

## **Refinement of Primary Silicon in Hypereutectic Aluminum-Silicon Alloys**

**Patama VISUTTIPITUKUIL<sup>1</sup>, Onnjira THANUDAPE<sup>1</sup>, Ittipon DIEWWANIT<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Gaduated Student, Department of Metallurgical Engineering Chulalongkorn University

<sup>2</sup>Department of Metallurgical Engineering Chulalongkorn University

### **Abstract**

Hypereutectic aluminum silicon alloys are low-density and wear-resistant materials. Their mechanical properties may be enhanced by the refinement of primary silicon which is traditionally done by the addition of phosphorus. This study shows that the addition of phosphor-copper to the melt prior to solidification reduces the size of primary silicon in the casting. Distribution of primary silicon in the refined castings was found to be more uniform than the unrefined.

## **การปรับลดขนาดของ primary silicon ในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ชนิด hypereutectic**

**ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล<sup>1</sup>, อรจิรา ธนุเทพ<sup>1</sup>, อธิรพล เตี้ยวณชัย<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

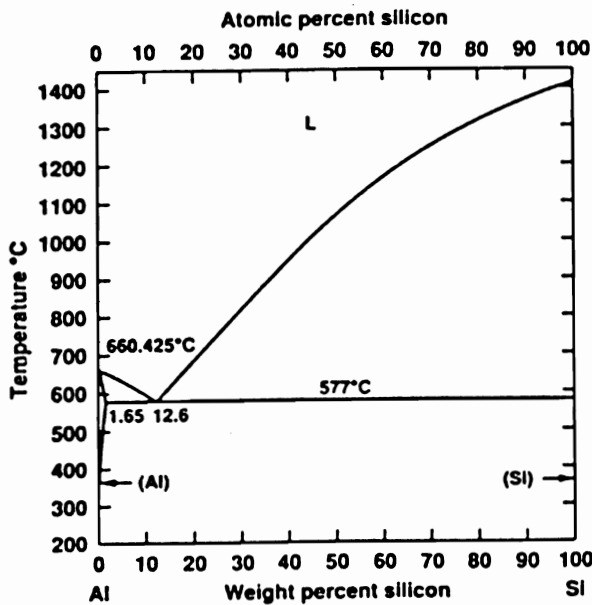
<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### **บทคัดย่อ**

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนชนิด hypereutectic สูญเสียคุณสมบัติทางกลเมื่อมีซิลิกอนผสมอยู่ในปริมาณที่สูง เนื่องจาก primary silicon ที่ตกผลึกออกมามีขนาดใหญ่ การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมคอปเปอร์-ฟอสฟอรัส ที่มีต่อขนาดและการกระจายตัวของ primary silicon ในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า primary silicon ที่ตกผลึกออกมาในระหว่างการแข็งตัวของโลหะผสม ที่ได้รับการเติมฟอสฟอรัสมีขนาดเล็กลงและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัดของชิ้นงาน

คำนำ

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนชนิด hypereutectic เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีซิลิกอน ผสมอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 12.6 โดยน้ำหนักขึ้นไป โลหะผสมในกลุ่มนี้ที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางได้แก่ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน A390 B390 B392 และ B393 ซึ่งมีซิลิกอนร้อยละ 17 19 และ 22 โดยน้ำหนักตามลำดับโดยมีทองแดง แมงกานีส แมกนีเซียม และนิกเกิลเป็นธาตุผสมรอง หากพิจารณาจากแผนภูมิสมมูลระหว่างธาตุอะลูมิเนียมและซิลิกอน (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 แผนภูมิสมมูลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน

จะพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมนี้ประกอบด้วยผลึก primary silicon กระจายอยู่ในโครงสร้าง eutectic คุณสมบัติเด่นของโลหะผสมกลุ่มนี้ได้แก่ 1. คุณสมบัติในการหล่อที่ดี (castability) 2. มีความถ่วงจำเพาะต่ำเนื่องจากมีซิลิกอน ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าอะลูมิเนียมผสมอยู่ 3. มีความต้านทานต่อการเสียดสี (wear resistance) ที่สูงเนื่องจากมีซิลิกอนซึ่งเป็นธาตุที่มีความแข็งสูงกระจายอย่างสม่ำเสมออยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมที่เหนียวและแกร่ง

โดยทั่วไปแล้วเมื่อปริมาณซิลิกอนสูงขึ้นความต้านทานต่อการเสียดสีและคุณสมบัติทางกลจะสูงขึ้นในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficients of

thermal expansion) ลดลง คุณสมบัติเฉพาะตัวที่เด่นเหล่านี้ทำให้โลหะผสม A390 และ B390 ได้รับการนำไปใช้งานผลิตชิ้นส่วนต่างๆของยานยนต์ ได้แก่ กระจอบสูบ ลูกสูบ เครื่องอัดอากาศ บีมน้ำ ลูกรอกและส่วนประกอบของระบบเบรก

จุดด้อยของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนชนิด hypereutectic นี้ก็คือจุดหลอมเหลวของโลหะผสมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกอนที่ผสมอยู่ ซึ่งจะเห็นได้จากแผนภูมิสมมูลระหว่างธาตุอะลูมิเนียมและซิลิกอนที่อุณหภูมิ liquidus เพิ่มขึ้นกับปริมาณซิลิกอน ดังนั้น primary silicon ที่ตกผลึกออกมามีขนาดใหญ่เนื่องจากช่วงการแข็งตัวที่กว้าง ลักษณะดังกล่าวทำให้การควบคุมคุณภาพงานหล่อเป็นไปได้ยากภายใต้ cooling rate ปกติ และยังทำให้สูญเสียคุณสมบัติทางกลอีกด้วย ทางแก้ทางหนึ่งได้แก่ การทำ refinement เพื่อทำให้ผลึก primary silicon มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ การทำ refinement สามารถทำได้โดยการเติม refining agent เช่น ธาตุฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์(S) อาร์เซนิก (As) และโลหะ rare earth เป็นต้น เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณนิวเคลียสด้วยกระบวนการ heterogeneous nucleation ขึ้น

เทคนิคการทำ refinement ที่นิยมใช้คือการเติมฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของ (1) master alloys (2) flux (3) สารประกอบของฟอสฟอรัสเช่น อะลูมิเนียม-ฟอสฟอรัส (AlP) คอปเปอร์-ฟอสฟอรัส (CuP) และ FeP ลงไปในโลหะผสมขณะหลอมเหลว ฟอสฟอรัสที่เติมลงไปนั้นจะรวมตัวกับอะลูมิเนียมเกิดเป็นสารประกอบอะลูมิเนียม-ฟอสไฟด์ (AlP) ตกผลึกออกมาในระหว่างการแข็งตัวของโลหะผสม ผลึกเล็กๆของ AlP นี้ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมให้กับซิลิกอน ที่ตกผลึกออกมาทำให้ primary silicon มีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่ผ่านการทำ refinement จะมีคุณสมบัติทางกล เช่น ความต้านทานการเสียดสี (wear resistance) ความเหนียว (ductility) และกำลังของวัสดุ (strength) ที่ดีขึ้น

*Primary Silicon in Hypereutectic Aluminum-Silicon Alloys.*

สำหรับปัญหาในการเติมฟอสฟอรัสลงในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอนก็คือ การป้องกันไม่ให้มีธาตุแอลคาไลน์ (alkaline) ผสมเจือปนอยู่ในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน และการควบคุมบรรยากาศภายในเตารวมทั้งการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณคอปเปอร์ฟอสฟอรัสที่มีต่อขนาดและการกระจายตัวของ primary silicon ในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ชนิด hypereutectic

### วิธีการทดลอง

ขั้นตอนในการทดลองเริ่มต้นจากการนำแท่งโลหะผสมน้ำหนักประมาณ 160 กรัมมาหลอมใน graphite crucible ในเตา electric resistance อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมมีอยู่ 2 อุณหภูมิคือ 950°C และ 1100°C

เมื่อโลหะหลอมละลายดีแล้วจะทำการ refinement โดยเติมผงคอปเปอร์-ฟอสฟอรัสที่มีขนาดอยู่ในช่วง 45 ถึง 65 mesh ในการเติมผงนั้นจะเติมที่ปริมาณต่างๆ กัน (ร้อยละ 0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ของน้ำหนัก

โลหะหลอมเหลว) หลังจากเติมคอปเปอร์-ฟอสฟอรัสแล้วจะนำ crucible กลับเข้าไปในเตาอีกครั้ง เมื่อได้อุณหภูมิตามที่ต้องการแล้วจะเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อที่ทำจาก graphite ซึ่งงานที่ได้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคทำโดยใช้ software image analysis ที่พุ่งอยู่กับกล้องจุลทรรศน์ซึ่งตรวจขนาดของผลึก primary silicon และทำการคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของผลึก ดังรูปที่ 2 ซึ่งงานที่หล่อได้

### ผลการทดลอง

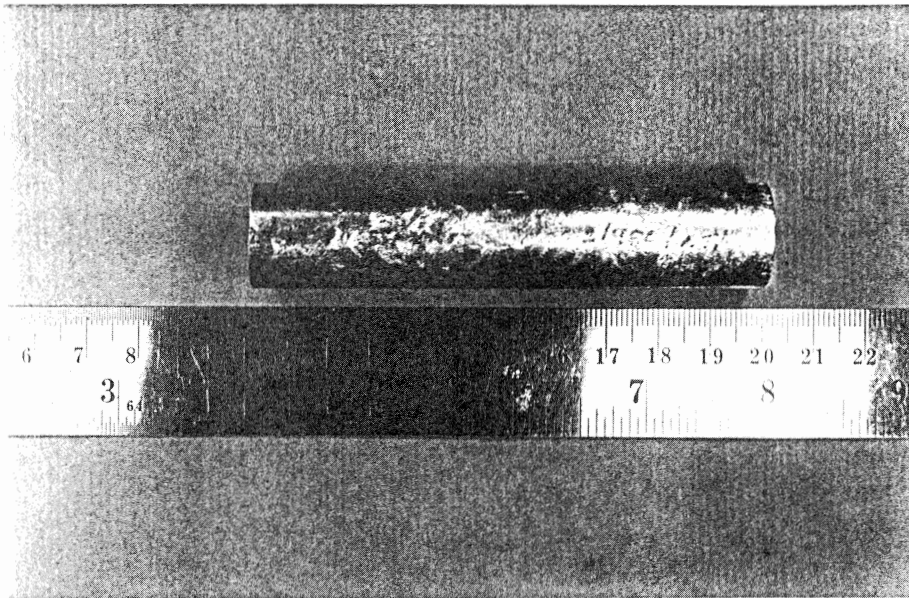
จากการทดลองเติมคอปเปอร์-ฟอสฟอรัส CuP ในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 0.5 โดยน้ำหนักลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนชนิด hypereutectic พบว่าขนาดของ primary silicon เล็กลงอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่เติม CuP ร้อยละ 0.1 กับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมขนาดเฉลี่ยของ primary silicon ในโลหะผสมที่เติม CuP ในปริมาณต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2 และรูปที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่ใช้ในการทดลองนี้มีส่วนผสมทางเคมี (โดยเฉลี่ย)

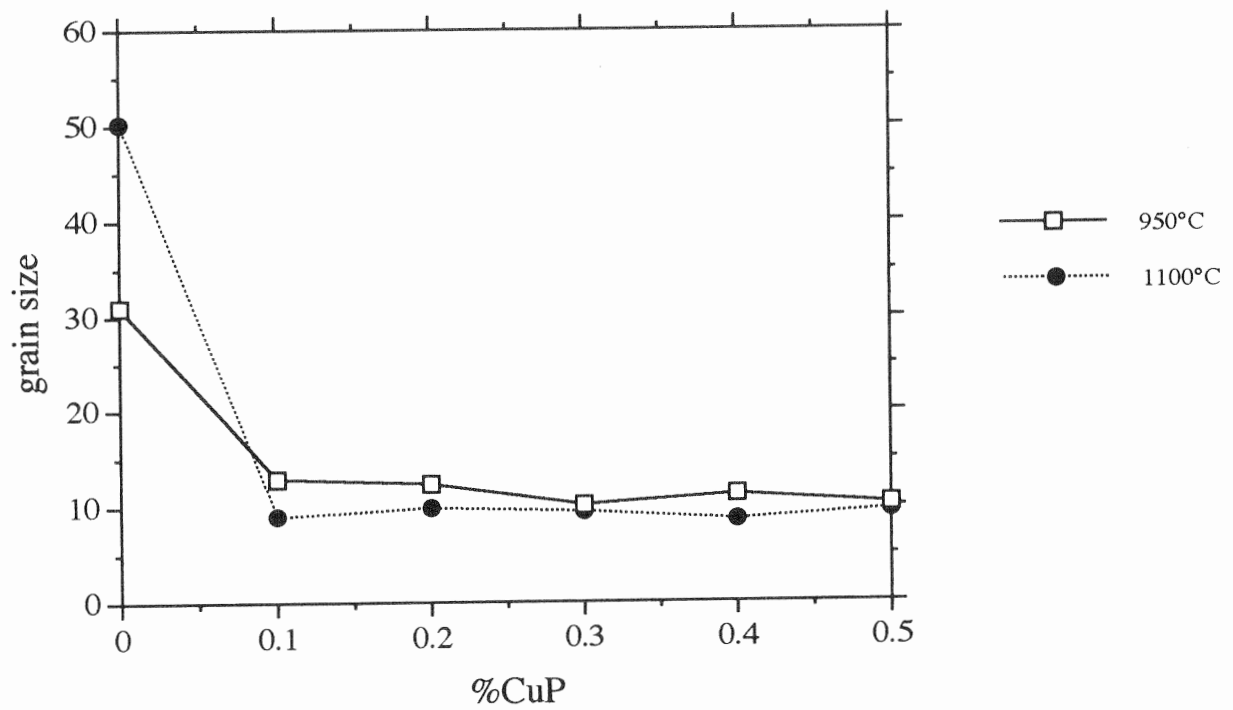
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Na
74.91	24.44	0.724	0.052	0.0867	0.0163	0.0434	0.0064

ตารางที่ 2 ขนาดซิลิกอนของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่กลึงชิ้นงาน

ตัวอย่างที่	ปริมาณCuP	ขนาดเฉลี่ยของซิลิกอน (microns) ที่อุณหภูมิเท	
	%CuP by weight	950°C	1100°C
1	0	30.980	50.222
2	0.1	12.882	8.976
3	0.2	12.348	9.886
4	0.3	10.146	9.488
5	0.4	11.260	8.595
6	0.5	10.264	9.630



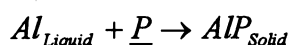
รูปที่ 2 ชิ้นงานที่หล่อได้



รูปที่ 3 ขนาดซิลิกอนของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่กลางชิ้นงาน

*Primary Silicon in Hypereutectic Aluminum-Silicon Alloys.*

เมื่อเติมคอปเปอร์-ฟอสฟอรัสมากกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก พบว่าขนาดของ primary silicon ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับขนาดของ primary silicon ที่เล็กลงจากการเติมคอปเปอร์-ฟอสฟอรัสอาจอธิบายได้จากการที่ฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในโลหะผสมหลอมเหลวรวมตัวกับอะลูมิเนียมเกิดสารประกอบอะลูมิเนียมฟอสไฟด์ (AlP) ดังสมการ



AlP ที่ตกผลึกออกมาระหว่างการแข็งตัวของโลหะผสมจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมให้กับผลึกของซิลิกอน (Ref 1-6) โดยขนาดของ primary silicon ในชิ้นงานหล่อ ที่อุณหภูมิเท 1100°C นั้นเล็กกว่าที่อุณหภูมิเท 950°C

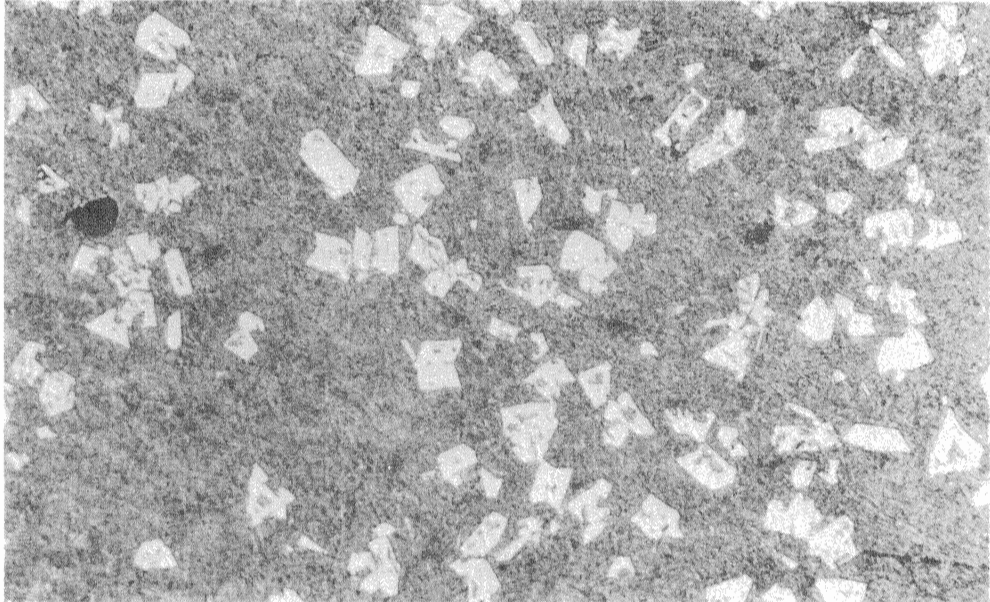
การทำ refinement นอกจากจะสามารถลดขนาดของ primary silicon ได้แล้วยังช่วยให้การกระจายตัวของ primary silicon สม่าเสมอมากขึ้นเนื่องจากผลึก AlP ที่ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมให้แก่ซิลิกอนตกผลึกออกมาอย่างสม่าเสมอ รูปที่ 4-7 เป็นภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเท 950°C และ 1100°C เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่เติมและไม่เติมคอปเปอร์-ฟอสฟอรัส จากภาพจะเห็นว่า primary silicon ในชิ้นงานหล่อที่เติม CuP มีขนาดเล็กกว่าในชิ้นงานที่ไม่ได้เติม CuP นอกจากนี้ primary silicon ในชิ้นงานหล่อ

ซึ่งเติม CuP และเท ที่อุณหภูมิเท 1100°C มีขนาดเล็กกว่าในชิ้นงานหล่อที่เท ที่อุณหภูมิ 950°C

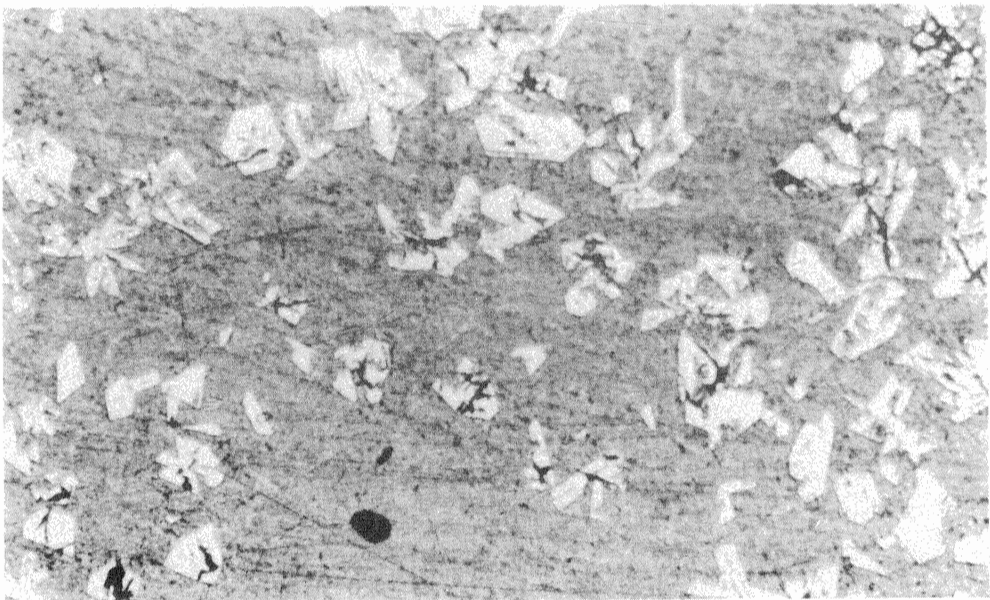
ในส่วนของกระจายของ primary silicon นั้นพบว่าผลึกซิลิกอนในชิ้นงานหล่อที่ไม่ได้เติม CuP มีการกระจายตัวอย่างไม่สม่าเสมอ เนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันระหว่างใจกลาง และส่วนที่อยู่ใกล้กับผนังแบบในกรณีของชิ้นงานที่เติม CuP พบว่าการกระจายตัวของ primary silicon มีความสม่าเสมอมากขึ้น ซึ่งอาจอธิบายได้จากทฤษฎีการเกิดนิวเคลียสเทียม เช่นเดียวกัน

นอกจากปริมาณของฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในโลหะผสมแล้ว ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อขนาดของ primary silicon คืออุณหภูมิเท จากการทดลองพบว่า primary silicon ในชิ้นงานหล่อซึ่งเทที่อุณหภูมิ 1100°C มีขนาดใหญ่กว่าในชิ้นงานหล่อซึ่งเทที่อุณหภูมิ 950°C ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโลหะหลอมเหลวที่เทที่อุณหภูมิ 1100°C มีช่วงการแข็งตัวกว้างกว่าที่อุณหภูมิ 950°C

สำหรับโลหะผสมที่เติมคอปเปอร์-ฟอสฟอรัสในปริมาณต่างๆ พบว่า primary silicon ในชิ้นงานหล่อที่เทที่อุณหภูมิ 1100°C มีขนาดเล็กกว่าในชิ้นงานหล่อที่เทที่อุณหภูมิ 950°C ทั้งๆ ที่มีช่วงการแข็งตัวกว้างกว่าที่เป็นดังนี้ อาจเป็นเพราะปริมาณฟอสฟอรัสในโลหะหลอมเหลวอุณหภูมิ 1100°C มีมากกว่าที่อุณหภูมิ 950°C ซึ่งเป็นผลจากความสามารถในการละลายของฟอสฟอรัสที่ละลายได้เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิ ตามแผนภูมิสมดุล 3 ธาตุของอะลูมิเนียม-ฟอสฟอรัส-ซิลิกอน (รูปที่ 8)

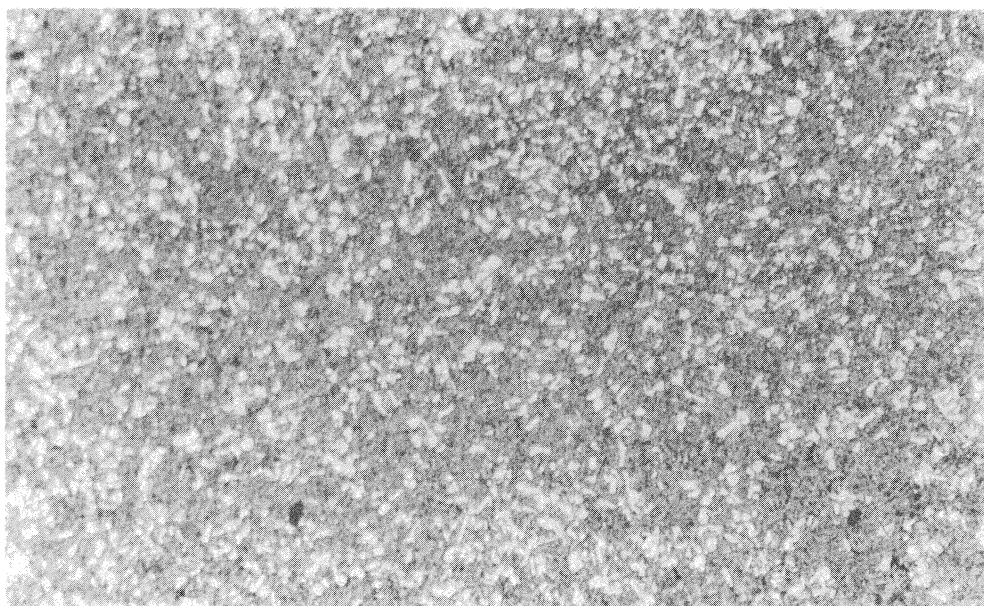


รูปที่ 4 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิ 950<sup>o</sup>c 0% CuP

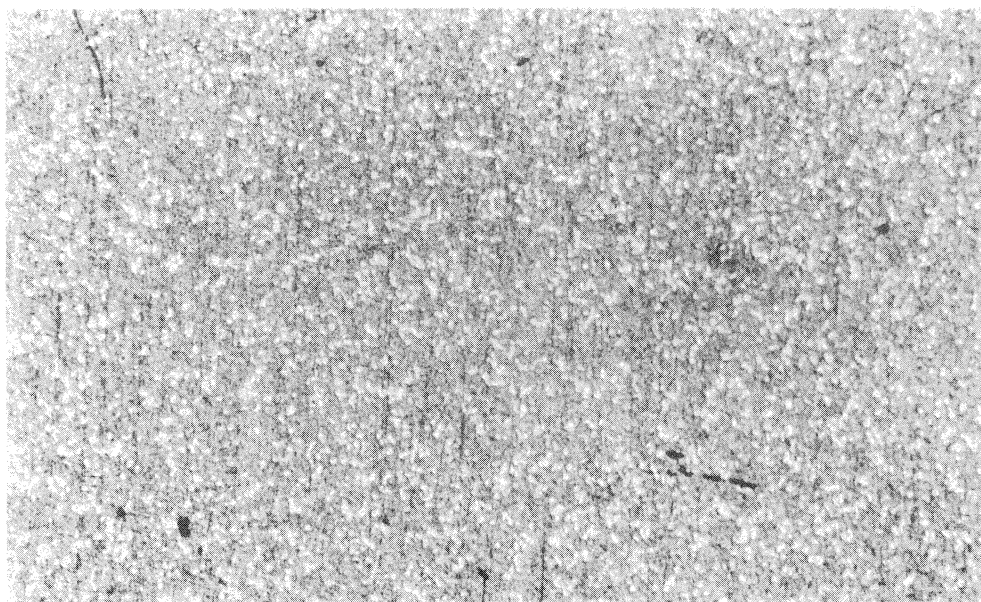


รูปที่ 5 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิ 1100<sup>o</sup>c 0% CuP

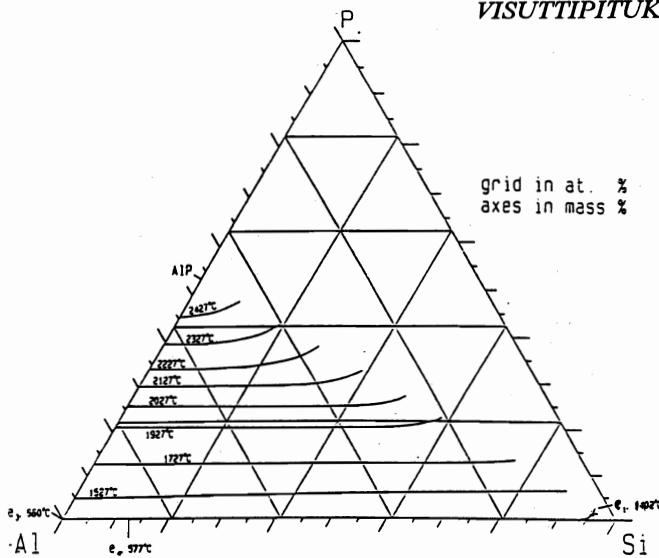
*Primary Silicon in Hypereutectic Aluminum-Silicon Alloys.*



รูปที่ 6 ภาพถ่าย โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเท 950<sup>o</sup>c 0.3% CuP



รูปที่ 7 ภาพถ่าย โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเท 1100<sup>o</sup>c 0.3% CuP



รูปที่ 8 แผนภูมิสมมูล 3 ธาตุของอะลูมิเนียม-ฟอสฟอรัส-ซิลิกอน

#### สรุปผลการทดลอง

1. คอปเปอร์-ฟอสฟอรัส (CuP) ที่เติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนหลอมเหลวจะช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในโลหะผสม
2. ขนาดของ primary silicon ในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเล็กลง หลังจากทำการ refinement โดยการเติมคอปเปอร์-ฟอสฟอรัส (CuP) ลงในโลหะผสมขณะหลอมเหลว
3. ขนาดของ primary silicon มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเติมคอปเปอร์-ฟอสฟอรัส (CuP) ปริมาณร้อยละ 0.1-0.5 โดยน้ำหนัก
4. การกระจายตัวของ primary silicon ในชิ้นงานหล่อเป็นไปอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นหลังจากทำการ refinement โดยเติมคอปเปอร์-ฟอสฟอรัสลงในโลหะผสมขณะหลอมเหลว
5. อุณหภูมิและปริมาณของฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในโลหะหลอมเหลวเป็นตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของ primary silicon

การศึกษาในครั้งนี้ได้รับการอุดหนุนจากเงินทุนอุดหนุนโครงการการเรียนการสอน เพื่อเสริมประสบการณ์ปีการเงิน 2540 ฝ่ายวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### เอกสารอ้างอิง

- Clegg, A.J. and Das, A.A. 1977. The Influence of Structural Modifiers on the Refinement of Primary Silicon in a Hypereutectic Aluminium-Silicon Alloy. *British Foundry*. **70** : 56-63.
- Guertler, Von Gustav 1948. Beitrag zur Kristallisation der Aluminium - Silizium - Legierungen, *Z. Metallkunde*. **39** (123) : 503-509.
- Rooy, E.L. 1972 . Summary of Technical Information on Hypereutectic Al-Si Alloys. *Transactions of the American Foundrymen's Society*. **44** :421-426.
- Sigworth, G.K. 1987. Refinement of Hypereutectic Aluminium Silicon Alloys. *Transaction of the American Foundrymen's Society*. **82** : 303-314.
- Tenedjiev, N., Argo, D. and Gruzleski, J.E. 1989. Sodium, Strontium, and Phosphorus Effects in Hypereutectic Al-Si Alloys. *Transaction of the American Foundrymen's Society*. **18** : 127-136.
- Zhao, Heng Xian and Xu, Xiao Fei 1995. Refinement of Aluminum - Silicon Hypereutectic Alloys. *Light Metal* : 995-998.
- มันสิน ตันจุลเวศม์, ดร. การวิเคราะห์ฟอสฟอรัส. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ : 187-197.