

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง และค่าความเข้มของสีบนชิ้นงานพลาสติกโดยใช้วิธีทาгуชิ

มนัส เจริญกิจ^{1,*}, วัชร ลายลักษณ์², วรณา รอดภัย³, สถาพร ขาตาม⁴

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Received: 22 January 2022

Revised: 10 November 2022

Accepted: 10 November 2022

บทคัดย่อ

การฉีดพลาสติกที่มีส่วนผสมของเส้นใยเสริมแรงนั้นมักจะถูกใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงและใช้ทดแทนชิ้นงานที่ผลิตจากโลหะในบางครั้ง แต่ในการผลิตชิ้นงานดังกล่าวนี้มักจะประสบปัญหาในการผลิตเช่นคุณภาพของผิวชิ้นงานไม่ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากคุณสมบัติของพลาสติก การเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานและการตั้งค่าเงื่อนไขในการฉีดที่ไม่เหมาะสม ในงานวิจัยชิ้นนี้นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ในการฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ได้ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาгуชิ โดยมีปัจจัย 3 ปัจจัยด้วยกันคือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์และความดันฉีด พลาสติกที่ใช้คือ Polyamide การแสดงผลการเรียงตัวของไฟเบอร์นั้นจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ผลค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานและการวัดค่าความเข้มของสีนั้นจะใช้วิธีการ Colorimeter เพื่อแสดงค่าความเข้มสีที่ได้ จากผลการทดลองนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยเสริมแรงและค่าความเข้มสีมากที่สุดนั้น คือ ความดันฉีดพลาสติกและอุณหภูมิแม่พิมพ์ตามลำดับ ผลการทดลองวิเคราะห์ค่าการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงและค่าความเข้มสีภายหลังจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทาгуชินั้นเท่ากับ 75.62% และ 23.12

คำสำคัญ: เส้นใยเสริมแรง การฉีดพลาสติก ความเข้มของสี วิธีทาгуชิ

* ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: manat.h@cit.kmutnb.ac.th

Effects of temperature and pressure to fiber orientation and color intensity of plastic part by using Taguchi method

Manat Hearunyakij^{1,*}, Vatchara Layluk², Wanna Rodpai³, Sathaporn Chatakorn⁴

^{1,2,3,4}Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Received: 22 January 2022

Revised: 10 November 2022

Accepted: 10 November 2022

Abstract

Plastic injection parts with fiber reinforce always use for applications of high-strength injection parts and sometimes for replacement of metal parts. However, part surface problems were concerned due to limitations of material property, fiber orientation in plastic parts, and improper injection conditions. This research aimed to study the process parameters that affected fiber orientation and color intensity of plastic parts. Taguchi method was applied for the design of experiment (DOE) to analyze the results of average fiber length and color intensity for the injection part. The main parameters which were melt temperature, mold temperature, and injection pressure were investigated as injection condition settings in DOE. Plastic flow analysis software was used for the investigation of average fiber length and colorimeter equipment was used for color intensity indicating. From the results, the parameters that affected highly to average fiber length and color intensity were injection pressure and mold temperature respectively. The average fiber length and color intensity results after improvement with the Taguchi method were 75.62% and 23.12 respectively.

Keywords: Fiber Reinforced, Plastic Injection, Color Intensity, Taguchi Method

* Corresponding Author; E-mail: manat.h@cit.kmutnb.ac.th

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในกระบวนการฉีดพลาสติกที่มีการผสมเส้นใยเสริมแรง (Fiber reinforced) นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงของพลาสติกและใช้ทดแทนชิ้นส่วนโลหะในอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งข้อดีของการผลิตชิ้นงานจากวัสดุดังกล่าวนี้ก็คือ ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงกว่าพลาสติกทั่วไปและมีน้ำหนักเบากว่าโลหะ ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ดี โดยในปัจจุบันได้มีการใช้ในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภทเช่น การผลิตรถยนต์ การผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและชิ้นส่วนอากาศยาน (Li et al., 2017) เป็นต้น พลาสติกที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีส่วนผสมของเส้นใยเสริมแรงนั้นเช่น Polyamide (PA) Polyoxymethylene (POM) และ Polypropylene (PP) โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและทดลองผลิตเส้นใยเสริมแรงหลากหลายประเภททั้งในส่วน of เส้นใยสังเคราะห์เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fiber reinforcement) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) (Kausar, 2019) หรือเส้นใยจากธรรมชาติเช่น เส้นใยกัญชง (Hemp fiber) (Antoine et al., 2020) แต่อย่างไรก็ตามการผลิตชิ้นงานจากวัสดุดังกล่าวนี้ มักประสบกับปัญหาการบิดตัวของชิ้นงาน การเกิดรอยแตกบนชิ้นงาน (Tanaka et al., 2014) ปัญหาผิวชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ (Wang et al., 2013) รวมถึงปัญหาการเกิดรอยเงาและความเข้มของสีที่ไม่เท่ากันบนผิวชิ้นงาน (Gloss transition and color intensity defect) (Gim et al., 2020) ซึ่งปัญหาดังกล่าวนั้น มักจะเกิดจากการออกแบบแม่พิมพ์ที่ไม่ได้คุณภาพหรือการตั้งค่าเงื่อนไขในการฉีดเช่น อุณหภูมิของพลาสติกเหลว (Melt temperature) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold temperature) และความเร็วในการฉีด (Flow front speed) ที่ไม่เหมาะสม (Chacinski and Sutowski, 2021) ซึ่งการแก้ไขปัญหาผิวชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพนั้นอาจต้องแก้ไขด้วยการพ่นสี (Painting) หรือการชุบ (Coating) ซึ่งจะเป็นการเพิ่มต้นทุนและระยะเวลาเป็นอย่างมาก

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดในการใช้เครื่องมือทางสถิติ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกเข้ามาช่วยในการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันที่ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยและความเข้มของสีบนผิวชิ้นงานที่ได้ โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองคือชิ้นส่วนโครงหลังคาของรถกระบะที่ผลิตจากพลาสติกประเภท PA ที่มีส่วนผสมของเส้นใยเสริมแรง 30%

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความดันที่ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง (Fiber orientation)
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความดันที่ส่งผลต่อความเข้มของสี (Color intensity) บนชิ้นงานฉีดพลาสติก
3. เพื่อพัฒนาวิธีการใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหลของพลาสติกร่วมกับวิธีการทางสถิติในการวิเคราะห์การฉีดพลาสติกที่มีส่วนผสมของเส้นใยเสริมแรง

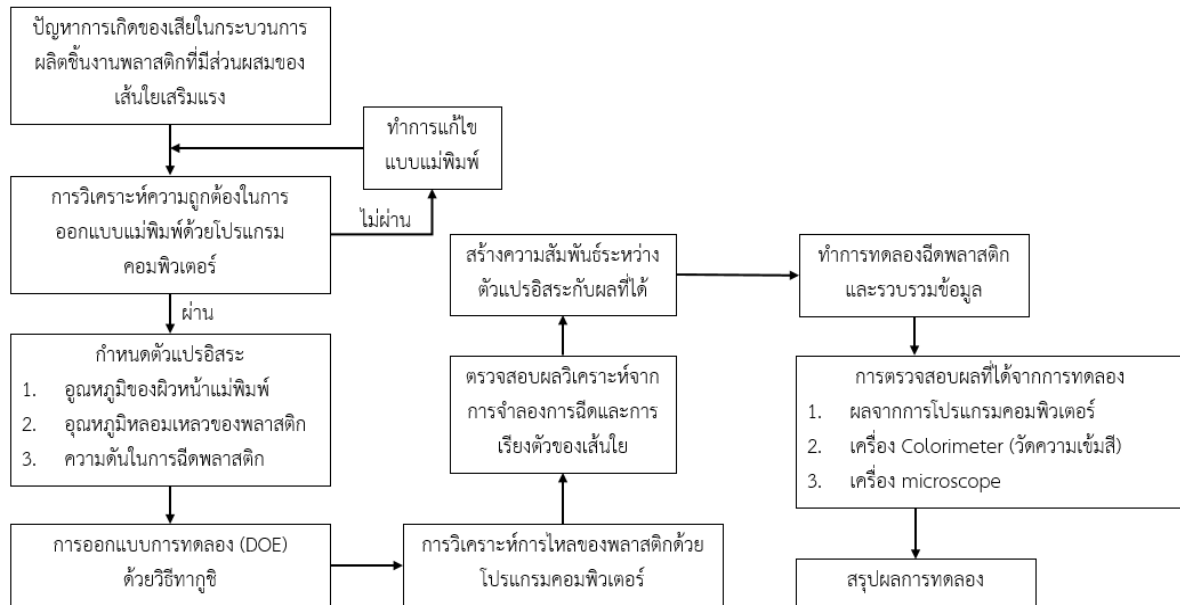
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาเงื่อนไขในการฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานพลาสติกนั้น ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิที่ผิวหน้าแม่พิมพ์ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของชิ้นงานพลาสติกประเภท HDPE ชิ้นงานถูกทดลองฉีดด้วยอุณหภูมิผิวหน้าแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันออกไปและนำไปทดสอบค่า

คุณสมบัติเชิงกล ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน (Karagoz and Tuna, 2021) เจื่อนไขในการฉีดพลาสติกเช่น อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันได้ถูกทดลองเพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานพลาสติกประเภท PP และวิธีทาคุชิ (Taguchi method) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงการเรียงตัวของเส้นใย ในการวิจัยนั้นได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์การไหลของพลาสติก จากผลที่ได้ทำให้ทราบว่าเวลาที่ใช้ในการเติมเต็ม ความดันและความเร็วในการฉีดนั้น ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงอย่างมีนัยสำคัญ (Li et al., 2017) ได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลของการไหลของพลาสติกที่ส่งผลต่อการเรียงตัวของไฟเบอร์และคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพลาสติก (Huang et al., 2021) แม่พิมพ์ที่ใช้ฉีดชิ้นงานจะถูกออกแบบให้มีทางเข้าของน้ำพลาสติก (Gate) ที่แตกต่างกันและชิ้นงานจากการทดลองถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าพลาสติกที่มีส่วนผสมของเส้นใยมีคุณสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นและรูปแบบการไหลของพลาสติกส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และเครื่องมือทางสถิติเข้ามาช่วยเพื่อวิเคราะห์และศึกษาปัญหาจากการฉีดพลาสติก โปรแกรม Moldex3D ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การเรียงตัวของเส้นใย โดยทำการเปรียบเทียบจากการสร้าง Mesh ที่แตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริง (Foss et al., 2014) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังได้เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การเรียงตัวของเส้นใยในงานฉีดแบบหลายวัสดุ (Huang et al., 2020) ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการเรียงตัวของเส้นใยที่ใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นอกจากการศึกษเกี่ยวกับผลของการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานแล้วนั้น ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบดังกล่าวต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน (Roo et al., 2022) โดยศึกษากับพลาสติกประเภท PA และ PBT ที่มีส่วนผสมของเส้นใย 30% ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเรียงตัวของเส้นใยนั้นส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและความหยาบผิวของชิ้นงาน อุณหภูมิที่ผิวหน้าแม่พิมพ์และการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงได้ถูกศึกษาถึงผลกระทบต่อคุณภาพผิวที่ได้ของชิ้นงาน เช่น รอยเชื่อมชน ความหยาบผิวและความแตกต่างของสีบนผิวชิ้นงานพลาสติก (Wang et al., 2013) โดยอุณหภูมิที่ผิวหน้าแม่พิมพ์นั้นจะส่งผลโดยตรงต่อความหยาบผิวและความเข้มสีบนผิวของชิ้นงาน จากงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น การศึกษาการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงมักจะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาสมบัติเชิงกล ซึ่งยังขาดการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบดังกล่าวต่อคุณภาพอื่นๆ ของชิ้นงาน

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การกำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1 จะศึกษาตัวแปรอิสระ 3 ตัวคือ อุณหภูมิของผิวหน้าแม่พิมพ์ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกและความดัน ที่ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานพลาสติก ในการออกแบบการทดลองนั้นจะใช้วิธีการทางสถิติที่เรียกว่าวิธีทากูชิ เพื่อลดขั้นตอนและระยะเวลาในการทดลอง ในการจำลองพฤติกรรมของการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงและเงื่อนไขในการฉีดจากวิธีทากูชินั้น จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในแสดงผลและนำค่าที่ดีที่สุดไปทำการทดลองฉีดจริง การตรวจสอบชิ้นงานจะใช้เครื่องวัดค่าความเข้มสีและกล้องจุลทรรศน์เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบการทดลอง

ในการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองผลการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงและการทดลองฉีดพลาสติกเพื่อวัดค่าความเข้มของสีนั้นจะใช้วิธีการทากูชิ เพื่อออกแบบการทดลองแบบเมตริกซ์ตามตาราง Orthogonal array แบบ L-9 (3^3) ซึ่งประกอบด้วย 3 ตัวแปรคือ อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์และความดันฉีด โดยในแต่ละตัวแปรนั้นมี 3 ระดับดังแสดงในตารางที่ 1 ในการใช้อัตราส่วนแบบ Signal-to-noise (S/N) ของวิธีทากูชิเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่ใช้วัดผลกระทบของปัจจัย Noise ตามรูปแบบของสมรรถนะตัวแปรและทำการวัดค่า ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองจะพิจารณาจากค่าตัววัดของทากูชิที่ทำให้ผลของค่า Average fiber range มีค่ามากที่สุด (Larger-is-better) ตามสมการที่ 1 โดยค่าดังกล่าวนี้จะแสดงผลอัตราส่วนความยาวของเส้นใยหลังจากการฉีดพลาสติกซึ่งจะแสดงผลเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ โดยค่าที่สูงจะแสดงว่าความยาวของเส้นใยเฉลี่ยภายในชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันมาก

$$S / N_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

ในขณะที่การทดลองวัดค่าความเข้มของสีนั้นจะพิจารณาจากค่าตัววัดของทากูชิที่ทำให้ผลของค่าเฉลี่ยมีค่าน้อยที่สุด (Smaller-is-better) ตามสมการที่ 2 ซึ่งหมายความว่าค่าความเข้มสีมากที่สุด ส่วนตัวแปรที่ไม่ได้กำหนดวิธีการควบคุมตัวแปรเนื่องจากปัจจัยภายนอกเกิดขึ้นน้อยที่สุดเช่น ประสิทธิภาพเครื่องจักร สภาพอากาศหรือผู้ปฏิบัติงาน

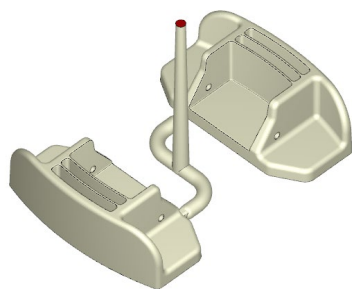
$$S / N_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

ตารางที่ 1 ค่าปัจจัยและระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลองและการฉีดพลาสติก

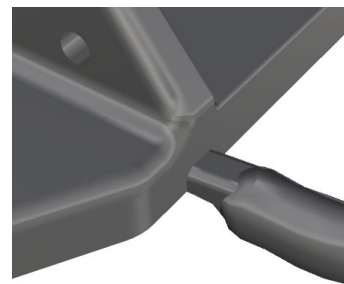
ระดับ	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	ความดันฉีด (Mpa)
1	260	70	90
2	270	80	100
3	280	90	110

การวิเคราะห์การไหลของพลาสติกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองฉีดพลาสติก

ในการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกจะใช้เงื่อนไขตามการทดลองในตารางที่ 2 ขึ้นงานในการทดลองนั้นถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2 (ก) โดยมีขนาด 80.0 × 118.0 × 27.0 (มม.) มีทางเข้าแบบสี่เหลี่ยมขนาด 4.0 × 4.0 × 2.0 (มม.) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) วัสดุทำแม่พิมพ์คือ เหล็กเกรด P20 และพลาสติกที่ใช้คือ PA-MXD6 เกรด RENY 1301 ของ Mitsubishi-Engineering ซึ่งมีอัตราส่วนของเส้นใยเสริมแรง (Glass fiber) ต่อน้ำหนักอยู่ที่ 30% อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกมีค่า 250-300 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ใช้ได้มีค่า 60-100 °C อุณหภูมิปลดของชิ้นงาน (Ejection temperature) 188 °C และอุณหภูมิต่ำสุด (Freezing temperature) 208 °C ขนาดของแม่พิมพ์ (Mold base) มีขนาด 350 × 350 × 200 มม.



(ก)

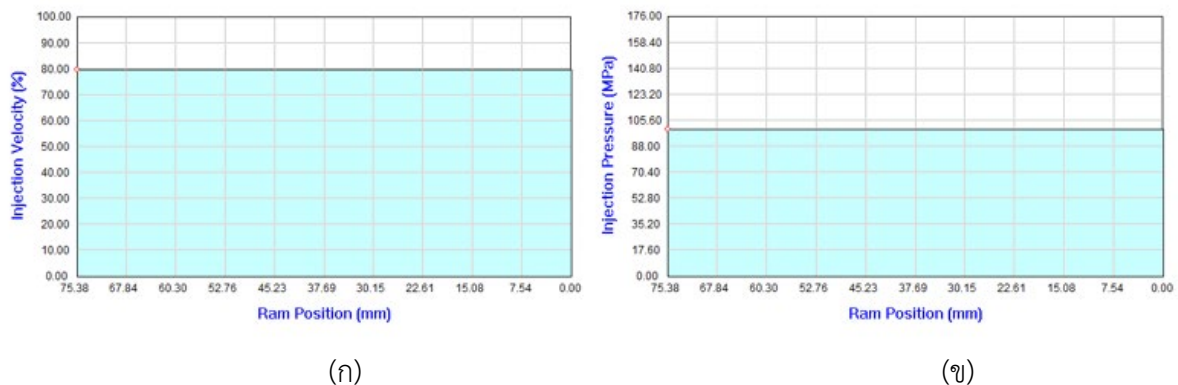


(ข)

ภาพที่ 2 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองฉีดพลาสติก (ก) และทางเข้าของพลาสติกเหลว (ข)

เงื่อนไขในการฉีดนั้นจะทำการตั้งค่าความเร็วในการฉีด (Injection velocity) ที่ 80 % ของค่าสูงสุดของเครื่องฉีดตามภาพที่ 3 (ก) และทำการตั้งความดันในการฉีดคงที่ตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้ตามตัวอย่างในภาพที่ 3 (ข) เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิเคราะห์และการทดลองฉีดจริงนั้นเลือกใช้เครื่องฉีดพลาสติกยี่ห้อ NISSEI

รุ่น NEX110-12E-B275 ซึ่งมีแรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping force) สูงสุดที่ 110 ตัน ปริมาณพลาสติกสูงสุดที่ฉีดได้ (Shot weight) 116 กรัมและความดันสูงสุดที่ฉีดได้ 176 MPa



ภาพที่ 3 ตัวอย่างการตั้งค่าความเร็วในการฉีดที่ 80 % (ก) และความดันที่ 100 MPa (ข)

การจำลองการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง (Fiber orientation)

ในการวิเคราะห์การเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานพลาสติกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น จะใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์ Fiber orientation ภายในโปรแกรม Moldex3D (Peter H. Foss, 2014) เพื่อแสดงผลรูปแบบการเรียงตัวและค่าอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องดังแสดงในสมการที่ (2)

$$\dot{A} = \dot{A}^{HD} + \dot{A}^{iARD}(C_I, C_M) + \dot{A}^{RPR}(\alpha) \quad (2)$$

โดยสมการที่ (2) นั้นจะเป็นสมการที่ได้มาจากการรวมของ 3 เทอมด้วยกันคือ Jeffery Hydrodynamics (HD), improved anisotropic rotary diffusion (iARD) และ Retardant Principal Rate (RPR) โดยที่ iARD นั้นจะแทนที่ด้วยค่าตัวแปรสองตัวคือ $\dot{A}^{iARD}$ และ D_r แทนที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) อื่นๆ ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4);

$$\dot{A}^{iARD} = \dot{\gamma} [2(D_r) - 2tr(D_r)A - 5D_r \cdot A - 5A \cdot D_r + 10A_4 : D_r] \quad (3)$$

$$D_r = C_I(I - C_M \frac{D^2}{\|D^2\|}) \quad (4)$$

ค่า $\dot{A}^{iARD}$ จะประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ C_I และ C_M โดยที่ค่า $\dot{\gamma}$ คือค่าความเค้นเฉือน (Shear rate) ค่า D_r คือ Anisotropic rotary diffusion tensor ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า $2tr$ ซึ่งคือค่า The square of the rate of the deformation tensor ค่า D คือ The rate of deformation tensor ค่า A คือ The second-order orientation order ค่า A_4 คือ The fourth-order orientation tensor และค่า I คือ Identity matrix

เมื่อ $D = \frac{1}{2}(L^T + L)$ คือ Symmetric part of the velocity-gradient tensor L โดยที่ L คือ The velocity gradient tensor และค่าสเกลาร์ $\|D^2\| = \sqrt{\frac{1}{2}D^2 : D^2}$ คือ norm of tensor D^2 สำหรับค่า RPR นั้นจะอธิบายถึงการหน่วงความเร็วของเส้นใยเสริมแรงตลอดการไหลของพลาสติก (The slow-down of fiber rotation along the flow) ซึ่งอธิบายได้จากสมการที่ (5);

$$\dot{A}^{RPR} = -R \cdot \dot{A}^{IOK} \cdot R^T \quad (5)$$

และ

$$\dot{A}_{ii}^{IOK} = \alpha \dot{\lambda}_i \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (6)$$

เมื่อ $\dot{A}^{RPR}$ คือค่า Similarity transformation of linear algebra, $\dot{A}^{IOK}$ และ R คือค่า Diagonal และ Rotational matrix ค่า R^T คือค่า Transpose ของ R และค่า T คือค่า Transpose operator of a matrix ค่า $\dot{A}_{ii}^{IOK}$ คือ The material derivative of a particular diagonal tensor และค่า Superscript คือผลรวมของ The intrinsic orientation kinetics (IOK) ค่า $R = [e_1, e_2, e_3]$ คือค่า The rotation matrix และ $\lambda_i (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3)$ คือค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalues) ของ A

ค่า C_I , C_M และ α คือค่าพารามิเตอร์ของปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยเสริมแรง (Fiber-fiber interaction) และถูกกำหนดค่าไว้ที่ $0 < C_I < 0.1$, $0 < C_M < 1$, $0 < \alpha < 1$

การตรวจสอบค่าความเข้มของสีบนชิ้นงาน

การตรวจสอบค่าความเข้มสี (Color intensity) จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Colorimeter ยี่ห้อ CHN spec (Model: CS-10, Sensor: Photodiode array, Color space: CIELAB, Illumination system: 8°/diffused illumination) ในการวัดค่าความเข้มสีนั้นจะอ้างอิงตามมาตรฐาน International Commission on Illumination (Souad et al., 2019) เครื่อง Colorimeter ที่ใช้ในการวัดค่านั้นถูกแสดงในภาพที่ 4 (ก) โดยมีช่วงของการวัด (L^*) ในช่วง 0-100 โดยค่า 0 จะหมายถึงสีดำและค่า 100 จะหมายถึงสีขาว ในการวัดค่านั้นจะทำการวัดที่ตำแหน่งบนชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 4 (ข) จำนวน 3 ตำแหน่งด้วยกันและนำค่าที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อตรวจสอบค่าความเข้มของสีบนชิ้นงาน



(ก)



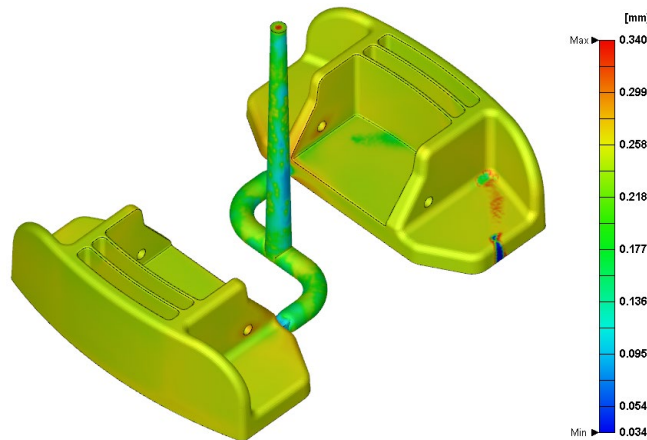
(ข)

ภาพที่ 4 เครื่อง Colorimeter สำหรับวัดค่าความเข้มของสี (ก) และตำแหน่งที่วัดบนชิ้นงาน (ข)

การตรวจสอบลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงด้วยกล้องจุลทรรศน์

ในการตรวจสอบการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานนั้นจะทำการเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีการกัด (Milling) จากผิวชิ้นงานลงไป 0.5 มม. เพื่อดูความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากชิ้นงานในแต่ละเงื่อนไข ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากวิธีทางจุลทรรศน์ในตารางที่ 3 จะถูกเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากการทดลองด้วยเงื่อนไขที่ 9 จากตารางที่ 2 ในการตรวจสอบนั้นจะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital microscope) ยี่ห้อ HIROX

มีกำลังขยายสูงสุด 10000 เท่าในการตรวจสอบ ในการตรวจสอบจะทำการตรวจสอบที่ตำแหน่งหมายเลข 2 บนชิ้นงานพลาสติกดังแสดงในภาพที่ 4 (ข)



ภาพที่ 5 ผลการจำลองค่า Filling average fiber range

ผลการการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์การเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงจากวิธีทาคุชิ

ผลการทดลองการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้เงื่อนไขการทดลองด้วยวิธีทาคุชิถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 2 ผลของค่าเฉลี่ยการเรียงตัวของไฟเบอร์ที่ดีที่สุดจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นได้รับการทดลองที่ 9 โดยมีค่า 72.34 % ซึ่งแสดงถึงอัตราความยาวเฉลี่ยของเส้นใยเสริมแรงทั้งหมดภายในชิ้นงานโดยมีเงื่อนไขการฉีดดังนี้ อุณหภูมิหลอมเหลว 280 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 90 °C และความดันฉีด 100 MPa ตัวอย่างผลการจำลองการเรียงตัวของไฟเบอร์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 7 และมีค่าความยาวมากที่สุดที่ 0.34 มม. อัตราส่วน S/N ของค่า Average fiber range มีค่าระหว่าง 35.03-37.19 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N ที่ 35.95

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาคุชิและผลของ Average fiber range

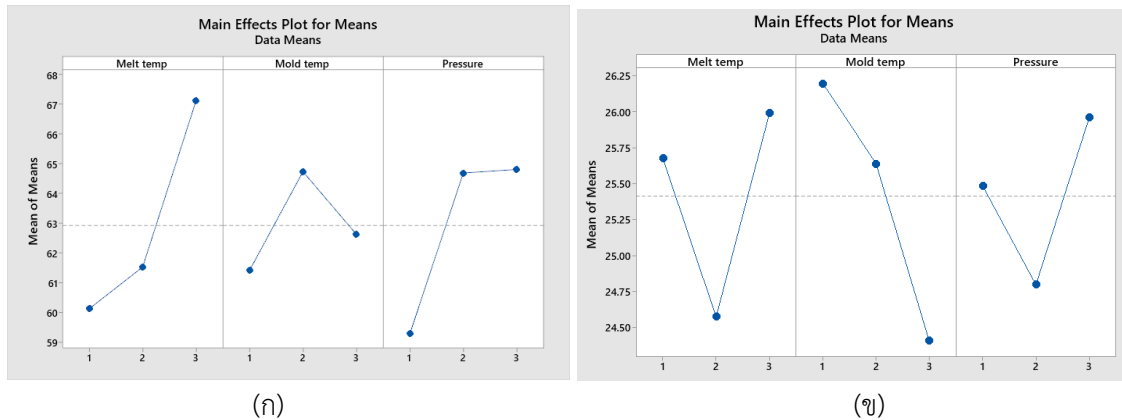
Run	อุณหภูมิหลอมเหลวของ พลาสติก (°C)	อุณหภูมิผิวหน้า แม่พิมพ์ (°C)	ความดันฉีดพลาสติก (Mpa)	Average fiber range (%)	S/N
1	260 (1)	70 (1)	90 (1)	58.73	35.38
2	260 (1)	80 (2)	100 (2)	71.56	37.10
3	260 (1)	90 (3)	110 (3)	59.13	35.44
4	270 (2)	70 (1)	100 (2)	70.21	36.93
5	270 (2)	80 (2)	110 (3)	68.98	36.77
6	270 (2)	90 (3)	90 (1)	56.40	35.03
7	280 (3)	70 (1)	110 (3)	66.30	36.43
8	280 (3)	80 (2)	90 (1)	62.70	35.95
9	280 (3)	90 (3)	100 (2)	72.34	37.19
Average					35.95

ตารางที่ 3 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิและผลความเข้มของสี

Run	อุณหภูมิหลอมเหลวของ พลาสติก (°C)	อุณหภูมิผิวหน้า แม่พิมพ์ (°C)	ความดันฉีดพลาสติก (Mpa)	ค่าความเข้มของสี (L*)	S/N
1	260 (1)	70 (1)	90 (1)	26.31	-28.40
2	260 (1)	80 (2)	100 (2)	25.42	-28.10
3	260 (1)	90 (3)	110 (3)	25.31	-28.06
4	270 (2)	70 (1)	100 (2)	24.83	-27.89
5	270 (2)	80 (2)	110 (3)	25.12	-28.00
6	270 (2)	90 (3)	90 (1)	23.77	-27.52
7	280 (3)	70 (1)	110 (3)	27.46	-28.77
8	280 (3)	80 (2)	90 (1)	26.38	-28.42
9	280 (3)	90 (3)	100 (2)	24.14	-27.65
Average					-28.09

2. ผลการทดลองวัดค่าความเข้มของสีบนผิวชิ้นงานจากวิธีทากูชิ

ผลการทดลองวัดค่าความเข้มของสีจากชิ้นงานที่ได้จากการทดลองฉีด โดยใช้เงื่อนไขการทดลองด้วยวิธีทากูชิ ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 3 ผลของวัดค่าความเข้มของสีที่ดีที่สุดได้จากการทดลองที่ 6 โดยมีค่าความเข้มของสีที่ 27.52 ซึ่งค่านี้น้อยกว่าหมายถึงมีความเข้มมากกว่า (Smaller-is-better) โดยได้รับจากเงื่อนไขการฉีดดังนี้ อุณหภูมิหลอมเหลว 270 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 90 °C และความดันฉีด 90 MPa อัตราส่วน S/N ของค่าความเข้มของสีมีค่าระหว่าง -27.52 ถึง -28.77 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N ที่ 25.42 จากผลการทดลองตามตารางที่ 2 นั้นเมื่อนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลตามวิธีของทากูชิเพื่อกำหนดค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับค่า Average fiber range ตามตารางที่ 4 นั้น จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าดังกล่าวมากที่สุดก็คือ ความดันฉีด อุณหภูมิแม่พิมพ์และอุณหภูมิหลอมเหลวตามลำดับ ซึ่งเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกที่ระดับ 3 อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ระดับ 2 และความดันฉีดที่ระดับ 2 สำหรับกราฟแสดงผลตอบสนองจากผลวิเคราะห์ของทากูชิเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยเสริมแรงนั้นถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 6 (ก) สำหรับผลตอบสนองต่อค่าความเข้มของสีบนผิวชิ้นงานนั้นจะถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 5 โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าดังกล่าวมากที่สุดนั้นคือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิหลอมเหลวและความดันตามลำดับ ซึ่งเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกที่ระดับ 2 ความดันฉีดพลาสติกที่ระดับ 3 และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ระดับ 2 สำหรับกราฟแสดงผลตอบสนองจากผลวิเคราะห์ของทากูชิเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเข้มของสีนั้นจะถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 6 (ข)



ภาพที่ 6 การแสดงผลตอบสนองของปัจจัยต่อค่าเฉลี่ยความยาวของไฟเบอร์ (ก) และค่าความเข้มของสี (ข)

ในการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกเพื่อยืนยันผลการทดลองจากวิธีทางขึ้นนี้จะทำการกำหนดปัจจัยในการฉีดที่ดีที่สุดตามเงื่อนไขที่ได้รับจากผลการทดลองก่อนหน้านี้ซึ่งแสดงในตารางที่ 3 และ 4 โดยทำการกำหนดเงื่อนไขคือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก 280 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 80 °C และความดันฉีด 110 MPa โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกแสดงในภาพที่ 8 และค่าเฉลี่ยความยาวของไฟเบอร์นั้นมีค่า 75.62 % ซึ่งดีกว่าการทดลองก่อนหน้านี้

ตารางที่ 4 ผลตอบสนองของค่า Average fiber range ต่อปัจจัยที่ระดับต่างๆ

ระดับปัจจัย	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	ความดันฉีด (Mpa)
1	63.14	65.08	59.28
2	65.20	67.75	71.37
3	67.11	62.62	64.8
ผลต่าง	3.97	5.12	12.09
ลำดับ	3	2	1

ตารางที่ 5 ผลตอบสนองของค่าเฉลี่ยความเข้มของสีบนผิวชิ้นงานต่อปัจจัยที่ระดับต่างๆ

ระดับปัจจัย	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	ความดันฉีด (Mpa)
1	25.68	26.2	25.49
2	24.57	25.64	24.8
3	25.99	24.41	25.96
ผลต่าง	1.42	1.79	1.17
ลำดับ	2	1	3

ในขณะที่การทดลองฉีดขึ้นงานเพื่อยืนยันผลการทดลองจากตารางที่ 4 นั้น จะทำการตั้งค่าเงื่อนไขคือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก 270 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 90 °C และความดันฉีด 100 MPa โดยขึ้นงานที่ได้จากการทดลองนั้นถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 7 และค่าความเข้มของสีที่วัดได้เท่ากับ 23.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อ

ทำการทดสอบความถูกต้องด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) ในการทดลองนี้กำหนดระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) ผลของ ANOVA สำหรับค่า Average fiber range และค่าความเข้มของสีถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ โดยค่าความเชื่อมั่น (R^2) ของ Average fiber range อยู่ที่ 96.13 % ในขณะที่ค่าความเชื่อมั่นของความเข้มสีอยู่ที่ 97.83 % สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า Average fiber range อย่างมีนัยสำคัญ (P -value < 0.05) คือ ค่าความดันฉีด ในขณะที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความเข้มของสีบนผิวชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 7 ชิ้นงานพลาสติกจากทดลองฉีดตามเงื่อนไขของทางอุทก

ตารางที่ 6 ANOVA ของค่า Average fiber range

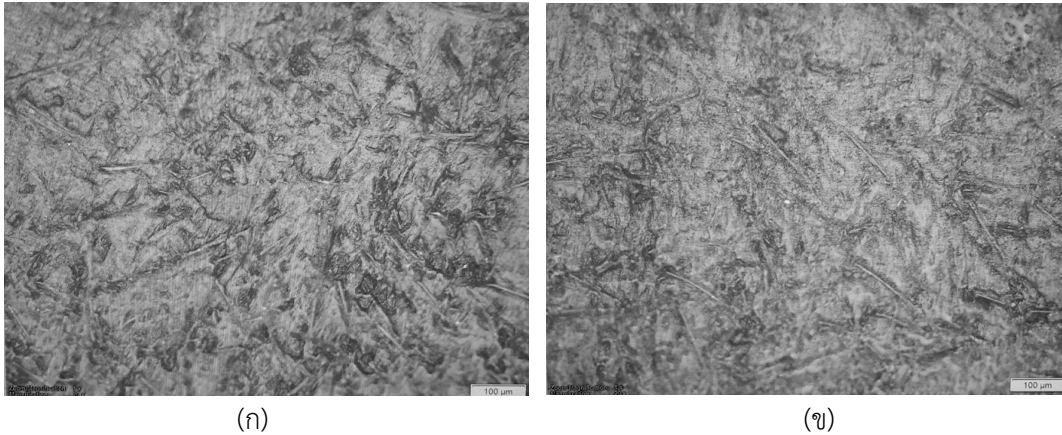
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
อุณหภูมิหลอมเหลว	2	23.69	11.845	2.08	0.325
อุณหภูมิแม่พิมพ์	2	39.39	19.697	3.46	0.224
ความดันฉีด	2	219.91	109.957	19.29	0.049
Error	2	11.40	5.701		
Total	8	294.40			
S=0.3404		R-sq=96.13 %		R-sq(adj) = 84.51 %	

ตารางที่ 7 ANOVA ของค่าความเข้มของสีบนผิวชิ้นงาน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
อุณหภูมิหลอมเหลว	2	3.3393	1.6696	14.41	0.065
อุณหภูมิแม่พิมพ์	2	5.0508	2.5254	21.79	0.044
ความดันฉีด	2	2.0644	1.0322	8.91	0.101
Error	2	0.2318	0.1159		
Total	8	10.6862			
S=0.3404		R-sq = 97.83%		R-sq(adj) = 91.33%	

3. ผลการตรวจสอบลักษณะการเรียงตัวของไฟเบอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

ในการตรวจสอบโครงสร้างของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานนั้น การเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงจากการทดลองฉีดด้วยเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากทากูชินั้นถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 8 (ก) และการทดลองฉีดจากเงื่อนไขที่ 9 ตามตารางที่ 2 นั้นถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 8 (ข)



ภาพที่ 8 การเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงจากผลของทากูชิ (ก) และการทดลองที่ 9 (ข)

ชิ้นงานที่ได้จากเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากวิธีทากูชิแสดงให้เห็นถึงปริมาณการเรียงตัวของเส้นใยที่หนาแน่นกว่าการทดลองที่ 9 ซึ่งความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรงนั้นจะส่งผลต่อความแข็งแรงและคุณภาพผิวที่ได้ของชิ้นงาน

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการฉีดซึ่งได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์และความดันฉีดที่ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงนั้น ทำให้ทราบได้ว่า (1) ความดันฉีดของพลาสติกส่งผลต่อค่า Average fiber range ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานมากที่สุด เนื่องจากค่าความดันฉีดที่สูงจะทำให้ความยาวเฉลี่ยของเส้นใยภายในชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่า (2) อุณหภูมิแม่พิมพ์ส่งผลต่อค่าความเข้มข้นมากที่สุด ซึ่งค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้การไหลของพลาสติกเหลวที่บริเวณติดกับผิวแม่พิมพ์ (Mold surface) นั้นสามารถไหลตัวได้ดีขึ้นและมีค่าความเค้นเฉือน (Shear stress) ที่ลดลงจากผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (3) การตั้งค่าเงื่อนไขการฉีดที่เหมาะสมสำหรับค่า Average fiber range และค่าความเข้มข้น ควรตั้งค่าความดันฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้มีค่าสูงกว่าปกติเพื่อเพิ่มอัตราการไหลตัวของพลาสติก และ (4) การตั้งค่าเงื่อนไขในการฉีดพลาสติกที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อความหนาแน่นและลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยอย่างเห็นได้ชัดจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

เอกสารอ้างอิง

- Antoine, D., Jean-Jacques, P., Paulo, F. and Gilles, R. (2020). Fiber Orientation and Concentration in an Injection-Molded Ethylene-Propylene Copolymer Reinforced by Hemp. *Polymers*, 12(12), 1-20.
- Chacinski, T. and Sutowski, P. (2021). Common Defects in Injection Molding of Plastic Products and Their Influence on Product Quality. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 5(45), 7-14.

- Foss, P. H., Tseng, H. C., Snawerdt, J., Chang, Y., Yang, W. H. and Hsu, C. H. (2014). Prediction of Fiber Orientation Distribution in Injection Molded Parts Using Moldex3D Simulation. *Polymer Composites*, 35(4), 671-680.
- Gim, J., Han, E., Rhee, B., Friesenbichler, W. and Gruber, D. P. (2020). Causes of the Gloss Transition Defect on High-Gloss Injection-Molded Surfaces. *Polymers*, 12(9), 2100.
- Huang, C. T., Chen, X. W. and Fu, W. W. (2020). Investigation on the Fiber Orientation Distributions and Their Influence on the Mechanical Property of the Co-Injection Molding Products. *Polymers*, 12(1), 1-19
- Huang, C. T., Chu, J. H., Fu, W. W., Hsu, C. and Hwang, S. J. (2021). Flow-induced Orientations of Fibers and Their Influences on Warpage and Mechanical Property in Injection Fiber Reinforced Plastic (FRP) Parts. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(3), 917-934.
- Karagoz, I. and Tuna, O. (2021). Effect of melt temperature on product properties of injection-molded high-density polyethylene. *Polymer Bulletin*, 78, 6073-6091.
- Kausar, A. (2019). Advances in carbon fiber reinforced polyamide-based composite materials. *Advances in materials science*, 19(4), 67-82.
- Li, K., Yan, S. L., Pan, W. F. and Zhao, G. (2017). Optimization of fiber-orientation distribution in fiber-reinforced composite injection molding by Taguchi, back propagation neural network, and genetic algorithm–particle swarm optimization. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(9), 1-11.
- Li, X., Gong, N., Gao, Z. and Yang, C. (2017). Fiber orientation in melt confluent process for reinforced injection molded part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 1457-1463.
- Mbarek, S., Baccouch, Z., Eterradosi, O., Perrin, D., Monasse, B., Garay, H. and et al. (2019). Effect of Recycling and Injection Parameters on Gloss Properties of Smooth Colored Polypropylene Parts: Contribution of Surface and Skin Layer. *Polymer engineering and science*, 59(6), 1288-1299.
- Roo, T. V., Kolling, S., Dillenberger, F. B. and Amberg, J. (2022). On short glass fiber reinforced thermoplastics with high fiber orientation and the influence of surface roughness on mechanical parameters. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 41(7-8), 296-308.
- Tanaka, K., Kitano, T. and Egami, N. (2014). Effect of fiber orientation on fatigue crack propagation in short-fiber reinforced plastics. *Engineering Fracture Mechanics*, 123, 44-58.
- Wang, G., Zhao, G. and Wang, X. (2013). Effects of cavity surface temperature on reinforced plastic part surface appearance in rapid heat cycle moulding. *Materials and Design*, 44, 509–520.