

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

อิทธิพลของกระบวนการหล่อต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ของโลหะผสมอะลูมิเนียมกึ่งแข็งเกรด A356

The Effects of Casting Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Semi-Solid A356 Aluminium Alloy

กัญญลักษณ์ เอี่ยมจำรูญ¹, นุชธนา พูลทอง¹ และ วรวิทย์ จิรจิตติเจริญ²

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
เลขที่ 126 ถนนประชาธิปไตย เขตทุ่งครุ แขวงบางมด กรุงเทพฯ 10140

² สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม เลขที่ 86/6 ถนนพระรามที่ 4 เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10110

*ผู้ติดต่อ: โทรศัพท์: (02) 470-8644, โทรสาร: (02) 470-8643

E-mail: poomluck@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่มีการเติมโลหะแมกนีเซียม Al-5Ti-1B ในปริมาณไทเทเนียม 0.15% โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปโดยผ่านกระบวนการหล่อทั่วไป (Conventional Casting) และกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) ด้วยเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ (Low Pouring Temperature Technique) และเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น (Cooling Plate Technique) โดยการทดลองจะใช้อุณหภูมิเท 670 °C (กระบวนการหล่อทั่วไป) และ 630 °C (เทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำและเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น) ลงในแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทราย ซึ่งผลการทดลองพบว่ากระบวนการหล่อทั่วไปทำให้อนุภาคแอลฟา-อะลูมิเนียม (α -Al) มีลักษณะเดนไดรต์ (Dendrite) แต่กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งจะทำให้อนุภาค α -Al มีลักษณะกลม (Globular) โดยเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็นทำให้อนุภาค α -Al มีลักษณะกลมและขนาดเล็กกว่าเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติทางกลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานหล่อในแบบหล่อโลหะมีขนาดอนุภาค α -Al เล็กกว่าแบบหล่อทราย เนื่องจากแบบหล่อโลหะมีอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) ที่เร็วกว่า โดยเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็นมีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำและกระบวนการหล่อทั่วไป

คำหลัก: กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง / เทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น / โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356

Abstract

In this study, the microstructure and mechanical properties of A356 aluminium products with the addition of Al-5Ti-1B master alloy at level of 0.15 wt% Ti produced by (1) Conventional Casting or directly casting, (2) Low Temperature Pouring (LTP) and (3) Cooling Plate (CS) were investigated. Using Conventional Casting, the A356 melt was poured at 670 °C into the metal mold and sand mold. However, using LTP and CS technique, the pouring temperature 630 °C was used instead. The results showed that

the microstructure of conventional casting showed the dendrite morphology of α -Al particles, while the microstructure via LTP and CS revealed globule morphology. The α -Al particle size via CS was smaller than those by using LTP. This is due to the cooling rate of CS is much higher than that of LTP. The smaller the α -Al particle size was, the higher the mechanical properties of semi-solid products became. Moreover, the microstructure achieved using metal mold revealed more globular shape and smaller size, in comparison with those of sand mold casting. This is due to the metal mold provides higher cooling rate than sand mold.

Keywords: Semi-solid metal casting / cooling plate technique / A356 aluminium alloy

1. บทนำ

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรมงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และอากาศยานต่างๆ เนื่องจากมีสมบัติที่ดี เช่น สมบัติทางกลทนต่อการกัดกร่อนและสามารถหล่อขึ้นรูปได้ง่าย เป็นต้น [1] โดยปกติทั่วไปงานหล่ออะลูมิเนียมนั้นมักพบปัญหาในแง่ของคุณภาพชิ้นงานหล่อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของสมบัติทางกล ซึ่งมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาค นั่นคือถ้าเกรนหยาบจะทำให้มีสมบัติทางกลต่ำ โดยโลหะที่มีขนาดเกรนละเอียดจะทำให้สมบัติทางกลดีกว่าโลหะที่มีเกรนหยาบ [2] ซึ่งการปรับปรุงสภาพเกรนให้ละเอียดมีหลายประการได้แก่ 1. โดยการทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมมีอัตราการเย็นตัวภายในแบบหล่อสูง 2. ใช้เทคนิคการกระตุ้นหรือทำการกวนน้ำโลหะอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็ง 3. ใช้เทคนิคการเพิ่มปริมาณนิวเคลียสโดยการเติมสารปรับปรุงสภาพเกรนให้ละเอียด [3] ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะพิจารณาทั้ง 3 ประการดังกล่าว โดยสำหรับกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ เทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ และเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น ซึ่งเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็นมีกลไกการเกิดโครงสร้างลักษณะกลมโดยอาศัยทฤษฎี Separation Theory ของ Ohno และ Motegi [4] กล่าวคือ เมื่อน้ำโลหะสัมผัสกับรางหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ก็จะเริ่มเกิดนิวเคลียสขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสกับรางหล่อเย็นนั้น และด้วยการเทน้ำโลหะที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง

ทำให้นิวเคลียสที่อยู่ติดกับรางหล่อเย็นเกิดการหลอมหลุดไปกับน้ำโลหะเข้าสู่แบบหล่อ ส่วนสำหรับการเติมสารปรับปรุงสภาพเกรนให้ละเอียด ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล (Fluidity) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวเข้าสู่แบบหล่อ [5] ส่วนใหญ่นิยมเติมโลหะแม่ (Master Alloy) ชนิด AI-5Ti-1B เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพเกรนให้ละเอียดสูงกว่าโลหะแม่ชนิดอื่นๆ เช่น AI-Ti หรือ AI-Ti-C เป็นต้น [6]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหล่อทั่วไปเทียบกับเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำและเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น โดยเติมโลหะแม่ชนิด AI-5Ti-1B ในปริมาณไทเทเนียม 0.15% โดยน้ำหนัก ลงในแบบหล่อที่มีอัตราการเย็นตัวต่างกันที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดลองใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่มีส่วนผสมทางเคมี แสดงในตารางที่ 1 และโลหะแม่ที่ใช้มีส่วนผสมทางเคมีคือ Ti 4.22%, B 0.81%, Fe 0.32% และ Si 0.06% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 (% โดยน้ำหนัก)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
6.41	0.14	0.02	0.01	0.46	Bal.

ขั้นตอนการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เริ่มจาก

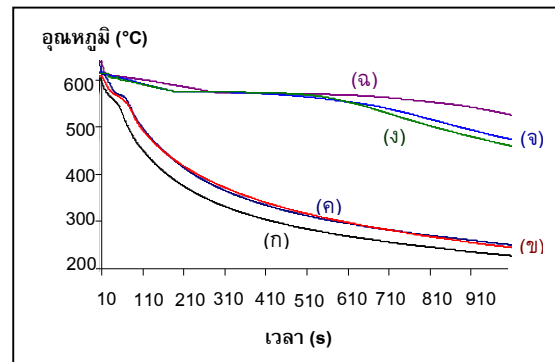
หล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 ด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ แล้วเติมโลหะแมกนีเซียมในปริมาณไทเทเนียม 0.15% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 700 °C จากนั้นทำความสะอาดน้ำโลหะอะลูมิเนียมด้วยฟลักซ์ชนิดปกคลุมปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนัก และใส่ไฮโดรเจนด้วยแก๊สอาร์กอนเป็นเวลา 5 นาที ที่อัตราการไหลของแก๊ส 5 ลิตร/นาที หลังจากนั้นค้ำน้ำโลหะอะลูมิเนียมไว้ในเบ้าหลอมเป็นเวลา 25 นาที ก่อนถึงเวลาเทใส่ไฮโดรเจนอีกครั้งด้วยแก๊สอาร์กอนประมาณ 30 วินาที แล้วเทลงในแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทรายเปลือก (Shell Mold) โดยกระบวนการหล่อทั่วไปใช้อุณหภูมิเท 670 °C และ 630 °C สำหรับเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำและเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น หลังจากนั้นนำชิ้นงานหล่อที่ได้มาตัดและขัดเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล นอกจากนี้ทำการวัดอุณหภูมิภายในแบบหล่อ ซึ่งใช้โปรแกรมวัดและเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger) โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลจุ่มบริเวณกึ่งกลางของแบบหล่อ

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การวัดขนาดเกรนและการทดสอบความแข็งจะศึกษาทั้งบริเวณส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของชิ้นงานหล่อ โดยการวิเคราะห์ชิ้นงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 ประกอบด้วย 1. การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเพื่อตรวจสอบปริมาณของไทเทเนียมที่เพิ่มขึ้นภายหลังการเติมโลหะแมกนีเซียม 2. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการวัดขนาดเกรนจะนำชิ้นงานหล่อไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 1200 กริต และขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.5 μm ก่อนนำไปกัดผิวหน้าด้วยสารละลายประกอบด้วย H_2O 190 ml, HF 5 ml, HNO_3 3 ml และ HCl 2 ml เป็นเวลา 10 วินาที โดยการวัดขนาดเกรนจะใช้โปรแกรม SigmaScan Pro 5 3. การทดสอบความแข็งจะนำชิ้นงานหล่อขัดหยาบด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 1200 กริต แล้วนำไปทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) และ 4. การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) จะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM B557M [7]

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลของอัตราการเย็นตัว

เส้นกราฟการเย็นตัว (Cooling Curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหล่อในแบบหล่อโลหะ (M) และแบบหล่อทราย (S) ที่ผ่านกระบวนการหล่อทั่วไป (M-670, S-670) เทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ (M-630, S-630) และเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น (M-CS-630, S-CS-30-630) แสดงในรูปที่ 1 พบว่าน้ำโลหะอะลูมิเนียมในแบบหล่อโลหะมีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าแบบหล่อทรายในทุกกระบวนการหล่อ และชิ้นงานหล่อที่ผ่านเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็นจะมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำและกระบวนการหล่อทั่วไปทั้งในแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทราย

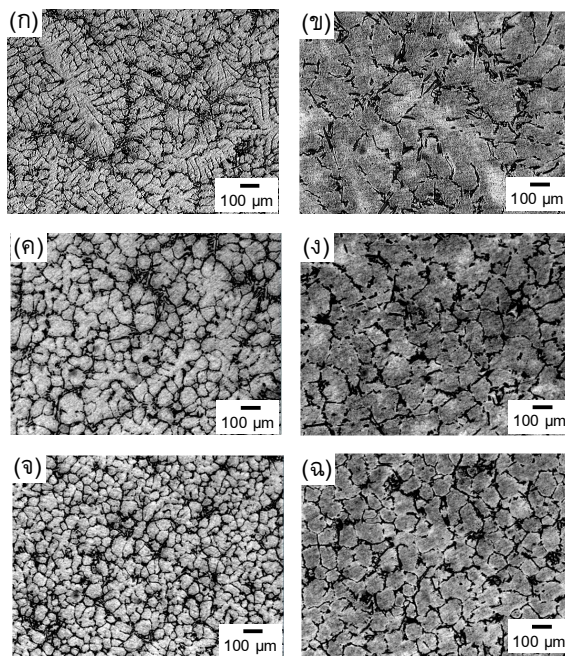


รูปที่ 1 เส้นกราฟการเย็นตัว: (ก) M-CS-30-630, (ข) M-630, (ค) M-670, (ง) S-CS-30-630, (จ) S-630 และ (ฉ) S-670

3.2 ผลของโครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรน

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 บริเวณส่วนกลางของชิ้นงานหล่อทั้งในแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทรายที่ผ่านกระบวนการหล่อทั่วไป เทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ และเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น แสดงในรูปที่ 2 (ก)-(ฉ) พบว่าในกรณีจากแบบหล่อโลหะ กระบวนการหล่อทั่วไปทำให้อนุภาค $\alpha\text{-Al}$ มีลักษณะเด่นได้รื (รูปที่ 2 (ก)) ส่วนเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำทำให้อนุภาค $\alpha\text{-Al}$ มีลักษณะค่อนข้างกลม (รูปที่ 2 (ค)) แต่เมื่อผ่านเทคนิค

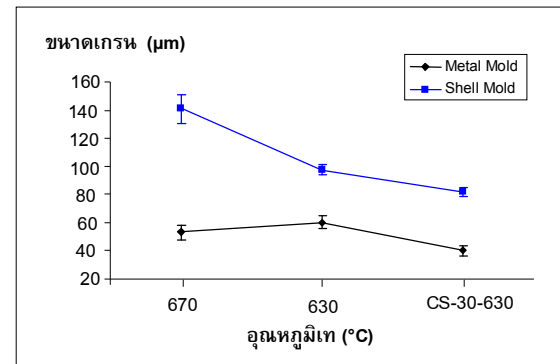
การเทผ่านรางหล่อเย็นทำให้อนุภาค α -Al มีลักษณะกลมขนาดเล็ก (รูปที่ 2(จ)) สำหรับกรณีจากแบบหล่อทราย พบว่าทั้งกระบวนการหล่อทั่วไป (รูปที่ 2 (ข)) เทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ (รูปที่ 2 (ง)) และเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น (รูปที่ 2 (ฉ)) จะทำให้อนุภาค α -Al มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาขนาดเกรนเฉลี่ยของอนุภาค α -Al แสดงในรูปที่ 3 พบว่าเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็นมีขนาดเกรนเล็กกว่ากระบวนการหล่ออื่นๆ ทั้งในแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทรายเฉลี่ยคือ 40 μm และ 82 μm ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรนที่ได้จากแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทราย พบว่าชิ้นงานหล่อที่ได้จากแบบหล่อโลหะมีขนาดอนุภาค α -Al เล็กกว่าแบบหล่อทราย เนื่องจากแบบหล่อโลหะมีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าแบบหล่อทราย ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างรวดเร็วจึงทำให้ชิ้นงานหล่อแข็งตัวอย่างรวดเร็วในแบบหล่อโลหะ [8] เป็นผลให้เกิดการแพร่กระจายของโครงสร้างที่เกิดขึ้นในขณะแข็งตัวเร็ว [9] ทำให้ได้โครงสร้างเกรนขนาดเล็กกว่า



รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณส่วนกลางของชิ้นงาน:

(ก) M-670, (ข) S-670, (ค) M-630, (ง) S-630,

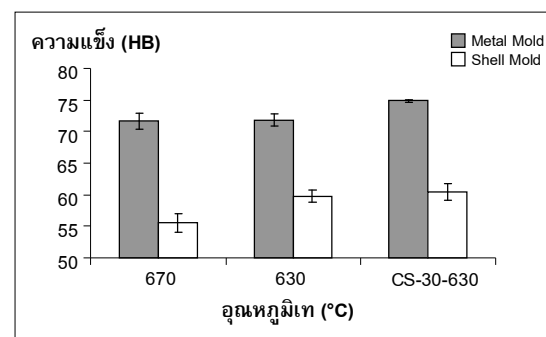
(จ) M-CS-30-630 และ (ฉ) S-CS-30-630



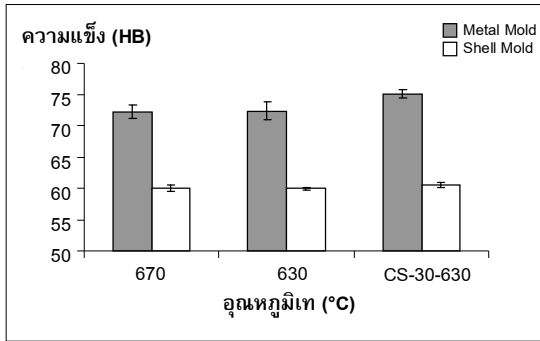
รูปที่ 3 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่การทดลองต่างๆ

3.3 ผลของการทดสอบค่าความแข็ง

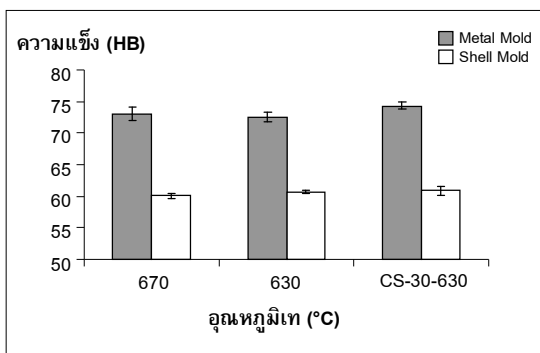
การทดสอบค่าความแข็งบริเวณส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของชิ้นงานหล่อทั้งในแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทรายที่ผ่านกระบวนการหล่อทั่วไป เทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ และเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น แสดงในรูปที่ 4-6 พบว่าชิ้นงานหล่อที่ได้จากแบบหล่อโลหะมีค่าความแข็งมากกว่าแบบหล่อทรายในทุกกระบวนการหล่อ เมื่อพิจารณาชิ้นงานหล่อทั้งจากแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทรายในกระบวนการหล่อเดียวกัน พบว่ามีค่าความแข็งในแต่ละบริเวณไม่ต่างกันนัก และเมื่อเปรียบเทียบแต่ละกระบวนการหล่อ พบว่าชิ้นงานหล่อที่ผ่านเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็นมีค่าความแข็งสูงกว่ากระบวนการหล่ออื่นๆ ทั้งในแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทราย เนื่องจากเทคนิคนี้อาศัยกลไกการเพิ่มปริมาณนิวเคลียส ส่งผลให้มีโครงสร้างเกรนจำนวนมากและขนาดเล็ก ทำให้มีสมบัติทางกลดีกว่าโครงสร้างเกรนขนาดใหญ่ [2]



รูปที่ 4 ค่าความแข็งบริเวณส่วนบนของชิ้นงานหล่อ



รูปที่ 5 ค่าความแข็งบริเวณส่วนกลางของชิ้นงานหล่อ

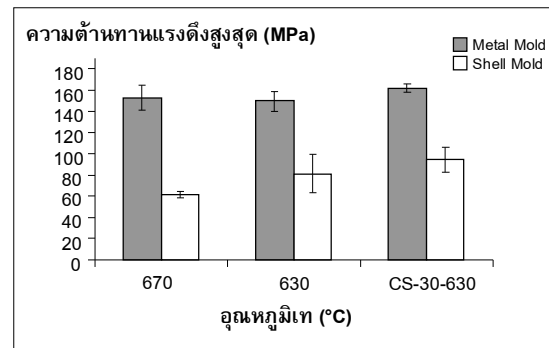


รูปที่ 6 ค่าความแข็งบริเวณส่วนล่างของชิ้นงานหล่อ

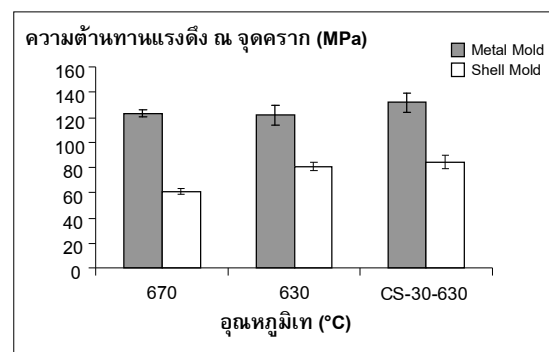
3.4 ผลของการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง

การทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหล่อทั้งในแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทรายที่ผ่านกระบวนการหล่อทั่วไป เทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ และเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น แสดงในรูปที่ 7-9 โดยพิจารณาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength: UTS) ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield Strength: YS) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) พบว่าชิ้นงานหล่อที่ได้จากแบบหล่อโลหะมีค่า UTS, YS และ % Elongation มากกว่าแบบหล่อทรายในทุกกระบวนการหล่อ โดยเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็นจะมีค่า UTS, YS และ % Elongation สูงกว่ากระบวนการหล่ออื่นๆ ทั้งในแบบหล่อโลหะและแบบหล่อทราย ซึ่งกรณีจากแบบหล่อโลหะมีค่า UTS และ YS เฉลี่ยเท่ากับ 162 MPa และ 132 MPa ตามลำดับ และจากแบบหล่อทรายมีค่า UTS และ YS เฉลี่ยเท่ากับ 94 MPa และ 84 MPa ตามลำดับ เมื่อ

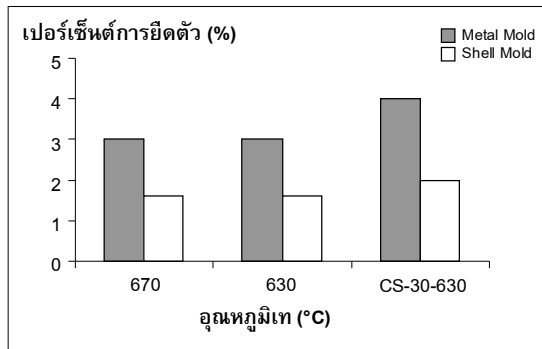
พิจารณากระบวนการหล่อทั่วไปและเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ พบว่ากรณีจากแบบหล่อโลหะ ชิ้นงานหล่อที่ผ่านกระบวนการหล่อทั่วไปจะมีค่า UTS และ YS มากกว่าเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาค กระบวนการหล่อทั่วไปให้โครงสร้างลักษณะเดนไดรท์ขนาดเล็ก ส่วนเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำจะให้โครงสร้างลักษณะค่อนข้างกลมแต่มีขนาดใหญ่กว่าเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็น ผลการวัดขนาดเกรน (รูปที่ 3) พบว่ากระบวนการหล่อทั่วไปมีขนาดเกรน α -Al เล็กกว่าเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้มีสมบัติทางกลดีกว่า แต่เมื่อพิจารณากรณีจากแบบหล่อทราย ชิ้นงานหล่อที่ผ่านเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำมีค่า UTS และ YS มากกว่ากระบวนการหล่อทั่วไป เนื่องจากเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำมีขนาดอนุภาค α -Al เล็กกว่าส่งผลให้สมบัติทางกลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานหล่อ



รูปที่ 8 ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของชิ้นงานหล่อ



รูปที่ 9 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานหล่อ

4. สรุปผลการทดลอง

โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่อทั่วไปทำให้อนุภาค α -Al มีลักษณะเด่นได้รื้ แต่สำหรับกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งจะทำให้อนุภาค α -Al มีลักษณะกลม โดยเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็นจะมีขนาดอนุภาค α -Al เล็กกว่าเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลทำให้สมบัติทางกลเพิ่มขึ้น และกรณีชิ้นงานหล่อที่ได้จากแบบหล่อโลหะจะมีขนาดอนุภาค α -Al เล็กกว่าแบบหล่อทราย เนื่องจากแบบหล่อโลหะมีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าแบบหล่อทราย ทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วในแบบหล่อ ส่งผลให้ได้โครงสร้างเกรนขนาดเล็กกว่า โดยเทคนิคการเทผ่านรางหล่อเย็นจะทำให้ให้อนุภาค α -Al มีขนาดเล็กกว่ากระบวนการหล่ออื่นๆ เนื่องจากอาศัยกลไกการเกิดนิวเคลียสบนรางหล่อเย็น ส่งผลทำให้สมบัติทางกลดีกว่ากระบวนการหล่อทั่วไปและเทคนิคการเทที่อุณหภูมิต่ำ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากโครงการสร้างขีดความสามารถด้านการวิจัยและพัฒนาและการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมโดยกลไกความร่วมมือระหว่างภาครัฐ เอกชน และมหาวิทยาลัย (University-Industry Research Collaboration Program: U-IRC) รหัสทุน U-IRC-1-07-28-02 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน (Bureau of

Supporting Industries Development: BSID) กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gruzlesk, J.E. and Bernard, C.M. (1990). *The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloy*, American Foundrymen's Society, USA.
- [2] Pearce, J.T.H. (2543). *เทคโนโลยีและโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมหล่อ*, กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [3] Kissling, R.J. and Wallace, J.F. (1963). Grain refinement of aluminum castings, *Foundry*, June 1963, pp. 78-82.
- [4] Ohno, A., Motegi, T. and Soda, H. (1971). Origin of the equiaxed crystals in castings, *Transaction Iron and Steel Institute of Japan*, Vol. 18, pp. 11-14.
- [5] Kwon, Y.D. and Lee, Z.H. (2003). The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of Al-4.5Cu-0.6Mn and A356 alloys, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 360(1-2), November 2003, pp. 372-376.
- [6] Jin, H., Saqstad, T., Taftø, J. and Zaqierski, P.T. (1996). The study of some Al-5%Ti and Al-5%Ti-1%B master alloys, *Materials Science Forum*, Vol. 217-222, No. 1, pp. 241-246.
- [7] Nonferrous Metal Products: Aluminum and magnesium alloys. (1997). *Annual Book of ASTM Standards*, West Conshohocken, PA, USA.
- [8] Mae, H., Teng, X., Bai, Y. and Wierzbicki, T. (2008). Comparison of ductile fracture properties of aluminum castings : sand mold vs. metal mold, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 45(5), March 2008, pp. 1430-1444.
- [9] Poirier, D.R. and Geiger, G.H. (1994). *Transport Phenomena in Materials Processing*, USA.