การปรับปรุงวิธีทำพิมพ์กระดองเซรามิคเพื่อใช้ในการหล่อประติมากรรมทองสำริดขนาดใหญ่

A Resolution to the Life-Size Fine Art Bronze Casting with Ceramic Shell Technique

พรสนอง วงศ์สิงห์ทอง*

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เสนอวิธีทำพิมพ์กระดองเซรามิคแบบใหม่ ที่ออกแบบขึ้นด้วยวัตถุประสงค์สองประการ คือ (1) เพื่อให้มีความแข็งแรง ไม่บิดตัว สามารถต้านทานการบวมเป่งและแตกร้าวในขณะที่เททอง และ(2) เพื่อให้สามารถผลิตประติมากรรมขนาดใหญ่ได้เร็วและมีต้นทุนต่ำ โดยไม่ต้องลงทุนด้านเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์เพิ่มเติม วิธีใหม่นี้พัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาที่ประสบ จากการใช้วิธีแบบดั้งเดิมในการหล่อประติมากรรมทองสำริดขนาดใหญ่ ซึ่งประกอบด้วย แถบโฟมเสริมผนังด้านในให้ระบบกระสวนขี้ผึ้งแข็งแรงขึ้น เหมือนกระดูกงู และใช้ขี้ผึ้งที่ผสมขึ้นใหม่ จากไมโครคริสตัลลีนหนึ่งส่วน กับซันอีกหนึ่งส่วน พร้อมกับใช้ระบบเพลาอย่างง่ายมาพยุงระบบกระสวนขี้ผึ้ง ช่วยให้การเคลือบผนังกระดองทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น นอกจากนั้น เมื่อเคลือบกระดองถึงชั้นกึ่งกลาง ก็ใช้ตาข่ายเล้าไก่พันไว้โดยรอบเป็นการเสริมแรงกระดอง วิธีนี้ถูกนำไปประกบคู่กับวิธีแบบดั้งเดิมในการทดสอบตามแบบฉบับการทดลอง 2^3 แฟคตอเรียล โดยใช้ประติมากรรมขนาดใหญ่เป็นตัวอย่างในการทดลอง แล้วประเมินประสิทธิภาพ การผลิตพิมพ์กระดองเซรามิค และความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งสรุปได้ว่าวิธีใหม่นี้ผลิตชิ้นงานหล่อได้คุณภาพดีพอกับวิธีแบบดั้งเดิม แต่วิธีใหม่นี้มีข้อได้เปรียบในการหล่อประติมากรรมที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตโดยรวมต่ำลง และย่นระยะเวลาในการผลิต วิธีนี้อาจนำไปใช้ในโรงหล่ออื่นๆที่มีงบประมาณจำกัดได้อย่างดี เพราะไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่มีราคาแพงแต่อย่างใด

คำสำคัญ : การหล่อประติมากรรมทองสำริด, เทคนิคประติมากรรม, เทคนิคกระดองเซรามิค

Abstract

This research proposes a simple method for preparing stronger ceramic shell mold with two objectives: (1) to avoid twisting, expanding and cracking while pouring melting bronze and (2) to help shortening production lead time of life-size bronze sculptures and lowering cost without an investment in heavy machineries and equipments. It was developed to resolve the recurring problems in life-size fine art bronze casting with traditional method. The method comprises applying a reinforcing foam skeleton to an inner wall of wax pattern system using one to one ratio of microcrystalline wax and rosin; a simple bearing-like apparatus to support the wax pattern system and ameliorate the process of shell layer building; and an additional layer of chicken wire in the middle of shell wall thickness. This method was then paired with the traditional method in 2^3 Factorial Experiment Design to evaluate for its strength and effectiveness in casting samples of life size bronze sculptures. It was found that this method provided casting quality as good as the existing method but can be used to cast larger size sculpture more effectively resulting in decreasing overall manufacturing cost and lead time. This method

* รองศาสตราจารย์ ภาควิชานฤมิตศิลป์ คณะศิลปกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

can be open up for use by fine art bronze foundries with limited budgets as the need for expensive capital equipment associated with the method is almost negligible.

Keywords : Fine Art Bronze Casting, Sculpture Technique, Ceramic Shell Technique

1. บทนำ

เมื่อนโปเลียนออกใบสั่งซื้อปืนใหญ่ให้กองทัพ บรรดาโรงหล่อเข้าใจกันดีว่า ต้องจัดส่งให้อย่างรวดเร็ว หากจัดส่งอย่างล่าช้า ไม่ว่าจะด้วยเหตุใด ก็ต้องส่งตัวผู้จัดการโรงหล่อเข้าเครื่องกิโยติน เหตุนี้ทำให้บรรดาผู้จัดการโรงหล่อต้องจัดการทำตามใบสั่งซื้อของกองทหารปืนใหญ่อย่างรวดเร็ว แต่ด้วยความเร่งรีบ ทำให้ปืนบางกระบอกดี บางกระบอกไม่ดี บ่อยครั้งเมื่อยิง ปืนใหญ่ก็แตกระเบิด ทำให้เสียพลปืนใหญ่ไปจำนวนมาก และคนในอาชีพช่างหล่อก็ลดจำนวนลงไม่น้อย ความล้มเหลวในครั้งนั้นสืบเนื่องมาจากการหล่อที่ขาดคุณภาพและหล่อไม่ทันตามกำหนด[1] แม้ว่าจากสมัยนโปเลียนมาจนถึงทุกวันนี้ บรรดาโรงหล่อได้หันไปใช้เทคนิคการหล่อใหม่ๆ ที่ช่วยให้หล่อได้รวดเร็วและมีคุณภาพสูงขึ้นแล้วก็ตาม ภาวะสงครามทางเศรษฐกิจในช่วงทศวรรษที่แล้วเป็นต้นมา โรงหล่อที่ผลิตประติมากรรมทองสำริดเป็นสินค้าส่งออกเข้าสู่ตลาดตะวันตก ต่างก็ต้องแข่งขันกับโรงหล่อในประเทศจีน กลยุทธ์ทางการผลิตของโรงหล่อประติมากรรมในประเทศไทย คือ การควบคุมการผลิตให้มีต้นทุนต่ำ และต้องผลิตให้มีคุณภาพสูงเท่าฝีมือช่างประติมากรรมชาวฝรั่งเศส ซึ่งมีประวัติการหล่อประติมากรรมมายาวนาน นอกจากนั้นยังต้องใช้เทคโนโลยีการผลิตที่รวดเร็วเท่ากระบวนการผลิตชาวอเมริกัน ซึ่งได้ชื่อว่าเป็นผู้นำทางเทคโนโลยี ประติมากรรม เทคโนโลยีใหม่ๆ เช่น Laser Scanner, CAD/CAM, และ Rapidprototyping จึงถูกนำเข้ามาใช้ในการผลิตประติมากรรม เพื่อมาช่วยย่นระยะเวลาในการย่อขยาย และขึ้นรูปต้นแบบประติมากรรม [2] เช่นเครื่อง CNC สี่แกนทำให้ย่นระยะเวลาในการขึ้นต้นแบบประติมากรรมรูปคนสูง 7 เมตรจากเดิม 3 เดือน เหลือเพียง 2 สัปดาห์ เป็นต้น [3]

แต่เทคนิคการหล่อประติมากรรมทองสำริด ก็ยังคงเหมือนกับการหล่อปืนใหญ่สมัยนโปเลียน คือ อาจทำได้หลายวิธี นับตั้งแต่การใช้พิมพ์ทราย พิมพ์ขี้วัว พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ และล่าสุดพิมพ์กระดองเซรามิค (Ceramic Shell Mold) เทคนิคการหล่อสูญขี้ผึ้ง (Lost Wax Technique) แบบใหม่นี้ใช้หล่อชิ้นงานได้แม่นยำมาก จนไม่จำเป็นต้องใช้ฝีมือช่างศิลป์ที่มีประสบการณ์และทักษะสูงกันอีกต่อไป ซึ่งในท้ายที่สุด ก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ผลิตประติมากรรมทองสำริดได้รวดเร็วขึ้นและมีต้นทุนต่ำลง [4] แม้กระดองเซรามิคจะเป็นเทคนิคที่ดีที่สุดในแง่ของความแม่นยำ แต่เมื่อนำมาใช้ในการหล่อประติมากรรมขนาดใหญ่ ในทางปฏิบัติก็ยังคงตัดแบ่งงานออกเป็นท่อนเล็ก ๆ หรือเป็นแผ่นขนาดเล็ก ให้พิมพ์รับน้ำหนักไม่เกิน 30 กก. ทั้งนี้เพราะเชื่อกันว่าถ้ามีแรงดันจากน้ำหนักโลหะเหลวมากกว่านี้ พิมพ์ก็จะเบ่งตัวแบ่งออก ซึ่งทำให้โพรงในพิมพ์กว้างออก ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาต่างจากที่ตั้งใจไว้ ทั้งยังเพิ่มน้ำหนักทองสำริดโดยใช่เหตุ ทำให้ชิ้นงานมีต้นทุนสูงขึ้น ประการสำคัญ แรงดันจากน้ำหนักทองสำริดเพิ่มขึ้นเพราะพิมพ์เบ่งตัว อาจทำให้พิมพ์แตก ลักษณะแบบนี้จะเห็นได้จาก (รูปที่ 1) ที่แสดงให้เห็นถึง

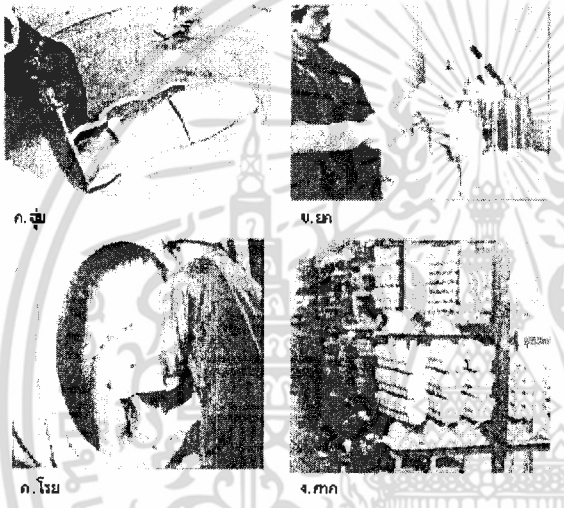
รูปที่ 1 แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์

พิมพ์ที่แตกออก ทำให้ทองสำริดที่เหลวอยู่ไหลออกจากพิมพ์ในขณะที่กำลังเททอง ทำให้การเททองล้มเหลว การทำพิมพ์กระดองเซรามิคขนาดใหญ่ นอกจากเกิดความล้มเหลวได้ง่ายแล้ว ยังปฏิบัติงานได้ไม่สะดวก เพราะการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนย้ายพิมพ์ที่ต้องใช้แรงคน จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทุ่นแรง หรือเครื่องกลที่มีราคาสูง ซึ่งไม่เหมาะกับโรงหล่อขนาดเล็ก ที่มีเงินลงทุนต่ำ

หัวใจของพิมพ์กระดองเซรามิคอยู่ที่กระสวนขี้ผึ้ง ด้วยเหตุที่ขี้ผึ้งอ่อนตัวได้ง่าย เมื่อหล่อเป็นชิ้นใหญ่ กระสวนนี้ต้องแบกน้ำหนักกระดองที่หนาขึ้นและหนักขึ้นทุกที ตามจำนวนชั้นกระดอง กระสวนนี้จะทรุดตัวลง และบิดขาดออกจากระบบท่อ นอกจากนั้น ในกระบวนการทำพิมพ์กระดองเซรามิค (รูปที่ 2) จะต้องปั่นสารละลายซิลิกา



รูปที่ 2 การผลิตพิมพ์กระดองเซรามิค

แขวนลอย (Colloidal Silica Slurry) หรือน้ำโคลน ซึ่งมีความหนืดสูงอยู่ตลอดเวลา ไม่เช่นนั้นก็จะตกตะกอนและแข็งตัวใช้งานไม่ได้ กรณีนี้กลายเป็นจุดอ่อนอีกข้อหนึ่งในการทำพิมพ์กระดองเซรามิคขนาดใหญ่ เพราะต้องนำกระสวนขี้ผึ้งที่ต่อเข้าด้วยกันกับท่อเทเป็นระบบแล้ว มาจุ่มลงในถัง เมื่อระบบกระสวนขี้ผึ้งมีขนาดใหญ่ ก็ต้องใช้ถังพร้อมกับมอเตอร์ปั่นที่มีขนาดใหญ่ และเครื่องมือกลในการยกและกดจุ่มระบบกระสวนขี้ผึ้งลงในถัง แรงกดจุ่มอาจทำให้ชิ้นขี้ผึ้งบิดเบี้ยวหรือแตกหักได้ อีกทั้งเมื่อมีน้ำหนักมากขึ้น การเคลื่อนย้ายไปมาระหว่างถังปั่นกับบริเวณที่โรยสารทนไฟ และบริเวณที่ตากกระดองเซรามิคก็ทำได้ลำบาก และไม่มีประสิทธิภาพ การใช้ถังปั่นขนาดใหญ่ การใช้เครื่องมือกล การเพิ่มจำนวนพนักงาน ความเสี่ยงจากการแตกหักในการขนย้ายและการจุ่ม ล้วนเป็นอุปสรรคในการทำพิมพ์กระดองเซรามิคขนาดใหญ่ของวิธีแบบดั้งเดิม

ในช่วงเวลาสิบปีที่ผ่านมา นักวิจัยพยายามค้นหาทางเสริมความแข็งแรงให้กับวิธีการทำพิมพ์กระดองเซรามิคแบบดั้งเดิม เช่น การใช้วัสดุผสมอย่างอื่นมาแทน และหรือผสมเพื่อช่วยลดการแบ่งตัว [5] สอดแผ่นเหล็กใยอลูมินาเข้าไปในชั้นกระดอง ซึ่งถือเป็นความพยายามอีกทางหนึ่งที่จะต้าน [6] การบวมเป่งของกระดองเซรามิคในขณะที่เทโลหะ แต่ก็ไม่เพียงพอสำหรับการหล่อประติมากรรมที่ใช้กระสวนขี้ผึ้งขนาดใหญ่ [7] ใช้เส้นใยคาร์บอนซึ่งต้านอัตราการยืดตัวได้สูง แม้จะกล่าวอ้างว่าสามารถรองรับน้ำหนักโลหะได้ตั้งแต่ 20 กก.ถึง 135 กก. ในการหล่อเครื่องกังหัน แต่เส้นใยดังกล่าวก็มีราคาแพง และเมื่อนำมาผนวกกับวิธีแบบดั้งเดิม แล้วใช้หล่อประติมากรรมทองสำริด ซึ่งมีรูปทรงที่สลับซับซ้อนกว่าเครื่องกังหันมากก็ไม่สามารถรองรับน้ำหนักทองสำริดได้เกินกว่า 50 กก.

ในแง่ศิลปะ ถ้าสามารถหล่อชิ้นส่วนงานประติมากรรมให้ได้ขนาดใหญ่มากเท่าไร จะทำให้รูปทรงของงานประติมากรรมมีความแม่นยำ กว่าการประกอบชิ้นงานหล่อเล็ก ๆ เข้าด้วยกันมากเท่านั้น โดยเฉพาะเมื่อประติมากรรมมีรูปทรงที่สลับซับซ้อน และในแง่การผลิต ก็จะลดเวลาในการเชื่อมและการแต่งผิวชิ้นงานลงได้มากเท่านั้น ความแม่นยำที่เพิ่มขึ้นย่อมทำให้งานมีคุณภาพสูงขึ้น ส่วนเวลาที่ลดลงย่อมทำให้งานเสร็จได้ทันตามกำหนดเวลา และจัดส่งได้เร็วขึ้น เท่ากับเป็นการเพิ่มกำลังการผลิตโดยไม่ได้เพิ่มต้นทุน ซึ่งทำให้สามารถแข่งขันอย่างได้เปรียบกับคู่แข่ง และทำให้โรงหล่อเจริญเติบโตได้ และมีผลกำไรมากขึ้นในท้ายที่สุด

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงเป็นความจำเป็นอันยิ่งยวด ที่จะต้องมีอุปกรณ์และกระบวนวิธีผลิตพิมพ์กระดองเซรามิคที่สามารถต้านทานการบิดตัว การบวมเป่ง การทรุดตัว และการแตกร้าว เพื่อช่วยให้หล่อชิ้นประติมากรรมขนาดใหญ่ได้ต้องตามพิกัดความหนาบางที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

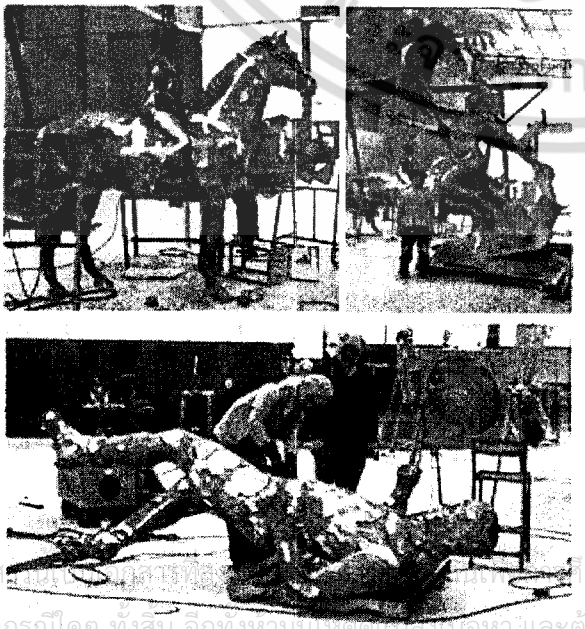
2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เป้าหมายของการวิจัยครั้งนี้ต้องการนำเสนอวิธีในการทำพิมพ์กระดองเซรามิคแบบใหม่ ที่ (1) มีความแข็งแรงไม่บิดตัว และสามารถต้านทานการบวมเป่งและแตกร้าวอันเนื่องมาจากน้ำหนักทองสำริดเหลวในขณะที่เททอง และ (2) ช่วยให้สามารถผลิตประติมากรรมขนาดใหญ่ได้เร็วขึ้นและมีต้นทุนต่ำ โดยไม่ต้องลงทุนด้านเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์เพิ่มเติม

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองครั้งนี้เป็นการประเมินความแข็งแรงและประสิทธิภาพวิธีทำพิมพ์กระดองเซรามิคพร้อมกับระบบเพลาที่ได้ออกแบบขึ้นใหม่ เปรียบเทียบกับวิธีแบบดั้งเดิม โดยใช้โรงหล่อของบริษัทไทยเมทัลคราฟเตอร์สจำกัด ตั้งอยู่ที่อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี เพียงโรงเดียวเป็นกรณีศึกษา ทั้งนี้เพราะการหล่อประติมากรรมทองสำริดขนาดใหญ่ในประเทศไทย ยังใช้พิมพ์ทรายกันเป็นหลัก และโรงหล่อที่ใช้เทคนิคกระดองเซรามิคหล่อประติมากรรมขนาดใหญ่ได้ ก็ยังมีเพียงไม่กี่ราย

ประชากรประติมากรรมขนาดใหญ่ของโรงหล่อที่ใช้ในกรณีศึกษานี้ หมายถึง ประติมากรรมที่มีขนาดตั้งแต่เท่าคนจริง จนถึงขนาดอนุสาวรีย์ ในจำนวนที่มีอยู่ทั้งหมดรวม 47 แบบ ได้เลือกมาใช้เป็นกลุ่มตัวอย่างในการทดลอง 4 แบบ (รูปที่ 3)

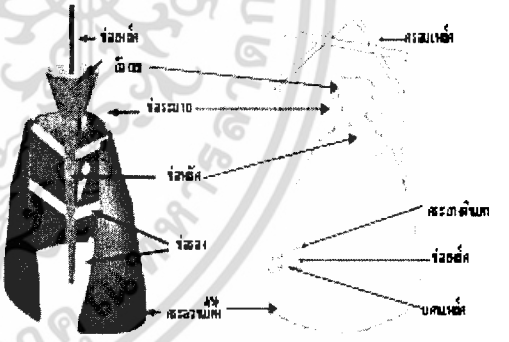


รูปที่ 3 ตัวอย่างประติมากรรมขนาดใหญ่ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3 (ต่อ)

แบบละ 2 ชิ้น รวม 8 ชิ้น โดยใช้การเลือกตัวอย่างแบบบังเอิญ เพราะกำหนดการผลิตชิ้นงานเหล่านี้อยู่ในช่วงเวลาเดียวกับการทำวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ คือ ระบบกระสวนขี้ผึ้ง ที่ทำขึ้นทั้งตามวิธีแบบดั้งเดิมกับวิธีใหม่ซึ่งมีระบบเพลา ดังรูปที่ 4 ระบบเพลานั้นประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้



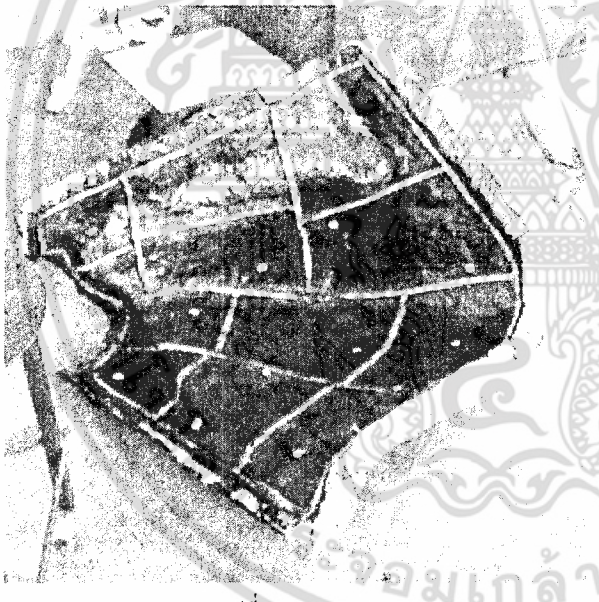
รูปที่ 4 ระบบกระสวนขี้ผึ้งวิธีแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับวิธีใหม่พร้อมด้วยระบบเพลา

(1) กระถางดินเผาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 60 มม. ซึ่งมีปลายตีบเข้าหาส่วนก้นที่ตัดแล้วจนเหลือเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 40 มม. กระถางนี้ทำหน้าที่เหมือนแบริ่ง (2) เพลาทำด้วยท่อเหล็กหนา 1 มม. มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 มม. ยาวเกินกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางช่วงที่กว้างที่สุดของกระสวนออกไปประมาณข้างละ 150 มม. (3) แกนเหล็กข้ออ้อยขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. มีความยาวกว่าเพลาออกไปประมาณข้างละ 150 มม. และ (4) โครงแขวนเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม.พับเป็นแขนสองข้างเท่า ๆ กัน แขนยาวเกินครึ่งหนึ่งของกระสวนขี้ผึ้งออกไปประมาณ 300 มม.หรือมากกว่านี้ ระยะระหว่างแขนสองข้างกว้างกว่าเพลาเล็กน้อย มีปลายแขนพับเป็นมือหิ้ว

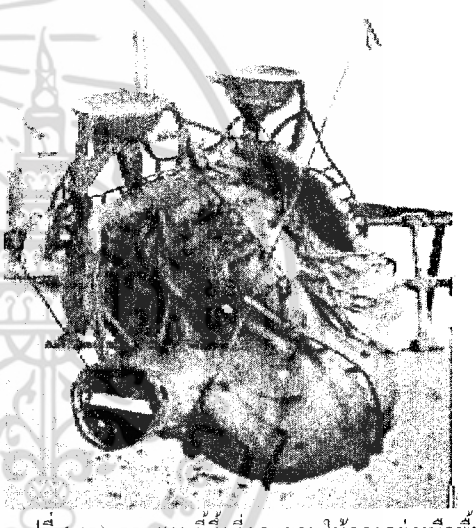
กระสวนขี้ผึ้ง ซึ่งเป็นหัวใจของพิมพ์กระดองเซรามิค ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อช่วยให้ชิ้นงานหล่อทองสำริดที่ได้มีความแม่นยำสูงขึ้น และเพื่อช่วยรับน้ำหนักกระดองในกระบวนการหุ้มกระดองอีกทางหนึ่ง ใช้ขี้ผึ้งที่ผสมขึ้นใหม่ประกอบด้วย ขี้ผึ้งไมโครคริสตัลลีน หนึ่งส่วน กับชันหนึ่งส่วน นอกเหนือจากการหล่อกระสวนให้ได้ตามความหนาที่ต้องการแล้ว ยังใช้แถบโฟม หน้าตัด 10 มม. เสริมผนังด้านในกระสวนขี้ผึ้งทำหน้าที่เหมือนกระดูกงู (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 กระดูกงู

การติดกระดูกงูเช่นนี้ นอกจากจะช่วยพยุงให้กระสวนตั้งอยู่ได้แล้ว ยังกลายไปเป็นท่อนำทองสำริดเหลวส่งไปยังส่วนต่างๆในโพรงกระดอง นอกจากนี้ยังเป็นส่วนที่ทำให้งานประติมากรรมทองสำริดแข็งแรงขึ้นอีกด้วย ระบบเพลาเสริมนี้ทำหน้าที่แทนท่อเหล็กในวิธีแบบดั้งเดิม คือ ช่วยพยุงกระสวนขี้ผึ้งในขณะที่จุ่ม ตาก และโรยสารทนไฟ

เมื่อจะประกอบเพลาเสริมนี้เข้ากับระบบกระสวนขี้ผึ้ง ก็จะนำกระถางดินเผาที่ตัดก้นออกแล้วมาเสียบลงบริเวณกึ่งกลางช่วงที่กว้างที่สุดของกระสวน ให้กระถางอยู่ด้านตรงข้ามในแนวเส้นตรงเดียวกัน นำเพลาท่อเหล็กไปทาขี้ผึ้งด้านนอกให้หนาประมาณ 1 มม. แล้วนำมาสอดเข้าไปในกระถางดินเผาทั้งสอง ให้ส่วนปลายมีระยะห่างจากปากถ้วยดินเผาเท่าๆกัน ใช้ขี้ผึ้งอุดช่องว่างระหว่างเพลากับกระถางจนเต็ม เมื่อขี้ผึ้งแข็งตัว เพลา กระถางและกระสวนจะยึดติดกันเป็นเนื้อเดียว นำแกนเหล็กมาสอดเข้าไปในเพลา แล้วนำไปพาดบนปลายแขนของกรอบเหล็ก ในการใช้งานจะแขวนระบบเพลานี้ ให้กระสวนขี้ผึ้งลอยอยู่เหนือพื้นและหมุนอยู่รอบแกนเหล็กได้ (รูปที่ 6 ก.)



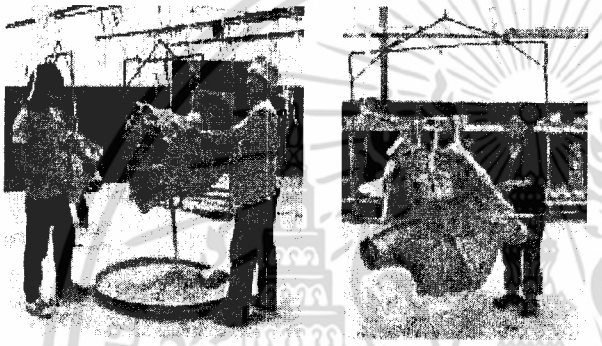
รูปที่ 6 (ก) กระสวนขี้ผึ้งที่ถูกแขวนให้ลอยอยู่เหนือพื้น

การเคลือบเซรามิควิธีใหม่ในทางปฏิบัติ แทนที่จะจุ่มระบบกระสวนขี้ผึ้งลงในถังน้ำโคลน กลับนำน้ำโคลนมาระบาย หรือราดลงบนกระสวน(รูปที่ 6 ข.) ในขณะที่ราด

รูปที่ 6 (ข) การราดน้ำโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็หมุนกระสวนไปรอบแกนตามแนวนอน การหมุนระบบกระสวนจะทำให้ได้ผนังกระดองเซรามิคที่สม่ำเสมอ และขจัดปัญหาไม่ให้น้ำโคลนไปขังอยู่ในซอกลึก ซึ่งจะทำให้ส่วนนั้นแห้งช้าและเมื่อนำไปเผาเพื่อสูญขี้ผึ้งก็จะแตกได้ง่าย ขณะที่หมุน ระดับองศาของกระสวนก็จะเปลี่ยนไป ทำให้น้ำโคลนไหลไปปิดมิดทุกซอก โดยเฉพาะในบริเวณที่ปิดได้ยากตามธรรมชาติของงานประติมากรรม ทำให้น้ำโคลนส่วนเกินไหลไปได้โดยไม่ขังอยู่ในซอก การโรยสารทนไฟก็ใช้วิธีเดียวกัน คือนำสารทนไฟมาโรยในจุดที่แขวนอยู่แล้วตากไว้ที่จุดเดิม (รูปที่ 6 ค.)



รูปที่ 6 (ค) การโรยสารทนไฟและการตากลม

ในวิธีใหม่แทนที่จะใช้เส้นใยแก้ว หรือเส้นใยคาร์บอน ซึ่งมีราคาแพง เพื่อเสริมความแข็งแรงของกระดอง กลับใช้ตาข่ายเล้าไก่แทน [8] พันรอบกระดอง ที่ชั้นกึ่งกลางของความหนาของพิมพ์ที่ต้องการ (รูปที่ 6 ง.) เช่นถัดจากชั้นที่สี่สำหรับการเคลือบสารทนไฟแปดชั้น อาจพันตลอดทั้งชิ้นหรือบริเวณที่ต้องการเสริมความแข็งแรงตาข่ายเล้าไก่นี้ช่วยชดเชย

รูปที่ 6 (ง) การมัดลวดตาข่าย

จุดอ่อนของพิมพ์กระดองเซรามิค เมื่อนำมาใช้ในการหล่อชิ้นงานขนาดใหญ่แม้ว่าการตอบสนองวัตถุประสงค์ ข้อแรก คือ การทดสอบสมมติฐานว่าวิธีใหม่จะทำให้กระดองเซรามิคขนาดใหญ่มีความแข็งแรงไม่แตกต่างจากวิธีแบบดั้งเดิม ความแข็งแรงวัดได้จากการเบ่งตัว หากมีความรุนแรงก็มองเห็นได้ทันทีด้วยการสังเกตว่า กระดองเซรามิคแตกหรือไม่แตก แต่หากไม่มีความรุนแรงก็จะมองไม่เห็นทันที การเบ่งตัวนี้เอง ที่ผันแปรทางตรงกับต้นทุนการผลิตชิ้นงานหล่อ เพราะงานหล่อที่หนาเกินความต้องการ ทำให้งานประติมากรรมมีน้ำหนักมากขึ้นโดยไม่จำเป็น และทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นโดยปริยาย

ด้วยเหตุที่ไม่อาจวัดการเบ่งตัวที่ไม่รุนแรงได้โดยตรง จึงวัดเอาจากผลของการเบ่งตัว คือ จากความหนาของชิ้นงานที่หล่อเสร็จแล้ว ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้เป็นตัวแปรตาม ความหนาของชิ้นงานหล่อ ตั้งสมมติฐานว่าขึ้นอยู่กับปัจจัย หรือตัวแปรอิสระสามตัว คือ (1) วิธีทำพิมพ์กระดองเซรามิค (2) ขนาดพื้นที่ผิวกระสวนขี้ผึ้ง และ (3)รูปทรงกระสวนขี้ผึ้ง และยังตั้งสมมติฐานต่อไปอีกได้ว่าอาจขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาระหว่างตัวแปรอิสระเหล่านี้อีกด้วย จึงจัดรูปการทดลองเข้าไปอยู่ในแบบ 2^3 Factorial Experiment เพราะได้ช่วยลดทั้งจำนวนกลุ่มตัวอย่างและจำนวนครั้งในการทดลอง โดยจำกัดตัวแปรอิสระวิธีการทำพิมพ์กระดองเซรามิค (Molding Method) อยู่เพียงสองระดับ คือ วิธีแบบดั้งเดิม (0) กับวิธีใหม่ (1) พื้นที่ผิวกระสวนขี้ผึ้ง(Wax Pattern Size)ก็แยกเป็นสองระดับเช่นกัน คือ พื้นที่ผิวน้อยกว่าหนึ่งตารางเมตร (Small) กับพื้นที่ผิวมากกว่าหนึ่งตารางเมตร (Large) ส่วนรูปทรงกระสวนขี้ผึ้ง (Pattern Shape) ก็แบ่งออกเป็นสองระดับ คือ ชิ้นที่เป็นแผ่นสองมิติ (2D) กับชิ้นที่เป็นท่อนสามมิติ (3D)

ส่วนวัตถุประสงค์ข้อที่สอง อันที่จริงเป็นการประเมินเปรียบเทียบประสิทธิภาพพิมพ์กระดองเซรามิคจากทั้งสองวิธี ประสิทธิภาพในกรณีนี้ นิยามออกมาเป็นข้อย่อยสี่ประเด็น คือ (1) ต้นทุนการผลิตประติมากรรม (2) ความรวดเร็วในการผลิตประติมากรรม (3) ความแม่นยำของชิ้นงานประติมากรรม และ (4) ความสะดวกในการใช้งานในชั้นแรก เป็นเพียงการประเมินภาพรวมของประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงใช้แบบสอบถามสำรวจความคิดเห็นของประชากรผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการใช้งาน ซึ่งมีเพียง 15 ราย ที่นับว่าเป็นจำนวนน้อย จึงใช้เป็นกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด และในชั้นหลัง เพื่อเป็นการยืนยันต้นทุน ซึ่งเป็นหัวใจของประสิทธิภาพ จึงสุ่มเลือกข้อมูลต้นทุนการผลิตประชากรประติมากรรมขนาดใหญ่ในบัญชีของโรงหล่อมาเป็นกลุ่มตัวอย่างจำนวน 20 ราย มาใช้ทดสอบ

4. ผลลัพธ์ การวิเคราะห์และการอภิปราย

ผลการสุ่มเจาะและวัดความหนาชิ้นงานหล่อประติมากรรมทองสำริด ที่ใช้เป็นกลุ่มตัวอย่างจำนวน 8 ชิ้น ซึ่งต้องการความหนาเพียง 6 มม. จำนวน 32 จุด ได้ข้อมูลเป็นหน่วย มม. ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลความหนาชิ้นงานหล่อทองสำริด

Wax Pattern (B)		Molding Method (T) 0 2D	0 3D	1 2D	1 3D	Average
(C)	Small	7.0	8.0	7.5	4.5	
		9.0	5.0	8.0	5.0	6.8
		7.5	6.5	7.0	8.0	
		7.5	6.5	6.0	6.0	
	Large	8.5	9.0	9.5	8.0	
		8.5	6.5	12.0	8.5	
		10.0	10.5	9.0	8.0	8.8
		12.5	7.5	8.0	5.0	
Average		7.5		8.1		
Average		2D = 8.6		3D = 7.0		

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาชิ้นงานหล่อในตารางที่ 2 ที่ระดับความมั่นใจ 95% และใช้ F-statistic ที่ df เท่ากับ 1 และ 24 ค่าวิกฤตตกอยู่ที่ $F \geq 4.26$ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า F ที่ได้ แสดงให้เห็นว่ามีสมมติฐานอยู่เพียงสองข้อเท่านั้นที่ปฏิเสธได้ คือ สมมติฐานว่าง (Null Hypothesis) ข้อที่ว่า ความหนาของชิ้นงานหล่อไม่ขึ้นอยู่กับรูปทรงกระสวนขี้ผึ้ง (Wax Pattern/B) กับข้อที่ว่า ความหนาของชิ้นงานหล่อไม่ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ผิวของกระสวนขี้ผึ้ง (Pattern Size/C) ส่วนสมมติฐานข้ออื่นๆ ไม่อาจปฏิเสธได้

ตารางที่ 2 ANOVA ของความหนาชิ้นงานหล่อทองสำริด

Source of Variation	Df	SS	MS	F	P
Molding Method(T)	1	2.82	2.82	1.02	0.017
Wax Pattern(B)	1	20.32	20.32	9.75*	0.004
TxB Interaction	1	0.20	0.20	0.09	0.764
Pattern Size (C)	1	31.01	31.01	15.98*	0.000
TXC Interaction	1	0.01	0.01	0.00	1.000
BXC Interaction	1	0.94	0.94	0.39	0.537
TxBxC Interaction	1	0.19	0.19	0.13	0.723
Error	24	53.44	2.23		
Total	31	108.93			

$P < 0.05$

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า มีเพียงรูปทรงกระสวนขี้ผึ้ง กับขนาดพื้นที่ผิวกระสวนขี้ผึ้งเท่านั้น ที่จะทำให้ชิ้นงานหล่อเบ่งตัวออกหรือไม่ ส่วนวิธีทำพิมพ์กระดองเซรามิค และปฏิกิริยาระหว่างตัวแปรอิสระทั้งสาม ไม่มีผลกระทบต่อการเบ่งตัวของชิ้นงานหล่อแต่อย่างใด

ค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระทั้งสอง (B กับ C) ในตารางที่ 1 ช่วยยืนยันได้ว่า รูปทรงกระสวนขี้ผึ้งมีผลกระทบต่อความหนาของชิ้นงานหล่อ ซึ่งหมายถึงการเบ่งตัว คือ กระดองเซรามิครูปทรงสองมิติเบ่งตัวมากกว่ากระดองที่มีรูปทรงสามมิติ(ค่าความแตกต่างเฉลี่ย 2D -3D = 8.6 -7.0 = 1.6 มม.) และขนาดพื้นที่ผิวกระสวนขี้ผึ้งก็มีผลกระทบต่อการเบ่งตัว งานชิ้นใหญ่เบ่งตัวออกมากกว่าชิ้นงานเล็กโดยเฉลี่ยอยู่ 2 มม. (Large – Small = 8.8- 6.8) ความแตกต่างข้อนี้ ไม่น่าประหลาดใจแต่อย่างใด เพราะมีเหตุผลอยู่หลายประการด้วยกัน เช่น อาจมาจากความหนาของกระสวนขี้ผึ้งที่หล่อขึ้น ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เสมอ เพราะเป็นการทาขี้ผึ้งลงบนแม่พิมพ์ยางซิลิโคนด้วยมือ หรืออาจเกิดขึ้นเพราะการเบ่งตัวของพิมพ์กระดองเซรามิคเอง หรืออาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากการขยายตัวตามอุณหภูมิในขณะที่ตากกระสวนขี้ผึ้งเมื่อเคลือบเซรามิคชั้นแรก ๆ ซึ่งเป็นช่วงที่เซรามิคยังไม่แข็งแรง

วัตถุประสงค์การวิจัยข้อที่สอง เป็นการหาว่าวิธีใหม่นี้ช่วยให้ผลิตประติมากรรมขนาดใหญ่ได้เร็วขึ้นและมีต้นทุนต่ำจริงหรือไม่ ดังตารางที่ 3 เป็นรายงานผลการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 รายงานการผลิตตัวอย่างประติมากรรม

	1		2		3		4	
ตัวอย่าง	ดั้งเดิม	ใหม่	ดั้งเดิม	ใหม่	ดั้งเดิม	ใหม่	ดั้งเดิม	ใหม่
ขนาด(ม.)	1×2.5×2.5		1.15×1.2×2.8		2×2.5×4		2×4×7	
กระดอง(ชิ้น)	15	5	9	4	42	12	40	22
น้ำหนัก (กก.)	460	530	260	275	900	1000	2500	2700
น้ำหนักกระดอง(กก.)	~30	~106	~28	~68	~21	~83	~62	~120
ช่างเชื่อม-แต่ง (คน)	3		3		3		5	
ระยะเวลา (วัน)	21	9	12	6	24	14	48	24

ประติมากรรมขั้นสุดท้าย แม้ในภาพรวมจะเห็นว่างานประติมากรรมที่หล่อขึ้นด้วยวิธีใหม่ มีน้ำหนักรวมมากกว่าชิ้นที่หล่อด้วยวิธีแบบดั้งเดิมไปหมดทุกกรณี ซึ่งหมายความว่า ต้องใช้ทองสำริดเพิ่มขึ้น ดังนี้ จึงมีต้นทุนสูงขึ้น แต่น้ำหนักส่วนเกินดูเหมือนเป็นส่วนเล็กน้อย หากเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการประกอบและแต่งชิ้นงานประติมากรรมที่ลดลง

เพื่อยืนยันว่าวิธีใหม่เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง จึงประเมินความคิดเห็นของประชากรที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับผลกระทบของวิธีทำพิมพ์กระดองเซรามิคแบบใหม่ คือพนักงาน พนักงาน ซุปเปอร์ไวเซอร์ และผู้จัดการ รวม 15 คน ซึ่งคะแนนเปรียบเทียบระหว่างวิธีทำแม่พิมพ์แบบใหม่กับแบบดั้งเดิม ใช้สเกลคะแนน 1 ถึง 5 เพื่อทดสอบสมมติฐาน 4 ข้อ คือ (1) ต้นทุนการผลิตประติมากรรม (2) ความรวดเร็วในการผลิตประติมากรรม (3) ความแม่นยำของชิ้นงานประติมากรรม และ (4) ความสะดวกในการใช้งาน

ด้วยเหตุที่เป็นข้อมูลจากตัวอย่างกลุ่มเดียว จึงใช้สถิติ Sign-Test กับข้อมูลที่วัดได้ [9] ด้วยการแปลงข้อมูลผลต่างระหว่างความคิดเห็นของผู้ที่ได้รับผลกระทบแต่ละคน (ลบคะแนนวิธีแบบดั้งเดิมออกจากคะแนนวิธีใหม่) ผลต่างที่ได้อยู่ในรูปเครื่องหมายบวกหรือลบ ผลสรุปดังตารางที่ 4 เมื่อใช้ระดับความน่าเชื่อถือที่ 95 % และด้วยเหตุz ที่สังเกตได้มีค่าเกินกว่าค่าวิกฤติ 1.96 ทุกปัจจัย จึงปฏิเสธสมมติฐานว่างทั้งสี่ข้อ

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์การสอบถามความคิดเห็น

ปัจจัย	y1 - y0	n	Z	z.05
1 ต้นทุนการผลิต	+	15	4.73	1.96
2 ความรวดเร็ว	+	10	4.43	1.96
3 ความแม่นยำ	+	15	4.73	1.96
4 ความสะดวก	+	14	2.67	1.96

แล้วสรุปว่าคะแนนการจัดอัตราเปรียบเทียบระหว่างวิธีแบบดั้งเดิมกับวิธีใหม่ต่างกัน และวิธีใหม่มีคะแนนการกระจายที่ขยับไปทางขวา(สูงกว่า) คะแนนการกระจายของวิธีแบบดั้งเดิม

จากตารางนี้จะเห็นได้ว่าสมมติฐานข้อที่ 2 (ความรวดเร็วในการผลิตประติมากรรม) ยืนยันรายงานในตารางที่ 3 ส่วนข้อที่ 4 (ความสะดวกในการใช้งาน) เป็นสมมติฐานที่เห็นได้ชัดด้วยสายตา โดยไม่จำเป็นต้องตรวจสอบซ้ำ เพราะการที่ไม่ต้องเคลื่อนย้ายพิมพ์กระดองเซรามิคที่มีน้ำหนักมาก สลับไปมาระหว่างการจุ่มกับการโรย และลักษณะที่ระบบกระสวนขี้ผึ้งหมุนรอบแกนได้ ทำให้ทำงานได้สะดวกขึ้น แต่สมมติฐานข้อที่ 1 แม้จะเข้าใจได้ด้วยเหตุผลดังกล่าวแล้วข้างต้น ก็ยังไม่ชัดตามความรู้สึกหรือความเชื่อของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการผลิต จึงเก็บข้อมูลจากเอกสารทางบัญชีของโรงหล่อ เพื่อมายืนยันความเชื่อของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการผลิตประติมากรรม

ตารางที่ 5 เป็นรายงานต้นทุนต่อหนึ่งหน่วยกิโลกรัมทองสำริด จากตัวอย่างชิ้นงานหล่อประติมากรรมที่ล้วนเป็นอนุสาวรีย์ ที่มีขนาดใหญ่ 20 ชิ้น สุ่มเลือกมาจากประชากร 47 ชิ้น ที่ผลิตในช่วงเวลา 32 เดือน ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันและมีความสลับซับซ้อนไล่เลี่ยกัน หรือเป็นแบบเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างกลุ่มที่หนึ่ง เป็นประติมากรรมที่ใช้วิธีแบบดั้งเดิมในการผลิต และตัวอย่างกลุ่มที่สองใช้วิธีใหม่ในการผลิต จุดมุ่งหมายในส่วนนี้ก็เพื่อทดสอบสมมติฐานว่าต้นทุนต่อหน่วยจากกลุ่มตัวอย่างที่สอง(วิธีใหม่) ไม่แตกต่างออกไปอย่างมีนัยสำคัญจากกลุ่มตัวอย่างที่หนึ่ง (วิธีแบบดั้งเดิม)

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตต่อหนึ่งหน่วยกิโลกรัม

	$\overline{X}$	n	SD	t
วิธีดั้งเดิม	512.6	10	50.8	2.05
วิธีใหม่	528.5	10	61.9	
$\overline{X_1} - \overline{X_0}$	16.1			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาค่า t-test ที่ระดับความมั่นใจ 95 % ในกรณีนี้ $t_0 = 2.05$ ซึ่งน้อยกว่าค่าวิกฤต 2.10 อยู่เพียงเล็กน้อย จึงต้องยอมรับสมมติฐานว่าง แล้วสรุปว่า ต้นทุนเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยกิโลกรัมจากตัวอย่างทั้งสองกลุ่ม ไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อาจสืบเนื่องมาจากการผลิตทั้งสองวิธีใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่ไม่แตกต่างกัน นอกจากส่วนที่เป็นค่าโสหุ้ยและค่าแรง ด้วยเหตุที่ระบบการบัญชีของโรงงาน จัดสรรค่าโสหุ้ยเข้าไปในต้นทุนการผลิตตามอัตราส่วนหนึ่งหน่วยน้ำหนักประติมากรรม จึงไม่สะท้อนประสิทธิภาพอันแท้จริงของการผลิต ในขณะเดียวกันค่าแรงงานที่ใช้ในการเชื่อมและแต่งชิ้นงาน ก็เป็นเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นในโครงสร้างต้นทุน ด้วยเหตุดังกล่าว จึงสะท้อนออกมาในรูปของความแตกต่างของค่าเฉลี่ยไม่มากนัก(16.10 บาท/หนึ่งหน่วยกิโลกรัม) แต่ดังได้กล่าวแล้วข้างต้นว่า การหล่อประติมากรรมให้มีชิ้นใหญ่ได้มากขึ้นเพียงไร ก็จะยิ่งช่วยลดจำนวนชิ้นที่ต้องนำมาประกอบเข้าด้วยกัน ลดระยะเวลาในการประกอบ และแต่งรอยเชื่อมชิ้นงานประติมากรรมลงได้มากเท่านั้น ระยะเวลาที่ลดลงนี้ย่อมทำให้โรงหล่อมีกำลังในการผลิตเพิ่มขึ้น และมีกำลังการผลิตที่มากขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มต้นทุนการผลิต เพราะไม่ต้องลงทุน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดว่าน่าจะเป็นประโยชน์แก่โรงหล่ออื่นๆ ที่ดำเนินกิจการด้วยงบประมาณต่ำ การมีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นโดยไม่ต้องลงทุน ย่อมทำให้ต้นทุนการผลิตในระยะยาวต่ำลงโดยปริยาย ต้นทุนการผลิตที่ต่ำลงย่อมทำให้โรงหล่อมีกำไรเพิ่มขึ้น และประการสำคัญสามารถจัดส่งสินค้าให้ลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญในการแข่งขัน แม้จะพ้นสมัยนิยมไปเสียนานแล้วก็ตาม

5. สรุปและผลกระทบ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการใหม่ เพื่อใช้ในการผลิตพิมพ์กระดองเซรามิคขนาดใหญ่ และการสอบสวนประสิทธิภาพการใช้งาน ด้วยการวิจัยเชิงทดลองที่ใช้โรงหล่อขนาดเล็กเป็นกรณีศึกษา ใช้ข้อมูลการผลิตประติมากรรมขนาดอนุสาวรีย์เป็นตัวอย่าง ข้อมูลการแสดงความคิดเห็นของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการผลิต และข้อมูลทางบัญชีของโรงหล่อ

5.1 วิธีใหม่ที่เสนอแนะ ช่วยให้ผลิตพิมพ์กระดองเซรามิคที่มีความแข็งแรง และมีขนาดใหญ่กว่าวิธีแบบดั้งเดิม โดยไม่ได้เกิดความบวมเป่งมากกว่าวิธีแบบดั้งเดิม แม้จะได้ชิ้นงานประติมากรรมสำเร็จที่มีน้ำหนักมากกว่าวิธีแบบดั้งเดิม อันอาจทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นโดยใช่เหตุ ก็ยังคงเป็นประเด็นที่ต้องศึกษาค้นคว้าและทำการทดลองกันต่อไป

5.2 นอกจากวิธีใหม่จะใช้งานได้อย่างสะดวกแล้ว เมื่อนำไปใช้หล่อประติมากรรมขนาดใหญ่ ดูเหมือนจะประหยัดกว่าวิธีดั้งเดิม แม้ว่าการทดสอบทางสถิติด้วยข้อมูลทางบัญชีจะยังไม่ยืนยัน ก็พอจะอนุมานได้

5.3 วิธีใหม่ใช้ทักษะและทรัพยากรที่หาได้ในโรงหล่อเล็กๆทั่วไป โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งกลไกและอุปกรณ์อื่นๆที่มีราคาแพง

5.4 ผลการใช้วิธีใหม่นี้เป็นเพียงรายงานขั้นต้น ซึ่งควรนำไปทำการสอบสวนต่อ เพื่อหาว่าวิธีนี้จะสามารถรองรับน้ำหนักทองสำริดได้สูงสุดเพียงใด

5.5 การวิจัยครั้งนี้เป็นเพียงการวิจัยเบิกทาง จึงมีข้อจำกัดอยู่มากมาย ซึ่งทำให้ข้อสรุปที่ได้หากจะยึดถือ ก็ควรยึดถือไว้เป็นการชั่วคราวเท่านั้น เพราะประการแรกเป็นกรณีศึกษาที่ใช้โรงหล่อเพียงแห่งเดียว ที่ผู้วิจัยเองมีส่วนร่วมในการออกแบบและพัฒนาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อ หากได้ใช้ทดลองในโรงหล่อหลายๆแห่ง หรือกรณีอื่นๆที่ต่างออกไป และได้ใช้ประติมากรรมที่มีจำนวนมากพอและมีความหลากหลาย ในการศึกษาครั้งต่อไปก็อาจช่วยหักล้างข้อจำกัดนี้ลงไปได้บ้าง และทำให้วิธีใหม่ที่เสนอมีความเที่ยงและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบรรดาพนักงาน ซุปเปอร์ไวเซอร์ ประติมากร และผู้จัดการของบริษัทไทยเมทัลคราฟเตอร์ส จำกัด ที่ให้การช่วยเหลืออย่างสุดกำลัง เพื่อให้การวิจัยครั้งนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Mueller, T. 1991. **Rapidprototyping draws widening foundry interest , Modern Casting.** [outline]Available : from:http://findarticles.com/p/articles [Accessed:23rd January 2009]

[2] พรสนอง วงศ์สิงห์ทอง. 2550. **การออกแบบและพัฒนาแฟชั่นและมัณฑนภัณฑ์.** กรุงเทพฯ : วิสคอมเซ็นเตอร์.

[3] Lash,J. 2004. **Johnson Atelier slashes the time for enlarged sculpture reproductions from 3 months to 2 weeks.** [online] Available from: http://www.innovmetric.com/manufacturing [Accessed: 4th February 2009]

[4] พรสนอง วงศ์สิงห์ทอง. 2549. **ศิลปะการหล่อมัณฑนภัณฑ์และประติมากรรมทองสำริด : เทคนิคการสูญขี้ผึ้งแบบใหม่.** กรุงเทพฯ: วิสคอมเซ็นเตอร์

[5] McGuire, D.S. & Hellstrom E.E. Wisys Technology Foundation. 2007. **Investment Casting Slurry Composition and Method of Use.** US 7,278,465 B1

[6] Klung, F.J.,Gigliotti, Jr., M.F. Pasco, W. D., & Svec,P.S.General Electric Company. 2002. **Reinforced Ceramic Shell Mold, and Related Processes**. US 6,467,534 B1.

[7] Naik, R. V. & Corrigan, J. 2001. **Reinforced Ceramic Shell Mold and Method of Making Same.** US 2001/0009182 A1.

[8] พรสนอง วงศ์สิงห์ทอง. 2549. **ศิลปะการหล่อมัณฑนภัณฑ์และประติมากรรมทองสำริด : เทคนิคการสูญขี้ผึ้งแบบใหม่.** กรุงเทพฯ : วิสคอมเซ็นเตอร์.

[9] Ott, Lyman. 1977. **An Introduction to Statistical and Methods and data analysis,** CA: Duxbury Press.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้