

การลดปัญหาพรุนของชิ้นงานมือหมุนในกรรมวิธีการหล่อฉีดสังกะสีผสม The Reducing of Porosity Defects in Window Winder Housing Zinc Alloy Die Casting Process

กิตติพันธ์ อัมพรพรวรดี กอบสิน ทวีสิน ดิลก ศรีประไพ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-24709207 โทรสาร 0-28729080 E-mail: dilok.sri@kmutt.ac.th

Kittipan Ampornpan Kobsin Taveesin Dilok Sriprapai

Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,

Bangmod, Tungkrui, Bangmod 10140

Tel: 0-24709207 Fax: 0-28729080 E-mail: dilok.sri@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นงานที่ศึกษาถึงวิธีการแก้ไขปัญหามือหมุนบนผิวชิ้นงานหล่อฉีดสังกะสีผสม ของชิ้นส่วนมือหมุนบานเกล็ด โดยนำเอาเทคโนโลยีการออกแบบแม่พิมพ์หล่อฉีดสังกะสีผสม มาใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหา ซึ่งเริ่มจากการออกแบบแม่พิมพ์อย่างถูกต้องตามหลักทฤษฎี พร้อมกับการนำเอาโปรแกรมจำลองแบบการหล่อฉีดสังกะสีผสมด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันผลจากการออกแบบ ภายหลังจากการได้ผลเฉลยที่เหมาะสมแล้ว จึงได้ทำการสร้างแม่พิมพ์ เพื่อนำไปทำการทดลองฉีดขึ้นงานมือหมุนบานเกล็ดดูรูพรุนบนผิวชิ้นงาน ผลจากการดำเนินการพบว่า สามารถลดปริมาณของเสียอันเนื่องมาจากการเกิดรูพรุนจากเดิม 10% เป็น 5% จึงอาจกล่าวได้ว่า แนวทางการใช้หลักทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ ร่วมกันกับการจำลองแบบด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ สามารถทำนายและช่วยในการแก้ไขปัญหาได้

Abstract

This research project involved the development of porosity reduction in window winder housing zinc alloy die casting process by using the technology of zinc alloy die casting in order to fix the problem. The first step was to correctly design the die casting by theory, combining with the computer software of zinc alloy die casting modeling to prove whether the theory is appropriate. After getting the accepted solution, the die casting was made and tryout as a master cast for the zinc alloy experiments. The result showed that the porosity defects on the surface were decreased

from 10 percent to 5 percent with the new die casting. In conclusion, the combination between theory of Die Casting Die Design and computer software can help predict and minimize the porosity defects in window winder housing zinc alloy die casting process.

1. บทนำ

กระบวนการหล่อฉีดโดยเฉพาะการฉีดโลหะเหลวด้วยแรงดันเป็นกระบวนการหล่อโลหะที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ต่อการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เครื่องมือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์เป็นอย่างยิ่ง เพราะสามารถผลิตได้คราวละมากๆ จึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นลดลง โดยปกติสำหรับกระบวนการนี้ โลหะเหลวจะถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ภายใต้แรงดันด้วยความเร็วตั้งแต่ 10-100 เมตรต่อวินาที ผ่านระบบทางวิ่งและทางเข้าที่ซับซ้อน ก่อนจะไหลรวมเป็นเนื้อเดียวกันในโพรงแม่พิมพ์ (โพรงแม่พิมพ์) โดยปกติแรงดันฉีดจะเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะมีผลทำให้การเติมเต็มผิวพื้นไปจากเป้าหมาย นอกจากนั้นยังเป็นเหตุก่อให้เกิดรูพรุนหรือพองอากาศ รวมไปถึงความเสียหายที่จะเกิดกับผิวชิ้นงาน ในอดีต หรือแม้กระทั่งในปัจจุบันก็ตาม การแก้ปัญหามือหมุนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อฉีดนั้นยังคงใช้วิธีลองผิดลองถูก รวมไปถึงประสบการณ์ความสามารถของผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก อันประกอบไปด้วย เงื่อนไขที่สำคัญสามประการ [1]

ประการแรก ได้แก่ ความรู้ทางเครื่องจักร (การปรับตั้งและเงื่อนไขการฉีด)

ประการที่สอง ได้แก่ กระบวนการออกแบบแม่พิมพ์

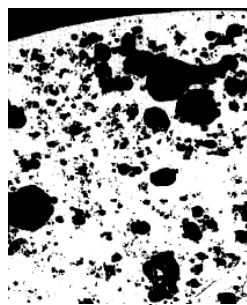
ประการที่สาม ได้แก่ความรู้ทางด้านโลหะวิทยา การหล่อหลอม และสมบัติทางกายภาพของโลหะเหลวเป็นต้น

ซึ่งไม่ผิดกติกาแต่ประการใด อย่างไรก็ตามหากต้องการยกระดับศักยภาพทางการผลิตให้สูงขึ้น ได้แก่ คุณภาพ ราคา และระยะเวลาการส่งมอบให้สามารถทำการแข่งขันกับผู้อื่นได้นั้น จึงมีความจำเป็นต้องนำเทคโนโลยีสมัยใหม่ รวมไปถึงแนวคิดทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาต่างๆดังกล่าว

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลึกลงไปถึงสาเหตุของการหล่อฉีดสังกะสีผสมเพื่อหาแนวทางในการลดปัญหารูพรุนของชิ้นงานมือหมุนบานเกล็ด ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยพิจารณาถึงตัวปัญหาต่างๆ ที่มักเกิดขึ้นมากที่สุด



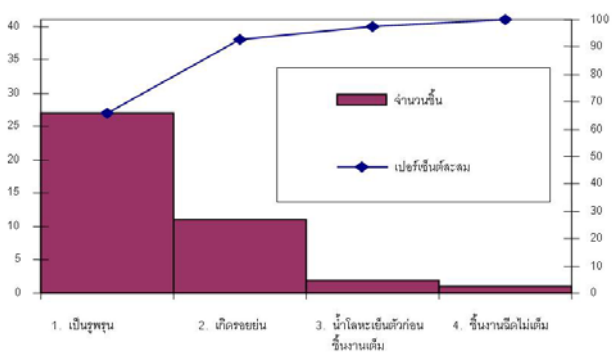
(ก) มือหมุนบานเกล็ด



(ข) รูพรุนในเนื้อโลหะ

รูปที่ 1 มือหมุนบานเกล็ดและรูพรุนในเนื้อ

กระบวนการผลิต ตามหลักการวินิจฉัยปัญหาแผนภูมิพาริต (Parito chart) จากข้อบกพร่องที่สำคัญ และมักพบอยู่บ่อย ๆ รูพรุนของชิ้นงานรอยย่น ชิ้นงานฉีดไม่เต็ม และอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิพาริตและความบกพร่องของชิ้นงานหล่อฉีด

จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหายมากที่สุด คือ ปัญหาเนื้อเป็นรูพรุนรวมในทุกกรณี สูงถึง 25% โดยเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นภายหลังการควบคุมปัจจัยต่างๆ แล้ว เช่น การปรับตั้งเครื่องจักร การควบคุมการหล่อหลอมและการดึงกาชออกจากเนื้อโลหะเหลว ประมาณ 10% ดังนั้นแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้มุ่งประเด็นไปยังการออกแบบแม่พิมพ์เป็นสำคัญ โดยจำลองการฉีดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วจึงนำมาปรับปรุงระบบแม่พิมพ์เพิ่มเติมให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

2. การไหลและการเติมเต็มในโพรงแม่พิมพ์

การหล่อฉีดชิ้นงานสังกะสีผสมเป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับการผลิตชิ้นส่วนซับซ้อนทางวิศวกรรมที่มีความเที่ยงตรงและให้ผลผลิตสูง ความรู้ในเรื่องการไหลของโลหะช่วยให้สามารถทำการผลิตชิ้นงานบางๆและปราศจากความบกพร่อง สามารถควบคุมการถ่ายเทความ

ร้อนได้อย่างถูกต้อง จึงทำให้ผิวสวย และความเที่ยงตรงสูง การควบคุมการไหลอย่าไม่ถูกต้องจึงเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายในชิ้นงานขึ้นได้

การไหลของโลหะเหลวในกระบวนการหล่อฉีดมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อความเสียหายในชิ้นงาน เช่นการกัดฟองอากาศ หรือกลายเป็นพารามิเตอร์ในการแข็งตัวของโลหะ ในขณะที่ทำการฉีด โลหะเหลวส่วนหน้า (Flow front) จะไหลเข้าไปแทนที่อากาศในโพรงแม่พิมพ์ ในขณะที่แรงดันในระบบเพิ่มขึ้น อากาศส่วนใหญ่จะหนีออกจากแม่พิมพ์ทางช่องระบายอากาศ แต่ถ้าโลหะไหลเข้าไปอุดตันช่องอากาศเสียก่อนอากาศที่เหลืออยู่ก็จะผสมกับโลหะเหลวแล้วกลายเป็นรูพรุนฟองอากาศในภายหลัง แต่ถ้าโลหะเหลวแข็งตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้ผิวเสียและโครงสร้างของโลหะไม่ดี

การแก้ปัญหารูพรุนในชิ้นงานจึงมักจะต้องออกแบบขนาดของช่องทางไหล หรือรันเนอร์ (Runner) ทางเข้า (Gate) หรือกำหนดตำแหน่งเสียใหม่ กล่าวคือ ต้องทำให้อากาศไหลออกไปจากแม่พิมพ์ได้สะดวก ไม่เกิดการกักและไม่อุดตันช่องระบายอากาศ นอกจากนั้นการควบคุมการถ่ายเทความร้อนและความเร็วฉีดที่ถูกต้องก็จะช่วยลดการเกิดรูพรุนลงไปได้

2.1 การเติมเต็มในโพรงแม่พิมพ์

กล่าวโดยทั่วไป การเติมเต็มในงานหล่อฉีดมักจะเป็นปัญหาที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา มีผลกระทบจากสภาพความเฉื่อยของโลหะ และการไหลและการรวมตัวในส่วนหน้าอย่างอิสระ แต่สำหรับการวิเคราะห์การไหลนั้นจำเป็นต้องสมมติว่า โลหะเหลวมีเนื้อเป็นเอกพันธ์ เฟสเดียว และมีความต่อเนื่อง และเนื่องจากโลหะมีความเร็วสูงดังได้กล่าวมาแล้ว และในขณะที่ย้อนกลับมายังสูงกว่าจุดแข็งตัว ความหนืดคิเนมาติก (Kinematic viscosity) ของโลหะเหลวจะมีอยู่ในอันดับ 10^{-6} ตารางเมตรวินาที และเนื่องจากการไหลมีผลโดยตรงจากความเฉื่อย จึงสมมติว่าการไหลนั้นเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้และความหนืดน้อยมาก จึงได้ใช้หุนจำลองการไหลแบบนิวโตเนียน-อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Newtonian fluid model) [2] เพื่อการคำนวณ และหาผลเฉลยอิงจากสมการ เนเวียร์-สโตรค (Navier-Stokes equation) โดยเริ่มต้นจากสมการ governing [3] ดังต่อไปนี้

1 สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (v_a - v_b) \nabla W_{ab} \quad (1)$$

2 สมการโมเมนตัม

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sum_b m_b \left[\left(\frac{P_b}{\rho_b^2} - \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) - \mu_{ab} \right] \nabla_a W_{ab} + g \quad (2)$$

3 สมการแสดงสถานะความเร็วและแรงดันฉีด

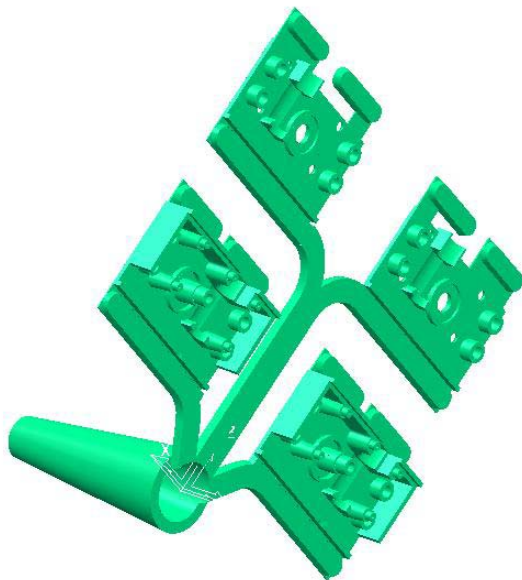
$$P = P_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (3)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_0} = 100V^2 \quad (4)$$

การอินเทอโพลจะขึ้นจะใช้วิธีลากรางเจียน (Lagrangian) เพราะเหมาะกับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคอย่างอิสระจากการไหลแบบซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการไหลที่มีผิวหน้าอิสระ การจำลองจะดำเนินไปในรูปแบบการอินทิเกรตแบบเอ็กพลิซิท์ (Explicite) สมการที่ 1 และ 3 ตามระบบสมการอนุพันธ์ ซึ่งการคำนวณนี้ไม่จำเป็นต้องมีกริด (grid) อ้างอิง และนับว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมกับหลักการ ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite different) และการจำลองการฉีดทุกครั้งจะต้องกำหนดขอบเขตเพื่อป้องกันเนื้อโลหะไหลออกจากขอบของเนื้องาน หรือผิวชิ้นงาน

3. การจำลองการฉีด

การจำลองการฉีดเริ่มต้นจากการเขียนภาพชิ้นงานโดยกำหนดตำแหน่งการฉีดและการจัดวางตามแบบของแม่พิมพ์หล่อฉีดมือหมุนบานเกล็ด จากแม่พิมพ์เดิมที่เกิดปัญหา ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การจัดวางชิ้นงานและตำแหน่งการฉีด

โลหะสังกะสีที่ใช้ในการทดลองมีชื่อตามมาตรฐานญี่ปุ่น JIS-H5301 (1979) ชื่อ ZAMAK-3 ซึ่งเป็นสังกะสีสำหรับงานหล่อฉีด โดยมีส่วนผสมทางเคมีตามตารางที่ 1

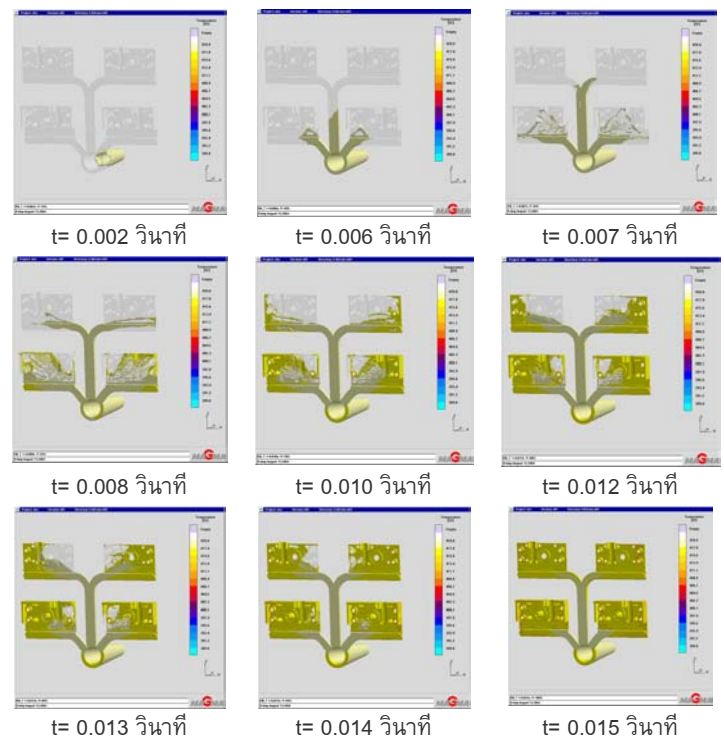
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของสังกะสีผสม ZAMAK-3

ส่วนประกอบทางเคมี (%)						
Al	Cu	Mg	Fe	สารปลอมปน (%)		
				Pb	Cd	Sn
3.5-4.3	< 0.25	0.020-0.06	< 0.1	< 0.005	< 0.004	< 0.003

ในการจำลองการฉีดเพื่อวิเคราะห์หาขนาดต่างๆของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมนั้น ได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ชื่อ MAGMA โดยกำหนดเงื่อนไขการฉีดดังนี้

อุณหภูมิหลอมละลายของสังกะสี	425° C
อุณหภูมิแม่พิมพ์	190° C
อุณหภูมิปลดชิ้นงาน	80° C
แรงดันฉีด	45 kg / cm ²
แรงบิดแม่พิมพ์	50 Ton

ผลจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์จะสามารถเห็น ลักษณะการไหลของโลหะเหลวในโพรงแม่พิมพ์ได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงถึงการเติมเต็ม และอุณหภูมิของโลหะเหลวในตำแหน่งต่างๆ ณ เวลาที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อโลหะเริ่มเติมเต็ม ก็จะเกิดร่องรอยของโพรงอากาศที่ถูกกักเก็บไว้ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4 การจำลองรอบการการฉีดและการเติมเต็ม ณ เวลาต่างๆ

เมื่อทำการปรับขนาดองค์ประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ ได้แก่ ทางวิ่ง ทางเข้า รูปล้น แล้วทำการจำลองซ้ำจนกระทั่งเห็นว่าไม่เกิดรูพรุนหรือโพรงอากาศในชิ้นงานแล้วจึงถือว่าเป็นจุดสิ้นสุดการทำงาน หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ดีที่สุดไปปรับแต่งแม่พิมพ์ให้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

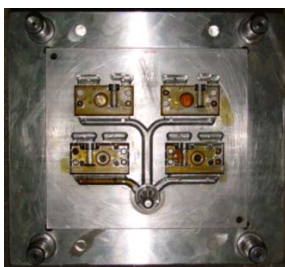
4. ผลการทดลอง

เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดมาเปรียบเทียบกับค่าแนะนำตามทฤษฎี รวมทั้งข้อมูลจากแม่พิมพ์เดิม ดังแสดงในตารางที่ 2 แล้วพบว่า จุดสำคัญในการออกแบบเดิม ที่มีความแตกต่างกันเป็นอย่างมากคือ การออกแบบช่องระบายอากาศ เพราะขณะฉีดหรือป้อนจ่ายน้ำโลหะจะเกิดก๊าซ และต้องมีช่องทางให้ก๊าซและหรืออากาศนั้นหนีออกจากแม่พิมพ์ได้ทั้งหมด จะเห็นว่าการออกแบบ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรของแม่พิมพ์

การออกแบบคำนวณ	ทฤษฎี	ผลการจำลอง	แม่พิมพ์เก่า
แรงดันฉีด	37 ตัน	50 ตัน	50 ตัน
พื้นที่หน้าตัดทางเข้า	27.78 มม ²	30 มม ²	25 มม ²
ความหนาทางเข้า	0.4 – 0.8 มม	0.5 มม	0.4 มม
พื้นที่หน้าตัดทางวิ่ง	44.45 – 83.34 มม ²	44 มม ²	75 มม ²
ความกว้างทางวิ่ง :	2 – 3 เท่า	3 เท่า	4.75 เท่า
ความหนา			
ปริมาตรรูสัน	20 – 50 % ของชิ้นงาน	37.5%	45 %
ขนาดของระบาย	9.25 มม ²	10 มม ²	ไม่มี
อากาศ			
ระยะฐานหล่อเย็นถึงผิวชิ้นงาน	63.53 มม	50 มม	40 มม

ตามหลักทฤษฎีจะให้ผลสอดคล้องกับการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ส่วนแม่พิมพ์เก่านั้นจะไม่มีกรออกแบบช่องระบายอากาศไว้ ดังนั้น จึงทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สามารถระบายออกได้ สิ่งเหล่านี้เป็นเรื่องที่สำคัญมากในการนำไปปรับปรุงแม่พิมพ์และชิ้นงาน ซึ่งแสดงในรูปที่ 5



(ก) แม่พิมพ์



(ข) ชิ้นงาน

รูปที่ 5 แม่พิมพ์ที่ปรับปรุงแล้วและชิ้นงานสำเร็จรูป

ผลจากการปรับปรุงแม่พิมพ์ทำให้สามารถลดปริมาณของเสียอันเนื่องมาจากรูพรุนลงได้ประมาณ 5% ดังแสดงในรูปที่ 6 และปัญหาเนื่องจากรอยต่อของโลหะและการฉีดไม่เต็มหมดไป



(ก) รูพรุนก่อนปรับปรุง



(ข) ชิ้นงานภายหลังการปรับปรุง

รูปที่ 6 การเปรียบเทียบคุณภาพชิ้นงานก่อนและหลังการปรับปรุง

5. สรุป

การทำแม่พิมพ์ฉีดสังกะสีผสมที่ตินั้น เริ่มต้นจากการออกแบบและคำนวณ ขนาด ตำแหน่ง ที่เหมาะสมในส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์เช่น รูเท ทางวิ่ง ทางเข้า รูสัน ระบบการหล่อเย็น ฯลฯ ให้ครบถ้วน และถูกต้องตามหลักทฤษฎี การเลือกนำเอาโปรแกรมจำลองแบบการหล่อฉีดด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันผลจากการออกแบบที่เป็นไปตามหลักทฤษฎี และภายหลังจากการได้ผลเฉลยที่เหมาะสมแล้ว จึงได้ทำการสร้างแม่พิมพ์ เพื่อนำไปทำการทดลองฉีดชิ้นงาน ส่วนในทางปฏิบัติการสร้างแม่พิมพ์นั้นจะใช้ผลจากการออกแบบ และคำนวณส่วนต่างๆ

ของแม่พิมพ์ โดยจะเลือกจากค่าต่ำก่อนเพื่อขึ้นรูปแม่พิมพ์เพราะว่าเมื่อนำไปทำการทดลองฉีดชิ้นงานแล้ว หากพบว่าค่าที่เลือกใช้ไม่เพียงพอ ยังคงต้องด้วยเครื่องมือกล เพื่อที่ขยายขนาดได้ แต่ถ้าหากเลือกใช้ค่าขนาดใหญ่ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ก่อน หากพบว่าการใช้ค่าขนาดใหญ่เกินไป จะทำให้เกิดความยุ่งยากในการแก้ไข ซึ่งเป็นผลทำให้ชิ้นงานที่ฉีดอาจบกพร่องได้

ดังนั้นเพื่อลดความผิดพลาดและการลองผิดลองถูก จึงควรยืนยันผลจากการออกแบบก่อนการสร้างแม่พิมพ์ โดยการใช้โปรแกรมจำลองแบบการหล่อฉีดด้วยมาทำนายผลการฉีด เพื่อที่จะทราบถึงปัญหาที่จะเกิดขึ้นจริง แล้วหาทางแก้ไขเสียก่อน เพราะสามารถทำการทดลองเปลี่ยนแปลง ขนาด และตำแหน่งในส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์นั้นได้ตามใจชอบ จึงช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการผลิตเป็นอย่างมาก จึงกล่าวได้ว่า แนวทางการใช้ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ร่วมกับการจำลองแบบด้วยซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ นั้นสามารถทำนายผลและช่วยในการแก้ไขปัญหาได้ค่อนข้างแม่นยำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และ บริษัท Alco Products จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์แก่งานวิจัยนี้

รายการสัญลักษณ์

t	เวลา , วินาที
g	เวกเตอร์ความเร่ง
P	แรงดันของไหล
m_b	มวลของอนุภาค b
P_0	ขนาดแรงดันสูงสุด
P_a	แรงดันของอนุภาค a
P_b	แรงดันของอนุภาค b
V	ความเร็วโลหะเหลว
v_a	ความเร็วของอนุภาค a
v_b	ความเร็วของอนุภาค b
W_{ab}	อินเทอโพลาร์เคอเนล
γ	เลขยกกำลังของโลหะเหลว
ρ	ความหนาแน่นของโลหะเหลว
μ_{ab}	นิพจน์ความเค้นความหนืดนิวโตเนียน
ρ_0	ความหนาแน่นอ้างอิง
ρ_a	ความหนาแน่นของอนุภาค a
ρ_b	ความหนาแน่นของอนุภาค b

เอกสารอ้างอิง

[1] G.S.A. Shawki and Kandeil A.Y."A Review of Design Parameters and Machine Performance for Improved Die Casting Quality", J. of Mechanical Working Technology, Elsevier Science Publishers, 1988, Vol. 16, pp. 315-333.

- [2] P. Cleary, J. Ha, Vladimir A. and Thang N. "Flow Modelling in Casting Process" Applied Mathematical modeling, Elsevier Science Publishers, 2000, Vol. 26, pp. 171-190.
- [3] F. Muttin, Bellet M. and Chenot J.L. "Numerical Simulation of Inertial Effects in Newtonian Flows: Application to the Filling Stage of The Die-Casting Process" J. of Materials Processing Technology, Elsevier Science Publishers, 1992, Vol. 31, pp. 65-74.
- [4] D.L. Cocks and Wall A.J. " Modern Technology ensures Zinc Die Casting Meet Market Needs" Materials & Design, 1984, Vol. 5, No. 4, pp.167-176.
- [5] S. Yue, Wang G., Yin F., Yixin W. and Yang J. " Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for die casting dies" J. of Materials Processing Technology, Elsevier Science Publishers, 2003, Vol.139, No. 1-3, pp. 457-461.
- [6] G.P. Syrcos "Die Casting Process Optimization Using Taguchi Methods"J. of Materials Processing Technology, Elsevier Science Publishers, 2003, Vol.135, pp. 68-74.
- [7] H. Hu, C. Fang, X. Chen, Chu Y.I. and Cheng P "Effect of Cooling Water Flow Rates on Local Temperatures and Heat Transfer of Casting Dies" J. of Materials Processing Technology, Elsevier Science Publishers, 2004, Vol.148, No. 1, pp. 57-67.