ผลกระทบจากส่วนเพิ่มของซิลิกอนต่อความสวยงามของงานหล่อประติมากรรมเหล็กไร้สนิม 18-8 ด้วยพิมพ์กระดองเซรามิก

พรสนอง วงศ์สิงห์ทอง*

บทคัดย่อ

โรงหล่อขนาดเล็กส่วนใหญ่นำเศษเหล็กไร้สนิม 18-8 จากโรงกลึงและโรงปั๊มโลหะ มาใช้เป็นวัตถุดิบในการหล่อประติมากรรม เศษเหล็กไร้สนิมเหล่านี้มีส่วนผสมโครเมียม 18% นิกเกิล 8% ซิลิกอน 0.75 % และอื่น ๆ ประสบการณ์จากการหล่อประติมากรรมทองสำริดซิลิกอนด้วยพิมพ์กระดองเซรามิก ทำให้รู้ว่าซิลิกอนที่เป็นส่วนผสมอยู่ในโลหะทองสำริด ทำหน้าที่เหมือนตัวหล่อลื่นระหว่างโลหะเหลวกับผนังกระดองเซรามิก จึงทำให้โลหะไหลได้ดีในระหว่างการหล่อ เชื่อมได้ง่าย และมีจุดเสียน้อย หลังจากที่ใช้ความพยายามลองผิดลองถูก เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านความสวยงามของประติมากรรมเหล็กไร้สนิมมานาน ในการวิจัยเชิงทดลองครั้งนี้ จึงเติมซิลิกอนลงในเศษเหล็กไร้สนิม 18-8 อีก 0.75 % จนส่วนผสมซิลิกอนสูงขึ้นเป็น 1.5 % ผลการทดลองพบว่าซิลิกอนที่เพิ่มเข้าไปไม่เพียงแต่ช่วยในการไหลในขณะที่หล่อ แต่ช่วยลดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนที่มาจากพิมพ์กระดองเซรามิกกับเหล็กไร้สนิมเช่นเดียวกับในทองสำริด ทำให้ปริมาณจุดเสียอันเนื่องมาจากหลุม รูเข็ม รูแก๊ส รูโบ๋ และรอยซ้อนเย็น ลดลง ดังนั้น จึงทำให้คุณภาพด้านความสวยงามของชิ้นงานหล่อเพิ่มขึ้น ซึ่งในท้ายที่สุด ช่วยลดเวลาและแรงงานที่ต้องใช้ในการเชื่อม กรอ และขัดมัน ทำให้การผลิตประติมากรรมเหล็กไร้สนิมมีต้นทุนต่ำลง

คำสำคัญ : การหล่อเหล็กไร้สนิม ประติมากรรม พิมพ์กระดองเซรามิก

---

*รองศาสตราจารย์ ภาควิชานฤมิตศิลป์ คณะศิลปกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of an Increased Silicon Content on the Aesthetic Quality of Stainless Steel 18-8 Fine Art Casting with Ceramic Shell Mold

Pornsanong Vongsingthong*

Abstract

Most small foundries normally use stainless steel 18-8 scraps from lathe machine and stamping shop to cast sculpture with ceramic shell mold. These scraps compose of 18% chromium, 8 % nickel, 0.75% silicon and others. Experience with silicon bronze casting using ceramic shell technique led to the belief that silicon made metal flow and weld better, and less defects. Outgrowing of trial-and-error efforts to improve aesthetic quality of stainless steel fine art castings, in this experimental research, silicon of 0.75% by weight is added to stainless steel scraps to bring up the total silicon content to 1.5%. As an outcome, the increased silicon content not only increases fluidity of stainless steel 18-8 during casting but lowers the driving force for the silicon content in the ceramic shell mold from reaction with the molten metal resulting in reduction in pits, pin-holes, porosities, non-fill and cold lap defects. This effect, consequently, increases the aesthetic quality of fine art castings. And thus, decreasing the cost of time and labor required for final welding, grinding and polishing of the sculptures.

Keywords: stainless steel casting, sculpture, ceramic shell mold

*Associate Professor, Department of Creative Arts, Faculty of Fine and Applied Arts, Chulalongkorn University

1. คำนำ

พัฒนาการของเครื่องมือใหม่ ๆ วิธีใหม่ ๆ และวัสดุใหม่ ๆ ส่งผลกระทบอย่างสูงต่อแนวความคิดที่ศิลปินใช้ในสร้างสรรค์ผลงาน ทั้งนี้เพราะพิกัดทางเลือกในการสร้างสุนทรียะขยายกว้างออกไป ในช่วงเวลา 25 ปีที่ผ่านมากระบวนวิธี เครื่องมือ และวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตประติมากรรม ได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างสำคัญ [1] ที่เห็นได้ชัดอย่างหนึ่ง คือ การนำเหล็กไร้สนิมวัสดุใหม่ ซึ่งเคยนิยมใช้เป็นเครื่องครัว [2] มาใช้หล่อประติมากรรม คู่ขนานกับทองสำริดที่เป็นวัสดุโบราณ ประโยชน์ของเหล็กไร้สนิมเป็นที่รู้จักกันดีในอุตสาหกรรมอาหาร เพราะมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีผิวที่ทำความสะอาดได้ง่าย รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นไม่ทำให้เกิดสนิม และไม่เปลี่ยนสีไปตามกาลเวลา

แต่กระบวนวิธีการหล่อประติมากรรมเหล็กไร้สนิมก็ยังคงเหมือนกับการหล่อทองสำริด คือ การหล่อพิมพ์ทรายกับการหล่อสูญขี้ผึ้ง ส่วนเทคนิคการหล่อสูญขี้ผึ้งที่ทันสมัยที่สุด คือ พิมพ์กระดองเซรามิก วิธีนี้ช่วยให้สามารถลอกแบบอะไรก็ได้ ที่ผลิตไม่ได้ด้วยวิธีอื่น แต่ขึ้นรูปได้ด้วยขี้ผึ้งออกมาเป็นโลหะได้อย่างแม่นยำ ซึ่งในท้ายที่สุด ก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้การผลิตประติมากรรมได้คุณภาพสูง รวดเร็ว และมีราคาถูก[5] แม้กระดองเซรามิกจะเป็นเทคนิคที่ดีที่สุด โรงหล่อที่ใช้เทคนิคกระดองเซรามิกแทบทุกโรง ก็มีปัญหาเรื่องชิ้นงานเสีย อันเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการที่แตกต่างกันไป แต่ปัญหาชิ้นงานที่เสียส่วนใหญ่มักจะเกี่ยวข้องกับกระดองเซรามิก ซึ่งอาจแตกต่างจากกระบวนการหล่อด้วยวิธีอื่น[3]

ในการหล่อประติมากรรมเหล็กไร้สนิม โดยทั่วไปจะใช้เศษเหล็กไร้สนิม 18-8 ที่เหลือใช้จากงานกลึง หรืองานปั๊มโลหะ ที่ประกอบด้วยโครเมียม 18% และ นิกเกิล 8% หลังจากหล่อแล้วก็จะกรอ เชื่อมต่อ เจียร หรือ ขัดผิวหล่อ เพื่อขจัดหลุม รูเข็ม หรือรูแก๊ส ฯลฯ จากนั้นจึงขัดแต่งผิวประติมากรรมให้เป็นเงามันวาว หรือไม่ก็ปาตินา (Patina) ให้เป็นสีอื่น ๆ ที่แตกต่างออกไปจากสีธรรมชาติของเหล็กไร้สนิม แต่ถ้าประติมากรรมมีจุดเสียอย่างอื่นอันเนื่องมาจากการหล่อ เช่น รูโบ๋ หรือรอยต่อเย็น ซึ่งมีขนาดใหญ่ ก็จำเป็นต้องซ่อมด้วยการเชื่อมต่อ จากนั้นจึงกรอรอยเชื่อมก่อนที่จะนำไปขัดแต่งผิวต่อไป

ทั้งการกรอและการเชื่อมต่อต้องใช้เวลา วัสดุ และแรงงานไม่น้อย จึงกลายเป็นต้นทุนโดยรวมที่มีสัดส่วนสำคัญในการผลิตประติมากรรม

วัตถุประสงค์ของการวิจัยเชิงทดลองนี้ เป็นผลสืบเนื่องมาจากความพยายามแบบลองผิดลองถูก ที่จะปรับปรุงคุณภาพด้านความสวยงาม ของประติมากรรมเหล็กไร้สนิม ที่ใช้พิมพ์กระดองเซรามิก ด้วยการลดจำนวนจุดเสียบนผิวชิ้นงาน โดยการเติมส่วนผสมซิลิกอนลงในเหล็กไร้สนิม 18-8

รายงานการวิจัยแบ่งออกได้เป็นสี่ส่วน ดังนี้ ส่วนที่สองถัดจากส่วนที่หนึ่งนี้ไป เป็นการทบทวนเทคนิคกระดองเซรามิกในการหล่อประติมากรรมเหล็กไร้สนิม และปัญหาจุดเสียอันเนื่องมาจากโลหะ พิมพ์ และระบบท่อเทเพื่อเป็นภูมิหลัง ส่วนที่สาม เป็นการอภิปรายการทดลองแบบ 2x3x3 แฟคตอเรียล (2x3x3 Factorial Experimental Design) และการประเมินผลของซิลิกอนสองระดับ ต่อจำนวนจุดเสียที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานหล่อประติมากรรมต่างแบบกันสามระดับ พร้อมกับการใช้ระบบท่อเทต่างวิธีกันสามระดับ และส่วนที่สี่ เป็นข้อสรุปและผลกระทบของงานวิจัยนี้

2. การหล่อประติมากรรมเหล็กไร้สนิมด้วยเทคนิคกระดองเซรามิก

วิธีกระดองเซรามิกเป็นการหล่อสูญขี้ผึ้งวิธีหนึ่ง ซึ่งขั้นตอนแรกเป็นการสร้างกระสวนขี้ผึ้ง (รูปที่ 1)

รูปที่ 1 กระสวนขี้ผึ้งพร้อมด้วยระบบท่อเท

ให้เหมือนต้นแบบ แล้วนำไปจุ่มสารละลายซิลิกาแขวนลอย(Colloidal Silica) ในขณะที่เปียกชื้นอยู่ก็โรย

เคลือบด้วยสารทนไฟ (เซรามิก) แล้วตากไว้ให้แห้ง ทำเช่นนี้ซ้ำแล้วซ้ำอีกเป็นชั้น ๆ ไป จนกว่าจะได้ความหนาประมาณ 12 ม.ม. หรือหนากว่านี้ในกรณีที่ชิ้นงานหล่อมีขนาดใหญ่ กระบวนวิธีนี้จึงเป็นการใช้เซรามิกหุ้มกระสวนขี้ผึ้ง ที่ติดระบบท่อเทไว้แล้วอย่างสมบูรณ์ เซรามิกที่หุ้มอยู่ทำหน้าที่เสมือนเปลือกหอย หรือกระดองปู (รูปที่ 2)

รูปที่ 2 กระดองเซรามิก

ที่มา : ภาพถ่ายกระดองเซรามิกระหว่างการทดลองในโรงหล่อ

เมื่อได้กระดองเซรามิกที่แห้งและแข็งแรง (หนา) พอแล้ว ก็จะนำไปสำรอกขี้ผึ้งออก กระดองส่วนที่คงอยู่กลายเป็นพิมพ์กระดองเซรามิก ซึ่งมีโพรงหรือรอยพิมพ์ตามรูปกระสวนและระบบท่อเทอยู่ภายในทั้งระบบ จากนั้นจึงนำพิมพ์กระดองเซรามิกนี้ไปย่างในเตาอบให้มีอุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส แล้วเทเหล็กไร้สนิมเหลวที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียสเข้าไปในโพรง เพื่อให้เข้าไปแทนที่ระบบกระสวนขี้ผึ้ง ซึ่งเท่ากับเป็นการลอกต้นแบบขี้ผึ้งเดิมพร้อมกับระบบท่อเท เมื่อพิมพ์เย็นลง จึงใช้ค้อนเคาะกระดองเซรามิกออกจากชิ้นงานหล่อที่ลอกต้นแบบขี้ผึ้งไว้ ได้ชิ้นงานหล่อตามที่ต้องการ (รูปที่ 3)

รูปที่ 3 ชิ้นงานหล่อ

ที่มา : ภาพถ่ายชิ้นงานหล่อระหว่างการทดลองในโรงหล่อ

โลหะเหลวไหลเข้าไปในโพรงทางถ้วยเท และกระจายไปทั่วทั้งโพรงในกระดองทางท่อหลักและท่อรอง ซึ่งกระจายอยู่เป็นเครือข่าย ท่อรองเกิดจากการติดแท่งขี้ผึ้งเข้าด้วยกันกับกระสวน ก่อนที่จะนำไปหุ้มเซรามิก ท่อรองเป็นท่อขี้ผึ้งที่จัดไว้เพื่อให้โลหะไหลไปในทิศทางที่ต้องการ ท่อรองนี้เป็นกิ่งที่แตกออกมาจากท่อหลัก ท่อหลักเป็นแท่งขี้ผึ้ง ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อท่อรองกับถ้วยเท เมื่อสำรอกขี้ผึ้งออก ท่อหลักและท่อรองจะยังคงอยู่ในกระดองเซรามิก และเป็นเส้นทางลำเลียงโลหะเหลว ในขั้นตอนสุดท้าย จึงตัดกระสวนขาดออกจากระบบท่อเท แล้วนำกระสวนไปเชื่อมแต่งเป็นชิ้นงานประติมากรรม

ด้วยเหตุที่ระบบท่อเทเป็นตัวควบคุมการกระจายโลหะเหลว และอัตราการนำโลหะไหลเข้าไปสู่ส่วนต่าง ๆ ในโพรง มีผลกระทบต่ออัตราการเย็นตัวและโครงสร้างของประติมากรรม ในแง่นี้ถ้าระบบท่อทำให้เกิดอัตราการเย็นตัวที่สม่ำเสมอ เริ่มต้นจากภายนอกไปหาภายใน ประติมากรรมที่ได้ก็จะมีโครงสร้างที่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการ ทั้งด้วยเหตุผลทางความสวยงามและความแข็งแรง แต่ถ้าระบบท่อกระจายโลหะได้ไม่ดี ก็จะทำให้เกิดจุดเสียขึ้นบนชิ้นงาน และทำให้ส่วนนั้นไม่สวยงามและไม่แข็งแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำให้เกิดหลุม หลุมเป็นจุดเสียที่เกิดจากการหดตัว ซึ่งเกี่ยวเนื่องอยู่กับการเย็นตัวของโลหะ การหดตัวเกิดขึ้นเมื่อโลหะเหลวถูกกักไว้ไว้ในถุงหรือหลุม แล้วมีโลหะเย็นห้อมล้อมอยู่โดยรอบ และด้วยเหตุที่ปริมาตรโลหะลดลงเมื่อโลหะเย็นตัวลง ปริมาตรโลหะเหลวลดลงเมื่อ

ไม่มีโลหะเหลวอยู่มากพอที่จะเติมลงไปในถุง ก็จะเกิดช่องว่าง และทำให้เกิดเป็นหลุมขึ้นในท้ายที่สุด

ในขณะที่หลุมเกิดมาจากการจัดระบบท่อเท แต่รูเข็ม รูแก๊ส และจุดเสียที่ใหญ่กว่านั้น เกิดจากคาร์บอนที่ละลายอยู่ในโลหะ ไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ด้วยกันในโลหะหรือพัดเข้าไปในโลหะ ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เข้าไปขังอยู่ใต้ผิวโลหะที่กำลังแข็งตัวและมองเห็นได้เป็นรูแก๊ส สำหรับเหล็กอัลลอยที่มีคาร์บอนต่ำ เช่น เหล็กไร้สนิม 18-8 ซึ่งดี-ออกซิไดซ์ (ไล่ออกซิเจน) อยู่แล้วเป็นการภายในเพราะมีโครเมียมผสมอยู่มาก รูเข็มและรูแก๊สจึงไม่ได้เป็นปัญหาที่สำคัญนัก

อย่างไรก็ตาม ในการหล่อเหล็กไร้สนิมด้วยพิมพ์กระดองเซรามิก เมื่อป้อนโลหะเหลวเข้าไปในกระดองเซรามิก ซึ่งมีส่วนประกอบซิลิกาอยู่เป็นสำคัญ การสัมผัสระหว่างโลหะเหลวกับผนังภายในกระดองอาจเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ทำให้เกิดรูแก๊ส และดังนี้ทำให้การทำความสะอาดผิวขั้นต้นและขั้นถัดไปมีต้นทุนสูงขึ้นได้ หรือไม่ก็ต้องยอมรับกับคุณภาพที่ต่ำลง แม้ว่าอันที่จริงรูแก๊สอาจขจัดออกไปได้ด้วยการกรอผิวโลหะให้ลึกลงไป หรือไม่เช่นนั้นก็ใช้สารละลายอลูมินาแขวนลอย (Colloidal Alumina) แล้วโรยเคลือบด้วยอลูมินา ซึ่งเป็นสารทนไฟอีกชนิดหนึ่ง เป็นวัสดุในการทำกระดองเซรามิกแทนที่ซิลิกา แต่ทั้งสองวิธีต่างก็ทำให้กระบวนการผลิตมีต้นทุนสูงขึ้น

จากประสบการณ์ในการหล่อทองสำริดพบว่า เมื่อเปลี่ยนจากสูตรทองสำริดแบบดั้งเดิม ซึ่งไม่มีซิลิกอนเป็นส่วนผสมอยู่เลย มาใช้สูตรทองสำริดซิลิกอน เช่น เอเวอร์ดูร์ (Everdur) ซึ่งมีซิลิกอนเป็นส่วนผสมอยู่ 4% ทำให้หล่อทองสำริดได้คุณภาพด้านความสวยงามสูงขึ้น คือ มีจุดเสียน้อยลง ดังนี้ จึงเกิดสมมติฐานว่า หากเติมซิลิกอนลงในเหล็กไร้สนิม 18-8 ให้มากขึ้น ซึ่งโดยปกติมีส่วนผสมซิลิกอนอยู่แล้ว 0.75 % ของน้ำหนัก จุดเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเหล็กไร้สนิมกับกระดองเซรามิก น่าจะลดลงได้เช่นเดียวกับในทองสำริดซิลิกอน และดังนี้ทำให้ต้นทุนในการแต่งชิ้นงานหล่อในขั้นถัดไปลดลง นอกจากนั้น ซิลิกอนยังช่วยเพิ่มความเหลวของทองสำริดในขณะที่เททอง ทำให้ลดจุดเสียที่เกิดจากรูโบ่งลงได้ และยังช่วยลดรอยต่อเย็นในชิ้นงานหล่อได้อีกด้วย ซิลิกอนที่ละลายอยู่ในทองสำริดเอเวอร์ดูร์ช่วยในการหล่อลื่น การหล่อลื่นช่วยลดพลังไม่ให้กระดองเซรามิกทำปฏิกิริยากับโลหะเหลว[4] ด้วยความเข้าใจดังกล่าวจึงทำให้เกิดความต้องการที่จะนำซิลิกอนมาเติมลงในเหล็กไร้สนิม 18-8 ให้มากกว่าปกติ

ในอดีตระบบท่อเทสำหรับประติมากรรมตันประกอบด้วยท่อเทหลักเพียงท่อเดียวติดไว้ที่ยอดหรือส่วนบนสุดของกระสวนขี้ผึ้ง แม้ว่าระบบท่อเทนี้จะทำให้กระบวนวิธีในการตัดแต่งในขั้นตอนสุดท้ายทำได้สะดวกขึ้น เพราะมีท่อจำนวนน้อยและสั้นกว่าแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ท่อเททางตรงเช่นนี้ ทำให้เกิดแรงดันบนผนังกระดองเซรามิกน้อยกว่าแบบอื่น ๆ แต่ข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ ทิศทางในการแข็งตัวของโลหะ โลหะจะแข็งตัวไปในทิศทางเดียว ทั้งนี้เพราะกระดองเซรามิกนั้นบางมาก หลังจากเทแล้วโลหะจะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งในงานประติมากรรมกลวงก็ใช้งานได้ดีเหมือนกัน ในแง่ที่เอื้อให้โลหะแข็งตัวไปในทิศทางเดียวกัน[6] แต่การใช้ท่อเดี่ยวทางตรงเช่นนั้น ก็อาจทำให้เกิดความปั่นป่วนของกระแสโลหะขึ้นได้ อันเป็นการขัดขวางการไหลของโลหะเหลวเข้าไปสู่กระสวน และไม่ได้ให้หลักประกันว่าจะได้โครงสร้างที่หนาแน่นหรือผิวงานหล่อที่สวยงาม เมื่อนำมาใช้กับชิ้นงานกลวงที่มีผิวบาง

ด้วยเหตุที่ท่อเทหลักเพียงท่อเดียว ไม่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มคุณภาพด้านความสวยงามของชิ้นงานหล่อและให้โครงสร้างที่แข็งแรงที่ต้องการ ในประติมากรรมกลวงจึงนิยมท่อรองและท่อรองชั้นสอง เป็นแบบขั้นบันได ติดไว้บริเวณกลางลำตัวหรือพาดผ่านบนกระสวน เพื่อให้โลหะกระจายออกไปเท่า ๆ กัน และช่วยควบคุมการแข็งตัวของโลหะ เมื่อกระสวนมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนท่อที่จำเป็นเพื่อรักษามาตรฐานความงามและโครงสร้างไว้จึงต้องมีมากขึ้นตามไปด้วย ในอดีตท่อรองต้องมีอย่างน้อยสามท่อและมากถึงเก้าท่อจึงจะได้คุณภาพที่ต้องการ

อีกวิธีหนึ่ง คือ ท่อแบบสวนทวาร หรือท่อที่วิ่งเข้าสู่กระสวนจากจุดที่ต่ำสุดของชิ้นงาน ท่อแบบนี้ช่วยแก้ปัญหาความปั่นป่วนของกระแสโลหะที่ไหลเข้าไปใน

โพรง แต่ทำให้กระดองเซรามิกต้องแบกรับน้ำหนักมากขึ้น และมีความดันบนผนังกระดองมากกว่าปกติ และอาจทำให้กระดองแตกได้[7]

ในขณะที่การเพิ่มจำนวนท่อรอง ช่วยควบคุมการกระจายของโลหะได้ดีขึ้นระดับหนึ่ง ข้อเสียในการผลิตประติมากรรมที่สลับซับซ้อนก็เพิ่มขึ้น เพราะต้องทำความสะอาดท่อรองและเตรียมการก่อนเชื่อมหลังจากที่หล่อแล้ว และด้วยเหตุที่ต้องใช้แรงคนในการเชื่อมท่อขี้ผึ้งเข้าด้วยกันกับกระสวน ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายส่วนที่เพิ่มเข้ามาก็มากไปด้วย

นอกจากนั้นต้องใช้แรงงานพอสมควรเพื่อให้ได้หลักประกันว่า ได้แปะท่อขี้ผึ้งจนติดสนิทกับกระสวน ไม่มีถุงอากาศ หรือ อันเดอร์คัต ที่รอยต่อระหว่างท่อรองกับท่อหลัก หรือกับกระสวนขี้ผึ้ง อันนี้นับเป็นสิ่งจำเป็น เพราะอันเดอร์คัตจะกักเซรามิกที่เป็นตัวโรยไว้ในระหว่างการจุ่มเซรามิก ในขั้นตอนการเทโลหะเซรามิกอาจแตกออกมาและไหลเข้าไปในกระแสโลหะทำให้เกิดสิ่งที่เรียกว่า การปลอมปน การปลอมปนส่งผลกระทบต่อความสวยงาม ระยะเวลาในการแต่ง และความแข็งแรงของโลหะ

การเพิ่มท่อรองมากขึ้น ทำให้เกิดข้อเสียสามประการด้วยกัน ประการแรกต้องใช้วัสดุทนไฟเพิ่มขึ้นเพื่อหุ้มพื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้นตามจำนวนท่อรอง ประการที่สอง ท่อรองที่เพิ่มเข้าไปทำให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า รั้วล้อมเซรามิกรุนแรงขึ้น เพราะมีกระดองเซรามิกถูกหนีบอยู่ระหว่างท่อรอง นอกจากจะกะเทาะกระดองส่วนนี้ออกได้ยากแล้ว ยังทำให้เกิดปัญหาเรื่องการกักความร้อนขึ้นในขั้นตอนการเทโลหะ

จำนวนท่อรอง และที่ตั้งของท่อรอง ที่เพิ่มเข้าไปสร้างปัญหาในการแต่งขั้นสุดท้าย ทำให้จำเป็นต้องตัดและขัดแต่ง การตัดและการขัดเป็นกระบวนวิธี ที่ต้องใช้แรงคนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น หลังจากที่หล่อแล้วด้วยเหตุที่ท่อรองที่เพิ่มขึ้นทำให้เซรามิกติดอยู่กับชิ้นงานมากกว่าเมื่อมีท่อรองน้อย จึงทำให้กะเทาะกระดองออกได้ไม่สะดวก นอกจากนั้นเมื่อต้องตัดชิ้นงานหล่อออกจากระบบ ต้องใช้การเจียร หรือเลื่อยตัดผ่านท่อรองที่เป็นโลหะแล้ว การตัดผ่านหลายท่อรองในตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยเลื่อยหรือใบเจียร ต้องใช้แรงงานมาก ต้องเสียเวลา และมีราคาแพงและเป็นอันตรายอีกด้วย

เมื่อตัดท่อรองออกแล้ว ตำแหน่งที่ตั้งท่อรองนั้นก็จะกลายเป็นตอ ต้องอาศัยการเจียร และขัดกระดาษทรายเพื่อตัดท่อออก ขั้นต่อไปต้องทำรอยตอนั้นให้กลืนไปกับบริเวณกับส่วนโค้งเว้าที่อยู่ใกล้เคียงกัน อันนี้ต้องใช้เวลาและมีราคาแพง และต้องใช้ทักษะในการทำงานสูงในอันที่จะทำให้กลืนกันได้ เพราะถ้าไม่แต่งรอยให้กลืนกันไปแล้วอาจเหลือร่องรอยอยู่ หรืออาจเป็นจุดเสียจนต้องคัดชิ้นงานทิ้งไป กระดาษทรายขัดในขั้นนี้ก็มีราคาแพง และอาจทำให้มีต้นทุนเพิ่มมากขึ้นในการผลิตประติมากรรมเหล็กไร้สนิม

อีกปัญหาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับวิธีติดท่อ คือความไม่คงเส้นคงวา ในเรื่องความโค้งของผิวและจุดที่แปะ การใช้หัวแร้งติดท่อขี้ผึ้งก็อาจทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่าย ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง การเสียรูปบนผิวหน้าก็เป็นปัญหาเหมือนกัน และการหดตัวเมื่อเย็นตัวลงยังทำให้ผลนี้มีความรุนแรงยิ่งขึ้นไปอีก

ปัญหาการเสียรูปทรงผนวกกับความรุนแรงในระหว่างการหดตัวของโลหะอันเนื่องมาจากความเครียดที่เกิดมาจากการหดตัวของกระสวน และท่อรอง ความแตกต่างในจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งท่อรองผนวกเข้าด้วยกัน ทำให้ความโค้งบนพื้นผิวไม่คงเส้นคงวาและทำนายไม่ถูก การพัฒนาระบบท่อเท เพื่อให้สามารถป้อนโลหะเหลวเข้าไปในกระดองได้อย่างสมบูรณ์ ตามแนวทางอุตสาหกรรมว่าด้วยขนาดท่อเท อาจหาได้ด้วยวิธีคำนวณปริมาตร และบริเวณที่เย็นตัวที่ชิ้นงานหล่อส่วนต่าง ๆ แล้วใช้การวัดเพื่อหาโมดุลุส (Modulus) บริเวณที่มีค่าโมดุลุสต่ำสุด จะเย็นตัวก่อน ส่วนบริเวณที่มีค่าโมดุลุสสูงสุด จะเย็นตัวหลังสุด โดยทั่วไปค่าโมดุลุสจะครอบคลุมแบบท่อเท ในส่วนที่หนักที่สุดของชิ้นงาน แต่ในบริเวณที่มีผิวบางมากจะใช้เงื่อนไขด้านปริมาตรแทน

ในขณะที่แนวความคิดนี้เป็นเรื่องง่ายและตรงไปตรงมา การติดตั้งระบบท่อเทในงานประติมากรรมไม่เป็นเช่นนั้น อันนี้สืบเนื่องมาจากความยุ่งยากในการคำนวณปริมาตรและบริเวณพื้นที่

ผิวชิ้นงาน ซึ่งมักจะมีความสลับซับซ้อน ในการใช้งานทางปฏิบัติช่างหล่อแบ่งชิ้นงานหล่อออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ และถือส่วนย่อย ๆ แต่ละส่วนนี้เป็นรูปทรงเรขาคณิตรูปหนึ่ง แล้วจึงคำนวณพื้นที่และปริมาตร กระบวนวิธีนี้ไม่สะดวกและไม่แม่นยำ เพราะการสรุปให้เป็นรูปทรงเรขาคณิตไม่ได้นำอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติการเย็นตัวของวัสดุที่ใช้หุ้มเป็นกระดอง ช่างหล่อประติมากรรมส่วนใหญ่ จึงอาศัยประสบการณ์เป็นสำคัญ คือ ติดต่อเทขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12 ม.ม. ทุกตารางคืบ

3. ผลการทดลอง

การทดลองครั้งนี้ นอกจากจะออกแบบขึ้นมาเพื่อทดสอบสมมติฐานว่า ปริมาณซิลิกอนส่วนที่เพิ่มเข้าไปในกับปริมาณซิลิกอนที่มีอยู่ในสูตรดั้งเดิมในเหล็กไร้สนิม 18-8จะส่งผลกระทบต่อจำนวนจุดเสียไม่ต่างกันแล้ว ยังออกแบบให้สามารถทดสอบแฟคเตอร์อื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อปริมาณจุดเสีย คือ ระบบท่อเทแบบต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น และลักษณะพื้นผิวชิ้นงานหล่อประติมากรรมแบบต่าง ๆ ที่พบเห็นอยู่เสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอันตรกิริยา (Interactions) ระหว่างแฟคเตอร์เหล่านี้กับซิลิกอน และระหว่างแฟคเตอร์เหล่านั้นด้วยกันเอง ที่ต่างก็อาจส่งผลกระทบ (ขัดขวางหรือส่งเสริม) ต่อจำนวนจุดเสีย บนพื้นผิวงานหล่อประติมากรรมเหล็กไร้สนิม

การวิจัยใช้การทดลองแบบแฟคตอเรียล มีแฟคเตอร์สามตัว ได้แก่ (1) *Silicon* คือ ปริมาณซิลิกอนในเหล็กไร้สนิม ซึ่งแบ่งออกเป็นสองระดับ คือ ระดับที่หนึ่ง ซิลิกอนในเหล็กไร้สนิม 18-8 สูตรดั้งเดิม ที่มีส่วนผสมอยู่ 0.75 % (Silicon: 0.75) กับเหล็กไร้สนิมสูตรเดิมที่นำมาเติมซิลิกอนเข้าไปอีกหนึ่งเท่าตัว เป็น 1.5% (Silicon: 1.5) โดยน้ำหนัก (2) *Design* คือ ลักษณะผิวงานประติมากรรม สามระดับ เพราะงานหล่อประติมากรรมที่พบเห็นโดยทั่วไปอาจมีผิวมัน ผิวมีลวดลาย และผิวที่เกิดจากงานหล่อตัน ซึ่งต่างก็อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อปริมาณจุดตำหนิต่างกันได้ และด้วยเหตุที่ต้องการวัดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากลักษณะผิวงาน จึงใช้ประติมากรรมขนาดเล็กสูงประมาณ 30 ซม.ที่ต่างกันสามระดับในการทดลอง คือ ระดับที่หนึ่ง ประติมากรรมกลวงผิวมันไม่มีรายละเอียด(Design: Hollow/Smooth) (รูปที่ 4 ก)

รูปที่ 4 แบบประติมากรรมสามระดับที่ใช้ในการทดลอง

ที่มา : ภาพถ่ายจากชิ้นงานสำเร็จระหว่างการทดลองในโรงหล่อ

ระดับที่สอง ประติมากรรมกลวงผิวหยาบหรือมีรายละเอียดบนพื้นผิว (Design: Hollow/Rough) (รูปที่ 4 ข) และระดับที่สามประติมากรรมตัน (Design: Solid) (รูปที่ 4 ค) และ (3) *Gate* คือ ระบบท่อเทสามระดับที่อาจส่งผลกระทบต่อปริมาณจุดเสีย และอาจมีอันตรกิริยากับแฟคเตอร์สองตัวแรก คือ ระดับที่หนึ่ง ท่อหลักเดี่ยวทางตรง (Gate: Top) ระดับที่สอง ท่อรองแบบขั้นบันได (Gate: Step) และระดับที่สาม ท่อรองแบบสวนทวาร (Gate: Bottom)

ดังนี้จึงเป็น 2x3x3 แฟคตอเรียล ซึ่งเท่ากับมีเงื่อนไขการทดลองอยู่ 18 ข้อ หลังจากที่ได้พิจารณาเงื่อนไขทั้งชุดและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้จากการตัดสินใจผิดพลาด จึงเลือกทำเงื่อนไขการทดลองแต่ละข้อซ้ำสามครั้ง ทำให้ต้องหล่อตัวอย่างชิ้นงานจำนวน 54 ชิ้น ตามลำดับการหล่อที่โปรแกรม SPSS กำหนดให้ โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) แล้ววัดค่าตัวแปร (Yield) คือ จำนวนจุดเสียบนชิ้นงาน จุดเสียในที่นี้หมายถึงจุดที่ต้องแก้ไขด้วยการเชื่อมต่อ กรอ และ/หรือแต่ง ได้แก่ หลุม รูเข็ม รูแก๊ส รูโบ๋ และรอยซ้อนเย็น รูโบ๋เป็นบริเวณของชิ้นงานหล่อที่เติมได้ไม่เต็มตามที่ต้องการ ในขณะที่รอยต่อเย็นเป็นบริเวณที่แนวโลหะเหลวสองแนวมาชนกันแต่ไม่เชื่อมเข้าด้วยกันเป็นเนื้อ

เดียว ประดิมากรรมที่หล่อแล้วทั้งหมดถูกนำมาพิจารณาหลังจากที่ทำความสะอาดด้วยการพ่นอลูมินาผงขนาด 80 เมช แล้ว เพื่อนับจำนวน รูเข็ม และจุดเสียทั้งเล็กและใหญ่ ในขณะที่รูเข็ม หรือรูแก๊ส ส่วนใหญ่จะถูกกรอแล้วขัด แต่รูโบ่และรอยต่อเย็น ต้องนำไปเชื่อมต่อ แล้วกรอรอยเชื่อม

ในการทดสอบสมมติฐาน เมื่อเปรียบเทียบค่า F วิกฤติ ที่ระดับความมั่นใจ 95 % กับค่า F ในตารางที่ 1 Analysis of Variance for Yield มีสมมติฐานว่างเพียงข้อเดียวเท่านั้นที่อาจปฏิเสธได้ คือ เหล็กไร้สนิม 18-8 ซึ่งมีส่วนประกอบซิลิกอนอยู่แล้ว 0.75 % โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มซิลิกอนเข้าไปอีกเท่าตัวเป็น 1.5 % จะมีจำนวนจุดเสียอันเนื่องมาจากหลุม รูเข็ม รูแก๊ส รูโบ่ และรอยซ้อนเย็น ในชิ้นงานประดิมากรรมไม่ต่างจากเหล็กไร้สนิม 18-8 เดิม

นอกจากนั้น ตารางที่ 1 ยังแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ไม่ว่าชิ้นงานประดิมากรรมจะเป็นแบบกลวงมีผิวเรียบไม่มีรายละเอียด หรือแบบกลวงผิวหยาบหรือมีรายละเอียด หรือแบบตัน และไม่ว่าจะใช้ระบบท่อเทหลักท่อเดียวทางตรง หรือระบบท่อรองแบบขั้นบันได หรือแบบสวนทวาร ทั้งอันตรกิริยาระหว่างแฟคเตอร์เหล่านี้ และอันตรกิริยากับซิลิกอน ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อจำนวนจุดเสีย

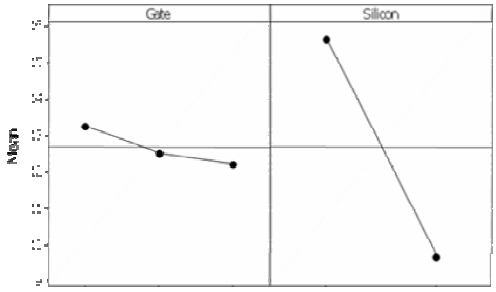
ตารางที่ 1 Analysis of Variance for Yield

Analysis of Variance for Yield, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Design	2	1	1	0.5	0.06	0.945
Gate	2	10.778	10.778	5.389	0.61	0.548
Silicon	1	486	486	486	55.13	0
Design*Gate	4	24.889	24.889	6.222	0.71	0.593
Design*Silicon	2	7.444	7.444	3.722	0.42	0.659
Gate*Silicon	2	33.444	33.444	16.722	1.9	0.165
Design*Gate*Silicon	4	87.111	87.111	21.778	2.47	0.062
Error	36	317.333	317.333	8.815		
Total	53	968				

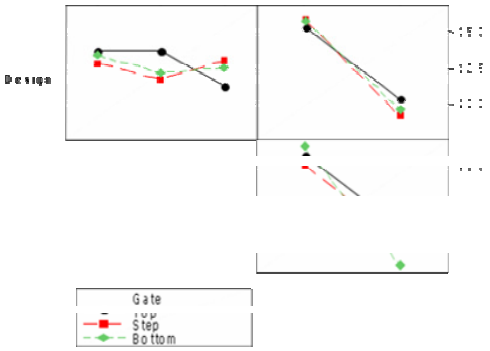
ในตารางที่ 2 Main Effects Plot for Yield ข้อมูลที่ทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนเป็น 1.5 % จำนวนจุดเสียที่เกิดขึ้นจากการหล่อในชิ้นงานประดิมากรรมลดลงอย่างรุนแรง

ตารางที่ 2 Main Effects Plot for Yield



แม้ตารางที่ 3 Interaction Plot for Yield จะแสดงให้เห็นว่ามีอันตรกิริยาระหว่างลักษณะผิวประดิมากรรมกับซิลิกอน และมีอันตรกิริยาในหมู่ลักษณะผิวประดิมากรรม และระบบท่อเทกับซิลิกอน แต่ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อันตรกิริยาต่าง ๆ เหล่านี้ก็ไม่มีนัยสำคัญ โดยเฉพาะ ยิ่งเป็นกรณีที่ลักษณะผิวประดิมากรรมและระบบท่อเทไม่ได้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ ด้วยแล้ว การตั้งข้อสรุปใด ๆ ให้ได้อย่างแม่นยำคงทำได้ยาก อย่างไรก็ตาม ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า โดยภาพรวม ระบบท่อแบบสวนทวาร เป็นวิธีที่มีความปลอดภัยที่สุดในแง่ของการลดจุดเสียบนผิวงานหล่อ

ตารางที่ 3 Interaction Plot for Yield



4. สรุปและผลกระทบ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองและประเมินผลสมมติฐานที่ได้จากประสบการณ์การหล่อประติมากรรมทองสำริดซิลิกอน ว่าหากเติมซิลิกอนลงในเหล็กไร้สนิม 18-8 จะทำให้โลหะเหลวไหลได้สะดวกในการหล่อประติมากรรมด้วยพิมพ์กระดองเซรามิก และจะส่งผลให้มีจำนวนจุดเสียน้อยลง เช่นเดียวกับผลกระทบในทองสำริดซิลิกอน แม้ผลที่ได้จากการทดลองนี้จะยืนยันสมมติฐานดังกล่าว และลดต้นทุนการผลิตประติมากรรมเหล็กไร้สนิมได้จริง เพราะมีจำนวนจุดเสียน้อยลง ทำให้ต้องใช้แรงงานและต้นทุนในการทำขั้นตอนถัดไปน้อยลงตามไปด้วย

ข้อควรสังเกตประการสำคัญ คือ การทดลองครั้งนี้เป็นการวิจัยปฏิบัติการ ใช้สภาพการทำงานหล่อโลหะในโรงงานตามที่เป็นอยู่ โดยไม่ได้เปลี่ยนแปลงให้มีสภาพเหมือนการทำงานในห้องทดลอง และเป็นการลองผิดลองถูกเพื่อแก้ปัญหาในโรงหล่อ ที่อาจถือได้ว่าเป็นเพียงการเบิกทาง ที่อาจมีข้อจำกัดอยู่อีกมาก ที่จำเป็นต้องวิจัยอย่างละเอียดในห้องทดลองต่อไป

ข้อจำกัดประการแรก สืบเนื่องมาจากเหล็กไร้สนิมที่ใช้เป็นวัตถุดิบเป็นเศษโลหะ ที่เหลือจากงานกลึงและงานปั๊มโลหะ ปนกันไป ไม่ได้ผ่านการแยกคัด หรือวิเคราะห์ส่วนประกอบ เพื่อยืนยันก่อนนำไปหลอมละลาย แต่เชื่อถือกันระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายเศษวัสดุ ว่าเป็นเหล็กไร้สนิม 18-8 ส่วนการจัดระบบท่อเทก็เป็นวิธีที่ทำกันตามที่เคยปฏิบัติมา ไม่ได้คำนวณปริมาตรกระสวนขี้ผึ้งอย่างแม่นยำ นอกจากนั้น ในการผสมโลหะก็เป็นการชั่ง ตวง วัด ที่ไม่ได้ใช้กระบวนวิธีที่มีการควบคุมอย่างเข้มงวดเหมือนในห้องทดลอง

ประการที่สอง การทดลองครั้งนี้ เป็นกรณีศึกษาในโรงหล่อเพียงแห่งเดียว ที่ผู้วิจัยเองมีส่วนร่วมและส่วนได้ส่วนเสีย ในการออกแบบและปรับปรุงคุณภาพงานหล่อประติมากรรม แม้จะค้นพบเหล็กไร้สนิมสูตรใหม่ขึ้นมาจากการทดลองครั้งนี้ ก็ควรถือว่าเป็นเพราะความเชื่อและความบังเอิญ ผู้วิจัยไม่มีทฤษฎีทางวัสดุศาสตร์เพื่ออธิบายโครงสร้างการเรียงตัวของโมเลกุล และเพราะเป็นเรื่องนอกเหนือภูมิปัญญาของช่างศิลป์ธรรมดา จึงต้องยกให้เป็นเรื่องของวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ เป็นผู้อธิบายเหตุผลที่แท้จริงด้วยภาษาทางเทคนิค ว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น และทำการทดลองหาสูตรส่วนผสมเหล็กไร้สนิม 18-8 สำหรับหล่อประติมากรรมด้วยพิมพ์กระดองเซรามิกที่ใช้สารละลายซิลิกาแขวนลอย ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างแท้จริง ที่อาจนำไปกล่าวสรุปเพื่อการอ้างอิงได้ครอบจักรวาลต่อไป

แต่ข้อสรุปประการหนึ่ง ที่อาจดึงออกมาได้จากการวิจัยนี้ คือ ผลการทดลองสอดคล้องกับคำพูดของบทความคลาสสิกของสมมาตร[8] ซึ่งเป็นคำที่กล่าวไว้เมื่อยี่สิบปีก่อนหน้านี้ว่า การลดต้นทุนทางอุตสาหกรรมย่อมมีเทคนิค ที่ต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมทางอุตสาหกรรมแต่ละแห่ง แม้จะเป็นอุตสาหกรรมประเภทเดียวกัน ในบางครั้งแนวทางที่ใช้ในการลดต้นทุนของโรงงานแห่งหนึ่ง อาจใช้ไม่ได้กับโรงงานอีกแห่งหนึ่งก็ได้ อย่างไรก็ตาม มีเทคนิคหลายอย่างที่ใช้ร่วมกันได้ หรือไม่ก็เป็นแนวทาง ที่จะดัดแปลงใช้ให้เหมาะสมกับสถานการณ์ต่อไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบรรดาผู้จัดการและซุปเปอร์ไวเซอร์ของโรงหล่อ บริษัทไทยเมทัลคราฟเตอร์ส จำกัด ไทรน้อย นนทบุรี ที่เป็นกำลังสำคัญให้การทดลองครั้งนี้ดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] de Marchi, John. (1998). *Sculpture Magazine*, January, Vol 1, No 1, pp. 1-6.

[2] Horendeen, Lee. (2008). *Why use stainless steel on appliances ?* [Online] Available from: http://www.Artmetal.com/blog/lee_herendeen /2008 [Accessed: 14th January 2009].

[3] Twarog, Daniel L. (1990). *Modern Casting*, August, pp. 1-8.

[4] Young, Ron D. (1989). *Contemporary Patination*, CA: Sculpt-Nouveau, p.4.

[5] พรสนอง วงศ์สิงห์ทอง. (2549). *ศิลปะการหล่อมัณฑนภัณฑ์และประติมากรรมทองสำริด: เทคนิค*

การสูญขี้ผึ้งแบบใหม่. กรุงเทพฯ: วิสคอมเซ็นเตอร์. น. คำนำ.

[6] พรสนอง (2549). น. 52.

[7] พรสนอง (2549). น. 53

[8] สมมาตร สุพานิชย์วิทย์. (2548). เทคนิคการลดต้นทุนอุตสาหกรรม บทความคลาสสิกเมื่อ 20 ปีก่อน. *วารสารเทคนิค เครื่องกล ไฟฟ้า อุตสาหกรรม*. ปีที่ 21 ฉบับที่ 244 หน้า 187 มกราคม 2548