

การวิเคราะห์จุดเสียในการหล่อทองเหลืองวิธีขึ้นฝ้ายแบบโบราณโดยการหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด กรณีศึกษาการหล่อทองเหลืองบ้านปะอาว

Casting Defects of the Brass Casting by Ancient Close Mold-Lost Wax Casting Process: Cast Study Baan-Pa-Ao

ธน ทองกลม จรรยาพร แสนทวีสุข* คมสันต์ ภูเต้านิล และพงประเสริฐ ศรีเนตร

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

*E-mail: charuayporn@gmail.com

บทคัดย่อ

งานหัตถกรรมหล่อทองเหลืองบ้านปะอาว จังหวัดอุบลราชธานี เป็นงานหัตถกรรมเชิงอนุรักษ์ซึ่งมีลวดลาย ประติมากรรมและกรรมวิธีการผลิตแบบโบราณ ซึ่งควรค่าแก่การอนุรักษ์ภูมิปัญญาท้องถิ่นไว้ให้บรรพชนรุ่นหลังได้สืบสาน ในปัจจุบัน เทคโนโลยีมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง องค์ความรู้ใหม่ๆเกิดขึ้นตลอดเวลา หากเราสามารถบูรณาการองค์ความรู้ ใหม่มาช่วยพัฒนากระบวนการผลิตแบบโบราณ จะสามารถลดต้นทุนการผลิตและลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิต เพื่อให้งานหัตถกรรมการทำทองเหลืองที่ล้ำค่าแห่งนี้อยู่คงอยู่และแข่งขันในตลาดได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำองค์ความรู้ ทางวิศวกรรมศาสตร์และคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและการสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรม (Computer Aided Design and Computer Aided Engineering) มาใช้การวิเคราะห์ระบบการป้อนจ่ายน้ำโลหะ (Gating systems) ที่เกิดจากภูมิปัญญาของคนท้องถิ่น เพื่อหาแนวทางพัฒนาระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะให้เหมาะสมกับขนาดชิ้นงาน และ วิเคราะห์การกระจายตัวทางความร้อนของน้ำโลหะขณะเย็นตัวและทำนายบริเวณที่อาจเกิดจุดเสียขณะเย็นตัวและ หลังเย็นตัวของน้ำโลหะได้ เพื่อหาแนวทางแก้ไขจุดเสีย และทำการทดลองเทหล่อทองเหลืองด้วยวิธีหล่อแบบขึ้นฝ้าย แบบโบราณโดยการหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด จากการศึกษาพบว่าการไหลของน้ำโลหะของชิ้นงานระฆังขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรทั้งแบบ 1 ทางเข้า และ 2 ทางเข้ามีความต่อเนื่อง สม่ำเสมอ และใช้เวลาในการเติมเต็ม ชิ้นงานสั้น เมื่อแข็งตัวพบจุดเสียแบบโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) เล็กน้อย เมื่อพิจารณาการไหลของน้ำโลหะ ของชิ้นงานระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรพบว่าชิ้นงานที่มี 2 ทางเข้ามีโอกาสเกิดจุดเสียจากน้ำโลหะแข็งตัว ก่อนเต็มแบบ เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองพฤติกรรมไหลกับการทดลองหล่อจริงพบว่าได้ผลที่สอดคล้องกัน ทำให้ทราบถึงสาเหตุของจุดเสียที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน นำไปสู่การพัฒนากระบวนการหล่อเพื่อแก้ไขจุดเสียในลำดับต่อไป

คำสำคัญ : งานหัตถกรรมการหล่อทองเหลืองบ้านปะอาว กรรมวิธีการหล่อขึ้นฝ้ายแบบโบราณ คอมพิวเตอร์ช่วยในการ ออกแบบและคอมพิวเตอร์ช่วยในการสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรม

Abstract

Baan-pa-ao brass casting handcrafts produced in Ubonratchathani is a conservative handmade product with an elaborate design reflecting the folk wisdom handed down from their ancestors. The prominent feature of Baan Pa-ao brassware is the lost wax method that has existed since prehistoric times. Knowledge has been passed down from one generation to another, through observation and by memory. Because of the rather complicated production process, casting defects on the brassware products can be generally found. If the new technology can be applied to create the products with better quality, the defects and the production costs would minimize and it would be benefit to the village. Consequently,

craftsmen can carry on this cultural heritage passing down to the new generations. In this study, the computer aided design and computer aided engineering software were used to simulate the effects of gating design system on the product quality of various specimen dimensions. Brass was cast with the close mold-lost wax casting process to verify the simulation results. The appropriate quantities of brass to be cast in the close mold processes were determined using the engineering equation. Temperature profile contours during solidification were also analyzed in order to predict the possible region in which the casting defects can occur. The experimental results reveal that metal fluid flow in the specimen with the average diameter of 5 cm has laminar and continuous flow pattern with a short filling time for both one inlet and two inlet systems. The shrinkage porosity has been rarely observed in the completely solidified specimens with the average diameter of 5 cm. The misrun has been often found in the specimen with the diameter of 10 cm and has 2 inlet systems. In addition, it was found that the simulation results are in good agreement with the experimental results. Finally, all study results were discussed and then concluded in order to improve the current processes of ancient brass casting at Baan-pa-ao.

Keywords: Baan-pa-ao, Ancient lost wax casting process, Computer Aided Design and Computer Aided Engineering

บทนำ

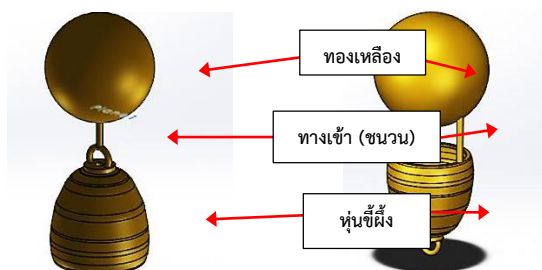
งานหัตถกรรมหล่อทองเหลืองบ้านปะอาว จังหวัดอุบลราชธานี เป็นงานหัตถกรรมเชิงอนุรักษ์ซึ่งมีลวดลายประติมากรรมและกรรมวิธีการผลิตแบบโบราณ สืบสานจากรุ่นสู่รุ่นเป็นระยะเวลามากกว่า 200 กว่าปี กรรมวิธีการหล่อแบบซี้ผึ้งหาย (Lost wax casting process) แบบโบราณที่ใช้ในการหล่อทองเหลืองของบ้านปะอาว เป็นกรรมวิธีที่ทำสืบต่อกันมาจากรบรรพบุรุษหลายชั่วอายุคน ซึ่งเป็นกลุ่มหัตถกรรมกลุ่มสุดท้ายในประเทศไทยที่ยังคงรักษาวิธีการผลิตแบบโบราณนี้ไว้ [1]

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง องค์ความรู้ใหม่ๆเกิดขึ้นตลอดเวลา หากเราสามารถบูรณาการองค์ความรู้ใหม่มาช่วยพัฒนากระบวนการผลิตแบบโบราณ จะสามารถลดต้นทุนการผลิตและลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิต เพื่อให้งานหัตถกรรมการทำทองเหลืองที่ล้ำค่าแห่งนี้นี้ยังคงอยู่และแข่งขันในตลาดได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำองค์ความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์และคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและการสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรม (Computer Aided Design and Computer Aided Engineering) มาใช้การวิเคราะห์ระบบการป้อนจ่ายน้ำโลหะ (Gating systems) ที่เกิดจากภูมิปัญญาของคนท้องถิ่น เพื่อหาแนวทางพัฒนาระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะให้เหมาะสมกับขนาดชิ้นงาน และวิเคราะห์การกระจายตัวทางความร้อนของน้ำโลหะขณะเย็นตัว และทำนายบริเวณที่อาจจะเกิดจุดเสียขณะเย็นตัวและหลังเย็นตัวของน้ำโลหะได้ เพื่อหาแนวทางแก้ไขจุดเสีย โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษากระบวนการผลิตระฆังในแม่พิมพ์แบบปิด (Close mold) หรือเรียกว่าเข้าหุบ เนื่องจากระฆังเป็นผลิตภัณฑ์หลักของกลุ่มหัตถกรรมทองเหลืองบ้านปะอาวที่มีการผลิตอยู่เป็นประจำเพื่อนำมาใช้งานจริง เช่น ใช้แขวนตามชายคาโบสถ์ ชายคาบ้านเรือน แขนงคอวัวควาย ทำพวงกุญแจ เป็นต้น และผลิตเพื่อเป็นของที่ระลึกสำหรับนักท่องเที่ยว

ในกระบวนการผลิตโดยใช้แม่พิมพ์แบบปิดนั้น โลหะจะถูกหุ้มไว้ภายในแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 ปริมาณของโลหะที่ใช้ต้องเหมาะสม ถ้าใช้ปริมาณน้อยเกินไป ชิ้นงานหล่อที่ได้จะไม่เต็มแบบหล่อ แต่หากใช้ปริมาณมากเกินไป ก็จะทำให้ส่วนหางวิ่งน้ำโลหะที่ต้องตัดทิ้งมากและสูญเสียพลังงานในการหลอมมาก ดังนั้น การคำนวณหาปริมาณของทองเหลืองที่เหมาะสมในการหล่อในแม่พิมพ์แบบปิดจะช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อีกทางหนึ่ง



(ก) ลักษณะภายนอกของแม่พิมพ์แบบปิดหรือเข้าหุบ



(ข) แบบจำลองลักษณะภายในของแม่พิมพ์แบบปิดหรือเข้าหุบ แสดงหุ่นซีผึ้ง ทางเข้า(หรือชาวบ้านบ้านปะอาวเรียกว่า ขนวน) และเศษโลหะบรรจุอยู่ในเบ้าดิน

รูปที่ 1 แสดงลักษณะแม่พิมพ์แบบปิด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการหล่อทองเหลืองด้วยวิธีซีผึ้งหายแบบโบราณ โดยการเทหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด
2. เพื่อศึกษาระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะที่เกิดจากภูมิปัญญาของคนท้องถิ่น
3. เพื่อหาแนวทางพัฒนาระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะให้เหมาะสมกับขนาดชิ้นงาน
4. เพื่อหาแนวทางแก้ไขจุดเสียที่เกิดจากการกระจายตัวทางความร้อนที่ไม่เหมาะสมของชิ้นงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

แผนการดำเนินงานวิจัยประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ การหล่อทองเหลืองโดยวิธีซีผึ้งหายแบบโบราณด้วยการเทหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด และการจำลองกระบวนการหล่อโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในขั้นตอนการศึกษารวบรวมวิธีการหล่อโลหะโดยวิธีซีผึ้งหายแบบโบราณ ประกอบด้วยวัตถุดิบและอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2



(ก) ดินโพนหรือดินจอมปลวก ใช้สำหรับผสมมูลวัว เพื่อปั้นเป็นหุ่นต้นแบบ



(ข) มูลวัว (ซีวัว) ใช้สำหรับผสมกับดินโพน ปั้นเป็นแม่พิมพ์ ทำให้ดินเกาะตัวแน่นและเพิ่มความโปร่งของเนื้อดิน



(ค) เทียน เป็นส่วนผสมของขี้ผึ้ง



(ง) ชันโรง เป็นส่วนผสมของขี้ผึ้ง



(จ) ขี้สูด เป็นส่วนผสมของขี้ผึ้ง



(ฉ) ขี้ผึ้ง ที่ได้จากการผสมเทียน ชันโรง และขี้สูดให้เข้ากัน



(ช) โส้งเขียน (เครื่องกลึงโบราณ)



(ซ) แกลบใช้สำหรับผสมกับดินโพลนและมูลวัวป็นแม่พิมพ์หล่อ



(ฌ) บั้งเตี้ยก ใช้เพื่อฉีดขี้ผึ้งเหลวให้ออกมาเป็นเส้น



(ญ) แม่พิมพ์ลาย



(ฎ) ทองเหลือง



(ฏ) เตาเผา

รูปที่ 2 วัตถุดิบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการหล่อทองเหลืองแบบโบราณ

ขั้นตอนการทำงานหล่อทองเหลือง จะเริ่มจากการเตรียมดิน โดยนำดินโพลนมาทำให้ละเอียดผสมกับมูลวัว และน้ำ ในอัตราส่วน 3 : 1 : 0.25 คลุกเคล้าจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำดินที่ตำเสร็จแล้วมาปั้นเป็นหุ่นให้มีรูปร่างลักษณะเป็นระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ แล้วตากหุ่นต้นแบบให้แห้งก่อนจะพันรอบหุ่นต้นแบบด้วยขี้ผึ้ง ซึ่งขี้ผึ้งที่ใช้ประกอบด้วย เทียน ชันโรง และขี้สูด ผสมกันในอัตราส่วน 3:1:1 เพื่อให้ขี้ผึ้งเหนียว ไม่เปราะ สามารถปั้นขึ้นรูปและกลึงแต่งได้ง่าย หลังจากนั้นทำการกลึงขี้ผึ้งโดยใช้โส้งเขียน (เครื่องกลึงแบบโบราณ) เพื่อให้ผิวของขี้ผึ้งเรียบและมีความหนาสม่ำเสมอ และทำการพิมพ์ลายโดยใช้แม่พิมพ์ลายกดลงบนผิวขี้ผึ้ง เมื่อได้หุ่นขี้ผึ้งที่ทำลวดลายเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการติดหุ้กระฆังและการต่อสายขนวน (ทางเข้า) การต่อสายขนวนเป็นการสร้างทางให้น้ำโลหะไหลไปยังชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตำแหน่งและจำนวนของทางเข้าสำหรับชิ้นงานระฆัง โดยชิ้นงานระฆังแต่ละขนาดจะประกอบไปด้วย 1 ทางเข้าติดตั้งไว้ตรงตำแหน่งหุ้กระฆัง และ 2 ทางเข้าติดตั้งไว้ตรงปลายฐานระฆัง ดังแสดงในรูปที่ 3 การสร้างทางเข้ามีจุดประสงค์เพื่อ เป็นทางให้น้ำโลหะไหลได้สะดวกทั่วถึงกันตลอดชิ้นงาน ทำให้ได้งานหล่อที่สมบูรณ์ไม่มีรูพรุน และทำให้ชิ้นงานไม่เสียหายเนื่องจากการไหลของน้ำโลหะเข้าไม่เต็มแบบ หลังจากต่อทางเข้าแล้วก็ทำการพอกหุ้มหุ่นขี้ผึ้งโดยใช้ดินโพลนที่ผสมกับมูลวัว, แกลบ และน้ำโอบรอบหุ่น และนำไปตากแดดให้แห้งประมาณ 3-4 วัน (เข้าดินที่บรรจุ

หุ่นขี้ผึ้งไว้ภายใน เรียกว่า เบ้ายึด) นำดินเหนียวผสมกลบมาหุ้มรอบทองเหลือง ซึ่งส่วนนี้จะเรียกว่า เบ้าหุบ หลังจากนั้นนำเบ้าหุบมาติดตั้งบริเวณปากของเบ้ายึด แล้วนำดินเหนียวผสมกลบหุ้มพอกทั้งเบ้าหุบและเบ้ายึดให้ติดกันเป็นเบ้าหรือแม่พิมพ์เดียวกัน แล้วนำไปฝังแดด 1 วัน เพื่อให้แม่พิมพ์แห้งสนิท ก่อนที่จะนำแม่พิมพ์ไปเผาไฟเป็นเวลา 90 นาที โดยให้ส่วนของเบ้าหุบอยู่ตำแหน่งล่าง และเบ้ายึดอยู่ตำแหน่งบน ความร้อนภายในเบ้าจะทำให้ขี้ผึ้งในเบ้ายึดละลาย และระเหยออกไปตามช่องว่างของดินและเกิดเป็นโพรงแบบรูประฆัง และในขณะเดียวกันทองเหลืองในเบ้าหุบถูกหลอมละลาย ซึ่งในขั้นตอนการเผาแม่พิมพ์ ชาวบ้านปะอวไม่มีการวัดอุณหภูมิของแม่พิมพ์และน้ำโลหะภายในแม่พิมพ์ แต่ใช้การเผาแม่พิมพ์เป็นเวลานานถึง 90 นาที เพื่อให้มั่นใจว่าขี้ผึ้งและโลหะภายในแม่พิมพ์ถูกหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ เมื่อนำแม่พิมพ์ออกจากเตาเผา พลิกชิ้นงานสลับตำแหน่งของเบ้าหุบและเบ้ายึดเพื่อให้น้ำทองเหลืองหลอมเหลวไหลลงในโพรงแบบ และปล่อยให้ทองเหลืองเย็นตัวตามธรรมชาติก่อนทำการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการหล่อวิธีขี้ผึ้งหายแบบโบราณ โดยการเทหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด



(ก) แบบ 2 ทางเข้าบริเวณปลายฐานระฆัง (ข) แบบ 1 ทางเข้าบริเวณหุระฆัง

รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองตำแหน่งการติดตั้งทางเข้าบนชิ้นงานรูประฆัง

ส่วนผสมทางเคมีของทองเหลืองที่ใช้ในการศึกษา ถูกวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Emission Spectrometer รุ่น ARL 3460 Fisons Instruments ซึ่งผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 มีค่าเทียบกับส่วนผสมทางเคมีมาตรฐาน UNS C85400 [2]

ตารางที่ 1 แสดงผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยเทียบกับมาตรฐาน UNS C85400

	Cu	Zn	Pb	Sn	Ni	Fe	Al	Mn	Si
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	61.61	33.37	2.42	0.42	1.67	0.33	0.04	0.02	0.10
UNS C85400	65.0-70.0	24.0-32.0	1.5-3.8	0.5-1.5	1.0 max	0.7 max	0.35 max	-	0.05 max

การหล่อโลหะวิธีขี้ผึ้งหายแบบโบราณ โดยวิธีการเทหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด ถ้าปริมาณของโลหะที่ใส่ในเบ้าหุบไม่เพียงพอ อาจทำให้น้ำโลหะไม่เต็มแบบหล่อหรือทำให้ชิ้นงานไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าหากใช้ปริมาณของโลหะมากเกินไปก็ทำให้สิ้นเปลืองโลหะในการหล่อและพลังงานในการหลอมโลหะ ดังนั้น การหาสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณของโลหะที่ใส่ในเบ้าหุบที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในการทำการหล่อทองเหลืองของบ้านปะอว จะอาศัยประสบการณ์ในการทำงานในการคาดคะเนปริมาณของโลหะที่ใส่เข้าไปในเบ้าหุบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้สมการ

หาน้ำหนักของทองเหลืองที่ใช้การหล่อขึ้นงาน โดยการคำนวณหาจากปริมาณของขี้ผึ้งคูณกับความถ่วงจำเพาะของทองเหลือง และเมื่อปริมาณของทองเหลืองอีกประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทองเหลืองที่แท้จริง เพื่อทดแทนการหดตัวหรืออาจสูญเสียปริมาณทองเหลืองเนื่องจากความตึงผิวติดกับแบบหล่อและทางเข้า สมการที่ 1 แสดงสมการที่ใช้การหาน้ำหนักของทองเหลืองที่ใช้การหล่อขึ้นงาน



(ก) การเตรียมดิน



(ค) การพันขี้ผึ้ง รอบหุ่นต้นแบบ



(จ) การพิมพ์ลาย โดยใช้ลูกกลิ้งพิมพ์หรือกดพิมพ์ลงลายลงบนขี้ผึ้งให้ได้ลวดลายตามที่ต้องการ



(ข) การอบเบ้ายัด โดยใช้ดินที่ผสมมูลวัว แกลบ และน้ำ มาหุ้มหุ่นที่ทำลวดลายและติดทางเข้าเรียบร้อยแล้วโดยให้ทางเข้าโผล่ออกมา แล้วนำไปตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 3-4 วัน



(ฉ) การหลอมขึ้นงาน โดยการไปเผาไฟเป็นเวลา 90 นาที



(ข) ปั้นหุ่นต้นแบบหรือพิมพ์ยัดโดยใช้ไม้มอน



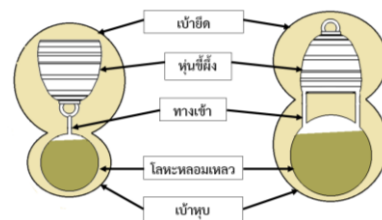
(ง) กลึงขี้ผึ้ง ให้มีผิวเรียบและมีความหนาสม่ำเสมอ



(ฉ) การติดหูระฆัง และติดทางเข้า



(ซ) เบ้าหุบที่บรรจุโลหะ และเบ้ายัดที่บรรจุหุ่นขี้ผึ้ง นำเบ้าหุบที่บรรจุทองเหลือง มาติดที่บริเวณปากของเบ้ายัด แล้วนำเอาดินเหนียวผสมแกลบมาโอบรอบเบ้าทั้งสอง เพื่อให้เบ้าหุบกับเบ้ายัดยึดติดกัน แล้วนำไปผึ่งแดดทิ้งไว้ 1 วัน



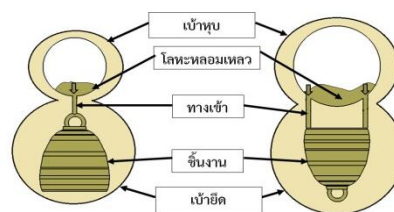
(ฎ) แบบจำลองการหลอมละลายขึ้นงานขณะเผาขึ้นงาน



(ฎ) พลิกชิ้นงาน เพื่อให้น้ำทองเหลืองหลอมเหลวไหลลงในโพรง ปล่อยทิ้งไว้ตามธรรมชาติประมาณ 15 นาที



(จ) การแกะแบบ เมื่อน้ำทองเหลืองแข็งตัวแล้ว ทำการทุบเบ้าดินให้แตก นำชิ้นงานที่ได้มาวิเคราะห์หาจุดเสีย และหาความสัมพันธ์ของขนาดของชิ้นงานกับปริมาณและตำแหน่งของทางเข้า



(ฐ) แบบจำลองการไหลของน้ำโลหะ



(ฌ) ชิ้นงานที่ผ่านการตกแต่งเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการหล่อทองเหลืองแบบโบราณ โดยการเทหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด

$$\text{ปริมาณทองเหลือง} = (\text{ปริมาณของซีฟิ่ง} \times \text{ความถ่วงจำเพาะของทองเหลือง}) + (10 \text{ หรือ } 20\% \text{ ของ } (\text{ปริมาณของซีฟิ่ง} \times \text{ความถ่วงจำเพาะของทองเหลือง})) \quad (\text{สมการที่ } 1)$$

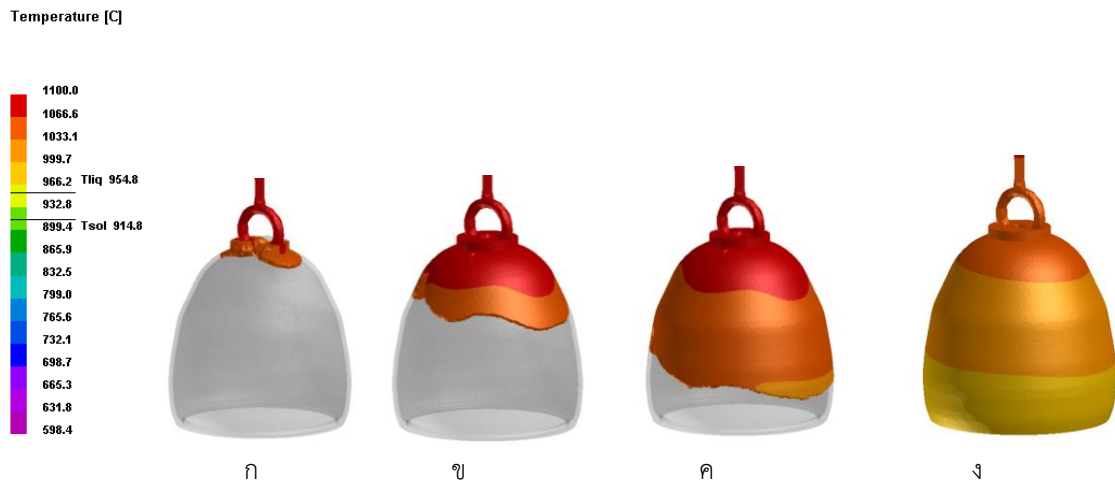
ซึ่งความถ่วงจำเพาะของทองเหลือง มีค่าเท่ากับ 8.4 - 8.7 [3] และปริมาณซีฟิ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$\text{ปริมาณซีฟิ่ง} = \text{น้ำหนักหุ่นต้นแบบหลังพ่นซีฟิ่ง} - \text{น้ำหนักหุ่นต้นแบบก่อนพ่นซีฟิ่ง} \quad (\text{สมการที่ } 2)$$

ในขั้นตอนการจำลองการไหลของน้ำโลหะในแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบและโปรแกรมช่วยในงานวิศวกรรม โปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คือ โปรแกรม ProCast version 2010 ขอบเขตเงื่อนไขในการทดลองได้กำหนดขนาดทางเข้าให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร อุณหภูมิเทหล่อ 1,100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ 600 องศาเซลเซียส และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างทองเหลืองกับแม่พิมพ์ $1,000 \text{ W m}^2/\text{K}$

ผลการวิจัย

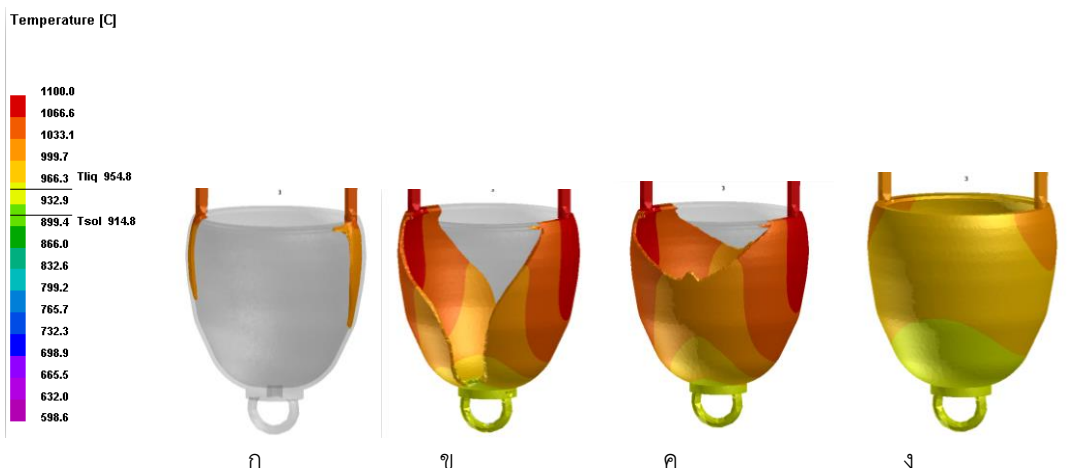
เมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทองเหลืองวิธีซีฟิ่งแบบโบราณ โดยการเทหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการจำลองกระบวนการหล่อด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าปริมาณทองเหลืองที่ใส่ในเบ้าหุบซึ่งคำนวณโดยใช้สมการที่ 1 และ 2 มีปริมาณเพียงพอที่จะเทเข้าไปในโพรงแบบหล่อจนเต็ม หากไม่เกิดจุดเสียชนิดน้ำโลหะไหลเข้าไม่เต็ม (Misrun) บนชิ้นงานก่อนที่น้ำโลหะจะไหลได้เต็มแบบ นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของขนาดชิ้นงานตำแหน่งและจำนวนของทางเข้าที่มีต่อความสมบูรณ์ของงานหล่อ จากการจำลองพฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะในชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร 1 ทางเข้า พบว่าน้ำโลหะมีการไหลจากเบ้าหุบเข้าโพรงแบบอย่างสม่ำเสมอจากบนลงล่างทั่วทั้งชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 5 โดยเริ่มจากน้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบ (รูป 5ก) จนถึงน้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบสมบูรณ์ (รูป 5ง)



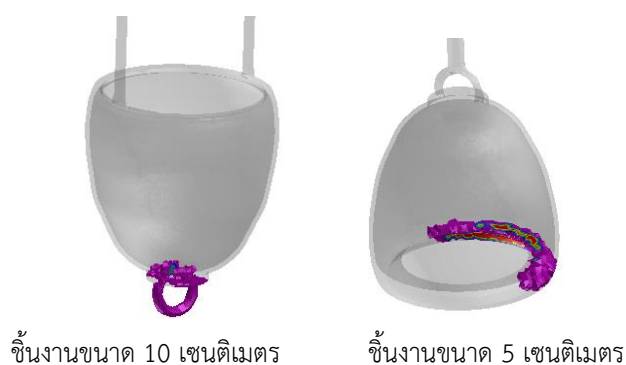
รูปที่ 5 การไหลของน้ำโลหะในชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร 1 ทางเข้า

ชิ้นงานที่ติดตั้งทางเข้าน้ำโลหะ 2 ทางเข้า น้ำโลหะไหลจากเข้าหุบผ่านทางเข้า 2 ตำแหน่งสู่โพรงแบบดังแสดงในรูปที่ 6 พิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิน้ำโลหะ เมื่อน้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบที่มีลักษณะเป็นผนังบาง (Thin Wall) อุณหภูมิของน้ำโลหะจะลดลงทันทีเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากน้ำโลหะสู่แม่พิมพ์ทั้งภายใน และภายนอกผนังบางพร้อม ๆ กัน [4] จากรูปที่ 6ข จะเห็นว่าน้ำโลหะที่บริเวณกลางชิ้นงานมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 930 - 966 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดผลึกของแข็งในน้ำโลหะ (Mushy Zone) ผลึกของแข็งซึ่งมักเกิดขึ้นหนาแน่นที่บริเวณปลายของน้ำโลหะเรียกว่า “Slurry of Dendrite” ปัจจัยนี้ส่งผลให้ความสามารถในการไหลของน้ำโลหะ (Fluidity) ต่ำลง [5-6] ทำให้น้ำโลหะมีโอกาสแข็งตัวก่อนไหลเข้าเต็มแบบ หรือเกิดจุดเสียกรณีน้ำโลหะไม่ประสานกัน [7-9] ดังแสดงในรูปที่ 8ก, 8ข และ 8ง

ในการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของชิ้นงานหลังจากแบบจำลองสิ้นสุดการแข็งตัวพบว่าชิ้นงานทั้ง 2 ขนาดเกิดจุดเสียแบบโพรงหดตัวเล็กน้อย ส่วนใหญ่เกิดบริเวณที่อยู่ห่างจากจุดป้อนน้ำโลหะ และส่วนของชิ้นงานที่มีความหนา ดังแสดงในรูปที่ 7 เนื่องจากการออกแบบระฆังจะต้องมีปากให้หนาขึ้นในส่วนฐานเพื่อให้โลหะมากระทบเกิดเสียงดังกังวาน จึงทำให้เกิดจุดสะสมความร้อน (Hot Spot) เป็นสาเหตุของการเกิดโพรงหดตัว เทียบกับชิ้นงานจริงในรูป 8ค, รูปที่ 8จ และรูปที่ 8ฉ นอกจากความหนาของชิ้นงานที่ทำให้เกิดจุดสะสมความร้อนแล้ว สาเหตุที่ทำให้เกิดโพรงหดตัวอาจเกิดจากความผิดพลาดในการป้อนน้ำโลหะ, โลหะไม่แข็งตัวในทิศทางเดียว, อุณหภูมิที่สูงเกินไป ทำให้เกิดการหดตัวของของเหลว หรือเกิดจากการแข็งตัวเร็วเกินไปที่ทางเข้าของน้ำโลหะ และจุดเสียชนิดรูพรุนหรือโพรงแก๊ส ที่มีลักษณะเป็นรูกลมผิวเรียบดังแสดงในรูปที่ 8ข มีสาเหตุเกิดจากแก๊สหรืออากาศถูกกักในเนื้องานระหว่างเทหล่อเพราะความปั่นป่วนของน้ำโลหะระหว่างการเท หรืออุณหภูมิที่ต่ำเกินไป [7-9]



รูปที่ 6 การไหลของน้ำโลหะในชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร 2 ทางเข้า



รูปที่ 7 บริเวณที่เกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานหล่อ

จากการวิเคราะห์จุดเสียที่เกิดขึ้นโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการทดลองหล่อชิ้นงานจริงสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของชิ้นงานกับปริมาณและตำแหน่งทางเข้าต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงาน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงจุดเสียที่พบในชิ้นงานหล่อทองเหลืองที่มีขนาดของชิ้นงาน และปริมาณและตำแหน่งทางเข้าที่แตกต่างกัน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ระฆัง (เซนติเมตร)	ปริมาณและตำแหน่งทางเข้า	
	1 ทางเข้า ติดตั้งไว้ตรงตำแหน่งหู ระฆัง	2 ทางเข้า ติดตั้งไว้ตรงปลายฐานระฆัง
2	ชิ้นงานมีความสมบูรณ์	ชิ้นงานมีความสมบูรณ์
5	โพรงที่เกิดจากการหดตัว (Shrinkage cavity) บริเวณปลาย ระฆัง	- โพรงที่เกิดจากการหดตัว (Shrinkage cavity) บริเวณที่ติดปลายหูระฆัง - น้ำโลหะไหลเข้าไม่เต็ม (Misrun) - โพรงแก๊สหรือรูพรุน (Blow holes)
10	โพรงที่เกิดจากการหดตัว (Shrinkage cavity) บริเวณปลาย ระฆัง	- โลหะไหลเข้าไม่เต็ม (Misrun) - โลหะเนื้อไม่ประสาน (Cold shut)



(ก) ระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ทางเข้า ติดตั้งไว้ตรงปลายฐานระฆัง



(ข) ระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ทางเข้า ติดตั้งไว้ตรงปลายฐานระฆัง



(ค) ระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ประกอบด้วย 1 ทางเข้า ติดตั้งไว้ตรงตำแหน่งหุระฆัง



(ง) ระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ทางเข้า ติดตั้งไว้ตรงปลายฐานระฆัง



(จ) ระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ทางเข้า ติดตั้งไว้ตรงปลายฐานระฆัง



(ฉ) ระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ประกอบด้วย 1 ทางเข้า ติดตั้งไว้ตรงตำแหน่งหุระฆัง



(ช) ระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ทางเข้า ติดตั้งไว้ตรงปลายฐานระฆัง



(ซ) ระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ประกอบด้วย 1 ทางเข้า ติดตั้งไว้ตรงตำแหน่งหุระฆัง

รูปที่ 8 แสดงจุดเสียที่พบในชิ้นงานหล่อทองเหลืองวิธีขึ้นหยาบบนโบราณ โดยการเทหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด (ชื่อและสาเหตุการเกิดจุดเสีย ดังอธิบายในเนื้อความส่วนผลการวิจัย)

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการศึกษาการหล่อทองเหลืองวิธีขึ้นฝั่งหยาบแบบโบราณโดยการเทหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด โดยใช้กรณีศึกษาการหล่อระฆังทองเหลืองบ้านปะอาว จังหวัดอุบลราชธานี พบว่า การเทหล่อในแม่พิมพ์แบบปิดปริมาณของโลหะที่ใช้ต้องเหมาะสม เพื่อลดปัญหาจุดเสียน้ำโลหะไม่เพียงพอในกรณีที่ใช้ปริมาณทองเหลืองน้อยไป หรือจะเหลือส่วนทางวิ่งน้ำโลหะที่ต้องตัดทิ้งมากและสูญเสียพลังงานในการหลอมมากในกรณีที่ใช้ปริมาณทองเหลืองมากเกินไป การใช้สมการคำนวณหาปริมาณทองเหลืองจะช่วยลดต้นทุนการผลิตให้กับกลุ่มหัตถกรรมได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังพบว่า ในการวางตำแหน่งทางเข้าและปริมาณของทางเข้าของน้ำโลหะลงบนชิ้นงานแต่ละขนาดนั้นจะอาศัยประสบการณ์และการลองผิดลองถูก จนกว่าจะได้ชิ้นงานหล่อที่สมบูรณ์ หากเราสามารถทำนายตำแหน่งการวางทางเข้าและปริมาณของทางเข้าน้ำโลหะที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานแต่ละขนาด ก็จะช่วยลดปริมาณของเสียในการผลิต

จากการศึกษาพบว่าเมื่อผลิตชิ้นงานระฆังที่มีขนาดเล็ก การวางตำแหน่งทางเข้าและปริมาณของทางเข้าของน้ำโลหะไม่ก่อให้เกิดจุดเสีย แต่เมื่อผลิตชิ้นงานระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 5 เซนติเมตร การวางตำแหน่งทางเข้าและปริมาณทางเข้าของน้ำโลหะมีผลต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงาน

จากผลการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของชิ้นงานระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 5 เซนติเมตร หลังจากแบบจำลองสิ้นสุดการแข็งตัวพบว่าชิ้นงานเกิดจุดเสียแบบโพรงหดตัวเล็กน้อย ส่วนใหญ่เกิดบริเวณที่อยู่ห่างจากจุดป้อนน้ำโลหะ และส่วนของชิ้นงานที่มีความหนา เนื่องจากการออกแบบระฆังจะต้องมีปากให้หนาขึ้นในส่วนฐานเพื่อให้โลหะมากระทบเกิดเสียงดังกังวาน จึงทำให้เกิดจุดสะสมความร้อน (Hot Spot) เป็นสาเหตุของการเกิดโพรงหดตัว แนวทางการแก้ไขจุดเสียชนิดนี้ สามารถทำได้โดยการเพิ่มทุนเย็นฝังไว้ในแม่พิมพ์ดินบริเวณโดยรอบจุดสะสมความร้อน และออกแบบระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะ โดยเพิ่มขนาดของทางวิ่งน้ำโลหะ

เมื่อพิจารณาการไหลของน้ำโลหะของชิ้นงานระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรที่มีการติดตั้งทางเข้าน้ำโลหะ 2 ทางเข้า น้ำโลหะไหลจากเบ้าหุบผ่านทางเข้า 2 ตำแหน่งสู่โพรงแบบ เมื่อน้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบที่มีลักษณะเป็นผนังบาง (Thin Wall) อุณหภูมิของน้ำโลหะจะลดลงทันทีเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากน้ำโลหะสู่แม่พิมพ์ทั้งภายใน และภายนอกผนังบางพร้อมๆกัน ปัจจัยนี้ส่งผลให้ความสามารถในการไหลของน้ำโลหะต่ำลง ทำให้น้ำโลหะมีโอกาสไหลเข้าไม่เต็มแบบ หรือเกิดจุดเสียกรณีน้ำโลหะไม่ประสานกัน ดังนั้นการออกแบบระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะสำหรับงานผนังบาง เช่น ระฆังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 เซนติเมตร ไม่ควรใช้ทางเข้าน้ำโลหะ 2 ทาง เพราะการควบคุมทิศทางการเย็นตัวให้เป็นไปในทิศทางเดียวกันทำได้ยาก และยังเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนของน้ำโลหะระหว่างการเท ซึ่งแนวทางการแก้ไขจุดเสียดังกล่าวสามารถจำลองได้โดยโปรแกรมช่วยในการออกแบบและโปรแกรมช่วยในงานวิศวกรรมเพื่อหาแนวทางการออกแบบระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะที่มีประสิทธิภาพและใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด

นอกจากการออกแบบระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะให้เหมาะสมแล้ว ยังมีสาเหตุอื่นๆที่ก่อให้เกิดจุดเสียในชิ้นงาน คือ อุณหภูมิเทน้ำโลหะไม่เหมาะสม ซึ่งนำไปสู่จุดเสียชนิดการหดตัวของของเหลว หรือเกิดรูพรุนบนผิวชิ้นงาน การใช้เครื่องมือวัดทางวิศวกรรม เช่น เครื่องวัดอุณหภูมิ มาใช้ในการตรวจจับอุณหภูมิของแม่พิมพ์และน้ำโลหะภายในแม่พิมพ์ สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างการพาความร้อน การนำความร้อน และการถ่ายเทความร้อนของน้ำโลหะและแม่พิมพ์ เพื่อหาเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเบ้า เพื่อให้ให้น้ำโลหะหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์แบบปิดมีอุณหภูมิที่เหมาะสม

นอกจากนั้นการใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบและโปรแกรมช่วยในงานวิศวกรรม ยังสามารถประยุกต์ใช้กับชิ้นงานผนังบางประเภทอื่น ๆ เช่น ชุดเขียนหมาก ฐานรอง ผอบ โล่ที่ระลึก คันไถน้ำ เป็นต้น หรือใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆแต่ใช้ลวดลายและกรรมวิธีการผลิตแบบโบราณ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิตอีกทางหนึ่ง ทำให้กลุ่มหัตถกรรมมีรายได้เพิ่มขึ้น และยังสามารถดำเนินกิจการและรักษามรดกทางปัญญาไว้ให้คนรุ่นหลังสืบต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กลุ่มหัตถกรรมทองเหลืองบ้านปะอาว จ.อุบลราชธานี ที่ให้การอนุเคราะห์ด้านข้อมูล สถานที่ และ สาธิตกรรมวิธีการหล่อทองเหลืองด้วยวิธีขึ้นหยาบแบบโบราณ ขอขอบคุณ ผศ.สุริยา โชคสวัสดิ์ ที่กรุณาให้การสนับสนุนและ ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ตลอดจนเป็นผู้แนะนำให้รู้จักกลุ่มหัตถกรรมทองเหลืองบ้านปะอาว และขอขอบคุณกรมส่งเสริม อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมที่อนุเคราะห์โปรแกรม ProCast เพื่อใช้ในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ. สุริยา โชคสวัสดิ์ และ ผศ. เจริญ ชุมมวล. 2553. **หัตถกรรมทองเหลืองบ้านปะอาว มรดกทาง ศิลปวัฒนธรรม จากภูมิปัญญาโบราณ**. อุบลราชธานี: ศิริธรรมออฟเซ็ท.
- [2] Cohen, A. 1984. **Casting copper-based alloys**, USA: American Foundrymen's society Inc.
- [3] Nunes, R. and et. al. 1990. **ASM metal handbook vol.2. Properties and selections: nonferrous alloys and special purpose materials**. USA: ASM international.
- [4] Kou, S. 1996. **Transport phenomena and materials processing**. USA: John Wiley and Sons Inc.
- [5] Flemings, M.C. 1974. **Solidification Processing**. London: McGraw-Hill Inc.
- [6] Hernandez, A.J. and et. al. 2010. "Clod Shut Formation Analysis on a Free Lead Yellow Brass Tap". **Engineering Failure Analysis**. 17: 1285-1289.
- [7] Pearce, J.T.H. และคณะ. 2544. **ข้อบกพร่องในงานหล่อโลหะ สาเหตุและวิธีการแก้ไข**. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์ เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [8] ไพบูลย์ ชูพึ่งอาตม์. 2533. **ข้อบกพร่องที่เกิดกับงานหล่อ และการแก้ไข**. กรุงเทพมหานคร: สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรม เครื่องจักรกลและโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม.
- [9] นรินทร์ ปูนพันธ์ฉาย, สุชาติ จันทรกานนท์ และ ทวีทรัพย์ ศุภสารมัสโร. 2537. **การออกแบบงานหล่อ**. กรุงเทพมหานคร:เอ็มแอนด์อี.