



## รายงานการวิจัย

อิทธิพลของสแกนเดียมและการปรับสภาพด้วยความร้อนหลังการบ่มแข็งที่มีต่อ  
โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนและแมกนีเซียมชนิดA356

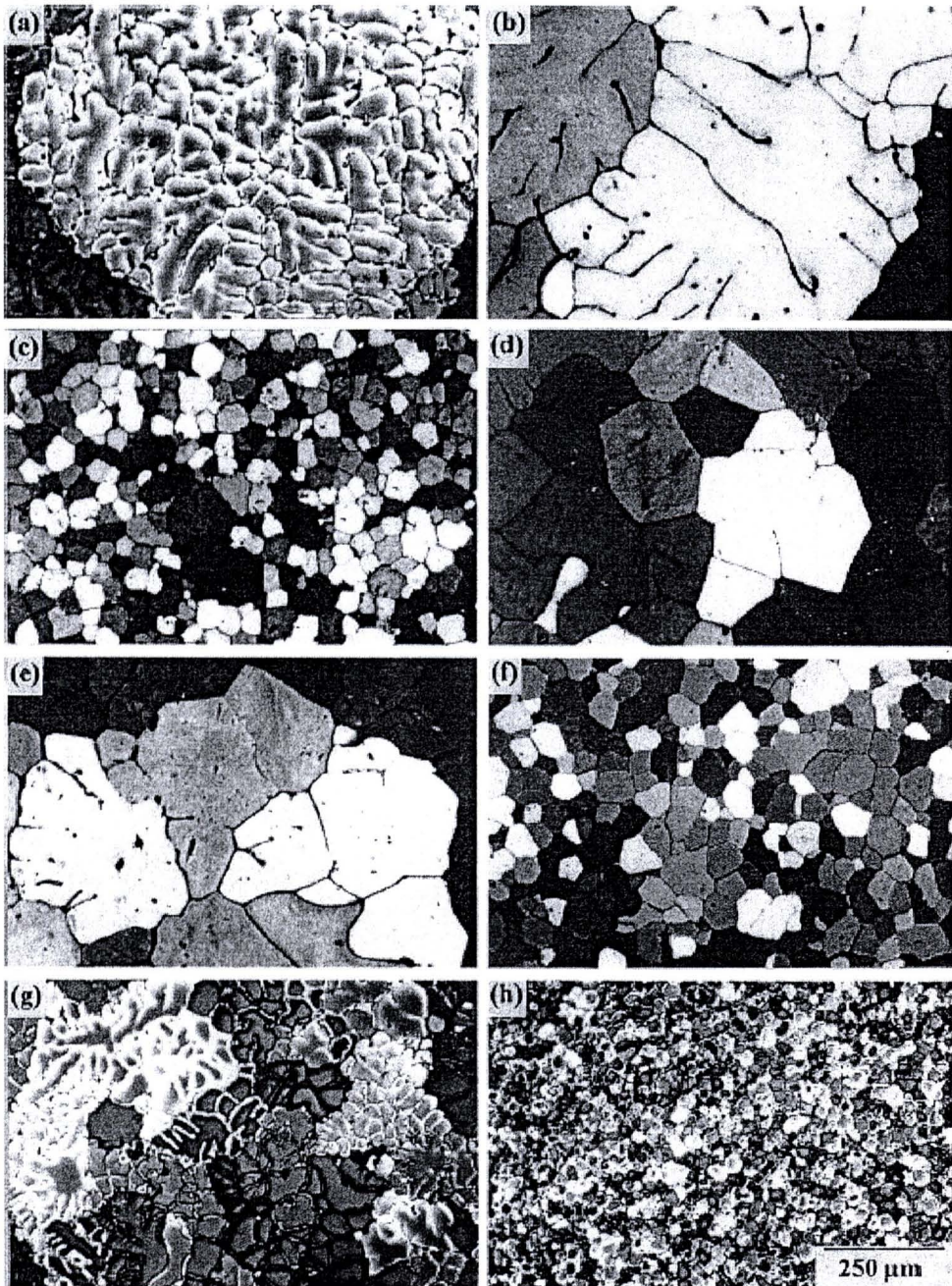
Effect of scandium and heat treating after age hardening on microstructure and  
hardness of aluminum-silicon-magnesium alloy of A356

โดย

ดร.วิวัฒน์ชัย พฤษก์กานนท์

การวิจัยนี้ได้รับทุนส่งเสริมการวิจัยจากมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

พ.ศ. 2552 - 2554



รูปที่ 2-4 โครงสร้างการแข็งตัวของชิ้นงาน Al-4.5Cu (อัตราเย็นตัว 100K/s) a) 4.5Cu b) 0.2Sc c) 0.7Sc d) 0.5Zr e) 0.2Zr f) 0.25Sc-0.25Zr g) 4.5Cu-0.3Sc h) 4.5-0.8Sc[30]

Venkateswarlu [36] ได้ทำการศึกษาผลปริมาณการเติม Sc ในอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ค่าความแข็งแรงและค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Sc การทำ Homogenized เพิ่มคุณสมบัติชิ้นงานสูงขึ้น



246479



## รายงานการวิจัย

อิทธิพลของสแกนเดียมและการปรับสภาพด้วยความร้อนหลังการบ่มแข็งที่มีต่อ  
โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนและแมกนีเซียมชนิด A356

\*Effect of scandium and heat treating after age hardening on microstructure and  
hardness of aluminum-silicon-magnesium alloy of A356

โดย

ดร.วิวัฒน์ชัย พฤกษ์กานนท์

การวิจัยนี้ได้รับทุนส่งเสริมการวิจัยจากมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

พ.ศ. 2552 - 2554

หัวข้อโครงการวิจัย	อิทธิพลของสแกนเดียมและการปรับสภาพด้วยความร้อนหลังการบ่มแข็งที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนและแมกนีเซียมชนิดA356
ชื่อนักวิจัย	ดร.วัฒน์ชัย พฤกษ์กานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
ปีการศึกษา	2552 - 2554

### บทคัดย่อ

246479

ธาตุสแกนเดียมกำลังเป็นที่สนใจ ด้วยเหตุผลที่โลหะอะลูมิเนียมผสมใช้แรงขึ้นรูปที่เจือสแกนเดียมมีผลการปรับปรุงสภาพเกรน เพิ่มอุณหภูมิการจัดผลึกใหม่และลดปัญหาการแตกร้าวยิ่งไปกว่านั้นส่งผลด้านลดการแตกร้าวร้อน และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีในโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูง ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลของสแกนเดียมต่อความมีเสถียรภาพสมบัติทางกลที่อุณหภูมิสูงหลังจากการบ่มแข็งในโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียมซิลิคอน A356 โดยพบว่าการเติมสแกนเดียม 0.2 wt.% ใน A356 ส่งผลต่อการปรับปรุงรูปร่างขนาด และการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอน และลดขนาดเกรน และส่งผลเพิ่มมากขึ้นที่ปริมาณสแกนเดียมสูงขึ้นส่วนผลด้านความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมส่งผลให้ความแข็งเพิ่มมากขึ้น และมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นหลังการบ่มแข็งทั้ง A356 ที่เติมและไม่เติมสแกนเดียม ผลการรับภาระความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆกัน พบว่า การเติมสแกนเดียม 0.2 wt.% 0.4 wt.% และสแกนเดียม 0.2 wt.% ร่วมกับ เซอร์โคเนียม 0.2 wt.% ในโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม A356 เพิ่มความแข็ง และ เพิ่มเสถียรภาพความแข็งจากการบ่มแข็ง T6 หลังจากผ่านการรับภาระที่อุณหภูมิสูง การเติมสแกนเดียมจะชะลอผลการเสื่อมสภาพจากการบ่มแข็ง

Title	Effect of scandium and heat treating after age hardening on microstructure and hardness of aluminum-silicon-magnesium alloy of A356
Researcher	Wattanachai Prukkanon, Ph.D.
Major	Industrial Engineering School of Engineering University of the Thai Chamber of Commerce
Year	2009 - 2011

---

### Abstract

**246479**

Scandium is in the focus of aluminum researchers as a new promising element to refine grains, increase recrystallization temperature, and reduce hot cracking susceptibility in wrought aluminum alloys, and effectively reduces hot tearing susceptibility and increases corrosion resistance in high strength aluminum alloys. However, many engineering properties have not been studied in details including the effect of scandium on the high temperature stability of A356, especially after age hardening process. This research was to investigate the effects of Sc on aluminum silicon casting alloy A356. It was found that addition of 0.2 wt.% Sc could modify eutectic Si in A356 by changing its morphology towards a rounded and fibrous shape and refine grain size. The different levels of Sc and Sc with Zr additions were added to A356 before casting in the permanent mold. Zr was used together with Sc because it was previously reported that Zr increased the effectiveness of Sc in many areas. The A356 samples were age hardened before heating up at different elevated temperatures and for different durations. The samples were then tested for their hardness. It was found that 0.2 and 0.4 wt.% Sc additions and Sc with Zr addition into A356 increased hardness and improved the hardness stability at T6 condition after elevated temperature service due to slower over aging response.

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยหอการค้าไทยที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยให้การดำเนินงานทุกอย่างสำเร็จด้วยดี ต้องขอขอบคุณโรงหล่ออุตสาหกรรม 2 มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรีที่เชื้อเพื่อเตาหลอมในการทดลอง ขอขอบคุณที่ปรึกษาโครงการ รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร สุดท้ายนี้ผู้จัดทำรายงานวิจัยฉบับนี้ ขอขอบคุณผู้ร่วมโครงการวิจัยทุกท่าน โดยเฉพาะนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ดังนี้ นายสิทธิา พณิชสกุล บัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ และ นายวรวิษ เอกวิไล นักศึกษาสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ดร.วัฒนชัย พฤกษ์กานนท์

อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย และภาษาอังกฤษ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	จ
สารบัญตาราง	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัยโดยสังเขป	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 โลหะผสมอะลูมิเนียมสแกนเดียมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 พฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียมสแกนเดียม	10
2.2 การปรับสภาพเกรนด้วยโลหะผสมหลัก อะลูมิเนียม สแกนเดียม	10
2.3 การปรับสภาพเกรนละเอียดของโลหะผสมหลักอะลูมิเนียมสแกนเดียม	13
<b>บทที่ 3 การทดลอง และผลการศึกษาวิจัย</b>	<b>16</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทดสอบ	19
3.3 การวิเคราะห์ผลการปรับปรุงรูปร่างและการกระจายตัวของเม็ดตกตะกอน	23
3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคทางโลหะวิทยาโลหะผสมอะลูมิเนียม	31
3.5 ผลการวัดค่าความแข็งก่อนและหลังการบ่มแข็งด้วยกระบวนการT6	33
3.6 ผลการวัดค่าความแข็งหลังผ่านการรับภาระที่อุณหภูมิสูงที่เวลาต่างๆกัน	34

บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย	39
4.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย	39
4.2 ข้อเสนอแนะ	40

#### บรรณานุกรม

ภาคผนวก ผลการวัดค่าความแข็งชิ้นงานหลังจากรับภาระที่อุณหภูมิสูงที่เวลาต่างๆกัน

## สารบัญรูปภาพ

- รูปที่ 2-1 ขนาดเกรน กับ ปริมาณการเติมโลหะผสมหลัก Al- Sc ในการปรับสภาพเกรน อะลูมิเนียมบริสุทธิ์
- รูปที่ 2-2 โครงสร้างภายในจาก TEM แสดง faceted ของอนุภาค  $L1_2 Al_3Sc$
- รูปที่ 2-3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด แสดงอนุภาคเริ่มต้น  $Al_3Sc$  ในเกรนอะลูมิเนียมบริสุทธิ์
- รูปที่ 2-4 โครงสร้างการแข็งตัวขึ้นงาน Al-4.5Cu (อัตราเย็นตัว 100K/s) a) 4.5Cu b) 0.2Sc c) 0.7Sc d) 0.5Zr e) 0.2Zr f) 0.25Sc-0.25Zr g) 4.5Cu-0.3Sc h) 4.5-0.8Sc
- รูปที่ 2-5 ผลการต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ของโลหะผสมหลัก Al-5Ti-B และ Al-Sc
- รูปที่ 2-6 เฟสไดอะแกรม Al-Sc
- รูปที่ 2-7 เฟสไดอะแกรมของ Al-Sc ส่วนขยาย
- รูปที่ 3-1 โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียมซิลิคอน A 356
- รูปที่ 3-2 โลหะผสมหลัก อะลูมิเนียม-สแกนเดียม 2 %โดยน้ำหนัก
- รูปที่ 3-3 โลหะผสมหลัก อะลูมิเนียม-เซอร์โคเนียม 10 %โดยน้ำหนัก
- รูปที่ 3-4 แบบหล่อการเย็นตัวเร็วสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างขึ้นงาน
- รูปที่ 3-5 แบบหล่อการเย็นตัวช้าสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างขึ้นงานและตรวจสอบความแข็ง
- รูปที่ 3-6 เตาหลอมโลหะแบบเหนียวน้ำและการอุ่นเข้าหลอมเพื่อไล่ความชื้น
- รูปที่ 3-7 แบบหล่อแบบเย็นตัวเร็วและเย็นตัวช้า
- รูปที่ 3-8 การตรวจวัดอุณหภูมิโลหะหลอมเหลว
- รูปที่ 3-9 แบบหล่อเย็นตัวช้าและเย็นตัวเร็วที่ทำเทหล่อขึ้นงาน
- รูปที่ 3-10 การตรวจวัดส่วนผสมทางเคมีของขึ้นงานหล่อแต่ละการทดลอง
- รูปที่ 3-11 ขึ้นงานที่หล่อจากแบบหล่อการเย็นตัวช้าและแบบหล่อเย็นตัวเร็ว
- รูปที่ 3-12 โลหะผสมอะลูมิเนียมA356 แบบหล่อเย็นตัวช้าที่กำลังขยายต่างๆ
- รูปที่ 3-13 โลหะผสมอะลูมิเนียมA356 แบบหล่อเย็นตัวเร็วที่กำลังขยายต่างๆ
- รูปที่ 3-14 โลหะผสมอะลูมิเนียมA356ที่เติม 0.2wt.%Sc แบบหล่อเย็นตัวช้าที่กำลังขยายต่างๆ
- รูปที่ 3-15 โลหะผสมอะลูมิเนียมA356ที่เติม 0.2wt.%Sc แบบหล่อเย็นตัวเร็วที่กำลังขยายต่างๆ

- รูปที่ 3-16 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่เติม 0.4 wt.% Sc แบบหล่อเย็นตัวช้าที่กำลังขยาย  
ต่างๆ
- รูปที่ 3-17 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่เติม 0.4 wt.% Sc แบบหล่อเย็นตัวเร็วที่กำลังขยาย  
ต่างๆ
- รูปที่ 3-18 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่เติม 0.6 wt.% Sc แบบหล่อเย็นตัวช้าที่กำลังขยาย  
ต่างๆ
- รูปที่ 3-19 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่เติม 0.6 wt.% Sc แบบหล่อเย็นตัวเร็วที่กำลังขยาย  
ต่างๆ
- รูปที่ 3-20 โครงสร้างภายในของโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน A356 เย็นตัวช้าที่ส่วนผสมเคมี  
ต่างๆ a) ไม่เติมสแกนเดียม b) เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% c) เติมสแกนเดียม 0.4  
wt.% และ d) เติมสแกนเดียม 0.6 wt.%
- รูปที่ 3-21 โครงสร้างภายในของโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน A356 เย็นตัวเร็วที่ส่วนผสม  
เคมีต่างๆ a) ไม่เติมสแกนเดียม b) เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% c) เติมสแกนเดียม  
0.4 wt.% และ d) เติมสแกนเดียม 0.6 wt.%
- รูปที่ 3-22 โครงสร้างมหภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน A356 เย็นตัวช้าที่ส่วนผสม  
เคมีต่างๆ a) ไม่เติมสแกนเดียม b) เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% c) เติมสแกนเดียม  
0.4 wt.% และ d) เติมสแกนเดียม 0.6 wt.%
- รูปที่ 3-23 โครงสร้างมหภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน A356 เย็นตัวเร็วที่ส่วนผสม  
เคมีต่างๆ a) ไม่เติมสแกนเดียม b) เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% c) เติมสแกนเดียม  
0.4 wt.% และ d) เติมสแกนเดียม 0.6 wt.%
- รูปที่ 3-24 ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่าน  
การรับภาระที่ 150 °C ที่เวลาต่างๆ
- รูปที่ 3-25 ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่าน  
การรับภาระที่ 250 °C ที่เวลาต่างๆ
- รูปที่ 3-26 ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่าน  
การรับภาระที่ 350 °C ที่เวลาต่างๆ
- รูปที่ 3-27 ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่าน  
การรับภาระ 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆกัน

## สารบัญตาราง

- ตารางที่ 2-1 ผลงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับโลหะผสมอะลูมิเนียมสแกนเดียม
- ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางกลจากการเติมธาตุ Sc ของโลหะอะลูมิเนียม
- ตารางที่ 2-3 ข้อมูลการคำนวณ ค่า growth restriction factor, Q
- ตารางที่ 3-1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียมซิลิคอน A356 (wt. %) ที่เติมสแกนเดียมและเซอร์โคเนียม
- ตารางที่ 3-2 ค่าความแข็งก่อนนำขึ้นงาน as-cast ก่อนนำไปอบกระบวนการ T6 (HB)
- ตารางที่ 3-3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความแข็งที่ลดลงหลังจากผ่านการรับภาระ 5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน