

รหัสโครงการ SUT7-713-51-12-54



รายงานการวิจัย

การผลิตเครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่สำหรับกระบวนการหล่อ  
โลหะอะลูมิเนียมผสม  
(The Construction of a Mobile Degassing Unit-MDU for  
Aluminium Alloy Casting)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การผลิตเครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่สำหรับกระบวนการหล่อ  
โลหะอะลูมิเนียมผสม  
(The Construction of a Mobile Degassing Unit-MDU for  
Aluminium Alloy Casting)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร. ฐาปนีย์ อุดมผล

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2552

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุน  
เงินทุนวิจัยสำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการอำนวยความสะดวกเรื่องสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือ  
การวิจัย

ผู้วิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของศูนย์เครื่องมือ F6 และ F1 ที่ให้ความร่วมมือช่วยเหลือและ  
สนับสนุนตลอดระยะเวลาการทำวิจัยอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสร้างเครื่องมือและการ  
หล่อหลอมโลหะ สุดท้ายขอขอบคุณคณาจารย์ของสาขาวิชาฯ ในการแนะนำช่วยเหลือทางด้าน  
วิชาการ และนักศึกษาวิศวกรรมโลหการที่ให้ความร่วมมือในการศึกษาวิจัยทุกท่าน

ผู้วิจัย

31 กรกฎาคม 2552

## บทคัดย่อ

ไฮโดรเจนถือว่าเป็นอันตรายอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากทำให้เกิดรูพรุนตกค้างในชิ้นงานหล่อ การปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวก่อนการเทหล่อแบบขึ้นรูปขึ้นงานนั้นมีความจำเป็นและมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างเครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่โดยใช้หลักการทำให้เกิดฟองก๊าซอาร์กอนขนาดเล็กละเอียดจำนวนมาก กระจายอยู่ทั่วในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว เพื่อให้ไฮโดรเจนสามารถแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซอาร์กอนและลอยขึ้นสู่มิวหน้าเพื่อถูกกำจัดออกไป ทำให้น้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีปริมาณไฮโดรเจนลดลงและเป็นผลให้ปริมาณรูพรุนจากก๊าซลดลงตามลำดับ

กระบวนการทดลองประกอบไปด้วยการหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสม ในเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีความถี่ 1000 เฮิร์ตส และกำลัง 20-30 กิโลวัตต์ โดยทำการหลอมอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ปริมาณ 80% และเศษซากถึงอะลูมิเนียมจำนวน 20% ในน้ำหลอมเซรามิกปริมาณ 20 กิโลกรัม เพื่อเพิ่มการเจือปนของไฮโดรเจนและสิ่งสกปรกที่อาจเกิดขึ้นในสภาวะการหล่อจริง โดยในการทดลองมีการควบคุมตัวแปรดังนี้คือ 1) ความเร็วในการปั่นแท่งกราไฟต์ 2) อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 3) ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ โดยจากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเร็วรอบในการปั่นแท่งกราไฟต์จะทำให้ลักษณะฟองก๊าซอาร์กอนเล็กละเอียดขึ้นเป็นผลทำให้เกิดพื้นที่ในการแพร่ของไฮโดรเจนสูง การใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ไม่สูงจนเกินไปจะให้ฟองก๊าซที่เล็กละเอียด อีกทั้งไม่เกิดความปั่นป่วนของน้ำโลหะระหว่างกระบวนการกำจัดก๊าซ รวมทั้งการเพิ่มระยะเวลาในการกำจัดก๊าซจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน จากผลการทดลองพบว่าการกำจัดก๊าซที่ความเร็วในการปั่นแท่ง กราไฟต์ 1000 รอบ/นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 10 ลิตร/นาที และใช้เวลาในการกำจัดก๊าซ 20 นาทีจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซที่ดีที่สุด ดังผลการทดลองที่สอดคล้องกับการตรวจสอบปริมาณรูพรุน ความหนาแน่น ค่าความแข็งและสมบัติเชิงกล

การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซโดยเพิ่มกระบวนการฉีดฟลักซ์จากด้านบน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มกระบวนการทำความสะอาดน้ำโลหะในเวลาเดียวกันกับการกำจัดก๊าซ พบว่าชิ้นงานหล่อมีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ดีขึ้น นอกจากนี้ การใช้ฟลักซ์ชนิดเม็ดจะให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำโลหะที่ดีกว่า อีกทั้งไม่เป็นมลพิษต่อผู้ปฏิบัติงานและสภาพแวดล้อม

## Abstract

Hydrogen is considered as a major enemy for aluminium casting due to its effects on gas porosity left after the casting solidifies. The improvement of aluminium melt prior to casting is therefore necessary and has a great impact on mechanical properties of the castings. This research aimed to solve this inherent problem through the construction of a mobile degassing unit to produce large amount of fine argon bubbles uniformly distributed throughout the aluminium melt. Hydrogen can therefore diffuse into these fine bubbles, which are carried up to the melt surface, leaving less hydrogen content in the melt and reduced porosity in the castings.

Experimental procedure included melting of 80% aluminium 356 ingot and 20% aluminium chip in a 20 kg crucible using an induction furnace of 1000 Hz and 20-30 kwatt capacity. The aluminum chip addition aimed to simulate the contaminated environment of hydrogen in the industrial foundry. The controlling degassing factors are 1) rotational speed, 2) argon gas flow rate and 3) degassing time. It is found that increasing rotational speed produced finer argon bubbles aiding hydrogen diffusion more efficiently. Proper argon gas flow rate facilitated both fine argon gas bubbles and eliminate surface melt turbulence. Increasing degassing time also provided enhanced degassing efficiency. According to experimental results, degassing conditions using rotational speed of the graphite shaft at 1000 rpm, argon gas flow rate at 10/min and degassing time for 20 min provided the most effective results, which were in good agreement with property assessment for example, porosity, density, hardness and tensile properties.

Improvement of degassing efficiency by integrating a top-feeding flux injection unit aimed to include the cleaning effect of the aluminium melt along with the degassing technique. As a result, enhanced physical and mechanical properties were obtained. Furthermore, the usage of granular flux yielded the melt quality improvement with less emission and environment friendly in comparison to power flux usage.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
ขอบเขตของการวิจัย	7
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	7
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น</b>	
สมบัติทั่วไปและประเภทของอะลูมิเนียมหล่อ	9
โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 356	15
การปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาค	19
การปรับเกรนละเอียด	20
การกำจัดก๊าซไฮโดรเจน	21
การกำจัดสิ่งแปลกปลอมในน้ำโลหะอะลูมิเนียมโดยใช้ฟลักซ์	22
เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียม	26
<b>บทที่ 3 การผลิตเครื่องมือฉีดฟลักซ์และแม่พิมพ์โลหะ</b>	
การสร้างเครื่องมือฉีดฟลักซ์	27
การสร้างแม่พิมพ์โลหะระบบเทแบบดันบน	29
เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียม	26

#### บทที่ 4 การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว

การเตรียมวัตถุดิบ	53
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	54
การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้เครื่อง Mobile Degassing Unit	57
การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค	61
การตรวจสอบปริมาณรูพรุนทางกายภาพ	62
การตรวจสอบความหนาแน่นชิ้นงาน	62
การทดสอบความแข็ง	63
การตรวจสอบสมบัติแรงดึง	63

#### บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว

ส่วนที่ 1 ผลการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจน	
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสม	68
ผลและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	68
ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุน	79
ผลการตรวจสอบความหนาแน่น	85
ผลการทดสอบค่าความแข็ง	86
ผลการทดสอบสมบัติแรงดึง	92
ส่วนที่ 2 ผลการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์	
ผลและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	95
ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุน	101
ผลการตรวจสอบความหนาแน่น	103
ผลการทดสอบค่าความแข็ง	104
ผลการทดสอบสมบัติแรงดึง	105
ผลการวิเคราะห์พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึง	109
วิเคราะห์ผลการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจน	118

#### บทที่ 6 บทสรุป

สรุปผลการวิจัย	130
ข้อเสนอแนะ	131
บรรณานุกรม	132
ประวัติผู้วิจัย	133

## สารบัญญัตราสาร

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการหล่อ (โดยน้ำหนัก)	53
ตารางที่ 4.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะ อะลูมิเนียมหลอมเหลว	58
ตารางที่ 4.3 Density of water at various temperatures (14-35°C)	63
ตารางที่ 4.4: สภาวะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์	66
ตารางที่ 5.1 แสดงปริมาณธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ 7 สภาวะการทดลอง	69
ตารางที่ 5.2 ค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ในชิ้นงานหล่อ M1-M7	86
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการหล่อที่ตำแหน่งบน (Top)	89
ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการหล่อที่ตำแหน่งกลาง (Middle)	89
ตารางที่ 5.5 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการหล่อที่ตำแหน่งล่าง (Bottom)	89
ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการหล่อโดยเฉลี่ย ที่ตำแหน่งบน กลางและล่าง	90
ตารางที่ 5.7 แสดงค่าเฉลี่ยสมบัติแรงดึงของชิ้นงานภายหลังการหล่อ	93
ตารางที่ 5.8 แสดงสภาวะการทดลองการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU	94
ตารางที่ 5.9 แสดงปริมาณธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมภาย หลังการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนผสมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU	95
ตารางที่ 5.10 ค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ในชิ้นงานหล่อ MDFT01- MDFT05	103
ตารางที่ 5.11 แสดงค่าความแข็งที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ในชิ้นงานหล่อ MDFT01- MDFT05	104
ตารางที่ 5.12 แสดงสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการ กำจัดก๊าซพร้อมการฉีด ฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU	106
ตารางที่ 5.13 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุจากสเปกตรัมที่ 1, 2 และ 3 จากพื้นผิวการแตกหัก ของชิ้นงานหล่อ MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง	114
ตารางที่ 5.14 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุจากสเปกตรัมที่ 1 และ 2 จากพื้นผิว การแตกหักของชิ้นงานหล่อ MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง	117
ตารางที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจน (ml H <sub>2</sub> / 100 gm Al) ที่คำนวณได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ ด้านบนกับสมบัติของชิ้นงานหล่อ	116



สารบัญภาพ

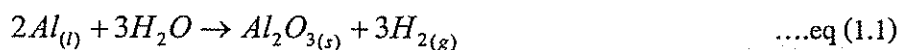
	หน้า
รูปที่ 5.1 โครงสร้างจุลภาค 80% Al 356 ingot Non degassing (M1) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน	71
รูปที่ 5.2 โครงสร้างจุลภาค 80% Al 356 ingot + 20% Al chip (M2) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน	72
รูปที่ 5.3 โครงสร้างจุลภาค 80% Al 356 ingot + 20% Al chip (M3) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน	73
รูปที่ 5.4 โครงสร้างจุลภาค 80% Al 356 ingot + 20% Al chip (M4) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน	74
รูปที่ 5.5 โครงสร้างจุลภาค 80% Al 356 ingot + 20% Al chip (M5) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน	75
รูปที่ 5.6 โครงสร้างจุลภาค 80% Al 356 ingot + 20% Al chip (M6) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน	76
รูปที่ 5.7 โครงสร้างจุลภาค 80% Al 356 ingot + 20% Al chip (M7) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน	77
รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบความละเอียดของเกรนที่ตำแหน่ง บน กลาง และล่าง จากชิ้นงาน M2 (Al 356 ingot 80% + Al scrap 20%, Non-Degassing) ที่กำลังขยาย 10X	78
รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน 100% Al 356 Ingot (M1)	82
รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน 80% Al 356 Ingot +20% Al chip (M2)	82
รูปที่ 5.11 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน 80% Al 356 Ingot +20% Al chip (M3)	83
รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน 80% Al 356 Ingot +20% Al chip (M4)	83
รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน 80% Al 356 Ingot +20% Al chip (M5)	84
รูปที่ 5.14 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน 80% Al 356 Ingot +20% Al chip (M6)	84
รูปที่ 5.15 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน 80% Al 356 Ingot +20% Al chip (M7)	85
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่อ	86
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ตำแหน่งบน	90
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ตำแหน่งกลาง	91
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ตำแหน่งล่าง	91
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ตำแหน่ง บน กลาง และล่าง	92
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม	93

รูปที่ 5.22	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมก่อนการกำจัดก๊าซและ นิตฟลักซ์ (MDFT01) ที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน	96
รูปที่ 5.23	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมหลังการกำจัดก๊าซและ นิตฟลักซ์ (MDFT02) ที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน	97
รูปที่ 5.24	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมหลังการกำจัดก๊าซและนิตฟลักซ์ (MDFT03) ที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน	98
รูปที่ 5.25	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมหลังการกำจัดก๊าซพร้อมการ นิตฟลักซ์ (MDFT04) ที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน	99
รูปที่ 5.26	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมหลังการกำจัดก๊าซพร้อมการนิตฟลักซ์ (MDFT05) ที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน	100
รูปที่ 5.27	ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT01 80% Al 356 ingot + 20% Al scrap (Nondegassing) เย็นตัวในสุญญากาศที่ 650 mmHg	101
รูปที่ 5.28	ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน MDFT02 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศที่ 650 mmHg	102
รูปที่ 5.29	ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน MDFT03 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศที่ 650 mmHg	102
รูปที่ 5.30	ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน MDFT05 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศที่ 650 mmHg	102
รูปที่ 5.31	ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน MDFT04 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศที่ 650 mmHg	103
รูปที่ 5.32	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่อ	104
รูปที่ 5.33	กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่อ	105
รูปที่ 5.34 (a)	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงแรงดึง (Tensile strength) ของชิ้นงานหล่อ อะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการนิตฟลักซ์ด้านบน	106
รูปที่ 5.34 (b)	กราฟแสดงค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength at 0.2% strain) ของ ชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการนิตฟลักซ์ด้านบน	107
รูปที่ 5.34 (c)	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Tensile elongation) ของชิ้นงานหล่อ อะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการนิตฟลักซ์ด้านบน	107
รูปที่ 5.35	กราฟความสัมพันธ์แสดงสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่าน การกำจัดก๊าซพร้อมการนิตฟลักซ์ด้านบน	108

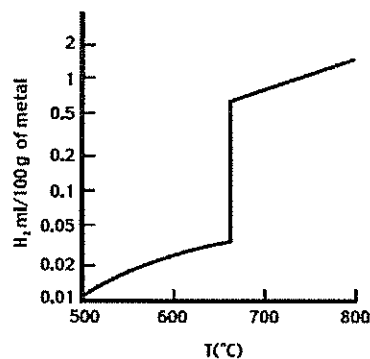
รูปที่ 5.36	กราฟความสัมพันธ์ Engineering stress-strain ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม ที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน	108
รูปที่ 5.37	แสดงค่าความแข็งแรงแรงดึงเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่อง MDU (M1-M7) และการ กำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU (MDFT01-05)	109
รูปที่ 5.38	แสดงพื้นผิวการแตกหักเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่าน กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่อง MDU และการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน พร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU	110
รูปที่ 5.39	พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบ แรงดึง a) จุดที่ทำให้เกิดการแตกหักจากกล้องสเตอริโอ, b)-d) จาก SEM	111
รูปที่ 5.40	พื้นผิวใกล้จุดกำเนิดของการแตกหักแสดงบริเวณที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ และโพรงหดตัวระหว่างการแข็งตัวที่ต่อเนื่องกันกินบริเวณกว้าง ในชิ้นงาน MDFT01	112
รูปที่ 5.41	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ใน SEM บนพื้นผิวการแตกหักชิ้นงาน MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง	113
รูปที่ 5.42	พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบ แรงดึง a) จุดที่ทำให้เกิดการแตกหักจากกล้องสเตอริโอ, b)-d) จาก SEM	115
รูปที่ 5.43	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ใน SEM บนพื้นผิวการแตกหักชิ้นงาน MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง	116
รูปที่ 5.44	พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT04 ที่ผ่านการทดสอบ แรงดึงพื้นผิวการแตกหักจากกล้องสเตอริโอ, b)-c) จาก SEM	118
รูปที่ 5.45	ผลการตรวจสอบสารประกอบในฟลักซ์ชนิดเม็ดและชนิดผงด้วย XRD	123
รูปที่ 5.46	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจน (ml H <sub>2</sub> / 100 gm Al) ที่ คำนวณได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน กับสมบัติของชิ้นงานหล่อ	129
รูปที่ 5.47	ผลการเปรียบเทียบ Quality Index ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมเมื่อผ่าน การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์สภาวะในสภาวะที่ต่างกัน	128

ปัญหาเรื่องรูพรุนเนื่องมาจากก๊าซไฮโดรเจนนั้น มีความสำคัญในกระบวนการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากหาวิธีการไล่ก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ หรือปล่อยให้ระยะเวลาหลังจากการไล่ก๊าซไฮโดรเจนจนถึงการเทน้ำโลหะนานเกินไปก็จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหารูพรุนอีก ทำให้คุณสมบัติเชิงกลลดลงอย่างมาก ในทางอุตสาหกรรมหากเกิดปัญหารูพรุนขึ้น ชิ้นงานนั้นจะถูกนำกลับมาหลอมใหม่ซึ่งทำให้เป็นการสิ้นเปลืองและเสียเวลาในการผลิต

แหล่งที่มาของก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการผลิตนั้นมาจากความชื้นหรือการระเหยของน้ำ ในบรรยากาศที่เข้าสัมผัสกับน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว การระเหยของน้ำมาจากน้ำมันจากหัวเผาของเตาน้ำมัน จากความชื้นของวัสดุช่วยหลอมประเภทเกลือ Salt flux จากวัสดุทนไฟที่ฉาบเข้าหลอมหรือเบ้ารับจากความเปราะเปื้อนของน้ำมันที่เศษโลหะบรรจุและจากอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้กับการทำงานหลอม ความชื้นหรือไอน้ำตามแหล่งต่างๆนี้จะแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนดังสมการ [2]



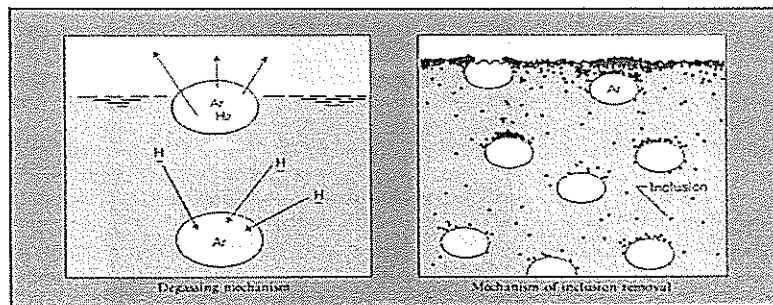
ไฮโดรเจนจะสามารถละลายในน้ำโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ได้ดีมากในสภาพหลอมเหลว (Hydrogen pickup) แต่เมื่อโลหะอะลูมิเนียมเย็นตัวลงและแข็งตัวปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ละลายได้จะลดลงอย่างฉับพลันดังแสดงในรูปที่ 1.1 [2] มีผลทำให้อะตอมของไฮโดรเจนที่ถูกขับออกมาในสภาพฟองก๊าซเล็กแยกตัวลอยขึ้น และหากฟองก๊าซไฮโดรเจนแยกตัวลอยออกจากผิวโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวไม่ทันเนื่องจากอะลูมิเนียมแข็งตัวเสียก่อน ก็จะตกค้างอยู่ภายในตัวเนื้ออะลูมิเนียม ในลักษณะเป็นฟองเล็กๆ กระจัดกระจายอยู่ทั่วไป ทำให้คุณภาพของงานหล่อที่ได้ต่ำและทำให้คุณสมบัติเชิงกลลดลงอย่างมากไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน



รูปที่ 1.1 แสดงปริมาณการละลายตัวของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน [2]

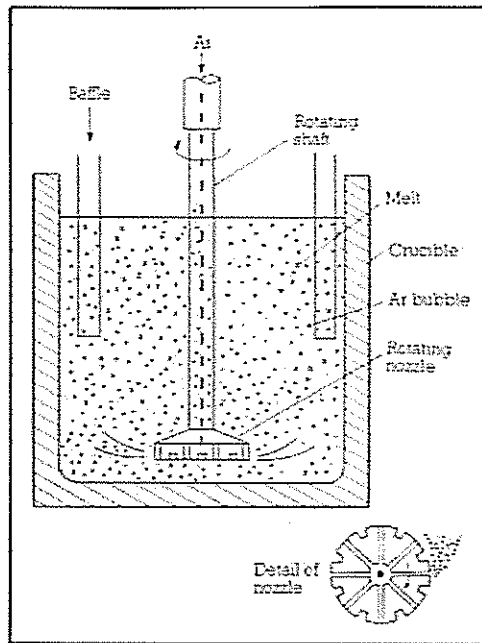
วิธีการลดการเกิด Hydrogen Pickup ออกไซด์ (dross) ที่ลอยปิดผิวหน้าของน้ำโลหะมีหลายวิธี ซึ่งอาจจะใช้ Degassing flux ที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) หรือ  $\text{AlCl}_3$ , NaF, KF,  $\text{AlF}_3$  หรืออาจใช้  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{NaAlCl}_4$ ,  $\text{KAlCl}_4$ ,  $\text{K}_3\text{AlF}_6$  เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนสามารถหนีขึ้นมาที่ผิวได้ [2] นอกจากนี้การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนสามารถใช้วิธีการ Ultrasonic และวิธีการสุญญากาศ (Vacuum) แต่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและอาจไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรมที่มีต้นทุนไม่สูงพอ

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนอีกวิธีที่ได้ผลดีและมีประสิทธิภาพสูงนั้น สามารถใช้ฟองก๊าซเฉื่อยอาร์กอน (Ar) หรือไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) กระจายตัวอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อให้ไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำโลหะสามารถแพร่เข้ามาอยู่ในฟองก๊าซ Ar หรือ  $\text{N}_2$  จากนั้นฟองก๊าซ Ar หรือ  $\text{N}_2$  จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำโลหะหลอมเหลวดังแสดงในรูปที่ 1.2 [3-4] เพื่อให้เกิดคุณภาพของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมที่ดีปริมาณของไฮโดรเจนควรควบคุมให้อยู่ในช่วง 0.2-0.3  $\text{ml.H}_2/100\text{g}$  ของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว โดยค่าสูงสุดของ Hydrogen Concentration ที่ละลายอยู่ได้ควรมีค่าไม่เกิน 0.6  $\text{ml.H}_2/100\text{g}$  ของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว ดังนั้นการทำ Degassing ในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวต้องใช้ความระมัดระวังให้มาก

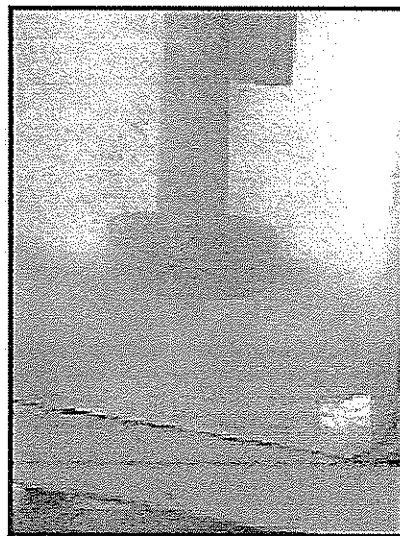


รูปที่ 1.2 แสดงการกระจายตัวของฟองก๊าซ Ar นำพาก๊าซ  $\text{H}_2$  ออกจากน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว [3-4]

เครื่องมือที่ใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว ได้มีการพัฒนามากขึ้นจากการเป่าก๊าซ Ar ผ่านท่อลงไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Lance degassing) มาเป็นการใช้ท่อแบบจานหมุน (Rotary nozzle) ดังรูปที่ 1.3 และ 1.4 เพื่อให้เกิดฟองก๊าซเฉื่อยที่ส่งผ่านท่อก๊าซออกมาสามารถกระจายก๊าซไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ทั่วถึง



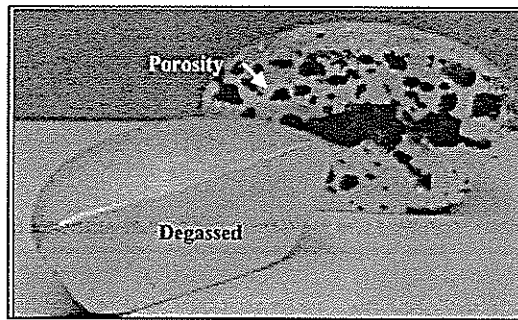
รูปที่ 1.3 ภาพจำลองแสดงการหมุนกระจายตัวของก๊าซ Ar [3-4]



รูปที่ 1.4 ภาพจำลองแสดงการทำงานของ Rotary nozzle [3-4]

ปัญหาที่พบบ่อยเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมนี้ ก่อให้เกิดอุปสรรคอย่างมากในการวิจัยและพัฒนาการหล่อชิ้นงานโลหะอะลูมิเนียมผสม เนื่องจาก การวิจัยและพัฒนาทางด้านการหล่ออะลูมิเนียม หรือการทดลองปรับปรุงส่วนผสมทางเคมีและการปรับปรุงโครงสร้าง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติหลังการหล่อไม่สามารถกระทำได้ หากการเตรียมชิ้นงานนั้นไม่สามารถกำจัดหรือควบคุมปริมาณของรูพรุนที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนได้ ส่งผลให้เกิดข้อตำหนิ (Defect) หลังการหล่อ

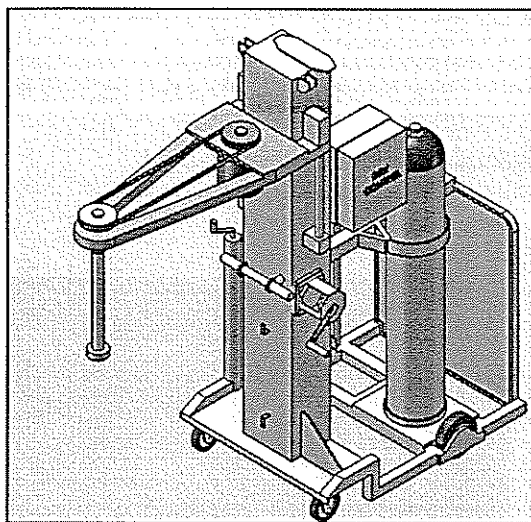
ชิ้นงานทำให้คุณสมบัติเชิงกลลดลงตามลำดับ ทำให้ไม่สามารถได้รับผลการทดลองที่แท้จริง เนื่องจากรูพรุนดังกล่าว ซึ่งแสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 1.5 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ชิ้นงานที่ผ่านการ Degassing จะไม่มีปริมาณรูพรุนหลงเหลืออยู่เลยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการ Degassing ซึ่งสามารถเห็นรูพรุนจำนวนมากปรากฏอยู่ภายในชิ้นงาน



รูปที่ 1.5 การเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการ Degassing และไม่ผ่านการ Degassing [3-4]

โครงการที่นำเสนอเป็นการจัดทำเครื่อง **Mobile Degassing Unit (MDU)** ซึ่งถูกพัฒนาจากเครื่องต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 1.6 เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในระหว่างการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม เครื่อง MDU ถูกออกแบบให้เกิดการกระจายตัวของก๊าซ ( $Ar$ ,  $N_2$ ) ผ่านจานหมุนกระจายก๊าซเพื่อติดอยู่ที่ปลายท่อที่ทำด้วยแกรไฟต์ โดยจานหมุนนี้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ด้วยมอเตอร์ เพื่อที่จะควบคุมการกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนขนาดเล็กในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว เพื่อเป็นตัวนำพาเอาก๊าซไฮโดรเจนและ สิ่งเจือปนอื่นๆ ออกไปจากผิวหน้าของน้ำโลหะ โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความดันทำให้ไฮโดรเจนแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซของอาร์กอนดังรูปที่ 1.2 และ 1.3

การจัดทำเครื่อง MDU นี้ยังสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก เพื่อให้สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนได้ในสถานะทั้งที่อยู่ในเบ้าพักหลังการหลอมหรืออยู่ในเบ้าหลอม (Crucible) ที่พร้อมที่จะทำการหล่อ ทำให้เกิดความพร้อมในการไล่ก๊าซไฮโดรเจนได้ทันทีก่อนเวลาที่จะทำการเทน้ำอะลูมิเนียมเหลวลงแม่พิมพ์ และเพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซไฮโดรเจนกลับไปละลายลงในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ทันก่อนการเทน้ำโลหะ เพราะหากทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนแล้วปล่อยให้ก๊าซไฮโดรเจนจะสามารถละลายลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้อีก และทำให้เกิดปัญหาการรูพรุนได้แม้ว่าจะทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไปแล้ว



รูปที่ 1.6 ภาพจำลองต้นแบบของเครื่อง Mobile Degassing Unit (MDU)

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อจัดสร้างเครื่องมือในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่สำหรับใช้ในขั้นตอนการหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสมได้สะดวกกับสภาพของเตาหลอมเดิมที่มีอยู่ และเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้กับชิ้นงานหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสม
- 2.2 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรที่สำคัญในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน เช่น ความเร็วรอบในการปั่นแท่งแกรไฟต์ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน และ เวลาในการกำจัดก๊าซ ต่อคุณภาพของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม ซึ่งเชื่อมโยงกับสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของชิ้นงาน
- 2.3 เพื่อสามารถใช้เครื่องมือสำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการหล่อโลหะ (431309) และเพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาโลหะอะลูมิเนียมผสมที่เกี่ยวข้องในสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการสำหรับกระบวนการหล่อขึ้นรูปโลหะ

## 3. ขอบเขตของงานวิจัย

สร้างเครื่องกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเพื่อใช้ในกระบวนการหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสม โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือจากตัวแปรดังต่อไปนี้

- 1) ความเร็วรอบของจานหมุน (100-1000 รอบ/นาที)
- 2) อัตราการไหลของก๊าซเฉื่อยอาร์กอน (5-20 ลิตร/นาที)
- 3) เวลาที่ใช้ในการกำจัดก๊าซ (5-20 นาที)



#### 4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 4.1 เครื่อง MDU สามารถใช้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากการใช้หัวกระจายก๊าซ (Nozzle) ที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของก๊าซอาร์กอนได้สม่ำเสมอมากขึ้นและสามารถปรับอัตราการหมุนและการไหลของก๊าซอาร์กอน เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของเบ้าหลอมและปริมาณน้ำโลหะหลอมเหลว อีกทั้งยังสามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้สะดวกโดยใช้ล้อเมื่อต้องการใช้งานทันทีก่อนการหล่อโลหะ และสามารถยึดให้อยู่กับที่ในขณะที่ทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนทำให้เกิดความปลอดภัยในระหว่างการใช้งาน ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนดีขึ้น และเนื่องจากสามารถปรับระยะความสูงของจานหมุนได้จึงสามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนก่อนการเทแบบได้กับเตาหลอมที่มีอยู่ในสถานปฏิบัติการ F6 ได้ทั้งเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction furnace) และเตาน้ำมัน
- 4.2 ทราบตัวแปรที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการกำจัดก๊าซให้มีประสิทธิภาพ
- 4.3 ลดระยะเวลาในช่วงการเหนี่ยวนำโลหะทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศได้น้อยลงลดการเกิด Dross ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำโลหะอะลูมิเนียมน้อยลง ทำให้การปรับปรุงโครงสร้างมีประสิทธิภาพมากขึ้น
- 4.4 เครื่อง MDU นี้สามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต Foundry Engineering Laboratory (431310) เพื่อให้นักศึกษาสามารถศึกษาและเรียนรู้กระบวนการจริงที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสมในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ซึ่งมีการขยายกำลังการผลิตในประเทศให้มากขึ้นในปัจจุบัน อีกทั้งยังสามารถใช้ในโครงการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสมในสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการอีกด้วย
- 4.5 เครื่อง MDU นี้สามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อปรับใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียมขนาดกลาง-เล็ก ที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะเพื่อลดปัญหาารุพุนอันเกิดจากก๊าซไฮโดรเจน เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตเครื่องมือที่ไม่สูงมาก

## บทที่ 2

### ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมและกระบวนการหล่อ

#### 2.1 บทนำ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการเกิดการผุกร่อน มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้อย่างกว้างขวางแทนเหล็กและทองแดงในหลายๆด้าน อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางด้านการหล่อที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำจึงสามารถหล่อหลอมได้ง่าย นอกจากนี้อะลูมิเนียมยังสามารถรวมตัวกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะผสมได้ง่าย และมีความสามารถในการไหลอยู่ในเกณฑ์สูง อย่างไรก็ตาม อะลูมิเนียมมีข้อจำกัด คือ มีขอบเขตการยืดหยุ่น (Elastic limit) ต่ำ และมีความแข็งแรงอยู่ในระดับปานกลาง ทำให้การใช้งานถูกจำกัดหากต้องการใช้งานทางโครงสร้างที่ต้องรับแรงมาก เป็นต้น

เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะที่นิยมนำมาใช้ในงานทางวิศวกรรม และในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น เหล็กกล้า เหล็กหล่อ เหล็กเครื่องมือ เป็นต้น อะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบามากกว่าครึ่งหนึ่งของเหล็กและยังมีความต้านทานต่อการเป็นสนิมที่ดีเยี่ยม จึงทำให้อะลูมิเนียมเข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งมีการแข่งขันกันมากขึ้นเพื่อสนองความต้องการของผู้บริโภค ที่ต้องการยานพาหนะที่มีน้ำหนักเบาขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและประหยัดเชื้อเพลิง แต่ยังคงมีความแข็งแรงที่ดีพอในการใช้งานนั้นๆ เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมผสมสามารถผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่าการชุบแข็งตกตะกอน (Precipitation hardening) ซึ่งจะทำให้มีค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นมาก นอกจากนี้แล้ว ในสภาวะปกติอะลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่ายทำให้เกิดฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ที่มีความหนาแน่นและมีความเสถียรสูง ซึ่งจัดว่าเป็น Passive film นั่นคืออะลูมิเนียมเกิดความต้านทานต่อการเป็นสนิมได้ด้วยตัวเอง อีกทั้งอะลูมิเนียมยังมีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติที่ยืดตัวได้ง่าย (High ductility) จึงสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ด้วยการรีดเป็นแผ่นหรืออัดขึ้นรูปได้สะดวก และมีคุณสมบัติทางด้านการหล่อหลอมที่ดี เช่น มีการไหลตัวที่ดี (High fluidity) และมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ( $660^{\circ}C$ ) ด้วยเหตุนี้ อะลูมิเนียมจึงถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ [5]

#### 2.2 ประเภทของโลหะอะลูมิเนียม

โลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมสามารถแยกออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ อะลูมิเนียมที่ผลิตจากงานขึ้นรูปทางกล (Wrought aluminium alloy) และอะลูมิเนียมที่ผลิตจากงานหล่อ (Cast

aluminium alloys) ซึ่งในแต่ละประเภทมีการเรียกชื่อและส่วนผสมทางเคมีและการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.2.1 อะลูมิเนียมงานขึ้นรูปทางกล (Wrought aluminium alloys)

สำหรับอะลูมิเนียมงานขึ้นรูปทางกลนั้นสามารถจัดประเภทตามมาตรฐาน International Aluminium Designation System: IADS ได้เป็น 8 ประเภทด้วยกัน

ตารางที่ 2 แสดงประเภทของโลหะอะลูมิเนียมเกรดงานขึ้นรูปทางกล

Wrought Aluminium Alloy	Major Alloying Element
1xxx	Aluminium of 99.0% minimum purity
2xxx	Copper
3xxx	Manganese
4xxx	Silicon
5xxx	Magnesium
6xxx	Silicon, Magnesium
7xxx	Zinc, Magnesium
8xxx	Other elements, i.e., Lithium

การเรียกชื่อจะใช้เลขทั้งหมด 4 หลัก หลักที่หนึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุดในการแสดงกลุ่มของโลหะผสมซึ่งมีอยู่ 8 กลุ่ม ตามตารางเช่น กลุ่ม 1XXX แทนโลหะที่มีอะลูมิเนียมไม่น้อยกว่า 99.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นต้น เลขหลักที่สองใช้สำหรับกำกับเมื่อมีการดัดแปลงส่วนผสมของโลหะให้ผิดไปจากโลหะผสมดั้งเดิม ตัวเลข 0 แสดงว่าเป็นโลหะผสมดั้งเดิม ตัวเลข 1-9 แสดงว่าเป็นส่วนที่ได้จากการดัดแปลงให้ผิดไปจากเดิม เช่น 2024 (4.5 Cu, 1.5Mg, 0.5Si, 0.1 Cr) เทียบกับ 2218 (4.0 Cu, 2.0 Ni, 1.5 Mg, 0.2 Si) ซึ่งสังเกตได้ว่าโลหะ 2218 มีนิกเกิลผสมเพิ่มเติมเข้าไป สำหรับกลุ่มที่มีการใช้งานมากที่สุดคือ 6xxx เช่น 6061 และ 6063 นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานหล่อได้โดยการนำไปผ่านกระบวนการชุบแข็งตกตะกอน เพื่อให้เกิดความแข็งแรงจากการตกตะกอน (Precipitate) ของเฟสที่สองที่เล็กละเอียด

### 2.2.2 อะลูมิเนียมงานหล่อ (Cast aluminium alloys)

การตั้งชื่องานหล่อของอะลูมิเนียมผสมยังไม่มีความมาตรฐานที่ถือเป็นสากลนิยม ในสหรัฐอเมริกาเป็นที่ยอมรับกันอยู่ 2 มาตรฐาน คือ มาตรฐานของ ASTM เช่น ASTM B 26, B 85 และ B 108 และมาตรฐานของบริษัทอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา ซึ่งเป็นบริษัทที่ผลิตอะลูมิเนียมที่ใหญ่ที่สุดในอเมริกา มาตรฐานดังกล่าวจึงมีอิทธิพลในวงการค้ามากและเป็นที่ยอมรับใช้

มากกว่ามาตรฐานแรก ระบบการตั้งชื่ออะลูมิเนียมหล่อตามมาตรฐานของบริษัทอะลูมิเนียมแห่งอเมริกันใช้ตัวเลข 2 หลัก หรือ 3 หลักแทนชื่อโลหะ

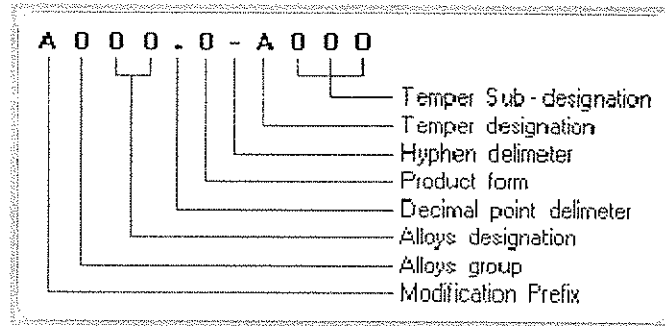
ตัวเลข 2 หลักใช้แทน โลหะอะลูมิเนียมผสมที่มีซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลัก สำหรับตัวเลข 3 หลักนั้นตัวเลขหลักแรกใช้แทนกลุ่มโลหะผสมที่มีธาตุ ๆ หนึ่งเป็นธาตุผสมหลัก เช่น 1xx เป็นกลุ่มโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น สัญลักษณ์ที่ใช้แทนธาตุผสมหลักตัวอื่น ๆ ดูได้จากตาราง

ตารางที่ 2 แสดงประเภทของโลหะอะลูมิเนียมเกรดงานหล่อ

Cast Aluminium Alloy	Major Alloying Element
1xx.x	Aluminium 99.00% or higher
2xx.x	Copper
3xx.x	Silicon with additions of Copper/Magnesium
4xx.x	Silicon
5xx.x	Magnesium
6xx.x	Unused series
7xx.x	Zinc
8xx.x	Tin
9xx.x	Other elements

การเรียกชื่อจะใช้ตัวเลข 3 หลักใช้แทน โลหะอะลูมิเนียมผสม เช่น 2xx.0 เป็นกลุ่มโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วโลหะอะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม 3xx.x และ 4xx.x นั้นจะให้ความสามารถในการหล่อที่ดี เกรดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ A356 เป็นต้น การเรียกชื่อบางชนิดอาจมีตัวอักษรภาษาอังกฤษนำหน้าตัวเลข เช่น A, B, C, D..... ทั้งนี้เพื่อแสดงว่ามีการดัดแปลงส่วนผสมของโลหะให้ผิดไปจากเดิม เพื่อให้เหมาะกับเงื่อนไขต่าง ๆ

นอกจากนี้ ยังได้มีการกำหนดการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมหล่อผสม โดย American Aluminum Association Casting Alloys ได้กำหนดมาตรฐานและแยกประเภทอะลูมิเนียมหล่อผสม โดยได้จดทะเบียนไว้กับ สำนักงานมาตรฐานแห่งชาติของอเมริกา (American National Standard Institute) หรือ ANSI Standard แต่ยังคงแบ่งกลุ่มได้ 9 กลุ่ม เหมือนกับ ASM (America Society of Metals) ซึ่งการกำหนดอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม ANSI Standard ได้ ดังนี้



- A:** อักษรตัวแรก หมายถึง สมาชิกของ Alloys ที่เหมือนกันอยู่ในกลุ่มเดียวกัน (หมายถึง Aluminum Alloy) แม้ว่าส่วนผสม จะแตกต่างกัน
- O:** Alloy group จะเป็นตัวเลขตัวเดียวจาก 1 ถึง 9 ใช้เป็นตัวกำหนด ชาติหลักของ Alloys หรือ Major Alloying
- O O:** Alloys designation เป็นตัวเลข 2 หลัก กำหนดความแตกต่าง ของสมาชิกในกลุ่ม Alloys เดียวกัน ความหมายของตัวเลข ที่กำหนดเหมือนกับ Major Alloy ในบางครั้ง ตัวเลข 2 หลัก คือ ปริมาณ % ไม่น้อยกว่าของ AI ที่มีผสมอยู่ เช่น 190.x เท่ากับ AI ผสมอยู่ 99.90%
- .O:** ตัวเลขหลังจุดทศนิยม หมายถึง รูปแบบการผลิต หรือ Product form เป็นตัวเลขหลักเดียว คือ
- .0:** เป็น Casting Specification
  - .1:** เป็น Ingot Specification
  - .2:** เป็น Ingot Specification ที่ควบคุมส่วนผสมน้อยกว่า .1 Ingot Specification
- A:** Temper designation เป็นตัวกำหนดแทนกรรมวิธี Temper ของกระบวนการ Heat Treatment ที่ใช้กับ Heat Treatable Alloys ดังนี้
- F:** As Cast Condition หมายถึง งานจากสภาพหล่อ โดยไม่ต้องใช้ กรรมวิธีใดๆ ควบคุม ภายหลัง การหล่อขึ้นรูป
- H:** Strain Hardened หมายถึง สภาพของงานแข็งตัวเอง เนื่องจาก ความเครียด จากการทำ Cold working เช่น งานรีดขึ้นรูปต่างๆ
- O:** Anneal หมายถึง การอบอ่อน ใช้กับงานหล่อ ที่ต้องนำไปอบ เพื่อปรับปรุงขนาด รูปร่าง ให้คงที่ (Stability) ขณะใช้งาน หรือ เพื่อให้ทำให้เพิ่ม ความเหนียว (Ductility)
- W:** Solution Heat Treat เป็นการอบเพื่อเปลี่ยน โครงสร้างให้เป็น สารละลายของแข็ง เฟส เดียว ใช้กับ Alloys ที่สามารถบ่มแข็งด้วยตัวเองได้ ในบรรยากาศปกติ (อุณหภูมิห้อง) ภายหลังจากการทำ Heat Treatment

**T:** เป็นการอบด้วยความร้อน โดยกำหนดกรรมวิธี Temper ที่แน่นอนดีกว่า F หรือ O การกำหนดกรรมวิธี "F", "O" และ "T" ทุกกระบวนการ สามารถหล่อด้วย แบบทราย และแบบเหล็ก

**OOO: Temper Sub-designation** เป็นตัวเลขระบุกรรมวิธีทำ Temper ที่ชัดเจนโดยระบุอุณหภูมิ และ ช่วงเวลาปฏิบัติ การที่แยกละเอียด ไปได้อีก 10 วิธีการ จาก T1 ถึง T10 และ ส่วนปลีกย่อยอีก ดังนี้

**T1:** ปลดปล่อยให้งานเย็นตัว ลงตามปกติ ในบรรยากาศปกติ และ บ่มแข็งด้วยตัวเอง (Naturally Aged) โดยธรรมชาติ และ สภาพงาน ไม่เปลี่ยนแปลง

**T2:** ปลดปล่อยให้งานเย็นตัวลงในบรรยากาศปกติความแข็งจะเกิดขึ้นจากการใช้งานที่อุณหภูมิปกติ (Cold working) โดยธรรมชาติ

**T3:** นำงานไปทำ Solution heat treatment แล้วปล่อยให้ งานเย็นตัวลง แล้วทำ Natural aging โดยทิ้งชิ้นงานไว้ในบรรยากาศจะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น

**T4:** ทำ Solution heat treatment และ Natural aging เพื่อให้ความแข็งคงตัว

**T42:** ทำ Solution heat treatment จาก "O" และ "F" Temper เพื่อปรับสภาพของ งานหล่อ ก่อนทำ Natural aging เพื่อให้ ความแข็งคงตัว

**T5:** ปลดปล่อยให้งานค่อยๆ เย็นตัวลง ในสภาพเดิม แล้วนำไปทำ Artificial aging (โดยนำงานที่ทำ Quenching แล้วกลับมา อบอีกครั้ง ในช่วงอุณหภูมิ ไม่เกิน 200°C เพื่อให้เกิด เฟสใหม่ที่ทำให้ ความแข็งแรง ได้ถึงจุดสูงสุด ภายในเวลา ไม่เกิน 10 ชม. เรียกว่า การทำบ่มเร่ง หรือ Artificial aging

\* Artificial aging ที่ 450°F - 8 hrs

**T51:** เป็นการทำให้ Stress relieving โดยการนำไปตัดตรง หลังจากการทำ Solution heat treatment หรือ หลังจาก การปล่อยให้เย็นตัว ลงตามปกติ

**T52:** เป็นการทำให้ Stress relieving โดยการนำไปกดอัดงานภายหลังจากการทำ Solution heat treatment หรือ หลังจากการปล่อยให้เย็นตัว ลงจากสภาพเดิม

**T54:** เป็นการทำให้ Stress relieving โดยการใช้แรงดึงและอัดงานภายหลังจากการรีดหรือขึ้นรูป

**T6:** เป็นการทำให้ Solution heat treatment, Quenching แล้วทำ Artificial aging

**T61:** เป็นการทำให้ Solution heat treatment, Quenching ก่อนทำ Artificial aging เพื่อให้ได้ความแข็งและความแข็งแรงสูงสุด

- T62:** เป็นการทำให้ Solution heat treatment จาก "O" และ "F" Temper จากนั้นนำไป Quenching ก่อนแล้วทำ Artificial Aging
- T7:** เป็นการทำให้ Solution heat treatment และ stabilized (การทำ Overaging เพื่อปรับปรุงขนาดให้คงที่แน่นอนแต่ไม่สูญเสียคุณสมบัติทาง Mechanical properties)  
\* หรือทำ Solution ที่ 980°F, Overaging ที่ 440°F - 3-5 hrs.
- T71:** เป็นการทำให้ Solution heat treatment และ Stabilizing คือ การยืดระยะเวลา และ อุณหภูมิ ทำ Overaging เพื่อลดความเครียด และ ปรับปรุงให้มี ขนาดคงที่แน่นอน แต่คุณสมบัติทาง Mechanical Properties จะลดลง
- T8:** คือ การทำให้ Solution heat treatment, Cold working และ นำมาทำ Artificial aging
- T9:** Solution heat treatment, Artificial aging และนำมาทำ Cold Working
- T10:** คือ ให้ชิ้นงานเย็นตัวตามปกติ นำไปทำ Cold working แล้วทำ Artificial Aging

### 2.3 โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 [1]

ในโครงการวิจัยนี้จะใช้อะลูมิเนียมงานหล่อเกรด 356 ซึ่งมีธาตุผสมหลัก 2 ชนิด คือ ซิลิกอน และแมกนีเซียม ซึ่งอะลูมิเนียมผสมส่วนใหญ่จะถูกพัฒนาขึ้นมาจากระบบ Al-Si ประมาณ 90 ของอะลูมิเนียมผสมในงานหล่อถึงแม้ว่าอะลูมิเนียมผสมนี้จะมีคุณสมบัติทางกลต่ำกว่าเกรดงานรีด แต่สามารถเพิ่มคุณสมบัติได้หลากหลายวิธี จะใช้ในการทดลอง ปรับปรุงคุณสมบัติ และการประยุกต์ใช้ก่อนอื่นจำเป็นต้องศึกษาลักษณะพื้นฐานของอะลูมิเนียมเกรด 356.0 ซึ่งเป็นดังนี้

#### อะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสมหมายเลข 356.0

ส่วนผสมทางเคมี : เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (มวล)

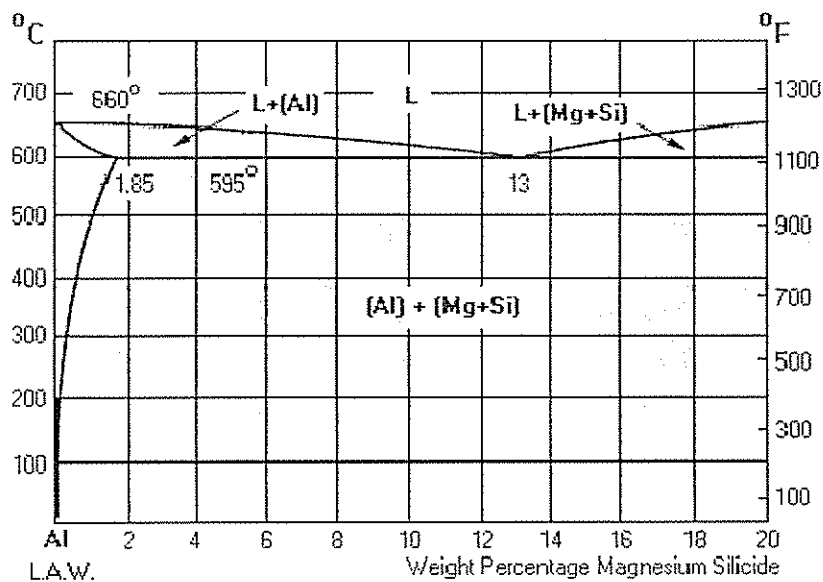
ซิลิกอน (Si) : 6.5-7.5	เหล็ก (Fe): 0.600 สูงสุด
ทองแดง (Cu): 0.250 สูงสุด	สังกะสี (Zn): 0.350 สูงสุด
ไทเทเนียม (Ti): 0.20 สูงสุด	แมกนีเซียม (Mg): 0.25-0.45
แมงกานีส (Mn): 0.350 สูงสุด	อื่นๆ: 0.05 สูงสุด

#### สมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิหลอมเหลว	615°C
อุณหภูมิแข็งตัว	555°C
สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 20 องศาเซลเซียส	21.5 $\mu\text{m/m.K}$

ความร้อนจำเพาะ	963 J/kg.K
สภาพการนำความร้อน T51 (Sand)	167 W/m.K
สภาพการนำความร้อน T6, T61 (Sand)	151 W/m.K
สภาพการนำความร้อน T7 (Sand)	155 W/m.K
สภาพการนำความร้อน T6, T61 (Permanent Mold)	159 W/m.K
ความหนาแน่น	2.685 g/cm <sup>3</sup>

### แผนภาพสมดุล (Phase diagram)



แผนภาพสมดุลสองธาตุอะลูมิเนียม - แมกนีเซียมซิลิไซด์  
(Aluminum - Magnesium - Silicide Phase Diagram)

[http://www.aluminiumlearning.com...x\\_x.html](http://www.aluminiumlearning.com...x_x.html)

### รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพสมดุล (Phase diagram) ของอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมซิลิไซด์

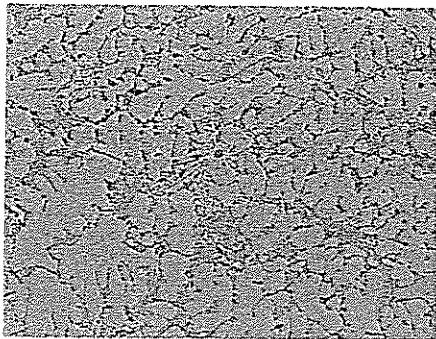
จากแผนภาพสมดุลของธาตุอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมซิลิไซด์ อะลูมิเนียมผสมนี้เกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่ 13% แมกนีเซียมซิลิไซด์ที่อุณหภูมิ 595°C ดังนั้นได้เส้นอุณหภูมิ 595°C หรือ อุณหภูมิยูเทคติก จะมีของแข็งสองชนิดคือ อะลูมิเนียม (Al) กับ แมกนีเซียมซิลิไซด์ ( $Mg_2Si$ ) และแมกนีเซียมซิลิไซด์นี้สามารถละลายได้ในอะลูมิเนียมสูงสุดที่ 1.85% ที่อุณหภูมิ 595°C สมบัติของ อะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียมหล่อผสมนี้เป็นอะลูมิเนียมหล่อผสมที่สามารถผ่านกระบวนการทางความร้อน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยผสมแมกนีเซียมเพื่อทำให้เกิดแมกนีเซียมซิลิไซด์ ( $Mg_2Si$ ) สามารถใช้กับงานหล่อได้ทั้งแบบทรายและแบบโลหะได้ดี สามารถนำมาถึง กัด ตัด เจาะ และเชื่อมประสานได้



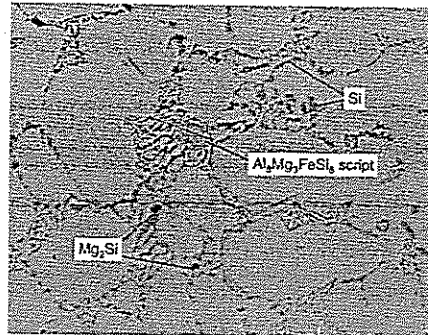
ง่าย เหมาะกับชิ้นงานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อน ประณีต และสามารถชุบผิวหรือ Anodizing ได้สีเทามัน สวยงาม

### ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างของอะลูมิเนียมเกรด 356.0 ขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกอนซึ่งประมาณ 7% จัดอยู่ในประเภทไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) คือ อยู่ในช่วง 1.65-11.6 %Si โครงสร้างทางจุลภาคจะประกอบด้วย Primary aluminum ในลักษณะของเดนไดรต์และยูเทคติกซิลิกอนที่มีลักษณะที่เป็นรูปเข็มเล็กๆแทรกสลับกันที่แยกตัวออกมาอยู่ระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic "divorced" eutectic Si) ในระหว่างกระบวนการแข็งตัว (Solidification process) โดยทั่วไป Al-Si ไฮโปยูเทคติกมีช่วงการแข็งตัวที่กว้างทำให้เกิดโพรงหดตัว (Shrinkage pores) กระจายตัวอยู่ทั่วไประหว่างเดนไดรต์



A) โครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 100x



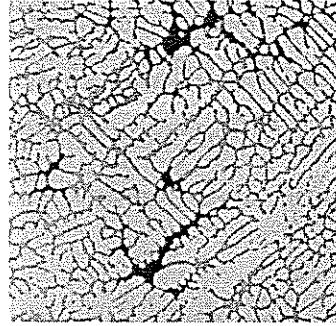
B) โครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 100x

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 356 [1]

ปัจจัยหลักซึ่งควบคุมสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติก คือ

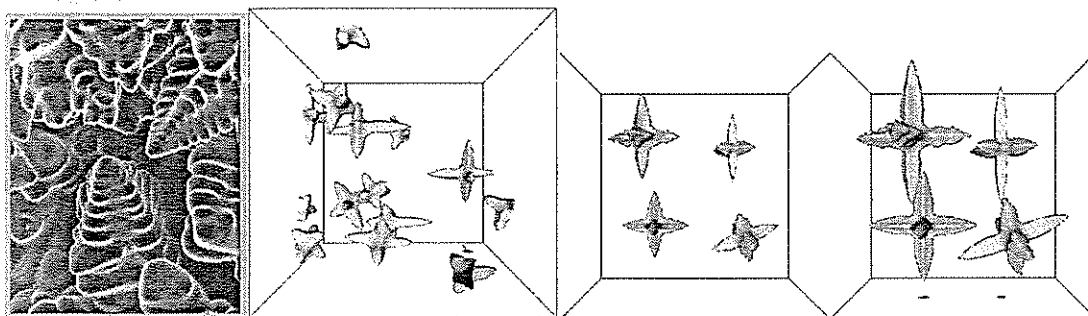
- ระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (SDAS , Secondary Dendrite Arms Spacing)
- ขนาดและรูปร่างของเกรน (Grain size and shape)

ระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์หรือ DAS มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมมากกว่าขนาดเกรน ซึ่งนอกจาก DAS จะเป็นตัวกำหนดความละเอียดของโครงสร้างทางจุลภาคแล้ว ยังเป็นตัวกำหนดการกระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งอยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ (Interdendritic intermetallic constituent) และการกระจายตัวของโพรงหดตัวระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic shrinkage) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อโครงสร้างมีขนาด DAS ที่เล็กจึงหมายถึงโครงสร้างมีความสม่ำเสมอมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงโพรงหดตัวระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic shrinkage)

ขนาดของ DAS ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวระหว่างการแข็งตัว ในบริเวณที่บางหรือในบริเวณที่มีคุณสมบัตินำความร้อนที่ดี หรืออาจเกิดจากการใช้หุ่นเย็น (Chill) และการเย็นตัวในแบบพิมพ์โลหะ (Permanent mold) จะให้อัตราการเย็นตัวสูง ซึ่งส่งผลทำให้ระยะเวลาในการแข็งตัวบริเวณเฉพาะที่ (Local solidification time) ลดลง ซึ่งเมื่อเกิดการแข็งตัวแบบเดนไดรต์ จะทำให้เกิดโตหรือหยาบขึ้น (Coarsening หรือ Ripening) ของแขนเดนไดรต์ด้านอันดับสอง (ทุติยภูมิ) ถูกจำกัด เมื่อมี Local solidification time ที่ลดลง ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างแขนของเดนไดรต์ทุติยภูมิ (SDAS หรือ Secondary Dendrite Arm Spacing) สั้นลง การที่ SDAS มีขนาดเล็กนั้น จะส่งผลให้ส่วนประกอบในเฟสยูเทคติกที่แยกตัวออกมา (เช่น Si,  $Mg_2Si$ ,  $CuAl_2$ ) ซึ่งแข็งตัวภายในช่องว่างระหว่างแขนเดนไดรต์มีลักษณะที่ละเอียดขึ้น โพรงหดตัวระหว่างเดนไดรต์มีขนาดเล็กกระจายตัวทั่วไป รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพการเกิดเดนไดรต์ระหว่างกระบวนการแข็งตัว ขนาดของ DAS มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสมไฮโดรเจนออกไซด์ DAS ที่ละเอียดจะทำให้โลหะผสมมีค่าการยืดตัว (Ductility) ที่สูงขึ้น และให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าความแกร่ง (Toughness) ดีขึ้น



<http://www.ndt-ed.org>

รูปที่ 2.4 ภาพแสดงโครงสร้างของเดนไดรต์ (DAS)

#### การนำไปใช้งาน (Application)

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะ อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติ ที่ดีหลายประการ คือ มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา และมี

ความแข็งแรงวัสดุต่อน้ำหนักสูง (Strength to weight ratio) จึงนิยมใช้ทำอุปกรณ์เครื่องมือ และ อุปกรณ์ในรถยนต์ ตลอดจนชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด เพื่อลดน้ำหนักของยานพาหนะให้น้อยลง ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง อะลูมิเนียมมีค่าการนำไฟฟ้าคิดเป็น 64.94 % IACS (International Annealed Copper Standard) ซึ่งไม่สูงนัก แต่เนื่องจากมีน้ำหนักเบาดังนั้นจึงใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในกรณีที่ต้องคำนึงถึงเรื่องน้ำหนักเป็นสำคัญ

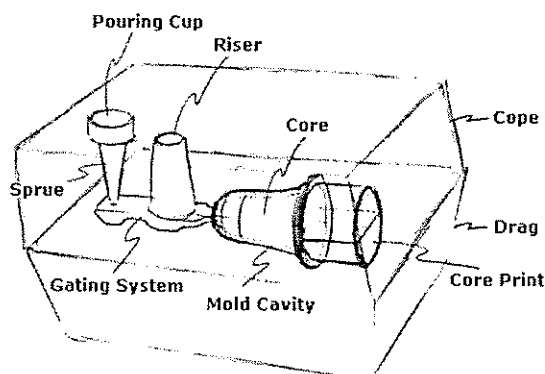
นอกจากนี้ อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย และมีค่าการนำความร้อนที่ดี สามารถใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหารและห่อรองรับอาหาร ผิวหน้าของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีดัชนีการสะท้อนแสงสูงมากจึงใช้ทำแผ่นสะท้อนในแฟลชถ่ายรูป งานสะท้อนแสงในโคมไฟ และไฟหน้ารถยนต์ อะลูมิเนียมทนทานต่อการผุกร่อนในบรรยากาศที่ใช้งานโดยทั่วไปได้ดีมาก แต่อะลูมิเนียมจะไม่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดแก่-ด่างและในน้ำทะเล อะลูมิเนียมสามารถใช้ในการตกแต่งทางสถาปัตยกรรม งานเฟอร์นิเจอร์ ตลอดจนใช้เป็นอุปกรณ์ตกแต่งบ้าน

#### 2.4 เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียม (Aluminium Casting Technology)

การหล่ออะลูมิเนียมในปัจจุบันได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีหลายกระบวนการที่แตกต่างกันไป แต่โดยหลักการพื้นฐานแล้ว คือ การทำให้โลหะหลอมเหลว แล้วนำเข้าสู่แบบแม่พิมพ์ ปล่อยให้เย็นตัว เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ต้องการ ในปัจจุบัน อะลูมิเนียมนิยมนำมาหล่อโดยใช้แบบโลหะที่ใช้ความดัน หรือที่เรียกว่า Pressure die-casting เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตสูง อย่างไรก็ตามก็ยังมีกระบวนการอื่นๆที่ใช้กันในอุตสาหกรรม ดังนี้คือ

##### 2.4.1 การหล่อด้วยแบบทราย (Sand Mold Casting)

งานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมส่วนใหญ่จะใช้ทรายแบบประเภทชื้น (Green sand) ซึ่งจะใช้ทั้งทรายแบบธรรมชาติและแบบสังเคราะห์ (Synthetic sand) บางกรณีอาจใช้ทรายแห้งสำหรับงานหล่อขนาดใหญ่



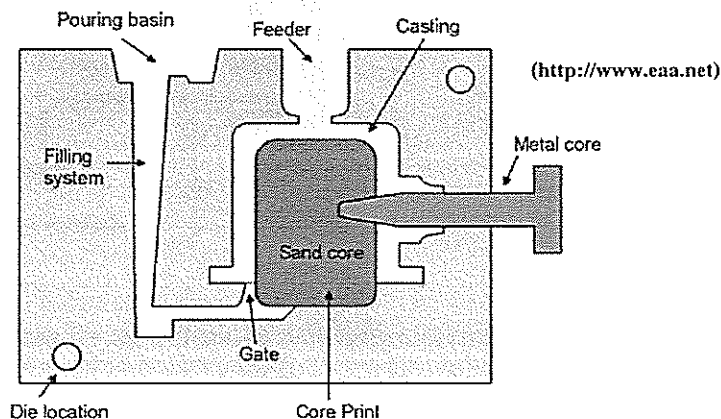
<http://www.efunda.com/processes/intro.cfm>

รูปที่ 2.3 แสดงส่วนต่างๆของแบบหล่อทราย

โลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อส่วนใหญ่จะมีช่วงการแข็งตัวยาวและมีอัตราการหดตัวสูง จึงต้องใช้ระบบทางวิ่งที่มีขนาดโตเพื่อทำหน้าที่จ่ายน้ำโลหะด้วยในตัว และทำหน้าที่แยก Inclusion หรือ Dross ก่อนที่จะผ่านไปยังทางเข้าโพรงแบบ ไรเซอร์ (Riser) จะต้องมีความโตเพียงพอที่จะจ่ายน้ำโลหะไปยังตำแหน่งที่จะเกิดการหดตัวสุดท้าย ซึ่งจะเป็นส่วนที่มีความหนามากที่สุดของงานหล่อ การกำหนดไรเซอร์ควรอาศัยหลักที่ว่ามอดูลัสการเย็นตัวของไรเซอร์ จะต้องมีความมากกว่ามอดูลัสการเย็นตัวของงานหล่อ ( $MR > MC$ ) ในทางปฏิบัติ  $MR = 1.1-1.2$  เท่าของ  $MC$  การใช้ผงให้ความร้อนหรือการใช้ปลอกไรเซอร์ (Exothermic sleeve) จะเป็นการช่วยให้ไรเซอร์ทำงานมีประสิทธิภาพและอาจจะลดขนาดของไรเซอร์ให้เล็กลงได้อีก

#### 2.4.2 การหล่อด้วยแบบหล่อโลหะ (Permanent mold)

ลักษณะการหล่อจะใช้แบบเทโลหะโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity pouring) โลหะที่ใช้เป็นแบบหล่อส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กหล่อ ซึ่งมีทั้งเหล็กหล่อสีเทาและเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งเป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติทางด้านต้านทานการแตกร้าวซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (Thermal shock) เป็นแบบหล่อที่ดีเป็นตัวนำความร้อนที่ดี ทำให้การเย็นตัวในอัตราสูง ส่งผลต่อคุณสมบัติหลายประการ



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของแบบหล่อโลหะ

#### 2.4.3 การหล่อด้วยความดัน (Pressure die casting)

การหล่อชิ้นงานด้วยความดันในแบบโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ การหล่อที่ความดันต่ำ (Low pressure die casting) การหล่อที่ความดันปานกลาง (Medium pressure die casting) และการหล่อที่ความดันสูง (High pressure die casting)

##### การหล่อฉีดด้วยความดันสูง (High pressure die casting)

กรรมวิธีแบบนี้คือเพิ่มอุณหภูมิให้อะลูมิเนียมหลอมเหลว แล้วทำการฉีดอะลูมิเนียมหลอมเหลวเข้าสู่แบบแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเป็นโลหะในลักษณะแนวนอนด้วยความดันสูง ส่วนมากจะเกิน 10 บาร์ ฉะนั้น การหล่อแบบนี้จึงจำเป็นต้องออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความแข็งแรงและทนต่อความ

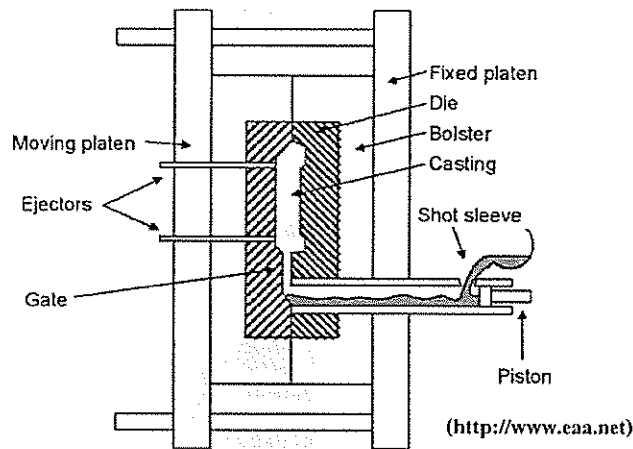
ดันสูง มีระบบกลไกภายในแม่พิมพ์ที่อยู่ยากพอสมควรลักษณะใกล้เคียงกับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกดังแสดงในรูปที่ 2.6 ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนมาก รวดเร็ว ชิ้นงานได้คุณภาพ ดังนั้นเราจำเป็นต้องมีเครื่องจักรสำหรับหล่อฉีดอะลูมิเนียม (Die casting machine)

#### การหล่อฉีดด้วยความดันต่ำ (Low pressure die casting)

กรรมวิธีแบบนี้คล้ายกับแบบวิธีแรก แต่การฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ จะใช้ความดันที่ต่ำกว่าโดยใช้ความดันประมาณ 2 บาร์ การฉีดจะฉีดจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน หรืออาจใช้วิธีการดูดอะลูมิเนียมที่หลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์

#### การหล่อฉีดด้วยความดันปานกลาง (Medium pressure die casting)

กรรมวิธีแบบนี้เช่นเดียวกับการฉีดด้วยความดันต่ำเพียงแต่เพิ่มความดันให้สูงขึ้นมาอีก หรืออาจใช้โดยวิธีการดูดอะลูมิเนียมหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการหล่อโดยให้แรงดันแบบ Cold Chamber Die Casting

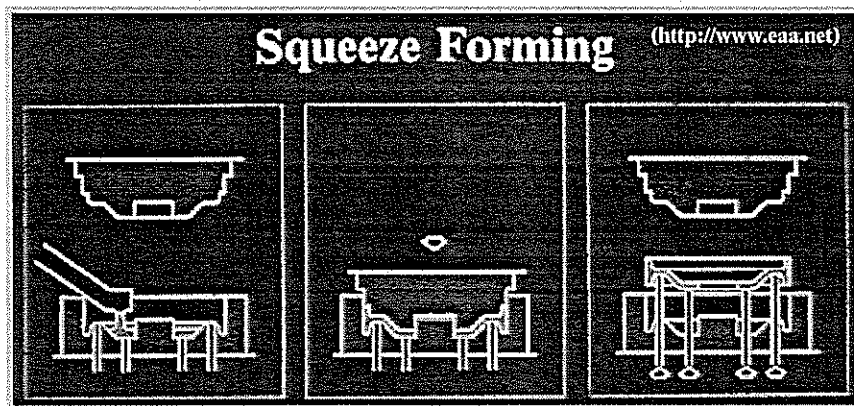
#### 2.4.4 การหล่อแบบ Cosworth

การหล่อแบบ Cosworth เป็นกระบวนการแรกที่มีการออกแบบการหล่อให้สมบูรณ์แบบและเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง เป็นวิธีการหล่อแบบทรายที่ให้ได้ขนาดของชิ้นงานที่แน่นอน ชิ้นงานแข็งแรงโดยการเริ่มแรกที่ได้พัฒนากระบวนการแบบนี้ เพื่อใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์และอุปกรณ์ เพื่อสำหรับการแข่งขันโดยเฉพาะซึ่งต้องใช้ชิ้นส่วนที่แข็งแรงเป็นพิเศษ กรรมวิธีที่สำคัญของวิธีนี้คือ การใช้ปั๊มแม่เหล็กไฟฟ้าดูดอากาศและควบคุมการไหลขณะที่โลหะหลอมเหลวโดยทั่วไป การหล่ออะลูมิเนียมแบบธรรมดา เมื่อน้ำโลหะหลอมเหลวไหลตัวจะสัมผัสกับอากาศภายนอกทำให้เกิดออกไซด์ ซึ่งจะผสมอยู่ในโครงสร้างภายในโลหะนั้น จึงเป็นผลให้เกิดเป็นจุดบกพร่อง หรือข้อตำหนิของชิ้นงาน (Defect) เมื่อนำชิ้นงานไปใช้งานอาจเกิดทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ อีกทั้งการหล่อแบบ Cosworth จะใช้ก๊าซเฉื่อยปกคลุมป้องกันอากาศภายนอกและออกซิเจนผสม

กับน้ำโลหะ เพื่อจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพประโยชน์ที่สำคัญที่สุดสำหรับกรรมวิธีการผลิตวิธีนี้คือประมาณมากกว่า 85 % ของผลิตภัณฑ์จะใช้ในการหล่อตัวพิมพ์อักษรและรูปแบบทรงต่างๆ ที่มีความละเอียดสูง ปัจจุบันมีการนำไปใช้ในการหล่อในอัตราการผลิตจำนวนมากแต่ถ้าผลิตน้อยก็ไม่คุ้มค่าในการลงทุนผลิตแม่พิมพ์แบบ Cosworth

#### 2.4.5 การหล่อแบบ Squeeze casting

การหล่อแบบ Squeeze casting เป็นกระบวนการหล่อที่ค่อนข้างยุ่งยาก คือขณะกระบวนการเปลี่ยนจากโลหะหลอมเหลวเป็นของแข็งนั้นจะต้องใช้แทนพิมพ์ที่เป็นระบบ hydraulic โดยจะใช้ความดันอยู่ที่ประมาณ 200 MPa ซึ่งสูงกว่ากระบวนการอื่นๆ



รูปที่ 2.7 แสดงการหล่อแบบ Squeeze Forming

#### เทคนิคการหล่อหลอมโลหะอะลูมิเนียม

กระบวนการหล่อหลอมโลหะอะลูมิเนียมสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้คือ

1. การหลอมโลหะ
2. การป้องกันและกำจัดก๊าซไฮโดรเจน
3. การป้องกันและกำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์
4. การปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะอะลูมิเนียมขั้นสุดท้ายก่อนการเทลงแบบ

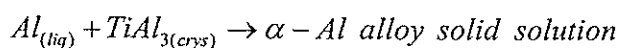
เตาที่ใช้หลอมอะลูมิเนียมมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะอะลูมิเนียม เช่น เตากระทะ (Reverberatory) หรือ เตาไฟฟ้า (Induction หรือ Resistance furnace) สำหรับเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่ว่าจะเป็นประเภทความถี่ต่ำหรือความถี่สูงจะมีผลทำให้เกิดการกวน (Stirring effect) น้ำโลหะที่กำลังหลอมเหลวทำให้มีโอกาสละลายก๊าซในอากาศได้มาก เตาหลอมไฟฟ้าที่ดีที่สุดควรจะเป็นแบบใช้ลวดความต้านทาน (Resistance) เนื่องจากสามารถควบคุมได้ง่ายทั้งการละลายและการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ เพราะไม่เกิดการกวนน้ำโลหะ การหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสมจะใช้อุณหภูมิการหลอมประมาณ 750-780°C ขึ้นอยู่กับชนิดของอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ในการหล่อ

ในระหว่างกระบวนการหลอม จะเกิดการละลายของไฮโดรเจนเข้าสู่โลหะอะลูมิเนียม หลอมเหลว และเมื่ออุณหภูมิตกลงช่วงระหว่างการแข็งตัวไฮโดรเจนสามารถละลายได้น้อยลง จึงทำให้เกิดเป็นรูพรุนอยู่ในโครงสร้าง ดังนั้นก่อนการเทแบบจึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน เพื่อป้องกันรูพรุนที่จะเกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ อีกกระบวนการหนึ่งที่สำคัญคือ การกำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์ หรือ Aluminium dross เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดน้ำโลหะ เพื่อไม่ให้ Dross ดังกล่าวหลงเหลือเป็นตำหนิหรือ Defect ที่เราไม่ต้องการและทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

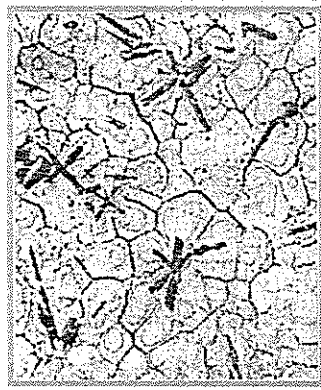
และในขั้นตอนสุดท้ายก่อนการเทแบบ จะมีการปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาค 2 ประเภท คือ การทำเกรนให้ละเอียด (Grain refinement) และการทำ Modification กระบวนการแรกจะเป็นการเติมสารทำให้เกรนละเอียด (Grain refiner) ซึ่งเป็นสารประกอบจำพวก Ti-B หรือ Ti-B-Al เพื่อให้เกิดการฟอร์มตัวของนิวเคลียสขนาดเล็กจำนวนมาก จึงเป็นผลทำให้โครงสร้างของเกรนที่ได้เล็ก ละเอียดและมีผลต่อสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น อีกกระบวนการหนึ่งคือ การทำ Modification โดยการเติมธาตุจำพวก โซเดียมหรือสตรอนเชียมซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างปลายแหลม (Needle-like structure) ของยูเทคติกซิลิคอนให้อยู่ในรูปทรงที่กลมมนขึ้น (Fibrous structure) ทำให้ลดการสะสมของความเค้น จึงเป็นผลทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นตามลำดับ ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการหล่อหลอมเพื่อผลิตชิ้นงานหล่อของโลหะอะลูมิเนียมผสมดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นยังมีรายละเอียดอีกมาก ซึ่งจะถูกล่ามถึงในหัวข้อต่อไป ดังนี้

## 2.5 การทำให้เกรนละเอียด (Grain refinement)

เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีช่วงการแข็งตัวกว้าง (Long range freezing) จึงมักให้โครงสร้างที่มีเกรนมีขนาดใหญ่และทำให้สมบัติเชิงกลลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณชิ้นงานที่มีความหนาหรือทำการหล่อด้วยแบบทราย ก็ยังทำให้เกรนมีขนาดใหญ่มากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงความละเอียดของเกรนและทำให้เกิดความสม่ำเสมอก่อนเทลงแบบ ด้วยวิธีการที่เรียกว่า Grain refinement ซึ่งกระทำได้โดยการผสมโลหะช่วยลดขนาดของเกรน (grain-refiner) เพื่อทำให้เกิดนิวเคลียสเล็กๆที่เป็นอนุภาคต่างชนิดกัน (heterogeneous nuclei) ด้วยจำนวนที่มากเพื่อให้มีจุดเริ่มต้นของการเกิดเกรนของอะลูมิเนียม โดยการเติมโลหะผสมหลักที่มีส่วนผสมของ Ti-B, Ti-Al-B ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การผสมนี้จะกระทำก่อนการเทโลหะลงแบบเล็กน้อย เพื่อให้ได้อนุภาคของ  $TiAl_3$  และ  $TiB_2$  ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic) อยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมต่อไป [5]



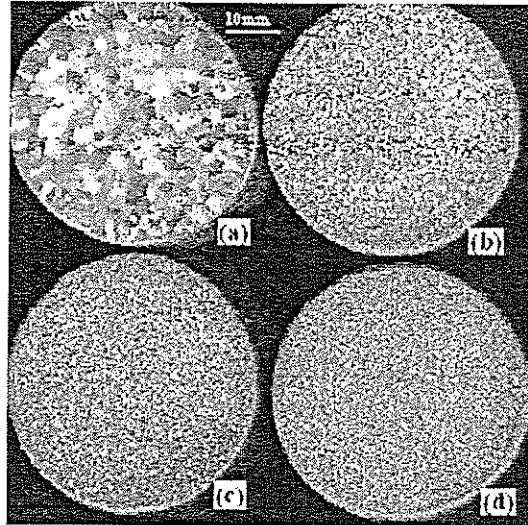
โลหะผสมหรือสารช่วยลดขนาดเกรนที่ใช้กันทั่วไปจะอยู่ในรูปของฟลักซ์เช่น โพแทสเซียมไทเทเนียมฟลูออไรด์ ( $K_2TiF_6$ ) และโพแทสเซียมโบโรฟลูออไรด์ (KBF) เมื่อผสมลงไป อะลูมิเนียมหลอมเหลวจะเกิดปฏิกิริยาแยกตัวออกและจะให้ไทเทเนียมโบไรด์ในที่สุด นอกจากสารช่วยลดขนาดเกรนจะอยู่ในรูปฟลักซ์แล้ว ยังอยู่ในรูปของโลหะผสม (Hardener) ระหว่างอะลูมิเนียมกับธาตุที่เป็น grain refiner เช่น อะลูมิเนียมไทเทเนียม , อะลูมิเนียมโบรอนหรืออะลูมิเนียม-ไทเทเนียม-โบรอน ซึ่งจะมีไทเทเนียมไม่เกิน 5% และโบรอนไม่เกิน 2.5% ตัวที่นิยมใช้ได้แก่ Al-5Ti-1B หรือ Al-3Ti-1B เป็นต้น รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมก่อนการปรับโครงสร้างเกรนให้ละเอียด (a) และภายหลังการปรับเกรนให้ละเอียดดังในรูป (b)-(d)



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการเกิดนิวเคลียสเทียมเพื่อปรับเกรนให้ละเอียด [5]

ปริมาณของสารช่วยลดขนาดเกรนหรือ Grain refiner ที่ต้องการสำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมโดยทั่วไป จะมีไทเทเนียม ~ 0.05-0.15 % โบรอน ~ 0.04 % หรือระหว่าง 0.01-0.08 % ไทเทเนียมและ 0.003% โบรอน ถ้าใช้ปริมาณของสารช่วยลดขนาดเกรนมากเกินไปจะเกิดข้อเสียคือเกิดการแยกตัวโดยเฉพาะไทเทเนียมโบไรด์ซึ่งมีความหนาแน่นที่สูงกว่าอะลูมิเนียม จึงเกิดการแยกตัวตกตะกอนอยู่ส่วนล่าง นอกจากนี้ ปริมาณซิลิคอน (Si) ที่ละลายอยู่ในโลหะผสม Al-Si ในระดับที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนที่ละเอียดแตกต่างกันด้วย เมื่อน้ำโลหะมีปริมาณซิลิคอนที่มากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนให้ละเอียดลดลง ดังนั้นเมื่อมีปริมาณซิลิคอนมากจำเป็นต้องใช้ตัวปรับสภาพเกรนให้ละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นตามไปด้วย นอกจากการปรับเกรนให้ละเอียดจะช่วยทำให้คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานดีขึ้น แล้วยังเป็น การช่วยต้านทานการเกิดรอยแตกขณะร้อน (Hot tearing) ลดการเกิดและปรับการกระจายของโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) และเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัน (Pressure tightness) ได้อีกด้วย

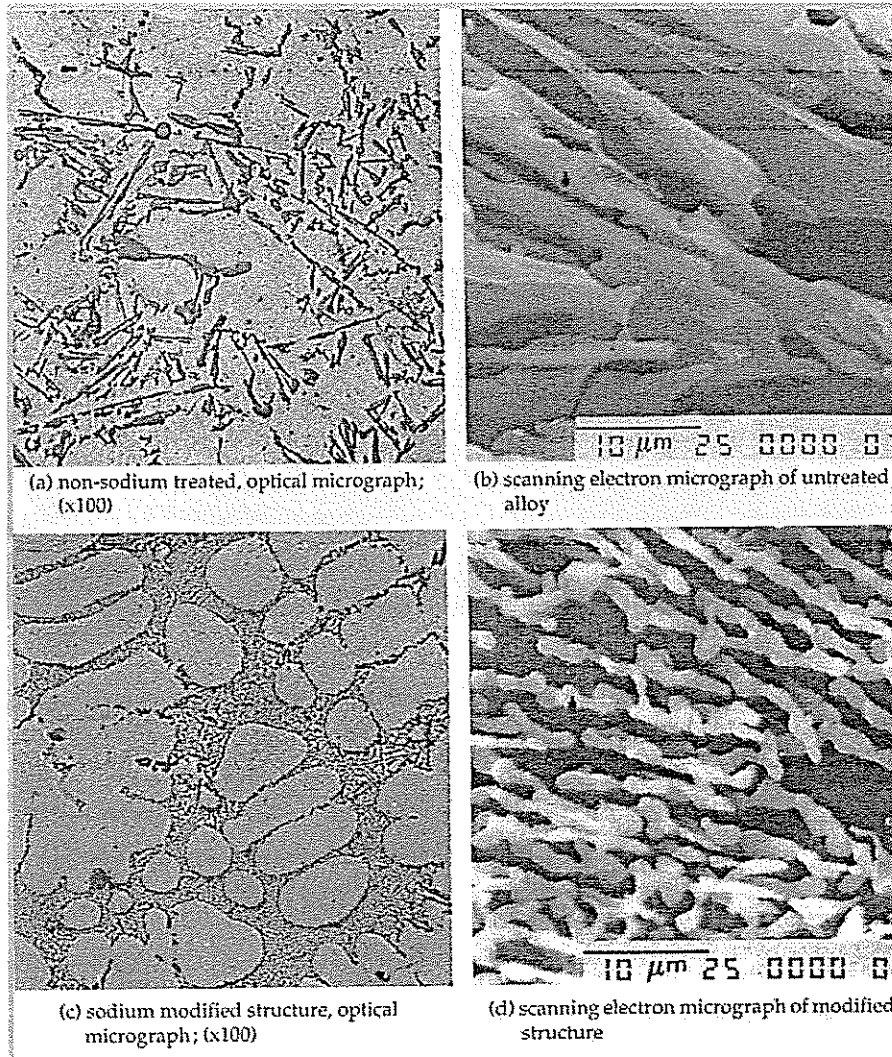




รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางจุลภาคของ Al เกรด 356.0 (a) ก่อน (b)-(d) หลังทำ Grain refinement [1]

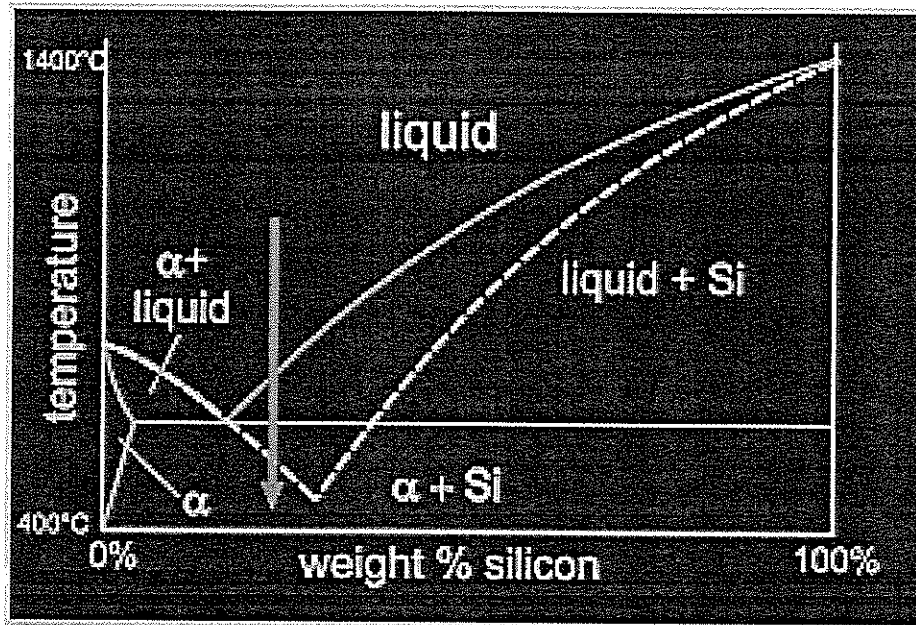
### 2.6 การปรับปรุงโครงสร้าง (Modification)

สำหรับอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด 356.0 หรืออะลูมิเนียมผสมชนิดไฮโปยูเทคติก โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีลักษณะเป็นเคนไดรต์ และยูเทคติกซิลิคอนที่แยกตัวออกมาอยู่ระหว่างเคนไดรต์ (Interdendritic “divorced” eutectic Si) โดยลักษณะของยูเทคติกซิลิคอนที่มีปลายแหลม อีกทั้งยังมีเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ  $Al_7FeSi$  ที่มีลักษณะคล้ายเข็มแหลม จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างของเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่เรียกว่ากระบวนการ Modification ซึ่งก็หมายถึง การทำให้ยูเทคติกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางยาวคล้ายเข็มเปลี่ยนรูปเป็นโครงสร้างที่กลมมนเล็กละเอียดมากขึ้น (Fine fibrous structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งจะช่วยให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำให้ค่า UTS และความเหนียวสูงขึ้น



รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 356 ก่อนและหลังทำ Modification [5]

กระบวนการ Modification สามารถทำได้ทั้งในการหล่อโดยใช้แบบหล่อทรายหรือแบบหล่อโลหะ ซึ่งในการปรับปรุงโครงสร้างจะมีการเติมธาตุโซเดียม (Na) หรือ สตรอนเชียม (Sr) ในปริมาณเล็กน้อยในน้ำโลหะก่อนการเทลงแบบโดยใช้ปริมาณเพียง 0.001-0.015 % Na โดยน้ำหนัก (จะบรรจุธาตุโซเดียมในภาชนะที่เป็นอะลูมิเนียมจุ่มลงในอะลูมิเนียมหลอมเหลว) หากเราพิจารณา Phase diagram การทำเช่นนี้ จะทำให้จุดยูเทคติกเลื่อนไปทางขวาจากส่วนผสมที่ 11.7 % Si ไปอยู่ที่ส่วนผสมประมาณ 14 % Si และอุณหภูมิยูเทคติกลดต่ำลงมาอยู่ที่อุณหภูมิ 564°C ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดซิลิกอนปฐมภูมิ (Primary Si) และทำให้เฟส Eutectic silicon มีลักษณะที่ละเอียดขึ้นเพราะการเกิดปฏิกิริยายูเทคติก (ที่ทำให้เกิดเฟสอะลูมิเนียมปฐมภูมิและยูเทคติกซิลิกอนพร้อมกัน) ที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงแผนภูมิสมดุกลภายหลังการทำ Modification

ทั้งนี้การเติมสตรอนเซียม (Sr) จะทนต่อการเสื่อมประสิทธิภาพ (Fading) ได้ดีกว่าโซเดียม แต่การทำ Modification โดยใช้สตรอนเซียมจะมีประสิทธิภาพต่ำหากอัตราเย็นตัวของชิ้นงานต่ำ เช่น ในกรณีของการหล่อในแบบหล่อทราย ส่วนธาตุโซเดียม สตรอนเซียม พลวง และแคลเซียม ล้วนให้ประสิทธิภาพในการดัดแปลงโครงสร้างเฟสยูเทคติกซิลิคอนเช่นเดียวกัน แต่แคลเซียมจะมีผลกระทบต่อคุณภาพทางเนื้อของชิ้นงาน (Soundness) ธาตุที่นำมาเติม (Modifier) จะอยู่ในรูปของโลหะหรือ Master alloy หรืออาจอยู่ในรูปของฟลักซ์ วิธีการทำทริทเมนต์ที่นิยมปฏิบัติทั่วไปมักใช้โลหะโซเดียม ซึ่งโดยปกติจะช่วยให้โครงสร้างที่มีความละเอียดสูง

ถึงแม้ว่าอินกอตที่ผ่านการทำทริทเมนต์ด้วยสตรอนเซียมจะสามารถนำมาใช้ได้ก็ตาม แต่ในโรงหล่อหลายแห่งยังนิยมใช้ธาตุโซเดียมสำหรับการทำให้โครงสร้างละเอียด เนื่องจากโลหะที่ผ่านการทำให้โครงสร้างละเอียดด้วยธาตุสตรอนเซียมสามารถทำให้เกิดปัญหาโพรงหดตัวได้ อย่างไรก็ตาม การเติมโลหะโซเดียม หรือเกลือโซเดียมในการปรับปรุงโครงสร้างอาจทำให้เกิดปัญหาบางประการ เช่น การจางหายของธาตุโซเดียมอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดควันมากซึ่งถือเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เบ้าหลอมเกิดความเสียหาย และการจับตัวกับก๊าซไฮโดรเจน เป็นต้น

### 2.7 การป้องกันและกำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์ (Dross)

อะลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย และเกิดเป็นฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และเนื่องจากอะลูมิเนียมออกไซด์นั้นมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับอะลูมิเนียม หลอมเหลวมากคือประมาณ  $2.6 \text{ g/cm}^3$  ดังนั้น อะลูมิเนียมออกไซด์จึงไม่แยกตัวมาขึ้นผิวหน้าแต่จะจับ

ตัวหรือแทรกอยู่ในเนื้อโลหะทำให้อะลูมิเนียมออกไซด์สามารถลอยปะปนไปกับน้ำโลหะได้ง่าย ในขณะที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวลงแบบหล่อซึ่งจะมีผลทำให้งานหล่อมักมีคุณภาพต่ำ เกิดเป็น Inclusion ที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้องกันไม่ให้เกิดหรือเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ให้น้อยที่สุด โดยระวังไม่ให้เกิดการปั่นป่วนของน้ำโลหะในระหว่างกระบวนการหลอมและการเทแบบ

ในการแก้ไขปัญหาให้มีให้น้ำโลหะก่อนการหล่อมักมีคุณภาพที่ดี จำเป็นต้องใช้ความชำนาญ และมีทักษะสูง การใช้ฟลักซ์เพื่อกำจัด Dross โดยจุ่มและแกว่งคนไปให้ทั่วในน้ำโลหะ เป็นวิธีหนึ่งที่ยง่ายแต่ให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีเท่าที่ควร การใช้ฟลักซ์ให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นสามารถกระทำได้โดยการใส่กระบวนการฉีดพ่นฟลักซ์ (Flux Injection) ซึ่งจะฉีดฟลักซ์ในปริมาณที่ต้องการลงไปใต้ผิวหน้าโลหะผ่านท่อฉีด โดยอาศัยก๊าซในโตรเจนหรืออาร์กอนเป็นตัวช่วยพาลงไป ฟลักซ์ที่ใช้ด้วยวิธีการฉีดนี้มักจะใช้ในปริมาณเพียง 25% ของฟลักซ์ที่ใช้โดยวิธีจุ่มและแกว่งเท่านั้น และเนื่องจากอาศัยก๊าซเพื่อช่วยในการพาฟลักซ์ลงไป ดังนั้นจึงได้ประโยชน์ในเชิงการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนอีกด้วย

ฟลักซ์โดยทั่วไปเป็นส่วนผสมระหว่างสารประกอบเกลืออนินทรีย์ ที่มีโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เป็นส่วนผสมหลัก ผสมกับฟลูออไรด์ ฟลูออโรซิลิเกต ซัลเฟต และไนเตรต เป็นต้น อย่างไรก็ตามแนวโน้มในปัจจุบันได้มีการหันมาใช้ฟลักซ์ที่มีฟลูออไรด์ต่ำที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ในภาคปฏิบัติจริงจะใช้ฟลักซ์ปริมาณ 0.2 % ของน้ำหนักโลหะที่จะทำการพริทเทมต์และเวลาที่ใช้ในการทำอยู่ที่ประมาณ 10 นาที

## 2.8 กระบวนการกำจัดก๊าซ (Degassing) [1-3]

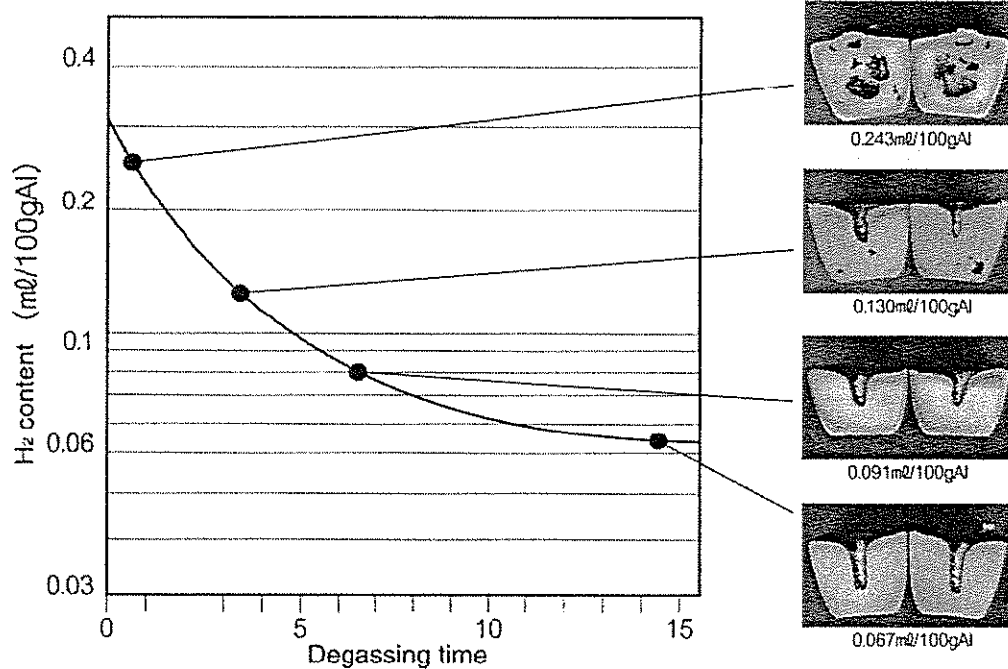
ในการหลอมโลหะอะลูมิเนียม ก๊าซไฮโดรเจนสามารถละลายแทรกซึมได้ง่ายในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนยิ่งเพิ่มมากขึ้น ส่วนแหล่งที่มาของก๊าซไฮโดรเจน อาจมาจากความชื้นของโลหะที่จะนำมาหลอม มากับก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ มากับความชื้นในอากาศ ความชื้นในเตา เมื่อไอน้ำหรือความชื้นสัมผัสกับโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการ eq 1.1 และ eq 1.2 (บทที่ 1)

เมื่ออุณหภูมิหน้าโลหะลดลงหรือในสภาวะที่ขึ้นงานหล่อเกิดการเย็นตัวลง ความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจนลดต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 1.1 อะตอมของไฮโดรเจนจะถูกขับออกมาและรวมตัวกันเป็นโมเลกุลและในที่สุดจะกลายเป็นฟองก๊าซเล็กๆแยกตัวออกมา และหากฟองก๊าซเหล่านี้ลอยขึ้นไปผิวโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวไม่ทันเนื่องจากอะลูมิเนียมแข็งตัวเสียก่อน จึงทำให้เกิดเป็นรูพรุนค้ำค้างอยู่กระจัดกระจายทั่วไปภายในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม ทำให้คุณภาพของงานหล่อที่ได้ต่ำ และจะเห็นได้ชัดเจนภายหลังนำเอาชิ้นงานไปกลึงหรือไสผิวออก ดังนั้น ในการหล่ออะลูมิเนียมเราควรควบคุมปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนและสารปนเปื้อนให้อยู่ในระดับที่ต่ำที่สุด เรา

จะได้ชิ้นงานหล่อที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี โดยปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนควรควบคุมให้น้อยกว่า 0.2-0.3 ml H<sub>2</sub> / 100 g Al

สำหรับการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนดังกล่าว จะใช้เทคนิคการทำให้เกิดฟองก๊าซภายในน้ำโลหะ โดยอาจเติมสารที่ทำให้เกิดฟองก๊าซเฉื่อยหรือการปั่นก๊าซเฉื่อยลงไปในน้ำโลหะโดยตรง ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่มีในน้ำโลหะมากกว่าในฟองก๊าซ จึงทำให้ไฮโดรเจนเกิดการแพร่เข้าไปในฟองก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จากนั้นฟองก๊าซจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำโลหะ และถูกกำจัดออกไปในที่สุด ดังนั้นหากฟองก๊าซเฉื่อยที่ได้มีขนาดเล็กละเอียดมีจำนวนมากและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จะทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนดียิ่งขึ้น (รูปที่ 1.2) โดยหากระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดก๊าซมากขึ้นทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนในน้ำโลหะอะลูมิเนียมลดลง และเป็นผลทำให้ปริมาณรูพรุนลดลงตามลำดับ ในอุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียม ก๊าซในโครเจนก็เป็นที่ยอมรับ เช่นเดียวกันซึ่งมีราคาที่ถูกกว่าก๊าซอาร์กอนแต่จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซที่น้อยกว่า

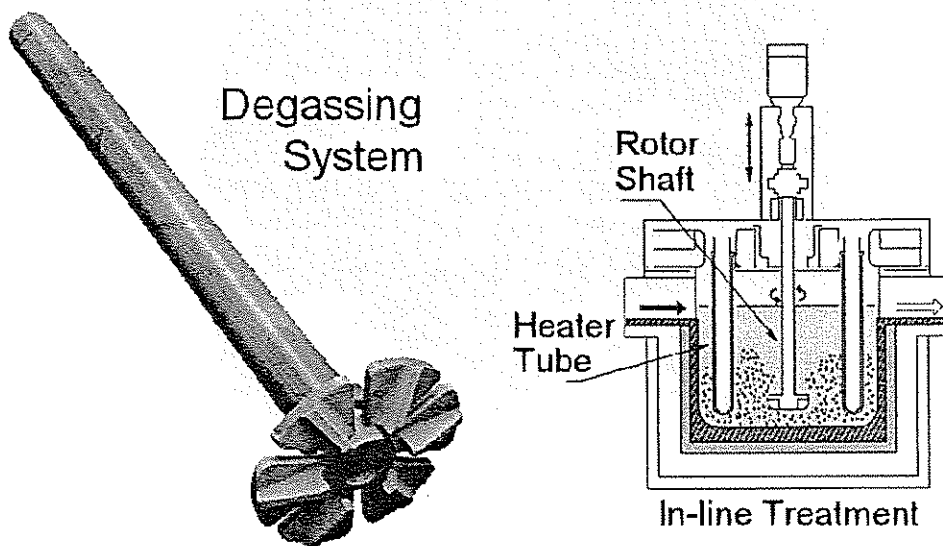
### Hydrogen Removal Efficiency (Test Results)



รูปที่ 2.10 ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานสัมพันธ์กับปริมาณไฮโดรเจนเมื่อเวลาในการกำจัดก๊าซเพิ่มขึ้น

### 2.8.1 การกำจัดก๊าซโดยวิธี Rotary Degassing

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะอะลูมิเนียมด้วยวิธี Rotary Degassing ถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง โดยผ่านก๊าซเฉื่อยผ่านแท่งแกรไฟต์ หรือ Sialon และหัวงานปืน (Nozzle) ลงไปในน้ำโลหะจนทำให้เกิดฟองก๊าซขนาดเล็กจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 2.11 วิธีการนี้ถูกพัฒนามาจาก Lance degassing ซึ่งจะไม่มีการใช้หัวปืนประกอบที่ปลายแท่งด้วยจึงทำให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นมีขนาดหยابเกินไปทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไม่ดีพอ หัวงานปืนที่ใช้จะถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของฟองก๊าซที่สม่ำเสมอและเล็กละเอียด กระบวนการกำจัดก๊าซจะกระทำที่อุณหภูมิประมาณ  $750-800^{\circ}\text{C}$



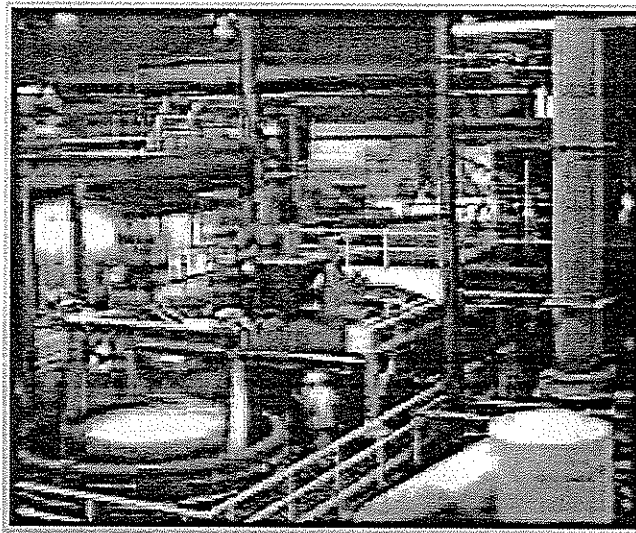
รูปที่ 2.11 การทำให้เกิดฟองก๊าซเฉื่อยในน้ำโลหะโดยวิธี Rotary degassing

### 2.8.2 การกำจัดก๊าซโดยวิธี Ultrasonic Degassing

นอกจากวิธีการไล่ก๊าซด้วยการใช้ฟองก๊าซพาไฮโดรเจนออกไปจากน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวแล้ว ยังมีวิธีการที่เรียกว่า Ultrasonic degassing ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นที่ประเทศรัสเซีย โดยใช้หัว Probe ซึ่งสามารถกำเนิดความถี่ได้ประมาณ 500-2000 เฮิรซ์ เพื่อให้เกิดการสั่นของฟองก๊าซเล็กๆ รวมตัวกันเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่และลอยขึ้นเหนือผิวหน้าโลหะหลอมเหลว แต่วิธีนี้จะใช้เวลานานและประสิทธิภาพต่ำ

### 2.8.3 การกำจัดก๊าซโดยวิธี Vacuum Degassing

วิธีการลดก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีสุญญากาศ (รูปที่ 2.12) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ได้ ซึ่งประสิทธิภาพของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับระดับของสุญญากาศและปริมาณของออกไซด์ฟิล์ม โดยการลดความดันบรรยากาศเหนือเบ้าหลอมอะลูมิเนียม ทำให้ไฮโดรเจนผุดขึ้นสู่ผิวหน้า น้ำโลหะอะลูมิเนียม หลอมเหลวและถูกกำจัดออกไปในที่สุด อาจมีการใช้ก๊าซเฉื่อยร่วมในการกำจัดก๊าซวิธีการนี้มีประสิทธิภาพสูงซึ่งอาจลดปริมาณของไฮโดรเจนลงถึง 0.08 ml/ 100 g Al และวิธีส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าวิธีอื่น แต่อย่างไรก็ดีวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและนิยมใช้ในทวีปยุโรปเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงการไล่ก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีสุญญากาศ

### 2.8.4 การกำจัดก๊าซโดยวิธี Fluxing

ฟลักซ์เคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนมักเป็นก้อน เพื่อใช้จุ่มลงไปในน้ำโลหะ อะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยใช้แท่งกดลงไปหรือใส่ในตะแกรงกดลงไปก้นเบ้า ฟลักซ์เคมีมีส่วนผสมของ Hexachloroethane ( $C_2Cl_6$ ) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของก๊าซคลอรีนที่อุณหภูมิประมาณ  $700^{\circ}C$  ก๊าซคลอรีน ส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมเกิดเป็นก๊าซอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $183^{\circ}C$  ซึ่งจะติดกับ Aluminium dross และอนุภาคปนเปื้อนอื่นๆ จึงทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาดน้ำโลหะ แต่อย่างไรก็ดี วิธีการนี้มีผลทางสภาวะแวดล้อมการทำงาน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงและรวดเร็วในระหว่างการจัด ก๊าซ อีกทั้งมีกลิ่นที่เป็นอันตรายเนื่องจากหากก๊าซอะลูมิเนียมคลอไรด์รวมตัวกับความชื้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นกรดไฮโดรคลอริก

## 2.9 กระบวนการทำความสะอาดน้ำโลหะโดยใช้ฟลักซ์ [2,6]

การใช้ฟลักซ์เคมีในการทำความสะอาดน้ำโลหะอะลูมิเนียมมีหลายวัตถุประสงค์ คือ อาจจะใช้เพื่อปกคลุมป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือ เพื่อการกำจัดก๊าซ และอาจใช้ในกระบวนการแยก เนื้อโลหะ Aluminium ออกจาก Dross เพื่อลดการสูญเสียอะลูมิเนียมเป็นต้น

### ฟลักซ์เคมี (Chemical flux)

แบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

ประเภทที่ 1 คือ ฟลักซ์คลุมผิวหน้า (Covering flux) ใช้คลุมผิวน้ำโลหะเพื่อป้องกันการเกิด Oxidation และ Hydrogen pickup ฟลักซ์คลุมผิวหน้าต้องแยกตัวออกจากน้ำโลหะและมีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าโลหะอะลูมิเนียมจึงทำให้ลอยบนผิวน้ำโลหะอะลูมิเนียม เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน อันจะทำให้เกิดการสูญเสียของอะลูมิเนียมในรูปของออกไซด์ และป้องกันการเกิดปฏิกิริยาของน้ำอะลูมิเนียมกับความชื้นในอากาศ โดยทั่วไปฟลักซ์จะต้องมีจุดหลอมต่ำกว่าจุดหลอมตัวของอะลูมิเนียม โดยเกิดเป็นส่วนผสมยูเทคติกของ NaCl และ KCl

ประเภทที่ 2 คือ ฟลักซ์ทำความสะอาด (Cleaning flux) ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกไซด์ และช่วยขจัดออกไซด์และสิ่งเจือปน (Suspended particle) โดยฟลักซ์ชนิดนี้มีส่วนผสมของเกลือโซเดียม เกลือของโปแตสเซียม และเกลือของฟลูออไรด์ ซึ่งจะช่วยให้จุดหลอมตัวและความถ่วงจำเพาะต่ำลงมากกว่ากรณีแรก

ประเภทที่ 3 คือ ฟลักซ์ลดการสูญเสียอะลูมิเนียมติดไปกับออกไซด์ (Drossing off flux) เป็นฟลักซ์ที่มีส่วนผสมโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) หรือ โซเดียมไนเตรด ( $\text{Na}_2\text{NO}_3$ ) ทำหน้าที่ลดการสูญเสียเนื้อโลหะอะลูมิเนียมที่ติดไปกับ Dross โดยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ที่จะทำให้น้ำอะลูมิเนียมที่ติดอยู่กับ Dross ละลายรวมตัวกันออกมาไปรวมกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวในเบ้าหลอม

ประเภทที่ 4 คือ ฟลักซ์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซ (Degassing flux) โดยส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยสารประกอบที่สามารถปล่อยก๊าซคลอรีนออกมาได้ เช่น เฮกซะคลอโรอีเทน ( $\text{C}_2\text{Cl}_6$ ) ที่เป็นของแข็ง จะถูกเติมลงในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยตกลงใต้ผิวน้ำโลหะ ทำให้เกิดฟองก๊าซในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนได้เช่นเดียวกัน ฟลักซ์กำจัดก๊าซที่เป็นชนิดผง (Degassing flux powder) สามารถใช้ก๊าซอาร์กอนหรือไนโตรเจน เป็นตัวพาผงฟลักซ์ฉีดเข้าไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียมในเบ้าหลอมให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยใช้เวลาประมาณ 10 นาที



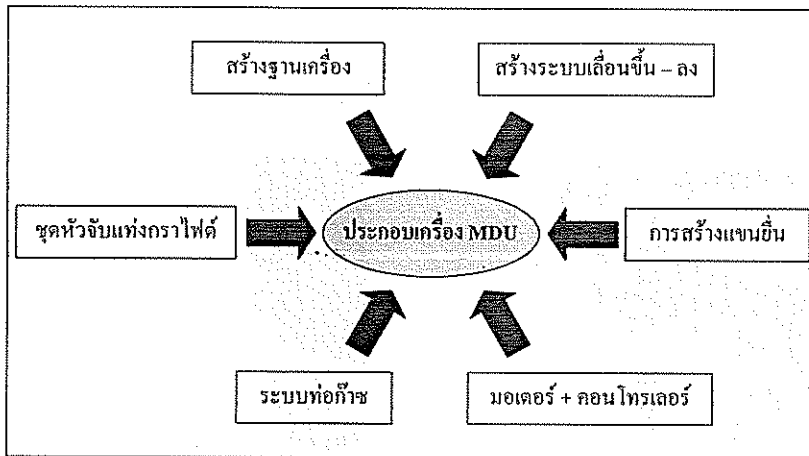
คุณสมบัติของฟลักซ์ที่ดีต้องไม่หลอมละลายรวมกับน้ำอะลูมิเนียมและมีความหนืดต่ำ อีกทั้งยังสามารถจัดธาตุมลทินและต้องมีความดันไอต่ำ (Low vapour pressure) ที่อุณหภูมิการหลอมของอะลูมิเนียม นอกจากนี้ ต้องมีความหนาแน่นที่ต่างจากอะลูมิเนียมเพียงพอที่จะแยกตัวออกจากอะลูมิเนียมผสม เพื่อผลในการแยกฟลักซ์ออกจากน้ำโลหะและไม่ควรทำปฏิกิริยากับวัสดุทนไฟที่ใช้ทำวัสดุที่บุภายในผนังเตา (Lining)

### บทที่ 3

#### การผลิตเครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่ และเครื่องทดสอบปริมาณรุกรานระบบสุญญากาศ

##### (The Construction of a Mobile Degassing Unit: MDU and Vacuum Apparatus)

การสร้างเครื่อง Mobile Degassing Unit เริ่มต้นจากการออกแบบเครื่องต้นแบบโดยใช้โปรแกรม Solid work จากนั้นทำการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ จากนั้นทำการประเมินราคา และดำเนินการจัดซื้อวัสดุเพื่อเตรียมความพร้อมในการสร้างเครื่องมือและดำเนินการตามแผนผังที่แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 Flow Chart แสดงขั้นตอนการสร้างเครื่อง MDU

การดำเนินการสร้างเครื่อง Mobile Degassing Unit โดยในขั้นตอนแรกจะดำเนินการเชื่อมต่อโครงสร้างเครื่อง สร้างฐานคือ แขนยื่น สร้างระบบเลื่อนขึ้นลง จากนั้นทำการกลึงชุดหัวจับแท่งกราฟไฟต์ แล้วประกอบเข้ากับตัวเครื่องและถังก๊าซอาร์กอน จากนั้นประกอบมอเตอร์และชุดควบคุมและตรวจสอบการใช้งาน สำหรับรายละเอียดในขั้นตอนต่างๆ จะถูกกล่าวถึงดังต่อไปนี้

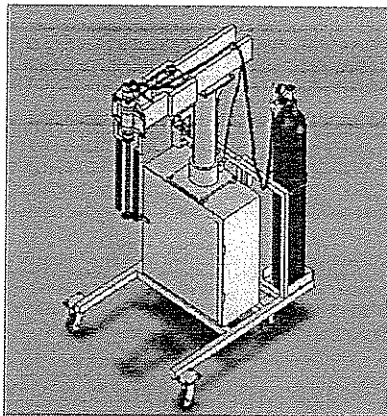
#### 3.1 ออกแบบเครื่องต้นแบบด้วยโปรแกรม Solid Work

หลักการออกแบบเครื่อง Mobile Degassing Unit จะเน้นการสร้างเครื่องให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมกับการใช้งานกับเตาหลอมไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction furnace) ขนาด 40 กิโลกรัมเคลื่อนที่ได้สะดวก คล่องตัว และไม่เป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน โดยเริ่มต้นจากการเขียนแบบตัวเครื่องด้วยโปรแกรม Solid Work ซึ่งมีรายละเอียดในส่วนที่เป็นโครงสร้างของเครื่องหัวจับแท่งกราฟไฟต์ ระบบขับเคลื่อนการปั่นแท่งกราฟไฟต์ แขนยื่น ระบบขับเคลื่อนขึ้นลง และฐานเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 A-D

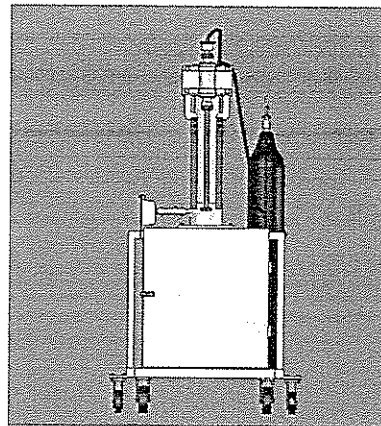
ในการออกแบบฐานเครื่อง จะกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างล้อที่สามารถให้ตัวเครื่องสามารถสอดเข้าไปทำงานกับตัวเตาหลอมไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้งานในสถานปฏิบัติการได้ รวมทั้งมีส่วนที่ใช้ในการเก็บถังก๊าซ และส่วนที่ใช้ในการเก็บอุปกรณ์และอะไหล่ในการบำรุงรักษาเครื่อง นอกจากนี้จะมีระบบล้อหมุนเพื่อการเคลื่อนที่ได้สะดวก และมีระบบล้อยึดล้อเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในระหว่างการกำจัดก๊าซ

ส่วนระบบขับเคลื่อนขึ้น-ลง จะใช้หลักการทำงานของการขบกันของเฟืองกับตัวเฟืองสะพาน โดยมีชุดเฟืองตัวหนอนเป็นต้นแรงเพื่อเป็นแรงในการดึงขึ้น-ลง ซึ่งในที่นี้ระยะขึ้น-ลงของแขนนั้นจะวัดจากความสูงของเตาหลอมไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อระยะการทำงานประมาณ 10-20 เซนติเมตร เพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้ายเครื่องออกจากเตาหลังจากกำจัดก๊าซเสร็จเรียบร้อยแล้ว

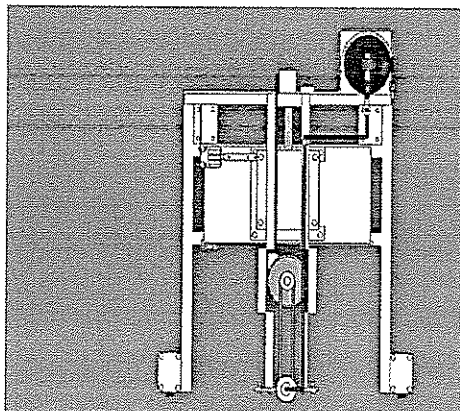
สำหรับหลักการที่ใช้ในการหมุนท่อแก๊สไฟต์นั้น จะใช้การขับเคลื่อนจากระบบสายพานและมอเตอร์ชนิดปรับรอบการหมุนได้ เพื่อเลือกใช้งานที่หลากหลายระดับของความเร็วรอบของชุดจับท่อแก๊สไฟต์ หัวจับแก๊สไฟต์จะถูกออกแบบให้มีการนำก๊าซเข้าและออกผ่านท่อแก๊สไฟต์ได้



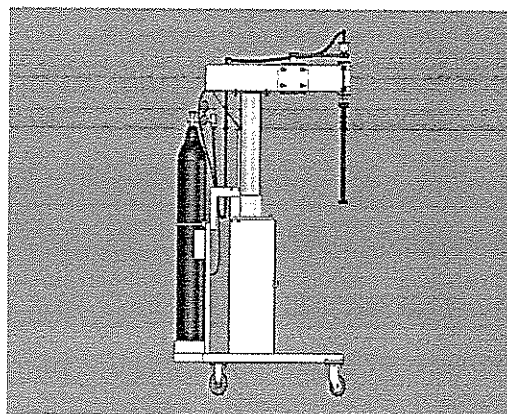
A) Overview



B) Back view



C) Top view



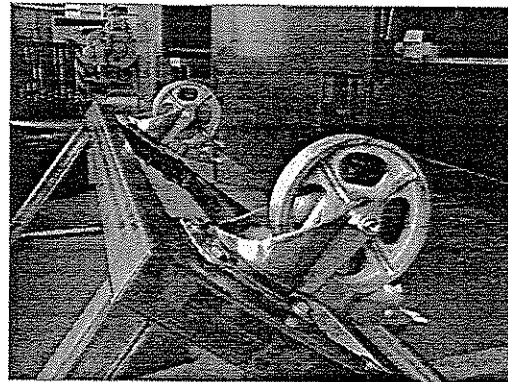
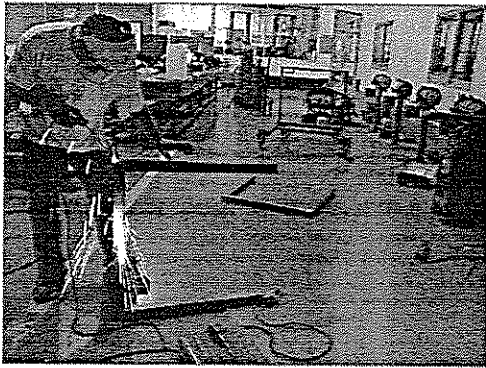
D) Side view

รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องต้นแบบ MDU

### 3.2 การสร้างเครื่อง (Mobile Degassing Unit)

#### 3.2.1 การสร้างฐานล้อและ โครงสร้างตัวเครื่อง

ในการสร้างเครื่อง (Mobile Degassing Unit) เริ่มต้นจากการสร้างส่วนที่เป็นฐานของเครื่อง โดยประกอบขึ้นจากเหล็กกล่องขนาด 3 นิ้ว หนา 1 มิลลิเมตร ที่วัดขนาดตามที่ออกแบบไว้และทำการเชื่อมยึดเหล็กทุกชิ้นที่ประกอบกันเป็นฐาน จากนั้นทำการประกอบล้อเข้ากับฐานของเครื่องโดยจับยึดล้อด้วยน็อต-สกรู ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ส่วนการประกอบโครงสร้างด้านบนของฐานล้อจะใช้การเชื่อมประกอบเหล็กกล่องขนาด 3 นิ้ว ทำเป็นโครงโดยมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมสูงประมาณ 1 เมตร แล้วประกบโครงด้วยเหล็กแผ่นเข้าด้วยกัน เพื่อเป็นโครงสร้างที่ใช้ป้องกันระบบเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของบริเวณเสาของตัวเครื่องแล้วพ่นสีกันสนิมดังแสดงในรูปที่ 3.4



A) การเชื่อม โครงสร้างฐานล้อของเครื่อง

B) การยึดฐานล้อเข้ากับฐานเครื่อง

รูปที่ 3.3 แสดงการสร้างฐานล้อ



A) โครงสร้างฐานและตัวเครื่อง

B) เชื่อมโครงสร้างปิดด้านหน้าเสา C) การพ่นสีกันสนิม

รูปที่ 3.4 แสดงการสร้างฐานล้อและโครงสร้างของเครื่อง Mobile degassing Unit

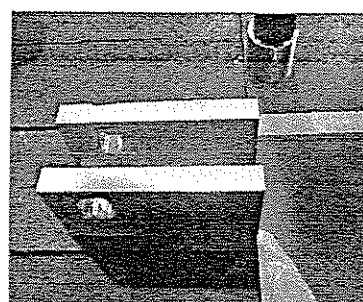
### 3.2.2 การสร้างเสาและตัวปรับระดับขึ้นลง

ขั้นตอนนี้เริ่มจากการตัดท่อเหล็กหนา 1 นิ้ว และความสูงประมาณ 1.8 เมตร เจียรตกแต่งขอบให้เรียบร้อยเพื่อเป็นเสา และจากนั้นทำตัวล้อมกรอบการเคลื่อนที่ของเสาโดยคว้านเหล็กแท่งกลมตันให้มีพื้นที่โตกว่าพื้นที่หน้าตัดของเสาคือเครื่องเล็กน้อยดังรูปที่ 3.5 A หลังจากนั้นทำการ Milling เพื่อเปิดพื้นที่ให้เฟืองที่ทำหน้าที่ดันเสาทำงานขึ้นลงดังรูปที่ 3.5 B และเชื่อมเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมประกบ บริเวณฐานทำการเจาะรูขีดด้วยน็อต-สกรู เพื่อทำการยึดฐานของตัวล้อมกับตัวฐานของเครื่องที่สร้างไว้



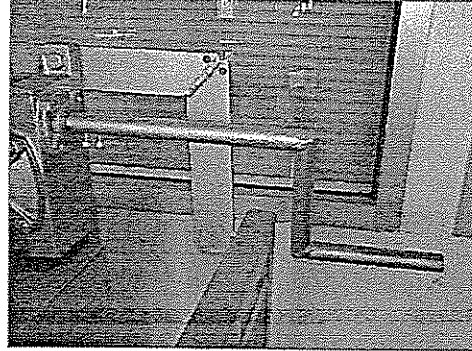
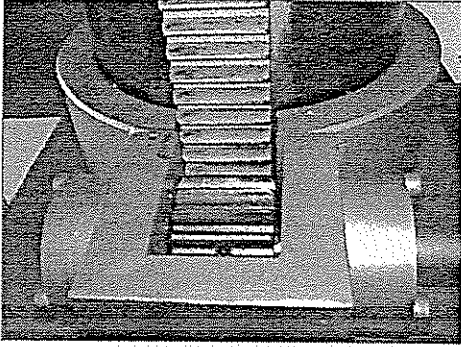
A) การกลึงเสาที่ใช้กรอบเสาของเครื่อง B) Milling เหล็กแท่งสี่เหลี่ยมทำชุดประกอบล้อมกรอบรูปที่ 3.5 แสดงการทำชุดประกอบล้อมกรอบ

ขั้นตอนต่อไปเป็นการทำระบบเคลื่อนที่ขึ้นลงของชุดแกนของเครื่อง ที่ใช้ระบบเฟืองเป็นกลไกในการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง โดยเริ่มจากการกลึงเพลยาว 45 เซนติเมตร แล้วทำการกัดเฟืองสะพานและเฟืองที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนเสาขึ้น-ลง ซึ่งชุดเฟืองขับเคลื่อนขึ้น-ลงนี้จะถูกรอบด้วยชุดประกอบล้อมกรอบดังแสดงในรูปที่ 3.6 เพื่อต่อกับเพลจากชุดเฟืองตัวหนอน



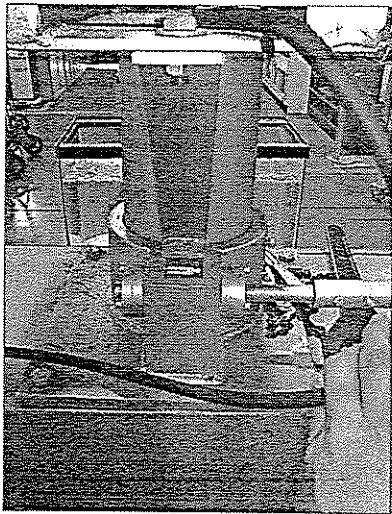
รูปที่ 3.6 แสดงชิ้นส่วนเฟืองและชุดประกอบล้อมกรอบ

รูปที่ 3.7 แสดงชุดขับเคลื่อนขึ้น-ลงโดยใช้เฟืองตัวหนอนและเฟืองสะพาน โดยเฟืองตัวหนอนจะเคลื่อนที่โดยการหมุนด้วยมือ ทำให้ตัวเสาสามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลงได้ตามระยะความสูงที่ต้องการซึ่งเราสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของเสานี้ได้ที่ความสูง 1.80 เมตร จากระยะฐาน



A) ชุดระบบการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง

B) การควบคุมการหมุนขึ้นลงที่ต่อกับเฟืองตัวหนอน



C) เฟลาจากเฟืองตัวหนอนต่อเข้ากับชุดเฟืองสะพาน

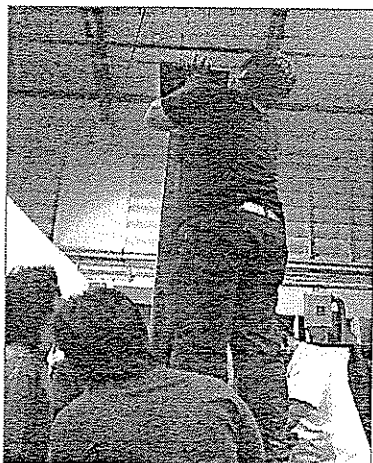
D) การขับเคลื่อนขึ้น-ลงโดยเฟืองสะพาน

รูปที่ 3.7 แสดงชุดระบบการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของชุดแขนของเครื่อง

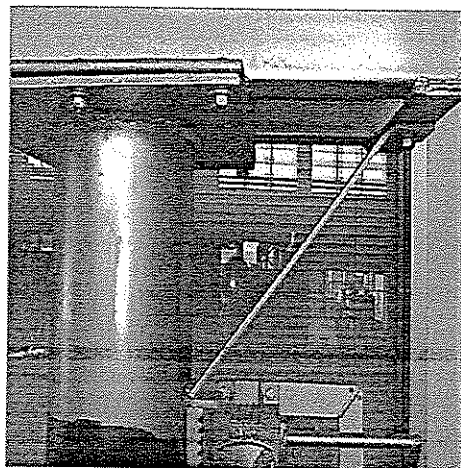
### 3.2.3 การสร้างแขนยื่น

ทำการเชื่อมยึดเหล็กกล่องขนาด 4 นิ้วยาว 1.40 เมตร สองแท่งเป็นแขนด้านหนึ่ง ส่วนอีกด้านหนึ่งก็ทำการเชื่อมในทำนองเดียวกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับแขน และรับน้ำหนักของชุดหัวจับแกรไฟต์ได้ ในการยึดชุดแขนเข้ากับตัวเสานั้นต้องเชื่อมเหล็กแผ่นบนหัวเสาและปรับให้ได้ระนาบด้วยระดับน้ำเพื่อให้ระดับแขนทั้งสองข้างเกิดสมดุล และที่ปลายด้านหนึ่งของแขนจะถูกรองรับด้วยคานเพื่อความแข็งแรงอีกทางหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 3.8 ส่วนปลายของแขนยื่นนั้นถูกเชื่อมประกอบ

เข้ากับชุดหัวจับแกรไฟต์ นอกจากนี้แล้วชุดมอเตอร์ที่ใช้สำหรับหมุนท่อแกรไฟต์จะถูกยึดเข้ากับแขนทั้งสองข้าง โดยมีการทำรู Slot ระหว่างตัวแขนกับมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เพื่อสามารถปรับความตึงหย่อนของสายพานได้และเป็นการยืดอายุการใช้งานของสายพานไปในตัว

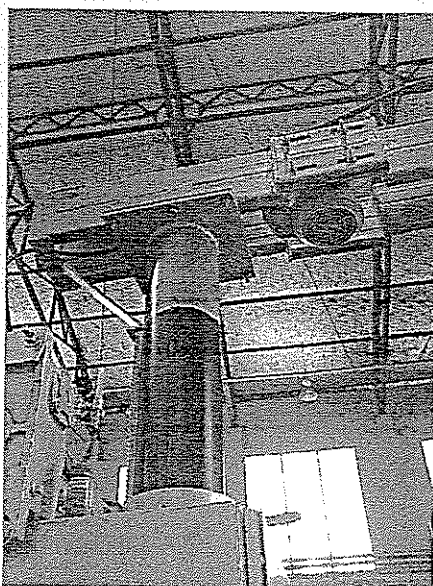


A) การขึ้น โครงเสา



B) การปรับระนาบหัวเสาและเสริมแรง

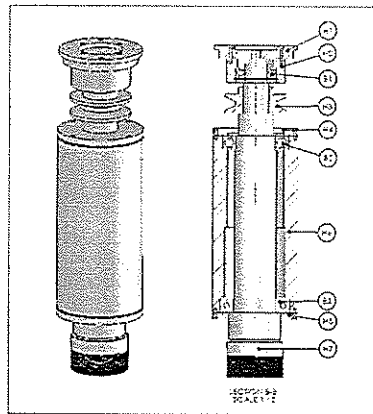
รูปที่ 3.8 การยึดชุดแขนเข้ากับตัวเสา



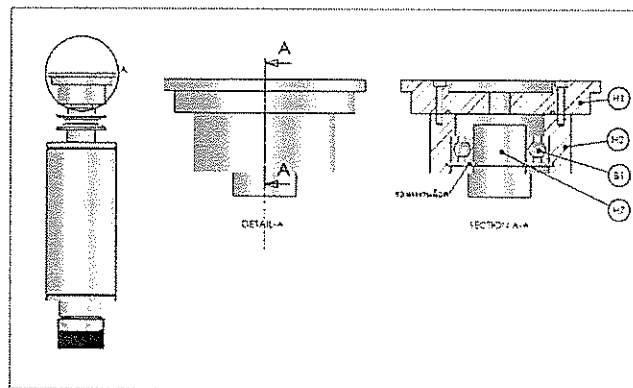
รูปที่ 3.9 แสดงการสร้างแขนยื่นและตำแหน่งวางมอเตอร์

### 3.2.4 การสร้างชุดหัวจับแกรไฟต์

เริ่มจากการออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Work ดังแสดงในรูป 3.10-3.15 ซึ่งประกอบด้วยชุดประกอบชุดหัวจับแกรไฟต์กับท่อก๊าซด้านบนและห้องก๊าซ (H1-H2) ชุดเชื่อมต่อกับสายพาน (H3) แกนกลางหัวจับแกรไฟต์ (H6) ชุดต่อแกนกลางหัวจับแกรไฟต์กับท่อแกรไฟต์ด้านล่าง (H5) และชุดต่อกับท่อแกรไฟต์ (H7) จากนั้นก็ถึงขั้นรูปให้ได้รูปทรงและขนาดตามต้องการและประกอบเป็นชุดหัวจับ รวมทั้งทำเข็มขัดรัดกับร่องที่ทำไว้กับชุดหัวจับแกรไฟต์ รัดกับชุดแขน ดังแสดงในรูปที่ 3.16

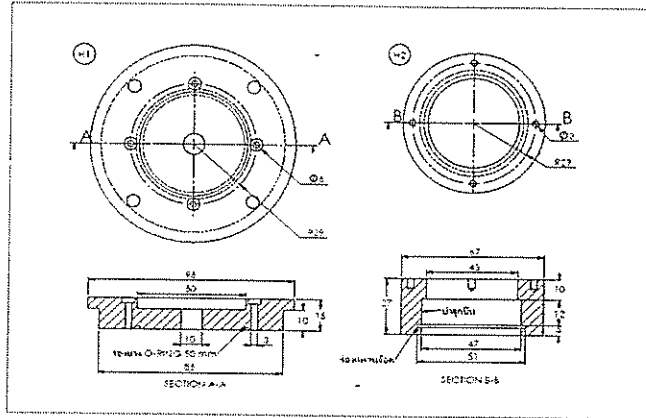


A) Overview ของชุดหัวจับท่อแกรไฟต์

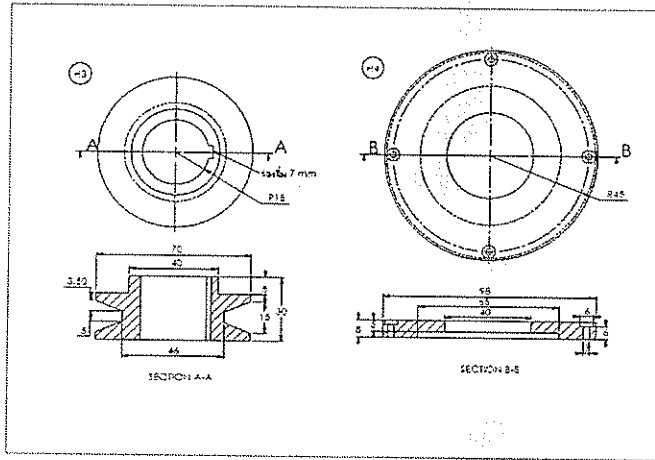


B) หัวต่อชุดจับแกรไฟต์กับท่อก๊าซ



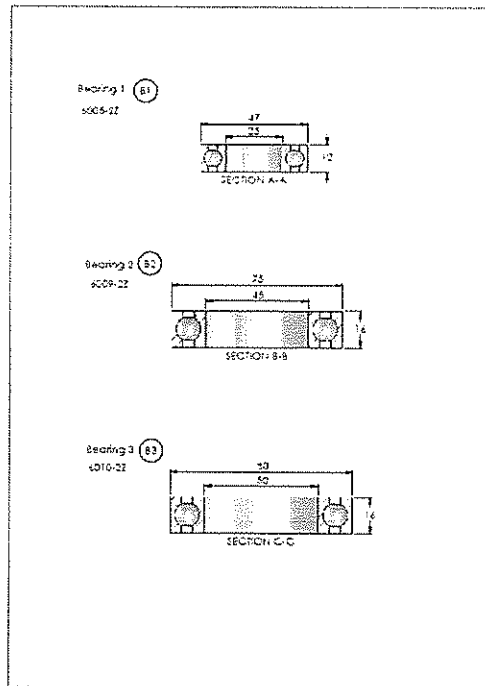


C) รายละเอียดหัวต่อชุดจับแกรไฟต์กับท่อก๊าซ

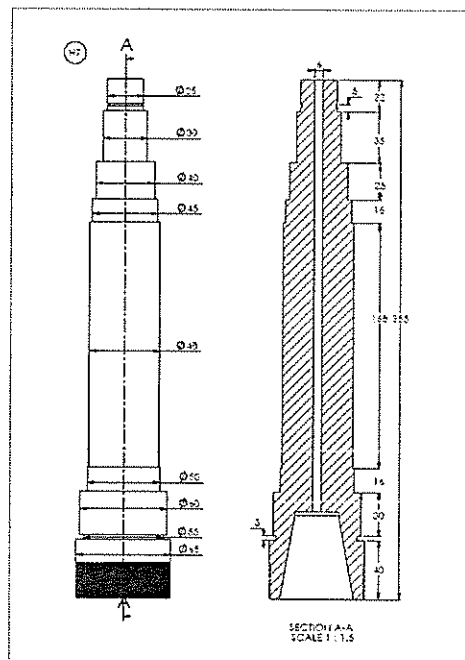


D) แสดงชุดหัวจับแกรไฟต์เชื่อมต่อกับสายพาน

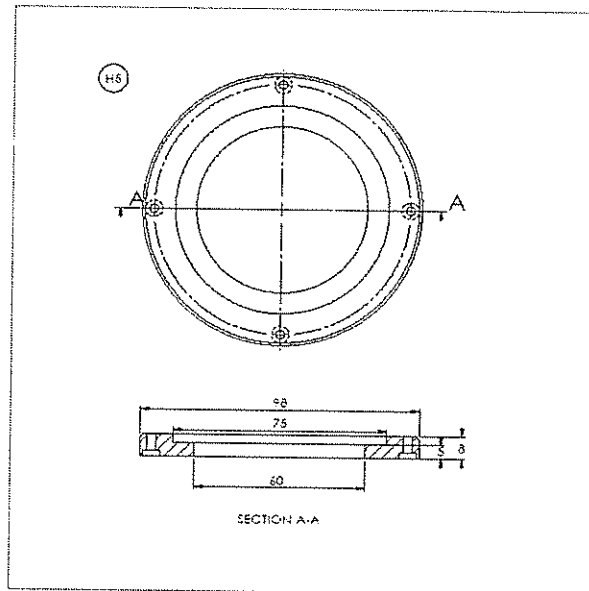
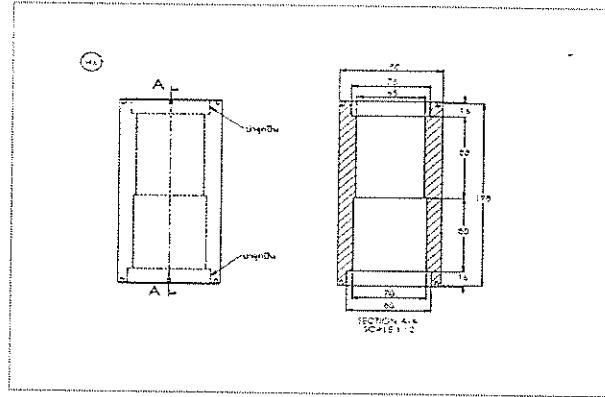
รูปที่ 3.10 แสดงส่วนประกอบชุดหัวจับแกรไฟต์



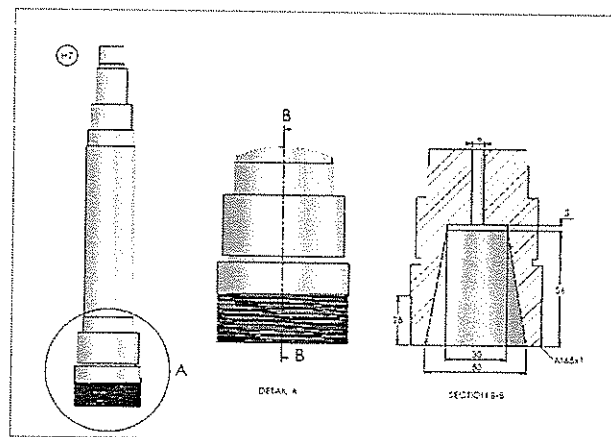
รูปที่ 3.11 ชุดลูกปืน (Bearing) ทั้งหมดที่ใช้ในหัวจับแกรไฟต์



รูปที่ 3.12 แสดงภาพตัดขวางของแกนกลางชุดหัวจับแกรไฟต์

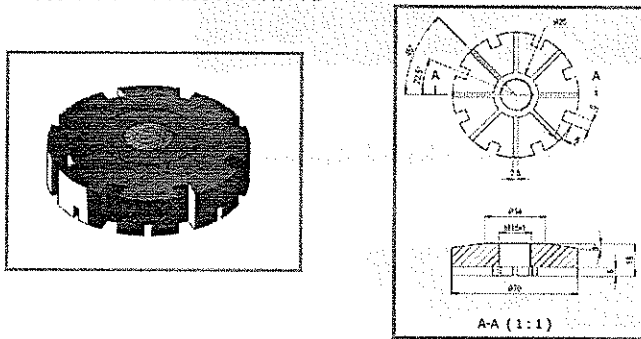


รูป 3.13 แสดงลักษณะภายในของชุดหัวจับแกรไฟต์

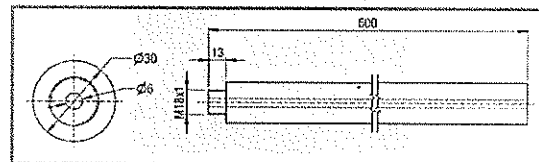


รูป 3.14 แสดงลักษณะของส่วนปลายชุดหัวจับแกรไฟต์

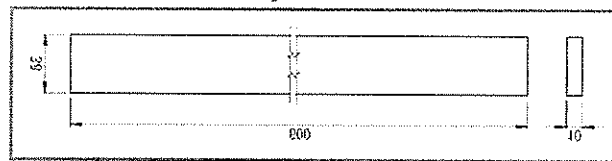
ในส่วนของการผลิตท่อแกรไฟต์และหัว Nozzle นั้นถูกออกแบบให้มีการกระจายตัวของฟองก๊าซอย่างสม่ำเสมอตามแสดงในรูปที่ 3.15 รายละเอียดด้านบนของหัว Nozzle เป็น Slope ทำมุม 8 องศา เพื่อลดแรงดันที่กระทำกับน้ำอะลูมิเนียม ตรงกลางเจาะรูและทำเกลียวใน (M18) สำหรับการประกอบเข้ากับท่อแกรไฟต์ ส่วนด้านล่างทำร่อง Slot กว้าง 2.5 มิลลิเมตร สำหรับให้ก๊าซอาร์กอนไหลผ่านพร้อมกับช่วยตีฟองก๊าซอาร์กอนให้เล็กละเอียดในขณะที่ท่อแกรไฟต์และหัว Nozzle หมุนระหว่างทำการกำจัดก๊าซ ส่วนท่อแกรไฟต์มีรูปทรงเป็นแท่งทรงกระบอกตรงกลางเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เพื่อให้ก๊าซอาร์กอนไหลผ่านลงไปที่หัว Nozzle และที่ปลายด้านล่างทำเกลียวขนาด M18 เพื่อประกอบเข้ากับหัว Nozzle ส่วนปลายด้านบนจะไปต่อเข้ากับหัวจับแกรไฟต์ซึ่งมี Collet เป็นตัวจับยึดท่อแกรไฟต์เอาไว้ นอกจากนี้จะใช้แผ่นแกรไฟต์ยาว 600 มิลลิเมตร กว้าง 38 มิลลิเมตรและหนา 10 มิลลิเมตร ใช้สำหรับประกอบด้านข้างของท่อแกรไฟต์เพื่อช่วยให้ Dross ลอยขึ้นขณะกำจัดก๊าซ



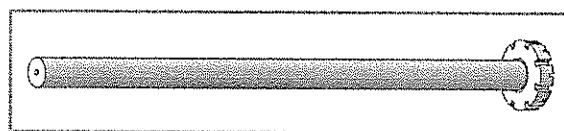
A) Graphite nozzle



B) Graphite shaft



C) Graphite plate

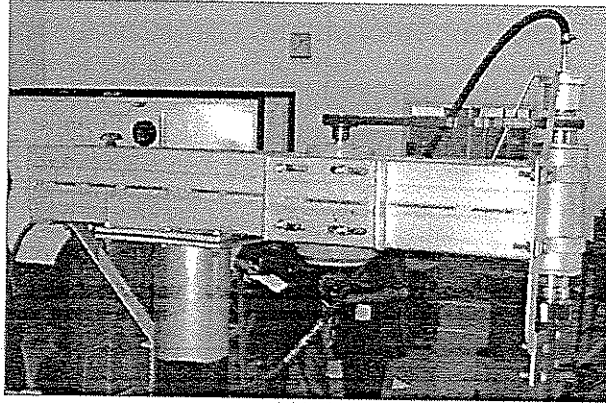


D) Graphite assembly

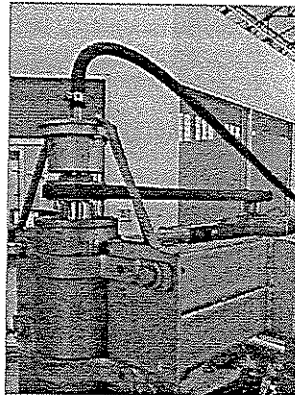
รูปที่ 3.15 แสดงขนาดของหัว Graphite nozzle, graphite shaft และ Graphite plate

### 3.2.5 การประกอบชุดหัวจับแกรไฟต์และชุดควบคุมความเร็วรอบ

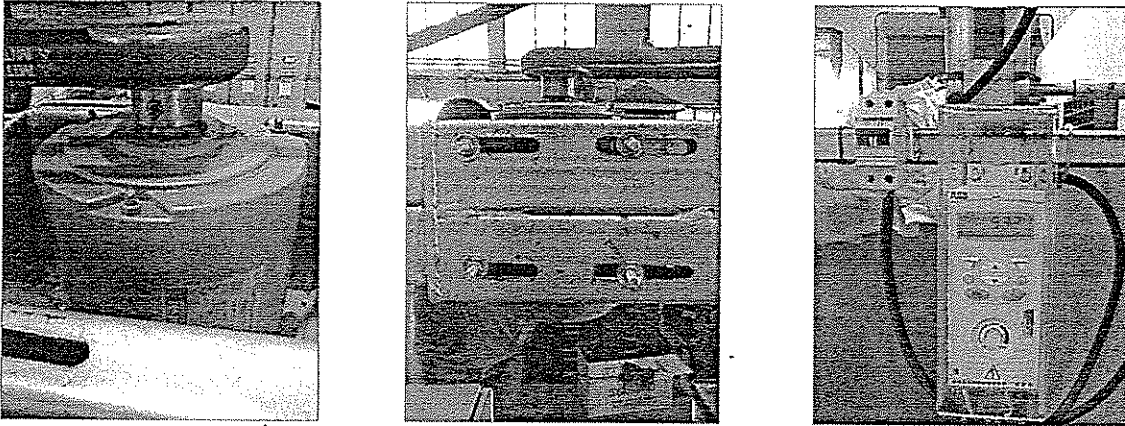
ชุดจับหัวแกรไฟต์จะใช้ประกอบต่อแกรไฟต์เข้ากับสายท่อก๊าซอาร์กอน ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17 และมีสายพานเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนจากระบบมอเตอร์ซึ่งถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมความเร็วรอบ (Controller) ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.16 แสดงการประกอบชุดหัวจับแกรไฟต์เข้ากับแขนของเครื่อง MDU



รูปที่ 3.17 แสดงการต่อสายก๊าซอาร์กอนเข้ากับชุดหัวจับแกรไฟต์



รูปที่ 3.18 แสดงตำแหน่งการติดตั้งของมอเตอร์และชุดควบคุม

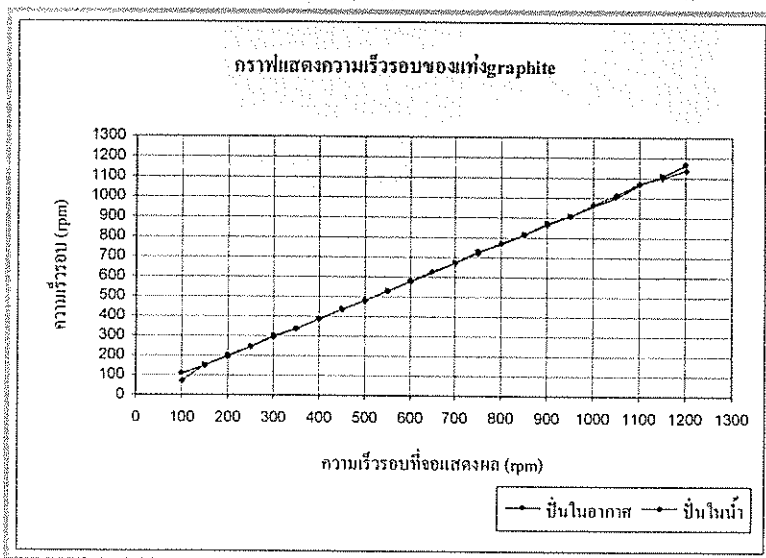
### 3.3 การทดสอบการใช้งานของเครื่อง Mobile Degassing Unit

#### 3.3.1 การทดสอบสภาพทั่วไปของเครื่อง MDU

เมื่อประกอบเครื่อง MDU เสร็จจึงทำการทดสอบการใช้งานทั่วไปของเครื่อง เช่น การเคลื่อนที่ของแขนเลื่อนขึ้น - ลง ตรวจสอบการรั่วของก๊าซบริเวณช่วงรอยต่อต่างๆ เช่น สายท่อก๊าซ และชุดหัวจับท่อแกรไฟต์ ทดสอบความคล่องตัวในการเคลื่อนย้ายเครื่องไปยังเตาหลอมและความปลอดภัยในการใช้งานของเครื่องระหว่างการใช้อย่างจริงจัง จากนั้นทำการทดสอบความเร็วรอบในการปั่นในอากาศและในน้ำเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองปั่นจริงในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว

#### 3.3.2 การตรวจสอบความเร็วรอบของการหมุนท่อแกรไฟต์

ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบจากมอเตอร์และความเร็วรอบของท่อแกรไฟต์ที่หมุนจริงในอากาศและในน้ำ โดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบอินฟราเรด ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความเร็วรอบของท่อแกรไฟต์

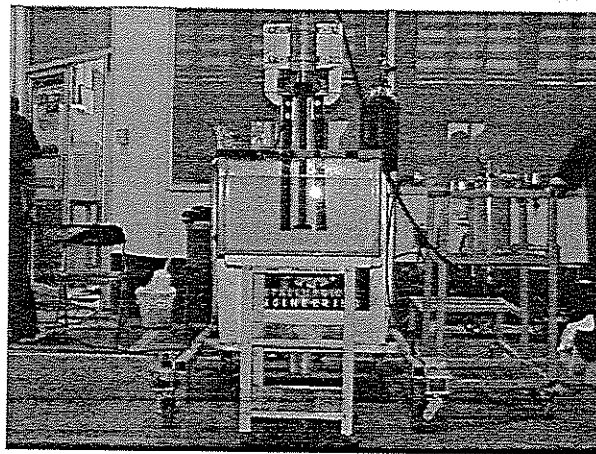
จากผลการทดลองพบว่า ความเร็วรอบของท่อแกรไฟต์ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับตามที่แสดงบนหน้าจอชุดควบคุม และอัตราการปั่นท่อแกรไฟต์ในอากาศและในน้ำ ไม่มีความแตกต่างกันเมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบแบบอินฟราเรด แต่อย่างไรก็ดี หากเปรียบเทียบค่าความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิห้องและน้ำอะลูมิเนียมไหลพบว่าอยู่ในช่วง 1.0-1.4 mPa.s ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลองการปั่นท่อแกรไฟต์ในน้ำสามารถที่นำมาใช้ร่วมกับการตัดสินใจ และการออกแบบการทดลองได้

### 3.3.3 การทดลองปั่นก๊าซอาร์กอนในน้ำ

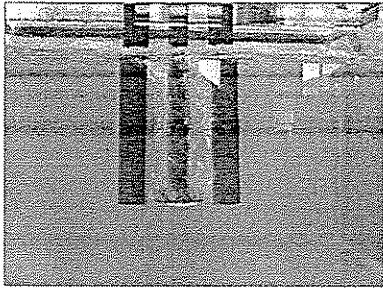
การทดลองปั่นก๊าซอาร์กอนในน้ำเพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอน โดยมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรดังนี้คือ

- ความเร็วรอบการหมุนท่อแกรไฟต์ (250, 500, 750 และ 1000 รอบ/นาที)
- อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (5, 10, 15 และ 20 ลิตร/นาที)

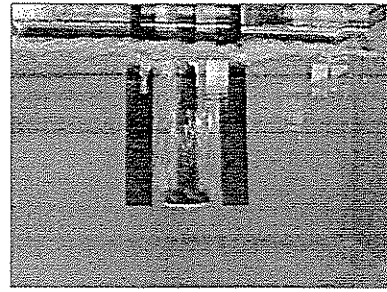
ผลการทดลองปั่นก๊าซอาร์กอนในน้ำแสดงให้เห็นถึงขนาดและการกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนแสดงในรูปที่ 3.20 – 3.21



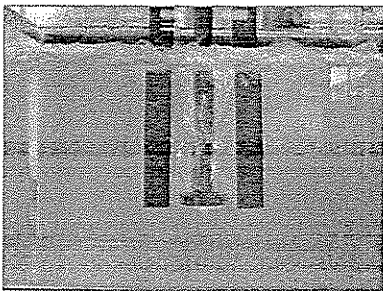
รูปที่ 3.20 ภาพแสดงการทดลองปั่นก๊าซอาร์กอนในน้ำ



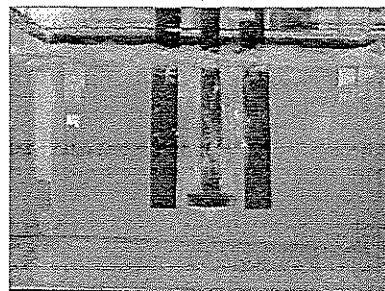
250 rpm, 5 l/min



250 rpm, 10 l/min

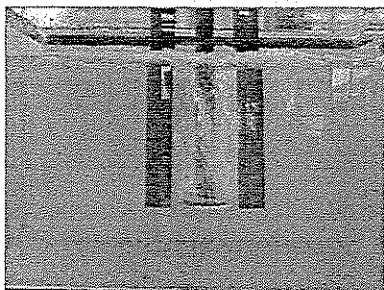


250 rpm, 15 l/min

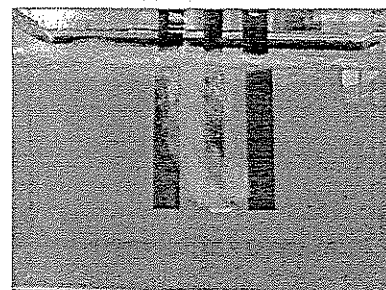


250 rpm, 20 l/min

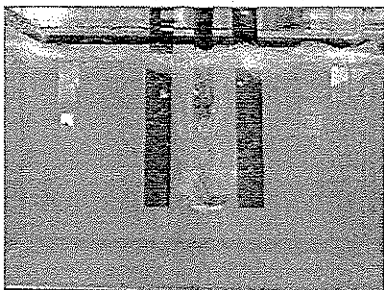
A) การกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆกัน



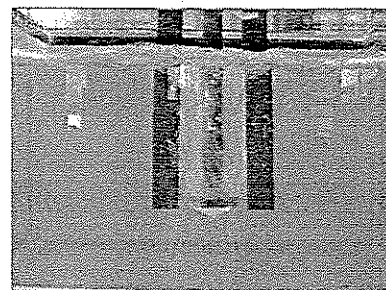
500 rpm, 5 l/min



500 rpm, 10 l/min



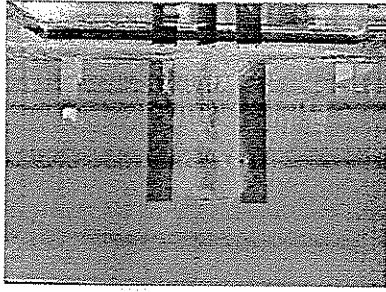
500 rpm, 15 l/min



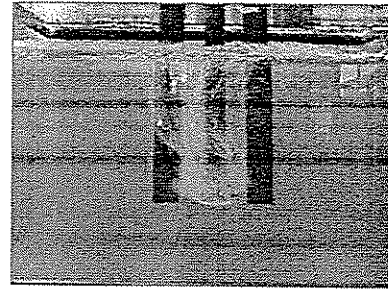
500 rpm, 20 l/min

B) การกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆกัน

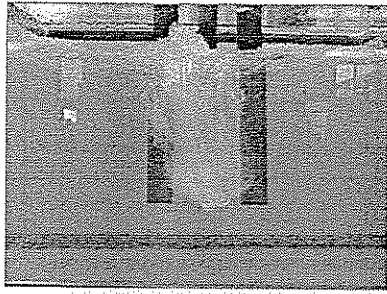




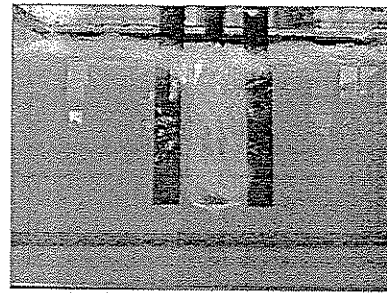
750 rpm, 5 l/min



750 rpm, 10 l/min

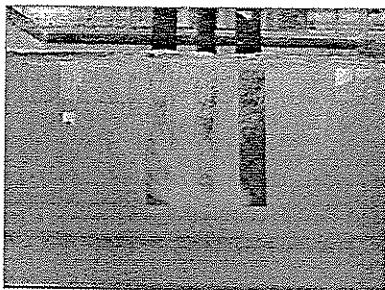


750 rpm, 15 l/min

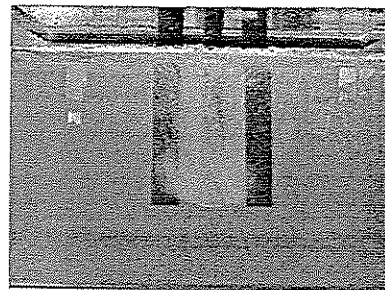


750 rpm, 20 l/min

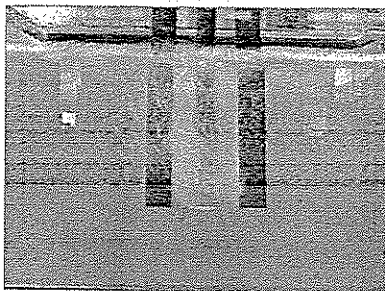
C) การกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆกัน



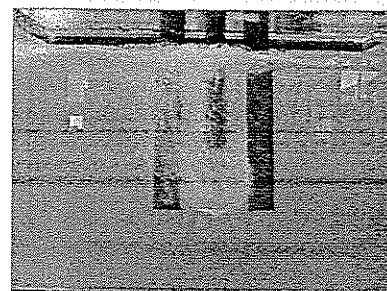
1000 rpm, 5 l/min



1000 rpm, 10 l/min



1000 rpm, 15 l/min



1000 rpm, 20 l/min

D) การกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนที่ความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆกัน

รูปที่ 3.21 A, B, C, D แสดงการตรวจสอบการกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนในน้ำ จากการทดลองพบว่า การปั่นก๊าซอาร์กอนที่ความเร็วรอบต่ำทำให้เกิดฟองของก๊าซอาร์กอนขนาดใหญ่และมีการกระจายตัวของฟองก๊าซน้อยไม่ทั่วถึง อีกทั้งยังทำให้เกิดการปั่นป่วนที่บริเวณผิว

ด้านบนของน้ำดังแสดงในรูปที่ 3.21 A และ B และเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นจะทำให้ฟองก๊าซมีลักษณะที่เล็กละเอียดมากขึ้นและลักษณะการกระจายตัวดีขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.21 C และ D นอกจากนี้ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนมีผลทำให้ลักษณะของการกระจายตัวของฟองก๊าซค่อนข้างรุนแรงตามอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

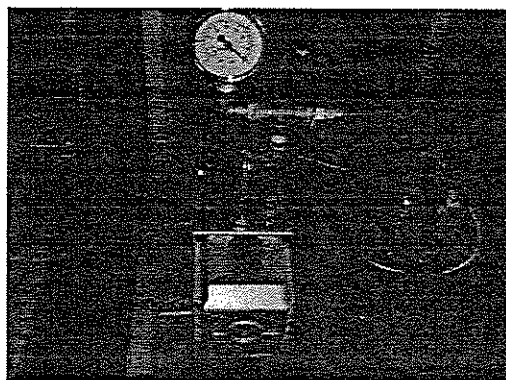
ดังนั้น จากผลการทดลองดังกล่าว เราจึงเลือกใช้ตัวแปรในการกำจัดก๊าซที่ความเร็วยรอบในการปั่นสูง เช่น ที่ 750 และ 1000 รอบ/นาที ซึ่งคาดว่าจะทำให้เกิดการกระจายตัวของฟองก๊าซที่ดี และทดลองใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 5-20 ลิตร/นาที ในการทดลองปั่นในน้ำอะลูมิเนียมหล่อมหลอมเหลว ดังจะกล่าวในบทต่อไป

### 3.4 การสร้างเครื่อง Reduced pressure test (Vacuum test) สำหรับการทดสอบปริมาณรูพรุน

#### พรุน

สำหรับการสร้างเครื่อง Vacuum test เพื่อใช้สำหรับทดสอบปริมาณรูพรุนในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม นั้นได้จัดทำขึ้นเพื่อช่วยในการตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่ โดยเริ่มจากการออกแบบ เตรียมวัสดุ สร้างเครื่องมือและทดสอบการใช้งานดังในรายละเอียดต่อไปนี้

โดยเริ่มตั้งแต่การสร้างฐานเครื่องด้วยเหล็กแผ่นและเหล็กกล่องขนาดประมาณ 40x40 ตารางเซนติเมตร จากนั้นเจาะรูเพื่อติดตั้งแผ่นเหล็กสแตนเลสกลมหนาประมาณ 1 นิ้ว สำหรับติดตั้งครอบแก้วสุญญากาศ พร้อมทั้งติดตั้ง Vacuum gauge ดังแสดงในรูปที่ 3.22 โดยประสิทธิภาพของเครื่องและอุปกรณ์สามารถเกิดสุญญากาศได้ที่ 650 mmHg หรือที่ความดันที่ต่ำกว่าความดันปกติ 650 mmHg



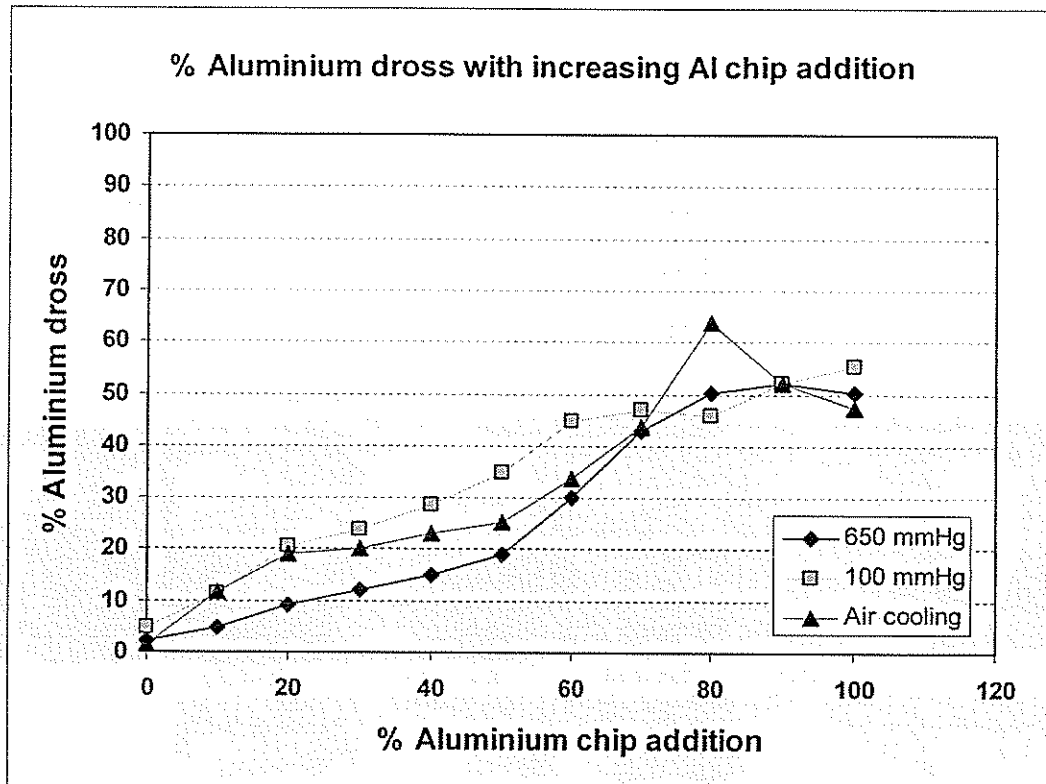
รูปที่ 3.22 เครื่อง Vacuum test สำหรับการทดสอบปริมาณรูพรุน

จากนั้นได้ดำเนินการทดสอบการใช้งานเบื้องต้นของเครื่อง โดยตรวจสอบปริมาณรูพรุนของชิ้นงานเมื่อทำการหลอมอะลูมิเนียมอินกอตผสมกับเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียมในอัตราส่วนต่างๆกันดังแสดงในตารางที่ 3.1 เนื่องจากความชื้นที่สะสมอยู่ในเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียมเป็นแหล่งที่มาของไฮโดรเจน โดยทำการหลอมวัตถุดิบน้ำหนักประมาณ 250 กรัม ในเบ้าเซรามิก (Ceramic crucible) ที่อุณหภูมิ 850°C โดยใช้เตาอบไฟฟ้าขดลวดความต้านทาน จากนั้นทำการกำจัด Aluminium dross ออกแล้วชั่งน้ำหนักก่อนการทำให้เย็นตัวในอากาศเปรียบเทียบกับการเย็นตัวในระบบสุญญากาศที่ 650 mmHg (ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศปกติ 650 mmHg) ด้วยเครื่อง Vacuum apparatus เพื่อตรวจสอบปริมาณรูพรุน โดยเทน้ำโลหะใส่ในเบ้าเหล็กกล้า (Steel crucible) ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ที่สุญญากาศ 100 mmHg และ 650 mmHg ตามลำดับ จากนั้น ชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน ถ่ายรูปชิ้นงาน ผ่าครึ่งแล้วทำการขีดด้วยกระดาษทรายเพื่อเผยให้เห็นขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นงาน

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียมจาก 0-100% เดิมเข้าไปในอะลูมิเนียมอินกอต พบว่า มีปริมาณ Aluminium dross เพิ่มขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.23 โดยเมื่อใช้อะลูมิเนียมอินกอต 100% จะทำให้เกิด Aluminium dross ประมาณ 2% และเมื่อใช้ เศษขี้กิ้งอะลูมิเนียม 100% จะให้ Aluminium dross ประมาณ 50%

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างปริมาณการเติมเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียมและเปอร์เซ็นต์ของ Aluminium dross

Aluminium Ingot (%)	Aluminium Chip (%)	น้ำหนัก Aluminium Ingot (g)	น้ำหนัก Aluminium Chip(g)	น้ำหนัก Dross (g)	น้ำหนัก Dross (%)
100	0	250	0	5.47	2.19
90	10	225	25	11.67	4.67
80	20	200	50	23.31	9.32
70	30	175	75	30.64	12.26
60	40	150	100	37.89	15.16
50	50	125	125	48.01	19.20
40	60	100	150	75.56	30.22
30	70	75	175	107.35	42.94
20	80	50	200	125.57	50.23
10	90	25	225	130.24	52.10
0	100	0	250	125.06	50.02



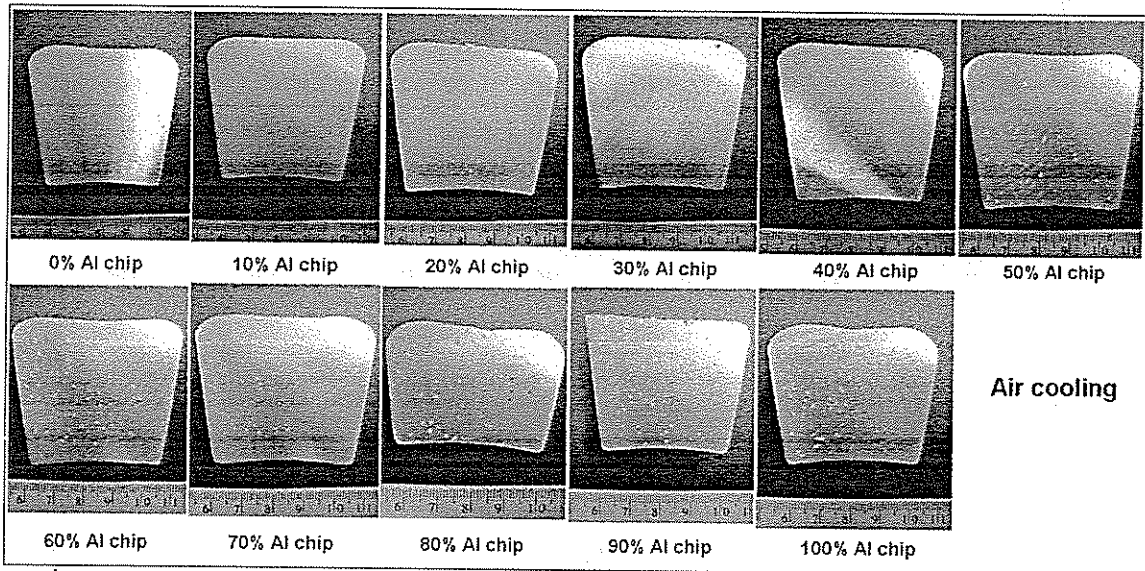
รูปที่ 3.23 แสดงปริมาณ % Aluminium dross กับปริมาณ % Aluminium chip addition

ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุนที่พบในชิ้นงานหล่อแสดงดังรูปที่ 3.24-3.26 พบว่า เมื่อทำให้ชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อใส่ปริมาณเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นและเป็นผลทำให้เกิด Aluminium dross มากขึ้นอีกด้วย แม้ว่า จะทำการหลอมอะลูมิเนียมอินกอตเพียงอย่างเดียวก็ทำให้เกิดปริมาณรูพรุนจำนวนหนึ่งเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ดี ปริมาณรูพรุนที่สังเกตเห็นนั้น จะสังเกตเห็นได้จาก เนื่องจากมีขนาดเล็ก และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่อที่แข็งตัวในสุญญากาศที่ 100 mmHg นั้น ให้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างจากการเย็นตัวในบรรยากาศปกติเท่าไรนัก

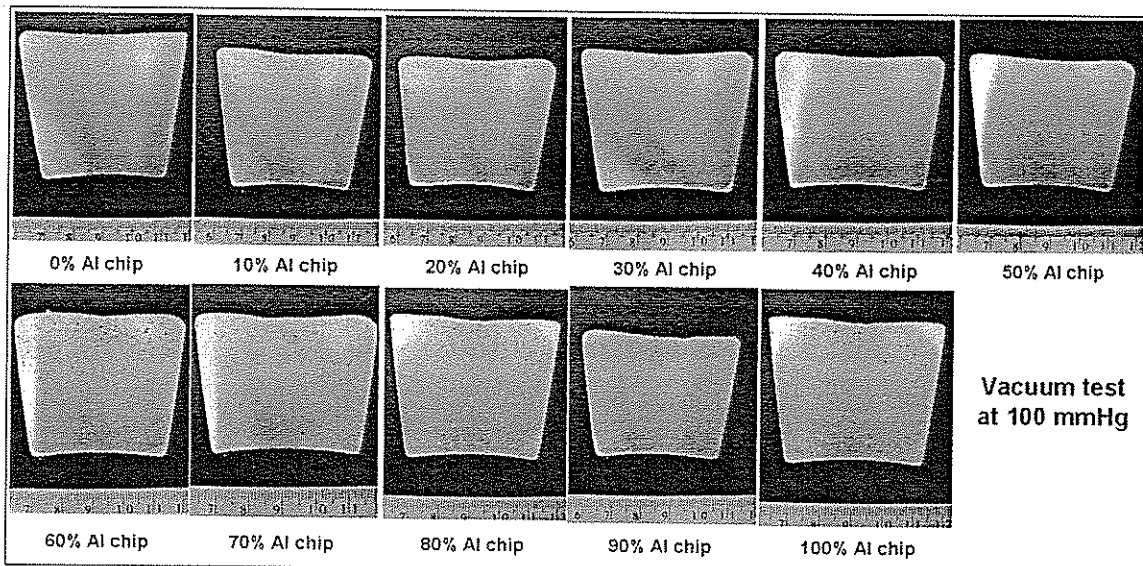
แต่เมื่อทำการทดลองหล่อชิ้นงานแล้วปล่อยให้เย็นตัวในสุญญากาศที่ 650 mmHg จะพบว่า ผิวหน้าของชิ้นงานฟูขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและขนาดของรูพรุนถูกขยายใหญ่ขึ้นมาก เมื่อสังเกตชิ้นงานที่หล่อด้วยอะลูมิเนียมอินกอต 100% จะพบปริมาณรูพรุนน้อยที่สุดและรูพรุนมีขนาดเล็ก ยกเว้นบริเวณด้านบนของชิ้นงานหล่อซึ่งน่าจะมาจากการรวมตัวของฟองก๊าซไฮโดรเจนในระหว่างการแข็งตัวและไม่สามารถถูกกำจัดออกได้ทัน และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียมพบว่าขนาดของรูพรุนขยายใหญ่ขึ้นตามลำดับ

รูปที่ 3.27 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อที่มีการเติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมจาก 0-100% ลงในอะลูมิเนียมอินกอต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งลดลงเมื่อปริมาณเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ซึ่งก็สอดคล้องกับปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

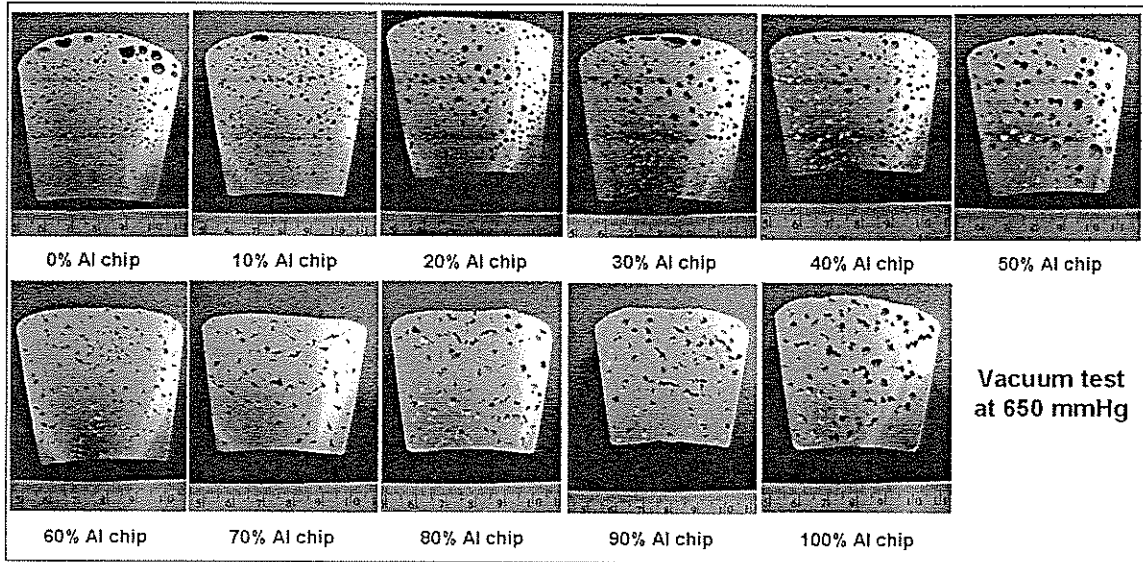
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เครื่องทดสอบปริมาณรูพรุนสามารถใช้ในการตรวจสอบปริมาณรูพรุนที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนได้ โดยที่ระดับของสถานะสุญญากาศมีผลกระทบต่อขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้น การทดลองที่ 100 mmHg จะให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันกับการเข็นตัวในสภาวะปกติ แต่ที่สภาวะ 650 mmHg สามารถทำให้สังเกตปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนมากขึ้น



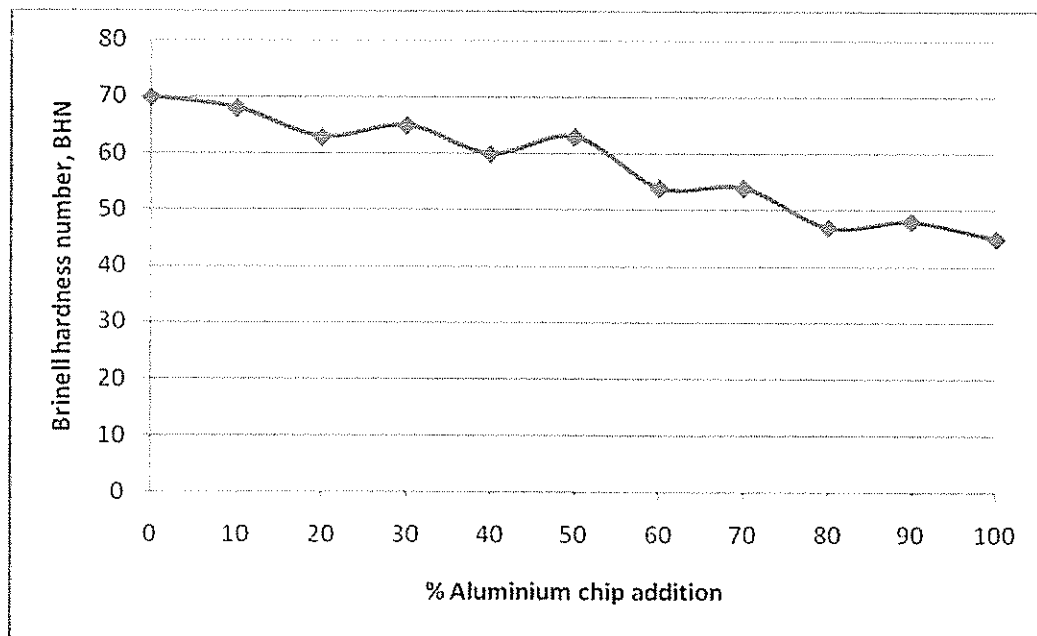
รูปที่ 3.24 แสดงปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อที่เติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมปริมาณแตกต่างกัน (เข็นตัวในบรรยากาศปกติ)



รูปที่ 3.25 แสดงปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อที่เติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมปริมาณแตกต่างกัน (เข็นตัวในสุญญากาศที่ 100 mmHg)



รูปที่ 3.26 แสดงปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อที่เติมเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียมปริมาณแตกต่างกัน (เย็นตัวในสุญญากาศที่ 650 mmHg)



รูปที่ 3.27 แสดงค่าความแข็งในชิ้นงานหล่อที่เติมเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียมปริมาณแตกต่างกัน (เย็นตัวในสุญญากาศที่ 100 mmHg)

## บทที่ 4

### การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Hydrogen Degassing in Aluminium Melt)

การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวก่อนการเทแบบ โดยใช้เครื่องกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่ (Mobile Degassing Unit: MDU) ที่ได้สร้างขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ กระบวนการทดลองเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการหล่อ กระบวนการกำจัดก๊าซ การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การตรวจสอบปริมาณรูพรุน การตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ รวมถึงการทดสอบสมบัติเชิงกล คือ การทดสอบความแข็งและความแข็งแรงดึง เป็นต้น โดยในบทนี้จะแบ่งการทดลองเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 การทดลองกำจัดก๊าซด้วยเครื่อง MDU และส่วนที่ 2 การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซของเครื่อง MDU โดยใช้ร่วมกับการฉีดฟลักซ์ ดังนี้

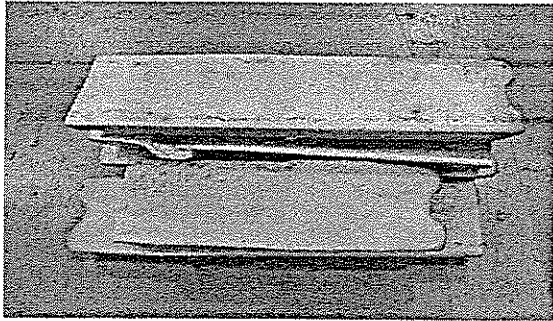
#### ส่วนที่ 1 การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่อง MDU

##### 4.1 การเตรียมวัตถุดิบ (Material Preparation)

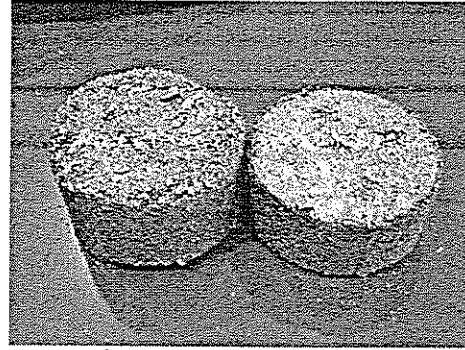
วัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมอินกอตเกรด 356 และเศษชิ้นกึ่งอะลูมิเนียม โดยวัตถุดิบดังกล่าวจะถูกนำมาตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Spark Emission Spectro Analyzer ซึ่งมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับเศษชิ้นกึ่งอะลูมิเนียมนั้นจะมีความชื้นและสิ่งเจือปนผสมอยู่ โดยจะใช้เติมในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีสถานะใกล้เคียงกับการหล่อจริงในภาคอุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดการละลายของก๊าซไฮโดรเจน

ตารางที่ 4.1: แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการหล่อ (โดยน้ำหนัก)

Element	Aluminium 356 Ingot	Aluminium chip
Al	89.15	90.143
Si	8.15	7.993
Cu	0.904	1.258
Fe	0.768	0.341
Zn	0.158	0.059
Ni	0.059	0.059
Mg	0.430	0.030
Cr	0.037	0.006
Mn	0.180	0.026
Pb	0.098	0.011
Sn	0.069	0.002



รูปที่ 4.1 อะลูมิเนียมอินกอตเกรด 356

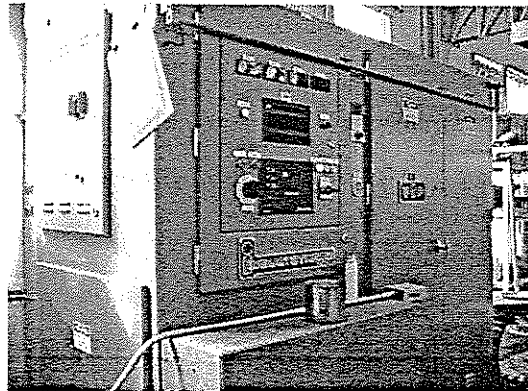


รูปที่ 4.2 เศษซีกลิ้งอะลูมิเนียม

## 4.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้

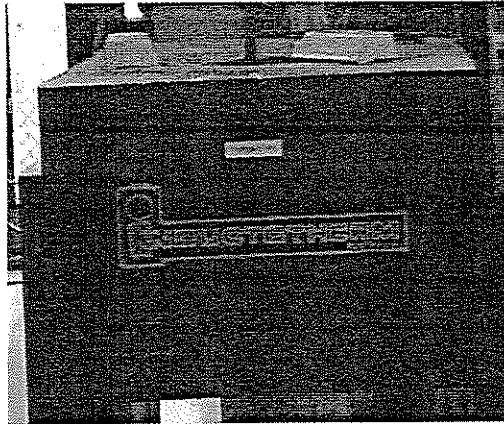
### 4.2.1 เตาหลอมไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)

การหลอมอะลูมิเนียม ในเบ้าหลอมเซรามิกขนาดความจุ 40 กิโลกรัม กระทำในเตาหลอมไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) ดังแสดงในรูปที่ 4.3–4.4 กำลัง 20-30 กิโลวัตต์ ความถี่ 1000 เฮิร์ต โดยจะหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส โดยในการทดลองจะทำการหลอมอะลูมิเนียมประมาณ 15-20 กิโลกรัม



รูปที่ 4.3 แผงควบคุมเตาหลอมไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)

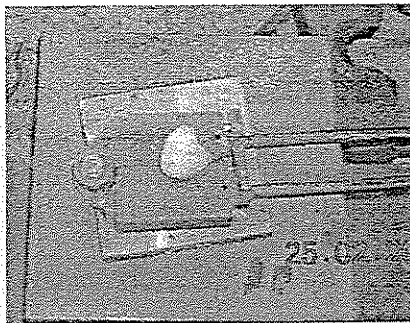




รูปที่ 4.4 เตาหลอมไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)

#### 4.2.2 Chill test

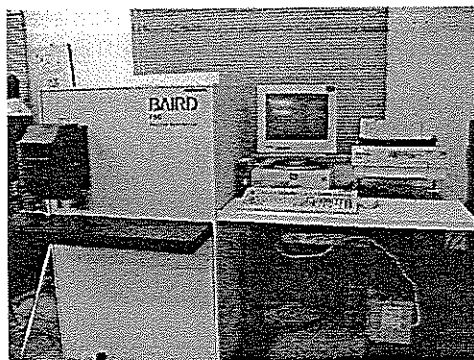
ใช้สำหรับการเตรียมชิ้นงานในการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Spark Emission Spectro Analyser ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 Chill test สำหรับหล่อชิ้นงานทดสอบ Spark Emission Spectro Analyser

#### 4.2.3 เครื่อง Spark Emission Spectro Analyser

ใช้สำหรับตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานหล่อ



รูปที่ 4.6 ภาพเครื่อง Spark Emission Spectro Analyser

#### 4.2.4 เครื่องขัดหยาบ

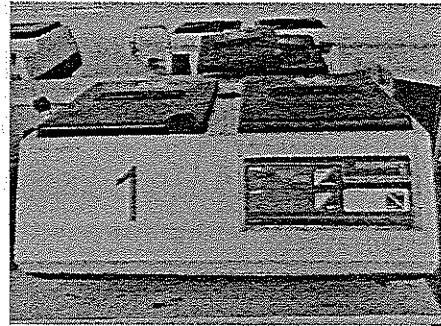
ใช้สำหรับการปรับระนาบชิ้นงาน Chill test, เตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ตรวจสอบปริมาณรูพรุนและชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง



รูปที่ 4.7 ภาพเครื่องขัดหยาบ

#### 4.2.5 เครื่องขัดกระดาษทราย

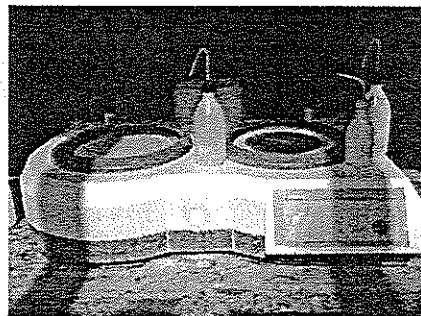
ใช้ทำการขัดหยาบและขัดละเอียดผิวหน้าของชิ้นทดสอบ (Grinding and polishing) ก่อนนำไปขัดด้วยเครื่องขัดผ้าสักหลาดต่อไป เริ่มขัดตั้งแต่กระดาษทรายเบอร์ 100 180 320 จนถึง 2000



รูปที่ 4.8 ภาพเครื่องขัดกระดาษทราย

#### 4.2.6 เครื่องขัดผ้าสักหลาด

ใช้สำหรับขัดละเอียดหลังจากการขัดด้วยเครื่องขัดกระดาษทราย โดยใช้ผงอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน ขัดบนผ้าสักหลาดเพื่อให้ได้ผิวหน้าที่เรียบเงา จากนั้นจากนั้นกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคต่อไป



รูปที่ 4.9 ภาพเครื่องขัดผ้าสักหลาด

#### 4.2.7 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ใช้ตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม(356) ที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.10 ภาพกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

#### 4.2.8 จุลทรรศน์แบบแสงและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพ

ใช้สำหรับบันทึกภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคในแต่ละกำลังขยาย



รูปที่ 4.11 ภาพกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพ

#### 4.3 การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ Mobile Degassing Unit (MDU)

ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะอะลูมิเนียม สามารถแบ่งสภาวะการทดลองเป็น 7 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะมีการผสมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมในการหลอม 20 % ทั้งนี้ เพื่อให้ผลของการกำจัดก๊าซแสดงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่อง MDU นั้น ประกอบไปด้วยตัวแปร 3 ตัวด้วยกัน คือ

- 1) อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (gas flow rate, l/min)
- 2) อัตราการปั่นท้อแกรไฟต์ (Rotational speed, rpm)
- 3) ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ (Degassing time, min)

ตารางที่ 4.2: สภาวะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว

Melt	Materials (%) for 20 kg melt		Gas flow rate	Rotational Speed	Degassing Time
	Aluminium Ingot 356	Aluminium Chip	(l/min)	(rpm)	(min)
M1	100	-	-	-	-
M2	80	20	-	-	-
M3	80	20	5	1000	10
M4	80	20	10	1000	10
M5	80	20	10	1000	20
M6	80	20	15	1000	5
M7	80	20	10	750	10

ทำการหลอมอะลูมิเนียมอินกอตและเศษขี้กถึงอะลูมิเนียมตามส่วนผสมที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 โดยใช้เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่อุณหภูมิหลอมประมาณ 850-900°C



รูปที่ 4.12 ภาพการหลอม Aluminium Ingot และ Aluminium scrap ด้วยเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

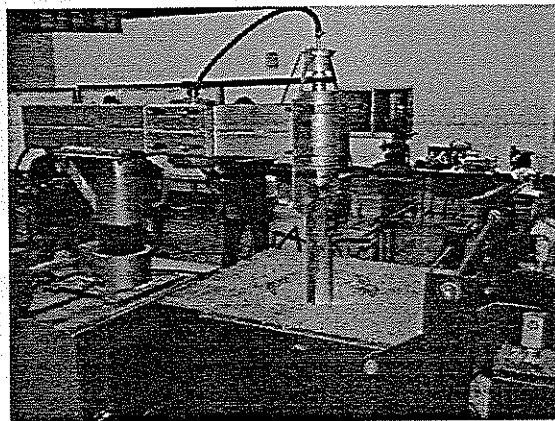
จากนั้นตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยใช้เครื่อง Spark Emission Spectro Analyser และควบคุมปริมาณของซิลิคอนให้อยู่ในช่วง 6.5-7.5 % ทำการตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะด้วย Thermocouple ก่อนเริ่มต้นกระบวนการกำจัดก๊าซ โดยควบคุมอุณหภูมิ

ก่อนการกำจัดก๊าซให้อยู่ในช่วง 850-870 °C เนื่องจากจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิของน้ำโลหะที่สูงในระหว่างการเทน้ำโลหะออกจากเตาหลอมลงสู่เบ้าเทก่อนทำการเทลงแบบพิมพ์โลหะ เพราะมีการสูญเสียความร้อน และในการทดลองนี้จะไม่มีกระบวนการปรับเกรนละเอียดและการปรับรูปทรงพื้นฐานของโครงสร้างยูเทคติกก่อนการเทแบบ ทั้งนี้ เพื่อเป็นการทดสอบผลกระทบของการกำจัดก๊าซเพียงอย่างเดียว



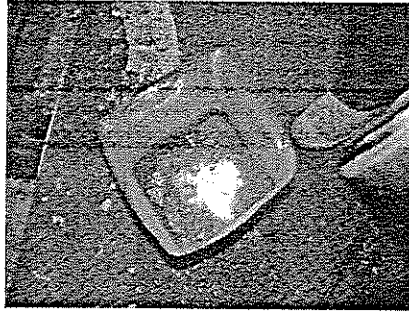
รูปที่ 4.13 การวัดอุณหภูมิเตาด้วย Thermocouple

เมื่อควบคุมส่วนผสมและอุณหภูมิตามที่ต้องการแล้ว จะทำการกำจัดก๊าซด้วยเครื่อง MDU ที่สร้างขึ้นตามสภาวะการทดลองต่างๆ ที่กำหนด โดยกำจัดก๊าซในเตาหลอมที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 850-870°C



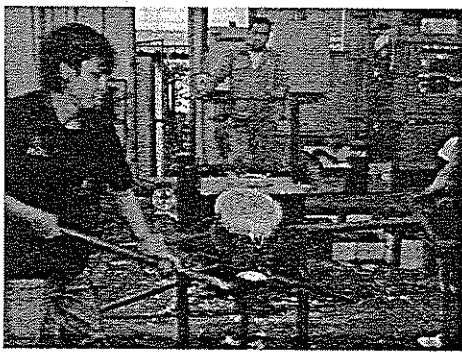
รูปที่ 4.14 ภาพการปั่นด้วยก๊าซอาร์กอนโดยใช้เครื่อง Mobile Degassing Unit (MDU)

เมื่อทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนตามที่กำหนดแล้วจะทำการกำจัด Dross ออกจากน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อเตรียมพร้อมก่อนการเทลงแบบ

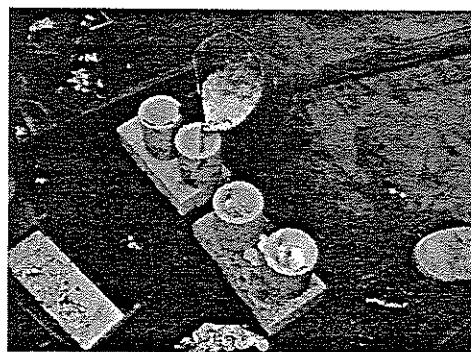


รูปที่ 4.15 แสดง Dross ที่ตักออกจากเตาหลอม

ในขั้นตอนการเทแบบ จะควบคุมอุณหภูมิก่อนการเทให้อยู่ในช่วง  $750-770^{\circ}\text{C}$  ทำการถ่ายน้ำโลหะลงในเบ้าเท (Ladle) แล้วเทลงในเบ้าหล่อเซรามิกขนาดเล็ก (เพื่อใช้ในการตรวจสอบปริมาณรูพรุนโดยการผ่าครึ่งชิ้นงาน) สำหรับการทดลองที่มีการเติมฟลักซ์ได้มีการพัฒนาการทดสอบแบบ Reduced pressure test (ดูหัวข้อ 5.9) โดยหล่ออะลูมิเนียมในเบ้าเซรามิกและเย็นตัวในสุญญากาศ จากนั้นเทน้ำโลหะลงแม่พิมพ์โลหะ (Permanent Mould) ที่มีการเทน้ำโลหะจากด้านบนจำนวน 6 แบบ เพื่อใช้ตรวจสอบความหนาแน่น โครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็ง ส่วนชิ้นงานที่หล่อจากแม่พิมพ์โลหะ (Permanent Mould) ที่ออกแบบให้มีการไหลของน้ำโลหะจากด้านล่างตามมาตรฐาน ASTM 392-B108 จำนวน 3 แบบ นั้นจะใช้สำหรับทดสอบสมบัติแรงดึง โดยทำการถอดแบบภายในเวลา 1 นาทีหลังการเท หลังจากทำการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว ตรวจสอบสภาพเครื่อง MDU ภายหลังการใช้งานให้อยู่ในสภาพพร้อมสำหรับการใช้งานครั้งต่อไป



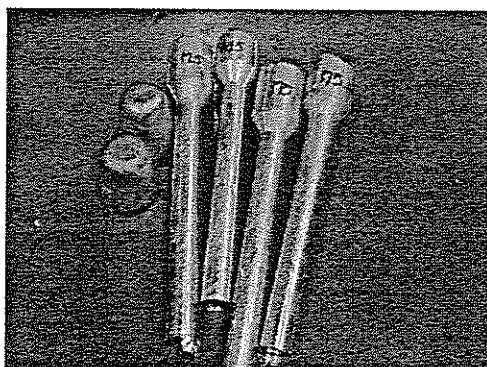
รูปที่ 4.16 การถ่ายน้ำโลหะลงในเบ้าโลหะเล็ก



รูปที่ 4.17 การเทน้ำอะลูมิเนียมลง Ceramic crucible



รูปที่ 4.18 การเทน้ำโลหะลง แม่พิมพ์โลหะ



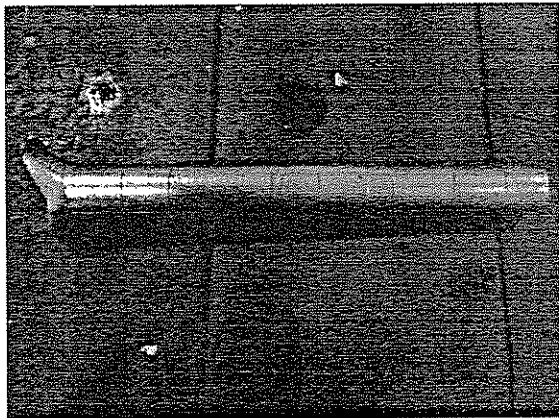
รูปที่ 4.19 ชิ้นงานภายหลังการหล่อ



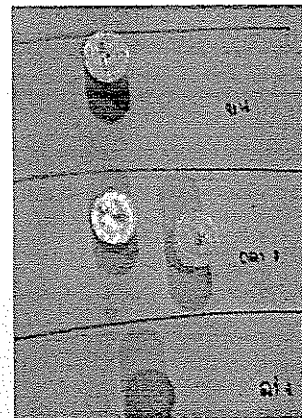
รูปที่ 4.20 แสดงสภาพของแท่งแกรไฟต์ภายหลังการกำจัดก๊าซ

#### 4.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ตัดชิ้นงานหล่อที่ตำแหน่งส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง โดยกำหนดให้ส่วนบนและส่วนล่างของชิ้นงานจะมีระยะห่างจากด้านปลายสุดชิ้นงานประมาณ 1.5 ซม. จากนั้นตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดความหนา 2.5 ซม. ทั้งสามชิ้นโดยใช้เลื่อยไฟฟ้าดังแสดงในรูป 4.21



รูปที่ 4.21A ภาพชิ้นงานก่อนตัด

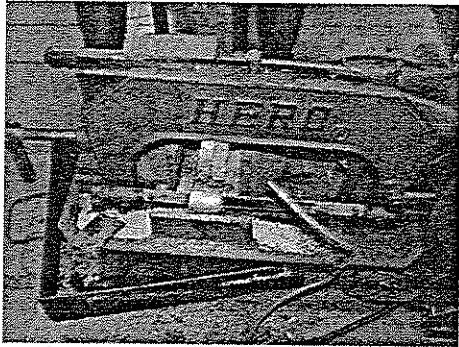


รูปที่ 4.21B ภาพชิ้นงานหลังตัด

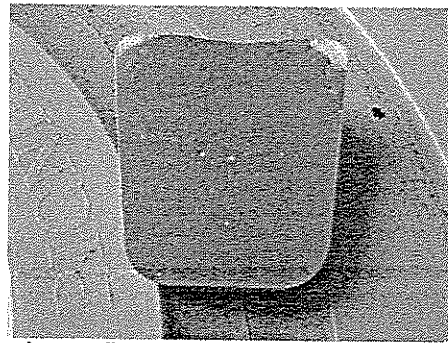
จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ 100 ถึงเบอร์ 1,200 แล้วนำไปขัดละเอียดด้วยผ้าสักหลาดและผงเพชร นำไปกัดด้วยกรดกรดไฮโดรฟลูออริกโดยจะจุ่มแช่ไว้ประมาณ 30 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นตามด้วยแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้ง เพื่อนำไปตรวจสอบ โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพโดยถ่ายบริเวณด้านบน กลางและส่วนล่างของชิ้นงาน ทำการถ่ายภาพที่กำลังขยาย 100, 200, 300, 400, 500 และ 1000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

#### 4.5 การตรวจสอบรูพรุน (Porosity) ทางกายภาพ

ผ่าเครื่องชิ้นงานที่หล่อด้วยเครื่องตัดอัตโนมัติ แล้วนำชิ้นงานไปปรับระนาบด้วยเครื่องขัดหยาบโดยเครื่องขัดกระดาษทรายเบอร์ 100, 180, 320, 600 และ 800 ตามลำดับ ถ้างด้วยแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้งจากนั้นถ้ำยรูปบันทึกเพื่อเก็บข้อมูล



รูปที่ 4.22 ผ่าเครื่องชิ้นงานด้วยเครื่องตัดอัตโนมัติ



รูปที่ 4.23 ชิ้นงานที่พร้อมตรวจสอบรูพรุน

#### 4.6 การตรวจสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน (Density Measurement)

ชิ้นงานที่ถูกตัดจากบริเวณส่วนบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่อ จะถูกนำมาตรวจสอบค่าความหนาแน่นโดยใช้หลักการของ Archimedes โดยทำการชั่งน้ำหนักในอากาศ และชั่งน้ำหนักในน้ำ ด้วยเครื่อง Density Determination Kit ดังแสดงในรูปที่ 4.24 คำนวณหาค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 1



รูปที่ 4.24 การตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ

$$\text{Sample Density} = (\text{Sample weight} / \text{Sample buoyancy}) \times \text{Density of the test liquid} \quad \dots \text{Eq. (1)}$$

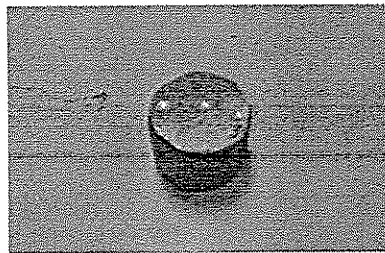


ตารางที่ 4.3: Density of water at various temperatures (14-35°C)

Temperature (Degrees Celsius)	Density (g/ml)	Temperature (Degree Celsius)	Density (g/ml)
14	0.9993	25	0.9971
15	0.9991	26	0.9968
16	0.9990	27	0.9965
17	0.9988	28	0.9963
18	0.9986	29	0.9960
19	0.9984	30	0.9957
20	0.9982	31	0.9954
21	0.9980	32	0.9950
22	0.9978	33	0.9947
23	0.9976	34	0.9944
24	0.9973	35	0.9941

#### 4.7 การทดสอบความแข็ง (Brinell hardness)

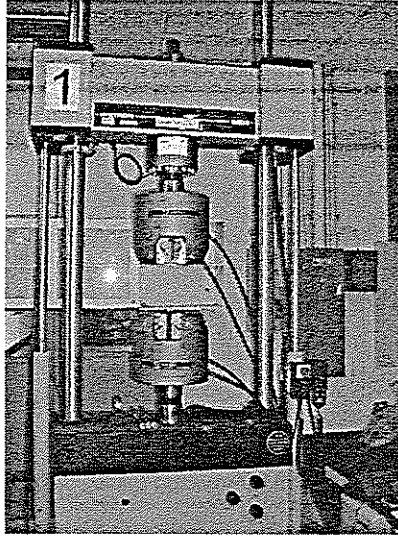
นำชิ้นงานหล่อที่ตัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วยส่วนบน ส่วนกลางและด้านล่างของชิ้นงานทำการปรับระนาบด้วยเครื่องขัดหยาบ จากนั้นทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Brinell Hardness Testing Machine ใช้ค้ำโหลดในการวัดเท่ากับ 500 kgf. โดยในชิ้นงาน 1 ชิ้นจะทำการวัด 3 ตำแหน่งของชิ้นงานจากบริเวณขอบ ใจกลาง และขอบอีกด้านหนึ่งของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.25 นำค่าความแข็งที่ทดสอบได้มาหาค่าเฉลี่ย และสร้างเป็นกราฟเพื่อแสดงผลเปรียบเทียบค่าความแข็งในแต่ละสถานะการทดลองของการกำจัดก๊าซพร้อมแสดงผลในรูปของกราฟ



รูปที่ 4.25 ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Brinell Hardness Testing Machine

#### 4.8 การทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile testing)

นำชิ้นงานหล่อจากแม่พิมพ์โลหะสำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึง ไปทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron 8803) ดังในรูปที่ 4.26 โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องและใช้ Cross head displacement ที่ 5 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 4.26 การทดสอบสมบัติแรงดึงโดยใช้เครื่อง Instron 8803 Universal Testing Machine

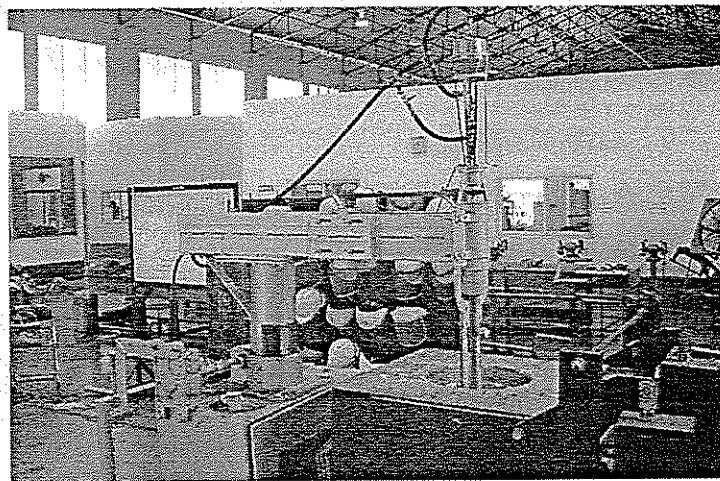
#### 4.9 ตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก (Fractographic examination)

นำชิ้นงานหล่อที่ผ่านการทดสอบสมบัติแรงดึงมาตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก ด้วยกล้อง Stereoscope และ Scanning electron microscope (SEM) พร้อม Energy dispersive spectroscopy (EDS)

## ส่วนที่ 2 การเพิ่มประสิทธิภาพกำจัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่อง MDU โดยใช้ร่วมกับการฉีดฟลักซ์

การปรับปรุงพัฒนาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน ในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวก่อนการเทแบบ โดยใช้เครื่องกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่ MDU ที่ได้สร้างขึ้นร่วมกับการฉีดฟลักซ์ เพื่อลดปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อรวมทั้งทำความสะอาดน้ำโลหะในเวลาเดียวกัน โดยเลือกทดลองฉีดฟลักซ์ที่เป็นผงและเป็นเม็ด (Powder and granular fluxes) กระบวนการทดลองเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการหล่อ กระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีด ฟลักซ์ การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การตรวจสอบปริมาณรูพรุนด้วยเครื่องสุญญากาศ การตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ รวมถึงการทดสอบสมบัติเชิงกล คือ การทดสอบความแข็งและความแข็งแรงแรงดึง เป็นต้น

โดยในรายละเอียดของวิธีการทดลองนั้นเหมือนกับที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1-4.8 หากแต่มีความแตกต่างกันในเรื่องของอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซนั้นมีการผสมผสานการฉีดฟลักซ์ซึ่งเรียกว่า Flux Injection Degassing Unit (FIDU) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ส่วนฟลักซ์ที่ใช้ในการฉีดนั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ฟลักซ์ชนิดผง (Powder flux) และ ฟลักซ์ชนิดเม็ด (Granular flux) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 a)-b)



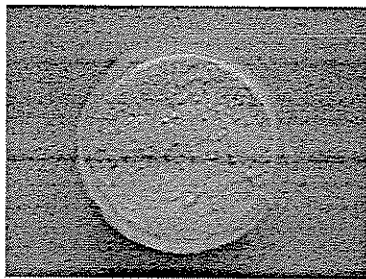
รูปที่ 4.27 แสดงการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์

โดยทำการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ในสภาวะการทดลองต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ที่อุณหภูมิ 850-870°C จากนั้นทำการกำจัด Aluminium dross วัตถุดิบน้ำโลหะโดยใช้ Thermocouple ทำการตรวจสอบปริมาณรูพรุนโดยใช้เครื่องมือ Vacuum apparatus ที่บรรยากาศสุญญากาศ 650 mmHg เปรียบเทียบกับการทดสอบให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นทำการเทน้ำโลหะ

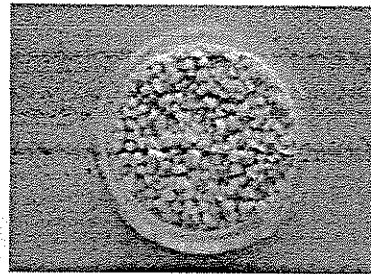
ออกจากเบ้าหลอมลงสู่เบ้าเท วัสดุอุณหภูมิน้ำโลหะอีกครั้งและควบคุมให้อยู่ในช่วง 750-770°C แล้ว  
เทลงแบบโลหะที่เตรียมไว้ ทำการแกะแบบและตรวจสอบชิ้นงานต่อไป

ตารางที่ 4.4: สภาพที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์

Melt	Starting material		Flux type	Flux content	Gas flow rate	Rotational Speed	Degassing time
	Al 356 ingot	Al chip		(%)	(rpm)	(min)	(min)
MDFT01	80	20	-	-	-	-	
MDFT02	80	20	Powder	0.25	10	1000	10
MDFT03	80	20	Powder	0.25	10	1000	20
MDFT04	80	20	Granular	0.125	10	1000	20
MDFT05	80	20	Granular	0.125	10	1000	10



a) Powder flux



b) Granular flux

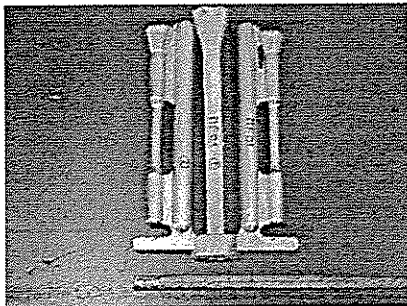
รูปที่ 4.28 แสดงฟลักซ์ชนิดผงและฟลักซ์ชนิดเม็ด



a) เหน้าโลหะลง Steel crucible ก่อนเข็นตัวในสุญญากาศ b) เปรียบเทียบชิ้นงานเข็นตัวใน vacuum (ขวา) และในอากาศ (ซ้าย)

รูปที่ 4.29 แสดงการตรวจสอบปริมาณรูพรุนโดยวิธี Vacuum test

จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ปริมาตรรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและความแข็งแรงแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่หล่อได้ ภายหลังจากการทดสอบกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ พร้อมเปรียบเทียบผลการทดลองกับชิ้นงานหล่อที่ไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซและชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.30 แสดงชิ้นงานหล่อสำหรับทดสอบสมบัติแรงดึง

โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายไบมิตซึ่งมีส่วนผสมของ  $Al_5FeSi$  และ โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายอักษรจีน หรือ Chinese scrip ในบางบริเวณอาจเฟสของซิลิกอนที่มีโครงสร้างเป็นเหลี่ยม

ตารางที่ 5.1 แสดงปริมาณธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมทั้ง 7 สภาวะการทดลอง

Element	Alloy 356	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Al	90.650	79.970	89.730	87.680	90.550	87.980	87.170	87.610
Si	6.5-7.5	7.930	7.980	7.170	7.380	6.520	7.750	7.200
Cu	0.250	1.231	1.218	1.960	1.248	1.737	1.859	1.892
Fe	0.600	0.390	0.433	1.660	0.351	1.884	1.592	1.744
Zn	0.350	0.054	0.056	0.226	0.056	0.260	0.259	0.230
Ni	-	0.029	0.029	0.106	0.029	0.105	0.103	0.104
Mg	0.25-0.45	0.206	0.243	0.306	0.202	0.306	0.276	0.319
Cr	-	0.011	0.010	0.036	0.011	0.062	0.039	0.031
Mn	0.350	0.035	0.034	0.205	0.034	0.324	0.259	0.220
Pb	-	0.097	0.214	0.465	0.093	0.450	0.417	0.471
Sn	-	0.048	0.051	0.185	0.051	0.252	0.252	0.180

เมื่อพิจารณาปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นจะพบว่า ในชิ้นงานหล่อ M1 ที่ใช้อะลูมิเนียมอินกอต 100% โดยไม่ผสมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมเลยนั้นปริมาณรูพรุนในโครงสร้างเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5.1 รูพรุนที่เกิดขึ้นนี้อยู่ระหว่างสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกมีลักษณะโค้งมนบางส่วนและไม่เป็นกึ่งก้านมากนัก ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการละลายของก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวระหว่างกระบวนการหล่อและการหดตัวระหว่างการแข็งตัว (Solidification shrinkage) และถูกขับออกมาในรูปของฟองก๊าซในขณะที่ชิ้นงานหล่อเย็นตัวลง เนื่องจากความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมลดลงมาก ซึ่งแม้ว่าในการทดลองจะใช้อะลูมิเนียมอินกอต 100% แต่ก็อาจมีความชื้นที่ติดมากับก้อนอะลูมิเนียมอินกอตหรือความชื้นในบรรยากาศระหว่างหล่อ และจากอุปกรณ์ต่างๆ เช่นเตาหลอม เบ้าหลอม เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการหลีกเลี่ยงไม่ได้เลยที่จะต้องทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนก่อนการเทแบบเพื่อให้ได้ชิ้นงานหล่อที่มีคุณภาพ

สำหรับชิ้นงานหล่อ M2 ซึ่งมีการผสมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียม 20% ลงไปด้วยนั้นพบว่า มีปริมาณรูพรุนจำนวนมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เนื่องจากเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมที่เติมลงไปเป็นแหล่งที่มาสำคัญของความชื้นและรูพรุนที่พบมีลักษณะที่กลมมนมากขึ้น

เมื่อทำการกำจัดก๊าซด้วยเครื่อง MDU ในสภาวะการทดลองหล่อชิ้นงาน M3-M7 ซึ่งมีการผสมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียม 20% และแปรค่าตัวแปรในการทดลอง (ความเร็วรอบการปั่นท่อแก๊สไฟต์, อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ) พบว่าโครงสร้างจุลภาคโดยรวมไม่

เปลี่ยนแปลง แต่ขนาดและปริมาณรูพรุนนั้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่อ M2 ที่ไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซดังแสดงในรูปที่ 5.2-5.7

เมื่อพิจารณาชิ้นงานหล่อ M3 (อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 5 ลิตร/นาทีก, ความเร็วรอบการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบต่อนาที, ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 10 นาที) พบว่าหลังจากกำจัดก๊าซยังมีปริมาณรูพรุนหลงเหลืออยู่ในโครงสร้าง แต่ขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่อ M2 และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนจาก 5 ลิตร/นาทีกเป็น 10 ลิตร/นาทีก ในชิ้นงานหล่อ M4 (อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาทีก, ความเร็วรอบการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบต่อนาที, ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 10 นาที) พบว่ามีปริมาณรูพรุนน้อยลงมาก และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกำจัดก๊าซจาก 10 นาทีเป็น 20 นาที ในชิ้นงานหล่อ M5 (อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาทีก, = 1000 รอบ/นาทีก, ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 20 นาที) จะสังเกตเห็นปริมาณรูพรุนน้อยมากเช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตามเมื่อเปลี่ยนสถานะการกำจัดก๊าซโดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้นเป็น 15 ลิตร/นาทีก สำหรับชิ้นงาน M6 (อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 15 ลิตร/นาทีก, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาทีก, ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 5 นาที) พบว่าระหว่างการกำจัดก๊าซจะเกิดการปั่นป่วนของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวมากขึ้น และเกิดการกระเด็นออกรอบบ้ำ หลอม ทำให้เกิดการทำงานที่ไม่ปลอดภัย อีกทั้งยังทำให้เกิดการสูญเสียน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวอีกด้วย ดังนั้นในกรณีนี้จึงทำการกำจัดก๊าซเพียง 5 นาที ชิ้นงานที่ได้มีปริมาณรูพรุนหลงเหลืออยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าชิ้นงานหล่อ M2-M3 แต่มีปริมาณที่มากกว่าชิ้นงานหล่อ M4-M5 สำหรับชิ้นงานหล่อ M7 (อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาทีก, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 750 รอบ/นาทีก, ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 10 นาที) ซึ่งลดความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์จาก 1000 รอบ/นาทีก เป็น 750 รอบ/นาทีก พบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซได้ไม่ดีเท่าการลดความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 1000 รอบ/นาทีก เพราะโครงสร้างมีปริมาณรูพรุนหลงเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย

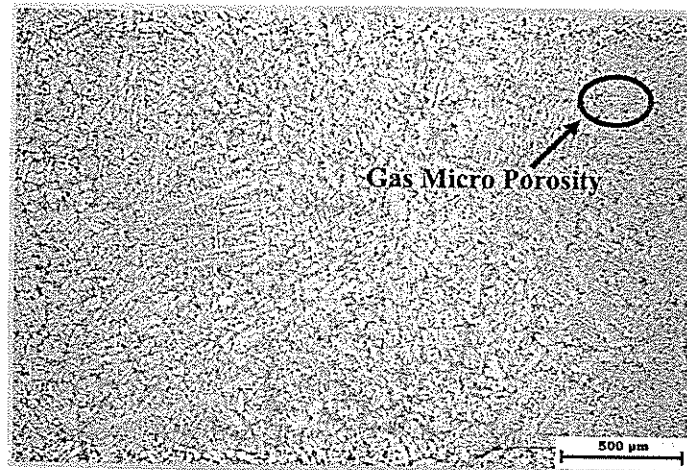
จากผลการทดลองจะเห็นว่าตัวแปรในการทดลองทั้ง 3 คือ อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ และเวลาในการกำจัดก๊าซมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ และจากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าชิ้นงานหล่อ M4 และ M5 จะให้ผลการทดลองที่ดีกว่า ซึ่งจะใช้อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาทีก, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาทีก และระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 10-20 นาที นอกจากนี้ เมื่อเราพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ ณ ตำแหน่งบน กลางและ ล่าง ดังแสดงในรูปที่ 5.8A-C พบว่า ในชิ้นงานหนึ่งๆ ที่ตำแหน่งบน และล่าง เกรนจะมีความละเอียดกว่าที่ตำแหน่งกลาง เนื่องจากว่าตำแหน่งบนและล่างของชิ้นงานจะมีพื้นที่สัมผัสกับอากาศด้านบนและผนังของแม่พิมพ์โลหะ

ด้านล่างมากกว่าที่ตำแหน่งกลาง ดังนั้น ตำแหน่งบนและล่างจึงมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าทำให้เกรนมีลักษณะที่ละเอียดมากกว่า

### รูปที่ 5.1A

The microstructure of cast Al 356 ingot, at 5X.

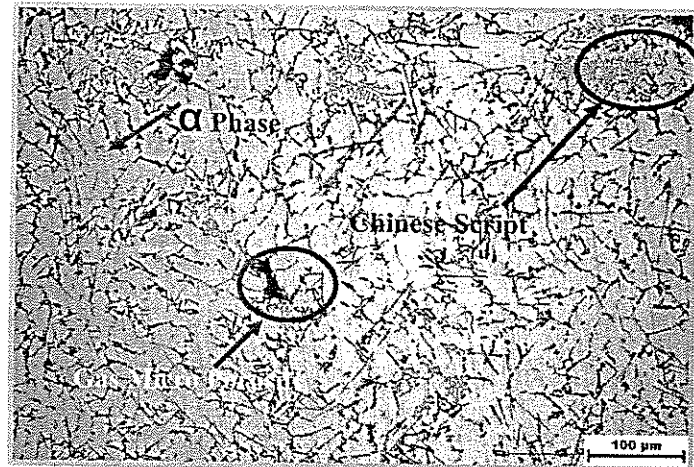
Degassing condition	M1
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-



### รูปที่ 5.1B

The microstructure of cast Al 356 ingot, at 20X.

Degassing condition	M1
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-



### รูปที่ 5.1C

The microstructure of cast Al 356 ingot, at 100X.

Degassing condition	M1
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-



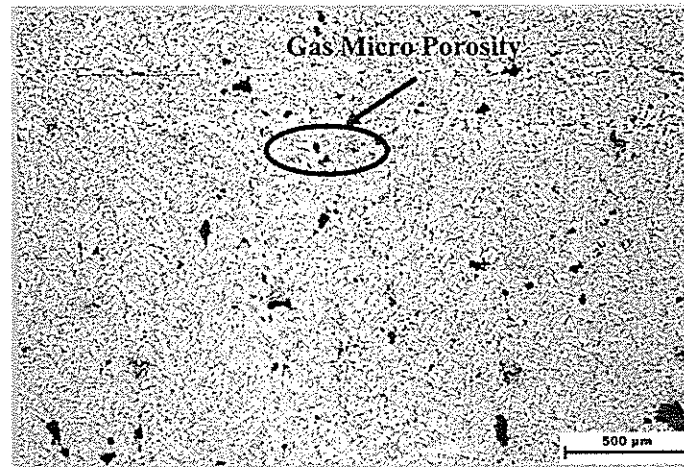
รูปที่ 5.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อสภาวะการทดลอง M1 ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน



## รูปที่ 5.2A

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 5X.

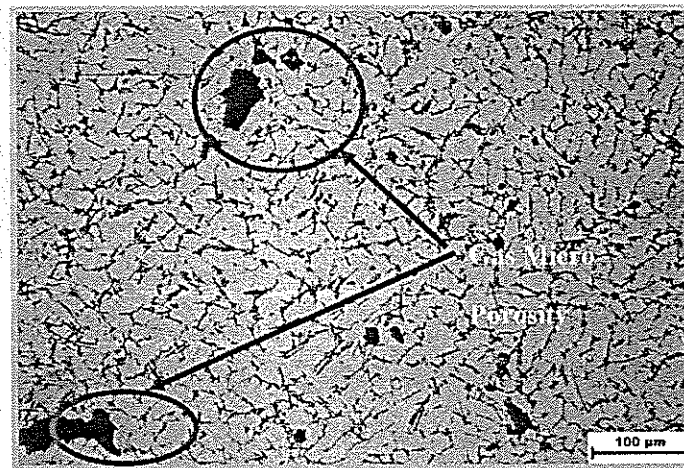
Degassing condition	M2
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-



## รูปที่ 5.2B

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 20X.

Degassing condition	M2
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-



## รูปที่ 5.2C

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 100X.

Degassing condition	M2
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-

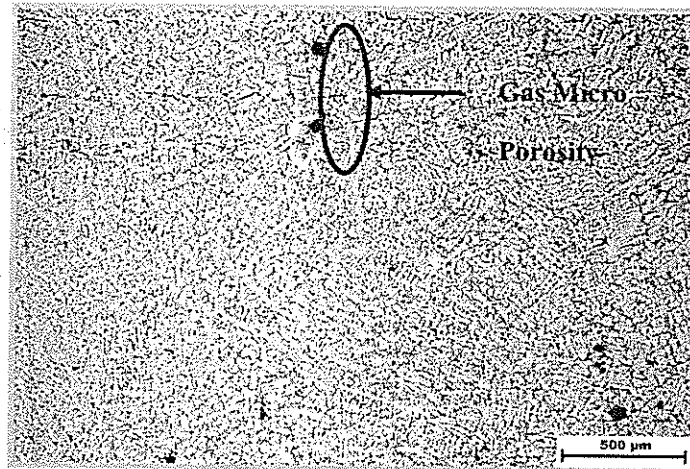


รูปที่ 5.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อสภาวะการทดลอง M2 ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

## รูปที่ 5.3A

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 5X.

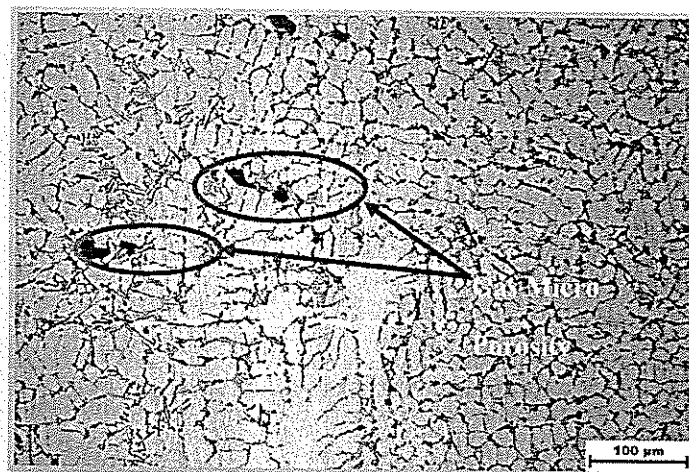
Degassing condition	M3
Gas flow rate (l/min)	5
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	1000



## รูปที่ 5.3B

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 20X.

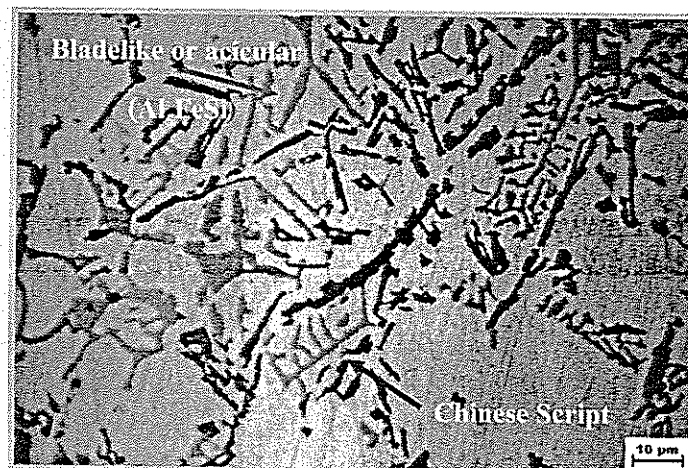
Degassing condition	M3
Gas flow rate (l/min)	5
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	1000



## รูปที่ 5.3C

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 100X.

Degassing condition	M3
Gas flow rate (l/min)	5
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	1000

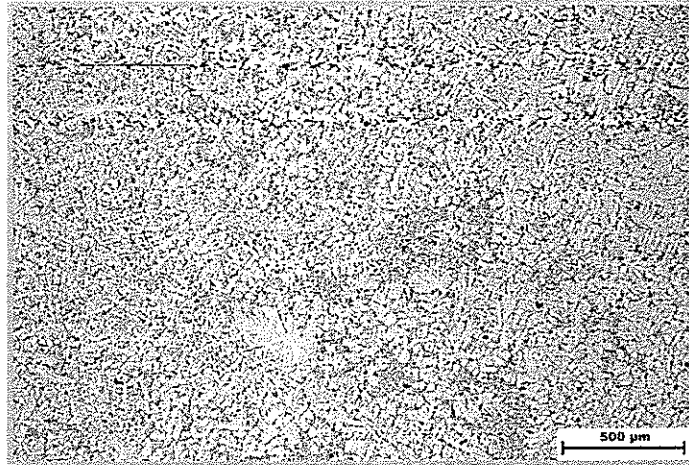


รูปที่ 5.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อสภาวะการทดลอง M3 ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

รูปที่ 5.4A

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 5X.

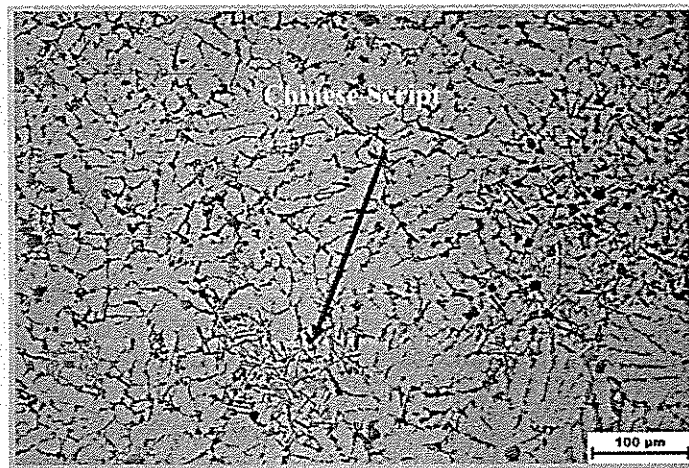
Degassing condition	M4
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	1000



รูปที่ 5.4B

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 20X.

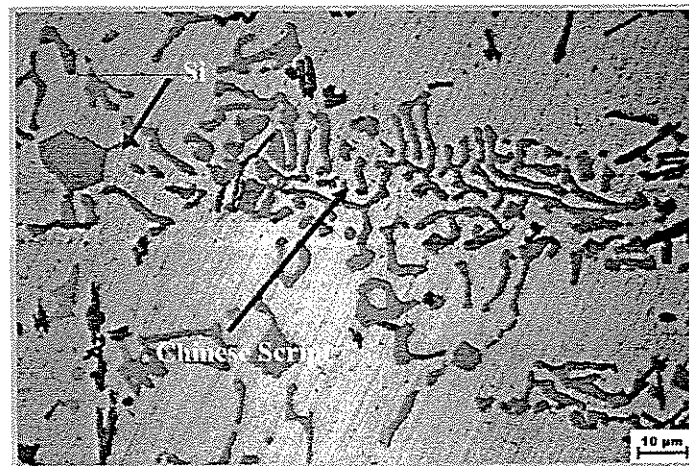
Degassing condition	M4
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	1000



รูปที่ 5.4C

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 100X.

Degassing condition	M4
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	1000

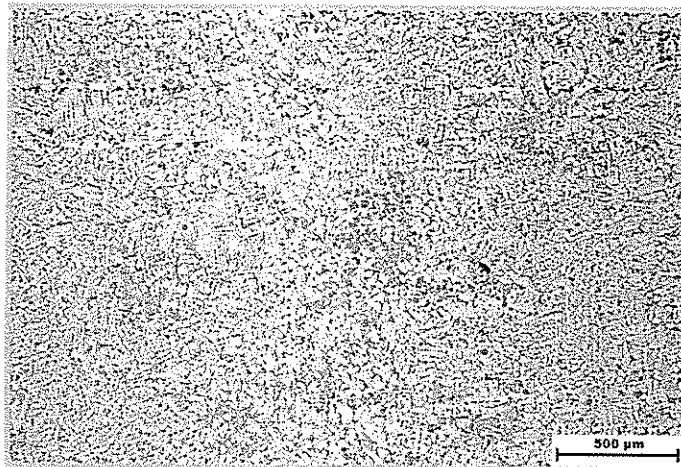


รูปที่ 5.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อสภาวะการทดลอง M4 ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

## รูปที่ 5.5A

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 5X.

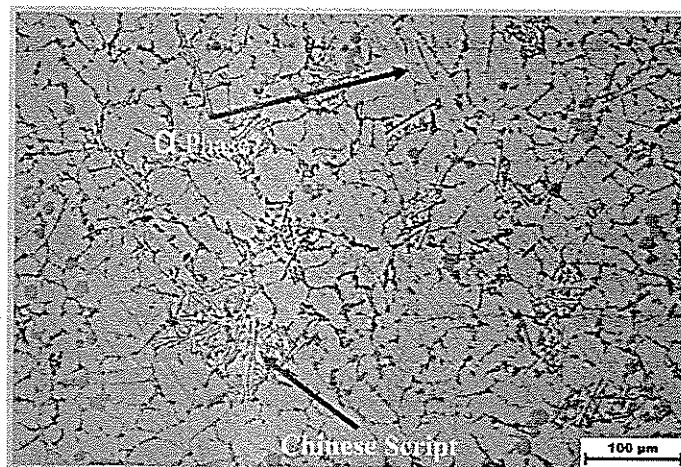
Degassing condition	M5
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	20
Rotation speed (rpm)	1000



## รูปที่ 5.5B

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 20X.

Degassing condition	M5
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	20
Rotation speed (rpm)	1000



## รูปที่ 5.5C

The microstructure of Al 356  
80% + Al scrap 20%, at 100X.

Degassing condition	M5
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	20
Rotation speed (rpm)	1000

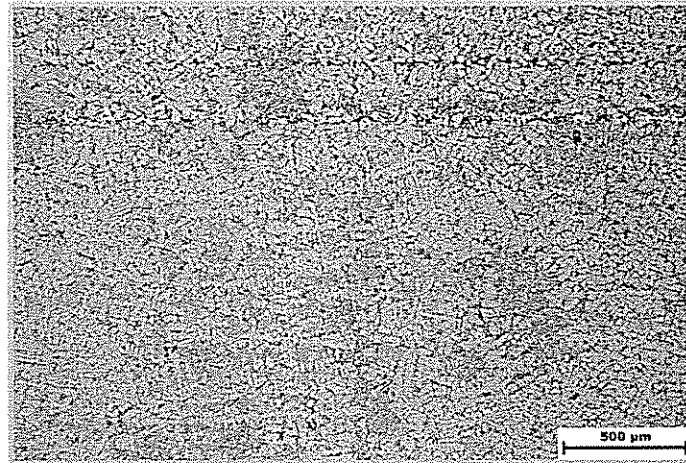


รูปที่ 5.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อสภาวะการทดลอง M5 ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

## รูปที่ 5.6A

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 5X.

Degassing condition	M6
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation speed (rpm)	1000



## รูปที่ 5.6B

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 20X.

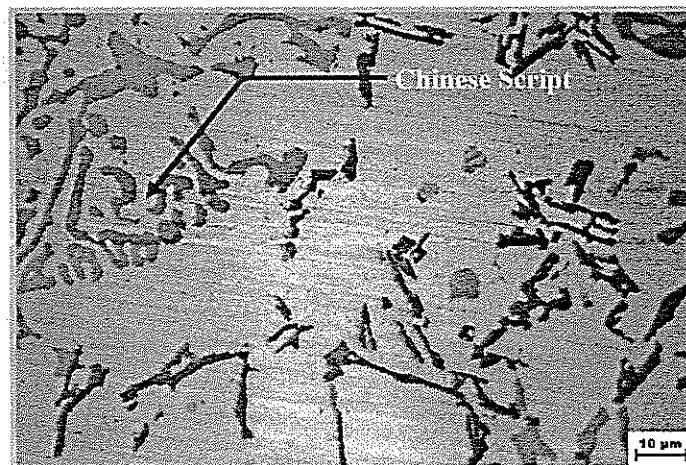
Degassing condition	M6
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation speed (rpm)	1000



## รูปที่ 5.6C

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 100X.

Degassing condition	M6
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation speed (rpm)	1000

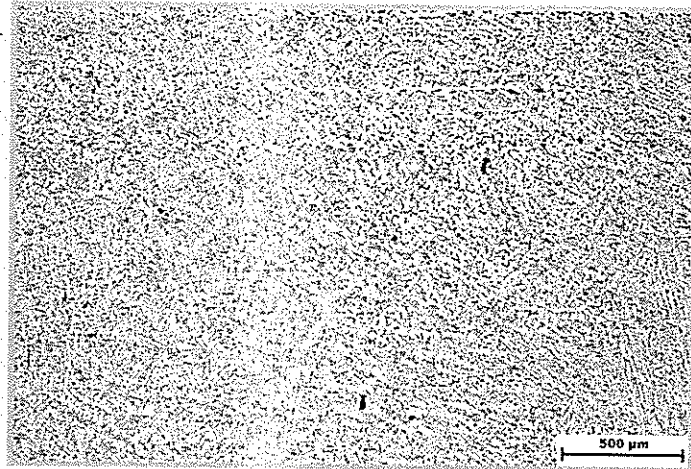


รูปที่ 5.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อสภาวะการทดลอง M6 ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

## รูปที่ 5.7A

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 5X.

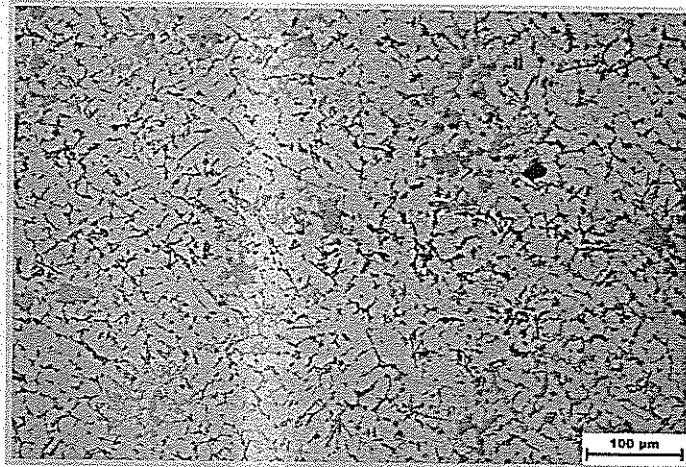
Degassing condition	M7
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	750



## รูปที่ 5.7B

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 20X.

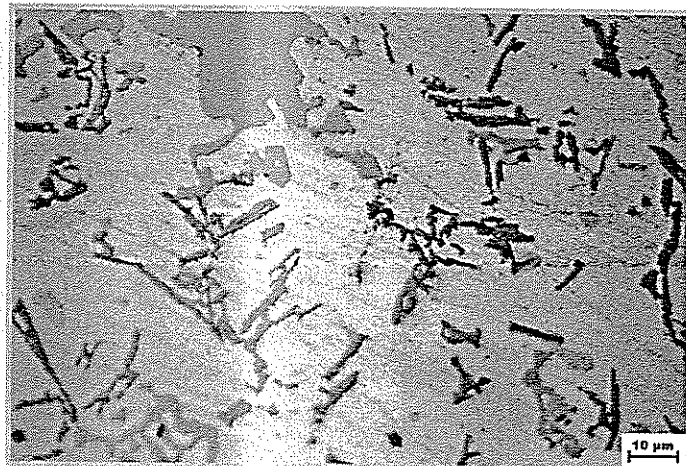
Degassing condition	M7
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	750



## รูปที่ 5.7C

The microstructure of Al 356 80%  
+ Al scrap 20%, at 100X.

Degassing condition	M7
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	750



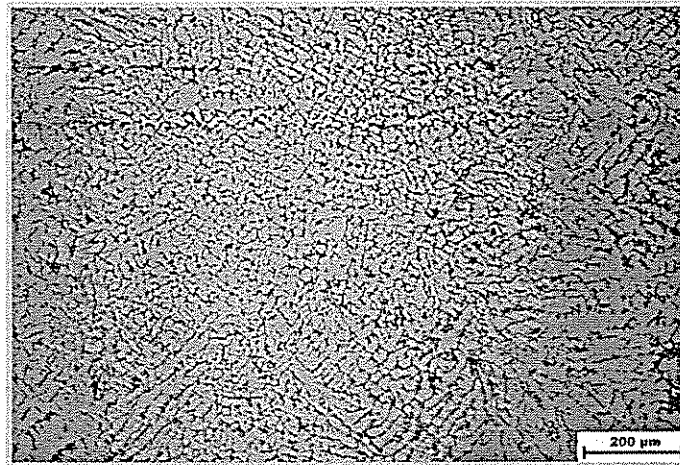
รูปที่ 5.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อสภาวะการทดลอง M7 ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

รูปที่ 5.8A

The microstructure of Al 356 80%

+ Al scrap 20%, at 10X. (TOP)

Degassing condition	M2
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-

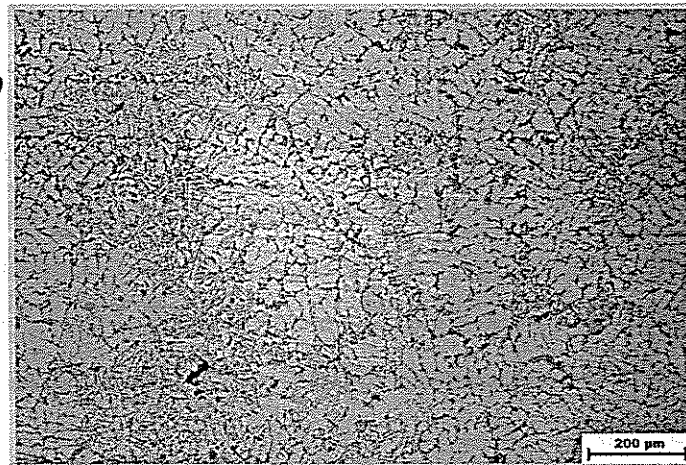


รูปที่ 5.8B

The microstructure of Al 356 80%

+ Al scrap 20%, at 10X. (MIDDLE)

Degassing condition	M2
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-



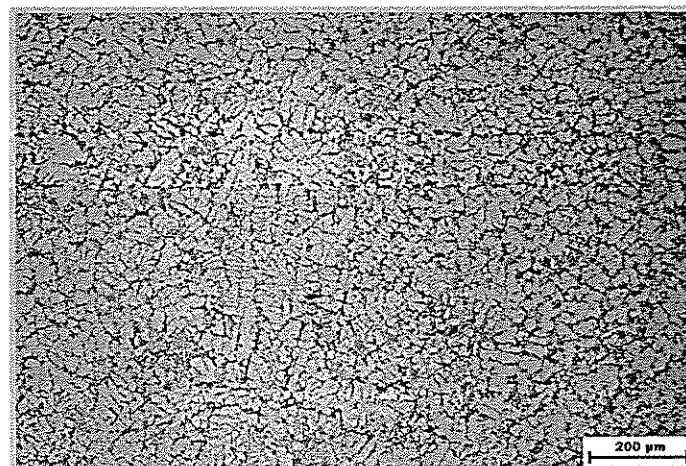
รูปที่ 5.8C

The microstructure of Al 356 80%

+ Al scrap 20%, at 10X.

(BOTTOM)

Degassing condition	M2
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-



รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบความละเอียดของเกรนที่ตำแหน่ง บน กลาง และล่าง จากชิ้นงาน M2

(Al 356 ingot 80% + Al scrap 20%, Non-Degassing) ที่กำลังขยาย 10X

### 5.3 ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุน

ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหล่อจากเบ้าหล่อเซรามิก โดยทำการผ่าครึ่ง ชิ้นงานหล่อตัดกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 800 พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโดยใช้อะลูมิเนียมอินกอต 100% (M1) มีลักษณะรูพรุนที่ค่อนข้างกลมซึ่งเป็นลักษณะรูพรุนที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว และกระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 5.9 และเมื่อเปรียบเทียบกับ ชิ้นงานหล่อ M2 ซึ่งมีการเติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียม 20% ลงไปในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว พบว่า ปริมาณรูพรุนที่เกิดภายในเนื้อชิ้นงานจะมีปริมาณมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียม อีกทั้งลักษณะของรูพรุนที่พบจะมีขนาดใหญ่กว่าอย่างเห็นได้ชัดจากรูปที่ 5.10 ทั้งนี้ เนื่องมาจากการเติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมลงไป มีความชื้นปะปนอยู่ทำให้เป็นแหล่งที่มาของก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งละลายอยู่ในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวมากขึ้น แต่เนื่องจากไม่มีการกำจัดก๊าซทำให้ไฮโดรเจนยังคงหลงเหลืออยู่ในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ประกอบกับที่ผิวหน้าของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีชั้นของออกไซด์ที่หนาแน่น ก๊าซไฮโดรเจนที่ถูกขับออกมาระหว่างการแข็งตัวของ ชิ้นงานจึงไม่สามารถหนีออกไปได้ทัน จึงส่งผลให้ภายในเนื้อชิ้นงานที่ได้หลังการหล่อมีปริมาณรูพรุนอยู่มาก นอกจากนี้แล้ว ขนาดของรูพรุนจากก๊าซที่ใหญ่ขึ้นนั้น เนื่องมาจากการรวมตัวของฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ถูกขับออกมาระหว่างกระบวนการแข็งตัวเนื่องจากไม่มีการกำจัดก๊าซนั่นเอง ซึ่งถือว่าเป็นอันตรายต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อหากมีฟองก๊าซขนาดใหญ่เกิดขึ้นในโครงสร้าง

ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่อง MDU โดยมีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรควบคุมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน คือ

- 1) Gas flow rate หรือ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (5, 10, 15 ลิตร/นาที)
- 2) Rotational speed หรือ ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ (750 และ 1000 รอบ/นาที)
- 3) Degassing time หรือ เวลาที่ใช้ในการกำจัดก๊าซ (5, 10, 20 นาที)

จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซในทุกสถานะที่ทำการทดลองจะมีปริมาณรูพรุนลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานของ M2 ที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 5.10-5.15 และจากการตรวจสอบพบว่า การลดลงของปริมาณรูพรุนมาน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งผลการทดลองพบว่าหากใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่แตกต่างกัน (5,10,15 ลิตร/นาที) แต่เวลาและความเร็วรอบที่ใช้ในการกำจัดก๊าซเท่ากัน ดังเช่นในชิ้นงานหล่อ M3 (อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 5 ลิตร/นาที, ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 10 นาที, ความเร็วในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาที) กับชิ้นงานหล่อ M4 (อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาที, ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 10 นาที, ความเร็วในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาที) จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซที่ต่างกัน โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาที



จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซที่ดีที่สุดดังแสดงในรูปที่ 5.11 และ 5.12 ทั้งนี้ เนื่องจากว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของก๊าซอาร์กอนในการกำจัดก๊าซมากขึ้น จึงทำให้เพิ่มโอกาสที่ก๊าซอาร์กอนจะพาเอาก๊าซไฮโดรเจน ขึ้นมาที่ผิวหน้าของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้มากกว่า แต่เมื่อเราทำการกำจัดก๊าซที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้นเป็น 15 ลิตร/นาที่ ในชิ้นงานหล่อ M6 เราจะพบว่าระหว่างการทดลองปั่นก๊าซอาร์กอนลงไปใต้น้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว จะเกิดความปั่นป่วนใต้น้ำอะลูมิเนียมค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 5 และ 10 ลิตร/นาที่ อีกทั้งยังทำให้เกิดการกระเด็นของน้ำโลหะออกมาภายนอกบ้างหลอม ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อเตาหลอมไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ ดังนั้นจึงทำการทดลองกำจัดก๊าซที่ 5 นาที่ แต่อย่างไรก็ดี ผลการทดลองตรวจสอบปริมาณรูพรุน พบว่าปริมาณรูพรุนนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองชิ้นงาน M3 และ M4 ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้นการกำจัดก๊าซโดยใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที่ จะทำให้ปริมาณรูพรุนจากก๊าซไฮโดรเจนลดลงมากที่สุด

และเมื่อเราพิจารณาปัจจัยที่สอง คือ ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นในหัวข้อ 3.3 พบว่ามีผลอย่างมากต่อกระจายตัวและขนาดของฟองก๊าซเมื่อเราทำการทดลองปั่นก๊าซอาร์กอนใต้น้ำ เมื่อเราเปรียบเทียบชิ้นงานหล่อ M4 และ M7 โดยเปรียบเทียบความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 1000 กับ 750 รอบ/นาที่ ตามลำดับ พบว่าปริมาณรูพรุนของชิ้นงานทั้งสองลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน M2 ที่ไม่ได้มีการกำจัดก๊าซ แต่อย่างไรก็ดี ปริมาณรูพรุนที่พบในชิ้นงานหล่อ M7 (รูปที่ 5.15) ยังคงมากกว่าที่พบในชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซในทุกสภาวะการทดลอง (M3-M6) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบที่ต่ำเกินไปทำให้ฟองก๊าซมีขนาดใหญ่และเกิดการกระจายตัวใต้น้ำอะลูมิเนียมน้อย จึงเป็นการลดโอกาสหรือพื้นที่ที่จะทำให้อะลูมิเนียมแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซอาร์กอนดังกล่าว อย่างไรก็ตามหากใช้ความเร็วรอบที่มากเกินไปก็จะทำให้บริเวณผิวหน้าของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดการหมุนวนอย่างปั่นป่วน (Turbulence) ทำให้ชั้นของฟิล์มออกไซด์ที่อยู่บริเวณผิวหน้าของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวถูกม้วนกลับเข้าไปอยู่ภายในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว เป็นการเปิดโอกาสให้ก๊าซไฮโดรเจนละลายกลับลงมาในน้ำโลหะอีกครั้ง อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดออกไซด์อินคลูชันที่ไม่ต้องการอีกด้วย ส่งผลให้เมื่อชิ้นงานเย็นตัวแล้วก็มีปริมาณรูพรุนมากขึ้น

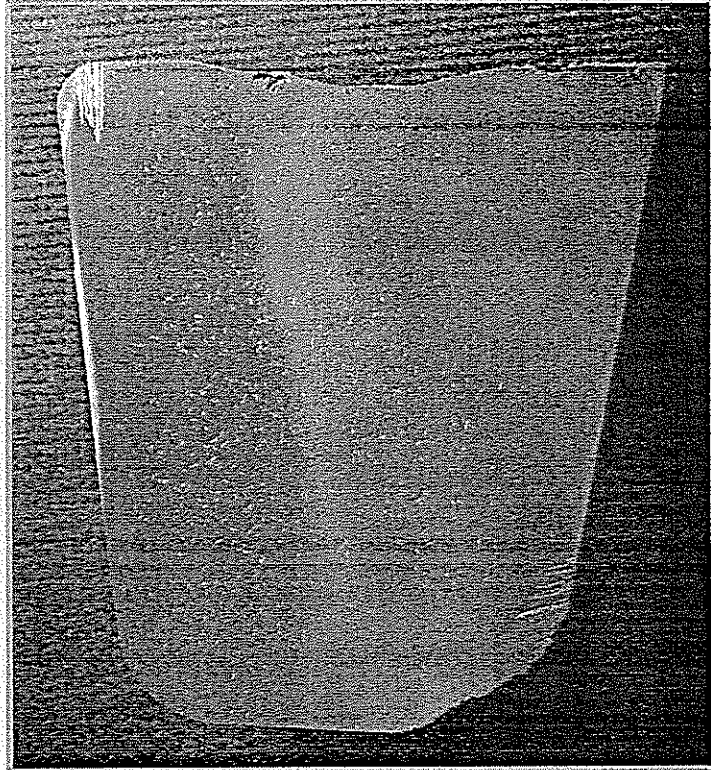
ส่วนปัจจัยสุดท้ายที่จะกล่าวถึง คือ ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ ซึ่งหากเราพิจารณาชิ้นงานหล่อ M4 กับ M5 โดยมีอัตราไหลของก๊าซอาร์กอนและความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 10 ลิตร/นาที่ และ 1000 รอบ/นาที่ ที่เท่ากันตามลำดับ แต่ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซไม่เท่ากัน โดย M4 ใช้เวลา 10 นาที่ ส่วน M5 ใช้เวลา 20 นาที่ ผลการทดลองพบว่าปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหล่อ M5 ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ M4 (รูปที่ 5.12) ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่นานเพียงพอจะทำให้ไฮโดรเจนยังไม่สามารถแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซอาร์กอนได้หมดระหว่างการกำจัดก๊าซ จึงทำให้ฟอง

ก๊าซไฮโดรเจนคงเหลือค้างอยู่ในโครงสร้างภายหลังการแข็งตัว ดังนั้นหากเวลาในการกำจัดก๊าซเพิ่มมากขึ้นหรือมีความเหมาะสมปริมาณของไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวก็จะลดลง เป็นผลทำให้ปริมาณรูพรุนที่เกิดในเนื้อชิ้นงานภายหลังการเย็นตัวก็จะลดลงด้วย อย่างไรก็ตามในการทดลองครั้งนี้ไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซที่เวลามากกว่า 20 นาที เนื่องจากเวลาที่จำกัด จึงไม่สามารถบอกได้ว่าการกำจัดก๊าซที่เวลามากกว่า 20 นาทีนั้นจะให้ผลการทดลองที่ดีกว่าหรือไม่ แต่อย่างไรก็ดีการกำจัดก๊าซเป็นเวลานานเกินไปอาจส่งผลทำให้ก๊าซไฮโดรเจนละลายกลับลงมาในน้ำอะลูมิเนียมได้ และอีกประการหนึ่ง หากใช้เวลาในการกำจัดก๊าซที่นานเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองและเสียเวลาในกระบวนการผลิต

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น ชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดก๊าซแล้วทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าชิ้นงานหล่อ M5 จะมีปริมาณรูพรุนลดลงมากที่สุด โดยใช้อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาที, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาที และระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 20 นาที (รูปที่ 5.13) และจากการทดลองกำจัดก๊าซที่ใช้ตัวแปรดังกล่าวแตกต่างกัน ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ อันได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน ความเร็วรอบและสุดท้ายเวลาในการกำจัดก๊าซ ทั้ง 3 ปัจจัยมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเหมาะสม เพื่อที่จะทำให้การกำจัดก๊าซเกิดประสิทธิภาพอย่างสูงที่สุด และลดปริมาณรูพรุนได้มากที่สุด

รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุน  
ในชิ้นงาน 100% Al 356 Ingot

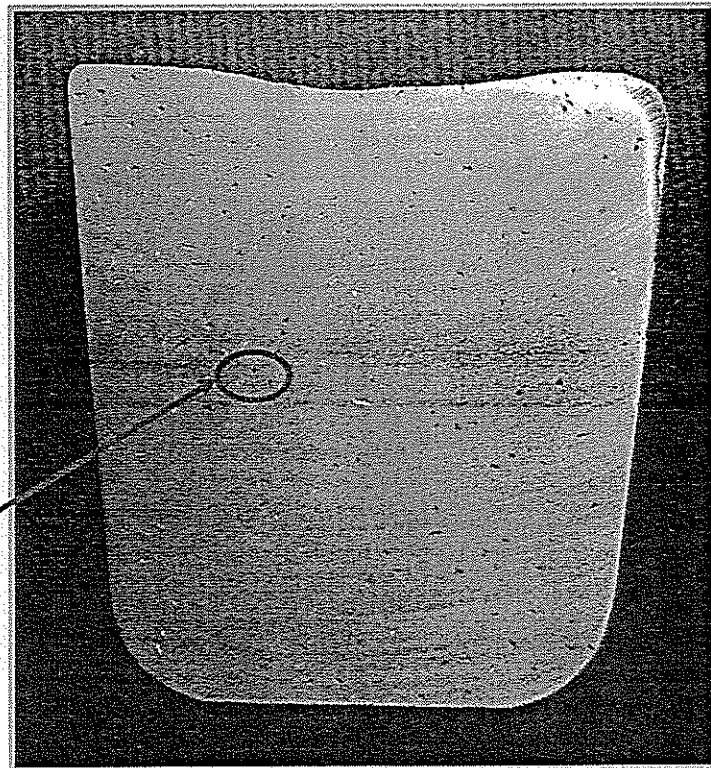
Degassing condition	M1
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-



รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุน  
ในชิ้นงาน Al 356 80% + Al scrap 20%

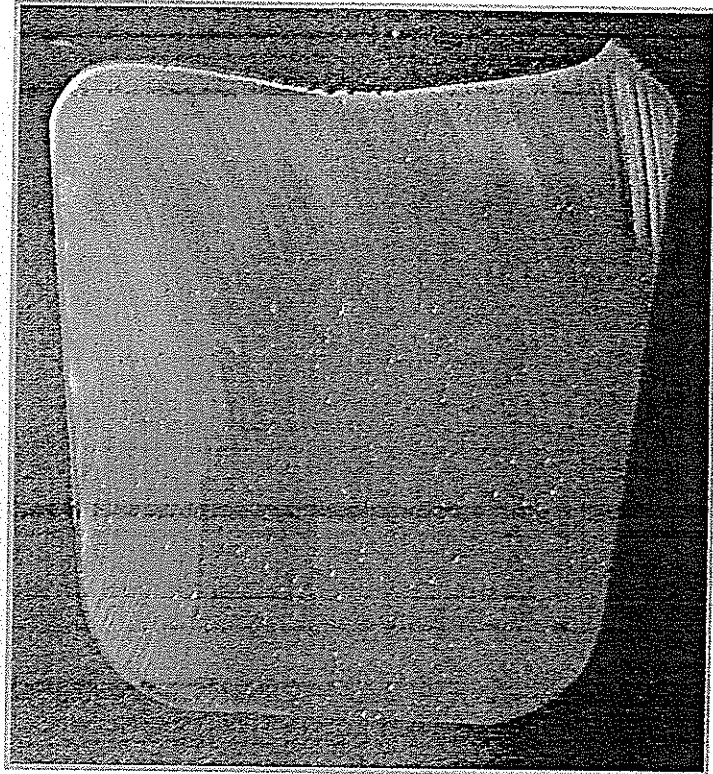
Degassing condition	M2
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation speed (rpm)	-

ลักษณะของ Porosity  
ที่เกิดจาก Gas



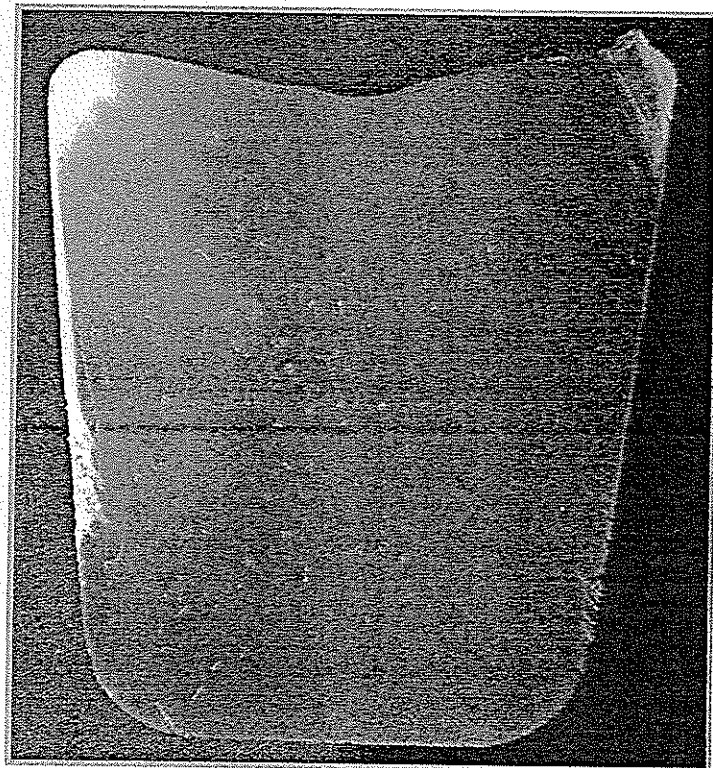
รูปที่ 5.11 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุน  
ในชิ้นงาน Al 356 80% + Al scrap 20 %

Degassing condition	M3
Gas flow rate (l/min)	5
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	1000



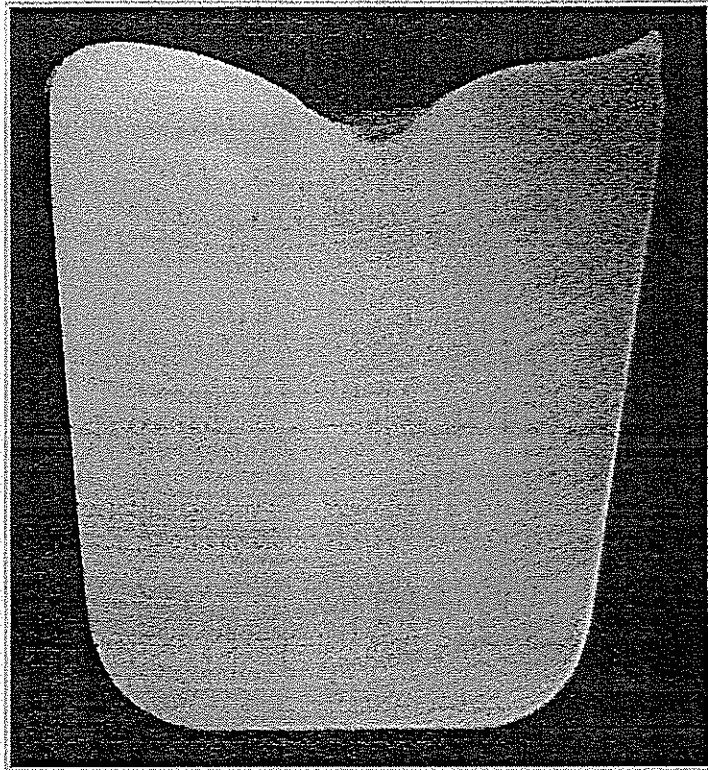
รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุน  
ในชิ้นงาน Al 356 80% + Al scrap 20 %

Degassing condition	M4
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	1000



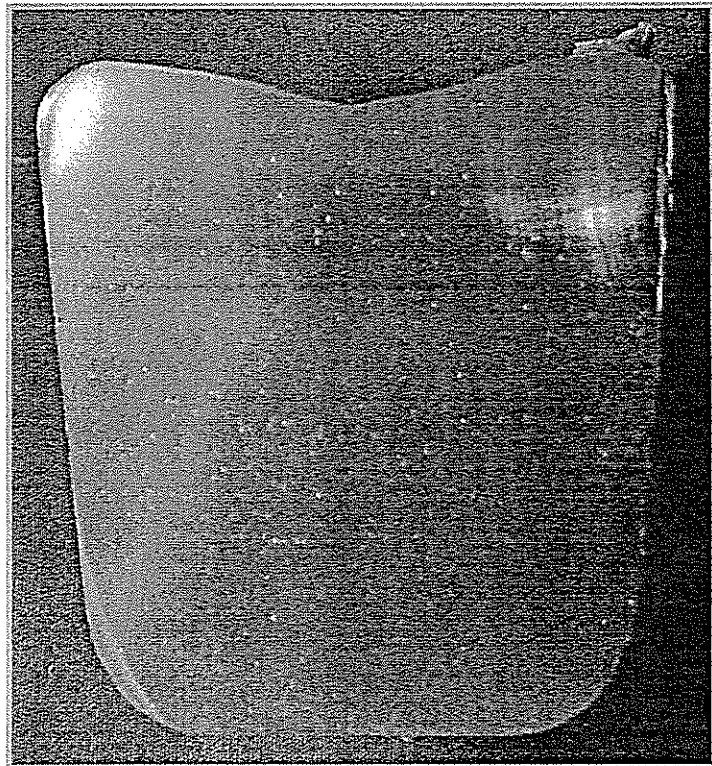
รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุน  
ในชิ้นงาน Al 356 80% + Al scrap 20%

Degassing condition	M5
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	20
Rotation speed (rpm)	1000



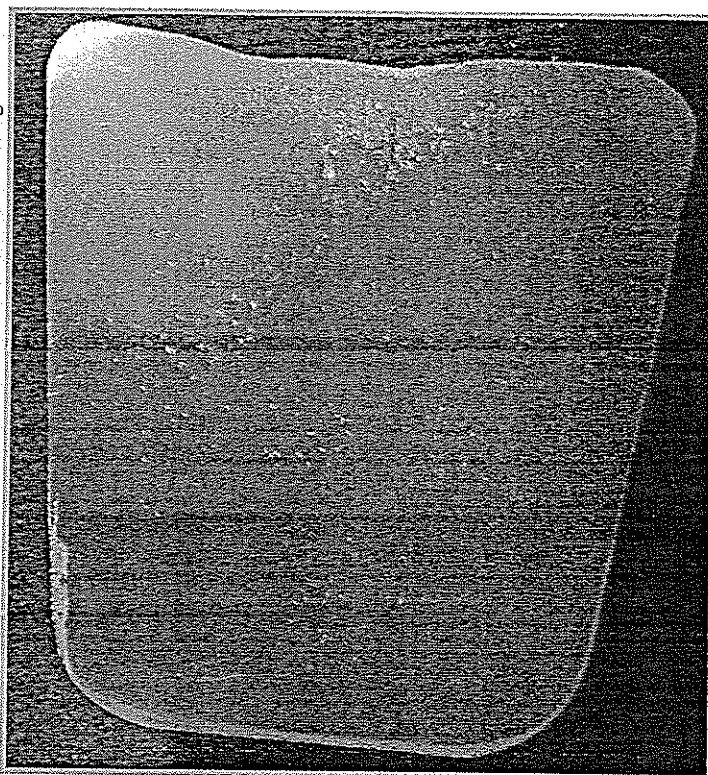
รูปที่ 5.14 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุน  
ในชิ้นงาน Al 356 80% + Al scrap 20%

Degassing condition	M6
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation speed (rpm)	1000



รูปที่ 5.15 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุน  
ในชิ้นงาน Ingot Al356 80% + scrap 20 %

Degassing condition.	M7
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation speed (rpm)	750



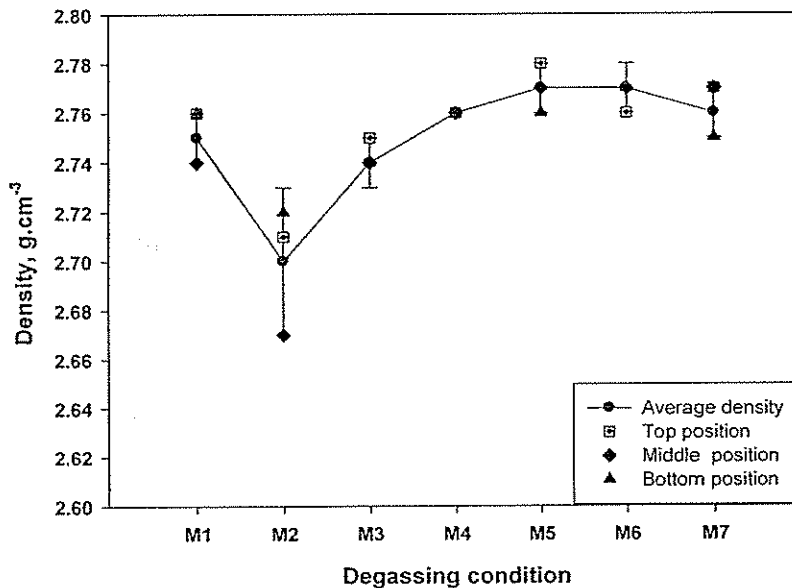
#### 5.4 ผลการตรวจสอบความหนาแน่น

เนื่องจากค่าความหนาแน่น เป็นดัชนีอย่างหนึ่งซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหล่อได้เช่นเดียวกัน และจากการตรวจสอบค่าความหนาแน่น (Density) ของชิ้นงานหล่อโดยการตัดชิ้นงานที่ตำแหน่งบน (Top), กลาง (Middle) และล่าง (Bottom) จำนวน 3 ชิ้น/สภาวะการทดลอง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้วและสูง 1 นิ้ว โดยใช้หลักการของ Archimedes พบว่า ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อแปรผันกับสภาวะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซ หรือ แปรผันกับปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานนั่นเอง ตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.16 แสดงผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ

ตารางที่ 5.2 ค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ในชิ้นงานหล่อ M1-M7

Melt	Work piece	DENSITY ( $\text{g/cm}^3$ )				
		Top	Middle	Bottom	Average	SD
M1	Ingot Al 356 Non-degassing	2.76	2.74	2.76	2.75	0.01
M2	Ingot Al 356 + Al scrap Non-degassing	2.71	2.67	2.72	2.70	0.03
M3	Degassing 5 l/min-10 min-1000 rpm	2.75	2.74	2.74	2.74	0.01
M4	Degassing 10 l/min-10 min-1000 rpm	2.76	2.76	2.76	2.76	0.00
M5	Degassing 10 l/min-20 min-1000 rpm	2.78	2.77	2.76	2.77	0.01
M6	Degassing 15 l/min-5 min-1000 rpm	2.76	2.77	2.77	2.77	0.01
M7	Degassing 10 l/min-10 min-750 rpm	2.77	2.77	2.75	2.76	0.01

density of aluminium castings



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่อ

จากกราฟแสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ M1-M7 ดังแสดงในรูปที่ 5.16 จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานหล่อ M1 ซึ่งหล่อจากอะลูมิเนียมอินกอต 100% นั้นมีความหนาแน่นที่ประมาณ 2.75 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชิ้นงานหล่อ M2 (2.70 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่มีการผสมเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียม 20% ทำให้เกิดมีปริมาตรรูพรุนจากก๊าซมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่ง บน กลาง และล่างนั้นค่อนข้างมากกว่าชิ้นงานหล่อประเภทอื่น ผลการทดลองสนับสนุนการลดปริมาณรูพรุนภายหลังการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่อง MDU โดยที่ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 2.74-2.77 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และชิ้นงานหล่อ M5 ซึ่งผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาที,

ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาที และระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 20 นาที นั้น มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด คือ 2.77 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีการปั่นด้วยก๊าซอาร์กอน ทำให้ชิ้นงานหล่อมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นหรือมีปริมาณรูพรุนที่ลดลงนั่นเอง และชิ้นงานหล่อ M5 มีค่าความหนาแน่นมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับปริมาณรูพรุนน้อยที่สุดอีกด้วย ดังนั้นสภาวะการกำจัดก๊าซนี้น่าจะเหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองครั้งนี้

หมายเหตุ: ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อกำลังอยู่ในช่วงประมาณ 2.70-2.77 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 356 (2.685 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณของทองแดงและเหล็กในชิ้นงานหล่อที่มากกว่า

### 5.5 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness test)

เมื่อนำชิ้นงานหล่อมาตรวจสอบค่าความแข็งตามตำแหน่งบนกลางและล่าง โดยแต่ละตำแหน่งจะวัดค่าความแข็ง 3 จุดที่ ซ้าย กลาง และขวา ตามลำดับ ผลการทดสอบค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานหล่อนำแสดงในตารางที่ 5.3-5.6 และกราฟในรูปที่ 5.17-5.20

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งที่ทดสอบได้จากชิ้นงานหล่อ M1-M7 มีผลการทดลองที่สอดคล้องกับผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุนและความหนาแน่นที่ได้แสดงมาก่อนหน้านี้ กล่าวคือ ค่าความแข็งที่ตำแหน่งบนและล่างมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณตรงกลาง สาเหตุที่ทำให้ค่าความแข็งที่ตำแหน่งบนและล่างมีค่ามากกว่านั้น เนื่องมาจากบริเวณทั้งสองมีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าบริเวณตรงกลาง เพราะตำแหน่งบนและล่างเป็นตำแหน่งที่สัมผัสกับอากาศและแม่พิมพ์โลหะมีผลทำให้เกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของตำแหน่งบนและล่างมีความละเอียดมากกว่าโดยสังเกตจากรูปที่ 5.8A-C

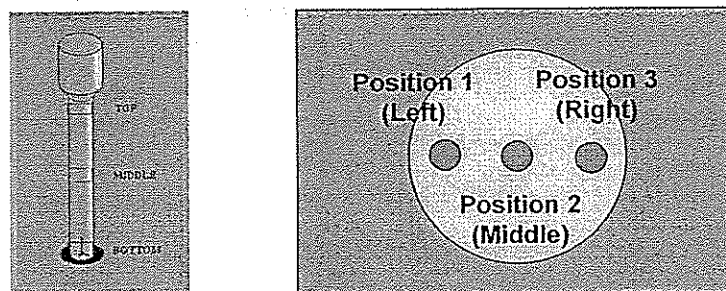
นอกจากนี้การทดสอบค่าความแข็งของแต่ละชิ้นงานที่ตำแหน่ง 1, 2 และ 3 (หรือ ซ้าย กลางและขวา ตามลำดับ) ดังแสดงในรูปที่ 5.17 พบว่าค่าความแข็งจากตำแหน่งที่ 1 และ 3 หรือ บริเวณขอบของชิ้นงานจะมีค่าที่มากกว่าค่าความแข็งที่วัดได้ในตำแหน่งที่ 2 หรือบริเวณใจกลางของชิ้นงานดังแสดงในกราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งรูปที่ 5.17 - 5.19 ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อสังเกตพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ใช้วัดค่าความแข็งจะพบว่าบริเวณใจกลางของชิ้นงาน (ตำแหน่งที่ 2) จะมีปริมาณของรูพรุนที่มากกว่าบริเวณขอบ (ตำแหน่งที่ 1 และ 3) เพราะเมื่อชิ้นงานหล่อเริ่มเกิดการแข็งตัวจากบริเวณขอบที่ติดกับแม่พิมพ์โลหะ บริเวณใจกลางชิ้นงานจะเกิดการแข็งตัวหลังสุด ทำให้ไฮโดรเจนที่เคยละลายอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมถูกขับออกมาอยู่บริเวณใจกลาง และกลายเป็นฟองก๊าซที่หลงเหลืออยู่ภายหลังจากการแข็งตัวเสร็จสิ้นหากถูกกำจัดออกไปไม่ทัน ดังนั้นจึงทำให้บริเวณใจกลางชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนมากกว่าบริเวณขอบและเป็นผลทำให้ค่าความแข็งที่บริเวณใจกลางน้อยกว่า



เมื่อพิจารณาชิ้นงานหล่อ (M2) ซึ่งเติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียม 20% โดยไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนชิ้นงานภายหลังการหล่อมีค่าความแข็งที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน M1 ซึ่งหล่อโดยใช้อะลูมิเนียมอินกอต 100% เนื่องจากเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมที่เติมลงไปมีผลทำให้เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

และเมื่อทำการศึกษาปัจจัยหรือตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน โดยใช้เครื่อง MDU คือ 1) อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 2) ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ และ 3) ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ ในชิ้นงานหล่อ M3-M7 พบว่า การทดลองกำจัดก๊าซที่ใช้สภาวะในการทดลอง M5 (อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาทีก, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาทีก, ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 20 นาที) ให้ค่าความแข็งแบบบริเนล (BHN) ที่มากที่สุดดังแสดงในตารางที่ 5.6 และยังคงคล้องกับผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุน และค่าความหนาแน่นของชิ้นงานดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.3 และ 5.4 อีกด้วย แต่อย่างไรก็ดี ค่าความแข็งที่ทดสอบได้นั้นขึ้นอยู่กับขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น สำหรับชิ้นงานหล่อ M3, M4, M6 และ M7 จะให้ค่าความแข็งในบางตำแหน่งการทดสอบที่น้อยกว่า M2 ที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดก๊าซ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการกระจายตัวและขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ชิ้นงาน M2 เกิดรูพรุนขนาดใหญ่กว่าแต่มีระยะห่างระหว่างรูพรุนมากกว่าในชิ้นงาน M3, M4, M6 และ M7 จึงทำให้โอกาสที่หัวกด (Brinell hardness indenter) จะกดลงบริเวณที่เกิดรูพรุนในชิ้นงาน M2 น้อยกว่า และอาจจะมีผลทำให้ค่าความแข็งที่วัดได้มากกว่านั่นเอง

ดังนั้นจากผลการทดสอบค่าความแข็งจากชิ้นงานหล่อ M1-M7 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซึ่งมีผลทำให้ได้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นคือ การใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาทีก ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 1000 รอบ/นาทีก และเวลาในการกำจัดก๊าซที่ 20 นาที เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซได้มากกว่า จึงมีปริมาณรูพรุนลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และดีกว่าในทุกสภาวะที่ทำการทดลองในครั้งนี้



แสดงการตัดชิ้นงานและตำแหน่งในการวัดความแข็ง

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการหล่อที่ตำแหน่งบน (Top)

Workpiece (Top)	Hardness(BHN)			Avg.	SD.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
M1 Ingot Al356 Non-Degassing	79.6	60.5	79.6	73.2	11.0
M2 Ingot Al356+20%scrap Non-Degassing	74.1	69.1	74.1	72.4	2.9
M3 Degassing-5 l/min, 1000 rpm, 10 min	64.6	62.5	64.6	63.9	1.2
M4 Degassing-10 l/min, 1000 rpm, 10 min	79.6	64.6	74.1	72.8	7.6
M5 Degassing-10 l/min, 1000 rpm, 20 min	76.8	50.3	74.1	67.1	14.6
M6 Degassing -15 l/min, 1000 rpm, 5 min	69.1	60.5	69.1	66.2	5.0
M7 Degassing-10 l/min, 750 rpm, 10 min	74.1	64.6	74.1	70.9	5.5

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการหล่อที่ตำแหน่งกลาง (Middle)

Workpiece (Middle)	Hardness (BHN)			Avg.	SD.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
M1 Ingot Al356 Non-Degassing	69.1	55.1	58.6	60.9	7.3
M2 Ingot Al356+20%scrap Non-Degassing	74.1	69.1	74.1	72.4	2.9
M3 Degassing-5 l/min, 1000 rpm, 10 min	64.6	56.8	66.8	62.7	5.3
M4 Degassing-10 l/min, 1000 rpm, 10 min	60.5	40.2	53.4	51.4	10.3
M5 Degassing-10 l/min, 1000 rpm, 20 min	74.1	74.1	74.1	74.1	0.0
M6 Degassing -15 l/min, 1000 rpm, 5 min	69.1	64.6	64.6	66.1	2.6
M7 Degassing-10 l/min, 750 rpm, 10 min	66.8	53.4	66.8	62.3	7.7

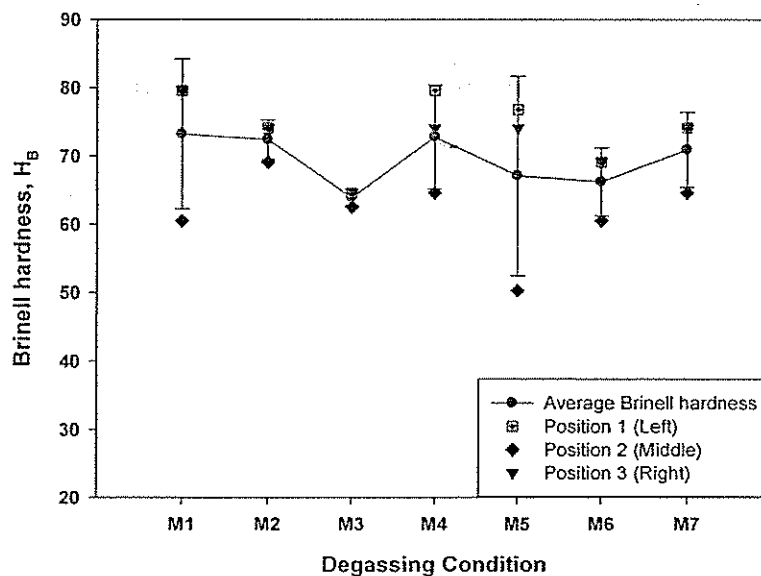
ตารางที่ 5.5 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการหล่อที่ตำแหน่งล่าง (Bottom)

Workpiece (Bottom)	Hardness(BHN)			Avg.	SD.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
M1 Ingot Al356 Non-Degassing	74.1	74.1	76.8	75.0	1.6
M2 Ingot Al356+20%scrap Non-Degassing	74.1	69.1	69.1	70.8	2.9
M3 Degassing-5 l/min, 1000 rpm, 10 min	66.8	55.1	69.1	63.7	7.5
M4 Degassing-10 l/min, 1000 rpm, 10 min	64.6	66.8	64.6	65.3	1.3
M5 Degassing-10 l/min, 1000 rpm, 20 min	76.8	71.5	74.1	74.1	2.7
M6 Degassing -15 l/min, 1000 rpm, 5 min	69.1	69.1	69.1	69.1	0.0
M7 Degassing-10 l/min, 750 rpm, 10 min	69.1	60.5	66.8	65.5	4.5

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการหล่อโดยเฉลี่ยที่ตำแหน่งบน กลางและล่าง

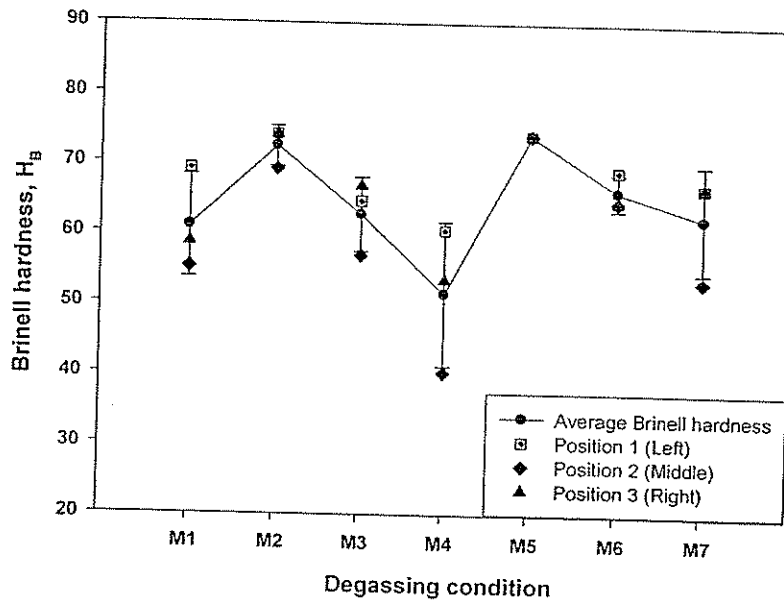
Workpiece	Hardness(BHN)			Avg.	SD.
	Top	Middle	Bottom		
M1 Ingot Al356 Non-Degassing	73.2	60.9	75.0	69.7	7.7
M2 Ingot Al356+20%scrap Non-Degassing	72.4	60.9	70.8	68.0	6.2
M3 Degassing-5 l/min, 1000 rpm, 10 min	63.9	62.7	63.7	63.4	0.6
M4 Degassing-10 l/min, 1000 rpm, 10 min	72.8	51.4	65.3	63.2	10.9
M5 Degassing-10 l/min, 1000 rpm, 20 min	67.1	74.1	74.1	71.8	4.0
M6 Degassing -15 l/min, 1000 rpm, 5 min	66.2	66.1	69.1	67.1	1.7
M7 Degassing-10 l/min, 750 rpm, 10 min	70.9	62.3	65.5	66.2	4.3

Brinell Hardness of Aluminium Castings at Top Position



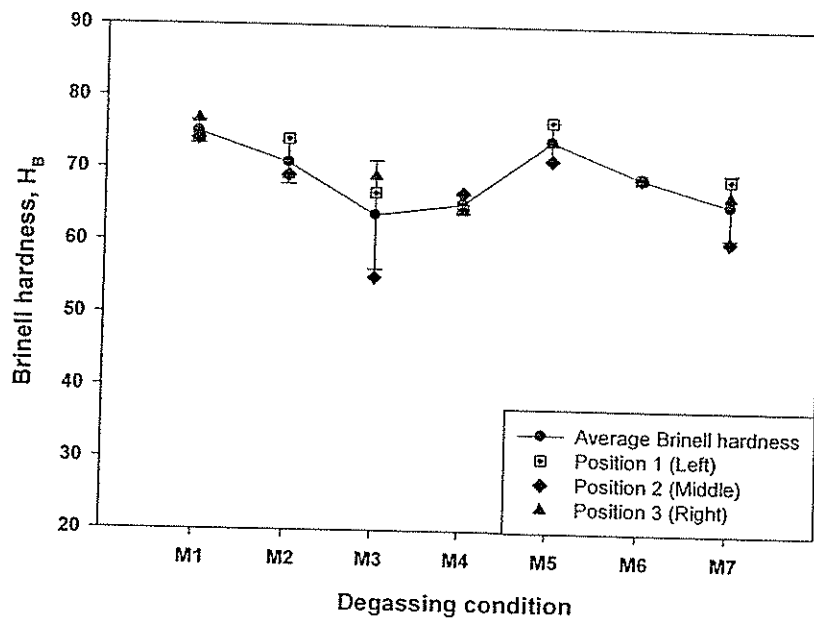
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ตำแหน่งบน

Brinell Hardness of Aluminium Casting at Middle Position

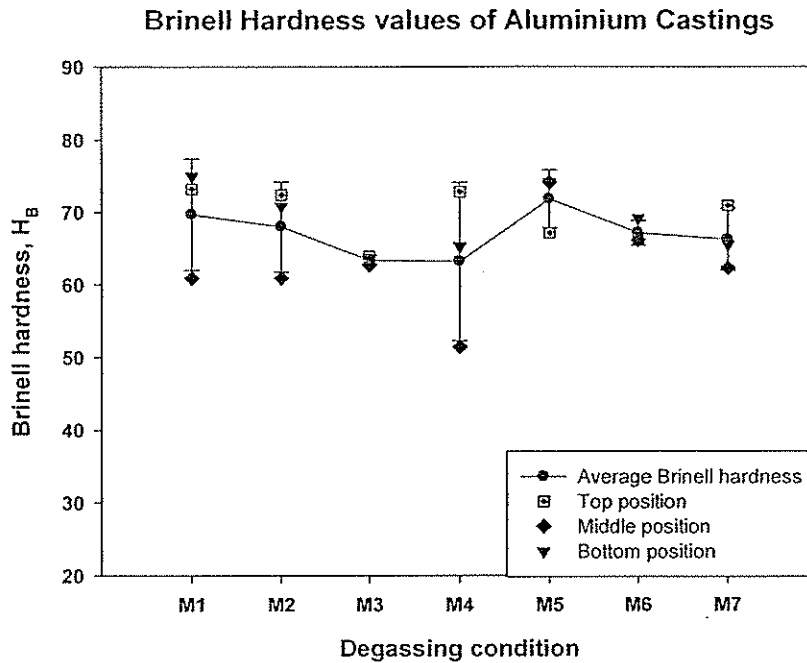


รูปที่ 5.18 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ตำแหน่งกลาง

Brinell Hardness of Aluminium Casting at Bottom Position



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ตำแหน่งล่าง



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง

#### 5.6 การทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile test)

ผลการทดสอบสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมแสดงดังตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.21 จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Tensile elongation) ที่ทดสอบได้จากชิ้นงานหล่อ M1-M7 มีผลการทดลองที่สอดคล้องกับผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุนและความหนาแน่นและค่าความแข็ง ที่ได้รายงานแสดงมาก่อนหน้านี้ โดยจะสังเกตได้ว่า ชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซในสภาวะการทดลอง M5 (ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาที, อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาที, ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ = 20 นาที) นั้นให้สมบัติแรงดึงที่ดีที่สุด โดยให้ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด = 221.9 MPa, ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงที่จุดคราก = 160.7 MPa และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การยืดตัว = 1.77%

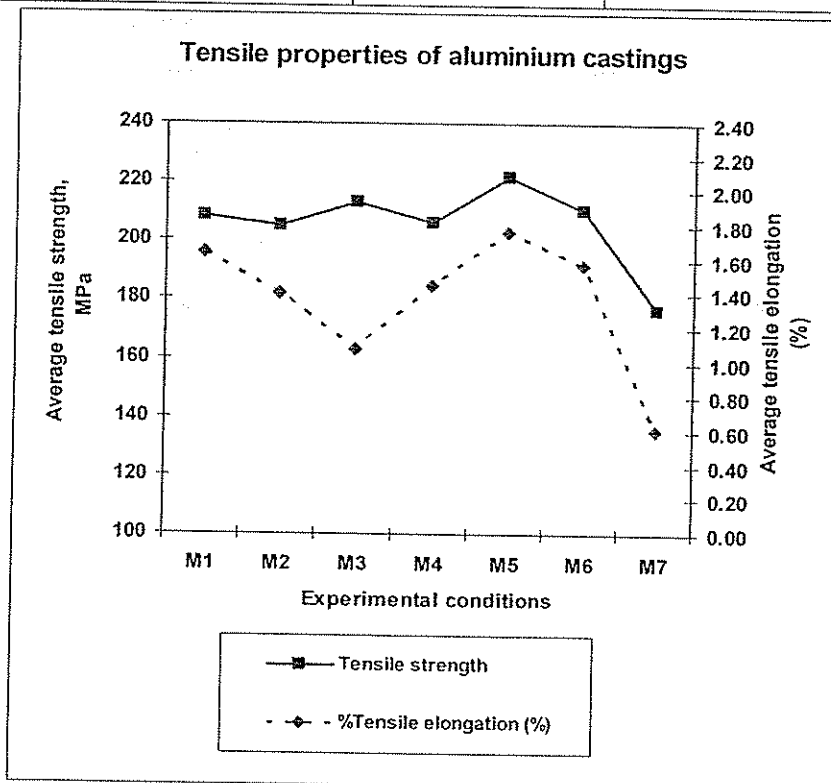
เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในสภาวะ M1 (อะลูมิเนียมอินกอต 100 % ที่ไม่ได้กำจัดก๊าซ) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะ M2 (อะลูมิเนียมอินกอต 80 % + เศษจี้กิ้งอะลูมิเนียม 20 % ที่ไม่ได้กำจัดก๊าซ) พบว่า ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น 8% และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น 26% เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมกับค่ามาตรฐานของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ในสภาวะหล่อ (26 ksi หรือประมาณ 180 MPa) จะพบว่าชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซนั้นจะให้ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุดมากกว่า ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืดตัวพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่ามาตรฐาน (5%) ซึ่งอาจเนื่องจากการทดลองนี้ไม่ได้ดำเนินการ

ปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะก่อนการเทแบบ ในเรื่องของการทำเกรนให้ละเอียดและปรับปรุงรูปทรงพื้นฐานของโครงสร้างยูเทคติก จึงอาจทำให้ได้ค่าน้อยกว่าปกติ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าการกำจัดก๊าซโดยใช้เครื่อง MDU สามารถทำการกำจัดก๊าซได้จริง

ในส่วนรายงานต่อไป ผู้วิจัยได้เพิ่มเติมทดลองการกำจัดก๊าซโดยมีกระบวนการฉีดฟลักซ์กระทำพร้อมกับการกำจัดก๊าซ ทั้งนี้ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะให้ดียิ่งขึ้นและเพื่อลดระยะเวลาในการทำงาน พร้อมทั้งทำให้การฉีดฟลักซ์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าเฉลี่ยสมบัติแรงดึงของชิ้นงานภายหลังการหล่อ

Test conditions	Tensile properties		
	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Tensile elongation (%)
M1 Ingot Al356 Non-Degassing	208.5	175.3	1.64
M2 Ingot Al356+20%scrap Non-Degassing	205.2	162.4	1.41
M3 Degassing-5 l/min, 1000 rpm, 10 min	212.9	181.0	1.08
M4 Degassing-10 l/min, 1000 rpm, 10 min	206.3	154.7	1.45
M5 Degassing-10 l/min, 1000 rpm, 20 min	221.9	160.7	1.77
M6 Degassing -15 l/min, 1000 rpm, 5 min	210.6	153.7	1.57
M7 Degassing-10 l/min, 750 rpm, 10 min	176.5	155.4	0.61



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม

## ส่วนที่ 2 ผลการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว โดยใช้เครื่อง FIDU

สำหรับผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการกำจัดก๊าซผสมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาค ปริมาตรรูพรุน ความหนาแน่น และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ไม่ผ่านการกำจัดก๊าซ (MDFT01) กับที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ (MDFT02-05) โดยแต่ละกรณีจะทำการหล่อในแม่พิมพ์โลหะและใช้ฟลักซ์ที่เป็นผงและเป็นเม็ดเปรียบเทียบกัน สภาวะต่างๆในการทดลองแสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 แสดงสภาวะการทดลองการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU

Melt	Starting material		Flux type	Gas flow	Rotational	Degassing	Fluxing
	Al 356 ingot	Al scrap		rate	Speed	time	time
				(l/min)	(rpm)	(min)	(min)
MDFT01	80	20	-	-	-	-	
MDFT02	80	20	Powder	10	1000	10	3
MDFT03	80	20	Powder	10	1000	20	3
MDFT04	80	20	Granular	10	1000	20	3
MDFT05	80	20	Granular	10	1000	10	3

### 5.7 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุผสม

ปริมาณธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม ก่อนและหลังการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU แสดงในตารางที่ 5.9 โดยปริมาณของ Si ควบคุมในช่วง 6.5-7.5 % ส่วนปริมาณของ แมกนีเซียม ควบคุมอยู่ในช่วง 0.25-0.45 % ผลการวิเคราะห์แสดงค่า ทองแดง เหล็กและสังกะสี ที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมที่ใช้มีธาตุผสมเหล่านี้อยู่พอสมควร จะสังเกตได้ว่า ปริมาณทองแดงในชิ้นงานค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานซึ่งมีผลให้สมบัติแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการตรวจสอบปริมาณ ทองแดง ในอินกอตที่ใช้ก็มีมากกว่า มาตรฐานอีกเช่นกัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลจึงต้องทำการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 และสภาวะการทดลองที่ไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์

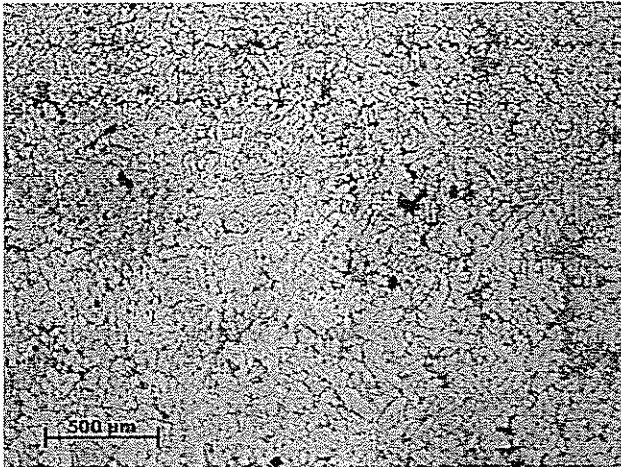
ตารางที่ 5.9 แสดงปริมาณธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมภายใต้การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนผสมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU

Element	Al 356	Al Ingot	Al scrap	MDFT1	MDFT2	MDFT3	MDFT4	MDFT5
Al	90.650	85.50	83.85	87.80	87.40	87.66	86.75	86.03
Si	6.5-7.5	7.30	12.58	7.36	7.43	7.39	7.48	7.60
Cu	0.250	1.747	2.676	1.304	1.213	1.217	1.597	1.730
Fe	0.600	0.669	0.480	0.402	0.591	0.570	0.608	0.576
Zn	0.350	>3.012	0.238	0.113	2.699	2.513	2.818	>3.012
Ni	-	0.289	0.044	0.013	0.094	0.092	0.169	0.186
Mg	0.25-0.45	0.534	<0.003	0.029	0.329	0.315	0.338	0.375
Cr	-	0.043	0.016	0.504	0.026	0.025	0.040	0.040
Mn	0.350	0.177	0.053	0.124	0.139	0.133	0.134	0.131
Pb	-	0.080	0.040	2.303	0.058	0.056	0.055	0.059
Sn	-	0.016	0.022	0.049	0.021	0.022	0.012	0.013

### 5.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ

โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมแสดงในรูปที่ 5.22-5.26 ที่กำลังขยายต่างๆ ณ ตำแหน่งตรงกึ่งกลางของแท่งชิ้นงานหล่อ ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานของอะลูมิเนียมปฐมภูมิเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมประเภทไฮโปยูเทคติก นอกจากนี้ ยังพบโครงสร้าง Blade-like เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมมีเหล็กอยู่ในปริมาณที่สูงพอสมควร สำหรับชิ้นงานหล่อ MDFT01 ซึ่งหล่อโดยใช้อะลูมิเนียมอินกอต 80 % + เศษจี้กิ้งอะลูมิเนียม 20 % โดยไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์พบรูพรุนจำนวนมากและรูพรุนมีขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.22 โดยลักษณะรูพรุนดังกล่าวแสดงถึงรูพรุนที่เกิดจากก๊าซร่วมกับโพรงหดตัวของชิ้นงานหล่อระหว่างการแข็งตัว และเมื่อทำการกำจัดก๊าซโดยรวมกับการฉีด ฟลักซ์ทั้งชนิดผง (0.25%) และชนิดเม็ด (0.125%) ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 10 ลิตร/นาที, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ 1000 รอบ/นาที และระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ 10 และ 20 นาที พบว่าปริมาณรูพรุนลดลงทั้งสิ้น



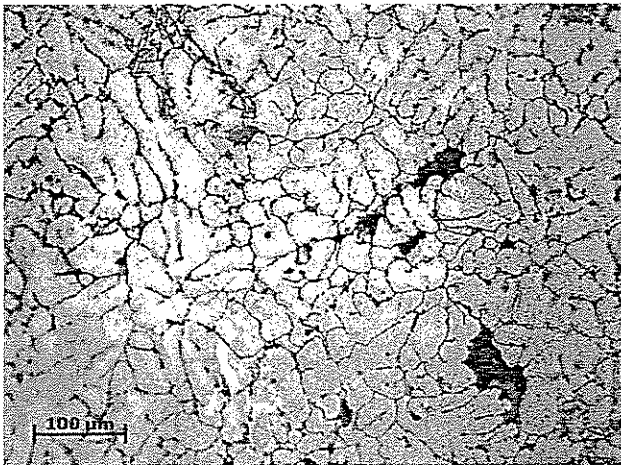


รูปที่ 5.22 A โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al scrap

ที่กำลังขยาย 5X

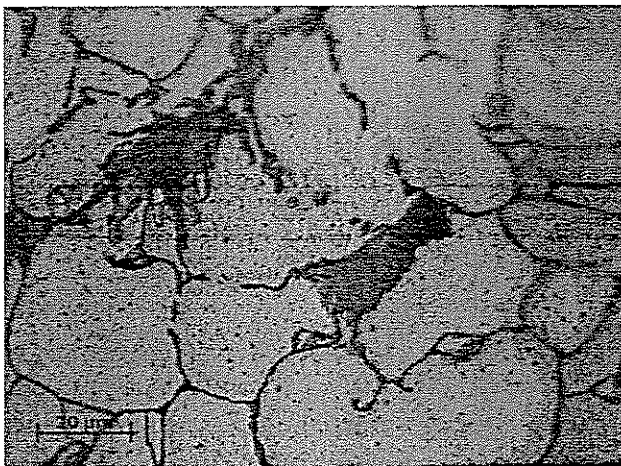
Degassing Condition	MDFT01
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-
Flux type	-
Flux content	-



รูปที่ 5.22 B โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al scrap

ที่กำลังขยาย 20X



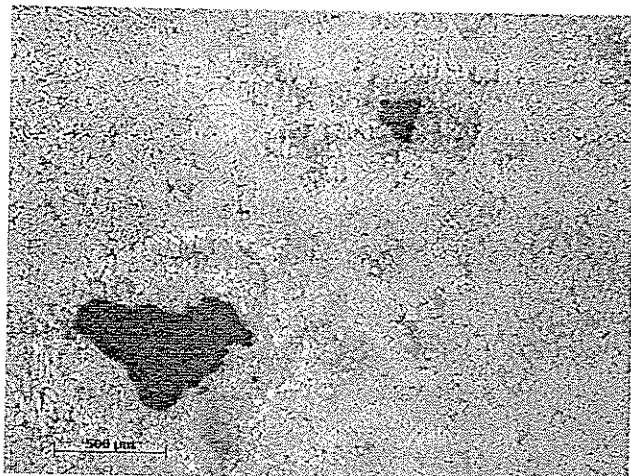
รูปที่ 5.22 C โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al scrap

ที่กำลังขยาย 50X

รูปที่ 5.22 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมก่อนการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์

(MDFT01) ที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน

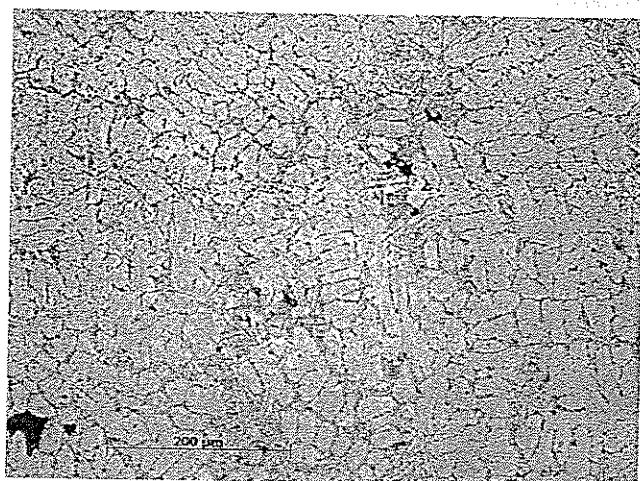


รูปที่ 5.23 A โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al scrap

ที่กำลังขยาย 5X

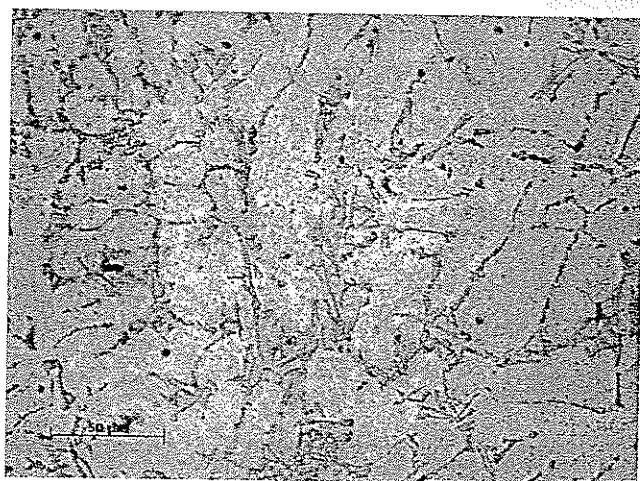
Degassing Condition	MDFT02
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Powder
Flux content	0.25%



รูปที่ 5.23 B โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al scrap

ที่กำลังขยาย 20X



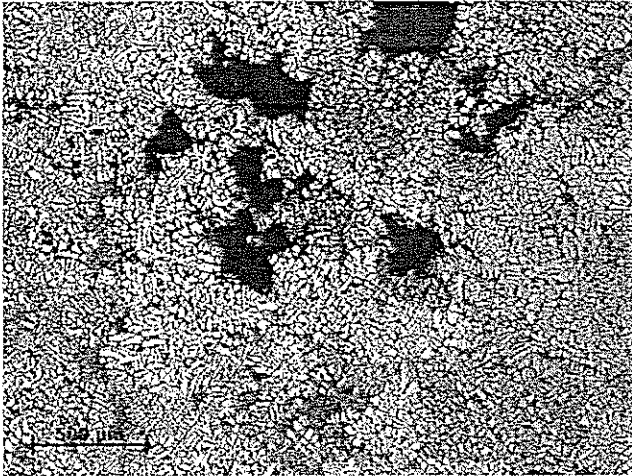
รูปที่ 5.23 C โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al scrap

ที่กำลังขยาย 50X

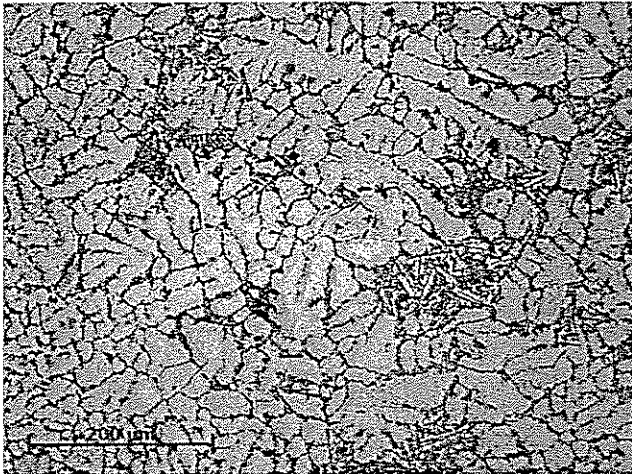
รูปที่ 5.23 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมหลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ (MDFT02)

ที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน

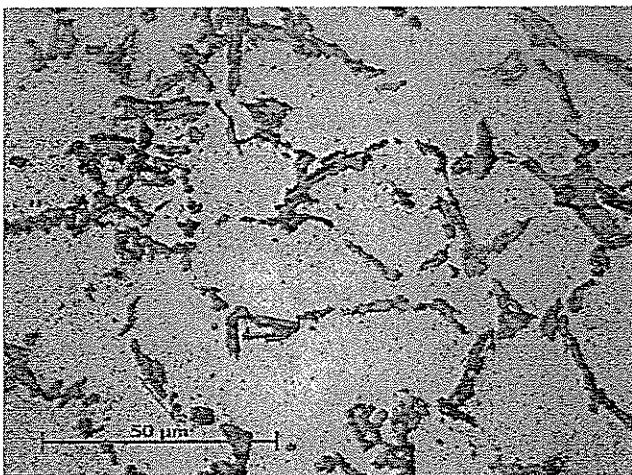


รูปที่ 5.24 A โครงสร้างจุลภาค MDFT03  
80% Al 356 ingot + 20% Al scrap  
ที่กำลังขยาย 5X

Degassing Condition	MDFT03
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	20
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Powder
Flux content	0.25%

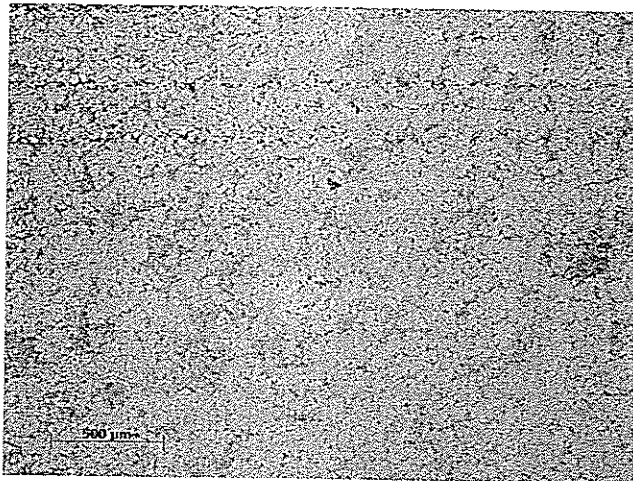


รูปที่ 5.24 B โครงสร้างจุลภาค MDFT03  
80% Al 356 ingot + 20% Al scrap  
ที่กำลังขยาย 20X



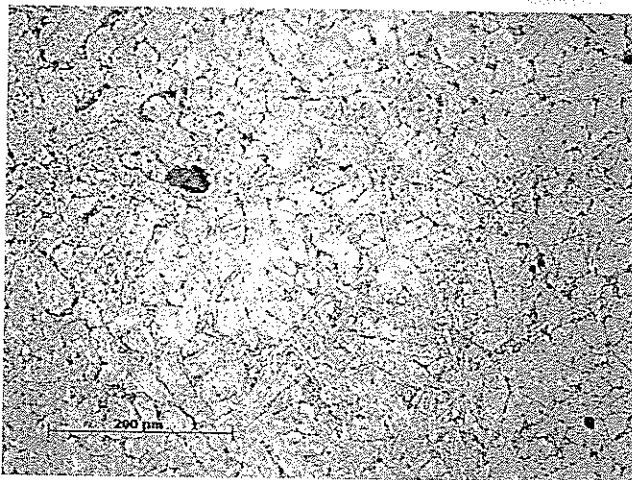
รูปที่ 5.24 C โครงสร้างจุลภาค MDFT03  
80% Al 356 ingot + 20% Al scrap  
ที่กำลังขยาย 50X

รูปที่ 5.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมหลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ (MDFT03)  
ที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน

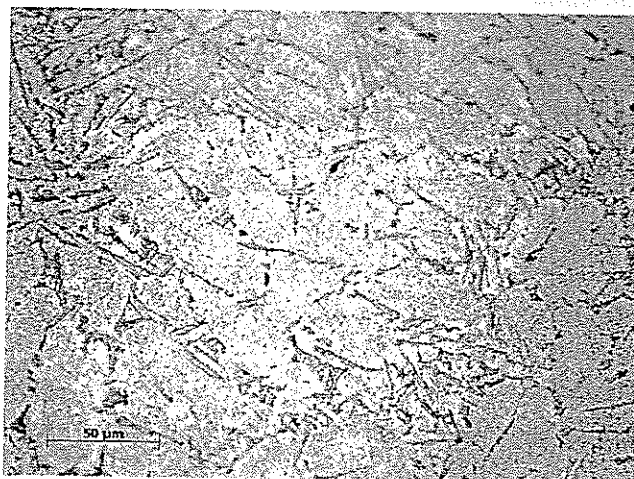


รูปที่ 5.25 A โครงสร้างจุลภาค MDFT04  
80% Al 356 ingot + 20% Al scrap  
ที่กำลังขยาย 5X

Degassing Condition	MDFT04
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Granular
Flux content	0.125%

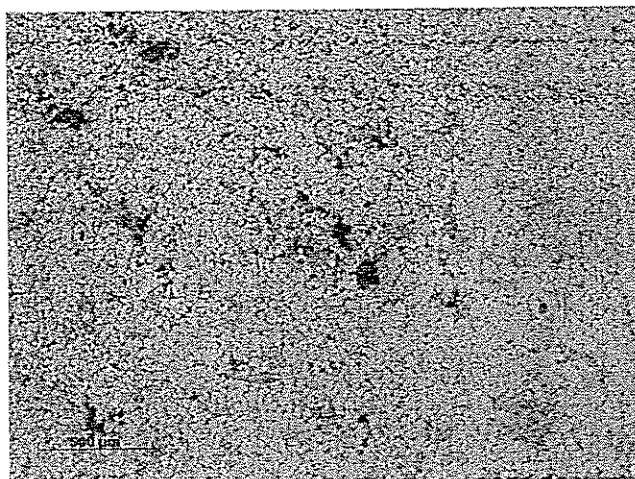


รูปที่ 5.25 B โครงสร้างจุลภาค MDFT04  
80% Al 356 ingot + 20% Al scrap  
ที่กำลังขยาย 20X



รูปที่ 5.25 C โครงสร้างจุลภาค MDFT04  
80% Al 356 ingot + 20% Al scrap  
ที่กำลังขยาย 50X

รูปที่ 5.25 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมหลังการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์  
(MDFT04) ที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน

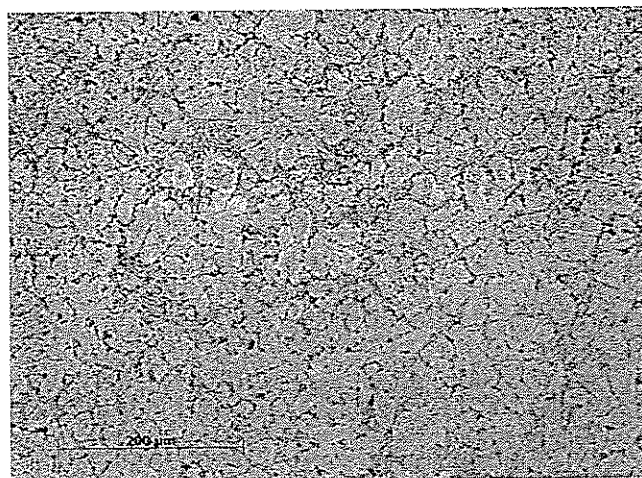


รูปที่ 5.26 A โครงสร้างจุลภาค MDFT05

80% Al 356 ingot + 20% Al scrap

ที่กำลังขยาย 5X

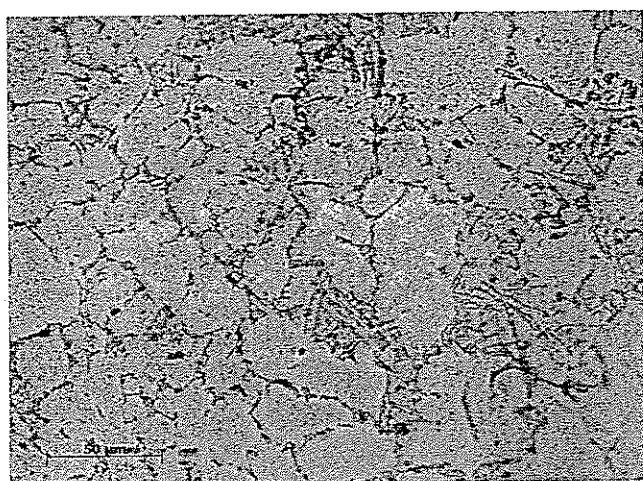
Degassing Condition	MDFT05
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	20
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Granular
Flux content	0.125%



รูปที่ 5.26 B โครงสร้างจุลภาค MDFT05

80% Al 356 ingot + 20% Al scrap

ที่กำลังขยาย 20X



รูปที่ 5.26 C โครงสร้างจุลภาค MDFT05

80% Al 356 ingot + 20% Al scrap

ที่กำลังขยาย 50X

รูปที่ 5.26 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมหลังการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ (MDFT05) ที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน

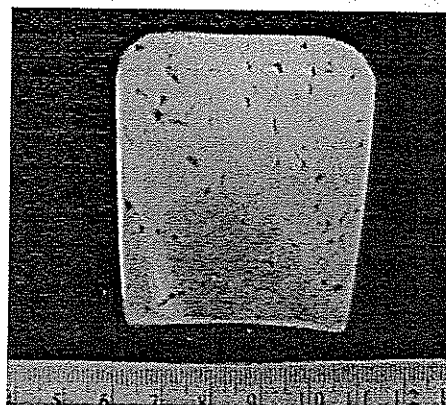
### 5.9 ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุน

ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุนในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม จากการทดสอบการแข็งตัวของชิ้นงานในอากาศเปรียบเทียบกับการแข็งตัวของชิ้นงานในสุญญากาศ (100 และ 650 mmHg) โดยใช้หลักการ Reduced pressure test ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นภายหลัง พบว่า หากชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมที่มีการเติมเศษจี้กลึงอะลูมิเนียม 20% และไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนดั่งในสถานะ MDFT01 จะทำให้ชิ้นงานหล่อที่ได้มีรูพรุนจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 5.27 จะสังเกตเห็นได้ว่า ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เย็นตัวในสุญญากาศนั้นมีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นโพรงยาวและแคบ นอกจากนี้ หากเปรียบเทียบที่ชิ้นงานที่แข็งตัวในอากาศและในสุญญากาศที่ 100 mmHg นั้นแสดงผลของปริมาณรูพรุนที่ใกล้เคียงกัน แต่ชิ้นงานที่แข็งตัวในสุญญากาศที่ 650 mmHg จะขยายผลขนาดรูพรุนให้เห็นชัดเจนมากยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ ในสถานะการทดลอง MDFT02-05 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีปริมาณรูพรุนที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.28-5.31 และสถานะการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ที่สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซสูงสุด คือ สถานะ MDFT05 นั่นคือ ทำการกำจัดก๊าซที่ความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที พร้อมการฉีดฟลักซ์ชนิดเม็ด (Granular flux) โดยใช้เวลา 20 นาที

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การกำจัดก๊าซที่เวลาเพิ่มขึ้นจาก 10 นาที เป็น 20 นาทีจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการที่ทำให้อะตอมของไฮโดรเจนสามารถแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซอาร์กอนได้มากขึ้น ส่วนการเลือกใช้ชนิดของฟลักซ์พบว่า ฟลักซ์ชนิดเม็ดจะให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณรูพรุนที่ดีกว่า อีกทั้งยังลดการฟุ้งกระจายระหว่างปฏิบัติงานอีกประการหนึ่งด้วย

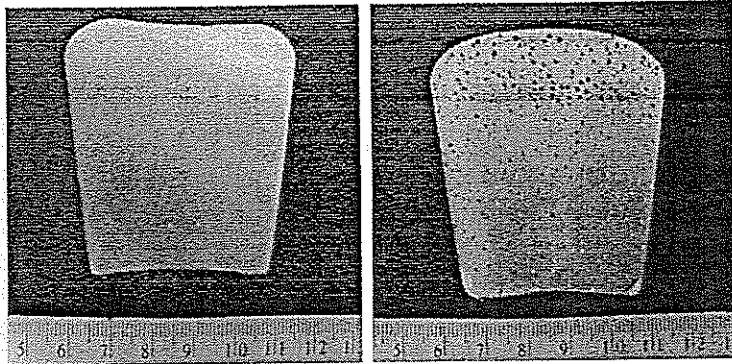
Degassing Condition	MDFT01
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-
Flux type	-
Flux content	-



รูปที่ 5.27 ภาพถ่ายแสดงปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT01

80% Al 356 ingot + 20% Al scrap (Nondegassing) เย็นตัวในสุญญากาศที่ 650 mmHg

Degassing Condition	MDFT02
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Powder
Flux content	0.25%

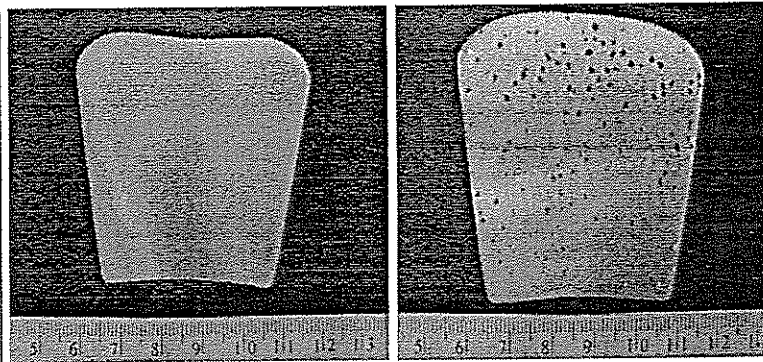


เย็นตัวในอากาศ

เย็นตัวในสุญญากาศ

รูปที่ 5.28 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน MDFT02 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศที่ 650 mmHg

Degassing Condition	MDFT03
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	20
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Powder
Flux content	0.25%

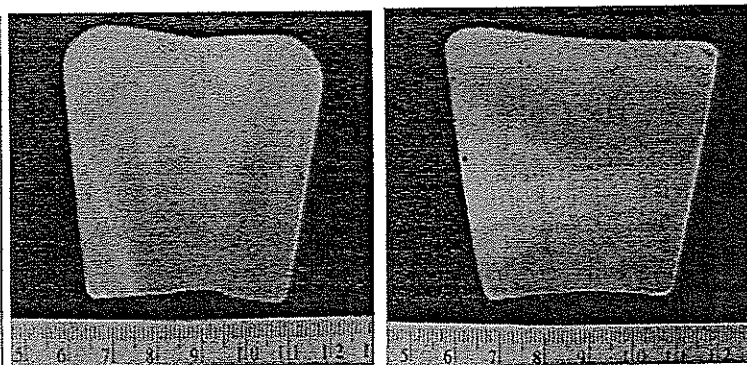


เย็นตัวในอากาศ

เย็นตัวในสุญญากาศ

รูปที่ 5.29 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน MDFT03 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศที่ 650 mmHg

Degassing Condition	MDFT04
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	20
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Granular
Flux content	0.125%

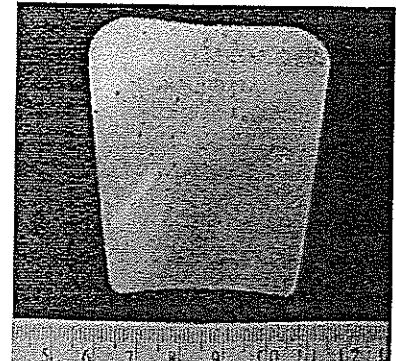
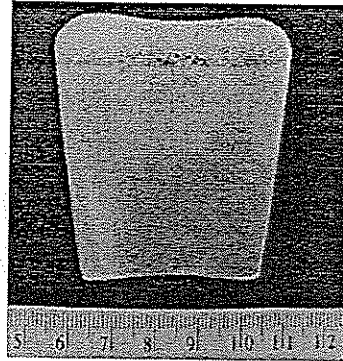


เย็นตัวในอากาศ

เย็นตัวในสุญญากาศ

รูปที่ 5.30 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน MDFT05 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศที่ 650 mmHg

Degassing Condition	MDFT05
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Granular
Flux content	0.125%



เย็นตัวในอากาศ

เย็นตัวในสุญญากาศ

รูปที่ 5.31 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน MDFT04 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศที่ 650 mmHg

### 5.9 ผลการตรวจสอบความหนาแน่น

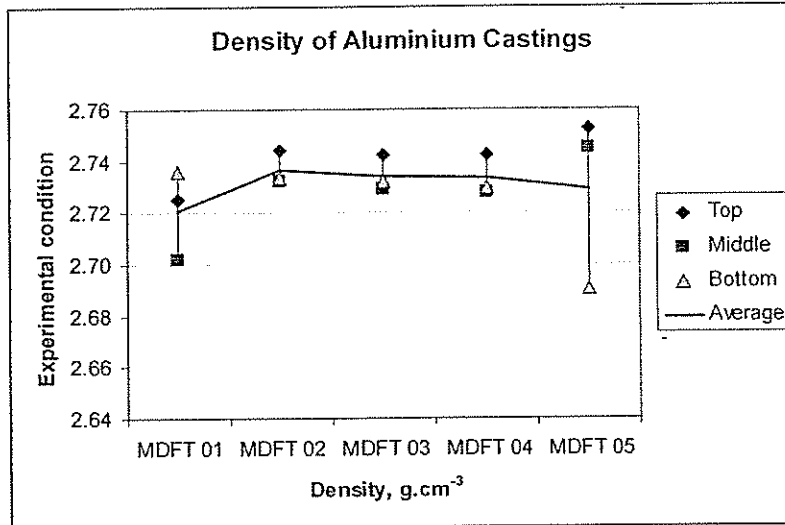
เมื่อทำการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมที่ตำแหน่งบน กลางและล่าง โดยใช้หลักการของ Archimedes พบว่า ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อแปรผันกับสถานะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซ หรือ แปรผันกับปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานนั่นเอง ดังแสดงในตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.32

เมื่อพิจารณาชิ้นงานหล่อที่ไม่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ พบว่ามีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.72 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (MDFT01) ซึ่งน้อยกว่าในชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ทุกสถานะการทดลอง คือ 2.73-2.74 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งทั้งนี้ก็เนื่องมาจากผลกระทบของปริมาณรูพรุนที่ตรวจพบในชิ้นงานหล่อนั่นเอง และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ชนิดเม็ด โดยใช้เครื่องมือกำจัดก๊าซ

ตารางที่ 5.10 ค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ในชิ้นงานหล่อ MDFT01-MDFT05

Melt	Condition	DENSITY (g/cm <sup>3</sup> )				
		Top	Middle	Bottom	Average	SD
MDFT01	Non-degassing	2.725	2.702	2.736	2.721	0.017
MDFT02	Degassing 10 min, 0.25% powder flux	2.744	2.732	2.733	2.737	0.007
MDFT03	Degassing 20 min, 0.25% powder flux	2.742	2.729	2.732	2.734	0.007
MDFT04	Degassing 20 min, 0.125% granular flux	2.742	2.728	2.730	2.733	0.008
MDFT05	Degassing 10 min, 0.125% granular flux	2.753	2.745	2.690	2.729	0.034





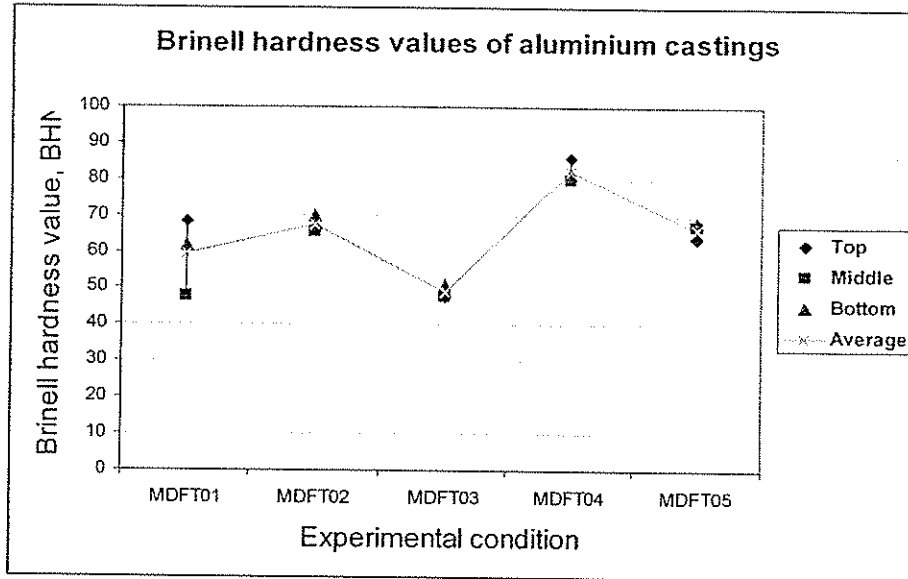
รูปที่ 5.32 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่อ

### 5.9 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness test)

ผลการทดสอบความแข็ง (Brinell Hardness) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม โดยแต่ละตำแหน่ง จะทดสอบค่าความแข็ง 3 จุดที่ ซ้าย กลาง และขวา ตามลำดับ พบว่า มีแนวโน้มของผลการทดลอง ใกล้เคียงกับผลการทดสอบปริมาณรูพรุนและค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ ดังแสดงในตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.33 ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การกำจัดก๊าซในสภาวะ MDFT04 นั้นให้ค่าความแข็งที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสภาวะการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่า หากชิ้นงานนั้นไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ (MDFT01) ข้อมูลค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบที่ตำแหน่งบน กลางและล่างของชิ้นงานนั้นมีความแตกต่างกันพอสมควร หรือมีการกระจายตัวสูงดังแสดงในการกระจายตัวของค่าความแข็งในชิ้นงานหล่อ ซึ่งแตกต่างจากการกระจายตัวของค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดก๊าซ (MDFT02-05) ดังนั้นการกำจัดก๊าซด้วยวิธีการปั่นด้วยก๊าซอาร์กอนพร้อมการฉีดฟลักซ์มีแนวโน้มทำให้ชิ้นงานหล่อมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าความแข็งที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ในชิ้นงานหล่อ MDFT01-MDFT05

Melt	Condition	Average hardness value (BHN)			Avg.	SD.
		Top	Middle	Bottom		
MDFT01	Non-degassing	68.33	47.83	61.90	59.35	10.48
MDFT02	Degassing 10 min, 0.25% powder flux	66.40	65.60	70.00	67.33	2.343
MDFT03	Degassing 20 min, 0.25% powder flux	47.83	47.70	51.20	48.91	1.984
MDFT04	Degassing 20 min, 0.125% granular flux	85.76	79.76	81.47	82.33	3.091
MDFT05	Degassing 10 min, 0.125% granular flux	63.67	66.93	68.36	66.32	2.403



รูปที่ 5.33 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่อ

#### 5.10 การทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile test)

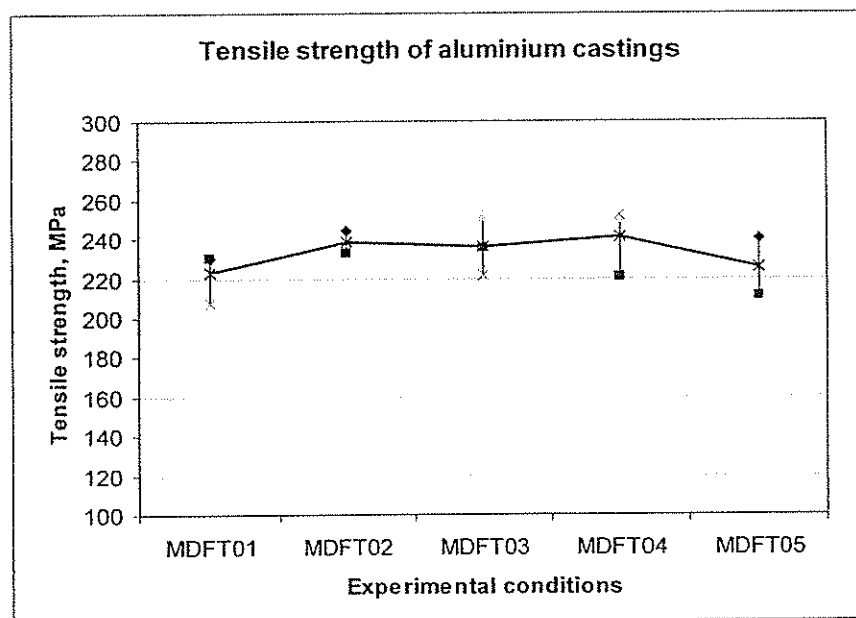
ผลการทดสอบสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมพบว่า ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน (MDFT02-05) จะให้ค่าความแข็งแรงแรงดึงและค่าความแข็งแรงที่จุดครากที่ดีกว่าในชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ (MDFT01) ดังแสดงในตารางที่ 5.12 และรูปที่ 5.34-5.36 และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการทดลองที่ MDFT04 ซึ่งกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์เป็นระยะเวลา 20 นาทีและใช้ฟลักซ์ชนิดเม็ด (0.125%) จะให้ค่าความแข็งแรงแรงดึงที่สูงกว่าในชิ้นงานทดสอบอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการตรวจสอบปริมาณรูพรุนความหนาแน่นรวมทั้งค่าความแข็งที่ได้กล่าวมาแล้ว ค่าความแข็งแรงแรงดึงและความแข็งแรงที่จุดครากของชิ้นงานหล่อ MDFT04 นั้นเพิ่มขึ้นประมาณ 8.4% และ 5.7% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่อ MDFT01 ที่ไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซ นอกจากนี้หากเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงแรงดึงของชิ้นงานทดสอบกับค่ามาตรฐานของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด 356 (~180 MPa) จะพบว่ามีความมากกว่ามาตรฐาน แต่อย่างไรก็ดี จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีพบว่าปริมาณของทองแดงมากกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าความแข็งแรงแรงดึงและความแข็งแรงที่จุดครากมากขึ้นด้วย

แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีค่าที่ลดลง เมื่อค่าความแข็งแรงแรงดึงและความแข็งแรงที่จุดครากเพิ่มขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวนี้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ (1.4-2.8%) หากเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน (5%) ในสภาวะหล่อ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการหลอมชิ้นงานนั้น ไม่ได้มีกระบวนการทำกรนให้ละเอียดและการปรับปรุงทรงสัณฐานของโครงสร้าง ยุทเทคนิคซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวต่ำกว่ามาตรฐาน รูปที่ 5.37 แสดงการเปรียบเทียบค่าความ

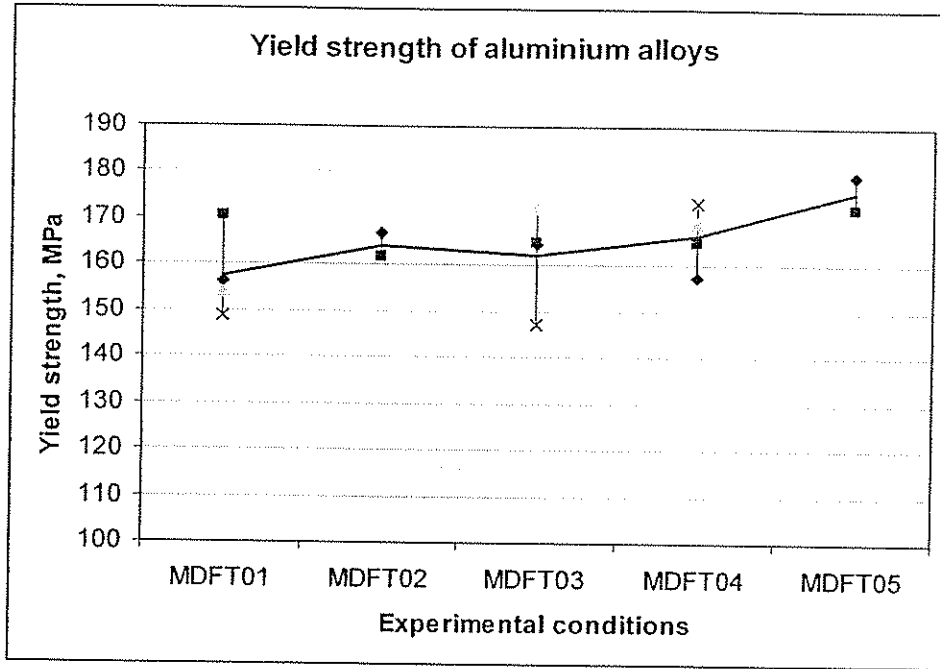
แข็งแรงแรงดึงระหว่างชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม ที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่อง MDU (M1-M7) และการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU (MDFT01-05) พบว่า การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์มีแนวโน้มที่ให้อายุความแข็งแรงแรงดึงที่ดีกว่า

ตารางที่ 5.12 แสดงสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU

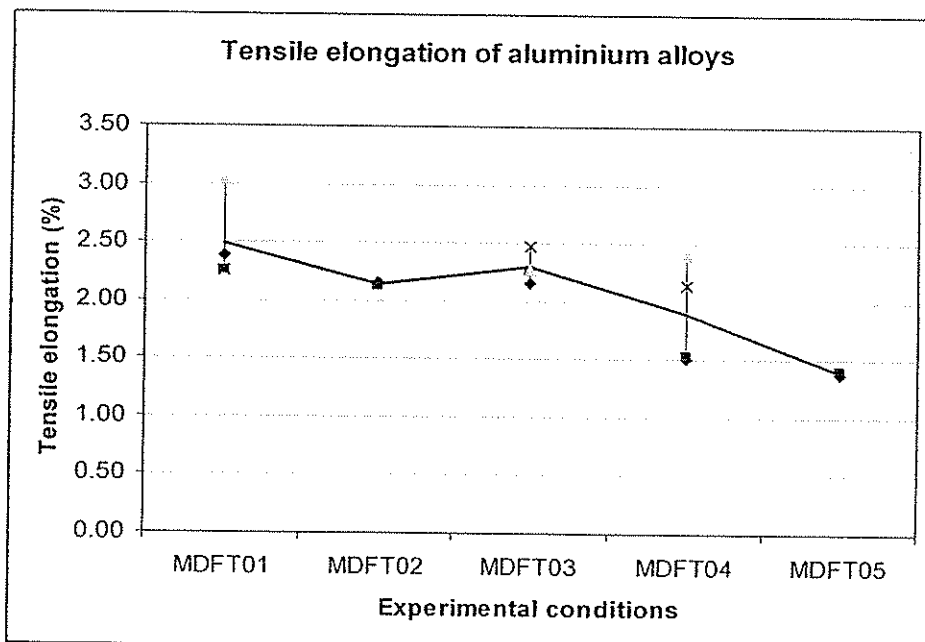
Test conditions	Tensile properties		
	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Tensile elongation (%)
MDFT01: 80%Al ingot+20%Al scrap Non-degassing	222.6	157.3	2.48
MDFT02: Degassing 10 min, 0.25% powder flux	238.5	164.2	2.15
MDFT03: Degassing 20 min, 0.25% powder flux	236.0	162.3	2.29
MDFT04: Degassing 20 min, 0.125% granular flux	241.2	166.3	1.89
MDFT05: Degassing 10 min, 0.125% granular flux	225.4	175.8	1.40



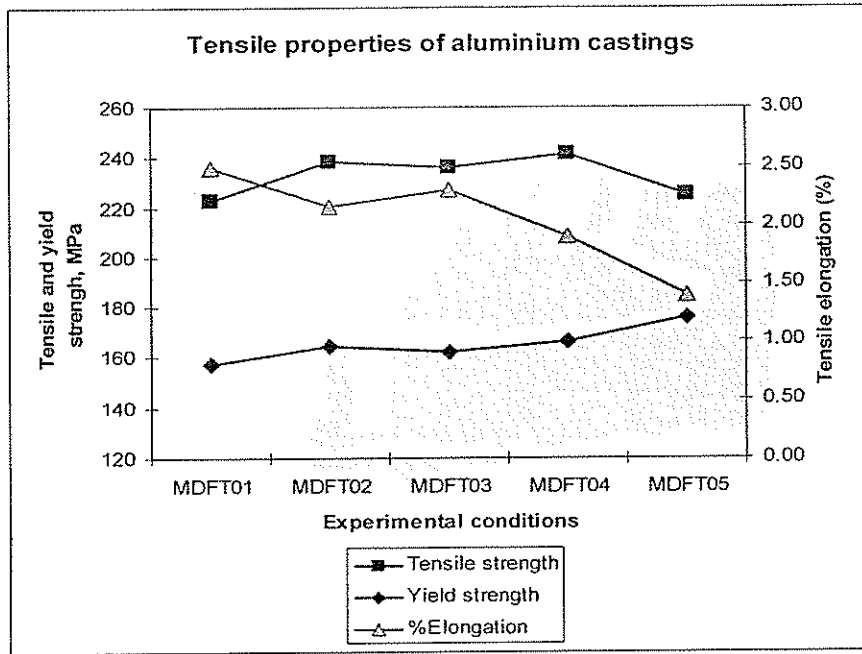
รูปที่ 5.34 (a) กราฟแสดงค่าความแข็งแรงแรงดึง (Tensile strength) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน



รูปที่ 5.34 (b) กราฟแสดงค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield strength at 0.2% strain) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

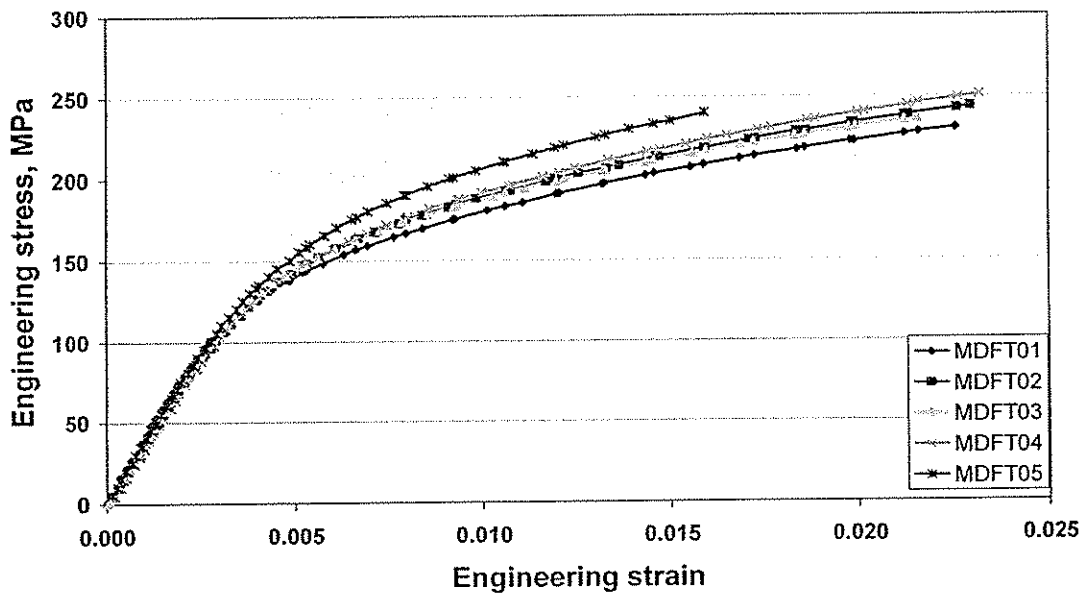


รูปที่ 5.34 (c) กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Tensile elongation) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

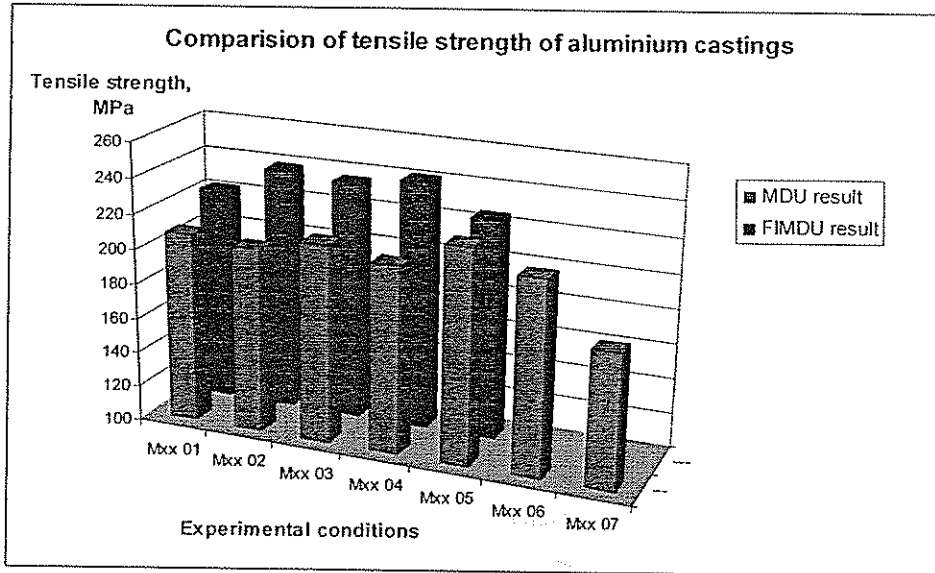


รูปที่ 5.35 กราฟความสัมพันธ์แสดงสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัด  
ก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

**Engineering stress-strain curves of aluminium castings**



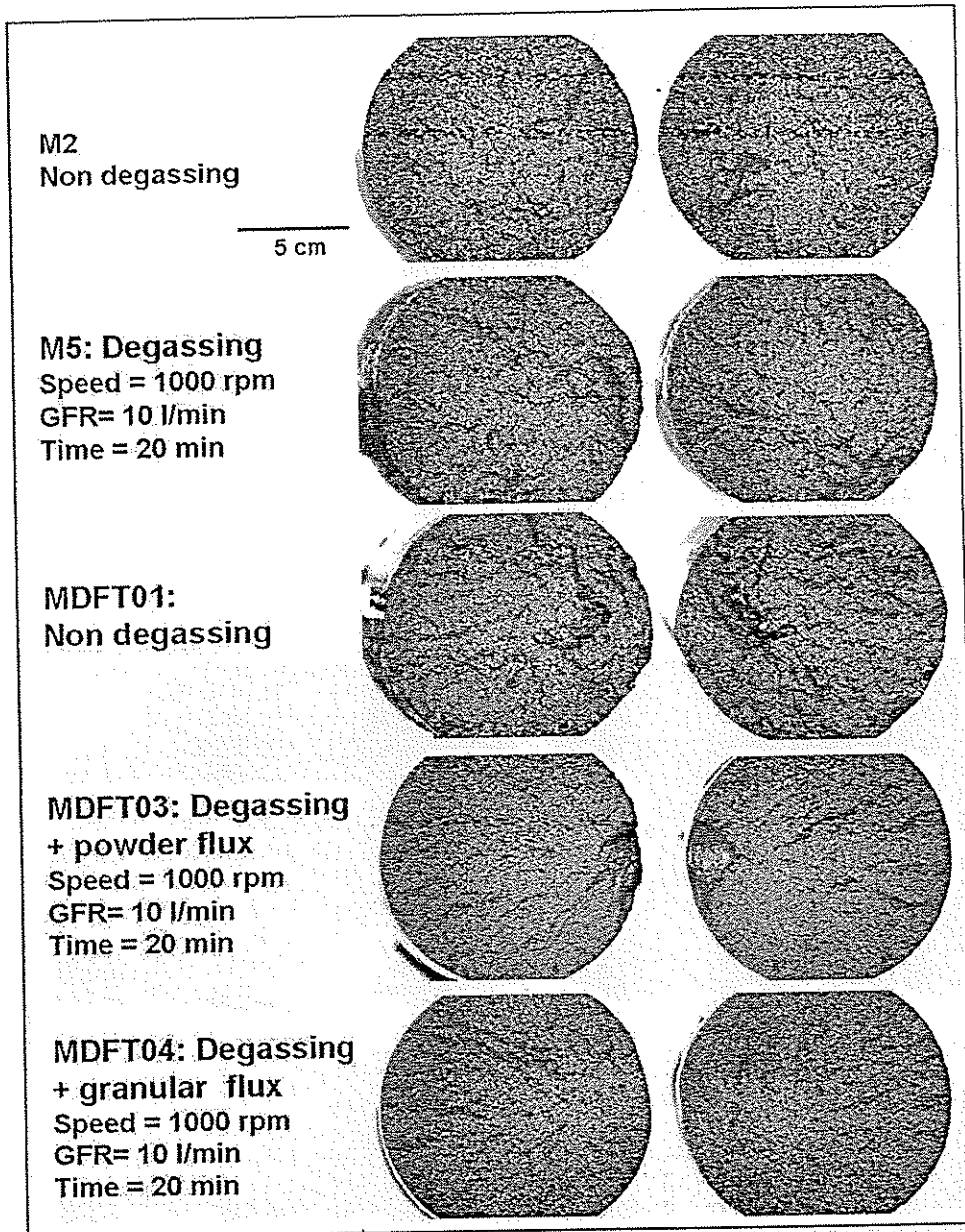
รูปที่ 5.36 กราฟความสัมพันธ์ Engineering stress-strain ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่าน  
การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน



รูปที่ 5.37 แสดงค่าความแข็งแรงแรงดึงเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่อง MDU (M1-M7) และการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU (MDFT01-05)

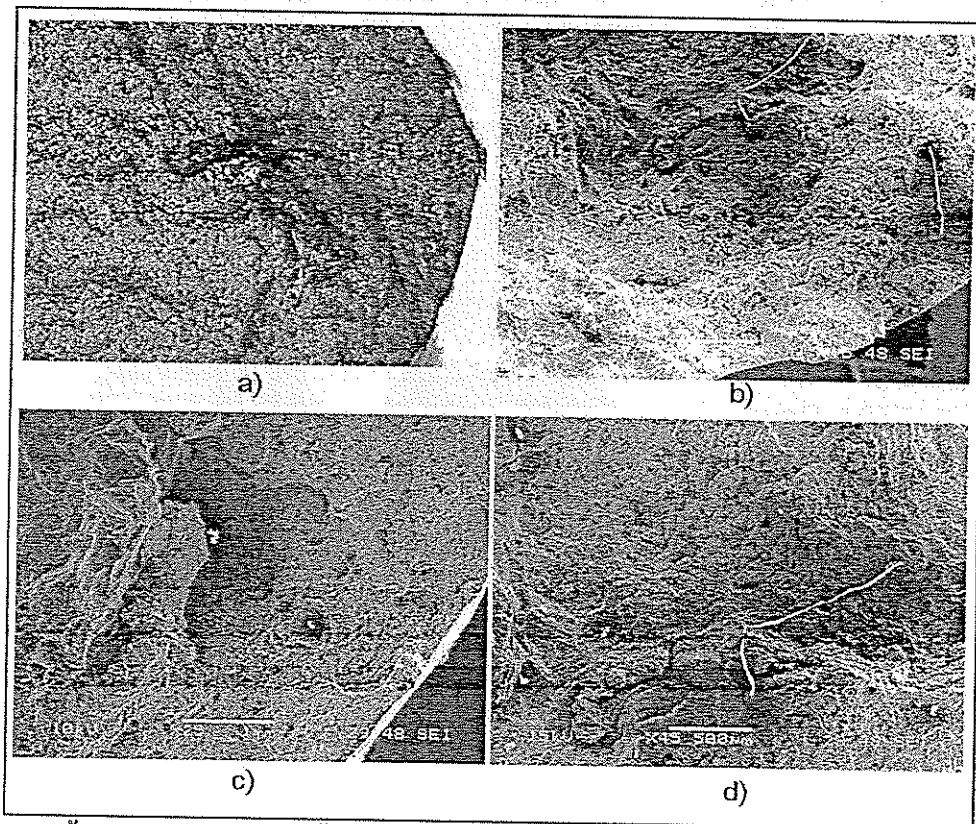
#### 5.11 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึง

รูปที่ 5.38 แสดงตัวอย่างพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเกิดการเสียรูปแบบถาวรก่อนการแตกหักค่อนข้างน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ค่อนข้างต่ำ (1-3%) ซึ่งชิ้นงานทุกชิ้นเกิดการแตกหักก่อนที่กราฟความสัมพันธ์ Engineering stress-strain จะถึงจุดสูงสุด เมื่อพิจารณาพื้นผิวการแตกหักด้วยตาเปล่าพบว่า มีพื้นผิวการแตกหักเป็นสีเทา (Gray surface) และเมื่อตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักด้วยกล้องกำลังขยายต่ำ (Stereomicroscope) พบว่า ในบางสภาวะการทดลอง เช่น M2, MDFT01 และ MDFT03 แสดงจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (Fracture initiation) จากรูพรุนหรืออินคลูชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นงาน MDFT01 ซึ่งน่าจะเกิดจากอินคลูชัน ส่วนในชิ้นงาน MDFT03 ที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์แล้วนั้นยังพบอินคลูชันเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักที่ขอบของชิ้นงานเนื่องมาจากการใช้ฟลักซ์ชนิดผง ซึ่งทำให้เกิดการฟุ้งกระจายและเกิดความปั่นป่วนของน้ำโลหะเป็นสาเหตุของการสะสมของฟิล์มออกไซด์หรืออินคลูชันได้ พื้นผิวการแตกหักที่ได้กล่าวมาข้างต้น มีความแตกต่างจากชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์อย่างเหมาะสม ดังที่สังเกตพบในชิ้นงานหล่อ MDFT04 ซึ่งไม่แสดงถึงร่องรอยของจุดแตกหักซึ่งเกิดจากอินคลูชันหรือรูพรุนแต่อย่างใด ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า การที่ไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ที่เหมาะสมจะทำให้มีโอกาสเกิดการสะสมของออกไซด์หรืออินคลูชันซึ่งเป็นผลเสียต่อสมบัติแรงดึง



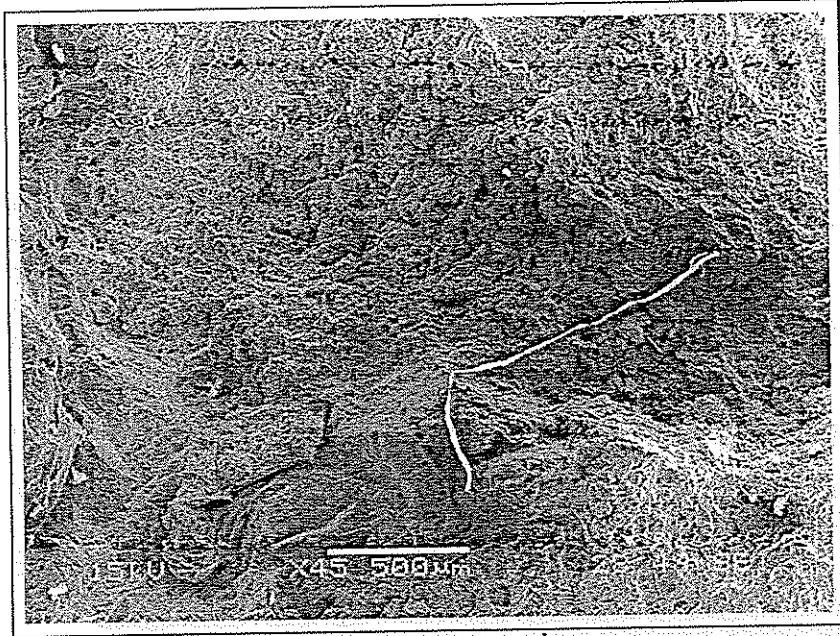
รูปที่ 5.38 แสดงพื้นผิวการแตกหักเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่อง MDU และการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU

เมื่อทำการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักด้วยกล้อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 5.39 พบว่าพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงาน MDFT01 ที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและฉีดฟลักซ์นั้นสามารถสังเกตเห็นจุดเริ่มต้นการแตกหักได้ชัดเจน โดยในรูปที่ 5.39 b) แสดงบริเวณ 1 ของรูปที่ 5.39 a) ซึ่งสังเกตเห็นพื้นผิวเป็นลักษณะคล้ายฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ปกคลุมอยู่ นอกจากนี้ในรูปที่ 5.39 c) แสดงบริเวณ 1 ของรูปที่ 5.39 a) แสดงจุดกำเนิดของการแตกหัก ส่วนในรูป 5.39 d) แสดงบริเวณใกล้เคียงของจุดกำเนิดการแตกหัก ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นพื้นผิวคล้ายฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อเนื่องกับบริเวณโพรงที่เกิดจากการหดตัวระหว่างการแข็งตัวของชิ้นงาน (Solidification shrinkage) ดังแสดงในรูปที่ 5. 40 ดังแสดงให้เห็นในบริเวณที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยบริเวณที่เกิดโพรงหดตัวจากกระบวนการแข็งตัวนั้นกินบริเวณที่มีความยาวประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และเห็นโครงสร้างของเดนไดรต์ชัดเจน นอกจากนี้ พื้นผิวการแตกหักจะปรากฏอินคลูชันอยู่ทั่วไป

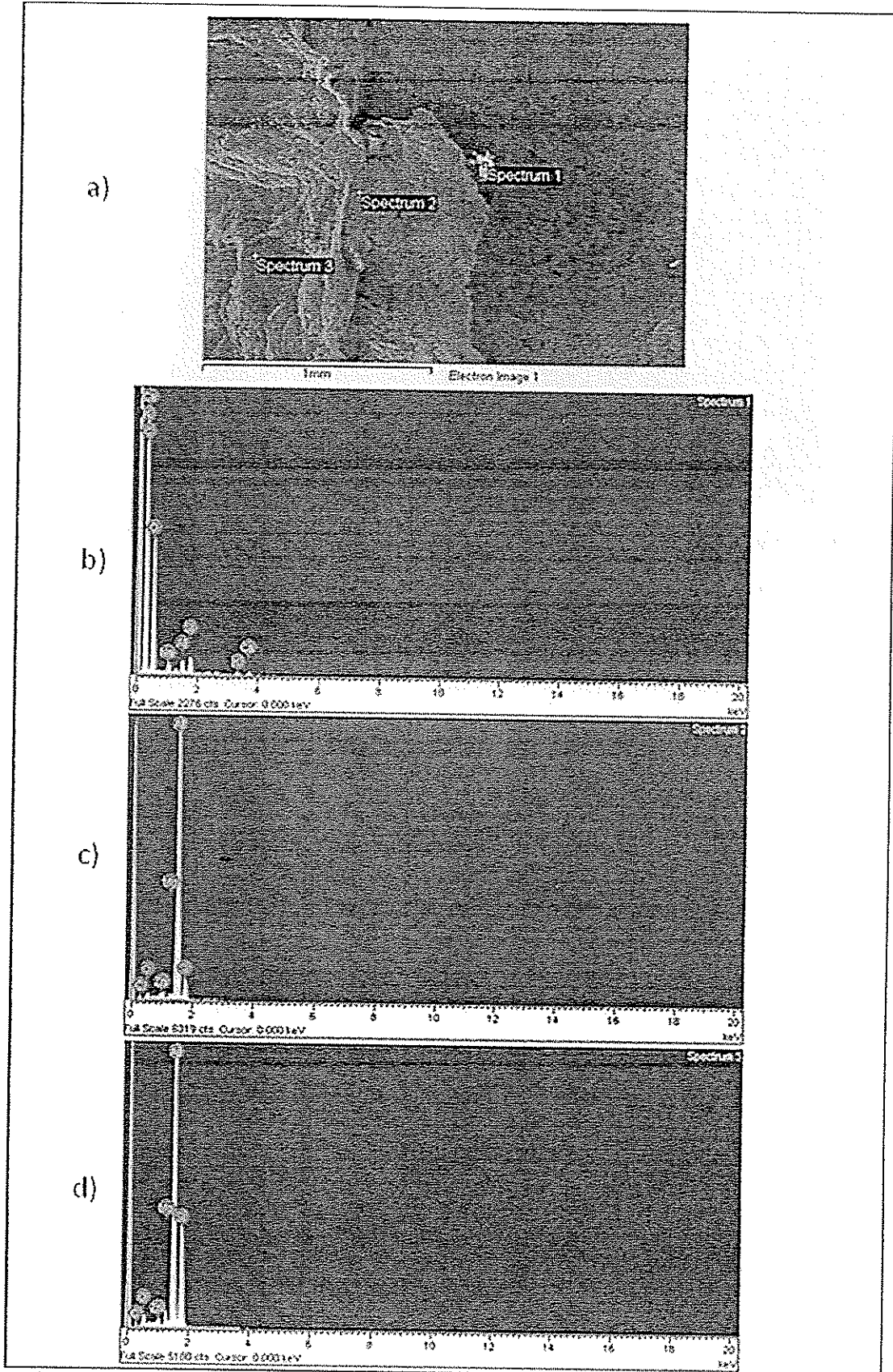


รูปที่ 5.39 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง  
a) จุดที่ทำให้เกิดการแตกหักจากกล้องสเตอริโอที่กำลังขยาย 8 เท่า, b)-d) จาก SEM





รูปที่ 5.40 พื้นผิวใกล้จุดกำเนิดของการแตกหักแสดงบริเวณที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์และโพรงหดตัวระหว่างการแข็งตัวที่ต่อเนื่องกันกินบริเวณกว้าง ในชิ้นงาน MDFT01



รูปที่ 5.41 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ใน SEM บนพื้นผิวการแตกหักชิ้นงาน MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

จากนั้นเมื่อทำการตรวจสอบบริเวณพื้นผิวที่เกิดการแตกหักและวิเคราะห์ด้วย EDS พบว่าสเปกตรัมที่ 1, 2 และ 3 มีองค์ประกอบของธาตุแสดงดังรูปที่ 5.41 และ ตารางที่ 5.13 จะเห็นได้ว่าบริเวณของสเปกตรัมที่ 2 และ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุที่ใกล้เคียงกัน คือ ประกอบไปด้วย Aluminium เป็นส่วนใหญ่และรองลงมาคือซิลิกอนและแมกนีเซียม ซึ่งแสดงถึงเฟสพื้นของโลหะอะลูมิเนียมเกรด 356 (Al-Si-Mg) เมื่อเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ธาตุจากสเปกตรัมที่ 1 จะพบแคลเซียม โพแทสเซียม คาร์บอนและออกซิเจน ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นอินคลูชันขนาดประมาณ 150-200 ไมครอน อยู่ใกล้บริเวณที่เป็นจุดกำเนิดของการแตกหัก ตารางที่ 5.13 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุจากสเปกตรัมที่ 1, 2 และ 3 จากพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่อ MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

Spectrum 1

Element	Intensity	Weight%	Atomic%
C K	1.4654	53.79	62.66
O K	1.1336	38.55	33.73
Na K	1.3884	1.26	0.77
Al K	1.0435	1.51	0.78
Si K	1.0195	2.34	1.16
K K	0.9981	0.92	0.33
Ca K	0.9230	1.63	0.57
Totals		100.00	

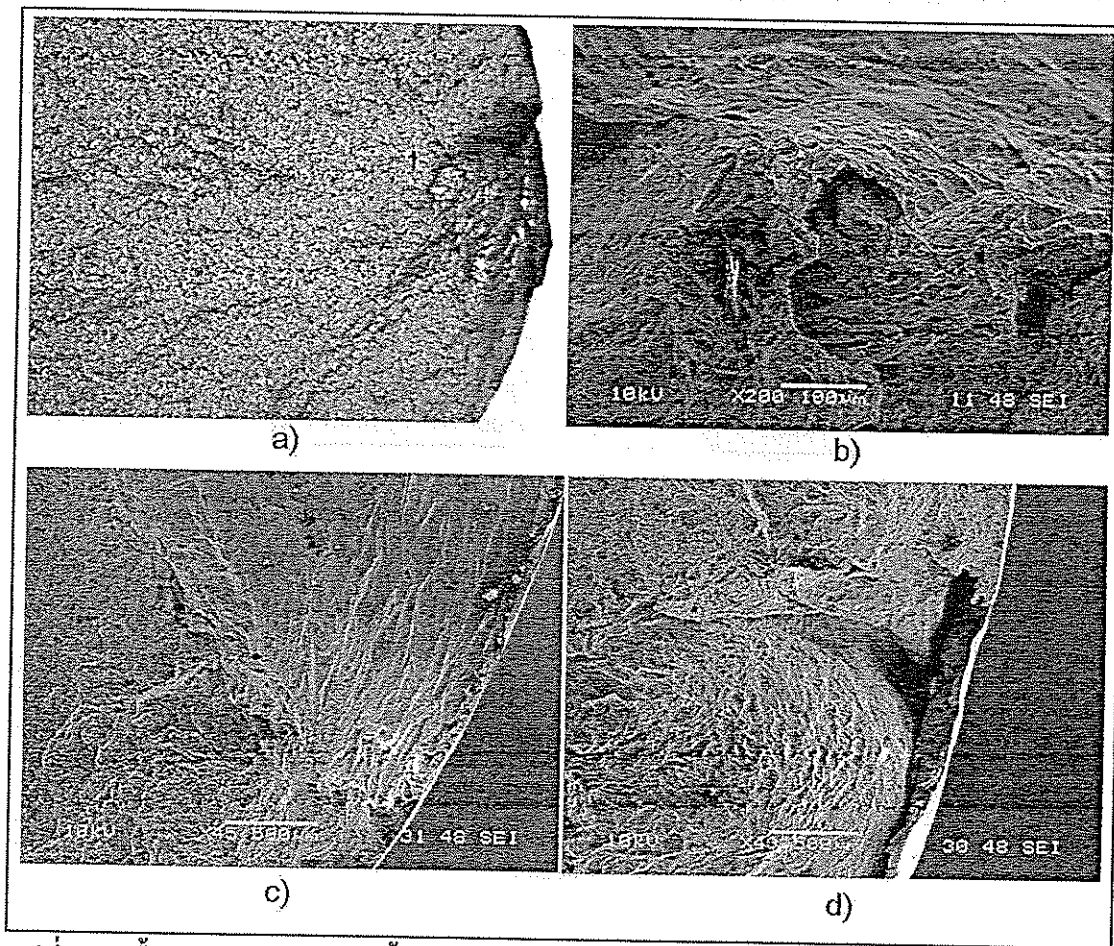
Spectrum 2

Element	Intensity	Weight%	Atomic%
C K	0.3380	6.46	13.30
O K	1.3833	3.17	4.90
Mg K	1.4432	0.82	0.84
Al K	1.3006	78.53	71.99
Si K	0.8617	9.56	8.42
Zn L	0.8580	1.45	0.55
Totals		100.00	

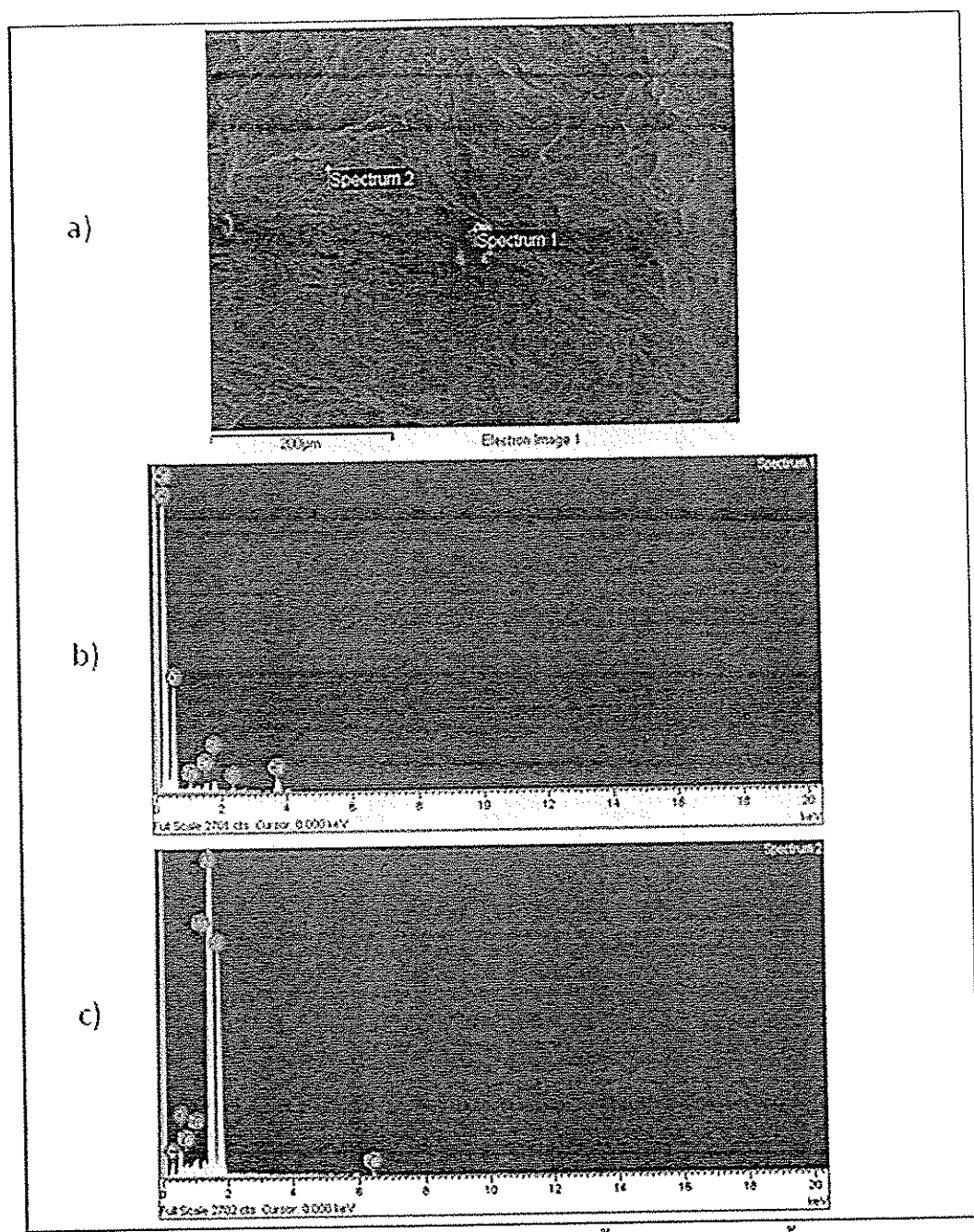
Spectrum 3

Element	Intensity	Weight%	Atomic%
C K	0.3171	5.30	11.02
O K	1.3451	4.71	7.36
Mg K	1.4120	2.15	2.21
Al K	1.2819	56.03	51.85
Si K	0.9397	30.38	27.01
Zn L	0.8379	1.42	0.54
Totals		100.00	

และเมื่อตรวจสอบชิ้นงานหล่อ MDFT03 ที่ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ชนิดผงเป็นระยะเวลา 20 นาทีพบว่า หลังจากการทดสอบแรงดึง พื้นผิวการแตกหักแสดงจุดเริ่มต้นของการแตกหักดังแสดงในรูปที่ 5.42 a) และเมื่อตรวจสอบด้วยกล้อง SEM แสดงพื้นผิวการแตกหักที่เรียบและโค้งรับกันทั้งสองด้านแสดงในรูป 5.42 c) และ d) พื้นผิวการแตกหักจะปรากฏ Inclusion อยู่ทั่วไป และจากผลการวิเคราะห์ธาตุดังแสดงในรูปที่ 5.43 และตารางที่ 5.14 ซึ่งพบว่าผลการวิเคราะห์ธาตุที่บริเวณสเปคตรัมที่ 1 จะพบธาตุคาร์บอน ออกซิเจนและแคลเซียมเป็นหลัก ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นอินคลูชันที่มีขนาดประมาณ 25-30 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ธาตุบริเวณสเปคตรัมที่ 2 ซึ่งเป็นเฟสพื้นของอะลูมิเนียมเกรด 356



รูปที่ 5.42 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง  
 a) จุดที่ทำให้เกิดการแตกหักจากกล้องสเตอริโอ, b)-d) จาก SEM



รูปที่ 5.43 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ใน SEM บนพื้นผิวการแตกหักชิ้นงาน MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 5.14 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุจากสเปกตรัมที่ 1 และ 2 จากพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงาน หล่อ MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

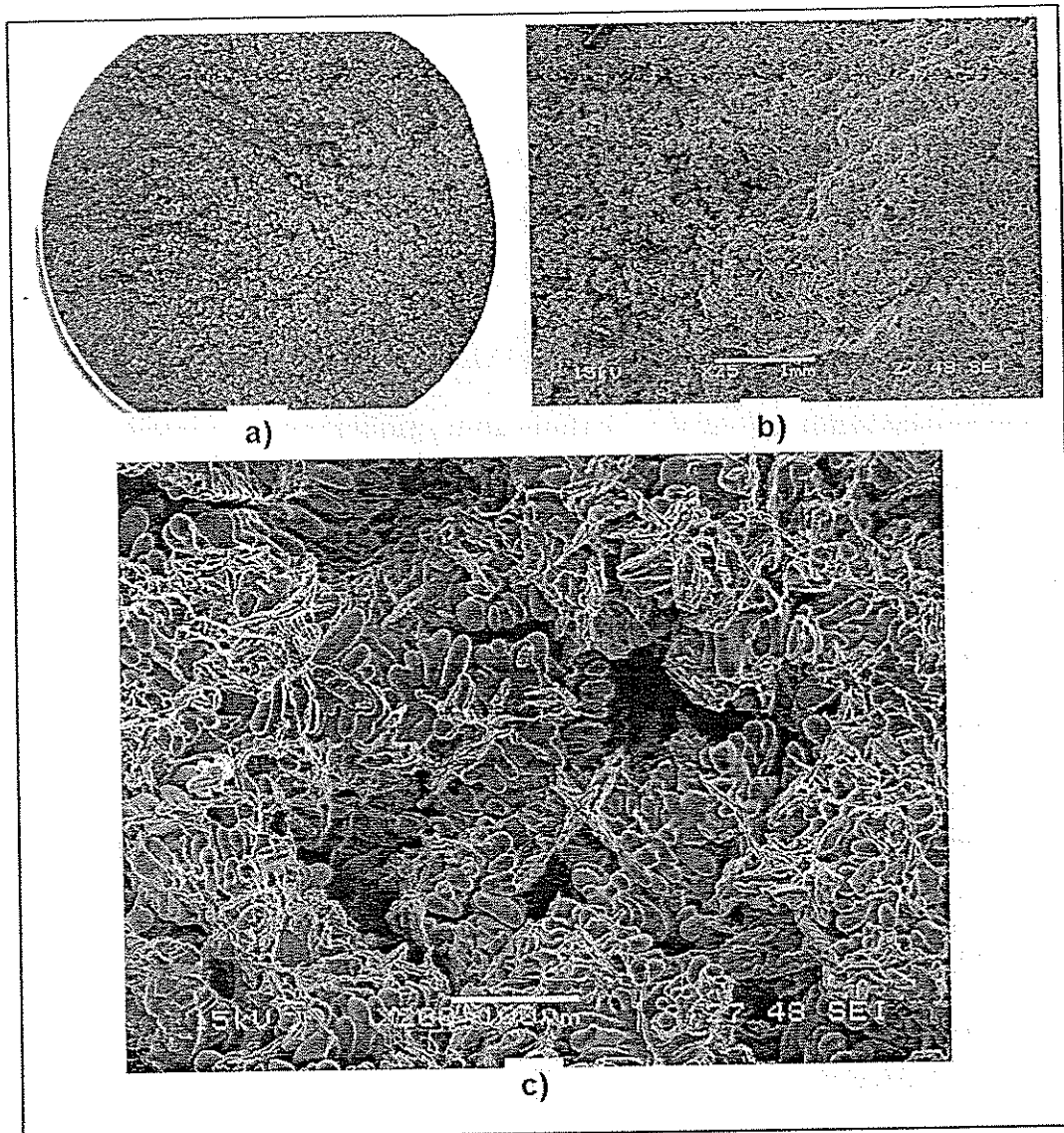
Spectrum 1

Element	Intensity	Weight%	Atomic%
C K	1.5440	62.79	72.53
O K	0.9798	28.33	24.57
Si K	1.0263	1.18	0.58
S K	0.9674	0.52	0.22
Ca K	0.9271	4.70	1.63
Zn L	0.5932	0.93	0.20
Br L	0.7574	1.56	0.27
Totals		100.00	

Spectrum 2

Element	Intensity	Weight%	Atomic%
C K	0.3310	7.74	15.88
O K	1.3367	4.25	6.54
Mg K	1.3841	0.73	0.74
Al K	1.2774	54.03	49.33
Si K	0.9459	29.59	25.96
Fe L	0.7902	2.69	1.19
Zn L	0.8075	0.98	0.37
Totals		100.00	

และเมื่อตรวจสอบชิ้นงานหล่อ MDFT04 ที่ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ ชนิดเม็ดเป็นระยะเวลา 20 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5.44 a) พบว่า พื้นผิวการแตกหักหลังการทดสอบแรงดึงปรากฏบริเวณที่แสดง Inclusion น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน MDFT01 และ MDFT03 พื้นผิวการแตกหักทั่วไปแสดงการแตกหักแบบเหนียว ยกเว้นบริเวณตรงกลางของชิ้นงานแสดงพื้นผิวการแตกหักที่แตกต่างจากบริเวณรอบนอก ดังแสดงในรูปที่ 5.44 b) และเมื่อตรวจสอบด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยายสูงขึ้นปรากฏพื้นผิวการแตกหักตามช่องว่างของแกนเดนไดรต์ ซึ่งน่าจะเกิดจากโพรงหดตัวระหว่างการแข็งตัว ไม่ปรากฏบริเวณที่เป็นอินคลูชันโดยบริเวณที่เกิดโพรงหดตัวเนื่องจากกระบวนการแข็งตัวนั้นกินบริเวณที่มีความยาวประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และเห็นโครงสร้างของเดนไดรต์ชัดเจน ซึ่งการเกิดโพรงหดตัวจากกระบวนการแข็งตัวที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าการยืดตัว (% Elongation ~ 1.89%) นี้สามารถแก้ไขได้โดยกระบวนการทำเกรนให้ละเอียดและการปรับปรุงรูปทรงพื้นฐานของโครงสร้างยูเทคติก เพื่อลดปริมาณ โครงสร้างเข็มแหลมของยูเทคติกซิลิคอนอาจกีดขวางการเติมเต็มของน้ำโลหะระหว่างการเย็นตัวได้ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในภายหลัง



รูปที่ 5.44 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT04 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง  
 a) พื้นผิวการแตกหักจากกล้องสเตอริโอ, b)-c) จาก SEM

### 5.6 วิเคราะห์ผลการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจน

สำหรับการวิจัยนี้ ได้สนใจศึกษาเฉพาะกระบวนการกำจัดก๊าซด้วยกระบวนการ Rotary degassing เพื่อลดปริมาณรูพรุนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนก่อนการเทแบบ ดังนั้นสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของการทำเกรนให้ละเอียด การปรับปรุงโครงสร้างนั้นจะถูกถอดออกไป ส่วนกระบวนการเทน้ำโลหะไม่ให้เกิดความปั่นป่วนนั้น ทางผู้วิจัยได้ให้ความระมัดระวังและทำการหล่อชิ้นงานทดสอบโดยใช้แม่พิมพ์ตามมาตรฐานของ ASTM B108 อีกประการหนึ่งที่เป็นข้อจำกัดในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ คือ การหลอมอะลูมิเนียมโดยใช้เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งส่งผลให้เกิด

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการกวนน้ำโลหะอะลูมิเนียมตลอดเวลาระหว่างการหลอม โดยสามารถสังเกตได้จากผิวหน้าของน้ำโลหะระหว่างการหลอม มีผลทำให้ไฮโดรเจนละลายได้ง่ายขึ้นในน้ำโลหะ แต่อย่างไรก็ดี จากการสังเกตลักษณะของผิวหน้าของน้ำโลหะระหว่างการหลอมพบว่าเกิดการกวนที่ไม่รุนแรงมากนัก และผลการทดลองกำจัดก๊าซในขณะที่ยังมีผลกระทบของการกวนน้ำโลหะอยู่ ยังได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือกำจัดก๊าซที่สามารถทำงานได้ดีในสภาวะแม้มีการกวนน้ำโลหะอยู่ตลอดเวลา

#### 5.6.1 ผลกระทบของการเติมเศษชิ้นอลูมิเนียมต่อการกำจัดก๊าซ

จากผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุน ความหนาแน่น สมบัติความแข็งและสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม พบว่า แม้จะทำการหล่อชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยใช้อะลูมิเนียมอินกอต 100% (M1) ก็ยังสามารถทำให้เกิดปริมาณรูพรุนในชิ้นงานหล่อได้ เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนอาจมาจากความชื้นในบรรยากาศการหลอม วัสดุดิบที่ใช้ในการหลอม ดังนั้น กระบวนการกำจัดก๊าซจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการผลิตชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

เมื่อทดลองผสมเศษชิ้นอลูมิเนียม (Aluminium chip) ปริมาณ 20% (M2 และ MDFT01) ทำให้เพิ่มการละลายของไฮโดรเจนในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวมากขึ้น และหากไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซ จึงหลงเหลือเป็นรูพรุนที่เกิดจากก๊าซอยู่จำนวนมากในชิ้นงานหล่อ ลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่หากเปรียบเทียบกับสภาวะการทดลองอื่นและเป็นอันตรายอย่างยิ่งในแง่ของข้อตำหนิ เป็นผลให้สมบัติด้านต่างๆ เช่น สมบัติความแข็ง สมบัติแรงดึงแย่งตามลำดับ

#### 5.6.2 ผลกระทบของความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์และอัตราการไหลของก๊าซต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ

จากการทดลองปั่นก๊าซอาร์กอนในน้ำซึ่งมีค่าความหนืดที่อุณหภูมิห้อง ใกล้เคียงกับน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว [7] เมื่อแปรค่าความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000 รอบ/นาที และใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 5, 10, 15 และ 20 ลิตร/นาที พบว่าการใช้ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่สูง (1000 รอบ/นาที) ร่วมกับการใช้อัตราไหลของก๊าซอาร์กอนที่ต่ำ (5 ลิตร/นาที) ทำให้เกิดการกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนได้ทั่วถึงที่สุดและเกิดความปั่นป่วนที่ผิวน้ำน้อยที่สุดอีกด้วย [8] ส่วนการปั่นด้วยความเร็วรอบต่ำ 500 รอบ/นาที และใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนสูงจะทำให้เกิดฟองก๊าซขนาดใหญ่และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังทำให้เกิดความปั่นป่วนอย่างมากที่ผิวน้ำ ดังนั้นจากการทดลองเบื้องต้น จึงได้กำหนดให้ใช้ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 750-1000 รอบ/นาที และอัตราการไหลของก๊าซต่ำ (5-15 ลิตร/นาที)



และจากการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้เครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่ในเบ้า หลอมขนาด 20 กิโลกรัม โดยหลอมอะลูมิเนียมผสม 80% + เศษขี้กิ้งอะลูมิเนียม 20% ที่อุณหภูมิ 850°C พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซขึ้นอยู่กับตัวแปรควบคุม 3 ประการ คือ

- 1) ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ (750-1000 รอบ/นาทิต)
- 2) อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (10-15 ลิตร/นาทิต)
- 3) ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ (10-20 นาที)

การใช้อัตราการไหลของก๊าซที่ 5 ลิตร/นาทิต และความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 1000 รอบ/นาทิต นั้นกลับไม่ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุดตามที่คาดไว้จากการทดลองเบื้องต้น ทั้งนี้อาจเป็น เพราะขนาดของเบ้าหลอมและภาวะในการทดลองกวนในน้ำมีขนาดและรูปทรงที่ต่างกัน ทำให้มี ผลต่อการกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนที่แตกต่างกันไปด้วย อย่างไรก็ตาม การทดลองเบื้องต้นก็ เป็นแนวทางที่สำคัญในการทดลองจริง สำหรับการทดลองกำจัดก๊าซโดยใช้อัตราการไหลของก๊าซ อาร์กอนที่สูงเกินไป (15 ลิตร/นาทิต) มีผลทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำโลหะอย่างรุนแรง เป็นไป ตามที่คาดไว้จากการทดลองปั่นในน้ำ เนื่องจากเกิดฟองก๊าซขนาดใหญ่เกินไปและลอยขึ้นสู่ผิว น้ำโลหะอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้เกิดการกระเด็นออกของน้ำโลหะทำให้สูญเสียน้ำโลหะจำนวนมาก สำหรับสภาพการหลอมในห้องปฏิบัติการทำให้ต้องหยุดการทดลองกำจัดก๊าซแค่ 5 นาที ดังนั้นการ ใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ (15 ลิตร/นาทิต) ไม่เหมาะสม นอกจากนี้ ผลการสังเกตการณ์ยัง สอดคล้องกับผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและสมบัติแรงดึง

ส่วนอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่เหมาะสมคือ 10 ลิตร/นาทิต ซึ่งไม่ทำให้เกิดความ ปั่นป่วนของน้ำโลหะที่ผิวหน้า อีกทั้งไม่เกิดการกระเด็นของน้ำโลหะออกมานอกเบ้าหลอม นอกจากนี้ ลักษณะของฟองก๊าซที่เล็กละเอียดโดยสังเกตได้จากผลการทดลองปั่นในน้ำ ทำให้ สามารถอธิบายได้ว่าฟองก๊าซที่เล็กละเอียดจำนวนมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวมากในการให้ไฮโดรเจนแพร่ เข้ามาในฟองก๊าซได้ง่าย อีกทั้งอัตราการไหลของก๊าซที่ไม่ต่ำจนเกินไปจะทำให้เกิดผลของการกวน ได้ดีกว่าการใช้อัตราการไหลของก๊าซที่ต่ำกว่า (5 ลิตร/นาทิต) ผลของการกวนนี้มีประโยชน์มากในการ กำจัดก๊าซรวมทั้งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนบริเวณที่ฟองก๊าซอาร์กอนจะเข้าไปถึง ดังจะสังเกตได้จาก ผลของการตรวจสอบปริมาณรูพรุน ค่าความหนาแน่น สมบัติความแข็งและสมบัติแรงดึงที่ได้กล่าว มาแล้ว

เมื่อทำการทดลองลดความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ (750 รอบ/นาทิต) กลับทำให้ผลการ ทดลองปริมาณรูพรุน ความหนาแน่น ความแข็งและสมบัติเชิงกลที่ลดลงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ

กับการกำจัดก๊าซโดยใช้ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 1000 รอบ/นาที จำนวนรอบในการปั่นที่น้อยกว่ามีผลทำให้ฟองก๊าซไม่แตกละเอียดพอ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองปั่นก๊าซอาร์กอนในน้ำ

### 5.6.3 ผลกระทบของระยะเวลาในการกำจัดก๊าซต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ

เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน จาก 10 นาทีเป็น 20 นาที โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 10 ลิตร/นาที และความเร็วรอบในการปั่น 1000 รอบ/นาที เหมือนกัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซดีมากขึ้นตามลำดับเมื่อระยะเวลาในการกำจัดก๊าซเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจาก เป็นการเพิ่มเวลาให้ฟองก๊าซอาร์กอนเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ได้แพร่เข้าสู่ฟองก๊าซได้นานมากขึ้นตามลำดับ แต่อย่างไรก็ดีในการวิจัยครั้งนี้ไม่ได้ทดลองกำจัดก๊าซที่ระยะเวลา นานกว่า 20 นาที ว่าจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซเพิ่มขึ้นด้วยหรือไม่ แต่การใช้ระยะเวลาการกำจัดก๊าซที่นานเกินไป เป็นการเสียเวลาและอาจเป็นการทำให้อะลูมิเนียมกลับดูดซับก๊าซไฮโดรเจนจากบรรยากาศการหลอมลงมาได้อีก แต่อย่างไรก็ดี แนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซควรเป็นไปในทิศทางที่ลดระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจทำได้โดยการปรับเปลี่ยนออกแบบหัว Nozzle ให้เกิดฟองก๊าซได้จำนวนมากและเกิดผลของการกววนเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งเป็นหัวข้อหนึ่งที่จะต้องศึกษาต่อไปในอนาคต

### 5.6.4 ผลของการเพิ่มประสิทธิภาพกำจัดก๊าซด้วยกระบวนการฉีดฟลักซ์

การปรับปรุงระบบการฉีดฟลักซ์ โดยใช้ร่วมกับเครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่ (MDU) นั้นทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและปรับปรุงคุณภาพน้ำโลหะดีขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากเครื่อง MDU มีระบบการปั่นก๊าซอาร์กอนผ่านจานหัวปั่น (Nozzle) ซึ่งนอกจากจะทำให้ได้ฟองก๊าซอาร์กอนที่แตกละเอียดมาก เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการพาเอาไฮโดรเจนออกไปจากน้ำโลหะได้ดีแล้ว การปั่นที่ทำให้เกิดฟองแตกละเอียดจะทำให้เกิดการพาเอาฟลักซ์ลงสู่น้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งเกิดผลของการกววนน้ำโลหะทำให้ฟลักซ์เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะได้อย่างทั่วถึง โดยในการฉีดฟลักซ์จากด้านบนของหัวปั่นสามารถใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที และไม่เกิดความปั่นป่วนของน้ำโลหะขณะทำการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์

สำหรับการทดลองกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ ได้มีการทดลองเปรียบเทียบการฉีดฟลักซ์ชนิดผง (Powder flux) และฟลักซ์ชนิดเม็ด (Granular flux) โดยแสดงให้เห็นความแตกต่างดังนี้ คือ การฉีดฟลักซ์ชนิดผงโดยใช้ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ 1000 รอบ/นาที ที่อัตราการไหลก๊าซอาร์กอน 10 ลิตร/นาที นั้นทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของผงฟลักซ์ขณะทำการฉีดบ้างเล็กน้อย การใช้เวลาเพิ่มขึ้นจาก 10 นาทีเป็น 20 นาทีสำหรับการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ชนิดผง นั้นกลับทำให้เกิด

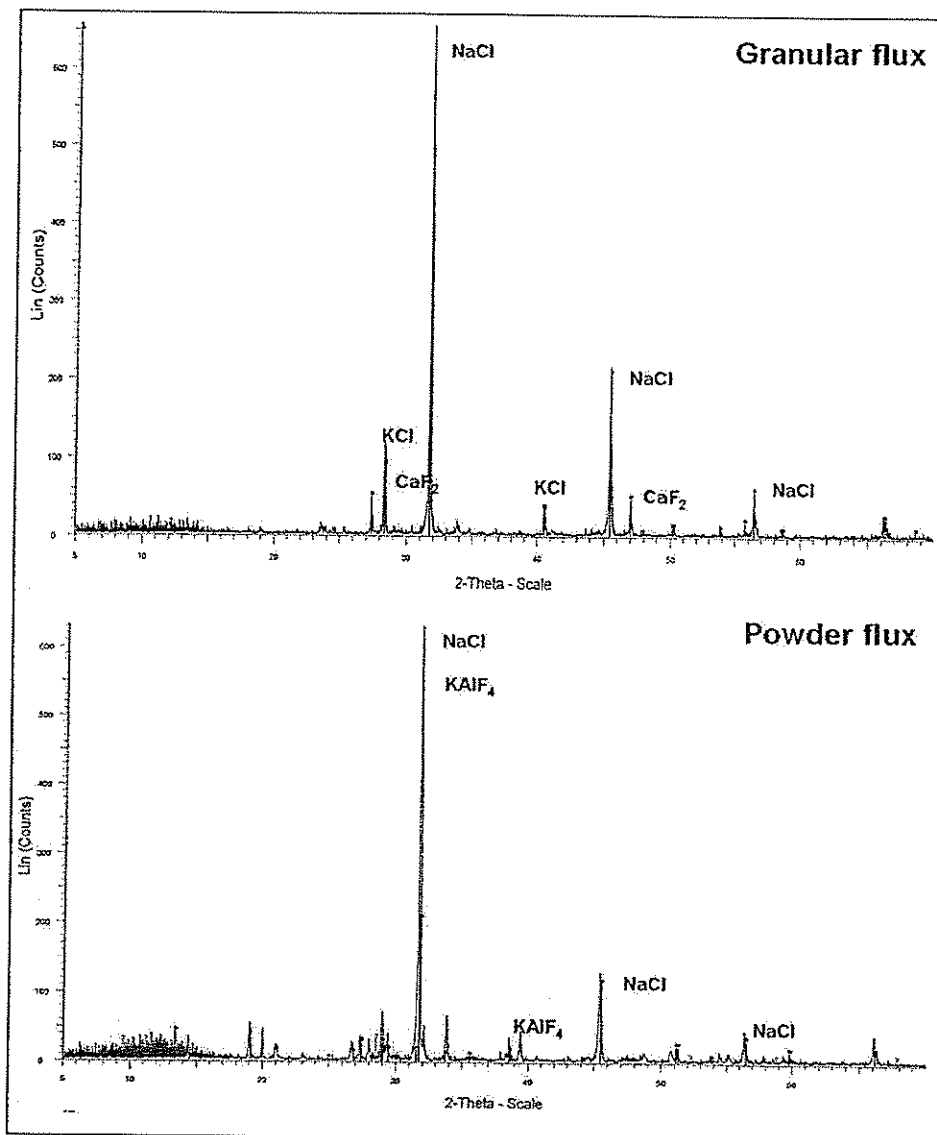
ปริมาณของรูพรุนและอินคลูชันตกค้างอยู่ในชิ้นงานหล่อ มีผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลง เมื่อทำการเปลี่ยนชนิดฟลักซ์เป็นแบบเม็ดพบว่า สามารถลดการฟุ้งกระจายของฟลักซ์ได้มาก ไม่เกิดการตกค้างของฟลักซ์และระหว่างกระบวนการฉีดฟลักซ์ผิวน้ำโลหะไม่มีเกิดความปั่นป่วน

เมื่อทำการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของฟลักซ์ทั้ง 2 ชนิดด้วย X-Ray Diffraction ดังแสดงในรูปที่ 5.45 พบว่าสารประกอบหลักของฟลักซ์ที่ใช้คือ NaCl, KCl เป็นส่วนใหญ่และประกอบไปด้วย CaF<sub>2</sub> และ KAIF<sub>4</sub> เป็นส่วนน้อย เมื่อฟลักซ์ถูกนำเข้าสู่ น้ำโลหะจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 1 [6]



นอกจากนี้ก๊าซ Metal halide (AlCl<sub>3</sub>) ที่เกิดขึ้นภายในน้ำโลหะจะฟอร์มตัวเป็นฟองก๊าซจะสนับสนุนทำให้เกิดการกวนน้ำโลหะ (Stirring) และกำจัดไฮโดรเจนและโซเดียม ส่วนฟลักซ์ที่ใช้ในการกำจัด Dross (Drossing-off flux) จะช่วยทำหน้าที่แยก Aluminium oxide dross ออกจากน้ำโลหะหลอมเหลวและจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนเป็นผลทำให้ความสามารถในการไหลตัว (Fluidity) เพิ่มขึ้น

สาเหตุหนึ่งที่ฟลักซ์ชนิดเม็ดไม่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย และทำปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำโลหะคือ ฟลักซ์ชนิดเม็ดจะมีปริมาณความชื้นที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ฟลักซ์ชนิดผง เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับความชื้นที่น้อยกว่านั่นเอง และการไม่ฟุ้งกระจายนั้นก็เป็ผลดีต่อผู้ใช้งาน อีกทั้งเป็นการลดมลพิษในสภาพแวดล้อมที่เราควรให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในปัจจุบัน งานวิจัย [9-10] ได้ตรวจสอบการแพร่กระจายของสาร (Emission) เนื่องมาจากการใช้ฟลักซ์แบบผงและแบบเม็ดระหว่างการเติมฟลักซ์ พบว่าฟลักซ์แบบผงจะมีปริมาณการเกิดการแพร่กระจายของสารที่มากกว่าซึ่งพบสารประกอบของฟลูออไรด์ (Fluoride) และซัลเฟอร์ออกไซด์ (Sulphur oxide) มากกว่าในฟลักซ์ชนิดเม็ด การเกิดการแพร่กระจายของสารที่น้อยกว่าเมื่อใช้ฟลักซ์ชนิดเม็ดอาจเนื่องมาจากปริมาณการเติมฟลักซ์ที่น้อยกว่า (0.125% สำหรับฟลักซ์ชนิดเม็ด และ 0.25% สำหรับฟลักซ์ชนิดผง) รวมถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำโลหะอาจแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ การทำปฏิกิริยาที่รุนแรงและการฟุ้งกระจายของฟลักซ์ชนิดผง อาจทำให้องค์ประกอบทางเคมีของฟลักซ์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพนั้นต่ำลง การฉีดฟลักซ์ชนิดเม็ดด้วยวิธี Rotary degassing นั้นทำให้เม็ดฟลักซ์ถูกฉีดลงน้ำโลหะโดยตรงและเกิดการกระจายเข้าทำปฏิกิริยาในบริเวณต่างๆ ในน้ำโลหะ ได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 5.45 ผลการตรวจสอบสารประกอบในฟลักซ์ชนิดเม็ดและชนิดผงด้วย XRD

จากข้อมูลเบื้องต้น [2] พบว่า ฟลักซ์ชนิดผงเหมาะที่ใช้สำหรับ Dressing-off ร่วมกับ Covering ส่วนฟลักซ์ชนิดเม็ดเหมาะที่ใช้สำหรับ Dressing-off ร่วมกับ Exothermic โดยที่ Dressing-off flux นั้นจะทำหน้าที่ในการดูดซับออกไซด์และ Non-metallic particle ต่างๆ รวมทั้งทำความสะอาดน้ำโลหะและทำให้สามารถกำจัด Dross ได้ง่าย และ Exothermic flux จะทำให้อะลูมิเนียมที่ติดอยู่กับ Dross นั้นกลับมายังน้ำโลหะอีกครั้ง ส่วน Covering flux นั้นจะทำหน้าที่ฟอร์มเป็นผิวหน้าปกป้องน้ำโลหะด้านล่างไม่ให้เกิดการละลายของไฮโดรเจน ดังนั้น ฟลักซ์ชนิดเม็ดซึ่งทำหน้าที่ในการล้างทำความสะอาดน้ำโลหะจึงทำให้ชิ้นงานหล่อมีปริมาณอินคลูชันที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ฟลักซ์ชนิดผง ดังแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในผลการตรวจสอบพื้นผิวการ

แตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ที่เตรียมได้จากกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ชนิดผงว่า พบอินคลูชันจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิว และบางส่วนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกหักในชิ้นงานทดสอบ นอกจากนี้ปริมาณอินคลูชันที่พบในเนื้อโลหะแล้วตำแหน่งของอินคลูชันก็มีความสำคัญ เช่นเดียวกับ จากการวิจัยพบว่า [11] ตำแหน่งของอินคลูชันมีผลต่อสมบัติทางด้านความล้าของ ชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมเกรด A356 และในการวิจัยครั้งนี้พบว่า ตำแหน่งของอินคลูชันที่พบนั้นอยู่ ใกล้กับผิวชิ้นงานและมีส่วนทำให้เกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงดึง

ผลกระทบของการกำจัดอินคลูชันในน้ำโลหะไม่หมดนั้น อาจเป็นสาเหตุของข้อตำหนิอื่นๆ ที่ตามมา เช่น การเกิดฟิล์มออกไซด์ของอะลูมิเนียม ซึ่งมักจะกระจุกตัวอยู่ร่วมกันกับ Inclusion ทำให้เกิดตำหนิที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และในบางกรณีฟิล์มออกไซด์ของอะลูมิเนียมนั้นสามารถฉีกหลุดได้ เมื่อเกิดความปั่นป่วนเพียงไม่กี่วินาทีที่ผิวหน้าของน้ำโลหะ เกิดชั้นฟิล์มที่เรียกว่า Double oxide film หรือ Bi-film [12] ทำให้เกิดเป็น Air pocket อยู่ด้านใน ซึ่ง Air pocket เหล่านี้เมื่อถูกแรงเหวี่ยงจาก ความปั่นป่วนของน้ำโลหะระหว่างการกวนทำให้รูปร่างบิดเบี้ยวไป ซึ่งเปรียบเสมือนรอยแตกที่คดงอ (Convuluted crack) [13] ซึ่งก็เป็นอันตรายต่อสมบัติเชิงกลอย่างมากเช่นเดียวกัน การฉีดฟลักซ์ด้วย อัตราการไหลของก๊าซที่สูงเกินไป เช่น ที่ 15 ลิตร/นาที หรือการใช้ฟลักซ์ชนิดผงทำให้เกิดความ ปั่นป่วนของน้ำโลหะ มีโอกาสเกิด Double oxide film สูงซึ่งต่อมาสามารถที่จะกลายสภาพเป็น Convuluted crack โดยจะสังเกตเห็นได้ในบางบริเวณของพื้นผิวการแตกหักที่มีอินคลูชันและร่องรอย การฉีกหลุดของเนื้อโลหะ จากรูปที่ 5.42

#### 5.6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไฮโดรเจนกับสมบัติทางกายภาพและเชิงกล

เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้ทำการวัดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนทางอ้อมโดยใช้วิธี Reduced pressure test ซึ่งรวมเอาผลกระทบของรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวร่วมด้วย ทำให้ไม่ได้ความเที่ยงตรง ในการวัดเหมือนวิธีทำการวัดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่มีอยู่ในน้ำโลหะโดยตรง [13] เหมือน วิธีการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical analyzer) [14] หรือ Hydrogen sensor [15] แต่อย่างไรก็ดี วิธีการทดสอบด้วย Reduced pressure test ก็ยังเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมการหล่อโลหะอะลูมิเนียม เนื่องจากมีความสะดวกรวดเร็วและเครื่องมือที่ไม่ซับซ้อน ดังนั้น การคำนวณปริมาณไฮโดรเจนใน น้ำโลหะสามารถหาได้จากค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อปกติโดยใช้หลักการของ Archimedes โดยสมมติให้ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นทั้งหมดเกิดจากก๊าซไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการที่ 2 [16]

$$ml H_2 / 100 gm Al = 100 \left( \frac{1}{D_s} - \frac{1}{D_t} \right) \quad \dots (2)$$

โดยที่  $D_s$  คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (Sample density)

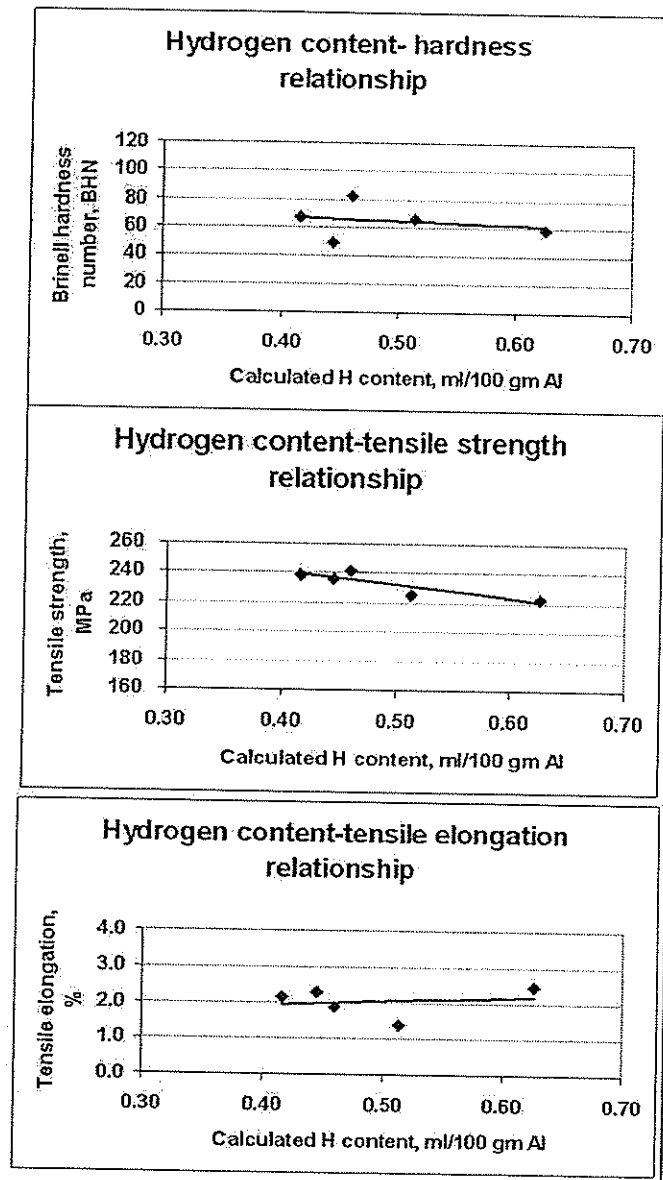
$D_t$  คือ ความหนาแน่นทางทฤษฎีของโลหะผสม (Theoretical density of the alloy)

ตารางที่ 5.16 แสดงปริมาณไฮโดรเจน ( $\text{ml H}_2/100 \text{ gm Al}$ ) ที่คำนวณได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ โดยหากไม่มีกระบวนการกำจัดก๊าซ ไฮโดรเจนสามารถละลายอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ถึง  $0.6 \text{ ml H}_2/100 \text{ gm Al}$  ในการผลิตอะลูมิเนียมผสมแต่ละเกรดให้ปราศจากรูพุนั้น จะรักษาหรือกำหนดปริมาณไฮโดรเจนที่ต่างกันออกไป เช่น ปริมาณไฮโดรเจนเท่ากับ  $0.1 \text{ ml H}_2/100 \text{ gm Al}$  ทำให้ชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมเกรด 319 (LM4) ปราศจากรูพุนได้ แต่ถ้าปริมาณไฮโดรเจนเท่ากับ  $0.35 \text{ ml H}_2/100 \text{ gm Al}$  พบว่ายังสามารถทำให้อะลูมิเนียมผสมเกรดที่มีปริมาณซิลิกอนต่ำ (Al-Cu-Ni alloy) ปราศจากรูพุนได้ แต่อย่างไรก็ดี หากปริมาณไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมน้อยเกินไปปัญหาที่จะตามมาคือ รูพุนจากการหดตัว และจากการทดลองใช้ Rotary degassing ในอะลูมิเนียมเกรด 356 (LM25) ในเบ้าเทขนาด 250 กิโลกรัมโดยใช้ระยะเวลาเพียงแค่ 6 นาที พบว่า สามารถลดปริมาณไฮโดรเจนจาก  $0.4 \text{ ml H}_2/100 \text{ gm Al}$  เป็น  $0.13 \text{ ml H}_2/100 \text{ gm Al}$  โดยใช้ความเร็วในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 400-500 รอบ/นาที และ อัตราไหลของก๊าซอยู่ในช่วง 8-20 ลิตร/นาที <sup>(1)</sup>

และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ พบว่า ปริมาณของไฮโดรเจนที่คำนวณได้จากชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ ยังมีปริมาณที่สูงอยู่ ( $0.42-0.51 \text{ ml H}_2/100 \text{ gm Al}$ ) แต่ก็ลดลงในระดับหนึ่งจากในสถานะที่ไม่ได้กำจัดก๊าซ (MDFT01) อนึ่ง การคำนวณปริมาณไฮโดรเจนด้วยวิธีการนี้ได้รวมเอาผลกระทบของปริมาณรูพุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน และปริมาณรูพุนที่เกิดจากการหดตัวเข้าด้วยกัน ดังนั้น หากชิ้นงานมีรูพุนจากการหดตัวสูง (เนื่องจากไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับเกรนละเอียดและปรับปรุงรูปทรงพื้นฐานของโครงสร้างยูเทคติก) จะทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนที่คำนวณได้สูงกว่าความเป็นจริง อย่างไรก็ตาม กระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU นั้น แสดงให้เห็นแนวโน้มของการลดปริมาณรูพุนอันเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนได้ และส่งผลให้สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง ความแข็งแรงแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวดีขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่คำนวณได้กับสมบัติเชิงกลของชิ้นงานในรูปที่ 5.46 และตาราง 5.15

ตารางที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจน (ml H<sub>2</sub>/ 100 gm Al) ที่คำนวณได้จาก  
 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบนกับสมบัติของชิ้นงานหล่อ

Sample	Density (g.cm <sup>-3</sup> )	Calculated H content (ml/100 gm Al)	Brinell hardness, BHN	Tensile strength (MPa)	Tensile elongation, %
MDFT01	2.721	0.63	59.35	222.6	2.48
MDFT02	2.737	0.42	67.33	238.5	2.15
MDFT03	2.734	0.44	48.91	236.0	2.29
MDFT04	2.733	0.46	82.33	241.2	1.89
MDFT05	2.729	0.51	66.32	225.4	1.40



รูปที่ 5.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจน (ml H<sub>2</sub>/ 100 gm Al) ที่คำนวณได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบนกับสมบัติของชิ้นงานหล่อ

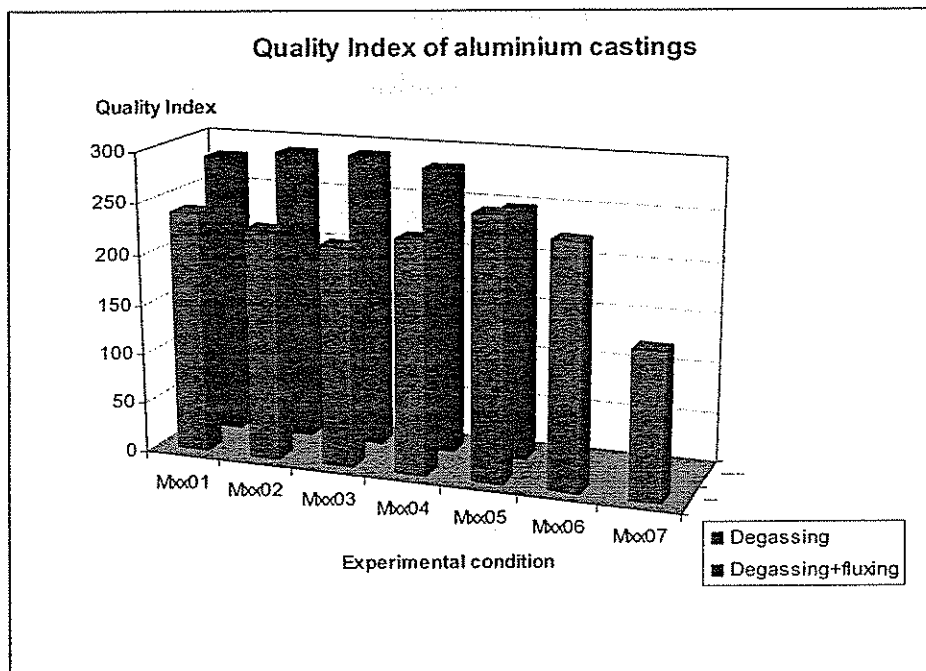
การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์นั้น ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดอินคลูชันได้ดีขึ้นนั้นมี 3 ประการ [6] คือ 1) เมื่อให้ฟลักซ์เคลือบลงบนอินคลูชันหรือออกไซด์ต่างๆ เกิดเป็นอนุภาค (Particle) แล้วนั้น การปั่นก๊าซอาร์กอนด้วยวิธี Rotary degassing นั้นจะทำอนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่ชนกัน (Collide) และฟอร์มตัวเป็นก้อนเล็กได้ง่ายและอาจจะตกตะกอนอยู่ที่ก้นเบ้าหลอมหรือถูกพาขึ้นไปบนผิวหน้าโลหะร่วมกับฟองก๊าซอาร์กอน และถูกกวาดออกในระหว่างการกำจัด Dross ในที่สุด 2) จะมีผลทำให้อินคลูชันไม่เปียกน้ำโลหะ (Dewettability) ทำให้ง่ายต่อการแยกอินคลูชันออกจากน้ำโลหะ นอกจากนี้ การกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ร่วมกันทำให้ใช้เวลาและกำลังคน



ลดลงในขั้นตอนการปรับปรุงน้ำโลหะอีกด้วย โดยการลดเวลาการปรับปรุงน้ำโลหะนั้นมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นจะเปิดโอกาสให้ไฮโดรเจนกลับเข้าละลายสู่น้ำโลหะได้อีก ทั้งยังทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ได้มากขึ้นหากผิวหน้าน้ำโลหะมีการเคลื่อนที่

หากพิจารณาค่า Quality Index (QI) ตามสมการที่ 3 โดยที่  $\sigma_{TS}$  คือค่าแรงดึงสูงสุด %E คือค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและ  $k$  เป็นค่าคงที่สำหรับ Al-7Si จะมีค่า  $k = 150$  จะพบว่า ในกรณีที่กำจัดก๊าซผสมการฉีดฟลักซ์จะให้ค่า Quality Index สูง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่กำจัดก๊าซเพียงอย่างเดียวโดยไม่ฉีดฟลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.47

$$QI = \sigma_{TS} + k \log(\%E) \quad \dots (3)$$



รูปที่ 5.47 ผลการเปรียบเทียบ Quality Index ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมเมื่อผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์สภาวะในสภาวะที่ต่างกัน

แต่อย่างไรก็ดี ชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซผสมการฉีดฟลักซ์ชนิดเม็คนั้นถึงแม้ว่าจะให้ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวนั้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ จึงทำให้ค่า Quality Index นั้นต่ำกว่าในบางสภาวะการทดลอง ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า สิ่งที่ต้องปรับปรุงเพิ่มขึ้นจากกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ คือ เพราะนอกจากการลดปริมาณรูพรุนและการทำความสะอาดน้ำโลหะแล้ว อาจจะต้องเพิ่มกระบวนการปรับเกรนละเอียดและการปรับปรุงทรงสัณฐานของโครงสร้างยูเทคติก เพื่อลดปัญหาการเกิดโพรงหดตัวเนื่องจากกระบวนการแข็งตัวที่จะมีผลทำให้

เปอร์เซ็นต์การยึดตัวนั้นเพิ่มสูงขึ้นได้ และจากเครื่องมือ FIDU ที่ได้ผลิตขึ้นนั้น มีความเป็นไปได้ที่ผสมผสานกระบวนการปรับเกรนละเอียดและการปรับปรุงทรงสัณฐานของโครงสร้างยูเทคติกผ่านเครื่องมือฉีดฟลักซ์ไปพร้อมกัน ทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาในการปรับปรุงคุณภาพน้ำโลหะทั้งหมดเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในแต่ละกระบวนการ โดยลดการละลายของก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่โลหะลดการเกิดออกไซด์อินคลูชั่น ลดการเกิดปรากฏการ Fading ในกระบวนการปรับเกรนละเอียดและการปรับปรุงทรงสัณฐานของโครงสร้างยูเทคติกอีกด้วย อีกประการหนึ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติม คือ ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการฉีดฟลักซ์ซึ่งอยู่ในช่วง  $730-780^{\circ}\text{C}$  แล้วแต่ชนิดของฟลักซ์ [17-18] รวมถึงอุณหภูมิและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน ร่วมกับการฉีดฟลักซ์ ทำเกรนให้ละเอียดและการปรับปรุงโครงสร้าง อีกทั้งในการศึกษาวิจัยนี้ ทำการทดลองกำจัดก๊าซที่  $850^{\circ}\text{C}$  ซึ่งถือว่าเป็นช่วงอุณหภูมิที่ก๊าซไฮโดรเจนมีความสามารถในการละลายได้มากขึ้นกว่า การกำจัดก๊าซที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้น การทดลองกำจัดก๊าซที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ เช่น  $730-750^{\circ}\text{C}$  จะเป็นการลดความสามารถในการละลายของไฮโดรเจน อาจเป็นผลทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามลำดับ

## บทที่ 6

### สรุปผลโครงการวิจัยกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว

#### (Conclusions on Aluminium Degassing)

##### 6.1 สรุปผล

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล แสดงให้เห็นว่า กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง แม้ว่าจะใช้อะลูมิเนียมอินกอต 100% ในการหลอมโลหะก็ตามก็ยังคงแสดงให้เห็นปริมาณรูพรุน ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากไฮโดรเจนสามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียมขณะหลอมเหลว อีกทั้งการเติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมยังช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนอีกด้วย กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้หลักการพาเอาฟองก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน ลงไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียมโดยการปั่นด้วยมอเตอร์ แสดงให้เห็นว่าสามารถลดปริมาณรูพรุนลงได้จริง โดยทำให้ไฮโดรเจนสามารถแพร่เข้าไปในฟองก๊าซอาร์กอนและถูกพาขึ้นไปสู่ผิวหน้าของน้ำโลหะ

ปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคือ การทำให้ฟองก๊าซอาร์กอนมีขนาดที่เล็กละเอียด มีปริมาณที่มากพอและกระจายอยู่อย่างทั่วถึงในน้ำโลหะ เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวการแพร่ของไฮโดรเจนอะตอมเข้าสู่ฟองก๊าซ ซึ่งปัจจัยดังกล่าว ถูกควบคุมโดย

- 1) ความเร็วรอบในการหมุนต่อแรมไฟต์ – Rotational speed
- 2) อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน – Gas flow rate
- 3) ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ – Degassing time

โดยที่การเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนแท่งกราไฟต์ มีผลทำให้ฟองก๊าซเล็กละเอียดมากขึ้น อัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ฟองก๊าซมีขนาดใหญ่ และเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวน้ำโลหะเร็วเกินไป ส่วนการเพิ่มระยะเวลาในการกำจัดก๊าซมีผลทำให้การกำจัดก๊าซมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การกำจัดก๊าซโดยใช้ความเร็วรอบในการปั่นแท่งกราไฟต์ที่ 1000 รอบ/นาที ใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที และใช้ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซที่ 20 นาที สามารถช่วยกำจัดก๊าซไฮโดรเจนได้ดีที่สุด โดยตรวจสอบจากปริมาณรูพรุนที่พบภายในชิ้นงาน ร่วมกับการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ความหนาแน่น ความแข็งและความแข็งแรงแรงดึงซึ่งแสดงผลที่สอดคล้องกัน

สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน โดยการเพิ่มกระบวนการฉีดฟลักซ์ผสมในระหว่างกระบวนการกำจัดก๊าซ พบว่าการฉีดฟลักซ์จะให้ชิ้นงานหล่อที่มีสมบัติแรงดึงที่ดีขึ้น ซึ่งสังเกตได้จาก Quality Index ที่เพิ่มขึ้น การเลือกวิธีการฉีดฟลักซ์และชนิดของฟลักซ์ที่เหมาะสมทำให้เกิดประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซรวมทั้งประสิทธิภาพ ในการทำความสะอาดน้ำโลหะ

อะลูมิเนียมที่ดี สามารถช่วยลดปริมาณรุปรุนอันเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนในชิ้นงานหล่อ รวมทั้งลดปริมาณอินคลูชันที่เป็นอันตรายต่อสมบัติเชิงกล ทางด้านสมบัติความแข็ง และสมบัติแรงดึง ข้อดีของการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์พอจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

การฉีดฟลักซ์จากด้านบนช่วยลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและทำให้ลดความปั่นป่วนของน้ำโลหะ ลดการตกค้างของฟลักซ์ และช่วยลดระยะเวลาในการเดินทางของฟลักซ์จากถึงฟลักซ์ไปยังหัวปืนก๊าซอาร์กอน

การเลือกใช้ฟลักซ์ชนิดเม็ดทำให้ลดการฟุ้งกระจายของฟลักซ์ ลดปริมาณความชื้นที่อาจสะสมที่ผิวของเม็ดฟลักซ์ เป็นการลดมลพิษที่เป็นอันตรายสำหรับผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม

การฉีดฟลักซ์ลงไปใต้น้ำโลหะโดยตรงเป็นการลดปริมาณการสูญเสียฟลักซ์เมื่อฟลักซ์เริ่มสัมผัสกับน้ำโลหะหลอมเหลว อีกทั้งทำให้ลดปริมาณการใช้ฟลักซ์และลดการเกิดมลพิษในอากาศ

การเพิ่มประสิทธิภาพจากการปั่นด้วยฟองก๊าซอาร์กอนขนาดเล็กละเอียด ทำให้ฟลักซ์เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย รวดเร็วและกินบริเวณใต้น้ำโลหะทั่วถึงมากขึ้น

การฉีดฟลักซ์พร้อมกับการกำจัดก๊าซจะช่วยลดระยะเวลาในการปฏิบัติงาน และลดระยะเวลาที่น้ำโลหะจะถูกทิ้งไว้ในบรรยากาศการหลอม เป็นเหตุให้ลดความเสี่ยงในการสะสมของเสียใต้น้ำโลหะระหว่างนั้น

โดยจากผลการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ในการศึกษาวิจัยนี้ สามารถกำหนดเป็นมาตรฐานเบื้องต้นในการปฏิบัติงานหลอมอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่มีการผสมเศษขึ้นถึงอะลูมิเนียม 20% โดยใช้เตาหลอมไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีในห้องปฏิบัติการงานหล่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงสภาวะการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 (ผสมเศษซิลิกอนอะลูมิเนียม 20%) โดยใช้เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เตาหลอม	เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กำลัง 20-30 กิโลวัตต์ ความถี่ 1000 เฮิร์ต
เบ้าหลอม	เซรามิกขนาด 15-20 กิโลกรัม
วัตถุดิบหลอม	อะลูมิเนียมผสมเกรด 356 (80%) + เศษซิลิกอนอะลูมิเนียม (20%)
อุณหภูมิหลอม	850-870 °C
อุณหภูมิกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์	850°C
ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟด์	1000 รอบ/นาที
อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน	10 ลิตร/นาที
ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์	20 นาที
ชนิดของฟลักซ์	ฟลักซ์ชนิดเม็ด
ปริมาณการเติมฟลักซ์	0.125%

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้นำไปสู่ข้อเสนอแนะหลายประการ ดังเช่น ในเรื่องของการวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในการฉีดฟลักซ์ กำจัดก๊าซ การทำเกรนละเอียด และการปรับปรุงโครงสร้างร่วมกัน เพื่อให้ได้โครงสร้างชิ้นงานที่ดี ลดข้อตำหนิและเป็นการเพิ่มสมบัติเชิงกล การวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดตัวของชิ้นงานหล่อเป็นอีกทิศทางหนึ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการทำเกรนให้ละเอียดและการปรับปรุงโครงสร้าง อ้างอิงจากพื้นฐานข้อมูลเดิมที่มีอยู่

การเพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซ เช่น การลดระยะเวลาในการกำจัดก๊าซรวมถึงการฉีดฟลักซ์ โดยอาจปรับปรุงการออกแบบหัวปืน Nozzle ให้เกิดการกระจายตัวของฟองก๊าซได้ดีมีผลของการกวนและได้ฟองก๊าซที่เล็กละเอียด

การลดอุณหภูมิในการกำจัดก๊าซเป็นอีกแนวทางหนึ่งเพื่อลดความสามารถการละลายในการละลายของไฮโดรเจนและเป็นการลดการสิ้นเปลืองพลังงานอีกทางหนึ่งด้วย

การพัฒนาวัสดุแทนที่การใช้แท่งกราไฟต์ที่มีราคาแพงและเปราะแตกหักง่าย จะมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียมเป็นอย่างมาก

### บรรณานุกรม

1. Jorstad, J. L. and W. M. Rasmussen (2001). Aluminium casting technology, AFS: American Foundrymen's Society.
2. Brown, J. R. (1999). Foseco non-ferrous foundryman's handbook, Butterworth Heinemann.
3. (1991). The GBF system for in- line refining of aluminium. Foseco: Foundry practice: 12-18.
4. The micro MDU- a need converted into reality. Foseco: Foundry practice: 1-2.
5. Polmear, I. J. (1995). Light alloys: Metallurgy of the light metals, Arnold.
6. T.A.Utigard, R. R. Roy, et al. (2001). "The roles of molten salts in the treatment of aluminum." Canadian Metallurgical Quarterly **40** (3): 327-334.
7. Dinsdale, A. T. and P. N. Quested "The viscosity of aluminium and its alloys- a review of data and models." NPL: 1-9.
8. Warke, V. and M. Makhlof (2006). "Removal of hydrogen and solid particles from molten aluminum alloys in the rotating impeller degasser:mathematical models and computer simulations." last modified.
9. Granular fluxes for aluminum alloys, environmental and technological advances. Foseco: Foundry practice: 16-20.
10. Granular and powder fluxes for aluminium alloys. cleaning efficiency, cost and environmental aspects. Foseco: Foundry practice: 1-7.
11. Seniw, M. E., J. G. Conley, et al. (2000). "The effect of microscopic inclusion locations and silicon segregation on fatigue lifetimes of aluminum alloy A356 castings." Materials Science and Engineering A **285**(1-2): 43-48.
12. Campbell, J. (2004). Casting practice: The 10 rules of castings, Elsevier.
13. Fox, S. and J. Campbell (2000). "Visualisation of oxide film defects during solidification of aluminium alloy." Sripta materialia **43**: 881-886
14. Foundry experiences with a new electrochemical sensor for determining hydrogen concentrations in aluminium alloys, Foseco: Foundry practice: 8-13.
15. Yajima, T., K. Koide, et al. (1995). "Application of hydrogen sensor using proton conductive ceramics as a solid electrolyte to aluminum casting industries." 333-337.

16. Gruzleski, J. E. and B. M. Closset (1990). The treatment of liquid aluminium-silicon alloys, The American Foundrymen's Society, Inc.
17. (2006). "Molten aluminum treatment by salt fluxing with low environmental emissions." INDUSTRIAL TECHNOLOGIES PROGRAM.
18. Majidi, O., S. G. Shabestari, et al. (2007). "Study of fluxing temperature in molten aluminum refining process." Journal of Materials Processing Technology 182(1-3): 450-455.



## ประวัติผู้แต่ง

ชื่อ(ภาษาไทย) นางสาว ฐาปนีย์ อุดมผล

(ภาษาอังกฤษ) Miss Tapany Udomphol

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงาน สำนักวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ (044)-224483 โทรสาร (044)-224482

E-mail [tapany@sut.ac.th](mailto:tapany@sut.ac.th)

### ประวัติการศึกษา

2001-2005 Ph.D. in Metallurgy and Materials (The University of Birmingham, UK)

2000-2001 MRes in Metallurgy and Materials (The University of Birmingham, UK)

1993-1996 BSc in Materials Science (Chulalongkorn University, Thailand)

### สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

การทดสอบเชิงกลของวัสดุ เช่น การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile test) การทดสอบความแข็ง (Hardness test) การทดสอบความล้า (Fatigue test) การทดสอบความเหนียว (Impact and fracture toughness tests) การวิเคราะห์การแตกหักของวัสดุโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) การทดสอบ Chemical analysis โดยวิธี Electron dispersive spectroscopy (EDS) การทดสอบการจัดเรียงตัวของเกรน (Grain orientation) โดยใช้ Electron Backscatter Diffraction (EBSD) analysis และการตรวจสอบขนาดและการจัดเรียงตัวของ phase ต่างๆ ในโครงสร้างของชิ้นงาน การหล่อโลหะประเภทเหล็กและโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น อลูมิเนียม

### ผลงานการวิจัย

1. Udomphol, T., Wenman, M., Voice, W., and Bowen, P., Mechanical properties and fracture mechanisms of burn resistant Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C alloys, digital edition, ICF:11th International Conference on Fracture, Carpinteri, A., Mai, Y.W., Ritchie, R.O., Ferro, G. Turino, Italy, 2005
2. Udomphol, T., and Bowen, P., Micromechanisms of fracture in burn resistant Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C alloy, Ti-2003 Science and Technology: 10<sup>th</sup> World Conference on Titanium, 2003, Hamburg, Germany, Lutjering, G., Abrecht, J., WILEY-VCH, Vol.5, p. 2829-2836.