



การพัฒนาฟลักซ์สำหรับปรับสภาพโครงสร้างในโลหะผสมหล่ออลูมิเนียม
ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล

The Development of Flux for Microstructure Modification in
Recycled Aluminum Cast Alloys

พิสิทธ์ เมืองน้อย^{1*}

Received: June, 2016; Accepted: September, 2016

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาฟลักซ์สำหรับปรับสภาพโครงสร้างในโลหะผสมหล่ออลูมิเนียม-ซิลิคอน-เหล็ก ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล ฟลักซ์ที่ใช้สำหรับปรับสภาพโครงสร้างมี 8 ชนิด ปริมาณการเติม 4 wt.% เวลาค้ำน้ำโลหะ 30 นาที โลหะผสมถูกหลอมและเทลงในแม่แบบสเตนเลส ผลการทดลองพบว่า การเติมฟลักซ์ชนิดที่ 1 (KCl-NaCl-NaF) โครงสร้างประกอบด้วยเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่มีรูปทรงไม่แน่นอน และเฟส β -Al₅FeSi เมื่อเติมฟลักซ์ชนิดที่ 2 (SrCl₂) และฟลักซ์ชนิด 4 (SrCl₂-MnO₃) สามารถเปลี่ยนเฟสยูเทคติกซิลิคอนให้มีรูปทรงกลมมนแค่บางส่วน เมื่อทดลองเติมฟลักซ์ชนิดที่ 5 (MnCl₂) พบว่ามีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเฟส β -Al₅FeSi กลายเป็นเฟส α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนไม่มีการปรับสภาพเฟส เมื่อเติมฟลักซ์ชนิดที่ 6 - 8 (CrCl₂, SrCl₂-MnCl₂ และ SrCl₂-CrCl₂) มีผลทำให้เฟส β -Al₅FeSi ถูกปรับสภาพกลายเป็นเฟส α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ ทั้งหมด ขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนถูกปรับสภาพให้มีรูปทรงกลมมน

คำสำคัญ : โลหะผสมอลูมิเนียม; รีไซเคิล; ฟลักซ์

¹ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ราชบุรี

* Corresponding Author E - mail Address: Phisith.mua@rmutr.ac.th

Abstract

The research's purpose was to develop the flux for microstructure modification in recycled Al-Si-Fe cast alloys. There were eight fluxes for modification in level of 4 wt.% content and constant holding time (30 min). The alloy was melted and cast into stainless mold. The experimental results showed an addition of KCl-NaCl-NaF flux results in an acicular eutectic Si and flake-like β -Al₅FeSi phase microstructure. The additions of SrCl₂ and SrCl₂-MnO₃ fluxes partly modified the eutectic Si into the fibrous morphology. The additions of MnCl₂ flux were effective to modify the β -Al₅FeSi phase into the α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ phase, while the eutectic Si was unmodified. The addition of CrCl₂, SrCl₂-MnCl₂ and SrCl₂-CrCl₂ flux fully modifies the β -Al₅FeSi phase into α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ phase, while the eutectic Si was modified into fibrous morphology.

Keywords: Aluminum Alloys; Recycled; Flux

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ฟลักซ์เป็นสารเคมีที่มีความสำคัญสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมงานหล่ออย่างแพร่หลาย หน้าที่สำคัญของฟลักซ์ เช่น ป้องกันการเกิดออกซิเดชันของน้ำโลหะหลอมเหลวกับอากาศ [1] กำจัดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผนังของเตา กำจัดสารมลทินที่ปนเปื้อนในน้ำโลหะ โดยการเติมสารเคมีที่มีส่วนประกอบของฟลูออไรด์ ได้แก่ Na₃AlF₆, CaF₂ และ Na₂SiF₆ เป็นต้น [2] โดยปกติฟลักซ์จะมีส่วนผสมของ NaCl และ KCl เป็นหลัก เมื่อนำสารทั้ง 2 ชนิดมารวมกันที่สัดส่วน 50% เท่ากัน จะมีจุดหลอมเหลวต่ำเท่ากับ 660 องศาเซลเซียส [3] การแบ่งชนิดของฟลักซ์นั้นสามารถแบ่งได้หลายประเภท ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน ฟลักซ์ปกคลุมผิวหน้า (Cover Flux) นิยมใช้สำหรับปกคลุมผิวหน้าน้ำโลหะเพื่อป้องกันการแพร่ของแก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่ น้ำโลหะหลอมเหลว เป็นที่ทราบกันว่าแก๊สไฮโดรเจนนั้น สามารถแพร่เข้าไปได้สูงเท่ากับ 1.7 mL/100 g เมื่อโลหะอยู่ในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส หลังจากขึ้นงานหล่อเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ทำให้เกิดเป็นฟองอากาศเกิดขึ้น ส่งผลเสียต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดลดต่ำลง [4]

คุณสมบัติเชิงกลที่ดีของขึ้นงานหล่อโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาค ลักษณะรูปร่างและการกระจายตัวของเฟสยูเทคติกซิลิคอน ตามธรรมชาติของเฟสซิลิคอนจะฟอร์มตัวและเติบโตในทิศทาง <112> และมีการ twinning ในระนาบ (111) ทำให้เฟสซิลิคอนมีรูปร่างไม่แน่นอน (Acicular) ส่งผลต่อคุณภาพของงานหล่อ เช่น สมบัติทางกลที่ต่ำ [5] และความสามารถในการตัดปาดผิวลดลง เป็นต้น กรรมวิธีที่นิยมใช้ในการปรับสภาพโครงสร้างจุลภาค โดยการเติมอะตอมแปลกปลอมหลายชนิด เช่น การเติมธาตุสตรอนเทียม และโซเดียม โดยปกตินิยมเติมโลหะผสม Al-Sr เติมปริมาณ 0.02 - 0.04 wt.% [6] เมื่อเติมโลหะผสมชนิดนี้ลงไปโลหะหลอมเหลวและปล่อยให้แข็งตัว ธาตุสตรอนเทียมจะขัดขวางการเติบโตของผลึกซิลิคอนในทิศทาง <112> และทำให้เกิดการเติบโตไปได้

ในหลายทิศทาง ทำให้เฟสซิลิคอนมีขนาดเล็กลงและมีรูปร่างกลมมนมากขึ้น (Fibrous) การเติมธาตุสตรอนเทียมในปริมาณที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบ $AlSr_4Si$ ในโครงสร้างจุลภาคส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ต่ำ [5]

ในภาคอุตสาหกรรมที่ผลิตขึ้นส่วนจากโลหะผสมอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล เช่น ลูกสูบเกาเศษซึ่กลึง ขอบประตูขอบหน้าต่าง และสายไฟอลูมิเนียม เป็นต้น มักจะเกิดการปนเปื้อนธาตุเหล็ก [7] แม้กระทั่งกระบวนการหล่อที่ไม่มีคุณภาพก็ส่งผลต่อการปนเปื้อนของธาตุเหล็กด้วยเช่นกัน เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในงานหล่อนั้นส่วนมากทำมาจากเหล็ก เช่น ท่อไอล์แก๊ส อุปกรณ์สำหรับตัดโครส เหล็กกวนน้ำโลหะ เป็นต้น ธาตุเหล็กที่เกิดจากการปนเปื้อนจะฟอร์มตัวเป็นเฟส $\beta-Al_5FeSi$ มีลักษณะเป็นเส้นยาวและปลายแหลมจากลักษณะเฟสดังกล่าวส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อที่ต่ำ [8] ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศที่มุ่งเน้นศึกษาการปรับสภาพเฟส $\beta-Al_5FeSi$ โดยใช้ธาตุ Mn และ Li ในรูปแบบของโลหะผสมในการปรับสภาพเฟส $\beta-Al_5FeSi$ ให้กลายเป็นเฟส $\alpha-Al_{15}(Mn,Cr,Fe)_3Si_2$ ที่มีลักษณะคล้ายกับตัวอักษรจีน (Chinese Script) ทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อเพิ่มขึ้นได้ การเติมธาตุผสมสำหรับปรับสภาพเฟส $\beta-Al_5FeSi$ ในปริมาณที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดการฟอร์มตัวของเฟสตะกอน (Sludge Phase) มีลักษณะเป็นก้อนในโครงสร้างจุลภาคส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ต่ำเช่นกัน [9]

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นเพื่อศึกษาการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนและเฟส $\beta-Al_5FeSi$ ของโลหะผสมอลูมิเนียมที่มีการปนเปื้อนของเหล็กที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลอยู่มาก มีการทดลองเติมธาตุโพแทสเซียม [10] ลงในอลูมิเนียมผสมเกรด 319 พบว่าสามารถทำให้เฟส $\beta-Al_5FeSi$ มีขนาดและปริมาณลดลง มีการศึกษาผลกระทบของธาตุ Sr, Mg และ Cr ในการปรับสภาพเฟส $\beta-Al_5FeSi$ [11] ทดลองเติมในโลหะผสม Al-Si-Fe พบว่าการเติม Cr และ Cr/Sr มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเฟส $\beta-Al_5FeSi$ กลายเป็นเฟส $\alpha-Al_{15}(Mn,Cr,Fe)_3Si_2$ ในขณะที่การเติม Mg ไม่มีผลต่อการปรับสภาพเฟส มีการพัฒนาการปรับสภาพเฟสแบบใหม่ในรูปแบบของโลหะแม่ Al-Mn-Sr [12] เติมในโลหะผสม Al-7Si-1Fe พบว่าโลหะแม่ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นั้นสามารถปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนและเฟส $\beta-Al_5FeSi$ ได้พร้อม ๆ กัน นอกจากนี้มีการศึกษาผลกระทบของสตรอนเทียมต่อลักษณะและรูปร่างของเฟสยูเทคติกซิลิคอนและสมบัติเชิงกลของโลหะผสม Al-Si-Cu พบว่าการเติมธาตุสตรอนเทียม ทำให้รูปร่างของเฟสยูเทคติกซิลิคอนเปลี่ยนจากรูปทรงไม่แน่นอน กลายเป็นรูปทรงกลมมน ที่ปริมาณการเติม 0.03 wt.% ส่งผลให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงขึ้น [13]

จากทั้งหมดที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการควบคุมโครงสร้างจุลภาคของเฟสยูเทคติกซิลิคอนและเฟส $\beta-Al_5FeSi$ ในงานหล่อนั้นมีผลต่อคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมยังไม่มีฟลักซ์ที่สามารถทำหน้าที่ได้ทั้งปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนและเฟส $\beta-Al_5FeSi$ ไปพร้อม ๆ กัน เพื่อทำให้ใช้งานได้สะดวกและง่ายขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาฟลักซ์สำหรับปรับสภาพโครงสร้างในโลหะผสมอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล

วิธีการทดลอง

1. ขั้นตอนการผสมฟลักซ์

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยฟลักซ์ SrCl₂ ความบริสุทธิ์ 99.99% ฟลักซ์ MnCO₃ ความบริสุทธิ์ 99.9% ฟลักซ์ MnCl₂ ความบริสุทธิ์ 99% และฟลักซ์ CrCl₂ ความบริสุทธิ์ 95% จากบริษัท Sigma-Aldrich โดยการนำสารเคมีมาบดให้ละเอียด และนำมาผสมรวมกันให้ได้ตามสัดส่วนที่คำนวณไว้ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นนำฟลักซ์ที่ได้จากการผสมไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

2. ทดลองปรับสภาพเฟส

การทดลองการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนและเฟสสารประกอบเชิงโลหะนั้น ผู้วิจัยกำหนดปริมาณการเติมฟลักซ์แต่ละชนิดลงไปในน้ำโลหะหลอมเหลวในปริมาณการเติม 4 wt.% เท่ากันทุก ๆ สภาวะการทดลอง โลหะผสมอลูมิเนียม -7% ซิลิคอน -1% เหล็ก จะถูกหลอมในเบ้าซิลิคอนคาร์ไบด์ ปริมาณการหลอม 1 กิโลกรัม โดยใช้เตาไฟฟ้าชดวดด้านทาน อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอม 850 องศาเซลเซียส เมื่อโลหะเริ่มหลอมเหลว เติมฟลักซ์แต่ละชนิดตามที่ได้ออกแบบไว้ ใช้เวลาดังน้ำโลหะ 30 นาที ไล่แก๊สที่แพร่เข้าไปในน้ำโลหะหลอมเหลวโดยแก๊สอาร์กอน ใช้เวลา 5 นาที จากนั้นเทลงแบบหล่อเหล็กสำหรับทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ตามมาตรฐานญี่ปุ่น JIS H5202 ดังแสดงในรูปที่ 1 และเทลงแบบหล่อสเตนเลสผนังบางที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำเท่ากับ 0.2 °C/s เพื่อลดผลกระทบจากการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน ที่มีผลมาจากอัตราการเย็นตัวที่สูงและเพื่อจำลองการเย็นตัวแบบทราयीขึ้น ซึ่งนิยมใช้กันมากในการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ อุณหภูมิที่ใช้ในการเท 700 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานที่ได้จากแบบหล่อเหล็กไปอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อคลายความเค้นที่เกิดจากการหล่อที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลโดยเครื่อง Universal Testing Machine เตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ได้แบบหล่อสเตนเลสผนังบาง กัดผิวหน้าด้วยสารละลาย Kellers Etch ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และวัดปริมาณเฟสที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ MSQ

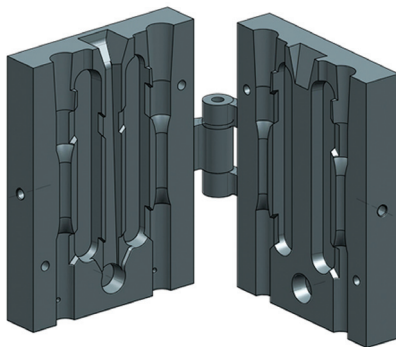
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	สารเคมี (wt.%)						
	NaCl	KCl	NaF	SrCl ₂	MnCO ₃	MnCl ₂	CrCl ₂
1	45	45	10	-	-	-	
2	45	45	5	5	-	-	
3	30	30	10	-	30	-	
4	30	30	5	5	30	-	
5	30	30	10	-	-	30	
6	30	30	10	-	-	-	30
7	30	30	5	5	-	30	
8	30	30	5	5	-	-	30

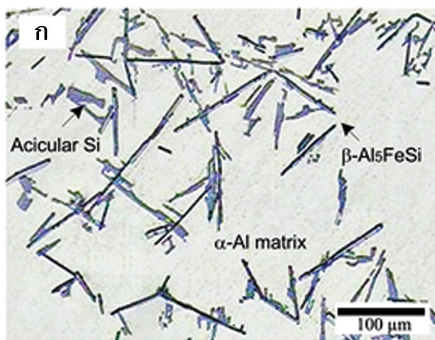
ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. โครงสร้างจุลภาค

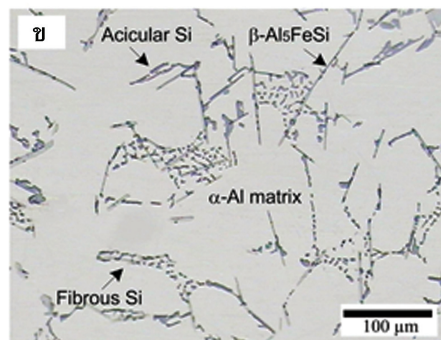
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการปรับสภาพเฟสโดยการเติมฟลักซ์แต่ละชนิด พบว่าชิ้นงานหล่อที่ผ่านการเติมฟลักซ์ชนิดที่ 1 (KCl-NaCl-NaF) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมงานหล่อ โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่มีรูปทรงไม่แน่นอน และเฟส β -Al₅FeSi ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของอลูมิเนียม เหล็ก และซิลิคอน เป็นสารประกอบเชิงโลหะ มีลักษณะเป็นเส้นยาว เนื่องจากเฟส β -Al₅FeSi มีโครงสร้างผลึกเป็น Monoclinic ทำให้มีการเติบโตในทิศทางเดียว ความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 80 - 120 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) จากลักษณะและรูปร่างของเฟส β จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและคุณภาพชิ้นงานหล่อลดต่ำลง เมื่อเติมฟลักซ์ชนิดที่ 2 (KCl-NaCl-NaF-SrCl₂) พบว่าเฟสยูเทคติกซิลิคอนปรับสภาพจากรูปทรงไม่แน่นอน กลายเป็นรูปทรงกลมมน และมีบางส่วนที่มีรูปทรงไม่แน่นอนเล็กน้อย โดยธาตุสตรอนเทียมจะแพร่เข้าไปในน้ำโลหะหลอมเหลวและเกิดการขัดขวางการเติบโตของซิลิคอนในทิศทาง <112> และทำให้เกิดการเติบโตได้ในหลายทิศทาง [6] ในขณะที่เฟส β -Al₅FeSi มีปริมาณลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข)



รูปที่ 1 แบบหล่อเหล็กมาตรฐาน JIS H5202 ที่ใช้ในการทดลอง

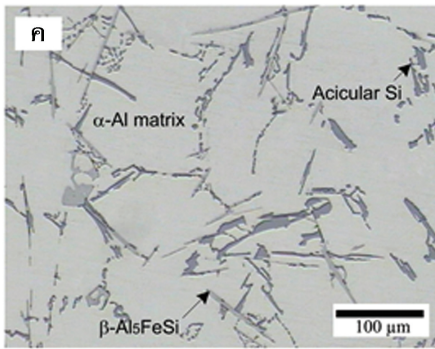


(ก) ฟลักซ์ชนิดที่ 1

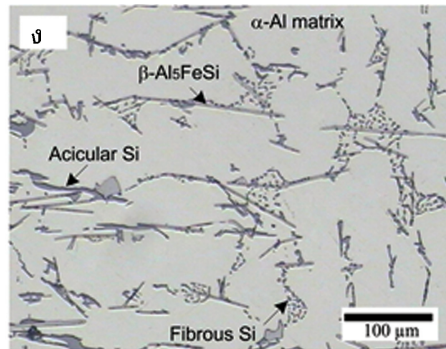


(ข) ฟลักซ์ชนิดที่ 2

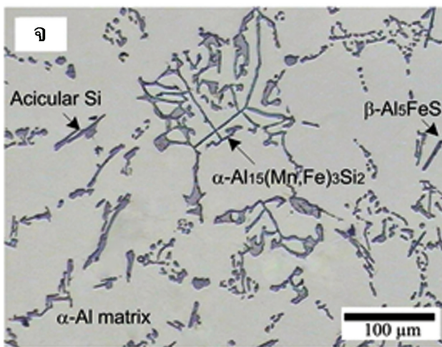
รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหลังจากเติมฟลักซ์



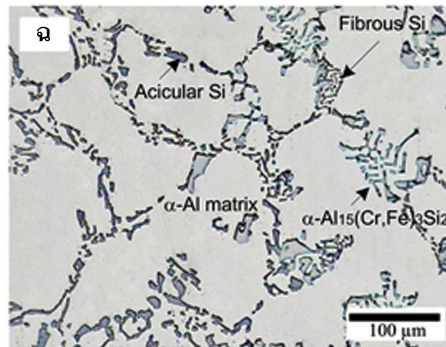
(ค) ฟลักซ์ชนิดที่ 3



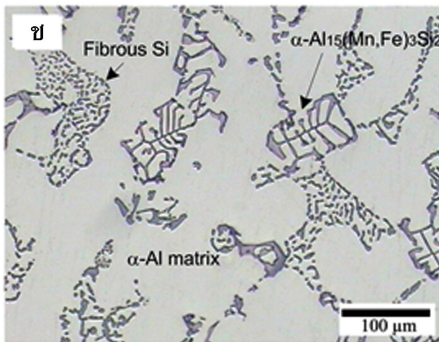
(ง) ฟลักซ์ชนิดที่ 4



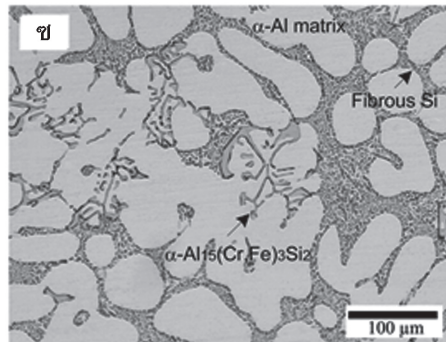
(จ) ฟลักซ์ชนิดที่ 5



(ฉ) ฟลักซ์ชนิดที่ 6



(ช) ฟลักซ์ชนิดที่ 7



(ซ) ฟลักซ์ชนิดที่ 8

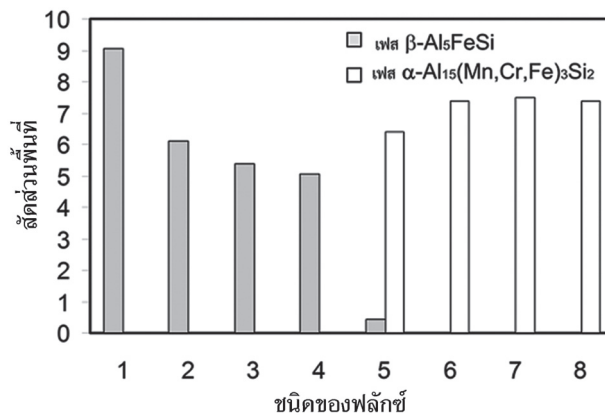
รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหลังจากเติมฟลักซ์ (ต่อ)

โครงสร้างจุลภาคเมื่อผ่านการเติมฟลักซ์ชนิดที่ 3 ($KCl-NaCl-NaF-MnCO_3$) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ค) พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีรูปทรงไม่แน่นอน ในขณะที่เฟส $\beta-Al_5FeSi$ ไม่สามารถปรับสภาพกลายเป็นเฟส $\alpha-Al_{15}(Mn,Cr,Fe)_3Si_2$ ได้ เช่นเดียวกันกับการเติมฟลักซ์ชนิดที่ 4 ($KCl-NaCl-NaF-SrCl_2-MnCO_3$) จากส่วนผสมของฟลักซ์ที่มีธาตุสตรอนเทียม ทำให้เฟสยูเทคติกซิลิคอนมีการปรับสภาพเป็นรูปทรงกลมมน ดังแสดงในรูปที่ 2 (ง) ผลจากการเติมฟลักซ์

MnCO₃ ไม่ส่งผลต่อการปรับสภาพเฟส β -Al₅FeSi เนื่องจาก MnCO₃ มีความหนาแน่น 3.12 g/mL มีความสามารถในการละลายในอลูมิเนียมหลอมเหลวได้น้อย ทำให้เกิดความหนืดสูงบริเวณเข้าหลอม ซึ่งลักษณะฟลักซ์ที่คืนนั้นต้องมีค่าความหนืดต่ำและมีค่า Fluidity ที่ดี [14] โครงสร้างจุลภาคเมื่อผ่านการเติมฟลักซ์ชนิดที่ 5 (KCl-NaCl-NaF-MnCl₂) ดังแสดงในรูปที่ 2 (จ) พบว่าโครงสร้างจุลภาคสามารถเปลี่ยนเฟส β -Al₅FeSi ให้กลายเป็นเฟส α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของอลูมิเนียม แมงกานีส เหล็ก และซิลิคอน กระจายตัวอยู่ทั่วไปบนพื้นของอลูมิเนียม โดยกลไกในการปรับสภาพเฟสเกิดจากการแพร่ของธาตุ Mn จาก MnCl₂ [15] แพร่เข้าไปในน้ำโลหะหลอมเหลวและรวมตัวเป็นเฟส α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ มีลักษณะคล้ายตัวอักษรจีน จากลักษณะดังกล่าวส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานหล่อสูงขึ้น การเติมฟลักซ์ชนิดที่ 6 (KCl-NaCl-NaF-CrCl₂) ชนิดที่ 7 (KCl-NaCl-NaF-SrCl₂-MnCl₂) และชนิดที่ 8 (KCl-NaCl-NaF-SrCl₂-CrCl₂) พบว่ามีการปรับสภาพทั้งเฟสยูเทคติกซิลิคอนและเฟส β -Al₅FeSi ให้กลายเป็นเฟส α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ ได้พร้อม ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2 (ฉ) (ช) (ซ) ตามลำดับ

2. ปริมาณเฟส

จากผลการตรวจสอบปริมาณเฟสโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ MSQ พบว่าชิ้นงานหล่อที่ผ่านการเติมฟลักซ์ชนิดที่ 1 มีการฟอร์มตัวของเฟส β -Al₅FeSi ปริมาณ 9.07 เมื่อทดลองเติมฟลักซ์ชนิดที่ 2 ปริมาณเฟส β -Al₅FeSi ลดลงเท่ากับ 6.10 เติมฟลักซ์ชนิดที่ 3 เฟส β -Al₅FeSi มีปริมาณเท่ากับ 5.38 และลดลงเท่ากับ 5.07 เมื่อผ่านการเติมฟลักซ์ชนิดที่ 4 ในขณะที่การเติมฟลักซ์ชนิดที่ 5 ที่มีส่วนผสมของ MnCl₂ มีการฟอร์มตัวของเฟส β -Al₅FeSi ปริมาณเล็กน้อยเท่ากับ 0.45 และเฟส α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ เท่ากับ 6.4 ผลจากการเติมฟลักซ์ชนิดที่ 6 - 8 มีการฟอร์มตัวของเฟส α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ มากขึ้นเท่ากับ 7.40 7.50 และ 7.40 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ปริมาณเฟสต่อหน่วยพื้นที่จากการเติมฟลักซ์แต่ละชนิด

3. ทดสอบสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบแรงดึง

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อถูกนำไปอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) ที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้มีการกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีสม่ำเสมอ และ

ลดความเค้นที่เกิดขึ้นจากการเย็นตัว โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้น จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะและรูปร่างมากนัก เนื่องจากอุณหภูมิในการตกผลึกของเฟส β -Al₅FeSi และเฟส α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ จะพอร์มตัวที่อุณหภูมิสูง และเวลาในการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้นไม่นานเกินไป โดยวัดค่าสำคัญที่ได้ประกอบด้วย ค่าความแข็งแรงที่จุดคราก ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ดังแสดงในรูปที่ 4

3.1 ค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength)

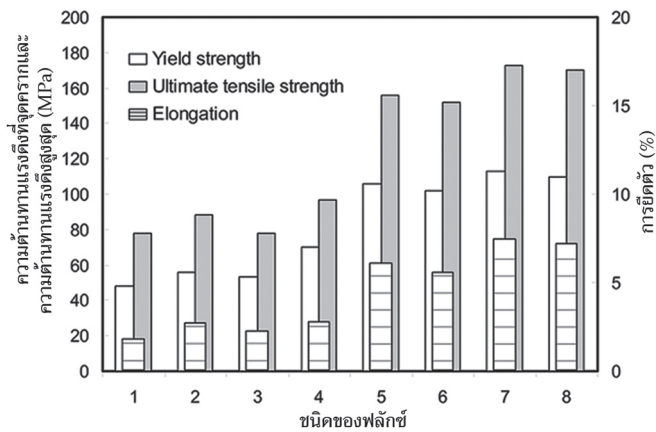
จากผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานหล่อที่ผ่านการเติมฟลักซ์ชนิดที่ 1 มีค่าความแข็งแรงที่จุดครากเท่ากับ 48.56 MPa เมื่อทดลองเติมฟลักซ์ชนิดที่ 2 ทำให้ค่าความแข็งแรงที่จุดครากเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 56.40 MPa เมื่อเติมฟลักซ์ชนิดที่ 3 มีค่าความแข็งแรงที่จุดครากเท่ากับ 53.10 MPa และเพิ่มขึ้นเท่ากับ 70.43 MPa เมื่อเติมฟลักซ์ชนิดที่ 4 ลงไปในน้ำโลหะหลอมเหลว ฟลักซ์ชนิดที่ 5 ที่มีส่วนผสมของ MnCl₂ มีค่าความแข็งแรงที่จุดครากเท่ากับ 106.69 MPa ฟลักซ์ชนิดที่ 6 ที่มีส่วนผสมของ CrCl₂ มีค่าความแข็งแรงที่จุดครากเท่ากับ 102.33 MPa และฟลักซ์ชนิดที่ 7 และ 8 มีค่าความแข็งแรงที่จุดครากเพิ่มขึ้นเท่ากับ 113.58 และ 110.98 MPa จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงที่จุดครากมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเฟส α -Al ที่เป็นเนื้อพื้นมีความแข็งแรง จากผลของการเติมธาตุสตรอนเทียม แมงกานีส และโครเมียม ซึ่งเข้าไปเป็นสารละลายของแข็งในพื้นอลูมิเนียม (Solid Solution Hardening) ทำให้ค่าการยึดเหนี่ยวทางเคมี (Chemical Bonding) สูง ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงที่จุดครากเพิ่มสูงขึ้น

3.2 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)

ชิ้นงานหล่อที่ผ่านการเติมฟลักซ์ชนิดที่ 1 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 78.06 MPa เนื่องจากลักษณะของเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่มีรูปร่างไม่แน่นอนและเฟส β -Al₅FeSi ที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวและปลายแหลม ส่งผลต่อความเค้นสะสมสูง และเป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดรอยแตกบริเวณเฟสยูเทคติกซิลิคอนและเฟส β -Al₅FeSi ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำ [16] เมื่อเติมฟลักซ์ชนิดที่ 2 ที่มีส่วนผสมของ SrCl₂ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 88.93 MPa ทดลองเติมฟลักซ์ชนิดที่ 3 และ 4 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 78.32 และ 97.13 MPa ในขณะที่เติมฟลักซ์ชนิดที่ 5 - 8 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 156.77 152.93 173.52 และ 170.00 MPa ตามลำดับ จากการปรับสภาพรูปร่างเฟสยูเทคติกซิลิคอนให้มีรูปทรงที่กลมมนและปรับสภาพเฟส β -Al₅FeSi กลายเป็นเฟส α -Al₁₅(Mn,Cr,Fe)₃Si₂ ที่มีลักษณะคล้ายตัวอักษรจีน มีการกระจายตัวที่ดี เนื่องจากโครงสร้างผลึกแบบ HCP มีการเติบโต 3 ทิศทาง จากลักษณะดังกล่าวส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านการเติมฟลักซ์ที่สามารถปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนและเฟส β -Al₅FeSi

3.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation)

จากผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานหล่อที่ผ่านการเติมฟลักซ์ชนิดที่ 1 ค่าการยืดตัวเท่ากับ 1.82% เมื่อทดลองเติมฟลักซ์ชนิดที่ 2 ส่งผลต่อค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.7% เติมฟลักซ์ชนิดที่ 3 ค่าการยืดตัวเท่ากับ 2.30% และเท่ากับ 2.82% เมื่อเติมฟลักซ์ชนิดที่ 4 และฟลักซ์ชนิดที่ 5 - 8 มีค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 6.12 5.68 7.55 และ 7.22% ตามลำดับ



รูปที่ 4 สมบัติเชิงกลที่ได้จากการเติมฟลักซ์แต่ละชนิด

จากผลการทดลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่าฟลักซ์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นั้น สามารถปรับสภาพโครงสร้างจุลภาคและเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมหล่ออลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลได้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการทดลองปรับสภาพโครงสร้างด้วยการเติมฟลักซ์ชนิด $MnCl_2$ [15] สำหรับการปรับสภาพเฟส $\beta-Al_5FeSi$ และการทดลองเติมของธาตุ Sr และ Cr [11] ในการปรับสภาพเฟส $\beta-Al_5FeSi$ ในโลหะผสม Al-Si-Fe โดยเติมในรูปแบบโลหะผสม Al-Sr และ Al-Cr เพื่อปรับสภาพโครงสร้างแบบวิธีดั้งเดิม นอกจากนี้คุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [13] โดยการเติมธาตุสโครเนียมเพื่อปรับสภาพรูปร่างเฟสยูเทคติกซิลิคอนและสมบัติเชิงกลของโลหะผสม Al-Si-Cu

สรุปผลการทดลอง

โลหะผสมอลูมิเนียมที่ใช้ฟลักซ์ KCl-NaCl-NaF โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสยูเทคติกซิลิคอนและเฟส $\beta-Al_5FeSi$ เมื่อเติมฟลักซ์ที่มีส่วนผสมของ $SrCl_2$ ทำให้เฟสยูเทคติกซิลิคอนมีรูปร่างกลมมนและปริมาณเฟส $\beta-Al_5FeSi$ ลดต่ำลง ทดลองเติมฟลักซ์ที่มีส่วนผสมของ $MnCO_3$ ส่งผลให้ปริมาณเฟส $\beta-Al_5FeSi$ มีปริมาณลดลงเล็กน้อย แต่ไม่สามารถปรับสภาพเฟส $\beta-Al_5FeSi$ ให้กลายเป็นเฟส $\alpha-Al_{15}(Mn,Cr,Fe)_3Si_2$ ได้ และฟลักซ์ที่มีส่วนผสมของ $MnCl_2$ สามารถปรับสภาพเฟส $\beta-Al_5FeSi$ กลายเป็นเฟส $\alpha-Al_{15}(Mn,Cr,Fe)_3Si_2$ ในขณะที่ฟลักซ์ที่มีส่วนผสมของ $MnCl_2 + SrCl_2$, $CrCl_2$ และ $SrCl_2 + CrCl_2$ สามารถปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนและเฟส $\beta-Al_5FeSi$ ได้พร้อม ๆ กัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2558

References

- [1] Crepeau, P.N., Fenyés, M.L. and Jeanneret, J.L. (1992). Solid Fluxing Practices for Aluminum Melting. *Mod Cast.* pp. 28-30
- [2] Majidi, O., Shabestari, S.G. and Aboutalebi, M.R. (2007). Study of Fluxing Temperature in Molten Aluminum Refining Process. *Journal of Materials Processing Technology.* Vol. 182. pp. 450-455
- [3] Tenorio, J.A.S. and Espinosa, D.C.R. (2002). Effect of Salt/Oxide Interaction on the Process of Aluminum Recycling. *Light Metal.* pp. 89-93
- [4] Kaufman, J.G. and Elwin L.R. (2004). *Aluminum Alloy Casting, Properties, Processes and Applications.* USA : American Foundry Society
- [5] John, E.G. and Bernard M.C. (1990). *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys.* USA : American Foundry Society
- [6] Backerud, L., Chai, G. and Tamminen, J. (1991). *Solidification Characteristic of Aluminum Alloy.* Strockholm : American Foundry Society
- [7] George, E., Totten, D. and Scott, M. (2003). *Handbook of Aluminum.* NewYork : Marcel Dekker
- [8] Ma, Z. and Samuel, A.M. (2008). A Study of Tensile Properties in Al-Si-Cu and Al-Si-Mg Alloys: Effect of β Phase Intermetallics and Porosity. *Materials Science and Engineering.* pp. 36-51
- [9] Ashtari, P., Tezuka, H. and Sato, T. (2004). Modification of Fe-Containing Intermetallic Compounds of Al-Si-Cu-Fe Cast Alloy Using Sr, Li and Mn Additions. In *Proceedings of the Internationa Conference on Aluminium Alloys.* Australasia : Institute of Materials Engineering Australasia. pp. 937-942.
- [10] Ashtari, P., Tezuka, H. and Sato, T. (2005). Modification of Fe-Containing Intermetallic Compounds by K Addition to Fe-Rich AA319 Aluminum Alloys. *Scripta Materials.* Vol. 53. pp. 937-942
- [11] Eidhed, K. (2008). Modification of β -Al₅FeSi Compound in Recycled Al-Si-Fe Cast Alloy by Using Sr, Mg and Cr Additions. *Journal of Materials Science and Technology.* Vol. 24. No. 1. pp. 45-47
- [12] Phisith, M. and Eidhed, K. (2011). The Development of Al-10%Mn-0.6%Sr Master Alloy for Modification in Al-7%Si-1%Fe Cast Alloy. In *The 9th PSU-Engineering conference (PEC-4).* Phuket : Prince of Songkla University. pp. 681-687
- [13] Shin, S.S., Kim, E.S., Yeom, G.Y. and Lee, J.C. (2012). Modification Effect of Sr on the Microstructures and Mechanical Properties of Al-10.5Si-2Cu Recycled Alloy for Die Casting. *Materials Science and Engineering A.* Vol. 532. pp. 151-157

- [14] Utigard, T.A., Friesen, K., Roy, R.R., Lim, J., Silny, A. and Dupuis, C. (1998). The Properties and Uses of Fluxes in Molten Aluminum Processing. *The Journal of the Minerals, Metal and Materials Society*. pp. 38-43
- [15] Yu, G.J. and Peng, J.H. (2013). The Effect of Addition Mn on the Morphology of Fe-rich Phase in the Al-1Fe alloy. *Advanced Materials Research*. Vol. 602-604. pp. 590-593
- [16] Davis, J.R. (1993). *Aluminum and Aluminum Alloys*. USA : ASM International