

## อิทธิพลของตัวแปรในการออกแบบ Fan gate ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของโลหะ เหลวในกระบวนการหล่อความดันสูง

### Effects of Fan Gate Design on Flow Behavior in High Pressure Die Casting Process

เอกชัย กิติแก้วทวีเสริฐ<sup>๑</sup>, พงศกร รักการ<sup>๑</sup>, พงษ์ศักดิ์ ดุลยประพันธ์<sup>๒</sup>

<sup>๑</sup>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, วิศวกรรมวัสดุ, 126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

<sup>๒</sup>ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, MTEC, 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน ต.คลองหลวง

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

\*เอกชัย กิติแก้วทวีเสริฐ: ek-ek555@hotmail.com, 084-648-1043

#### บทคัดย่อ

ในกระบวนการหล่อความดันสูง (High Pressure Die Casting Process, HPDC) ปัญหาข้อบกพร่องประเภทโพรงอากาศ (Gas Porosity Defects) และ ข้อบกพร่องประเภทที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน (Surface Defects) เป็นลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย เส้นทางการไหลของโลหะเหลว (Flow Path) เป็นปัจจัยหลักอันหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อการเกิดข้อบกพร่องทั้งสองประเภท เพื่อป้องกันปัญหาข้อบกพร่องดังกล่าว เมื่อทำการออกแบบระบบทางเดินโลหะเหลว (Gating System) วิศวกรจะต้องออกแบบให้เส้นทางการไหลของโลหะเหลวมีลักษณะการไหลที่เป็นระนาบ (Distributed Flow) จาก Ingate ไปยัง Overflow โดยทั่วไปแล้วเส้นทางการไหลของโลหะเหลวจะถูกควบคุมโดยตำแหน่งของ Ingate และชนิดของ Gate ที่ใช้

Fan Gate เป็น Gate ที่นิยมใช้กับแม่พิมพ์ในกระบวนการหล่อความดันสูง โดยยึดหลักมวลการไหลคงที่ (Mass Flow Rate Conservation) ตัวแปรในการออกแบบ Fan Gate ประกอบไปด้วย มุมการไหล, ขนาดพื้นที่หน้าตัด Ingate, ความยาวของ Ingate, อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด Runner ต่อพื้นที่หน้าตัด Ingate, งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่กล่าวข้างต้นของ Fan Gate ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว โดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการหล่อ (Casting Process Simulation) ความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้จะนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ Gating System ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในอุตสาหกรรม เพื่อช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการออกแบบ Gating System โดยใช้หลักการออกแบบที่ถูกต้องยังช่วยทำให้น้ำหนักของชิ้นงานหล่อเทียบกับน้ำหนักของ Shot Weight มีค่าสูงขึ้น (Casting Yield) ส่งผลให้ลดการใช้วัตถุดิบและพลังงานในการผลิตลง ทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่ลดต่ำลง

**คำหลัก:** กระบวนการหล่อความดันสูง/ Fan Gate / Distributed Flow / Gating System Design

#### ABSTRACT

Gas porosity and surface defects are common problems found in High Pressure Die Casting Processes (HPDC). Flow pattern of liquid metal is one the main factors contributing to those problems. To prevent such problems, distributed flow pattern from ingate to overflow is required. Mainly, ingate position and gate design are factors controlling the flow pattern.

Gating system design for HPDC processes is based on the mass flow rate conservation law. There are 4 main variables in fan gate design, including (1) flow angle, (2) ingate's cross section area, (3) ingate length, and (4) the ratio of runner's cross section area to the ingate's cross section area. In this research, the effects of these factors to the liquid metal flow behaviors are investigated using casting process simulation software. Results from the study are used to design gating system for the automotive part's production. Beside the defect reduction problem, the study also shows that by applying the gating design principle, a better casting yield can be achieved. This results in lower material and melting energy cost.

**keywords:** High Pressure Die Casting / Fan Gate / Distributed Flow / Gating System Design

## 1. บทนำ

การไหลของโลหะเหลวจาก Gate เข้าสู่โพรงแม่พิมพ์นั้น โลหะเหลวจะไหลเข้าไปแทนที่อากาศ อากาศที่อยู่ในโพรงแม่พิมพ์ถูกไล่ออกไปทาง overflow ส่วนอากาศที่ตกค้างอยู่ภายในจะรวมตัวเข้ากับโลหะเหลวเกิดเป็นโพรงอากาศ ทำให้เกิดชิ้นงานเสียขึ้น ลักษณะการไหลที่ดีของโลหะเหลวคือการไหลที่เป็นระนาบ โดยโลหะเหลวไหลออกจากปาก Gate แล้วออกจนเต็มความกว้างของชิ้นงานแล้วไหลขึ้นไปพร้อมกัน ทั้งหน้าตัดของชิ้นงานเป็นแนวเส้นตรง การไหลแบบเป็นระนาบออกจาก Gate จะช่วยลดการกักอากาศ และช่วยป้องกันการเกิด flow line ภายในชิ้นงาน ทำให้คุณสมบัติทางกลและผิวของชิ้นงานดีขึ้น นอกจากนี้แล้ว Gate ยังมีหน้าที่คือ กำหนดมุมในการไหล (Flow Angle) ของโลหะเหลวภายใน Cavity และ ช่วยเพิ่มความเร็วของโลหะเหลวที่จะไหลจาก Runner ไปสู่ Ingate

Gate ที่ใช้ในงาน HPDC โดยทั่วไปมี 3 ชนิดคือ Fan Gate, Tangential Gate และ Chisel Gate ซึ่ง Fan Gate เป็น Gate ที่ควบคุมการไหลของโลหะเหลวได้ง่ายที่สุด และ Chisel Gate ควบคุมการไหลของโลหะเหลวได้ยากที่สุด

รูปภาพที่ 1

Fan gate ยังแบ่งออกเป็น 3 ชนิดด้วยกัน คือ Straight Fan gate, Side Curved Fan Gate และ All

Straight Fan Gate แต่ในบทความนี้มุ่งทำการศึกษาเฉพาะ Straight Fan gate ซึ่งเป็น gate ที่นิยมใช้ในงานฉีดอลูมิเนียม มีลักษณะดังนี้

- พื้นที่หน้าตัดของ Straight Fan gate จะลดลงเป็นสัดส่วนเชิงเส้นที่ต่อเนื่องจาก Runner ไปยัง Ingate
- ความยาวฐานเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นตรง
- ความสูงเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเส้นตรง
- Flow angle วัดจาก center เทียบกับมุมที่ปลาย Gate

รูปภาพที่ 2

## 2. ขั้นตอนการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการออกแบบ Fan Gate โดยใช้โปรแกรมจำลองการหล่อ MAGMASOFT ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้หลักการคำนวณแบบ Finite differential ทำการวิเคราะห์รูปแบบการไหลผ่าน Gate ของโลหะเหลว

รูปภาพที่ 3

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 100 mm ยาว 125 mm หนา 5 mm โดยใส่ตัววัดความเร็วของโลหะเหลวไว้ที่ Ingate จำนวน 5 จุด

การทดลองครั้งนี้ได้ทำการศึกษาดัชนีแปรทั้งหมด 4 ตัว คือ (1) มุมการไหล (Flow angle) ตั้งแต่  $10^{\circ}$  ถึง  $60^{\circ}$ , (2) ความหนา Ingate (Ingate thickness) 1-2.5

mm, (3) ความยาว Ingate (Ingate length) 30-50 mm, และ (4) อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด Runner ต่อ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด Ingate (R:I ratio) ตั้งแต่ 1-4 เท่า

Condition ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้ทำการควบคุมให้ความเร็วที่ Ingate อยู่ระหว่าง 31 m/s ถึง 55 m/s เนื่องจากถ้าโลหะเหลวมีความเร็วมากเกินไป จะทำให้ลักษณะการไหลของโลหะเหลวผ่าน Ingate ไม่เป็นละอองซึ่งจะมีผลทำให้ฉีดได้ไม่เต็มชิ้นงาน แต่ถ้าความเร็วโลหะเหลวไหลผ่าน Ingate มากเกินไปจะทำให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานที่สั้นลงเนื่องจากความเร็วของโลหะเหลวจะกัดกร่อนหน้าแม่พิมพ์ ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

ตารางที่ 1

รูปภาพที่ 4

ตารางที่ 2

### 3. ผลการทดลองและการอภิปราย

#### 3.1 ผลจากการเปลี่ยนมุมการไหล (Flow angle)

เมื่อมุมการไหลที่  $10^\circ$  จะทำให้โลหะเหลวไหลพุ่งขึ้นไป มีอากาศตกค้างอยู่ในโพรงแม่พิมพ์มาก เมื่อมุมการไหลเพิ่มขึ้นเป็น  $25^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  จะเกิดการไหลที่เป็นระนาบ (Distributed Flow) ได้ในเวลาสั้นกว่า ทำให้อากาศที่ตกค้างภายในโพรงของแม่พิมพ์จะลดน้อยลง

แต่เมื่อเพิ่มมุมการไหลไปที่  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  ได้เกิดการแตกของโลหะเหลวขึ้น คือ จะเกิดการแยกออกของโลหะเหลวบริเวณตรงกลางของ Ingate โดยสามารถสังเกตได้จากความเร็วของโลหะเหลวที่ไหลผ่าน Ingate มีความเร็วไม่สม่ำเสมอ

รูปภาพที่ 5

รูปภาพที่ 6

รูปภาพที่ 7

#### 3.2 ผลจากการเปลี่ยนความยาว Ingate

ความยาว Ingate ที่มากขึ้น โลหะเหลวแผ่อกได้ระยะที่กว้างขึ้นทำให้การกักอากาศในชิ้นงาน บริเวณ Ingate ลดน้อยลง ดังรูปที่ 8

รูปภาพที่ 8

แต่ที่ความยาว Ingate 40 mm และ 50 mm เกิดการแตกของโลหะเหลวบริเวณตรงกลาง Ingate ขึ้น

รูปภาพที่ 9

#### 3.3 ผลจากการเปลี่ยนความหนาของ Ingate

ที่ความหนา Ingate 1 mm โลหะเหลวที่ไหลผ่าน Ingate จะไหลเร็วมาก ทำให้เกิดการแตกของโลหะเหลวขึ้น และโลหะเหลวไหลขึ้นไปแบบไม่เป็นระนาบ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนา Ingate 2.5 mm จะไหลเป็นระนาบมากกว่า

รูปภาพที่ 10

รูปภาพที่ 11

แต่ในการเพิ่มความหนาของ Ingate ต้องคำนึงถึงความเร็ว Fast shot (V2) ด้วยเพื่อทำให้โลหะเหลวที่ไหลออกจาก Ingate เป็นละออง

#### 3.4 ผลจากการเปลี่ยนอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด

Runner ต่อ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด Ingate จากกราฟแสดงความเร็วของโลหะเหลวที่ไหลผ่าน Ingate พบว่าที่ R:I ratio=1 โลหะเหลวจะไหลขึ้นไปอย่างไม่เป็นระนาบ แต่เมื่อปรับค่า R:I ratio เพิ่มเป็น 1.8 และ 2.5 โลหะเหลวจะไหลอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น แต่เมื่อปรับค่า R:I ratio เพิ่มขึ้นไปถึง 4 พบว่า การไหลของโลหะเหลวไม่สม่ำเสมออีกครั้งหนึ่ง

รูปภาพที่ 12

#### 4. การประยุกต์ใช้กับชิ้นงานในอุตสาหกรรม

นำชิ้นส่วนยานยนต์ที่ทำการผลิตในอุตสาหกรรมที่มีปัญหาข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ (Gas Porosity) มาทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการหล่อ ซึ่งผลวิเคราะห์ได้แสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องทำการปรับเปลี่ยน Gating system เพื่อให้มีการไหลที่เป็นระนาบ จาก Ingate ไปจนถึง overflow

รูปภาพที่ 13

รูปภาพที่ 14

เมื่อทำการออกแบบ Gating system ใหม่แล้วปรับค่าตัวแปรต่างๆอย่างเหมาะสมแล้ว พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานหล่อเทียบกับน้ำหนักของ Shot Weight มีค่าสูงขึ้น (Casting Yield) ส่งผลให้ลดการสูญเสียวัตถุดิบในการผลิตลงทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่ลดต่ำลง โดยลดการใช้อลูมิเนียมผงครั้งละ 137 g ต่อ 1 ชิ้นงาน

รูปภาพที่ 15

ตารางที่ 3

#### 5. สรุปผลการทดลอง

ในการออกแบบ Gating system ที่ใช้ในกระบวนการหล่อ HPDC นั้น สิ่งหนึ่งที่สำคัญคือ Gate เนื่องจากเป็นตัวกำหนดเส้นทางการไหลใน Cavity โดยตัวแปรที่สำคัญของ Fan gate มี 4 ตัวแปร คือ มุมการไหล (Flow angle), ความยาว Ingate, ความหนา Ingate และ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด Runner ต่อ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด Ingate ซึ่งการปรับค่าของตัวแปรแต่ละตัวจะมีผลต่อการไหลของโลหะเหลวใน Cavity ถ้ามีการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่เหมาะสมจะทำให้ลดต้นทุนในการผลิตได้ ผลของตัวแปรแต่ละตัวมีดังนี้

มุมการไหล (Flow angle) ที่น้อยจะทำให้โลหะเหลวไหลพุ่งขึ้นไป เกิดการกักอากาศภายในแม่พิมพ์ การเพิ่มมุมการไหลให้มากขึ้นจะทำให้โลหะเหลวไหล

เป็นระนาบได้ดีกว่า แต่ถ้ามุมการไหลมากเกินไปจะทำให้โลหะเหลวที่ไหลผ่าน Ingate แตก

อิทธิพลของการปรับเปลี่ยนความยาวของ Ingate จะมีพฤติกรรมคล้ายกับการเปลี่ยนมุมการไหล คือถ้าความยาว Ingate น้อยไปจะมีการกักอากาศมากขึ้น แต่ถ้ามากเกินไปโลหะเหลวที่ไหลผ่าน Ingate ก็จะแตก

ความหนา Ingate ที่น้อยเกินไปจะทำให้โลหะเหลวทำให้โลหะเหลวไหลไม่เป็นระนาบ การไหลจะเป็นระนาบมากขึ้นเมื่อเพิ่มความหนา Ingate

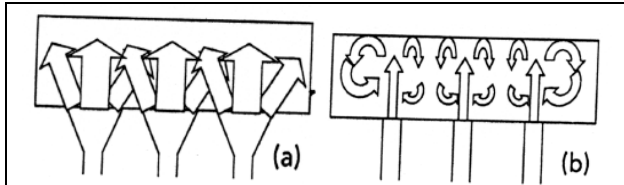
อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด Runner ต่อ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด Ingate ที่น้อยเกินไปจะทำให้โลหะเหลวไหลไม่เป็นระนาบ แต่ถ้ามากเกินไปจะทำให้การไหลของโลหะเหลวไม่สม่ำเสมอ

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

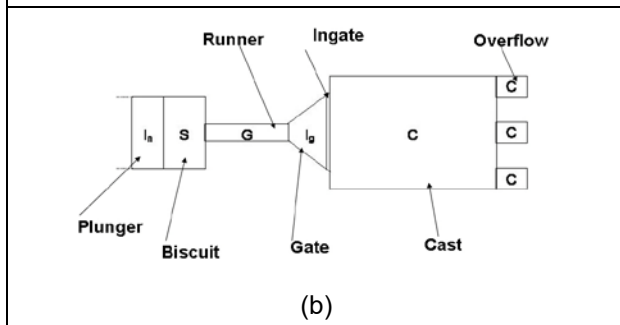
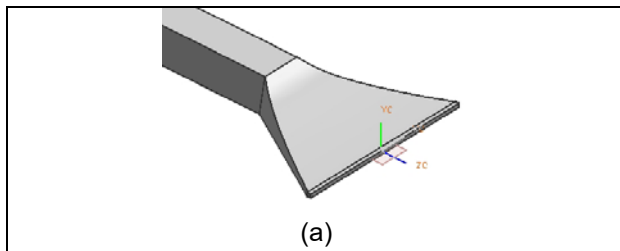
ขอขอบคุณ โครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโนโลยี (YSTP) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ อาจารย์ ดร. พงษ์ศักดิ์ ดุลยประพันธ์ นักวิจัย MTEC ที่ให้แนวทาง, คำแนะนำในการวิจัยและความรู้ด้านกระบวนการหล่อ ความดันสูง อาจารย์ ดร. สุรศักดิ์ สุรนนท์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาและให้คำแนะนำในการวิจัยนี้ และท้ายที่สุดขอขอบคุณคณาจารย์และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

#### 7. เอกสารอ้างอิง

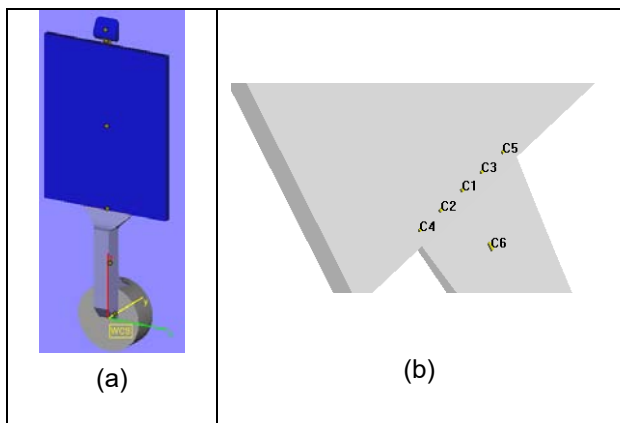
- [1]. Dr. P. N. Rao , R. Thukral and K. L. Rajpal (1989), Computer-Aided Design of Gating Systems for Die Casting Dies , paper presented in 15<sup>th</sup> Die Casting Congress & Exposition October 16-19 , 1989 St.Lotus, MO
- [2]. Bill Walkington (2001), Seven Steps to Quality Gating Design, North American Die Casting Association
- [3]. Gating manual, North American Die Casting Association, NADCA, Publication #512
- [4].MAGMASOFT MANUAL (2002), Giesserei technologie GMBH, KACKERTSTRASSE11, D-52072 AACHEN, GERMANY



รูปที่ 1 ลักษณะของ flow pattern ที่ต่างกันของ (a) fan gate โลหะเหลวไหลเป็นระนาบ, (b) chisel gate โลหะเหลวไหลวนในชิ้นงาน



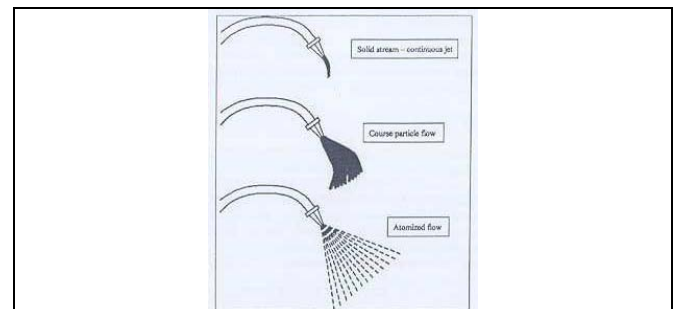
รูปที่ 2. (a) ลักษณะของ Straight Fan Gate (b) องค์ประกอบของ Gating System และชิ้นงาน



รูปที่ 3. แสดง (a) ชิ้นงานและ gating system ที่ใช้ในการทดลอง (b) จุดตรวจวัดความเร็วโลหะเหลว

ตารางที่ 1. การปรับค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

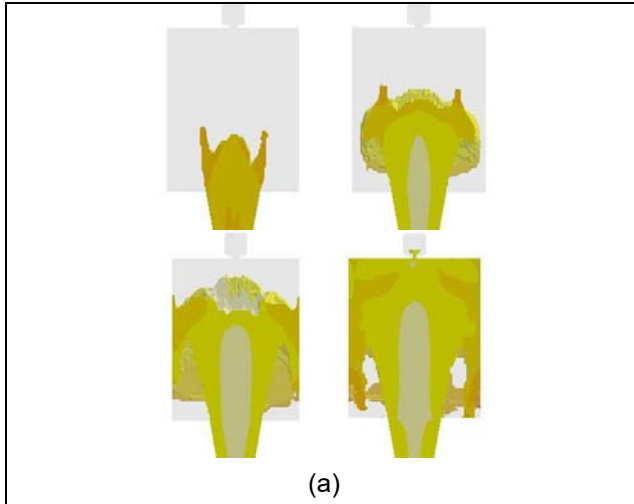
Flow angle (degree)	Ingate thickness (mm)	Ingate length (mm)	R:I ratio
10	1.5	40	2.5
25	1.5	40	2.5
45	1.5	40	2.5
60	1.5	40	2.5
45	1.5	30	2.5
45	1.5	50	2.5
45	1.0	40	2.5
45	2.0	40	2.5
45	2.5	40	2.5
45	1.5	40	1.0
45	1.5	40	1.8
45	1.5	40	4.0



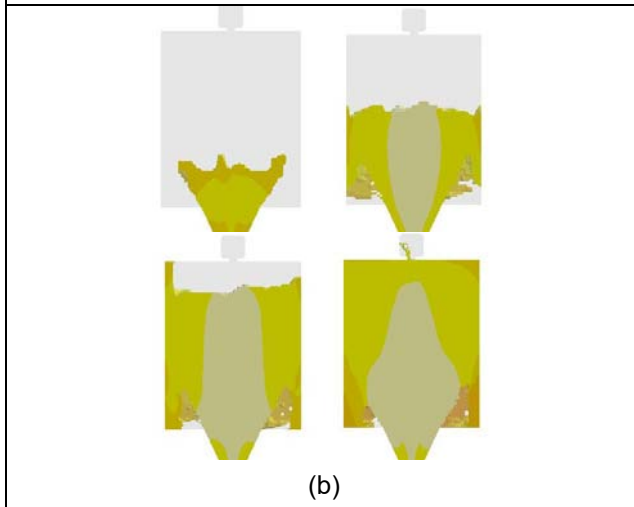
รูปที่ 4. การไหลของของเหลวผ่านพื้นที่ที่เล็กลงด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ต้องทำให้มีความเร็วมากพอทำให้โลหะเหลวไหลเป็นละออง [2]

ตารางที่ 2. Condition ที่ใช้ในการทดลอง

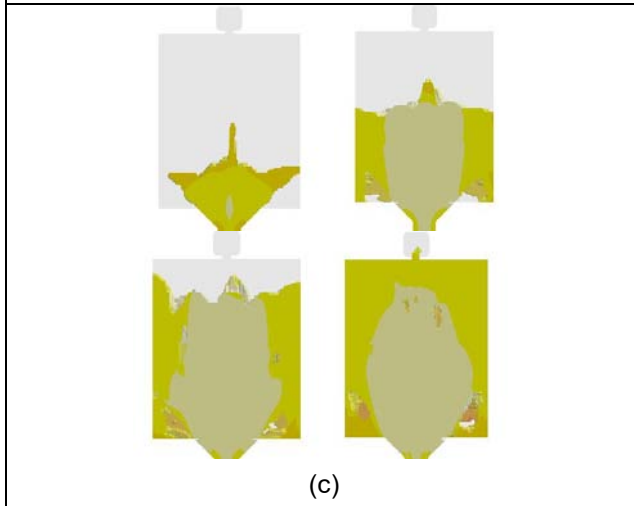
Cast alloy	ADC12 / 670 °C
Die material	SKD61 / 180 °C
Plunger diameter	50 mm
Active length of shot sleeve	342mm
Slow shot (V1)	0.32 m/s
Fast shot (V2)	1.298-1.622 m/s
Fill time	18-25 ms
Velocity at Ingate	38-55 m/s
Volume of cast	63706.5 mm <sup>3</sup>



(a)

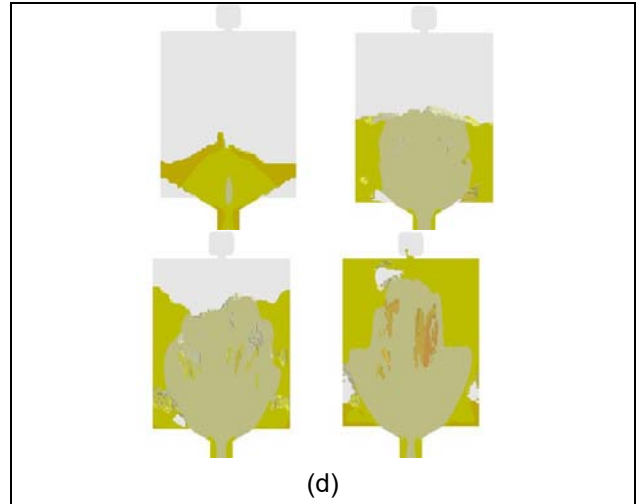


(b)



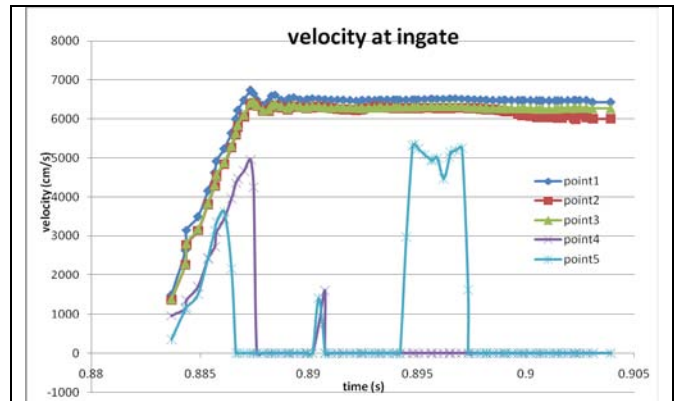
(c)

รูปที่ 5. Flow pattern ของโลหะเหลวเมื่อมุมการไหลที่ Fan gate ต่างกัน (a) มุม  $10^\circ$  (b) มุม  $25^\circ$  (c) มุม  $45^\circ$

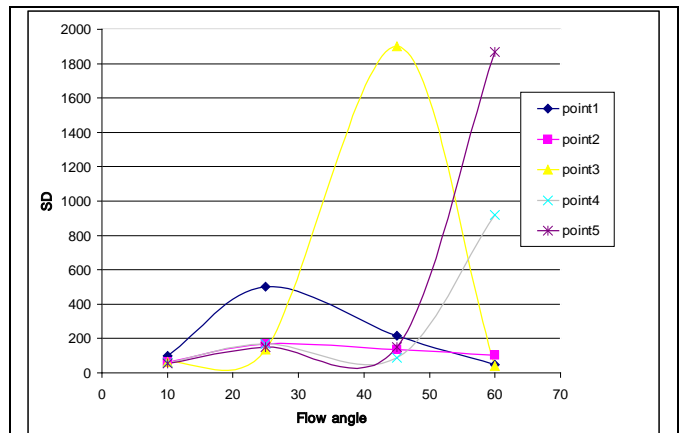


(d)

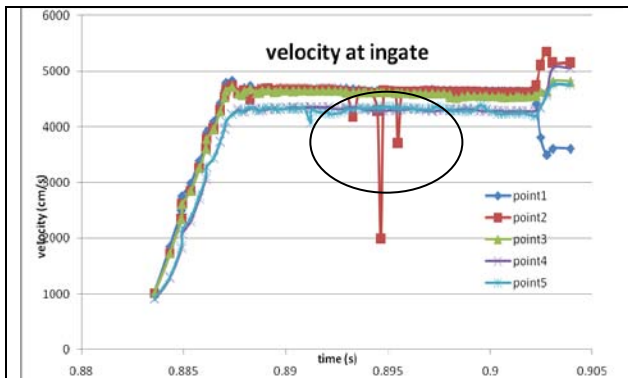
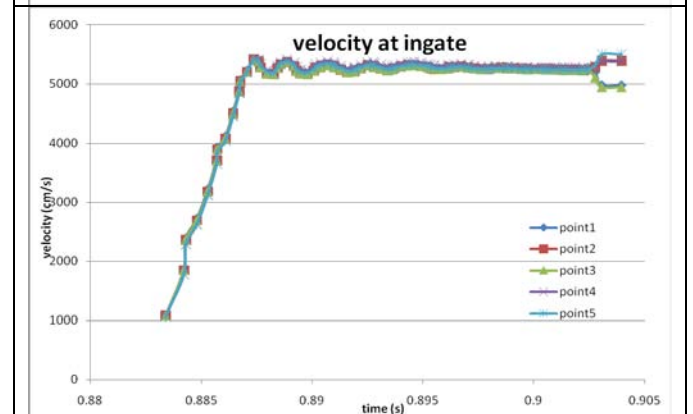
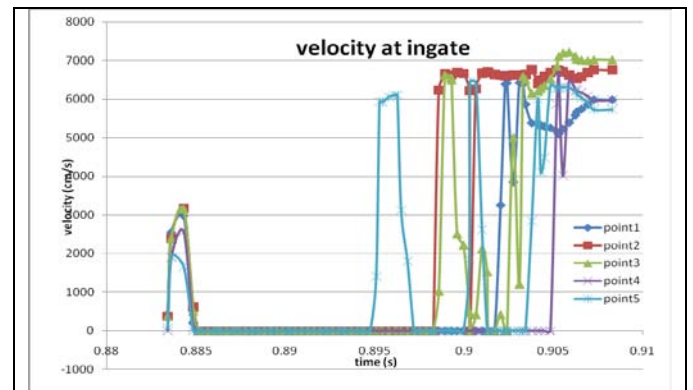
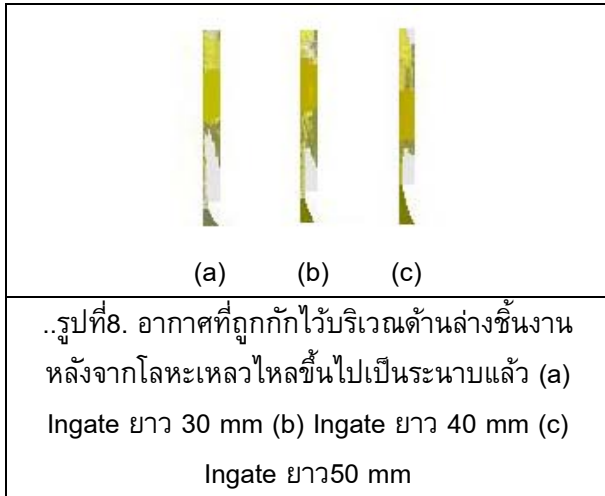
รูปที่ 5.(ต่อ) Flow pattern ของโลหะเหลวเมื่อมุมการไหลที่ Fan gate ต่างกัน (d) มุม  $60^\circ$



รูปที่ 6. ความเร็วของโลหะเหลวเมื่อมุมการไหลที่  $60^\circ$  มีการแตกของโลหะเหลวเกิดขึ้น

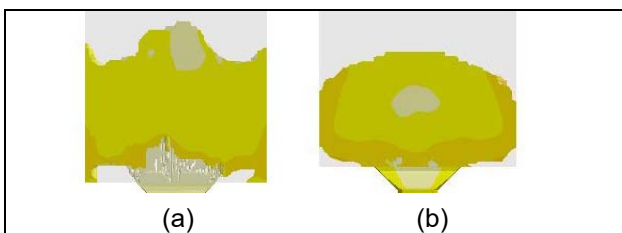


รูปที่ 7. แสดงค่า SD ของแต่ละ point เมื่อเปลี่ยนมุม Flow Angle ซึ่งค่า SD แสดงถึงความเร็วของโลหะเหลวที่เปลี่ยนไปที่จุดวัดทั้ง 5 จุด ที่มุม Flow angle  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน

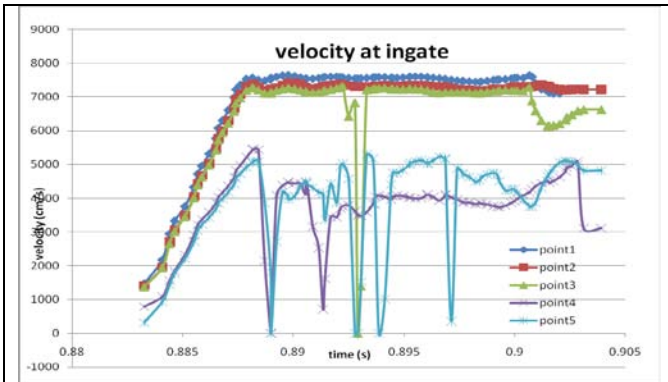


รูปที่11. ความเร็วของโลหะเหลวผ่าน Ingate (a) ความ  
หนา Ingate 1 mm (b) Ingate 2.5 mm

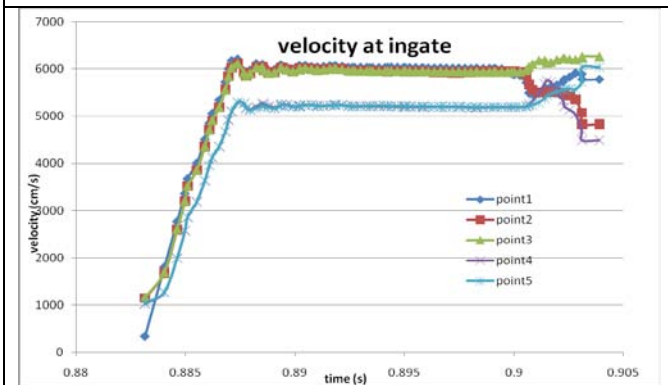
รูปที่9. ความเร็วไม่สม่ำเสมอของโลหะเหลวผ่าน  
Ingate ที่ ความยาว Ingate 50 mm



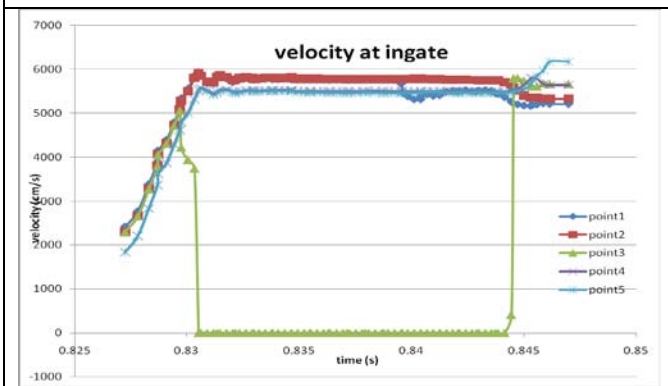
รูปที่10. การไหลของโลหะเหลวผ่าน Ingate (a) ความ  
หนา Ingate 1 mm (b) Ingate 2.5 mm



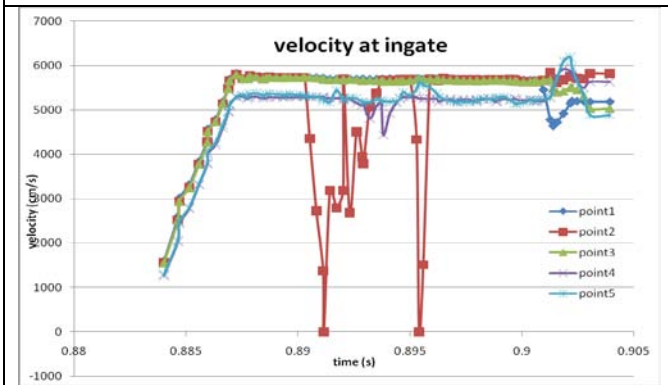
(a)



(b)

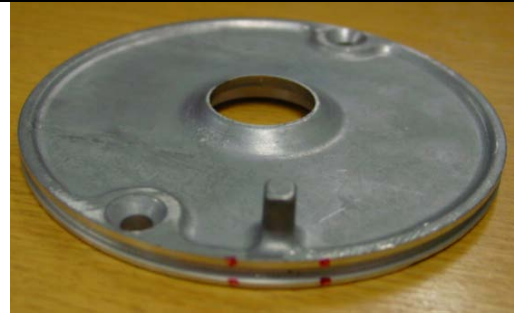


(c)

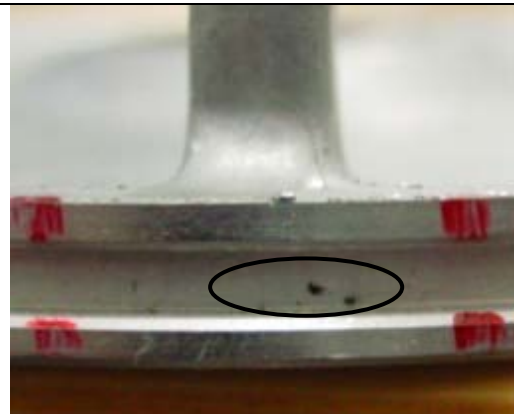


(d)

รูปที่12. ความเร็วของโลหะเหลวผ่าน Ingate เมื่อปรับค่า R:I ratio (a) R:I ratio=1 (b) R:I ratio=1.8 (c) R:I ratio=2.5 (d) R:I ratio=4

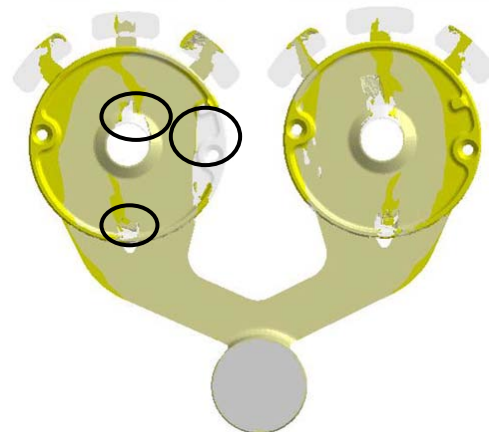


(a)



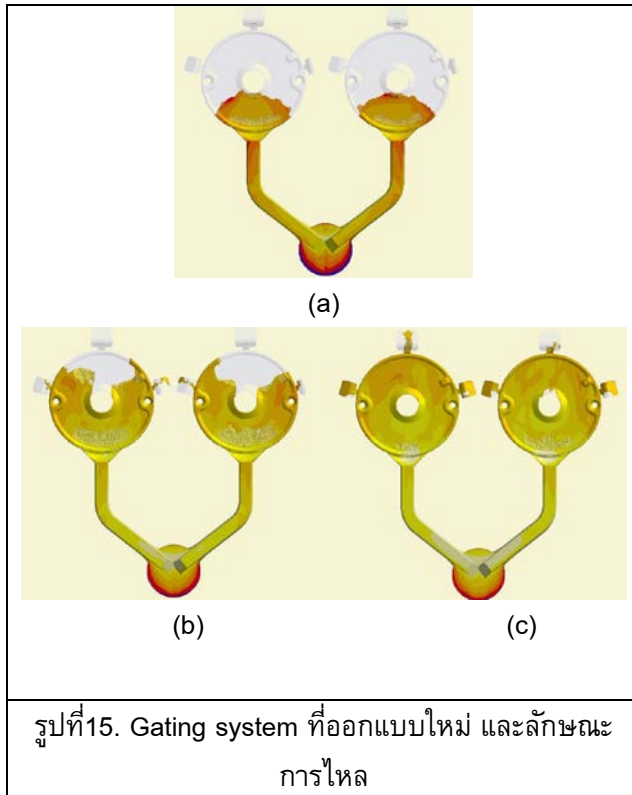
(b)

รูปที่13. (a) ชิ้นส่วนยานยนต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา (b) บริเวณที่พบปัญหา



รูปที่14. บริเวณที่อาจพบปัญหาข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ





ตารางที่3. เปรียบเทียบค่า casting yield ของ Gating System ของแบบเก่าและแบบใหม่

Original	New Design
Casting = 94120 mm <sup>3</sup>	Casting = 94120 mm <sup>3</sup>
Runner = 68513 mm <sup>3</sup>	Runner = 51714 mm <sup>3</sup>
Overflow = 22829 mm <sup>3</sup>	Overflow = 10040 mm <sup>3</sup>
Ingateoverflow=389mm <sup>3</sup>	Ingateoverflow=445mm <sup>3</sup>
Ingate = 2025 mm <sup>3</sup>	Ingate = 240 mm <sup>3</sup>
Biscuit = 38846 mm <sup>3</sup>	Biscuit = 38846 mm <sup>3</sup>
SUM = 226722 mm <sup>3</sup>	SUM = 195405 mm <sup>3</sup>
Yield = 41.51 %	Yield = 48.17 %