

# การศึกษาการเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

## Study of Void Formation within Injection Molded Thermoplastic Composites

จรรยา กริ่งเกษมศรี

ดร. สมเจตน์ พันธ์พันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. (662) 942-8555 Ext.2121 E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อขนาดและปริมาณของโพรงอากาศภายในชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป และปรับปรุงสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยแก้วมีสารตัวเติม จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้นพบว่าพื้นที่ของโพรงอากาศภายในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่ไม่เท่ากันของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณชั้นแกนกลางและชั้นผิว กล่าวคือ เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงของชั้นผิวที่เย็นตัวก่อนเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อพอลิเมอร์บริเวณชั้นแกนกลางเริ่มเย็นตัว การหดตัวของชั้นแกนกลางไม่สามารถทำได้เนื่องจากความแข็งแรงของชั้นผิวที่เย็นตัวก่อน จึงทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศบริเวณชั้นแกนกลางขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงขนาดของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นพบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้น ขนาดของโพรงอากาศมีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่การเพิ่มความยาวของเส้นใยแก้วทำให้โพรงอากาศมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้น (matrix) และเส้นใยแก้ว (glass fiber) มีค่าที่แตกต่างกันตามปริมาณและความยาวของเส้นใยแก้ว จึงทำให้ความค่าความเป็นผลึกซึ่งส่งผลต่อลักษณะการหดตัวที่ต่างกัน ทั้งนี้เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำนายความแข็งแรงของชิ้นงานตามกฎการผสมที่มีเส้นใยแก้วเป็นสารตัวเติมพบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบยังมีความแตกต่างกับค่าที่ได้จากทางทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องมาจากสมมุติฐานของกฎการผสม เช่น ความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุพื้นและเส้นใย การยึดตัวเมื่อได้รับแรงของวัสดุพื้นและเส้นใยมีค่าที่เท่ากัน รวมไปถึงการเกิดความเค้นสะสมภายในชิ้นงานเนื่องจากโพรงอากาศที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: กระบวนการฉีดขึ้นรูป/ วัสดุเชิงประกอบ/ การเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว/ โพรงอากาศ/ กฎการผสม

### Abstract

This study aims to identify the influence of glass fiber shape and quantity on the size and amount of void in the polypropylene injection molding product, and development of the equation to evaluate strength of glass fibered-reinforced composite material. The experimental results showed that unreinforced and glass-fiber-reinforced polypropylene 20% by weight have very low amount of void, but have distortion and sink mark on the part surface. However when the amount of glass fiber is increased, the void area in the part increase as well. This reason is because of difference cooling rate of the melting polymer between polymer in the area that nearly contact and distant apart the mold surface. That is, the increased amount of glass-fiber improve the strength of the polymer that first contact to the mold and cool down, then prevent the middle area of the polymer to shrink and becoming the void instead. However when the size of void is taken into consideration, the result showed that the size of void is decrease when the amount of void is increased. While increased in glass-fiber length effect the larger size of the voids, since the contact area between the glass-fiber and matrix material depend on quantity and length of the glass-fiber, and effect the crystallize and shrinkage of material as well. The strength prediction part by using rule of mixture of the glass-fibered composite yield difference results compared to the experiment result, because of the limitation of assumption of the rule of mixture.

**Keywords:** Injection Molding/ Composite Materials/ Glass-fiber reinforcement / Void/ Rule of mixture

## 1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### วัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยสารรวมวัสดุมากกว่า 2 ชนิดเข้าด้วยกัน โดยที่วัสดุประเภทนี้มีการแยกเฟสไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แบ่งเป็น วัสดุที่เป็นเนื้อพื้น (Matrix) กับวัสดุที่เป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) หรือวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ที่กระจายอยู่ในวัสดุเนื้อพื้นนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อพื้นทำหน้าที่รองรับวัสดุที่เป็นเฟสกระจายให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุที่เป็นเฟสกระจาย ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือใช้เป็นวัสดุเสริมแรง ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุเนื้อพื้นให้สูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็น ก้อน เส้น อนุภาคหรือเกร็ดแทรกตัวอยู่ในวัสดุเนื้อพื้น โดยวัสดุประกอบขึ้นกับสมบัติของสารเนื้อพื้น รวมถึงสมบัติ ชนิด ปริมาณ และการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่ วัสดุประกอบเมื่อแบ่งตามลักษณะของสารตัวเติม แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วย 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ วัสดุประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค วัสดุประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย และวัสดุประกอบโครงสร้าง ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันเพื่อให้วัสดุประกอบมีสมบัติทางกลที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น

### ประเภทของวัสดุประกอบแบ่งตามเนื้อพื้น

#### ก. วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นโลหะ (Metal Matrix Composite; MMC)

วัสดุประกอบประเภทนี้ใช้โลหะเป็นเนื้อพื้น ตัวอย่างเช่น อลูมิเนียม ไทเทเนียม และแมกนีเซียม พบมากในผลิตภัณฑ์กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ สำหรับวัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้เป็นเฟสกระจายของวัสดุประกอบกลุ่มนี้เป็นวัสดุจำพวกเซรามิก ได้แก่ กลุ่มคาร์ไบด์ กลุ่มไนไตรด์ เป็นต้น

#### ข. วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นเซรามิก (Ceramic Matrix Composite; CMC)

วัสดุประกอบประเภทนี้ใช้เซรามิกเป็นเนื้อพื้น ได้แก่ คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปูน ทราย เหล็กเส้น (เป็นตัวแทนที่พบเห็นได้ทั่วไปของวัสดุกลุ่มนี้ ขณะที่วัสดุเซรามิกคอมโพสิตสมัยใหม่) advanced composite) มีเนื้อหลักเป็นเซรามิก และใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย คอมโพสิตกลุ่มนี้มักนำมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น แผ่นฉนวนความร้อนของยานอวกาศ เป็นต้น

#### ค. วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite; PMC)

วัสดุประกอบประเภทนี้ใช้พอลิเมอร์ซึ่งเป็นพลาสติก หรือยางเป็นเนื้อพื้น ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์มีความแข็งแรงต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น แต่มีความยืดหยุ่นสูง น้ำหนักเบา กระบวนการผลิต

สามารถทำได้ง่าย และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรายละเอียดซับซ้อนได้ ส่วนวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง ได้แก่ เส้นใยแก้ว (Glass Fibre) เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fibre) เส้นใยอารามิด (Aramide Fibre) มีสมบัติเด่นเรื่องความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งแรงต่อแรงกด (Compressive strength) สูง

### การเสริมแรงของสารตัวเติมที่เป็นอนุภาค

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุ 2 ชนิด จากสมการของกฎการผสม (Rule of Mixtures) ซึ่งสามารถทำนายค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างขอบเขตบน (Upper Bond) และขอบเขตล่าง (Lower Bond) ของวัสดุประกอบได้จากสมการที่ 1 และสมการที่ 2 ตามลำดับ และเส้นกราฟขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยความแข็งแรงของวัสดุประกอบอยู่ระหว่างเส้นกราฟทั้งสอง

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad \text{สมการ (1)}$$

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad \text{สมการ (2)}$$

โดย  $E_c$  = ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุประกอบ

$E_p$  = ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของอนุภาค

$E_m$  = ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเนื้อพื้น

$V_p$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค

$V_m$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของเนื้อพื้น

### การเสริมแรงของสารตัวเติมที่เป็นเส้นใย

#### ก. อิทธิพลของความยาวของเส้นใย

ประสิทธิภาพการเสริมแรงของเส้นใยในวัสดุประกอบ นอกจากชนิดของเส้นใยแล้ว ยังขึ้นกับความสามารถในการส่งผ่านแรงกระทำจากเนื้อพื้นสู่เส้นใยอีกด้วย ซึ่งปัจจัยสำคัญในการส่งผ่านแรงกระทำ คือ พันธะการยึดเหนี่ยว (Interfacial Bonding) ระหว่างเส้นใยและเนื้อพื้นรวมถึงความยาวของเส้นใย โดยความยาวเส้นใยวิกฤต (Critical Fibre Length) นั้น เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุประกอบ

#### ข. สมบัติเชิงกล

วัสดุประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย สามารถทำนายค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุประกอบได้จากสมการที่ 3

$$E_{cd} = E_m V_m + K E_f V_f \quad \text{สมการ (3)}$$

โดย  $E_{cd}$  = ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุประกอบ  
 $E_m$  = ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของเนื้อพื้นและเส้นใย  
 $E_f$  = ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของเส้นใย  
 $V_m$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของสารเนื้อพื้นและเส้นใย  
 $V_f$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย  
 $K$  = ตัวแปรประสิทธิภาพของเส้นใย

ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต คือ ชนิดของเส้นใยเสริมแรง สมบัติของวัสดุเนื้อพื้นและการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง (Fiber orientation) ซึ่งสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมขึ้นอยู่กับทิศทางที่เส้นใยเสริมแรง โดยวัสดุผสมมีความแข็งแรงและความเหนียวในทิศทางที่เส้นใยเสริมแรงจัดเรียงตัวในแนวทิศทางของแรงที่กระทำ ดังนั้นในการออกแบบชิ้นงานที่ทำจากวัสดุผสมนั้นสิ่งที่สำคัญที่ต้องพิจารณาคือ ขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน

**วิธีการดำเนินโครงการ**

#### การเตรียมเม็ดโพลีโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้ว

การเตรียมโพลีโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้วเพื่อนำไปใช้ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน อัตราส่วนผสมระหว่างโพลีโพรพิลีนและเส้นใยแก้วสามารถคำนวณได้จากสมการ และ รวมทั้งอัตราส่วนผสมระหว่างโพลีโพรพิลีนและเส้นใยแก้ว

#### การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

การฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน โพลีโพรพิลีนที่ไม่ผสมเส้นใยแก้ว โพลีโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 20, 30 และ 40 %wt และโพลีโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดยาว 40 %wt

#### การทดสอบแรงต้านทานต่อการดึง

นำชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป มาตัดให้เป็นชิ้นงานมาตรฐาน เพื่อนำไปวัดค่าแรงต้านทานต่อการดึง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงสากล (Universal testing machine, UTM) โดยใช้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ตามมาตรฐาน ASTM D638

#### ผลการดำเนินโครงการและวิจารณ์

##### ปริมาณเส้นใยแก้วในโพลีโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

จากการทดสอบหาปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและชนิดยาวที่ปริมาณต่างๆ ในวัสดุดิบที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

ชนิดของโพลีเมอร์	% เส้นใยแก้วโดยน้ำหนัก
PPSGF20	19.83
PPSGF30	29.72
PPSGF40	39.57
PPLGF40	39.78

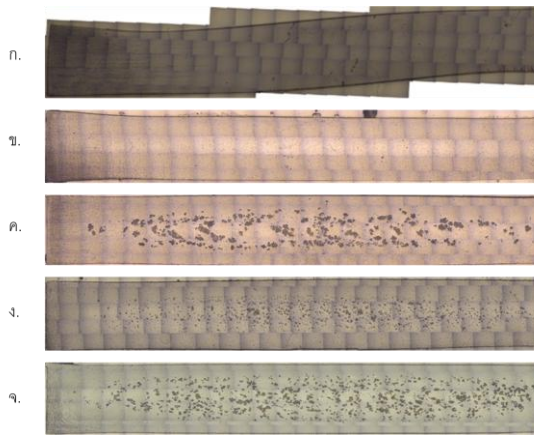
#### อิทธิพลของชนิดและปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อการแตกหักของเส้นใยแก้วที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

จากการทดสอบอิทธิพลและปริมาณเส้นใยแก้วที่มีผลต่อการแตกหักของเส้นใยแก้วที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงตรวจสอบ พบว่าเส้นใยแก้วที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีความยาวลดลงอย่างมาก โดยชิ้นงานโพลีโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 40%wt มีการแตกหักสูงกว่า 30%wt และ 20%wt ซึ่งมีสาเหตุอันเนื่องมาจากความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยแก้วกับสกรูและผนังของห้องหลอม รวมไปถึงระหว่างเส้นใยแก้วด้วยกันเอง เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มมากยิ่งขึ้น ความหนืดของโพลีเมอร์หลอมเหลวมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดความเค้นเฉือนที่มากยิ่งขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาเส้นใยแก้วชนิดสั้น 40%wt และเส้นใยแก้วชนิดยาว 40%wt พบว่าเส้นใยแก้วชนิดยาวมี %การแตกหักที่สูงกว่า เส้นใยแก้วชนิดสั้น อันเนื่องมาจากความหนืดของโพลีเมอร์หลอมเหลว มีค่าสูงกว่า ส่งผลให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นสูงกว่าตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามความยาวสุดท้ายของเส้นใยแก้วชนิดยาวหลังผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแล้วมีความยาวที่มากกว่าเส้นใยแก้วชนิดสั้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ดีกว่า

#### อิทธิพลของชนิดและปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อปริมาณและขนาดของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

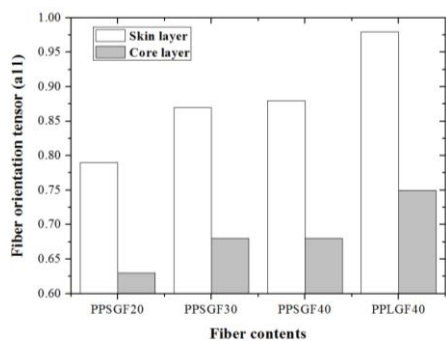
จากรูปที่ 21 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานโพลีโพรพิลีน และโพลีโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ถ่ายภาพ พบว่า ชิ้นงานโพลีโพรพิลีนเกิดการหดตัวและบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานโพลีโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้ว พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้น ปริมาณการเกิดโพรงอากาศมากขึ้นตามดังแสดงในภาพที่ 22 โดยที่ชิ้นงานโพลีโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 20%wt เกิดการหดตัวลงมาเพื่อชดเชยการหดตัวของโพลีเมอร์หลอมเหลว ชิ้นงานโพลีโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 30%wt และ 40%wt เริ่มมีการหดตัวที่ผนังน้อยลงแต่มีโพรงอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงานแทน ซึ่งพบว่าขนาดของโพรงอากาศของชิ้นงานโพลีโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 30%wt มีขนาดใหญ่กว่าของชิ้นงานโพลีโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 40%wt ซึ่งมีสาเหตุอันเนื่องมาจากปริมาณ

เส้นใยแก้วที่น้อยกว่า ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่า ทำให้มีเวลาในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์หลอมที่นานกว่า เมื่อเกิดการเย็นตัวลงการหดตัวจึงมีมากกว่า ทำให้ขนาดของโพรงอากาศมีขนาดที่ใหญ่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 40%wt กับชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดยาว 40%wt พบว่า ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดยาว 40%wt มีพื้นที่ผิวระหว่างเส้นใยแก้ว กับพอลิโพรพิลีนที่น้อยกว่า ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 40%wt ส่งผลให้การระบายความร้อนที่ต่ำกว่า ทำให้มีเวลาในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์หลอมที่นานกว่า เมื่อพอลิเมอร์หลอมเกิดการเย็นตัวลงการหดตัวจึงมีมากกว่า ส่งผลให้ขนาดของโพรงอากาศมีขนาดที่ใหญ่มากกว่า



**อิทธิพลของชนิดและปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้ว**

การวิเคราะห์ทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้ว โดยใช้โปรแกรมช่วยทางวิศวกรรมวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้ว พบว่าการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วบริเวณชั้นผิวของชิ้นงานมีการจัดเรียงตัวตามแนวของทิศทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ในขณะที่บริเวณชั้นแกนกลางมีการจัดเรียงตัวที่ขวางทิศทางการไหลมากยิ่งขึ้น เนื่องจากที่บริเวณผนังแม่พิมพ์ได้รับอิทธิพลของแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นนั้นลดลงเมื่อเข้าสู่ชั้นแกนกลาง



**สรุปผลการดำเนินงาน**

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดและปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อขนาดและปริมาณของโพรงอากาศภายในชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยพบว่าปริมาณเส้นใยแก้วที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณโพรงอากาศภายในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่ไม่เท่ากันของพอลิเมอร์หลอมเหลวระหว่างชั้นผิว (Skin layer) และชั้นแกนกลาง (Core layer) ซึ่งทำให้การหดตัวเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน รวมไปถึงความแข็งแรงของชั้นผิวที่แตกต่างกันเมื่อปริมาณเส้นใยแก้วมากขึ้น ในขณะที่ขนาดของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นมาจากปัจจัยในด้านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและเส้นใยแก้ว

การเปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานจากการทดสอบจริงและค่าที่ได้จากการปรับปรุงกฎการผสมพบว่ามีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณมีความแตกต่างจากการทดสอบจริง เช่น ความเข้ากันระหว่างวัสดุพื้นและสารตัวเติม การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่มากจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีข้อกำหนดที่แตกต่างจากกระบวนการฉีดจริง นอกจากนี้การปรับปรุงกฎการผสมยังไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยจากความเค้นสะสม (Stress concentration) ซึ่งเกิดจากโพรงอากาศภายในชิ้นงาน จากปัจจัยดังกล่าวจึงทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมาก

**ข้อเสนอแนะ**

ในการวิเคราะห์ปัจจัยในด้านปัจจัยในกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิในกระบวนการฉีดขึ้นรูป รวมไปถึงปัจจัยจากสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ที่มีต่อปริมาณของโพรงอากาศภายในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป