

การศึกษาวิธีสร้างแม่พิมพ์และเงื่อนไขในการผลิตสำหรับการฉีดขึ้นงาน ด้วยพลาสติกพอลิเอไมด์ที่มีส่วนผสมของผงแม่เหล็กเฟอร์ไรท์

ชัยวัฒน์ โยคี¹, มนัส เหมบุญกิจ^{2,*}, วัชร ลายลักษณ์³, สถาพร ชาดาคม⁴

^{1,2,3,4}ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Received: 18 February 2019

Revised: 17 June 2019

Accepted: 19 June 2019

บทคัดย่อ

กระบวนการฉีดพลาสติกเป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีจำนวนมากๆ และต้องการขนาดชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรง พลาสติกที่มีการเติมวัสดุประเภท Ferrite bonded magnet compound (FBMC) ลงไปนั้นเพื่อต้องการให้ชิ้นงานเกิดสถานะแม่เหล็กในขณะนำไปใช้งานเช่น เซนเซอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วัสดุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้นั้นต้องการศึกษาวิธีสร้างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมและเงื่อนไขของการฉีดพลาสติกที่มีส่วนผสมของผงแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชิ้นส่วนของเซนเซอร์ที่ใช้สำหรับควบคุมระบบการทำงานของรถจักรยานยนต์ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุ ในขั้นตอนของการออกแบบจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองการไหลของพลาสติกภายในแม่พิมพ์และจำลองค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) ของระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับเป้าหมายแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน ในการทดลองฉีดจะใช้พลาสติกพอลิเอไมด์ (PA6) ที่มีส่วนผสมของเฟอร์ไรท์ 85 % ในการทดลอง เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 20 ตันและใช้ทองเหลืองในการสร้างชิ้นส่วนแม่พิมพ์ จากผลการทดลองที่ได้ชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเฉลี่ยที่ 5.23×10^3 Gauss สำหรับระยะห่าง 10 มม. ในการเพิ่มระยะเวลารอบในการฉีดเพื่อศึกษาผลกระทบค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ค่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ได้มีค่าลดลง 0.02×10^3 Gauss

คำสำคัญ: โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและช่วยในการวิเคราะห์ แม่เหล็กพลาสติก เฟอร์ไรท์

* ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล; manatdeedee@gmail.com

The Study of Mold Construction and Injection Process for PA6 and Ferrite Bonded Magnet Compound Plastic Parts

Chaiwat Yokee¹, Manat Hearunyakij^{2,*}, Vatchara Layluk³, Sathaporn Chatakorn⁴

Mechanical Engineering Department, College of Industrial Technology

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Abstract

Plastic injection process is always used for mass production process. The advantages of that process are variety of plastic material and excellent dimension control. The additive such as ferrite bonded magnet compound (FBMC) was used for increasing of plastic part magnetic property. The objective of this research was to study the mold construction process and injection condition for plastic part with ferrite bonded magnet compound. The typical part that was used in this research was an electronic component in motorcycle. Polyamide 6 with 85 % of ferrite bonded magnet compound was used for injection process experiment. Computer simulation software was used for analysis of plastic flow behaviour and magnetic flux density of different distances between magnetic source and mold cavity. The injection machine, sized 20 tons, was used for injection experiment and brass also was used for mold insert construction. For the injection results, the average of magnetic flux density was 5.23×10^3 Gauss in case of 10 mm distance, according to simulation result. In case of the increase of cycle time to compare the magnetic flux densities, the results showed that the magnetic flux density decreased by 0.02×10^3 Gauss when compared with conventional condition.

Keywords: computer simulation, magnetic plastic, Ferrite

* Corresponding author; E-mail; manatdeedee@gmail.com

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การควบคุมระบบความเร็วและควบคุมความปลอดภัยของรถจักรยานยนต์ที่มีขนาดความจุของกระบอกสูบตั้ง 250 CC. ขึ้นไป ในอดีตมักจะใช้ระบบเชิงกล (Mechanic) ในการควบคุม โดยจะใช้ลวดสลิงในการควบคุมระบบเบรคหรือคลัชของรถจักรยานยนต์ ซึ่งระบบดังกล่าวนี้เมื่อรถเกิดอุบัติเหตุหรือเกิดการล้มขึ้น ในบางครั้งอาจจะเกิดปัญหาที่เรียกว่าคันเร่งค้างหรือเครื่องยนต์ยังไม่หยุดการทำงานได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวนั้นถือได้ว่าเป็นอันตรายอย่างมาก ในกรณีที่รถจักรยานยนต์อาจจะพุ่งเข้าสู่บริเวณที่มีผู้คนอยู่หรือเข้าชนพาหนะคันอื่นๆ โดยที่ไม่มีผู้ขับขี่ควบคุมอยู่บนรถจักรยานยนต์ โดยในปัจจุบันการควบคุมระบบดังกล่าวในกรณีที่รถเกิดอุบัติเหตุ นั้น จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า อุปกรณ์ตัดการทำงานของเครื่องยนต์ในกรณีที่รถเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวใช้หลักการของลูกตุ้มนาฬิกา (Pendulum) ในการควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับการทำงานจำนวน 2 ตัวด้วยกัน และมีชิ้นส่วนที่มีลักษณะคล้ายลูกตุ้มถ่วงน้ำหนักอยู่ตรงกลางระหว่างเซนเซอร์ 2 ตัวนี้ โดยถ้าหากรถจักรยานยนต์เกิดการล้มหรือเอียงจนกระทั่งลูกตุ้มเคลื่อนออกจากตำแหน่ง เซนเซอร์จะทำการหยุดการทำงานของเครื่องยนต์ทันที ซึ่งในปัจจุบันชิ้นส่วนของเซนเซอร์นี้จะถูกนำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาสูง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นงานพลาสติกที่มีส่วนผสมของผงแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ เพื่อผลิตชิ้นส่วนของเซนเซอร์นี้ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวถูกแยกชิ้นส่วนออกมาดังแสดงอยู่ในภาพที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีชิ้นส่วนที่มีลักษณะคล้ายกับตุ้มถ่วงน้ำหนักอยู่ โดยชิ้นส่วนดังกล่าวนี้ นอกจากจะทำหน้าที่เหมือนลูกตุ้มถ่วงน้ำหนักแล้วยังต้องมีสถานะการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเพื่อควบคุมการทำงานของเซนเซอร์อีกด้วย



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของเซนเซอร์



ภาพที่ 2 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

ซึ่งในการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวนี้ใช้วิธีการฉีดพลาสติก (Plastic injection molding) ประเภท PA6 (Polyamide6) ซึ่งจะมีส่วนผสมของ Ferrite bonded magnet compound (FBMC) ในการผลิตชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 2 โดยวัสดุดังกล่าวนี้จะมีสถานะการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเกิดขึ้นได้ หากถูกกระตุ้นโดยการใช้แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่มีพลังงานสูงเพียงพอ

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการฉีดพลาสติกนั้นมักจะถูกใช้สำหรับการผลิตชิ้นงานที่ต้องการจำนวนมากๆ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถผลิตชิ้นงานได้ในเวลาสั้นๆ และสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ดี นอกจากนั้นยังสามารถทำการผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ ซึ่งในปัจจุบันชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์บางอย่างก็นำกระบวนการดังกล่าวมาใช้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ได้เช่น ชิ้นส่วนที่มีส่วนประกอบของแม่เหล็ก เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในการฉีดพลาสติกร่วมกับการผสมผงแม่เหล็กลงไปนั้นมักจะพบข้อจำกัดในการผลิต เช่น สมบัติของแม่เหล็กที่ลดลงเมื่อผสมร่วมกับพลาสติก (Plastic bonded magnet) เนื่องจากอัตราส่วนผสมที่จำกัดของส่วนผสมทั้งสองดังกล่าว Kim et al. (2007) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีการผสมแม่เหล็กลงไปในพลาสติกได้ทั้งแม่เหล็กถาวร (Hard magnetic) และแม่เหล็กชั่วคราว (Soft magnetic) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแม่เหล็กแบบชั่วคราวนั้นมักจะใช้กับชิ้นงานที่ต้องการสนามแม่เหล็กเป็นแบบกระแสสลับ (Alternating current) Ding-Zhou et al. (2014) เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic flux density) สูง สามารถทำให้เป็นแม่เหล็กได้ง่ายและสูญเสียพลังงานต่ำในสถานะของสนามแม่เหล็กแบบกระแสสลับ (Gakuji et al., 2007) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัสดุในกลุ่มของแม่เหล็กแบบชั่วคราวสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน ซึ่งแบบแรกก็คือวัสดุในกลุ่มของ Sintered Fe-Based alloy โดยวัสดุในกลุ่มดังกล่าวนี้จะมีการผสมส่วนผสมต่างๆ ลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของการเป็นแม่เหล็กเช่น Fe, Fe-Si, Fe-P เป็นต้น (Taghvaei et al., 2010) ซึ่งวัสดุในกลุ่มนี้มักจะใช้ในการผลิตชิ้นส่วนมอเตอร์หรืออุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า (Electromagnetic conversion component) แต่อย่างไรก็ตามวัสดุในกลุ่มนี้มักจะมีการสูญเสียพลังงานในช่วงความถี่สูงค่อนข้างมากเนื่องจากมีค่าต้านทานกระแสไฟฟ้า (Electric resistance) ต่ำ สำหรับในกลุ่มที่ 2 นั้นคือวัสดุในกลุ่มของ Ferrite เช่น NiO, Fe₂O₃, MnO, Fe₂O₃ เป็นต้น ซึ่งวัสดุในกลุ่มนี้มีค่าการต้านทานกระแสไฟฟ้าสูงกว่าวัสดุในกลุ่มแรก แต่อย่างไรก็ตามจะมีค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กต่ำกว่า ซึ่งวัสดุในกลุ่มนี้มักจะใช้ในการผลิตชิ้นส่วนวิทยุ อุปกรณ์สำหรับกรองคลื่นและสัญญาณ (Wave filter components) และอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า (Transformers) เป็นต้น

นอกจากกระบวนการผลิตชิ้นงานดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีวิธีที่เรียกว่า Micro-powder injection molding ซึ่งใช้ในการผลิตชิ้นส่วนพลาสติกที่มีการผสมแม่เหล็กลงไปในชิ้นงาน โดยวิธีการดังกล่าวคล้ายกับกระบวนการฉีดพลาสติกแบบทั่วไปแต่จะเป็นการผสมระหว่างการฉีดพลาสติกและการขึ้นรูปโลหะผง Im et al. (2015) โดยวิธีการดังกล่าวมีขั้นตอนหลักๆอยู่ 4 ขั้นตอนด้วยกันคือ การเตรียมวัตถุดิบ การฉีดพลาสติก การกำจัดวัสดุประสาน (Debinding process) และขึ้นรูปโลหะผง (Sintering process) Zhiyuan et al. (2017) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้สามารถผลิตชิ้นงานรูปทรงซับซ้อนได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของกระบวนการที่มีหลายขั้นตอน

สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการฉีดพลาสติกในการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้พลาสติก PA6 ซึ่งมีส่วนผสมของเฟอร์ไรท์ 85% ในการผลิตชิ้นงาน โดยจะมีการฝังอุปกรณ์กำเนิดสนามแม่เหล็กไว้ภายในแม่พิมพ์เพื่อกระตุ้นให้ชิ้นงานเกิดสถานะความเป็นแม่เหล็กขึ้นทันทีภายหลังจากเสร็จสิ้นการฉีดพลาสติก

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แรงแม่เหล็ก (Magnetic force, F_M)

แรงแม่เหล็กเป็นแรงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเช่นเดียวกับแรงโน้มถ่วง แรงทางไฟฟ้าหรือ แรงนิวเคลียร์ การคำนวณหาแรงแม่เหล็กสามารถใช้กฎของคูลอมบ์ (Coulomb) หรือกฎแรงดึงดูด ระหว่างมวลของนิวตันมาประยุกต์อธิบายได้ นั่นคือ

$$F_E = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (2)$$

$$F_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (3)$$

เมื่อ

F_E (แรงทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็น นิวตัน)

q_1, q_2 (ประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น คูลอมบ์)

r (ระยะทาง มีหน่วยเป็น เมตร)

k (ค่าคงตัวของคูลอมบ์ของสุญญากาศ มีค่า $9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$)

ϵ (สภาพยอมรับได้ของสุญญากาศ Permittivity of free space)

ดังนั้นเมื่อใช้กฎของคูลอมบ์ จึงสามารถอธิบายแรงของแม่เหล็กได้ คือ

$$F_M = \mu \frac{p_1 p_2}{r^2} \quad (4)$$

เมื่อ

F_M (แรงทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็น นิวตัน)

p_1, p_2 (ประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น คูลอมบ์)

r (ระยะทาง มีหน่วยเป็น เมตร)

μ (ค่าคงตัวของสภาพยอมให้สนามแม่เหล็กซึมได้เชิงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อแอมแปร์-เมตร (Wb/A-m) หรือเฮนรีต่อเมตร (H/m) หรือ นิวตันต่อแอมแปร์ยกกำลังสอง (N/A²)

ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)

ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B) คือ อัตราส่วนของปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่ของวัสดุที่ฟลักซ์นั้นไหลผ่านดังแสดงในสมการ

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (5)$$

เมื่อ

B (ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตรหรือ Tesla)

Φ (เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์)

A (พื้นที่ มีหน่วยเป็นตารางเมตร)

โดยที่ $1 \text{ Wb/m}^2 = 1 \text{ Tesla} = 10,000 \text{ Gauss}$

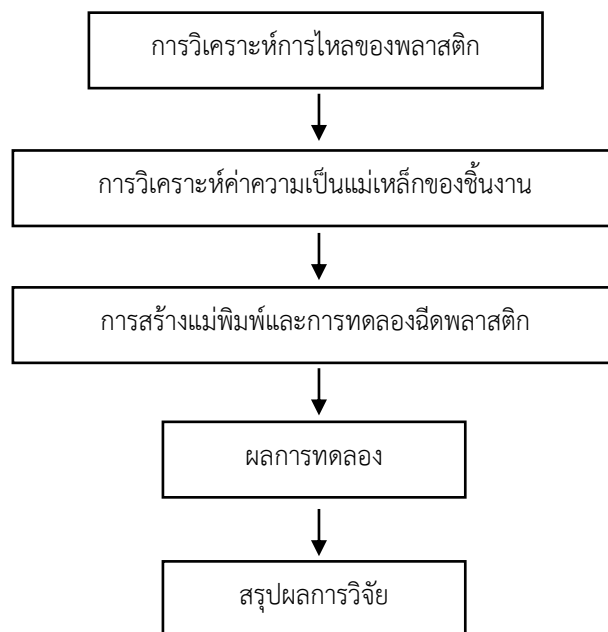
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการที่จะศึกษาปัจจัยต่างๆ ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับชิ้นงานที่เกิดการเหนียวแม่เหล็กภายในแม่พิมพ์เช่น ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับเบ้าแม่พิมพ์ เจือปนในการฉีดพลาสติกเป็นต้น โดยรูปแบบของการออกแบบแม่พิมพ์ในงานวิจัยชิ้นนี้นั้นจะเป็นแม่พิมพ์แบบ 2 แผ่น (Two Plates injection mold) ที่จะมีการฝังแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายในแม่พิมพ์เพื่อลดขั้นตอนในการนำชิ้นงานออกมาสร้างสนามแม่เหล็กภายนอก

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัย

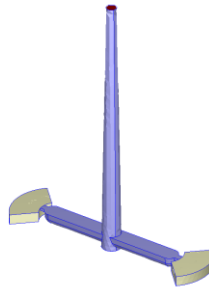
ในการดำเนินการวิจัยนี้มีขั้นตอนในการวิจัยดังนี้ (ดังแสดงในภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

การวิเคราะห์การไหลของพลาสติก

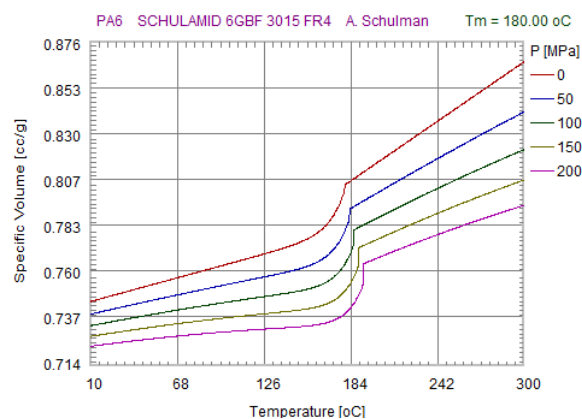
ในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นจะใช้วิธีการออกแบบและวิเคราะห์การไหลของพลาสติกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนทำการผลิตแม่พิมพ์จริง เพื่อจำลองลักษณะการไหลของพลาสติก โดยในการออกแบบนั้นจะกำหนดจำนวนควิตี้ (Cavity number) ระบบทางวิ่งและทางเข้า (Runner and gate system) ให้เหมาะสมกับขนาดและปริมาณการผลิตของชิ้นงาน ซึ่งในการกำหนดจำนวนของเบ้าพิมพ์ในการผลิตแม่พิมพ์นั้นจะกำหนดให้มีจำนวนเท่ากับ 2 ควิตี้ ทางเข้าของเนื้อพลาสติก (Gate) นั้นจะกำหนดให้เป็นทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular) โดยจะกำหนดตำแหน่งทางเข้าไว้บริเวณผิวบนของชิ้นงาน ขนาดของทางเข้าจะมีขนาดเท่ากับ 1.0 มม. สำหรับทางวิ่งหลักจะออกแบบให้เป็นทางวิ่งแบบที่เรียกว่า U Shape ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แบบจำลองระบบทางวิ่งและทางเข้าของพลาสติก

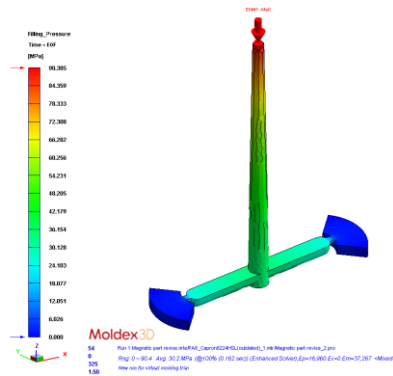
เมื่อทำการออกแบบระบบดังกล่าวเรียบร้อยแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการกำหนดค่าเงื่อนไขต่างในการผลิตภายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยค่าที่กำหนดบางส่วนนั้นมีดังนี้

- ขนาดของเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ = 50 ตัน
- อุณหภูมิหลอมละลาย (Melt temperature) = 260 °C
- เวลาที่ใช้ในการเติมเนื้อพลาสติก (Filling time) = 1.6 วินาที
- เวลาที่ใช้ในการคงความดัน (Packing time) = 5.3 วินาที

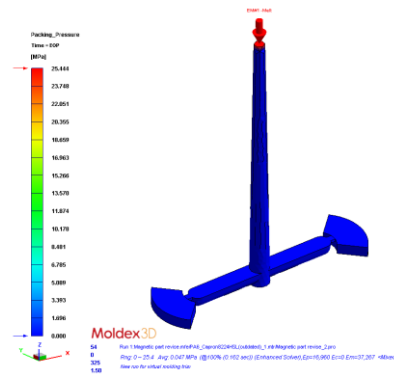


ภาพที่ 5 PVT - diagram ของพลาสติกชนิด PA6 เกรด SCHULAMID 6GBF 3015 FR4

เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขในการฉีดพลาสติกเรียบร้อยแล้วนั้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกในช่วงของการเติมเนื้อพลาสติก (Filling melt front time) ดังแสดงในภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ระบบทางวิ่งสามารถเติมเต็มพลาสติกเหลวเข้าไปภายในเบ้าพิมพ์ได้ในเวลาที่ใกล้เคียงกันทั้ง 2 คาวิตี โดยจะใช้เวลาประมาณ 1.8 วินาที

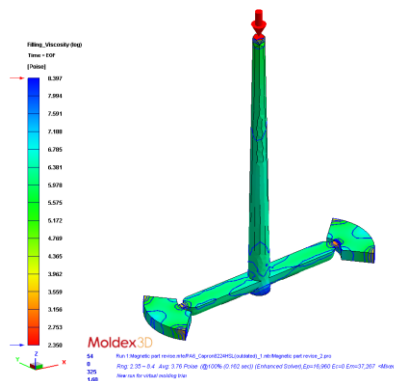


ภาพที่ 6 Filling melt front time



ภาพที่ 7 Packing pressure

ในช่วงของการคงความดันภายในเบ้าพิมพ์ (Packing time) นั้น จะใช้เวลาประมาณ 14.6 วินาทีและความดันภายในเบ้าพิมพ์นั้นประมาณ 22.3 MPa ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดันภายในเบ้าพิมพ์นั้นใกล้เคียงกันทั้ง 2 คาวิตี ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีขนาดและรูปทรงเหมือนกันไม่มีการบิดตัวหรือเสียรูปมากนัก นอกจากนั้นในช่วงของการหล่อเย็นชิ้นงาน (Cooling time) จะใช้เวลาประมาณ 12.0 วินาที สำหรับแบบจำลองการกระจายตัวของผงเฟอร์ไรท์ภายในชิ้นงานนั้นถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าบริเวณทางเข้าของน้ำพลาสติกนั้นจะมีผงเฟอร์ไรท์อยู่ในปริมาณมากกว่าบริเวณอื่นๆ เนื่องจากเป็นส่วนที่แคบที่สุดของชิ้นงาน แต่ที่บริเวณชิ้นงานนั้นจะมีการกระจายของผงเฟอร์ไรท์ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 8 การกระจายตัวของผงเฟอร์ไรท์

การวิเคราะห์ค่าความเป็นแม่เหล็กของชิ้นงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

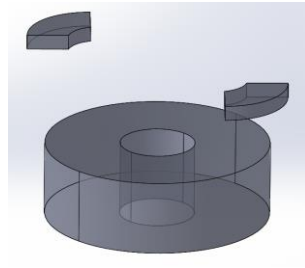
ในการวิเคราะห์สภาพความเป็นแม่เหล็กของชิ้นงานนั้นจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาสภาพความเป็นแม่เหล็กหลังจากการฉีดพลาสติกเข้าไปในเบ้าของแม่พิมพ์ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กถึงงานสูงกับชิ้นงานโดยจะมีทั้งหมด 3 ระยะด้วยกันคือ 10, 15 และ 20 มม.

โดยการกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์นั้นจะทำการกำหนดให้แม่เหล็กถึงงานสูงนั้นเป็นวัสดุประเภท Permanent magnet ซึ่งจะมีคุณสมบัติเบื้องต้นดังนี้

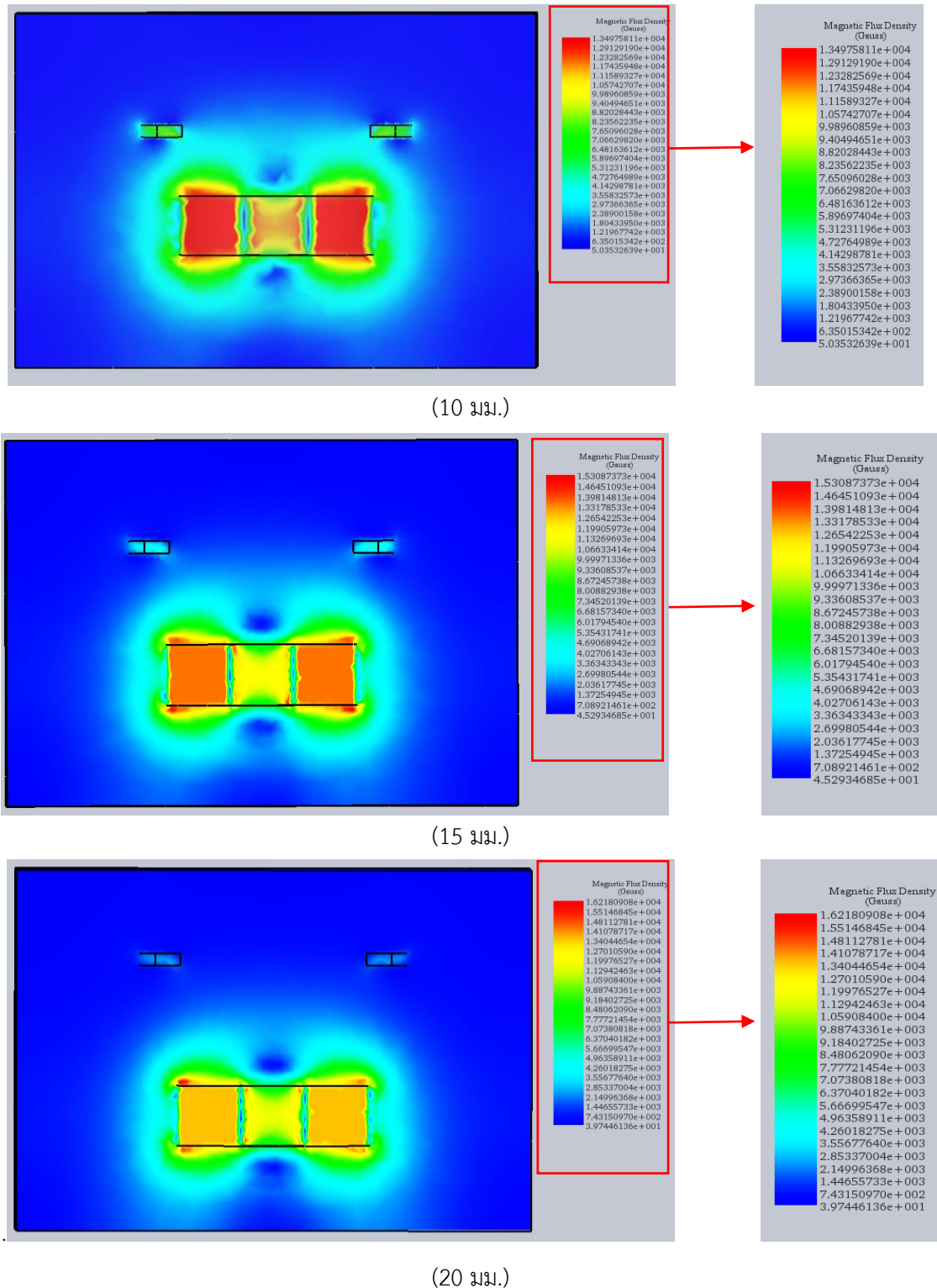
- Relative permeability = 1.20536
- Coercivity (A/m) = 891268
- Remanence (Tesla) = 1.35

สำหรับชิ้นงานนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นวัสดุประเภท Ferromagnetic โดยแบบจำลองของการวิเคราะห์นั้นถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 9

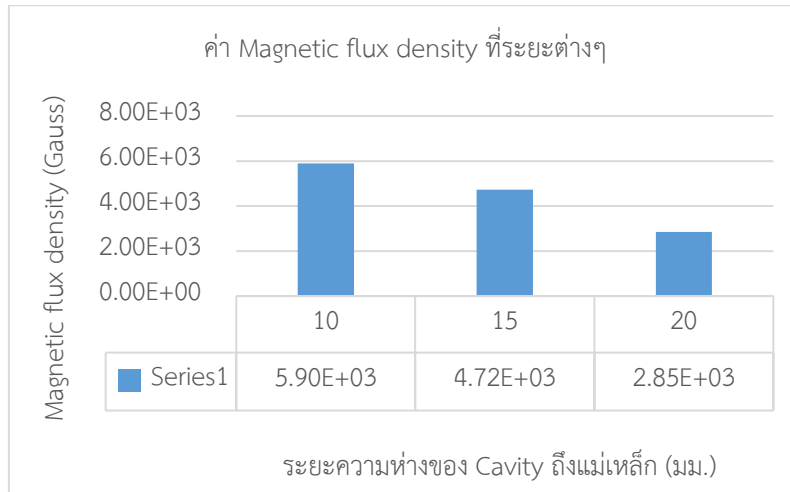


ภาพที่ 9 แบบจำลองของชิ้นงานและแม่เหล็ก

จากผลการวิเคราะห์ค่า Magnetic flux density ดังแสดงในภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับชิ้นงานนั้นมีผลโดยตรงต่อค่า Magnetic flux density ของชิ้นงานโดยระยะ 10 มม. นั้นจะทำให้ชิ้นงานเกิดค่า Magnetic flux density ที่มากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.90×10^3 Gauss



ภาพที่ 10 ผลวิเคราะห์ค่า Magnetic flux density



ภาพที่ 11 ผลวิเคราะห์ค่า Magnetic flux density ของชิ้นงาน

การสร้างแม่พิมพ์และการทดลองฉีดพลาสติก

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองฉีดสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้นั้นจะเป็นแม่พิมพ์แบบ 2 แผ่น เนื่องจากลักษณะของชิ้นงานนั้นไม่มีความซับซ้อนและไม่มีส่วนที่ขวางทิศทางการปลด (Undercut) โดยในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้นั้น จะแตกต่างจากแม่พิมพ์แบบทั่วไปตรงที่จะต้องมีการออกแบบตำแหน่งที่จะฝังแม่เหล็กพลังงานสูงเพื่อจะทำการสร้างกระแสนามแม่เหล็กให้แก่ชิ้นงานพลาสติก โดยแม่เหล็กที่ใช้ในนั้นเป็นรูปทรงแบบทรงกระบอกและมีรูตรงกลางขนาด $\varnothing$ นอก 80 มม. และ $\varnothing$ ใน 30 มม. ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งแม่เหล็กดังกล่าวนี้เป็นแม่เหล็กแบบถาวรประเภท Hard magnetic



ภาพที่ 12 การประกอบแม่เหล็กเข้ากับแม่พิมพ์ฝังควิต

ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉีดชิ้นงานนั้น จำเป็นที่จะต้องเลือกวัสดุทำแม่พิมพ์บริเวณเข้า (Cavity) ที่ชิ้นงานไม่สามารถถอดได้ภายหลังจากการฉีดพลาสติก เนื่องจากชิ้นงานที่ได้จะมีสถานะเป็นแม่เหล็กทันทีที่ภายหลังจากการฉีดพลาสติกซึ่งจะมีปัญหาต่อการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ สำหรับวัสดุที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ดังกล่าวนี้จะเลือกใช้วัสดุประเภททองเหลืองเกรด BC6C ซึ่งจะเป็ทองเหลืองที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ได้ดังแสดงในภาพที่ 12

โดยในการทดลองฉีดพลาสติกนั้นจะใช้เครื่องฉีดพลาสติกยี่ห้อ BOY ซึ่งจะมีขนาดแรงอัดแม่พิมพ์ 20 ตัน วัสดุที่ใช้ในการฉีดพลาสติกจะเป็นพลาสติกเกรด PA6 ของบริษัท MATE Co., Ltd ซึ่งจะมีส่วนผสมของผง Ferrite bonded magnet compound 85% ในการทดลองฉีดพลาสติกครั้งที่ 1 จะใช้เงื่อนไขในการฉีดพลาสติก (Plastic injection condition) ตามที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรมฉีดพลาสติก



ภาพที่ 13 เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

จากผลการทดลองฉีดพลาสติกครั้งที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 14 ชิ้นงานที่ได้นั้น พบปัญหาการฉีดไม่เต็ม (Short shot) ที่บริเวณส่วนปลายของชิ้นงาน เนื่องจากเวลาที่อยู่ในช่วงของการเติมเต็มเนื้อพลาสติก (Filling Stage) นั้นมีค่าน้อยเกินไปและความเร็วในการฉีดมากเกินไป ทำให้พลาสติกไหลไปที่ส่วนปลายของชิ้นงานก่อน ดังนั้นในการทดลองครั้งที่ 2 จึงเพิ่มเวลาในส่วนดังกล่าวเพิ่มขึ้นและลดความเร็วในการฉีดลง จึงสามารถทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความสมบูรณ์มากขึ้น นอกจากนั้นยังทำการเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ขึ้นจาก 80 °C เป็น 90 °C เพื่อลดปัญหาการเกิดตำหนิที่ผิวหน้าชิ้นงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการไหลของพลาสติกให้ดีขึ้น



ภาพที่ 14 ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองฉีดครั้งที่ 1



ภาพที่ 15 ชิ้นงานและระบบทางวิ่ง

โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองครั้งที่ 3 นั้น สามารถทำการผลิตชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์โดยสามารถเติมเต็มเนื้อพลาสติกไหลเข้าไปในเบ้าพิมพ์ทั้ง 2 คาวิตี้ได้ดังแสดงในภาพที่ 15 หลังจากนั้นจึงทำการทดลองเพิ่มระยะเวลาในการเปิดแม่พิมพ์เพื่อเป็นการทดสอบการเกิดสภาวะความเป็นแม่เหล็กของชิ้นงานในระยะเวลาที่ต่างกัน โดยจะเพิ่มครั้งละ 5 วินาที ตามที่แสดงตารางที่ 1 และทำการฉีดชิ้นงานตามเงื่อนไขอย่างละ 20 ชิ้น

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบเงื่อนไขในการฉีดพลาสติก

เงื่อนไขในการฉีดพลาสติก	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
1. Filling time (sec)	2.2	3.0	3.0	3.0	3.0
2. Packing time (sec)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
3. Cooling time (sec)	8.0	8.0	12.0	12.0	12.0
4. Mold temperature (°C)	80	80	90	90	90
5. Injection pressure (bars)	80	75	75	75	75
6. Mold open time (sec)	5.0	5.0	5.0	10.0	15.0
7. Total cycle time (sec)	25.2	26.0	30.0	35.0	40.0

ผลการวิจัย

ในการวัดค่า Magnetic flux density ของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองฉีดนั้น จะใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า Gauss/Tesla Meter ดังแสดงในภาพที่ 16 โดยจะทำการวัดจากชิ้นงานตามเงื่อนไขในการฉีดแบบที่ 3 ทั้งหมด 10 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่า Magnetic flux density ที่ได้จากทดลอง ในการวัดค่าที่ชิ้นงานนั้นจะกำหนดระยะห่างระหว่างเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ (Probe) กับชิ้นงานที่เท่ากันทุกชิ้นคือ 10 มม. ดังแสดงในภาพที่ 17

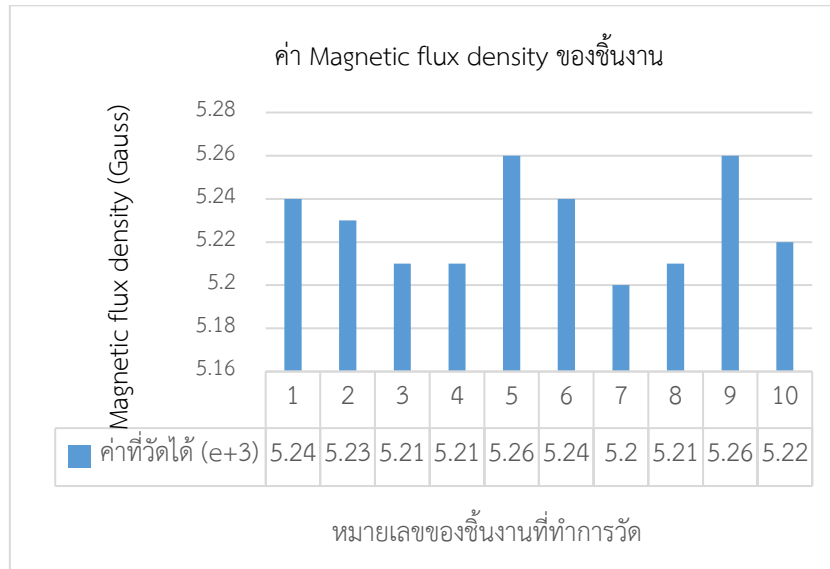


ภาพที่ 16 เครื่องวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



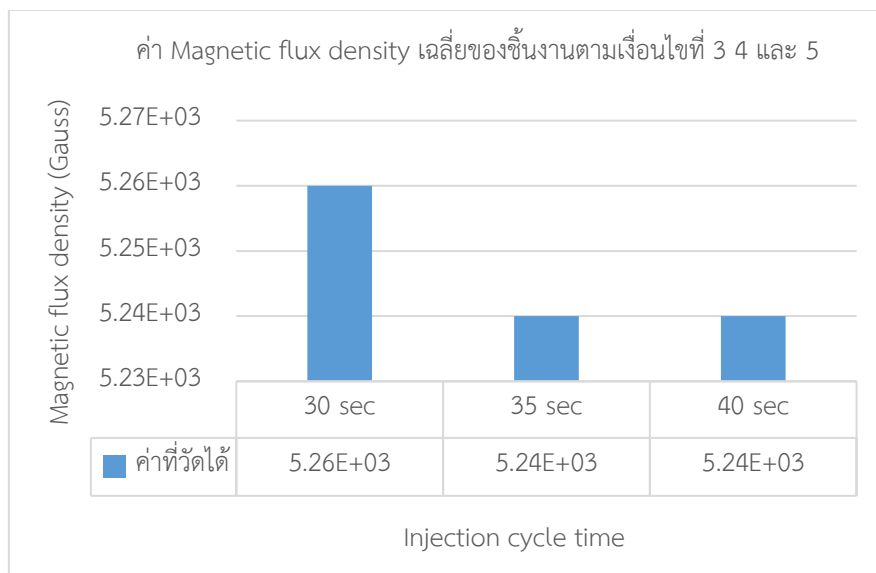
ภาพที่ 17 การวัดค่าที่ชิ้นงาน

จากผลการวัดค่า Magnetic flux density ด้วยเครื่อง Gauss/Tesla Meter นั้นค่าสูงสุดที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับ 5.26×10^3 Gauss และค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 5.21×10^3 Gauss โดยค่า Magnetic flux density เฉลี่ยของชิ้นงานทั้งหมดเท่ากับ 5.23×10^3 Gauss ซึ่งจะน้อยกว่าค่าที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณได้ประมาณ 0.63×10^3 Gauss ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ค่า Magnetic flux density ของชิ้นงานในเงื่อนไขการฉีดแบบที่ 3

หลังจากนั้นจึงทำการวัดค่า Magnetic flux density ของชิ้นงานจากเงื่อนไขการฉีดที่ 3, 4 และ 5 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของการเกิดสภาวะความเป็นแม่เหล็กของชิ้นงานตามเงื่อนไขของระยะเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าที่ได้ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 19 โดยจะเป็นค่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่วัดได้ทั้งหมดตามเงื่อนไขอย่างละ 10 ชิ้น



ภาพที่ 19 ค่า Magnetic flux density ของชิ้นงานในเงื่อนไขการฉีดแบบที่ 3 4 และ 5

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มระยะเวลาให้ชิ้นงานอยู่ในแม่พิมพ์นานขึ้นนั้น ไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดสภาวะความเป็นแม่เหล็กของชิ้นงานมากนัก โดยจะมีค่า Magnetic flux density แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

การศึกษาและวิจัยกระบวนการสร้างแม่พิมพ์และเงื่อนไขในการผลิตสำหรับการฉีดขึ้นงานด้วยพลาสติกพอลิเอไมด์ที่มีส่วนผสมของผงแม่เหล็กเฟอร์ไรต์นั้น ก็เพื่อต้องการพัฒนาวิธีการสร้างชิ้นงานพลาสติกที่มีคุณสมบัติทางด้านแม่เหล็กภายในชิ้นงาน ซึ่งการผลิตขึ้นงานดังกล่าวนี้จะแตกต่างจากการฉีดพลาสติกแบบทั่วไป โดยเมื่อพิจารณาจากผลของการทดลองนั้นสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับชิ้นงานภายในแม่พิมพ์นั้น ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดสภาวะความเป็นแม่เหล็กของชิ้นงาน โดยชิ้นงานจะเกิดสภาวะความเป็นแม่เหล็กได้ง่ายกว่าเมื่ออยู่ใกล้กับแม่เหล็ก ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดของการออกแบบแม่พิมพ์ด้วย ซึ่งจะไม่สามารถออกแบบให้แม่เหล็กอยู่ใกล้กับชิ้นงานได้มากเกินไป เนื่องจากจะส่งผลต่อความแข็งแรงของแม่พิมพ์

2. วัสดุที่เลือกใช้ในการผลิตแม่พิมพ์นั้นจะแตกต่างจากแม่พิมพ์ทั่วไป ซึ่งจะต้องเลือกใช้วัสดุประเภทโลหะ เช่น ทองเหลืองหรือสแตนเลส ในการผลิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของเบ้าแม่พิมพ์ เนื่องจากจะส่งผลต่อการที่ชิ้นงานติดกับแม่พิมพ์ในขณะทำการปลดชิ้นงาน

3. ในการเกิดสภาวะความเป็นแม่เหล็กของชิ้นงานนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติของชิ้นงาน เช่น ค่า Permeability เป็นต้น ซึ่งเมื่อชิ้นงานเกิดสภาวะความเป็นแม่เหล็กเรียบร้อยแล้วนั้น การเพิ่มระยะเวลาให้ชิ้นงานอยู่ในแม่พิมพ์นานขึ้นนั้น ไม่ส่งผลต่อค่า Magnetic flux density ของชิ้นงานมากนัก

อภิปรายผล

วัตถุประสงค์ในการศึกษาวิธีการสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับ PA6 ที่มีส่วนผสมของผงแม่เหล็กเฟอร์ไรต์และเงื่อนไขที่สำคัญในการฉีดพลาสติกนั้น ต้องการที่จะศึกษาถึงขั้นตอนต่างๆ ในการทำแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ที่เหมาะสม การตั้งค่าเงื่อนไขในการฉีดและผลที่ได้ ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการฉีดพลาสติกนั้นจะแตกต่างจากพลาสติกแบบทั่วไป โดยในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ในการผลิตขึ้นงานมากขึ้น

ในการทดลองนั้นจะเริ่มจากการออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์ที่เหมาะสม จากนั้นจึงนำแบบแม่พิมพ์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยในการกำหนดระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมนั้นจะใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการวิเคราะห์ถึงค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ชิ้นงานอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นจึงทำการสร้างแม่พิมพ์และทำการทดลองฉีด โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กกับชิ้นงานนั้นส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ชิ้นงาน โดยระยะที่ใกล้จะทำให้ชิ้นงานมีค่าสูงกว่าแต่ในขณะเดียวกันในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นก็ต้องคำนึงถึงค่าความแข็งแรงของแม่พิมพ์ด้วยซึ่งไม่สามารถทำการกำหนดระยะห่างให้ใกล้กับเบ้าของแม่พิมพ์เกินไปได้ สำหรับในส่วน of วัสดุทำแม่พิมพ์นั้นในการศึกษาพบว่าจำเป็นต้องใช้วัสดุที่แม่เหล็กไม่สามารถดูดติดได้เนื่องจากจะทำให้เกิดปัญหาในขณะทำการปลดชิ้นงาน

ซึ่งในการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ชิ้นงานนั้น ทางผู้วิจัยได้ใช้การตรวจสอบแบบ Gauss/Tesla Meter ที่นิยมใช้สำหรับการวัดค่าดังกล่าวในอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการมาใช้ในการตรวจสอบ

ซึ่งพบว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และแม่พิมพ์ที่ทำการออกแบบนั้นสามารถทำการผลิตขึ้นงานได้จริง

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

1.1 การเลือกใช้วัสดุประเภทที่แม่เหล็กไม่สามารถดูดติดได้มาทำชิ้นส่วนแม่พิมพ์นั้น ต้องคำนึงถึงค่าความแข็งแรงของวัสดุประเภทนั้นๆ ด้วย เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ววัสดุประเภทดังกล่าวจะมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าเหล็กทำแม่พิมพ์

1.2 ในการนำงานวิจัยไปผลิตจริงควรจะออกแบบแม่พิมพ์ให้สามารถซ่อมบำรุงได้ง่าย เนื่องจากวัสดุที่ผสมผงแม่เหล็กเพื่อไรท์ลงไปในนั้น มีแนวโน้มที่จะทำให้ชิ้นส่วนแม่พิมพ์เสียหายได้เร็วกว่าปกติ

2. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

2.1 ควรมีการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กับการเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็ก

2.2 ควรมีการศึกษาถึงชิ้นงานรูปแบบอื่นๆ เช่น ชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Ding-Zhou, X., Kuan-Hong, L. and Shun-Tian, L. (2014). Effects of Processed Parameters on The Magnetic Performance of a Powder Magnetic Core. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 353, 34-40.
- Gakuji, U., Muneaki, W., Ryoji, N., Kazunori, I. and Koichiro, M. (2007). Properties of Soft Magnetic Composite with Evaporated MgO Insulation Coating for Low Iron Loss. *Mater. Sci. Forum*, 534-536, 1361-1364.
- Taghvaei, A., Ebrahimi, A., Gheisari, K. and Janghorban, K. (2010). Analysis of The Magnetic Loss in Iron-Based Soft Magnetic Composites with MgO Insulation Produced by Sol-Gel Method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322 (23), 3748-3754.
- Kim, Y., Jang, D., Seok, H. and Kima, K. (2007). Fabrication of Fe-Si-B Based Amorphous Powder Cores by Col Pressing and Their Magnetic Properties. *Mater. Sci. Eng. A*, 449-451, 389-393.
- Im, D.J., Jang, M.P., Tae, G.K., See, J.K. and Seong, J.P. (2015). Magneto-Rheological Model for Computational Analysis of Magnetic Micro Powder Injection Molding. *Computational Materials Science*, 100, 39-44.
- Zhiyuan, S., Mingli, Q., Rui, L., Jidong, M., Fei, F., Huifeng, L. and Xuanhui, Q. (2017) Preparation of High Performance Soft Magnetic Alloy Fe-4Si-0.8P by Metal Injection Molding. *Advanced Powder Technology*, 28, 2687-2693.