



การศึกษาตัวแปรกระบวนการผลิตสายพานดินตะขากับโปรแกรม Cast Designer สำหรับแบบหล่ออินเวสต์เมนต์เพื่อลดการหดตัว

ทินกร สวัสดิสาร* ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว และ พัชรพิมล สุวรรณกาญจน์

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: den.tinnagorn@gmail.com

วันที่รับบทความ: 16 มีนาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 15 สิงหาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 18 สิงหาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 15 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: เทคโนโลยีการขึ้นรูปทางวิศวกรรมในปัจจุบันมีความก้าวหน้าอย่างมาก ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานด้วยเครื่องมือ เครื่องจักรที่ทันสมัยมากขึ้น การผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อน งานต้นแบบ งานที่มีลักษณะเฉพาะสามารถทำได้อย่างรวดเร็วขึ้นตามไปด้วย การนำโปรแกรมจำลองทางด้านวิศวกรรมเข้ามาช่วยให้การทำงานเป็นไปด้วยความราบรื่นก็มีความจำเป็นไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน ในกระบวนการหล่อโลหะแบบที่ียงตรงสูงเป็นกรรมวิธีการผลิตหนึ่งที่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อน งานที่ต้องการรายละเอียดโดยไม่ผ่านการตัดปาดผิวได้เป็นอย่างดี แต่มักพบข้อบกพร่องจำนวนหนึ่งที่เกิดขึ้นได้บ่อยครั้งจากประเภทการหดตัว ซึ่งการเทหล่อประกอบด้วยปัจจัยหลายส่วนสำคัญ ผู้วิจัยจึงนำโปรแกรม Cast Designer จำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลวสำหรับขึ้นรูปชิ้นส่วนสายพานดินตะขาบที่มีลักษณะเฉพาะ เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน พัฒนาการผลิตชิ้นส่วนงานเทหล่อแบบที่ียงตรงสูง ลดความสูญเสียที่ไม่จำเป็น รวมไปถึงการช่วยวิเคราะห์แนวโน้มในการผลิตที่ทำได้อย่างแม่นยำ การจำลองพฤติกรรมการไหล พบว่า ความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานหล่อเกิดขึ้นได้น้อยที่สุดในเงื่อนไขที่สองโดยไม่ส่งผลเสียหายต่อชิ้นงาน พบข้อบกพร่องประเภทการหดตัว คิดเป็นร้อยละ 0.039 โดยใช้เวลาในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว 23 วินาที และความเร็วในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว 40 เมตรต่อวินาที ขณะที่เงื่อนไขที่สามพบข้อบกพร่องประเภทการหดตัวที่น้อยที่สุด คิดเป็นร้อยละ 0.023 ซึ่งมีความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานที่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้

คำสำคัญ: หล่อที่ียงตรงสูง; กระบวนการหล่อ; การหดตัว; โปรแกรมแคสติ้งซอฟต์แวร์; สายพานดินตะขาบ

The study of Factors in Track Shoe Manufacturing Process with Cast Designer Program for Investment Casting to Reduce Shrinkage

Tinnagorn Swatdisan^{*}, Khanittha Wongseedakaew and Patpimol Suwankan

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

^{*} Corresponding author, E-mail: den.tinnagorn@gmail.com

Received: 16 March 2023; Revised: 15 August 2023; Accepted: 18 August 2023

Online Published: 15 December 2023

Abstract: Presently, engineering molding technology has made significant progress, making it possible to produce workpieces with modern tools and machines. Prototypes and unique work can also be done faster. An engineering simulation program is necessary to produce, and precision molding is one of the manufacturing processes that can produce complex workpieces or require detail without a machine. By the way, there are a lot of defects that occur in casting workpieces due to shrinkage. In this study, the casting designer is a simulation program that is necessary to investigate the flow behavior of molten metal for a track shoe part. To increase work efficiency, develop production, and reduce costs, including accurately analyzing trends in production. The flow behavior simulation result showed that the imperfections of the casting were minimal in the second condition without damaging the workpiece, displaying a shrinkage of 0.039 percent using a molten metal casting time of 23 seconds, and a molten metal casting velocity of 40 meters per second. While the third condition, it is the least shrinkage, representing 0.023 percent. The imperfections of the casting cannot be used.

Keywords: Investment casting; Casting process; Shrinkage; Cast designer; Track shoe



1. บทนำ

การเกษตรในปัจจุบันมีการใช้เครื่องจักรกลเพื่อเป็นเครื่องทุ่นแรงให้กับเกษตรกรอันเป็นสิ่งจำเป็นและหลีกเลี่ยงได้ยาก เครื่องมือเครื่องจักรกลทางการเกษตร ดังเช่น รถไถ รถแทรกเตอร์ ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายนี้ต้องอาศัยสายพานดินตะขាប់ในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งหรือสถานที่ต่างๆ อายุการใช้งานและลักษณะพื้นผิวของพื้นที่เป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อความเสียหายขึ้นกับสายพานดินตะขាប់ การดำเนินการซ่อมแซมชิ้นส่วนสายพานดินตะขាប់เป็นเรื่องที่เกิดขึ้นได้ยากอันเนื่องจากชิ้นส่วนสายพานดินตะขាប់มีลักษณะเฉพาะทางด้านรูปพรรณ (Profile) รูปร่าง (Shape) และขนาด (Dimension) การเลือกใช้กระบวนการหล่อโลหะแบบเที่ยงตรงสูง (Precision Casting) จึงเป็นกระบวนการผลิตหนึ่งที่สามารถผลิตชิ้นส่วนสายพานดินตะขាប់ได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งรายละเอียดของชิ้นส่วน ข้อจำกัดด้านการตัดแปดผิว (Machining) ขนาดและความเที่ยงตรง กระบวนการเทหล่อ (Casting Process) นี้สามารถทำได้ดีกว่ากระบวนการหล่อแบบอื่น แต่ทว่าในกระบวนการหล่อโลหะมักพบข้อบกพร่อง (Defect) ที่อาจจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานได้จากขั้นตอนการเทหล่อโลหะ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดโพรงอากาศ (Gas Porosity) รูพรุน (Void) โลหะหลอมเหลวไม่เต็มแม่พิมพ์ (Misrun) การเย็นตัวที่ไม่ประสานกัน (Cold Shut) การหดตัวของชิ้นงานหล่อ (Shrinkage) เป็นต้น

การออกแบบระบบการเทหล่อโลหะหลอมเหลวเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญต่อการเกิดความบกพร่องของชิ้นงานหล่อ ซึ่งในระบบการเทหล่อโลหะหลอมเหลวมี

องค์ประกอบหลายส่วน ดังต่อไปนี้ แอ่งเทโลหะหลอมเหลว (Pouring Basin) รูเท (Sprue) ทางวิ่งของโลหะหลอมเหลว (Runner) ทางเข้าโลหะหลอมเหลว (Ingate) รูล้น (Blind) ตลอดจนอุณหภูมิเทหล่อโลหะหลอมเหลว (Tapping Temperature) และอุณหภูมิอบแม่พิมพ์ (Burnout Temperature) ซึ่งปัญหาความบกพร่องในชิ้นงานเทหล่อเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ แต่ละสาเหตุของความบกพร่องมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความบกพร่องของชิ้นงานหล่อแตกต่างกันออกไป ดังนั้น การนำโปรแกรมหรือเครื่องมือเพื่อช่วยในการออกแบบ การจำลองพฤติกรรมกรหล่อ และการวิเคราะห์ผล เป็นการช่วยลดปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเทหล่อโลหะ ลดความบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ลดความสูญเสียด้านการลงทุน จึงนับได้ว่าโปรแกรมหรือเครื่องมือเหล่านี้มีความจำเป็นเพื่อตอบสนองความต้องการทางด้านวิศวกรรม โดยมีนักวิจัยจำนวนหนึ่งทำการจำลองพฤติกรรมกรไหลของโลหะเหลวด้วยโปรแกรม Cast Designer โดยการศึกษารูพรุนและอุณหภูมิเทหล่อ และการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลว (Casting System) ที่ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานคือ เทหล่อไม่เต็มแม่พิมพ์ รูพรุน ตามด และโพรงอากาศ [1] ในการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีทางเข้าของโลหะเหลวทางเดียวและมีการจัดวางเรียงชิ้นงานเป็นมุมเอียงกับระนาบแนวนอน 30 45 และ 60 องศา องศาที่มีผลในการเติมเต็มของโลหะหลอมเหลว ซึ่งมุมจัดวางที่ 60 องศา ใช้เวลาในการเติมเต็มน้อยสุดเพียง 1.0667 วินาที [2] การออกแบบอัตราส่วนทางไหลของโลหะเหลวคือพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งต่อพื้นที่หน้าตัดทางเข้าเป็น 1:1.5 โดยมีความเร็วในการฉีดโลหะเหลวระหว่าง



1.5-2.5 เมตรต่อวินาที มีมุมการไหล 20 30 45 และ 60 องศา และอุณหภูมิของโลหะเหลวระหว่าง 680-800 องศาเซลเซียส ผลของการออกแบบจำลองพบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน ต้องควบคุมความเร็วของการฉีดโลหะเหลว 2.4 เมตรต่อวินาที มุมของการไหลที่ 20 องศา และอุณหภูมิของโลหะเหลวที่ 690 องศาเซลเซียส [3] การออกแบบการทดลองจากอุณหภูมิอบเบ้า 480 540 และ 600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเทหล่อ 1,020 1,030 และ 1,060 องศาเซลเซียส เพื่อลดปัญหาของชิ้นงานที่เกิดจากการหดตัวในเงินสีชมพูจากกระบวนการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting Process) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบเบ้ากับอุณหภูมิเทหล่อมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดรูพรุนจากการหดตัว ซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมในการหล่อจะมีอุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 องศาเซลเซียส กับอุณหภูมิเทหล่อที่ 1,060 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 องศาเซลเซียส กับอุณหภูมิเทหล่อที่ 1,030 องศาเซลเซียส [4] นักวิจัยจำนวนหนึ่งได้ทดลองหลอมโลหะผสมสีขาวที่อุณหภูมิคงที่ 990 องศาเซลเซียส ด้วยกระบวนการหล่อแบบซีฟิ่งหาย (Lost Wax Casting Process) โดยการออกแบบระบบทางไหลของโลหะเหลวมีทางเข้ารูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 4 มิลลิเมตร มีทางวิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร และชิ้นงานทำมุม 45 องศา กับรูเทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ซึ่งทำจากปูนปลาสเตอร์ กำหนดอุณหภูมิแบบหล่อที่ 400 550 และ 630 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิแบบหล่อมีผลต่อการเกิดรูพรุนจากการหดตัวที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน มีลักษณะผิวหยาบ และรูปร่างไม่แน่นอน

อุณหภูมิแบบหล่อที่ 400 องศาเซลเซียส เกิดการหดตัวต่ำสุด [5] ด้านการศึกษาข้อบกพร่องของชิ้นงานประเภทโพรงอากาศ โดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการหล่อ กำหนดให้มีทางเข้ากว้าง 1.5 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร มุมการไหลตั้งแต่ 10 ถึง 60 องศา ความเร็วของโลหะเหลว 25 30 และ 60 เมตรต่อวินาที และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางวิ่งต่อพื้นที่หน้าตัดทางเข้าตั้งแต่ 1.4 ถึง 3.5 พบว่าอิทธิพลของตัวแปรมุมการไหลในช่วง 20 ถึง 40 องศา เกิดข้อบกพร่องประเภทโพรงอากาศน้อย และอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดไม่ควรต่ำกว่า 1 เท่า และไม่ควรเกิน 2.5 เท่า [6] การตรวจสอบความบกพร่องของชิ้นงานตัวเรือนสูบด้วยวิธีการเอกซเรย์ พบข้อบกพร่องคือการเกิดโพรงอากาศ จึงทำการจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Flow 3D Cast วิเคราะห์ปัญหาจากชิ้นงานเดิม และออกแบบระบบทางไหลของโลหะเหลว โดยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดทางเข้าเป็น 37.5 ตาราง-มิลลิเมตร และเพิ่มพื้นที่หน้าตัดช่องทางออกเป็น 52.5 ตารางมิลลิเมตร พบว่าการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดทางเข้าจะยิ่งทำให้เกิดโพรงอากาศในชิ้นงาน แต่ในทางกลับกันการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดช่องทางออกจะทำให้ชิ้นงานเกิดโพรงอากาศลดน้อยลง [7] การทดลองเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับข้อบกพร่องของชิ้นงานประเภทโพรงหดตัว โดยการใช้โปรแกรมทางสถิติคือ Minitab ในการวิเคราะห์ กำหนดแรงดัน 750 900 และ 1,000 บาร์ ความเร็วที่ทางเข้า 30 36 และ 42 เมตรต่อวินาที และระยะเวลาในการหล่อเย็น 127 130 และ 133 วินาที พบว่า การเพิ่มแรงดันฉีดในระหว่างการเย็นตัวและการหดตัวนั้นปริมาณของ



โลหะเหลวจะถูกดันเข้าไปซัดเซยในส่วนที่เป็นโพรง จึงทำให้โพรงหดตัวนั้นมีขนาดที่เล็กลง [8] การวิเคราะห์สาเหตุของจุดเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหล่อของดุมล้อรถไถนา ชิ้นงานหล่อเย็นตัวแบบไม่ประสาน และชิ้นงานหล่อไม่เต็มแม่พิมพ์ โดยการจำลองกระบวนการหล่อด้วยโปรแกรม ProCAST กำหนดอัตราการเทหล่อที่ 1,000 กรัมต่อวินาที และอุณหภูมิเทหล่อ 1,190 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่ 1,220 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส ไม่เกิดจุดเสียในชิ้นงาน แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,200 องศาเซลเซียส โลหะหลอมเหลวจะเกิดการแข็งตัวก่อนเต็มแบบทำให้ชิ้นงานเกิดจุดเสียหล่อไม่เต็มแม่พิมพ์ และชิ้นงานเกิดการเย็นตัวไม่ประสาน [9] อย่างไรก็ตาม การเทหล่อชิ้นส่วนสายพานดินตะขาบด้วยในกระบวนการเทหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) ที่มีวิธีการแบบเที่ยงตรงสูง โดยเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทางการเกษตรที่มีรูปพรรณซับซ้อนและประกอบเข้ากับชิ้นส่วนอื่นได้ เช่น สลักเกลียว บูชประคอง เป็นต้น ดังรูปที่ 1 เพื่อแก้ไขลดความบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการเทหล่อโลหะจริง และปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานสายพานดินตะขาบได้ ผู้วิจัยจึงนำโปรแกรม Cast Designer ช่วยในการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะ และวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของการเทหล่อโลหะหลอมเหลวชิ้นส่วนสายพานดินตะขาบนี้ ซึ่งใช้เวลาในการเทและความเร็วในการไหลในโพรงแบบแม่พิมพ์ เพื่อหาข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อประเภทการหดตัว นำไปสู่การแก้ไขชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 1 ชิ้นงานสายพานดินตะขาบที่ใช้งานจริง

2. วิธีการดำเนินงานทดลอง

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปหล่อเป็นชิ้นส่วนสายพานดินตะขาบเป็นเหล็กเกรด JIS SCM 415 ซึ่งจะจัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกินร้อยละ 0.2 นอกจากคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น แมงกานีส (Mn) ซิลิคอน (Si) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) เป็นต้น สมบัติของเหล็ก JIS SCM 415 มีความเหนียว แกร่งดี (Toughness) มีค่ายืดตัวสูง (Ductility) สามารถดัดงอ (Bending) ได้ง่าย ด้านทานต่อการบิดได้ดี (Torque) ด้านทานต่อการล้าได้ดี (Fatigue) และผิวด้านทานต่อการสึกหรอได้ดีเมื่อชุบคาร์บูไรซิง (Carburizing) มีความสามารถในการชุบแข็งแบบคาร์บูไรซิงชุบแข็งอุณหภูมิ 860-930 องศาเซลเซียส โดยใช้สารชุบเป็นน้ำมัน (Oil) ความแข็งก่อนชุบจะอยู่ที่ 8-12 HRC ส่วนความแข็งหลังชุบจะอยู่ที่ 58-60 HRC อุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัว (Tempering) 170-210 องศาเซลเซียส ใช้เวลาที่ 1 ชั่วโมง ค่าความแข็งหลังอบคืนตัว (Hardness) แล้วจะอยู่ที่ 52-56 HRC และ



การนำไปใช้งานส่วนมากนิยมใช้ทำอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องรับภาระความล้าในระดับปานกลาง และมีการเสียดสีระหว่างการใช้งานสูง ทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) มีความเหนียวภายใน เช่น เฟืองตาม หรือเฟืองที่มีรอบคงที่ เพลาที่รับแรงบิดไม่สูงมากนัก สลัก อุปกรณ์ชิ้นส่วนในการขุดเจาะดิน อุปกรณ์การเกษตร อะไหล่รถยนต์ รถจักรยานยนต์ และลูกปืนทนการเสียดสี โดยเหล็กเกรด JIS SCM 415 มีสมบัติทางเคมี ดังตารางที่ 1

2.2 กระบวนการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting)

กระบวนการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะอีกชนิดหนึ่ง ที่จัดอยู่ในกระบวนการหล่อ ซึ่งการหล่อโลหะหลอมเหลวแบบเที่ยงตรงสูงนี้ จะทำโดยการสร้างใส่แบบหล่อ หรือกระสวน (Pattern) ตามรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการ จะทำจากขี้ผึ้ง (Wax) นำมาประกอบติดกับระบบการเทหล่อ (Pattern Assembly) ประกอบด้วยแอ่งเทโลหะหลอมเหลว รูปโลหะหลอมเหลว ทางวิ่งโลหะหลอมเหลว และทางเข้าโลหะหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากประกอบเข้ากับส่วนต่างๆของระบบเทหล่อเสร็จแล้วจะนำไปเคลือบผิวกับวัสดุทนไฟที่ประกอบด้วย Zircon Sand และ Alumina Sand เป็นธาตุหลัก เพื่อทำเป็นแม่พิมพ์หล่อ ดังรูปที่ 3 เมื่อแม่พิมพ์แข็งตัวและแห้งแล้วจะนำไปอบด้วยความร้อนเพื่อทำการไล่ขี้ผึ้งออกจากแม่พิมพ์ และก่อนที่จะเทโลหะหลอมเหลวเข้าแม่พิมพ์จะมีการอุ่นแม่พิมพ์ให้มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเทหล่อของโลหะหลอมเหลว เมื่อโลหะแข็งตัว จะทำการกระเทาะส่วนที่เป็นแม่พิมพ์ออกจากชิ้นงาน หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปตกแต่งเพื่อความเรียบร้อย ซึ่ง

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ [10]

Chemical composition of JIS SCM 415 (wt %)

C	0.16
Si	0.19
Mn	0.83
P	0.025
S	0.017
Ni	0.08
Cr	1.08
Mo	0.16
Cu	0.11

การหล่อแบบเที่ยงตรงสูงนี้สามารถหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ผิวชิ้นงานที่ได้มีความเรียบมาก มีความละเอียดและแม่นยำทางด้านขนาดสูง ชิ้นงานที่ได้ไม่ต้องปรับแต่งผิวหรือแปรรูปอีก และใช้ได้กับโลหะหลายชนิด แต่กรรมวิธีการหล่อนี้มีราคาค่อนข้างสูง จำเป็นต้องทำกระสวนและแม่พิมพ์ใหม่ทุกครั้งและที่สำคัญอีกประการคือจำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญในการทำแม่พิมพ์หล่อ



รูปที่ 2 ชิ้นงานหลังการประกอบเข้ากับส่วนต่างๆ ของระบบเทหล่อเป็นต้นเทียน (Way Tree)



รูปที่ 3 ชิ้นงานหลังการเคลือบวัสดุทนไฟ เพื่อเป็นแม่พิมพ์หล่อ

2.3 ตัวแปรในการจำลอง

การจำลองเพื่อศึกษากระบวนการเทหล่อโลหะหลอมเหลวมีตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อจำนวนมาก การทดลองนี้ถูกกำหนดอุณหภูมิเทหล่อโลหะหลอมเหลว 1,680 องศาเซลเซียส มีวัสดุที่ใช้ในการเทหล่อเป็น JIS SCM 415 แม่พิมพ์ประกอบด้วยวัสดุทนไฟ Zircon Sand และ Alumina Sand เป็นธาตุหลัก ความหนาของแม่พิมพ์ 8 มิลลิเมตร และอบแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส และกำหนดตัวแปร (Variable) ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานประเภทการหดตัว ดังสมการที่ 1 เวลาที่ใช้เทโลหะหลอมเหลว (t) และดังสมการที่ 2 คือความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลว (V)

เนื่องจากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ได้เลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดนามาศึกษา คือ เวลาในการเทหล่อ และความเร็วในการเทหล่อ ซึ่งความเร็วในการไหลที่แตกต่างกันจะมีอิทธิพลต่อการไหลของโลหะหลอมเหลวแบบปั่นป่วนจะทำให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่อง

$$t \approx (0.05 - 0.1) \times t_f \times (H_c / H_s) \quad (1)$$

โดยที่ t_f = เวลาของการแข็งตัวของโลหะเหลว (sec)

t = เวลาที่ใช้เทโลหะเหลวโดยประมาณ (sec)

H_c = ความสูงของชิ้นงานหล่อ หรือความหนาของชิ้นงานหล่อ (mm)

H_s = ความสูงของรูเท (mm)

$$v = \sqrt{2gH_b} \quad (2)$$

โดยที่ V = ความเร็วในการไหล (m/s)

A = พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (mm²)

g = ค่าแรงโน้มถ่วง (9.81 m/s²)

H_b = ความสูงของแอ่งเท (mm)

มากกว่าการไหลของโลหะหลอมเหลวที่เป็นหลอมเหลวอันเป็นสาเหตุของการไหลแบบปั่นป่วน หรือการไหลแบบราบเรียบ การไหลของโลหะแบบราบเรียบ ดังนั้นในช่วงตัวแปรมี ดังนี้ คือ ค่าสูง ค่ากลาง และค่าต่ำ เมื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลในระบบของการเทหล่อทั้งหมดแล้ว จะสามารถเห็นค่าของผลลัพธ์ของการเทหล่อที่ดี การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวได้รับอิทธิพลจากเวลาในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว หากโลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวระหว่างการเทเข้าสู่โพรงแบบแม่พิมพ์ จะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่องขึ้นได้

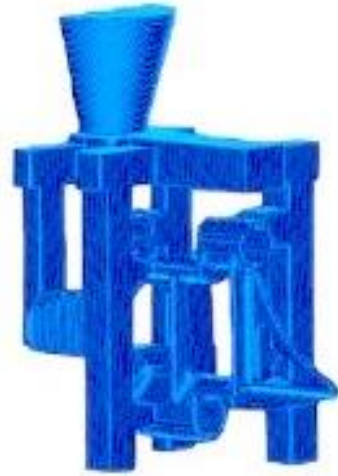
จากการกำหนดเงื่อนไขการทดลองสำหรับการเทหล่อโลหะ เพื่อให้ได้มาซึ่งเวลาที่ใช้เทโลหะหลอมเหลว และความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลว จากตัวแปรทั้งสามค่า ที่ประกอบด้วย ค่าสูง ค่ากลางและค่าต่ำ จึงกำหนดสามเงื่อนไข ดังนี้ เวลาที่ใช้เทโลหะหลอมเหลวเงื่อนไขที่หนึ่ง 34 วินาที เงื่อนไขที่สอง 23 วินาที และเงื่อนไขที่สาม 17 วินาที ตามลำดับ และ



ใช้ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวตามเงื่อนไข 37, 40 และ 42 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ตัวแปรในเงื่อนไขทั้งสามนี้ใช้กำหนดในโปรแกรม Cast Designer เพื่อศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของโลหะเข้าสู่โพรงแบบแม่พิมพ์

2.4 โปรแกรม Cast Designer

Cast Designer เป็นโปรแกรมวิเคราะห์งานหล่อโลหะทุกชนิด ด้วยเทคโนโลยีการจำลอง Finite Element Method (FEM) ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะ และ CFD (Computer Fluid Dynamic) สามารถบอกจุดปัญหาต่างๆ ภายในเวลาอันรวดเร็วได้ ใช้งานง่าย คำนวณได้รวดเร็วและมีความแม่นยำสูง สามารถวิเคราะห์ได้หลายรูปแบบ เช่น แถบสีแสดงระดับความเร็วในการแข็งตัวของโลหะ อากาศภายในแม่พิมพ์ การหดตัว เป็นต้น โดยการนำ CAD แบบที่มีขนาดเท่ากับชิ้นงานจริงมาใส่ในโปรแกรม Cast Designer แล้วทำการกำหนดสร้าง Finite Element Method Mesh และทำการสร้างแม่พิมพ์เป็นแม่พิมพ์แบบที่ยังตรงสูง จะเห็นได้ว่าชิ้นงานจาก CAD มีการตัดแบ่งครึ่งหนึ่งเพื่อลดเวลาในการวิเคราะห์ผลจำลองของคอมพิวเตอร์ เนื่องจากชิ้นงานมีความสมมาตรกัน จึงเกิดพฤติกรรมที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 4 มีการกำหนดค่าอิเลเมนต์ (Elements) และกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ จากนั้นเริ่มทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ เช่น พฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ เวลาในการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวหลังจากเทเข้าสู่แม่พิมพ์ที่เต็มแล้ว และร้อยละการหดตัวของชิ้นงานหลังจากที่โลหะหลอมเหลวนั้นแข็งตัวแล้ว เป็นต้น



รูปที่ 4 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Finite Element Method Mesh

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

โปรแกรม Cast Designer ถูกนำมาใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลวในกระบวนการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting Process) ของชิ้นงานสายพานตีนตะขาก โดยกำหนดค่าความเร็วของการเทหล่อโดยการเลือกขนาดของอุปกรณ์ในการเทโลหะหลอมเหลว เพื่อเป็นตัวกำหนดปริมาตรของโลหะหลอมเหลวให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน ในการเทโลหะหลอมเหลวแต่ละครั้ง โลหะหลอมเหลวในอุปกรณ์ควรจะต้องมีปริมาตรเท่ากับหรือมากกว่าปริมาตรของชิ้นงานที่ต้องการเทหล่อโดยเทียบกับเวลาในการเทหล่อ จะได้เป็นความเร็วในการไหล การควบคุมความเร็วในการไหลนี้ต้องเร่งให้ทันก่อนเกิดการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว การออกแบบระบบการเทหล่อจึงจำเป็นต้องควบคุมด้วยตัวแปรดังในตารางที่ 2

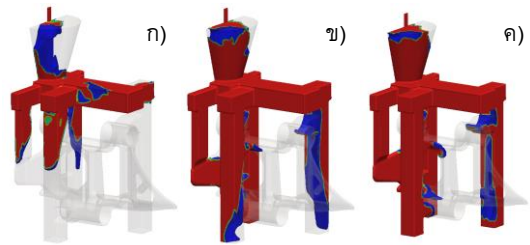


ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการเทหล่อโลหะหลอมเหลว

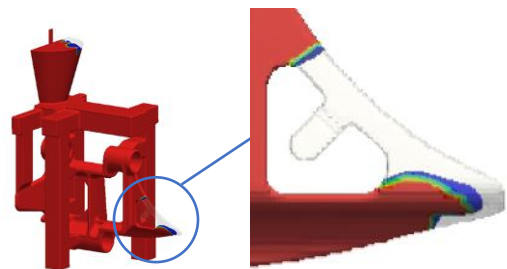
เงื่อนไขที่	เวลาที่ใช้เท (t) (วินาที)	ความเร็วในการไหล (V) (เมตรต่อวินาที)
1	34	37
2	23	40
3	17	42

การกำหนดเงื่อนไขและตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการเทหล่อโลหะหลอมเหลวแบบเทียงตรงสูงของชิ้นงานสายพานดินตะขาบ จะประกอบด้วยตัวแปรคือเวลาที่ใช้เทโลหะหลอมเหลวและใช้ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลว

จากผลการจำลองพบว่า เงื่อนไขที่หนึ่ง ใช้เวลาในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว 34 วินาที ด้วยความเร็วในการไหล 37 เมตรต่อวินาที จากการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว (Fluid Fraction) จะไหลไปตามทิศทางโดยเริ่มจากแอ่งเท ไหลไปยังทางวิ่ง และทางเข้า เข้าไปส่วนของชิ้นงาน และสิ้นสุดที่ส่วนครีบทงด้านข้างที่อยู่ไกลสุดจากทางเข้าของระบบเทหล่อ ดังแสดงรูปที่ 5 ในเงื่อนไขนี้จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลวเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ อันเนื่องมาจากบริเวณส่วนครีบทงด้านข้างนี้อยู่ในส่วนที่ไกลที่สุด อีกทั้งยังเป็นพื้นที่ที่เล็กและมีลักษณะแคบที่สุดจากทางเข้าของโลหะหลอมเหลว ทำให้เกิดความบกพร่องจากโลหะหลอมเหลวไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ ดังแสดงรูปที่ 6 เงื่อนไขที่หนึ่งนี้จะใช้เวลาในการเติมเต็มโลหะ (Fill Time) 1.6 วินาที

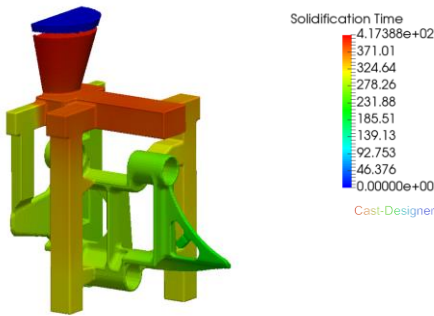


รูปที่ 5 พฤติกรรมการไหลของเงื่อนไขที่หนึ่ง ก) ร้อยละ 20 ข) ร้อยละ 60 ค) ร้อยละ 95

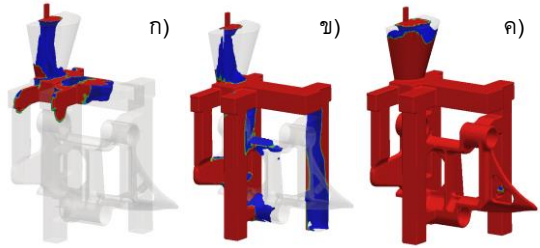


รูปที่ 6 โลหะหลอมเหลวที่ไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ตามเงื่อนไขที่หนึ่ง

เมื่อพิจารณาด้านเวลาในการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวขณะเทหล่อ (Solid Fraction) พบว่า เมื่อเทโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ สถานะของเหลวจะเปลี่ยนเป็นสถานะของแข็ง โดยมีการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวเริ่มจากพื้นที่ส่วนที่เล็กและบางที่สุดไปจนถึงพื้นที่ที่มากที่สุด ตั้งแต่ส่วนครีบทงด้านข้างของชิ้นงานที่ไล่ขึ้นไปจนถึงบริเวณที่เป็นแอ่งเท ดังแสดงรูปที่ 7 ซึ่งเงื่อนไขที่หนึ่ง นี้ใช้เวลาในการแข็งตัว 959 วินาที โดยความบกพร่องจากการเทหล่อนี้ พบว่าเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน ดังรูปที่ 8 ซึ่งแสดงถึงความบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมหดตัว (Shrinkage Porosity) อยู่ร้อยละ 0.06 การหดตัวของเงื่อนไขนี้มากกว่าเงื่อนไขที่สองและสาม ตามลำดับ

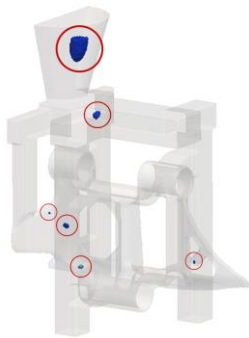


รูปที่ 7 พฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว



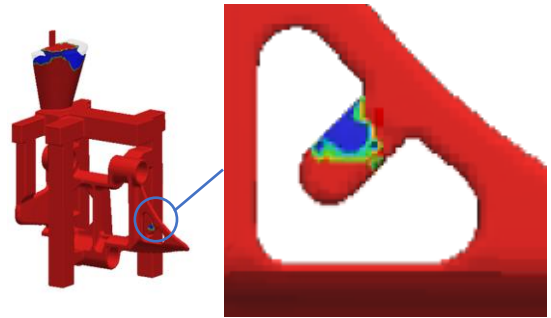
รูปที่ 9 พฤติกรรมการไหลของเงื่อนไขที่สอง

ก) ร้อยละ 20 ข) ร้อยละ 60 และ
ค) ร้อยละ 95



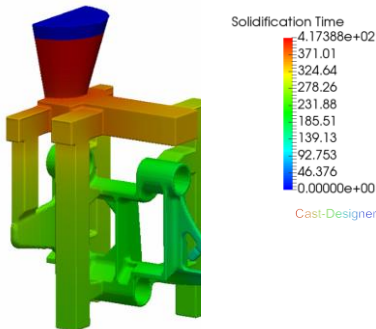
รูปที่ 8 ความบกพร่องที่พบจากการหดตัวตาม
เงื่อนไขที่หนึ่ง

เงื่อนไขที่สอง ใช้เวลาในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว 23 วินาที มีความเร็วในการไหล 40 เมตรต่อวินาที เงื่อนไขนี้จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว (Fluid Fraction) จะไหลไปตามทิศทางของระบบเทหล่อ คือ เริ่มจากแอ่งเท ไหลไปยังทางวิ่ง และทางเข้า เข้าไปสู่ชิ้นงาน จนไปถึงสิ้นสุดที่ส่วนครีบริดด้านข้างที่อยู่ไกลสุดจากทางเข้าของระบบเทหล่อ ดังแสดงรูปที่ 9 พฤติกรรมการไหลของเงื่อนไขนี้เป็นการไหลเข้าแบบไม่เต็มแม่พิมพ์บริเวณส่วนที่เป็นครีบริดด้านข้างของชิ้นงาน ซึ่งเงื่อนไขนี้พบว่าจะเกิดขึ้นน้อยกว่าเงื่อนไขที่หนึ่งและสาม เนื่องจากบริเวณนี้อยู่ไกลออกไปมากที่สุด

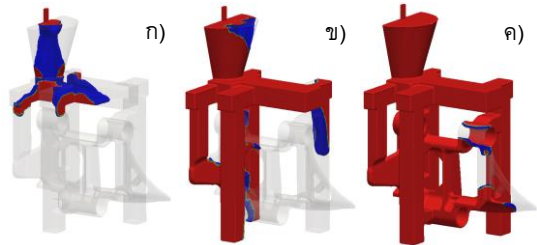


รูปที่ 10 โลหะหลอมเหลวที่ไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ตาม
เงื่อนไขที่สอง

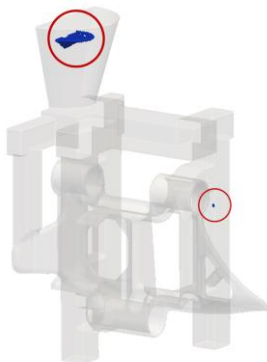
และมีพื้นที่ที่เล็กมากที่สุดจากทางเข้าของโลหะหลอมเหลว ดังรูปที่ 10 พฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว โดยใช้เวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) 2.5 วินาที เมื่อพิจารณาการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว (Solid Fraction) ตามเงื่อนไขที่สอง เห็นได้ว่าส่วนบริเวณครีบริดด้านข้างของชิ้นงาน เป็นส่วนพื้นที่ที่เล็กและบางที่สุด จะเป็นส่วนที่เริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งก่อนและไล่ไปจนถึงบริเวณแอ่งเทที่มีพื้นที่มากที่สุดต่อไป ดังรูปที่ 11 โดยใช้เวลาในการแข็งตัว 1.601 วินาที



รูปที่ 11 พฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว



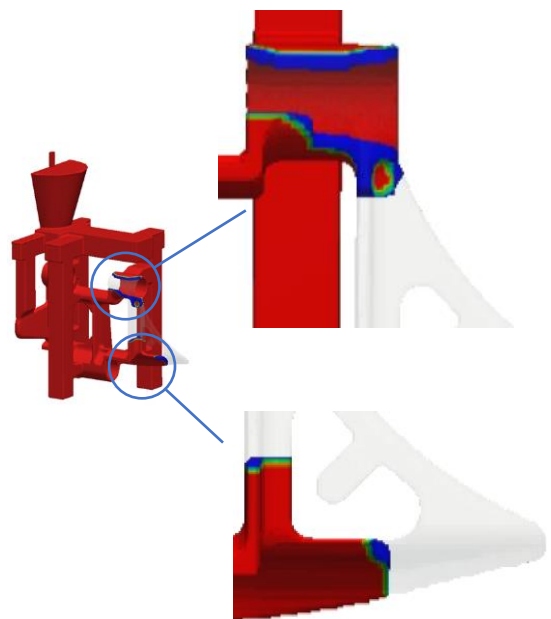
รูปที่ 13 พฤติกรรมการไหลของเงื่อนไขที่สาม
ก) ร้อยละ 20 ข) ร้อยละ 60 ค) ร้อยละ 95



รูปที่ 12 ความบกพร่องที่พบจากการหดตัวตาม
เงื่อนไขที่สอง

เงื่อนไขที่สาม ใช้เวลาในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว 17 วินาที ด้วยความเร็วในการไหลของโลหะ 42 เมตรต่อวินาที พฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว (Fluid Fraction) ในเงื่อนไขนี้จะไหลไปตามทิศทางของระบบเทหล่อ เช่นเดียวกับเงื่อนไขที่หนึ่งและเงื่อนไขที่สาม โดยเริ่มจากแอ่งเท ไหลไปยังทางวิ่ง และทางเข้า เข้าสู่ชิ้นงาน และสิ้นสุดที่ส่วนครีبد้านข้างที่อยู่ไกลสุดจากทางเข้าของระบบเทหล่อดังแสดงรูปที่ 13

รูปที่ 14 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว เป็นการไหลแบบไม่เต็มแม่พิมพ์ที่บริเวณส่วนครีبد้านข้างของชิ้นงานเช่นเดียวกับเงื่อนที่หนึ่ง

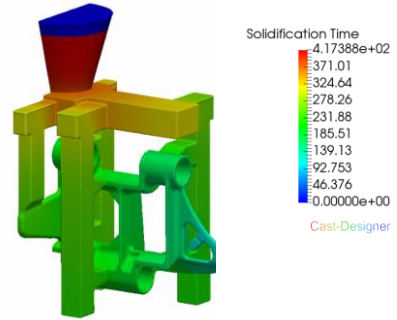


รูปที่ 14 โลหะหลอมเหลวที่ไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ตาม
เงื่อนไขที่สาม

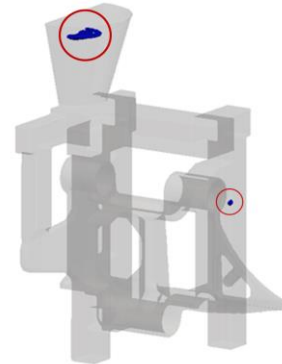
และสอง บริเวณที่อยู่ไกลสุดและมีพื้นที่เล็กสุดจากทางเข้าของโลหะหลอมเหลวยังเป็นส่วนที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องเงื่อนไขนี้พบว่า การหล่อไม่เต็มแม่พิมพ์เกิดขึ้นมากกว่าเงื่อนไขที่หนึ่งและสองตามลำดับ



การไหลของโลหะหลอมเหลวเมื่อเข้าสู่แ่งเทและไหลไปตามส่วนต่างๆ ของระบบหล่อไปสิ้นสุดการไหลส่วนที่เป็นครีบด้านข้างของชิ้นงาน โดยใช้เวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) 2.4 วินาที เมื่อพิจารณาถึงการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว (Solid Fraction) ที่เข้าสู่แม่พิมพ์ แล้วเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง จะเริ่มแข็งตัวจากพื้นที่ในส่วนที่เล็กที่สุดและบางที่สุดเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในทุกเงื่อนไข ดังแสดงรูปที่ 15 โดยใช้เวลาในการแข็งตัว 1.139 วินาที หลังการเทหล่อ พบว่า เกิดความบกพร่องของชิ้นงานประเภทหดตัว บริเวณที่เกิดการหดตัวนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงาน การหดตัว (Shrinkage Porosity) ที่เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 0.023 แสดงในรูปที่ 16 ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในเงื่อนไขที่สามนี้น้อยกว่าเงื่อนไขที่หนึ่งและสองตามลำดับ



รูปที่ 15 พฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว



รูปที่ 16 ความบกพร่องที่พบจากการหดตัวตามเงื่อนไขที่สาม

4. บทสรุป

การใช้โปรแกรม Cast Designer เพื่อจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลวในกระบวนการหล่อสายพานดินตะขابدวยกรรมวิธีการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานประเภทการหดตัวสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว (Fluid Fraction) พบว่ามีปัจจัยที่ส่งอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทการหดตัว (Shrinkage Porosity)
2. เวลาในการเทโลหะหลอมเหลวและความเร็วการไหลของโลหะหลอมเหลวเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทการหดตัวของชิ้นงาน

3. ความไม่สมบูรณ์จากการเทหล่อโลหะหลอมเหลวที่พบในชิ้นงานจากการจำลอง เป็นแบบหล่อไม่เต็มแม่พิมพ์ ความเสียหายที่พบได้น้อยสุดเป็นไปตามเงื่อนไขที่สอง หนึ่งและสาม ตามลำดับ

4. ความบกพร่องของชิ้นงานประเภทการหดตัวในเงื่อนไขที่สองเป็นลักษณะที่ไม่ส่งผลเสียต่อชิ้นงานหล่อสายพานดินตะขาบ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมการไหลของการเทหล่อโลหะหลอมเหลวด้วยโปรแกรม Cast Designer เกิดขึ้นร้อยละ 0.039 โดยใช้เวลาในการเทโลหะหลอมเหลว 23 วินาที ด้วยความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลว 40 เมตรต่อวินาที



5. ถึงแม้ว่าเมื่อพิจารณาถึงความบกพร่องประเภท การหดตัวที่เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว จากการจำลอง เงื่อนไขที่สามมีการหดตัวเกิดขึ้นร้อยละ 0.023 เป็นการ หดตัวที่น้อยที่สุด แต่จุดบกพร่องเกิดขึ้นอยู่ในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานไม่สามารถนำไปใช้งานได้

6. โปรแกรม Cast Designer สามารถใช้เป็น แนวทางสำหรับด้านการออกแบบระบบการหล่อ สามารถเลือกประเภทของการหล่อชิ้นส่วนสายพาน ดินตะขาก่อนการวางแผนการผลิตจริง และจากการ ออกแบบการหล่อเพื่อจำลองพฤติกรรมการไหลของ โลหะหลอมเหลวขณะเข้าสู่โพรงแบบของชิ้นส่วน สายพานดินตะขานี้ นำมาซึ่งผลลัพธ์ของสาเหตุความ บกพร่องในชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบ เทียงตรงสูงได้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลือจากคุณมงคล เอกสินธุ์กุล และบริษัท โฟร์ดี คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนโปรแกรม Cast Designer เป็นเครื่องมือสำหรับการวิจัย เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูงและให้คำปรึกษาได้ เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Laotweesub, P. Suwankan and P. Ngamsantivongsa, Simulating the flow behavior of liquid metal affects the damage of stainless steel in the investment casting process, Defence Technology Academic Journal, 2020, 2(4), 78-85. (in Thai)
- [2] P. Suwankan, N. Sornsuwit and P. Ngamsantivongsa, A study of flow behavior of AISI 430 stainless steel in investment casting by analysis program, Defence Technology Academic Journal, 2022, 3(9), 72-79. (in Thai)
- [3] P. Meitham and C. Suvanjumrat, High pressure die casting model and effective factors for porosity in parts, 28th Conference on Mechanical Engineering (MENETT 28), Proceedings, 2014, 705-711. (in Thai)
- [4] N. Apikamolkul and K. Kanlayasiri, Reduction of porosity in investment-casted pink silver: A case study of a jewelry company, The Journal of Industrial Technology, 2020, 80-89. (in Thai)
- [5] C. Pisansungkakoon, S. Rojananan and S. Rojananan, Effect of mold temperature on defects for white alloy in loss wax casting process, KMUTT Research and Development Journal, 2017, 91-101. (in Thai)
- [6] E. Kittikhewtraweersed, P. Rakkarn and S. Suranuntchai, Effects of fan gate's design parameters on flow behavior in a high pressure die casting process, KMUTT Research and Development Journal, 2011, 147-164. (in Thai)
- [7] P. Sratong-on, J. Kobbali, P. Tangworatham and N. Limjeerajarus, The reduction of blowholes defect in cylinder blocks during casting process, TNI Journal of Engineering and Technology, 2014, 30-35. (in Thai)



- [8] C. Sawangwong and S. Puajindanetr, Reduction of defect of shrinkage in high pressure die casting process, IE Network Conference, Proceeding, 2012, 1159-1162. (in Thai)
- [9] T. Kaiyarit, S. Kaewprasom and T. Thongklom, Misrun and cold shut analysis on the bob of pushcart wheel casting, The 10th National Academic Conference, Proceeding, 2016, 97-107. (in Thai)
- [10] Y. Hiraoka, Effect of phase in surface layers on rotating-bending fatigue strength of SCM415 steel after austenitic nitriding, Journal Material Research Technology, 2020, 9(3), 4894-4903.