

## การศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่ผสมกระป๋องเครื่องตีไม้ใช้แล้ว

อวยชัย วงศ์รัตน์\*

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

ปฎิภาณ จุ้ยเจิม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

พยุร เสนทองแก้ว

นักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-7004-6603 อีเมล: Ouay\_chai@hotmail.com

รับเมื่อ 9 มิถุนายน 2557 ตอรับเมื่อ 15 ธันวาคม 2557

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.12.005 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะการทำกระบวนการทางความร้อนที่เหมาะสมต่อความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนชนิดไฮโปยูเทคติกที่ผสมกระป๋องเครื่องตีไม้ใช้แล้วโดยศึกษาโลหะผสม 4 ชนิดได้แก่ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่ไม่ผ่านการผสมเพิ่ม โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเติมฝากระป๋อง โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเติมสตรอนเทียม และโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเติมฝากระป๋องและสตรอนเทียม โลหะผสมทุกอัตราส่วนผ่านการหลอมรวมโดยเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส แล้วนำมาเทลงเบ้ากราไฟต์ที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส และทำการให้ความร้อนด้วยการอบละลายที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจุ่มน้ำทันที ก่อนทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 18 ชั่วโมงและศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนต่อความแข็งแรงด้วยการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์พบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเติมฝากระป๋องและสตรอนเทียมที่อุณหภูมิการบ่มแข็งที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลาช่วงระหว่าง 3 และ 5 ชั่วโมงได้รับค่าความแข็งแรงที่ดีที่สุด

**คำสำคัญ:** กระป๋องเครื่องตีไม้ บ่มแข็ง โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เอ 356 ความแข็งแรง

การอ้างอิงบทความ: อวยชัย วงศ์รัตน์, ปฎิภาณ จุ้ยเจิม และ พยุร เสนทองแก้ว, “การศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่ผสมกระป๋องเครื่องตีไม้ใช้แล้ว,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, หน้า 63-72, ม.ค. - เม.ย. 2558. <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2014.12.005>



## A Study on the Effects of Heat-treatment Conditions on Mechanical Behavior of A356 Cast Aluminium-silicon Alloys Mixed with Recycled Beverage Cans

**Ouay-chai Wongrat\***

*Assistant Professor, Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, Thailand*

**Patiphan Juijerm**

*Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand*

**Payoon Senthongkaew**

*Researcher, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand*

\* Corresponding Author, Tel. 08-7004-6603, E-mail: Ouay\_chai@hotmail.com

Received 9 June 2014; Accepted 15 December 2014

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.12.005 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research investigated the optimal processing conditions on hardness of hypoeutectic aluminium-silicon alloys mixed with recycled beverage cans. Four alloys were studied. They were an A356 master alloy and three modified A356 alloys, namely, A356 + beverage can lids, A356 + strontium, and A356 + beverage can lids + strontium. The alloys were melted at 750°C in an induction furnace, then poured into a graphite mould held at 720°C. The specimens were subsequently solutionized at 540°C for four hours before being water-quenched followed by artificial ageing at either 120°C, 150°C or 180°C for one to eighteen hours. The effects of heat treatment conditions on hardness were investigated using Vickers hardness testing. It was found that the Aluminium-silicon alloy with lid and strontium addition had the highest hardness among the different alloys and the optimal ageing condition was at a temperature of 180°C for three to five hours.

**Keywords:** Beverage Cans, Aging, Aluminium-silicon Alloys, A356, Hardness

Please cite this article as: O. Wongrat, P. Juijerm and P. Senthongkaew, "A Study on the Effects of Heat-treatment Conditions on Mechanical Behavior of A356 Cast Aluminium-silicon Alloys Mixed with Recycled Beverage Cans," *J. KMUTNB*, Vol. 25, No. 1, pp. 63-72, Jan. - Apr. 2015 (in Thai). <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2014.12.005>

## 1. บทนำ

ปัจจุบันพบว่าโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็กโดยเฉพาะโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นกลุ่มที่มีความสำคัญ และมีแนวโน้มในการใช้งานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โลหะผสมอะลูมิเนียมจึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น ชิ้นส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์บรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น ล้อรถยนต์ ลูกสูบ ส่วนประกอบเครื่องอัดอากาศ นอกจากนี้ยังนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมการบิน และการทหารอีกด้วย ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายด้าน คือ 1) สมบัติทางกลทั้งความแข็งแรงและความแข็งแรงต่อหน่วยน้ำหนักสูง 2) ความสามารถทางด้าน การเชื่อม 3) ความถ่วงจำเพาะต่ำ 4) ความต้านทาน ทางด้านการกัดกร่อน และ 5) คุณสมบัติด้านการหล่อที่ดีสามารถหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ทำให้มีความต้องการในตลาดอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก [1]-[9] นั่นคือ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Al-Si Alloys)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการนำเทคนิคทางด้านการกระบวนการความร้อนมาช่วยทำให้เกิดการตกผลึกของ  $Mg_2Si$  กระจายตัวทั่วไปในเนื้อพื้นเฟส  $\alpha$  ซึ่งเกิดจากการแพร่ของอะตอมแมกนีเซียมและซิลิคอนออกจากสารละลายอิ่มตัว [10]-[12] ส่งผลให้สมบัติทางกลเพิ่มขึ้น ซึ่งได้มีการเติมสตรอนเทียม (Sr) เข้าไปในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรด A356 ส่งผลให้ยูเทคติกซิลิคอนมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ซึ่งงานวิจัยที่พบได้ศึกษาการเติมโลหะแม่ (Master Alloy) ที่มีแมกนีเซียม (Mg) และสตรอนเทียม (Sr) เป็นหลักผสมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรด A356 [12] ด้วยกระบวนการทางความร้อนและยังพบอีกว่าได้มีการนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรด A356 มาผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ที่กำหนด [9] แต่ไม่พบการนำเทคนิคการเติมธาตุสตรอนเทียม (Sr) โดยผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มาใช้กับกระป๋องเครื่องตีไม้ใช้แล้วมาเติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรด A356 เนื่องจากสามารถทำให้เกิดยูเทคติกละเอียดขึ้นและ

การตกตะกอนของเฟส  $Mg_2Si$  กระจายตัวทั่วๆ ในเนื้อของเฟส  $\alpha$  ของอะลูมิเนียม ซึ่งทำให้โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการนี้มีความแข็งแรงสูงขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาสภาวะทดลองที่เหมาะสมต่อความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่ผสมกระป๋องเครื่องตีไม้ใช้แล้ว เพื่อทำให้ทราบตัวแปรในกระบวนการทางความร้อน T6 ซึ่งประกอบไปด้วยอุณหภูมิเวลา และส่วนผสมของกระป๋องที่ใช้ในการบ่มแข็งที่มีความเหมาะสมทั้งเติมและไม่เติมธาตุสตรอนเทียม

## 2. วิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 วัสดุ

1. แท่งอินกอตชนิดโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรด A356
2. กระป๋องเครื่องตีไม้ใช้แล้ว
3. โลหะแม่ ชนิด Al-10wt%Sr
4. เกลือ  $NaNO_3$  และ  $KNO_3$

### 2.2 อุปกรณ์และวิธีการ

1. ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (A356) ที่เป็นแท่งอินกอตกระป๋องเครื่องตีไม้ในการทดลองครั้งนี้ ใช้ฝาและโลหะแม่ Al-10wt% Sr ที่นำมาทดลองในครั้งนี้ยังไม่ทราบส่วนผสมที่แน่นอนจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีก่อนทำการทดลอง โดยตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์สเปกโตรสโกปีภายหลังที่ผ่านการหลอมดังแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนหล่อ และฝากระป๋องและโลหะแม่ 10%Sr ที่ผ่านการหลอมใช้ในการทดลอง (wt%)

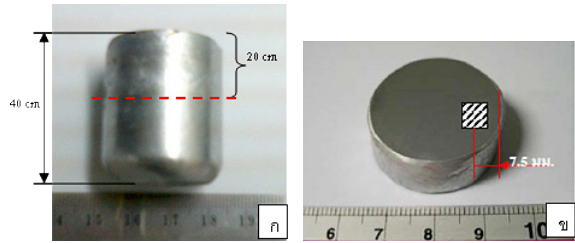
Alloy	Si	Mg	Mn	Fe	Sr	Al
A356	7.521	0.209	0.125	0.098	-	Bal.
Lid	0.196	2.467	0.432	0.261	-	Bal.
Al-10%Sr	-	-	-	-	13	87

2. เตรียมชิ้นงานสำหรับการหลอม ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค และทดสอบความแข็ง

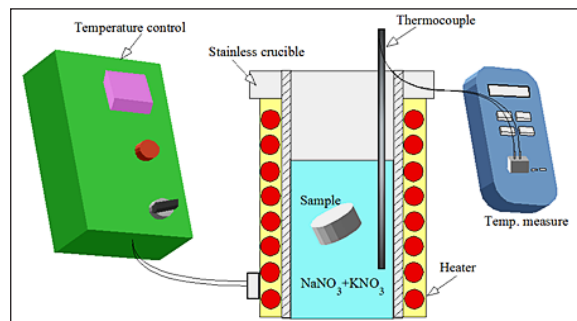
ชิ้นงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนผสมเกรด A356 น้ำหนัก 100 กรัม ถูกหลอมในเบ้ากราไฟต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ความสูง 95 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 750°C ภายในเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnace) รุ่น LAVA ภายหลังจากนำอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรด A356 เป็นเวลา 15-20 นาที พร้อมทำการเติม 15wt% ผากระป๋องเครื่องตีไม้แล้ว ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 530°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อละลายแลกเกอร์และสีที่ติดบนผิวกระป๋องออกและ 0.02wt%Sr ทำการคนให้เข้าด้วยกันเป็นเวลา 1 นาที เมื่อค้ำนำโลหะเป็นเวลา 30 นาที นำเข้าออกจากเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า ทำการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ที่อุณหภูมิ 720°C เทลงในเบ้ากราไฟต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 50 มิลลิเมตร และใน 30 มิลลิเมตร ส่วนสูง 50 มิลลิเมตร จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิต้อง

โดยโลหะผสมที่ได้หลังการหล่อ มีรหัสการทดลองดังนี้ คือ 1) รหัส A356 เป็นการปราศจากการเติมฝาและสตรอนเทียม 2) รหัส A356+Lid เป็นการเติมผากระป๋อง 3) รหัส A356+Sr เป็นการเติมสตรอนเทียม และ 4) รหัส A356+Lid+Sr เป็นการเติมฝาและสตรอนเทียม ทำการตัดชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างด้วยและทดสอบความแข็ง ชนิดไมโครวิกเกอร์ดังแสดงในรูปที่ 1

3. เตรียมชิ้นงานสำหรับกระบวนการทางความร้อน T6 นำชิ้นงานผ่านการผสมจากการทดลองข้างต้น ทั้ง 4 ชุดมาผ่านการให้ความร้อนด้วยการอบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในเตาขดลวดแล้วจุ่มน้ำที่อุณหภูมิต้อง ตามด้วยบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120, 150 และ 180°C เป็นเวลา 1, 3, 5, 8, 11, 18 และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับโดยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิในอ่างเกลือ ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการตัดชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้าง โดยนำมาตรวจด้วยเครื่องวิเคราะห์รูป (Image Analyzer) โปรแกรมอิมเมจโปรพลัส เวอร์ชัน 3.0 วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของธาตุเฉพาะพื้นที่ด้วยเครื่อง EDS ยี่ห้อ EDAX



รูปที่ 1 (ก) ต้ําแห่งตัดเพื่อตรวจสอบ (ข) ต้ําแห่งชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและทดสอบความแข็ง



รูปที่ 2 ชุดบ่มแข็งในอ่างเกลือ

และทดสอบความแข็ง ชนิดไมโครวิกเกอร์ รุ่น MVK-H1 ยี่ห้อ MITUTOYO ใช้แรงกดทดสอบ 50 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 1

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 3.1 ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

เมื่อพิจารณาส่วนผสมทางเคมีของปริมาณอะลูมิเนียม-ซิลิกอนผสมรวมผากระป๋องเครื่องตีไม้พร้อมเติม 0.02wt%Sr ประกอบไปด้วย 4 กลุ่ม คือ 1) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรด A356 (รหัส A356) 2) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรด A356 เติมผากระป๋อง (รหัส A356+Lid) 3) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรด A356 เติม 0.02wt%Sr (รหัส A356+Sr) และ 4) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรด A356 เติมผากระป๋องและ 0.02wt%Sr (รหัส A356+Lid+Sr) จะเห็นได้ว่า A356+Sr ปริมาณ 0.196wt%Mg ลดลงเมื่อเทียบกับ A356 อันเนื่องมาจากปริมาณของ

แมกนีเซียมเกิดจากการสูญเสีย (Dilute) ในขณะที่พลังงานความร้อนที่สูง นอกจากนี้ยังพบว่า A356+Sr และ A356+Lid+Sr มีปริมาณของสตรอนเทียมคือร้อยละ 0.001 และ 0.002 โดยน้ำหนักตามลำดับอันเนื่องมาจาก [12],[14] เวลาที่ใช้ในการละลายสตรอนเทียมเพื่อเข้าไปขัดขวางการโตของซิลิคอนในระนาบ 111 ซึ่งจะทำให้ซิลิคอนเกิดการเติบโตทุกทิศทางและมีลักษณะมนนั้นยังมีปริมาณสตรอนเทียมไม่เพียงพอ

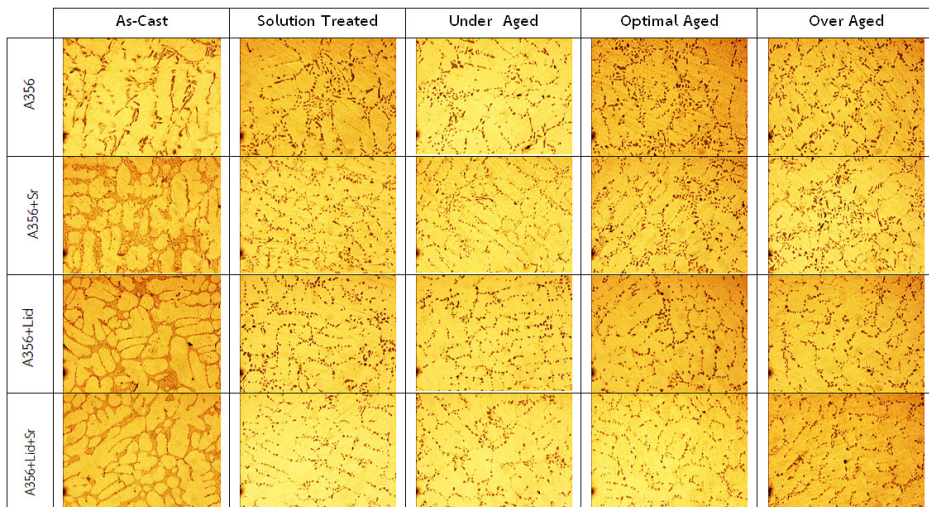
ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ผ่ากระป๋อง และสตรอนเทียม (WT.%)

Alloy	Si	Mg	Mn	Fe	Sr	Al
A356	7.521	0.209	0.105	0.090	-	Bal.
A356+Lid	6.485	0.599	0.070	0.136	-	Bal.
A356+Sr	7.492	0.196	0.000	0.000	0.001	Bal.
A356+Lid+Sr	6.432	0.482	0.061	0.127	0.002	Bal.

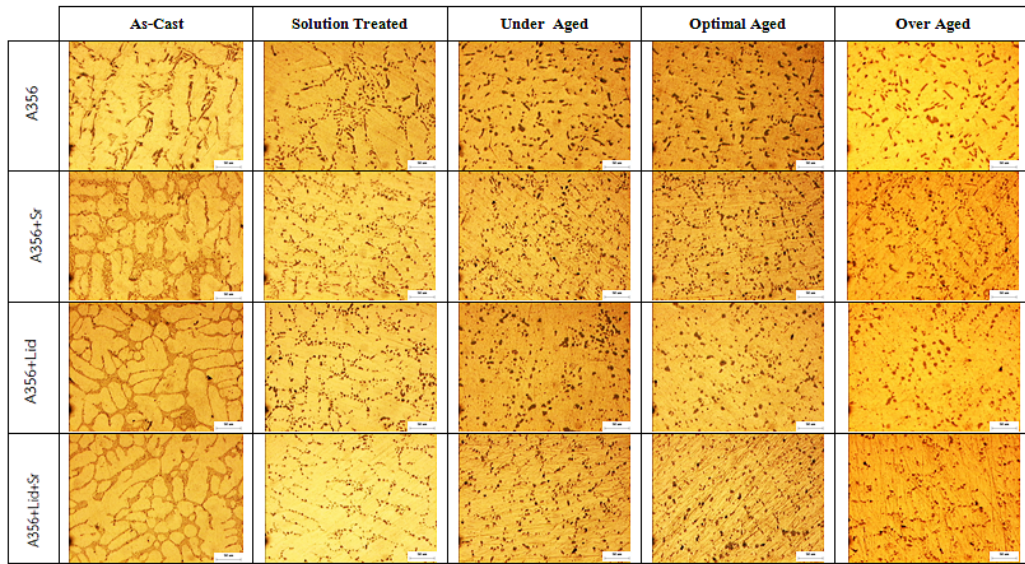
### 3.2 ผลโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

จากรูปที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ เป็นรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 กลุ่ม คือ รหัส A356, A356+Lid, A356+Sr และ A356+Lid+Sr ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

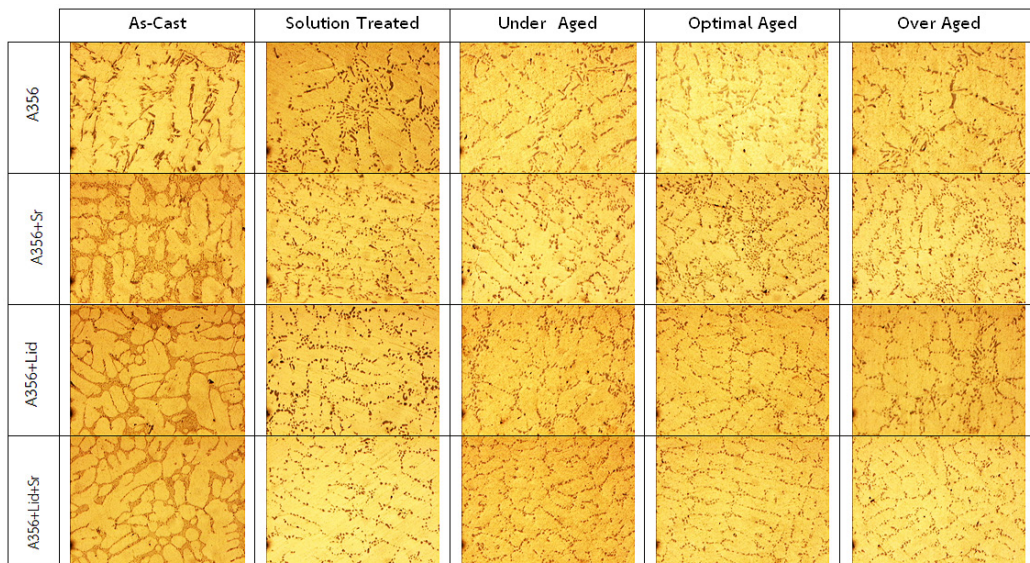
เมื่อนำชิ้นงานมาผ่านการอบละลายและบ่มแข็งเทียมภายหลังจากนั้นเฟสของโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่ผ่านและไม่ผ่านการผสมฝากระป๋องและสตรอนเทียมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังนี้ คือ เมื่อมีการอบละลายชิ้นงานที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำให้เฟสโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนจะเกิดการแตกตัวเป็นขนาดอนุภาคเล็กลงและรูปทรงพื้นฐานมีลักษณะขอบโค้ง กลมมน (Near Round Shapes) ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนโครงสร้างลักษณะเข็มหรือ Needlelike และไปทำให้ Mg<sub>2</sub>Si แทรกซึมเข้าไปรวมตัวในอะลูมิเนียม เรียกว่า การละลายตัวของของแข็ง (Solid Solution) ประกอบไปด้วยแมกนีเซียม(Mg)ซิลิคอน(Si)ในอะลูมิเนียม (Al) อุณหภูมิที่ทำการอบละลายจะมีปริมาณซิลิคอนบางส่วนจะละลายและแพร่เข้าไปในเนื้อพื้นเฟสหลักของอะลูมิเนียม จนทำให้เนื้อพื้นอะลูมิเนียมกลายเป็นสารละลายของแข็งอิมตัวยังยวดยที่มีปริมาณซิลิคอนมากกว่าสภาวะปกติเล็กน้อยสำหรับการนำชิ้นงานชุบน้ำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อเป็นการรักษารูปสารละลายของแข็งของแมกนีเซียม (Mg) ซิลิคอน (Si) ที่เกิดในเฟสเนื้อพื้นของอะลูมิเนียม (Al) ให้คงรูปอยู่ได้ ก็ยังคงสภาวะอิมตัวยังยวดยนั้นไว้



รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อภายหลังผ่านการอบละลายและบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 120°C ที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อภายหลังผ่านการอบละลายและบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 150°C ที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อภายหลังผ่านการอบละลายและบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 180°C ที่กำลังขยาย 100 เท่า

ภายหลังการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิคือ 120, 150 และ 180°C เป็นเวลาต่างๆ ตามเงื่อนไข เพื่อทำให้เกิดผลึกขนาดเล็กๆ จะสามารถฟอร์มเป็นเฟสแมกนีเซียมซิลิไซด์ ( $Mg_2Si$ ) เกิดเป็นสารละลายของแข็ง ต่อจากนั้นสารประกอบขนาดเล็กจำนวนมากๆ เหล่านี้จะกระจุกกระจายอยู่ทั่ว

ทั้งเนื้อพื้นอะลูมิเนียม มีผลทำให้ความแข็งแรงของโลหะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด แต่เฟส  $Mg_2Si$  ดังกล่าวมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) หรือแม้แต่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) นอกจากนี้

การตรวจสอบพบว่าเวลานานมากขึ้นเรื่อยๆจนถึง 30 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคของเฟสยูเทคติกส่วนใหญ่จะมีลักษณะใกล้เคียงกันโดยมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในรูปทรง สัณฐานของเฟสยูเทคติก คือกลมมน ยังพบเพียงรหัส A356 ที่มีสัณฐานของเฟสยูเทคติกซิลิคอนเป็นลักษณะกลมมนปนรวมกันกับเข็มขอบโค้งมนขนาดเล็กบางส่วนที่ปรากฏอยู่ในเนื้อของโลหะ อันเนื่องจากไม่ผ่านการเติม สตรอนเทียมและฝากระป๋องเครื่องตี

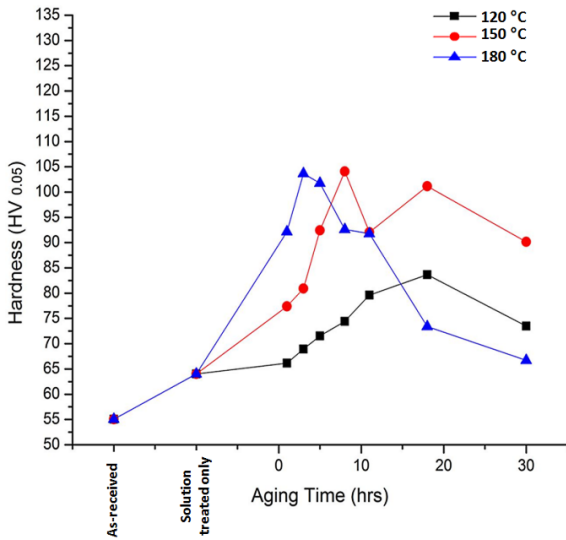
การเติมฝากระป๋องเครื่องตีและสตรอนเทียม จากโลหะแม่ชนิด Al-10wt%Sr เป็นลักษณะการทำ โมดิฟิเคชัน (Modification) เพื่อเป็นการลดขนาด นิวเคลียสของเฟสยูเทคติกซิลิคอน อันเนื่องจาก [13] โครงสร้างซิลิคอนจะเกิดง่ายที่สุดในทิศทาง <112> จนขนาดผลึกโตขึ้นทิศทางการแข็งตัวจะเปลี่ยนไปเป็น แบบ Twin ในระนาบ (111) ทั้งนี้เป็นเพราะธรรมชาติ ของโครงสร้างพื้นฐานของอะตอม โดยจะเกิดการทำมุม 141 องศาทิศทางการแข็งตัว โครงสร้างที่ได้จึงมี ลักษณะเป็นแผ่นและมีขนาดใหญ่ แต่ถ้าในการแข็งตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วการแข็งตัวจะเปลี่ยนไปด้วย ทิศทางการ แข็งตัวของผลึกจะเกิดในทิศทางเดียว แต่ถ้าในการแข็ง ตัวของผลึกมีธาตุปนเปื้อนเข้ามาขวางการแข็งตัวจะเกิด การเลื่อนเป็นจังหวะทำให้การแข็งตัวของผลึกไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ผลึกของแมกนีเซียม (Mg) และซิลิคอน (Si) บางส่วนมีการแพร่เข้าไปในเนื้อพื้นของเฟสอะลูมิเนียม ทำให้เกิดการสร้างนิวเคลียสใหม่ของ  $Mg_2Si$  เกิดขึ้น และ ทำให้โลหะผสมภายหลังการทำโมดิฟิเคชันมีความแข็ง เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด

### 3.3 ผลของค่าความแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการ ทางความร้อน T6

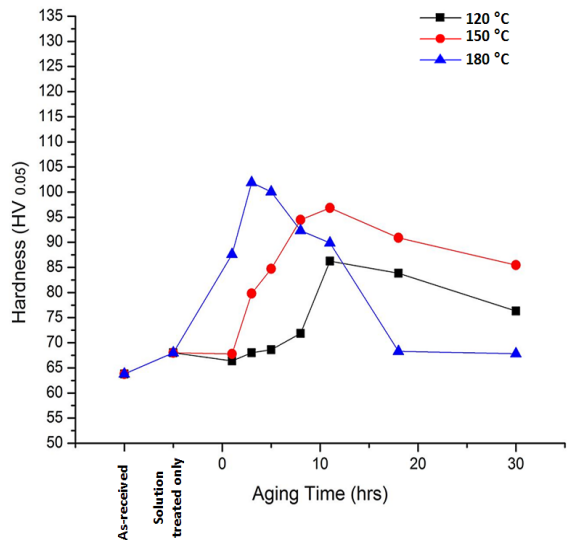
จากรูปที่ 6, 7, 8 และ 9 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบ ความแข็งพบว่ากรอบละลายแล้วบ่มแข็งทำให้ความ แข็งของชิ้นงานหล่อทั้ง 4 กลุ่มเพิ่มสูงขึ้นได้โดยง่ายเมื่อ บ่มแข็งเทียมเป็นเวลานานขึ้น ความแข็งของชิ้นงานจะเพิ่ม สูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งความแข็งเพิ่มขึ้นมีค่าสูงสุด

ที่เรียกว่าสภาวะ Optimal Aged หลังจากนั้นแม้จะใช้เวลา บ่มแข็งต่อไปความแข็งก็ไม่เพิ่มขึ้นอีกแต่กลับจะมีค่า ลดลงเรื่อยๆเรียกว่าสภาวะ Over Aged และเมื่อเปรียบเทียบ ความแข็งจากการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการบ่ม แข็งเทียมที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปจะทำให้ชิ้นงานทดสอบสามารถ ถึงจุดที่ความต้านทานแรงกดสูงสุดได้เร็วขึ้น แต่การบ่ม แข็งเทียมที่อุณหภูมิต่ำกลับทำให้ความต้านทานทางด้าน การกดความแข็งที่ได้รับสูงสุดจะเกิดได้ช้า สำหรับอุณหภูมิ การบ่มแข็งเทียมที่ทำให้อะลูมิเนียมทั้ง 4 กลุ่ม พบว่ามี ค่าความแข็งเร็วสุดในการทดลองนี้คือ  $180^{\circ}C$  เป็นรหัส A356+Lid+Sr จะใช้เวลาบ่มแข็งเทียมน้อยที่สุด คือ 1 ชั่วโมง ในขณะที่รหัส A356 ใช้เวลา คือช่วงระหว่าง 3 และ 5 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของกระบวนการ ทางความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของ ชิ้นงานสามารถอธิบายได้ดังนี้ กระบวนการทางความร้อน ที่ใช้ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ การอบละลาย (Solution Treatment) การชุบด้วยน้ำ (Quenching) และการบ่ม แข็งเทียม (Artificial Aging)

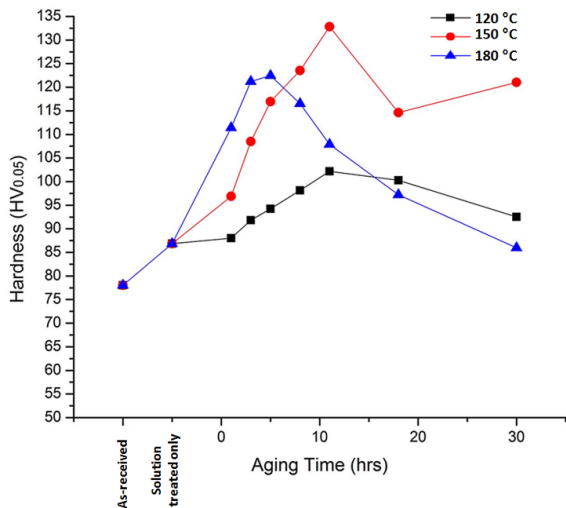
จากการวิเคราะห์ทำการทดสอบสมบัติทางด้าน ความแข็ง กลับพบว่าการบ่มแข็งเทียมของรหัส A356+Lid+Sr ที่ช่วงอุณหภูมิคือ 120, 150 และ  $180^{\circ}C$  ตามลำดับ ให้ความแข็งสูงสุดที่เวลาการบ่มแข็งเทียมคือ 18, 11 และช่วงระหว่าง 3 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยมี ค่าความแข็งเฉลี่ยเป็น 100.26, 129.88 และช่วงระหว่าง 127.14 และ 128.56 HV ตามลำดับ ในสภาวะอุณหภูมิการบ่ม แข็งเทียมที่ดีในการทำการทดลองคือ  $180^{\circ}C$  เนื่องจาก เวลาที่ใช้ในการบ่มแข็งเทียมมีค่าน้อยกว่าช่วงอุณหภูมิ 120 และ  $150^{\circ}C$  สำหรับช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ได้ค่า ความแข็งเร็วสุด คือ  $180^{\circ}C$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และมี ค่าความแข็งคือ 120.22 HV อันเนื่องจากเวลาที่เริ่มเกิด การฟอร์มตัวของแมกนีเซียมซิลิไซด์ ( $Mg_2Si$ ) เกิดได้ รวดเร็วกว่าชิ้นงานกลุ่มอื่นๆ เมื่อคำนวณจากค่าความแข็ง ของชิ้นงานกลุ่มอื่นๆ ที่เวลาคือ 1 ชั่วโมง เทียบกับรหัส A356-Lid+Sr ผลที่ได้คือจะมีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงาน กลุ่มอื่นๆ อยู่ที่ค่าความแข็งเฉลี่ยคือ 23 HV



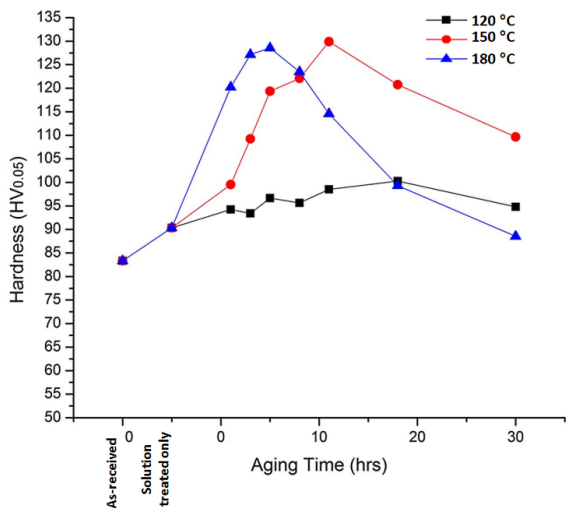
รูปที่ 6 ความแข็งของ A356 ที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 8 ความแข็งของ A356+Sr ที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 7 ความแข็งของ A356+Lid ที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 9 ความแข็งของ A356+Lid+Sr ที่สภาวะต่างๆ

#### 4. สรุป

##### 4.1 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

ภายหลังนำชิ้นงานทั้ง 4 กลุ่มผ่านกระบวนการอบให้เป็นสารละลายของแข็ง (Solution Treatment) พบว่าโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอน เกิดการเปลี่ยนเป็นรูปทรง

สัญญาณลักษณะทรงกลมบางส่วน มีขนาดลดลงและมีรูปร่างขอบโค้งมน อันเนื่องมาจากยูเทคติกซิลิคอนบางส่วนจะละลายและแพร่เข้าไปในเนื้อพื้นของอะลูมิเนียมจนทำให้เนื้อพื้นอะลูมิเนียมกลายเป็นสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดที่มีปริมาณ ซิลิคอนมากกว่าสภาวะปกติเล็กน้อยและเมื่อนำไปชุบน้ำอย่างรวดเร็วจนสารละลาย



ของแข็งก็จะยังคงสภาวะอ่อนตัวยิ่งยวดนั้นไว้ทำให้ทราบว่าการผสมรวมของ A356+Lid+Sr สามารถทำให้ซิลิคอนแพร่เข้าไปในเนื้อพื้นของอะลูมิเนียมได้สูงจากค่าความแข็งคือ 93.34 HV

#### 4.2 ความแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

ความแข็งที่ดีที่สุดคือ 180°C อยู่ในช่วงระหว่างเวลา 3 และ 5 ชั่วโมง และมีค่าความแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 127.14 และ 128.56 HV ตามลำดับ เนื่องจากเวลาที่ใช้น้อยที่สุดและอุณหภูมิที่สูงนั้นส่งผลให้เกิดกลไกการตกตะกอนที่ทำให้เกิดเฟสแมกนีเซียมซิลิไซด์ ( $Mg_2Si$ ) ได้รวดเร็ว จึงทำให้การเคลื่อนที่ของ Dislocation เกิดยากเมื่อมีแรงกระทำทางกลเป็นผลต่อค่าความแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนชนิดไฮโปยูเทคติกเติมฟลักซ์ป้องกันและสตรอนเทียม (รหัส A356+Lid+Sr) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้เงินอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 ซึ่งงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากการสนับสนุนของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร รวมทั้งผู้ตรวจสอบทางวิชาการที่ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และผู้ประสานงานโครงการงานวิจัยของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้จนเป็นผลสำเร็จลงได้ตามวัตถุประสงค์ และกำหนดระยะเวลาตามสัญญาทุนที่ได้รับ

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Kongkiat Puparatanapong, "Effect of Coating on Aluminium Loss in the Used Beverage Container Recycling Process," King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2004.
- [2] Phisith Muangnoy, "Effect of Alloying Element on The Formation of  $\beta$ -Al<sub>15</sub>FeSi Compound in

Al-7%Si-1%Fe CAST ALLOYS," *Industrial Engineering (IE) Network Journal*, vol. 10, pp.76, Oct. 2010.

- [3] Jongjit Deechu and Yanee Techarachan, "The Influence of Pre-Aging on Precipitation Hardening of Al-Mg-Si-Cr-Alloys," King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2007.
- [4] Chaowalit Limmaneevichitr, "Aluminium-Silicon in Metal Casting Industrial," *Industrial Technology*, vol. 31, pp. 112-115, 2004.
- [5] Songwid Pong-a-nanpanya, "The Development of Vibration System at Semi-Solid State for Microstructure Improvement in Cast Aluminum Alloy," King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2008.
- [6] Tawichat Yenwiset, "Improvement of the Mechanical Properties of Aluminium Cast from Recycled Beverage Cans by Silicon Addition and Heat Treatment," King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2006.
- [7] Payoon Senthongkaew, Dissanee Chatsettapong, Chaowalit Limmaneevichitr, et al., "Effect of Addition Recycled Beverage Cans and Mechanical Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of A356 Al-Si Alloys," in *54<sup>th</sup> Kasetsart University Conference*, February 1-4, 2010, pp. 34-41.
- [8] Phisith Muangnoy, "The Development of Al-10%Mn-1%Sr Master Alloy to Modify  $\beta$ -phase and Eutectic Silicon in Cast Al-7% Si - 1%Fe Alloys," in *Industrial Engineering (IE) Network Conference*, October 20-21 2011, pp.1255-1263.
- [9] Manas Satirajind, *Non-Ferrous Metals*, Chulalongkorn University Publishing House, 1995.
- [10] M. Abdulwahab, et al., "Effect of multiple-step



- thermal ageing treatment on the hardness characteristics of A356.0 type Al-Si-Mg Alloy,” *Materials and Design*, vol. 32, pp. 1159-1166, 2011.
- [11] H. Möller, et al., “Natural and artificial aging response of semisolid metal processed Al-Si-Mg alloy A356,” *Cast Metals Research*, vol. 20, pp. 340-346, 2007.
- [12] A. Thirugnanam, “Effect of Mg on the fracture characteristics of cast Al-7Si-Mg alloys,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 445-446, pp. 405-414, 2007.
- [13] J.E. Gruzleski and C.M. Bernard, *The Treatment of Liquid Aluminium Silicon Alloy*, American Foundrymen’s Society, AFS, Inc. Illinois, 1990. pp. 1-94, 108-126.
- [14] Thai Foundrymen’s Society, *Technique and Schedules for Al-Alloys*, 2002, pp. 31-39.