

รหัสโครงการ SUT7-713-50-12-88



รายงานการวิจัย

การผลิตเครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ Flux Injection (Flux Injection Degassing Unit) สำหรับใช้ในกระบวนการหล่อหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสม
(The Construction of a Flux Injection Degassing Unit-FIDU for Aluminium Alloy Casting)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การผลิตเครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ Flux Injection (Flux Injection Degassing Unit) สำหรับใช้ในกระบวนการหล่อหลอมโลหะ

อะลูมิเนียมผสม

(The Construction of a Flux Injection Degassing Unit-FIDU for Aluminium Alloy Casting)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร. ชูปนี้อย์ อุดมผล

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

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

การปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวก่อนการเทหล่อ นั้น มีความจำเป็น และมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนร่วมกับการทำความสะอาดน้ำโลหะด้วยฟลักซ์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการทำงานและเพิ่มสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงเทคนิคกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธีการ Lance Degassing และ Rotary Degassing โดยกระบวนการหลังมีการเปรียบเทียบเทคนิคการฉีดฟลักซ์จากด้านข้างและด้านบน รวมถึงชนิดและขนาดของฟลักซ์

โลหะอะลูมิเนียมถูกหลอมด้วยเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีความถี่ 1000 เฮิรตซ์ และกำลัง 20-30 กิโลวัตต์ โดยทำการหลอมโลหะในเบ้าหลอม 20 กิโลกรัม โดยใช้อะลูมิเนียมอินกอตผสมเศษขี้กิ้งจำนวน 20 เปอร์เซ็นต์เพื่อเพิ่มการเชื่อมของไฮโดรเจนและสิ่งสกปรกที่อาจเกิดขึ้นในสภาวะการหล่อจริง ในการทดลองมีการควบคุมตัวแปรดังนี้คือ 1) ความเร็วในการปั่นท่อกราไฟต์ 2) อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 3) ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ 4) วิธีการฉีดฟลักซ์ และ 5) ชนิดของฟลักซ์ โดยจากผลการทดลองพบว่า การกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance จะให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุด รวมทั้งเกิดผลเสียต่อชิ้นงาน ส่วนการกำจัดก๊าซด้วยวิธี Rotary จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ามาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรควบคุมที่กล่าวมาแล้ว การกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยใช้ความเร็วในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 1000 รอบต่อนาที และการอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่ำที่ 10 ลิตรต่อนาที จะช่วยในการลดความปั่นป่วนของน้ำโลหะอะลูมิเนียมได้ และการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์เป็นเวลา 20 นาทีจะให้ผลการทดลองกำจัดก๊าซที่ดีที่สุด ดังผลการทดลองที่สอดคล้องกับการตรวจสอบปริมาณรูพรุน ความหนาแน่น ค่าความแข็งและสมบัติแรงดึง

การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซโดยเพิ่มกระบวนการฉีดฟลักซ์จากด้านบน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มกระบวนการทำความสะอาดน้ำโลหะในเวลาเดียวกันกับการกำจัดก๊าซ พบว่าชิ้นงานหล่อมีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ดีขึ้น นอกจากนี้ การใช้ฟลักซ์ชนิดเม็ดจะให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำโลหะได้ดีกว่า อีกทั้งไม่เป็นมลพิษต่อผู้ปฏิบัติงานและสภาพแวดล้อม

Abstract

Aluminium melt treatment prior to casting is of great necessary and has tremendous effects on mechanical properties of the castings. This research investigated degassing techniques coupled with flux injection in order to provide enhanced treatment efficiency and improved mechanical property of aluminium 356 castings through reducing gas porosity and increasing melt cleanliness. Experimental involved investigations on two degassing techniques, lance degassing and rotary degassing coupled with a flux injection unit. The latter also provided comparative results on flux feeding from sideway and on top and different types of fluxes used, powder and granular types.

Aluminium ingot with 20% aluminium chip was melt in a 20 kg crucible using a 1000 Hz and 20-30 kilowatt induction furnace to simulate the contaminated environment of the melt by hydrogen and impurities. The controlled parameters for degassing plus flux injection are 1) rotational speed of the graphite shaft, 2) argon gas flow rate, 3) Degassing and fluxing time, 4) Flux injection technique and 5) types of fluxes. Experimental results showed that lance degassing coupled with flux injection led to worsen melt treatment efficiency and dramatically reduced soundness of the castings. Rotary degassing on the other hand provided much better efficiency, depending on the controlled parameters. Degassing coupled with flux injection at high rotational speed (1000 rpm) and low argon gas flow rate (10 l/min) helped not to cause turbulence in the aluminium melt. Degassing plus fluxing for 20 minute provided good experimental results. In comparison to flux feeding from sideway, flux feeding from the top eliminated a problem of remaining flux left during flux carrying. Top feeding enabled lower argon gas flow rate; thereby, lessening turbulence in the aluminium melt. Furthermore, higher flux feeding efficiency could be obtained when granular flux was used. The smaller granular flux consumption was noted and lower emission was detected during melt treatment, leading to better working condition and more environmental friendly, in comparison to the usage of the powder flux.

สารบัญ

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

บทที่ 4 การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์	
การเตรียมวัสดุดิบ	34
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	35
การทดลองเบื้องต้นเกี่ยวกับอุณหภูมิ เวลาในการหล่อกับปริมาณรูพรุน	39
การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและทำความสะอาดน้ำโลหะด้วยวิธีฉีดฟลักซ์	39
การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	44
การตรวจสอบปริมาณรูพรุนทางกายภาพ	45
การตรวจสอบปริมาณรูพรุนด้วยวิธี Vacuum test	46
การตรวจสอบความหนาแน่นชิ้นงาน	46
การทดสอบความแข็ง	47
การตรวจสอบสมบัติแรงดึง	47
การตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก	48
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
ผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาในการหล่อต่อปริมาณรูพรุน	49
ผลและการวิเคราะห์การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance degassing	50
ผลและการวิเคราะห์การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถึงฟลักซ์อยู่ด้านข้าง	56
ผลและการวิเคราะห์การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถึงฟลักซ์อยู่ด้านบน	77
ผลการวิเคราะห์พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานผ่านการทดสอบแรงดึง	93
วิเคราะห์ผลการทดลองกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์	101
บทที่ 6 บทสรุป	
สรุปผลการวิจัย	114
ข้อเสนอแนะ	117
บรรณานุกรม	118
ประวัติผู้วิจัย	119

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม	34
ตารางที่ 4.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและฉีดฟลักซ์ด้วย วิธี Lance degassing	40
ตารางที่ 4.3 สภาวะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary ด้วยเครื่อง Mobile degassing unit โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง	40
ตารางที่ 4.4 สภาวะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary ด้วยเครื่อง Mobile degassing unit โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบน	41
ตารางที่ 4.5 Density of Water at various temperatures in the range of 14-35°C	47
ตารางที่ 5.1 แสดงสภาวะการทดลองการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ ด้วยวิธี Lance degassing	50
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็ง (Brinell hardness value) และสมบัติแรงดึง (Tensile properties) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม	55
ตารางที่ 5.3 แสดงสภาวะการทดลองการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถัง ฟลักซ์อยู่ด้านข้างในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม	57
ตารางที่ 5.4 ผลการตรวจสอบปริมาตรรูพรุนบนพื้นที่ 2x2 cm ² ของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานหล่อ ในเบ้าเซรามิก	70
ตารางที่ 5.5 ความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจาก ด้านบน ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง โดยตัดชิ้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง บน กลาง และล่าง	71
ตารางที่ 5.6 ค่าความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะ จากด้านบน ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี โดยมีถังฟลักซ์อยู่ ด้านข้าง โดยตัดชิ้นงานทดสอบจากตำแหน่ง บน กลาง และล่าง	73
ตารางที่ 5.7 แสดงค่าสมบัติแรงดึงของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทาง เดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี โดย มีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง	74
ตารางที่ 5.8 แสดงปริมาณธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมภายหลังการกำจัดก๊าซ ไฮโดรเจนผสมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบน	
ตารางที่ 5.9 ค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ในชิ้นงานหล่อ MDFT01- MDFT05 จากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน	87

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าความแข็งที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ในชิ้นงานหล่อ MDFT01- MDFT05 จากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน	88
ตารางที่ 5.11 แสดงสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมหล่อในแม่พิมพ์ที่มีทาง เดินน้ำโลหะจากด้านล่างที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ด้านบน	89
ตารางที่ 5.14 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุจากสเปกตรัมที่ 1, 2 และ 3 จากพื้นผิวการแตกหัก ของชิ้นงานหล่อ MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง	97
ตารางที่ 5.15 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุจากสเปกตรัมที่ 1 และ 2 โดยใช้การวิเคราะห์ EDS จากพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่อ MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง	100
ตารางที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Hydrogen (ml H ₂ / 100 gm Al) ที่คำนวณ ได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน กับสมบัติของชิ้นงานหล่อ	109

สารบัญรูปร่างภาพ

- รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิและเวลาในการหลอมต่างๆ กัน
- รูปที่ 5.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่ไม่กำจัดก๊าซและไม่ฉีดฟลักซ์ในแบบทราย (ML01-S)
- รูปที่ 5.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่ไม่กำจัดก๊าซและไม่ฉีดฟลักซ์ในแบบโลหะ (ML01-P)
- รูปที่ 5.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ในแบบหล่อทราย(ML02-S)
- รูปที่ 5.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ในแบบหล่อโลหะ (ML02-P)
- รูปที่ 5.6 ภาคตัดขวางชิ้นงานหล่อที่ไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ในแบบหล่อเซรามิก
- รูปที่ 5.7 ภาคตัดขวางชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ในแบบหล่อเซรามิก
- รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ Stress-strain ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมเปรียบเทียบกับสภาวะก่อนและหลังการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance
- รูปที่ 5.9 ชิ้นงานแตกหักภายหลังจากทดสอบแรงดึง
- รูปที่ 5.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Aluminium 356 ingot 100% ที่ไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ (MDF-01) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- รูปที่ 5.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Aluminium 356 ingot 80% + Aluminium scrap 20% ที่ไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ (MDF-02) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- รูปที่ 5.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม 80% + เศษขี้กิ้ง 20% กำจัดก๊าซ+ฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถึงฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (MDF03) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- รูปที่ 5.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมอินกอต 80% + เศษขี้กิ้ง 20% กำจัดก๊าซ+ฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถึงฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (MDF-04) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- รูปที่ 5.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมอินกอต 80%+ เศษขี้กิ้ง 20% กำจัดก๊าซ+ฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary มีถึงฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (MDF-05) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- รูปที่ 5.15 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมอินกอต 80% + เศษขี้กิ้ง 20% กำจัดก๊าซ+ฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary มีถึงฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (MDF-05) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- รูปที่ 15.16 ภาคตัดขวางของชิ้นงานหล่อในเบ้าเซรามิก 100% Aluminium 356 ingot (MDF01)
- รูปที่ 15.17 ภาคตัดขวางของชิ้นงานหล่อในเบ้าเซรามิก Al 356 ingot 80% + Al scrap 20% (MDF02)
- รูปที่ 15.18 ภาคตัดขวางของชิ้นงานหล่อในเบ้าเซรามิก Al 356 ingot 80% + Al scrap 20% (MDF03)
- รูปที่ 15.19 ภาคตัดขวางของชิ้นงานหล่อในเบ้าเซรามิก Al 356 ingot 80% + Al scrap 20% (MDF04)
- รูปที่ 15.20 ภาคตัดขวางของชิ้นงานหล่อในเบ้าเซรามิก Al 356 ingot 80% + Al scrap 20% (MDF05)
- รูปที่ 15.21 ภาคตัดขวางของชิ้นงานหล่อในเบ้าเซรามิก Al 356 ingot 80% + Al scrap 20% (MDF06)
- รูปที่ 5.22 การวัดปริมาณรูพรุนจากภาพถ่ายในพื้นที่ $2 \times 2 \text{ cm}^2$ หล่อในเบ้าเซรามิก

- รูปที่ 5.23 ความหนาแน่นของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน โดยตัดชิ้นงานทดสอบจากตำแหน่ง บน กลาง และล่าง
- รูปที่ 5.24 ความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี โดยมีถึง ฟลักซ์อยู่ด้านบน โดยตัดชิ้นงาน ณ ตำแหน่ง บน กลาง และล่าง
- รูปที่ 5.25 (a) ความแข็งแรงแรงดึง (Tensile strength) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี โดยมีถึงฟลักซ์อยู่ด้านบน
- รูปที่ 5.25 (b) ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี โดยมีถึงฟลักซ์อยู่ด้านบน
- รูปที่ 5.25 (c) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Tensile elongation) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี โดยมีถึงฟลักซ์อยู่ด้านบน
- รูปที่ 5.26 สมบัติแรงดึง (Tensile properties) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี โดยมีถึงฟลักซ์อยู่ด้านบน
- รูปที่ 5.27 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ โดยมีถึง ฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT01) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- รูปที่ 5.28 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ โดยมีถึง ฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT02) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- รูปที่ 5.29 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ โดยมีถึง ฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT03) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- รูปที่ 5.30 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ โดยมีถึง ฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT04) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- รูปที่ 5.31 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ โดยมีถึง ฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT05) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

รูปที่ 5.32 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT01 80% Al 356 ingot + 20% Al chip (Non-degassing) จากการทดสอบสุญญากาศ 650 mmHg

รูปที่ 5.33 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT02 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศ 650 mmHg

รูปที่ 5.34 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT03 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศ 650 mmHg

รูปที่ 5.35 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT04 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศ 650 mmHg

รูปที่ 5.36 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT05 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศ 650 mmHg

รูปที่ 5.37 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน

รูปที่ 5.38 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน

รูปที่ 5.39 (a) กราฟแสดงค่าความแข็งแรงแรงดึง (Tensile strength) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

รูปที่ 5.39 (b) กราฟแสดงค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength at 0.2% strain) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

รูปที่ 5.39 (c) กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Tensile elongation) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

รูปที่ 5.40 กราฟความสัมพันธ์แสดงสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

รูปที่ 5.41 กราฟความสัมพันธ์ Engineering stress-strain ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

รูปที่ 5.42 แสดงค่า Tensile strength เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซด้วยวิธี Lance degassing, การกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ที่มีถึงฟลักซ์อยู่ด้านล่าง (MDF01-06) และด้านบน (MDFT01-05)

รูปที่ 5.43 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

รูปที่ 5.44 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง
a) จุดที่ทำให้เกิดการแตกหักจากกล้อง Stereoscope, b)-d) จาก SEM

รูปที่ 5.45 พื้นผิวใกล้จุดกำเนิดของการแตกหักแสดงบริเวณที่มี Aluminium oxide film และ Solidification shrinkage ที่ต่อเนื่องกันกินบริเวณกว้าง ในชิ้นงาน MDFT01

รูปที่ 5.46 ผลการวิเคราะห์ธาตุ (EDS) บนพื้นผิวแตกหักชิ้นงาน MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

รูปที่ 5.47 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง
a) จุดที่ทำให้เกิดการแตกหักจากกล้อง Stereoscope, b)-d) จาก SEM

รูปที่ 5.48 ผลการวิเคราะห์ธาตุ (EDS) บนพื้นผิวแตกหักชิ้นงาน MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

รูปที่ 5.49 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT04 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

a) พื้นผิวการแตกหักจากกล้อง Stereoscope, b)-c) จาก SEM

รูปที่ 5.50 ผลการตรวจสอบสารประกอบในฟลักซ์ชนิดเม็ดและชนิดผงด้วย XRD

รูปที่ 5.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Hydrogen ($\text{ml H}_2 / 100 \text{ gm Al}$) ที่คำนวณได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบนกับสมบัติของชิ้นงานหล่อ

รูปที่ 5.52 ผลการเปรียบเทียบ Quality Index ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมเมื่อผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์สถานะในสถานะที่ต่างกัน

บทที่ 1

บทนำ

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมได้เข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ซึ่งมีการแข่งขันกันมากขึ้นตาม เพื่อสนองความต้องการของผู้บริโภค ข้อได้เปรียบของอะลูมิเนียมคือมีความต้านทานต่อการเป็นสนิมที่ดี เนื่องจากอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่ายทำให้เกิดฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีแน่นและมีความเสถียรสูงซึ่งจัดว่าเป็น Passive film คือ อะลูมิเนียมเกิดความต้านทานต่อการเป็นสนิมได้ด้วยตัวเอง นอกจากนี้แล้วอะลูมิเนียมยังมีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติที่ยืดตัวได้ง่าย (High ductility) จึงสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ด้วยการรีดเป็นแผ่นหรืออัดขึ้นรูปได้สะดวก และมีคุณสมบัติทางด้านการหล่อหลอมที่ดี เช่น มีการไหลตัวที่ดี (High fluidity) และมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ($660^{\circ}C$) ด้วยเหตุนี้ อะลูมิเนียมจึงถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์เพิ่มมากขึ้น

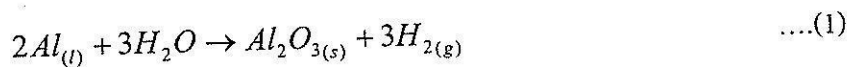
การปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมในขั้นตอนการหล่อขึ้นงานนั้นมีความสำคัญมาก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานหลังการหล่อและการนำไปใช้งาน การปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมก่อนการแบบนั้นประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้คือ

- 1) การปรับปรุงโครงสร้างของอะลูมิเนียมปฐมภูมิให้มีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ที่ดีขึ้น การปรับปรุงโครงสร้างนี้สามารถทำได้โดยการเติม Grain refiner ที่อยู่ในรูปของ Ti-B
- 2) การปรับปรุงโครงสร้างยูเทคติกโดยเติม Sodium (Na) หรือ Strontium (Sr) เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก Eutectic structure ซึ่งมีสภาพเป็นปลายแหลมไม่เป็นที่ต้องการเนื่องจากมีความเปราะสูง ให้เป็นโครงสร้างที่มีความกลมมนมากขึ้นเพื่อลดการสะสมของความเค้น
- 3) การกำจัดออกไซด์ต่างๆ (Dross) ที่เกิดขึ้นระหว่างการหลอมน้ำโลหะอะลูมิเนียม โดยใช้ flux เพื่อป้องกันการเกิด inclusions ซึ่งเป็นผลเสียต่อสมบัติเชิงกล
- 4) การกำจัดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen degassing) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดรูพรุน (Porosity) ในงานหล่ออะลูมิเนียม ซึ่งในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนนี้จำเป็นต้องทำทันทีก่อนการเทแบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะในวิธีที่ 1-3 ก่อนเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

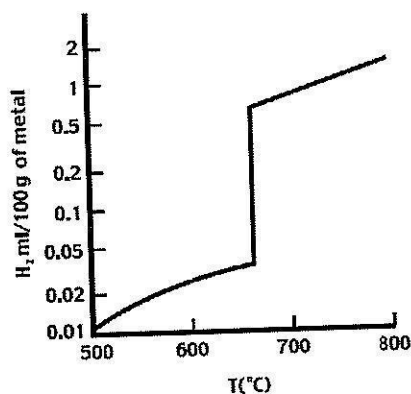
ปัญหาเรื่องรูพรุนเนื่องมาจากก๊าซไฮโดรเจนนั้น มีความสำคัญในกระบวนการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากหากวิธีการไล่ก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ไม่มี

ประสิทธิภาพเพียงพอ หรือปล่อยให้ระยะเวลาหลังจากการไล่ก๊าซไฮโดรเจนจนถึงการเหน้าโลหะนานเกินไปก็จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาารุพุนขึ้น ทำให้คุณสมบัติเชิงกลลดลงอย่างมาก ในทางอุตสาหกรรมหากเกิดปัญหาารุพุนขึ้น ชิ้นงานนั้นจะถูกนำกลับมาหลอมใหม่ซึ่งทำให้เป็นการสิ้นเปลืองและเสียเวลาในการผลิต

แหล่งที่มาของก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการผลิตนั้นมาจากความชื้นหรือการระเหยของน้ำในบรรยากาศที่เข้าสัมผัสกับน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว การระเหยของน้ำมาจากน้ำมันจากหัวเผาของเตาน้ำมัน จากความชื้นของวัสดุช่วยหลอมประเภทเกลือ Salt flux จากวัสดุทนไฟที่ฉาบเข้าหลอมหรือเบ้ารับจากความเปราะเปื้อนของน้ำมันที่เศษโลหะบรรจุและจากอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้กับการทำงานหลอม ความชื้นหรือไอน้ำตามแหล่งต่างๆนี้จะแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนดังสมการ^[1]



ไฮโดรเจนจะสามารถละลายในน้ำโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ได้ดีมากในสภาพหลอมเหลว (Hydrogen pickup) แต่เมื่อโลหะอะลูมิเนียมเย็นตัวลงและแข็งตัวปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ละลายได้จะลดลงอย่างฉับพลันดังแสดงในรูปที่ 1.1 มีผลทำให้อะตอมของไฮโดรเจนที่ถูกขับออกมาในสภาพฟองก๊าซเล็กแยกตัวลอยขึ้น และหากฟองก๊าซไฮโดรเจนแยกตัวลอยออกจากผิวโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวไม่ทันเนื่องจากอะลูมิเนียมแข็งตัวเสียก่อน ก็จะตกค้างอยู่ภายในตัวเนื้ออะลูมิเนียม ในลักษณะเป็นฟองเล็กๆ กระจุกกระจายอยู่ทั่วไป ทำให้คุณภาพของงานหล่อที่ได้ต่ำและทำให้คุณสมบัติเชิงกลลดลงอย่างมากไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน

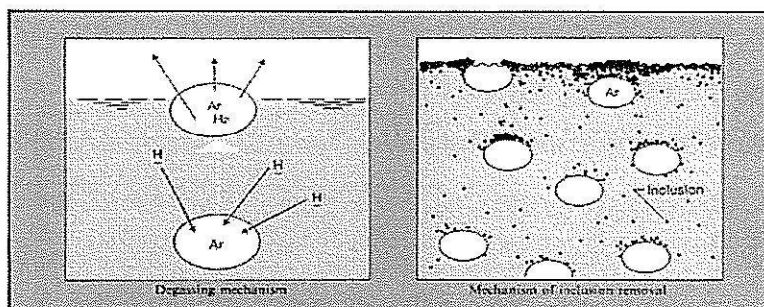


รูปที่ 1.1 แสดงปริมาณการละลายตัวของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน^[2]

วิธีการลดการเกิด Hydrogen Pickup ออกไซด์ (Dross) ที่ลอยปิดผิวหน้าของน้ำโลหะมีหลายวิธี ซึ่งอาจจะใช้ฟลักซ์ในการกำจัดก๊าซที่ประกอบด้วยส่วนผสมของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) หรือ $AlCl_3$, NaF, KF, AlF_3 หรืออาจใช้ CaF_2 , $NaAlCl_4$, $KAlCl_4$, K_3AlF_6

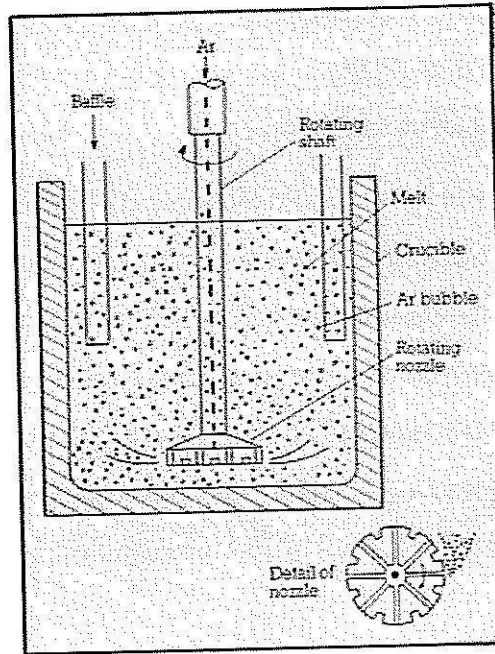
เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนสามารถหนีขึ้นมาที่ผิวได้ นอกจากนี้การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนสามารถใช้วิธีการ Ultrasonic และวิธีการสุญญากาศ (Vacuum) แต่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและอาจไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรมที่มีต้นทุนไม่สูงพอ

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนอีกวิธีที่ได้ผลดีและมีประสิทธิภาพสูงนั้น สามารถใช้ฟองก๊าซเฉื่อย อาร์กอน (Ar) หรือไนโตรเจน (N_2) กระจายตัวอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อให้ไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำโลหะสามารถแพร่เข้ามาอยู่ในฟองก๊าซ Ar หรือ N_2 จากนั้นฟองก๊าซ Ar หรือ N_2 จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำโลหะหลอมเหลวดังแสดงในรูปที่ 1.2 เพื่อให้เกิดคุณภาพของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมที่ดี ปริมาณของไฮโดรเจนควรควบคุมให้อยู่ในช่วง 0.2-0.3 $mL.H_2/100g$ ของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว โดยค่าสูงสุดของ Hydrogen Concentration ที่ละลายอยู่ได้ควรมีค่าไม่เกิน 0.6 $mL.H_2/100g$ ของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว ดังนั้นการทำกำจัดก๊าซในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวต้องใช้ความระมัดระวังให้มาก

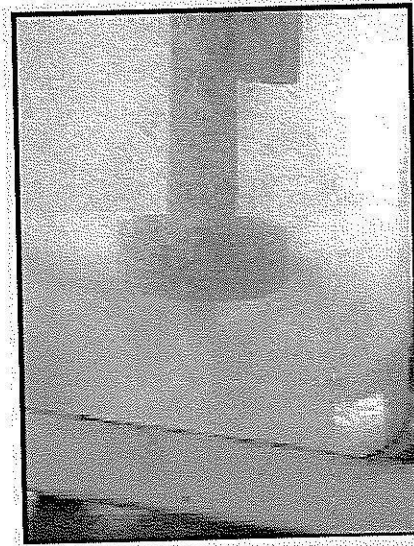


รูปที่ 1.2 แสดงการกระจายตัวของฟองก๊าซ Ar นำพาก๊าซ H_2 ออกจากน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว^[2]

เครื่องมือที่ใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้มีการพัฒนามากขึ้น จากการเป่าก๊าซ Ar ผ่านท่อลงไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Lance degassing) มาเป็นการใช้ท่อแบบจานหมุน (Rotary nozzle) ดังรูปที่ 1.3 และ 1.4 เพื่อให้เกิดฟองก๊าซเฉื่อยที่ส่งผ่านท่อก๊าซออกมาสามารถกระจายก๊าซไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ทั่วถึง



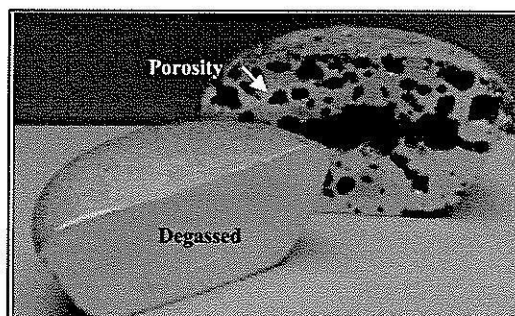
รูปที่ 1.3 ภาพจำลองแสดงการหมุนกระจายตัวของก๊าซ Ar^[2]



รูปที่ 1.4 ภาพจำลองแสดงการทำงานของ Rotary nozzle^[2]

ปัญหาารุพ-run เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมนี้ ก่อให้เกิดอุปสรรคอย่างมากในการวิจัยและพัฒนาการหล่อชิ้นงาน โลหะอะลูมิเนียมผสม เนื่องจาก การวิจัยและพัฒนาทางด้านการหล่ออะลูมิเนียม หรือการทดลองปรับปรุงส่วนผสมทางเคมีและการปรับปรุง โครงสร้างเพื่อเพิ่มคุณสมบัติหลังการหล่อไม่สามารถกระทำได้ หากการเตรียมชิ้นงานนั้นไม่สามารถกำจัดหรือควบคุมปริมาณของรูพ-run ที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนได้ ส่งผลให้เกิดข้อตำหนิ (Defect) หลังการหล่อชิ้นงานทำให้คุณสมบัติเชิงกลลดลงตามลำดับ ทำให้ไม่สามารถได้รับผลการทดลองที่แท้จริงเนื่องจากรูพ-run

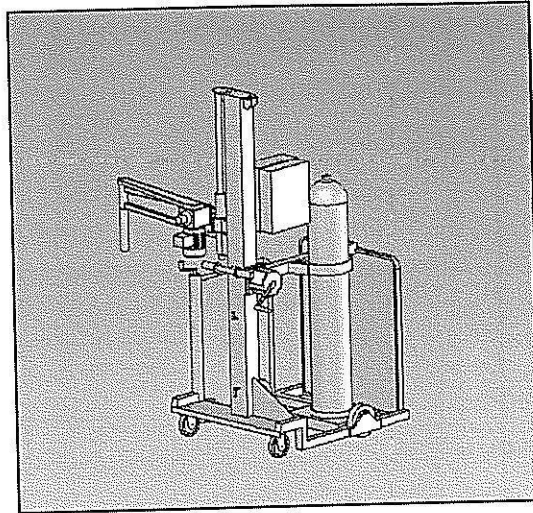
ดังกล่าว ซึ่งแสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 1.5 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดก๊าซจะไม่มีปริมาณรูพรุนหลงเหลืออยู่เลยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการกำจัดก๊าซ ซึ่งสามารถเห็นรูพรุนจำนวนมากปรากฏอยู่ภายในชิ้นงาน



รูปที่ 1.5 การเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดก๊าซและไม่ผ่านการกำจัดก๊าซ^[1]

โครงการที่นำเสนอเป็นการจัดทำเครื่อง **Flux Injection Degassing Unit (FIDU)** ซึ่งถูกพัฒนาจากเครื่องต้นแบบ คือ เครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่ (Mobile Degassing Unit:MDU) ดังแสดงในรูปที่ 1.6 เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในระหว่างการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม เครื่อง MDU ถูกออกแบบให้เกิดการกระจายตัวของก๊าซอาร์กอน ผ่านจานหมุนกระจายก๊าซเฉื่อยติดอยู่ที่ปลายท่อที่ทำด้วยแกรไฟต์โดยจานหมุนนี้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ด้วยมอเตอร์ เพื่อที่จะควบคุมการกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนขนาดเล็กในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว เพื่อเป็นตัวนำพาเอาก๊าซไฮโดรเจนและ สิ่งเจือปนอื่นๆออกไปจากผิวหน้าของน้ำโลหะ โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความดันทำให้ไฮโดรเจนแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซอาร์กอนดังรูปที่ 1.2 และ 1.3 ทั้งนี้ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ฉีดฟลักซ์ขึ้นเพื่อสามารถทำความสะอาดน้ำโลหะโดยใช้ฟลักซ์พร้อมกับกระบวนการกำจัดก๊าซ โดยจะแสดงรายละเอียดในการสร้างอุปกรณ์ในหัวข้อที่ 3.1

การจัดทำเครื่อง FIDU นี้ยังสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก เพื่อให้สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนได้ในสถานะทั้งที่อยู่ในเบ้าพักหลังการหลอมหรืออยู่ในเบ้าหลอม (Crucible) ที่พร้อมที่จะทำการหล่อ ทำให้เกิดความพร้อมในการไล่ก๊าซไฮโดรเจนได้ทันทีก่อนเวลาที่จะทำการเทน้ำอะลูมิเนียมลงในแม่พิมพ์ และเพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซไฮโดรเจนกลับไปละลายลงในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ทันก่อนการเทน้ำโลหะ เพราะหากทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนแล้วปล่อยให้ก๊าซไฮโดรเจนจะสามารถละลายลงไปใต้น้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้อีก และทำให้เกิดปัญหาารูพรุนได้แม้ว่าจะทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนไปแล้ว



รูปที่ 1.6 ภาพต้นแบบเครื่อง Mobile Degassing Unit (MDU) ที่ถูกนำมาพัฒนาสำหรับการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์

ข้อดีของ Flux Injection Degassing Unit (FIDU)

1. เครื่อง FIDU สามารถใช้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากการใช้หัวกระจายก๊าซ (nozzle) ที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของก๊าซ (Ar , N_2) ได้สม่ำเสมอมากขึ้นและสามารถปรับอัตราการหมุนและการไหลของก๊าซ Ar และ N_2 เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของเบ้าหลอมและปริมาณน้ำโลหะหลอมเหลว อีกทั้งยังสามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้สะดวกโดยใช้ล้อเมื่อต้องการใช้งานทันทีก่อนการหล่อน้ำโลหะ และสามารถยึดให้อยู่กับที่ในขณะที่ทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนทำให้เกิดความปลอดภัยในระหว่างการใช้งาน ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนดีขึ้น
2. ลดระยะเวลาในช่วงการเทน้ำโลหะ ทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศได้น้อยลงลดการเกิด Dross ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำโลหะอะลูมิเนียมน้อยลง และยังป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียปริมาณของโซเดียมหรือสทอนเซียม ซึ่งใช้ในกระบวนการปรับปรุงรูปทรงพื้นฐานของโครงสร้างยูเทคติก (Modification) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
3. เครื่อง FIDU นี้สามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต Foundry Engineering Laboratory (431310) เพื่อให้นักศึกษาสามารถเรียนรู้กระบวนการหล่อ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสมในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ซึ่งมีการขยายกำลังการผลิตในประเทศให้มากขึ้นในปัจจุบัน อีกทั้งยังสามารถใช้ในโครงการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสมในสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการอีกด้วย

4. การติดตั้งอุปกรณ์ฉีดฟลักซ์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาดน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวก่อนการเทแบบร่วมกับกระบวนการกำจัดก๊าซด้วยวิธี Rotary degassing ซึ่งการกระจายตัวของฟองก๊าซอาร์กอนจากการปั่นจะช่วยในการทำให้เม็ดฟลักซ์หรือผงฟลักซ์สามารถกระจายตัวและทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะได้ดีและทั่วถึงมากขึ้น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 เพื่อจัดสร้างเครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมอุปกรณ์ฉีดฟลักซ์สำหรับใช้ในขั้นตอนการหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสม เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้กับชิ้นงานหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสม
- 2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการกำจัดก๊าซและการฉีดฟลักซ์ เช่น ความเร็วรอบในการหมุนแท่งแกรไฟต์ อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ วิธีการฉีดฟลักซ์รวมถึงชนิดของฟลักซ์ ต่อคุณภาพ ปริมาณรูพรุนและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ
- 2.3 เพื่อสามารถใช้เครื่องมือสำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิตโลหะ (431310) และเพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาโลหะอะลูมิเนียมผสมในสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

3. ขอบเขตการวิจัย

สร้างเครื่องกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมพร้อมอุปกรณ์ฉีดฟลักซ์ เพื่อใช้ในกระบวนการหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสม โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือจากตัวแปรดังต่อไปนี้

- 1) ความเร็วรอบของการหมุนแท่งแกรไฟต์ (Rotational speed 750-100 rpm)
- 2) อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (Gas flow rate 5-20 rpm)
- 3) เวลาที่ใช้ในการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ (Degassing and Fluxing time 5-20 min)
- 4) วิธีการฉีดฟลักซ์ (Fluxing method - lance & rotary)
- 5) ชนิดของฟลักซ์ (Type of fluxes- powder & granular)

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 4.1 สามารถกำจัด Dross ในเวลาเดียวกันกับการกำจัดก๊าซ เพื่อลดระยะเวลาในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะก่อนการเทแบบ เพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของฟลักซ์กับน้ำโลหะ อีกทั้งยังสามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้สะดวกเมื่อต้องการใช้งานทันทีก่อนการหล่อน้ำ

โลหะ สามารถปรับใช้กำจัดได้กับเตาหลอมขนาดเล็ก (Induction furnace) ที่มีอยู่ในสถานปฏิบัติกร F6

- 4.2 ตลอดระยะเวลาในช่วงการเทน้ำโลหะทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศได้น้อยลง ลดการเกิด Dross ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำโลหะอะลูมิเนียมน้อยลง
- 4.3 เครื่อง Flux injection degassing unit นี้สามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการหล่อ Foundry Engineering Laboratory (431310) เพื่อให้นักศึกษาสามารถศึกษาและเรียนรู้กระบวนการจริงที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสมในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ซึ่งมีการขยายกำลังการผลิตในประเทศให้มากขึ้นในปัจจุบัน อีกทั้งยังสามารถใช้ในโครงการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสมในสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
- 4.4 เครื่อง Flux injection degassing unit นี้สามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อปรับใช้ในอุตสาหกรรมการหล่ออะลูมิเนียมขนาดเล็ก ที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะเพื่อลดปัญหาารุพุนอันเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด Dross โดยใช้ฟลักซ์

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการหล่ออะลูมิเนียมและการฉีดพลาซมา

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการเป็นสนิมเนื่องจากการเกิดฟิล์มของ Al_2O_3 ที่เกิดจากการรวมตัวของอะลูมิเนียมกับออกซิเจน มีความหนาแน่นของชั้นฟิล์มมากช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนสามารถแทรกซึมลงไปทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมภายใต้ฟิล์มของ Al_2O_3 เป็นผลให้อะลูมิเนียมเกิดภูมิต้านทานต่อการเป็นสนิมได้ด้วยตัวเอง (Passive state) และคุณสมบัติที่ยึดตัวได้ง่ายของอะลูมิเนียมจึงสามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีคุณสมบัติทางด้านการหล่อหลอมที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ อีกทั้งสามารถรวมตัวกับโลหะอื่นๆเป็นโลหะผสมได้ง่าย เช่น Si, Cu และ Mg เป็นต้น จึงทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางกลได้ดี เหมาะสมกับการใช้งานทางวิศวกรรม

ในการผลิตให้ได้ชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมที่มีคุณภาพดี จำเป็นต้องมีการขจัดออกไซด์สิ่งสกปรกออกจากน้ำโลหะที่ต้องมีควบคุมกระบวนการขึ้นตอนต่างๆ อย่างเข้มงวด อีกทั้งต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งเป็นเทคนิคการหลอมที่ซับซ้อนและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงจะได้โลหะที่ปราศจากออกไซด์ รูพรุนและโครงสร้างที่เหมาะสมอย่างแท้จริง อย่างไรก็ตาม ในบทนี้จะกล่าวถึงสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางโลหวิทยากับสมบัติทางกายภาพและทางกล ซึ่งเป็นที่มาของการควบคุมกระบวนการหล่อหลอมอะลูมิเนียม

3.1 สมบัติทั่วไปและประเภทของอะลูมิเนียมหล่อ^[1]

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะน้ำหนักเบา ซึ่งถือว่าเบากว่าเหล็กโดยทั่วไปประมาณ 2.8 เท่า มีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้สามารถหล่อขึ้นรูปได้ง่าย แต่มีการหดตัวที่สูงปานกลาง (ประมาณ 6%) เนื่องจากโครงสร้างผลึกเป็น Face Centre Cubic (FCC) จึงทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีในเรื่องของความเหนียวสามารถขึ้นรูปทางกลได้ง่ายแม้แต่ที่อุณหภูมิห้อง แต่มีความแข็ง ความแข็งแรงแรงดึง ค่ามอดุลัสของยังที่ต่ำกว่าเหล็ก แต่อย่างไรก็ดีโลหะอะลูมิเนียมผสมบางชนิดสามารถเพิ่มสมบัติทางกลได้ด้วยกระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่า Precipitation hardening จึงทำให้สามารถนำอะลูมิเนียมผสมมาใช้งานแทนที่เหล็กได้ในบางกรณี

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

น้ำหนักอะตอม	26.97
ระบบผลึก	FCC ($a=b=c=4.041\text{\AA}$)
ความหนาแน่น	2.70 g/cm^3
อุณหภูมิหลอมเหลว	658°C

จุดเดือด	1800°C
ความร้อนจำเพาะ	0.2259 Cal/g °C
ความร้อนแฝงการหลอมเหลว	93 Cal/g
อัตราการหดตัวจากสภาพหลอมเหลว	6.6%
สัมประสิทธิ์การขยายตัว 20°C	$23.8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

คุณสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

ความต้านทานแรงดึง	8-10 kgf/mm ²
พิกัดความยืดหยุ่น	3 kgf/mm ²
อัตราการยืดตัว	40-45%
ความแข็ง	16-20 H _B
มอดุลัสความยืดหยุ่น	7800 kgf/mm ²

สำหรับงานหล่ออะลูมิเนียม นั้น อะลูมิเนียมผสม (Al-Si) นั้นเป็นที่นิยมมากที่สุดเนื่องจาก ซิลิคอนทำให้เกิดการไหลตัวเข้าสู่แบบหล่อได้ดี^[1-11] ซึ่งอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดด้วยกัน คือ อะลูมิเนียมผสมชนิดยูเทคติก ไฮโปยูเทคติก และไฮเปอร์ยูเทคติก

3.1.1 อะลูมิเนียมผสมชนิดยูเทคติก

อะลูมิเนียมผสมชนิดโดยทั่วไปมีปริมาณ Si 10% < Si < 13% โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยยูเทคติกซิลิคอนส่วนใหญ่ ดังแสดงในแผนภูมิสมดุลของเฟสในรูปที่ 3.1 ซึ่งเฟสยูเทคติกซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางยาวคล้ายเข็ม (Acicular ลักษณะดังกล่าวมีผลให้คุณสมบัติทางกลต่ำ ดังนั้น จึงต้องมีการดัดแปลงโครงสร้างของเฟสยูเทคติกซิลิคอนหรือเรียกว่า Modification ซึ่งหมายถึงการทำให้เฟสยูเทคติกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางยาวคล้ายเข็ม (Acicular platelets) เปลี่ยนรูปเป็นโครงสร้างที่เล็กละเอียดขึ้น (Fine fibres) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

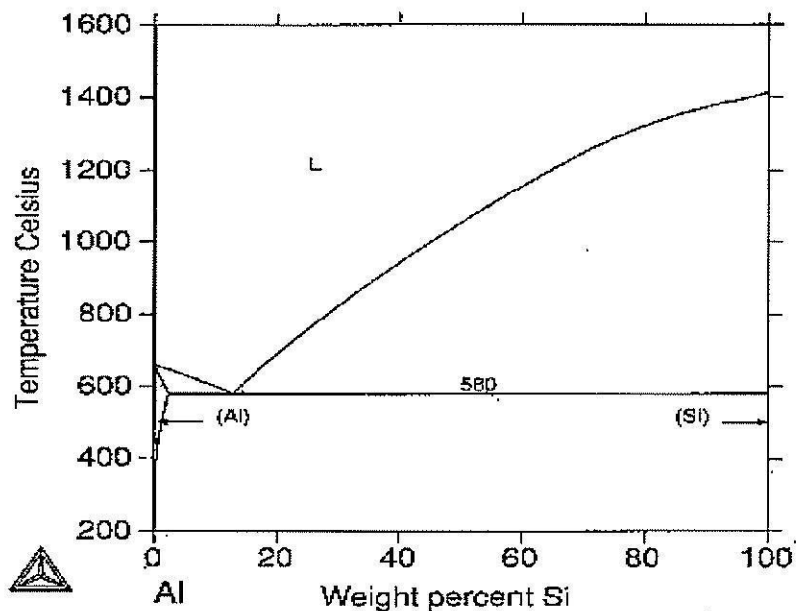
3.1.2 อะลูมิเนียมผสมชนิดไฮโปยูเทคติก

โดยทั่วไปมีปริมาณ Si <10%, 4% < Si <8% โครงสร้างทั่วไปประกอบด้วย Primary aluminium หรือเดนไดรต์ และยูเทคติกซิลิคอน ที่แยกตัวมาอยู่ระหว่างเดนไดรต์ในระหว่างการแข็งตัว โดยทั่วไปอะลูมิเนียมไฮโปยูเทคติกมีช่วงการแข็งตัวที่กว้าง ทำให้เกิดโพรงหดตัวกระจายทั่วระหว่างเดนไดรต์ ดังนั้นจึงต้องควบคุมคุณสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมไฮโปยูเทคติก โดยการ

ควบคุมระยะห่างระหว่างเดนไดรต์ทุติยภูมิ (DAS) และ ขนาดและรูปร่างของเกรน (Grain size and shape)

3.1.3 อะลูมิเนียมผสมชนิดไฮเปอร์ยูเทคติก

โดยทั่วไปอะลูมิเนียมผสมชนิดนี้มีปริมาณ Si $16\% < \text{Si} < 20\%$ โครงสร้างประกอบด้วย Primary silicon และยูเทคติกซิลิคอน และเนื่องจากปริมาณซิลิคอนที่สูงมาก ทำให้อะลูมิเนียมชนิดนี้ นำมาใช้งานที่ต้องการการขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำ และทนการเสียดสี เช่น ลูกสูบในเครื่องยนต์สันดาปภายใน การทำ Grain Refinement ซิลิคอนปฐมภูมิ ในอะลูมิเนียมไฮเปอร์ยูเทคติกต้องเติมธาตุฟอสฟอรัส (P) ซึ่งอยู่ในรูปของ Master alloy เช่น Copper phosphorus (CuP) nickel phosphorus (NiP)



รูปที่ 3.1 แผนภูมิสมดุลของ Al-Si

ในอุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียม มีการแบ่งแยกประเภทและการเรียกชื่อของอะลูมิเนียมผสมต่างกันไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุผสม เช่น Si, Mg, Cu หรือ Zn เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 1 อิทธิพลของธาตุผสมต่างๆ เหล่านี้มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆของชิ้นงานหล่อ ดังจะกล่าวสรุปคร่าวๆ ดังนี้คือ

มาตรฐาน LM BS 1490 AA และ JIS	คุณสมบัติโดยทั่วไปและลักษณะการใช้งาน
LM0 AA150	ใช้กับงานหล่อด้วยแบบทราย พวกอุปกรณ์ไฟฟ้า เคมี ผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับอาหาร
LM2 ADC12	อะลูมิเนียมผสมเกรดหนึ่งในสองเกรดที่ใช้มากที่สุดกับการหล่อด้วยแม่พิมพ์ดีด หรือ Die Casting
LM4 AA319 AC 2A	เป็นอะลูมิเนียมเกรดที่ใช้งานแพร่หลายที่สุด คุณสมบัติทางการหล่อดีมาก ใช้กับงานหล่อกว้างขวางหลายประเภท และยังสามารถปรับปรุงความแข็งและความแข็งแรงให้เพิ่มขึ้น โดยการอบชุบได้อีกด้วย
LM 5 AA514 AC 7A	เหมาะกับการหล่อด้วยแบบทรายและแบบโลหะ สำหรับงานที่ต้องการคุณสมบัติทนทานต่อการผุกร่อนสูงสุด เช่น อุปกรณ์เดินเรือทะเลต่างๆ
LM 6 A 413 AC 3A	เหมาะกับการหล่อที่มีขนาดใหญ่ งานหล่อประณีต งานบางๆ ใช้กับแบบหล่อได้ทั้งแบบหล่อทรายและแบบโลหะ และยังสามารถใช้งานหล่อที่ต้องการทนต่อการผุกร่อน หรือต้องการความอ่อนเหนียวสูง
LM 9 A360 AC 4 A	ใช้กับงานหล่อด้วยแม่พิมพ์หล่อ ชนิดใช้แรงดันอัดต่ำ ที่ต้องการคุณสมบัติเหมือนกับ LM 6 แต่ถ้าขึ้นงาน ได้นำไปทำการอบชุบจะเพิ่มความแข็งได้สูงกว่า
LM 10 AA220	ใช้กับงานหล่อแบบทรายและงานหล่อแบบโลหะ หรือฝังหุ่นขึ้นที่ต้องการ (Chill casting) ที่ต้องการความแข็งแรงสูงทนต่อแรงกระแทกกรรมวิธีในการหล่อต้องมีเทคนิคพิเศษ และสามารถอบชุบได้
LM 12 AA 222	ใช้กับงานที่ต้องการผิวมันเรียบ หลังจากการตกแต่งผิวเครื่องจักรเป็นหลักและ ขึ้นงานที่ต้องการความแข็งแรง
LM13 AA 336 AC8A	ใช้ทำเครื่องสูบลมเครื่องยนต์เป็นหลักใช้เฉพาะกับงานหล่อแม่พิมพ์ Permanent Mold เพิ่มความแข็งแรงด้วยการอบชุบ
LM 16 AA355 AC4D	เหมาะกับการหล่อที่ต้องการคุณสมบัติทางกลสูงกว่า และกับงานหล่อที่ค่อนข้างประณีต ทั้งแบบทรายและแบบโลหะ สามารถทำการอบชุบได้
LM 18 AA355	เหมือนกับเกรด LM 16 เอาคุณสมบัติด้านการหล่อหลอมและทนทานต่อการผุกร่อนได้สูงกว่าเข้าด้วยกัน
LM 20 A413	ใช้กับการหล่อด้วยแม่พิมพ์ Die Casting เหมือนกับ LM 16 คุณสมบัติการตกแต่งด้วยเครื่องจักร และความแข็งแรงสูงกว่า LM 16
LM 21 AA308	โดยทั่วไปมีคุณสมบัติเหมือน LM4 แต่คุณสมบัติทาง Machinability สูงกว่า
LM 22 AA319 AC2A	เหมาะกับการใช้งานหล่อแบบเย็นเร็ว Chill Casting ที่ต้องการคุณสมบัติการหล่อที่ดีกว่าความอ่อนเหนียวที่ดีกว่า ต้องทำการอบชุบก่อนการนำไปใช้งาน
LM 24 A380 AC4B ADC10	อะลูมิเนียมหนึ่งในสองเกรดที่ใช้กับงานหล่อแบบใช้แม่พิมพ์ ทุกระบบทั้งประเภทใช้แรงอัดต่ำและแรงอัดสูง
LM 25 A356 AC4C	เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อการผุกร่อน และความแข็งแรงในการใช้งานสูงสามารถชุบแข็ง ปัจจุบันนิยมกับอุตสาหกรรมทำล้อรถยนต์
LM 26 AA332	งานหลักๆคือ ใช้ทำลูกสูบ เหมือน LM 13 เน้นเกี่ยวกับลูกสูบที่ใช้งานหนักๆ ลูกรอก Pulleys
LM 27 AC2B	เป็นอะลูมิเนียมที่แพร่หลายในการนำไปหล่อด้วยแบบทราย เป็นอีกเกรดหนึ่งที่ใช้แทนที่ LM4 และ LM21 และสามารถเทแบบหล่อโลหะและสามารถทำการอบชุบได้
LM 28	ใช้ทำลูกสูบเครื่องยนต์ที่มีอัตราการยึดตัวต่ำกว่า LM13 การหล่อต้องใช้เทคนิคพิเศษ
LM 29	เป็นอะลูมิเนียมที่ใช้หล่อพวกลูกสูบ มีอัตราการยึดตัวต่ำกว่า LM 28
LM 30	ใช้ทำเสื้อสูบ Cylinder block ที่มีการยึดตัวต่ำ และทนการเสียดสีที่ผิวได้
AA390	ขดเชื่อม โดยไม่ต้องเคลือบผิว นอกจากนี้ใช้งานหล่อชิ้นส่วนอุปกรณ์ยานอวกาศที่ต้องการความแข็งแรงสูง และระบบไฮดรอลิกต่างๆ
LM31 AA712	อะลูมิเนียมผสมพื้นฐานกับ Zinc รวมกับธาตุอื่น ๆ มากกว่า 1 อย่าง คุณสมบัติทางการหล่อพอใช้ แต่ลักษณะในสภาพร้อนได้ง่าย ไม่เหมาะกับการผลิตที่ต้องการเนื้อแน่น ไม่มีรอยร้าวและใช้หล่อแบบทราย

ธาตุผสมในอะลูมิเนียมจะอยู่ใน 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1. ละลายในเนื้ออะลูมิเนียมเกิดเป็นระบบสารละลายของแข็ง
2. รวมตัวกับธาตุอื่นเกิดเป็นสารประกอบ เช่น แมกนีเซียมซิลิกอน Mg_2Si หรือแยกตัวออกมาหากมีความสามารถในการละลายต่ำ

ธาตุผสมมีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆที่สำคัญของอะลูมิเนียมมีดังนี้^[11-12]

ซิลิกอน (Silicon) เป็นธาตุผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติในการหล่อ ได้แก่ การไหลตัว การป้อนโลหะเข้าแบบและความต้านทานต่อการฉีกขาดจากสภาพร้อน (Hot tearing resistance) โดยซิลิกอนจะรวมตัวกับอะลูมิเนียมเกิดเป็นโครงสร้างยูเทคติก 11.7% Si หากมีปริมาณที่มากจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเฟส ช่วยลดปัญหาการหดตัว แต่จะให้คุณสมบัติด้านการยึดตัว และความสามารถในการกลึงไสลดลง ปริมาณซิลิกอนที่นิยมใส่ในงานหล่อแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

- ปริมาณต่ำ 4-6% Si
- ปริมาณปานกลาง 7.5-9.5% Si
- โลหะผสมยูเทคติก 10-13% Si
- ไฮเปอร์ยูเทคติกแบบพิเศษ > 16% Si

โลหะผสมยูเทคติกเป็นโลหะผสมที่มีสมบัติของการไหลได้สูงที่อุณหภูมิการหล่อหนึ่งๆ แต่มีช่วงการแข็งตัวสั้น จึงแข็งตัวโดยการหดตัวแบบปรุภูมิภาค ดังนั้น โลหะผสมยูเทคติกจึงเหมาะสำหรับงานหล่อชิ้นบาง แต่ถ้าต้องการงานที่มีความแข็งแรงสูง ควรใช้ซิลิกอนที่มีปริมาณต่ำ ส่วนโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติกนั้น มีสมบัติการกลึงไสได้ยากนิยมทำเป็นชิ้นงานที่ต้องทนต่อการสึกหรอ เช่น ลูกสูบ เป็นต้น

ไทเทเนียม (Titanium) เป็นตัวปรับเนื้อโครงสร้างโลหะผสมให้มีเกรนที่เล็กละเอียดขึ้นใช้ร่วมกับโบรอน ปริมาณของไทเทเนียมจะใช้มากกว่าโบรอน จึงจะทำให้การปรับเนื้อโครงสร้างได้ผล

แมกนีเซียม (Magnesium) แมกนีเซียมที่ใส่ลงในอะลูมิเนียม 0.25-0.5% สามารถใช้ในกระบวนการทางความร้อน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียม-ซิลิกอนได้ และยังช่วยให้สมบัติทางกลดีขึ้น เนื่องจากมีการตกตะกอนของเฟส Mg_2Si เล็กๆกระจายอยู่ทั่วไป ค่าความเค้นพิสูจน์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ในลูกสูบที่ทำจากอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนที่มีปริมาณซิลิกอนสูงสามารถเติมแมกนีเซียมได้สูงถึง 1% อาจเติมถึง 3-6% ในอะลูมิเนียมซึ่งมีซิลิกอนต่ำเพื่อปรับปรุงลักษณะเฉพาะของการทำ Anodizing ช่วยให้ผิวสำเร็จมีความเงางามสำหรับงานที่ใช้ในการตกแต่ง ในงานหล่อในแบบพิมพ์โลหะด้วยแรงดัน (Die casting process) ควรเติมแมกนีเซียมต่ำๆป้องกันการแตกแบบเปราะ

โบรอน (Boron) โบรอนใช้งานในรูปแบบ Titanium Boride เพื่อปรับสภาพการเกิดของนิวเคลียสในกระบวนการทำแกรนให้ละเอียด หากมีปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าให้กับโลหะผสม แต่ถ้ามีปริมาณสูงเกินไปจะมีผลต่อโลหะผสม เช่น การกริ่งไส และการยึดตัวต่ำ

ทองแดง (Copper) เป็นธาตุที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของอะลูมิเนียมได้แก่ ความแข็ง ความแข็งแรง และความสามารถในการกริ่งไส และสภาพการนำความร้อน กระบวนการทางความร้อนจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด ถ้าเติมทองแดงลงในโลหะผสมอะลูมิเนียมปริมาณ 4-5% แต่ทองแดงทำให้ความสามารถในการหล่อ และความต้านทานการฉีกขาดขณะร้อนด้อยลง รวมทั้งความต้านทานการผุกร่อนด้อยลงด้วย

สตรอนเทียม (Strontium) ช่วยปรับปรุงโครงสร้างยูเทคติกของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ส่วนใหญ่เติมประมาณ 0.008-0.04% Sr ถ้าเติมมากกว่านี้จะทำให้เกิดรูพรุนในงานหล่อ โดยเฉพาะกับบริเวณที่หนาหรือกับที่มีการเย็นตัวช้าซึ่งปัญหานี้สามารถลดลงได้ด้วยการกำจัดก๊าซที่มีประสิทธิภาพ

เหล็ก (Iron) ช่วยเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานต่อการเกิด Hot tearing โดยส่วนมากจะใช้ไม่เกิน 0.8% หากมีปริมาณสูงกว่านี้จะทำให้คุณสมบัติด้านการหล่อหลอม การยึดตัวและความสามารถในการกริ่งไสมีค่าลดลง

แมงกานีส (Manganese) ช่วยทำให้งานหล่อดีขึ้น และช่วยควบคุมลักษณะสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กในชิ้นงาน ซึ่งนำไปสู่ความสามารถในการยึดตัว และลักษณะการหดตัวของงานหล่อ โดยส่วนมากจะใช้มากกว่า 0.5%

นิกเกิล (Nickel) ส่วนมากเติมร่วมกับทองแดงเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งให้กับงานหล่อ เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงยังลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนด้วย

โซเดียม (Sodium) เป็นธาตุที่ช่วยปรับปรุงโครงสร้างยูเทคติกในอะลูมิเนียม-ซิลิกอน แต่ถ้ามีธาตุโซเดียมอยู่ในงานหล่ออะลูมิเนียม-แมกนีเซียมทำให้งานมีสมบัติการแตกเปราะที่ง่าย

ตะกั่ว (Lead) ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านการกริ่งไสให้ดีขึ้น โดยตะกั่วทำหน้าที่เป็นตัว Chip Breaker ซึ่งช่วยให้ขี้กิ้งไสขาดเป็นช่วง ไม่ออกเป็นเส้นใยต่อเนื่อง

สำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่มีธาตุผสมหลักคือ Si และ Mg เป็นเกรดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมงานหล่อและถูกเลือกใช้ในโครงการวิจัยนี้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.2 โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ^[11-12]

ในโครงการวิจัยนี้จะใช้อะลูมิเนียมงานหล่อเกรด 356 ซึ่งมีธาตุผสมหลัก 2 ชนิด คือ ซิลิกอน และแมกนีเซียม ซึ่งอะลูมิเนียมผสมส่วนใหญ่จะถูกพัฒนาขึ้นมาจากระบบ Al-Si ประมาณ 90 ของ

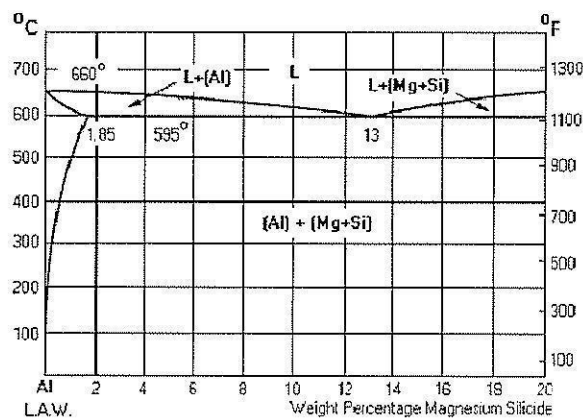
อะลูมิเนียมผสมในงานหล่อถึงแม้ว่าอะลูมิเนียมผสมนี้จะมีคุณสมบัติทางกลต่ำกว่าเกรดงานรีด แต่สามารถเพิ่มคุณสมบัติได้หลากหลายวิธี จะใช้ในการทดลอง ปรับปรุงคุณสมบัติ และการประยุกต์ใช้ก่อนอื่นจำเป็นต้องศึกษาลักษณะพื้นฐานของอะลูมิเนียมเกรด 356.0 ซึ่งเป็นดังนี้

ส่วนผสมทางเคมี: เปอร์เซนต์โดยมวล

ซิลิคอน (Si) : 6.5-7.5	เหล็ก (Fe): 0.20 max
ทองแดง (Cu): 0.20 max	สังกะสี (Zn): 0.10 max
ไทเทเนียม (Ti): 0.20 max	แมกนีเซียม (Mg): 0.25-0.45
แมงกานีส (Mn): 0.10 max	อื่นๆ: 0.05 max

สมบัติทางความร้อน

ความหนาแน่น	2.685 g/cm ³
อุณหภูมิหลอมเหลว	615°C
อุณหภูมิแข็งตัว	555°C
สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 20 องศาเซลเซียส	21.5 μm/m.K
ความร้อนจำเพาะ	963 J/kg.K
สภาพการนำความร้อน T6, T61 (Sand)	151 W/m.K
สภาพในการนำความร้อน T6, T61 (Permanent Mold)	159 W/m.K



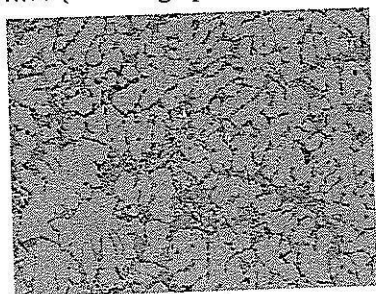
แผนภาพสมดุลของธาตุอะลูมิเนียม - แมกนีเซียมซิลิไซด์
(Aluminum - Magnesium - Silicide Phase Diagram)

รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพสมดุล (Phase diagram) ของอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมซิลิไซด์

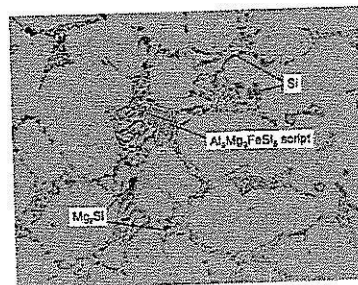
จากแผนภาพสมดุลของธาตุอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมซิลิไซด์ อะลูมิเนียมผสมนี้เกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่ 13% แมกนีเซียมซิลิไซด์ที่อุณหภูมิ 595°C ดังนั้นได้เส้นอุณหภูมิ 595°C หรือ อุณหภูมิยูเทคติก จะมีของแข็งสองชนิดคือ อะลูมิเนียม (Al) กับ แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg₂Si) และแมกนีเซียมซิลิไซด์นี้สามารถละลายได้ในอะลูมิเนียมสูงสุดที่ 1.85% ที่อุณหภูมิ 595°C สมบัติของ อะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียมหล่อผสมนี้เป็นอะลูมิเนียมหล่อผสมที่สามารถผ่านกระบวนการทางความร้อน

เพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยผสมแมกนีเซียมเพื่อทำให้เกิดแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) สามารถใช้กับงานหล่อได้ทั้งแบบทรายและแบบโลหะได้ดี สามารถนำมากลึง กัด ตัด เจาะ และเชื่อมประสานได้ง่าย เหมาะกับชิ้นงานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อน ประณีต และสามารถชุบผิวหรือ Anodizing ได้สวยงาม ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

โครงสร้างของอะลูมิเนียมเกรด 356.0 ขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิคอนซึ่งประมาณ 7% จัดอยู่ในประเภทไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) คือ อยู่ในช่วง 1.65-11.6 %Si โครงสร้างทางจุลภาคจะประกอบด้วย Primary aluminum ในลักษณะของเดนไดรต์และยูเทคติกซิลิคอนที่มีลักษณะที่เป็นรูปเข็มเล็กๆแทรกสลับกันที่แยกตัวออกมาอยู่ระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic "divorced" eutectic Si) ในระหว่างกระบวนการแข็งตัว (Solidification process) หากมีธาตุผสมอื่นอยู่ด้วย เช่น Fe หรือ Mg จะเกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า Bladelike หรืออาจเกิดเป็นโครงสร้างที่คล้ายอักษรจีนที่เรียกว่า Chinese Script และ Mg_2Si เป็นต้น โดยทั่วไป Al-Si ไฮโปยูเทคติกมีช่วงการแข็งตัวที่กว้างทำให้เกิดโพรงหดตัว (Shrinkage pores) กระจายตัวอยู่ทั่วไประหว่างเดนไดรต์



A) โครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 100x



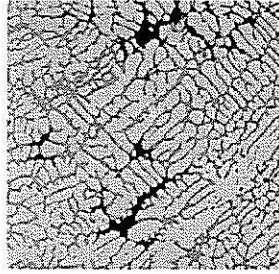
B) โครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 250x

รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 356

ปัจจัยหลักซึ่งควบคุมสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติก คือ

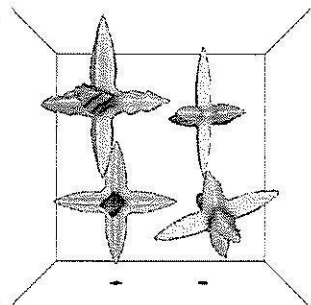
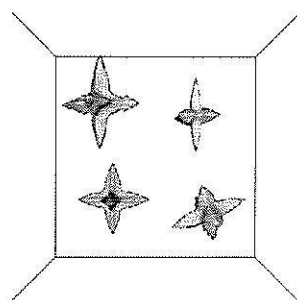
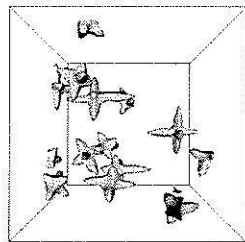
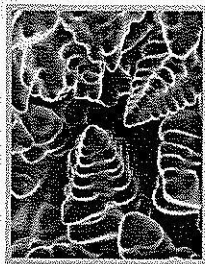
- ระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (DAS , Secondary Dendrite Arms Spacing)
- ขนาดและรูปร่างของเกรน (Grain size and shape)

ระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์หรือ DAS มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมมากกว่าขนาดเกรน ซึ่งนอกจาก DAS จะเป็นตัวกำหนดความละเอียดของโครงสร้างทางจุลภาคแล้ว ยังเป็นตัวกำหนดการกระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งอยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ (Interdendritic intermetallic constituent) และการกระจายตัวของโพรงหดตัวระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic shrinkage) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เมื่อโครงสร้างมีขนาด DAS ที่เล็กจึงหมายถึงโครงสร้างมีความสม่ำเสมอมากขึ้นด้วย



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงโพรงหดตัวระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic shrinkage)

ขนาดของ DAS ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการแข็งตัว ณ ตำแหน่งนั้น (Local freezing time) ในบริเวณที่บางหรือในบริเวณที่มีคุณสมบัตินำความร้อนที่ดี หรืออาจเกิดจากการใช้ท่อนเย็น (Chill) และการเย็นตัวในแบบพิมพ์โลหะ (Permanent mold) จะให้อัตราการเย็นตัวสูง ส่งผลให้เดนไดรต์ปฐมภูมิ (Primary dendrite) โดยอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดแขนเดนไดรต์ด้านข้าง (ทุติยภูมิ) ถึขึ้นส่งผลให้ระยะห่างระหว่างแขนของเดนไดรต์ทุติยภูมิ (DAS) สั้นลง การที่ DAS มีขนาดเล็กนั้น จะส่งผลให้ส่วนประกอบในเฟสยูเทคติกที่แยกตัวออกมา (เช่น Si, Mg_2Si , $CuAl_2$) ซึ่งแข็งตัวภายในช่องว่างระหว่างแขนเดนไดรต์มีลักษณะที่ละเอียดขึ้น โพรงหดตัวระหว่างเดนไดรต์มีขนาดเล็กกระจายตัวทั่วไป รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพการเกิดเดนไดรต์ระหว่างกระบวนการแข็งตัว ขนาดของ DAS มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสมไฮโดรเจน (Al-H) DAS ที่ละเอียดจะทำให้โลหะผสมมีค่าการยืดตัว (Ductility) ที่สูงขึ้น และให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าความแกร่ง (Toughness) ดีขึ้น



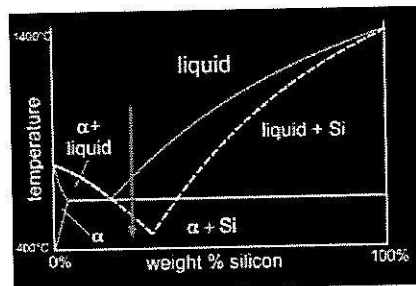
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการเกิดและโครงสร้างของเดนไดรต์

เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการต่างๆ ดังนี้คือ

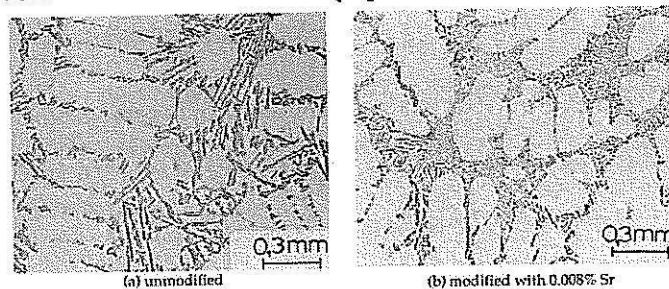
- การปรับปรุงโครงสร้าง (Modification) ของเฟสยูเทคติก
- การปรับเกรนละเอียด (Grain refinement) ของเฟสอะลูมิเนียมปฐมภูมิ
- การกำจัดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen degassing)
- การกำจัดสิ่งแปลกปลอมในน้ำโลหะโดยใช้ฟลักซ์ (Flux treatment)

3.3 การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค (Modification)

การทำ Modification นี้สามารถทำได้ทั้งในแบบทรายหรือแบบหล่อโลหะ โดยการเติมธาตุโซเดียม (Na) หรือ สตรอนเทียม (Sr) ในปริมาณเล็กน้อย (0.01%-0.015%Na) ในน้ำโลหะก่อนการเทลงแบบหล่อ การทำเช่นนี้ทำให้จุดยูเทคติกเคลื่อนจาก 11.7% Si เป็น 13%Si โดยประมาณ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดซิลิคอนปฐมภูมิ (Primary Si) และทำให้เกิดเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีความละเอียดขึ้น อย่างไรก็ตาม การตัดแปลงโครงสร้างด้วยธาตุโซเดียม สตรอนเทียม พลวง และแคลเซียม ล้วนให้ประสิทธิผลในการตัดแปลงโครงสร้างเฟสยูเทคติกซิลิคอน ธาตุที่นำมาเติมสามารถอยู่ในรูปของโลหะ ในรูปของ Master alloy หรือในรูปของฟลักซ์ การทำเติมโซเดียมที่นิยมปฏิบัติทั่วไปมักใช้โลหะโซเดียมหรือเกลือโซเดียม ซึ่งโดยปกติจะได้โครงสร้างที่มีความละเอียดสูง และน้ำโลหะที่ผ่านการตัดแปลงโครงสร้างจะถูกพักเป็นเวลาประมาณ 10-15 นาที ถึงแม้ว่า อินก๊อตที่ผ่านการทำพริทเมนต์ด้วยธาตุสตรอนเทียมจะสามารถนำมาใช้ได้ก็ตาม แต่ในโรงหล่อหลายแห่งนิยมที่จะใช้โซเดียมในการทำให้โครงสร้างมีความละเอียด เนื่องจากโครงสร้างที่ผ่านการทำโครงสร้างละเอียดด้วยสตรอนเทียม สามารถนำมาซึ่งปัญหาโพรงหดตัวได้ อย่างไรก็ตาม ยังพบปัญหาบางประการในการเติมโซเดียมหรือเกลือโซเดียมเพื่อการตัดแปลงโครงสร้าง เช่น การจางหายของโซเดียมอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดควันมาก ซึ่งถือเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งทำให้เบ้าหลอมเกิดความเสียหายและอาจเกิดการจับตัวกับก๊าซไฮโดรเจนอีกด้วยด้วยการทำ Modification จะทำให้จุดยูเทคติกเลื่อนไปทางขวามือและต่ำลงเล็กน้อย (รูปที่ 3.6) ทำให้ลดโอกาสการเกิดยูเทคติกซิลิคอนซึ่งเป็นโครงสร้างเข็มแหลม (Needle-like structure) เปลี่ยนเป็นโครงสร้างละเอียด (Fibrous structure) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น



รูปที่ 3.6 ภาพแสดงการเลื่อนของจุดยูเทคติกเมื่อเติมโซเดียม



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงการปรับปรุงโครงสร้างในอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ 100x ^[12]

3.4 การปรับเกรนละเอียด (Grain refinement)

เนื่องจาก DAS มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมมากกว่าขนาดเกรน เพราะ DAS เป็นตัวกำหนดการกระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะซึ่งอยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ (Interdendritic intermetallic constituent) และการกระจายตัวของโพรงระหว่างเดนไดรต์ (interdendritic shrinkage) ขนาดของ DAS ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวระหว่างการแข็งตัว ในบริเวณที่บางหรือในแบบหล่อที่มีคุณสมบัตินำความร้อนที่ดี จะทำให้อัตราการเย็นตัวสูงส่งผลให้ เดนไดรต์ปฐมภูมิโตรวดเร็วและทำให้เกิดเดนไดรต์ด้านข้าง (ทุติยภูมิ) ที่ขึ้นส่งผลให้ระยะห่างระหว่างแขนของเดนไดรต์ทุติยภูมิสั้นลง และการที่ DAS มีขนาดเล็กส่งผลให้

- ส่วนประกอบในเฟสยูเทคติกที่แยกตัวออกมา เช่น $\text{Si, Mg}_2\text{Si}$ ซึ่งแข็งตัวภายในช่องว่างระหว่างเดนไดรต์มีลักษณะที่ละเอียดขึ้น
- โพรงหดตัวระหว่างเดนไดรต์มีขนาดเล็กลงและกระจายตัวอยู่ทั่วไป
- ขนาดของ DAS มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติเชิงกลอะลูมิเนียมไฮโปยูเทคติก DAS ที่ละเอียดจะทำให้โลหะผสมมีค่าการยึดตัวที่สูงขึ้นและทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าความเหนียวดีขึ้น (Toughness)

และการที่ขนาดของเกรนละเอียดขึ้นส่งผลให้ ช่วยต้านทานการเกิดรอยแตกขณะร้อน (Hot tearing) ลดการเกิดและปรับการกระจายของโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) เพิ่มความสามารถในการรับแรงดัน (Pressure tightness) การปรับเกรนให้ละเอียด เป็นการทำให้เดนไดรต์มีขนาดเล็กลงและมีปริมาณมากขึ้นโดยทำให้เกิดจำนวนนิวเคลียสที่มากขึ้นในโลหะเหลว โดยการเติมสารเพิ่มความละเอียดของเกรน (Grain refiner) ในการปรับปรุงคุณภาพโดยการทำให้เกรนละเอียด สามารถทำได้ด้วยการเติมไทเทเนียม (Ti) และ โบรอน (B) ที่อยู่ในรูปเม็ดหรือฟลักซ์ โดยสามารถเติมในอะลูมิเนียมได้มากถึง 0.15% หรือการใช้ Master alloy

3.5 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen degassing) ^[1, 11-12]

ดังที่กล่าวแล้วว่า อะลูมิเนียมสามารถให้ไฮโดรเจนละลายได้ดีมากในสภาวะหลอมเหลว และจะถูกขับออกมาในรูปแบบของฟองก๊าซเมื่อขึ้นงานหล่อเริ่มเย็นตัวลง เหลือเป็นรูพรุนค้างอยู่ในชิ้นงานหล่อเป็นผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลงอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการกำจัดก๊าซ สำหรับการกำจัดก๊าซโดยการใช้ก๊าซหรือสารผสมของก๊าซเฉื่อย เช่น Argon, Chlorine หรือ Nitrogen นั้น ไม่ว่าจะเป็วิธีใดก็ตามต่างก็ใช้การทำให้เกิดฟองก๊าซภายในน้ำโลหะด้วยกันทั้งนั้น โดยก๊าซที่เกิดขึ้นนั้น จะอยู่ในรูปของฟองก๊าซเฉื่อย ซึ่งภายในฟองอากาศนี้มีไฮโดรเจนอยู่น้อยมาก ดังนั้นไฮโดรเจนพยายามที่จะหาสถานะสมดุล จึงพยายามที่จะแทรกเข้าไปในฟองก๊าซเฉื่อย และถูกพาลอยขึ้นมาที่ผิวของโลหะพร้อมกับฟองก๊าซเฉื่อย ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งในฟองก๊าซเฉื่อย

นี้อาจทำได้โดยการจุ่มหัวก๊าซผ่านท่อ (Lance) ลงในน้ำโลหะ หรือผ่านหัวปั่น (Rotary) เป็นต้น สำหรับการใส่หัวพ่นก๊าซนั้นถ้าหากใช้ท่อปลายเปิดธรรมดา จะทำให้เกิดฟองที่มีขนาดใหญ่ เช่นเดียวกับฟองก๊าซที่เกิดจากการจุ่มเม็ดเซกซาคลอร์โอรีเทนซึ่งจากการค้นคว้าทดลองพบว่า

- การกำจัดก๊าซที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ถ้าฟองก๊าซมีขนาดเล็ก
- การกำจัดก๊าซโดยการทำให้เกิดฟองก๊าซที่ใหญ่เป็นวิธีที่ไม่มีประสิทธิภาพและยังทำให้เกิดการกระเซ็นของน้ำโลหะหรือการออกซิเดชัน โดยไม่เกิดการกำจัดก๊าซขึ้น
- การกำจัดก๊าซจะมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิต่ำ เวลาที่ใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ณ อุณหภูมิที่สูงขึ้นกว่าเดิม 60°C

สำหรับไฮโดรเจนที่ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมนั้นจะพบว่า สามารถละลายได้ดีในน้ำ โลหะ ซึ่งเกิดอัตราการละลายของไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 660°C เป็นต้นไปและเมื่อน้ำโลหะเย็นตัวลงไฮโดรเจนที่ละลายอยู่เหล่านี้ก็จะแยกตัวออกมา และทำให้เกิดรูพรุนซึ่งทำให้งานที่ได้เสีย ไฮโดรเจนส่วนใหญ่ได้มาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง อะลูมิเนียมกับน้ำโดยเกิดเป็นไฮโดรเจนและอะลูมิเนียมออกไซด์ตามสมการดังนี้



ไฮโดรเจนที่ทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะจะมาจากแหล่งต่างๆ คือ ความชื้นในอากาศ การเผาไหม้ของก๊าซหรือเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหลอมและอุ่นน้ำโลหะ ความชื้นจากวัตถุดิบที่ใช้หลอม ออกไซด์จากวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอม สารเคลือบที่ใช้เคลือบอุปกรณ์ที่ไม่แห้งสนิทพอ ความชื้นจากฟลักซ์ที่ใช้ ซึ่งในกระบวนการหล่อควรมีมาตรการป้องกันที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการสะสมของความชื้น

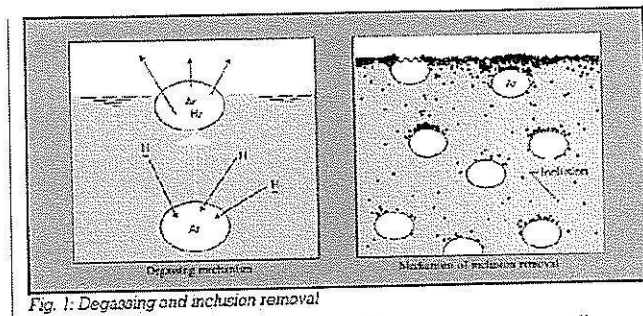


Fig. 1. Degassing and inclusion removal

รูปที่ 3.8 การแพร่ของไฮโดรเจนเข้าสู่ฟองก๊าซเฉื่อยและถูกพาลอยขึ้นสู่ผิวหน้า^[5]

3.6 การกำจัดสิ่งแปลกปลอมในน้ำอะลูมิเนียมโดยใช้ฟลักซ์

เนื่องจากอะลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี อีกทั้งในกระบวนการหล่อโลหะยังทำให้เกิดการปั่นป่วนของน้ำโลหะได้ง่าย จึงทำให้เกิดฟิล์มของออกไซด์ได้ง่าย ซึ่งหากฟิล์มเหล่านี้ไม่ถูกกำจัดออกไปจะหลงเหลือเป็น Inclusion ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ ดังนั้นในกระบวนการหล่อโลหะ

อะลูมิเนียม จึงต้องมีกระบวนการทำความสะอาดน้ำโลหะโดยใช้ฟลักซ์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้กำจัดสิ่งสกปรกแปลกปลอมอื่นๆ ที่เป็นผลเสียต่อสมบัติของชิ้นงานหล่ออีกด้วย แหล่งที่มาของฟิล์มออกไซด์และสิ่งปนเปื้อน ได้แก่ วัตถุดิบที่นำมาหลอมโดยเฉพาะ Scrap และอินกอตที่ไม่มีคุณภาพ การไหลปั่นป่วนที่เกิดขึ้นขณะเตรียมโลหะเหลว ขณะขนย้าย และขณะเทโลหะเหลวลงแบบหล่อ การเติม ฟลักซ์ (Flux) และการปรับสภาพโครงสร้างที่ไม่ถูกต้อง (Grain Refining Treatment) การกัดเซาะ (Erosion) ของผนังทนไฟ (Refractory) และการกัดเซาะของผนังแบบแบบหล่อ

ฟิล์มออกไซด์ ฟองอากาศ (Bubble Trails) และสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในเนื้อโลหะนั้น นอกจากเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักแบบล้าในระหว่างใช้งานแล้ว ยังเป็นจุดของการเกิด โพรงก๊าซได้อีก เนื่องจากไฮโดรเจนสามารถแพร่เข้าสู่โพรงอากาศที่อยู่รอบๆหรือเหนือฟิล์มได้ และยังเป็นตัวสนับสนุนทำให้เกิด โพรงหดตัวระดับจุลภาคได้ (Micro Shrinkage Porosity) ส่วนผลกระทบอื่นๆ เช่น ลดความสามารถในการไหลของโลหะหลอมเหลว (Fluidity) ลด Pressure tightness ของชิ้นงาน เนื่องการเกิด Micro Porosity ต้องมีการเชื่อมเพื่อซ่อม หรือทำให้เนื้อแน่นขึ้น ลดความสามารถในการกลึง (Machinability) เนื่องจากเกิดจุดแข็ง ลดความเหนียวของวัสดุ ลดความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน และผิวงานที่ได้ไม่เหมาะในการทำ Anodizing

ในกระบวนการ Flux treatment สามารถทำได้ด้วยแรงงานคน ซึ่งจะรวมถึงกระบวนการกำจัดก๊าซ การดัดแปลงโครงสร้าง การตัดชีโลหะ และการทำความสะอาดน้ำโลหะด้วยแรงงานคน ซึ่งไม่เพียงแต่เป็นงานที่หนักเท่านั้น แต่ยังให้ประสิทธิผลที่ไม่สม่ำเสมอ เพราะประสิทธิภาพของการทำทรีทเมนต์จะขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ปฏิบัติการหลอมเป็นหลัก ซึ่งในกระบวนการ Flux treatment สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ^[1, 2, 4]

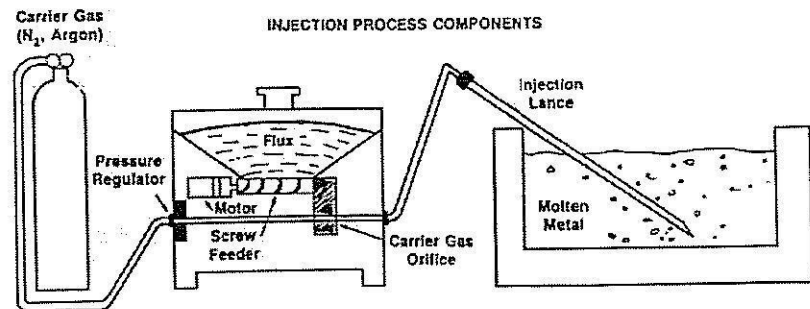
- ฟลักซ์ปกคลุมผิวหน้า (Covering fluxes) ทำหน้าที่ปกคลุมผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมเหลวไว้เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดออกไซด์และการละลายของก๊าซไฮโดรเจน ได้แก่คลอไรด์ของโซเดียมและโปแตสเซียมจะมีจุดหลอมเหลว 658°C
- ฟลักซ์ทำความสะอาด (Cleaning fluxes) ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกไซด์ และช่วยให้ออกไซด์และสิ่งเจือปนอื่นถูกจับติดกับฟลักซ์ทำให้สามารถกำจัดออกไซด์และกวาดสแลกออกได้ง่าย ฟลักซ์นี้ประกอบด้วยเกลือของโซเดียมและโปแตสเซียม แต่จะผสมฟลูออไรด์ของโซเดียม
- ฟลักซ์ลดการสูญเสียอะลูมิเนียมที่ติดไปกับออกไซด์ (Drossing off fluxes) ทำหน้าที่ลดการสูญเสียอะลูมิเนียม โดยฟลักซ์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาความร้อน ทำให้เม็ดอะลูมิเนียมรวมเป็นหยดและตกกลับ ไปรวมกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวในเบ้าหลอม ทำให้ลดการสูญเสียโลหะอะลูมิเนียมไปกับฟลักซ์ ฟลักซ์นี้จะผสม โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) หรือไนเตรด (Na_2NO_3)

ส่วนการทำ Flux treatment ด้วยอุปกรณ์เครื่องมือ สามารถแบ่งออกเป็น

- การฉีดพ่นฟลักซ์ (Flux Injection)
- การกำจัดก๊าซร่วมกับการทำความสะอาดด้วยฟลักซ์ (Rotary Flux Injection)

3.6.1 การกำจัดก๊าซแบบ Lance flux injection

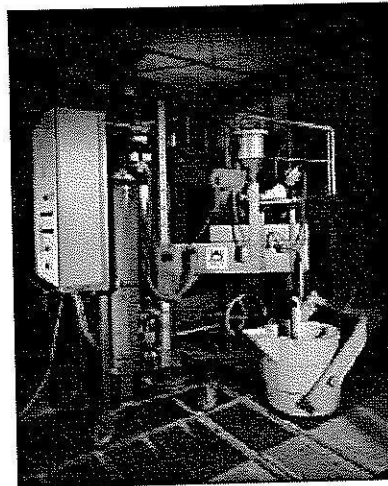
เป็นการพ่นผงฟลักซ์ตามด้วยก๊าซเฉื่อยตามไปด้วย โดยพ่นไปที่ผิวโลหะหลอมเหลวสารที่ไวต่อปฏิกิริยาในการใส่ฟลักซ์จะกำจัดและลดความชื้นจากออกไซด์ และออกไซด์จะลอยขึ้นมาที่ผิวของน้ำโลหะ เนื่องจากแห้งและกลายเป็น Dross หรือขยะที่ตักออกที่ง่าย



รูปที่ 3.9 ภาพจำลองการเป่าก๊าซ Argon + ผงฟลักซ์เข้าไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว

3.6.2 การกำจัดก๊าซแบบ Rotary flux injection

กระบวนการกำจัดก๊าซแบบ Rotary flux injection^[5] เป็นการผสมผสานการทำความสะอาดน้ำโลหะและกำจัดก๊าซในเวลาเดียวกัน เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ ลดระยะเวลาการทำงาน



รูปที่ 3.10 การกำจัดก๊าซร่วมกับการทำ Flux treatment

ออกไซด์ในอะลูมิเนียมผสมมีความหนาแน่นเท่ากับอะลูมิเนียมหลอมเหลว ดังนั้นออกไซด์จึงไม่แยกตัวและลอยขึ้นมายังผิวหน้า การโรยฟลักซ์และการตักขี้โลหะออกด้วยมือ โดยการกวนลงในเตาหลอม สามารถทำให้ออกไซด์ที่อยู่ภายในถูกกำจัดออกได้ แต่จะมีประสิทธิภาพเพียงใดขึ้นอยู่กับทักษะ และความชำนาญของผู้ปฏิบัติการเป็นหลัก จึงมีการพัฒนากระบวนการฉีดฟลักซ์หลาย

รูปแบบ เพื่อเพิ่มความแน่นอนในการเตรียมน้ำโลหะให้มีคุณภาพดี โดยกระบวนการฉีดฟลักซ์อาจรวมการกำจัดก๊าซ การทำความสะอาด และการกำจัดเอาสารมลทินได้ภายในขั้นตอนเดียวกัน โดยทั่วไปใช้ฟลักซ์ปริมาณ 0.2% ของน้ำหนักโลหะที่เราต้องการ และเวลาที่ใช้ในการทรีทเมนต์อยู่ที่ประมาณ 10 นาที

การปรุงแต่งน้ำโลหะหรือการขจัดสารบางตัวออกไปสามารถทำได้ ด้วยการใช้ฟลักซ์ชนิดต่างๆกันซึ่งการกำจัดก๊าซด้วยวิธี Flux injection เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่มีการผสมกันอย่างแนบแน่นระหว่างฟลักซ์ก๊าซ และโลหะภายในน้ำโลหะที่กำลังหลอมเหลวและใช้ฟลักซ์น้อยกว่าวิธีการเดิมมากถึง 25 % การป้อนหรือพ่นฟลักซ์ด้วยวิธีนี้จึงเป็นการลดหรือควบคุมภาวะมลพิษให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ในฟองอากาศยิ่งเล็กจะดึงผิวหน้าสิ่งสกปรกออกมา โดยสะสมออกไซด์ฟิล์มลอยตัวขึ้นมาที่ผิวหน้าของน้ำโลหะฟิล์มที่เกาะกันแน่นก็ยังคงเหมือนผสมอยู่กับน้ำโลหะ และจะต้องทำการลดความชื้นด้วยฟลักซ์ หรือทำให้เกิด Dross ที่แห้งเพื่อจะกวาดออกทิ้งได้ง่าย

โดยทั่วไปเรามักใช้ฟลักซ์เคมีในการขจัดออกไซด์ออกจากผิวหน้าของโลหะ โดยฟลักซ์ที่ใส่เข้าไปจะทำให้เกิดออกไซด์ที่เกิดขึ้นแห้งตัวลง เพื่อให้อะลูมิเนียมที่ปนอยู่ในออกไซด์แยกตัวออกมา และง่ายต่อการตัดออกไซด์ออกจากโลหะ นอกจากนี้ ยังช่วยทำให้ออกไซด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำโลหะลอยตัวขึ้นมาที่ผิวหน้าด้วย คุณสมบัติของ Fluxes ต้องประกอบด้วย

- ไม่หลอมเหลวรวมกับอะลูมิเนียม
- มีความหนืดต่ำ
- สามารถขจัดโลหะและสารประกอบแปลกปลอมได้ที่อุณหภูมิหลอมเหลวของ อะลูมิเนียม
- ที่อุณหภูมิหลอมปกติต้องมีการระเหยตัวต่ำ (Low Vapour Pressure)
- ต้องมีฟลักซ์น้ำหนักตัวเพียงพอที่จะแยกตัวออกจากอะลูมิเนียม เพื่อผลในการแยกฟลักซ์ออกจากน้ำโลหะ
- ไม่มีปฏิกิริยาต่อต้านกับวัสดุทนไฟที่ใช้ Lining เตาหลอม

ฟลักซ์เคมี (Chemical fluxes) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ^[4]

ประเภทที่ 1 คือ เป็นฟลักซ์ที่ใช้คลุมผิวหน้าน้ำโลหะเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันและ Hydrogen pickup

ประเภทที่ 2 คือ พวกคลอไรด์และฟลูออไรด์ ทำหน้าที่ขจัดออกไซด์หรือสิ่งสกปรกออกจากน้ำโลหะ ทำความสะอาดน้ำโลหะและแยกเนื้อโลหะอะลูมิเนียมออกจากสิ่งสกปรก (Dross)

ฟลักซ์โดยทั่วไปนั้นอยู่ในรูปแบบของส่วนผสมของ NaCl (โซเดียมคลอไรด์) และ KCl (โพแทสเซียมคลอไรด์) และมักมีฟลูออไรด์ต่างๆเช่น CaF₂ (แคลเซียมฟลูออไรด์) เพิ่มเติมลงไปด้วย เพื่อขจัดอะลูมิเนียมออกไซด์ลอยบนผิวหน้า โดยทั่วไป เรามักใช้ฟลักซ์จุ่มและแกว่งคนไปทั่วๆ ใน

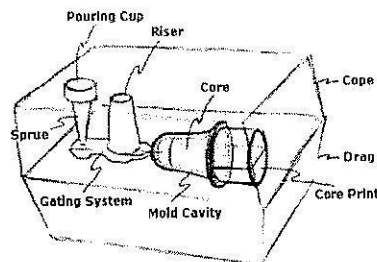
น้ำโลหะซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ได้ประสิทธิภาพที่สิ้นนัก การใช้ฟลักซ์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีทำได้โดยการใช้เครื่องฉีด ฟลักซ์ ซึ่งใช้การฉีดฟลักซ์ในปริมาณไม่มากนักลงไปใต้ผิวหน้าโลหะ ด้วยท่อฉีดโดยอาศัยก๊าซไนโตรเจนหรืออาร์กอนเป็นตัวช่วยพาลงไป

3.7 เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียม (Aluminium Casting Technology)

การหล่ออะลูมิเนียมในปัจจุบันได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีหลายกระบวนการที่แตกต่างกันไป ดังนี้คือ ^[12]

3.7.1 การหล่อด้วยแบบทราย (Sand casting)

โลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อส่วนใหญ่จะมีช่วงการแข็งตัวยาว และมีอัตราการหดตัวสูง จะใช้ระบบทางวิ่งที่มีขนาดโตเพื่อทำหน้าที่จ่ายน้ำโลหะด้วยในตัว และทำหน้าที่แยกพวก Inclusion หรือ Dross ก่อนที่ผ่านไปยังทางเข้าโพรงแบบ บางกรณีอาจใช้ตัวกรองในระบบทางเข้าและต้องพยายามไม่ให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะและควรเสริมให้มีการแข็งตัวอย่างมีทิศทางให้เป็นไปได้มากที่สุด โรเซอร์ต้องมีขนาดโตเพียงพอที่จะจ่ายน้ำโลหะไปยังตำแหน่งที่จะเกิดการหดตัวสุดท้าย ซึ่งเป็นส่วนที่มีความหนามากที่สุดของงานหล่อ การกำหนดขนาดของโรเซอร์อาศัยหลักการเย็นตัวของโรเซอร์มีค่ามากกว่ามอดูลัสการเย็นตัวของงานหล่อ การใช้ผงความร้อน (Exothermic) หรือปลอกโรเซอร์ (Exothermic sleeve) ช่วยให้โรเซอร์ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และอาจลดขนาดโรเซอร์ให้เล็กลง

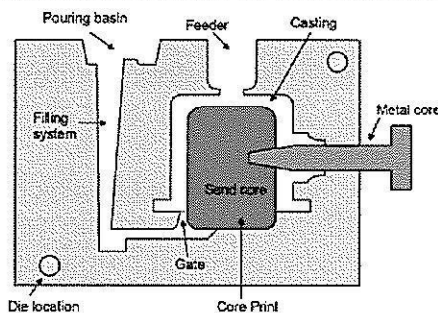


รูปที่ 3.11 ภาพจำลองแบบหล่อทราย

3.7.2 การหล่อด้วยแบบโลหะ (Permanent mold casting)

โลหะที่ใช้เป็นแบบหล่อโดยส่วนใหญ่เป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติต้านทานการแตกร้าว ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว บางกรณีอาจใช้เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม หรือโลหะผสมทองแดงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพิเศษที่ต้องการ ในการออกแบบระบบการหล่อก็มีลักษณะเหมือนกับแบบหล่อทั่วไป คือ ตัวแบบหล่อจะต้องมีสองส่วน โดยทำให้เกิดช่องว่างที่เป็นระบบรูเท (Sprue) ทางวิ่ง (Gates or Runner) รูสัน นำแบบหล่อทั้งสองมาประกบกันยึดติดด้วยอุปกรณ์ช่วยยึดให้แน่น และมีระบบแยกส่วนของแบบหล่อ ภายหลังจากเทโลหะหลอมเหลวลงแบบแล้ว เพื่อความสะดวกในการทำงานให้เกิดความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพที่แน่นอน

ในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นเนื่องจากการเย็นตัวโลหะภายในแบบอยู่ในเกณฑ์สูง การออกแบบจำเป็นต้องวางระบบทางวิ่งของโลหะให้มีการไหลวนน้อยที่สุด เพื่อป้องกันการดูดอากาศของโลหะในขณะไหลเข้าสู่แบบหล่อ การควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal gradient) ของโลหะภายหลังเมื่อไหลเข้าเต็มแบบ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการแข็งตัวของโลหะจะเริ่มจากส่วนที่บางที่สุดไปยังส่วนที่หนาและต่อไปยังไรเซอร์ เป็นไปในลักษณะที่มีทิศทาง โดยทางปฏิบัติแล้วส่วนที่หนาหรือส่วนที่มีปริมาตรมากที่สุดจะต้องอยู่ติดกับไรเซอร์ เพื่อให้โลหะในไรเซอร์ไหลเข้าไปชดเชยส่วนที่มีการหดตัวมากที่สุดของชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานมีเนื้อแน่น ปราศจากรูหรือโพรงหดตัว ทั้งรูเท ทางวิ่ง และไรเซอร์จะต้องออกแบบให้อยู่แนวเดียวกับรอยแยก (Parting Surface) ของแบบหล่อเพื่อให้สามารถแกะออกจากแบบหล่อได้พร้อมกันกับชิ้นงานหล่อ การหดตัวของโลหะภายในแบบหล่อถ้ามีส่วนของแบบหล่อไปขวางการหดตัว จะทำให้โลหะขณะเกิดการหดตัวเกิดความเครียดขึ้นตามบริเวณต่างๆอันทำให้เกิดการแตกร้าว การระบายไอออกจากแบบหล่อต้องวางระบบให้อากาศมีการหนีออกได้สะดวก เพราะถ้าอากาศออกไม่ได้จะเกิดความดันขึ้น และด้านการไหลเข้าแบบหล่อของโลหะหรืออาจรวมตัวกับโลหะขณะหลอมเหลวทำให้ชิ้นงานหลอมมีฟองอากาศ



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของแบบหล่อโลหะ

3.7.3 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)

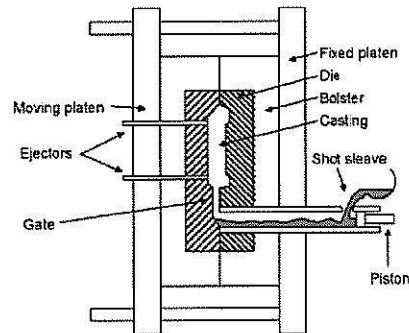
กรรมวิธีแบบนี้คือเพิ่มอุณหภูมิให้อะลูมิเนียมหลอมเหลว แล้วทำการฉีดอะลูมิเนียมหลอมเหลวเข้าสู่แบบแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเป็นโลหะในลักษณะแนวอนด้วยความดันสูง ส่วนมากจะเกิน 10 บาร์ ฉะนั้น การหล่อแบบนี้จึงจำเป็นต้องออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความแข็งแรงและทนต่อความดันสูง มีระบบกลไกภายในแม่พิมพ์ที่ยู่ยากพอสมควรลักษณะใกล้เคียงกับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.13 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)

กรรมวิธีแบบนี้เช่นเดียวกับการฉีดด้วยความดันต่ำเพียงแต่เพิ่มความดันให้สูงขึ้นอีก หรืออาจใช้โดยวิธีการดูดอะลูมิเนียมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะการหล่อโดยให้แรงดันแบบ Cold chamber die casting

3.7.4 การหล่อแบบ Cosworth

การหล่อแบบ Cosworth เป็นกระบวนการแรกที่มีการออกแบบการหล่อให้สมบูรณ์แบบและเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง เป็นวิธีการหล่อแบบทรายที่ได้ขนาดของชิ้นงานที่แน่นอน ชิ้นงานแข็งแรงโดยการเริ่มแรกที่ได้พัฒนากระบวนการแบบนี้ เพื่อใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์และอุปกรณ์ เพื่อสำหรับการแข่งขันโดยเฉพาะซึ่งต้องใช้ชิ้นส่วนที่แข็งแรงเป็นพิเศษ กรรมวิธีที่สำคัญของวิธีนี้คือ การใช้ปั๊มแม่เหล็กไฟฟ้าดูดอากาศและควบคุมการไหลขณะที่โลหะหลอมเหลวโดยทั่วไป การหล่ออะลูมิเนียมแบบธรรมดา เมื่อน้ำโลหะหลอมเหลวไหลตัวจะสัมผัสกับอากาศภายนอกทำให้เกิดออกไซด์ ซึ่งจะผสมอยู่ในโครงสร้างภายในโลหะนั้น จึงเป็นผลให้เกิดเป็นจุดบกพร่อง หรือข้อตำหนิของชิ้นงาน (Defect) เมื่อนำชิ้นงานไปใช้งานอาจเกิดทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ อีกทั้งการหล่อแบบ Cosworth จะใช้ก๊าซเฉื่อยปกคลุมป้องกันอากาศภายนอกและออกซิเจนผสมกับน้ำโลหะ เพื่อจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพประโยชน์ที่สำคัญที่สุดสำหรับกรรมวิธีการผลิตวิธีนี้คือ ประมาณมากกว่า 85 % ของผลิตภัณฑ์จะใช้ในการหล่อตัวพิมพ์อักษรและรูปแบบทรงต่างๆ ที่มีความละเอียดสูง ปัจจุบันมีการนำไปใช้ในการหล่อในอัตราการผลิตจำนวนมากแต่ถ้าผลิตน้อยก็ไม่คุ้มค่าในการลงทุนผลิตแม่พิมพ์แบบ Cosworth

บทที่ 3

การสร้างเครื่องมือฉีดฟลักซ์และแม่พิมพ์โลหะ

(The Construction of Flux Injection Unit and Permanent Mold)

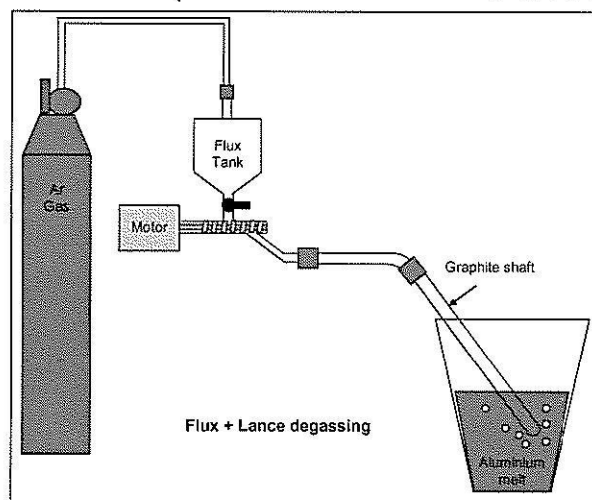
การสร้างเครื่องมือฉีดฟลักซ์สำหรับการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน เริ่มจากการออกแบบและทดลองระบบการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธีต่างๆ เช่นการใช้ระบบ Lance และการใช้ระบบปั่น (Rotary) รวมถึงการทดสอบใช้งานจริงในอากาศ น้ำและในน้ำโลหะ ส่วนการผลิตแม่พิมพ์โลหะจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แม่พิมพ์โลหะที่มีการเทจากด้านบนหล่อเป็นชิ้นงานแท่งกลม และแม่พิมพ์ที่มีระบบการวิ่งของน้ำโลหะจากด้านล่างขึ้นบนเพื่อลดการเกิดความปั่นป่วน (Turbulence) และใช้สำหรับทดสอบแรงดึง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การสร้างเครื่องมือฉีดฟลักซ์

วัตถุประสงค์ของการฉีดฟลักซ์ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อ กำจัดสิ่งสกปรก ทำความสะอาด Dross, กำจัดก๊าซ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของฟลักซ์ที่ใช้ด้วย ซึ่งมีทั้งแบบผง (Powder) และแบบเม็ด (Granular)

3.1.1 เครื่องมือฉีดฟลักซ์ด้วยระบบ Lance degassing

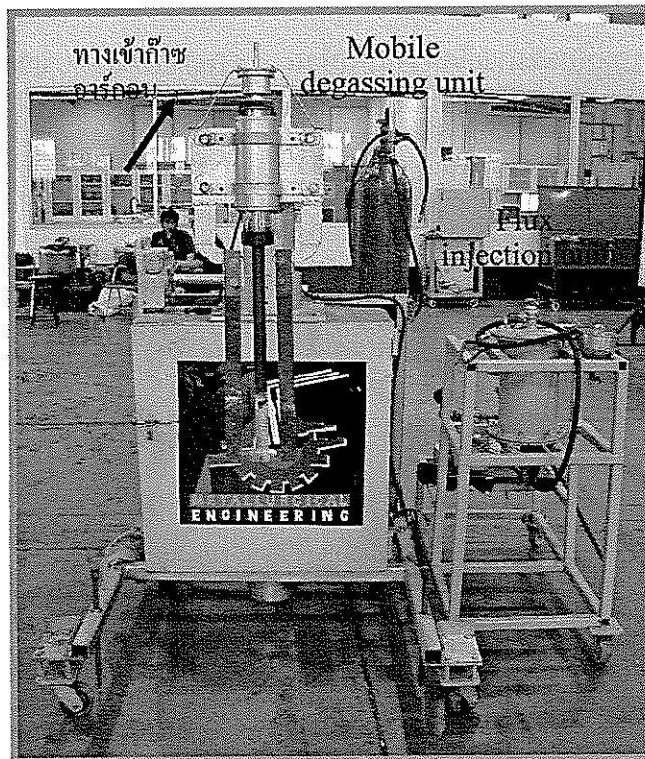
ระบบ Lance degassing จะใช้ก๊าซเฉื่อย (Argon) พาเอาฟลักซ์เคลื่อนที่ผ่านท่อแกรไฟต์ลงไป ยังน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวดังแสดงในรูปที่ 3.1 เชื่อมสแตนเลสเพื่อทำเป็น Flux tank ซึ่งต่อเข้ากับท่อก๊าซอาร์กอนด้านบน และมีการควบคุมปริมาณของฟลักซ์โดยใช้มอเตอร์จับเกลียวโลหะ เพื่อทำการป้อนฟลักซ์ตามอัตราการหมุนของมอเตอร์ แต่จะให้ฟองก๊าซอาร์กอนที่ค่อนข้างหาย



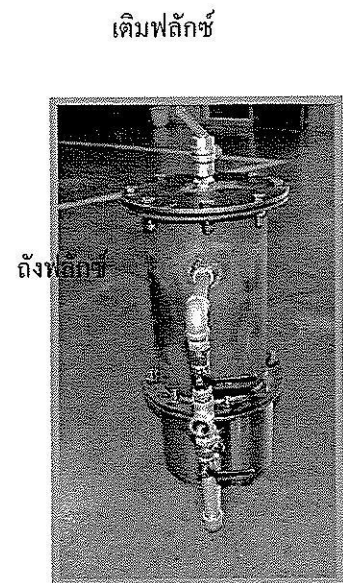
รูปที่ 3.1: เครื่องมือฉีดฟลักซ์ด้วยระบบ Lance degassing

3.1.2 การสร้างเครื่องมือฉีดฟลักซ์ประกอบด้านข้างผ่านระบบ Rotary degassing

ในลำดับต่อมาได้ทำการประยุกต์ใช้เครื่องมือฉีดฟลักซ์กับกระบวนการกำจัดก๊าซด้วยวิธี Rotary degassing ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบทางเข้าของก๊าซและฟลักซ์กับระบบการหมุนของท่อแกรไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ท่อจากถังก๊าซอาร์กอนจะถูกต่อเข้ากับถังฟลักซ์ทั้งบนและล่างซึ่งจะทำให้ความดันข้างในถังฟลักซ์เท่ากัน การเปิดวาล์วที่ด้านปลายของถังฟลักซ์จะทำให้ผงฟลักซ์ไหลลงตามแรงโน้มถ่วงและปริมาณและความเร็วของฟลักซ์ที่ไหลออกมากจะแปรผันกับองศาการเปิดวาล์ว วิธีการนี้จะให้ฟองก๊าซที่เล็กละเอียดมากกว่าวิธีแรกและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนที่ดีกว่า



A) เครื่องมือกำจัดก๊าซ MDU กับ Flux injection unit



B) Flux injection unit

รูปที่ 3.2: เครื่องมือฉีดฟลักซ์ผ่านระบบ Rotary degassing

3.1.3 การสร้างเครื่องมือฉีดฟลักซ์ด้านบนร่วมกับระบบ Rotary degassing

วิธีการฉีดฟลักซ์นี้ได้ปรับปรุงขึ้นจากวิธีการฉีดฟลักซ์ผ่านระบบ Rotary degassing เนื่องจากถังฟลักซ์ที่อยู่ระดับต่ำกว่าหัวจับท่อแกรไฟต์ ทำให้ต้องใช้แรงดันหรืออัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนมากกว่าปกติเพื่อพาเอาฟลักซ์ไหลขึ้นไปด้วย ซึ่งอาจมีผลทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำโลหะมากเมื่อใช้ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนสูงๆ ดังนั้นทางผู้ทดลองจึงได้ปรับเปลี่ยนให้ถัง ฟลักซ์ถูกประกอบติดด้านบนหัวจับแกรไฟต์เพื่อให้เกิดการไหลของฟลักซ์ได้สะดวกขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.3

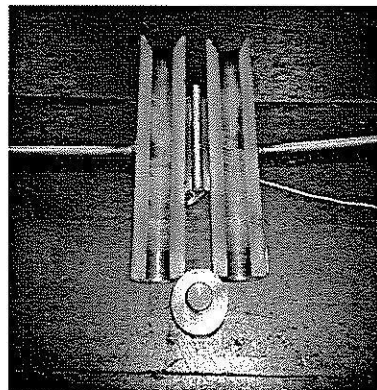
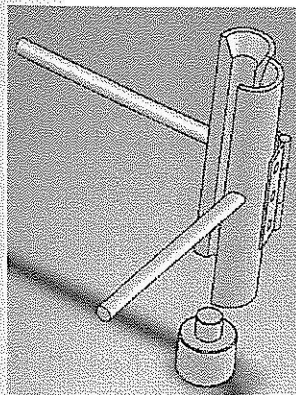


รูปที่ 3.3: เครื่องมือฉีดฟลักซ์ร่วมกับระบบ Rotary degassing

3.2 การสร้าง Permanent mold สำหรับการหล่อชิ้นงานทดสอบ

3.2.1 การสร้างแม่พิมพ์โลหะระบบเทแบบด้านบน

แม่พิมพ์โลหะระบบเทด้านบนทำจากเหล็กเพลวแท่งกลมขนาด 50 cm. ยาว 25 cm ทำการกลึงผิวและคว้านเป็นช่องสำหรับหล่อโลหะด้วยสว่านเบอร์ 23 และคว้านมุมด้านบน 30° เพื่อเป็นรูเทและRiser จากนั้นผ่ากลางชิ้นงานออกเป็น 2 ส่วนด้วยเครื่อง Wire cut เชื่อมแม่พิมพ์ทั้ง 2 ชั้นเข้าด้วยกันโดยใช้บานพับสแตนเลส และประกอบแขนด้วยเหล็กเพลวขาว กลึงฐานรองสำหรับปิดท้ายแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

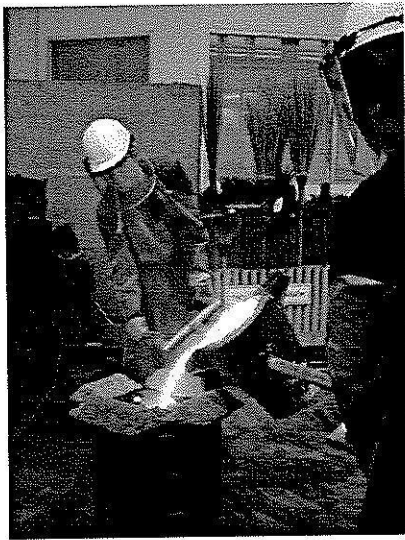


A) การออกแบบแม่พิมพ์โลหะ B) แม่พิมพ์โลหะหล่อด้านบน C) แม่พิมพ์โลหะพร้อมสำหรับงานหล่อ

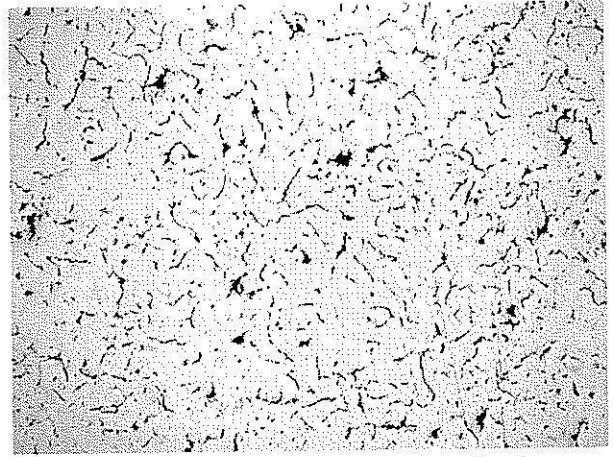
รูปที่ 3.4: แม่พิมพ์โลหะระบบเทแบบด้านบน

3.2.2 การสร้าง Permanent mold ตามมาตรฐาน ASTM 392-B108

สำหรับการหล่อชิ้นงานอะลูมิเนียมใช้นิยามแม่พิมพ์โลหะ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้จัดทำแม่พิมพ์โลหะ (Permanent mold) สำหรับหล่อชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM 392-B108 โดยใช้โปรแกรม AutoCad โดยใช้วัสดุทำแม่พิมพ์ที่ผลิตจากเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอน เนื่องจากเหล็กหล่อชนิดนี้มี Thermal conductivity สูงและมีความแข็งแรงและสามารถหล่อได้เองจากงานวิจัยภายในมหาวิทยาลัยและไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทางความร้อน เหมือนเหล็กเครื่องมือ H13 ซึ่งมีราคาแพงกว่ามาก ชิ้นงานเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอนมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.5 และมีความแข็งที่วัดได้ในสภาพ As-cast ประมาณ 143 HBN



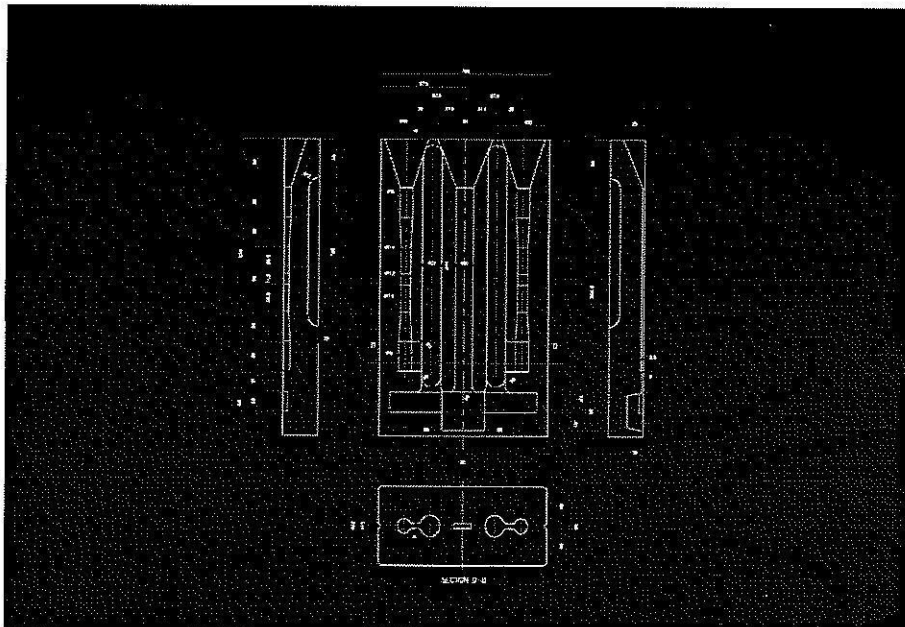
A) การผลิตเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอน



B) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเกรไฟ 50 μm

รูปที่ 3.5: การผลิตเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอนและโครงสร้างจุลภาค

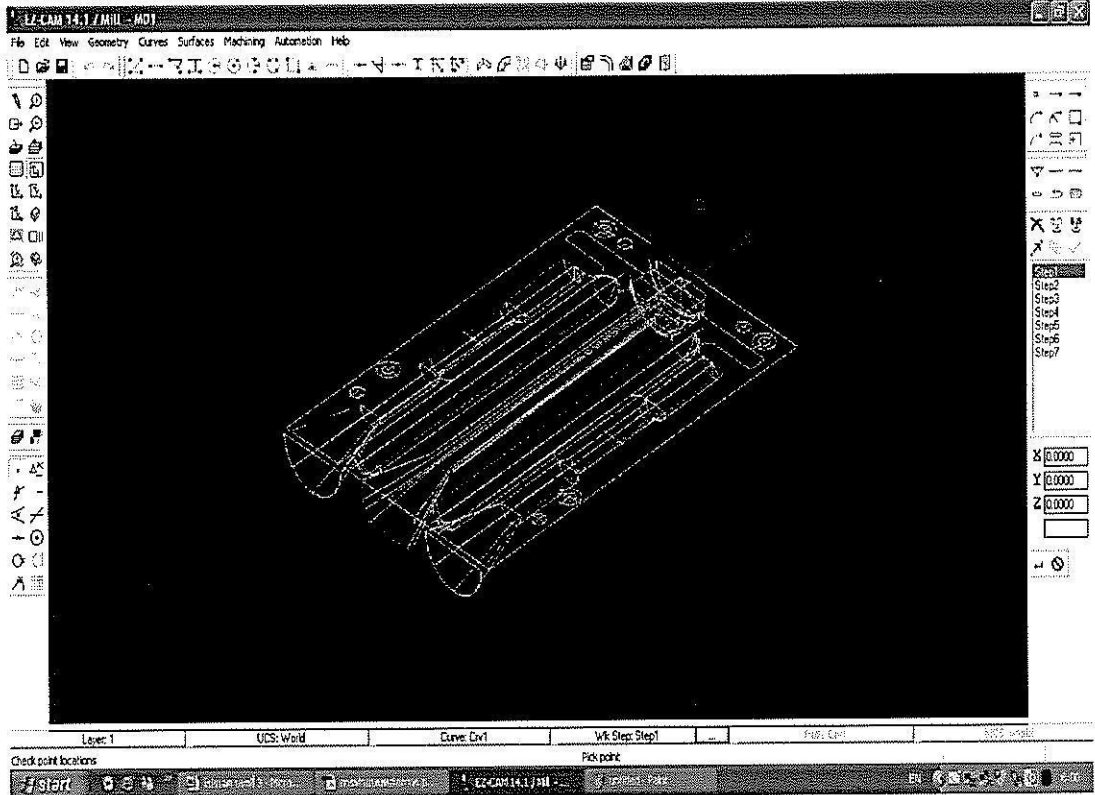
เจียร์ผิวชิ้นงานหล่อเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอนขนาด $195 \times 295 \times 40 \text{ mm}^3$ จำนวน 2 ชิ้นเพื่อเตรียมสำหรับการกัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง CNC Machining Center โดยเริ่มจากการเขียนแบบชิ้นงานจาก AutoCad 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.6-3.7 เพื่อนำมาเขียนเป็น EZ-CAM14 มีหน้าที่เป็นตัวส่งถ่ายโอนข้อมูล นำรหัส G-code เข้าสู่เครื่อง CNC Machining Center ซึ่งเราจะขึ้นรูปชิ้นงานโดยเพิ่มทางเดินของน้ำโลหะและรูลึนรูเท จากนั้นแบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 ส่วน สร้างเป็นแบบพิมพ์ได้จำนวน 2 ฝา จากนั้นก็นำบล็อกที่ได้ไปเข้าสู่กระบวนการ CAM เพื่อออกรหัส G-code ดังจะเห็นได้ในขั้นตอนแสดงในรูปที่ 3.8-3.9 จนได้ชิ้นงานที่กัดขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากนั้นประกอบแม่พิมพ์กับฐานเพื่อสะดวกแก่การเทแบบ และทดสอบการใช้งานของแม่พิมพ์



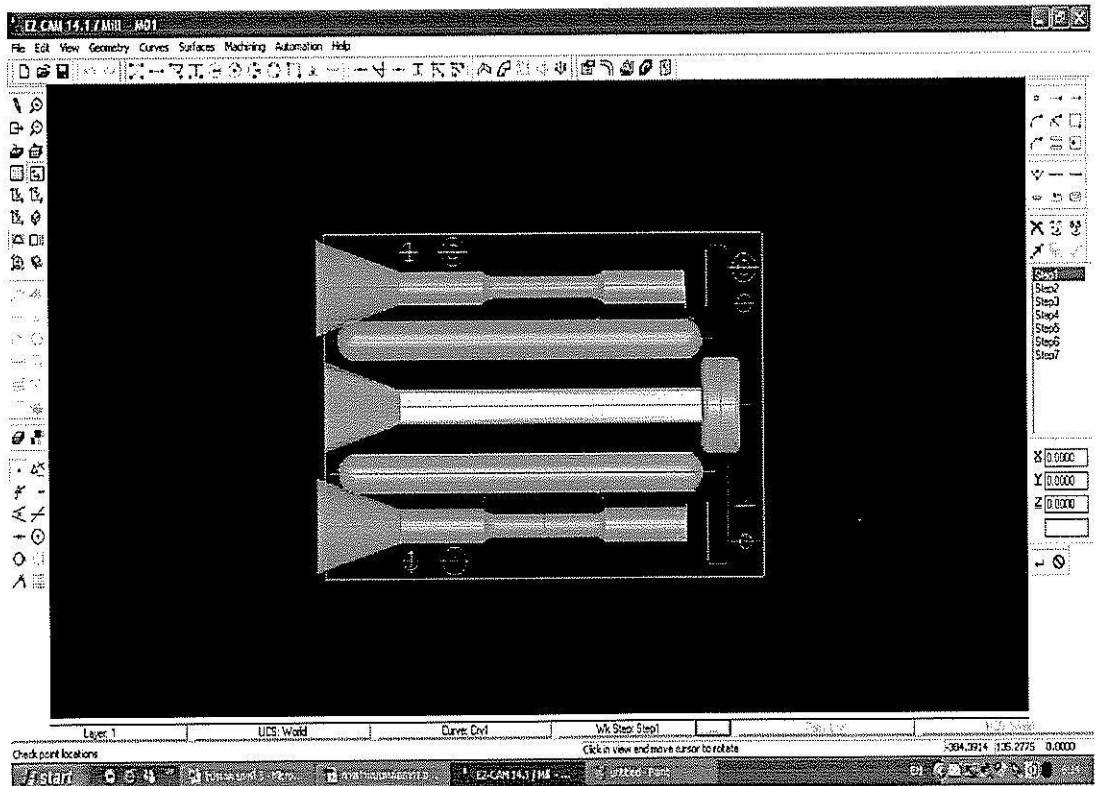
รูปที่ 3.6 Permanent mold ตามมาตรฐาน ASTM 932-B108 ในรูปแบบ 2 มิติ



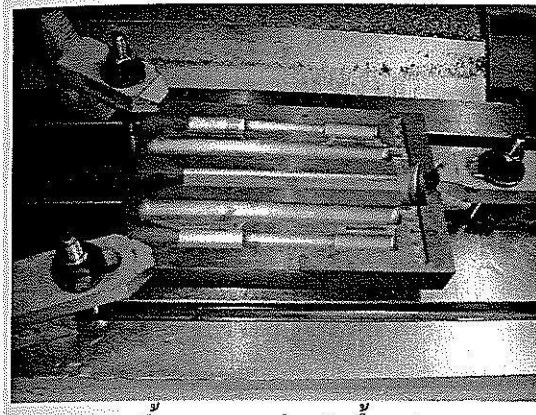
รูปที่ 3.7 Permanent mold ตามมาตรฐาน ASTM 932-B108 ในรูปแบบ 3 มิติ



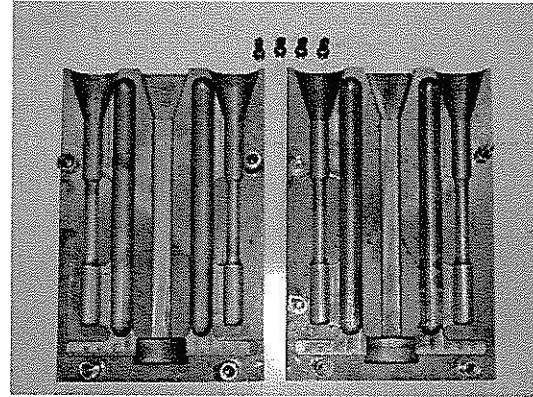
รูปที่ 3.8 Permanent mold โดยใช้โปรแกรม EZ-CAM14แบบ 3 มิติแสดงแนวเส้นการกัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.9 Permanent mold โดยใช้โปรแกรม EZ-CAM14แบบ 3 มิติแสดงรายละเอียดชิ้นงาน



A) ชิ้นงานระหว่างกััดขึ้นรูป



B) ชิ้นงานหลังการกััดขึ้นรูป

รูปที่ 3.10 Permanent mold ก่อนและหลังการกััดขึ้นรูป

บทที่ 4

การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ (Hydrogen Degassing Coupled with Flux Injection)

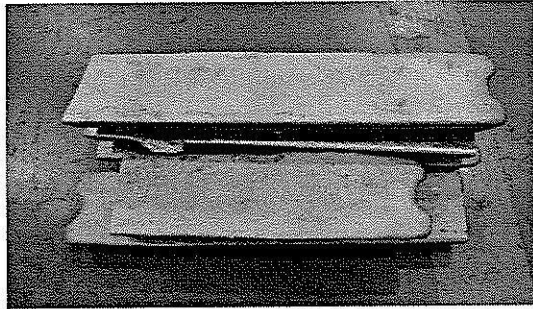
การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวก่อนการเทแบบ ร่วมกับการฉีดฟลักซ์ แบ่งออกเป็น 2 วิธีการ คือ การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์โดยใช้วิธี Lance Degassing และการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์โดยใช้เครื่องกำจัดก๊าซไฮโดรเจน (Flux Injection Degassing Unit: FIDU) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อรวมทั้งการทำความสะอาดน้ำโลหะ กระบวนการทดลองเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการหล่อ กระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค การตรวจสอบปริมาณรูพรุน การตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ รวมถึงการทดสอบสมบัติเชิงกล คือ การทดสอบความแข็งและความแข็งแรงดึง เป็นต้น

4.1 การเตรียมวัตถุดิบ (Material Preparation)

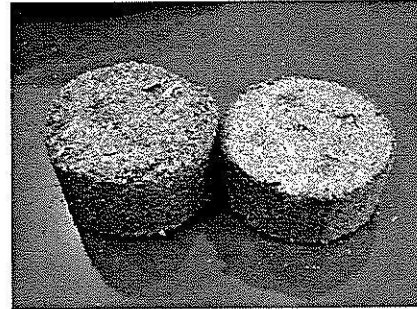
วัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมอินกอตเกรด 356 (Aluminium 356 ingot) และเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียม (Aluminium chip) โดยวัตถุดิบดังกล่าวจะถูกนำมาตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Spark Emission Spectro Analyzer ซึ่งมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 a-b สำหรับเศษขี้กิ้งนั้นจะมีความชื้นและสิ่งเจือปนผสมอยู่ โดยจะใช้เติมน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีสถานะใกล้เคียงกับการหล่อในอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการละลายของก๊าซไฮโดรเจน นอกจากนี้ มีการเติมฟลักซ์ชนิดผงและเม็ด และรูปที่ 4.2 a-b

ตารางที่ 4.1: แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม

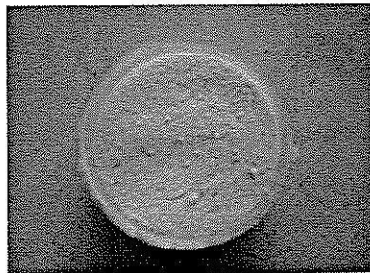
Element	Aluminium 356 Ingot (wt%)	Aluminium Chip (wt%)
Al	89.15	90.143
Si	8.15	7.993
Cu	0.904	1.258
Fe	0.768	0.341
Zn	0.158	0.059
Ni	0.059	0.059
Mg	0.430	0.030
Cr	0.037	0.006
Mn	0.180	0.026
Pb	0.098	0.011
Sn	0.069	0.002



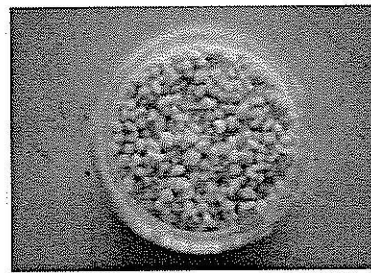
รูปที่ 4.1 (a) Aluminium Ingot



รูปที่ 4.1 (b) Aluminium chip



รูปที่ 4.2 (a) Powder flux

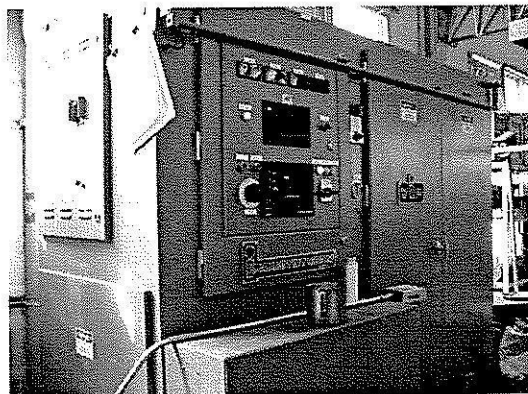


รูปที่ 4.2 (b) Granular flux

4.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้

4.2.1 เตาไฟฟ้าขดลวดความต้านทาน (Electrical resistance furnace)

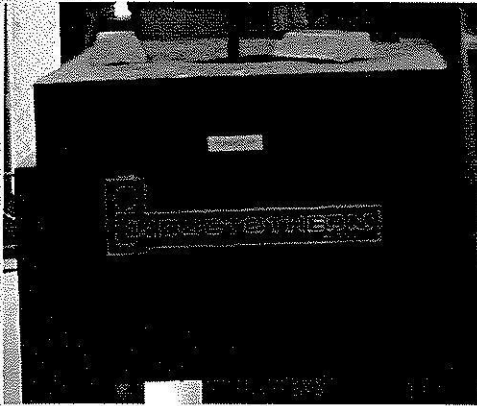
ใช้สำหรับการหลอมอะลูมิเนียม เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการหลอมต่อปริมาณรูพรุนในชิ้นงานหล่อ (หัวข้อ 5.1) โดยมีกำลัง 20-30 กิโลวัตต์ ความถี่ 1000 เฮิรต์ และสามารถใช้งานอุณหภูมิสูงสุดที่ 1100 °C



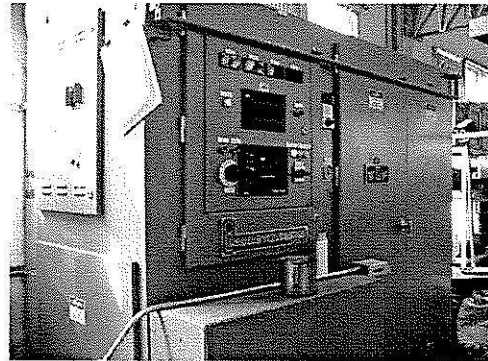
รูปที่ 4.3 เตาไฟฟ้าขดลวดความต้านทาน (Electrical resistance furnace)

4.2.2 เตาหลอมไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)

การหลอมอะลูมิเนียม กระทำในเตาหลอมไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 กำลัง 20-30 กิโลวัตต์ ความถี่ 1000 เฮิรต์ โดยใช้เบ้าหลอมขนาดความจุ 40 กิโลกรัม สำหรับโลหะอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส โดยในการทดลองจะทำการหลอมอะลูมิเนียมประมาณ 15-20 กิโลกรัม



a) เตาหลอมไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ

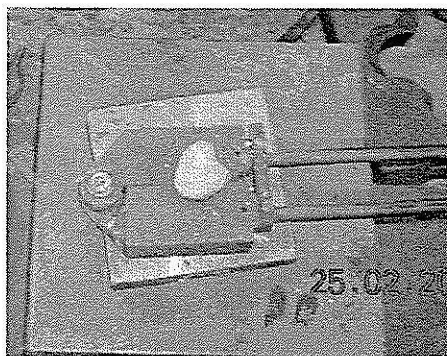


b) แผงควบคุมการหลอม

รูปที่ 4.4 เตาหลอมไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) และแผงควบคุม

4.2.3 อุปกรณ์ทดสอบ Chill test

ใช้สำหรับการเตรียมชิ้นงานในการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Spark Emission Spectro Analyser ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 Chill test



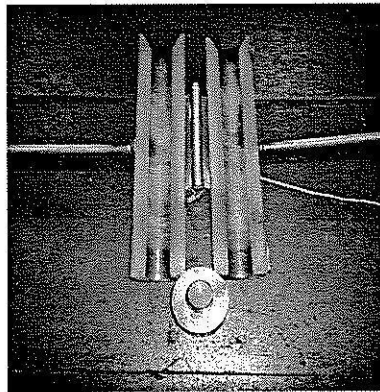
รูปที่ 4.6 Spark Emission SpectroAnalyser

4.2.4 เครื่อง Spark Emission Spectro Analyser

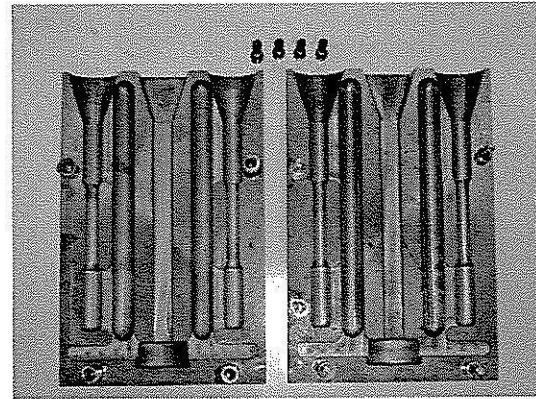
ใช้สำหรับตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานหล่อดังแสดงในรูปที่ 4.6

4.2.5 แม่พิมพ์โลหะ (Permanent mold)

ในการทดลองจะใช้แม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะด้านบน (รูปที่ 4.7 a) และแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะด้านล่าง (รูปที่ 4.7 b)



a)



b)

รูปที่ 4.7 แม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะ a) จากด้านบนและ b) จากด้านล่าง

4.2.6 เครื่องขัดหยาบ

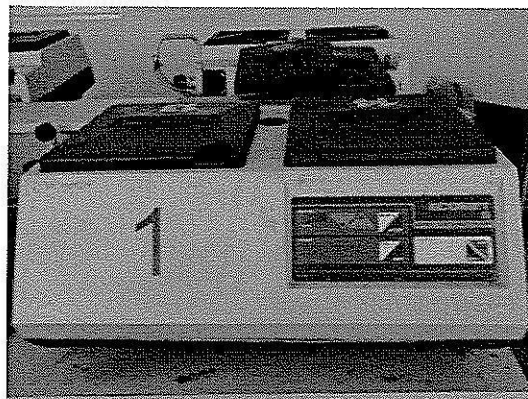
ใช้สำหรับการปรับระนาบชิ้นงาน Chill test, เตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ตรวจสอบปริมาณรูพรุนและชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง



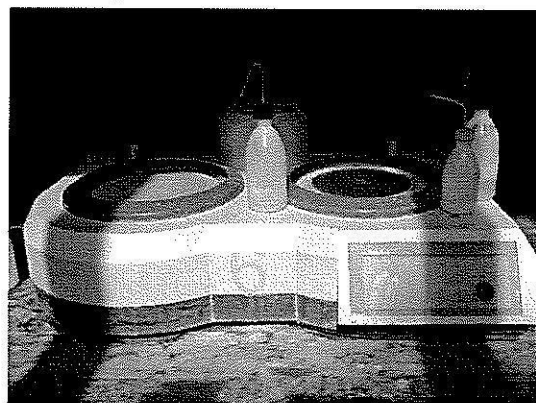
รูปที่ 4.8 ภาพเครื่องขัดหยาบ

4.2.7 เครื่องขัดกระดาษทราย

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



รูปที่ 4.9 เครื่องขัดกระดาษทราย



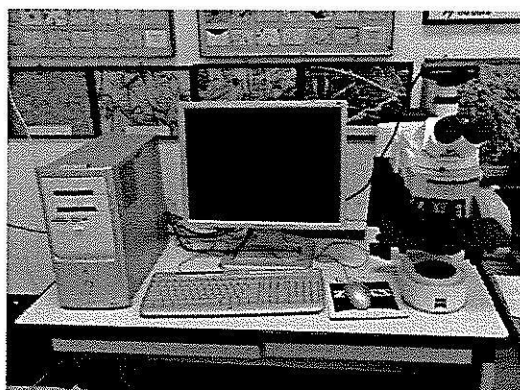
รูปที่ 4.10 เครื่องขัดผ้าสักหลาด

4.2.8 เครื่องขัดผ้าสักหลาด

ใช้สำหรับขัดละเอียดหลังจากการขัดด้วยเครื่องขัดกระดาษทราย โดยใช้ผงอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน จากนั้นกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เป็นเวลา 30 วินาที ก่อนนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคต่อไป

4.2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพ

ใช้สำหรับ บันทึกภาพถ่าย โครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 10-100 เท่า



รูปที่ 4.11 ภาพกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพ

4.3 การทดลองเบื้องต้นเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ เวลาการหลอมกับปริมาณรูพรุน

เป็นการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิ และระยะเวลาในการหลอมน้ำโลหะก่อนการเทแบบที่มีต่อปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน โดยการทดลองเริ่มจากการหลอมอะลูมิเนียมเกรด 356 ในเตาหลอมเซรามิกขนาดเล็ก (200-300 กรัม) โดยใช้เตาไฟฟ้าขดลวดความต้านทาน (Electric resistance furnace) ที่อุณหภูมิ 850 และ 950°C จากนั้นทิ้งไว้ในเตาที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที แล้วทำการเทหล่อลงในแม่พิมพ์เซรามิกเพื่อตรวจสอบปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการถอดชิ้นงานหล่อออกจากแม่พิมพ์โลหะ โดยทำการถอดแบบที่ 0.5, 1, 2 และ 5 นาที ตามลำดับ เพื่อดูความยาก-ง่ายในการถอดแบบ

4.4 การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและทำความสะอาดน้ำโลหะด้วยวิธีฉีดฟลักซ์

ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและทำความสะอาดในน้ำโลหะอะลูมิเนียม สามารถแบ่งสถานะที่ใช้ในการทดลองเป็น 3 ชุดด้วยกัน คือ

- ชุดที่ 1 การกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยใช้วิธี Lance หล่อในแบบทรายและแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะด้านบน
- ชุดที่ 2 การกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยใช้วิธี Rotary (ถังฟลักซ์ประกอบด้านข้าง) ซึ่งจะหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะด้านบนและด้านล่างเปรียบเทียบกัน
- ชุดที่ 3 การกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยใช้วิธี Rotary (ถังฟลักซ์ประกอบด้านบน) ซึ่งจะหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะด้านบนและด้านล่างเปรียบเทียบกัน

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการหล่อ จะผสมเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียม (Aluminium chip) ประมาณ 20 % ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการกำจัดก๊าซแสดงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ส่วนการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยวิธี Rotary ด้วยเครื่อง Mobile Degassing Unit นั้นประกอบไปด้วยตัวแปร 3 ตัวด้วยกัน คือ

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

ตารางที่ 4.2: สภาวะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance degassing

Melt	Al 356 Ingot	Degassing condition	Gas flow rate (l/min)	Degassing time (min)	Flux type	Mold Types
ML01-S	100%	Non-degassing	-	-	-	Sand mold
ML01-P	100%	Non-degassing	-	-	-	Permanent mold
ML02-S	100%	Lance	20	10	Powder	Sand mold
ML02-P	100%	Lance	20	10	Powder	Permanent mold

ตารางที่ 4.3: สภาวะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary ด้วยเครื่อง Mobile degassing unit โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง

Melt	Starting material		Gas flow rate (l/min)	Rotational speed (rpm)	Degassing time (min)	Flux opening (degree)	Fluxing time (min)
	Al 356 ingot (%)	Al chip (%)					
MDF01	100	-	-	-	-	-	-
MDF02	80	20	-	-	-	-	-
MDF03	80	20	15	1000	5	-	-
MDF04	80	20	15	1000	5	20	5
MDF05	80	20	15 [*] /10 ^{**}	1000	10	30	5
MDF06	80	20	15 [*] /10 ^{**}	1000	20	30	5

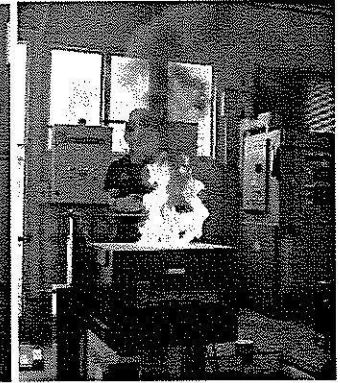
* คืออัตราการไหลของก๊าซในขณะที่ทำการฉีดฟลักซ์

** คืออัตราการไหลของก๊าซในขณะที่ทำการฉีดกำจัดก๊าซภายหลังการฉีดฟลักซ์เสร็จเรียบร้อยแล้ว

ตารางที่ 4.4: สภาพที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary ด้วยเครื่อง Mobile degassing unit โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบน

Melt	Starting materials		Flux type	Flux content (%)	Gas flow rate (rpm)	Rotational Speed (min)	Degassing time (min)
	Al 356 ingot (%)	Al chip (%)					
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

ทำการหลอมอะลูมิเนียมอินกอตและเศษจี้กิ้งอะลูมิเนียมตามส่วนผสมที่กำหนดไว้ โดยใช้เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่อุณหภูมิหลอมประมาณ 850°C



a) หลอมอะลูมิเนียมอินกอต

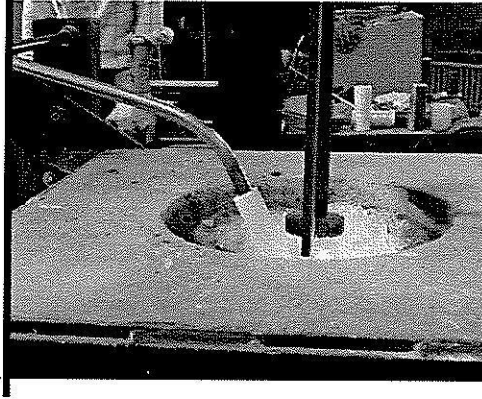
b) หลอมเศษจี้กิ้ง

c) การเผาไหม้ระหว่างหลอม

รูปที่ 4.12 ภาพการหลอมอะลูมิเนียมอินกอตและเศษจี้กิ้งอะลูมิเนียมด้วยเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากนั้นตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยใช้เครื่อง Spark Emission Spectro Analyser และควบคุมปริมาณของซิลิคอนให้อยู่ในช่วง 6.5-7.5 % ทำการตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะด้วย Thermocouple จากนั้นดำเนินการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยแยกเป็น 3 กระบวนการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คือ 1) กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยวิธี Lance degassing 2) กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary degassing โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง และ 3) กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary degassing โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบน โดยควบคุมอุณหภูมิก่อนการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ให้อยู่ในช่วง 850-870 °C

หมายเหตุ: ในการทดลองนี้จะไม่มีการทำ Grain refinement และ Modification ก่อนการเทแบบ ทั้งนี้ เพื่อเป็นการทดสอบผลกระทบของการกำจัดก๊าซเพียงอย่างเดียว

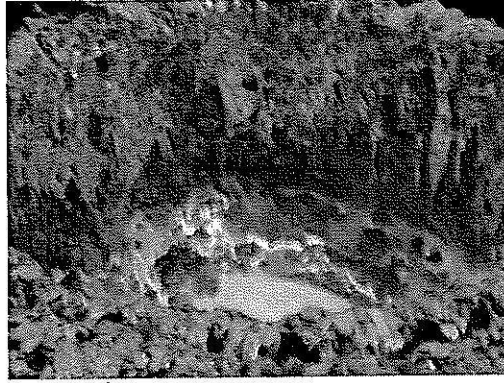


รูปที่ 4.13 การวัดอุณหภูมิน้ำโลหะด้วย Thermocouple



รูปที่ 4.14 การปั่นก๊าซอาร์กอนพร้อมฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง Flux Injection Degassing Unit (FIDU)

เมื่อทำการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ตามที่ต้องการแล้ว จึงทำการกำจัด Dross ออกจากน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อเตรียมพร้อมก่อนการเทลงแบบ เนื่องจากระหว่างการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์จะทำให้เกิด Dross ในปริมาณที่มากกว่าการกำจัดก๊าซโดยไม่มีฉีดฟลักซ์

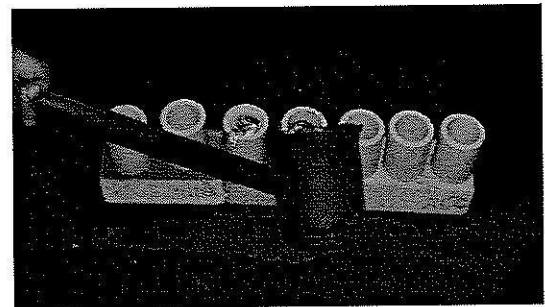


รูปที่ 4.15 แสดง Dross ในเตาหลอม

ในขั้นตอนการเทแบบ จะควบคุมอุณหภูมิก่อนการเทให้อยู่ในช่วง $750-770^{\circ}\text{C}$ ทำการถ่ายน้ำโลหะลงในเบ้าเท (Ladle) แล้วเทลงในเบ้าเซรามิกเพื่อใช้ในการตรวจสอบปริมาณรูพรุน (หมายเหตุ: การทดสอบปริมาณรูพรุน โดยใช้การทดสอบแบบสุญญากาศจะใช้สำหรับการทดลองกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์จากด้านบนเท่านั้น โดยทดสอบที่สุญญากาศหรือความดันต่ำกว่าความดันปกติ 650 mmHg) จากนั้นเทน้ำโลหะลงแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะด้านบนที่ผ่านการเผาแบบไล่ความชื้นมาแล้วจำนวน 6 แบบ และเทน้ำโลหะลงแม่พิมพ์ที่มีทางเดินน้ำโลหะด้านล่างจำนวน 2 แบบ โดยทำการถอดแบบภายใน 1 นาทีหลังการเท ชิ้นงานภายหลังการหล่อจะถูกนำมาตรวจสอบปริมาณรูพรุน ความหนาแน่น โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกล หลังจากทำการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว ตรวจสอบสภาพเครื่อง Mobile Degassing Unit และเครื่องฉีด ฟลักซ์ภายหลังการใช้งานให้อยู่ในสภาพที่พร้อมสำหรับการใช้งานครั้งต่อไป



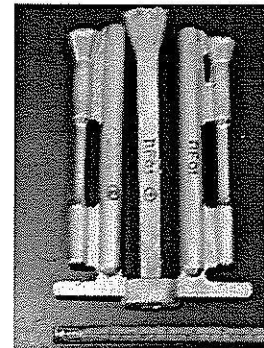
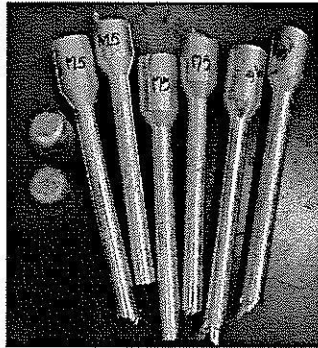
รูปที่ 4.16 การถ่ายน้ำโลหะลงในเบ้าเท



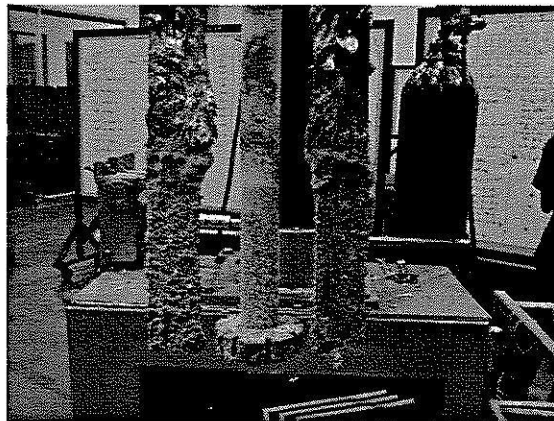
รูปที่ 4.17 การเทน้ำอะลูมิเนียมลงเบ้าเซรามิก



รูปที่ 4.18 การเทน้ำโลหะลง แม่พิมพ์โลหะ



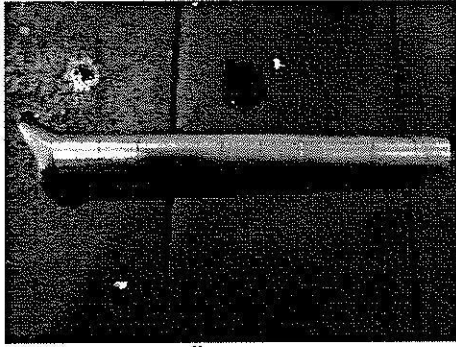
A) ชิ้นงานหล่อในแม่พิมพ์ทางเดินโลหะด้านบน B) ชิ้นงานหล่อในแม่พิมพ์ทางเดินน้ำโลหะด้านล่าง



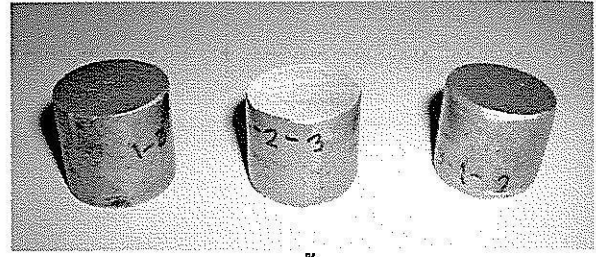
รูปที่ 4.20 แสดงสภาพของแท่งแกรไฟต์ภายหลังการกำจัดก๊าซ

4.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ตัดชิ้นงานหล่อที่ตำแหน่งส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างจากชิ้นงานที่ทำการเทหล่อจากด้านบน โดยกำหนดให้ส่วนบนและส่วนล่างของชิ้นงานจะมีระยะห่างจากด้านปลายสุดชิ้นงานประมาณ 1.5 เซนติเมตร จากนั้นตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดความหนา 2.5 เซนติเมตร ทั้งสามชิ้นดังแสดงในรูป 4.21



a) ภาพชิ้นงานก่อนตัด



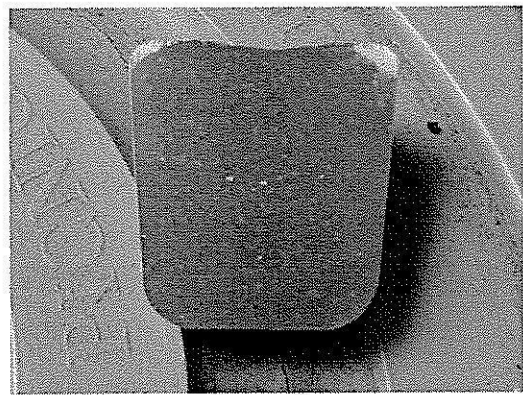
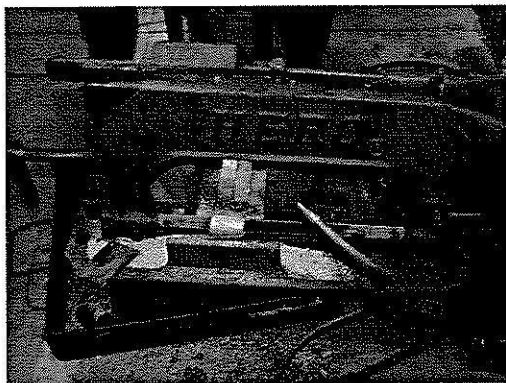
b) ภาพชิ้นงานหลังตัด

รูปที่ 4.21 การตัดชิ้นงานที่ตำแหน่งบน กลาง ล่าง

นำชิ้นงานไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ 100 ถึงเบอร์ 1,200 แล้วนำไปขัดละเอียดด้วยผ้าสักหลาดและผงเพชร นำไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกโดยจะจุ่มแช่ไว้ 30 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นตามด้วยแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้ง เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพโดยถ่ายบริเวณด้านบน กลางและส่วนล่างของชิ้นงาน ทำการถ่ายภาพที่กำลังขยาย 100, 200, 300, 400, 500 และ 1000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

4.6 การตรวจสอบรูพรุน (Porosity) ทางกายภาพ

ผ่าครึ่งชิ้นงานที่หล่อได้จากเบ้าเซรามิกด้วยเครื่องตัดอัตโนมัติ แล้วนำชิ้นงานไปปรับระนาบด้วยเครื่องขัดหยาบโดยเครื่องขัดกระดาษทรายเบอร์ 100, 180, 320, 600 และ 800 ตามลำดับ ล้างด้วยแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้งจากนั้นถ่ายรูปบันทึกเพื่อเก็บข้อมูล เพื่อตรวจสอบปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน โดยการตรวจสอบปริมาณรูพรุนโดยใช้ชิ้นงานหล่อจากเบ้าเซรามิกนั้นจะใช้กับสถานะการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.22 ผ่าครึ่งชิ้นงานด้วยเครื่องตัดอัตโนมัติ รูปที่ 4.23 แสดงชิ้นงานที่พร้อมตรวจสอบรูพรุน

4.7 การตรวจสอบปริมาณรูพรุนโดยใช้วิธี Vacuum test

ทำการตรวจสอบปริมาณรูพรุนในชิ้นงานหล่อโดยใช้เครื่องทดสอบสุญญากาศดังแสดงในรูปที่ 4.24 ที่ระดับสุญญากาศ 650 mmHg ก่อนการหล่อแบบ และเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ เนื่องจากเครื่องทดสอบรูพรุนแบบสุญญากาศนี้มีการพัฒนาขึ้นในภายหลัง จึงใช้กับการทดลองกำจัดก๊าซแบบ Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบน ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.3



a) เทน้ำโลหะลงใน Steel crucible



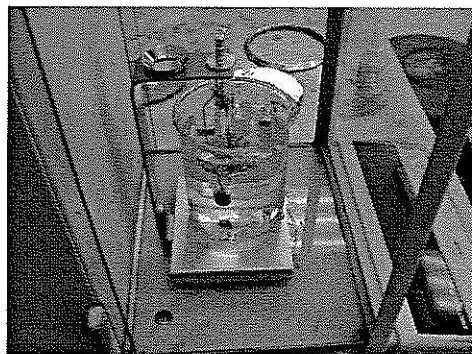
b) ชิ้นงานหลังการทดสอบ

รูปที่ 4.24 การทดสอบปริมาณรูพรุนโดยใช้เครื่อง Vacuum test

4.8 การตรวจสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน (Density Measurement)

ชิ้นงานที่ถูกตัดจากบริเวณส่วนบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่อ จะถูกนำมาตรวจสอบค่าความหนาแน่นโดยใช้หลักการของ Archimedes โดยทำการชั่งน้ำหนักในอากาศ และชั่งน้ำหนักในน้ำ ด้วยเครื่อง Density Determination Kit ดังแสดงในรูปที่ 4.25 คำนวณเพื่อหาค่า Sample density จากสมการ

$$\text{Sample Density} = (\text{Sample weight} / \text{Sample buoyancy}) \times \text{Density of the test liquid}$$



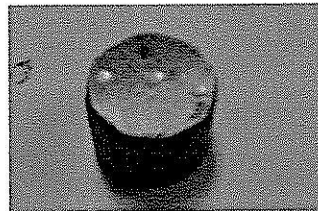
รูปที่ 4.25 การตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 4.5: Density of water at various temperatures in the range of 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

4.8 การทดสอบความแข็ง (Brinell hardness)

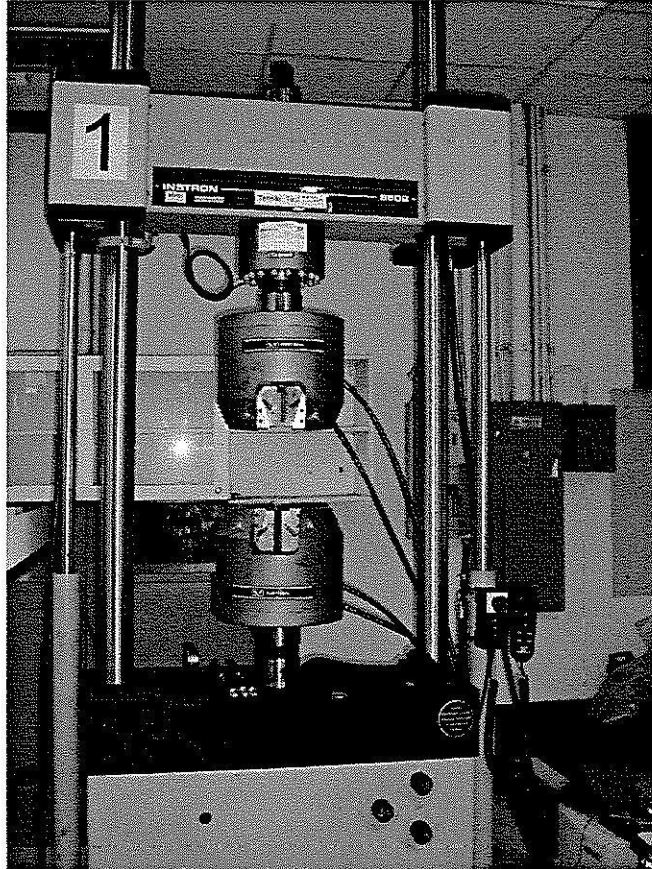
นำชิ้นงานหล่อที่ตัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วยส่วนบน ส่วนกลางและด้านล่างของชิ้นงานทำการปรับระนาบด้วยเครื่องขัดหยาบ จากนั้นทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องวัด Brinell Hardness Testing Machine ใช้ค่าโหลดในการทดสอบเท่ากับ 500 kgf. โดยในชิ้นงาน 1 ชิ้นจะทำการวัด 3 ตำแหน่งของชิ้นงานจากบริเวณขอบ ใจกลาง และขอบอีกด้านหนึ่งของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.26 นำค่าความแข็งที่ทดสอบได้มาหาค่าเฉลี่ย และสร้างเป็นกราฟเพื่อแสดงผลเปรียบเทียบค่าความแข็งในแต่ละสถานะของการกำจัดก๊าซพร้อมแสดงผลในรูปของกราฟ



รูปที่ 4.26 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบด้วยเครื่อง Brinell Hardness Testing Machine

4.9 การทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile testing)

นำชิ้นงานหล่อที่ได้จาก Permanent mould ในสภาพหลังการหล่อ (As-cast) มาทำการทดสอบสมบัติแรงดึง ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron 8803) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ด้วย Cross head displacement เท่ากับ 0.5 mm/min



รูปที่ 4.27 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine

4.10 ตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก (Fractographic examination)

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

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

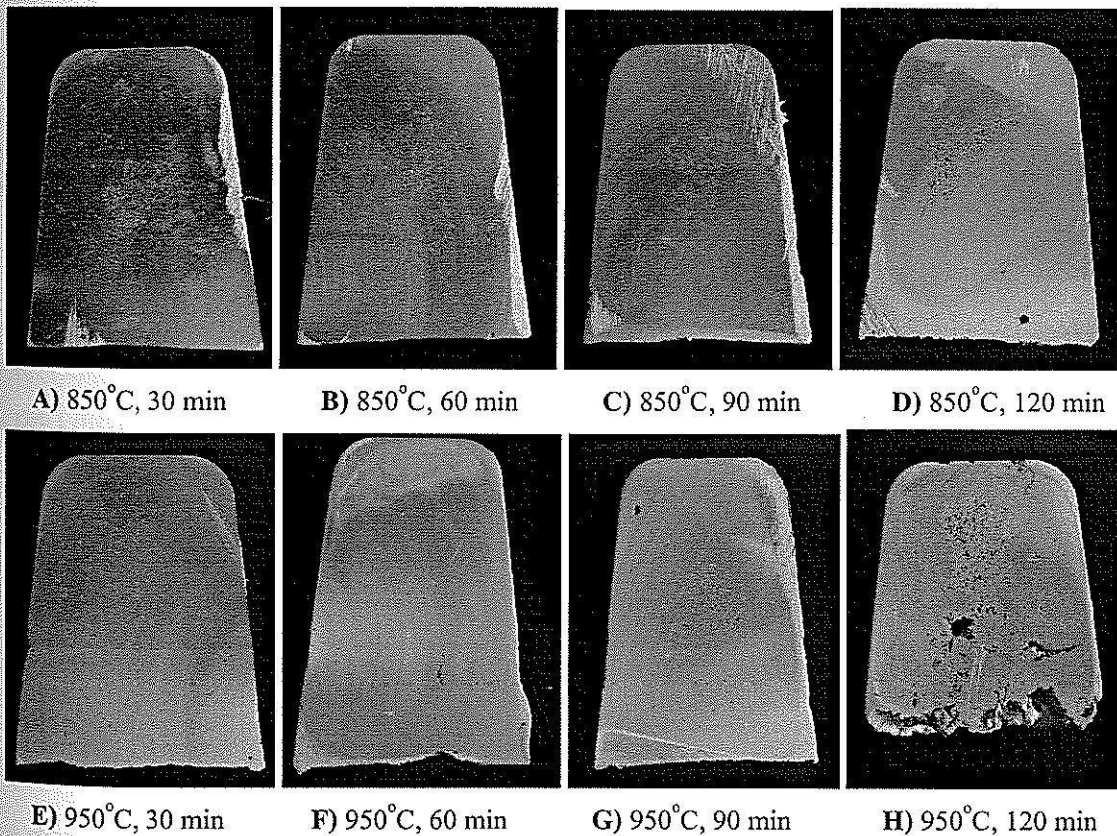
การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนผสมการฉีดฟลักซ์ในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว

(Results and Discussion on Aluminium Degassing Coupled with Flux Injection)

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผล เกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาการหลอมโลหะต่อปริมาณรูพรุน และผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนผสมการฉีดฟลักซ์ในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวก่อนการเทแบบ จากนั้นทำการศึกษาวินิจฉัยสาเหตุทางกายภาพและเชิงกลของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม ซึ่งประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสม การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค การตรวจสอบปริมาณรูพรุน การตรวจสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ รวมถึงการทดสอบค่าความแข็งและความแข็งแรงดึง ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการหลอมต่อปริมาณรูพรุน

เมื่อหลอมอะลูมิเนียมผสมในเตาไฟฟ้าขนาดความดันที่ 850°C และ 950°C เป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่าปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการหลอม ดังในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิและเวลาในการหลอมต่างๆ กัน

ซึ่งหากพิจารณาจากความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว จะพบว่า ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นจะยิ่งทำให้ไฮโดรเจนสามารถละลายในน้ำโลหะอะลูมิเนียมได้มากขึ้น (รูปที่ 1.1) จึงทำให้ปริมาณรูพรุนที่พบในชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามลำดับ อีกทั้งเวลาในการหลอมที่เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ผลเช่นเดียวกันคือทำให้ปริมาณรูพรุนมากขึ้น จะเห็นได้ว่า แม้ว่าจะใช้วัสดุเริ่มต้นในการหลอมที่เป็นอะลูมิเนียมอินกอตเกรด 356 เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีเศษขี้กิ้งปนอยู่เลยก็สามารถทำให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อในปริมาณมาก ดังนั้น ในกระบวนการหล่อโลหะอะลูมิเนียมในสภาวะจริง จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ควรทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนก่อนการเทแบบ เพื่อป้องกันรูพรุนอันไม่พึงประสงค์

5.2 ผลและการวิเคราะห์การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance degassing

สภาวะการทดลองในการกำจัดก๊าซด้วยวิธี Lance ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ไม่ผ่านการกำจัดก๊าซ (ML-01) กับที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance (ML02) โดยแต่ละกรณีจะทำการหล่อในแบบทรายและแม่พิมพ์โลหะที่มีการเทน้ำโลหะด้านบน

5.2.1 ผลและการวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสม

จากตารางที่ 5.1 แสดงธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการหล่อภายหลังการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนผสมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance ในสภาวะการทดลองทั้งหมดจะมีการควบคุมส่วนผสมทางเคมีให้ใกล้เคียงกับอะลูมิเนียม 356 ซึ่งมีการควบคุมปริมาณของซิลิคอนอยู่ในช่วง 6.5-7.5% และแมกนีเซียมอยู่ในช่วง 0.2-0.45% และจากการทดลองพบว่าปริมาณของ Cu สูงกว่าช่วงที่กำหนดคือ 0.250% เนื่องจากอะลูมิเนียมอินกอตและเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการหลอมนั้นมีปริมาณของทองแดงที่ค่อนข้างสูง คือ ประมาณ 0.9% และ 1.25% ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) อย่างไรก็ตาม ปริมาณทองแดงนี้อาจมีผลกระทบต่อความสามารถในการไหลของน้ำโลหะ (Fluidity) แต่เนื่องจากปริมาณทองแดงที่ตรวจสอบได้มีปริมาณใกล้เคียงกันจึงถือว่าผลการทดลองในแต่ละสภาวะนั้นสามารถเปรียบเทียบกันได้

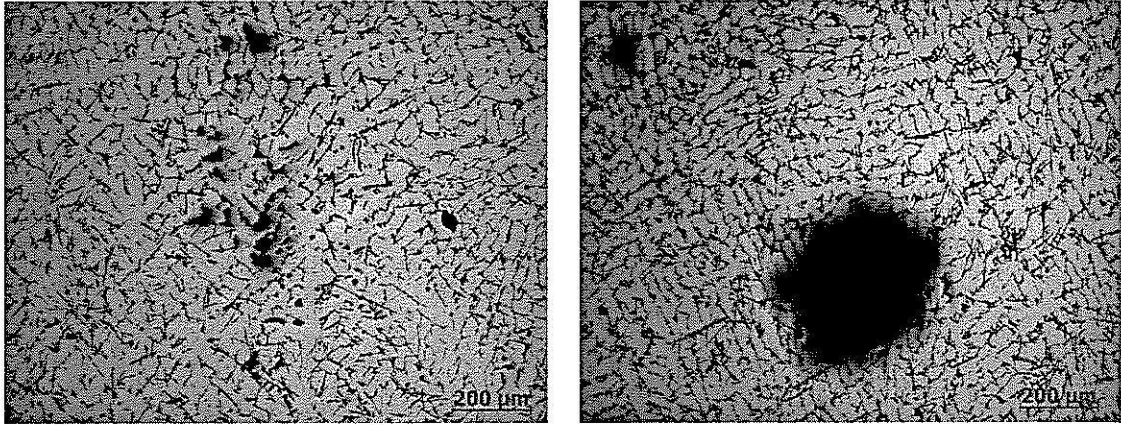
ตารางที่ 5.1: แสดงปริมาณธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมภายใต้การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนผสมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance degassing

Element	Alloy 356	ML01	ML02
Al	90.650	79.970	89.730
Si	6.5-7.5	7.930	7.980
Cu	0.250	1.231	1.218
Fe	0.600	0.390	0.433
Zn	0.350	0.054	0.056
Ni	-	0.029	0.029
Mg	0.25-0.45	0.206	0.243
Cr	-	0.011	0.010
Mn	0.350	0.035	0.034
Pb	-	0.097	0.214
Sn	-	0.048	0.051

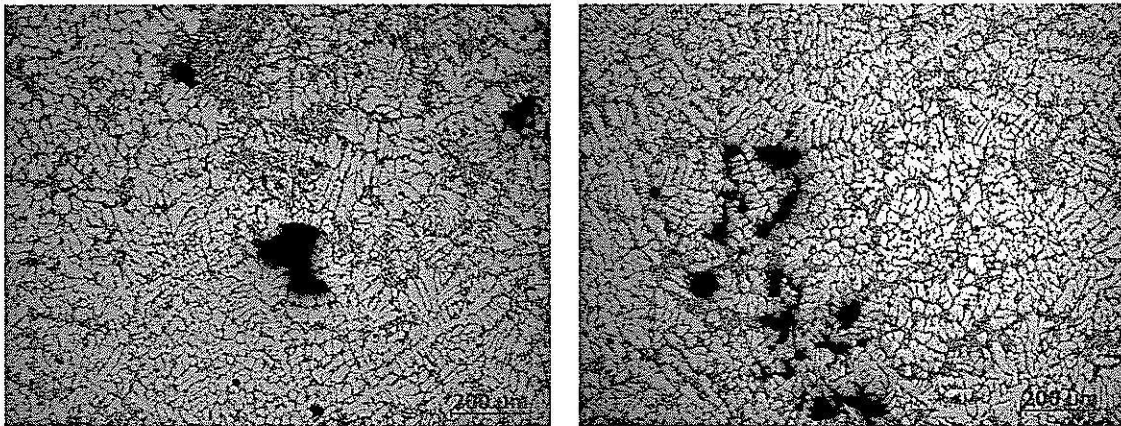
5.2.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อภายใต้การกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยวิธี Lance

รูปที่ 5.2-5.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมก่อนและหลังการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์โดยวิธี Lance ซึ่งหล่อในแบบทรายและแบบโลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบจากส่วนบน กลางและล่างจะประกอบด้วยเฟสของอะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary aluminium) เป็นโครงสร้างพื้นฐานเดนไดรต์และโครงสร้างยูเทคติกกระจายอยู่ระหว่างโครงสร้างเดนไดรต์ดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคจากการหล่อในแบบหล่อทรายและแบบหล่อโลหะพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่พบในแบบหล่อโลหะมีความละเอียดมากกว่าที่พบในแบบหล่อทราย เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าในแบบหล่อโลหะส่งเสริมให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่เล็กละเอียดกว่า และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นพบว่า กระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ทำให้เกิดปริมาณรูพรุนที่มากขึ้น เนื่องจากระหว่างกระบวนการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance ทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำโลหะอะลูมิเนียมอย่างมาก ฟองก๊าซอาร์กอนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแอร์ไฟต์ = 6 mm) มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์นั้นต่ำกว่าในกรณีที่หล่อแล้วเทแบบเพียงอย่างเดียว ฟองก๊าซอาร์กอนที่มีขนาดใหญ่จะลอยขึ้นสู่วิวน้ำโลหะได้เร็วกว่าฟองก๊าซขนาดเล็ก นอกจากจะไม่ทำให้ไฮโดรเจนมีโอกาสแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซอาร์กอนได้ทันแล้ว ยังมีผลทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำ

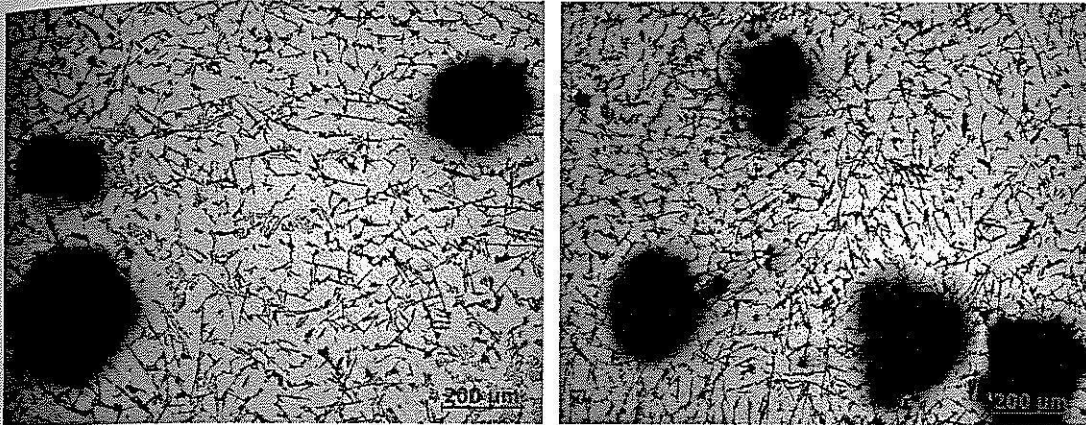
โลหะ จึงทำให้เกิดออกไซด์ของอะลูมิเนียม (Dross) จำนวนมาก เป็นการสูญเสียเนื้อโลหะอะลูมิเนียม อีกทั้งยังหลงเหลือเป็นอินคลูชันที่เราไม่ต้องการอีกด้วย



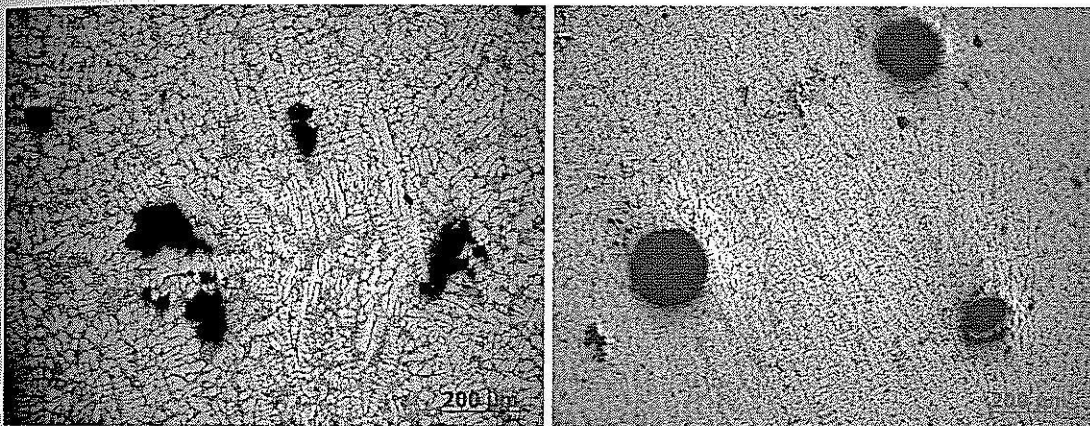
รูปที่ 5.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่ไม่กำจัดก๊าซไม่ฉีดฟลักซ์ในแบบหล่อทราย (ML01-S)



รูปที่ 5.3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อที่ไม่กำจัดก๊าซและไม่ฉีดฟลักซ์ในแบบหล่อโลหะ (ML01-P)



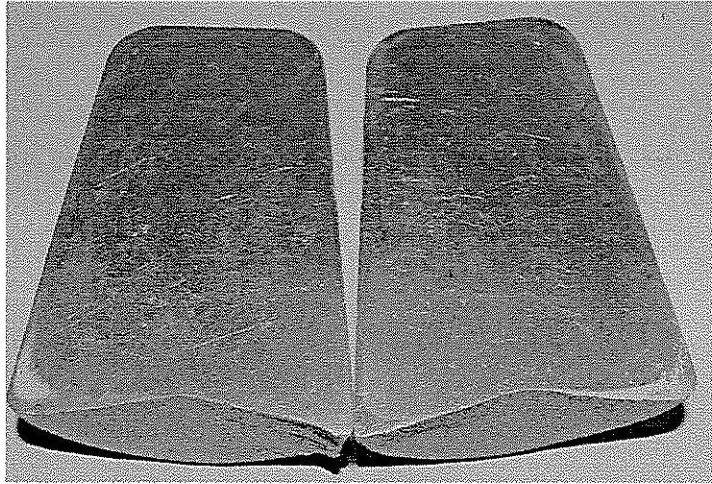
รูปที่ 5.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ในแบบหล่อทราย(ML02-S)



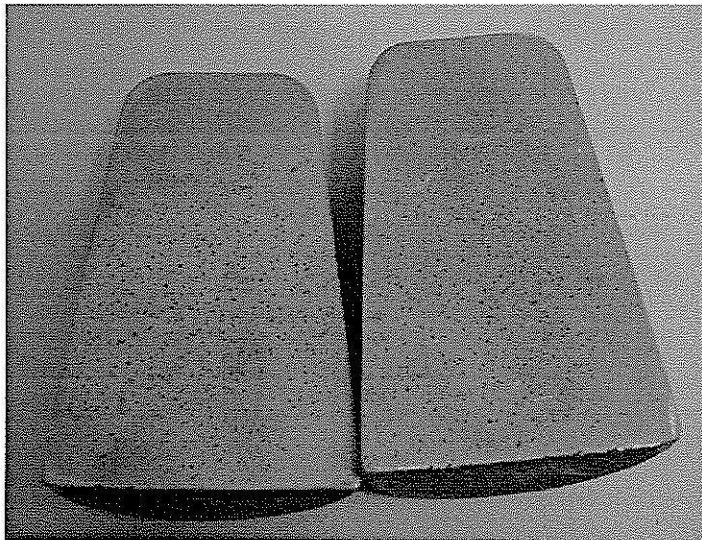
รูปที่ 5.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ในแบบหล่อโลหะ (ML02-P)

5.2.3 ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุน

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของรูพรุนที่พบในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมที่หล่อในเบ้าเซรามิก จะเห็นได้ว่า เมื่อไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ชิ้นงานหล่อปกติจะไม่ปรากฏรูพรุนให้เห็นชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 5.6 แต่เมื่อทำการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ปรากฏเห็นรูพรุนชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 5.7 ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance ทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำโลหะ เพราะเกิดฟองก๊าซขนาดใหญ่ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซน้อยมาก อีกทั้งความปั่นป่วนของน้ำโลหะยังเอื้ออำนวยให้เกิดการละลายกลับของก๊าซไฮโดรเจนจากบรรยากาศรอบๆ อีกด้วย



รูปที่ 5.6 ภาควัตถววางชิ้นงานหล่อที่ไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ในเบ้าเซรามิก



รูปที่ 5.7 ภาควัตถววางชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ในเบ้าเซรามิก

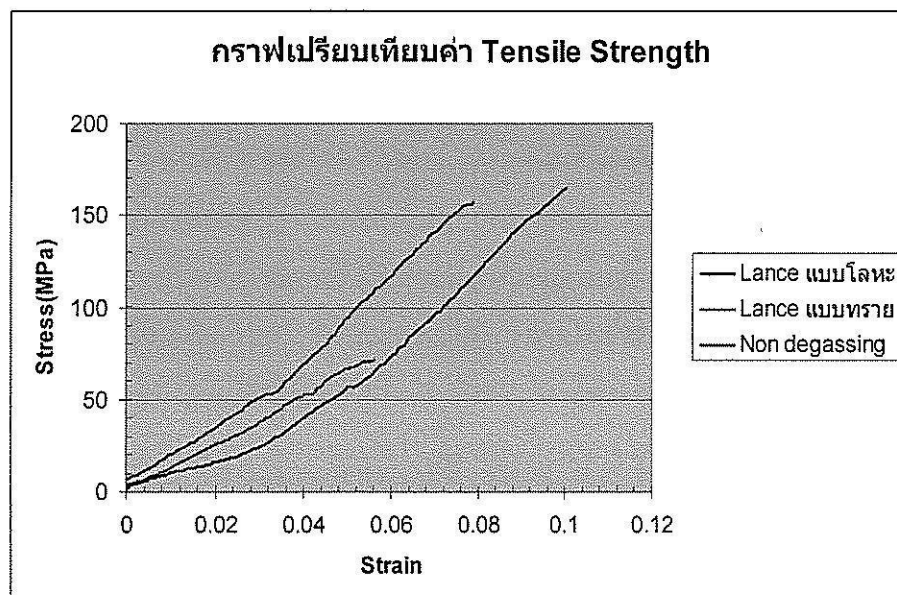
5.2.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness) และสมบัติแรงดึง (Tensile properties) ของชิ้นงานหล่อ อะลูมิเนียมก่อน และหลังการกำจัดก๊าซด้วยวิธี Lance แสดงดังตารางที่ 5.2 ชิ้นงานหล่อที่ไม่ผ่านการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์นั้นมีค่าความแข็ง ความแข็งแรงแรงดึง (Tensile strength) มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยวิธี Lance ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองปริมาณรูพรุนที่พบในชิ้นงานหล่อดังที่แสดงข้างต้น ปริมาตรรูพรุนที่เพิ่มขึ้นและมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดการสะสมของความเค้น (Stress concentration) ระหว่างได้รับแรงกระทำ ทำให้เกิดการแตกหักก่อนเวลาอันควร

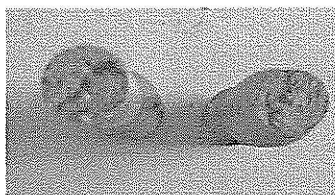
(Premature failure) ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-strain ในรูปที่ 5.8 ชิ้นงานหล่อแสดงพฤติกรรมการเสียรูปในช่วงยืดหยุ่นเป็นส่วนใหญ่ และเกิด Plastic strain ที่น้อยมาก บ่งบอกถึงพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะซึ่งสอดคล้องกับค่า % Elongation และลักษณะพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่อดังแสดงในรูปที่ 5.9 ลักษณะของชิ้นงานภายหลังการแตกหักไม่เกิดคอคอน และยังคงแสดงถึงจุดกำเนิดของการแตกหักอันเนื่องมาจากรูพรุนอีกด้วย

ตารางที่ 5.2: แสดงค่าเฉลี่ยความแข็ง (Brinell hardness) และสมบัติแรงดึง (Tensile properties) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม

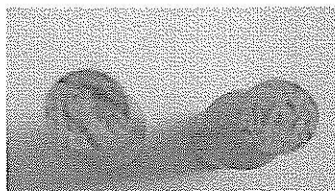
Test condition	Brinell hardness number (BHN)	Tensile strength (MPa)	% Elongation
ML01-S	24.75	-	-
ML01-P	28.09	171.4	1.5
ML02-S	24.50	71.6	0.6
ML02-P	27.49	164.5	2.3



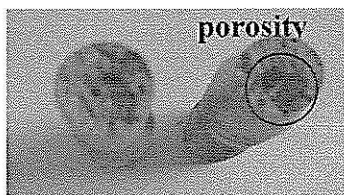
รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ Stress-strain ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมเปรียบเทียบสภาวะก่อนและหลังการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance



a) ก่อนกำจัดก๊าซ+ฉีดฟลักซ์ (ML01-P)



b) หลังกำจัดก๊าซ+ฉีดฟลักซ์ (ML02-P)



c) หลังกำจัดก๊าซ+ฉีดฟลักซ์ (ML02-S)

รูปที่ 5.9 ชิ้นงานแตกหักภายหลังจากทดสอบแรงดึง

5.3 ผลและการวิเคราะห์การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง

สภาวะการทดลองในการกำจัดก๊าซผสมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้างแสดงดังในตารางที่ 4.3 ซึ่งผลจากการทดลองในสภาวะดังกล่าวจะเป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค ปริมาตรรูพรุน ความหนาแน่น และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ไม่ผ่านการกำจัดก๊าซ (MDF01) กับที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDF02-06) โดยแต่ละกรณีจะทำการหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีการเทน้ำโลหะด้านบนและด้านล่างเปรียบเทียบกัน

5.3.1 ปริมาณธาตุผสม

ปริมาณธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมแสดงในตารางที่ 5.3 ซึ่งมีการควบคุมปริมาณของซิลิกอนและแมกนีเซียมอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด คือ ซิลิกอนอยู่ในช่วง 6.5-7.5 wt% และแมกนีเซียมอยู่ในช่วง 0.25-0.45 wt% อย่างไรก็ตาม ปริมาณทองแดงและเหล็กค่อนข้างสูงกว่าที่กำหนดซึ่งเนื่องมาจากปริมาณที่มีอยู่เดิมของอะลูมิเนียมอินกอตที่ใช้และการเติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียม ทำให้มีปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้นด้วย

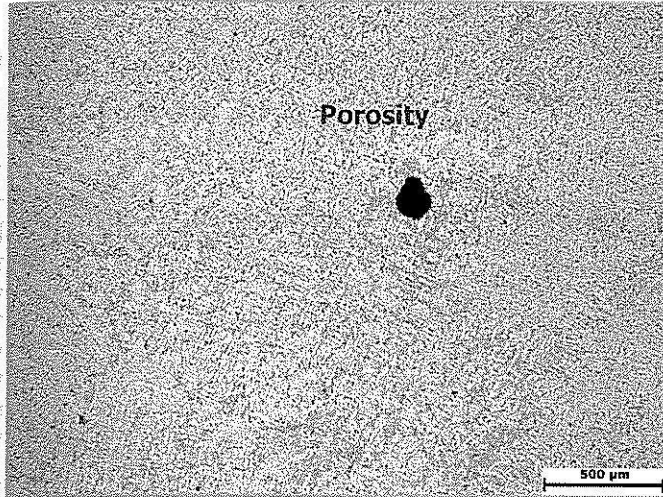
ตารางที่ 5.3 แสดงปริมาณธาตุผสม (โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมก่อนหลังการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนผสมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านล่าง

Element	Alloy 356	MDF01	MDF02	MDF03	MDF04	MDF05	MDF06
Al	90.650	79.970	89.730	87.170	87.070	87.650	89.810
Si	6.5-7.5	7.930	7.980	7.750	7.870	7.990	7.040
Cu	0.250	1.231	1.218	1.859	1.926	1.751	1.902
Fe	0.600	0.390	0.433	1.592	1.544	1.369	1.781
Zn	0.350	0.054	0.056	0.259	0.253	0.194	0.218
Ni	-	0.029	0.029	0.103	0.106	0.090	0.102
Mg	0.25-0.45	0.206	0.243	0.276	0.258	0.260	0.261
Cr	-	0.011	0.010	0.039	0.037	0.035	0.033
Mn	0.350	0.035	0.034	0.259	0.233	0.206	0.210
Pb	-	0.097	0.214	0.417	0.411	0.346	0.455
Sn	-	0.048	0.051	0.252	0.252	0.118	0.190

5.3.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ

รูปที่ 5.10-5.15 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งกลางแท่งชิ้นงานที่หล่อจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคจะประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานของอะลูมิเนียมปฐมภูมิเป็นแกนโครงและมีโครงสร้างยูเทคติกล้อมรอบ ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมประเภทไฮโปยูเทคติก นอกจากนี้ ยังพบโครงสร้างคล้ายใบมีด (Blade-like structure) เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมมีเหล็กอยู่ในปริมาณที่สูงพอสมควร เมื่อพิจารณาความละเอียดของโครงสร้าง พบว่าสถานะที่ทำการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์จะให้โครงสร้างจุลภาคที่หยากกว่าสถานะที่ไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์เล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของรูพรุนที่พบในชิ้นงานหล่อ จะเห็นได้ว่าขนาดของรูพรุนลดลง จากประมาณ 200-300 μm เมื่อทำการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance เป็น <100 μm เมื่อทำการกำจัดก๊าซด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซดีขึ้น มากกว่า และนอกจากนี้ รูพรุนที่พบมีปริมาณน้อยลง แต่อย่างไรก็ดี วิธีการนี้ก็ยังไม่สามารถกำจัดรูพรุนได้ 100% ยังสามารถพบปริมาณรูพรุนในชิ้นงานหล่อ

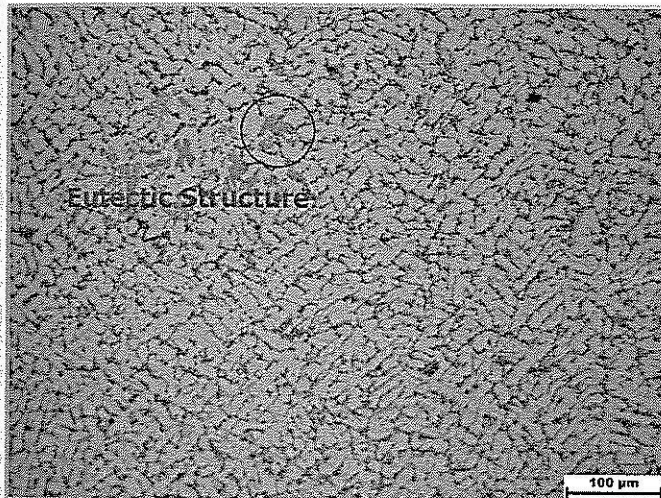


รูปที่ 5.10 A โครงสร้างจุลภาค

Aluminium 356 ingot

ที่กำลังขยาย 5X

Degassing Condition	MDF01
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-

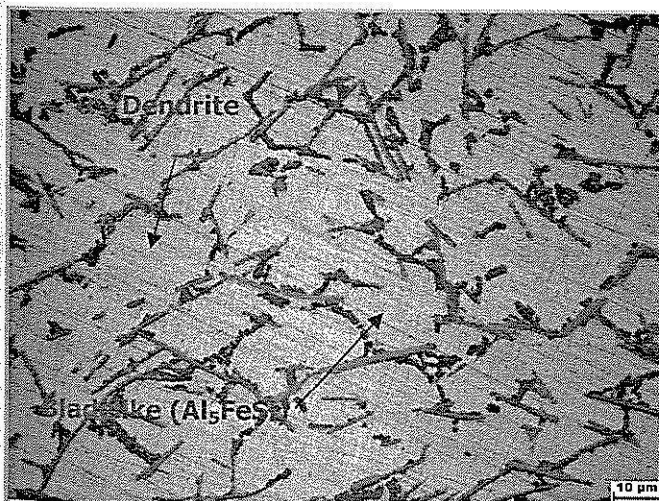


รูปที่ 5.10 B โครงสร้างจุลภาค

Aluminium 356 ingot

ที่กำลังขยาย 20X

Degassing Condition	MDF01
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-



รูปที่ 5.10 C โครงสร้างจุลภาค

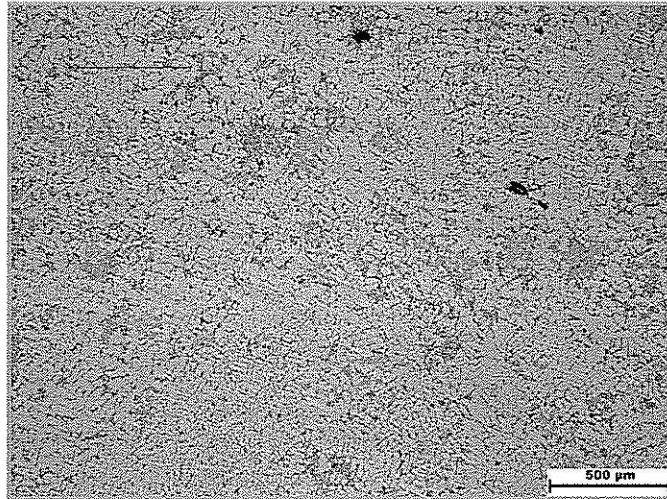
Aluminium 356 ingot

ที่กำลังขยาย 100X

Degassing Condition	MDF01
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-

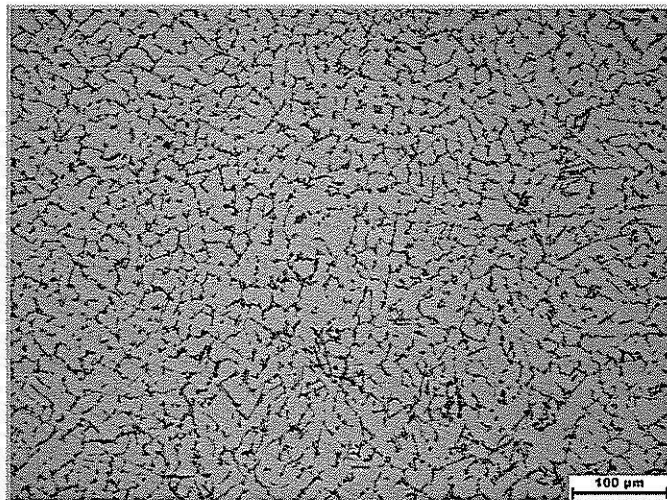
รูปที่ 5.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม 100% ที่ไม่ได้กำจัดก๊าซ

และดีฟลักซ์ (MDF-01) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน



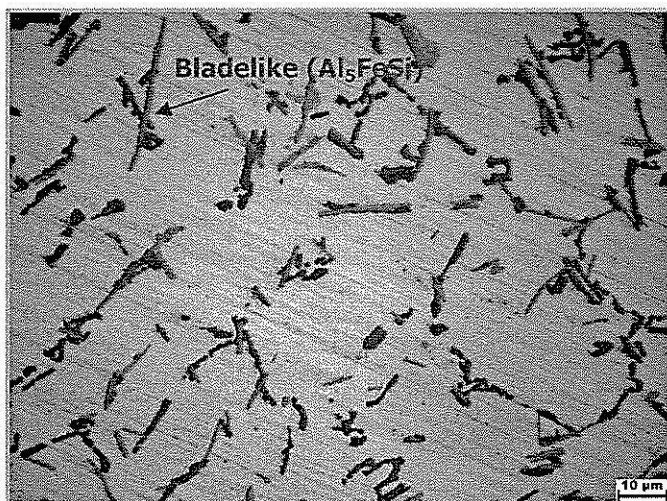
รูปที่ 5.11 A โครงสร้างจุลภาค
Al 356 ingot 80%, Al chip
20%, ที่กำลังขยาย 5X

Degassing Condition	MLF02
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-



รูปที่ 5.11 B โครงสร้างจุลภาค
Al 356 ingot 80%+Al chip 20%
ที่ กำลังขยาย 20X

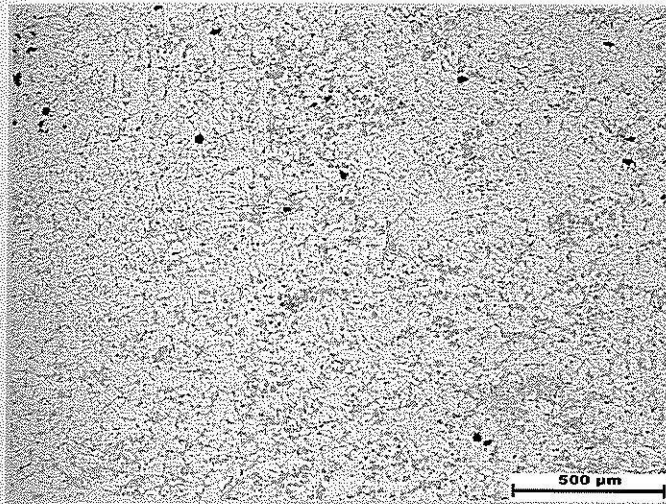
Degassing Condition	MLF02
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-



รูปที่ 5.11 C โครงสร้างจุลภาค
Al 356 ingot 80%+Al chip 20%
ที่ กำลังขยาย 100X

Degassing Condition	MLF02
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-

รูปที่ 5.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมอินกอต 80% + เศษขี้กิ้ง 20%
ที่ไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ (MDF-02) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

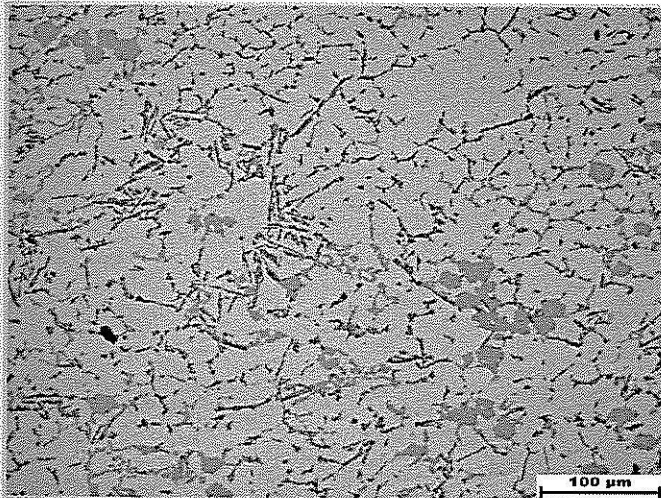


รูปที่ 5.12 A โครงสร้างจุลภาค

Al 356 ingot 80%+Al chip 20%

ที่กำลังขยาย 5X

Degassing Condition	MDF03
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation Speed (rpm)	1,000

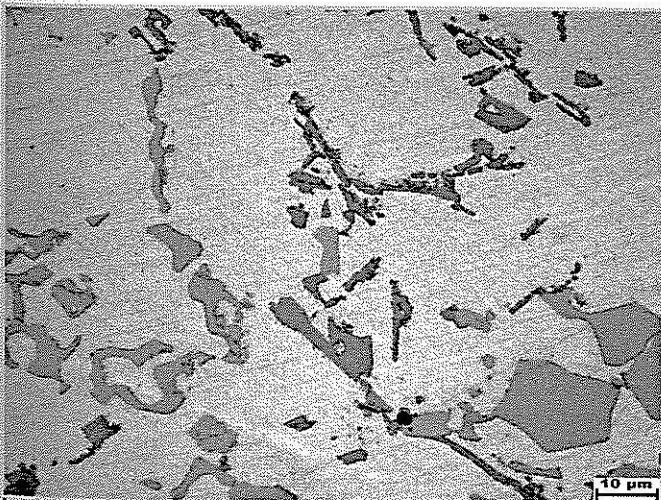


รูปที่ 5.12 B โครงสร้างจุลภาค

Al 356 ingot 80%+Al chip 20%

ที่กำลังขยาย 20X

Degassing Condition	MDF03
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation Speed (rpm)	1,000



รูปที่ 5.12 C โครงสร้างจุลภาค

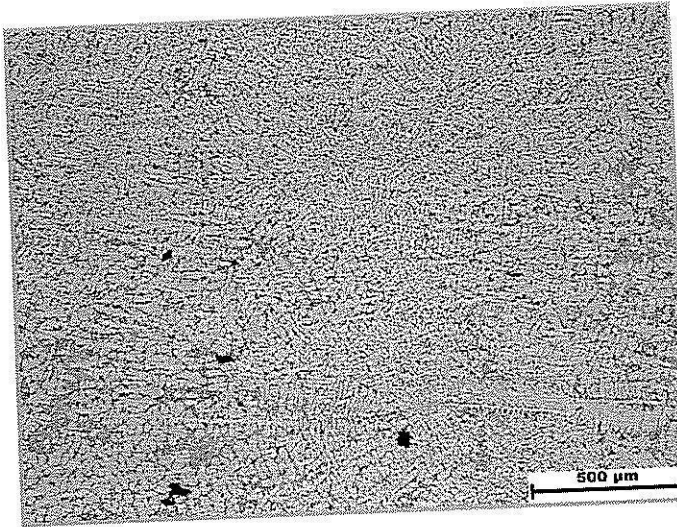
Al 356 ingot 80%+Al chip 20%

ที่กำลังขยาย 100X

Degassing Condition	MDF03
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation Speed (rpm)	1,000

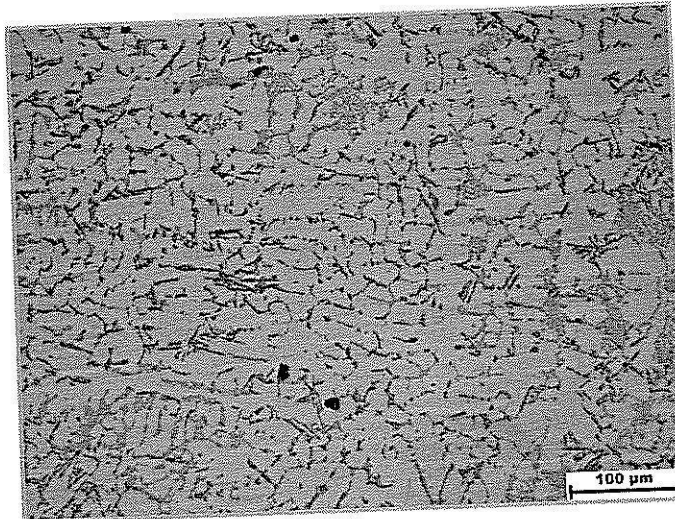
รูปที่ 5.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม 80% + เศษขี้กิ้ง 20% กำจัดก๊าซ+ฉีดฟลักซ์

ด้วยวิธี Rotary โดยมีตั้งฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (MDF03) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน



รูปที่ 5.13 A โครงสร้างจุลภาค
Al 356 ingot 80%+Al chip 20%
ที่กำลังขยาย 5X

Degassing Condition	MDF04
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°



รูปที่ 5.13 B โครงสร้างจุลภาค
Al 356 ingot 80%+Al chip 20%
ที่กำลังขยาย 20X

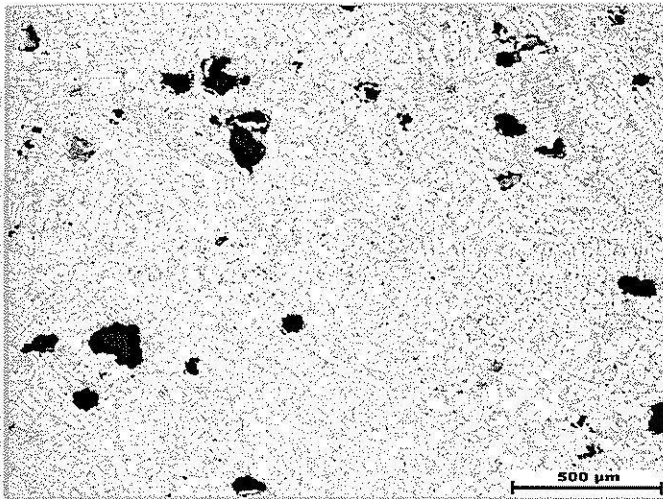
Degassing Condition	MDF04
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°



รูปที่ 5.13 C โครงสร้างจุลภาค
Al 356 ingot 80%+Al chip 20%
ที่กำลังขยาย 100X

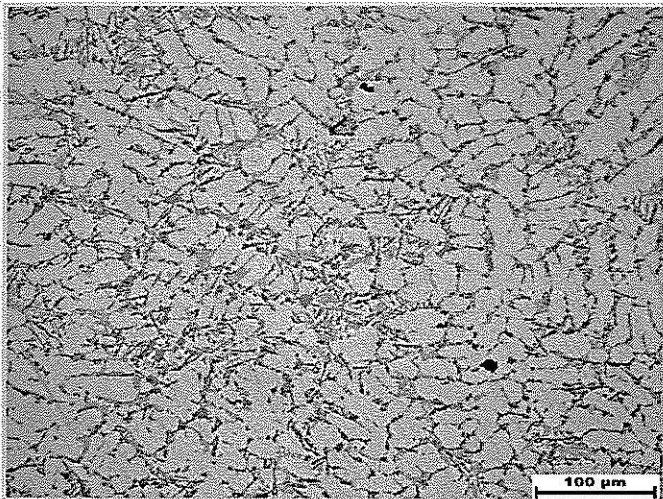
Degassing Condition	MDF04
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°

รูปที่ 5.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมอินกอต 80% + เศษขี้กิ้ง 20% กำจัดก๊าซ+
ฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (MDF-04) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน



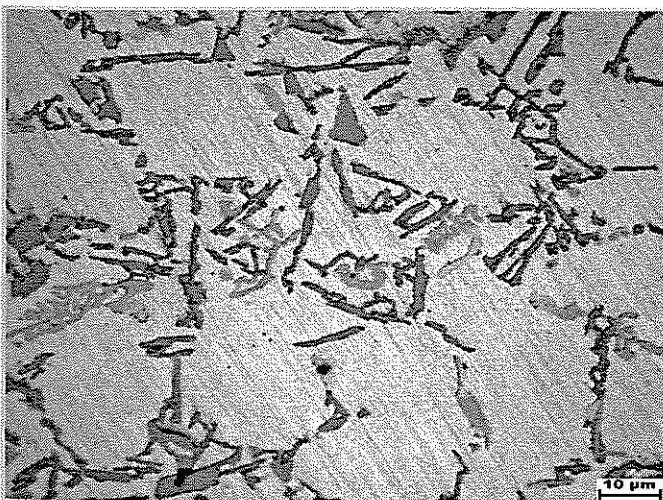
รูปที่ 5.14 A โครงสร้างจุลภาค
Al 356 ingot 80%+Al chip 20%
ที่กำลังขยาย 5X

Degassing Condition	MDF05
Gas flow rate (l/min)	15/10
Flux/degas time (min)	5/5
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°



รูปที่ 5.14 B โครงสร้างจุลภาค
Al 356 ingot 80%+Al chip 20%
ที่กำลังขยาย 20X

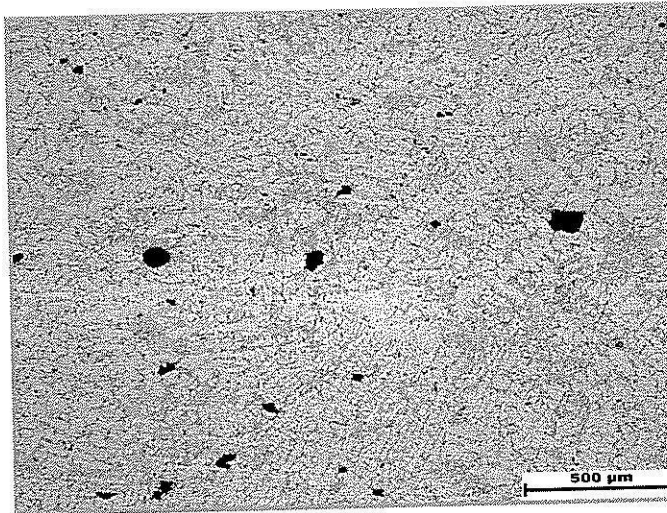
Degassing Condition	MDF05
Gas flow rate (l/min)	15/10
Degassing time (min)	5/5
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°



รูปที่ 5.14 C โครงสร้างจุลภาค
Al 356 ingot 80%+Al chip 20%
ที่กำลังขยาย 100X

Degassing Condition	MDF05
Gas flow rate (l/min)	15/10
Flux/degas time (min)	5/5
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°

รูปที่ 5.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมอินกอต 80%+ เศษขี้กิ้ง 20% กำจัดก๊าซ+ ฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary มีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (MDF-05) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

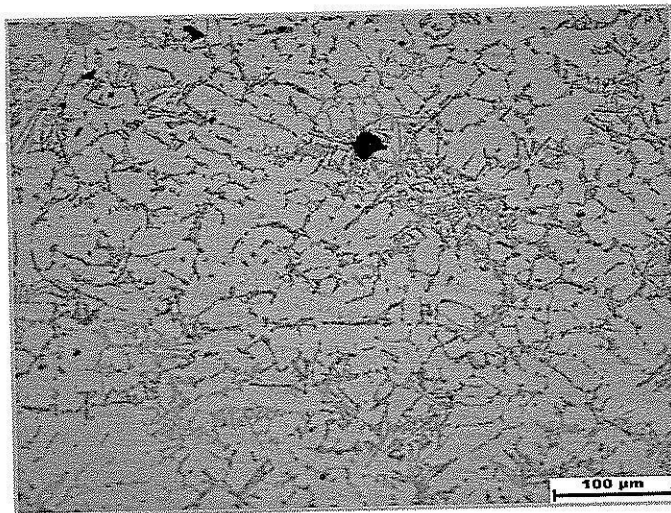


รูปที่ 5.15 A โครงสร้างจุลภาค

Al 356 ingot 80%+Al chip 20%

ที่กำลังขยาย 5X

Degassing Condition	MDF06
Gas flow rate (l/min)	15/10
Flux/degas time (min)	5/15
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°



รูปที่ 5.15 B โครงสร้างจุลภาค

Al 356 ingot 80%+Al chip 20%

ที่กำลังขยาย 20X

Degassing Condition	MDF06
Gas flow rate (l/min)	15/10
Flux/degas time (min)	5/15
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°



รูปที่ 5.15 C โครงสร้างจุลภาค

Al 356 ingot 80%+Al chip 20%

ที่กำลังขยาย 100X

Degassing Condition	MDF06
Gas flow rate (l/min)	15/10
Flux/degas time (min)	5/15
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°

รูปที่ 5.15 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมอินกอต 80% + เศษขี้กิ้ง 20% ทำจัดก๊าซ+ ถัดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary มีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (MDF-05) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

5.3.3 ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุน

ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในเบ้าเซรามิก ก่อนและหลังการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้างพบว่า การหล่อโดยใช้อะลูมิเนียมอินกอต 100% (MDF01) นั้นสามารถพบรูพรุนอันเนื่องมาจากก๊าซกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 5.16 การเติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมลงไปในส่วน 20% (MDF02) ทำให้รูพรุนดังกล่าวมีขนาดใหญ่ขึ้นมากดังรูปที่ 15.7 ซึ่งเป็นอันตรายต่อสมบัติเชิงกล

กระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ (ชิ้นงานหล่อ MDF04-MDF06) ให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซที่ดีเมื่อเปรียบเทียบปริมาณและลักษณะของรูพรุนที่พบ เปรียบเทียบกับชิ้นงานผสมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียม 20% โดยไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ แต่อย่างไรก็ดีกระบวนการดังกล่าวไม่สามารถกำจัดก๊าซได้ทั้งหมดและยังมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรในการปั่นก๊าซอาร์กอนและฉีดฟลักซ์ คือ

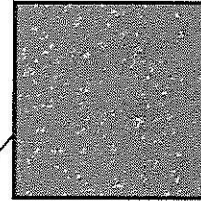
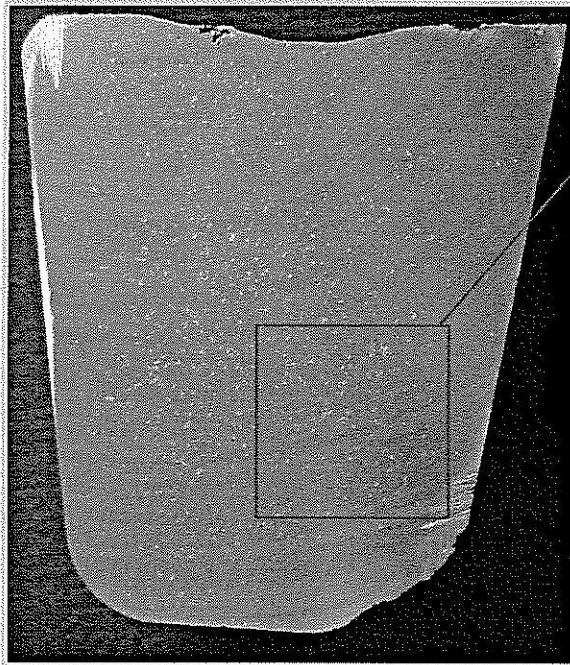
- 1) อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนหรือ Gas flow rate (l/min)
- 2) ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์หรือ Rotational speed (rpm)
- 3) ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์หรือ Fluxing and Degassing time (min)
- 4) องศาการเปิดควาล์วให้ฟลักซ์ไหลผ่านหรือ Flux opening degree (degree)

ซึ่งจากการทดลองพบว่า หากทำการกำจัดก๊าซเพียงอย่างเดียวโดยไม่ฉีดฟลักซ์โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาที, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาที จะให้น้ำโลหะไม่เกิดความปั่นป่วนระหว่างการกำจัดก๊าซ ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซที่ดีกว่ามาก และยิ่งเพิ่มเวลาในการกำจัดก๊าซจาก 10 นาที เป็น 20 นาที จะลดปริมาณรูพรุนในชิ้นงานได้มากขึ้นอีก แต่เนื่องจากการทดลองซึ่งต้องฉีดฟลักซ์พร้อมการกำจัดก๊าซนั้นต้องการอัตราการไหลของก๊าซที่มากเพียงพอ ที่จะผลักดันเอาฟลักซ์จากถังฟลักซ์ซึ่งติดอยู่ด้านข้างเคลื่อนที่ตามท่อไฮดรอลิกส์ขึ้นไปยังหัวปั่นท่อแกรไฟต์ ดังนั้น การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์จึงไม่สามารถกระทำได้ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 10 ลิตร/นาที แต่ต้องทำการทดลองที่ 15 ลิตร/นาที จึงมีผลทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำโลหะระหว่างการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ ดังนั้นจึงทำให้ชิ้นงานที่ทำการกำจัดก๊าซแบบ Rotary พร้อมการฉีดฟลักซ์ยังคงมีปริมาณรูพรุนหลงเหลืออยู่ ไม่สามารถกำจัดออกได้ทั้งหมด แต่อย่างไรก็ดี พบว่าขนาดของรูพรุนนั้นมีความละเอียดมากกว่าในกรณีที่ไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซ ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบปริมาณรูพรุนในชิ้นงานหล่อ โดยใช้วิธีการนับจำนวนรูพรุนจากภาพถ่ายในพื้นที่ $2 \times 2 \text{ cm}^2$ แสดงรูปที่ 5.22 และในตารางที่ 5.4 เพื่อใช้ประกอบในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 15 ลิตร/นาที่, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาที่ และระยะเวลาในการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ = 5 นาที (MDF04) พบว่าขนาดรูพรุนเล็กละเอียดมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ และเมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการกำจัดก๊าซภายหลังการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์อีก 5 นาที (อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 15 ลิตร/นาที่, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาที่ และระยะเวลาในฉีดฟลักซ์ = 5 นาที + กำจัดก๊าซ = 5 นาที, MDF05) พบว่าขนาดของรูพรุนเล็กละเอียดขึ้นแต่ทำให้ปริมาณของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อทดลองเพิ่มระยะเวลาในการกำจัดก๊าซภายหลังการฉีดฟลักซ์อีก 15 นาที (อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน = 15 ลิตร/นาที่, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ = 1000 รอบ/นาที่ และระยะเวลาในการฉีดฟลักซ์ = 5 นาที + กำจัดก๊าซ = 15 นาที, MDF06) พบว่าปริมาณรูพรุนลดลงประมาณ 25% แต่ขนาดของรูพรุนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซเพิ่มขึ้นภายหลังการฉีดฟลักซ์ จะทำให้ปริมาณรูพรุนลดลง โดยจะใช้เวลาในการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ทั้งหมด 20 นาที แต่อย่างไรก็ดีก็ยังไม่สามารถกำจัดปริมาณรูพรุนในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมได้หมด การกำจัดก๊าซโดยวิธี Rotary ทำให้ฟองก๊าซอาร์กอนเล็กละเอียดมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Lance แต่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่สูงเกินไป (15 ลิตร/นาที่) กลับทำให้เกิดความปั่นרבวนน้ำโลหะจึงทำให้เกิดการละลายกลับของก๊าซไฮโดรเจนระหว่างการทดลอง ดังนั้น ปัจจัยที่สำคัญในการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ คือ การฉีด ฟลักซ์ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนน้อยที่สุดที่จะไม่ทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำโลหะระหว่างการทดลอง และจากการทดสอบโดยการกำจัดก๊าซเพียงอย่างเดียว พบว่าการใช้อัตราการไหลของก๊าซที่ 10 ลิตร/นาที่ จะให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณรูพรุนสูงที่สุด (ตารางที่ 5.6) ซึ่งไม่สามารถทำได้จากเครื่องฉีดฟลักซ์ที่ติดตั้งฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (เนื่องจากอุปสรรคเรื่ององศาของฟลักซ์ขึ้นสู่ชุดหัวจับ แกรไฟต์)

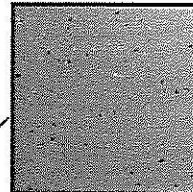
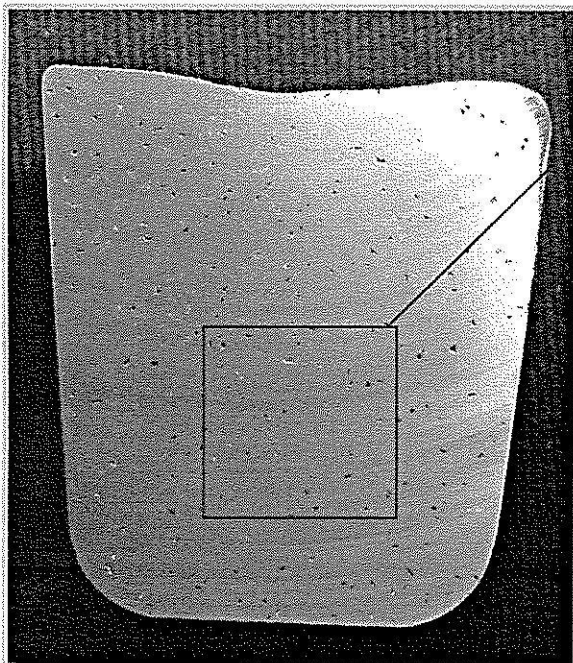
ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาเครื่องฉีดฟลักซ์ขนาดเล็กซึ่งสามารถนำมาติดตั้งที่ปลายของชุดหัวจับแกรไฟต์ของเครื่องกำจัดก๊าซเคลื่อนที่ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 5.4 ต่อไป



รูปที่ 15.16 ภาคตัดขวางของชิ้นงาน
หล่อเบ้าเซรามิกโดยใช้ 100%

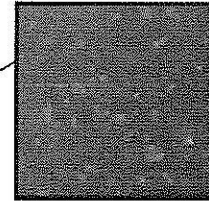
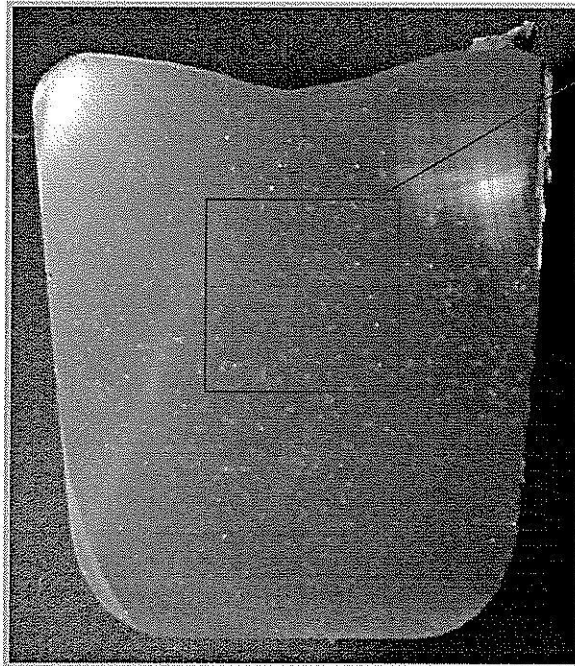
Aluminium 356 ingot

Degassing Condition	MDF01
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-



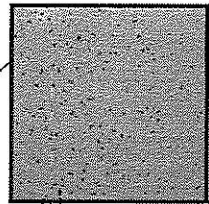
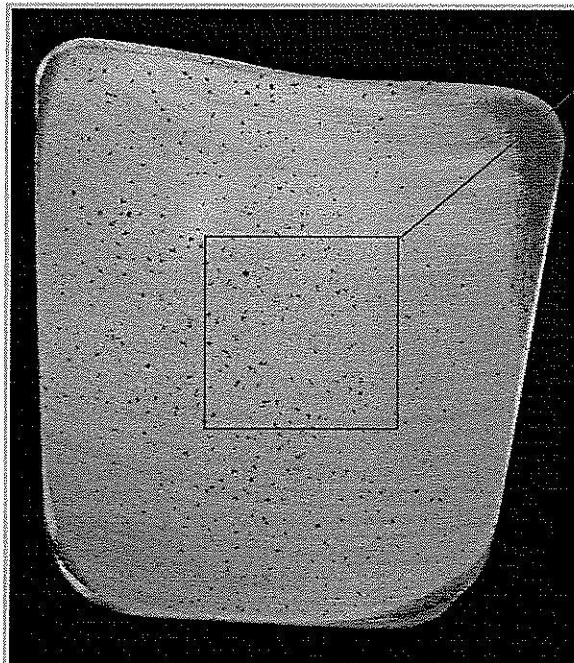
รูปที่ 15.17 ภาคตัดขวางของชิ้นงาน
หล่อเบ้าเซรามิกโดยใช้ Al 356 ingot
80% + Al chip 20%

Degassing Condition	MDF02
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-



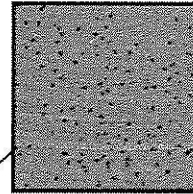
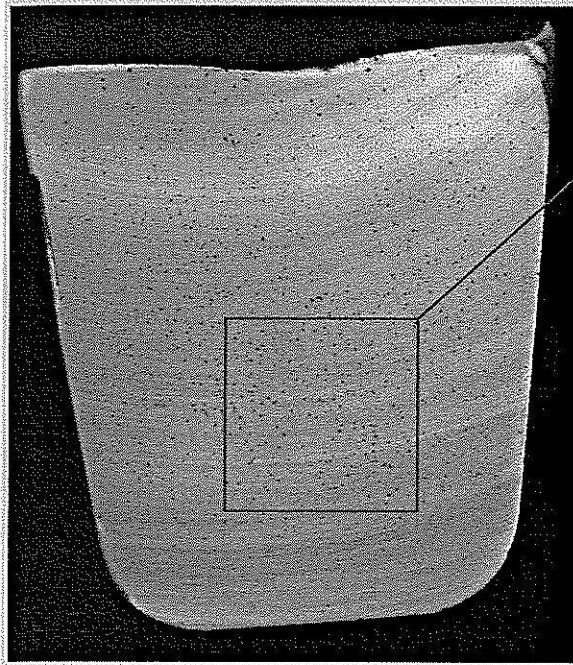
รูปที่ 15.18 ภาควัดขวางของชิ้นงาน
หล่อเบ้าเซรามิกโดยใช้ Al 356 ingot
80% + Al chip 20%

Degassing Condition	MDF03
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation Speed (rpm)	1,000



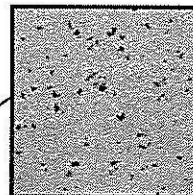
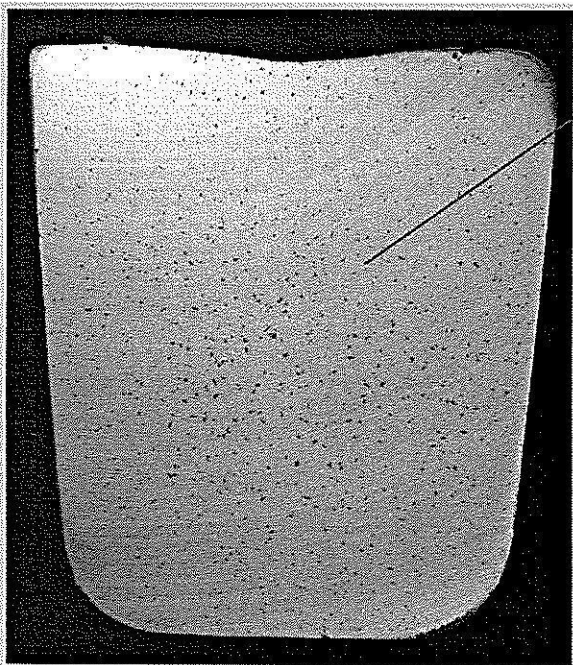
รูปที่ 15.19 ภาควัดขวางของชิ้นงาน
หล่อเบ้าเซรามิกโดยใช้ Al 356 ingot
80% + Al chip 20%

Degassing Condition	MDF04
Gas flow rate (l/min)	15
Degassing time (min)	5
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°



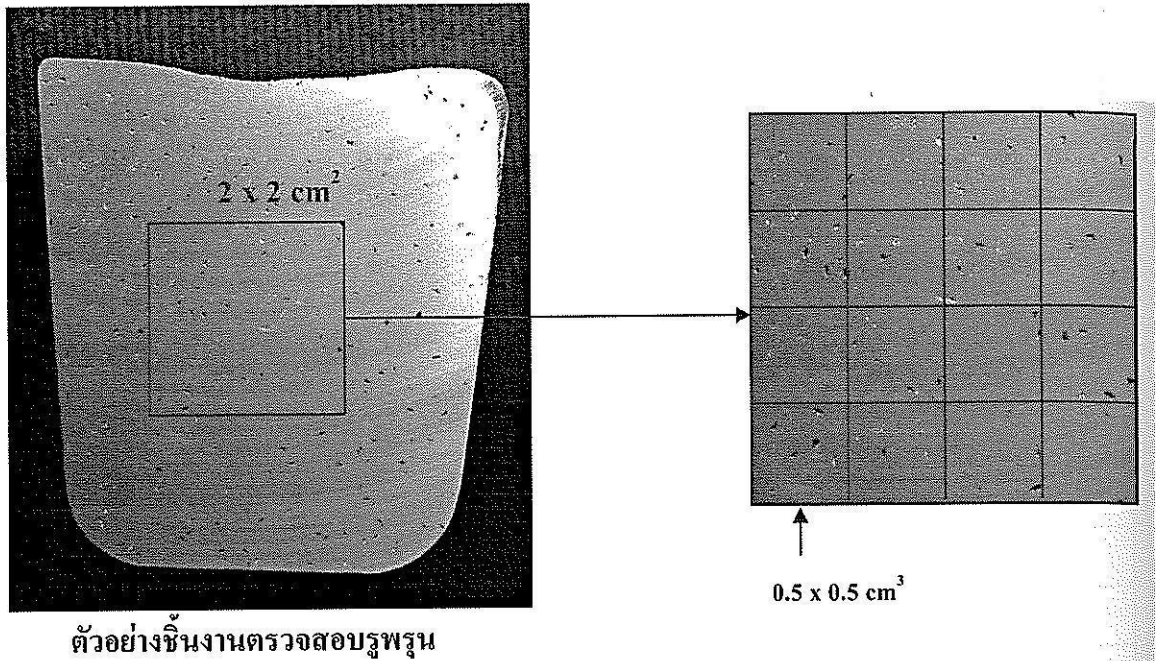
รูปที่ 15.20 ภาคตัดขวางของชิ้นงาน
หล่อเบ้าเซรามิกโดยใช้ Al 356 ingot
80% + Al chip 20%

Degassing Condition	MDF05
Gas flow rate (l/min)	15/10
Flux/degas time (min)	5/5
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°



รูปที่ 15.21 ภาคตัดขวางของชิ้นงาน
หล่อเบ้าเซรามิกโดยใช้ Al 356 ingot
80% + Al chip 20%

Degassing Condition	MDF06
Gas flow rate (l/min)	15/10
Flux/degas time (min)	5/15
Rotation Speed (rpm)	1,000
Flux opening degree	20°



รูปที่ 5.22 การวัดปริมาณรูพรุนจากภาพถ่ายในพื้นที่ $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ของชิ้นงานหล่อในเบ้าเซรามิก

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุนบนพื้นที่ $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานหล่อในเบ้าเซรามิก

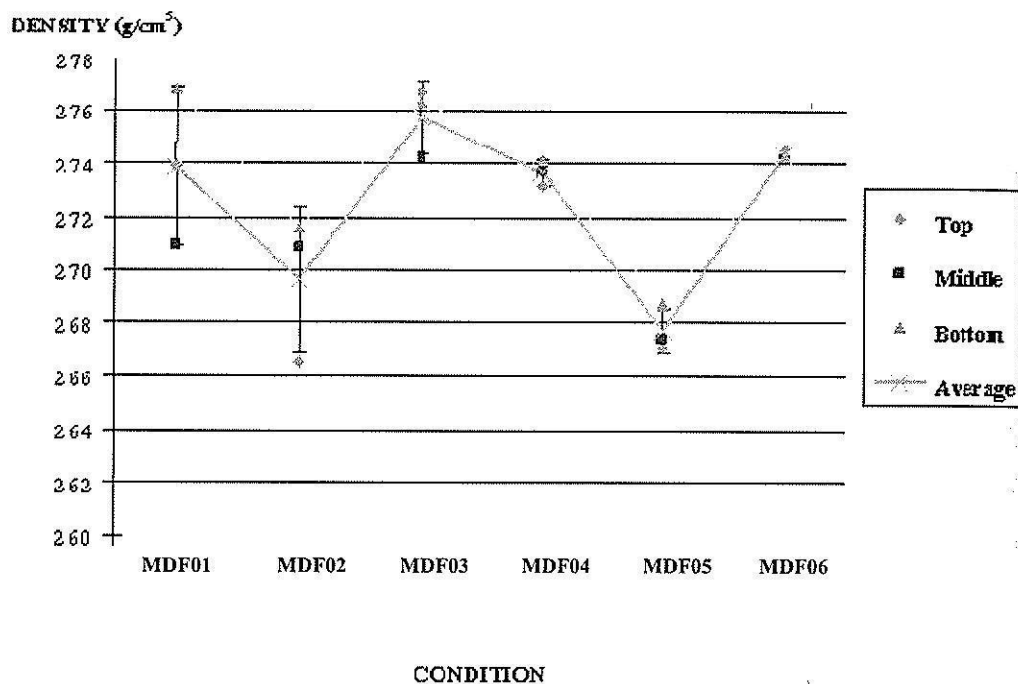
Melt	ชั้นที่	จำนวนรูพรุน																Average	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		รวม
MDF01	1	13	20	15	13	12	13	12	10	16	14	13	10	17	10	12	12	212	218
	2	10	17	12	10	13	18	20	15	10	19	14	16	13	13	13	10	223	
MDF02	1	2	3	8	5	4	4	5	2	7	1	5	5	0	5	3	2	61	58
	2	5	3	4	3	9	3	4	2	1	2	0	4	4	5	3	3	55	
MDF03	1	6	4	7	2	6	3	4	1	4	6	5	4	5	2	4	5	68	58
	2	3	4	3	2	5	2	3	3	0	3	4	5	3	0	5	3	48	
MDF04	2	7	7	5	6	6	9	10	12	7	5	8	5	6	5	6	5	109	118
	4	11	10	8	11	9	9	6	10	7	12	6	4	5	7	9	7	131	
MDF05	1	21	14	15	11	27	24	18	16	27	19	21	16	12	10	7	15	273	288
	2	24	21	17	20	17	18	21	23	13	17	18	12	21	16	24	21	303	
MDF06	1	14	15	19	11	15	11	19	8	13	12	8	15	22	21	18	16	237	218
	2	13	17	13	12	14	14	9	7	11	18	11	11	12	14	18	9	203	

5.3.4 ความหนาแน่นของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม

เมื่อทำการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมก่อนและหลังการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์โดยใช้หลักการของ Archimedes ได้ผลแสดงในตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.23 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความหนาแน่นที่ตรวจสอบได้สอดคล้องกับปริมาณและขนาดรูพรุนที่พบในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม ชิ้นงาน MDF02 ที่ไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์มีความหนาแน่นที่น้อยที่สุด (2.69 g.cm^{-3}) โดยที่ชิ้นงาน MDF03 ที่กำจัดก๊าซเพียงอย่างเดียวจะมีค่าความหนาแน่นที่มากที่สุด (2.76 g.cm^{-3}) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

ตารางที่ 5.5 ความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธีโดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง โดยตัดชิ้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่ง บน กลาง และล่าง

Condition	Density (g/cm^3)				
	Top	Middle	Bottom	Average	SD
MDF01 : 100% Aluminium Ingot 356 , Non degas	2.7395	2.7092	2.7689	2.7393	0.030
MDF02 : 80%Al 356 ingot+20%Al chip, Non-degas	2.6652	2.7082	2.7155	2.6963	0.027
MDF03 : Degas 15 l/min -5 min -1000 rpm	2.7674	2.7424	2.7633	2.7577	0.013
MDF04 : Degas+Flux 15 l/min-10 min-1000 rpm	2.7314	2.7371	2.7418	2.7367	0.005
MDF05 : Degas+Flux 10/15 l/min-5/5 min-1000 rpm	2.6707	2.6741	2.6875	2.6774	0.009
MDF06 : Degas+Flux 10/15 l/min-15/5 min-1000 rpm	2.7457	2.7415	2.7429	2.7434	0.002



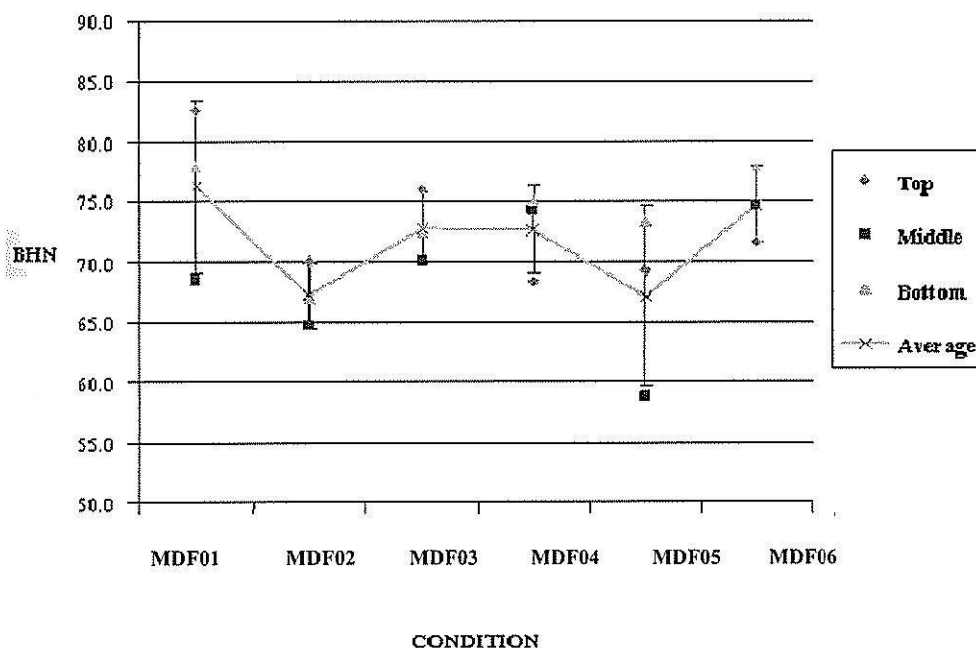
รูปที่ 5.23 ความหนาแน่นของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน โดยตัดชิ้นงานทดสอบจากตำแหน่ง บน กลาง และล่าง

5.3.5 สมบัติความแข็ง (Brinell hardness) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม

ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหล่อ (ตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.24) แสดงความสัมพันธ์กับผลการทดลองปริมาณและขนาดของรูพรุน รวมทั้งความหนาแน่นของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ชิ้นงาน MDF02 ที่ไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์แสดงค่าความแข็งที่ต่ำกว่าสภาวะการทดลองอื่นๆ โดยที่การกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ (MDF06) ให้ค่าความแข็งที่มากที่สุด

ตารางที่ 5.6 ค่าความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธีโดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง โดยตัดชิ้นงานทดสอบจากตำแหน่ง บน กลาง และล่าง

Condition	Top	Middle	Bottom	Average	SD
MDF01 : 100% Aluminom Ingot 356 , Non degas	82.63	68.33	77.73	76.23	7.27
MDF02 : 80%Al 356 ingot+20%Al chip, Non-degas	69.93	64.63	66.83	67.13	2.66
MDF03 : Degas 15 l/min -5 min -1000 rpm	75.90	69.90	72.43	72.74	3.01
MDF04 : Degas+Flux 15 l/min-10 min-1000 rpm	68.33	74.13	75.06	72.51	3.65
MDF05 : Degas+Flux 10/15 l/min-5/5 min-1000 rpm	69.13	58.80	73.26	67.06	7.45
MDF06 : Degas+Flux 10/15 l/min-15/5 min-1000 rpm	71.50	74.60	77.73	74.61	3.12



รูปที่ 5.24 ความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธีโดยมีถัง ฟลักซ์อยู่ด้านข้าง โดยตัดชิ้นงาน ณ ตำแหน่ง บน กลาง และล่าง

5.3.6 สมบัติแรงดึง (Tensile properties) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม

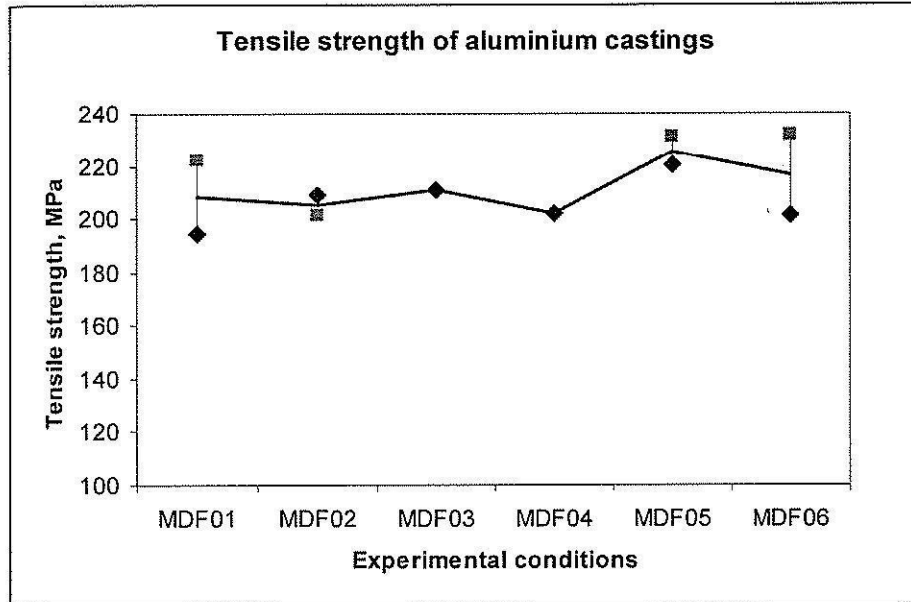
ผลการทดสอบสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่หล่อจากแม่พิมพ์ที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ที่ผ่านการกำจัดก๊าซโดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้างแสดงดังตารางที่ 5.7 และรูปที่

5.25-5.26 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ที่มีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (MDF05-06) จะให้ค่าความแข็งแรงแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Tensile elongation) ที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ไม่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ (MDF01-02)

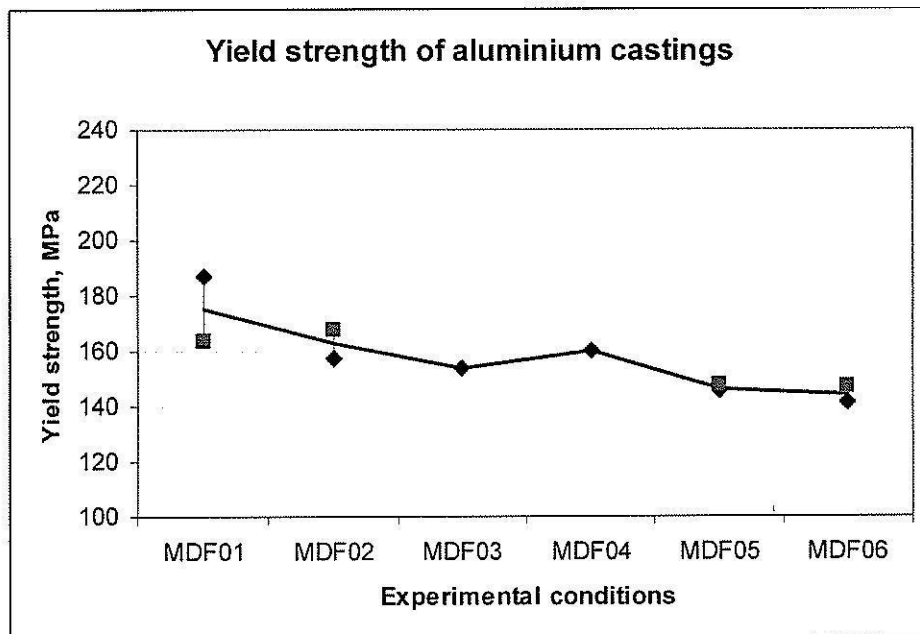
จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า การฉีดฟลักซ์โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้างต้องทำการฉีดฟลักซ์ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 15 ลิตร/นาที่ หากการฉีดฟลักซ์ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ต่ำกว่าค่าดังกล่าว จะทำให้เกิดปัญหาการตกค้างของผงฟลักซ์ในท่อส่งฟลักซ์ทำให้ไม่สามารถฉีดฟลักซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ปริมาณฟลักซ์ที่ต้องการฉีดน้อยกว่าปริมาณที่กำหนดไว้ ดังนั้นในการทดลอง MDF04-06 จึงทำการฉีดฟลักซ์โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 15 ลิตร/นาที่ แต่อย่างไรก็ดี การฉีดฟลักซ์ด้วยอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 15 ลิตร/นาที่ นั้นทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ ยังเกิดการกระเด็นของน้ำโลหะออกมาจากนอกเตาหลอมดังแสดงในผลการทดลอง MDF04 ซึ่งจะแสดงค่าสมบัติแรงดึงที่ต่ำกว่าในทุกสภาวะการทดลอง ดังนั้นการฉีดฟลักซ์ในกรณีนี้จึงถูกจำกัดเวลาเพียง 5 นาที

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าสมบัติแรงดึงของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธีโดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง

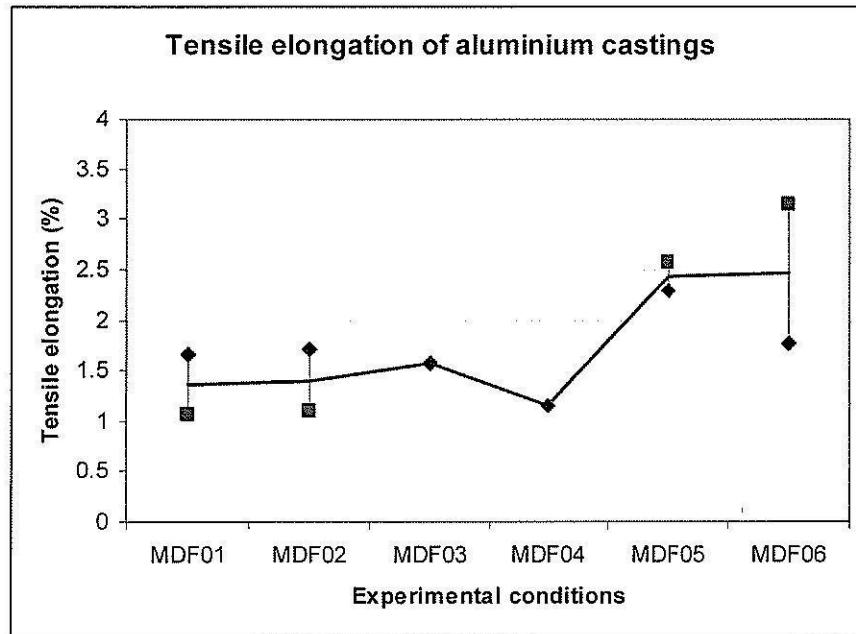
Test conditions	Tensile properties		
	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Tensile elongation (%)
MDF01 : 100% Alumonium Ingot 356 , Non degas	208.5	175.3	1.36
MDF02 : 80%Al 356 ingot+20%Al chip, Non-degas	205.2	162.4	1.41
MDF03 : Degas 15 l/min -5 min -1000 rpm	210.6	153.7	1.57
MDF04 : Degas+Flux 15 l/min-10 min-1000 rpm	201.7	159.8	1.16
MDF05 : Degas+Flux 10/15 l/min-5/5 min-1000 rpm	225.6	146.5	2.43
MDF06 : Degas+Flux 10/15 l/min-15/5 min-1000 rpm	216.6	143.9	2.46



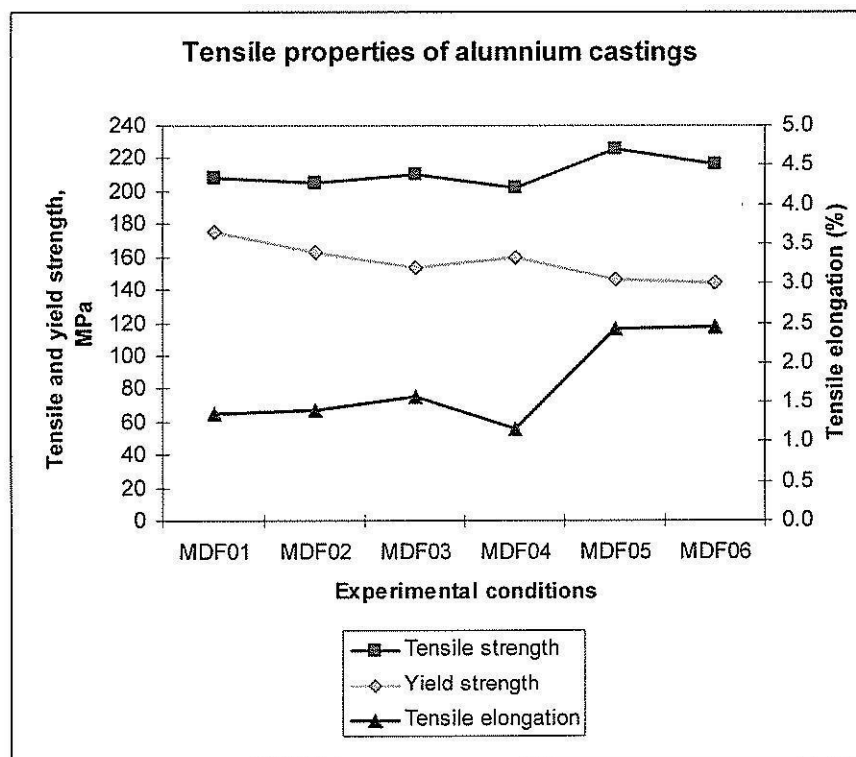
รูปที่ 5.25 (a) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธีโดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง



รูปที่ 5.25 (b) ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธีโดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง



รูปที่ 5.25 (c) เปอร์เซนต์การยืดตัว (%Tensile elongation) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อจากแม่พิมพ์ที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธีโดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง



รูปที่ 5.26 สมบัติแรงดึง (Tensile properties) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ก่อน-หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ด้วยวิธีโดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง

5.4 ผลและการวิเคราะห์การกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบน

สภาวะการทดลองในการกำจัดก๊าซผสมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบน (ตารางที่ 4.4) จะให้ผลการทดลองที่สามารถเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค ปริมาณรูพรุน ความหนาแน่น และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ไม่ผ่านการกำจัดก๊าซ (MDFT01) กับที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT02-05) โดยแต่ละกรณีจะทำการหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบนและด้านล่าง และใช้ฟลักซ์ที่เป็นผงและเป็นเม็ดเปรียบเทียบกัน

5.4.1 ปริมาณธาตุผสม

ปริมาณธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม ก่อนและหลังการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบนแสดงในตารางที่ 5.8 ปริมาณของซิลิคอนควบคุมในช่วง 6.5-7.5 wt% ส่วนปริมาณของแมกนีเซียมถูกควบคุมอยู่ในช่วง 0.25-0.45 wt% ผลการวิเคราะห์แสดงปริมาณธาตุผสมของทองแดง เหล็ก และสังกะสีที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากปริมาณเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมที่ใช้มีธาตุผสมเหล่านี้อยู่พอสมควร

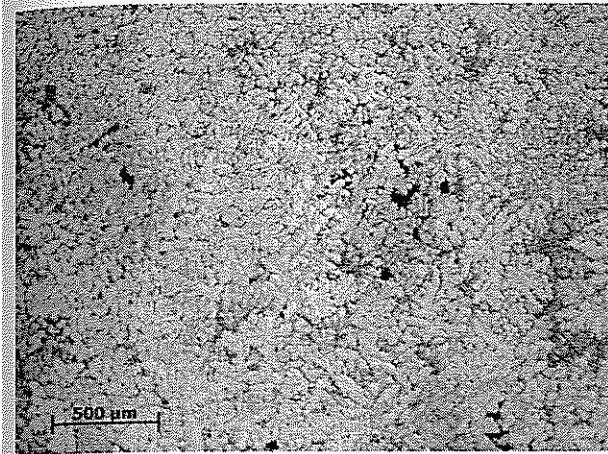
ตารางที่ 5.8 แสดงปริมาณธาตุผสมของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมภายหลังการกำจัดก๊าซ

ไฮโดรเจนผสมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Rotary โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบน

Element	Al 356	Al Ingot	Al chip	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

5.4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ

โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 5.27-5.31 ที่กำลังขยายต่างๆ ณ ตำแหน่งตรงกึ่งกลางของแท่งชิ้นงานหล่อ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานของอะลูมิเนียมปฏุมภูมิเป็นเดนไดรท์ล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมประเภทไฮโปยูเทคติกนอกจากนี้ยังพบโครงสร้าง Blade-like structure เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมมีธาตุเหล็กอยู่ในปริมาณที่สูงพอสมควร สำหรับชิ้นงานหล่อ MDFT01 ซึ่งหล่อโดยใช้อะลูมิเนียมอินกอต 80% + เศษซึ่กลึงอะลูมิเนียม 20% โดยไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์พบรูพรุนจำนวนมากและรูพรุนมีขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.27 โดยลักษณะรูพรุนดังกล่าวแสดงถึงรูพรุนที่เกิดจากก๊าซร่วมกับโพรงหดตัวของชิ้นงานหลอระหว่างการผลิต และเมื่อทำการกำจัดก๊าซโดยร่วมกับการฉีด ฟลักซ์ทั้งชนิดผง (0.25%) และชนิดเม็ด (0.125%) ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 10 ลิตร/นาที่, ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ 1000 รอบ/นาที่ และระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ 10 และ 20 นาที พบว่าปริมาณรูพรุนลดลงทั้งสิ้น

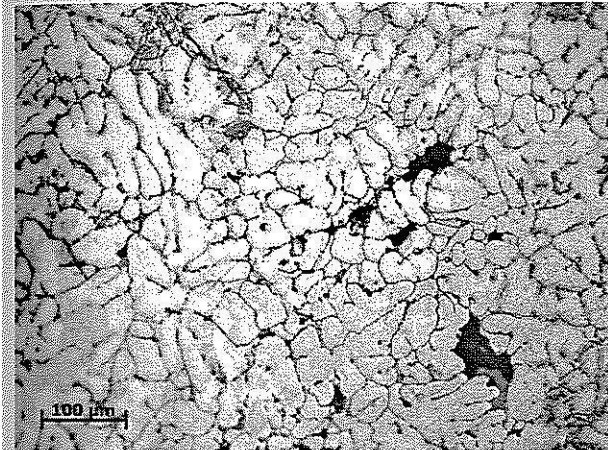


รูปที่ 5.27 A โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 5X

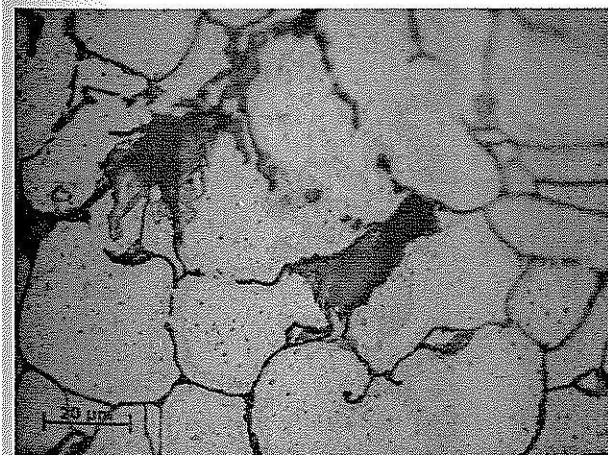
Degassing Condition	MDFT01
Gas flow rate (l/min)	-
Degassing time (min)	-
Rotation Speed (rpm)	-
Flux type	-
Flux content	-



รูปที่ 5.27 B โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 20X

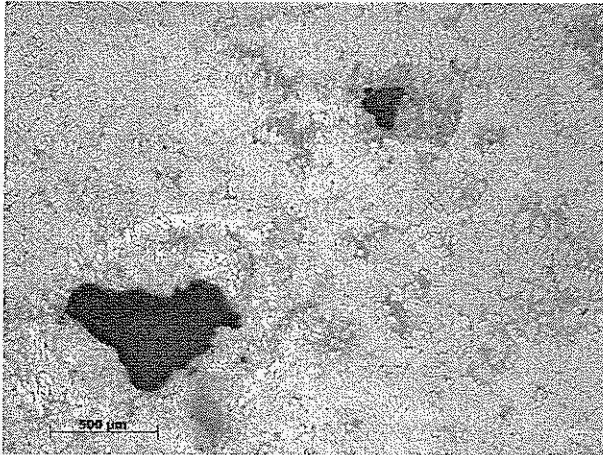


รูปที่ 5.27 C โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 50X

รูปที่ 5.27 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยมีถัง ฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT01) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

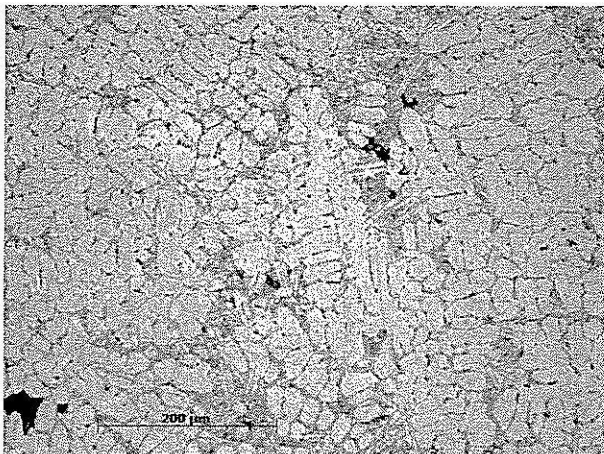


รูปที่ 5.28 A โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 5X

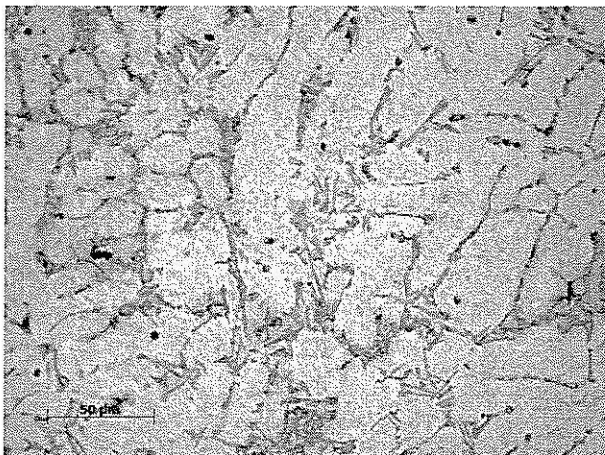
Degassing Condition	MDFT02
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Powder
Flux content	0.25%



รูปที่ 5.28 B โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 20X

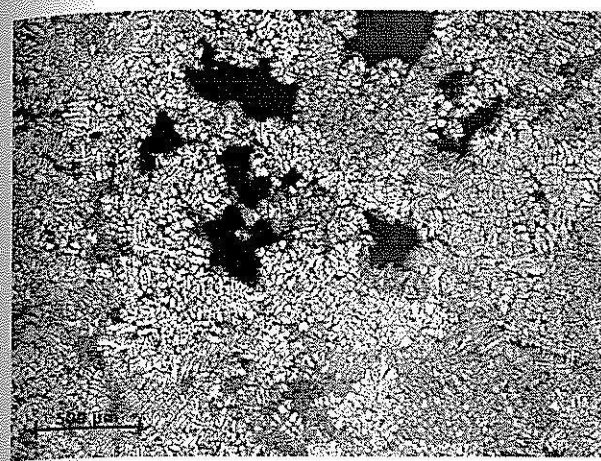


รูปที่ 5.28 C โครงสร้างจุลภาค

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 50X

รูปที่ 5.28 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบนหลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยมีถัง ฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT02) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

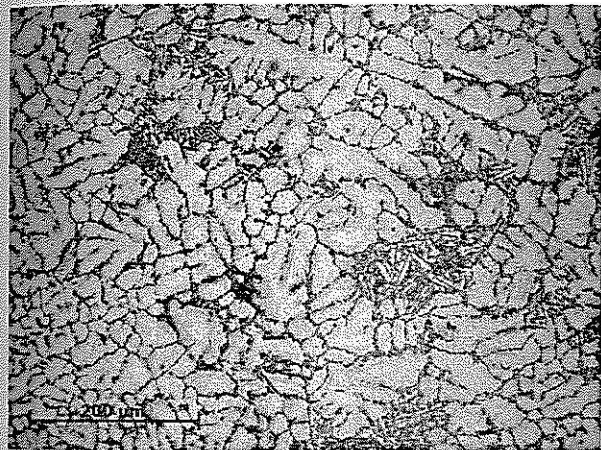


รูปที่ 5.29 A โครงสร้างจุลภาค MDFT03

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 5X

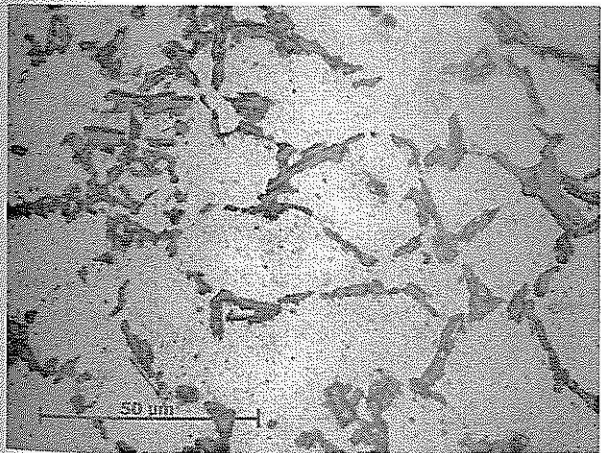
Degassing Condition	MDFT03
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	20
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Powder
Flux content	0.25%



รูปที่ 5.29 B โครงสร้างจุลภาค MDFT03

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 20X

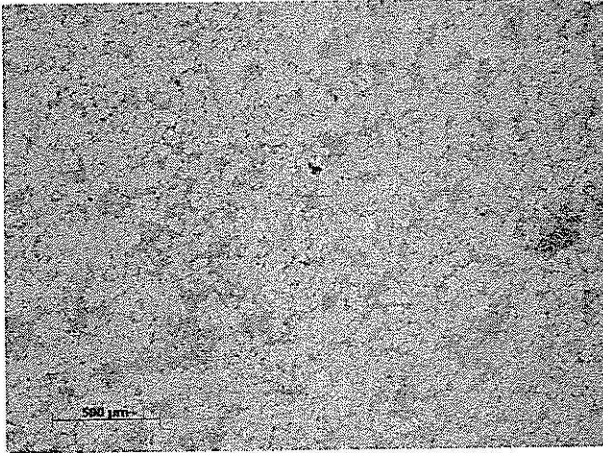


รูปที่ 5.29 C โครงสร้างจุลภาค MDFT03

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 50X

รูปที่ 5.29 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยมีถัง ฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT03) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

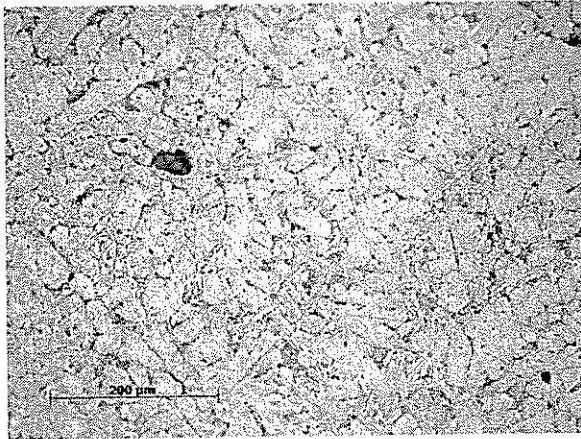


รูปที่ 5.30 A โครงสร้างจุลภาค MDFT04

80% Al 356 ingot + 20% Alchip

ที่กำลังขยาย 5X

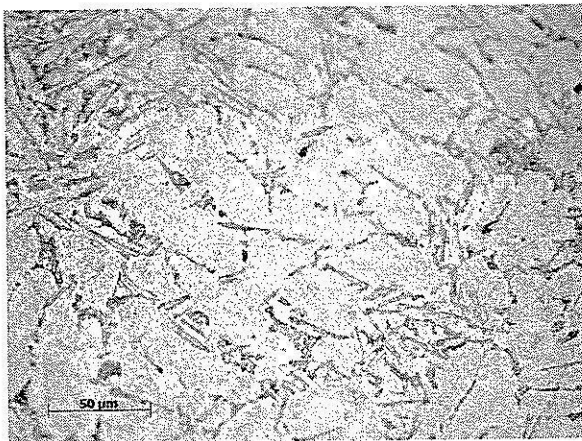
Degassing Condition	MDFT04
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	10
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Granular
Flux content	0.125%



รูปที่ 5.30 B โครงสร้างจุลภาค MDFT04

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 20X

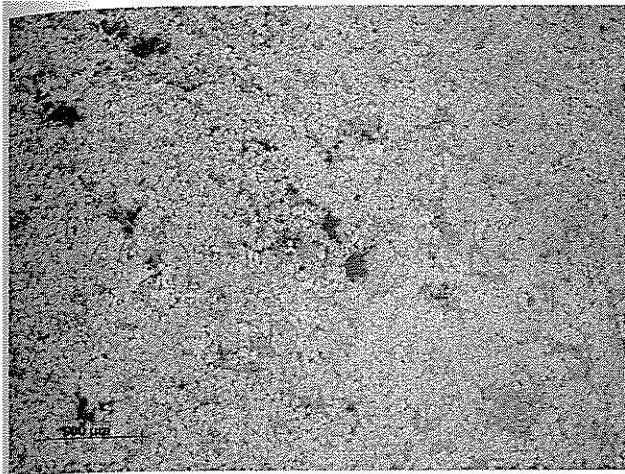


รูปที่ 5.30 C โครงสร้างจุลภาค MDFT04

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 50X

รูปที่ 5.30 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยมีถัง ฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT04) ณ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน

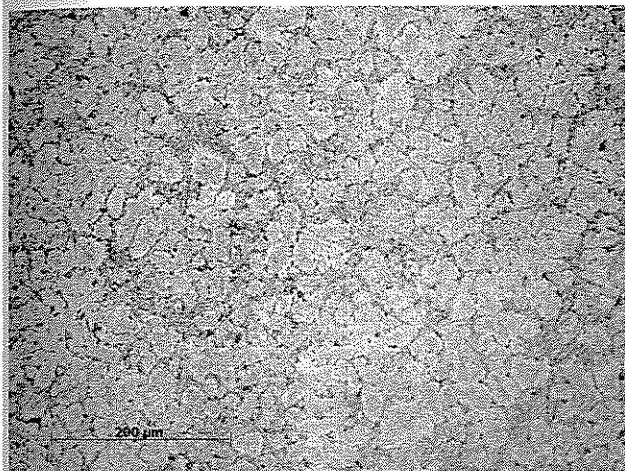


รูปที่ 5.31 A โครงสร้างจุลภาค MDFT05

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 5X

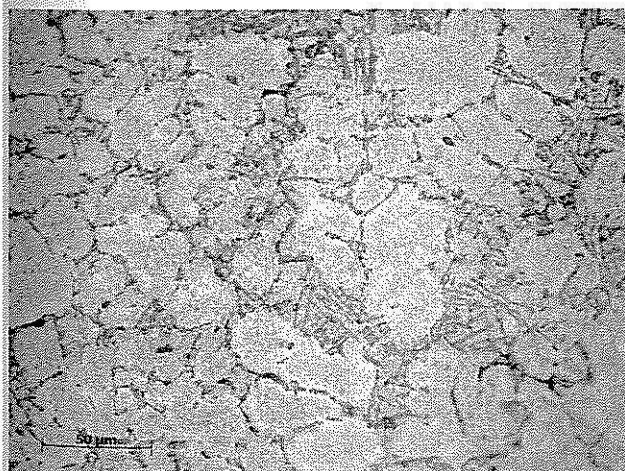
Degassing Condition	MDFT05
Gas flow rate (l/min)	10
Degassing time (min)	20
Rotation Speed (rpm)	1000
Flux type	Granular
Flux content	0.125%



รูปที่ 5.31 B โครงสร้างจุลภาค MDFT05

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 20X



รูปที่ 5.31 C โครงสร้างจุลภาค MDFT05

80% Al 356 ingot + 20% Al chip

ที่กำลังขยาย 50X

รูปที่ 5.31 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจาก
ด้านบน หลังการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์โดยมีถัง ฟลักซ์อยู่ด้านบน (MDFT05) ณ ตำแหน่งกลาง
ชิ้นงาน

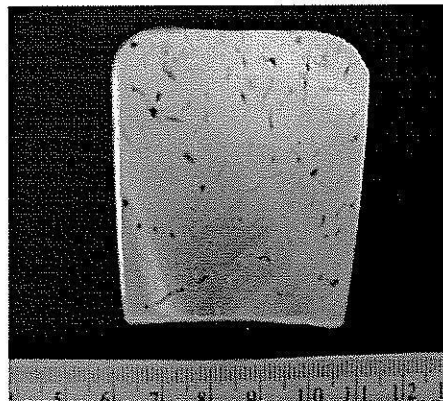
5.4.3 ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหล่อ

ผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุนในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม จากการทดสอบการแข็งตัวของชิ้นงานในอากาศเปรียบเทียบกับการแข็งตัวของชิ้นงานในสุญญากาศ ที่ความดันต่ำกว่าความดันปกติ 100 และ 650 mmHg โดยใช้หลักการ Reduced pressure test พบว่า หากชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมที่มีการเติมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียม 20% และไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนดั่งในสถานะ MDFT01 จะทำให้ชิ้นงานหล่อที่ได้มีรูพรุนจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 5.32 จะสังเกตเห็นได้ว่า ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เย็นตัวในสุญญากาศนั้นมีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นโพรงยาวและแคบ นอกจากนี้ หากเปรียบเทียบที่ชิ้นงานที่แข็งตัวในอากาศและในสุญญากาศที่ 100 mmHg นั้นแสดงผลของปริมาณรูพรุนที่ใกล้เคียงกัน แต่ชิ้นงานที่แข็งตัวในสุญญากาศที่ 650 mmHg จะขยายผลของขนาดรูพรุนให้เห็นชัดเจนมากยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ ในสถานะการทดลอง MDFT02-05 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีปริมาณรูพรุนที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.33-5.36 และสถานะการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ที่สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซสูงสุด คือ สถานะ MDFT05 นั่นคือ ทำการกำจัดก๊าซที่ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ 1000 รอบ/นาที โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที พร้อมการฉีดฟลักซ์ชนิดเม็ด (Granular flux) โดยใช้เวลา 20 นาที

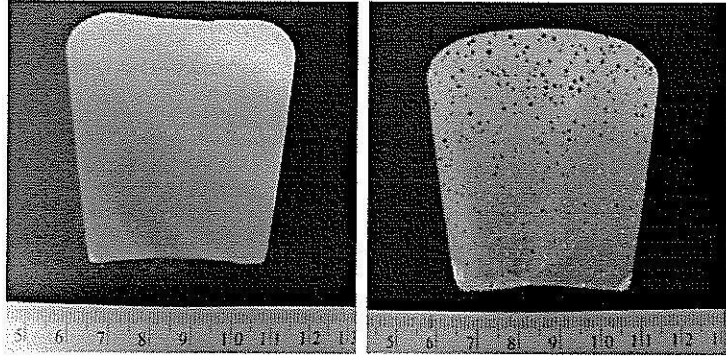
ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การกำจัดก๊าซที่เวลาเพิ่มขึ้นจาก 10 นาที เป็น 20 นาทีจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการที่ทำให้อะตอมไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำโลหะสามารถแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซอาร์กอนได้มากขึ้น ส่วนการเลือกใช้ชนิดของฟลักซ์ พบว่า ฟลักซ์ชนิดเม็ดจะให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณรูพรุนที่ดีกว่า อีกทั้งยังลดการฟุ้งกระจายระหว่างปฏิบัติงานอีกประการหนึ่งด้วย

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



รูปที่ 5.32 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT01 80% Al 356 ingot + 20% Al chip (Non-degassing) จากการทดสอบสุญญากาศ 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%

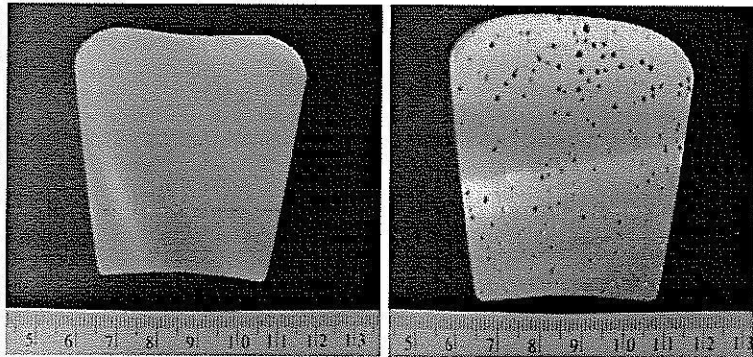


เย็นตัวในอากาศ

เย็นตัวในสุญญากาศ

รูปที่ 5.33 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT02 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศ 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%

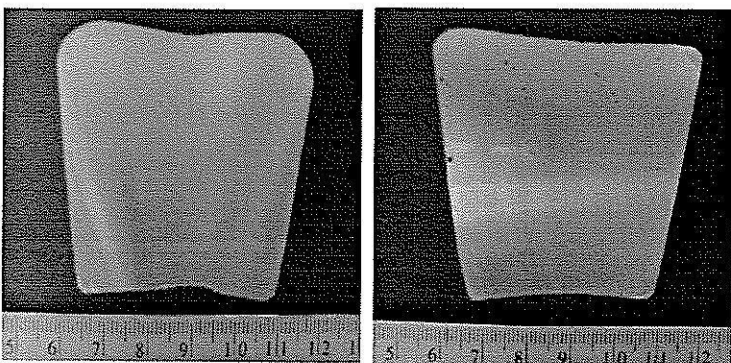


เย็นตัวในอากาศ

เย็นตัวในสุญญากาศ

รูปที่ 5.34 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT03 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศ 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%

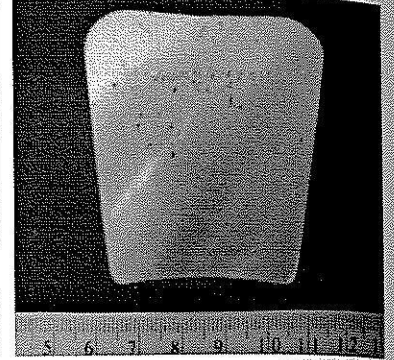
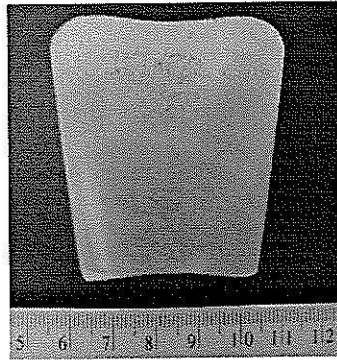


เย็นตัวในอากาศ

เย็นตัวในสุญญากาศ

รูปที่ 5.35 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT04 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศ 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 5.36 ภาพถ่ายปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน MDFT05 เย็นตัวในอากาศและสุญญากาศ 650 mmHg

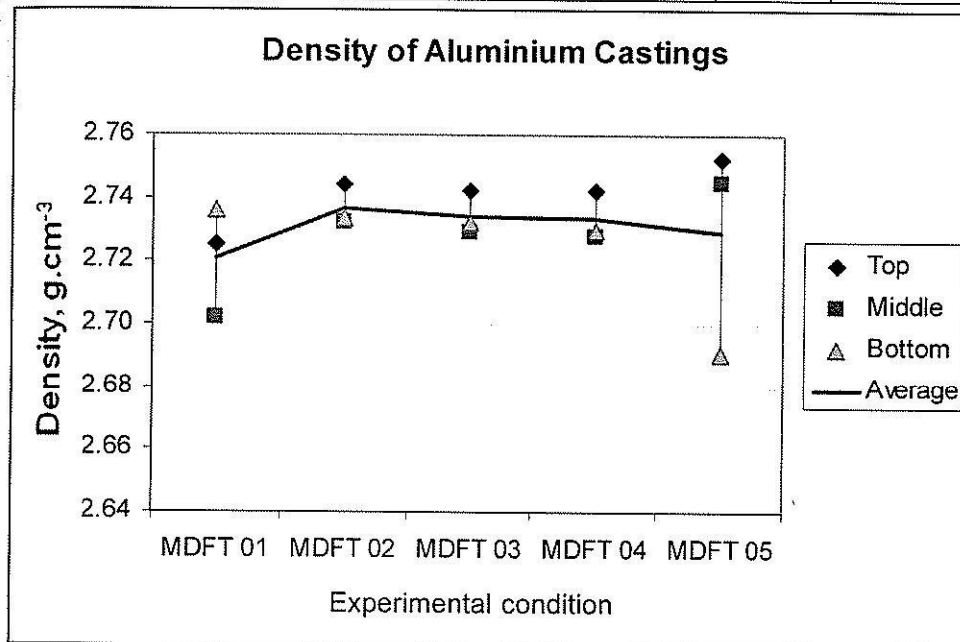
5.4.4 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ

เมื่อทำการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมที่ตำแหน่งบน กลางและล่าง โดยใช้หลักการของ Archimedes พบว่า ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อแปรผันกับสถานะที่ใช้ในการทดลองกำจัดก๊าซ หรือ แปรผันกับปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานนั่นเอง ดังแสดงในตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.37

เมื่อพิจารณาชิ้นงานหล่อที่ไม่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ พบว่ามีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.72 g.cm^{-3} (MDFT01) ซึ่งน้อยกว่าในชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ทุกสถานะการทดลอง คือ $2.73\text{-}2.74 \text{ g.cm}^{-3}$ ซึ่งทั้งนี้ก็เนื่องมาจากผลกระทบของปริมาณรูพรุนที่ตรวจพบในชิ้นงานหล่อนั่นเอง อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นที่วัดได้นั้น ไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณของไฮโดรเจน โดยตรงเนื่องจากทั้งรูพรุนจากก๊าซและรูพรุนจากการหดตัวเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงได้ทั้งสิ้น

ตารางที่ 5.9 ค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ในชิ้นงานหล่อ MDFT01-MDFT05 จากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน

Melt	Condition	DENSITY (g/cm^3)				
		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 5.37 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน

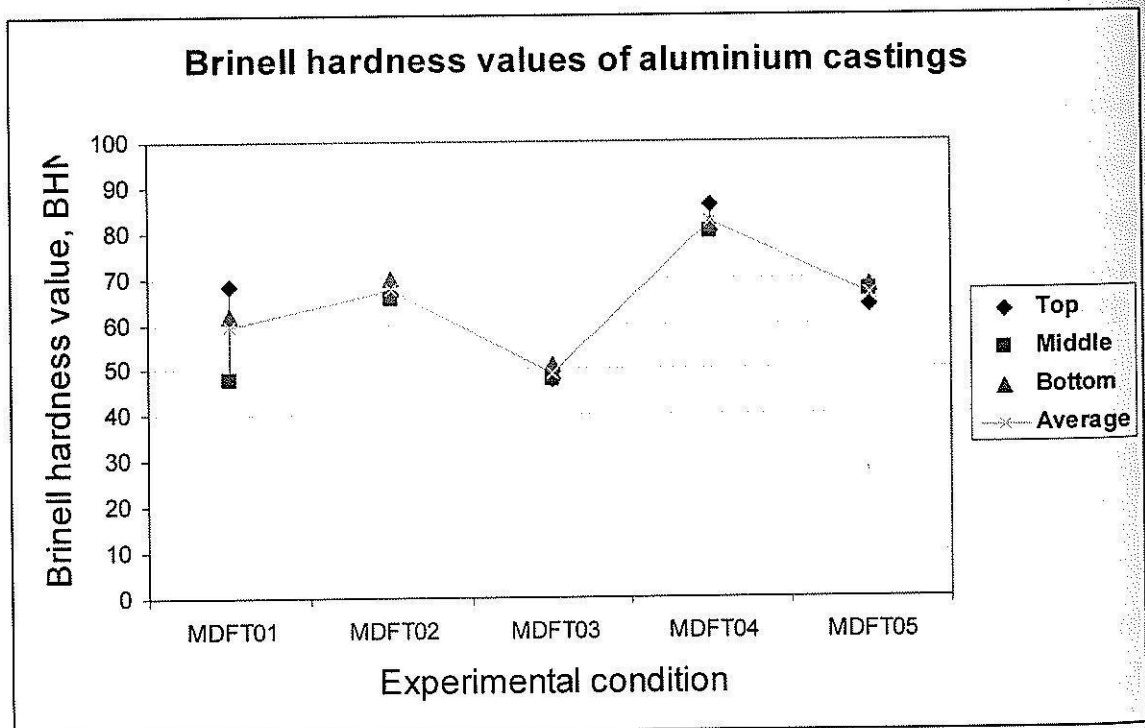
5.4.5 ผลการตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อ

ผลการทดสอบความแข็ง (Brinell Hardness) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน ที่ตำแหน่งบน กลางและล่างของชิ้นงาน โดยจะวัดค่าความแข็ง 3 จุดที่ซ้าย กลาง และขวา ตามลำดับ พบว่า มีแนวโน้มของผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดสอบปริมาณรูพรุนและค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ ดังแสดงในตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.38 ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การกำจัดก๊าซในสภาวะ MDFT04 นั้นให้ค่าความแข็งที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับในทุกสภาวะการทดลอง

นอกจากนี้ยังพบว่า หากชิ้นงานนั้นไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ (MDFT01) ข้อมูลค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบที่ตำแหน่ง บน กลางและล่างของชิ้นงานนั้นมีความแตกต่างกันพอสมควร หรือมีการกระจายตัวสูงดังแสดงในการกระจายตัวของค่าความแข็งในชิ้นงานหล่อ ซึ่งแตกต่างจากการกระจายตัวของค่าความแข็งที่ทดสอบได้ในชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดก๊าซ (MDFT02-05) ดังนั้นการกำจัดก๊าซด้วยวิธีการปั่นด้วยก๊าซอาร์กอนพร้อมการฉีดฟลักซ์มีแนวโน้มทำให้ชิ้นงานหล่อมีความสม่ำเสมอมากขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าความแข็งที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ในชิ้นงานหล่อ MDFT01-MDFT05 จากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน

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 5.38 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมจากแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านบน

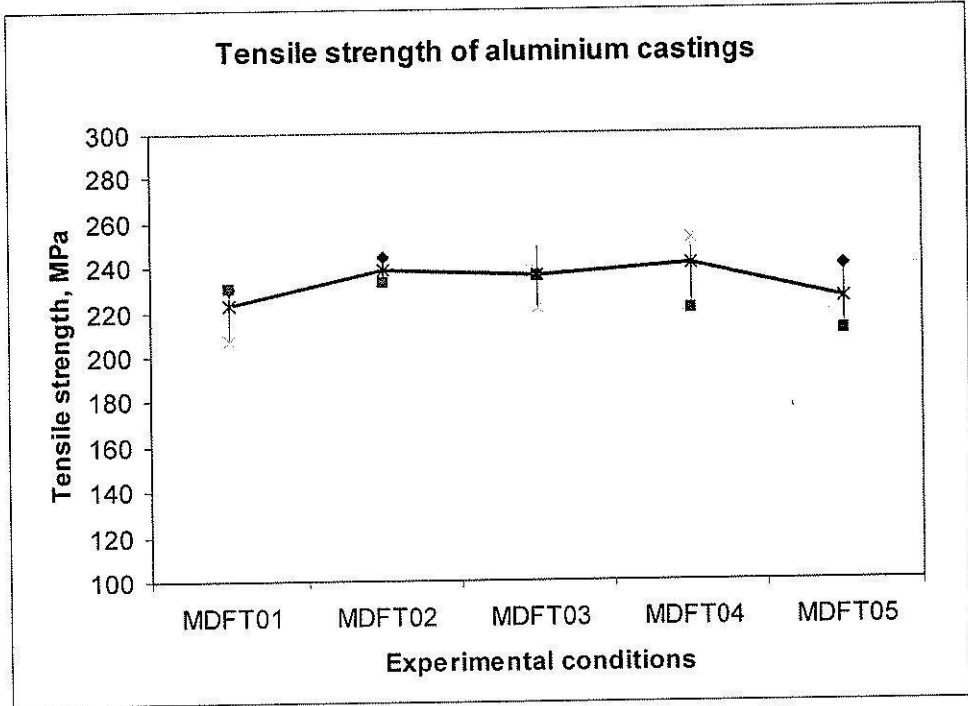
5.4.6 ผลการตรวจสอบสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่อ

ผลการตรวจสอบสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์โลหะที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง พบว่า ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน (MDFT02-05) จะให้ค่า Tensile strength และ Yield strength ที่ดีกว่าในชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ (MDFT01) ดังแสดงในตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.39-5.41 และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการทดลองที่ MDFT04 ซึ่งกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์เป็นระยะเวลา 20 นาทีและใช้ฟลักซ์ชนิดเม็ด (0.125%) จะให้ค่าความแข็งแรงแรงดึงที่สูงกว่าในชิ้นงานทดสอบอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการตรวจสอบปริมาณรูพรุน ความหนาแน่นรวมทั้งค่าความแข็งที่ได้กล่าวมาแล้ว ค่าความแข็งแรงแรงดึงและความแข็งแรง ณ จุด คราก ของชิ้นงานหล่อ MDFT04 นั้นเพิ่มขึ้นประมาณ 8.4% และ 5.7% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่อ MDFT01 ที่ไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.42 แสดงถึงค่าความแข็งแรงแรงดึงที่มีทิศทางเพิ่มขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยนเทคนิควิธีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์

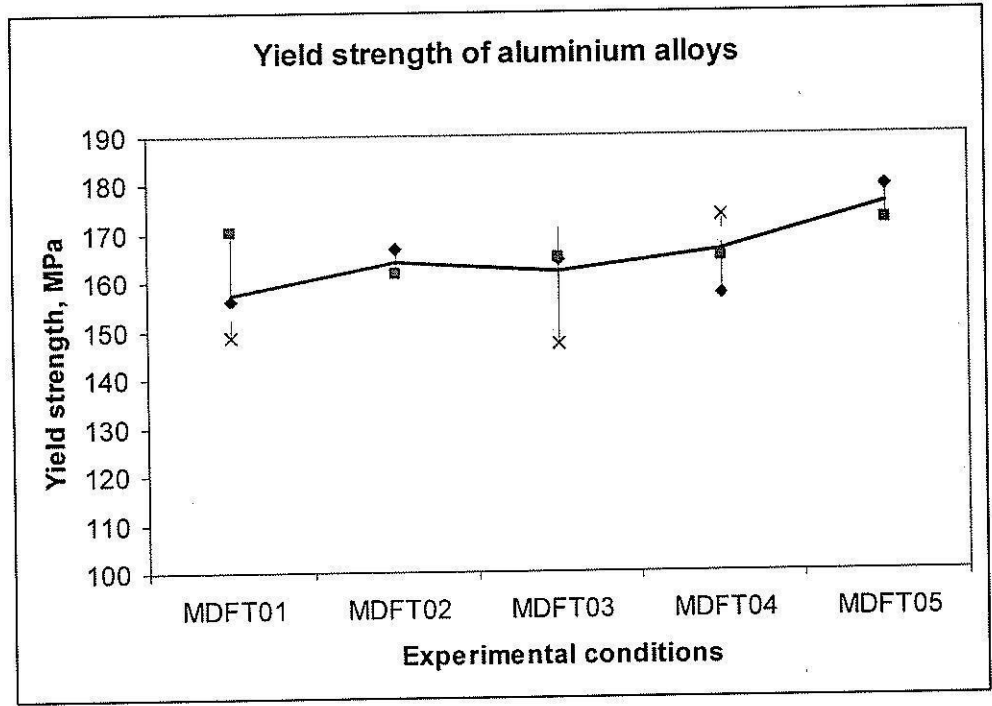
แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าที่ลดลงเมื่อค่าความแข็งแรงแรงดึงและความแข็งแรง ณ จุดคราก เพิ่มขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวนี้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ (1.4-2.8%) หากเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน (5%) ในสภาวะหล่อ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระหว่างกระบวนการหลอมชิ้นงานนั้น ไม่ได้ทำ Grain refinement และ Modification ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวไม่ได้ตามมาตรฐาน

ตารางที่ 5.11 แสดงสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมหล่อในแม่พิมพ์ที่มีทางเดินน้ำโลหะจากด้านล่าง ที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ด้านบน

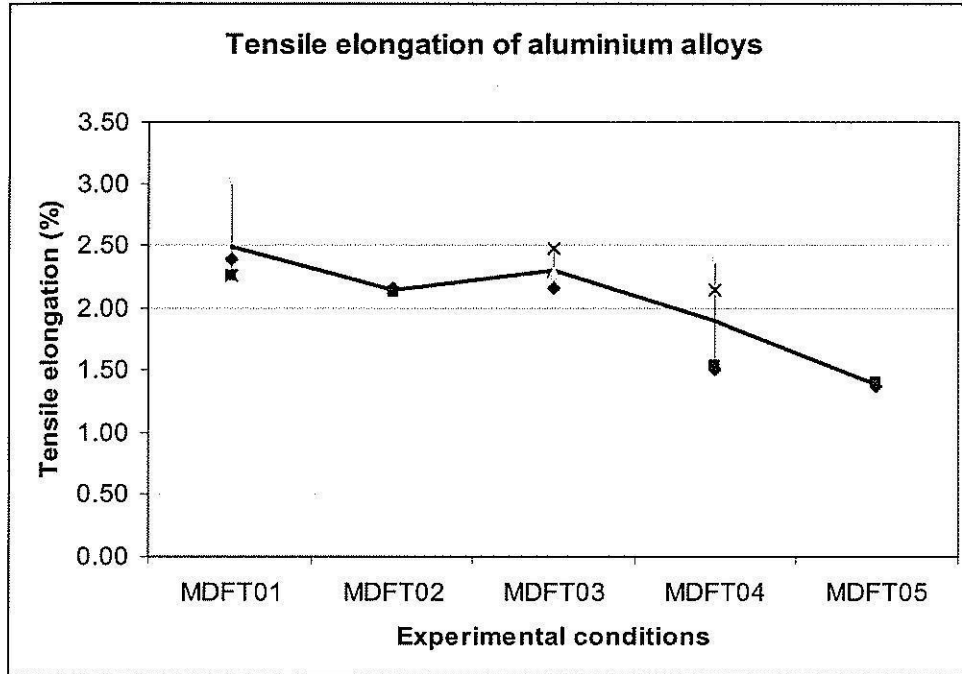
Test conditions	Average tensile properties		
	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Tensile elongation (%)
MDFT01: Non-degassing	222.6	157.3	2.48
MDFT02: Degassing 10 min, 0.25% powder flux	238.5	164.2	2.15
MDFT03: Degassing 20 min, 0.25% powder flux	236.0	162.3	2.29
MDFT04: Degassing 20 min, 0.125%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



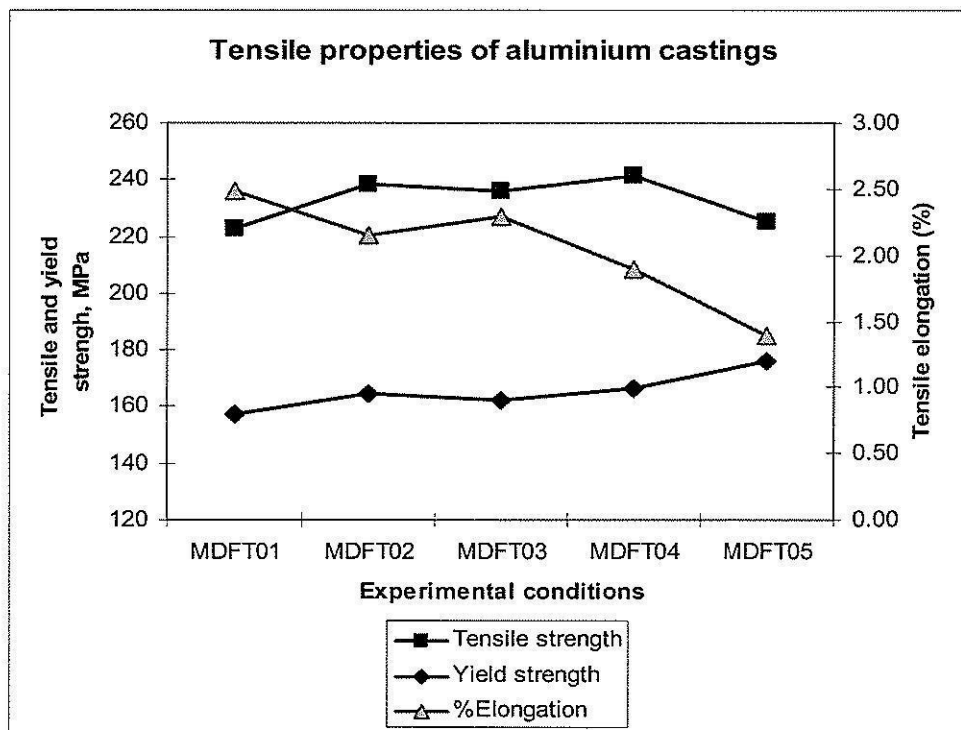
รูปที่ 5.39 (a) กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน



รูปที่ 5.39 (b) กราฟแสดงค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength at 0.2% strain) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

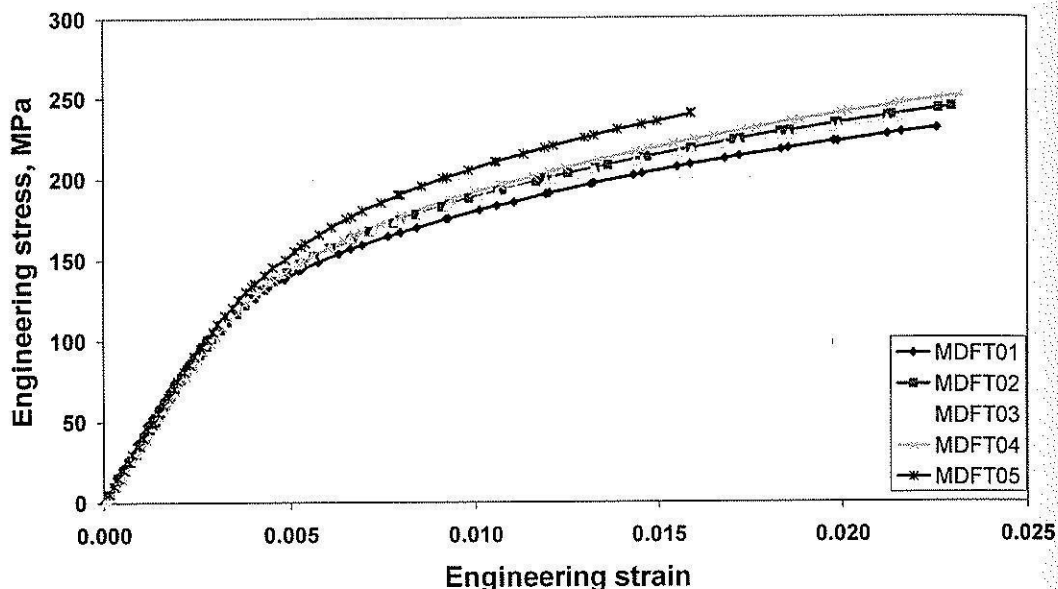


รูปที่ 5.39 (c) กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Tensile elongation) ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

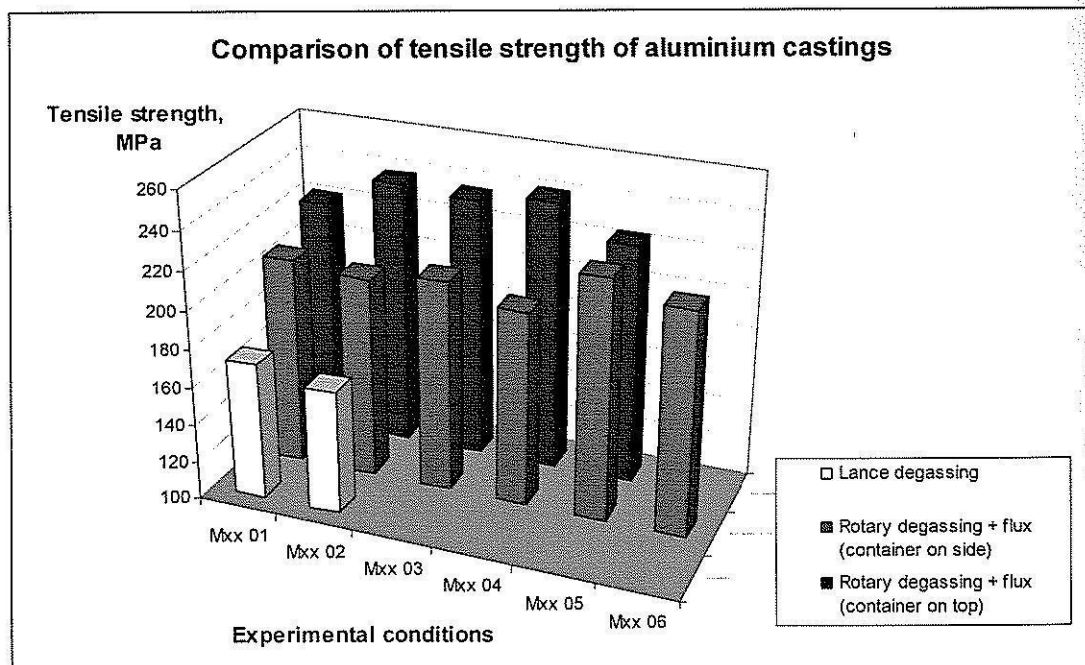


รูปที่ 5.40 กราฟความสัมพันธ์แสดงสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน

Engineering stress-strain curves of aluminium castings



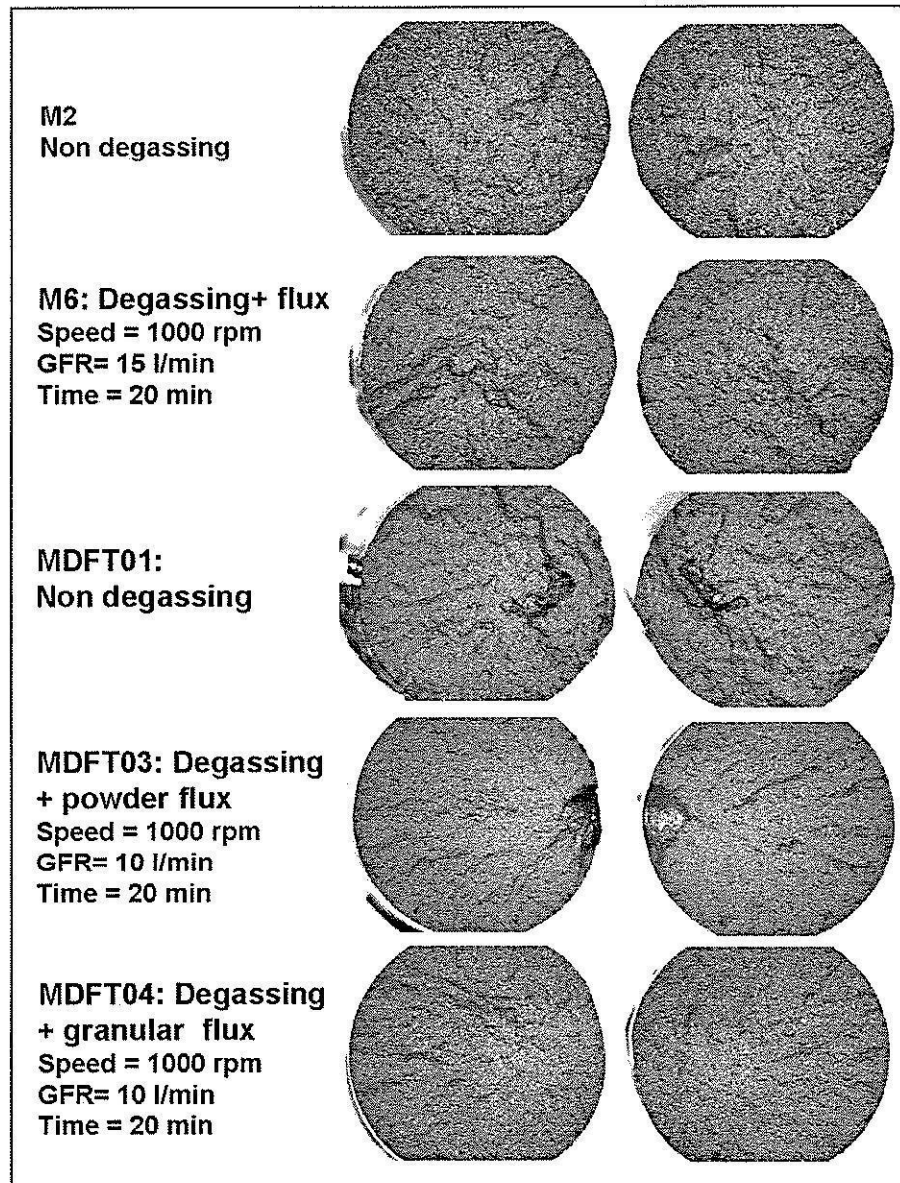
รูปที่ 5.41 กราฟความสัมพันธ์ Engineering stress-strain ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน



รูปที่ 5.42 แสดงค่า Tensile strength เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซด้วยวิธี Lance degassing, การกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ที่มีถังฟลักซ์อยู่ด้านข้าง (MDF01-06) และด้านบน (MDFT01-05)

5.5 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานผ่านการทดสอบแรงดึง

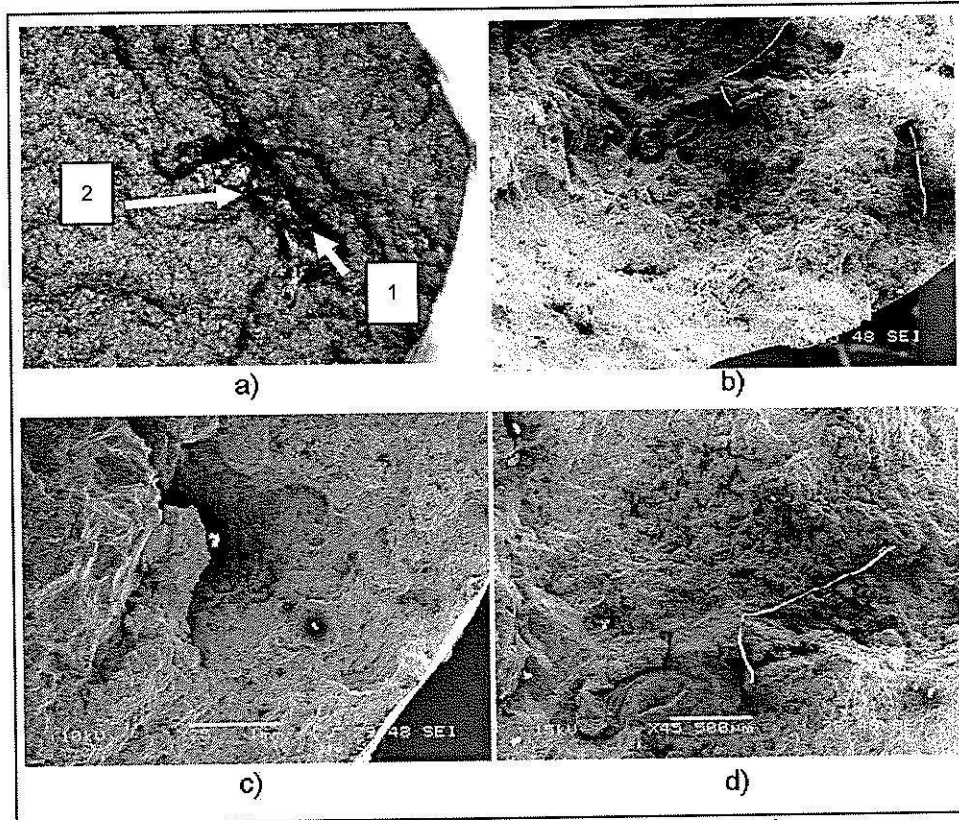
รูปที่ 5.43 แสดงตัวอย่างพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีการเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) ก่อนการแตกหักค่อนข้างน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ค่อนข้างต่ำ (1-3%) ซึ่งชิ้นงานทุกชิ้นเกิดการแตกหักก่อนที่กราฟความสัมพันธ์ Engineering stress-strain จะถึงจุดสูงสุด เมื่อพิจารณาพื้นผิวการแตกหักด้วยตาเปล่าพบว่า มีพื้นผิวการแตกหักเป็นสีเทา (Gray surface) และเมื่อตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักด้วยกล้องกำลังขยายต่ำ (Stereomicroscope) พบว่า ในบางสภาวะการทดลอง เช่น M2, MDFT01 และ MDFT03 แสดงจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (Fracture initiation) จากรูพรุนหรืออินคลูชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นงาน MDFT01 ซึ่งน่าจะเกิดจากอินคลูชัน ส่วนในชิ้นงาน MDFT03 ที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์แล้วนั้นยังพบอินคลูชัน เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักที่ขอบของชิ้นงานเนื่องมาจากการใช้ฟลักซ์ชนิดผง ซึ่งทำให้เกิดการฟุ้งกระจายและเกิดความปั่นป่วนของน้ำโลหะเป็นสาเหตุของการสะสมของฟิล์มออกไซด์หรืออินคลูชันได้ พื้นผิวการแตกหักที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีความแตกต่างจากชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์อย่างเหมาะสม ดังในชิ้นงานหล่อ MDFT04 ซึ่งไม่แสดงถึงร่องรอยของจุดแตกหักซึ่งเกิดจากอินคลูชันหรือรูพรุนแต่อย่างใด ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า การที่ไม่ได้กำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการสะสมของฟิล์มออกไซด์หรืออินคลูชันได้ง่ายและส่งผลทำให้สมบัติแรงดึงลดลง



รูปที่ 5.43 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

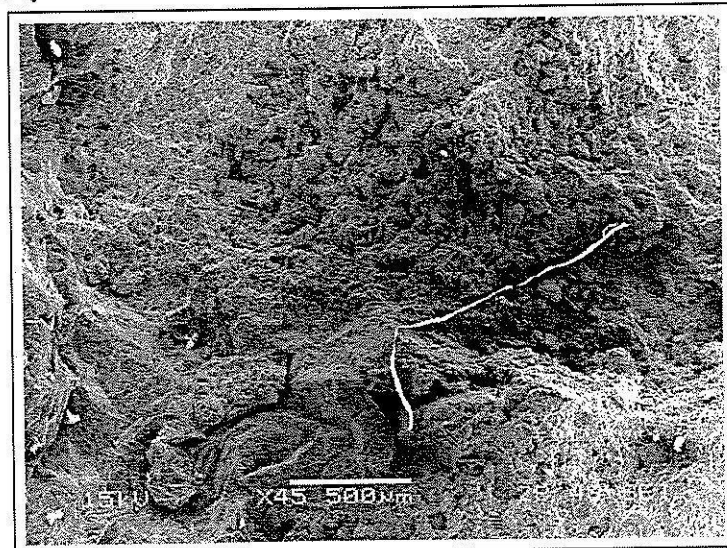
เมื่อทำการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักด้วยกล้อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 5.44 พบว่าพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงาน MDFT01 ที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและฉีดฟลักซ์นั้นสามารถสังเกตเห็นเริ่มต้นการแตกหักได้ชัดเจน โดยในรูปที่ 5.44 b) แสดงบริเวณ 1 ของรูปที่ 5.44 a) ซึ่งสังเกตเห็นพื้นผิวเป็นลักษณะคล้ายฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide film) ปกคลุมอยู่นอกจากนี้ในรูปที่ 5.44 c) แสดงบริเวณ 1 ของรูปที่ 5.44 a) แสดงจุดกำเนิดของการแตกหัก ส่วนในรูป 5.44 d) แสดงบริเวณใกล้เคียงของจุดกำเนิดการแตกหัก ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นพื้นผิวคล้ายฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ต่อเนื่องกับบริเวณโพรงที่เกิดจากการหดตัวระหว่างการแข็งตัวของชิ้นงาน (Solidification shrinkage) ดังแสดงในรูปที่ 5. 45 ดังแสดงให้เห็นในบริเวณที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

โดยบริเวณที่เกิดโพรงหดตัวจากกระบวนการแข็งตัว นั้นครอบคลุมบริเวณที่มีความยาวประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และเห็นโครงสร้างของเดนไดรต์ชัดเจน นอกจากนี้ พื้นผิวการแตกหักจะปรากฏอินคลูชันอยู่ทั่วไป

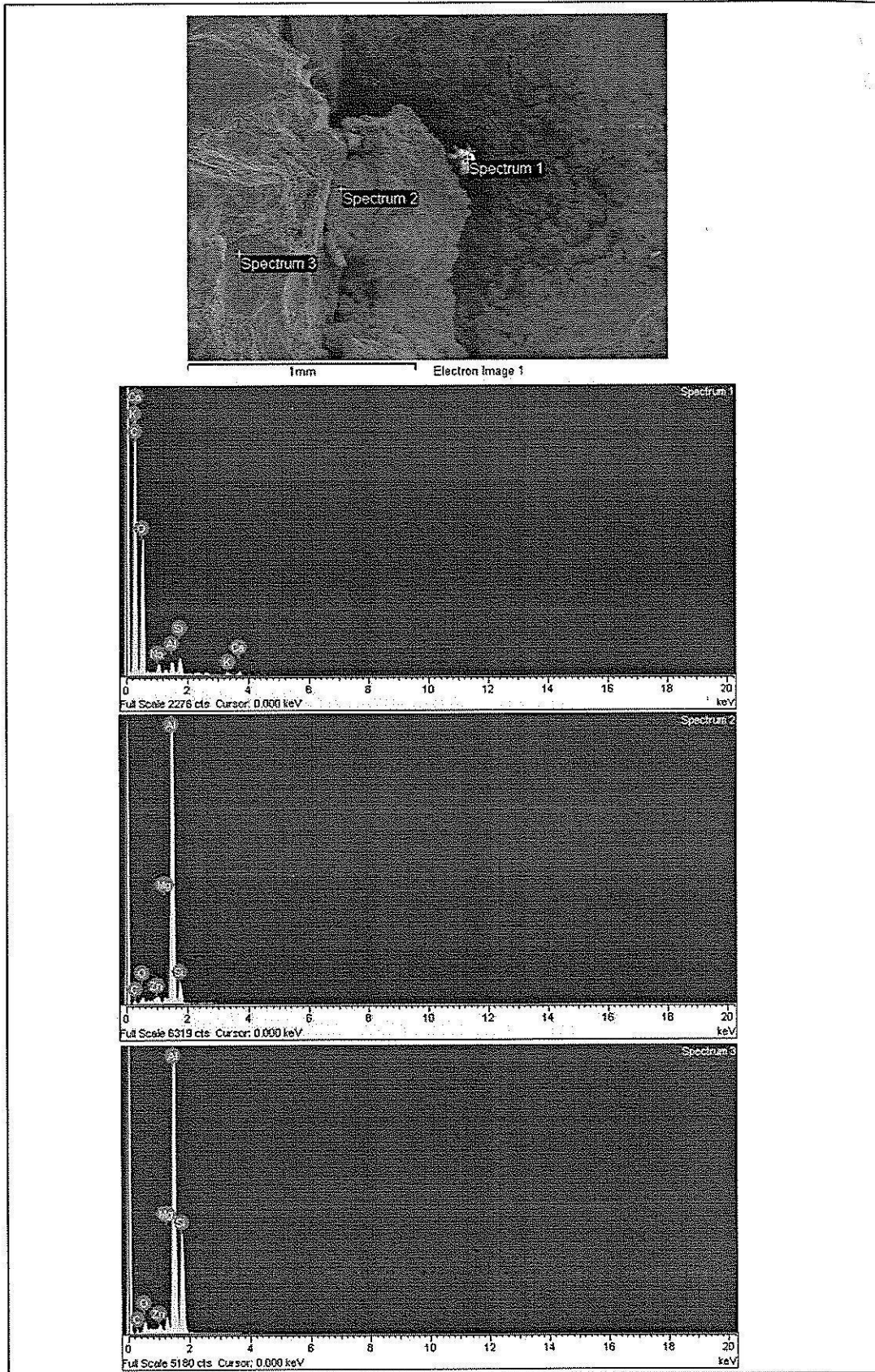


รูปที่ 5.44 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

a) จุดที่ทำให้เกิดการแตกหักจากกล้อง Stereoscope, b)-d) จาก SEM



รูปที่ 5.45 พื้นผิวใกล้จุดกำเนิดของการแตกหักแสดงบริเวณที่มี Aluminium oxide film และ Solidification shrinkage ที่ต่อเนื่องกันกินบริเวณกว้าง ในชิ้นงาน MDFT01



รูปที่ 5.46 ผลการวิเคราะห์ธาตุ (EDS) บนพื้นผิวแตกหักชิ้นงาน MDFT01 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

จากนั้นเมื่อทำการตรวจสอบบริเวณพื้นผิวที่เกิดการแตกหักด้วย EDS analysis พบว่าสเปกตรัมที่ 1, 2 และ 3 มีองค์ประกอบของธาตุแสดงดังรูปที่ 5.46 และ ตารางที่ 5.14 จะเห็นได้ว่าบริเวณของสเปกตรัมที่ 2 และ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุที่ใกล้เคียงกัน คือ ประกอบไปด้วย อะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่และรองลงมา คือ ซิลิกอนและแมกนีเซียม ซึ่งแสดงถึงเฟสพื้นผิวของโลหะ อะลูมิเนียมเกรด 356 (Al-Si-Mg) เมื่อเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ธาตุจากสเปกตรัมที่ 1 จะพบธาตุแคลเซียม โพแทสเซียม แคลเซียมและออกซิเจน ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นอินคลูชันขนาดประมาณ 150-200 ไมครอน อยู่ใกล้บริเวณที่เป็นจุดกำเนิดของการแตกหัก

ตารางที่ 5.14 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	

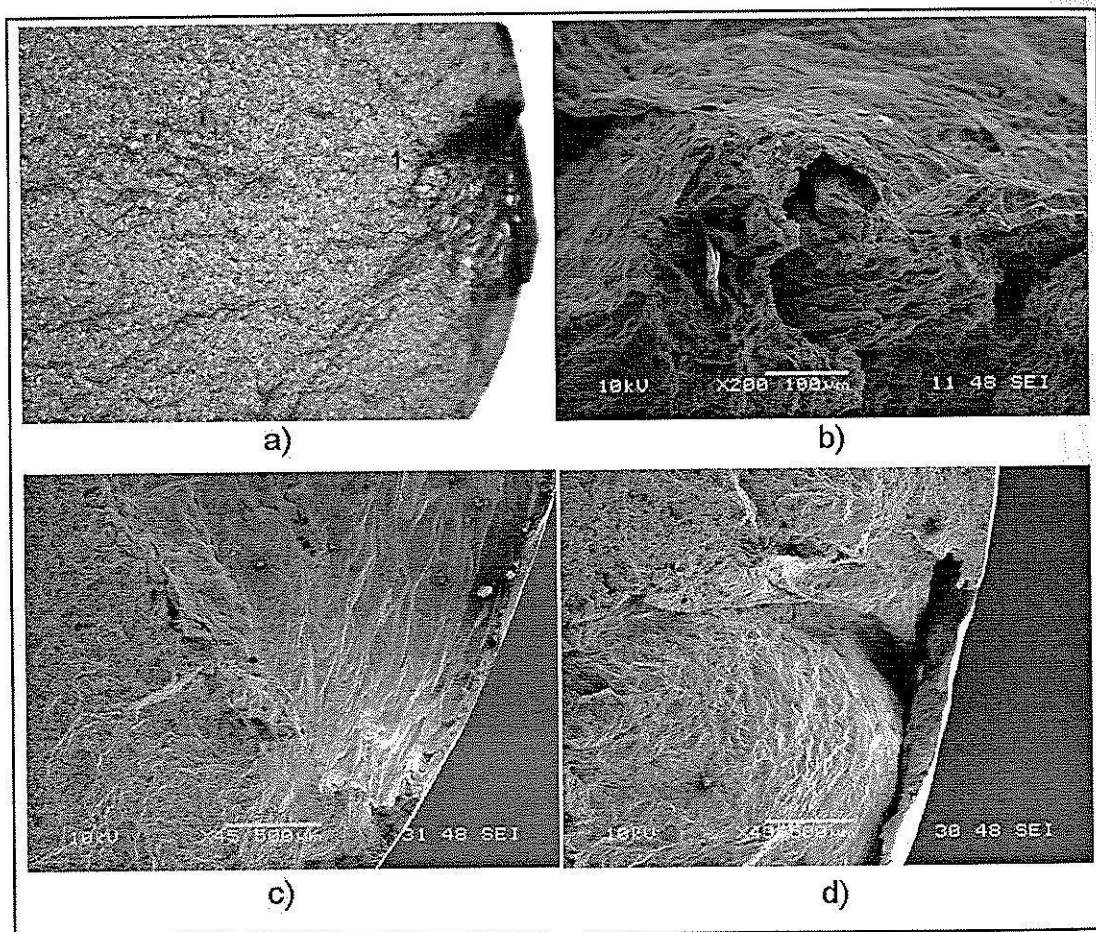
Spectrum 2

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

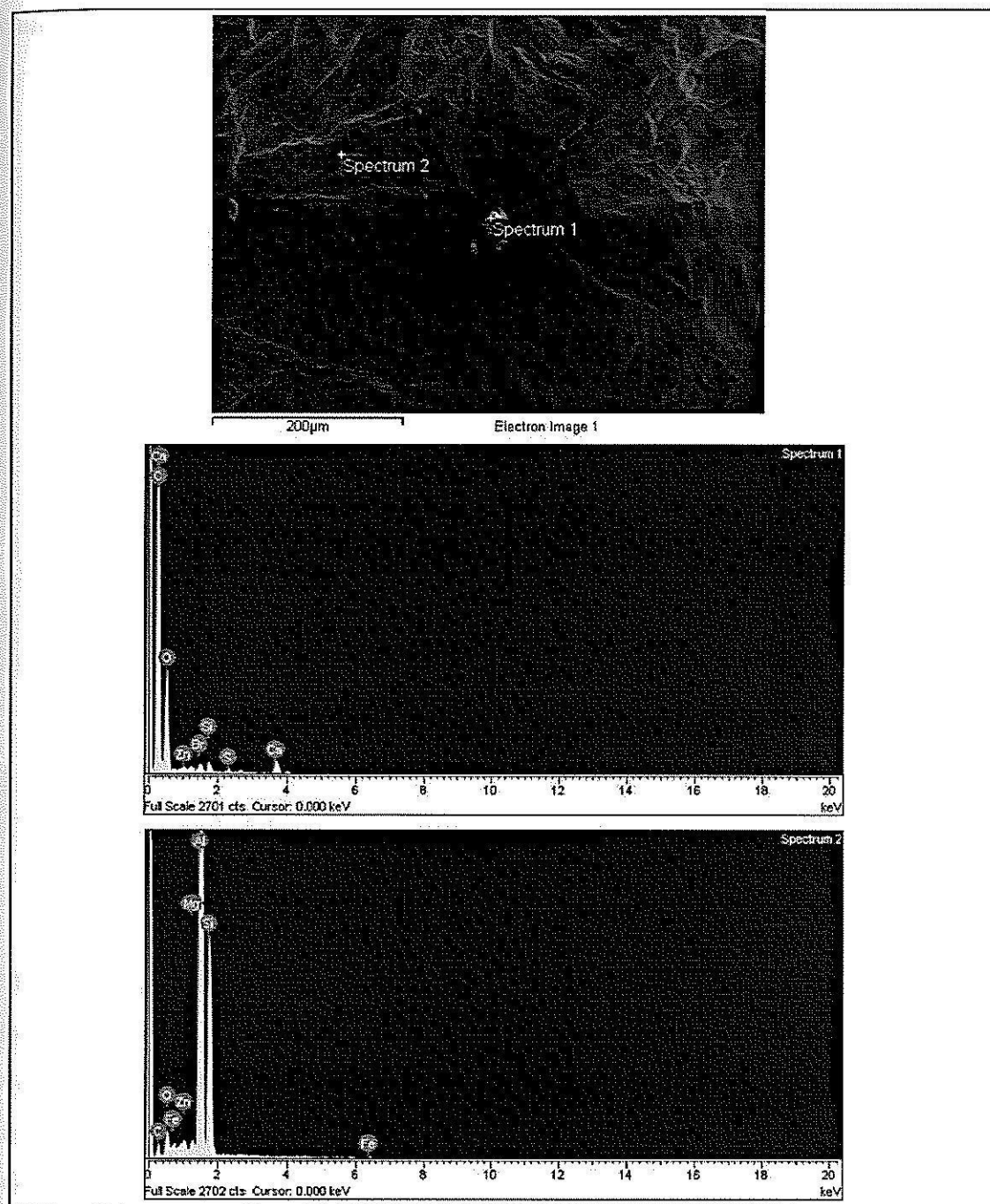
Element	Intensity	Weight%	Atomic%
C K	0.3171	5.30	11.02
O K	1.3451	4.71	7.36
Mg K	1.4120	2.15	2.21
Al K	1.2819	56.03	51.85
Si K	0.9397	30.38	27.01
Zn L	0.8379	1.42	0.54
Totals		100.00	

และเมื่อตรวจสอบชิ้นงานหล่อ MDFT03 ที่ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ ชนิดผงเป็นระยะเวลา 20 นาทีพบว่า หลังจากการทดสอบแรงดึง พื้นผิวการแตกหักแสดงจุดเริ่มต้นของการแตกหักดังแสดงในรูปที่ 5.47 a) และเมื่อตรวจสอบด้วยกล้อง SEM แสดงพื้นผิวการแตกหักที่เรียบและโค้งรับกันทั้งสองด้านแสดงในรูป 5.47 c) และ d) พื้นผิวการแตกหักจะปรากฏอินคลูชันอยู่ทั่วไป และจากผลการวิเคราะห์ธาตุดังแสดงในรูปที่ 5.48 และตารางที่ 5.15 ซึ่งพบว่าผลการวิเคราะห์ธาตุที่บริเวณสเปคตรัมที่ 1 จะพบธาตุแคลเซียม คาร์บอนและออกซิเจนเป็นหลัก ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นอินคลูชันที่มีขนาดประมาณ 25-30 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ธาตุบริเวณสเปคตรัมที่ 2 ซึ่งเป็นเฟสพื้นของอะลูมิเนียม 356



รูปที่ 5.47 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

a) จุดที่ทำให้เกิดการแตกหักจากกล้อง Stereoscope, b)-d) จาก SEM



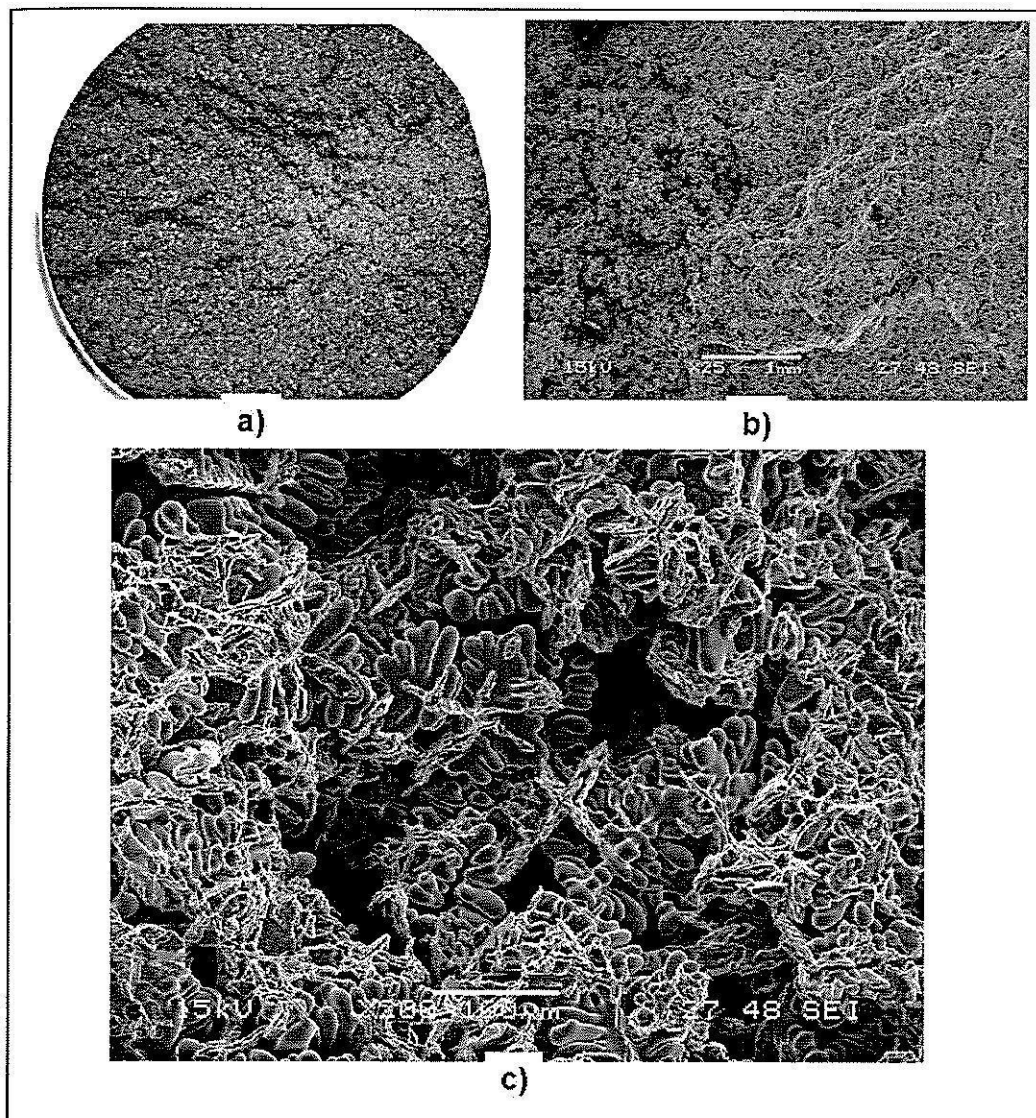
รูปที่ 5.48 ผลการวิเคราะห์ธาตุ (EDS) บนพื้นผิวแตกหักชิ้นงาน MDFT03 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 5.15 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุจากสเปกตรัมที่ 1 และ 2 โดยใช้การวิเคราะห์ EDS จากพื้นผิว การแตกหักของชิ้นงานหล่อ 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 5.49 a) พบว่า พื้นผิวการแตกหักหลังการทดสอบแรงดึงปรากฏบริเวณที่แสดงอินคลูชันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน MDFT01 และ MDFT03 พื้นผิวการแตกหักทั่วไปแสดงการแตกหักแบบเหนียว ยกเว้นบริเวณตรงกลางของชิ้นงานแสดงพื้นผิวการแตกหักที่แตกต่างจากบริเวณรอบนอก ดังแสดงในรูปที่ 5.49 b) และเมื่อตรวจสอบด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยายสูงขึ้นไปปรากฏพื้นผิวการแตกหักตามช่องว่างของแกนเดนไดรต์ ซึ่งน่าจะเกิดจากโพรงหดตัวระหว่างการแข็งตัว ไม่ปรากฏบริเวณที่เป็นอินคลูชันโดยบริเวณที่เกิด Solidification shrinkage นั้นกินบริเวณที่มีความยาวประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และเห็นโครงสร้างของเดนไดรต์ชัดเจน ซึ่งการเกิด Solidification shrinkage ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล (% Elongation ~ 1.89%) นี้สามารถแก้ไขได้โดยกระบวนการ Grain refinement และ Modification เพื่อลดปริมาณโครงสร้างเข็มแหลมของโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอน ซึ่งอาจกีดขวางการเติมเต็มของน้ำโลหะระหว่างการเย็นตัวได้ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในภายหลัง



รูปที่ 5.49 พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม MDFT04 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง
a) พื้นผิวการแตกหักจากกล้อง Stereoscope, b)-c) จาก SEM

5.6 วิเคราะห์ผลการทดลองกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์

ในการหล่อขึ้นรูปให้ได้ชิ้นงานอะลูมิเนียมที่มีคุณภาพนั้น ต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดข้อตำหนิ 3 ประการคือ

- 1) การเกิดออกไซด์อินคลูชันเมื่อน้ำอะลูมิเนียมเริ่มสัมผัสกับอากาศและถูกกักอยู่ในน้ำโลหะ
- 2) การเกิดโพรงก๊าซ เนื่องจากไฮโดรเจนไม่สามารถละลายในอะลูมิเนียมขณะแข็งตัวได้
- 3) การเกิดโพรงหดตัวเนื่องจากอะลูมิเนียมมีการหดตัวที่สูง 3.5-6.0% ขึ้นอยู่กับชนิดของอะลูมิเนียมผสม

โดยการควบคุมปัจจัยทั้ง 3 ประการนี้ ขึ้นอยู่กับการให้ความสำคัญในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการหล่อและเทแบบซึ่งประกอบไปด้วย⁽¹⁾

- กระบวนการกำจัดก๊าซ (Efficient degassing)
- กระบวนการทำเกรนให้ละเอียด (Grain refinement)
- กระบวนการปรับรูปทรงพื้นฐานของโครงสร้างยูเทคติก (Modification)
- กระบวนการทำความสะอาดและกรองน้ำโลหะ (Fluxing and metal filtration)
- กระบวนการเทน้ำโลหะไม่ให้เกิดความปั่นป่วน (Non-turbulent filling of molds)

สำหรับในการวิจัยนี้ ได้สนใจศึกษาเฉพาะกระบวนการกำจัดก๊าซ ร่วมกับกระบวนการฉีดฟลักซ์ เพื่อลดปริมาณรูพรุนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนและเพิ่มคุณภาพน้ำโลหะให้สะอาดขึ้นก่อนการเทแบบ ดังนั้นสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของการทำเกรนให้ละเอียด การปรับปรุงโครงสร้างนั้นจะถูกละออกไป ส่วนกระบวนการเทน้ำโลหะไม่ให้เกิดความปั่นป่วนนั้น ทางผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญระวังและทำการหล่อชิ้นงานทดสอบ โดยใช้แม่พิมพ์ตามมาตรฐานของ ASTM B108 อีกประการหนึ่งซึ่งเป็นข้อจำกัดในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ คือ การหลอมอะลูมิเนียมโดยใช้เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการกวนน้ำโลหะอะลูมิเนียมตลอดเวลาระหว่างการหลอม ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผิวหน้าของน้ำโลหะระหว่างการหลอม และมีผลทำให้ไฮโดรเจนละลายได้ง่ายขึ้นในน้ำโลหะ แต่อย่างไรก็ดี จากการสังเกตลักษณะของผิวหน้าของน้ำโลหะระหว่างการหลอมพบว่า เกิดการกวนที่ไม่รุนแรงมากนัก และผลการทดลองกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ในขณะที่ยังมีผลกระทบของการกวนน้ำโลหะอยู่ ยังได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือกำจัดก๊าซที่สามารถทำงานได้ดีในสถานะแม้มีการกวนน้ำโลหะอยู่ตลอดเวลา

5.6.1 ผลกระทบของการผสมเศษขี้กึ่งลงในน้ำโลหะ

จากผลการตรวจสอบปริมาณรูพรุน ความหนาแน่น สมบัติความแข็งและสมบัติแรงดึงของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม พบว่า แม้จะทำการหล่อชิ้นงานอะลูมิเนียม โดยใช้อะลูมิเนียมอินกอต 100% (M1) ก็สามารถทำให้เกิดปริมาณรูพรุนในชิ้นงานหล่อได้ ดังนั้น กระบวนการกำจัดก๊าซจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการผลิตชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม

การทดลองผสมเศษขี้กึ่งอะลูมิเนียมปริมาณ 20% (M2 และ MDFT01) ทำให้เกิดการละลายของไฮโดรเจนมากขึ้นในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว หากไม่ได้ทำการกำจัดก๊าซ จึงหลงเหลือเป็นรูพรุนอยู่จำนวนมากในชิ้นงานหล่อ ลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่หากเปรียบเทียบ

กับสภาวะการทดลองอื่นและเป็นอันตรายอย่างยิ่งในแง่ของการเกิดข้อตำหนิ เป็นผลให้สมบัติด้านต่างๆ แปรตามลำดับ

5.6.2 ผลกระทบของวิธีการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ต่อคุณภาพชิ้นงานหล่อ

จากการทดลองกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance degassing พบว่า ไม่สามารถทำให้ปริมาณรูพรุนลดลงได้ และกลับทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวขณะทำการฉีดฟลักซ์ชนิดผงซึ่งทำปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำโลหะเกิดเป็นควันฟุ้งกระจาย ซึ่งส่งผลให้เกิดอันตรายระหว่างการปฏิบัติงานของผู้ใช้งานเอง นอกจากนี้ การกำจัดก๊าซด้วยวิธี Lance degassing นั้นทำให้เกิดฟองก๊าซขนาดใหญ่ที่เกินไป (ฉีดก๊าซอาร์กอนผ่านท่อแกรไฟต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 มม.) ทำให้ฟองก๊าซลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำโลหะอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถที่จะให้ไฮโดรเจนแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซอาร์กอนเพื่อถูกกำจัดออกไปได้ทัน ฟองก๊าซขนาดใหญ่นี้ยังทำให้เกิดความปั่นป่วนที่ผิวหน้าโลหะ และเป็นผลทำให้เกิดการละลายเข้าของไฮโดรเจนในบรรยากาศการหลอม ซึ่งเป็นบรรยากาศเปิดได้เพิ่มขึ้นอีก ดังนั้น การกำจัดก๊าซพร้อมวิธีการฉีดฟลักซ์ด้วยวิธี Lance degassing นั้นไม่เหมาะสมทั้งในสภาวะการใช้งานและการปรับปรุงคุณภาพของน้ำโลหะ

การปรับปรุงระบบการฉีดฟลักซ์โดยใช้ร่วมกับเครื่องมือกำจัดก๊าซไฮโดรเจนเคลื่อนที่ (Mobile Degassing Unit, MDU) นั้นทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนและปรับปรุงคุณภาพน้ำโลหะดีขึ้นจากกระบวนการ Lance degassing ทั้งนี้เนื่องจากเครื่อง MDU มีระบบการปั่นก๊าซอาร์กอนผ่านจานหัวปืน (Nozzle) ซึ่งทำให้ได้ฟองก๊าซอาร์กอนที่เล็กละเอียดมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการพาเอาไฮโดรเจนออกไปจากน้ำโลหะได้ดีกว่า^[3] ทำให้ได้ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลนั้นดีขึ้นกว่าการใช้ระบบ Lance degassing อย่างมาก ดังแสดงเปรียบเทียบในตาราง 5.3 และ 5.9 ซึ่งพบว่าทำให้ค่าความแข็งแรงแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 34% แต่อย่างไรก็ดี อุปสรรคในการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง MDU นั้น พบว่า การติดตั้งถังฉีดฟลักซ์ด้านข้างของเครื่อง MDU ทำให้ไม่สามารถพาเอาเม็ดฟลักซ์ไหลเข้าสู่ชุดหัวปืนแกรไฟต์ได้โดยง่าย เกิดการตกค้างของเม็ดฟลักซ์ในท่อลำเลียง ทำให้ต้องใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 15 ลิตร/นาที่ ซึ่งทำให้เกิดความปั่นป่วนระหว่างทำการทดลองฉีดฟลักซ์ถึงแม้ว่าจะได้ฟองก๊าซอาร์กอนที่มีขนาดเล็กลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ Lance degassing ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรทดลองกำจัดก๊าซเพียงอย่างเดียวโดยไม่ทำการฉีดฟลักซ์โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 10 ลิตร/นาที่ พบว่ากลับทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซที่ดีกว่า ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการฉีดฟลักซ์ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที่ เพื่อลดความปั่นป่วนของน้ำโลหะที่เกิดขึ้น

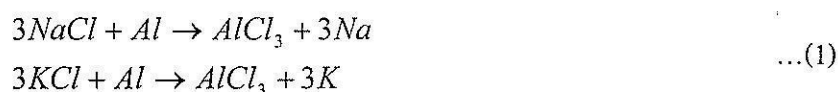
การเปลี่ยนตำแหน่งของถังฟลักซ์มาอยู่ด้านบนของชุดหัวปืนก๊าซอาร์กอน โดยมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนระบบการนำก๊าซอาร์กอนเข้าและออก เพื่อเป็นการลดระยะทางการเคลื่อนที่ของ

ผงฟลักซ์เพื่อลดการตกร้างของเม็ดฟลักซ์ อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงน้ำหนักของผงฟลักซ์ที่ติดอยู่ด้านบนของแขนเครื่อง MDU ที่จะไม่ทำให้เกิดความยุ่งยากในกระบวนการปั่นก๊าซ ดังนั้น ผงฟลักซ์ด้านบนจึงมีขนาดเล็กกว่าผงฟลักซ์ด้านข้างประมาณ 3 เท่า และทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม และจากการปรับเปลี่ยนระบบการฉีด ฟลักซ์ด้านบนนี้ ทำให้สามารถฉีดฟลักซ์ผ่านชุดหัวปั่นแกรไฟต์โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาทิต โดยไม่ทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมระหว่างกระบวนการฉีดฟลักซ์และไม่เกิดการตกร้างของผงฟลักซ์อีกด้วย

5.6.3 ผลกระทบของชนิดฟลักซ์ที่ใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ต่อคุณภาพชิ้นงานหล่อ

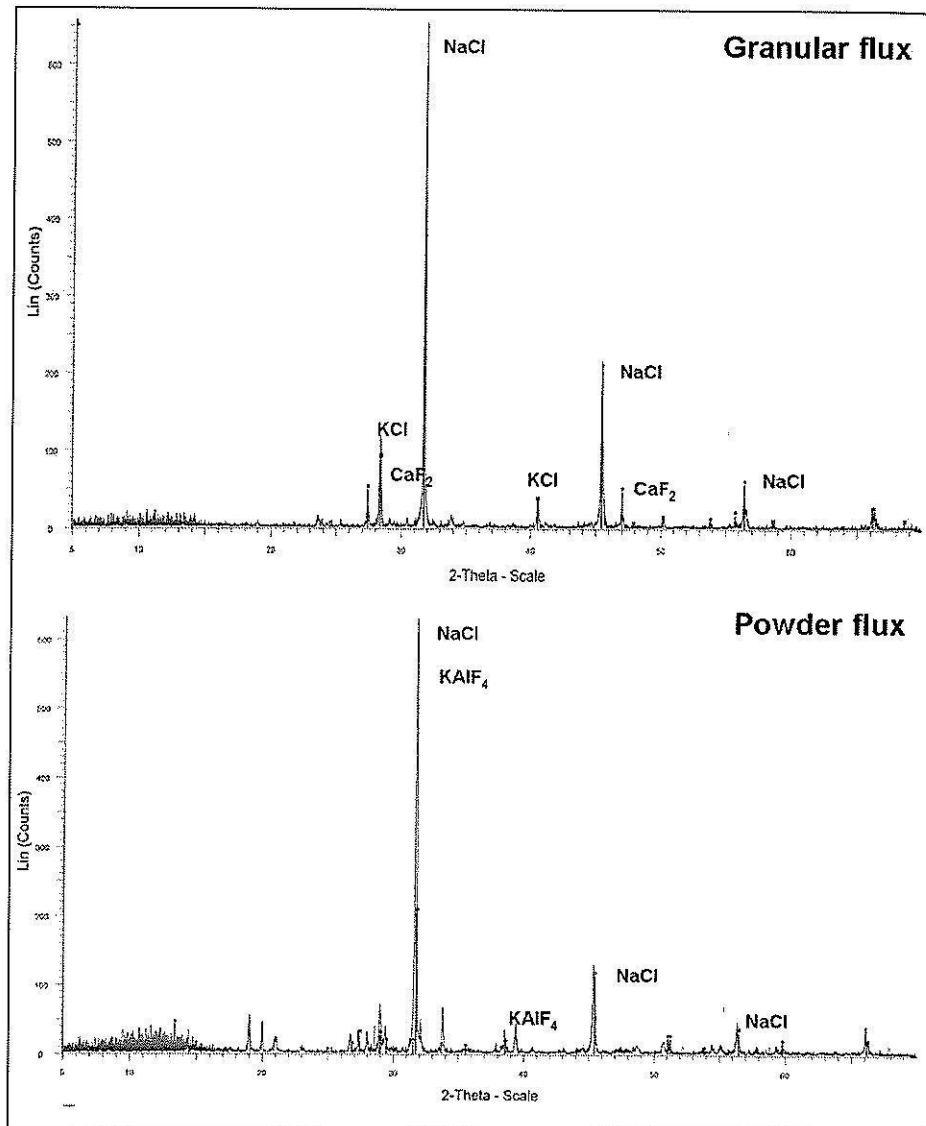
สำหรับการทดลองกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบน ได้มีการทดลองเปรียบเทียบการฉีดฟลักซ์ชนิดผง (Powder flux) และฟลักซ์ชนิดเม็ด (Granular flux) โดยแสดงให้เห็นความแตกต่างดังนี้ คือ การฉีดฟลักซ์ชนิดผงโดยใช้ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ 1000 รอบ/นาทิต ที่อัตราการไหลก๊าซอาร์กอน 10 ลิตร/นาทิต นั้นทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของผงฟลักซ์ขณะทำการฉีดบ้างเล็กน้อย แต่ในปริมาณไม่มากเท่ากับการฉีดฟลักซ์โดยใช้อัตราการไหลก๊าซอาร์กอน 15 ลิตร/นาทิตเมื่อทำการฉีดฟลักซ์ด้านข้าง แต่อย่างไรก็ดี การใช้เวลาเพิ่มขึ้นจาก 10 นาทีเป็น 20 นาทีสำหรับการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ชนิดผงนั้นกลับทำให้เกิดปริมาณรูพรุนและอินคลูชันตกร้างอยู่ในชิ้นงานหล่อจำนวนหนึ่ง มีผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลง เมื่อทำการเปลี่ยนชนิดฟลักซ์เป็นแบบเม็ดพบว่าสามารถลดการฟุ้งกระจายของฟลักซ์ได้มาก ไม่เกิดการตกร้างของฟลักซ์และระหว่างกระบวนการฉีดฟลักซ์ผิวหน้าโลหะไม่มีเกิดความปั่นป่วน

เมื่อทำการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของฟลักซ์ทั้ง 2 ชนิดด้วย X-Ray Diffraction ดังแสดงในรูปที่ 5.50 a)-b) พบว่าสารประกอบหลักของฟลักซ์ที่ใช้คือ NaCl, KCl เป็นส่วนใหญ่และประกอบไปด้วย CaF₂ และ KAIF₄ เป็นส่วนน้อย เมื่อฟลักซ์ถูกนำเข้าสู่หน้าโลหะจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 1^[4]



นอกจากนี้ก๊าซ Metal halide (AlCl₃) ที่เกิดขึ้นภายในน้ำโลหะจะฟอร์มตัวเป็นฟองก๊าซจะสนับสนุนทำให้เกิดการกวนน้ำโลหะ (Stirring) และกำจัดไฮโดรเจนและโซเดียม ส่วน Drossing-off flux จะช่วยทำหน้าที่แยก Aluminium oxide dross ออกจากน้ำโลหะหลอมเหลวและจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนเป็นผลทำให้ความสามารถในการไหลตัว (Fluidity) เพิ่มขึ้น

สาเหตุหนึ่งที่ฟลักซ์ชนิดเม็ดไม่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายและทำปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำโลหะ คือ ฟลักซ์ชนิดเม็ดจะมีปริมาณความชื้นที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ฟลักซ์ชนิดผง ^[2] เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับความชื้นที่น้อยกว่านั่นเอง และการไม่ฟุ้งกระจายนั้นก็เป็ผลดีต่อผู้ใช้งาน อีกทั้งยังเป็นการลดมลพิษในสภาพแวดล้อมที่เราควรให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในปัจจุบัน งานวิจัย ^[2] ได้ตรวจสอบการแพร่กระจายของสาร (Emission) เนื่องมาจากการใช้ฟลักซ์แบบผงและแบบเม็ด ระหว่างการเติมฟลักซ์ พบว่าฟลักซ์แบบผงจะมีปริมาณการเกิดการแพร่กระจายของสารที่มากกว่าซึ่งพบสารประกอบของฟลูออไรด์ (Fluoride) และ ซัลเฟอร์ออกไซด์ (Sulphur oxide) มากกว่าในฟลักซ์ชนิดเม็ด แต่ปริมาณการเกิดการแพร่กระจายของสารที่น้อยกว่าในฟลักซ์ชนิดผงนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณการเติมฟลักซ์ที่น้อยกว่า (0.125% สำหรับฟลักซ์ชนิดเม็ด และ 0.25% สำหรับฟลักซ์ชนิดผง) รวมถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำโลหะอาจแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ การทำปฏิกิริยาที่รุนแรงและการฟุ้งกระจายของฟลักซ์ชนิดผง อาจทำให้องค์ประกอบทางเคมีของฟลักซ์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพนั้นต่ำลง การฉีดฟลักซ์ชนิดเม็ดด้วยวิธี Rotary degassing นั้นทำให้เม็ดฟลักซ์ถูกฉีดลงน้ำโลหะโดยตรงและเกิดการกระจายเข้าทำปฏิกิริยาในบริเวณต่างๆ ในน้ำโลหะได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 5.50 ผลการตรวจสอบสารประกอบในฟลักซ์ชนิดเม็ดและชนิดผงด้วย XRD

จากข้อมูลเบื้องต้น⁽¹⁾ พบว่า ฟลักซ์ชนิดผงเหมาะที่ใช้สำหรับ Drossing-off ร่วมกับ Covering ส่วนฟลักซ์ชนิดเม็ดเหมาะที่ใช้สำหรับ Drossing-off ร่วมกับ Exothermic โดยที่ Drossing-off flux นั้นจะทำหน้าที่ในการดูดซับออกไซด์และ Non-metallic particle ต่างๆ รวมทั้งทำความสะอาดน้ำโลหะและทำให้สามารถกำจัด Dross ได้ง่าย และ Exothermic flux จะทำให้อะลูมิเนียมที่ติดอยู่กับ Dross นั้นกลับมายังน้ำโลหะอีกครั้ง ส่วน Covering flux นั้นจะทำหน้าที่ฟอรัมเป็นผิวหน้าปกป้องน้ำโลหะด้านล่างไม่ให้เกิดการละลายของไฮโดรเจน ดังนั้น ฟลักซ์ชนิดเม็ดซึ่งทำหน้าที่ในการล้างทำความสะอาดน้ำโลหะจึงทำให้ชิ้นงานหล่อมีปริมาณอินคลูชันที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ฟลักซ์ชนิดผง ดังแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในผลการตรวจสอบพื้นผิวการ

แตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ที่เตรียมได้จากกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมฉีดฟลักซ์ชนิดผงว่า พบอินคลูชันจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิว และบางส่วนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกหักในชิ้นงานทดสอบ นอกจากนี้ปริมาณอินคลูชันที่พบในเนื้อ โลหะแล้วตำแหน่งของอินคลูชันก็มีความสำคัญ เช่นเดียวกับ จากการวิจัยพบว่า^[3] ตำแหน่งของอินคลูชันมีผลต่อสมบัติทางด้านความล้าของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมเกรด A356 และในการวิจัยครั้งนี้พบว่า ตำแหน่งของอินคลูชันที่พบนี้อยู่ใกล้กับผิวชิ้นงานและมีส่วนทำให้เกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงดึง

ผลกระทบของการกำจัดอินคลูชันในน้ำโลหะไม่หมดนั้น อาจเป็นสาเหตุของข้อตำหนิอื่นๆ ที่ตามมา เช่น การเกิดฟิล์มออกไซด์ของอะลูมิเนียม ซึ่งมักจะกระจุกตัวอยู่ร่วมกันกับอินคลูชัน ทำให้เกิดตำหนิที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และในบางกรณีฟิล์มออกไซด์ของอะลูมิเนียมนั้นสามารถม้วนพับได้ เมื่อเกิดความปั่นป่วนเพียงไม่กี่วินาทีที่ผิวหน้าของน้ำโลหะ เกิดชั้นฟิล์มที่เรียกว่า Double oxide film หรือ Bi-film^[5] ทำให้เกิดเป็น Air pocket อยู่ด้านใน ซึ่ง Air pocket เหล่านี้เมื่อถูกแรงเหวี่ยงจากความปั่นป่วนของน้ำโลหะระหว่างการกวนทำให้รูปร่างบิดเบี้ยวไป ซึ่งเปรียบเสมือนรอยแตกที่คดงอ (Convolutated crack)^[6] ซึ่งก็เป็นอันตรายต่อสมบัติเชิงกลอย่างมากเช่นเดียวกัน การฉีดฟลักซ์ด้วยอัตราการไหลของก๊าซที่สูงเกินไป เช่น ที่ 15 ลิตร/นาที หรือการใช้ฟลักซ์ชนิดผงทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำโลหะ มีโอกาสเกิด Double oxide film สูงซึ่งต่อมาสามารถที่จะกลายสภาพเป็น Convolutated crack โดยจะสังเกตเห็นได้ในบางบริเวณของพื้นผิวการแตกหัก ที่มีอินคลูชันและร่องรอยการม้วนพับของเนื้อโลหะ จากรูปที่ 5.47

5.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไฮโดรเจนกับสมบัติทางกายภาพและเชิงกล

เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้ทำการวัดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนทางอ้อมโดยใช้วิธี Reduced pressure test ซึ่งรวมเอาผลกระทบของรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวร่วมด้วย ทำให้ไม่ได้ความเที่ยงตรงในการวัดเหมือนวิธีทำการวัดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่มีอยู่ในน้ำโลหะโดยตรง^[7] เหมือนวิธีการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical analyzer)^[8] หรือ Hydrogen sensor^[9] แต่อย่างไรก็ดี วิธีการทดสอบด้วย Reduced pressure test ก็ยังเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมการหล่อโลหะอะลูมิเนียม เนื่องจากมีความสะดวกรวดเร็วและเครื่องมือที่ไม่ซับซ้อน ดังนั้น การคำนวณปริมาณไฮโดรเจนในน้ำโลหะสามารถหาได้จากค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อปกติโดยใช้หลักการของ Archimedes โดยสมมติให้ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นทั้งหมดเกิดจากก๊าซไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการที่ 2^[10]

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

โดยที่ D_s คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (Sample density)

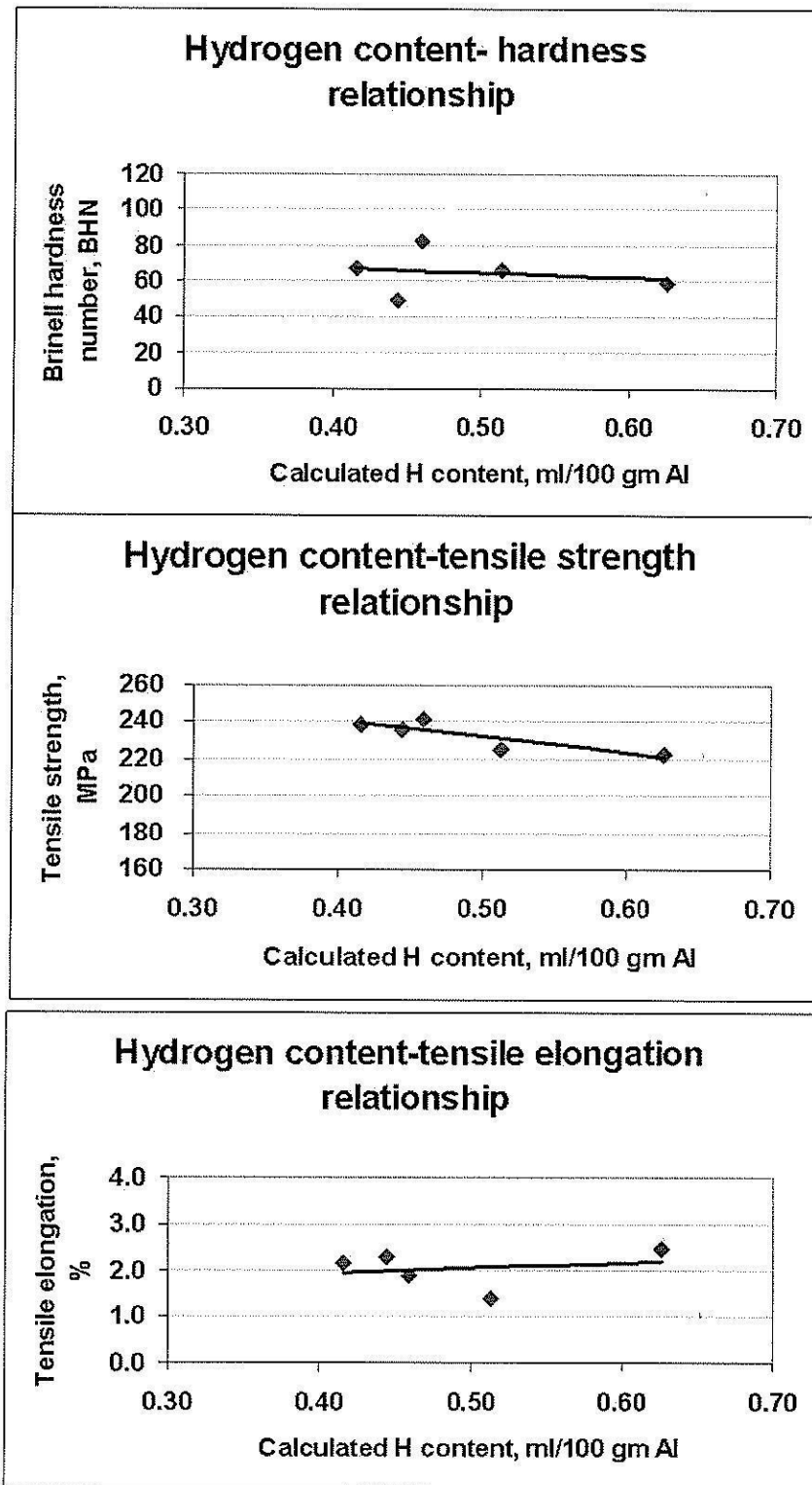
D_t คือ ความหนาแน่นทางทฤษฎีของโลหะผสม (Theoretical density of the alloy)

ตารางที่ 5.16 แสดงปริมาณ Hydrogen ($\text{ml H}_2/100 \text{ gm Al}$) ที่คำนวณได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ โดยหากไม่มีกระบวนการกำจัดก๊าซ ไฮโดรเจนสามารถละลายอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ถึง $0.6 \text{ ml H}_2/100 \text{ gm Al}$ ในการผลิตอะลูมิเนียมผสมแต่ละเกรดให้ปราศจากรูพรุนนั้น จะรักษาหรือกำหนดปริมาณไฮโดรเจนที่ต่างกันออกไป เช่น ปริมาณไฮโดรเจนเท่ากับ $0.1 \text{ ml H}_2/100 \text{ gm Al}$ ทำให้ชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมเกรด 319 (LM4) ปราศจากรูพรุนได้ แต่ถ้าปริมาณไฮโดรเจนเท่ากับ $0.35 \text{ ml H}_2/100 \text{ gm Al}$ พบว่ายังสามารถทำให้อะลูมิเนียมผสมเกรดที่มีปริมาณซิลิกอนต่ำ (Al-Cu-Ni alloy) ปราศจากรูพรุนได้ แต่อย่างไรก็ดี หากปริมาณไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมน้อยเกินไปปัญหาที่จะตามมาก็คือ Solidification shrinkage และจากการทดลองใช้ Rotary degassing ในอะลูมิเนียมเกรด 356 (LM25) ใน Ladle ขนาด 250 กิโลกรัม โดยใช้ระยะเวลาเพียงแค่ 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 rpm และ อัตราไหลของก๊าซอยู่ในช่วง 8-20 l/min^[1]

และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ พบว่า ปริมาณของไฮโดรเจนที่คำนวณได้จากชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ ยังมีปริมาณที่สูงอยู่ ($0.42\text{-}0.51 \text{ ml H}_2/100 \text{ gm Al}$) แต่ก็ลดลงในระดับหนึ่งจากในสถานะที่ไม่ได้กำจัดก๊าซ (MDFT01) อนึ่ง การคำนวณปริมาณไฮโดรเจนด้วยวิธีการนี้ได้รวมเอาผลกระทบของปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน และปริมาณรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวเข้าด้วยกัน ดังนั้น หากชิ้นงานมีรูพรุนจากการหดตัวสูง (เนื่องจากไม่ได้ทำ Grain refinement และ Modification) ก็สามารทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนที่คำนวณได้สูงกว่าความเป็นจริง อย่างไรก็ตาม กระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้วยเครื่อง FIDU นั้น แสดงให้เห็นแนวโน้มของการลดปริมาณรูพรุนอันเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนได้ และส่งผลให้สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง ความแข็งแรงแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวดีขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่คำนวณได้กับสมบัติเชิงกลของชิ้นงานในรูปที่ 5.51 และตาราง 5.16

ตารางที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Hydrogen (ml H₂/ 100 gm Al) ที่คำนวณได้จาก
 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ด้านบนกับสมบัติของชิ้นงานหล่อ

Sample	Density (g.cm ⁻³)	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 5.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Hydrogen (ml H₂/ 100 gm Al) ที่คำนวณได้จากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ต้านบนกับสมบัติของชิ้นงานหล่อ

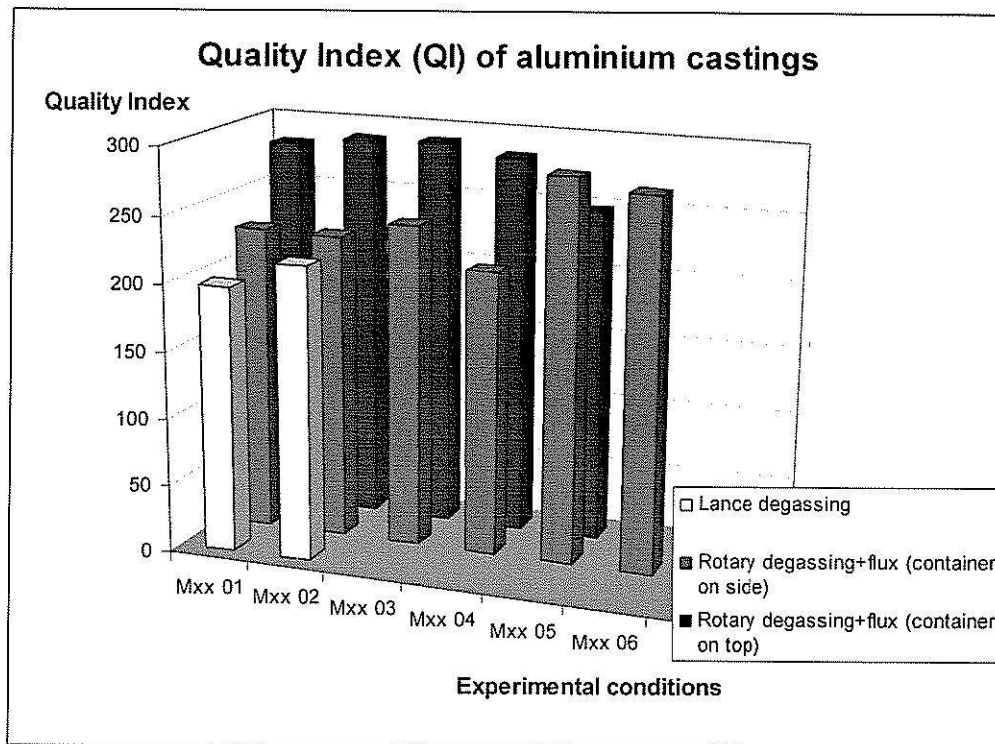
นอกจากนี้หากเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงแรงดึงของชิ้นงานทดสอบกับค่ามาตรฐานของ อะลูมิเนียมเกรด 356 (~180 MPa) จะพบว่าค่าที่มากกว่ามาตรฐาน และจากผลการตรวจสอบ องค์ประกอบทางเคมีพบว่าปริมาณของทองแดง (Cu) มากกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุส่วน หนึ่งที่ทำให้ค่าความแข็งแรงแรงดึงและความแข็งแรง ณ จุด คราก มากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ดี หาก พิจารณาค่าความแข็งแรงแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรดใกล้เคียงกันที่มีปริมาณทองแดงอยู่ในช่วงที่ทำการ ทดลอง ดังเช่น เกรด LM27 หรือ AC2B มีปริมาณทองแดงอยู่ระหว่าง 1.5-2.5% จะมี 8jk ความ แข็งแรงแรงดึงในสถานะหล่อ (As-cast) อยู่ที่ 180 MPa ^[1] ซึ่งใกล้เคียงกับอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 (LM25, AC 4C) ซึ่งมีค่าความแข็งแรงแรงดึงอยู่ที่ 180 MPa ในสถานะงานหล่อและหล่อด้วยแม่พิมพ์ โลหะเช่นเดียวกัน ซึ่งการที่ชิ้นงานหล่อมีค่าความแข็งแรงแรงดึงที่สูงกว่าค่ามาตรฐานนั้น อาจเป็นผล เนื่องมาจากความระมัดระวังในกระบวนการหล่อและเทน้ำโลหะในห้องปฏิบัติการซึ่งอาจจะมีปัจจัย ที่แตกต่างออกไปจากสถานะการทำงานในอุตสาหกรรม อีกทั้งการเกิดความปั่นป่วนในน้ำโลหะมี น้อยระหว่างกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ และเป็นที่น่าสังเกตว่าจากการศึกษาตัวแปร ในการกำจัดก๊าซ เช่น ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ที่ 1000 รอบ/นาที ซึ่งเร็วกว่าในการใช้งาน ภาคอุตสาหกรรม (~500 รอบ/นาที) อีกทั้งใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ต่ำกว่าที่ 10 ลิตร/นาที ในขณะที่ในภาคอุตสาหกรรมใช้ที่ประมาณ 15-25 ลิตร/นาที จึงทำให้ฟองก๊าซอาร์กอนที่ได้มีความ เล็กละเอียดและกระจายตัวอย่างทั่วถึง อีกทั้งอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ต่ำจะสามารถลดความ ปั่นป่วนของน้ำโลหะได้มาก เป็นการลดปัญหาฟิล์มออกไซด์ที่จะตามมา และอีกประการหนึ่งคือ การใช้แม่พิมพ์โลหะที่ทำจากเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหอนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ สูง อาจมีผลทำให้ชิ้นงานมีการเย็นตัวที่เร็วขึ้นและได้โครงสร้างที่ดีเล็กละเอียด แต่อย่างไรก็ดี ใน การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบการหล่อชิ้นงานอะลูมิเนียมด้วยแม่พิมพ์โลหะที่ผลิต จากโลหะต่างชนิดกัน ดังนั้น การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแม่พิมพ์ด้วยเหล็กหล่อแกรไฟต์ ตัวหอนก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับงานหล่ออะลูมิเนียม

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์นั้นทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดอินคลูชัน ได้ดีขึ้นนั้นมี 3 ประการ ^[4] คือ 1) เมื่อให้ฟลักซ์เคลือบลงบนอินคลูชันหรือออกไซด์ต่างๆ เกิดเป็น อนุภาค (Particle) แล้วนั้น การปั่นก๊าซอาร์กอนด้วยวิธี Rotary degassing นั้นจะทำอนุภาคเหล่านี้ เคลื่อนที่ชนกัน (Collide) และฟอร์มตัวเป็นก้อนเล็กได้ง่ายและอาจจะตกตะกอนอยู่ที่ก้นเบ้าหลอม หรือถูกพาขึ้นไปบนผิวน้ำโลหะร่วมกับฟองก๊าซอาร์กอนและถูกกวาดออกในระหว่างการทำ จด Dross ในที่สุด 2) จะมีผลทำให้อินคลูชันไม่เปียกน้ำโลหะ (Dewettability) ทำให้ง่ายต่อการแยก อินคลูชันออกจากน้ำโลหะ นอกจากนี้ การกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์ร่วมกันทำให้ใช้เวลาและ กำลังคนลดลงในขั้นตอนการปรับปรุงน้ำโลหะอีกด้วย โดยการลดเวลาการปรับปรุงน้ำโลหะนั้นมี

ความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นจะเปิดโอกาสให้ไฮโดรเจนกลับเข้าละลายสู่น้ำโลหะได้อีกทั้งยังทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ได้มากขึ้นหากผิวหน้าน้ำโลหะมีการเคลื่อนที่

หากพิจารณาค่า Quality Index (QI) ตามสมการที่ 2 โดยที่ σ_{TS} คือค่าแรงดึงสูงสุด %E คือค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและ k เป็นค่าคงที่สำหรับ Al-7Si จะมีค่า $k = 150$ จะพบว่า ค่า Quality Index เพิ่มขึ้นในกรณีที่มีการกำจัดก๊าซผสมการฉีดฟลักซ์โดยมีถังฟลักซ์อยู่ด้านบนจะให้ค่า Quality Index สูง

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



รูปที่ 5.52 ผลการเปรียบเทียบ Quality Index ของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมเมื่อผ่านการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์สถานะในสถานะที่ต่างกัน

แต่อย่างไรก็ดี ชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกำจัดก๊าซผสมการฉีดฟลักซ์ชนิดเม็คนั้นถึงแม้ว่าจะให้ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ จึงทำให้ค่า Quality Index นั้นต่ำกว่าในบางสถานะการทดลอง ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า สิ่งที่ต้องปรับปรุงเพิ่มขึ้นจากกระบวนการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์ คือ เพราะนอกจากการลดปริมาณรูพรุนและการทำความสะอาด

สะอาดน้ำโลหะแล้ว อาจจะต้องเพิ่มกระบวนการ Grain refinement และ Modification เพื่อลดปัญหาการเกิดโพรงหดตัวที่จะมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การยึดตัวนั้นเพิ่มสูงขึ้นได้ และจากเครื่องมือ Flux Injection Degassing Unit ที่ได้ผลิตขึ้นนั้น มีความเป็นไปได้ที่ผสมผสานกระบวนการ Grain refinement และ Modification ผ่านเครื่องมือฉีดฟลักซ์ไปพร้อมกัน ทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาในการปรับปรุงคุณภาพน้ำโลหะทั้งหมด เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในแต่ละกระบวนการ โดยลดการละลายของก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่้ำโลหะ ลดการเกิดออกไซด์อินคลูชันและลดการเกิดปรากฏการณ์ Fading ในการทำ Modification และ Grain refinement อีกด้วย อีกประการหนึ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติมคือ ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการฉีดฟลักซ์ซึ่งอยู่ในช่วง 730-780°C แล้วแต่นชนิดของฟลักซ์ รวมถึงอุณหภูมิและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน ร่วมกับการฉีดฟลักซ์ ทำเกรนให้ละเอียดและการปรับปรุงโครงสร้าง

บทที่ 6

สรุปผลโครงการวิจัยกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Conclusions on Aluminium Degassing Coupled with Flux Injection)

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล แสดงให้เห็นว่า กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง แม้ว่าจะใช้อะลูมิเนียมอินกอตเกรด 356 ในการหลอมโลหะก็ตามก็ยังคงแสดงให้เห็นปริมาณรูพรุนได้อย่างชัดเจน เนื่องจากไฮโดรเจนสามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียมขณะหลอมเหลว อีกทั้งการเติมเศษขี้กิ้งอะลูมิเนียมจะช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนอีกด้วย กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้หลักการพาอากาศก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน ลงไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียมโดยการปั่นด้วยมอเตอร์ แสดงให้เห็นว่าสามารถลดปริมาณรูพรุนลงได้จริง โดยทำให้ไฮโดรเจนสามารถแพร่เข้าไปในฟองก๊าซอาร์กอนและถูกพาขึ้นไปสู่ผิวหน้าของน้ำโลหะและถูกกำจัดไปในที่สุด

ปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ คือ การทำให้ฟองก๊าซอาร์กอนมีขนาดที่เล็กละเอียด มีปริมาณที่มากพอและกระจายอยู่อย่างทั่วถึงในน้ำโลหะ เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวการแพร่ของไฮโดรเจนอะตอมเข้าสู่ฟองก๊าซและวิธีการฉีดฟลักซ์ที่เหมาะสม ซึ่งปัจจัยดังกล่าว ถูกควบคุมโดย

- 1) ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์ – Rotational speed
- 2) อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน – Gas flow rate
- 3) ระยะเวลาในการกำจัดก๊าซ – Degassing time
- 4) วิธีการฉีดฟลักซ์ – Flux injection method
- 5) ชนิดของฟลักซ์ – Flux type

การเลือกวิธีการฉีดฟลักซ์และชนิดของฟลักซ์ที่เหมาะสม ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซรวมทั้งประสิทธิภาพในการทำความสะอาดน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่ดี สามารถช่วยลดปริมาณรูพรุนอันเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนในชิ้นงานหล่อ รวมทั้งลดปริมาณ Inclusion ที่เป็นอันตรายต่อสมบัติเชิงกล ทางด้านสมบัติความแข็ง และสมบัติแรงดึง ข้อดีของการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์พอจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1) การฉีดฟลักซ์จากด้านบนช่วยลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและทำให้ลดความปั่นป่วนของน้ำโลหะ ลดการตกค้างของฟลักซ์ และช่วยลดระยะเวลาในการเดินทางของฟลักซ์จากถังฟลักซ์ไปยังหัวปืนก๊าซอาร์กอน
- 2) การเลือกใช้ฟลักซ์ชนิดเม็ดทำให้ลดการฟุ้งกระจายของฟลักซ์ ลดปริมาณความชื้นที่อาจสะสมที่ผิวของเม็ดฟลักซ์ เป็นการลดมลพิษที่เป็นอันตรายสำหรับผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม
- 3) การฉีดฟลักซ์ลงไปใต้น้ำโลหะโดยตรงเป็นการลดปริมาณการสูญเสียฟลักซ์เมื่อฟลักซ์เริ่มสัมผัสกับน้ำโลหะหลอมเหลว อีกทั้งทำให้ลดปริมาณการใช้ฟลักซ์และลดการเกิดมลพิษในอากาศ
- 4) การเพิ่มประสิทธิภาพจากการปั่นด้วยฟองก๊าซอาร์กอนขนาดเล็กละเอียด ทำให้ฟลักซ์เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย รวดเร็วและกินบริเวณใต้น้ำโลหะทั่วถึงมากขึ้น
- 5) การฉีดฟลักซ์พร้อมกับการกำจัดก๊าซจะช่วยลดระยะเวลาในการปฏิบัติงาน และลดระยะเวลาที่น้ำโลหะจะถูกทิ้งไว้ในบรรยากาศการหลอม เป็นเหตุให้ลดความเสี่ยงในการสะสมของเสียใต้น้ำโลหะระหว่างนั้น

โดยจากผลการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนพร้อมการฉีดฟลักซ์ในการศึกษาวิจัยนี้ สามารถกำหนดเป็นมาตรฐานเบื้องต้นในการปฏิบัติงานหลอมอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่มีการผสมเศษซีกลิ่งอะลูมิเนียม 20% โดยใช้เตาหลอมไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีในห้องปฏิบัติการงานหล่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงสถานะการกำจัดก๊าซพร้อมการฉีดฟลักซ์โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 (ผสมเศษซิงก์ถึงอะลูมิเนียม 20%) โดยใช้เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เตาหลอม	เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กำลัง 20-30 กิโลวัตต์ ความถี่ 1000 เฮิร์ต
เบ้าหลอม	เซรามิกขนาด 15-20 กิโลกรัม
วัตถุดิบหลอม	อะลูมิเนียมผสมเกรด 356 (80%) + เศษซิงก์ถึงอะลูมิเนียม (20%)
อุณหภูมิหลอม	850-870 °C
อุณหภูมิกำจัดก๊าซและฉีดฟลักซ์	850°C
ความเร็วรอบในการปั่นท่อแกรไฟต์	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

การวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดตัวของชิ้นงานเป็นอีกทิศทางหนึ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการทำเกรนให้ละเอียดและการปรับปรุงโครงสร้าง อ้างอิงจากพื้นฐานข้อมูลเดิมที่มีอยู่

รวมถึงการวิจัยทางด้านการปรับปรุงแม่พิมพ์โลหะ เพิ่มประสิทธิภาพของแม่พิมพ์โดยการเลือกใช้วัสดุแม่พิมพ์และวัสดุเคลือบผิวที่เหมาะสม

บรรณานุกรม

1. Brown, J. R. (1999). Foseco non-ferrous foundryman's handbook, Butterworth Heinemann.
2. Granular fluxes for aluminum alloys, environmental and technological advances. Foseco: Foundry practice: 16-20.
3. 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.
4. 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.
5. (1991). The GBF system for in-line refining of aluminium. Foseco: Foundry practice: 12-18.
6. Campbell, J. (2004). Casting practice: The 10 rules of castings, Elsevier.
7. Fox, S. and J. Campbell (2000). "Visualisation of oxide film defects during solidification of aluminium alloy." Sripta materialia **43**: 881-886.
8. Lapham, D. P., C. Schwandt, et al. (2002). "The detection of hydrogen in molten aluminium." Ionics **8**: 391-401.
9. A novel electrochemical analyser for hydrogen determination in aluminium melts. Foseco: Foundry practice: 12-15.
10. 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.
11. Gruzleski, J. E. and B. M. Closset (1990). The treatment of liquid aluminium-silicon alloys, The American Foundrymen's Society, Inc
12. Jorstad, J. L. and W. M. Rasmussen (2001). Aluminium casting technology, AFS: American Foundrymen's Society.

ประวัติผู้แต่ง

ชื่อ(ภาษาไทย) นางสาว ฐาปนีย์ อุดมพล

(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

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: 10th World Conference on Titanium, 2003, Hamburg, Germany, Lutjering, G., Abrecht, J., WILEY-VCH, Vol.5, p. 2829-2836.