วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008

บทความวิจัย

สมบัติเชิงกลและการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

จรรธิญา กริ่งเกษมศรี และ สมเจตน์ พัชรพันธ์ *

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 12 พฤษภาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 22 กรกฎาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 27 กรกฎาคม 2565
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณและความยาวเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติเชิงกลและการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป จากผลการทดลองโดยทั่วไปพบว่าการเพิ่มปริมาณและความยาวเส้นใยแก้วในพอลิโพรพิลีนส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก (Tensile and Impact Strengths) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมเส้นใยแก้ว จากผลการวิเคราะห์ขนาดและปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานพบว่าพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้ว 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) แสดงให้เห็นว่าเกิดรูพรุนที่บริเวณชั้นแกนกลาง (Core Layer) ของชิ้นงานในปริมาณที่น้อยมาก อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้น (ที่ปริมาณการผสมเส้นใยแก้วที่ 30 และ 40 wt%) พบว่าขนาดและปริมาณรูพรุนภายในชั้นแกนกลางชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้ เนื่องจากอัตราการเย็นตัวและความแข็งที่บริเวณชั้นผิว (Solidified Skin Layer) ที่เพิ่มมากขึ้นจากการผสมเส้นใยแก้ว นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์อิทธิพลของความยาวเส้นใยแก้วที่มีต่อปริมาณและขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้รูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่มีปริมาณลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่ลดลง จากการลดลงของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยแก้วและวัสดุเนื้อพื้น

คำสำคัญ: พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต; กระบวนการฉีดขึ้นรูป; สมบัติเชิงกล; การเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว; การเกิดรูพรุน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008

บทความวิจัย

Mechanical Properties and Void Formation within Injection Molded Thermoplastic Composites

Chantiya Kringkasemsri and Somjate Patcharaphun *

Department of Material Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

Received: 12 May 2022; Revised: 22 July 2022; Accepted: 27 July 2022
Online Published: 25 August 2022

Abstract: The influences of glass-fiber length and concentration on the mechanical properties and formation of micro-voids within injection molded polypropylene composites were investigated in this work. The primary results obtained from the mechanical testing showed that the tensile and impact strength of PP composites increased with increasing fiber length and concentration. The analytical results indicated that the short-glass-fiber content of 20 wt% did not have a significant influence on the formation of voids. However, the size and content of voids within the core layer were considerably increased with the increase of fiber concentration, especially for PP filled with 30 and 40 %wt short-glass-fibers. This was due to the increase of cooling rate at the solidified skin layer by increasing glass-fiber contents. Considering the effect of fiber length on the formation of voids, it can be seen that the void contents tended to decrease whereas the size of micro-voids tended to increase with the increase of fiber length. This was due to the reduction of heat transfer efficiency caused by the decrease of contact area between the fiber surface and the polymer matrix.

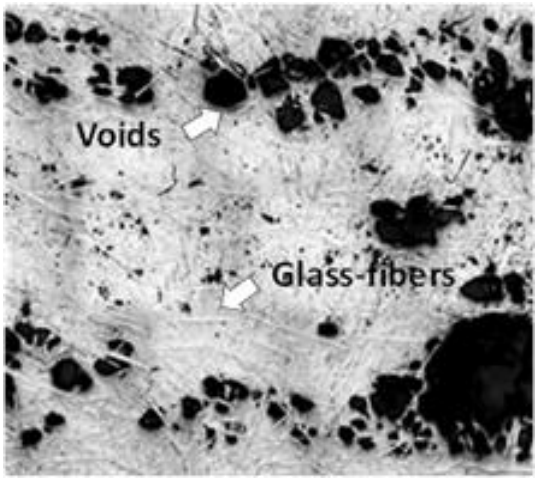
Keywords: Polypropylene composites; Injection molding; Mechanical properties; Fiber reinforcement; Formation of voids

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008

บทความวิจัย

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต (Thermoplastic Composites) มีการใช้เพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ [1] เนื่องจากสมบัติที่ทนทานต่อการใช้งาน มีน้ำหนักเบา รวมถึงสามารถใช้กระบวนการผลิตที่หลากหลายในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ [2] โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Process) เนื่องจากข้อเด่นของกระบวนการในแง่ของการผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและแม่นยำสูง รวมถึงรอบเวลาในการผลิต (Cycle Time) สั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบอื่นๆ และสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ตามแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ [3] โดยทั่วไปแล้วปัญหาที่พบในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่มีเส้นใยเป็นสารเสริมแรง (Fiber Reinforcement) ได้แก่ การใช้พลังงานในกระบวนการผลิตที่สูงขึ้นเนื่องจากความหนืด (Viscosity) ที่เพิ่มขึ้น [4] ส่งผลให้อาจเกิดการฉีดไม่เต็มเบ้าพิมพ์ (Short Shot) การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้ว (Fiber orientation) ภายในชิ้นงานที่ควบคุมได้ยาก [5] ความแข็งแรงของรอยประสาน (Weldline Strength) มีค่าที่ต่ำมาก [6] นอกจากนี้ ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตคือการเกิดโพรงอากาศหรือรูพรุน (Voids) ที่บริเวณชั้นแกนกลางภายในชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงลดลง [7-8] จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ ของวัสดุเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป [9-10] อย่างไรก็ตาม



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป [7]

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดรูพรุนหรือรูพรุนภายในชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่ายังคงมีน้อยมากเมื่อเทียบกับการศึกษาการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานเทอร์โมเซตคอมโพสิต (Thermoset Composites) [11-12] โดย Vaxman และคณะ [13] ได้ศึกษาการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการอัดรีด (Extrusion) โดยใช้เงื่อนไขในกระบวนการผลิตต่างๆ กัน และคำนวณปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการวัดความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM 792-66 จากผลการทดสอบพบว่ารูพรุนเกิดที่บริเวณปลายของเส้นใยแก้ว ปริมาณรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณการผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ในขณะที่ Saint-Martin และคณะ [14] ได้ศึกษาการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้เทคนิค

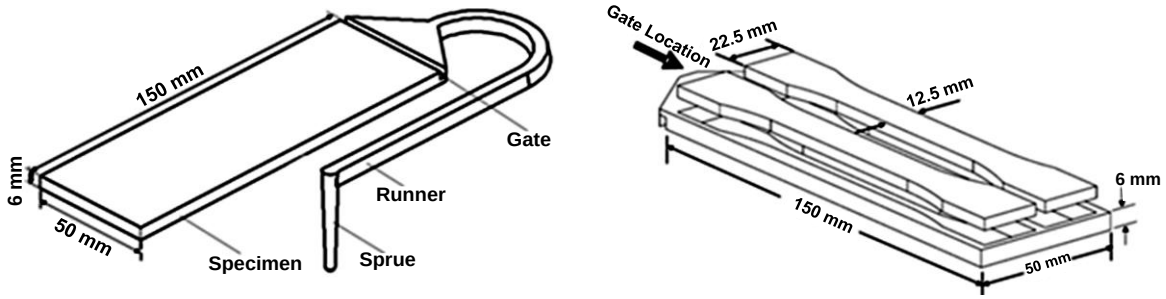
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008

การวิเคราะห์ภาพถ่าย (Optical Microscopy) เปรียบเทียบกับเทคนิคการวัดน้ำหนักและความหนาแน่น (Mass and Density Measurements) ของชิ้นงานที่ได้ จากผลการวิเคราะห์พบว่าเทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนภายในโดยการวัดความหนาแน่นเป็นวิธีการทดสอบโดยไม่ทำลาย (Non-destructive Test) ที่ให้ผลการวิเคราะห์ในเกณฑ์ที่ดี นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่ารูพรุนเกิดขึ้นที่บริเวณชั้นแกนกลางของชิ้นงานทดสอบ

ดังนั้น งานวิจัยนี้นอกเหนือจากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณและความยาวเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติเชิงกล ทางผู้วิจัยยังได้ทำการศึกษาขนาดและปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่อไปในอนาคต

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) จากบริษัทเอส ซี จี จำกัด (มหาชน) เกรดฉีด P6001F Melt Flow Rate, MFR เท่ากับ 10 g/10 min เป็นวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) และใช้เส้นใยแก้วแบบสั้น (Short-glass-fibers, SGF) ที่มีความยาวเริ่มต้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3 มิลลิเมตร เกรด E (Electrical Grade) จากบริษัท Pongpana Co., Ltd. (Thailand) เป็นวัสดุเส้นใยเสริมแรง โดยใช้เครื่องผสมแบบความเร็วสูง (High-Speed Mixer) รุ่น LMXS ของบริษัท LAB TECH Engineering จำกัด ในการผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นเข้ากับเม็ดพอลิโพรพิลีน ในอัตราส่วน 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) ในขณะที่เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบยาว (Long-glass-fibers, LGF) 40 wt% ที่มีความยาวเริ่มต้นของเส้นใยแก้วโดยเฉลี่ยเท่ากับ 8 มิลลิเมตร ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Global Connection Ltd. (Thailand) ใช้เครื่องฉีดพลาสติก ARBURG รุ่น ALLROUNDER 500-320C (Germany) ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดดังแสดงในรูปที่ 2 (a) โดยเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแสดงในตารางที่ 1



(a) (b)

รูปที่ 2 (a) ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป และ
(b) ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN EN ISO 527

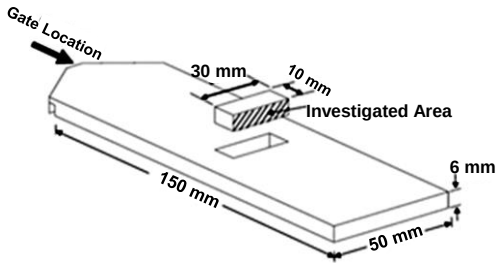
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

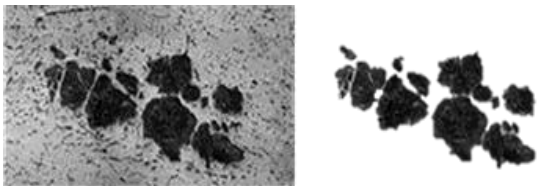
อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle Temperature)	230 °C
ความดันฉีด (Injection Pressure)	950 bar
ความเร็วฉีด (Injection Speed)	15 ccm/s
แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force)	450 kN
แรงดันย้ำ (Holding Pressure)	800 bar
เวลาเย็นตัว (Cooling Time)	25 s
ปริมาตรในการฉีด (Shot Size)	90 ccm

การทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกแบบ IZOD โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (Hounsfield H50K5 0809, USA) และเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบ IZOD (GT-7045, Gotech, Taiwan) เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ DIN EN ISO 527 และ DIN EN ISO 179 ตามลำดับ โดยนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาทำการตัดแต่งให้เป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง (Tensile Specimens) ดังแสดงในรูปที่ 2 (b) และทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบ IZOD โดยนำแผ่นชิ้นงานมาตัดให้มีขนาดกว้าง 10 mm และยาว 60 mm และทำร่องบากรูปตัววี (V-notch) ที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบ

การวิเคราะห์ปริมาณและขนาดรูพรุนภายในชิ้นงานเริ่มจากทำการตัดชิ้นงานที่บริเวณกึ่งกลางตามแนวภาคตัดขวาง (Cross-sectional Area) ดังแสดงในรูปที่ 3 นำชิ้นงานที่ได้มาหล่อเข้าพิมพ์ (Mounting) ทำการขัดหยาบและขัดละเอียด (Grinding and Polishing) ตามเทคนิค Metallography จากนั้นจึงทำการถ่ายรูปที่กำลังขยาย 10 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) รุ่น AxioCamERC5s ของบริษัท ZEISS ร่วมกับการวิเคราะห์จากโปรแกรม Image-Pro Plus 4.5 โดยใช้จำนวนชิ้นงาน 5 ตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ขนาดและปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ ตัวอย่างภาพถ่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดและปริมาณรูพรุน แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ลักษณะการเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์ขนาดและปริมาณรูพรุนภายในที่เกิดขึ้น



(a) (b)

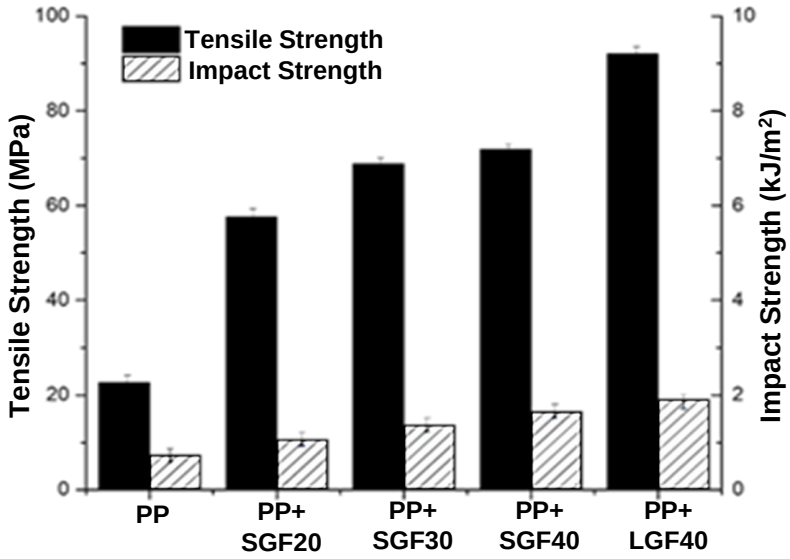
รูปที่ 4 (a) ตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (b) รูปที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Image-Pro Plus 4.5

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

3.1 อิทธิพลของปริมาณและความยาวของเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

รูปที่ 5 แสดงสมบัติการต้านทานแรงดึงและแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 0 ถึง 40 wt% (PP / PP+SGF20 / PP+SGF30 และ PP+SGF40) และพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบยาวที่อัตราส่วนผสม 40 wt% (PP+LGF40) จากผลการทดสอบโดยทั่วไปพบว่า

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008



รูปที่ 5 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วที่ปริมาณและความยาวต่างๆ กัน

การเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นในพอลิโพรพิลีนส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นที่ 20 wt% มีสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นถึง 2.55 เท่า และสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.43 เท่า หากพิจารณาสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นที่ 30 wt% พบว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 3.1 เท่า และสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.86 เท่า ในขณะที่หากใช้เส้นใยแก้วแบบสั้นในอัตราส่วนผสมที่ 40 wt% สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3.2 และ 2.2 เท่าตามลำดับ ทั้งนี้ทางผู้วิจัยได้ตั้งข้อสังเกตไว้ว่า หากพิจารณาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก จะพบว่าความแข็งแรงทางกลไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงตามปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น จากผลการทดสอบที่ได้การเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นจาก 20 เป็น 40 wt% สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในปริมาณ 40 wt% ไม่ได้มีสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นถึง 5.1 เท่า แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 3.2 เท่า ในขณะที่สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกมีเพิ่มขึ้นเพียง 2.2 เท่า จากที่ควรจะเป็น 2.86 เท่า ทั้งนี้ นอกเหนือจากการเกิดรูพรุนภายในชั้นแกนกลางของชิ้นงาน (ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป) ยังสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยแก้ว ทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าเพิ่มมากขึ้น [15] ส่งผลให้เส้นใยแก้วได้รับอิทธิพลความเค้นเฉือน (Shear Stress) ที่เพิ่มมากขึ้นในขณะที่สกรูหมุนเพื่อทำการหลอมละลายเม็ดพลาสติก จึงเป็นสาเหตุให้เส้นใยแก้วเกิดการแตกหัก (Fiber Breakage)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008

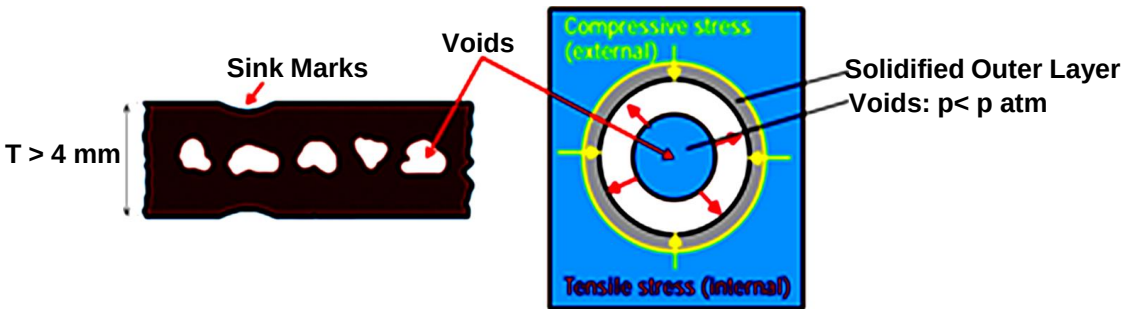
และสั้นลง [7] ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง รวมถึงการเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วยังส่งผลต่อความแข็ง (Hardness) หรือสภาพแข็งเกร็ง (Rigidity) ของวัสดุพื้น ซึ่งทำให้วัสดุเกิดความเสียหายจากแรงกระแทกได้ง่ายขึ้นจากการที่มีความไวต่อการตอบสนองที่รอยแตกหรือรอยร้าว (Crack Sensitivity) เพิ่มขึ้น [16]

นอกจากนี้หากพิจารณาผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบยาวที่ปริมาณ 40 wt% ยังแสดงให้เห็นว่าสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกยังคงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 1.28 เท่า และมีค่าสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 1.16 เท่า เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นที่ปริมาณ 40 wt% ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพการเสริมแรงของเส้นใยแก้วภายในวัสดุพอลิเมอร์หรือวัสดุพื้นที่เพิ่มมากขึ้นจากการเพิ่มความยาวของเส้นใยแก้ว [16]

3.2 อิทธิพลของปริมาณและความยาวของเส้นใยแก้วที่มีต่อการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงาน

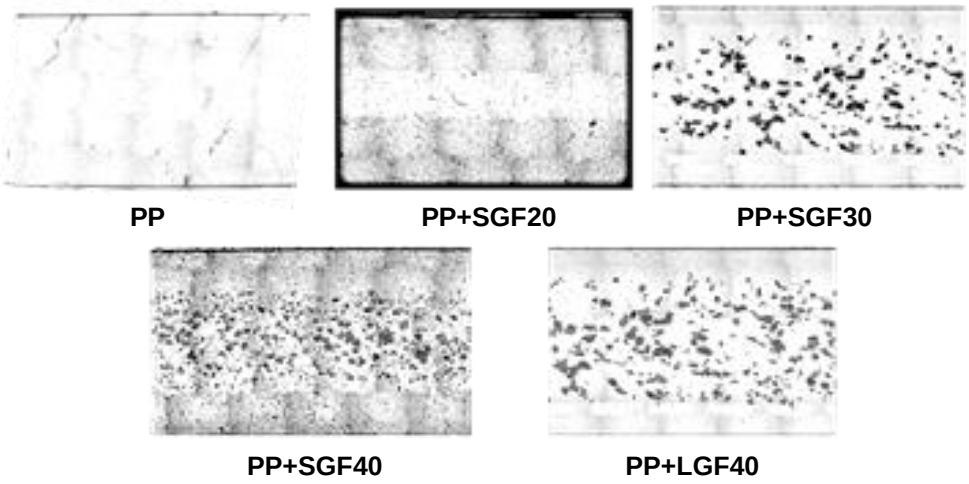
โดยทั่วไปแล้วการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป มีสาเหตุมาจากการหดตัว (Shrinkage) ของพลาสติกหลอมเหลวที่บริเวณภายในชั้นแกนกลางชิ้นงาน ในช่วงระหว่างการเย็นตัวภายในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งหากบริเวณชั้นผิวของชิ้นงานที่แข็งตัว มีความหนามาก ทำให้พลาสติกหลอมเหลวที่บริเวณชั้นแกนกลางไม่สามารถหดตัวได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือไม่สามารถดึงชั้นผิวที่แข็งตัวลงมาซึ่งทำให้เกิดรอยยุบ (Sink Marks) ที่ผิวของชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนภายในที่เป็นสุญญากาศ (Vacuum Voids) ที่บริเวณชั้นแกนกลางของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 6

รูปที่ 7 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วที่ปริมาณและความยาวต่างๆ กัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานภายหลังจากผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิโพรพิลีนไม่มีรูพรุนภายในเกิดขึ้น และพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วในปริมาณ 20 wt% เกิดรูพรุนน้อยมาก อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วชนิดแก้วชนิดสั้นเพิ่มมากขึ้น (PP+SGF30 และ PP+SGF40) พบว่า ขนาดและปริมาณรูพรุนที่บริเวณชั้นแกนกลางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม Image-Pro Plus 4.5 ดังแสดงในรูปที่ 8

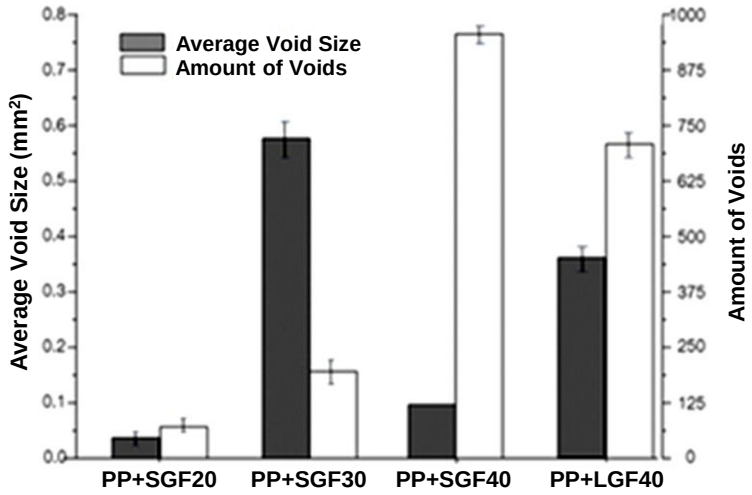


รูปที่ 6 สาเหตุการเกิดรูพรุนภายในชั้นแกนกลางของชิ้นงาน [17]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008



รูปที่ 7 ภาพตัดขวางของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วในปริมาณและความยาวต่างๆ กัน



รูปที่ 8 ขนาดและปริมาณของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานพอลิโพรพิลีน ที่ผสมเส้นใยแก้วในปริมาณและความยาวต่างๆ กัน

ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าว มีสาเหตุมาจากการผสมเส้นใยแก้วในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้พลาสติกหลอมเหลวที่บริเวณชั้นผิวเกิดการเย็นตัวที่รวดเร็วขึ้น หรือมีความหนาชั้นผิวแข็งตัวที่หนามากขึ้น ทำให้พลาสติกหลอมเหลวที่บริเวณชั้นแกนกลางไม่สามารถดึงเนื้อพลาสติกที่บริเวณชั้นผิวลงมาเป็นรอยยุบได้ จึงเกิดเป็นรูพรุนภายในชั้นแกนกลางที่มีปริมาณและขนาดเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008

หากพิจารณาความสามารถในการตกผลึก (Crystallizability) ของเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline Structure) เมื่อมีการผสมเส้นใยแก้ว จากงานวิจัยของ Frihi และคณะ [18] แสดงให้เห็นว่า การผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในพอลิเอไมด์ 6,6 (Polyamide, PA) ส่งผลให้การเกิดผลึกใน PA 6,6 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยแก้วอาจทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณการผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นตั้งแต่ 30 ถึง 50 wt% ความเป็นผลึกกลับมีค่าลดลงอย่างมาก ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอัตราการเย็นตัวของวัสดุพื้นที่รวดเร็วขึ้นจากการผสมเส้นใยแก้วในปริมาณที่มากและปริมาณเส้นใยแก้วที่มากนั้นยังอาจขัดขวางการตกผลึกของสายโซ่โมเลกุลได้ ดังนั้นหากพิจารณาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นที่มีต่อขนาดและปริมาณรูพรุนดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าขนาดรูพรุนภายในชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 30 wt% มีขนาดใหญ่กว่าและมีปริมาณน้อยกว่ารูพรุนภายในที่วิเคราะห์ได้จากชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 40 wt% ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของวัสดุพื้นที่ช้ากว่า (เนื่องจากปริมาณเส้นใยแก้วที่ผสมน้อยกว่า) จึงทำให้ที่บริเวณแกนกลางเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ช้ากว่า จึงมีแนวโน้มเกิดความเป็นผลึกและหดตัวลงที่มากกว่า จึงทำให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานที่มีปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นที่ 40 wt% นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์อิทธิพลของความยาวเส้นใยแก้วที่มีต่อปริมาณและขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้รูพรุนภายในชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีปริมาณที่ลดลง ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุมาจากในกรณีที่มีปริมาณการผสมที่เท่ากัน เส้นใยแก้วแบบยาวมีพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface Contact Area) ระหว่างเส้นใยแก้วและพอลิโพรพิลีนที่น้อยกว่าเส้นใยแก้วแบบสั้น ทำให้อัตราการเย็นตัวช้ากว่า จึงเกิดความเป็นผลึกและหดตัวลงที่มากกว่า ส่งผลให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นและแบบยาวที่มีต่อสมบัติเชิงกลและการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการผสมเส้นใยแก้ว การเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Relationship) อาจมีสาเหตุมาจากการเกิดรูพรุนภายในชั้นแกนกลางของชิ้นงาน การแตกหักของเส้นใยแก้ว และสภาพแข็งเกร็งของวัสดุพื้นที่เพิ่มขึ้น จากผลการวิเคราะห์ขนาดและปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชั้นแกนกลาง สรุปได้ว่า ขนาดและปริมาณรูพรุนภายในชั้นแกนกลางชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อปริมาณของเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณการผสมเส้นใยแก้วที่ 30 และ 40 wt% ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเย็นตัวและความแข็งที่บริเวณชั้นผิวที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์อิทธิพลของความยาวเส้นใยแก้วที่มีต่อปริมาณและขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้รูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่มีปริมาณลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากประสิทธิภาพ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008

ในการถ่ายเทความร้อนที่ลดลง จากการลดลงของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยแก้วและวัสดุเนื้อพื้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย นอกจากนี้ทางผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณ บริษัทเอส ซี จี จำกัด (มหาชน) บริษัท Pongpana Co., Ltd. (Thailand) และบริษัท Global Connection Ltd. (Thailand) สำหรับความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Siengchin and R. Srisuk, Applied green composites use for automotive applications, The Journal of KMUTNB, 2017, 27(3), 405-406. (in Thai)

[2] S.M. Lee, Handbook of composite reinforcements, VCH Publishers, NY, USA, 1992.

[3] D.V. Rosato and D.V. Rosato, Injection molding handbook: The complete molding operation technology, performance, economics, 2nd ed, Springer, NY, USA, 1995.

[4] F.N. Cogswell, Polymer melt rheology: A guide for industrial practice, Woodhead Publishing Limited, London, UK, 1981.

[5] B.E. VerWeyst, C.L. Tucker, P.H. Foss, and J.F. O'Gara, Fiber orientation in 3-D injection molded features: Prediction and experiment, International Polymer Processing, 1999, 14(4), 409-420.

[6] B. Fisa and M. Rahmani, Weldline strength in injection molded glass-fiber-reinforced polypropylene, Polymer Engineering and Science, 1991, 31(18), 1330-1336.

[7] S. Patcharaphun and G. Opaskornkul, Characterization of fiber length distribution in short and long-glass-fiber-reinforced polypropylene during injection molding process, Kasetsart Journal (Natural Science), 2008, 42, 392-397.

[8] P.O. Hagstrand, F. Bonjour, and J.A.E. Manson, The influence of void content on the structural flexural performance of unidirectional glass fiber reinforced polypropylene composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36, 705-714.

[9] M. Gupta and K.K. Wang, Fiber orientation and mechanical properties of short-fiber-reinforced injection-molded composites: Simulated and experimental results, Polymer Composites, 1993, 14(5), 367-382.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.008

[10] M. Akay and D.Barkley, Processing-structure-property interaction in injection molded glass-fiber-reinforced polypropylene, Composite Structure, 1985, 3(3-4), 269-293.

[11] H. Huang and R. Talreja, Effect of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites, Composites Science and Technology, 2005, 65(13), 1964-1981.

[12] Y.K. Hamidi, L. Aktas, and M.C. Altan, Effect of packing on void morphology in resin transfer molded E-glass/epoxy composites, Polymer Composites, 2005, 26(5), 614-627.

[13] A. Vaxman, M. Narkis, A. Siegmann, and S. Kenig, Void formation in short-fiber thermoplastic composites, Polymer Composites, 1989, 10(6), 449-453.

[14] G. Saint-Martin, F. Schmidt, P. Devos, and C. Levaillant, Voids in short fiber reinforced injection molded parts: density control vs. mass control, Polymer Testing, 2003, 22(8), 947-953.

[15] I.S. Miles and S. Rostami, Multi-component Polymer System, Polymer Science and Technology Sires, Longman Scientific & Technical Publisher, NY, USA, 1992.

[16] J. Karger-Kocsis and K. Friedrich, Fatigue crack propagation in short and long fiber reinforced injection molded PA 6.6 composites, Composites, 1988, 19(2), 105-114.

[17] Bakelite AG / KISTLER, Defects on Injection Molded Parts, Germany.

[18] D. Frihi, A. Layachi, S. Gherib, G. Stoclet, K. Masenelli-Varlot, H. Satha, and R. Seguela, Crystallization of glass-fiber-reinforced polyamide 66 composites: Influence of glass-fiber content and cooling rate, Composites Science and Technology, 2016, 130(17), 70-77.