

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ในแม่พิมพ์งานหล่ออินเวสต์เมนต์

พัตรพิมล สุวรรณกาญจน์^{1*} ณัฐพงศ์ สอนสุวิทย์² และ พิมพ์ภััส งามสันติวงศ์³

วันที่รับ 18 มีนาคม 2565 วันที่แก้ไข 5 สิงหาคม 2565 วันตอบรับ 16 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกระบวนการหล่องานเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความเล็กบางและมีความซับซ้อน มีการออกแบบระบบจ่ายโลหะเหลวและรูสลิ้น โดยทั่วไปเป็นการออกแบบจากประสบการณ์และทดลองหล่อแบบลองผิดลองถูก เพื่อตรวจสอบหาจุดบกพร่องของชิ้นงาน (Defects) ที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงทำการปรับปรุงการออกแบบและทดลองหล่ออีกครั้งจนกระทั่งมั่นใจได้ว่างานหล่อที่ได้สมบูรณ์ปราศจากข้อบกพร่อง วิธีดังกล่าวทำให้สูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากการทดลองหล่อเป็นจำนวนมาก ขาดความแน่นอนและความถูกต้องในการออกแบบ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ในการจำลองพฤติกรรม (Cast Designer[®]) เพื่อนำมาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบระบบงานหล่อเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่ราคาสูง ปัญหาของผู้ประกอบการคือการตัดสินใจในการจัดซื้อหรือการจัดหาคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์เหล่านี้นี้มาใช้เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการทำงานหล่องาน เพื่อศึกษาการจำลองพฤติกรรมของงานหล่อโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์มาใช้ในการวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ที่เลือกใช้โปรแกรม Cast Designer[®] ขอบเขตในการทำงานวิจัยคือออกแบบชุดแม่พิมพ์งานหล่อ 3 แบบ โดยแม่พิมพ์เป็นแบบมีทางเข้าของโลหะเหลวทางเดียว มีการจัดวางเรียงชิ้นงานเป็นมุมเอียงลงกับระนาบแนวนอน 30, 45 และ 60 องศา โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบงานหล่อ โดยทำการเปรียบเทียบลักษณะของการไหลของโลหะเหลว เวลาในการเติมเต็มโลหะเหลว และทำการวิเคราะห์แม่พิมพ์ว่าในงานหล่อแม่พิมพ์ในแต่ละแบบเกิดข้อบกพร่องตรงจุดใดของแบบแม่พิมพ์จากการจำลองพฤติกรรมกระบวนการหล่อแม่พิมพ์แบบที่ 3 มีความสมบูรณ์แบบมากที่สุด เนื่องจากการไหลตัวของโลหะเหลว (Fluid Fraction) มีทิศทางไหลในทิศทางเดียวกัน ใช้เวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) เข้าสู่โพรงแบบน้อยที่สุด โดยใช้เวลาเพียง 1.0667 วินาที และได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์แบบเป็นแม่พิมพ์ที่ทำให้การผลิตมีประสิทธิภาพที่สุด

คำสำคัญ : กระบวนการหล่อโลหะ, การออกแบบแม่พิมพ์, การจำลองพฤติกรรม

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีวัสดุ, วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ ส่วนบริหารองค์ความรู้ (Knowledge Management Division - TKM), สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

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

A Study of Flow Behavior of AISI 430 Stainless Steel in Investment Casting by Analysis Program

Patpimol Suwankan ^{1*} Nuttaphong Sornsuwit ² and Phimraphas Ngamsantivongsa ³

Received 18 March 2022, Revised 5 August 2022, Accepted 16 August 2022

Abstract

Stainless steel parts with high complexity and small dimensions are cast in the casting process. Liquid metal dispensing system and overflow holes are designed. A design is generally based on experience and trial and error casting to check for defects in the workpiece. Following that, the design is optimized and the casting is tested again until it is certain that there are no defects in the casting. As a result of a large number of casting trials and inaccuracy, this method costs time and money. In order to prevent such a waste of time and money, computer software is used to simulate the casting process. In this study, Cast Designer[®] simulation software is used in analysis to evaluate the optimized design of casting mold. The scope of this research is to design 3 types of casting molds. The workpieces were arranged inclined at angles of 30, 45 and 60 degrees by using a computer-aided design program to design the casting by comparing the characteristic of liquid metal flow and the filling time were analyzed. As a result of the fluid fraction flowing in the same direction and filling the cavity in the shortest amount of time (1.0667 seconds), type 3 casting molds are the most ideal.

Keywords : casting process, mold design, simulation

¹ Department of Materials and Production Technology Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

² Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

³ Knowledge Management Division - TKM, Defence Technology Institute

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

1. บทนำ

เนื่องจากการผลิตชิ้นงานตะขอเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ที่มีลักษณะบางและรูปร่างซับซ้อน จะต้องใช้การผลิตโดยการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) หรือที่เรียกว่าหล่อแบบซีพิงหาย (Lost Wax Casting) โดยที่ในกระบวนการผลิตจะต้องมีปัจจัยต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีที่สุดปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ รูปร่างของชิ้นงาน อุณหภูมิของน้ำโลหะเหลว (Melt Temperature) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature) ความเร็วในการไหลตัวของน้ำโลหะเหลว อุณหภูมิขณะเทหล่อ (Pouring Temperature) โดยปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะส่งผลต่อข้อบกพร่อง (Defect) ของชิ้นงาน กระบวนการหล่อใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วนโลหะ ความต้องการชิ้นส่วนหล่อที่มีความเที่ยงตรงสูงยังคงเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้องการที่เข้มงวดจากอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน งานวิจัยจำนวนมากได้ทุ่มเทให้กับการพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อการผลิตสินค้าหล่อคุณภาพสูงด้วยต้นทุนที่ต่ำ การวิเคราะห์การไหลของของไหลในระหว่างกระบวนการเติมเต็มของโลหะเหลวในแม่พิมพ์ได้รับการศึกษาอย่างจริงจังในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากความก้าวหน้าของระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของคอมพิวเตอร์ [1], [2] ข้อบกพร่องฝังใน (Inclusion Defects) ซึ่งเกิดจากฟิล์มออกไซด์ การล้าทางทราย และการเกิดตะกรัน ความหนาแน่นต่ำเป็นเรื่องปกติในกระบวนการหล่อและอาจทำให้คุณสมบัติทางกลของการหล่อลดลงอย่างมาก ความเห็นร่วมกันของอุตสาหกรรม คือ กระบวนการเติมเต็มของโลหะเหลวมีความสำคัญต่อคุณภาพการหล่อ และเศษการหล่อส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากไม่ก็วินาทีที่การหล่อถูกเท [3] ข้อบกพร่องฝังในจะได้รับผลกระทบอย่างมากจากสภาพพื้นผิวอิสระ ความเร็วที่ทางเข้า และการกระจายการไหลในระหว่างกระบวนการเติมเต็มของโลหะเหลว ระบบการเติมเต็ม

ของโลหะเหลวมีบทบาทสำคัญในการควบคุมข้อบกพร่องฝังใน ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าระบบการเติมเต็มของโลหะเหลวที่ออกแบบมาไม่ดีมักส่งผลให้เกิดความเร็วการไหลและความปั่นป่วนของพื้นผิวที่สูง [4]

ตามที่ Babaei และคณะ [5] การเติมแม่พิมพ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการพิจารณาคุณภาพของการหล่อ ปรากฏการณ์การไหลของของไหลระหว่างการเติมแม่พิมพ์มีความสัมพันธ์อย่างมากกับคุณภาพการหล่อพื้นผิวสำเร็จ และการแยกส่วนขนาดใหญ่ของชิ้นส่วนหล่อ และการสึกกร่อนของแม่พิมพ์

ข้อบกพร่องที่พบบ่อยของชิ้นงานตะขอเหล็กกล้าไร้สนิม คือ รูพรุน (Void) โพรงหดตัวขณะแข็งตัว (Shrinkage Porosity) และชิ้นงานไม่สมบูรณ์ โดยได้มีการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อลดปัญหาดังกล่าว โดยการออกแบบแม่พิมพ์แต่ละครั้งจำเป็นต้องทำการทดลองเทน้ำโลหะก่อนหลายครั้งเพื่อทดสอบหาแบบแม่พิมพ์ที่ทำให้เกิดชิ้นงานที่สมบูรณ์ที่สุดมาทำการใช้เทหล่อชิ้นงานจริง ซึ่งเป็นการยุ่งยากและสิ้นเปลือง รวมทั้งยังต้องใช้ต้นทุนสูง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของการไหลของน้ำโลหะ การจำลองพฤติกรรมการแข่งขันตัวของน้ำโลหะซึ่งผลิตจากการจำลองแม่พิมพ์ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหล่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของการไหลของน้ำโลหะ ตัวแปรที่ศึกษาคือ สัดส่วนการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) ในเครื่องมือจำลองวิเคราะห์กระบวนการเติมของแม่พิมพ์ด้วยของเหลวมีการวางจัดเรียงชิ้นงานเป็นมุมเอียงลงกับระนาบแนวนอน 30, 45 และ 60 องศา โดยการจำลองพฤติกรรมของการไหลด้วยโปรแกรม Cast Designer® เพื่อพัฒนาให้ได้แม่พิมพ์ที่ทำให้การผลิตมีประสิทธิภาพที่สุด

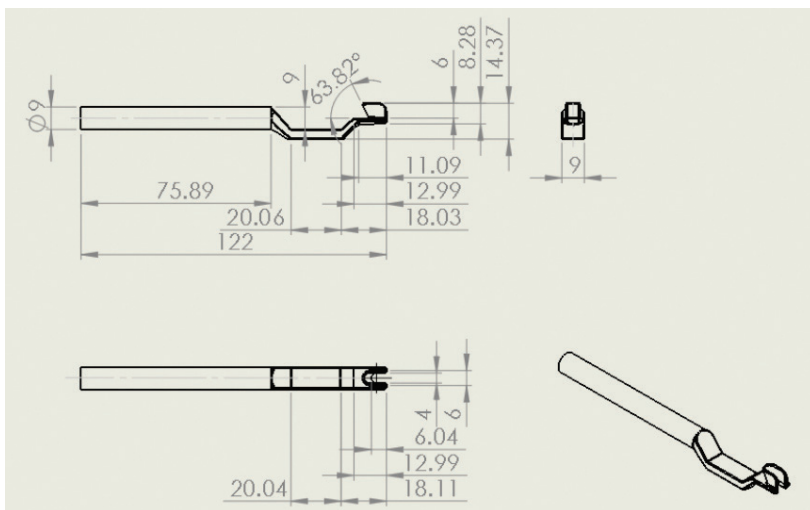
2. ออกแบบการทดลอง

2.1 กรรมวิธีการหล่ออินเวสต์เมนต์

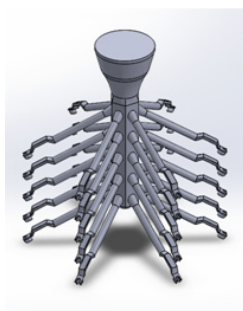
กระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์มีขั้นตอนในการเตรียมวัสดุหล่อโลหะ ซึ่งการทดลองนี้ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 เป็นวัสดุหล่อขึ้นงานตะขอ มีอุณหภูมิเท (Pouring Temperature) 1650°C เทลงในแม่พิมพ์หล่อโลหะ ซึ่งก่อนการเทน้ำโลหะใส่แม่พิมพ์จะต้องอบให้ร้อนอยู่ที่อุณหภูมิ (Mold Temperature) 1150°C แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศปกติ ลักษณะของขึ้นงานตะขอแสดงในรูปที่ 1

2.2 แม่พิมพ์เทหล่อ

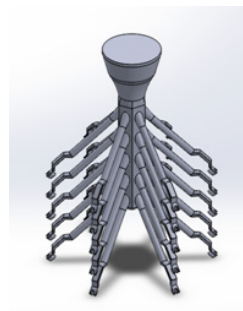
กำหนดรูปร่างขึ้นงานให้มีการจัดเรียงระบบบ่อนเติมน้ำโลหะที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาการไหลของน้ำโลหะในรูปแบบลักษณะมุมเอียงในการจัดเรียงขึ้นงานในแบบหล่อที่ 30, 45 และ 60 องศา กับแนวระนาบโดยมีรูปร่างขึ้นงานดังรูปที่ 2



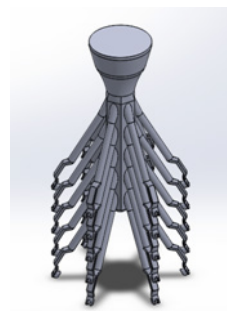
รูปที่ 1 ลักษณะของขึ้นงานตะขอ



ก) 30 องศา



ข) 45 องศา

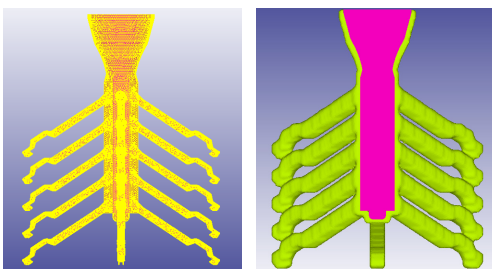


ค) 60 องศา

รูปที่ 2 แบบแม่พิมพ์ที่มีการเอียงทำมุมกับแนวระนาบ

2.3 เทคโนโลยีการจำลองแบบช่วยในการจำลอง พฤติกรรมการไหลตัวของน้ำโลหะเหลว

ในการจำลองพฤติกรรมการไหลในงานวิจัยนี้ ตัวแปรที่ศึกษา คือ สัดส่วนการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction) เวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) โดยการจำลองพฤติกรรมการไหลด้วยโปรแกรม Cast Designer® นำ CAD ที่สร้างจาก Solid work ดังรูป เข้าไปในโปรแกรม Cast Designer® เพื่อทำให้เกิด Finite Element Method Mesh จะเห็นได้ว่าการตัดแบ่งครึ่งของ CAD เพื่อช่วยในการลดเวลาที่คอมพิวเตอร์จะต้องใช้ในการคำนวณ และลักษณะชิ้นงานมีลักษณะที่สมมาตรกัน ทำให้เกิดพฤติกรรมที่เหมือนกัน แสดงรูปชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Finite Element Method Mesh และสร้างเปลือกแม่พิมพ์ (Shell Mold) คลุมทั้งชิ้นงาน ตัวอย่างดังรูปที่ 3

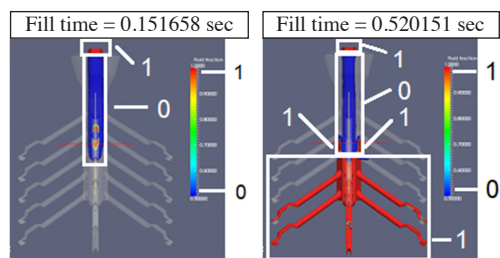


รูปที่ 3 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Finite Element Method Mesh และสร้างเปลือกแม่พิมพ์ (Shell Mold) คลุมทั้งชิ้นงาน

3. ผลการทดลอง

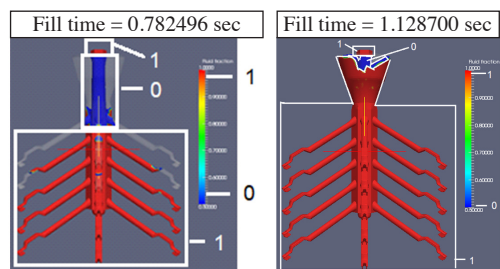
3.1 ผลจากการทำแบบจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction)

ผลจากการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวจะเทียบสเกลสี โดยสีแดง (หมายเลข 1) แทนตำแหน่งที่โลหะเหลวไหลเต็มในจุดนั้น 100% แล้วไล่เฉดสีไปตามเปอร์เซ็นต์ที่ลดลง จากรูปที่ 4, 5 และ 6 แสดงให้เห็นถึงลำดับการไหลในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ผ่านไปของแต่ละแม่พิมพ์ โดยพบว่าโลหะเหลวจะเริ่มไหลจากปากกรูเทลงมาตามทางไหลจนเต็มในส่วนปลายของทางไหลแล้วค่อย ๆ เอ่อล้นไปตามรูทางเข้าของชิ้นงานจนเต็มแห่งเรื่อย ๆ จากชิ้นงานด้านล่างขึ้นไปยังด้านบนจนเต็มถึงปากกรูเท ซึ่งจะมีลักษณะเดียวกันทั้ง 3 แบบแม่พิมพ์



(ก) โลหะเหลว 10%

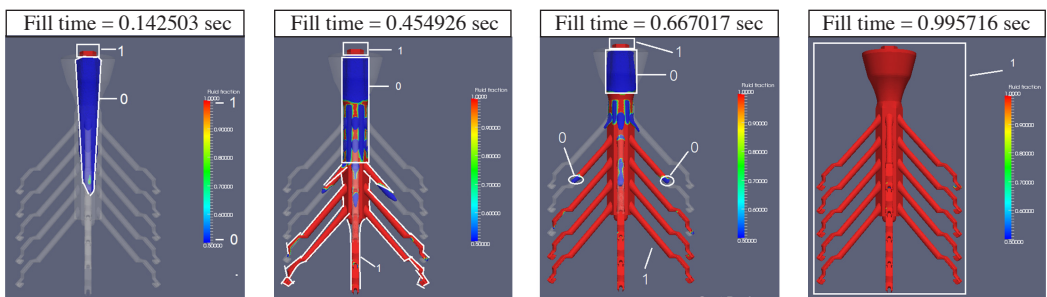
(ข) โลหะเหลว 40%



(ค) โลหะเหลว 60%

(ง) โลหะเหลว 90%

รูปที่ 4 แบบจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวในแม่พิมพ์ 30 องศา



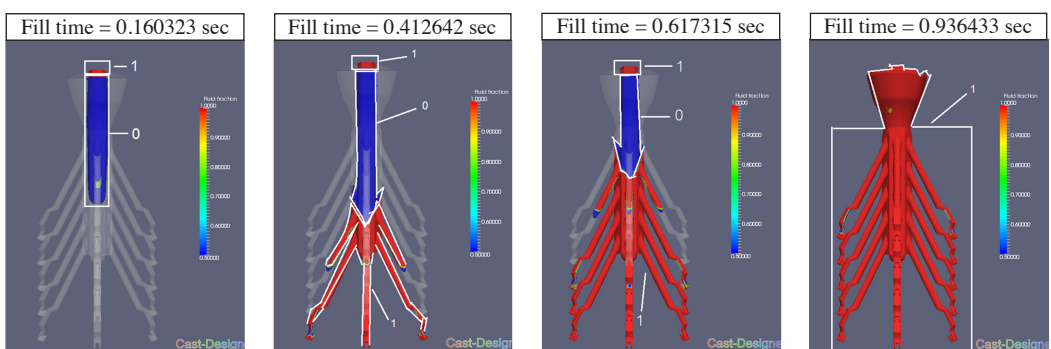
(ก) โลหะเหลว 10%

(ข) โลหะเหลว 40%

(ค) โลหะเหลว 60%

(ง) โลหะเหลว 90%

รูปที่ 5 แบบจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวในแม่พิมพ์ 45 องศา



(ก) โลหะเหลว 10%

(ข) โลหะเหลว 40%

(ค) โลหะเหลว 60%

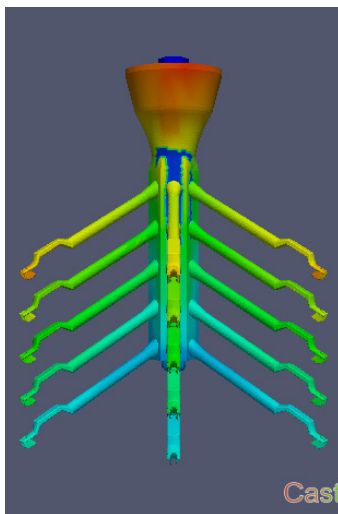
(ง) โลหะเหลว 90%

รูปที่ 6 แบบจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวในแม่พิมพ์ 60 องศา

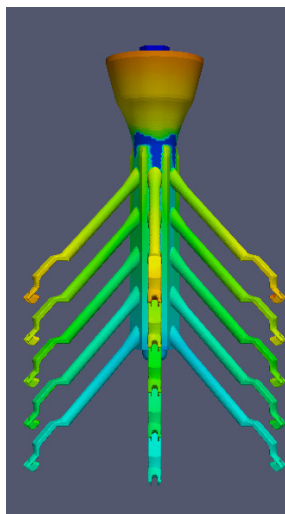
3.2 แบบจำลองเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill time)

ผลจากการจำลองพบว่าเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill time) จะเทียบจากสเกลสี โดยสีน้ำเงิน (หมายเลข 0) แทนเวลาจาก 0 ไปสีไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจนถึงสีแดง (หมายเลข 1) คือเวลาสิ้นสุดการเติมเต็มของโลหะเหลว พบว่าในส่วนล่างของแม่พิมพ์จะถูกเติมเต็มด้วยโลหะเหลวก่อนแล้วค่อยๆ เติบโตขึ้นไปที่ส่วนบนของ

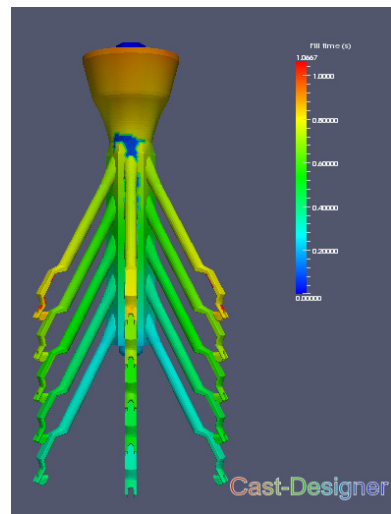
แม่พิมพ์ ซึ่งจะมีลักษณะเดียวกันทั้ง 3 แม่พิมพ์ จะต่างกันเพียงเวลาที่ใช้ในการเติมเต็ม โดยแม่พิมพ์ 30 องศา ใช้เวลา 1.2861 วินาที เป็นเวลาที่มากที่สุด รองลงมาเป็นแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้เวลา 1.1008 วินาที และ 60 องศา ใช้เวลา 1.0667 วินาที เป็นเวลาที่น้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 7 จากผลการทดลองที่ได้ การวางจัดเรียงชิ้นงานมุมเอียงลงกับระนาบแนวนอนของแม่พิมพ์แปรผกผันกับเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว



(ก) 30 อองศา
Fill time = 1.2861 sec



(ข) 45 องศา
Fill time = 1.1008 sec



(ค) 60 องศา
Fill time = 1.0667 sec

รูปที่ 7 แบบจำลองเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว

4. สรุปผลการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยนี้ คือ การพัฒนาการออกแบบระบบการหล่อ โดยได้ทำการจำลองพฤติกรรมของงานหล่อโดยใช้โปรแกรม Cast Designer® เพื่อประเมินลักษณะของการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) ในเครื่องมือจำลองวิเคราะห์กระบวนการเติมของแม่พิมพ์ด้วยของเหลว มีการวางจัดเรียงชิ้นงานเป็นมุมเอียงลงกับระนาบแนวนอน 30, 45 และ 60 องศา ผลการจำลองสำหรับการหล่อแสดงให้เห็นว่าโลหะเหลวจะเริ่มไหลจากปากกรูเทลงมาตามทางไหลจนเต็มในส่วนปลายของทางไหล ซึ่งมีลักษณะเดียวกันทั้ง 3 แม่พิมพ์ และผลจากการจำลองเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) พบว่าในส่วนล่างของแม่พิมพ์จะถูกเติมเต็มด้วยโลหะเหลวก่อน แล้วค่อย ๆ เติม

ขึ้นไปในส่วนบนของแม่พิมพ์ ซึ่งมีลักษณะเดียวกันทั้ง 3 แม่พิมพ์ แตกต่างกันที่เวลาที่ใช้ในการเติมเต็ม โดยแม่พิมพ์ 30 องศา ใช้เวลา 1.2861 วินาที เป็นเวลาที่มากที่สุด รองลงมาเป็นแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้เวลา 1.1008 วินาที และ 60 องศา ใช้เวลา 1.0667 วินาที เป็นเวลาน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าการวางจัดเรียงชิ้นงานมุมเอียงลงกับระนาบแนวนอนของแม่พิมพ์มีผลกระทบกับเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลวโดยแปรผกผันกัน

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ทรงประสิทธิภาพในการวิเคราะห์กระบวนการเติมแม่พิมพ์ ซึ่งไม่ใช่เรื่องง่ายในการแสดงภาพการทดลอง การจำลองช่วยให้เห็นภาพไดนามิกการเติมและควบคุมกระบวนการ โดยแปรผันตามพารามิเตอร์การปฏิบัติงาน

5. ข้อเสนอแนะ

ผลการจำลองที่ได้เบื้องต้นควรประกอบกับการศึกษาพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะเหลว (Solid Fraction) และการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ซึ่งจะเป็นแนวทางการวิจัยในอนาคตต่อไปของผู้วิจัยนี้ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพความยั่งยืนของการออกแบบระบบการหล่อ การฝึกจำลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในอุตสาหกรรม การหล่อสามารถสร้างผลประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพ การประหยัดเวลา การลดของเสีย และการปรับปรุงคุณภาพขั้นสุดท้ายเพื่อประโยชน์ในการแข่งขันในตลาดโลก

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Ik - Tae Im, Woo - Seung Kim and Kwan - Soo Lee, "A unified analysis of filling and solidification in casting with natural convection," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 44, issue 8, pp. 1507-1515, Apr. 2001.

[2] S.M.H. Mirbagheri, H. Esmaeileian, S. Serajzadeh, N. Varahram and P. Davami, "Simulation of melt flow in coated mould cavity in the casting process," Journal of Materials Processing Technology, vol. 142, issue 2, pp. 493-507, Nov. 2003.

[3] J. Campbell, "Structure, defects and properties of the finished casting," in Castings, 2nd ed. Burlington, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2003, ch. 9, pp. 267-305.

[4] T. Wanga, S. Yao, Q. Tong, L. Sui, "Improved filling condition to reduce casting inclusions using the submerged gate method," Journal of Manufacturing Processes, vol. 27, pp. 108-113, Jun. 2017.

[5] R. Babaei, J. Abdollahi, P. Homayonifar, N. Varahram, P. Davami, "Improved advection algorithm of computational modeling of free surface flow using structured grids," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 195, issue 7-8, pp. 775-795, Jan. 2006.