

**การวิเคราะห์รอยการไหลบนผิวของผลิตภัณฑ์การหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงโดยใช้
คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม**

**Investigation of Flow Marks on Surface of High Pressure Die Casting Product using
Computer-Aided Engineering**

ปิยะนุช มีธรรม และ ชาคกริต สุวรรณจำรัส*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170
*ติดต่อ: อีเมลล์ chakrit.suv@mahidol.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 662 889 2138 ต่อ 6416, เบอร์โทรสาร 662 889 2138 ต่อ 6429

บทคัดย่อ

ข้อบกพร่องที่ตรวจพบบ่อยครั้งบนชิ้นงานรูปร่างบางที่ผลิตจากกระบวนการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูง คือ รอยการไหล (Flow Mark) ข้อบกพร่องนี้มีสาเหตุจากการที่น้ำโลหะเหลวที่ฉีดเข้าไปก่อนเกิดการแข็งตัวบางส่วนก่อนน้ำโลหะเหลวทั้งหมด ปัจจุบันแม่พิมพ์การหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงได้ถูกออกแบบโดยใช้เทคโนโลยี CAD/CAE ข้อบกพร่องหลายจุดที่เกิดขึ้นภายหลังการผลิตชิ้นงานการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงจะทำนายได้ด้วยผลการจำลอง แต่อย่างไรก็ยังไม่มียวิธีจำลองกระบวนการหล่อที่แน่ชัดว่าสามารถจะวิเคราะห์ข้อบกพร่องอันเนื่องมาจากรอยการไหลที่เกิดบนผิวของผลิตภัณฑ์จากการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการจำลองเพื่อนำผลไประบุรอยการไหลบนผิวของชิ้นงานที่ผลิตด้วยการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูง ผลจากการแข็งตัวและการกระจายตัวของอุณหภูมิในน้ำโลหะในการจำลองการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงเป็นผลที่สำคัญในการบ่งบอกการเกิดรอยการไหลบนผิวของชิ้นงาน ผลการวิเคราะห์นี้ได้ถูกนำไปตรวจสอบกับการทดลอง ชิ้นงานซึ่งถูกตัดทิ้งเนื่องจากข้อบกพร่องของรอยการไหลจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ซึ่งให้ผลเปรียบเทียบของรอยการไหลมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นผลที่ได้จากการจำลองการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงสามารถนำไปใช้ตรวจสอบการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานอันเนื่องมาจากรอยการไหล ซึ่งจะทำให้ได้การออกแบบผลิตภัณฑ์การหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงที่ดีต่อไป

คำหลัก: การวิเคราะห์ รอยการไหล พื้นผิว การหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูง คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม

Abstract

A defect which is often inspected on the thin shape of the high pressure die casting (HPDC) product is the flow mark defect. This defect is caused by the early partial solidification of the leading edge of one of the metal streams. Nowadays, the HPDC mold has been design using CAD/CAE technology. Many defects which appear after producing the HPDC product will forecast with simulated results. However, there are not a distinct simulating method can analyze the flow mark defect on surface of the HPDC product. This research aimed to propose the simulation method in order to obtain results to specify the flow mark on surface of the HPDC product. The solidification and temperature distribution in the HPDC simulating result were a key role to imply the flow mark. These results were confirmed with the experiment. The HPDC product which had been rejected causing the flow mark defect was compared to the simulated result. The comparison of flow marks had a good agreement. Therefore, results of the HPDC simulation can be used to investigate the flow mark defect for a good design of the HPDC product.

Keywords: Investigation, Flow Mark, Surface, High Pressure Die Casting, Computer-Aided Engineering.

CST-12

1. บทนำ

ปัญหาการขาดคุณภาพผิวที่ดีของชิ้นงานหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูง (High Pressure Die Casting) ได้แก่ การเกิดรูพรุน (Porosity) และการเกิดรอยการไหล (Flow mark) [1-3] ปัจจุบันปัญหาที่ผิวของชิ้นงานเป็นปัญหาที่รุนแรงสำหรับชิ้นงานที่ต้องการผิว เนื่องจากชิ้นงานเหล่านี้จะไม่ถูกนำไปตกแต่งผิวอีกครั้งก่อนการประกอบเพื่อจัดจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ ปัจจุบันการออกแบบและผลิตชิ้นงานหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงได้มีการนำเทคโนโลยี CAE (Computer Aided Engineering) เพื่อมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อบกพร่องของการฉีดหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูง

Hu และคณะ [4] ได้ใช้ซอฟต์แวร์ MAGMASOFT วิเคราะห์รูปร่างของทางเข้าน้ำโลหะ (Gate) และทางวิ่ง (Runner) เพื่อกำหนดรูปร่างที่เหมาะสมของทางเข้าน้ำโลหะและทางวิ่ง ทำให้ได้ชิ้นงานหล่อฝาปิดโทรศัพท์มือถือซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นแผ่นบางที่มีคุณภาพดี Kim และคณะ [5] ได้ใช้ซอฟต์แวร์ MAGMASOFT ออกแบบทางเข้าน้ำโลหะและทางวิ่งของฝาปิดคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop Case) การออกแบบระบบทางเข้าน้ำโลหะเหลวที่ดีที่สุดถูกตรวจสอบด้วยผลการวิเคราะห์ของซอฟต์แวร์โดยพบว่าลักษณะการไหลของน้ำโลหะเหลวที่ไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ (Mold Cavity) มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และการกระจายอุณหภูมิของโลหะเหลวที่เข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์จนเต็มมีลักษณะการกระจายแบบสม่ำเสมอหรือใกล้เคียงกัน Gunasegaram และคณะ [6] ได้ใช้วิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) เพื่อออกแบบทางวิ่งและกำหนดความเร็วของการฉีดชิ้นงานทดสอบอะลูมิเนียมโดยทำให้ชิ้นทดสอบมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการเรียงอนุภาคของวัสดุที่ดีและไม่เกิดฟองอากาศภายในเนื้อของชิ้นงานทดสอบ Ferreira [7] ได้ใช้วิธีผสมระหว่าง CAD (Computer Aided Design), RP (Rapid Prototyping) และ FEA (Finite Element Analysis) เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตฝาคอสมอสขึ้นประตู่ซึ่งผลิตจากวัสดุสังกะสี ซอฟต์แวร์ MoldFlow ถูกใช้ในการวิเคราะห์การไหลของน้ำโลหะเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ที่มีการออกแบบให้มีชิ้นงาน 4 ชิ้น จาก 2 ทางวิ่ง ทำให้ได้ชิ้นงานหล่อฝาคอสมอสขึ้นประตู่ที่มีการเติมเต็มน้ำโลหะโดยสมบูรณ์

การใช้เทคโนโลยี CAE ช่วยจำลองการไหลของน้ำโลหะเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ทำให้เข้าใจลักษณะการไหล และทราบสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องกับชิ้นงานหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงที่ถูกผลิต งานวิจัยที่ได้ถูกตรวจค้นไม่มีการใช้ผลการจำลองทำนายการเกิดรอยการไหลบนผิวชิ้นงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ผลการจำลองการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูง เพื่อนำไปใช้ตรวจสอบข้อบกพร่องของชิ้นงานเนื่องจากรอยการไหลบนพื้นผิว เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบชิ้นงานให้มีคุณภาพผิวที่ดีก่อนการผลิตจริง

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

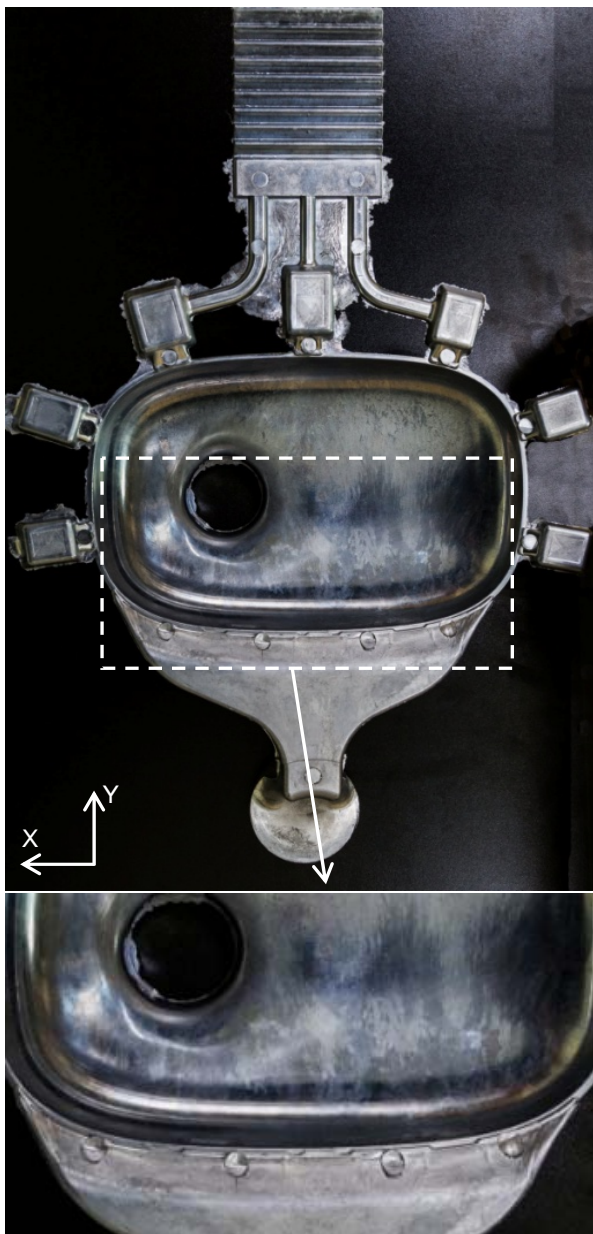
2.1 ชิ้นงานฉีดหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูง

ชิ้นงานอะลูมิเนียมของกรวย (Hopper) เครื่องบดเนื้อสัตว์ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงภายใต้เงื่อนไขของการฉีดที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิหน้าอะลูมิเนียมหลอมเหลววัดจากอ่างหลอมเหลว 670 องศาเซลเซียส และความเร็วในการฉีดที่ความเร็วสูงเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที อะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ใช้ในกระบวนการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงเป็นอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 โดยมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1 ภายหลังการฉีดหล่อกรวยเครื่องบดเนื้อสัตว์จะสังเกตเห็นรอยการไหล บนผิวของชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 1 รอยการไหลบนผิวของกรวยเครื่องบดเนื้อสัตว์จะมีลักษณะเป็นรอยต่างเป็นเส้นยาวและสันสลับกันทำให้เกิดความไม่สวยงามของผิวชิ้นงานและเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานชิ้นนี้ถูกคัดทิ้ง

ตารางที่ 1 สมบัติของอะลูมิเนียมหลอมเหลวเกรด ADC12

Description	Quantity	Unit
Density	12.00	kg/m ³
Specific Heat Capacity	10.50	J.kg/°K
Liquidus	613	°C
Solidus	427	°C
Heat Conductivity	121	W/(m°K)
Latent Heat	390	kJ/kg
Aluminum Temperature	660	°C

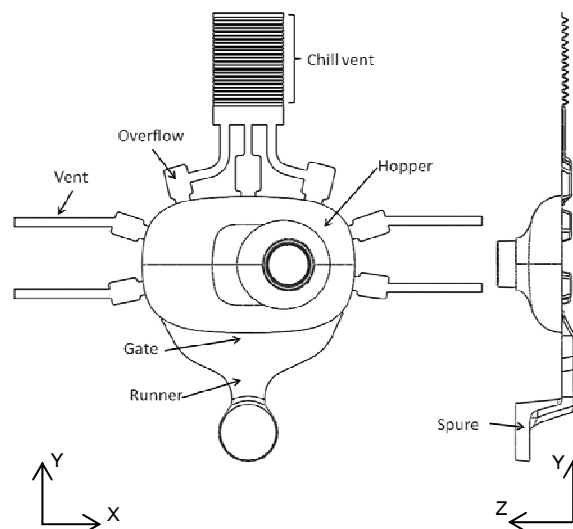
CST-12



รูปที่ 1 ชิ้นงานหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงของกรวยเครื่องบดเนื้อสัตว์ซึ่งเกิดรอยการไหลบนผิว

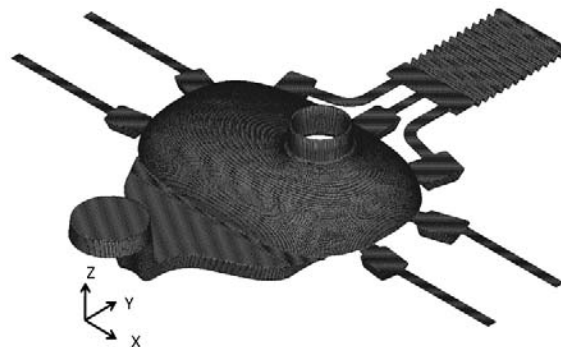
2.2 แบบจำลองการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูง

การจำลองการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงของชิ้นส่วนกรวยเครื่องบดเนื้อสัตว์ทำได้โดยการสร้างแบบจำลองสามมิติของเบ้าแม่พิมพ์ด้วยซอฟต์แวร์ CAD ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ซอฟต์แวร์ SolidWorks เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติเบ้าแม่พิมพ์ของกรวยเครื่องบดเนื้อสัตว์ประกอบด้วย รูเท (Spure) ทางวิ่ง ทางเข้าน้ำโลหะ รูล้น (Overflow) รูระบาย (Vent) และร่องระบาย (Chill Vent) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลอง 3 มิติ ของเบ้าแม่พิมพ์ของกรวยเครื่องบดเนื้อสัตว์

แบบจำลอง CAD สามมิติของเบ้าแม่พิมพ์จะถูกนำเข้ามาไว้ในซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ CAE ด้วยการใช้ไฟล์มาตรฐาน (Standard File) ได้แก่ ไฟล์นามสกุล .stp แบบจำลอง CAD จะถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ (Element) เล็กๆ และทำการทดสอบจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมของการคำนวณด้วยการทดสอบการลู่เข้าของคำตอบ (Convergent Test) ซึ่งทำให้สามารถแบ่งแบบจำลอง CAD ด้วยเอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยม (Hexahedral Element) จำนวน 417,797 เอลิเมนต์ และสามารถแสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) ของเบ้าแม่พิมพ์ได้ในรูปที่ 3 วัสดุอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 อุณหภูมิ 670 องศาเซลเซียส จะถูกกำหนดให้ไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ที่ตำแหน่ง



รูปที่ 3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ชิ้นส่วนกรวยเครื่องบดเนื้อสัตว์

CST-12

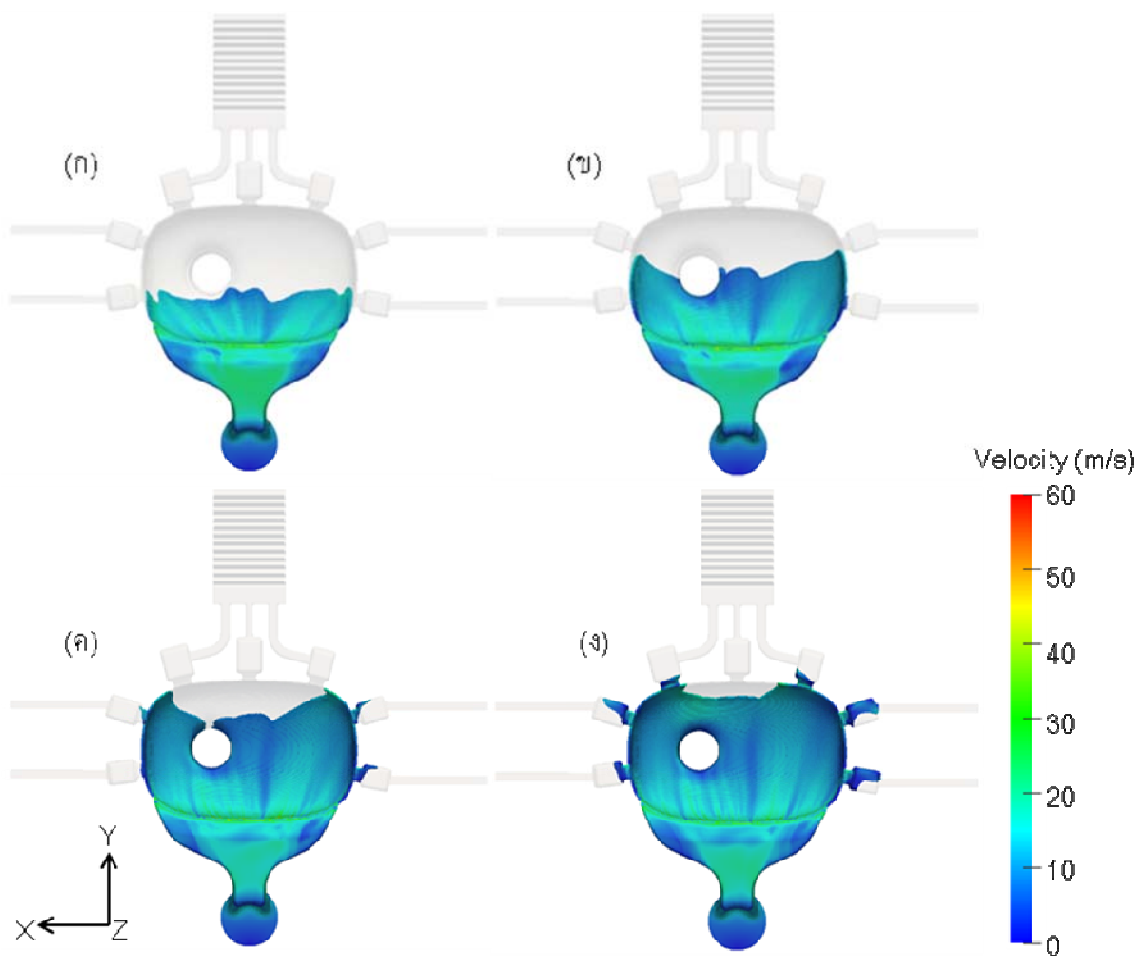
รูปที่ 4 แสดงภาพการไหลของน้ำอะลูมิเนียมเหลวเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ด้วยความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิและความเร็วของการฉีดหล่อทรายเครื่องบดเนื้อสัตว์ที่ตรวจพบรอยการไหลบนผิวของชิ้นงานจริง แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเบ้าแม่พิมพ์จะกำหนดให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอ โดยเบ้าแม่พิมพ์ผลิตจากวัสดุเหล็ก SKD61 ซึ่งมีสมบัติทางความร้อนแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์

Description	Quantity	Unit
Density	8.03	kg/m ³
Specific Heat Capacity	502	J.kg/°K
Heat Conductivity	15.10	W/(m°K)
Initial Temperature	100	°C

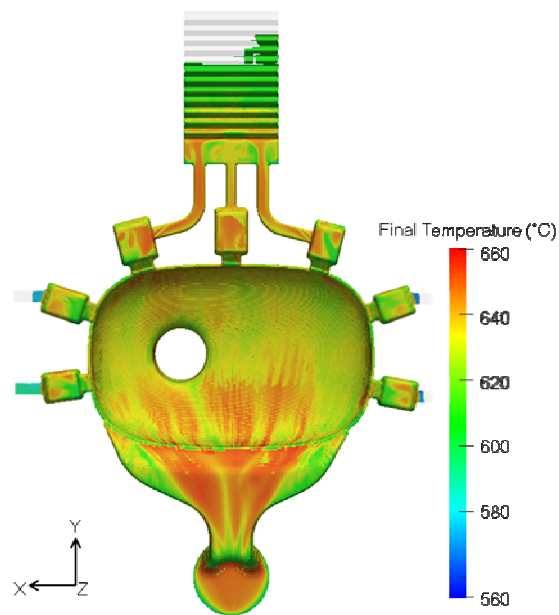
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการจำลองการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงสามารถแสดงเป็นภาพลำดับการไหลของน้ำอะลูมิเนียมเหลวไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ด้วยเจดสี (Contour) แสดงค่าความเร็วของการไหลที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 ค่าความเร็วสูงสุดของน้ำโลหะที่ไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์จะแสดงด้วยเจดสีแดง และค่าความเร็วที่ต่ำสุดของการไหลแสดงด้วยเจดสีน้ำเงิน โดยจะสังเกตเห็นลักษณะการไหลของน้ำโลหะเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์มีลักษณะการไหลเต็มเต็มเป็นระนาบตามแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหล (แกน X) การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงสามารถคำนวณเวลาการไหลของน้ำโลหะเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์จนเต็มเบ้าแม่พิมพ์ได้ 0.0411 วินาที และสามารถแสดงผลการแข็งตัวของอะลูมิเนียมเหลวด้วยการกระจายของอุณหภูมิของน้ำโลหะด้วยเจดสีแดงแสดงในรูปที่ 5 ค่าสูงสุด



รูปที่ 4 ภาพลำดับการไหลของน้ำอะลูมิเนียมเหลวเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ที่เวลา (ก) 0.02333 (ข) 0.0270 (ค) 0.030 และ (ง) 0.041 วินาที

CST-12



รูปที่ 5 ผลการกระจายอุณหภูมิของน้ำอะลูมิเนียมเหลว
ขณะที่มีการเติมจนเต็มเบ้าแม่พิมพ์

ของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์แสดงด้วยเจดสีแดง และค่าต่ำสุดของอุณหภูมิน้ำโลหะแสดงด้วยเจดสีน้ำเงิน ตามลำดับ

การกระจายตัวของอุณหภูมิของการจำลองการหล่อฉีดแม่พิมพ์แรงดันสูงของกรวยเครื่องบดเนื้อสัตว์ จะสังเกตเห็นลักษณะความแตกต่างของอุณหภูมิแสดงด้วยแถบสีส้ม (650 °C) ไหลเข้าภายในเบ้าแม่พิมพ์ซึ่งมีอุณหภูมิน้ำโลหะเหลวรอบๆ แสดงด้วยแถบสีเหลือง (635 °C) และสีเขียว (610 °C) อุณหภูมิน้ำโลหะเหลวที่แสดงด้วยแถบสีส้มจะมีค่าแตกต่างจากแถบสีเหลือง และแถบสีเขียว 25 °C และ 40 °C ตามลำดับ ค่าความแตกต่างกันของอุณหภูมิทำให้ทราบได้ว่าอุณหภูมิของน้ำโลหะเหลวที่มีการไหลเป็นเส้นมีค่าสูงกว่าน้ำโลหะเหลวบริเวณใกล้เคียงอย่างเด่นชัด ทำให้การแข็งตัวของน้ำโลหะเหลวเกิดการเย็นตัวแต่ละบริเวณของการไหลเกิดขึ้นไม่พร้อมเพรียงกัน และทำให้เกิดเป็นบริเวณที่มีรอยการไหลขึ้น ผลการระบุบริเวณที่เกิดรอยการไหลด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะสังเกตเห็นได้ว่าเป็นบริเวณรอยการไหลเดียวกันกับชิ้นงานจริง การเกิดอุณหภูมิของน้ำโลหะเหลวแตกต่างกันเป็นเส้นจนเป็นสาเหตุของการเกิดรอยการไหลภายหลังการเย็นลงและแข็งตัวของน้ำโลหะเหลวมีสาเหตุมาจากการออกแบบทางวิ่ง และทางเข้าน้ำโลหะไม่เหมาะสมจึงทำให้มีความเร็วของการไหลของน้ำโลหะ

เหลวไม่สม่ำเสมอตามระนาบตั้งฉากของทิศทางการไหล ดังนั้นบริเวณที่มีเส้นสายการไหลของน้ำโลหะที่มีค่าความเร็วสูงจะทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่ดีเท่ากับบริเวณที่มีการไหลต่ำ ซึ่งจะสังเกตได้จากผลการจำลองการไหลของน้ำโลหะในรูปที่ 4 เปรียบเทียบกับผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของน้ำโลหะในรูปที่ 5 บริเวณที่มีความเร็วสูงจะเป็นบริเวณที่มีความร้อนของน้ำโลหะสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งเป็นเหตุให้การแข็งตัวของโลหะเหลวเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน และเกิดรอยการไหลในที่สุด

4. สรุปผล

การจำลองการหล่อฉีดแม่พิมพ์แรงดันสูงของชิ้นงานกรวยเครื่องบดเนื้อสัตว์ถูกนำมาใช้ในการค้นหาสาเหตุของรอยการไหลบนผิวของชิ้นงาน การเตรียมแบบจำลองจะใช้แบบจำลอง 3 มิติ ของเบ้าแม่พิมพ์เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการคำนวณ ผลการจำลองการหล่อแม่พิมพ์แรงดันสูงสามารถแสดงผลการคำนวณได้ด้วยกราฟฟิกของความเร็วในการไหลของน้ำโลหะเหลวไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ และค่าการกระจายของอุณหภูมิของน้ำโลหะภายในเบ้าแม่พิมพ์ ความเร็วของการไหลของน้ำโลหะที่มีค่าสูงและทำให้น้ำโลหะไหลเป็นสายเล็กๆ จะทำให้มีการถ่ายเทความร้อนต่ำ ซึ่งทำให้เส้นสายการไหลนี้กลายเป็นรอยการไหล ภายหลังการฉีดน้ำโลหะสิ้นสุด และน้ำโลหะเย็นตัวลง ทั้งนี้เมื่อนำผลการจำลองไปเปรียบเทียบกับการผลิตชิ้นงานจริงพบว่าบริเวณที่คาดการณ์ว่าจะเป็นรอยการไหลของผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นบริเวณเดียวกันกับรอยการไหลที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ดังนั้นเพื่อลดปัญหารอยการไหลจึงจำเป็นต้องออกแบบ และกำหนดสภาวะการฉีดซึ่งทำให้ความเร็วของน้ำโลหะไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์สม่ำเสมอ และไม่มีการไหลที่เป็นสายที่มีความเร็วสูง เพื่อการปรับปรุงผลิตภัณฑ์กรวยเครื่องบดเนื้อสัตว์ชิ้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) และบริษัทไมโครปริซิชัน จำกัด ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท และได้รับความอนุเคราะห์ลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER จากบริษัทฟอร์ติคอร์ปอเรชั่น จำกัด

CST-12

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ramnath, V.B., Elanchezhian, C., Chandrasekhar, V., Kuman, A.A., Asif, S.M., Mohamed, G.R., Raj, D.V. and Kuman, C.S. (2014). Analysis and optimization of gating system for commutator end bracket, *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp.1312-1328
- [2] Wakington, W.G. (2003). *Die Casting Defects*, NADCA, Illinois.
- [3] Ghomashchi, M.R. (1995). High-pressure die casting: effect of fluid flow on the microstructure of LM24 die-casting alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 52, Nov 1993, pp. 193-206.
- [4] Hu, B.H., Tong, K.K., Niu, X.P. and Pinwill, I. (2000). Design and optimization of runner and gating systems for the die casting of thin-walled magnesium telecommunication parts through numerical simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 105, May 1999, pp. 128-133.
- [5] Kim, Y.C., Kang, C.S., Cho, J.I., Jeong, C.Y., Choi, S.W. and Hons, S.K. (2008). Die casting mold design of the thin-walled aluminum case by computational solidification simulation, *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 24(3), pp. 383-388.
- [6] Gunasegaram, D.R., Giyord, M., O'Donnell, R.G. and Finnin, B.R. (2013). Improvements engineered in UTS and elongation of aluminum alloy high pressure die casting through the alteration of runner geometry and plunger velocity, *Material Science & Engineering A*, vol. 559, pp. 276-286.
- [7] Ferreira, J.C. (2006). A study of advance die-casting technology integrating CAD/FP/FEA for Zn castings, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 31, pp. 235-243.