รหัสบทความ SEITS 06

การออกแบบและพัฒนาเครื่องหล่อเหวี่ยงสำหรับการหล่อแบบขี้ผึ้งหาย

Centrifuge casting machine for lost wax casting

มารุต เขียวแก่[1*], พิชิตชัย บุตรน้อย[2], คณุตม์ จิณภัค[2],
สว่าง ฉันทวิทย์[3], สุวิมล เจียรธราวานิช[3], สุพัตรา กฤษวัฒนากรณ์[3]

[1] สาขาวิชาเทคโนโลยีโลหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
marut.k@mail.rmutk.ac.th
[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีโลหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
[3] สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและสร้างเครื่องหล่อเหวี่ยงสำหรับการหล่อแบบขี้ผึ้งหาย เพื่อใช้ในการหล่อชิ้นงานขนาดเล็กและมีรายละเอียด ตัวถังสามารถติดตั้งโพรงแบบหล่อขี้ผึ้งหายทรงกระบอกขนาด 88.9 มม. ยาว 120 มม. ได้ 2 ชิ้น ภายใต้ความเร็วรอบ 429 รอบต่อนาที หลังจากทดสอบประสิทธิภาพเครื่องหล่อเหวี่ยงโดยการหล่ออะลูมิเนียม แล้วทำการตรวจสอบลักษณะภายนอกของชิ้นงานที่ผ่านเครื่องหล่อเหวี่ยงกับชิ้นงานที่เทลงในโพรงแบบขี้ผึ้งหายตามปกติ พบว่าลักษณะชิ้นงานที่ได้จากเครื่องหล่อเหวี่ยงมีลักษณะภายนอกคมชัดสมบูรณ์ทุกชิ้น และผลการตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการทำงานของเครื่องหล่อเหวี่ยง โดยเปรียบเทียบน้ำหนักของชิ้นงาน พบว่าที่เวลา 30 วินาที ชิ้นงานมีน้ำหนักเฉลี่ย 7.12 กรัม ที่ 60 วินาที ชิ้นงานมีน้ำหนักเฉลี่ย 6.98 กรัม และที่เวลา 90 วินาที ชิ้นงานมีน้ำหนักเฉลี่ย 7.02 กรัม แสดงว่าเวลาที่ใช้นั้นเหมาะสมและให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ : การหล่อแบบเหวี่ยง การหล่อแบบขี้ผึ้งหาย การหล่อแบบประณีต

Abstract

The objective of this research was to design and develop a centrifuge casting machine for lost wax casting mold to cast small-size products with a lot of intricate features. The casting machine can run at a speed of 429 rpm and hold two lost wax cylinder molds that measure 88.9 mm in diameter and 120 mm in length. The result showed that all specimens from the centrifuged casting machine have a sharp and clean surface appearance when compared to pouring manually, and the result by varying time from 30, 60, and 90 seconds showed that average weight of specimens were 7.12 g, 6.98 g, and 7.02 g consecutively indicating that the factor was suitable.

Keywords : Centrifuge casting; lost-wax; investment casting

1. บทนำ (Introduction)

อุตสาหกรรมเครื่องประดับเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าทางการส่งออกสูง การหล่อแบบขี้ผึ้งหาย (Lost wax Casting) หรือการหล่อแบบประณีต (Investment Casting) เป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตที่นิยมใช้เป็นหลักในการผลิตเครื่องประดับจากโลหะ (นันทวัฒน์ และกรรณชัย, 2563) เนื่องจากจุดเด่นด้านความเหมาะสมในการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก รูปร่างซับซ้อน มีรายละเอียด ผิวเรียบ และมีความแม่นยำสูง จึงสอดคล้องกับภาพรวมของอุตสาหกรรมเครื่องประดับที่อาศัยความสามารถของช่าง ความละเอียดอ่อน และความประณีต (วรรณี, 2543) ขณะเดียวกันการหล่อแบบขี้ผึ้งหายก็เป็นกระบวนการผลิตที่สามารถประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมหลากหลายขนาด ตั้งแต่อุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (SME) ไปจนถึงวิสาหกิจชุมชน

การหล่อแบบขี้ผึ้งหาย เริ่มต้นจากการผลิตโพรงแบบด้วยการขึ้นรูปกระสวนเทียน จากนั้นหล่อปูนห่อหุ้มกระสวนเทียนเอาไว้ แล้วนำไปเผาเพื่อสำรอกเทียนออกมา ช่องว่างจากการสำรอกเทียนออกมา จะกลายเป็นโพรงแบบหล่อที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ จากนั้นเทน้ำโลหะลงไปในโพรงแบบหล่อ รอให้โลหะแข็งต่อจึงนำไปกระเทาะปูนที่ห่อหุ้มออกมา จนได้เป็นโลหะที่มีรูปร่างเหมือนที่ออกแบบกระสวนเทียน ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้ สามารถประยุกต์หรือปรับแต่งรายละเอียดแต่ละกระบวนการให้สอดคล้องกับขนาดอุตสาหกรรมได้

เพ็ญศรี (2554) ได้ทำการศึกษาวิจัยปัญหากระบวนการหล่อในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ พบตำหนิหรือข้อบกพร่องหลายชนิดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในการหล่อแบบขี้ผึ้งหาย เช่น รูพรุนจากการหดตัว รูพรุนตามดจากก๊าซ จุดแข็ง ฝ้าดำฝ้าแดง ก้านแตก หนึ่งในตำหนิที่เกิดขึ้นบ่อยคือ การหล่อไม่เต็มแบบ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการไหลตัวของน้ำโลหะ ขณะเดียวกันในชิ้นงานหล่อแบบขี้ผึ้งหายที่มีรายละเอียดผิวสูง เช่น พระกริ่ง พระพุทธรูปขนาดเล็ก หรือ แหวนที่มีลวดลาย การหล่อไม่เต็มแบบก็ส่งผลต่อรายละเอียดของผิวชิ้นงานที่ไม่ครบถ้วนสมบูรณ์ กลายเป็นตำหนิที่ต้องคัดทิ้งเช่นกัน

อีกกระบวนการที่นิยมใช้ในการหล่อคือการหล่อเหวี่ยงหรือการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge casting) เป็นกระบวนการที่อาศัยการหมุนเหวี่ยงของแบบหล่อที่ความเร็วสูง โดยโพรงแบบหล่อจะออกแบบให้อยู่ห่างจากแกนหมุน ทำให้เวลาน้ำโลหะถูกเทลงไปในโพรงแบบ แรงเหวี่ยงจะผลักดันน้ำโลหะให้กระจายและสัมผัสกับผนังแบบหล่อโดยทั่วถึง เป็นกระบวนการที่เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก (Groover, 2005) ขณะเดียวกันแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ยังส่งผลต่อความดันภายในชิ้นงานขณะที่โลหะเหลวกำลังจะแข็งตัว ทำให้ทิศทางการแข็งตัวของโลหะเป็นระเบียบจากผนังโพรงแบบมุ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางของแกนหมุน ช่วยให้การป้อนเติมน้ำโลหะดีขึ้น สามารถทำให้สิ่งมลทินต่าง ๆ แยกตัวออกจากเนื้อโลหะ และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางยังสามารถไล่ก๊าซไม่ให้ปนในน้ำโลหะอีกด้วย (เอกสิทธิ์, 2549) กระบวนการหล่อเหวี่ยง จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมและมีบทบาทต่อการผลิตในหลายอุตสาหกรรม เหมาะสมสำหรับ

งานหล่อชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและซับซ้อน สามารถผลิตได้จำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น รวมทั้งมีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก ใช้อุปกรณ์การผลิตน้อย (สิริพร และคณะ, 2554)

Vergara et al. (1997) ได้ทำการวิจัยการหล่อเหวี่ยงโลหะผสมทองแดงโดยใช้แม่พิมพ์เซรามิก แล้วพบว่าความหยาบผิวของชิ้นงานนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงเหวี่ยง เนื่องจากเกิดการกระแทกผนังแบบหล่ออย่างรุนแรง โดยแรงเหวี่ยงจะแปรผันตรงกับระยะห่างของแบบหล่อจากจุดศูนย์กลางและกำลังสองของความเร็วรอบ ดังสมการที่ 1

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

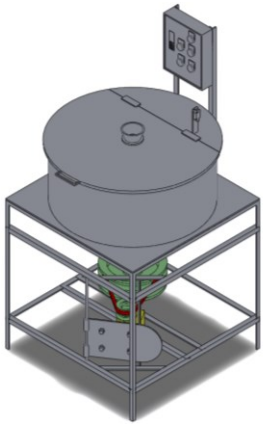
โดย F คือแรงเหวี่ยง N คือจำนวนครั้งที่เกิดการหมุนต่อวินาที และ R คือระยะห่างจากแกนหมุน ขณะเดียวกันความหยาบผิวของชิ้นงานจะสูงขึ้น หากอุณหภูมิที่ใช้ในการเทน้ำโลหะลดลง แสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหล่อเหวี่ยง

เนื่องจากในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ หรือผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเน้นรายละเอียดในปัจจุบัน ได้มีการประยุกต์การหล่อแบบขี้ผึ้งหาย กับการหล่อเหวี่ยงเข้าด้วยกัน เช่นเครื่องหล่อเหวี่ยงที่ใช้โพรงแบบหล่อที่ผ่านกระบวนการขี้ผึ้งหาย ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการพัฒนาเครื่องหล่อเหวี่ยงสำหรับการหล่อแบบขี้ผึ้งหายขึ้น เพื่อใช้เป็นเครื่องต้นแบบเพื่อนำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือวิสาหกิจชุมชนได้ หรือเป็นเครื่องต้นแบบในภาคศึกษา รวมถึงใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหล่อเหวี่ยงแบบหล่อขี้ผึ้งหายต่อไป

2. วิธีการวิจัย (Methodology)

2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องหล่อเหวี่ยง

เครื่องหล่อเหวี่ยงที่แสดงดังภาพที่ 1 ประกอบด้วยส่วนตัวถังที่ทำจากเหล็กกล้า ss400 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 620 มม. หนา 20 มม. สูง 260 มม. ฝาหนา 12 มม. มีรูเทขนาด 48 มม.



ภาพที่ 1 เครื่องหล่อเหวี่ยงสำหรับการหล่อแบบขี้ผึ้งหาย

ฐานเหวี่ยงชิ้นงานทำจากแผ่นเหล็ก หนา 10 มม. ตัดเป็นวงกลมขนาด 440 มม. กลึงด้านล่างฐานเป็นที่เสียบเพลาและติดตั้งอุปกรณ์จับยึดโพรงแบบหล่อและท่อสามทางเข้ากับฐานเหวี่ยง ทำให้สามารถหล่อโพรงแบบได้สองโพรงในเวลาเดียวกัน

ส่วนล่างของเครื่องจะประกอบด้วยเพลาที่ประกอบกับมูเล่ย์ (Pulley) ชนิด 2 ร่อง ขนาด 10 นิ้ว และมอเตอร์ที่ประกอบเข้ากับมูเล่ย์ขนาด 3 นิ้ว ความเร็วรอบ 1,430 RPM ซึ่งสามารถคำนวณเพื่อหาความเร็วรอบของเพลาขับเครื่องหล่อเหวี่ยงได้ตามสมการที่ (2)

$$D_1 \times N_1 = D_2 \times N_2 \qquad (2)$$

โดย D_1 และ D_2 คือขนาดของมูเล่ย์ที่ติดกับเพลาและมอเตอร์ตามลำดับ ส่วน N_1 และ N_2 คือความเร็วรอบของเพลาและมอเตอร์ตามลำดับเช่นกัน จากการคำนวณทำให้ได้ค่าความเร็วรอบของเครื่องหล่อเหวี่ยงเป็น 429 RPM

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่อง

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องหล่อเหวี่ยงจะทำการทดสอบสองด้าน ประกอบด้วย การทดสอบความสามารถของเครื่องหล่อเหวี่ยงในการใช้งานหล่อแบบหล่อขี้ผึ้งหาย โดยเทียบลักษณะภายนอกของชิ้นงานที่หล่อผ่านเครื่องกับชิ้นงานที่หล่อด้วยการเทปกติ และการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่เวลาในการหล่อเหวี่ยงต่าง ๆ กัน เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเครื่อง

โดยแบบหล่อขี้ผึ้งหายนั้น เตรียมการโดยการขึ้นรูปด้วยการหล่อเทียนบนแม่พิมพ์เรซิน เพื่อให้ได้เทียนรูปร่างเป็นพระเครื่อง จากนั้นทำการต่อเทียนเข้ากับแท่งเทียนที่จะใช้เป็นทางเดินน้ำโลหะ จนได้ช่อเทียนที่มีชิ้นงานช่อละ 6 ชิ้น ดังภาพที่ 2 ใส่ลงไปในท่อขนาด 88.9 มม. หรือ 3.5 นิ้ว ยาว 120 มม. เทปูนลงไปแล้วรอจนปูนแห้ง จากนั้นนำท่อไปเข้าเตาเพื่อสำรอกเทียนออกมา

ภาพที่ 2 ช่อเทียนที่ใช้สำหรับทำแบบหล่อขี้ผึ้งหาย

จากนั้นนำท่อที่มีโพรงแบบหล่อขี้ผึ้งหายจำนวน 2 อันมาติดตั้งกับเครื่องหล่อเหวี่ยง แล้วทำการเทน้ำโลหะขณะเครื่องกำลังทำงาน จากนั้นจับเวลา 60 วินาทีแล้วปิดเครื่อง และเตรียมท่ออีก 2 อัน เพื่อเทตามปกติ โดยน้ำโลหะที่ใช้จะเป็นอะลูมิเนียมสภาวะหลอมเหลวที่อุณหภูมิเตาหลอม 800°C หลังจากแกะชิ้นงานอะลูมิเนียมออกมาจากปูนและทำความสะอาดแล้ว ให้ทำการตรวจสอบสภาพผิวชิ้นงานที่ได้ว่ามีความสมบูรณ์กี่ชิ้น โดยชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์จะสังเกตจากรูปร่างชัดเจน เห็นรายละเอียดของชิ้นงาน ดังภาพที่ 3 (A) ส่วนชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์จะเป็นดังภาพที่ 3 (B)

ภาพที่ 3 (A) แสดงชิ้นงานที่มีลักษณะสมบูรณ์
(B) ชิ้นงานที่มีลักษณะไม่สมบูรณ์

จากนั้นทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบชิ้นงานภายใต้เวลาในการหล่อเหวี่ยงที่แตกต่างกัน ได้แก่ 30, 60 และ 90 วินาที โดยเตรียมโพรงแบบหล่อจำนวน 3 ท่อ ท่อละ 6 ชิ้น แล้วนำไปเทน้ำอะลูมิเนียมผ่านเครื่องหล่อเหวี่ยง จากนั้นเปรียบเทียบสภาพภายนอก และน้ำหนักเฉลี่ยของชิ้นงาน เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมกับการใช้งานเครื่องหล่อเหวี่ยง

3. ผลการวิจัย (Results)

จากการสร้างเครื่องหล่อเหวี่ยงตามที่ได้ออกแบบไว้ และทำการทดสอบประสิทธิภาพทั้งสองด้าน ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับการหล่อแบบปกติ

สำหรับการทดสอบสภาพผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมจากการหล่อเหวี่ยงแบบหล่อขี้ผึ้งหาย เปรียบเทียบกับการเทเพื่อหล่อแบบปกติ โดยการนับจำนวนชิ้นงานที่มีลักษณะสมบูรณ์ ผลเป็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนชิ้นงานที่มีลักษณะสมบูรณ์จากการหล่อแต่ละแบบ

วิธีการหล่อ	จำนวนชิ้นงานที่มีลักษณะสมบูรณ์ (ชิ้น)	จำนวนชิ้นงานที่มีลักษณะไม่สมบูรณ์ (ชิ้น)
เครื่องหล่อเหวี่ยง	12	0
แบบปกติ	0	12

จากผลการทดสอบ แสดงว่าเครื่องหล่อเหวี่ยงสามารถหล่อชิ้นงานแบบหล่อขี้ผึ้งหายให้มีลักษณะสมบูรณ์ได้ทั้ง 12 ชิ้น

3.2 ผลการทดสอบเวลาในการหล่อเหวี่ยง

เป็นการหล่อชิ้นงานด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยง โดยปรับตัวแปรเวลาในการหล่อเหวี่ยง 30, 60 และ 90 วินาที ตัวแปรละ 6 ชิ้นงาน แล้วนำตรวจสอบลักษณะภายนอก และน้ำหนัก โดยผลของลักษณะภายนอก วัดจากจำนวนชิ้นงานที่มีลักษณะสมบูรณ์ เป็นไปดังภาพที่ 4 และตารางที่ 2

ภาพที่ 4 แสดงลักษณะสมบูรณ์ของชิ้นงาน
ที่ผ่านการหล่อที่เวลาแตกต่างกัน
(A) 30 วินาที (B) 60 วินาที (C) 90 วินาที

ตารางที่ 2 แสดงจำนวนชิ้นงานที่มีลักษณะสมบูรณ์จากการหล่อภายใต้เงื่อนไขเวลาการเหวี่ยงที่แตกต่างกัน

เวลาที่ใช้ (วินาที)	30	60	90
จำนวนชิ้นงานที่มีลักษณะสมบูรณ์ (ชิ้น)	6	6	6
จำนวนชิ้นงานที่มีลักษณะไม่สมบูรณ์ (ชิ้น)	0	0	0

สำหรับผลการทดสอบของน้ำหนักชิ้นงานที่ได้จากการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทั้ง 6 ชิ้นในแต่ละตัวแปรแล้วหาค่าเฉลี่ย แสดงผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงน้ำหนักเฉลี่ยของชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขเวลาการเหวี่ยงที่แตกต่างกัน

เวลาที่ใช้ (วินาที)	30	60	90
น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)	7.12	6.98	7.02

4. การอภิปราย (Discussion)

เมื่อวิเคราะห์ผลการออกแบบ พัฒนาเครื่องหล่อเหวี่ยงสำหรับการหล่อแบบขี้ผึ้งหาย และการทดสอบประสิทธิภาพด้วยการเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบปกติ และเปรียบเทียบภายใต้เวลาการเหวี่ยงที่แตกต่างกัน โดยชิ้นงานที่ผ่านเครื่องหล่อเหวี่ยงจะมีลักษณะของผิวชิ้นงานที่สมบูรณ์ 12 ชิ้น จากทั้งหมด 12 ชิ้น หรือคิดเป็น 100% ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเทปกตินั้นไม่มีชิ้นงานใดมีลักษณะสมบูรณ์เลย หรือคิดเป็น 0% แสดงว่าเครื่องหล่อเหวี่ยงที่ออกแบบและพัฒนานั้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อแบบขี้ผึ้งหายได้จริง ขณะเดียวกันจากภาพที่ 4 ชิ้นงานก็ยังคงรักษาความเรียบผิวเอาไว้ได้ สอดคล้องผลการวิจัยของ Vergara et al. (1997) ที่ได้ระบุว่าความหยาบผิวของชิ้นงานนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงเหวี่ยง เนื่องจากเกิดการกระแทกผนังแบบหล่ออย่างรุนแรง โดยแรงเหวี่ยงจะสัมพันธ์กับความเร็วรอบ แสดงว่าความเร็วที่ใช้ในการเหวี่ยงนั้นมีความเหมาะสม เนื่องจากยังไม่มากเกินไปที่จะทำให้น้ำโลหะเกิดการกระแทกผนังแบบหล่ออย่างรุนแรงได้

และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการหล่อภายใต้เวลาในการเหวี่ยงที่แตกต่างกัน พบว่าผิวชิ้นงานมีลักษณะสมบูรณ์คล้ายคลึงกัน โดยจำนวนชิ้นงานที่มีลักษณะสมบูรณ์ในแต่ละตัวแปรเวลา มีจำนวน 6 ชิ้นจาก 6 ชิ้น คิดเป็น 100% เท่ากัน ในส่วนน้ำหนักของชิ้นงาน พบว่าที่เวลา 30, 60 และ 90 วินาที ชิ้นงานมีน้ำหนักเฉลี่ย 7.12 กรัม, 6.98 กรัม และ 7.02 กรัมตามลำดับ แสดงว่าเวลาที่ใช้นั้นเหมาะสม และให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

5. สรุปผล (Conclusion)

การออกแบบและพัฒนาเครื่องหล่อเหวี่ยงสำหรับการหล่อแบบขี้ผึ้งหาย สามารถสร้างเครื่องหล่อเหวี่ยงขึ้นมาได้จริง โดยสรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพได้ดังนี้

5.1 เครื่องหล่อเหวี่ยงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อแบบขี้ผึ้งหายได้จริง

5.2 เครื่องสามารถทำงานภายใต้ความเร็วรอบ 429 รอบต่อนาทีได้โดยไม่ส่งผลต่อผิวชิ้นงาน

5.3 เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการหล่อภายใต้เวลาในการเหวี่ยง 30, 60 และ 90 วินาที พบว่าผิวชิ้นงานมีลักษณะสมบูรณ์คล้ายคลึงกัน และมีน้ำหนักเฉลี่ยใกล้เคียงกัน แสดงว่าเวลาที่ใช้นั้นเหมาะสม และให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ หน่วยงานต้นสังกัด ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยเป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] นันทวัฒน์ อภิกมลกุล และกรรณชัย กัลยาศิริ. (2563). การลดรูพรุนในเงินสีชมพูที่หล่อด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต: กรณีศึกษาของบริษัทผลิตเครื่องประดับแห่งหนึ่ง. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 16(3), 80-89

[2] เพ็ญศรี ทองนพคุณ. (2554). การวิจัยเพื่อพัฒนากระบวนการหล่อในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

[3] วรรณี มิ่งวานิช. (2546). กลยุทธ์การเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ. กรมส่งเสริมการส่งออก กระทรวงพาณิชย์.

[4] สิริพร โรจนนันต์, อภิรัฐ โกสิตานนท์, และสุรศิษฐ์ โรจนนันต์. (2554). อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการหล่อแบบหมุนเหวี่ยงที่มีผลต่อการหดตัวของสังกะสีผสม. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ, 3, 217-229.

[5] เอกสิทธิ์ นิสารัตนาพร. (2549). เทคนิคการหล่อเครื่องประดับ. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

[6] Groover, M. P. (2005). Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems (3rd ed.). John Wiley and Sons (WIE).

[7] Vergara, V.E., & Salazar, N.V. (1997). Centrifuged casting of a copper alloy using ceramic moulds. Journal of Materials Processing Technology, 63(1-3), 765-769. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02720-3.