CST-40

แบบจำลองการหล่อแม่พิมพ์ความดันสูงกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงาน
High Pressure Die Casting Model and Effective Factors for Porosity in Parts

ปิยะนุช มีธรรม และ ชาคริต สุวรรณจำรัส*

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

บทคัดย่อ

ปัญหาข้อบกพร่องที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกระบวนการหล่อแม่พิมพ์ความดันสูง (high pressure die casting) คือ ปัญหารูพรุน (porosities) ซึ่งเกิดจากฟองอากาศที่มีขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ถูกกักเก็บไว้ในเนื้อของชิ้นงาน ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง ปริมาณของรูพรุนภายในชิ้นงานเป็นผลเนื่องมาจากการดักก๊าซ (gas entrapment) ซึ่งเกิดขึ้นขณะมีการไหลของน้ำโลหะเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงาน ได้แก่ ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะ มุมการไหล และอุณหภูมิของน้ำโลหะ ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานรูปทรงมาตรฐานซึ่งมีทางเข้าแบบใบพัด (fan gate) โดยการใช้ซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER จำลองการหล่อ และหาเปอร์เซ็นต์ของการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการการหารูพรุนในทางทฤษฎี เพื่อกำหนดเงื่อนไขการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความเหมาะสมของการลดการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงาน และเป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์ที่ดีได้ต่อไป

คำหลัก: การหล่อแม่พิมพ์; ความดันสูง; แบบจำลอง; แม่พิมพ์; รูพรุน

Abstract

The important defect in the high pressure die casting process is the porosities which occur by small and large air bubbles are stored in parts. The effect of porosity is the decrement of the part strength. The numbers of porosities in parts depend on the gas entrapment which occurs during the metal liquid flow into the cavity of mold. This research had study the variables that affected to the porosities inside parts including the injection speed, flow angle and temperature of liquid metal. The parts with standard shape and a fan gate were simulated for the high pressure die casting process by the CAST-DESIGNER software. The percent porosity of simulated results was compared with theory to require the suitable conditions of mold design for reducing porosities and guide for the perfectly mold design.

Keywords: Die casting; High pressure; Model; Mold; Porosity.

1. บทนำ

กรรมวิธีการหล่อแม่พิมพ์ ความดันสูง (high pressure die casting process) มีวิธีการใช้ลูกสูบอัดน้ำโลหะ เช่น อะลูมิเนียม สังกะสี เข้าสู่ช่องว่างภายในแม่พิมพ์ (mold) ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ รูเท (spure) รันเนอร์ (runner) เกท (gate) อินเกท (ingate) และ รูล้น (over flow) ระบบทางเดินน้ำโลหะเหลว (gating system) ประกอบไปด้วย รันเนอร์ เกท

และอินเกท ที่เป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแม่พิมพ์ความดันสูง ระบบทางเดินน้ำโลหะเหลวที่ดีจะต้องทำให้ความเร็วของน้ำโลหะเหลวขณะที่ไหลผ่านอินเกท เข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์มีความเร็วเพียงพอที่จะเติมน้ำโลหะให้เต็มเบ้าแม่พิมพ์ก่อนที่จะเกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะ ด้วยเหตุนี้ระบบทางเดินน้ำโลหะเหลวจึงถูกออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดลดลงเป็นสัดส่วนเชิงเส้นเพื่อจะช่วยเพิ่มความเร็วของน้ำโลหะเหลวที่ไหลผ่านอินเก ท นอกจากการควบคุมควา มเร็วการไหลของน้ำโลหะเหลวด้วยพื้นที่หน้าตัดแล้วการออกแบบมุมการไหล (flow angle) ของเกทจะช่วยกำหนดทิศทางและลักษณะการไหลที่ไม่ทำให้น้ำโลหะเหลวแตก กระจาย ทำให้อากาศรวมตัวกับโลห ะเหลวได้ง่าย และเกิดโพรงอากาศ ที่ชิ้นงาน [1] เนื่องจากน้ำโลหะ ไหล เข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ ที่รูปร่างเป็นช่องแคบ ๆ ความหนืดที่ผิวของเบ้าแม่พิมพ์จะทำให้ การไหล เป็นแบบปั่นป่วน (turbulent flow) และเป็นสาเหตุให้เกิดการดักก๊าซ (gas entrapment) ในเบ้าแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน [2] ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง [3-6] การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุนสามารถช่วยลดปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาตัวแปรที่เป็นสาเหตุของการเกิดรูพรุนของแม่พิมพ์การหล่อแม่พิมพ์ความดันสูง โดยการนำซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER จำลองการหล่อแม่พิมพ์ความดันสูงในชิ้นงานมาตรฐาน ตัวแปรที่ตรวจพบด้วยแบบจำลองจะถูกนำไปใช้ประเมินค่าในการออกแบบแม่พิมพ์ที่ปราศจากรูพรุนได้ก่อนการผลิตจริง

2. วิธีการคำนวณหารูพรุนภายในชิ้นงาน

รูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเป็นปัญหาที่มีความสำคัญมากของกระบวนการหล่อแม่พิมพ์ความดันสูง โดยสาเหตุของการเกิดรูพรุนนั้นมาจาก 2 สาเหตุหลัก คือ การหดตัวของน้ำโลหะในช่วงการแข็งตัว และการเกิดการดักก๊าซในระหว่างการเติมน้ำโลหะในเบ้าแม่พิมพ์ วิธีการหาปริมาณของรูพรุนใ น ชิ้นงานหล่อแม่พิมพ์ความดันสูง สามารถคำนวณ ได้จากสมการที่ 1

$$\%P = \frac{V_{gas} + V_{hydrogen}}{V_{casting}} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ V_{gas} คือ ปริมาณก๊าซที่เกิดจากการหดตัวซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$V_{hydrogen}$ คือ ปริมาตรของก๊าซไฮโดรเจน

$$V_{gas} = \frac{V_{casting} \times \%S}{100} \qquad (2)$$

เมื่อ $V_{casting}$ คือ ปริมาตรเบ้าของแม่พิมพ์ และ

$\%S$ คือ ร้อยละการหดตัวของน้ำโลหะช่วงการแข็งตัวมีค่าแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณการหดตัวของโลหะในระหว่างกระบวนการแข็งตัวและการหดตัวของของแข็ง [7]

Metal	Volumetric Contraction Due to:	
	Solidification Shrinkage, %	Solid Thermal Contraction, %
Aluminum	7.0	5.6
Al alloy (typical)	7.0	5.0
Gray cast iron	1.8	3.0
Gray cast iron, high C	0.0	3.0
Low cast steel	3.0	7.2
Copper	4.5	7.5
Bronze (Cu-Sn)	5.5	6.0

ก๊าซที่เกิดขึ้นในการเติมน้ำโลหะในเบ้าแม่พิมพ์จากการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับอากาศที่เป็นอลูมิเนียมหลอมเหลว คือ ก๊าซไฮโดรเจนโดยมีสูตรการเกิดปฏิกิริยาแสดงในสมการที่ 3

$$3H_2O + 2Al \leftrightarrow Al_2O_3 + 3H_2 \qquad (3)$$

การคำนวณหาปริม าตรก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 4 และ 5

$$V_{hydrogen} = \frac{[H]_{hydrogen} \times m_{hydrogen}}{100} \qquad (4)$$

$$m_{hydrogen} = \rho_{Al} \times V_{casting} \qquad (5)$$

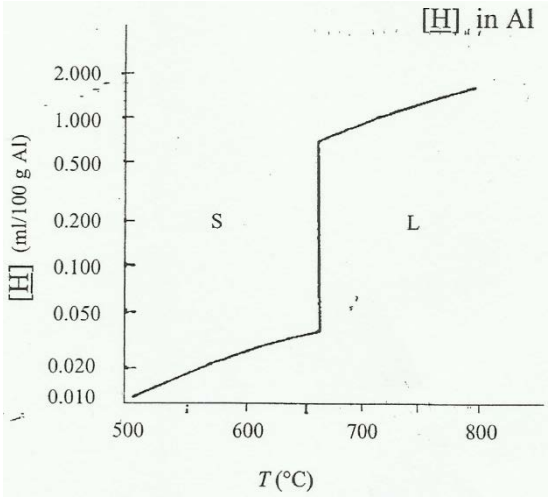
เมื่อ $V_{hydrogen}$ คือ ปริมาตรของก๊าซไฮโดรเจน

$[H]_{hydrogen}$ คือ ปริมาณการละลายของก๊าซไฮโดรเจนโดยมีกราฟแสดงอุณหภูมิในรูปที่ 1

CST-40

$m_{hydrogen}$ คือ น้ำหนักของก๊าซไฮโดรเจน

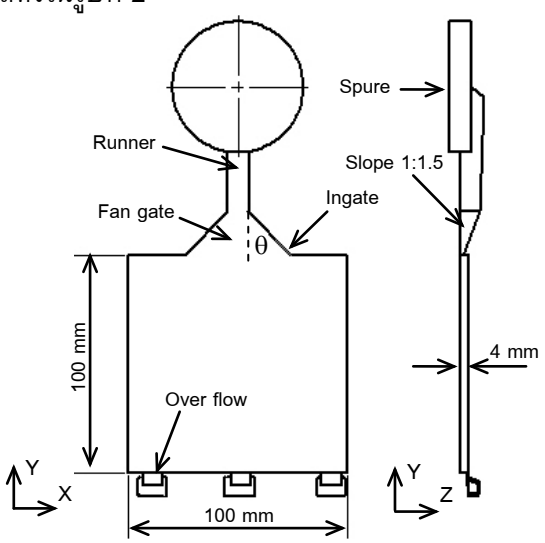
ρ_{Al} คือ ความหนาแน่นของอะลูมิเนียม



รูปที่ 1 กราฟการละลายของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมที่ความดันบรรยากาศ [8]

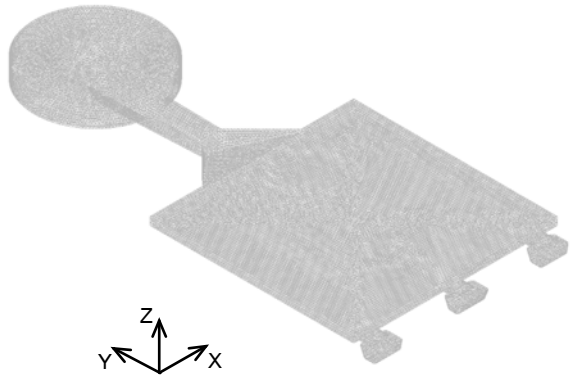
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ชิ้นงานทดสอบเพื่อใช้ในการจำลองแม่พิมพ์ความดันสูงถูกสร้างด้วยซอฟต์แวร์ CAD (computer aided design) เป็นชิ้นงานแผ่นบางรูปทรงสี่เหลี่ยมมีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความหนา เท่ากับ 100 x 100 x 4 mm กำหนดให้มีทางเข้าของน้ำโลหะ (gate) เป็นแบบใบพัด (fan gate) มีมุม θ เป็นมุมการไหล พื้นที่หน้าตัดของรันเนอร์ต่ออินเกท มีอัตราส่วน 1 :1.5 ความหนาของอินเกทกำหนดเท่ากับ 1.5 mm และมี รูล้นปริมาตร 479.80 mm^3 ติดกับชิ้นงานจำนวน 3 จุด แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงแบบเบ้าแม่พิมพ์ที่ใช้ในการจำลองการหล่อแม่พิมพ์ความดันสูง

แบบจำลอง CAD สามมิติของเบ้าแม่พิมพ์จะถูกนำมาแบ่งกริดด้วยซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER และทดสอบกริดอิสระ (grid independent) ทำให้สามารถแบ่งแบบจำลอง CAD ด้วยกริดชนิดปิรมิดฐานสามเหลี่ยมจำนวน 87 ,731 กริด และสามารถแสดงโครงสร้างกริดของแบบจำลองเบ้าแม่พิมพ์ได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างกริดของเบ้าแม่พิมพ์

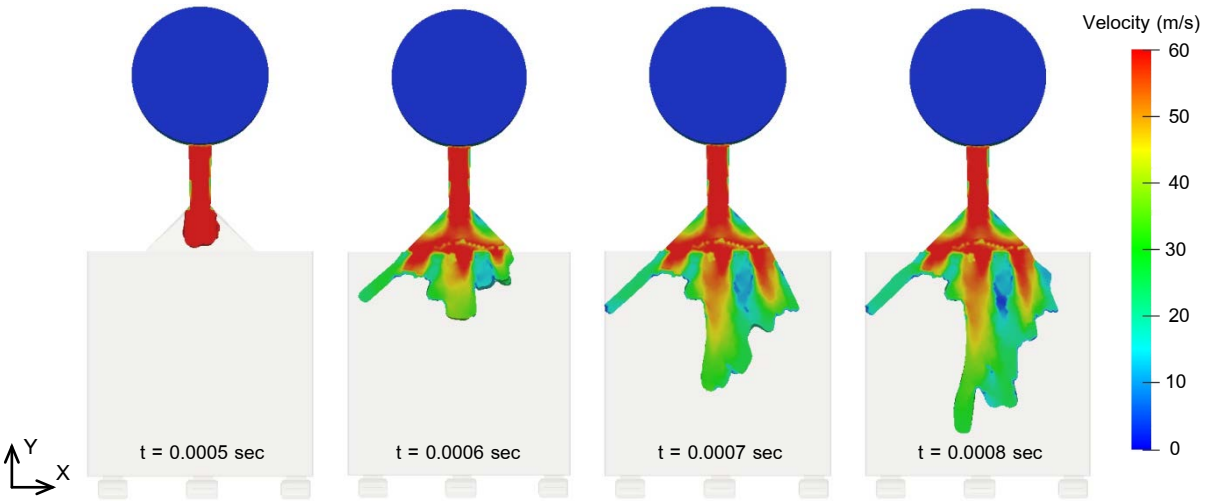
การศึกษาผลกระทบของความเร็วในการฉีดน้ำโลหะต่อสภาวะการเกิดรูพรุนจะกำหนดให้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะเข้าที่ รูเท มีค่าเป็นค่ามาตรฐานอยู่ระหว่าง 1.5 – 2.5 m/s โดยระบุค่าความเร็วจำนวน 11 ค่าประกอบด้วย 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 และ 2.5 m/s ตามลำดับ

การศึกษาผลกระทบของมุมการไหลต่อ สภาวะการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานทำการศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองให้มีมุมการไหลของทางเข้าน้ำโลหะมีค่า 20°°, 30°°, 45°° และ 60°° ตามลำดับ

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ฉีดเข้าไปในเบ้าแม่พิมพ์ต่อ สภาวะ การเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานจะกำหนดจากการใช้วัสดุอะลูมิเนียมที่มีสภาวะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 613 °°C และมีภาวะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 472 °°C โดยการศึกษาจะกำหนดอุณหภูมิของโลหะ 13 ค่า ประกอบด้วย 680, 690,

700, 710, 720˚, 730˚, 740˚, 750˚, 760˚, 770˚, 780˚, 790˚ และ 800 °˚C ตามลำดับ

ผลการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER สามารถแสดงบริเวณที่เกิดรูพรุนในชิ้นงานภายหลังการฉีดน้ำโลหะเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์จน



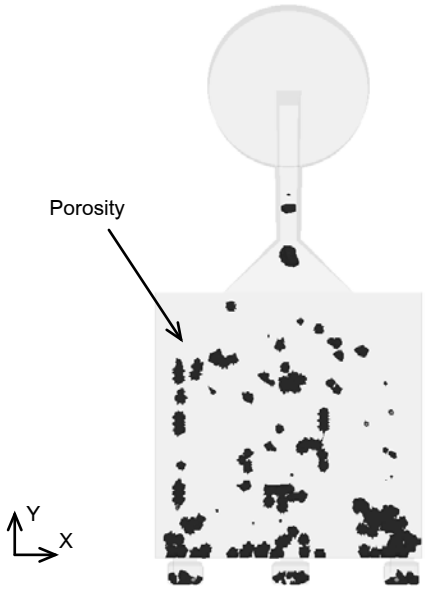
รูปที่ 4 ผลการแสดงความเร็วของน้ำโลหะไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ที่เวลา 0.005, 0.006, 0.007 และ 0.008 วินาที

การจำลองการหล่อแม่พิมพ์ความดันสูงทำได้โดยการกำหนดค่าเริ่มต้น (initial conditions) และสภาวะขอบเขต (boundary conditions) ที่ตรงตามค่าการทดสอบ ให้แก่แบบจำลองโครงสร้างกริดที่สร้างขึ้น หลังจากนั้นจะทำการคำนวณและแสดงผลด้วยซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง Core i5 ความถี่ 3.2 GHz และมีหน่วยความจำ 4 GB

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

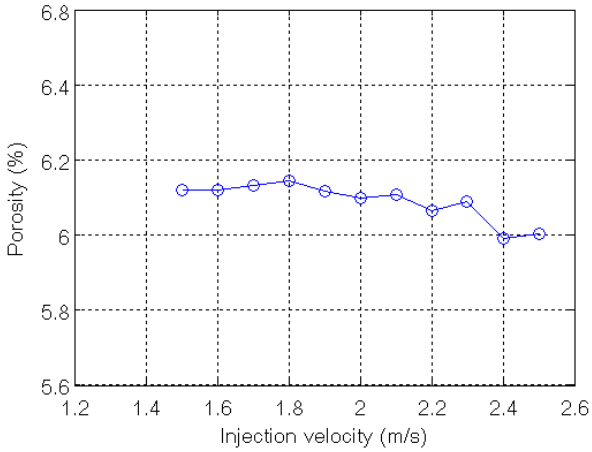
ผลการจำลองการหล่อแม่พิมพ์ความดันสูงสามารถแสดงเป็นภาพการไหลของน้ำอะลูมิเนียมเหลวเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ด้วยเฉดสีของค่าความเร็วการไหลที่เวลาต่างๆ ได้ การจำลองการไหลของน้ำโลหะที่มีการกำหนดความเร็วเริ่มต้นของการฉีด 2.0 m/s แสดงได้ในรูปที่ 4 ผลการจำลองการไหลแสดงให้เห็นค่าความเร็วสูงสุดของการไหลของน้ำโลหะมีสีแดง และค่าความเร็วต่ำสุดของการไหลมีสีน้ำเงินในแต่ละเวลาของการแสดงผล ทั้งนี้จะสังเกตุได้ว่าค่าความเร็วการไหลของน้ำโลหะมีค่าไม่เท่ากันตามแนวความกว้างของชิ้นงาน

เต็ม ผลการเกิดรูพรุนในชิ้นงานของการฉีดน้ำโลหะด้วยความเร็ว 2.0 m/s ที่มุมการไหล 45 ° และมีอุณหภูมิน้ำโลหะ 8 00 °˚C สามารถแสดงด้วยสีเทาดำดังแสดงในรูปที่ 5 ปริมาณของรูพรุนซึ่งเกิดขึ้นภายในชิ้นงานจากความเร็วการฉีดที่แตกต่างกันสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ในรูปที่ 6 ซึ่งสามารถระบุความเร็วที่เหมาะสมของการฉีดได้ที่ 2.4 m/s เมื่อใช้มุมการไหล 45 ° และมีอุณหภูมิน้ำโลหะ 8 00 °˚C ตามลำดับ



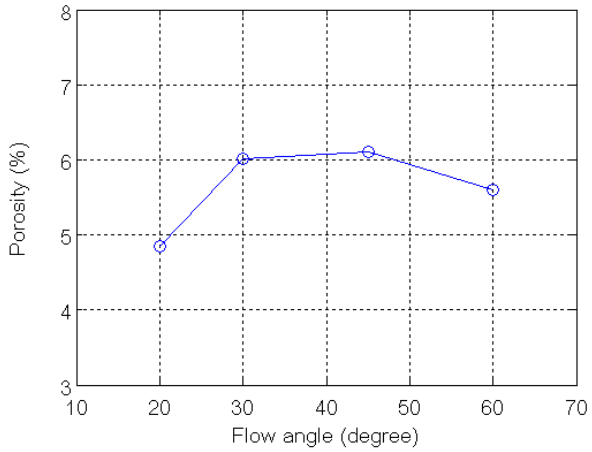
CST-40

รูปที่ 5 ผลการแสดงรูพรุนในชิ้นงานที่ใช้ความเร็วการฉีด 2.0 m/s มีมุมการไหล 45° และมีอุณหภูมิน้ำโลหะ 800 °°C



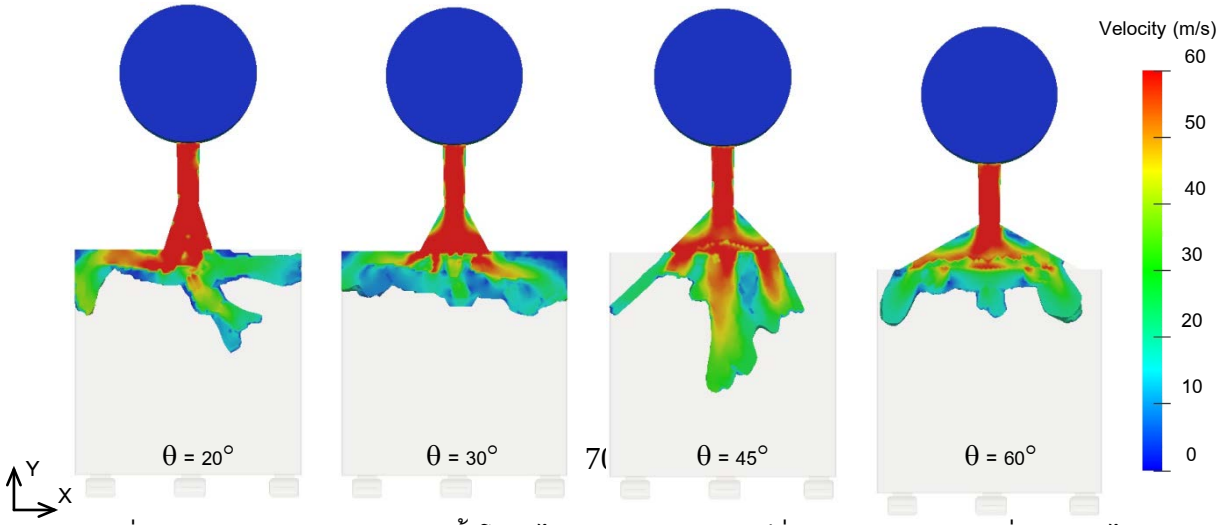
รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนและความเร็วการฉีดที่มุมการไหล 45° และมีอุณหภูมิน้ำโลหะ 800 °°C

มุมการไหลมีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานเนื่องจากทำให้เกิดความเร็วและรูปร่างการไหลของน้ำโลหะเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน รูปที่ 7 แสดงภาพความเร็วของน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์ที่เวลา 0.007 sec จากการกำหนดมุมการไหล 20°°, 30°°, 45°° และ 60°° ด้วยค่าความเร็วของการฉีด 2.0 m/s และน้ำโลหะมีอุณหภูมิ 800 °°C ปริมาณของรูพรุนซึ่งเกิดขึ้นภายในชิ้นงานจากการฉีดน้ำโลหะอุณหภูมิ 800 °°C ด้วยความเร็ว 2.0 m/s ที่มุมการไหลแตกต่างกันสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ในรูปที่ 8



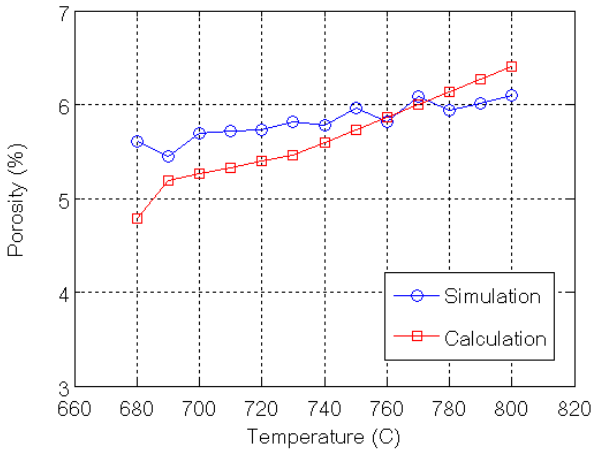
รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนและมุมการไหลของการฉีดน้ำโลหะอุณหภูมิ 800 °°C ด้วยความเร็ว 2.0 m/s

อุณหภูมิของ น้ำโลหะที่ทำการฉีดเข้าไปในเบ้าแม่พิมพ์มีผลต่อการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานเช่นเดียวกันกับความเร็ว และมุมการไหล การกำหนดให้ความเร็วของการฉีด และมุมการไหลมีค่าคงที่ 2. 0 m/s และ 45 ° ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะในการหล่อแม่พิมพ์ความดันสูงสามารถคำนวณปริมาณฟองอากาศในชิ้นงานได้ด้วยการใช้สมการในหัวข้อที่ 2 ผลการคำนวณที่ได้เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนและอุณหภูมิ โดยแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่าง



รูปที่ 7 ผลการแสดงความเร็วของน้ำโลหะไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ที่เวลา 0.007 วินาที ที่มีมุมการไหล 20°°, 30°°, 45°° และ 60°° ตามลำดับ

ผลการคำนวณและผลจากแบบจำลองด้วยซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER ได้ในรูปที่ 9 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์อธิบายได้ว่าปริมาณฟองอากาศจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำโลหะ โดยที่อุณหภูมิที่เหมาะสมของการฉีดน้ำโลหะด้วยความเร็ว 2.0 m/s และมุมการไหล 45 °° คือ 690 °°C ทั้งนี้ผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์จากผลการคำนวณเฉลี่ย 5.21%



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนและอุณหภูมิที่ความเร็วการฉีด 2.0 m/s มุมการไหล 45°°

5. สรุปผล

แบบจำลองการหล่อแม่พิมพ์ความดันสูงของชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางถูกนำมาศึกษาเพื่อตรวจสอบตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนประกอบด้วย ความเร็วของการฉีดน้ำโลหะ มุมการไหล และอุณหภูมิของน้ำโลหะ สำหรับชิ้นงานที่มีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความหนา เท่ากับ 100 x 100 x 4 mm จะต้องควบคุมความเร็วของการฉีดน้ำโลหะ มุมการไหล และอุณหภูมิของน้ำโลหะให้มีค่า 2.4 m/s, 20°° และ 690 °C ตามลำดับ ทั้งนี้อุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการเกิดรูพรุนในชิ้นงานสามารถคำนวณโดยใช้สมการในหัวข้อที่ 2 โดยที่ผลการคำนวณถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองพบว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย 5.21 % หากชิ้นงานมีรูปร่างซับซ้อนขึ้น วิธีการคำนวณหาปริมาณรูพรุนจะทำได้ยากและแม่นยำน้อยกว่าการใช้ซอฟต์แวร์ เพื่อให้สามารถกำหนดความแม่นยำของการใช้ซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER ให้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้นควรนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีการผลิตจริงๆ ในอุตสาหกรรม ทั้งนี้ตัวแปรที่ถูกตรวจพบในการวิเคราะห์การเกิดรูพรุนของชิ้นงานด้วยแบบจำลองในงานวิจัยนี้มีประโยชน์เพียงพอที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการประเมินผลกระทบของตัวแปรที่ใช้ออกแบบแม่พิมพ์ของชิ้นงานอื่นๆ ในอนาคตได้ และทำให้ชิ้นงานปราศจากรูพรุนก่อนการผลิตจริง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์ให้ใช้งานซอฟต์แวร์ CAST-DESIGNER จากบริษัทโฟร์ดีคอร์ปอเรชั่น จำกัด

7. เอกสารอ้างอิง

[1] เอกชัย กิติแก้วประเสริฐ, พงษ์กร รักการ, สุรศักดิ์ สุรนันทชัย, พงษ์ศักดิ์ ดุลยประพันธ์, (2554). อิทธิพลของตัวแปรในการออกแบบ Fan gate ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวในกระบวนการหล่อความดันสูง. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 34, ฉบับที่ 2, หน้า 147-164.

[2] Zhao, H.D., Bai, Y.F., Ouyang, X.X. and Dong, P.Y. (2010). Simulation of mold filling and prediction of gas entrapment on practical high pressure die castings, *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, vol. 20, pp. 2064-2070.

[3] Song, J., Xiong, S.M., Li, M. and Allison, J. (2009). The correlation between microstructure and mechanical properties of high-pressure die-cast AM50 alloy, *Alloys and Compounds*, vol. 477, pp. 863-869.

[4] Hu, H., Zhou, M., Sun, Z.Z. and Li, N. (2008). Tensile behavior and fracture characteristics of die cast magnesium alloy AM50, *Materials Processing Technology*, vol. 201, pp. 364-368.

[5] Aghion, E., Moscovitch, N. and Arnon, A. (2007). The correlation between wall thickness and properties of HPDC magnesium alloys. *Materials Science and Engineering A*, vol. 447, pp.341-346.

[6] Weiler, J.P., Wood, J.T., Klassen, R.J., Maire, E., Berkmortel, R., and Wang, G. (2005). Relationship between internal porosity and fracture strength of die-cast magnesium AM60B alloy, *Material Science & Engineering A*, vol. 395, pp. 315-322.

[7] Mikell, P. G. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4th edition, John Wiley & Sons, Inc., USA.

[8] Fredriksson, H. and Akerlind, U. (2006) *Materials Processing during Casting*, John Wiley & Sons, USA.