

การจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวที่ส่งผลต่อความเสียหายของเหล็กกล้าไร้สนิมในกระบวนการงานหล่ออินเวสต์เมนต์เข็มทอวน

วรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์^{1*} พัตร์พิมล สุวรรณกาญจน์^{1**} และ พิมพรัภัส งามสันติวงศ์^{2***}

วันที่รับ 16 มีนาคม 2563 วันที่แก้ไข 26 มีนาคม 2563 วันที่ตอบรับ 8 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

ในการผลิตเข็มทอวนซึ่งสามารถทนต่อการสึกหรอและใช้งานได้ยาวนานทำให้การผลิตสินค้าประเภทดาขายมีประสิทธิภาพได้รับการศึกษาอย่างละเอียด เพื่อกำหนดวิธีการขึ้นรูปให้ได้คุณภาพที่ต้องการ กระบวนการหล่อโลหะเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดที่รู้จักกันในการผลิต โดยกระบวนการหล่อในการหล่อการลงทุน เรียกว่า "หล่อขึ้นฝั่ง" สำหรับการออกแบบการหล่อแม่พิมพ์ในกระบวนการหล่อขึ้นฝั่งนั้นเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องมีการไหลที่ราบรื่นของเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูงกว่า 1600 °C โปรแกรม CAST-DESIGNER™ วิเคราะห์การไหลของโลหะเหลวเพื่อแสดงการจำลองการแข็งตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในผลิตภัณฑ์ ความไม่เหมาะสมของปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและการใช้แม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสมเป็นเงื่อนไขหลักที่นำไปสู่การหล่อที่มีข้อบกพร่อง เช่น การหมุนที่ไม่ถูกต้อง การปิดเย็น การหดตัว รูเข็ม รูอากาศ และความพรุนในผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

คำสำคัญ : กระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์, การจำลองสถานการณ์, เหล็กกล้าไร้สนิม

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ฝ่ายองค์ความรู้และการเผยแพร่, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: wannalak.l@cit.kmutnb.ac.th

** ผู้แต่ง, อีเมล: patrpimol.s@cit.kmutnb.ac.th

*** ผู้แต่ง, อีเมล: phimraphas.n@dti.or.th

Simulating the flow behavior of liquid metal affecting the damage of stainless steel in the Investment Casting process

Wannalak Laotweesub ^{1*} Patpimol Suwankan ^{1**} and Phimraphas Ngamsantivongsa ^{2***}

Received 16 March 2020 Revised 26 March 2020 Accepted 8 April 2020

Abstract

In the production of hook which could endure the wear and be used for a long lifetime, enabling the net production with a good efficiency has been intensively studied to determine the forming method for achieving the desired quality and getting a higher fine surface of net hook. The metal casting process is the oldest method known to produce by a casting process in Investment Casting so called “Lost Wax” casting. For the design of mold casting in the lost wax casting process, it is critical to get the smooth flow behavior of stainless steel at a temperature higher than 1600 °C. The CAST-DESIGNER™ program was used to analyze the flow of liquid metal to represent the simulation of the solidification for stainless steel cause defects in the products. The unsuitability of heat transfer phenomena and the use of the unsuitable mold are the main conditions leading to the defective casting with defects such as misruns, cold shuts, shrinkage, pin holes, air holes and porosity in the final products.

Keywords : Investment casting, simulation, stainless steel.

¹ Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok.

² Knowledge and Publication Management Department-TKP, Defence Technology Institute.

* Corresponding author, E-mail: wannalak.l@cit.kmutnb.ac.th

** Corresponding author, E-mail: patrpimol.s@cit.kmutnb.ac.th

*** Corresponding author, E-mail: phimraphas.n@dti.or.th

1. บทนำ

ในภาคอุตสาหกรรมผู้ผลิตส่วนใหญ่มีการแข่งขันเพื่อความเป็นเลิศในวงการอุตสาหกรรมนั้น ๆ มีวิสัยทัศน์และนโยบายเพื่อการพัฒนาโดยการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาใช้ในการกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ทั้งในด้านคุณภาพและการให้บริการ อุตสาหกรรมหล่อโลหะเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ เนื่องจากผลิตภัณฑ์จากงานหล่อมักถูกนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนของอุปกรณ์เครื่องจักรกล รวมไปถึงชิ้นส่วนยานยนต์อื่น ๆ ซึ่งโดยมากมีรูปทรงที่มีความซับซ้อนเกินกว่าจะทำการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอื่นได้ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการหล่อในประเทศยังได้รับการพัฒนาและสนับสนุนไม่มากนัก ส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพโดยรวมของอุตสาหกรรมหล่อในประเทศยังต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับอุตสาหกรรมเดียวกันในประเทศที่พัฒนาแล้ว [1] ปัจจัยสำคัญประการหนึ่ง คือ การมีความรู้และความเข้าใจในพื้นฐานของกระบวนการผลิตสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ต้องการหล่อ [2] การออกแบบระบบงานหล่อที่เหมาะสม และตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงการวิเคราะห์รอยบกพร่องที่เกิดจากการหล่อ [3] ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นส่วนเครื่องจักรให้ทนทานต่อการใช้งานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาในภาคอุตสาหกรรม [4] เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตจำเป็นต้องมีชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรงทนทาน ดังเช่นเครื่องทอที่ใช้ในการผลิตอวนชิ้นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตอวนโดยตรงในการทออวน คือ เข็มทออวน (Hook)

การผลิตเข็มทออวนที่สามารถทนทานการสึกหรอใช้งานได้ยาวนาน โดยสามารถใช้ในการผลิตแหวนให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี จึงมีการศึกษาค้นคว้ากรรมวิธีขึ้นรูปชิ้นงานที่มีคุณภาพและได้ผิวชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง [5] สำหรับเข็มทออวน ซึ่งในกระบวนการหล่อโลหะที่รู้จักกันเก่าแก่มากที่สุดจะสร้างโดยวิธีกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า งานหล่อขี้ผึ้งหาย (Lost Wax) ทั้งยังได้ผิวชิ้นงาน

ที่มีความเรียบละเอียดสูง โดยมีจำนวนหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตงานหล่อประเภทนี้ ซึ่งต้องอาศัยความแม่นยำในการปฏิบัติงานเป็นสำคัญ ทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่มีคุณภาพตามความต้องการ

2. กระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting)

กระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์หลายขั้นตอนในการเตรียมวัสดุโลหะการศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 431 เพื่อหล่อเข็มทออวน อุณหภูมิในการเท (Pouring Temperature) 1650°C เทวัสดุลงในแม่พิมพ์หล่อก่อนที่จะเทโลหะลงในแม่พิมพ์ ตั้งเตาให้ร้อนที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 1150°C จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ [6]

จากการศึกษาปัจจัยในงานหล่ออินเวสต์เมนต์ที่ส่งผลต่อชิ้นงานหล่อเข็มทออวน เช่น อุณหภูมิในการเท (Pouring Temperature) อุณหภูมิการอบแม่พิมพ์ (Preheating Temperature) เวลาในการอบแม่พิมพ์ (Preheat Time) อัตราการเท (Pouring Rate) และเวลาในการปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ (Cooling Rate) ของแม่พิมพ์งานหล่อ โดยทำการศึกษากระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการไหลของน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์หล่อ มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1



(a)

(b)

รูปที่ 1 (a) ตำแหน่งเข็มทออวนในเครื่องทออวน
(b) เข็มทออวนที่ผลิตในโรงงาน

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่มีผลต่อชิ้นงานหล่อจากกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์

ที่	ขั้นตอนการผลิต	ผลกระทบ	ปัจจัยสาเหตุ
1	ฉีดขี้ผึ้ง (wax)	1.1 ชิ้นงานฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ 1.2 ชิ้นงานมีครีบมาก	- อุณหภูมิของวัสดุยังไหลตัวไม่ดี - เครื่องฉีดชำรุด - แม่พิมพ์ชำรุด
2	ตกแต่งชิ้นงาน	2.1 มีรอยตำหนิ	- คนงานขาดความชำนาญในการตกแต่ง
3	ตกแต่งชิ้นงาน	3.1 ชิ้นงานไม่ติดหรือหลุดออกก้านรูเท ได้ง่าย	- วิธีการบัดกรีเชื่อมขี้ผึ้ง - คนงานขาดความละเอียดถี่ถ้วน
4	ล้างน้ำยาทำความสะอาด (IPA)	4.1 มีเศษผงติดชิ้นงาน	- น้ำยามีการใช้ซ้ำอีก ไม่ได้กำจัดตะกอนหลังใช้งาน
5	จุ่มน้ำกาวและโปรยทราย ชั้น 1 ทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง ชั้น 2-5 ทิ้งไว้ 4 ชั่วโมง ชั้น 6 ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง	5.1 น้ำกาวร้อนไม่ติดชิ้นงาน 5.2 มีรอยร้าวหรือรอยแตกที่ผิวแม่พิมพ์ 5.3 เกิดฟองอากาศที่ผิวน้ำกาว	- น้ำกาวมีความหนืดมากเกินไป - ความชำนาญในการจุ่มกาวของคนงาน - ส่วนผสมและคุณสมบัติของน้ำกาว - ความชื้นของอากาศของห้องจุ่มน้ำกาว - ระยะเวลาปล่อยให้แห้งก่อนโปรยทราย - วิธีการจุ่มน้ำกาวโดยการสลัดฟองอากาศ
6	ดีแว็กซ์แม่พิมพ์ (Dewax) ใช้เวลา 15 นาที/รอบ ที่อุณหภูมิ 150 °C	6.1 ผิวแม่พิมพ์ภายในไม่เรียบ 6.2 ผิวงานภายในแม่พิมพ์ไม่สะอาด	- วิธีการกำจัดขี้ผึ้งไม่เหมาะสม เช่น เวลาและอุณหภูมิ - ส่วนผสมขี้ผึ้งใหม่กับขี้ผึ้งที่ใช้แล้ว - วิธีการวางจัดเก็บแม่พิมพ์หลังเอาขี้ผึ้งออก - สถานที่ที่มีฝุ่นละอองมาก
7	อบแม่พิมพ์ จากอุณหภูมิ 25-1150 °C เผาแซในเตาไว้ 2 ชั่วโมง	7.1 แม่พิมพ์แตกร้าว	- วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ - อุณหภูมิในการอบเริ่มต้น - การจัดวางตำแหน่งแม่พิมพ์ในเตา
8	เทหลอมโลหะ อุณหภูมิหลอม 1650 °C กำจัดออกซิเจนด้วยก๊าซอาร์กอน ทุก 5 นาที และเติมอะลูมิเนียม	8.1 เทไม่เต็มแบบ 8.2 ชิ้นงานมีตามดและรูพรุน	- อุณหภูมิในเตาอุณหภูมิไม่พอ ปูนยังไม่สุก - ส่วนผสมของน้ำโลหะ - แม่พิมพ์มีผงเศษปูนติดอยู่ภายใน - อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะ
9	กระแทกเปลือกโมลด์	-	-
10	ยิงทราย	-	-
11	ตัดแม่พิมพ์	-	-
12	เจียรตกแต่งชิ้นงาน	-	-

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่มีผลต่อชิ้นงานหล่อจากกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (ต่อ)

ที่	ขั้นตอนการผลิต	ผลกระทบ	ปัจจัยสาเหตุ
13	อบชิ้นงานปรับโครงสร้างเหล็ก (Heat Treatment)	13.1 ชิ้นงานมีความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอ มีความแข็งเปราะ	- อุณหภูมิของเตา - เวลาในการอบต่อจำนวนชิ้นงานแต่ละครั้ง - สมบัติและโครงสร้างวัสดุที่หล่อ
14	ไม่ทรายขัดผิว	14.1 มีร่องตำตรงหัวตะขอ 14.2 เกิดสนิมบริเวณมุมร่องตะขอ	- ขนาดเบอร์เม็ดทรายหยาบเกินไป - รูปทรงชิ้นงานมีมุมแคบยากต่อการขัดผิว - ชิ้นงานถูกความชื้นจากน้ำ - ส่วนผสมเคมีเหล็กกล้าไร้สนิม - ความสะอาดของเศษโลหะต่าง ๆ
15	เคาะตรง	-	-
16	กลึงปอกป่าและเจาะรู	16.1 ชิ้นงานมีรอยร้าวในเนื้อเหล็ก	- อุณหภูมิในการเทหลอมโลหะ - ขนาดหน้าตัดทางเข้าน้ำโลหะไหลเข้าสู่ชิ้นงาน

3. การจำลอง (Simulation)

ปัญหาที่พบบนั้่นมักเกิดขึ้นในกระบวนการหล่อ การควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ให้เป็นตามมาตรฐานการปฏิบัติงานให้คงที่ ซึ่งมักเกิดจากพนักงานในโรงงานขาดทักษะและความเข้าใจ การเอาใจใส่ในงานที่รับผิดชอบ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาล่่านนี้ได้ในเบื้องต้น และในการศึกษาครั้งนี้ยังได้ใช้โปรแกรมมาทำการวิเคราะห์แม่พิมพ์งานหล่อ ซึ่งปัจจุบันโรงงานทำการออกแบบระบบป้อนเติมน้ำโลหะให้มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับชิ้นงาน เพื่อความประหยัดในเรื่องของต้นทุนและเวลา จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ชิ้นงานหล่อโดยจำลองการไหลและการเย็นตัวด้วยซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER™

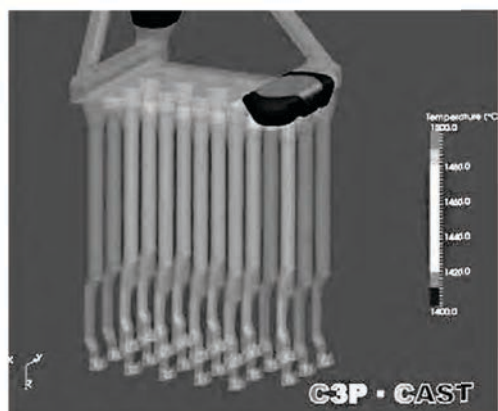
จึงทำการศึกษาและออกแบบระบบป้อนเติมน้ำโลหะ (Gating System) ซึ่งมีหน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะ (Runner) จากนั้นศึกษาความแตกต่างของมุมทางเข้าน้ำโลหะของชิ้นงาน (Gate) ส่งผลต่อเวลาในการไหลเติมน้ำโลหะ (Filling Time) การเทน้ำโลหะไหลเข้าจนเต็มแม่พิมพ์เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิในการเท ซึ่งอาจมีผลความเสียหายในงานหล่อที่เกิดขึ้น โดยเป็นปัจจัยทำให้การไหลของน้ำโลหะไหลเข้าสู่แบบแม่พิมพ์ไม่สมบูรณ์

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

เพื่อกออกแบบระบบป้อนเติมน้ำโลหะจากการหารูปแบบหน้าตัดที่ส่งผลต่อการไหลของน้ำโลหะให้เต็มแม่พิมพ์ (Fluid Fraction) อุณหภูมิการเทน้ำโลหะเหลวและเวลาในการแข็งตัวของโลหะ (Solidification Time) สามารถนำมาเปรียบเทียบความเสียหายที่เกิดขึ้นจากรูปแบบแม่พิมพ์ของงานหล่อที่โรงงานใช้อยู่จริงในปัจจุบัน และเป็นแนวทางในการคิดสร้างแม่พิมพ์ที่ออกแบบใหม่ได้ โดยการใช้โปรแกรมจำลองการไหลให้เต็มแม่พิมพ์อย่างสมบูรณ์ โดยโปรแกรมสามารถจำลองวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะที่วิ่งเข้าสู่ชิ้นงาน เห็นความเป็นไปได้ของความเสียหายในชิ้นงานหล่อเนื่องจากการออกแบบระบบทางเข้าของน้ำโลหะ (Gating System) ที่นำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลจากพฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะในแม่พิมพ์งานหล่อ แสดงให้เห็นดังในรูปที่ 2 และ 3



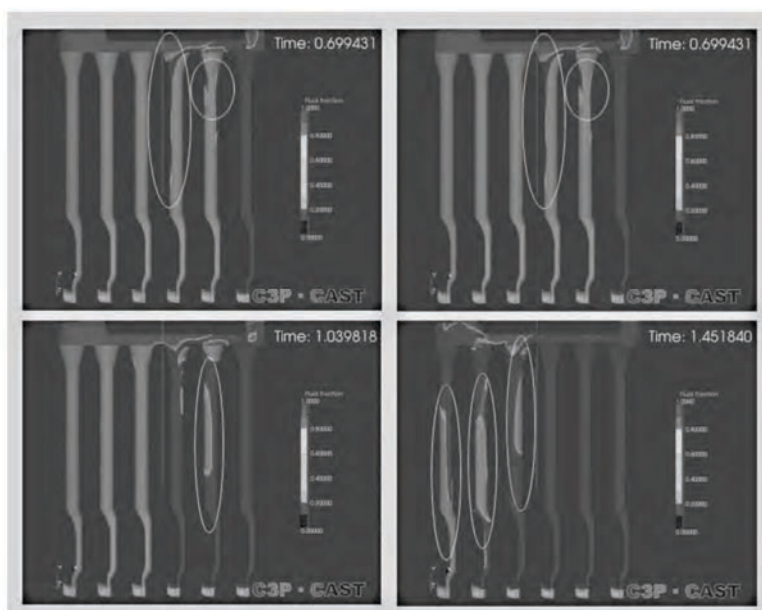
รูปที่ 2 การเย็นตัวของชิ้นงานหล่อ



รูปที่ 3 แสดงการเกิดโพรงอากาศในชิ้นงาน

จากการจำลองการไหลของน้ำโลหะด้วยโปรแกรม จำลองสถานการณ์ดังกล่าวเพื่อนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุ การเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน จึงหะในการไหลของ น้ำโลหะที่อุณหภูมิ 1650 °C ไหลเข้าสู่โพรงแบบ

แม่พิมพ์หล่อ ซึ่งตัดส่วนของระบบเติมป้อนน้ำโลหะออกไป นำมาแสดงเฉพาะตำแหน่งชิ้นงานหล่อ โดยได้แสดงให้เห็น ในภาพจำลองการไหลเป็นช่วงจังหวะเวลาออกเป็น 4 ขั้นตอนการทำงาน ดังนี้



รูปที่ 4 การจำลองการไหลของการวิเคราะห์สาเหตุของข้อผิดพลาดในการหล่ออินเวสตีเมนต์

จากการศึกษาและวิเคราะห์การไหลของน้ำโลหะที่วิ่งเข้าสู่โพรงแบบแม่พิมพ์ มีการไหลของน้ำโลหะไม่สม่ำเสมอ และมีการไหลวนของน้ำโลหะและอากาศที่อยู่ภายในโพรงแบบของแม่พิมพ์ชิ้นงานหล่อ ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างอากาศในเนื้อชิ้นงานส่งผลให้บริเวณที่มีมุมรอบขนาดเล็ก (Undercut) ที่ไหลเข้าถึงได้ยาก ปรากฏผลว่า น้ำโลหะไหลเข้าไปไม่เต็มแม่พิมพ์ เนื่องจากอุณหภูมิ น้ำโลหะเย็นตัวลงจนถึงจุดแข็งตัวเป็นของแข็งก่อนที่จะไหลเข้าสู่ส่วนปลายชิ้นงานของเข็มทอวน ซึ่งลักษณะข้อบกพร่อง

ความเสียหายแบบนี้เรียกว่า Misrun และ เป็นปัญหาใหญ่ที่สำคัญในการผลิตของโรงหล่อที่เกิดของเสียในชิ้นงานหล่อบ่อยที่สุด

จากการเก็บข้อมูลในกระบวนการหล่อชิ้นงานเข็มทอวนพบว่า ปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการหล่อส่งผลความเสียหายของชิ้นงานหล่อที่เกิดขึ้น เช่น การเทหล่อไม่เต็มแบบแม่พิมพ์ (Misrun/Cold Shut) รูพรุน ตามด (Blowholes/Pin Holes) โพรงอากาศในชิ้นงานหล่อเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) ดังแสดงในรูปที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ความเสียหายที่ได้รับผลกระทบต่อการหล่ออินเวสต์เมนต์

5. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของแบบแม่พิมพ์ที่โรงงานใช้อยู่ในปัจจุบัน อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากรูปแบบระบบทางวิ่งน้ำโลหะ (Gating System) ซึ่งควรมีการทดลองออกแบบระบบทางวิ่งน้ำโลหะรูปแบบใหม่ให้มีระบบป้องกันในการไหลของน้ำโลหะมีความต่อเนื่องเพื่อให้โพรงแบบมีทางวิ่งน้ำโลหะของชิ้นงานหล่อสามารถไหลเต็มแบบแม่พิมพ์ได้ง่ายและสม่ำเสมอ ให้ความเหมาะสมกับชิ้นงาน และอีกปัจจัยหนึ่งที่เป็นสาเหตุให้การไหลน้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบไม่เต็มแบบแม่พิมพ์ ซึ่งน้ำโลหะมีอุณหภูมิที่เทหล่อสูงกว่าอุณหภูมิจุดแข็งตัวไม่มาก ทำให้น้ำโลหะแข็งตัวเป็นของแข็งก่อนไหลเข้าเต็มแบบแม่พิมพ์ ซึ่งส่วนปลายเข็มทอวนมีรูปร่างขนาดเล็กซับซ้อน หากอุณหภูมิสูงไม่พอก็ไม่สามารถไหลเข้าสู่แบบแม่พิมพ์ได้เต็มถึงส่วนปลายของชิ้นงานหล่อ ทั้งสองสาเหตุจึงมีส่วน

ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องให้ชิ้นงานหล่อเกิดความเสียหายได้มากจนกลายเป็นต้นทุนในการผลิตชิ้นงานหล่อที่สูงขึ้นได้

6. กิตติกรรมประกาศ

การจำลองในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดยโปรแกรมนักออกแบบจาก 4D corporation Co., Ltd. และส่งอำนวยความสะดวกสำหรับการทดลองได้รับการสนับสนุนโดย Khon Kaen Fishing Net (Public) Co., Ltd.

7. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Jones, C. Yuan. (2003), Advances in shell moulding for investment casting, *Journal of Materials Processing Technology* 135, 258–265.

[2] Adrian S. Sabau, Srinath Viswanathan. (2003), Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting, *Materials Science and Engineering A362*, 125–134.

[3] S. Lun Sin, D. Dube, R. Tremblay. (2008), An investigation on microstructural and mechanical properties of solid mould investment casting of AZ91D magnesium alloy, *Materials Characterization* 59, 178–187.

[4] Barbara Previtali, Dante Pocci, Cataldo Taccardo. (2008), Application of traditional investment casting process to aluminium matrix composites, *Composites: Part A39*, 1606–1617.

[5] M.M.A. Rafique, J. Iqbal. (2009) Modeling and simulation of heat transfer phenomena during investment casting, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, 2132–2139.

[6] Patpimol Suwankan, Nuttaphong Sornsuwit, Nuchthana Poolthong. (2015), Design of runner and gating systems for the investment casting of 431 stainless steel netting hook through numerical simulation, *Key Engineering Materials* 659, 647–651