

## อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการหล่อแบบหมุนเหวี่ยงที่มีผลต่อ การหดตัวของสังกะสีผสม

สิริพร โรจนนันต์<sup>1\*</sup> อภิรัฐ โกสิตานนท์<sup>2</sup> และ สุรศิษฐ์ โรจนนันต์<sup>3</sup>  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

### บทคัดย่อ

การหดตัวของโลหะที่ผ่านกระบวนการหล่อทำให้ขนาดชิ้นงานที่ได้มีมิติที่แตกต่างไปจากที่ออกแบบไว้ ซึ่งค่าการหดตัวของโลหะขึ้นกับหลายตัวแปร จึงเป็นปัญหาในการผลิตของภาคอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการหล่อแบบหมุนเหวี่ยงที่มีผลต่อการหดตัวของสังกะสีผสมที่มีส่วนผสมของ Zn-4.0Al-3.1Cu-0.5Mg อุนทุมุมที่ใช้ในการหล่อมีค่า 420-480 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการเหวี่ยงใช้ 300-500 รอบต่อนาที ความยาวทางวิ่งและขนาดทางเข้าของน้ำโลหะแตกต่างกัน แม่พิมพ์ทำจากยางซิลิโคนทนความร้อนสูงผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้อุนทุมุมหล่อ 420 องศาเซลเซียส และความเร็วเหวี่ยง 500 รอบต่อนาที ทำให้ชิ้นงานมีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต่ำที่สุด มีค่าเฉลี่ยร้อยละ  $3.92 \pm 0.56$  ส่วนค่าการหดตัวของชิ้นงานในทิศทางตามแนวแรงเหวี่ยงมีค่าน้อยกว่าการหดตัวของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉาก การเพิ่มความยาวทางวิ่งส่งผลให้การหดตัวลดลง ในขณะที่การเพิ่มขนาดทางเข้าไม่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน สรุปได้ว่าการหล่อที่อุนทุมุมสูงส่งผลให้ชิ้นงานมีการหดตัวเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มความเร็วในการเหวี่ยงสูงขึ้นมีผลให้การหดตัวของชิ้นงานมีค่าลดลง ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์สำหรับภาคอุตสาหกรรมเพื่อได้แนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับงานหล่อแบบหมุนเหวี่ยง

**คำสำคัญ :** การหดตัว / การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง / งานหล่อ / สังกะสีผสม

\* Corresponding author : siriporn.roj@kmutt.ac.th

1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

2 นักศึกษาปริญญาโท สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

## The Effect of Spin Casting Process Parameters on Shrinkage in Zinc Alloy

Siriporn Rojananan<sup>1\*</sup>, Apirath Gositanon<sup>2</sup>, and Surasit Rojananan<sup>3</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

### Abstract

Shrinkage causes a change in dimension of metal castings from an original design. The metal casting shrinkage depends on varied parameters, and hence makes problems in industrial casting manufacture. The objective of this work is to study the effect of spin casting process parameters on shrinkage of Zn-4.0Al-3.1Cu-0.5Mg alloy. Casting temperatures in the range of 420-480 °C, rotation speeds of 300-500 rpm and various gate and runner sizes were studied. Moulds were made of high temperature resistant silicone rubber. The results show that the lowest volume shrinkage  $3.92 \pm 0.56\%$  occurs at the casting temperature of 420 °C and the rotational speed of 500 rpm. The shrinkage of sample sections parallel to the spin cast direction is lower than those of perpendicular to the spin cast direction. The increase in runner length results in the lower shrinkage, while the increase in runner size does not affect the shrinkage of samples. It could be concluded that higher casting temperatures result in higher shrinkage. On the other hand, the increase of spin speed results in the reduction of shrinkage. So, conclusions of this work would be useful guidance of mould design for spin casting industrial.

**Keywords :** Casting Sample / Shrinkage / Spin Casting / Zinc Alloy

---

\* Corresponding author : siriporn.roj@kmutt.ac.th

<sup>1</sup> Assistant Professor, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials.

<sup>2</sup> Master Degree Student, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

## 1. บทนำ

กระบวนการหล่อแบบหมุนเหวี่ยงเป็นกระบวนการหล่อที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจากการหมุนของแม่พิมพ์ เพื่อเหวี่ยงน้ำโลหะไปสู่ทางวิ่ง (Runner) และทางเข้า (Gate) แล้วเข้าสู่โพรงแบบ (Cavity) แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (F) ที่เกิดขึ้นกับตัวแปรหลายอย่าง [1] ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$F = \frac{4 \times m \times \pi^2 \times N^2 \times R}{G} \quad (1)$$

- F คือ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (กิโลกรัมแรง)  
 m คือ น้ำหนักของโลหะ (กิโลกรัมน้ำหนัก)  
 R คือ รัศมีของแม่พิมพ์ที่ใช้เหวี่ยง (เมตร)  
 N คือ จำนวนรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)  
 G คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

ปัจจุบันกระบวนการหล่อแบบหมุนเหวี่ยงมีบทบาทต่อการผลิตในหลายอุตสาหกรรม เหมาะสมสำหรับงานหล่อชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและซับซ้อน สามารถผลิตได้จำนวนมากในระยะเวลานับสั้น รวมทั้งมีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก ใช้อุปกรณ์การผลิตน้อย [2] ส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตต่ำ ภาคอุตสาหกรรมจึงหันมาให้ความสำคัญกับกระบวนการผลิตดังกล่าวมากขึ้น อย่างไรก็ตามในงานหล่อโลหะมักพบว่ามีปัญหาเรื่องการหดตัวของชิ้นงานเนื่องจากเมื่อโลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นของแข็งจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือความหนาแน่นเกิดขึ้น โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิของโลหะเหลวลดลงจะเกิดการหดตัวอยู่ 3 ช่วง [3] ได้แก่ช่วงแรกเป็นการหดตัวขณะที่เป็นของเหลวเรียกว่า Liquid Shrinkage เริ่มหดตัวในขณะที่โลหะเป็นของเหลวจนกระทั่งเริ่มกลายเป็นของแข็ง ช่วงต่อมา เกิดการหดตัวในขณะที่แข็งตัวเรียกว่า Solidification Shrinkage เกิดเมื่อโลหะเริ่มต้นแข็งตัวจนเกิดการแข็งตัวทั้งหมด ช่วงสุดท้ายเป็นการหดตัวเมื่อโลหะแข็งตัวสมบูรณ์เรียกว่า Solid Contraction เป็นการหดตัวเริ่มที่โลหะแข็งตัวสมบูรณ์จนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งกระบวนการหดตัวดังกล่าวจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกระบวนการหล่อและชนิดของโลหะ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การหดตัวของโลหะขึ้นกับ

ปัจจัยหลายปัจจัย ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Ogura [4] ศึกษาการหดตัวของทองคำผสมในกระบวนการหล่อด้วยเครื่องแรงดันสูญญากาศ (Vacuum-Pressure Casting Machine) พบว่า การหดตัวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิหล่อ เมื่อหล่อที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้เกิดการหดตัวมากขึ้น งานวิจัยของ Okorafor [5] ศึกษาการหล่ออะลูมิเนียมผสมซิลิคอนที่มีปริมาณส่วนผสมซิลิคอนต่างๆ ด้วยกระบวนการหล่อโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity casting) พบว่า เมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การหดตัวเพิ่มมากขึ้น จากงานวิจัยของ Korojy และคณะ [6] ศึกษาการหดตัวของทองแดงผสม Cu-Pb และ Cu-Sn-Pb พบว่า อัตราการเย็นตัวของโลหะ (Cooling rate) มีผลต่อการหดตัวของโลหะ กล่าวคือโลหะที่มีอัตราการเย็นตัวสูงมีผลทำให้มีการหดตัวน้อยกว่าโลหะที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำ

จากที่กล่าวมาข้างต้น เห็นได้ว่าการหดตัวของโลหะขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ แต่ยังไม่พบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวของสังกะสีผสมด้วยกระบวนการหล่อเหวี่ยง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิหล่อ ความเร็วรอบในการเหวี่ยง ความยาวทางวิ่ง และขนาดทางเข้าของน้ำโลหะ ที่มีผลต่อการหดตัวของสังกะสีผสม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยต่อไปและยังเป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรม เพื่อใช้ข้อมูลที่ได้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ปัจจัยในการหล่อ และการออกแบบแม่พิมพ์หล่อเหวี่ยงความเที่ยงตรงสูง สำหรับการหล่อตัวได้ถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกศึกษาส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางความร้อนของสังกะสีผสมที่ใช้ในการทดลอง ส่วนที่สองเป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการหล่อแบบหมุนเหวี่ยงและการหดตัวของชิ้นงานที่ได้

### 2.1 ส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และจุดหลอมเหลว

สังกะสีผสมที่ใช้ในการทดลองเป็นอินกอตที่นำเข้ามาจากประเทศเบลเยียม ตัดอินกอตไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Emission Spectrometer รุ่น ARL 4460 จากนั้นศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค

Differential Scanning Calorimetry (DSC) ด้วยเครื่อง METTLE TOLEDO DSC822<sup>®</sup> ใช้น้ำหนักชิ้นงาน 3.831 มก. ใช้อัตราความร้อนคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องถึง 450 องศาเซลเซียส การศึกษาโครงสร้างจุลภาค เริ่มจากนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วขัดเงาด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ หลังจากนั้นกัดผิวชิ้นงานด้วยสารละลายกรด ที่ประกอบด้วยกรดไนตริกร้อยละ 5 ผสมกับเอทานอลร้อยละ 95 โดยปริมาตร แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดและเป่าให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ผลิตโดยบริษัท Olympus รุ่น BX 60M

**2.2 การหล่อเหวี่ยงและการหดตัวของชิ้นงาน**

ในการทดลองใช้เครื่องหล่อเหวี่ยงรุ่น TRSME AUTOMAT ผลิตจากบริษัท Nicem<sup>®</sup>SpA ศึกษาอุณหภูมิหล่อ 420 440 460 และ 480 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบในการเหวี่ยง 200 300 400 500 และ 600 รอบต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ แม่พิมพ์ทำจากยางซิลิโคนทนความร้อนสูง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มม. หนา 15 มม. จำนวน 2 ชั้น แบ่งออกเป็นแม่พิมพ์ตัวล่างและตัวบนประกบกัน ชิ้นงานหล่อมี

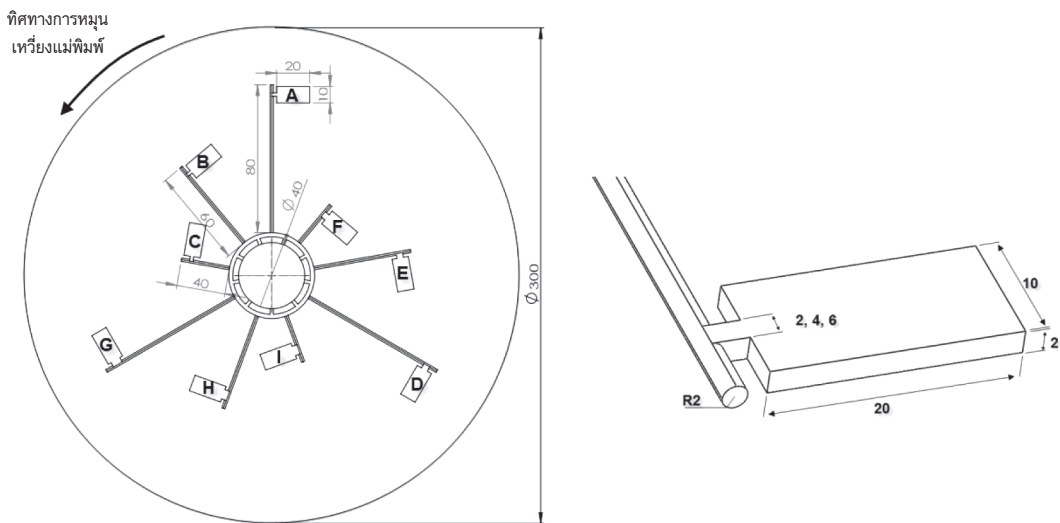
ขนาด 10 มม. x 20 มม. x 2 มม. ออกแบบให้มีความยาวทางวิ่งเป็น 40 60 และ 80 มม. ขนาดทางเข้าของน้ำโลหะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าความยาวคงที่ 20 มม. ความสูงคงที่ 2 มม. ความกว้างต่างกัน มีค่า 2, 4 และ 6 มม. ในที่นี้ใช้ตัวอักษรภาษาอังกฤษตั้งแต่ A ถึง I แทนตำแหน่งชิ้นงานและใช้สัญลักษณ์ RXXGY แทนชิ้นงานทดสอบที่มีความยาวทางวิ่ง (R) และขนาดทางเข้า (G) ที่แตกต่างกัน กำหนดให้ XX แทนตัวเลขที่ระบุถึงความยาว Y แทนตัวเลขที่ระบุถึงความกว้าง ดังแสดงในตารางที่ 1 ตำแหน่งและขนาดของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 1 ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรของชิ้นงาน (Volume shrinkage) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2 และค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงาน (Linear shrinkage) สามารถคำนวณจากสมการที่ 3

$$\text{ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร} = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100 \quad (2)$$

$V_0$  คือ ปริมาตรโพรงแบบ,  $V_1$  คือ ปริมาตรชิ้นงานหล่อ

$$\text{ร้อยละการหดตัวเชิงเส้น} = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 \quad (3)$$

$L_0$  คือ ความยาวโพรงแบบ,  $L_1$  คือ ความยาวชิ้นงานหล่อ



รูปที่ 1 ตำแหน่งและขนาดของชิ้นงานทดสอบ

**ตารางที่ 1** ความยาวทางวิ่งและขนาดทางเข้าของชิ้นงานตัวอย่าง A ถึง I

ชิ้นงาน	ความยาวทางวิ่ง (มม.)	ขนาดทางเข้า (มม. X มม.)	สัญลักษณ์
A	80	2 x 2	R80G2
B	60	2 x 2	R60G2
C	40	2 x 2	R40G2
D	80	4 x 2	R80G4
E	60	4 x 2	R60G4
F	40	4 x 2	R40G4
G	80	6 x 2	R80G6
H	60	6 x 2	R60G6
I	40	6 x 2	R40G6

### 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### 3.1 ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของอินกอตสังกะสีผสมที่ใช้ในการทดลองนี้ได้จากการวิเคราะห์ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยให้ผลแสดงในตารางที่ 2 พบว่ามีปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 4.0400 โดยน้ำหนัก มีปริมาณทองแดง

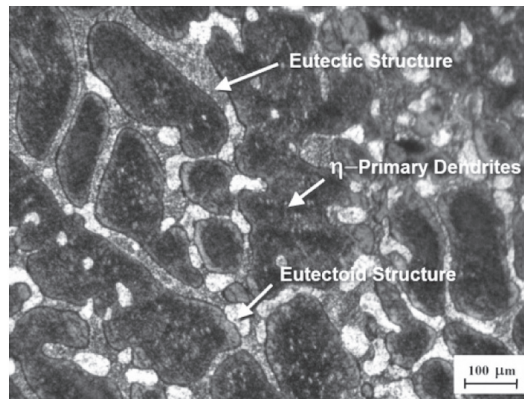
ร้อยละ 3.0900 โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียม 0.5300 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นยังพบ ตะกั่ว แคดเมียม เหล็ก และนิกเกิล ซึ่งมีปริมาณต่ำไม่เกินตามมาตรฐาน ASTM B952M-09 ปริมาณส่วนที่เหลือเป็นสังกะสี ตลอดจนการทดลองนี้จะเรียกส่วนผสมดังกล่าวนี้ว่า Zn-4.0Al-3.1Cu-0.5Mg

**ตารางที่ 2** ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของสังกะสีผสมที่ใช้ในการทดลอง

ธาตุ	ปริมาณเฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
อะลูมิเนียม	4.0400
ทองแดง	3.0900
แมกนีเซียม	0.5300
ตะกั่ว	0.0026
แคดเมียม	0.0003
เหล็ก	0.0021
นิกเกิล	0.0003
สังกะสี	ส่วนที่เหลือ

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอินกอต Zn-4.0Al-3.1Cu-0.5Mg แสดงดังรูปที่ 2 พบว่า โครงสร้างมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ของเฟสอีตาที่เกิดลำดับแรก ( $\eta$  Primary dendrites) ซึ่งมีสังกะสีเป็นส่วนผสมหลัก มีโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) และโครงสร้าง

ยูเทคตอยด์ (Eutectoid structure) ขนาดเล็กแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างเดนไดรต์ [7] เฟสที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับแผนภาพเฟสสมดุลของสังกะสี-อะลูมิเนียม และธาตุสังกะสี-ทองแดง [8]

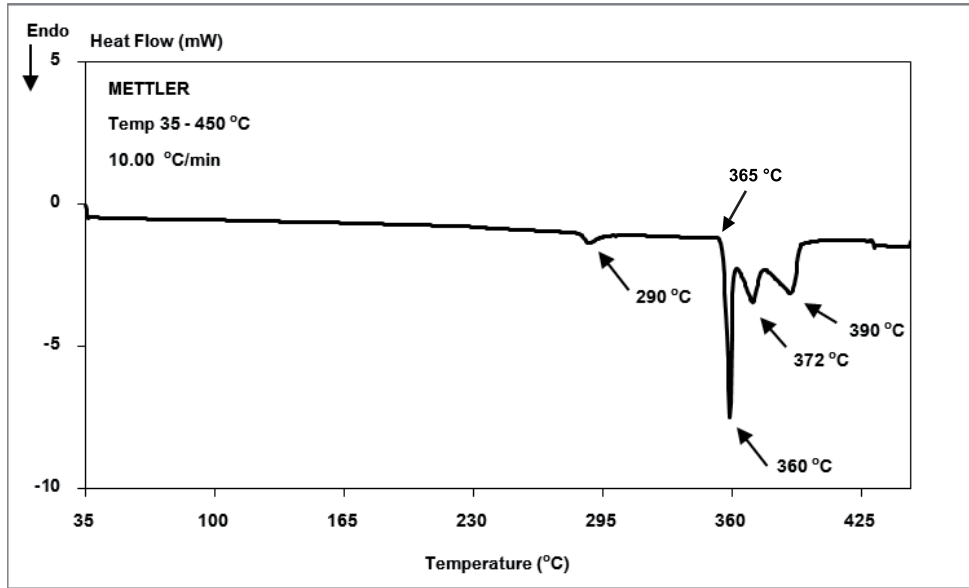


รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของอินกอต Zn-4.0Al-3.1Cu-0.5Mg

### 3.2 สมบัติทางความร้อน

ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ใช้อัตราการให้ความร้อนคงที่ 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที แสดงในรูปที่ 3 พบว่า พีค (Peak) เล็กที่อุณหภูมิประมาณ 290 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนจากการสลายตัวของโครงสร้างยูเทคตอยด์และพีคใหญ่ที่อุณหภูมิ 360 372 และ 390 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนจากการสลายตัวของเฟสอีตา ที่เป็นเดนไดรต์เฟสเอ็ฟซิลอน ( $\epsilon$  phase) ที่อยู่

ในรูปสารประกอบของ  $\text{CuZn}_4$  และโครงสร้างยูเทคติกตามลำดับ จุดเริ่มหลอมเหลว (Onset temperature) ของสังกะสีผสมนี้เริ่มที่ 356 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งศึกษาส่วนผสมของ Zn-3.8Al-2.9Cu-0.5Mg มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 339-388 องศาเซลเซียส [7] ดังนั้นในการทดลองจึงใช้อุณหภูมิหล่อตั้งแต่ 420 องศาเซลเซียสขึ้นไป

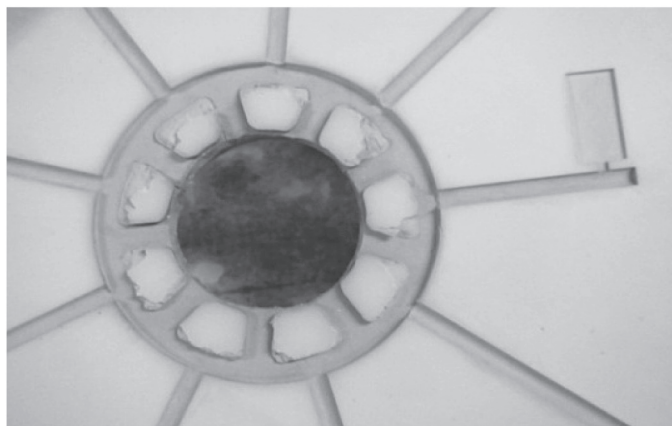


รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความร้อนและอุณหภูมิ

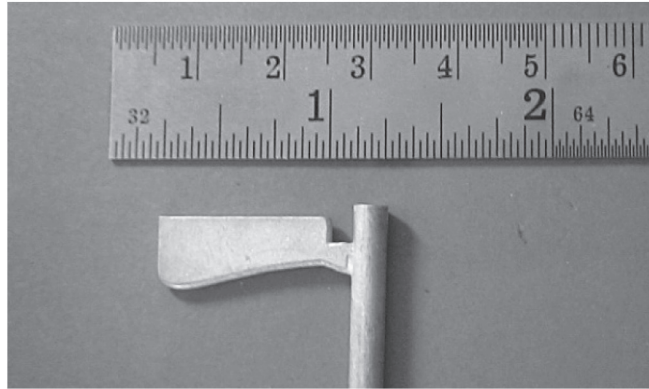
### 3.3 ผลการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรและการหดตัว

ในการทดลองได้หล่อชิ้นงานที่อุณหภูมิ 420 440 460 และ 480 องศาเซลเซียส พบปัญหาในการหล่อด้วยอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส แม่พิมพ์ยางซิลิโคนใหม่และมีการฉีกขาดจนหลุดออกมาอย่างเห็นได้ชัดที่บริเวณรูเท ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากแม่พิมพ์ไม่สามารถทนความร้อนได้สูงถึงอุณหภูมิดังกล่าว นอกจากนี้ในการทดลอง ใช้

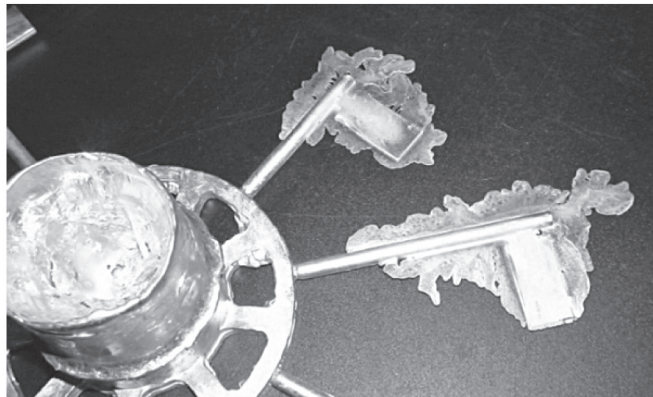
ความเร็วรอบในการเหวี่ยงที่ 200 300 400 และ 500 รอบต่อนาที พบปัญหาการใช้ความเร็วเหวี่ยง 200 รอบต่อนาที ไม่สามารถเหวี่ยงโลหะได้เต็มแบบ ดังแสดงในรูปที่ 5 ส่วนการใช้ความเร็วเหวี่ยง 600 รอบต่อนาที ส่งผลให้เกิดครีบ (Flash) ที่รอยประกบของแม่พิมพ์ (Parting Line) จำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 6 จากผลการทดลองนี้ จึงไม่ได้อภิปรายผลการหดตัวของชิ้นงานหล่อที่เกิดปัญหา ดังกล่าว



รูปที่ 4 แม่พิมพ์ยางเสียหายบริเวณรูเทที่อุณหภูมิหล่อ 480 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 ชิ้นงานหล่อไม่เต็มแบบที่ความเร็วรอบในการเหวี่ยง 200 รอบต่อนาที



รูปที่ 6 เกิดครีบบริเวณรอยประกบแม่พิมพ์ที่ความเร็วรอบในการเหวี่ยง 600 รอบต่อนาที

ผลการทดสอบการหดตัวของปริมาตรชิ้นงานที่ได้จากการหล่อด้วยพาราไมเตอร์อื่นๆ ที่ได้ชิ้นงานสมบูรณ์ 3 ครั้ง และได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2 เป็นค่าเฉลี่ยจากชิ้นงาน A ถึง I พบว่า ค่าการหดตัวที่มากที่สุดคือชิ้นงานตัวอย่าง E ที่อุณหภูมิหล่อ 460 องศาเซลเซียส

ที่ความเร็วรอบเหวี่ยง 300 รอบต่อนาที มีค่าการหดตัวร้อยละ  $9.38 \pm 0.66$  และค่าการหดตัวที่น้อยที่สุดคือชิ้นงานตัวอย่าง G ที่อุณหภูมิหล่อ 420 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบเหวี่ยง 500 รอบต่อนาที มีค่าการหดตัวร้อยละ  $3.92 \pm 0.56$

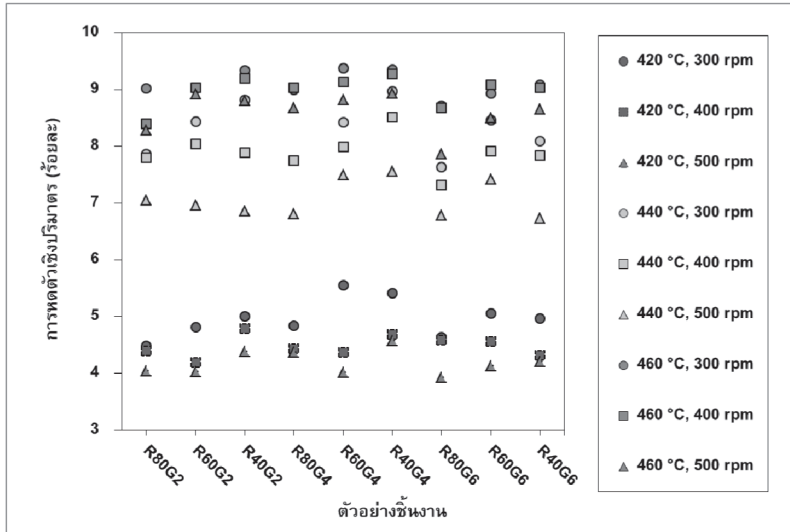


**ตารางที่ 3** ค่าการหดตัวเฉลี่ยร้อยละของชิ้นงานหล่อที่พารามิเตอร์ต่างๆ

ชิ้นงานตัวอย่าง	ร้อยละการหดตัว									
	พารามิเตอร์ที่ใช้หล่อ (อุณหภูมิ, ความเร็วรอบเพียง)									
	420 °C, 300 rpm	420 °C, 400 rpm	420 °C, 500 rpm	440 °C, 300 rpm	440 °C, 400 rpm	440 °C, 500 rpm	460 °C, 300 rpm	460 °C, 400 rpm	460 °C, 500 rpm	460 °C, 500 rpm
A	4.49 ± 0.48	4.40 ± 0.53	4.03 ± 0.34	7.86 ± 0.64	7.80 ± 0.97	7.05 ± 0.80	9.01 ± 0.67	8.39 ± 0.49	8.28 ± 0.73	
B	4.81 ± 0.61	4.19 ± 0.52	4.03 ± 0.39	8.43 ± 0.25	8.04 ± 0.47	6.96 ± 0.63	9.02 ± 0.15	9.03 ± 0.50	8.92 ± 0.50	
C	5.01 ± 0.66	4.78 ± 0.42	4.38 ± 0.57	8.81 ± 0.57	7.89 ± 0.26	6.86 ± 0.91	9.34 ± 0.43	9.20 ± 0.17	8.80 ± 0.23	
D	4.84 ± 0.60	4.44 ± 0.67	4.37 ± 0.35	7.75 ± 0.35	7.75 ± 0.75	6.81 ± 0.99	9.00 ± 0.24	9.04 ± 0.63	8.68 ± 0.65	
E	5.56 ± 0.67	4.36 ± 0.21	4.02 ± 0.27	8.42 ± 0.27	7.99 ± 0.32	7.50 ± 0.36	9.38 ± 0.66	9.14 ± 0.61	8.82 ± 0.45	
F	5.41 ± 0.28	4.69 ± 0.50	4.57 ± 0.55	8.97 ± 0.55	8.51 ± 0.41	7.56 ± 0.62	9.35 ± 0.80	9.27 ± 0.44	8.93 ± 0.54	
G	4.64 ± 0.21	4.58 ± 0.62	3.92 ± 0.56	7.63 ± 0.56	7.31 ± 0.51	6.79 ± 0.85	8.72 ± 0.64	8.68 ± 0.20	7.86 ± 0.48	
H	5.06 ± 0.60	4.56 ± 0.50	4.13 ± 0.30	8.46 ± 0.30	7.91 ± 0.75	7.41 ± 0.62	8.93 ± 0.24	9.08 ± 0.31	8.50 ± 0.40	
I	4.97 ± 0.69	4.32 ± 0.46	4.21 ± 0.36	8.09 ± 0.36	7.84 ± 0.59	6.73 ± 0.37	9.08 ± 0.35	9.03 ± 0.19	8.65 ± 0.25	

จากข้อมูลในตารางที่ 3 นำมาเขียนเป็นกราฟเพื่อช่วยให้เห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานตัวอย่าง A-I เทหล่อที่อุณหภูมิ 420 440 และ 460 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบในการเหวี่ยง 300 400 และ 500 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิหล่อสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการหดตัวเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นในทุก

ชิ้นงานตัวอย่าง ทั้งนี้ เนื่องจากในระหว่างการหลอมโลหะสังกะสีที่อุณหภูมิสูงขึ้น น้ำโลหะจะมีความหนาแน่นลดลง ส่งผลให้มีปริมาตรจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อนมีมากขึ้น เมื่อเทน้ำโลหะลงแบบระหว่างเกิดกระบวนการแข็งตัวของโลหะ อุณหภูมิโลหะลดลงจึงมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพิ่มมากขึ้นด้วย [9]

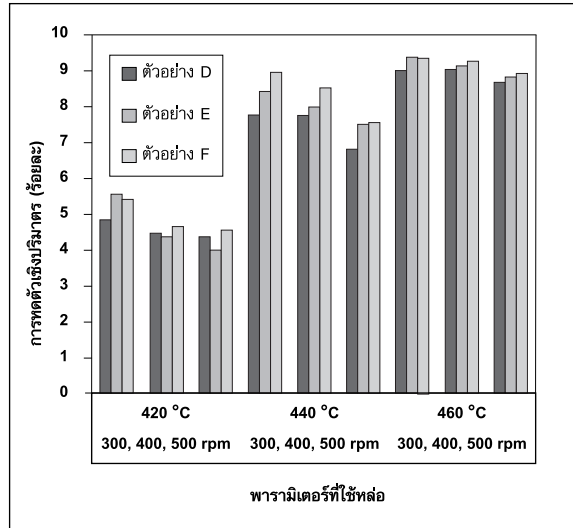


รูปที่ 7 ค่าการหดตัวของชิ้นงานตัวอย่าง ที่อุณหภูมิหล่อและความเร็วรอบในการเหวี่ยงต่างกัน

ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มความเร็วยรอบในการเหวี่ยงมีค่าการหดตัวเฉลี่ยลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1, 10] ได้ระบุไว้ว่าการเพิ่มความเร็วยรอบในการเหวี่ยง เป็นการเพิ่มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงและมีเวลาในการเติมเต็มแบบ (Filling time) สั้น การหดตัวจึงเกิดขึ้นได้น้อยลง

การพิจารณาอิทธิพลของความยาวทางวิ่งมีผลต่อการหดตัว พิจารณาจากค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานตัวอย่าง D E และ F ซึ่งมีความยาวทางวิ่ง 80 60 และ 40 มม. ตามลำดับ (จากตารางที่ 1) ใช้ความกว้างคงที่ 4 มม. ใช้อุณหภูมิหล่อ 420 440 และ 460 องศาเซลเซียส

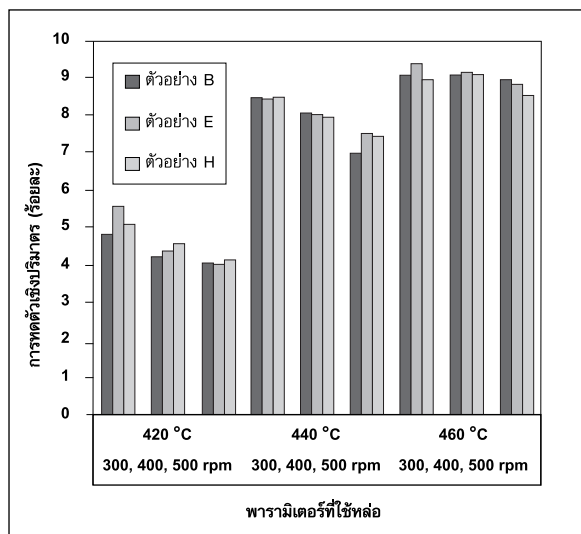
ใช้ความเร็วยรอบในการเหวี่ยง 300 400 และ 500 รอบต่อนาที แสดงในรูปที่ 8 พบว่า ชิ้นงานตัวอย่าง D มีความยาวทางวิ่ง 80 มม. มีค่าการหดตัวน้อยที่สุดในทุกอุณหภูมิหล่อเมื่อความยาวทางวิ่งน้ำโลหะลดลง ส่งผลให้ค่าร้อยละการหดตัวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากงานวิจัยที่ผ่านมา [6, 11] รายงานว่า โลหะที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำ จะส่งผลให้มีค่าการหดตัวมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองนี้ ชิ้นงานที่อยู่ใกล้รูเท มีความร้อนสะสมอยู่มากกว่าชิ้นงานที่อยู่ในระยะที่ไกลออกไป เนื่องจากการสูญเสียความร้อนของโลหะเหลวระหว่างเส้นทางการไหลที่น้อยกว่า ทำให้ชิ้นงานที่อยู่ใกล้รูเทนี้มีอัตราการเย็นตัวของโลหะช้าลง ส่งผลให้ค่าการหดตัวเฉลี่ยมากกว่าชิ้นงานตัวอย่าง E



**รูปที่ 8** ค่าการหัดตัวของชิ้นงาน D E และ F ที่ความยาวทางวิ่ง 80 60 และ 40 มม. ตามลำดับ ที่อุณหภูมิหล่อและความเร็วรอบในการเหวี่ยงต่างกัน

พิจารณานาอิทธิพลของทางเข้าที่มีผลต่อการหัดตัว พิจารณาจากค่าการหัดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานตัวอย่าง B E และ H ซึ่งมีขนาดทางเข้า 2 4 และ 6 มม. ตามลำดับ ใช้อุณหภูมิหล่อ 420 440 และ 460 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบในการเหวี่ยง 300, 400 และ 500 รอบ

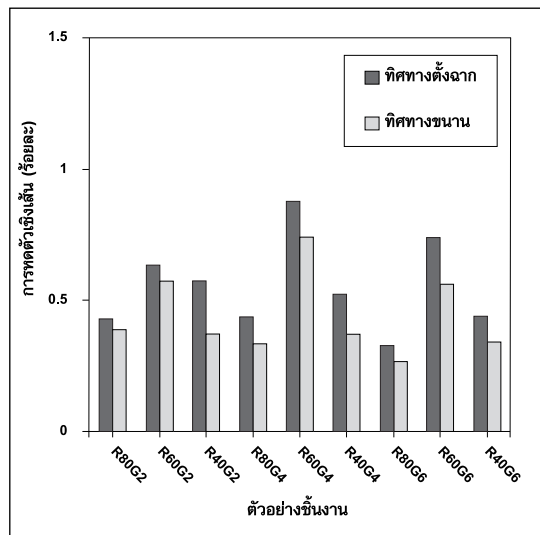
ตอนที่ แสดงในรูปที่ 9 พบว่า การใช้อุณหภูมิหล่อที่ 420 องศาเซลเซียส เมื่อขนาดทางเข้ากว้างขึ้นมีแนวโน้มทำให้ ค่าการหัดตัวเฉลี่ยลดลง แต่เมื่อใช้อุณหภูมิหล่อที่ 440 และ 460 องศาเซลเซียส ค่าการหัดตัวมีค่าใกล้เคียงกัน ทุกขนาดทางเข้า



**รูปที่ 9** ค่าการหัดตัวของชิ้นงาน B E และ H ที่ความกว้างของทางเข้า 2 4 และ 6 มม. ตามลำดับ ที่อุณหภูมิหล่อและความเร็วรอบในการเหวี่ยงต่างกัน

จากผลการหัดตัวเชิงปริมาตร เห็นได้ว่าการใช้ อุณหภูมิหล่อ 420 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบ ในการเหวี่ยง 500 รอบต่อนาที มีผลให้มีค่าการหัดตัว เชิงปริมาตรต่ำสุด จึงพิจารณาพารามิเตอร์ดังกล่าวที่มี ต่อการหัดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานตามทิศทางตั้งฉากกับ แรงเหวี่ยงเปรียบเทียบกับชิ้นงานตามทิศทางขนานกับแรง เหวี่ยงของชิ้นงาน A-I จากการคำนวณตามสมการที่ 3

พบว่าทุกชิ้นงานหลอมมีค่าการหัดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานใน ทิศทางตั้งฉากกับแรงเหวี่ยงมีค่ามากกว่าการหัดตัวของ ชิ้นงานทิศทางขนานกับแรงเหวี่ยง ดังแสดงในรูปที่ 10 ทั้งนี้ เนื่องจากการหมุนของแม่พิมพ์ส่งผลให้น้ำโลหะไหล เข้าแบบในทิศทางขนานกับแรงเหวี่ยงและถูกแรงจากการ เหวี่ยงอัดเข้าในขณะแข็งตัว ทำให้การหัดตัวลดลง



รูปที่ 10 ค่าการหัดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานตัวอย่าง ใช้อุณหภูมิหล่อ 420 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการเหวี่ยง 500 รอบต่อนาที

#### 4. สรุปผลการทดลอง

สังกะสีผสมที่ใช้ในการทดลองมีส่วนผสมของ Zn-4.0Al-3.1Cu-0.5 มีจุดเริ่มหลอมที่อุณหภูมิ 356 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของตัวแปรใน กระบวนการหล่อแบบหมุนเหวี่ยงที่มีผลต่อการหัดตัวของ ชิ้นงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การหล่อด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่า การหัดตัวเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การใช้ความเร็วรอบในการ เหวี่ยงที่สูงขึ้นมีผลให้การหัดตัวของชิ้นงานลดลง

2. การเพิ่มความยาวทางวิ่ง มีผลให้การหัดตัวของชิ้น งานลดลง ในขณะที่การเพิ่มขนาดทางเข้ามีผลให้ชิ้นงาน หัดตัวลดลง เมื่อใช้อุณหภูมิหล่อ 420 องศาเซลเซียส แต่ การเพิ่มขนาดทางเข้ามีผลต่อการหัดตัวที่ไม่แตกต่างกัน

เมื่อใช้อุณหภูมิหล่อ 440 และ 460 องศาเซลเซียส

3. การหัดตัวของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากกับแรง เหวี่ยงมีค่ามากกว่าการหัดตัวในทิศทางขนานกับแรงเหวี่ยง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์โครงการความร่วมมือในการ ผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สัญญาเลขที่ MN 01-53-40 บริษัทสยามแพชั่นจิวเวลรี่ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้และขอขอบคุณ ดร.สม- พงษ์ ศรีมันโเสวภาคย์ นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและ วัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ ความคิดเห็นในงานวิจัยนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Vergara, V.E. and Salazar, N.V., 1997, "Centrifugal Casting of a Copper Alloy Using Ceramic Moulds", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, pp. 765-769.
2. Schey, J.A., 1999, *Introduction to Manufacturing Processes*, McGraw-Hill, USA.
3. Degarmo, E.P, Black, J.T., and Kohser, R.A, 2003, *Materials and Processes in Manufacturing*, Wiley, USA.
4. Ogura, H., 1995, "Casting Shrinkage of Thin-Walled Castings", *Journal of Dentistry*, Vol. 23, pp. 239-244.
5. Okorafor, O.E., 1986, "Some Consideration of the Volume Shrinkage of Aluminium-silicon Alloy Casting Produced in Full Mould", *Transactions of the Japan Institute of Metals*, Vol. 27, pp. 463-468.
6. Korojy, B., Ekbomand, L., and Fredriksson, H., 2008, "On Solidification Shrinkage of Copper-Lead and Copper-Tin-Lead Alloys", *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 22, pp. 179-182.
7. Costa, E., Costa, C., Vecchia, F., Rick, C., Scherer, M., Santos, C., and Dedavid, B., 2009, "Study of the Influence of Copper and Magnesium Additions on the Microstructure Formation of Zn-Al Hypoeutectic Alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 488, pp. 89-99.
8. Zhu, Y.H., Man, H.C., and Lee, W.B., 1999, "Exothermic Reaction in Eutectoid Zn-Al Based Alloys", *Materials Science and Engineering*, A268, pp. 147-153.
9. Porter, F., 1991, *Zinc Handbook Properties Processing and Use in Design*, Marcel Dekker Inc., USA.
10. Vezzetti, E., 2008, "Spin Casting Characterization : An Experimental Approach for the Definition of Runners Design Guidelines", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, pp. 33-41.
11. Zhongjie, H. and Jordaan, G.D., 2005, "Investigation of the Cooling of Spin-Casting Moulds", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, pp. 1183-1194.

