

## การลดปัญหาความบกพร่องของชิ้นงานตัวเรือนสูบที่เกิดจากโพรงอากาศ ในระหว่างกระบวนการหล่อขึ้นรูป

### The Reduction of Blowholes Defect in Cylinder Blocks during Casting Process

พิมพ์เพชร สระทองอุ่น<sup>1,2</sup> จริญญา โกบบาทลี<sup>1</sup>ปรินทร์ ตั้งวรรธม<sup>1</sup> และ ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

<sup>2</sup>ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานขั้นสูง (Research Center for Advanced Energy Technology)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

1771/1 ถ.พัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

nuttapol@tni.ac.th

#### บทคัดย่อ

จากการตรวจสอบความบกพร่องของชิ้นงานด้วยวิธีการเอกซเรย์ตัวเรือนสูบ (Cylinder Block) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของคอมเพรสเซอร์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออะลูมิเนียมด้วยความดันสูง (High Pressure Die Casting: HPDC) พบว่าปัญหาความบกพร่องของชิ้นงานส่วนใหญ่ คือ การเกิดโพรงอากาศในกระบวนการแข็งตัวของน้ำอะลูมิเนียมในแม่พิมพ์ เพื่อที่จะลดปัญหาความบกพร่องดังกล่าว ตลอดจนค่าใช้จ่าย และเวลาที่จะต้องใช้ในการแก้ไขงานที่เสียหายงานวิจัยนี้จึงทำการจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Flow 3D® Cast โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษาคือ กรณีเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน กรณีที่สองเพิ่มตำแหน่งทางเข้าน้ำโลหะ (Gate runner) และกรณีที่สามเพิ่มช่องทางออกของน้ำอะลูมิเนียม (Overflow) จากผลการศึกษาพบว่าในกรณีที่สาม การเพิ่มช่องทางออกของน้ำอะลูมิเนียมของชิ้นงานส่งผลให้เกิดโพรงอากาศน้อยที่สุด เนื่องจากการเพิ่มช่องทางระบายอากาศเมื่อน้ำอะลูมิเนียมไหลเข้ามาแทนที่ให้อากาศสามารถไหลออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างราบรื่น

คำสำคัญ: กระบวนการหล่อด้วยความดันสูง, โพรงอากาศ, เรือนสูบ, ทางเข้าน้ำโลหะ, ทางออกน้ำโลหะ

#### Abstract

From quality inspection on cylinder blocks of automobile compressors using X-Ray technique, it was found that most defects are blowholes, which occur in mold cavity during aluminum solidification process. In order to reduce such defect and its related time and monetary consumption, this study proposed to modify the positions and cross-sectional areas of the gate runner (inlet) and overflow (outlet) connecting to the mold of cylinder block. The flows of the liquefied aluminum and the air inside the mold at different times

were simulated based on three different conditions on Flow 3D® software. The first case is the original conditions. The second and the third cases are the modification of the first by which a gate runner and an overflow was added, respectively. The simulation results demonstrated that adding an overflow at an appropriate position could minimize blowholes defect effectively since it increased the air-outflow channel and allowed the air being discharged smoothly.

Keywords: Casting process, Blowhole defects, Cylinder block, Gate runner, Overflow

#### 1. บทนำ

การผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียมในอุตสาหกรรมยานยนต์โดยส่วนมากจะใช้กระบวนการหล่อฉีด (Die casting) เนื่องจากข้อดีของกระบวนการหล่อฉีดคือสามารถผลิตได้จำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น อย่างไรก็ตามข้อเสียที่พบได้ง่ายของกระบวนการนี้คือ ชิ้นงานเกิดรูพรุนหรือโพรงอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะในแม่พิมพ์ ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานต่ำลง ซึ่งสาเหตุหนึ่งของปัญหาดังกล่าวมาจากอากาศที่ตกค้างระหว่างกระบวนการแข็งตัวของน้ำอะลูมิเนียม โดยทั่วไปแล้วทางโรงงานจะดำเนินการแก้ไขปัญหาลำนี้โดยอาศัยประสบการณ์การทำงานของวิศวกรเพื่อทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ที่เครื่องฉีด เช่น ความดันและอัตราการไหลของน้ำอะลูมิเนียม เป็นต้น ทำให้สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการประยุกต์ใช้แนวคิดเรื่อง "คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE)" เพื่อใช้แก้ปัญหาดังกล่าวจากการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ก่อนดำเนินการปฏิบัติงานจริง

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาคือการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน โดยการปรับปรุงขนาดและตำแหน่งทางเข้า (Gate runner) และออกของน้ำโลหะ

(Overflow) โดยใช้ตัวเรือนสูบ (Cylinder Block) ที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปของบริษัทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์แห่งหนึ่งเป็นกรณีศึกษา โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีแรกคือกรณีเดิมที่ก่อให้เกิดปัญหาโพรงอากาศ กรณีที่สองคือ การเพิ่มตำแหน่งทางเข้าของน้ำโลหะ และกรณีสุดท้ายคือการเพิ่มช่องทางออกของน้ำอะลูมิเนียม หลังจากนั้นการจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนสูบได้ถูกจำลองขึ้นโดยใช้หลักการของ Computational Fluid Dynamics (CFD) ด้วยโปรแกรม Flow 3D®

#### 2. การจำลองการไหลของน้ำโลหะด้วยโปรแกรม Flow 3D® Casting

กระบวนการหล่อโลหะคือ การขึ้นรูปชิ้นงานจากโลหะหลอมเหลวโดยการเทน้ำโลหะใส่ในแม่พิมพ์ [1] ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ที่สำคัญคือ รูเท (Sprue), รูลิ้น (Riser), ทางเข้าและทางออกของน้ำอะลูมิเนียม (Gate Runner และ Overflow) ตามลำดับซึ่งการออกแบบส่วนประกอบเหล่านี้อาศัยทฤษฎีพื้นฐานของกลศาสตร์ของไหล [2] ในปัจจุบันโปรแกรม Flow 3D® เป็นโปรแกรมหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้เพื่อจำลองกระบวนการไหลของของเหลวและก๊าซ และได้ถูกพัฒนาโปรแกรมสำหรับจำลองกระบวนการหล่อโลหะโดยเฉพาะ โดยใช้ชื่อว่า Flow 3D Casting ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย

ปัญหาโพรงอากาศในตัวเรือนสูบที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ High Pressure Die Casting (HPDC) ได้ถูกจำลองในโปรแกรม Flow 3D® Cast โดยความถูกต้องในการจำลองของโปรแกรมจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ใส่เข้าไปในโปรแกรม และในโปรแกรมกำหนดให้การจำลองกระบวนการหล่อแบบ HPDC นั้น นอกจากจะใส่ข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ขึ้นรูป เช่น ความหนาแน่น เป็นต้น ก็จะต้องใส่ค่าพื้นที่หน้าตัดและความเร็วในการไหลเข้าไปด้วยและจะพิจารณาการไหลของน้ำโลหะภายใต้เงื่อนไขการไหลที่สถานะคงตัว (Steady State) และเป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible Flow) ซึ่งมีความหนาแน่นของของไหลไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งทฤษฎีที่ใช้คำนวณเพื่อจำลองการไหลของน้ำโลหะนั้นมีดังนี้ [2-3]

สมการความต่อเนื่อง

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1)$$

Navier-Stokes Equation

$$\rho b_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j \right) \quad (2)$$

สมการที่ (1) และ (2) จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการคำนวณและออกแบบขนาดของทางเข้าและออกของน้ำโลหะ อย่างไรก็ตามนอกจากการวิเคราะห์ปัญหาการไหลด้วยสมการที่ (1) และ (2) แล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงสภาพการไหลและตำแหน่งของทางเข้าและออกของน้ำโลหะที่เหมาะสมด้วยตามทฤษฎีนั้นสภาพการไหลสามารถจำแนกได้จากการคำนวณหาค่าเรย์

โนลด์นัมเบอร์ (Reynold's number, Re) ของการไหล ซึ่งเป็นปริมาณไร้มิติ กำหนดให้ของไหลไหลผ่านท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือน, เส้นรอบรูปและสัมประสิทธิ์ความหนืดไดนามิกคือ  $D_h$ ,  $P$  และ  $\mu$  ตามลำดับ ดังนั้นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

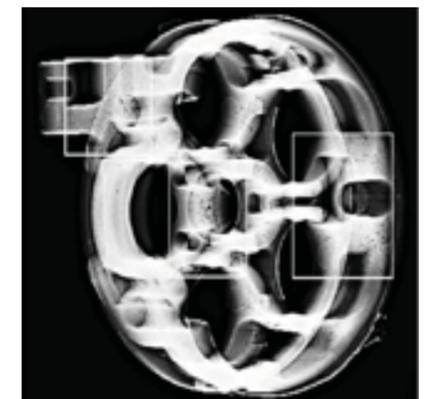
$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}, D_h = \frac{4A}{P} \quad (3)$$

สำหรับการไหลในท่อสามารถสรุปได้ว่า  $Re \leq 2300$  คือการไหลแบบราบเรียบ และ  $Re \geq 4000$  คือการไหลแบบปั่นป่วน [3]

การออกแบบส่วนประกอบของแม่พิมพ์ในงาน Die Casting จะต้องออกแบบให้ขณะที่น้ำโลหะเคลื่อนตัวผ่านทางเข้าน้ำโลหะ (Runner) เกิดการปั่นป่วน (Turbulent) ให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพราะยังเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากก็จะทำให้อากาศในแม่พิมพ์ระบายออกไปได้อย่างไม่ราบรื่นนัก จากผลงานวิจัย [4-5] พบว่าความเร็วของน้ำโลหะในกรณีวิธี Die Casting จะอยู่ที่ประมาณ 10-100 m/s และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์มีค่าอยู่ที่ประมาณ  $10^{-6}-10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s ดังนั้นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของกรณีวิธี Die Casting จึงอยู่ที่ประมาณ  $10^5-10^6$

#### 3. กระบวนการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา

จากการตรวจสอบชิ้นงานตัวเรือนสูบที่ผ่านการหล่ออะลูมิเนียมขึ้นรูปของบริษัทผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่ง ด้วยวิธีการเอกซเรย์ชิ้นงาน ทำให้สามารถตรวจพบโพรงอากาศในชิ้นงานซึ่งแสดงในจุดสีดำในกรอบสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 1 เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วนดังกล่าว โดยใช้หลักการ CFD ด้วยโปรแกรม Flow 3D® โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณี

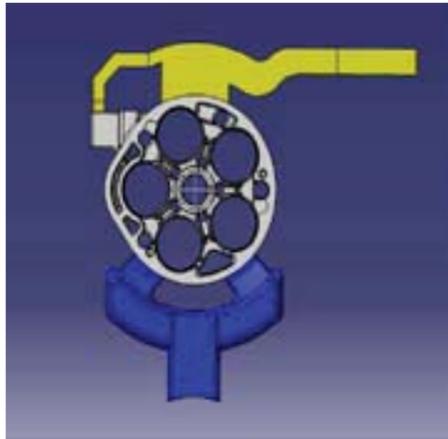


รูปที่ 1 รูปเอกซเรย์ตัวเรือนสูบซึ่งแสดงโพรงอากาศในชิ้นงาน

#### 3.1 วิเคราะห์ปัญหาจากชิ้นงานเดิม

รูปที่ 2 แสดงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยเงื่อนไขปัจจุบันซึ่งเกิดความบกพร่อง และมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของทางน้ำเข้าโลหะ

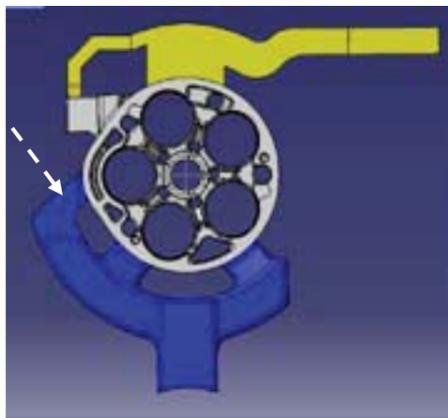
ทั้งด้านซ้ายและขวา ด้านละ 70 mm<sup>2</sup>ตามลำดับ จากนั้นกระบวนการหล่อขึ้นรูปของชิ้นงานดังกล่าวได้ถูกจำลองขึ้นด้วยโปรแกรม Flow 3D® เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา จึงพบว่ามีส่วนมาจากโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหลายจุด อันเนื่องมาจากตำแหน่งของทางน้ำเข้าลูมิเนียมไม่เหมาะสมทำให้น้ำอลูมิเนียมไม่สามารถไหลเพื่อไล่อากาศออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างราบรื่น และจากการคำนวณค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เฉลี่ยโดยพื้นที่หน้าตัดของท่อในกรณีการไหลของชิ้นงานเดิมมีค่าเท่ากับ  $1.24 \times 10^6$



รูปที่ 2 แบบจำลองทางเข้าและทางออกของน้ำโลหะของแม่พิมพ์ชิ้นงาน

### 3.2 การเพิ่มตำแหน่งทางเข้าของน้ำโลหะ

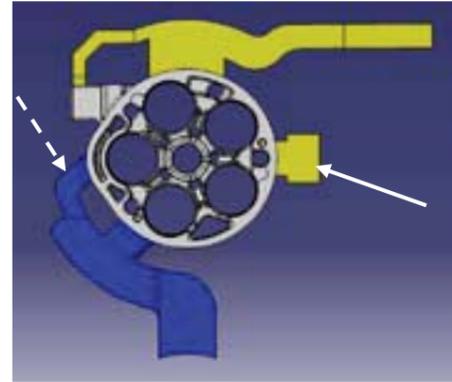
ตำแหน่งทางเข้าของน้ำโลหะได้ถูกเพิ่มตรงบริเวณด้านบนของทางเข้าน้ำโลหะด้านซ้าย และแสดงตรงบริเวณที่ลูกครีในรูปที่ 3 เพื่อที่น้ำโลหะจะสามารถไล่อากาศออกไปทางท่อระบายอากาศได้สะดวกขึ้น โดยทางเข้าของน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นมานั้นมีพื้นที่หน้าตัด 37.5 mm<sup>2</sup>



รูปที่ 3 ปรับการออกแบบโดยเพิ่มทางน้ำเข้าโลหะ (ลูกครีเส้นประแสดงตำแหน่งทางเข้าน้ำโลหะที่เพิ่มเข้ามา)

### 3.3 การเพิ่มช่องทางออกของน้ำโลหะ

ทางเข้าน้ำโลหะทางด้านขวาในรูปที่ 3 ได้ถูกตัดออก และปรับรูปทรงของทางเข้าน้ำโลหะที่เพิ่มเข้ามาจากกรณีที่ 3.2 ให้มีความโค้งมนบริเวณทางเดินของน้ำโลหะและเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดเป็น 46.65 mm<sup>2</sup> จากนั้นเพิ่มทางน้ำออกของโลหะที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 52.5 mm<sup>2</sup> ดังรูปที่ 4

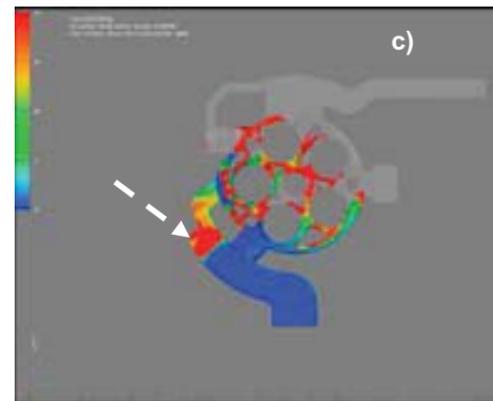
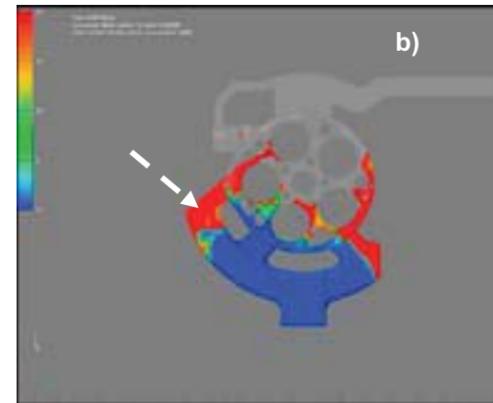
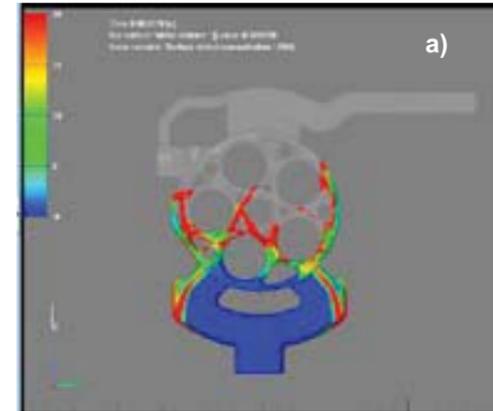


รูปที่ 4 ปรับแก้รูปทรงของทางน้ำเข้าโลหะและเพิ่มทางออกของทางออกน้ำโลหะ (ลูกครีเส้นประแสดงตำแหน่งทางเข้าน้ำโลหะที่เพิ่มเข้ามา และ ลูกครีเส้นทึบแสดงตำแหน่งทางออกของน้ำโลหะที่เพิ่มเข้ามา)

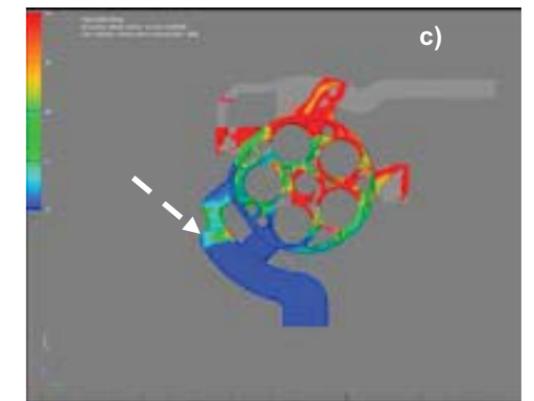
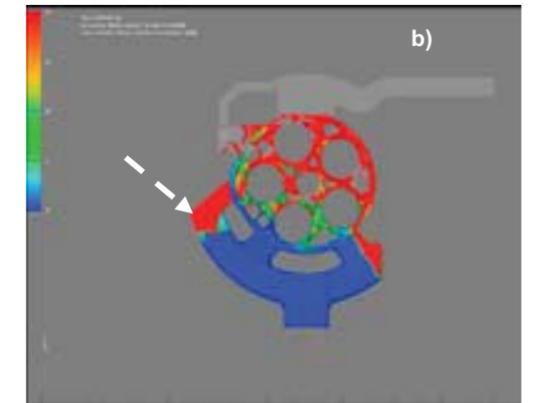
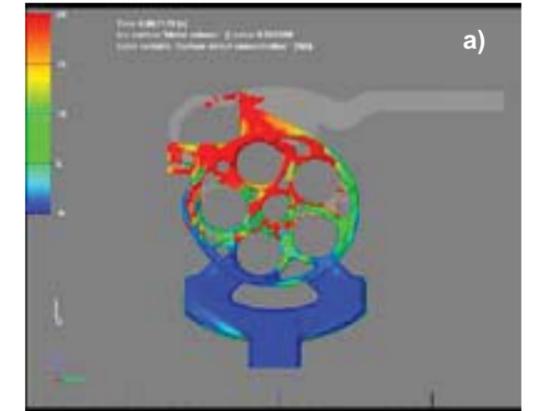
### 4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการจำลองการหล่อขึ้นรูปของชิ้นส่วนตัวเรือนสูบ ณ เวลาที่  $t = 2$  s ซึ่งเป็นเวลาที่น้ำอลูมิเนียมเริ่มไหลเข้ามาในแม่พิมพ์ได้ถูกแสดงดังรูปที่ 5a-c เพื่อเปรียบเทียบการไหลของน้ำอลูมิเนียมในกรณีเดิม กรณีการเพิ่มตำแหน่งทางเข้าของน้ำโลหะ และ กรณีการเพิ่มทางออกของน้ำโลหะตามลำดับ จากการคำนวณค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ทั้ง 3 กรณี พบว่าค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เฉลี่ยโดยพื้นที่มีค่าเท่ากับ  $1.24 \times 10^6$ ,  $1.40 \times 10^6$  และ  $1.49 \times 10^6$  ตามลำดับ ซึ่งทั้งกรณีการเพิ่มทางเข้าน้ำโลหะและการเพิ่มทางออกของน้ำโลหะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากกว่ากรณีเดิม แต่อย่างไรก็ตามจากการไหลของน้ำอลูมิเนียม ณ เวลาเดียวกัน คือ  $t = 2$  s ในกรณีเดิม ดังแสดงในรูปที่ 5a จะสังเกตเห็นบริเวณอากาศกระจายไปตามเนื้อชิ้นงานและทางเข้าน้ำอลูมิเนียมมากกว่าในกรณีการเพิ่มทางเข้าและทางออกของน้ำอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 5b และ 5c ตามลำดับ

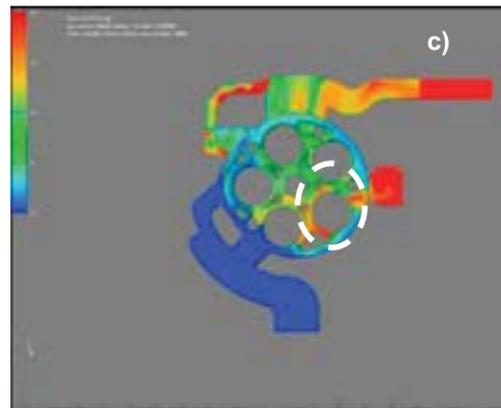
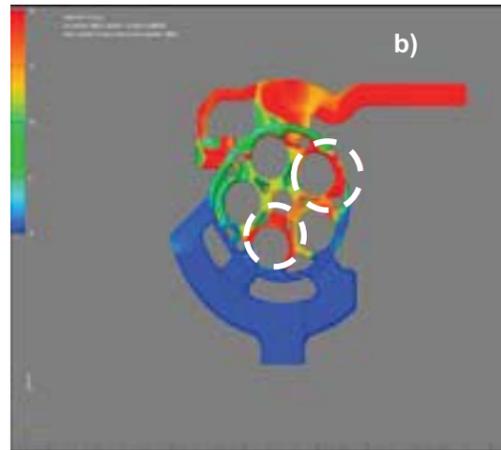
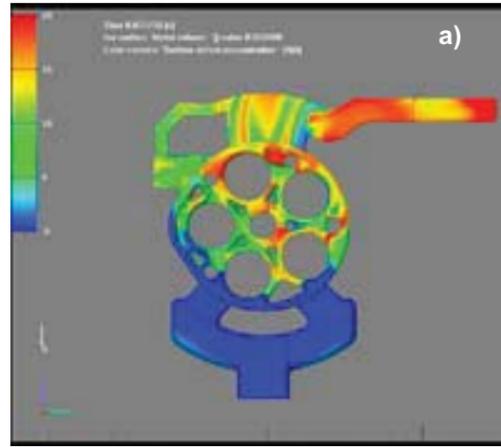
เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นอย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น การจำลองการไหลของน้ำอลูมิเนียมในช่วงเวลา  $t = 4$  s ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6a - c ของทั้ง 3 กรณี ตามลำดับ และรูปที่ 7a - c แสดงการจำลองการไหลของน้ำอลูมิเนียมเมื่อหล่อชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์ (ไหลเต็มแม่พิมพ์) ที่  $t = 9$  s ของทั้ง 3 กรณีตามลำดับ



รูปที่ 5 การไหลของน้ำอลูมิเนียม ณ เวลา  $t = 2$  s โดยที่ a) กรณีเดิม b) การเพิ่มตำแหน่งทางเข้าของน้ำโลหะ และ c) การเพิ่มทางออกของน้ำโลหะ



รูปที่ 6 การไหลของน้ำอลูมิเนียม ณ เวลา  $t = 4$  s โดยที่ a) กรณีเดิม b) กรณีการเพิ่มทางเข้าน้ำโลหะ และ c) กรณีการเพิ่มทางออกของน้ำโลหะ



รูปที่ 7 การไหลของน้ำอลูมิเนียม ณ เวลา  $t = 9$  s โดยที่ a) กรณีเดิม b) กรณีการเพิ่มทางเข้าของน้ำโลหะ และ c) กรณีการเพิ่มทางออกของน้ำโลหะ วงกลมเส้นประแสดงโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

เมื่อพิจารณาการไหลของน้ำอลูมิเนียมในทั้ง 3 กรณี ที่เวลา  $t = 4$  s และ  $t = 9$  s (รูปที่ 6a-c และ 7a-c) ถึงแม้ว่ากรณีการเพิ่มตำแหน่งทางเข้า

ของน้ำโลหะและกรณีการเพิ่มทางออกของน้ำโลหะมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เฉลี่ยโดยพื้นที่ที่ใกล้เคียงกัน ( $Re = 1.40 \times 10^6$  และ  $Re = 1.49 \times 10^6$  ตามลำดับ) แต่เมื่อคำนวณเรย์โนลด์นัมเบอร์เฉพาะทางเข้าน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นมานั้นพบว่าค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์อยู่ที่  $1.97 \times 10^6$  ซึ่งมากกว่ากรณีปกติ ( $Re = 1.24 \times 10^6$ ) อยู่ 58% ดังนั้นทางเข้าน้ำโลหะที่เพิ่มเข้ามาจึงทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุทำให้การระบายอากาศบริเวณชิ้นงานด้านซ้ายไม่ค่อยราบรื่นนัก (รูปที่ 6b และ 6c)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกรณีเดิมกับกรณีการเพิ่มทางออกของน้ำโลหะ พบว่าในกรณีการเพิ่มทางออกของน้ำโลหะเกิดโพรงอากาศในชิ้นงานน้อยที่สุด ถึงแม้ว่าการไหลของน้ำโลหะมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เฉลี่ยโดยพื้นที่เท่ากับ  $1.49 \times 10^6$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากกรณีเดิม แต่เนื่องจาก การออกแบบทางเข้าน้ำโลหะให้มีลักษณะโค้งมนบริเวณทางเดินของน้ำโลหะด้านซ้ายบนสามารถทำให้น้ำอลูมิเนียมสามารถไหลได้เต็มพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าน้ำโลหะโดยไม่มีอากาศเจือปนดังแสดงในรูปที่ 7c เนื่องจากอากาศจะไหลกระทบกับส่วนโค้งจึงทำให้สามารถระบายอากาศออกไปได้ก่อน (รูปที่ 6c) และอากาศบางส่วนจะไหลวกกลับมาบริเวณทางเข้าน้ำโลหะด้านล่างและระบายออกทางทางออกของน้ำโลหะที่เพิ่มเข้ามา (รูปที่ 7c) นอกจากนี้ การเพิ่มทางออกของน้ำโลหะขนาดดังกล่าวยังช่วยระบายอากาศทางด้านขวาและกลางชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์และเป็นปัญหาจากกรณีเดิม ทำให้น้ำอลูมิเนียมไหลได้อย่างราบรื่นอีกด้วย

#### 5.สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อพิจารณาการออกแบบและการจำลองการไหลของน้ำอลูมิเนียมเพื่อแก้ไขปัญหาโพรงอากาศในชิ้นงานของทั้งสองกรณีแล้ว สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มทางเข้าของน้ำโลหะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเฉลี่ยโดยพื้นที่มากที่สุด เนื่องจากความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้นตรงบริเวณทางเข้าน้ำโลหะที่เพิ่มเข้ามา ดังนั้นจึงทำให้เกิดโพรงอากาศในชิ้นงานได้ง่าย

ในทางกลับกันกรณีการเพิ่มทางออกของน้ำโลหะและการออกแบบทางเข้าน้ำโลหะให้มีความโค้งมนนั้น ถึงแม้ว่าจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากกว่ากรณีเดิม แต่อากาศในแม่พิมพ์จะไปกระทบกับส่วนโค้งดังกล่าวทำให้ถูกระบายออกไปทางช่องทางออกของน้ำโลหะและอากาศบางส่วนก็ถูกระบายทางช่องทางออกของน้ำโลหะที่เพิ่มเข้ามา จึงเกิดโพรงอากาศในชิ้นงานน้อยกว่าการเพิ่มทางเข้าน้ำโลหะและกรณีเดิม

อย่างไรก็ตามทางบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ได้เสนอว่าการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนสูบด้วยวิธีการหล่อแบบกดอัด (Squeeze casting) เป็นวิธีที่สามารถควบคุมการเกิดโพรงอากาศได้ดี เนื่องจากแรงดันจะถูกส่งเข้าไประหว่างกระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะทำให้สามารถไล่อากาศออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่ทางโรงงานจะต้องเสียค่าใช้จ่ายของแม่พิมพ์และค่าซ่อมบำรุงอุปกรณ์อื่น ๆ สูง

#### 6.กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลและโปรแกรม Flow 3D สำหรับการจำลองการขึ้นรูปตัวเรือนสูบในงานวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Groover, M.P. (2007). *Fundamentals of Modern Manufacturing*, John Wiley and Sons, USA.
- [2] Cengel, Y.A. and Cimbala, J.M. (2006). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*, 1<sup>st</sup> edition, McGraw Hill, Singapore.
- [3] Halliday, D., Reinsick, R. and Walker, J. (2006). *Fundamentals of Physics*, 8<sup>th</sup> edition, John Wiley and Sons, USA.
- [4] Barone, M.R. and Caulk, D.A. (2000). *Analysis of Liquid Metal Flow in Die Casting*. International Journal of Engineering Science, p.1279-1302.
- [5] ปราบก กฤตบุญญฤทธิ์ และ พงษ์ศักดิ์ ดุลยประพันธ์. 2552. อิทธิพลของการออกแบบทางเดินโลหะเหลวต่อคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการหล่อความดันสูง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 23.
- [6] เชิดศักดิ์ อรัญมาลา และ ชามยุทธร โกลิตะวงษ์. 2547. การศึกษากฎพื้นฐานและหลักการออกแบบ Gate และ Runner ของชิ้นงาน Locking Knob ในอุตสาหกรรมโคมไฟโดยใช้เทคนิคการจำลองวิธีการหล่ออลูมิเนียม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 18.
- [7] เอกชัย กิตติแก้วทวีเสรีฐ, พงศกร รักการ และ พงษ์ศักดิ์ ดุลยประพันธ์. 2552. อิทธิพลของตัวแปรในการออกแบบ Fan Gate ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวในกระบวนการหล่อความดันสูง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 23.