การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง

จตุพงศ์ ครองธานินทร์[1] และ สมเจตน์ พัชรพันธ์[1*]

fengsjpc@ku.ac.th

[1] ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Received : 24-Aug-2021
Revised : 1-Nov-2021
Accepted : 17-Nov-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยของกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลดิ้ง ที่มีต่อความแข็งแรงการยึดเกาะ (Bond strength) ระหว่างพอลิโพรพิลีนที่เป็นวัสดุพื้น (Substrate material) และวัสดุซ้อนทับ (Overmolded material) โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดของวัสดุซ้อนทับ (Overmolded temperature) อุณหภูมิของวัสดุพื้น (Substrate temperature) และแรงดันคงค้าง (Holding pressure) ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และแรงกระแทก (Impact strength) นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะสัมผัส (Contact distance) และลักษณะของพื้นผิวสัมผัส (Surface pattern) ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) จากผลการทดสอบพบว่า ความแข็งแรงการยึดเกาะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและวัสดุพื้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้น ส่งผลให้ความแข็งแรงการยึดเกาะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ จากผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนพบว่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุล (Intermolecular diffusion) ที่บริเวณหน้าสัมผัสที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าวัสดุพื้นที่มีพื้นผิวสัมผัสแบบร่องแนวตั้งฉากและร่องแนวขนานกับทิศทางการรับแรงให้สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ดีกว่าวัสดุพื้นที่มีพื้นผิวสัมผัสแบบเรียบ

คำสำคัญ: สมบัติการยึดเกาะ กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง ปัจจัยในกระบวนการผลิต

An Investigation into Bond Strength of Injection Overmolded Polypropylene

Jatuphong Krongthanin[1] and Somjate Patcharaphun[1*]

fengsjpc@ku.ac.th

[1] Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

Received : 24-Aug-2021
Revised : 1-Nov-2021
Accepted : 17-Nov-2021

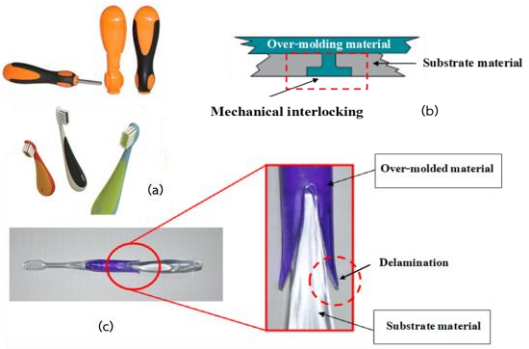
Abstract

The aim of this research was to investigate the influence of injection overmolding parameters on the bond strength between substrate and overmolded polypropylene. The injection overmolded temperature, substrate temperature, and holding pressure on the tensile and impact strengths of injection overmolded part were studied in details. In addition, the effects of contact distance and surface pattern on the lap shear strength were also main interest. The experimental results indicated that the bond strength particularly increased with increasing substrate temperature, while less significant effect was found with increasing overmolded temperature. It can be seen that the shear strength tended to decrease with the increase of contact distance. This was associated with the decrease of intermolecular diffusion at the interface as increase in flow distance. Furthermore, the significant improvement of shear strength was found by using the perpendicular and parallel groove patterns on the substrate surface.

Keywords: Bond strength, Injection overmolding process, Processing parameters

1. บทนำ

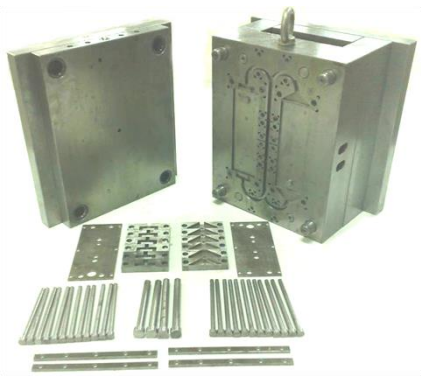
กระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติก เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากให้อัตราการผลิตสูง และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ [1] นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิด (Multi-components) ยังสามารถใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลดิ้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุพอลิเมอร์หลายชนิดในชิ้นงานเดียวโดยไม่ต้องประกอบชิ้นงานแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน [2] ดังแสดงในรูปที่ 1a ซึ่งการผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิ เช่น การออกแบบแม่พิมพ์ (Mold design) สมบัติความเข้ากันได้ของวัสดุ (Compatibility) รวมถึงปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูป [3] ปัญหาที่พบมากในภาคอุตสาหกรรมของการฉีดขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลดิ้ง คือ การหลุดลอก (Delamination) ซึ่งปัญหาดังกล่าวทางโรงงานผู้ประกอบการส่วนใหญ่นิยมแก้ปัญหาโดยการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดให้เกิดการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวส่วนของวัสดุซ้อนทับให้ไหลทะลุไปยังอีกด้านของวัสดุพื้น เพื่อให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นการยึดเกาะแบบเชิงกล (Mechanical interlocking) ดังแสดงในรูปที่ 1b แต่อย่างไรก็ตามในบริเวณหรือทิศทางอื่นที่ห่างจากตำแหน่งของการยึดเกาะแบบเชิงกลก็ยังคงเกิดปัญหาการหลุดลอกของวัสดุซ้อนทับ ดังแสดงในรูปที่ 1c ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิฉีดของวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิแม่พิมพ์หรืออุณหภูมิของวัสดุพื้น และแรงดันคงค้าง รวมถึงอิทธิพลของระยะสัมผัสและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสที่มีต่อสมบัติการยึดเกาะ (Bond strength) ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับโดยได้ทำการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) แรงกระแทก (Impact strength) และแรงเฉือน (Shear strength) เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้งต่อไป



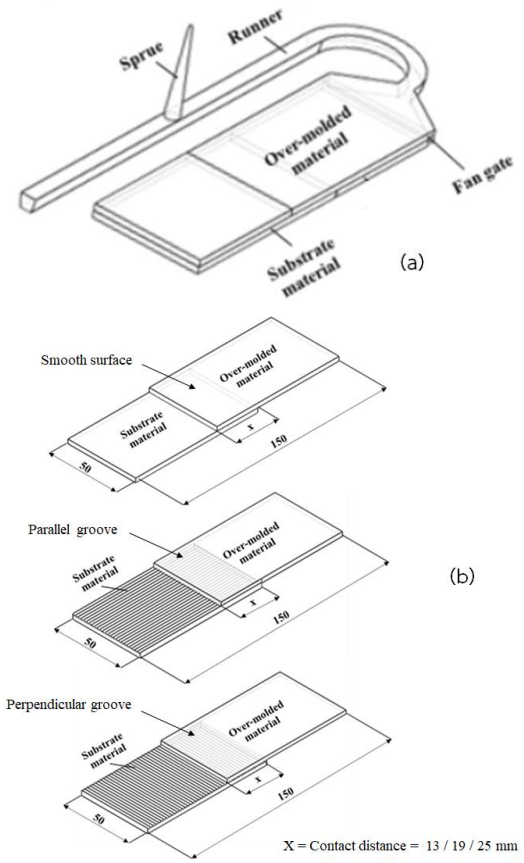
รูปที่ 1 (a) ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลดิ้ง (b) การยึดเกาะกันแบบทางกล และ (c) การหลุดลอกของวัสดุซ้อนทับออกจากวัสดุพื้น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เกรด NK1100 จากบริษัท ไอ อาร์พีซี จำกัด (มหาชน) สำหรับการฉีดขึ้นรูปวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ โดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก ARBURG รุ่น ALLROUNDER 500-320C และได้ทำการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปสำหรับการฉีดแบบโอเวอร์โมลดิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (ตามมาตรฐาน ASTM D638) และสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบ IZOD (ตามมาตรฐาน ASTM D256) และสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนตามมาตรฐาน ASTM D3163 รูปที่ 3a และ b แสดงลักษณะชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง



รูปที่ 2 แม่พิมพ์ฉีดแบบโอเวอร์โมลดิ้งที่ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3 (a) ลักษณะชิ้นงานโอเวอร์โมลดิ้งสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก (b) ลักษณะชิ้นงานโอเวอร์โมลดิ้งสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ระยะสัมผัสและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสต่างๆ กัน

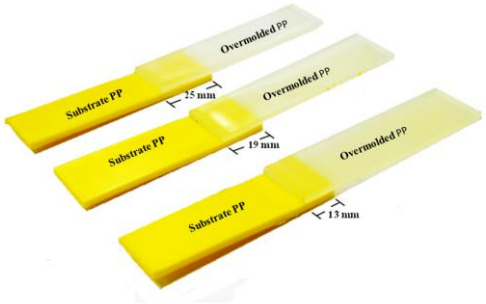
ตารางที่ 1 แสดงปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้งที่ได้ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุพื้น) และแรงดันคงค้าง ในขณะที่ระยะสัมผัสและลักษณะของผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ใช้ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปวัสดุพื้นและชิ้นงานโอเวอร์โมลดิ้ง

Processing Conditions	Substrate specimen	Over-molded specimen
Injection pressure (bar)	900	900
Injection speed (ccm/sec)	10	5
Holding pressure (bar)	800	800
Cooling time (sec)	20	60
Clamping force (KN)	300	300
Melt temperature (°C)	230	220/230/240
Mold temperature (°C)	30	30/60/90
Contact area (mm^2)	-	325/475/625

ตารางที่ 2 ระยะสัมผัสและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ใช้ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน

Surface pattern	Contact distance (mm)
Smooth	13/19/25
Perpendicular groove	13/19/25
Parallel groove	13/19/25



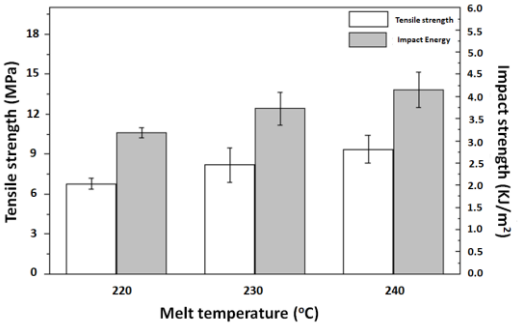
รูปที่ 4 ชิ้นงานโอเวอร์โมลดิ้งสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ระยะสัมผัสต่างๆ กัน

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

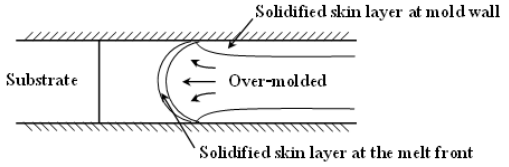
3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

จากผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง โดยใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์หรือวัสดุพื้นเท่ากับ 60°C และใช้แรงดันคงค้างที่ 900 bar ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับเพิ่มขึ้นจาก 220°C

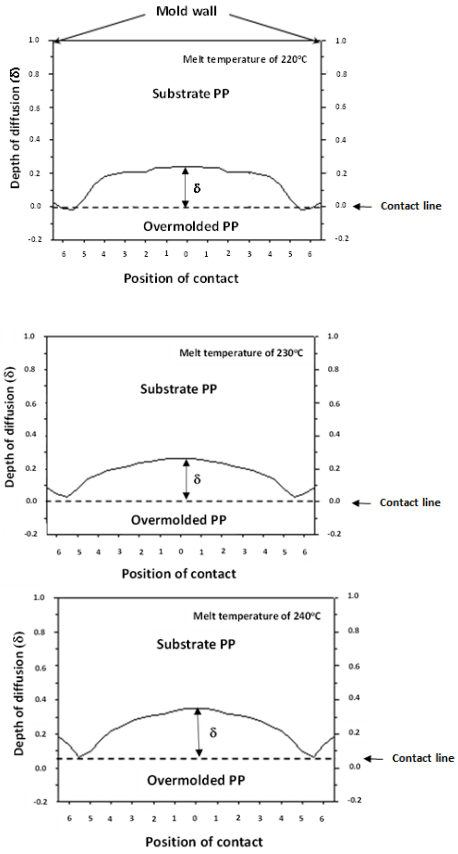
ถึง 240°C ส่งผลให้ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการหลอมละลายของวัสดุพื้นและยึดเกาะกับวัสดุซ้อนทับเป็นเนื้อเดียวกัน รวมถึง ความหนาที่ลดลงของชั้นผิวที่เย็นตัวที่บริเวณด้านหน้า (Solidified skin layer at the melt front) ซึ่งเกิดจากการไหลแบบ Fountain flow จึงทำให้บริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุซ้อนทับ (Bond interface) มีพื้นที่ผิวสัมผัส (Contact area) มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 นอกจากนี้หากพิจารณาระยะความลึกการหลอมละลาย (Depth of diffusion, δ) หรือปริมาณการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุล (Intermolecular diffusion) บริเวณหน้าสัมผัส (Contact line) ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งได้จากการวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย (Optical microscopy) ร่วมกับโปรแกรม Image J พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ส่งผลให้ระยะความลึกการหลอมละลายตลอดแนวสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับมากขึ้น จึงทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 5 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุซ้อนทับที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก



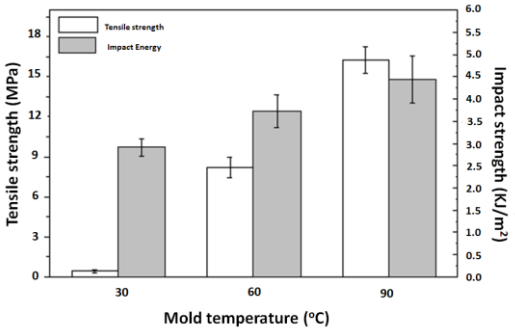
รูปที่ 6 ชั้นผิวที่เย็นตัวที่บริเวณด้านหน้าซึ่งเกิดจากการไหลแบบ Fountain flow



รูปที่ 7 ระยะความลึกของการหลอมละลายที่บริเวณหน้าสัมผัสเมื่อใช้อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับต่างๆ กัน

3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

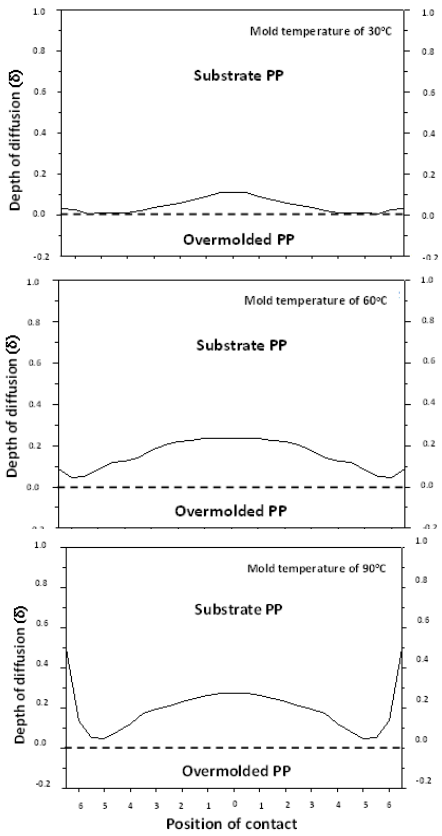
หากพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์หรืออุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างวัสดุซ้อนทับและวัสดุพื้น โดยใช้อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับเท่ากับ 230°C และแรงดันคงค้าง 900 bar ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้นส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีอัตราการเย็นตัวภายในแม่พิมพ์ที่ช้าลง ทำให้เวลาในการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลระหว่างผิวสัมผัสมากขึ้น ทั้งนี้อุณหภูมิวัสดุพื้นที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนาของชั้นผิวที่เย็นตัวลดลง เนื่องจากความร้อนจากพอลิเมอร์หลอมเหลวมีการถ่ายเทไปยังแม่พิมพ์ได้น้อยลง จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับมากขึ้น



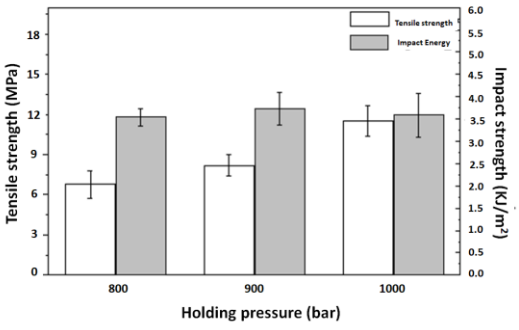
รูปที่ 8 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

นอกจากนี้หากพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อระยะความลึกการหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้น ส่งผลให้ระยะความลึกการหลอมละลายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากอัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ที่ช้าลง จึงทำให้หน้าสัมผัสของวัสดุซ้อนทับมีเวลาในการแพร่ข้ามมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอุณหภูมิของวัสดุพื้นที่ 90°C พบว่าระยะการหลอมละลายบริเวณของผนังชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนเฉือน (Shear heating) ระหว่างพอลิเมอร์ชั้นผิวที่เย็นตัวและชั้นแกนกลาง ซึ่งส่งผลให้ความหนืดของวัสดุซ้อนทับที่ผนังมีค่าที่ลดลง ดังนั้นจึงมีการแพร่ข้ามที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้น

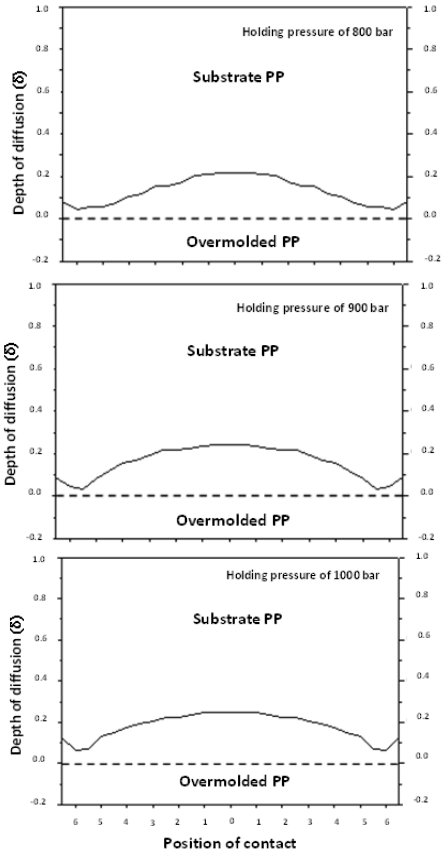
รูปที่ 10 แสดงอิทธิพลของการเพิ่มแรงดันคงค้างที่มีต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ โดยใช้อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ 230°C และอุณหภูมิวัสดุพื้น 60°C ผลที่ได้พบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้มีสาเหตุจาก การเพิ่มแรงดันคงค้างส่งผลให้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณหน้าสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้เกิดการแพร่ข้ามระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่มากขึ้น ดังนั้นสมบัติการยึดเกาะจึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงภาพถ่ายบริเวณหน้าสัมผัส พบว่าเมื่อแรงดันคงค้างเพิ่มสูงขึ้น ความลึกของการหลอมละลายหรือปริมาณการแพร่ข้ามของวัสดุซ้อนทับ มีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 11 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มแรงดันคงค้าง ไม่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลของวัสดุซ้อนทับ และอัตราการเย็นตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความลึกของการหลอมละลายมีการเปลี่ยนแปลง ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 9 ระยะความลึกของการหลอมละลายที่บริเวณหน้าสัมผัสเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน



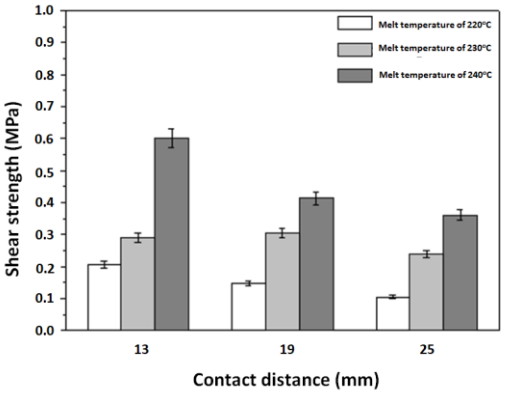
รูปที่ 10 อิทธิพลของแรงดันคงค้างที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก



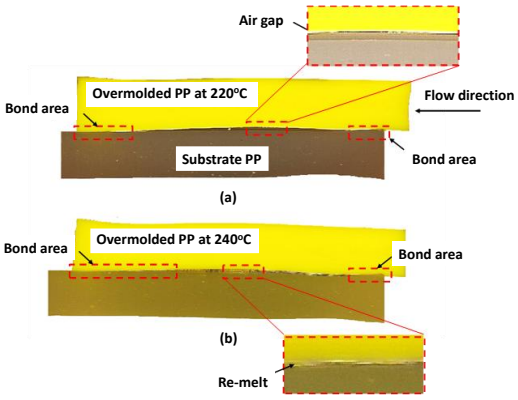
รูปที่ 11 ระยะความลึกของการหลอมละลายที่บริเวณหน้าสัมผัสเมื่อใช้แรงดันคงค้างต่างๆ กัน

3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและระยะสัมผัส ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของวัสดุพื้นที่เป็นชิ้นงาน PP แบบผิวเรียบที่อุณหภูมิ 30 °C ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ส่งผลให้สมบัติความต้านต่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการหลอมละลายของวัสดุพื้น (Re-melt) ดังแสดงใน 13b ในขณะที่รูป 13a แสดงการเกิดช่องว่างอากาศ (Air gap) จากการฉีดวัสดุซ้อนทับที่ อุณหภูมิ 220°C ทั้งนี้มีสาเหตุจากการหดตัวที่ต่างกันในแต่ละด้านของวัสดุซ้อนทับ กล่าวคือ วัสดุซ้อนทับด้านที่ติดผนังของแม่พิมพ์มีการถ่ายเทความร้อนได้ดี จึงเกิดเป็นชั้นผิวที่แข็งตัว (Solidified skin layer) ซึ่งมีความหนามากกว่า ในขณะที่วัสดุซ้อนทับด้านที่สัมผัสกับวัสดุพื้นมีการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำมาก ดังนั้นเมื่อชั้นแกนกลางของวัสดุซ้อนทับเริ่มเย็นตัว จึงทำให้วัสดุซ้อนทับด้านที่สัมผัสกับวัสดุพื้นมีการหดตัวมากกว่าด้านที่สัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ เกิดเป็นช่องว่างอากาศขนาดเล็กบริเวณหน้าสัมผัส ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะมีค่าที่ลดลง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของระยะสัมผัสพบว่า ความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มมีการเย็นตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณด้านหน้าการไหล ส่งผลให้อัตราการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลมีแนวโน้มลดลง



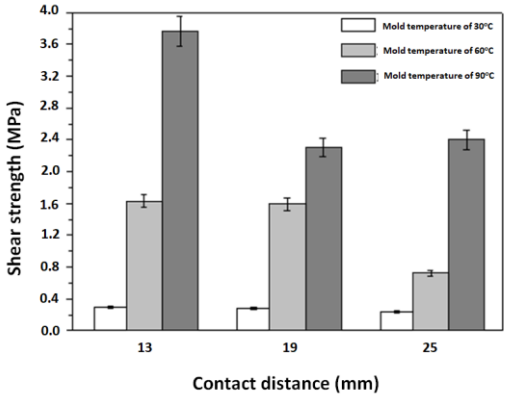
รูปที่ 12 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและระยะสัมผัสที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือนในกรณีวัสดุพื้นแบบผิวเรียบ



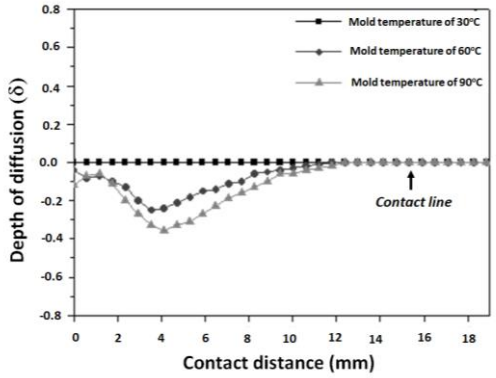
รูปที่ 13 ภาพตัดตามแนวยาวของชิ้นงาน PP ที่ผ่านกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลดิ้งที่อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับเท่ากับ (a) 220°C และ (b) 240°C

3.4 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน

จากผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์หรือวัสดุพื้นและระยะสัมผัส ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยใช้วัสดุพื้นแบบแผ่นเรียบ และอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับเท่ากับ 230°C พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้นส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่ลดลง จึงส่งผลให้วัสดุซ้อนทับมีความลึกและระยะการหลอมละลายที่มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 15 และหากพิจารณาอิทธิพลของระยะสัมผัสที่มากขึ้น พบว่า ในกรณีของอุณหภูมิวัสดุพื้น 30°C สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิของวัสดุพื้นเท่ากับ 60°C และ 90°C พบว่าความแข็งแรงของการยึดเกาะมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอัตราการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลที่ลดลงรวมถึงระยะการหลอมละลายที่เริ่มมีค่าไม่แตกต่างกันที่ระยะทางการไหลประมาณ 12 mm (ดังแสดงในรูปที่ 15)



รูปที่ 14 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และระยะสัมผัสที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือนในกรณีวัสดุพื้นแบบผิวเรียบ

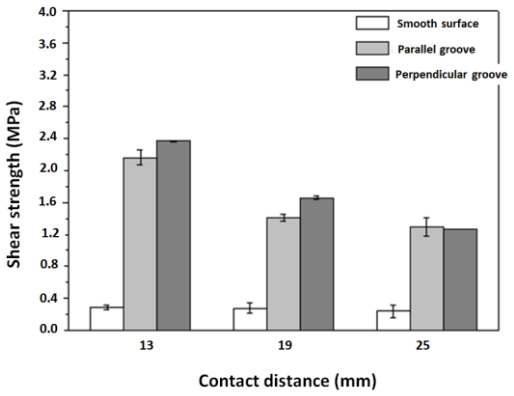


รูปที่15 ความลึกและระยะทางการหลอมละลายของวัสดุพื้น เมื่อทำการฉีดที่ระยะสัมผัสเท่ากับ 19 mm

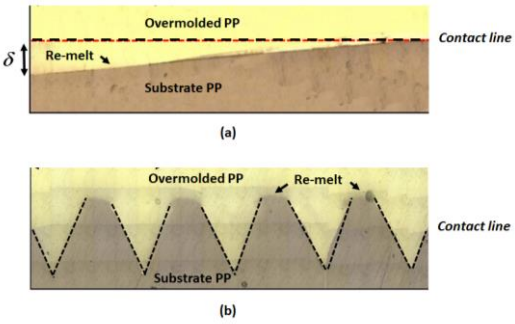
3.5 อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน

รูปที่ 16 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนเมื่อใช้วัสดุพื้นที่มีลักษณะพื้นผิว (Surface pattern) ต่างๆกัน โดยใช้อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและอุณหภูมิวัสดุพื้นเท่ากับ 230°C และ 30°C ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าเมื่อใช้วัสดุพื้นที่มีลักษณะพื้นผิวแบบร่องแนวขนาน (Parallel groove) และร่องแนวตั้งฉาก (Perpendicular groove) กับทิศทางการไหล ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับวัสดุพื้นที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวแบบร่องทั้ง 2 แบบ มีพื้นผิวสัมผัส (Contact area) มากกว่าพื้นที่ผิวสัมผัสแบบแผ่นเรียบ ดังแสดงรูปที่ 17 จึงทำให้วัสดุซ้อนทับและวัสดุพื้นมีพื้นที่ในการยึดเกาะเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุพื้นที่มีผิวแบบร่องแนวตั้งฉากให้ความต้านทานต่อแรงเฉือนมากกว่าที่มีผิวแบบร่องแนวขนานที่ระยะสัมผัส 13 และ 19 mm (ดังแสดงในรูปที่ 16) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วัสดุพื้นที่มีรผิวสัมผัสแบบร่องแนวตั้งฉากเกิดการยึดเกาะทางกล (Mechanical interlock) อย่างไรก็ตามเมื่อระยะสัมผัสเพิ่มมากขึ้น (ที่ระยะสัมผัส 25 mm) พบว่าความแข็งแรงของการยึดเกาะจากวัสดุพื้นที่มีพื้นผิวแบบร่องแนวขนานและร่องแนวตั้งฉากมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวแบบร่องแนวตั้งฉาก ขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ส่งผลให้ความเร็วในการไหลของวัสดุซ้อนทับเริ่มลดลง

เมื่อระยะทางในการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุซ้อนทับมีความหนาของชั้นผิวที่แข็งตัวบริเวณด้านหน้าการไหลมากกว่าพื้นผิวแบบร่องขนาน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะที่ลดลง



รูปที่ 16 อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวและระยะสัมผัสที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน



รูปที่ 17 ภาพตัดตามแนวยาวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุซ้อนทับและวัสดุพื้น (a) แบบแผ่นเรียบ และ (b) แบบแผ่นร่องแนวตั้งฉาก

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลดิ้ง ที่มีต่อสมบัติการยึดเกาะซึ่งได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง แรงกระแทก และแรงเฉือนของพอลิโพรพิลีนที่เป็นวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนซ้อนทับ โดยปัจจัยในกระบวนการฉีดที่ได้ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิวัสดุพื้น และแรงดันคงค้าง จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้นส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ในขณะที่การเพิ่มแรงดันคงค้างไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงในการยึดเกาะมากนัก

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิวัสดุพื้น ระยะทางและลักษณะของพื้นผิวสัมผัส พบว่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและอุณหภูมิวัสดุพื้น ในขณะที่การเพิ่มระยะสัมผัส ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลง และหากพิจารณาอิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน พบว่าผิวชิ้นงานแบบแผ่นร่องแนวขนานและแบบแผ่นร่องแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลให้สมบัติการยึดเกาะที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับผิวชิ้นงานแบบแผ่นเรียบ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าในระยะทางการไหลที่เท่ากัน รวมถึงการยึดเกาะทางกลที่เกิดขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Osswald T.A, Polymer Processing: Fundamentals, Hanhser Publishers, Munich, 1998.

[2] Rothe J. Special injection molding methods, Kunststoffe Plast Europe, 1997, 87(11):1564-81.

[3] Costalas E, Krauss H. Optimized bonding of composites in over-injection. Kunststoffe Plast Europe. 1995;85(11):1887-91.