



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญ

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบ
โอเวอร์โมลด์ดิ้ง

An Investigation into Bond Strength of Injection Overmolded Polypropylene

นามผู้วิจัย นายจุฑพงศ์ กรองธานินทร์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สมเจตน์ พชรพันธ์, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ปฎิภาณ จัยเจิม, Dr.-Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการ
ฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์

An Investigation into Bond Strength of Injection Overmolded Polypropylene

โดย

นายจตุพงศ์ กรองธานินทร์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2554

จดุพงศ์ ครงชานินทร์ 2554: การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของพอลิโพรลีนที่ผ่าน
กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ิง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์สมเจตน์ พชรพันธ์, Dr.-Ing. 81 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยของกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลด์ิง ที่มีต่อความ
แข็งแรงการยึดเกาะระหว่างพอลิโพรลีนที่เป็นวัสดุพื้น (Substrate material) และวัสดุซ้อนทับ
(Overmolded material) โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดของวัสดุซ้อนทับ
(Overmolded temperature) อุณหภูมิของวัสดุพื้น (Substrate temperature) และแรงดันคงค้าง
(Holding pressure) ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก นอกจากนี้ยังได้
ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะสัมผัส (Contact distance) และลักษณะของพื้นผิวสัมผัส (Surface
pattern) ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน จากผลการทดสอบพบว่า ความแข็งแรงการยึดเกาะมีค่า
เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและวัสดุพื้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้น ส่งผลให้ความ
แข็งแรงการยึดเกาะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ จากผลการ
ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนพบว่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงเมื่อ
ระยะสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุล (Intermolecular
diffusion) ที่บริเวณหน้าสัมผัสที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จาก
ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า วัสดุพื้นที่มีพื้นผิวสัมผัสแบบร่องแนวตั้งฉากและร่องแนวนาน
กับทิศทางการรับแรงให้สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ดีกว่าวัสดุพื้นที่มีพื้นผิวสัมผัสแบบ
เรียบ จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการทำนายค่า
ความต้านทานต่อแรงเฉือนในกรณีพื้นผิวสัมผัสแบบเรียบพบว่าให้ผลที่มีความสอดคล้องกับผล
การทดสอบจริง อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ยังคงต้องการการพัฒนาเพื่อใช้ในการ
การทำนายความแข็งแรงการยึดเกาะในกรณีที่วัสดุพื้นมีพื้นผิวสัมผัสแบบต่างๆ

Jatupong Krongthanin 2011: An Investigation into Bond Strength of Injection Overmolded Polypropylene. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr. Somjate Patcharaphun, Dr.-Ing. 81 pages.

The aim of this study 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 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. In this work, the mathematical model was developed in order to predict the shear strength of overmolded part and the analytical results were in well agreement with corresponding experiments. However, the model needs to be further developed in order to accurately predict the shear strength of overmolded part with various surface pattern.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์สมเจตน์ พชรพันธ์
ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา ตลอดจนการให้ความช่วยเหลือแก้ไขปัญหาดังกล่าว
ตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์อภิรัตน์เลาหวัตร ที่ได้ให้คำปรึกษา ตลอดจนการให้ความ
ช่วยเหลือแก้ไขปัญหาดังกล่าว เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณวัชรพงษ์ ชูแก้ว คุณธนวัฒน์ ตั้งเขื่อนขันธุ์ และคุณรวีวัฒน์ รักสัจ นักวิจัย
ของกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตยางและพลาสติก (Plastic and Rubber Processing
Research; PaRP-Group) เพื่อนๆ และน้องๆ ในกลุ่มที่ให้ความช่วยเหลือทุกๆ ด้านงานวิจัย
สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีแห่งชาติที่สนับสนุนทุนวิจัย หัวข้อเรื่อง การศึกษาสมบัติการยึดเกาะกันของชิ้นงานที่
ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์िंग รหัสโครงการ MT-B-53-POL-11-489-G

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาตลอด ข้าพเจ้าหวัง
เป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้เพื่อเป็นพื้นฐานในการวิจัยต่อไปในอนาคตอีกทั้งเป็น
ประโยชน์สำหรับการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมต่อไป

จิตพงศ์ ครอบธานีนทร์
ธันวาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	59
สรุป	59
ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	61
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก ผลทดสอบความแข็งแรงของการยึดเกาะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์แบบทิศทางเดียว	65
ภาคผนวก ข ระยะเวลาการหลอมละลายที่ระยะต่างๆของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์แบบทิศทางเดียว	68
ภาคผนวก ค ผลทดสอบความแข็งแรงการต้านทานต่อแรงเฉือนของการยึดเกาะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์	72
ภาคผนวก ง ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB	76
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	81

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปัจจัยในกระบวนการคิดที่ใช้ในการคิดขั้นรูปวัสดุพื้นและชิ้นงานแบบโอเวอร์โมลดิ้งเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก	36
2	ปัจจัยในกระบวนการคิดที่ใช้ในการคิดขั้นรูปวัสดุพื้นและชิ้นงานแบบโอเวอร์โมลดิ้งเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน	37
3	ระยะสัมผัสและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ใช้ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน	37
4	สมการ C ที่ใช้ทำนายความแข็งแรงการต้านทานต่อแรงเฉือน	56
5	ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์ในสมการ C	56

ตารางผนวกที่

ก1	อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง	66
ก2	อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง	66
ก3	อิทธิพลของแรงดันคงค้างที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง	66
ก4	อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก	66
ก5	อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก	67
ก6	อิทธิพลของแรงดันคงค้างที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก	67
ข1	อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีผลต่อระยะความลึกของการหลอมละลายตลอดแนวสัมผัสของชิ้นงาน โอเวอร์โมลดิ้ง	69
ข2	อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุพื้นที่มีผลต่อระยะความลึกของการหลอมละลายตลอดแนวสัมผัสของชิ้นงาน โอเวอร์โมลดิ้ง	70
ข3	อิทธิพลของแรงดันคงค้างที่มีผลต่อระยะความลึกของการหลอมละลายตลอดแนวสัมผัสของชิ้นงาน โอเวอร์โมลดิ้ง	71
ค1	อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ระยะต่างๆ	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค2	อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ระยะต่างๆ	73
ค3	อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน	73
ค4	อิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุข้อต่อที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะผิวสัมผัสต่างกันของชิ้นงานแผ่นร่องแนวนาน	74
ค5	อิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุพื้นที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะผิวสัมผัสต่างกันของชิ้นงานแผ่นร่องแนวนาน	74
ค6	อิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุข้อต่อที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสต่างกันของชิ้นงานแผ่นร่องแนวตั้งฉาก	74
ค7	อิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุพื้นที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะผิวสัมผัสต่างกันของชิ้นงานแผ่นร่องแนวตั้งฉาก	75

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลด์	2
2	การยึดเกาะกันแบบทางกล (Mechanical interlocking)	2
3	การหลุดลอกของวัสดุชั้นทับออกจากวัสดุพื้น	3
4	ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก	5
5	ลักษณะของสกรูที่ใช้ในเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก	7
6	ลักษณะของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบข้อต่อ	8
7	ลักษณะของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก	8
8	แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น	9
9	แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น	10
10	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีด	10
11	ส่วนประกอบของรูฉีด	11
12	แม่พิมพ์ที่แบบทางวิ่งร้อน	12
13	ลักษณะหน้าตัดของทางวิ่ง	13
14	อัตราส่วนของขนาดทางวิ่งระหว่างทางวิ่งหลักต่อทางวิ่งรอง	14
15	ตัวอย่างการจัดวางแบบทางวิ่งแบบสมมาตร	15
16	ชนิดของทางเข้า	16
17	ขนาดและตำแหน่งของระบบหล่อเย็นในแม่พิมพ์	19
18	ขนาดของช่องระบายอากาศ	19
19	ขั้นตอนและรอบเวลาของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์	20
20	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T^*) และค่าตัวเลขฟูเรียร์	22
21	เครื่องฉีดพลาสติกแบบ 2 หัวฉีดและแบบ 3 หัวฉีด	23
22	เทคนิคต่างๆ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบหลายวัสดุ	24
23	กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแซนด์วิช	25
24	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแซนด์วิช	25
25	กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบใช้น้ำหรือก๊าซช่วย	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ลักษณะผลิตภัณฑ์จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบใช้น้ำหรือก๊าซช่วย	27
27	ลักษณะการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยใช้ระบบการหมุนของแม่พิมพ์	27
28	ลักษณะการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของอินเสิร์ตภายในแม่พิมพ์ฉีด	28
29	การแทรกตัวของสายโซ่โมเลกุลที่บริเวณผิวสัมผัส	29
30	แรงวันเคอวาลส์ที่เกิดขึ้นในทฤษฎีการดูดซับ	29
31	การแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลที่บริเวณผิวสัมผัสที่กลายเป็นเนื้อเดียวกัน	30
32	ลักษณะรอยประสาน	31
33	เครื่องฉีดขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย	34
34	แม่พิมพ์ฉีดแบบโอเวอร์โมลด์ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ	34
35	การออกแบบชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก	35
36	ขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือน	36
37	ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนลักษณะพื้นผิวแบบต่างๆ	38
38	ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ระยะต่างๆ	38
39	แผนการพัฒนาศมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความสามารถในการยึดเกาะ	42
40	อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุซ้อนทับที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก	43
41	พฤติกรรมกรไหลแบบน้ำพุ	44
42	ระยะความลึกการหลอมละลายตลอดแนวสัมผัสจากอิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุซ้อนทับ	44
43	อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก	45
44	ระยะความลึกของการหลอมละลายตลอดแนวสัมผัสจากอิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้น	46
45	อิทธิพลของแรงดันคงค้างที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก	47
46	ระยะความลึกของการหลอมละลายตลอดแนวสัมผัสจากอิทธิพลของแรงดันคงค้าง	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
47 อิทธิพลของอุณหภูมิควัดคู่ซ้อนทับที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะสัมผัสต่างๆ ของชิ้นงานผิวเรียบ	49
48 ภาพตัดตามแนวยาวของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนของชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนของชิ้นงานแบบผิวเรียบ	49
49 อิทธิพลของอุณหภูมิควัดคู่พื้นที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะสัมผัสต่างๆ ของชิ้นงานผิวเรียบ	50
50 ความลึกและระยะทางการหลอมละลายของวัสดุพื้น เมื่อใช้ระยะสัมผัสเท่ากับ 19 mm	51
51 อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน	52
52 ภาพตัดตามแนวยาวที่บริเวณผิวสัมผัสแบบแผ่นเรียบและแผ่นร่องแนวตั้งฉาก	52
53 อิทธิพลของอุณหภูมิควัดคู่ซ้อนทับต่อความแข็งแรงของชิ้นงานแบบร่องแนวนานที่ระยะสัมผัสต่างๆ	53
54 อิทธิพลของอุณหภูมิควัดคู่พื้นต่อความแข็งแรงของชิ้นงานแบบร่องแนวนานที่ระยะสัมผัสต่างๆ	54
55 อิทธิพลของอุณหภูมิควัดคู่ซ้อนทับต่อความแข็งแรงของชิ้นงานแบบร่องแนวตั้งฉากที่ระยะสัมผัสต่างๆ	54
56 อิทธิพลของอุณหภูมิควัดคู่พื้นต่อความแข็งแรงของชิ้นงานแบบร่องแนวตั้งฉากที่ระยะสัมผัสต่างๆ	55
57 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองและจากสมการทางคณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิควัดคู่ซ้อนทับและระยะสัมผัสต่างๆ กัน	57
58 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองและจากสมการทางคณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิควัดคู่พื้นและระยะสัมผัสต่างๆ กัน	58

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American society testing and materials
T _g	=	Glass transition temperature
PP	=	Polypropylene
g	=	Gram
cm ³	=	Cubic centimeter
σ_w	=	Tensile strength of weldlinecontaining specimens
σ_b	=	Tensile strength of non-weldlinecontaining specimens
A _O	=	Area
A _N	=	Contact area
T	=	Temperature at interface
t	=	Contact time
D	=	Diffusion coefficient
ΔG	=	Free energy
K	=	Boltzmann's constant
γ	=	Surface tension
ΔS_m	=	Entropy of mixing
UTM	=	Universal testing machine
mm	=	Millimeter
min	=	Minute
kg	=	Kilogram
°C	=	Degree celsius

การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการ ฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง

An Investigation into Bond Strength of Injection Overmolded Polypropylene

คำนำ

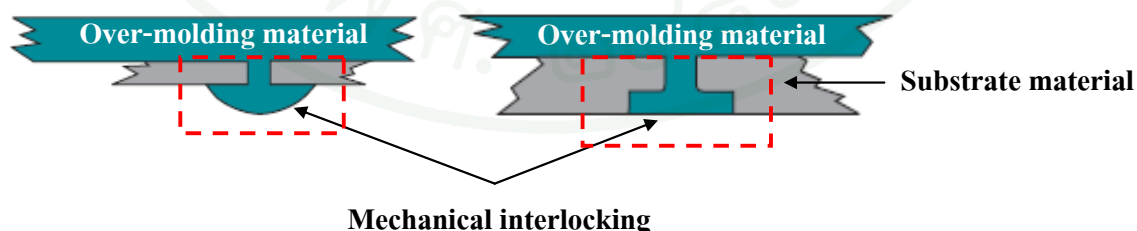
ปัจจุบันผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรม การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุปกรณ์ทางไฟฟ้า อุปกรณ์ทางการแพทย์ อุปกรณ์กีฬา และบรรจุภัณฑ์ ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ กระบวนการฉีด ขึ้นรูป (Injection molding) เนื่องจากให้อัตราการผลิตที่สูง และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความ ซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ (Osswald, 1998; Richardson and Lokensgard, 1996) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความต้องการในการใช้งานในลักษณะที่หลากหลายทั้งในแง่ของความสวยงามและสมบัติ ของผลิตภัณฑ์ในการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องออกแบบและพัฒนากระบวนการ ผลิตให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบ โอเวอร์โมลดิ้ง (Injection over-molding process) (Bill, 2006; Donald and Dominick, 1995) ซึ่งเป็น กระบวนการที่พัฒนามาจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (Conventional injection molding process) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุพอลิเมอร์หลายชนิดในชิ้นงาน เดียวกันโดยไม่จำเป็นต้องทำการประกอบชิ้นงานในแต่ละส่วนเข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถนำไปใช้ งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Ajmani *et al.*, 2006; Barinaga and Dowell, 2004) ดังแสดงใน ภาพที่ 1

คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง โดยทั่วไปแล้ว ขึ้นอยู่กับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด (Mold design) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับ สมบัติความเข้ากันได้ของ วัสดุที่ใช้ (Compatibility) และที่สำคัญคือการปรับตั้งค่าของเครื่องฉีดขึ้นรูป (Processing parameters) ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป (Injection temperature) แรงดันคงค้าง (Holding pressure) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีด (Mold temperature) เป็นต้น (Zhao *et al.*, 2008; Chia *et al.*, 1998)



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลดิ้ง

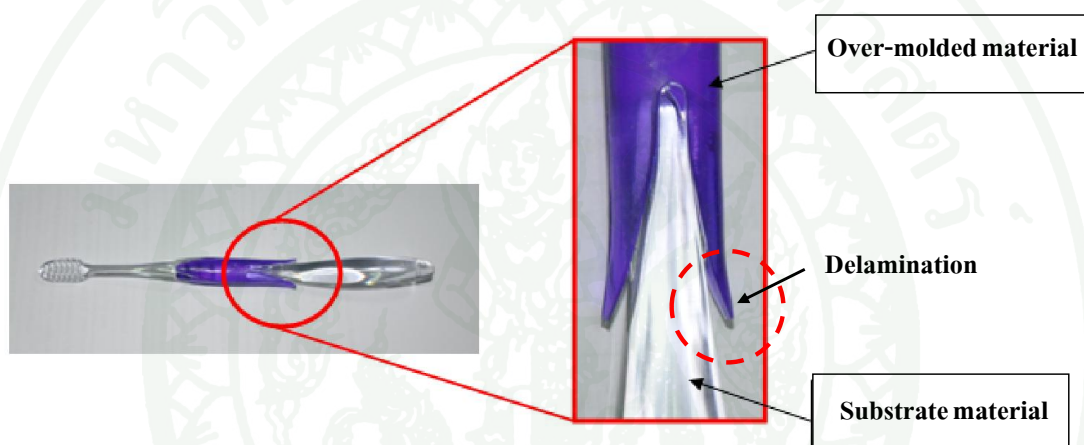
โดยทั่วไปแล้วปัญหาที่พบบ่อยมากในอุตสาหกรรมการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้งคือ ความแข็งแรงของการยึดเกาะ (Bond strength) ระหว่างวัสดุพอลิเมอร์ (ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้ระหว่างวัสดุเทอร์โมพลาสติกและวัสดุยาง) ที่มีค่าต่ำมาก เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้ว (Polarity) และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด (Modic., 1999, Birley *et al.*, 1992) ซึ่งการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ทางโรงงานผู้ผลิตส่วนใหญ่แก้ปัญหาโดยการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดให้เกิดการไหลทะลุของพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งเป็นวัสดุซ้อนทับ (Over-molded material) ไปยังอีกด้านของวัสดุพื้น (Substrate material) เพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันแบบทางกล (Mechanical interlocking) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การยึดเกาะกันแบบทางกล (Mechanical interlocking)

ที่มา: Overmoulding Guide, Total TPE Solutions (2004)

การแก้ไขปัญหาโดยวิธีการดังกล่าว สามารถเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดได้ อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากราคาค้นทุนในการจัดสร้างแม่พิมพ์ที่เพิ่มมากขึ้นแล้ว ความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดยังขึ้นอยู่กับทิศทางและตำแหน่งของการยึดเกาะแบบเชิงกลภายในแม่พิมพ์ฉีด กล่าวคือในบริเวณหรือทิศทางอื่นซึ่งห่างออกมาจากตำแหน่งของการยึดเกาะแบบเชิงกล สมบัติการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดยังคงมีค่าต่ำมาก ส่งผลให้เกิดการหลุดลอก (Delamination) ของวัสดุซ้อนทับจากวัสดุพื้น ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การหลุดลอกของวัสดุซ้อนทับออกจากวัสดุพื้น

จากปัญหาของความแข็งแรงในการยึดเกาะของวัสดุพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิวัสดุพื้น (อุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีด) ระยะและลักษณะพื้นผิวสัมผัส ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก และสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้ในงานวิจัยยังได้นำผลการทดลองที่ได้ไปพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการทำนายความแข็งแรงการยึดเกาะที่เกิดขึ้น ผลสำเร็จจากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ ผู้ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีด รวมถึงโรงงานผู้ผลิตต่อไป

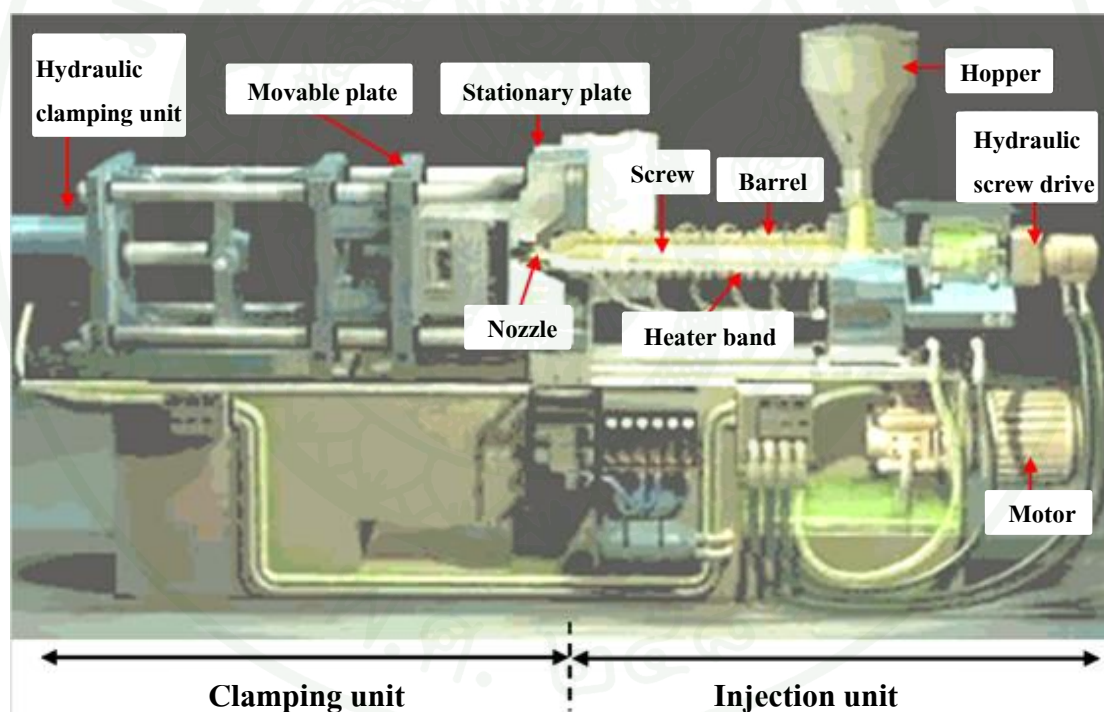
วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานแบบโอเวอร์โมลด์िंग เพื่อทดสอบความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ ได้แก่ สมบัติการต้านทานต่อแรงดึง สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก และสมบัติการต้านทานต่อแรงเฉือน
2. เพื่อทราบถึงปัจจัยสำคัญในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์िंगที่มีต่อความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างพอลิโพรพิลีน
3. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายความแข็งแรงการยึดเกาะของวัสดุพอลิเมอร์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์िंग

การตรวจเอกสาร

1. กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (Conventional injection molding process)

กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการผลิตที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากให้กำลังการผลิตสูง และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะซับซ้อนได้ดี ซึ่งกระบวนการฉีดขึ้นรูปนั้นสามารถใช้วัสดุที่เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) และอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเครื่องฉีดที่ถูกปรับเปลี่ยนให้เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลักคือ ชุดฉีดและชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก

1.1 ชุดฉีด (Injection unit) เป็นส่วนประกอบของเครื่องฉีดที่ทำหน้าที่หลอมละลายเม็ดพอลิเมอร์ และให้แรงดันเพื่อให้เนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป โดยชุดฉีดประกอบด้วยส่วนสำคัญ ดังนี้

1.1.1 ห้องหลอม (Barrel) ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์โดยใช้เข็มขัดให้ความร้อน (Heater band) ซึ่งหุ้มอยู่ภายนอกและควบคุมอุณหภูมิของพอลิเมอร์

1.1.2 หัวฉีด (Nozzle) มีลักษณะเป็นรูขนาดเล็ก อยู่ที่บริเวณด้านหน้าสุดของห้องหลอม ทำหน้าที่เพิ่มความเร็วของพอลิเมอร์หลอมเหลวก่อนไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ฉีด

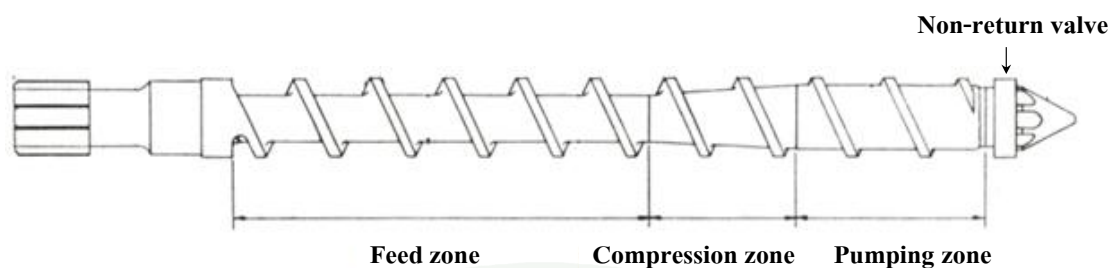
1.1.3 สกรู (Screw) เป็นส่วนที่สำคัญในกระบวนการหลอมละลายเม็ดพอลิเมอร์ และให้แรงดันในการฉีดขึ้นรูปรวมถึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการผสมและความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลว ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยสามารถแบ่งสกรูออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ช่วงการลำเลียง (Feed zone) เป็นช่วงที่ร่องเกลียวของสกรูมีความลึกมากที่สุด และมีความยาวประมาณครึ่งหนึ่งของสกรู ทำหน้าที่ลำเลียงพอลิเมอร์ลงมาจากกรวยเติม (Hopper) ไปยังช่วงการอัด

ช่วงการอัด (Compression zone) เป็นช่วงที่สกรูมีความลึกของร่องเกลียวลดลง โดยที่ช่วงนี้เริ่มเกิดการหลอมละลายของเม็ดพอลิเมอร์ เนื่องจากความร้อนจากเข็มขัดให้ความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) ระหว่างเม็ดพอลิเมอร์กับผนังห้องหลอม อีกทั้งเม็ดพอลิเมอร์กับสกรูตลอดจนเม็ดพอลิเมอร์ด้วยกันเอง ส่งผลให้เม็ดพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลว

ช่วงเพิ่มความดัน (Pumping zone) เป็นช่วงที่สกรูมีความลึกของร่องเกลียวน้อยที่สุด เพื่อให้เม็ดพอลิเมอร์ที่ยังไม่เกิดการหลอมเหลวเกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่บริเวณนี้ และยังทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวกลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เพื่อพร้อมสำหรับการฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ต่อไป

1.1.4 วาล์วกันไหลย้อนกลับ (Non-return valve) อยู่บริเวณหัวของสกรูทำหน้าที่ป้องกันการไหลย้อนกลับของพอลิเมอร์หลอมเหลวในขณะฉีดขึ้นรูป



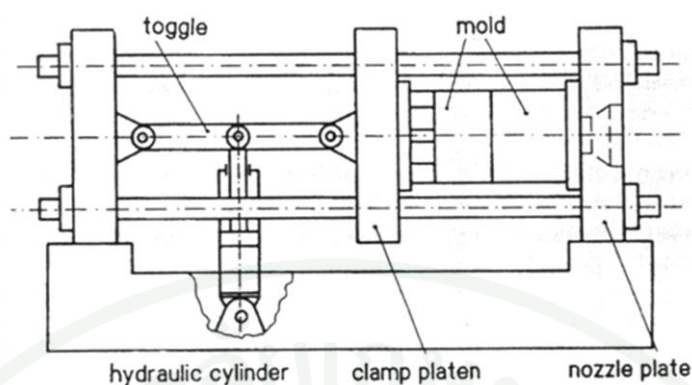
ภาพที่ 5 ลักษณะของสกรูที่ใช้ในเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก

ที่มา: Rauwendall (1986)

1.1.5 ชุดขับเคลื่อน (Drive unit) ประกอบด้วยมอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่หมุนสกรูเพื่อให้เกิดการหลอมละลายของพอลิเมอร์ และกระบอกไฮดรอลิกซึ่งทำหน้าที่ดันสกรูไปด้านหน้าในจังหวะฉีด

1.2 ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนเพื่อปิดและเปิดแม่พิมพ์ ในระหว่างการทำงานของเครื่องฉีด โดยแบ่งออกจากรูปแบบการปิด-เปิดแม่พิมพ์ ได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

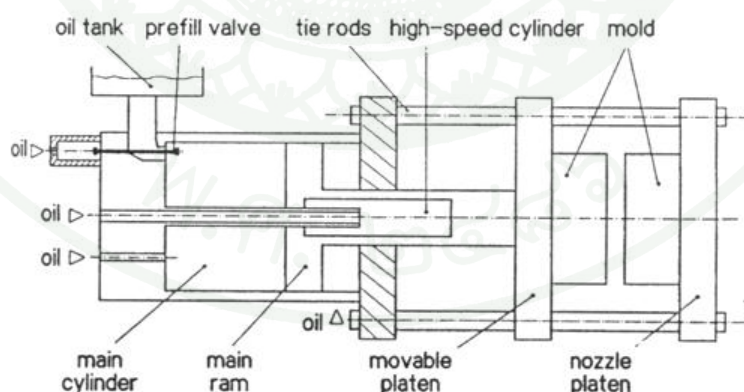
1.2.1 ระบบปิด-เปิดแบบข้อพับ (Toggle clamping system) ใช้ระบบไฮดรอลิกหรือมอเตอร์ดันข้อพับให้ปิดแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 6 มีระบบการทำงานแบบล็อกอัตโนมัติ (Self-locking) เมื่อใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนาที่เหมาะสม ทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ในการปิดแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตาม ระบบปิด-เปิดแบบข้อพับมีข้อด้อยในเรื่องของการบำรุงรักษา และความแม่นยำของการใช้งานที่ลดลงเนื่องจากการสึกหรอของข้อต่อ เมื่อใช้งานไปในระยะเวลานาน



ภาพที่ 6 ลักษณะของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบข้อต่อ

ที่มา: Jones (2008)

1.3.2 ระบบปิด-เปิดแบบไฮดรอลิก (Hydraulic clamping system) การปิด-เปิดแม่พิมพ์ควบคุมด้วยระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งมีข้อเด่นคือสามารถควบคุมระยะ และแรงในการปิด-เปิดได้อย่างแม่นยำ ให้แรงดันปิดที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามระบบปิด-เปิดแบบข้อไฮดรอลิก มีราคาค่อนข้างสูง สิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากระบบไฮดรอลิกต้องให้แรงดันคงค้างไว้ในขณะที่ปิดแม่พิมพ์ฉีด

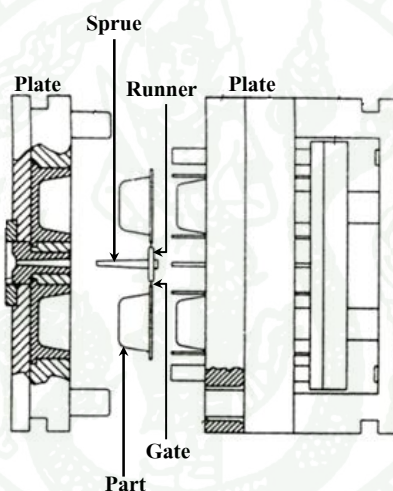


ภาพที่ 7 ลักษณะของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก

ที่มา: Jones (2008)

1.3 แม่พิมพ์ (Mold unit) คือส่วนที่เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ โดยทั่วไป การเลือกประเภทของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของชิ้นงานและเงื่อนไขต่างๆ ในการผลิตซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

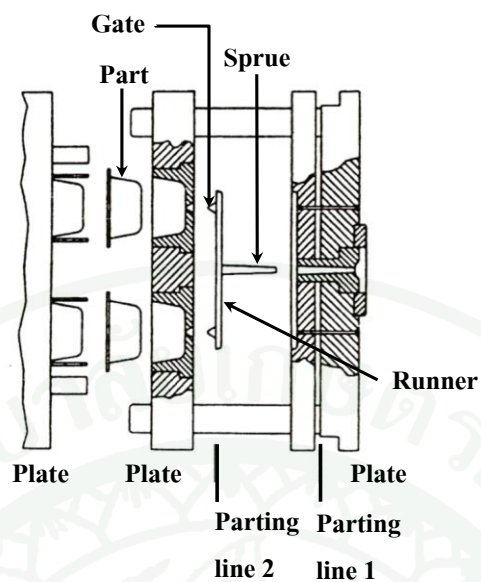
แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น (Two-plate injection mold) เป็นแม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตชิ้นงานที่ปราศจากอันเดอร์คัท (Undercut) ลักษณะของแม่พิมพ์แบบนี้มีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ (Parting line) เพียงเส้นเดียวหรือมีช่องสำหรับปลดชิ้นงาน ทางวิ่งและทางเข้าเพียงช่องเดียวเท่านั้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีส่วนของรูฉีด ทางวิ่ง และทางเข้าติดออกมาด้วย จึงจำเป็นต้องมีการตัดแต่งชิ้นงานหลังกระบวนการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 8



ภาพที่ 8 แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น

ที่มา: Osswaldet al. (2007)

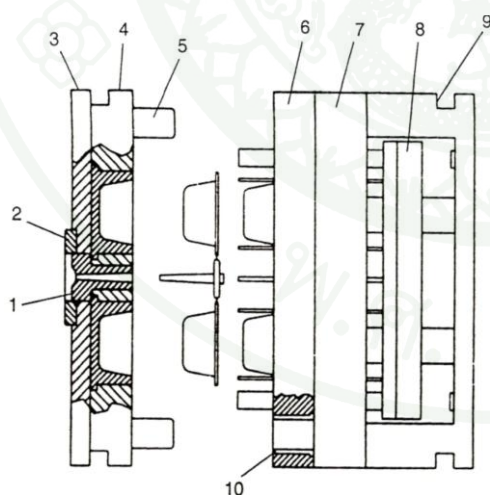
แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น (Three-plate injection mold) แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่นเป็นแม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบให้มีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ 2 เส้นหรือมีช่องเปิดแม่พิมพ์ 2 ช่อง ส่วนใหญ่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ที่ต้องการให้มีระบบปลดรูฉีด ทางวิ่งและทางเข้าออกจากชิ้นงานโดยอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 9



ภาพที่ 9 แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น

ที่มา: Osswaldet al. (2007)

โดยส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีดประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้



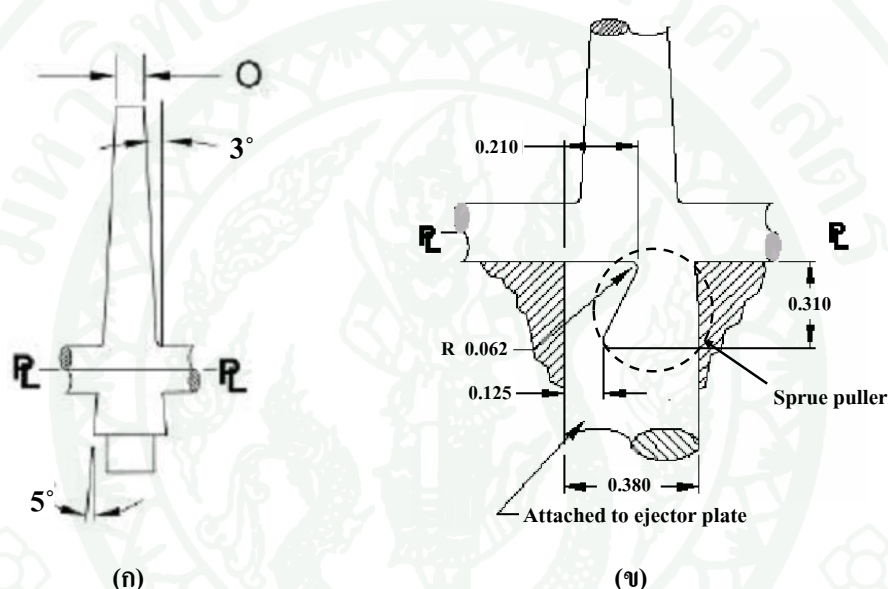
Part names:

- | | |
|----------------------|-------------------------|
| 1- Sprue bushing | 6- Punch or force plate |
| 2- Locating spring | 7- Support plate |
| 3- Top clamp plate | 8- Ejector plates |
| 4- Cavity or A plate | 9- Ejector housing |
| 5- Leader pin | 10- Leader pin bushing |

ภาพที่ 10 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีด

ที่มา: Osswaldet al. (2007)

1.3.1 รูฉีดยิ่ง (Sprue) เป็นส่วนแรกของแม่พิมพ์ที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ และทำหน้าที่ส่งผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลวไปยังทางวิ่งโดยทั่วไปการออกแบบรูฉีดยิ่งนิยมออกแบบให้มีขนาดของมุมเอียงอยู่ระหว่าง 3-5 องศา ดังแสดงในภาพที่ 11(ก) และมีบ่อพักเย็น (Cold slug) อยู่บริเวณด้านใต้ของรูฉีดยิ่งเพื่อป้องกันการแข็งตัวของพลาสติกหลอมเหลวในทางวิ่งและช่วยในการดึงก้านรูฉีดยิ่งออกจากปลอกรูฉีดยิ่งในขณะที่เปิดแม่พิมพ์ ซึ่งมีหลายลักษณะเป็นตัวยิง (Z-pin sprue puller) แม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 11(ข)



ภาพที่ 11 ส่วนประกอบของรูฉีดยิ่ง (ก) ก้านรูฉีดยิ่ง (ข) บ่อพักเย็น

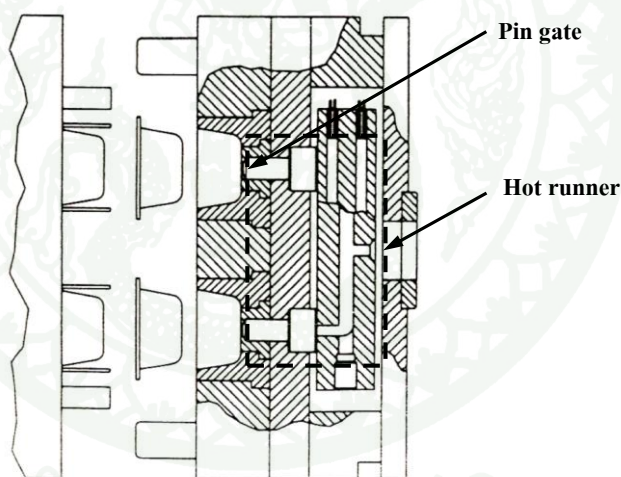
ที่มา: Beaumont (2004)

1.3.2 ทางวิ่ง (Runner) ทำหน้าที่นำพาพอลิเมอร์หลอมเหลวจากรูฉีดยิ่งเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ (Cavity) โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ทางวิ่งเย็น (Cold runner) เป็นแบบทางวิ่งที่อยู่ในระนาบเดียวกับชิ้นงาน ใช้กับแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น ทำให้ติดกับชิ้นงานเมื่อปลดออกและถูกตัดออกไปในภายหลัง ข้อดี

ของทางวิ่งเย็น คือมีราคาถูกและออกแบบได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ต้องมีการตัดแต่งชิ้นงานออกจากทางวิ่ง หลังผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปซึ่งทำให้เพิ่มเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิต

2. ทางวิ่งร้อน (Hot runner) เป็นทางวิ่งที่จำเป็นต้องใช้ร่วมกับแม่พิมพ์แบบสามแผ่นโดยให้ความร้อนกับแผ่นแม่พิมพ์ส่วนที่เป็นทางวิ่ง เพื่อรักษาอุณหภูมิของพลาสติกให้อยู่ในช่วงของการหลอมเหลว โดยมีฉนวนทำหน้าที่ป้องกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างแผ่นทางวิ่งและแผ่นเบ้าแม่พิมพ์ ดังนั้นพอลิเมอร์หลอมเหลวในทางวิ่งร้อนจึงสามารถใช้ในการฉีดของรอบถัดไปโดยไม่เป็นของเสียในกระบวนการผลิต ดังแสดงในภาพที่ 12 นอกจากนี้ ทางวิ่งร้อนยังมีข้อดีในด้านลดพลังงานและเวลาที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากไม่จำเป็นต้องรอให้พอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณทางวิ่งหรือรูฉีดเย็นตัวก่อนเปิดแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของระบบทางวิ่งร้อนได้แก่ ต้นทุนของราคาแม่พิมพ์ รวมไปถึงการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Degradation) ที่ผ่านรูฉีดแบบเข็ม (Pin gate) ซึ่งทำให้เกิดความร้อนสูงจากแรงเฉือน

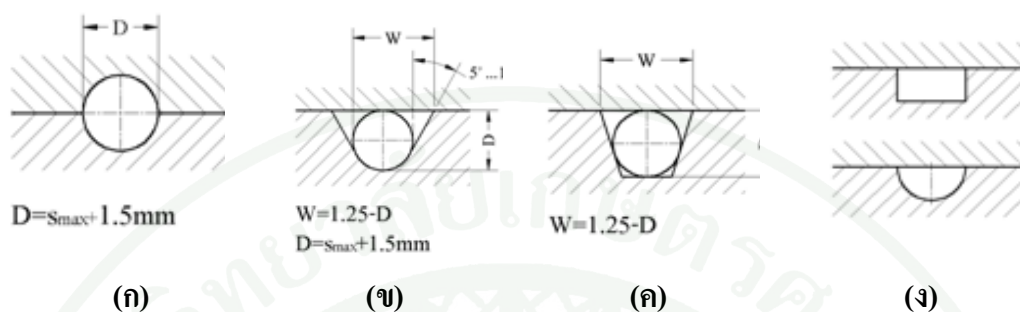


ภาพที่ 12 แม่พิมพ์ที่แบบทางวิ่งร้อน

ที่มา: Jones (2008)

ในการออกแบบทางวิ่งนั้นต้องพิจารณาถึงรูปร่างหน้าตัดของทางวิ่ง ขนาดของทางวิ่งและความสมมาตรของทางวิ่ง (Runner balance) ซึ่งสามารถทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลเข้าเบ้าแม่พิมพ์ของแม่พิมพ์พร้อมกันในกรณีของแม่พิมพ์ที่มีหลายเบ้าแม่พิมพ์และทางวิ่งควรมีระยะทางการไหลสั้นที่สุด เพื่อป้องกันการสูญเสียความดันในขณะไหล

ลักษณะหน้าตัดของทางวิ่งที่นิยมใช้ในแม่พิมพ์ฉีดมี 3 แบบ คือ แบบกลม (Round) แบบพาราโบลา (Parabolic) และแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ลักษณะหน้าตัดของทางวิ่ง (ก) ทางวิ่งแบบกลม (ข) ทางวิ่งแบบพาราโบลา (ค) ทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (ง) ทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมและครึ่งวงกลม

ที่มา: Beaumont (2004)

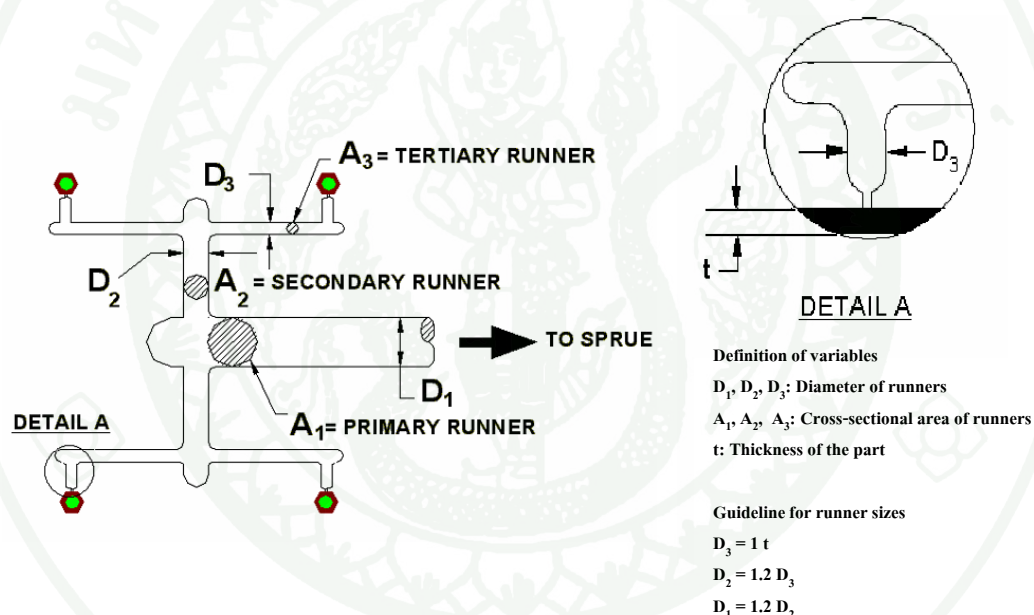
ทางวิ่งแบบกลมมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ ส่งผลให้มีการสูญเสียความร้อนและความเสียดทานน้อย จึงมีอัตราการเย็นตัวที่ช้าที่สุด สามารถให้แรงดันฉีดและแรงดันคงค้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อจำกัดของทางวิ่งแบบกลมคือ การกัดเซาะร่องที่แม่พิมพ์สองด้านต้องอาศัยความแม่นยำมากจึงมีค่าใช้จ่ายและเวลาในการผลิตที่สูง

แบบพาราโบลา มีลักษณะคล้ายกับหน้าตัดรูปวงกลม แต่มีการกัดเซาะร่องที่แผ่นแม่พิมพ์เพียงด้านเดียวทำให้สามารถผลิตได้ง่ายกว่าโดยปกติแล้วอยู่บนแม่พิมพ์ส่วนที่เคลื่อนที่ เพราะสามารถปลดชิ้นงานออกได้ง่ายกว่า ข้อดีของทางวิ่งแบบพาราโบลา คือ มีการสูญเสียความร้อนและพลาสติกมากกว่าเมื่อเทียบกับหน้าตัดรูปวงกลม

ทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมคางหมูมีลักษณะคล้ายกับหน้าตัดแบบพาราโบลา การกัดเซาะร่องทำได้ง่ายกว่า แต่มีการสูญเสียความร้อนและพลาสติกมากกว่าเมื่อเทียบกับหน้าตัดแบบพาราโบลา

ทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมและครึ่งวงกลม เป็นลักษณะของทางวิ่งที่ไม่เหมาะสม เนื่องจาก มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเนื้อพลาสติกมาก มีการสูญเสียความร้อนและมีความเสียดทานสูง ส่งผลให้มีอัตราการเย็นตัวเร็วเมื่อเทียบกับทางวิ่งในลักษณะอื่นๆ

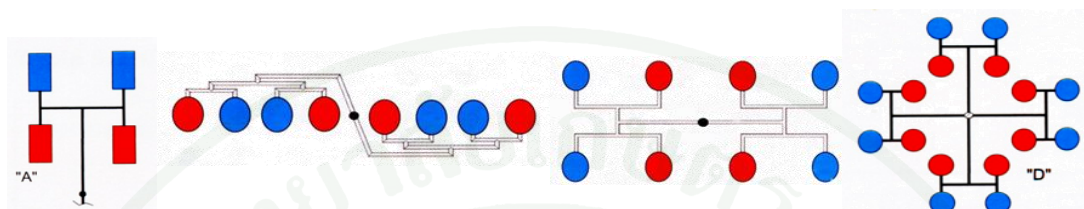
ขนาดของทางวิ่งผู้ออกแบบต้องพิจารณาถึงขนาดของทางวิ่งให้เหมาะสมกับชิ้นงานแต่ละแบบ โดยการพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ เช่น รูปร่างหน้าตัดของทางวิ่งและปริมาตรของชิ้นงาน ระยะทางจากทางวิ่งหลักหรือรูฉีดไปยังเบ้าแม่พิมพ์ การหล่อเย็น ระบบทางวิ่ง ขนาดของมอดก๊ทที่สามารถหาใช้ได้ และชนิดของพลาสติกที่ใช้ เป็นต้น โดยอัตราส่วนระหว่างทางวิ่งหลัก (Primary runner) และทางวิ่งรอง (Secondary runner) ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 อัตราส่วนของขนาดทางวิ่งระหว่างทางวิ่งหลักต่อทางวิ่งรอง

การร่างแบบทางวิ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ จำนวนของเบ้าแม่พิมพ์ รูปทรงของชิ้นงาน ชนิดของแม่พิมพ์ (แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่นหรือสามแผ่น) และชนิดของทางเข้า ในการออกแบบเพื่อร่างแบบทางวิ่งมีข้อพิจารณาหลัก 2 ประการ คือ ความยาวของทางวิ่งควรออกแบบให้สั้นที่สุดเพื่อลดการสูญเสียแรงดัน (Pressure losses) รวมทั้งพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งซึ่งโดยทั่วไปขนาดของทางเข้าลำดับสาม (Tertiary runner) ควรมีขนาดเท่ากับความหนาของชิ้นงาน และทางวิ่งควรมีขนาด 1.2 เท่าของทางวิ่งลำดับสาม เช่นเดียวกับทางวิ่งหลักซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.2

เท่าของทางวิ่งรอง นอกจากนี้ระบบทางวิ่งต้องสมมาตรกัน กล่าวคือ ระยะทางที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากกรู๊นดไปยังทางเข้าของชิ้นงานแต่ละชิ้นต้องเท่ากัน เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าเต็มเบ้าแม่พิมพ์พร้อมกัน โดยลักษณะทางวิ่งที่สมมาตร แสดงในภาพที่ 15

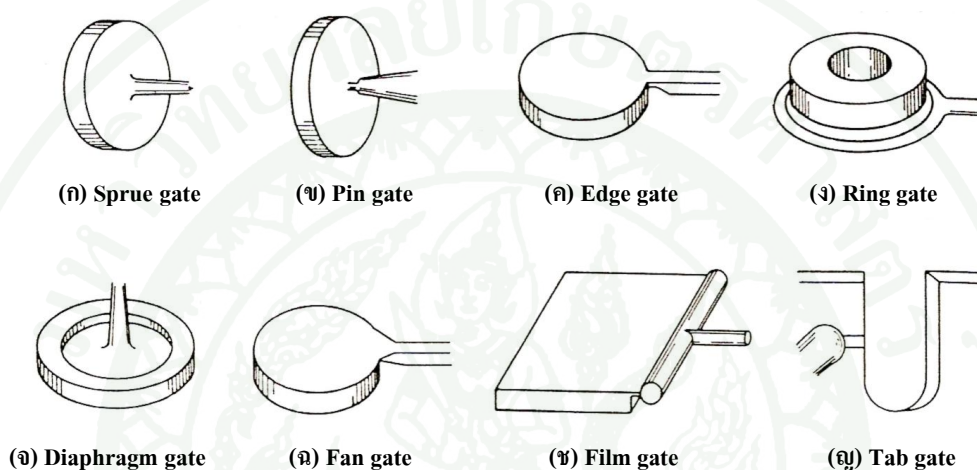


ภาพที่ 15 ตัวอย่างการจัดวางแบบทางวิ่งแบบสมมาตร

1.3.3 ทางเข้า (Gate) เป็นส่วนประกอบของแม่พิมพ์อยู่ระหว่างทางวิ่งและเบ้าแม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นช่องขนาดเล็กและบาง เพื่อให้สามารถตัดออกจากชิ้นงานได้ง่าย อีกทั้งทำหน้าที่เพิ่มความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวให้สามารถไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้เต็มเบ้า เนื่องจากอัตราความเร็วที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ความหนืดมีค่าลดลงตามพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) นอกจากนี้ในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเต็มเบ้าแม่พิมพ์ ทางเข้ายังทำหน้าที่ป้องกันพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลย้อนเมื่อสกรูหมุนถอยหลังเพื่อเตรียมเนื้อในรอบการฉีดถัดไปเนื่องจากเป็นส่วนที่แข็งตัวเร็วที่สุดการออกแบบทางเข้าขึ้นอยู่กับลักษณะและรูปทรงของชิ้นงาน โดยต้องพิจารณาถึงขนาดของทางเข้า (Gate size) และชนิดของทางเข้า (Type of gate) รวมทั้งตำแหน่งของทางเข้าซึ่งควรอยู่บริเวณที่ชิ้นงานหนาสุด

ขนาดของทางเข้า (Gate size) ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ขนาดและลักษณะของชิ้นงาน ความหนาของผนังชิ้นงาน (Wall thickness) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยคำนึงถึงปัจจัยในกระบวนการฉีด ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ฉีด เป็นต้น ในทางปฏิบัติการเลือกขนาดของทางเข้าสำหรับชิ้นงานทั่วไป มีความหนาอยู่ที่ 40 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของความหนาผนังชิ้นงานในส่วนที่ติดอยู่กับทางเข้า และความยาวของทางเข้า (Gate length) ไม่ควรเกิน 1.5 มิลลิเมตร

ชนิดของทางเข้า (Type of gate) เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าเบ้าแม่พิมพ์ได้เป็นอย่างดี จึงต้องเลือกใช้ชนิดของทางเข้าให้เหมาะสม ชนิดของทางเข้าที่นิยมใช้ได้แก่ ทางเข้าแบบก้านรูฉีด (Sprue gate) ทางเข้าแบบขอบ (Edge gate) ทางเข้าแบบพัด (Fan gate) ทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate) ทางเข้าแบบเข็ม (Pin gate) ทางเข้าแบบวงแหวน (Ring gate) ทางเข้าแบบม่าน (Diaphragm gate) และทางเข้าแบบแถบ (Tab gate) ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ชนิดของทางเข้า (ก) แบบก้านรูฉีด (ข) แบบเข็ม (ค) แบบขอบ (ง) แบบวงแหวน (ฉ) แบบพัด (ช) แบบฟิล์ม (จ) แบบม่าน และ (ญ) แบบแถบ

ที่มา: Beaumont (2004)

ทางเข้าแบบก้านรูฉีด (Sprue gate) เป็นทางเข้าที่พอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์โดยตรงจากรูฉีด เหมาะสำหรับการฉีดขึ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ในกรณีของแม่พิมพ์แบบสองแผ่นสามารถฉีดได้เพียง 1 คาวีตี้ ข้อด้อยวิธีนี้คือ ต้องทำการตัดแต่งชิ้นงานหลังฉีดและปรากฏรอยตำหนิของทางเข้าบริเวณผิวของชิ้นงานที่ชัดเจน โดยมีการออกแบบให้ปลายทางเข้ามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร แล้วให้เทยาวลงมาโดยมีขนาดของมุมอยู่ระหว่าง 3-5 องศา และให้ความยาวของทางเข้าสั้นที่สุดเท่าที่ทำได้ดังแสดงไว้ในภาพที่ 16(ก)

ทางเข้าแบบเข็ม (Pin gate) เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก และมีลักษณะซับซ้อน โดยมีจุดเด่น คือ กำหนดบริเวณทางเข้ามีขนาดเล็กขนาดของทางเข้าแบบเข็มที่เหมาะสมคือ

มีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ที่ 40 ถึง 50% ของความหนาของผนังและมีความยาวของทางเข้าประมาณ 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 16(ข)

ทางเข้าแบบขอบ (Edge gate) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดรอยตำหนิจากทางเข้า โดยให้ตำแหน่งทางเข้าอยู่ที่บริเวณขอบของชิ้นงาน โดยตัดเฉียงร่องสี่เหลี่ยมบนแม่พิมพ์ด้านใดด้านหนึ่งเพื่อเชื่อมต่อระหว่างทางวิ่งกับเบ้าแม่พิมพ์ ขนาดของทางเข้าควรมีความหนาไม่เกิน 0.5 ถึง 0.7 เท่าของความหนาชิ้นงานและมีความยาวของทางเข้าประมาณ 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร ลักษณะของทางเข้าแบบขอบแสดงดังภาพที่ 16(ค)

ทางเข้าแบบม่าน (Diaphragm gate) ทางเข้าแบบม่านมีจุดเชื่อมต่อไปจนถึงทางเข้ารูปร่างแหวนที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางด้านในของท่อเล็กน้อย ทางเข้าแบบนี้ทำให้เกิดเนื้อวัสดุเป็นรูปจาน ทำหน้าที่เหมือนทางวิ่งให้พอลิเมอร์ไหลออกจากจุดออกไปรอบๆ เป็นรัศมีเข้าไปยังทางเข้าของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 16(จ) ขนาดของทางเข้าในจุดเริ่มต้นควรมีความหนาน้อย 1.25 เท่าของความหนาของชิ้นงาน มีความยาวประมาณ 0.5 มิลลิเมตรและทางเข้าก่อนเข้าชิ้นงานควรมีความหนา 50 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของความหนาของผนัง

ทางเข้าแบบวงแหวน (Ring gate) หน้าที่และการใช้งานของทางเข้าแบบนี้ คล้ายคลึงกับทางเข้าแบบม่าน แต่เหมาะกับชิ้นงานที่เป็นลักษณะท่อในแม่พิมพ์ชนิดแบบสองแผ่นที่มีควาดีมากกว่าหนึ่งชุด ทางเข้าแบบวงแหวนมีทางเข้าของพอลิเมอร์ไหลรอบๆ ผิวเส้นรอบวงด้านนอกของชิ้นงาน (ซึ่งตรงข้ามกับผิวด้านในที่ใช้ในทางเข้าแบบม่าน) ดังภาพที่ 16(ง) เป็นทางเข้าที่สามารถใช้ได้กับทุกทางวิ่งการออกแบบทางเข้าใช้หลักการเดียวกันกับทางเข้าแบบฟิล์ม

ทางเข้าแบบพัด (Fan gate) เป็นทางเข้าแบบขอบชนิดหนึ่งแต่มีขนาดความกว้างที่มากกว่าและมีลักษณะเหมือนพัด ดังแสดงในภาพที่ 16(ฉ) (โดยปกติเริ่มขยายจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางวิ่งที่ใช้) ทางเข้าแบบพัดเหมาะกับชิ้นงานที่มีพื้นที่กว้างและมีผนังบาง เนื่องจากช่วยกระจายการไหลของพอลิเมอร์ไหลเข้าไปในเบ้าแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอ แต่ข้อด้อยของทางเข้าแบบนี้คือ เหลือรอยตำหนิขนาดใหญ่บนชิ้นงานและต้องทำการตัดแต่งชิ้นงานอีกครั้ง ขนาดของทางเข้าแบบพัดควรมีความหนาสูงสุดไม่เกิน 70% ของความหนาชิ้นงาน โดยที่มีความกว้างตั้งแต่ 6 มิลลิเมตรขึ้นไปจนถึง 25 เปอร์เซ็นต์ของความกว้างของเบ้าแม่พิมพ์

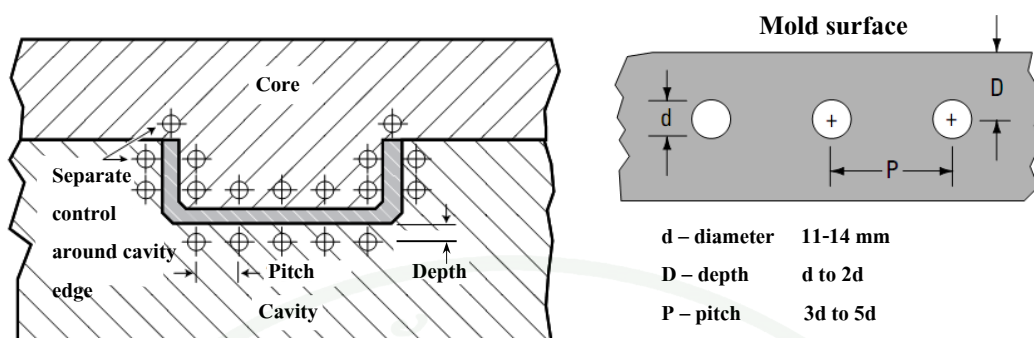
ทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate) มีลักษณะเหมือนทางเข้าแบบขบลิ่เหลี่ยมที่มีขนาดยาวและใช้ผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ที่มีผนังบางซึ่งสามารถยืดหยุ่นตัวได้ โดยปกติจะวางตำแหน่งทางเข้าขนานไปตลอดความกว้างของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 16(ข) แต่อาจให้มีความหนาที่บางกว่าในตอนแรกได้ เพื่อแก้ปัญหาในการตัดแต่งชิ้นงานหลังการฉีด ทางเข้าแบบฟิล์มมีพื้นที่ทางการไหลขนาดใหญ่ทำให้พอลิเมอร์ไหลอมเหลวไหลเต็มเบ้าแม่พิมพ์ได้เร็ว แต่อาจมีข้อด้อยคือ มีรอยตำหนิบนผิวชิ้นงานและต้องทำการตัดแต่งชิ้นงาน โดยทั่วไปมีความหนาของทางเข้าอยู่ที่ 0.25 ถึง 1.5 มิลลิเมตร

ทางเข้าแบบแถบ (Tab gate) เป็นการออกแบบทางเข้าที่ใช้กับชิ้นงานที่เป็นแท่งตันซึ่งมีหน้าตัดเป็นแนวยาวโดยทำการฉีดเข้าทางบริเวณด้านข้างของชิ้นงาน ดังภาพที่ 6(ญ) ทางเข้าขบลิ่เหลี่ยมจะเชื่อมต่อระหว่างแถบและทางวิ่ง รอยต่อระหว่างทางเข้ากับแถบทำเป็นมุมฉากเพื่อป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ไหลอมเหลวพุ่งเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์และแข็งตัวอย่างรวดเร็ว

1.3.4 เบ้าแม่พิมพ์ (Cavity) เป็นส่วนของแม่พิมพ์ที่พอลิเมอร์ไหลอมเหลวถูกฉีดเข้าไปเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ตามรูปร่างที่ต้องการ

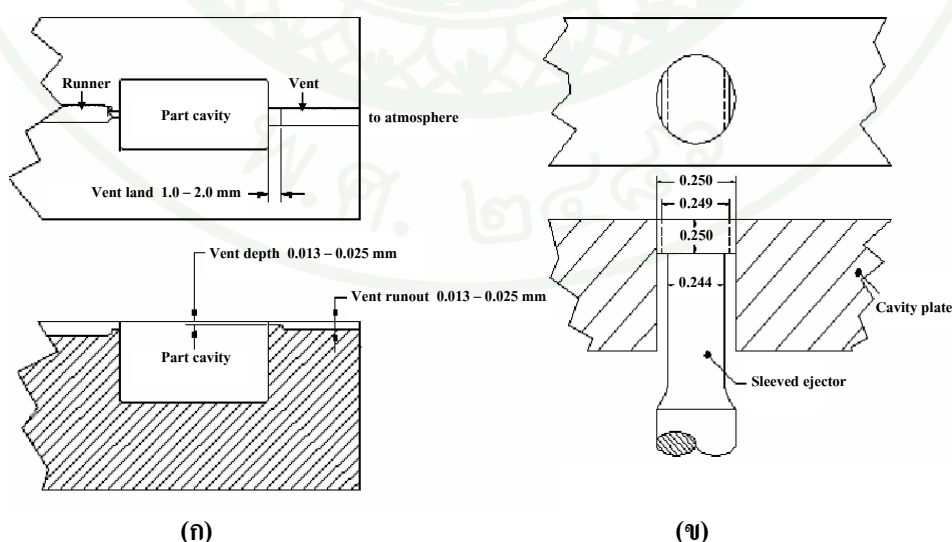
1.3.5 ระบบนำปัดชิ้นงาน (Ejector system) ทำหน้าที่นำปัดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ภายหลังจากการเย็นตัวแล้ว โดยมีก้านกระทุ้ง (Ejector pin) อยู่ภายในเพื่อนำปัดชิ้นงานออกมา

1.3.6 ระบบหล่อเย็น (Cooling system) ทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด เนื่องจากถ้าไม่มีระบบดังกล่าว เมื่อผลิตชิ้นงานจำนวนมากความร้อนจากเนื้อพอลิเมอร์เกิดการสะสมอยู่ในแม่พิมพ์ส่งผลให้แม่พิมพ์มีความร้อนสูงทำให้ผลิตชิ้นงานได้น้อยลง เนื่องจากรอบเวลาการผลิตที่มากขึ้นและยังส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานในแง่ของผิวชิ้นงานและขนาดไม่ได้ตามแบบที่กำหนดโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหล่อเย็นควรอยู่ที่ประมาณ 11 ถึง 14 มิลลิเมตร ส่วนตำแหน่งของระบบหล่อเย็นห่างจากผนังแม่พิมพ์ประมาณ 1 ถึง 2 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลาง และระยะระหว่างท่อหล่อเย็นเท่ากับ 3 ถึง 5 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ขนาดและตำแหน่งของระบบหล่อเย็นในแม่พิมพ์

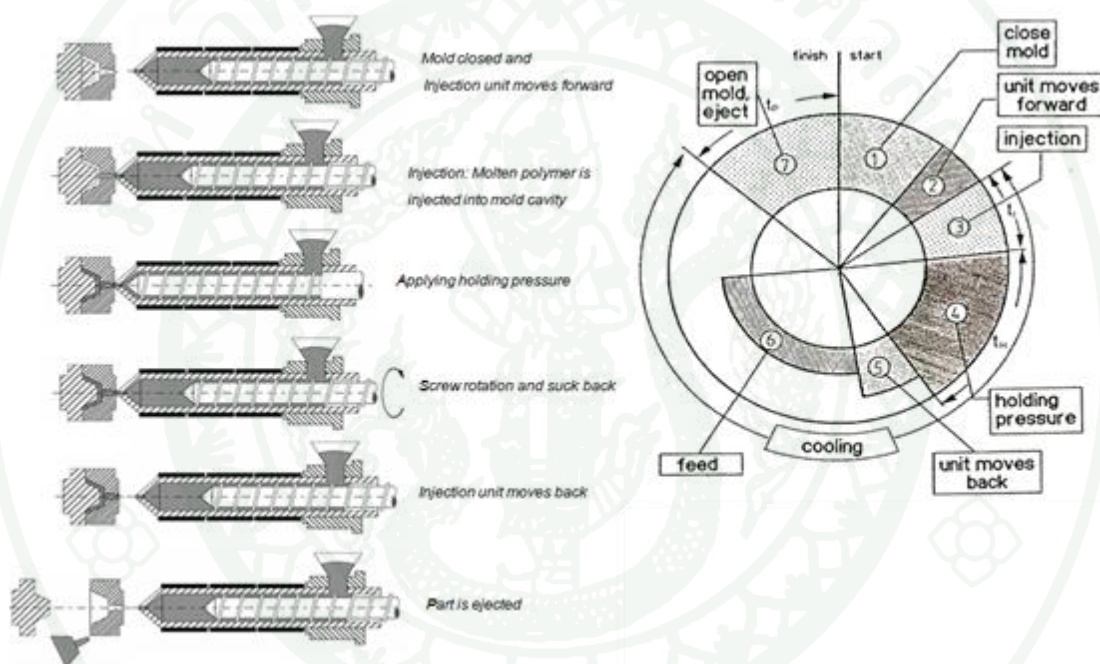
1.3.7 ช่องระบายอากาศ (Venting) ช่องระบายอากาศควรมีความลึก (Vent depth) จากระยะของแม่พิมพ์ (Parting line) ในช่วงระหว่าง 0.013 ถึง 0.025 มิลลิเมตร โดยมีความยาวประมาณ (Vent land) ที่ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร และเพื่อเป็นการระบายอากาศจากเบ้าแม่พิมพ์เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ จึงต้องมีช่องระบายอากาศระหว่างปลายของช่องระบายอากาศไปยังนอกแม่พิมพ์ (Vent runout) ให้มีความลึก ประมาณ 0.13 ถึง 0.25 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 18(ก) นอกจากนี้ยังสามารถระบายอากาศออกจากเบ้าแม่พิมพ์โดยทางช่องว่างระหว่างแท่งนำปลดชิ้นงานกับฐานนำปลดชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 18(ข) ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการออกแบบระบบการระบายอากาศออกจากเบ้าแม่พิมพ์ไม่เหมาะสมหรือไม่เพียงพอ อาจก่อให้เกิดข้อบกพร่องบนชิ้นงาน ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานไม่เต็มแบบ (Short shot) และรอยไหม้ (Burn marks) เป็นต้น



ภาพที่ 18 ขนาดของช่องระบายอากาศ

1.4 รอบเวลาในการฉีดขึ้นรูป

ภาพที่ 19 แสดงขั้นตอนและรอบเวลาของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโดยเริ่มจากนำเม็ดพอลิเมอร์ป้อนเข้าทางกรวยเติม ซึ่งเม็ดพอลิเมอร์ถูกหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวโดยใช้เข็มขัดให้ความร้อน ร่วมกับการหมุนของสกรูทำให้เกิดความร้อนจากแรงเฉือน จากนั้นสกรูเคลื่อนที่เพื่ออัดพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านหัวฉีดเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ รวมถึงการให้แรงดันคงค้างจากนั้นรอให้ชิ้นงานเย็นตัวก่อนนำปดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 19 ขั้นตอนและรอบเวลาของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

1.4.1 การหลอมเหลวพอลิเมอร์ (Melting process) คือ ขั้นตอนในการหลอมเหลวเม็ดพอลิเมอร์จนกลายเป็นเนื้อเดียวกันด้วยความร้อนจากอุปกรณ์ให้ความร้อนและความร้อนเฉือน (Shear heating) จากการหมุนของสกรู

1.4.2 การฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ (Mold filling process) คือ ขั้นตอนของการฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านหัวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงดันจากการขับเคลื่อนตามแนวอนของสกรู

1.4.3 การให้แรงดันคงค้าง(Holding pressure) เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกฉีดเข้าจนเต็มเบ้าแม่พิมพ์และเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มเย็นตัวจะเกิดการหดตัวของพอลิเมอร์ (Shrinkage) ในขั้นตอนนี้ต้องมีการให้แรงดันคงค้างแก่พอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเติมเนื้อพอลิเมอร์ภายในชั้นแกนกลางของชิ้นงานเพื่อชดเชยการหดตัวของชิ้นงานภายในเบ้าแม่พิมพ์

1.4.4 การเตรียมพอลิเมอร์หลอมเหลว (Dosage) โดยการหมุนสกรูเพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลไปที่บริเวณด้านหน้าของสกรูเพื่อรอการฉีดในรอบต่อไป

1.4.5 การเย็นตัวของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์ (Cooling phase) ในขั้นตอนนี้ ทั้งอุณหภูมิและความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงอย่างต่อเนื่อง การเย็นตัวเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานที่สุดในรอบการผลิตของกระบวนการฉีดขึ้นรูปสำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาอัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว คือ สมการฟูริเยร์ (Fourier number) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งได้แก่ การแพร่ผ่านทางความร้อน (Thermal diffusivity, α) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (1)$$

โดย k = ค่าการนำความร้อนของพอลิเมอร์ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 ρ = ค่าความหนาแน่น (kg.m^{-3})
 c_p = ค่าความจุความร้อน ($\text{J.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$)

การกระจายตัวของอุณหภูมิที่อยู่ในรูปของการกระจายอุณหภูมิเชิงเส้น (Temperature gradient, T^*) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2 จากนั้นใช้เส้นกราฟมาตรฐาน ดังแสดงภาพที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า T^* และค่าตัวเลขฟูริเยร์ (F_0) ซึ่งตัวเลขฟูริเยร์นี้มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการเย็นตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว ดังแสดงในสมการที่ 3

$$r^* = \frac{T_3 - T_2}{T_1 - T_2} \quad (2)$$

$$F_i = \frac{\alpha t}{X^2} \quad (3)$$

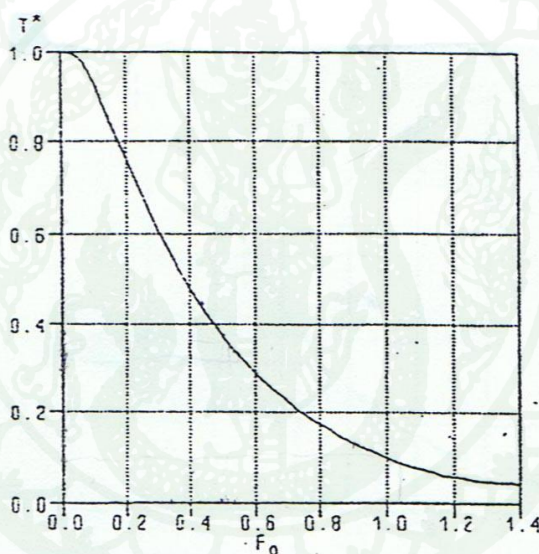
โดย T_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นของพอลิเมอร์หลอมเหลวก่อนกระบวนการ
ระบายความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 = อุณหภูมิของตัวกลางที่ทำให้พอลิเมอร์เย็นตัว หรืออุณหภูมิ
แม่พิมพ์ ($^{\circ}\text{C}$)

T_3 = อุณหภูมิที่พอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มแข็งตัวได้ ($^{\circ}\text{C}$)

X = ครึ่งหนึ่งของความหนาหรือขนาดหน้าตัดช่องการไหล (m)

t = เวลาที่ใช้ในการเย็นตัว



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T^*) และค่าตัวเลขฟูเรียร์

ที่มา: ชนิตา (2552)

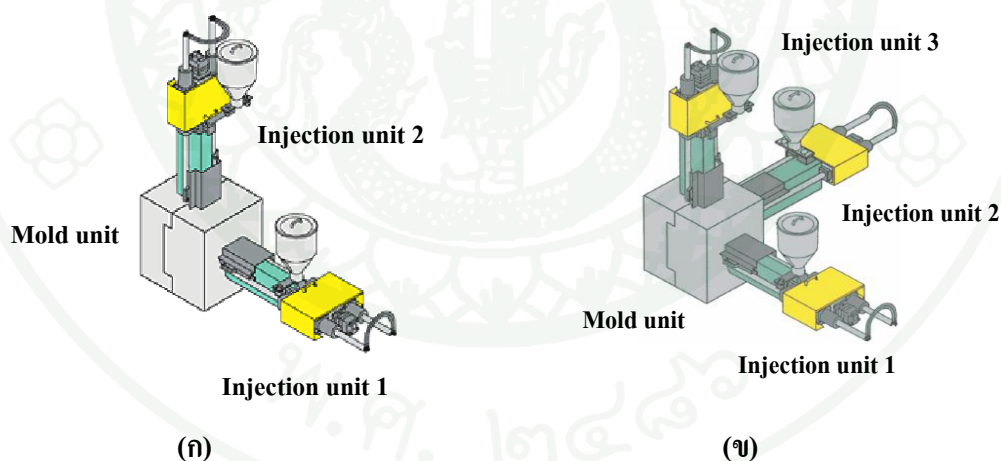
1.4.6 การเปิดแม่พิมพ์ (Mold open) แม่พิมพ์ถูกเปิดเพื่อรอการนำปลดชิ้นงาน โดยระบบปลดชิ้นงาน

1.4.7 การนำปลดชิ้นงาน (Ejection) หลังจากแม่พิมพ์เปิดออกชิ้นงานถูกปลดด้วยกลไกทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากเบ้าแม่พิมพ์

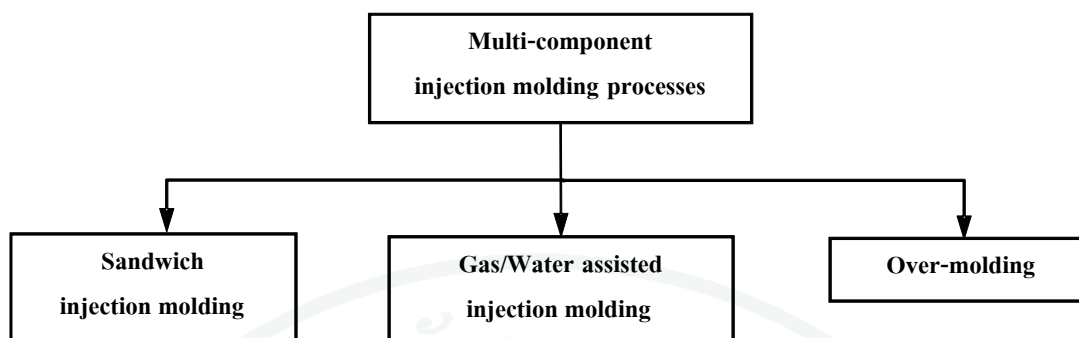
1.4.8 แม่พิมพ์ปิด (Mold close) เมื่อนำปลดชิ้นงานเสร็จแล้วแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าประกบกัน เพื่อทำการฉีดในรอบต่อไป

2. กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบหลายวัสดุ (Multi-component injection molding process)

กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบหลายวัสดุ เป็นกระบวนการฉีดขึ้นรูปงานพอลิเมอร์ที่ถูกพัฒนาต่อเนื่องจากกระบวนการฉีดแบบดั้งเดิม (Conventional injection molding) เพื่อความสวยงามและความสามารถในการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการฉีดแบบดั้งเดิมมีชุดเครื่องฉีด (Injection unit) เพียง 1 ชุด ในขณะที่กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบหลายวัสดุจะประกอบไปด้วยชุดเครื่องฉีดอย่างน้อย 2 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 21(ก) และ 21(ข) เพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยหลายวัสดุในชิ้นงานเดียว ซึ่งแบ่งออกเป็นกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแซนด์วิช (Sandwich injection molding) กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบใช้น้ำหรือก๊าซช่วย (Gas/Water assisted injection molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง (Over-molding) โดยมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 22



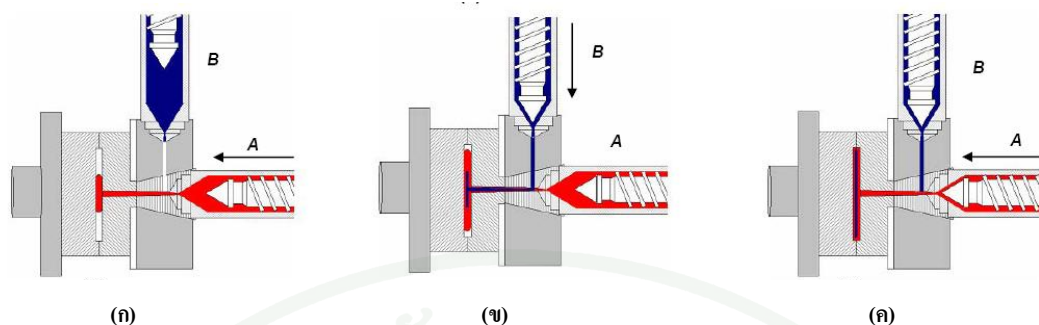
ภาพที่ 21 เครื่องฉีดพลาสติก (ก) แบบ 2 หัวฉีดและ (ข) แบบ 3 หัวฉีด



ภาพที่ 22 เทคนิคต่างๆในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบหลายวัสดุ

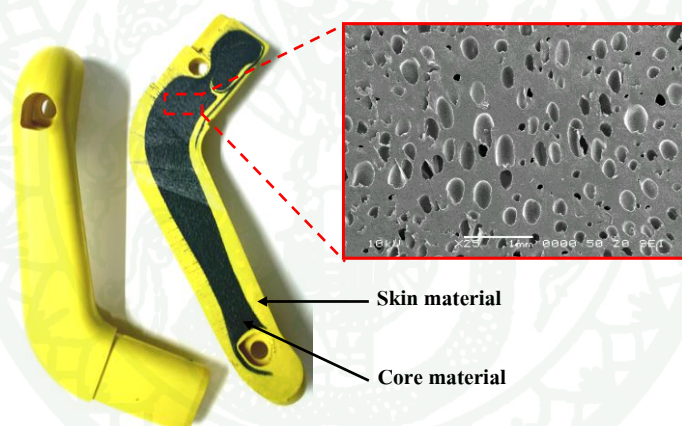
2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแซนด์วิช

กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแซนด์วิชสามารถแบ่งเป็นกระบวนการฉีดตามลำดับขั้น (Sequential) และกระบวนการฉีดในเวลาเดียวกัน (Simultaneous) ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการฉีดแบบลำดับขั้นมีความนิยมมากกว่าในอุตสาหกรรม โดยทำการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านช่องทางเข้าเดียวกัน กล่าวคือพอลิเมอร์ชนิดที่หนึ่งถูกฉีดเข้าไปก่อนซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นผิว (Skin material) ดังภาพที่ 23(ก) จากนั้นฉีดวัสดุชนิดที่สองต่อเนื่องเข้าไปจากวัสดุชนิดแรกเพื่อเป็นชั้นแกนกลาง (Core material) ดังภาพที่ 23(ข) ในขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการฉีดพอลิเมอร์ชั้นผิวอีกครั้งเพื่อปิดผิวของชิ้นงาน ดังภาพที่ 23(ค) ซึ่งจุดเด่นของกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแซนด์วิชเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการฉีดแบบดั้งเดิม คือสามารถใช้พอลิเมอร์ ที่มีสี สันสวยงาม หรือมีสมบัติทนทานต่อสภาพแวดล้อมหรือสารเคมีเป็นพอลิเมอร์ชนิดแรกที่ถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ เพื่อเป็นพอลิเมอร์ชั้นผิว ในขณะที่ยังสามารใช้พอลิเมอร์รีไซเคิล (Recycle) เพื่อให้เป็นพอลิเมอร์ชั้นแกนกลาง ในการลดต้นทุนการผลิตที่เกิดขึ้น หรือ อาจทำการผสมสารพองฟู (Blowing agent) ในวัสดุพอลิเมอร์ชั้นแกนกลางเพื่อลดปัญหาหอยุบ (Sink mark) ที่เกิดขึ้นในกรณีที่ต้องการฉีดขึ้นงานที่มีความหนาหลายๆ ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 23 กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแซนด์วิช (ก) ฉีดพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุผิว (ข) ฉีดพอลิเมอร์ที่เป็นแกนกลาง และ (ค) ฉีดพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุผิวเพื่อปิดผิวของชิ้นงาน

ที่มา: Patcharaphun (2006)



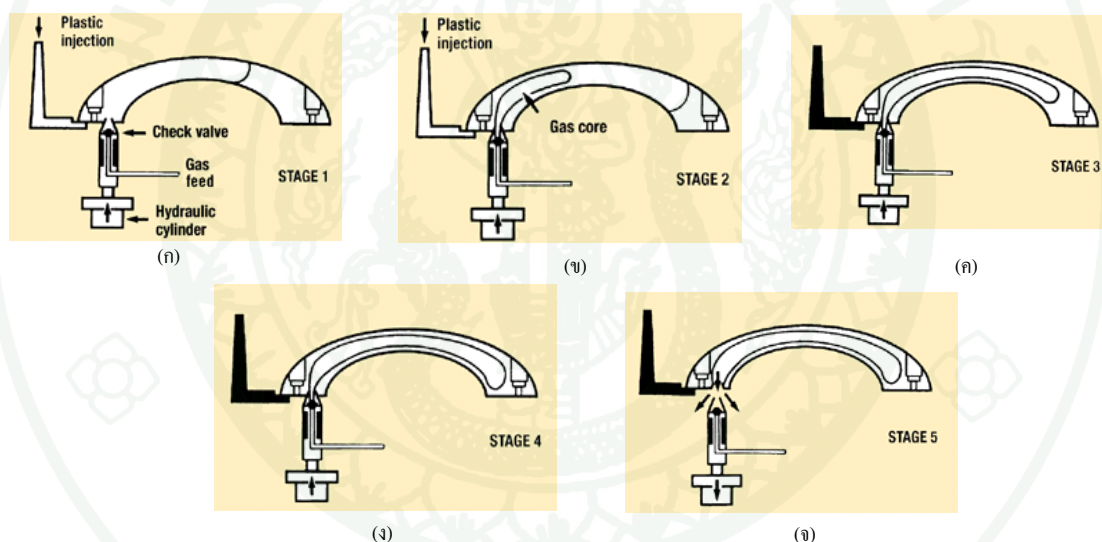
ภาพที่ 24 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแซนด์วิช

ที่มา: Patcharaphun (2009)

2.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบใช้น้ำหรือก๊าซช่วย

การฉีดขึ้นรูปแบบใช้น้ำหรือก๊าซช่วยเป็นแนวทางในการผลิตชิ้นส่วนที่มีลักษณะกลวงอยู่ภายใน โดยมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงในภาพที่ 25 ซึ่งเทคนิคนี้ทำการลดความหนาผนัง (Wall thickness) ของชิ้นงานลงโดยการแทนที่แกนกลางของผลิตภัณฑ์พลาสติกด้วยน้ำหรือก๊าซซึ่งเริ่มจากการฉีดวัสดุชนิดแรกที่ต้องการให้เป็นผิวชิ้นงานเข้าไปก่อน ดังภาพที่ 25(ก) หลังจากนั้นเริ่ม

ฉีดน้ำหรือก๊าซเข้าไปยังแกนกลาง ดังภาพที่ 25(ข) ถึง 25(ง) น้ำหรือก๊าซมีหน้าที่ดันวัสดุชนิดแรก ดัดผนังเพื่อเป็นผิวของชิ้นงาน เมื่อทำการฉีดน้ำหรือก๊าซจนทำให้วัสดุชนิดแรกเต็มแม่พิมพ์แล้ว น้ำหรือก๊าซจะถูกระบายออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 25(จ) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะดังภาพที่ 26 เทคนิคการฉีดขึ้นรูปแบบใช้น้ำช่วยมีข้อเด่นเมื่อเทียบกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบใช้ก๊าซช่วย คือ สามารถทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงได้เร็วขึ้นเนื่องจากค่าการนำความร้อนของน้ำมีค่ามากกว่าก๊าซประมาณ 40 เท่าและค่าความจุความร้อนของน้ำมีค่ามากกว่าก๊าซถึง 4 เท่าดังนั้นการฉีดขึ้นรูปแบบใช้น้ำช่วยจึงช่วยลดระยะเวลาในการผลิตแต่ละรอบได้ถึง 25 เปอร์เซ็นต์นอกจากนี้ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปแบบใช้น้ำช่วยยังมีข้อดีกว่าการใช้ก๊าซช่วยกล่าวคือสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความหนาสม่ำเสมอและบางลงอีกทั้งพื้นผิวภายในของชิ้นงานยังมีลักษณะที่เรียบซึ่งไม่สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการฉีดแบบใช้ก๊าซช่วย (วุฒิพงษ์และ ชีระพนธ์, 2550)



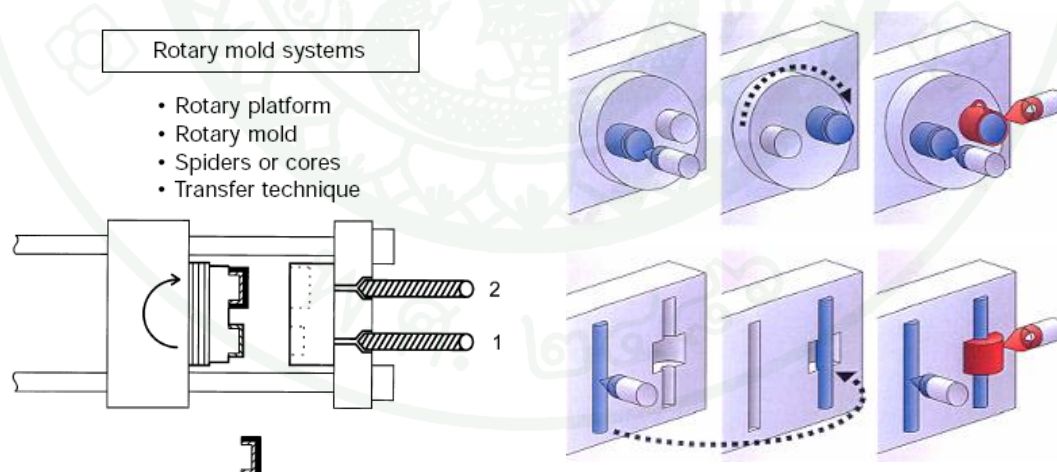
ภาพที่ 25 กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบใช้น้ำหรือก๊าซช่วย (ก) ฉีดพลาสติกที่ต้องการให้เป็นผิวชิ้นงาน (ข) ถึง (ง)ฉีดน้ำหรือก๊าซ (จ) ปล่อน้ำหรือก๊าซออก



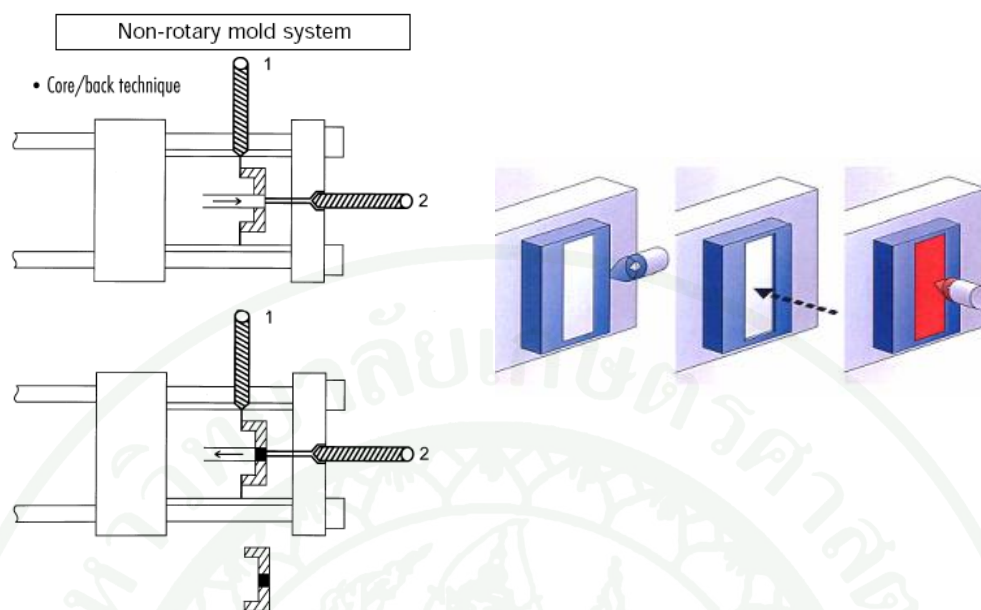
ภาพที่ 26 ลักษณะผลิตภัณฑ์จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบใช้น้ำหรือก๊าซช่วย

2.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง

หลักการของกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง เริ่มจากการฉีดวัสดุพอลิเมอร์ชนิดแรกเข้าไปในแม่พิมพ์ฉีด (Mold) เพื่อให้เป็นวัสดุพื้น (Substrate material) จากนั้นหลังจากที่วัสดุพื้นเย็นตัวแล้ว จึงฉีดวัสดุพอลิเมอร์ชนิดที่สองเข้าไปในแม่พิมพ์เพื่อเป็นวัสดุซ้อนทับ (Over-molded material) ต่อเนื่องจากการฉีดในครั้งแรก โดยอาศัยหลักการหมุนของแม่พิมพ์ (Rotary mold system) หรือโดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของอินเลอร์ (Core back technique) ภายในแม่พิมพ์ฉีด ดังแสดงในภาพที่ 27 และ 28 ตามลำดับ



ภาพที่ 27 ลักษณะการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง โดยใช้ระบบการหมุนของแม่พิมพ์



ภาพที่ 28 ลักษณะการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ิ่ง โดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของอินเลอร์ภายในแม่พิมพ์ฉีด

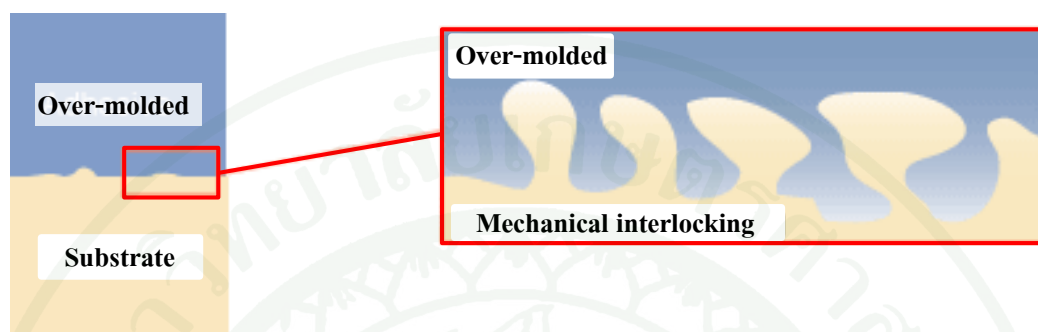
3. ทฤษฎีในการยึดเกาะ (Theories of adhesion)

กลไกในการยึดเกาะของพอลิเมอร์หรือวัสดุชนิดอื่น (Mechanism of adhesion) ที่ผิวสัมผัสเป็นผลมาจากการยึดเกาะทางกล ทางกายภาพ และทางเคมี ซึ่งสามารถแบ่งเป็นทฤษฎีหลักได้ 3 ทฤษฎี ได้แก่ ทฤษฎีการยึดติดทางกล (Mechanical interlocking theory) ทฤษฎีการดูดซับ (Absorption theory) และทฤษฎีการแพร่ข้าม (Diffusion theory)

3.1 ทฤษฎีการยึดเกาะทางกล (Mechanical interlocking theory)

การยึดติดหรือการยึดเกาะทางกลในกระบวนการขึ้นรูปโดยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ิ่ง เกิดจากพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลมาสัมผัสกัน ส่งผลให้เกิดการแทรกตัวระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่บริเวณผิวสัมผัส ซึ่งความแข็งแรงของการยึดเกาะขึ้นอยู่กับเวลาและขนาดของพื้นที่สัมผัส (Kinloch, 1990; Packham, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 29 นอกจากนี้การปรับปรุงพื้นผิว (Surface treatment) โดยเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวสัมผัสในระดับไมครอน สามารถช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของการยึดติดได้เช่นกัน (Clearfield *et al.*, 1991) โดยทั่วไปแล้วภาคอุตสาหกรรมการผลิต

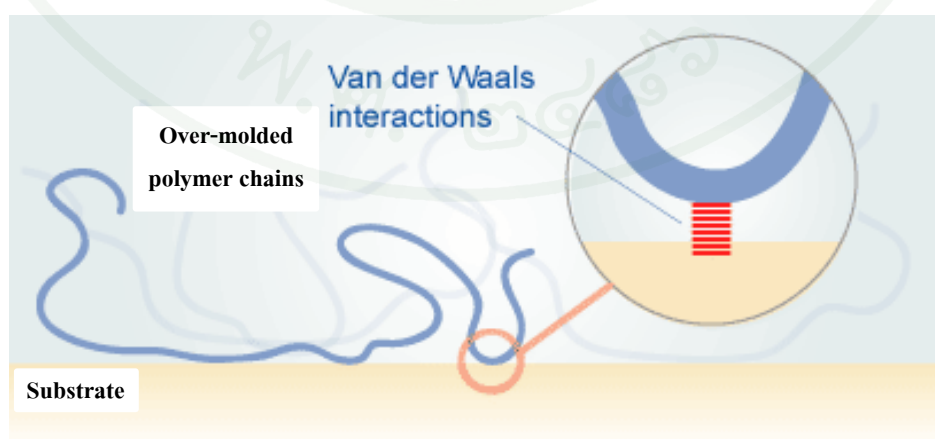
นิยมใช้หลักการยึดเกาะทางกลโดยออกแบบแม่พิมพ์ให้เกิดการไหลทะลุของพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งเป็นวัสดุร้อนทับไปยังอีกด้านของวัสดุพื้นดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น เพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันแบบทางกลดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 การแทรกตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่บริเวณผิวสัมผัส

3.2 ทฤษฎีการดูดซับ (Absorption theory)

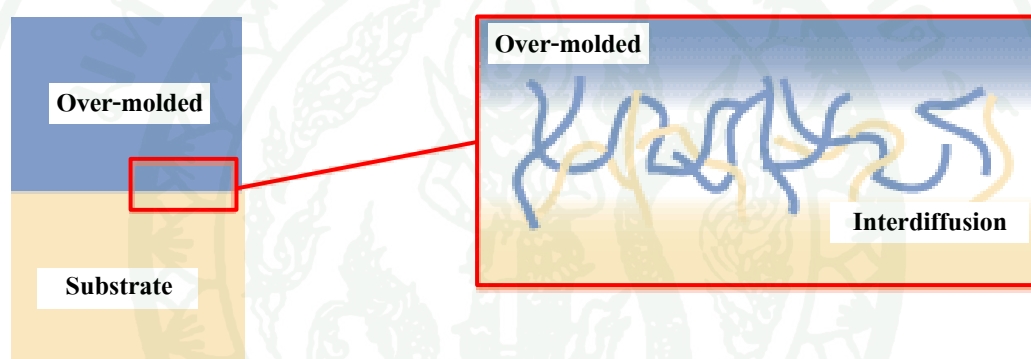
ทฤษฎีการดูดซับถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายถึงการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ยกตัวอย่างเช่น ยางหรือเทอร์โมพลาสติก (Lee, 1991) ซึ่งมีพื้นผิวที่สัมผัสหรือเชื่อมติดกัน โดยการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลในบริเวณที่พอลิเมอร์สองชนิดสัมผัสกัน โดยทั่วไปแล้วแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากแรงทุติยภูมิ (Secondary force) เช่น แรงวานเดอวาลส์ (Van Der Waals force) ดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 แรงวานเดอวาลส์ที่เกิดขึ้นในทฤษฎีการดูดซับ

3.3 ทฤษฎีการแพร่ข้าม (Diffusion theory)

ทฤษฎีการแพร่ข้ามอธิบายการยืดยาวของวัสดุสองชนิดที่มีผิวสัมผัสกันในระยะที่สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามระหว่างกัน (Pocius, 2002; Voyutskii, 1963) ทำให้ผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสองชนิดกลายเป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 31 อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีการแพร่ข้ามไม่สามารถอธิบายได้ถึงการยืดยาวของวัสดุที่สายโซ่โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนที่ หรือเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid) นอกจากนี้ยังพบว่า เวลาการแพร่ข้ามสูงสุดของวัสดุเทอร์โมพลาสติกอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 10 วินาที ที่บริเวณผิวสัมผัส ซึ่งทำให้การแพร่ข้ามเกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปได้ง่ายกว่ากระบวนการฉีดขึ้นรูป



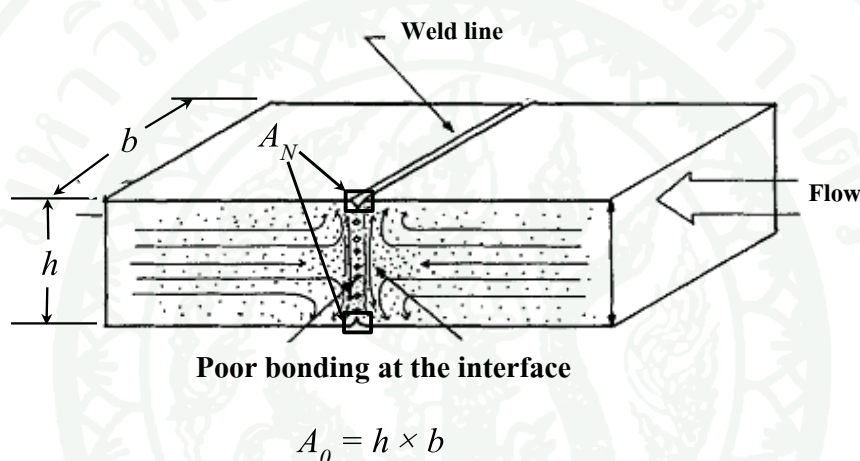
ภาพที่ 31 การแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลที่บริเวณผิวสัมผัสที่กลายเป็นเนื้อเดียวกัน

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความแข็งแรงในการยืดยาวของพอลิเมอร์

Kim and Suh (1986) ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายความแข็งแรงของการยืดยาวที่บริเวณรอยประสาน (Weldline) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก โดยแสดงความสัมพันธ์ของระดับการประสาน (Degree of bonding) ในรูปฟังก์ชันของเวลาสัมผัส (Contact time) และอุณหภูมิที่หน้าสัมผัส (Interfacial temperature) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4 และแสดงในภาพที่ 32

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_b} = \frac{A_o - A_N}{A_o} = 1 - f(T, t) \quad (4)$$

- โดย σ_w คือ ความต้านทานแรงดึงของรอยประสาน
 σ_b คือ ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน
 A_o คือ บริเวณพื้นที่หน้าสัมผัสเริ่มต้นของชิ้นงานหรือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน
 A_N คือ บริเวณพื้นที่ที่ไม่เกิดการประสานซึ่งสายโซ่โมเลกุลไม่มีการแพร่ข้าม
 หน้าสัมผัส
 T คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของหน้าสัมผัส
 t คือ เวลาสัมผัสหรือเวลาประสาน



ภาพที่ 32 ลักษณะรอยประสาน

ที่มา: Kim and Suh (1986)

จากกฎข้อที่ 1 ของ Fick ได้แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ในบริเวณที่ไม่เกิดการเชื่อมต่อนั้นดังแสดงในสมการที่ 5

$$\frac{dA_N}{dt} = C \frac{D\Delta G}{kT} \quad (5)$$

เมื่อ C คือค่าคงที่ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) K คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ t คือ เวลาสัมผัส และ ΔG คือ ผลต่างพลังงานอิสระ (Gibb free energy) โดยผลต่างพลังงานอิสระสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 6

$$\Delta G = -2\gamma A_N - T\Delta S_m \quad (6)$$

เมื่อ γ คือ ค่าแรงตึงผิว (Surface Tension)

ΔS_m คือ ค่าเอนโทรปีของการผสม (Entropy of Mixing)

จากทฤษฎี Lattice ของ Flory-Huggins (Flory-Huggins theory of lattice) ได้ความสัมพันธ์ของค่าเอนโทรปีของการผสม ดังแสดงในสมการที่ (7)

$$\Delta S_m = -kA_N \delta x \delta n_o \ln(1/2) \quad (7)$$

โดยที่ δx และ δn_o คือความหนาของการแพร่ (Diffusion thickness) และจำนวนของ Lattice ต่อหน่วยปริมาตร ตามลำดับจากสมการที่ 5 ถึง 7 สามารถคำนวณบริเวณที่ไม่เกิดการเชื่อมต่อพันธะของรอยประสานดังแสดงในสมการที่ 8

$$\frac{1}{A_N} dA_N = -\frac{CD}{kT} (2\gamma - kT\delta x \delta n_o \ln(1/2)) dt \quad (8)$$

อินทิเกรตสมการที่ 8 แล้วแทนในสมการที่ 4 สามารถคำนวณค่าความแข็งแรงของรอยประสานได้ดังแสดงในสมการที่ 9

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_b} = 1 - \exp \left\{ -\frac{CD}{kT} (-2\gamma + kT\delta x \delta n_o \ln(1/2)) t \right\} \quad (9)$$

งานวิจัยของ Kim and Suh พบว่า เวลาสัมผัสเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยประสาน แต่ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงการสัมผัสกันของพอลิเมอร์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 0 ถึง 10 วินาที (Clements, 2007) ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามหน้าสัมผัสได้ไม่มากนัก ดังนั้นองศาการประสาน (Degree of diffusion) จึงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิมากกว่าเป็นฟังก์ชันของเวลาสัมผัส

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เม็ดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เกรดการค้าจากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)

2. เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) ของบริษัท ARBURG รุ่น

ALLROUNDER 500-320C ดังแสดงในภาพที่ 33

2.2 แม่พิมพ์ฉีดแบบโอเวอร์โมลด์สำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และแรงกระแทก (Impact strength)

2.3 แม่พิมพ์ฉีดแบบโอเวอร์โมลด์ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้นสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) ดังแสดงในภาพที่ 34

2.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีด (Mold temperature controller) ของบริษัท Shini รุ่น STM120

2.5 เครื่องตัดชิ้นงาน (Cutting machine) ของบริษัท Performax รุ่น 90246

2.6 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน (Grinder polisher) ของบริษัท Imptech รุ่น 101

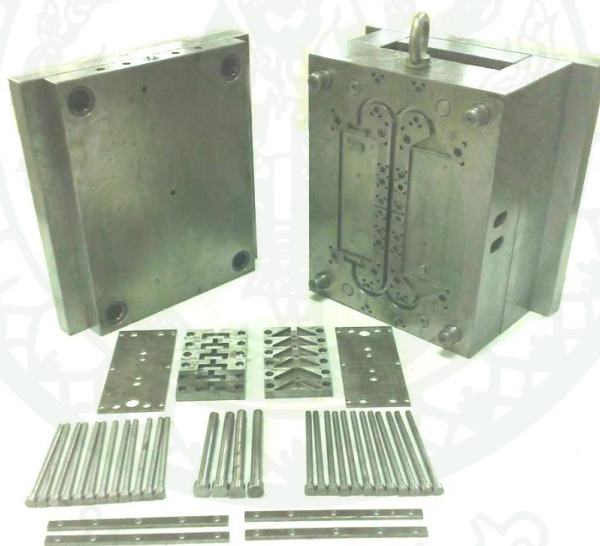
2.7 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) ของบริษัท Hounsfield รุ่น H50K50809

2.8 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact tester) ของบริษัท Gotech รุ่น GT-7045

2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ของบริษัท Nikon รุ่น Eclipse me600



ภาพที่ 33 เครื่องฉีดขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย



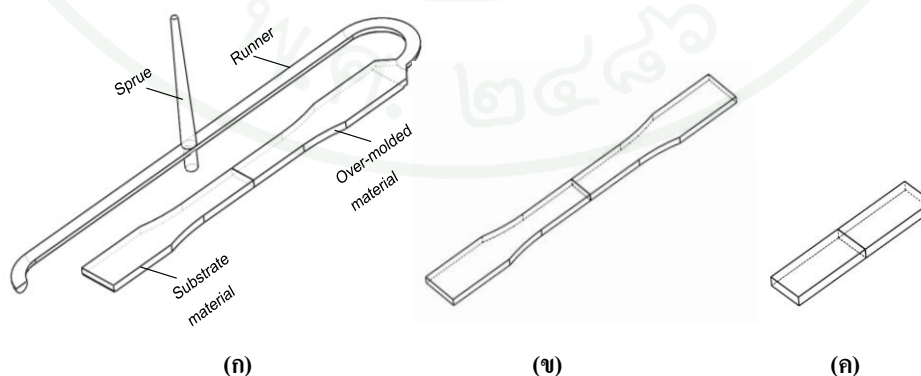
ภาพที่ 34 แม่พิมพ์ฉีดแบบ โอเวอร์โมลด์ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

วิธีการ

1. การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างพอลิโพรพิลีน(PP)

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคโอเวอร์โมลด์िंग เพื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (ASTM D638) สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบ IZOD (ASTM D256) ดังแสดงในภาพที่ 35 โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์िंग ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุพื้น) อุณหภูมิฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลว (อุณหภูมิฉีดพอลิเมอร์วัสดุซ้อนทับ) และแรงดันคงค้าง ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ดังนี้

เริ่มจากการฉีดขึ้นรูปวัสดุพื้น โดยการวางอินเสิร์ท (Insert) ภายในแม่พิมพ์ฉีด หลังจากนั้นจึงทำการฉีดพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์ รอให้เย็นตัวนำออกจากแม่พิมพ์เพื่อให้ได้วัสดุพื้นนำพอลิโพรพิลีนที่เป็นวัสดุพื้นใส่กลับเข้าไปในแม่พิมพ์ หลังจากนั้นฉีดพอลิโพรพิลีนในส่วนที่เป็นวัสดุซ้อนทับลงบนวัสดุพื้นให้ได้ชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 35(ก) จึงนำชิ้นงานที่ได้ทำการตัดส่วนของทางเข้าออก เมื่อได้ชิ้นงานทดสอบงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ของ Hounsfield รุ่น H50K5 0809 เพื่อทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ที่ความเร็วในการดึง (Crosshead speed) เท่ากับ 1.3 mm/min ดังแสดงในภาพที่ 35(ข) สำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod นำชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปมาตัดให้ได้ขนาด โดยใช้น้ำหนัก 0.49 kg ที่ระยะแขนเหวี่ยงเท่ากับ 327 mm เพื่อทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 35(ค)

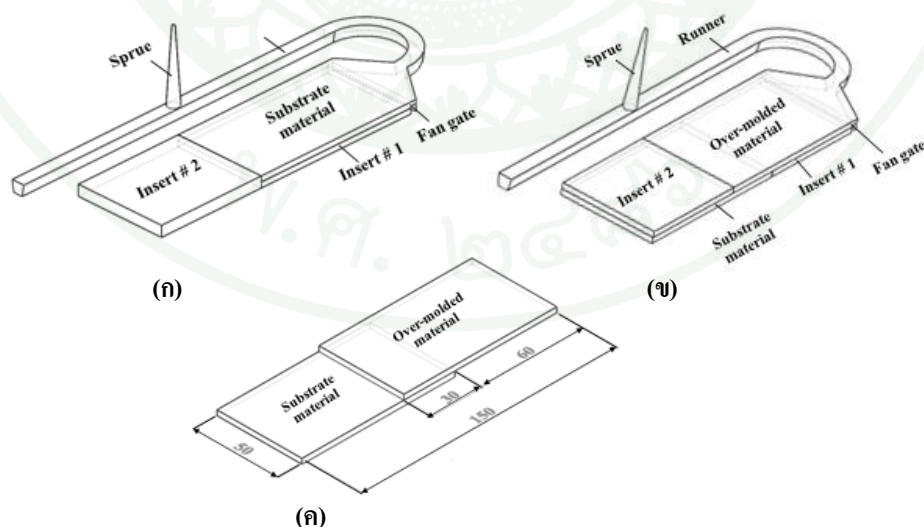


ภาพที่ 35 (ก) ขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแบบโอเวอร์โมลด์िंग (ข) ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (ค) ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก

ตารางที่ 1 ปัจจัยในกระบวนการฉีดที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปวัสดุพื้นและชิ้นงานแบบโอเวอร์โมลด์ิ่ง
เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

Processing Conditions	Substrate specimen	Over-molded specimen
Injection pressure (bar)	900	900
Injection speed (ccm/sec)	10	5
Holding pressure (bar)	800	800/900/1000
Cooling time (sec)	20	60
Clamping force (kN)	300	300
Melt temperature (°C)	230	230/240/250
Mold temperature (°C)	30	30/60/90

ภาพที่ 36 แสดงขั้นตอนในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน โดยใช้หลักการวางอินเสิร์ท (Insert) ภายในแม่พิมพ์ฉีด ดังแสดงในภาพ 36(ก) เพื่อฉีดขึ้นรูปวัสดุพื้น จากนั้นจึงทำการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ิ่งโดยตำแหน่งการวางของอินเสิร์ทและวัสดุพื้นภายในแม่พิมพ์แสดงในภาพที่ 36(ข) เพื่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบดังแสดงในภาพที่ 36(ค) ตามมาตรฐาน ASTM D3163 โดยใช้ความเร็วในการดึง (Crosshead speed) เท่ากับ 1.3 mm/min



ภาพที่ 36 (ก) การฉีดขึ้นรูปวัสดุพื้น (ข) ลักษณะการวางอินเสิร์ทภายในแม่พิมพ์เพื่อฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ิ่งและ (ค) ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือน

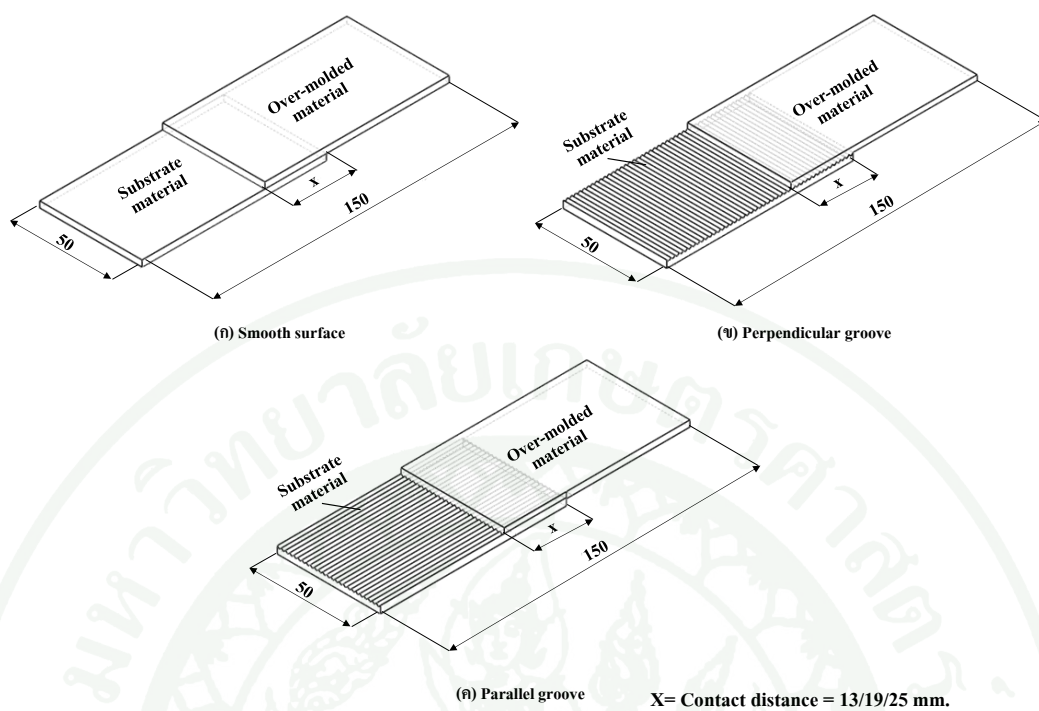
ตารางที่ 2 แสดงปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนซึ่งได้แก่ อุณหภูมิวัสดุพื้น และอุณหภูมิฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลวของวัสดุซ้อนทับ ในขณะที่ตารางที่ 3 แสดงระยะสัมผัส (Contact distance) และลักษณะของพื้นผิวสัมผัส (Surface pattern) ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ โดยลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบแสดงในภาพที่ 37 และชิ้นงานที่ขึ้นรูปจริงที่ระยะสัมผัสต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 38

ตารางที่ 2 ปัจจัยในกระบวนการฉีดที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปวัสดุพื้นและชิ้นงานแบบโอเวอร์โมลด์ใช้ในการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน

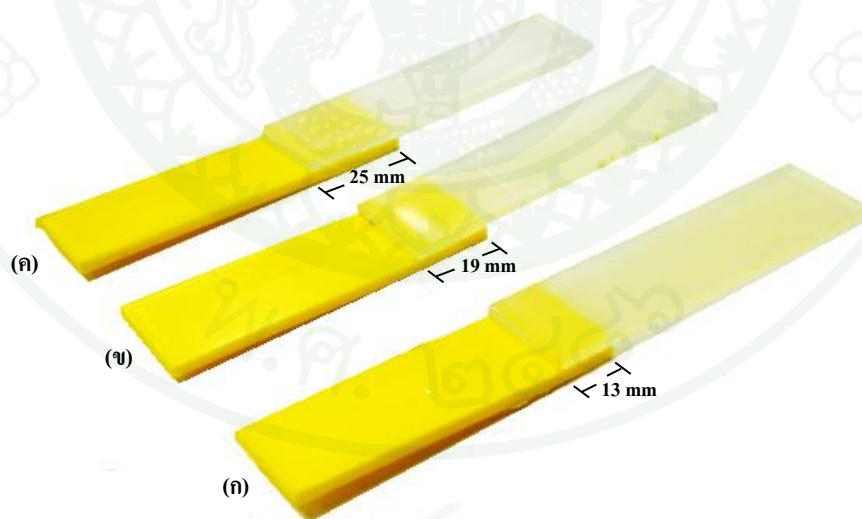
Processing Conditions	Substrate specimen	Over-molded specimen
Injection pressure (bar)	900	900
Injection speed (ccm/sec)	10	5
Holding pressure (bar)	800	800
Cooling time (sec)	20	60
Clamping force (kN)	300	300
Melt temperature (°C)	230	220/230/240
Mold temperature (°C)	30	30/60/90

ตารางที่ 3 ระยะสัมผัสและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ใช้ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน

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



ภาพที่ 37 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงฉีก (ก) พื้นผิวสัมผัสแบบเรียบ (ข) พื้นผิวสัมผัสแบบร่องแนวตั้งฉาก และ (ค) พื้นผิวสัมผัสแบบร่องแนวนอน



ภาพที่ 38 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงฉีกที่ระยะ (ก) 13 mm (ข) 19 mm และ (ค) 25 mm

2. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์

การศึกษาความแข็งแรงเพื่อพัฒนาความแข็งแรงในการยึดเกาะ พบว่าอิทธิพลสำคัญที่มีผลต่อความแข็งแรงในการยึดเกาะ คือ ปัจจัยในกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับ อุณหภูมิวัสดุพื้น เป็นต้น เพื่อทราบถึงความแข็งแรงของการยึดเกาะจึงมีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความแข็งแรงของชิ้นงาน ดังสมการที่ 10 (Kim and Suh, 1986)

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_s} = 1 - \exp \left[- \frac{CD}{kT} \left(\frac{0.98}{\sqrt{2}} \frac{\gamma}{\delta n_s \delta_s} \right) t \right] \quad (10)$$

จากต้นแบบสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 10 ได้มีการพัฒนารูปแบบของสมการเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีผลต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ 11 (Chien, et al., 2004; Chen, et al., 2007)

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_s} = 1 - \exp \left[- \frac{2CD\gamma}{kT_m} \left(1 - \frac{T_m}{T_g} \right) t \right] \quad (11)$$

โดยที่	σ_w	คือ	ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยประสาน
	σ_s	คือ	ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน
	C	คือ	ปัจจัยในกระบวนการฉีดที่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยประสาน
	D	คือ	Self-diffusion constant
	γ	คือ	Surface energy
	k	คือ	ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/k
	T_m	คือ	อุณหภูมิฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลว (อุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับ)
	T_g	คือ	อุณหภูมิที่พอลิเมอร์มีสถานะคล้ายแก้ว
	t	คือ	เวลาในการยึดเกาะ (Bonding time)

โดยงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าค่า C หรือค่าคงที่ปัจจัยในกระบวนการฉีด (Process parameter constant) สามารถเขียนในรูปฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial function) ของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการฉีดที่มีต่อความสามารถในการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยประสานได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยทำการจัดรูปสมการใหม่เพื่อปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายความแข็งแรงการยึดเกาะของชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนแบบผิวเรียบ โดยใช้วัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับเป็นพอลิโพรพิลีนดังแสดงในสมการที่ 12

$$\ln \left(1 - \frac{\sigma_w}{\sigma_i} \right) = \left[-\frac{2D^2 t}{k} \times C \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad (12)$$

C สามารถเขียนในรูปฟังก์ชันพหุนามแบบจำกัด หรือเขียนในรูปผลรวมของผลคูณระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของชิ้นงาน ได้แก่ อุณหภูมิฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลว (T_{melt}) อุณหภูมิวัสดุพื้น (T_{mold}) และระยะผิวสัมผัส (S) ดังสมการที่ 14

$$C = f(T_{melt}, T_{mold}, S) \quad (13)$$

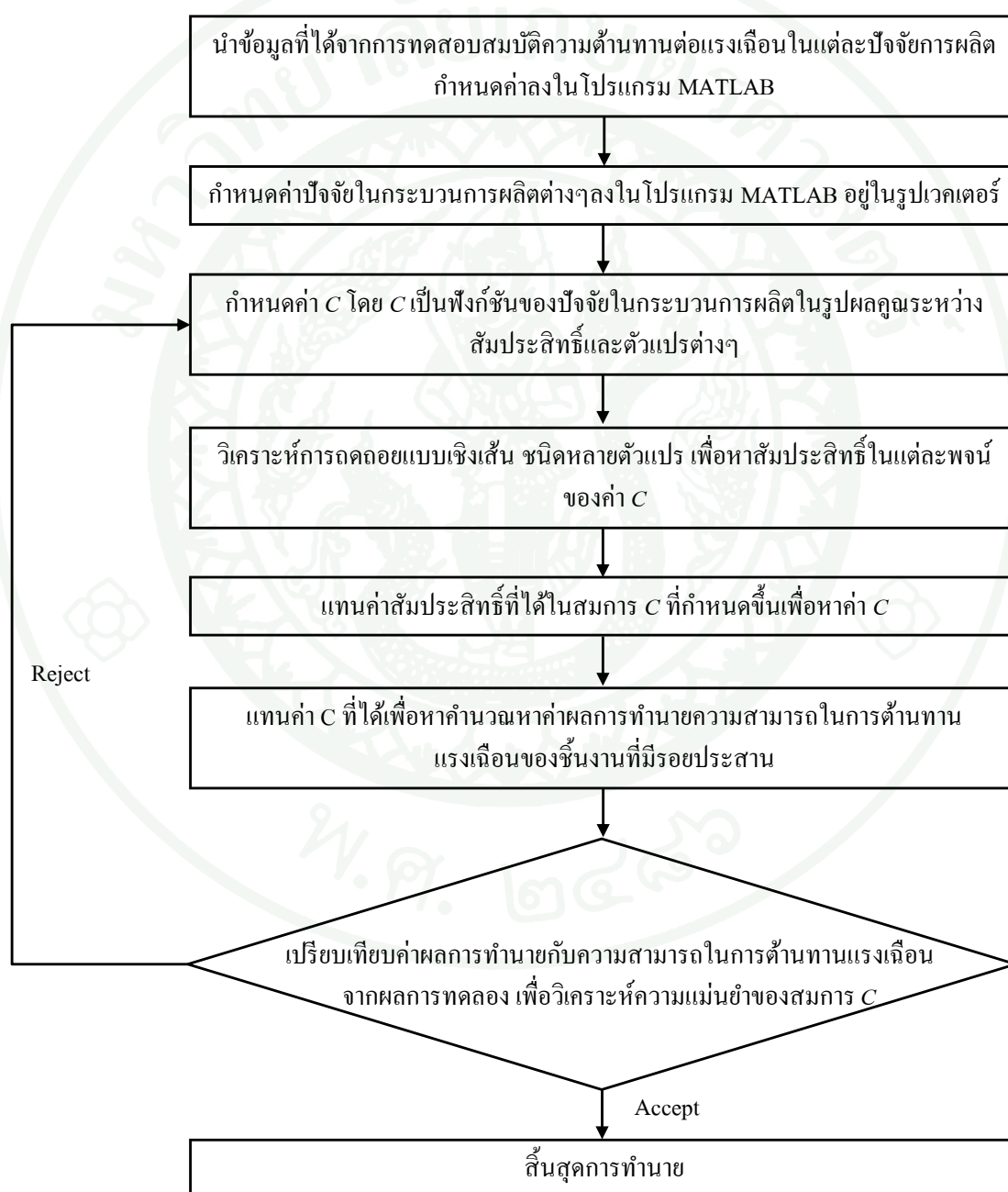
และเขียนในรูปฟังก์ชันพหุนามแบบจำกัดคือ

$$C = \sum_{i=1}^m \sum_{j+k=1}^n (c_i T_{melt}^j T_{mold}^k S^k) \quad (14)$$

ในการหาสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ในแต่ละพจน์ของฟังก์ชันพหุนาม สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression analysis) ชนิดหลายตัวแปร (Multiple variables) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมช่วยการคำนวณโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) การพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความสามารถในการยึดเกาะของพอลิเมอร์ สามารถดำเนินการได้โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนในแต่ละปัจจัยการผลิต (Process parameter) และค่าสมบัติของวัสดุ แทนค่าลงในสมการ 12 และกำหนดค่าลงในโปรแกรม MATLAB โดยค่าตัวแปรต่างๆอยู่ในรูปเวกเตอร์ (Vector)
2. กำหนดค่าปัจจัยในกระบวนการผลิตต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลวของวัสดุชั้นทับ (T_{melt}) อุณหภูมิวัสดุพื้น (T_{mold}) และระยะสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุชั้นทับ (A) โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ลงในโปรแกรม MATLAB โดยตัวแปรต่างๆ อยู่ในรูปเวกเตอร์
3. กำหนดค่า C โดย C เป็นฟังก์ชันของปัจจัยในกระบวนการผลิต ที่ได้กำหนดในขั้นตอนที่ 2 และเขียนในรูปผลรวมของผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์และตัวแปรต่างๆ ดังสมการที่ 14
4. ทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น ชนิดหลายตัวแปร ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ข้อมูลที่ได้กำหนดในขั้นตอนที่ 1-3 เพื่อหาสัมประสิทธิ์ในแต่ละพจน์ของค่า C ที่ได้กำหนดในขั้นตอนที่ 3
5. แทนค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยในขั้นตอนที่ 4 ลงในสมการ C ที่กำหนดขึ้นในขั้นตอนที่ 3 เพื่อหาค่า C
6. แทนค่า C ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 ลงในสมการ 12 เพื่อหาคำนวณหาค่าผลการทำนายความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของชิ้นงานที่มีรอยประสาน
7. เปรียบเทียบค่าผลการทำนายความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของชิ้นงานที่มีรอยประสาน กับความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของชิ้นงานที่มีรอยประสานที่แต่ละสภาวะการผลิต เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการ C ที่กำหนดขึ้นในขั้นตอนที่ 3
8. หากสมการ C ที่กำหนดขึ้นในขั้นตอนที่ 3 ยังขาดความแม่นยำ โดยเปรียบเทียบจากผลการทำนายความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนและผลจากการทดสอบจริงในขั้นตอนที่ 7 สามารถเพิ่มความแม่นยำของผลการทำนายความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนได้โดย (ก) เพิ่มจำนวนข้อมูลค่าปัจจัยในการผลิตและผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนในขั้นตอนที่ 1-2 โดยดำเนินการทดสอบเพิ่มเติมที่สภาวะการผลิตใหม่ที่นอกเหนือจากที่กำหนดลงใน

ขั้นตอนที่ 2 โดยการเพิ่มจำนวนข้อมูลจะทำให้การวิเคราะห์การถดถอยมีความแม่นยำมากขึ้น และ (ข) กำหนดสมการ C ในขั้นตอนที่ 3 ใหม่ โดยแก้ไขให้สมการมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนมากยิ่งขึ้น และดำเนินการวิเคราะห์การถดถอยใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4-8 จนกว่าสมการ C ที่กำหนดจะให้ผลการทำนายความต้านทานแรงเฉือนที่แม่นยำเพียงพอต่อการนำไปใช้งานดังแสดงในแผนภาพที่ 39

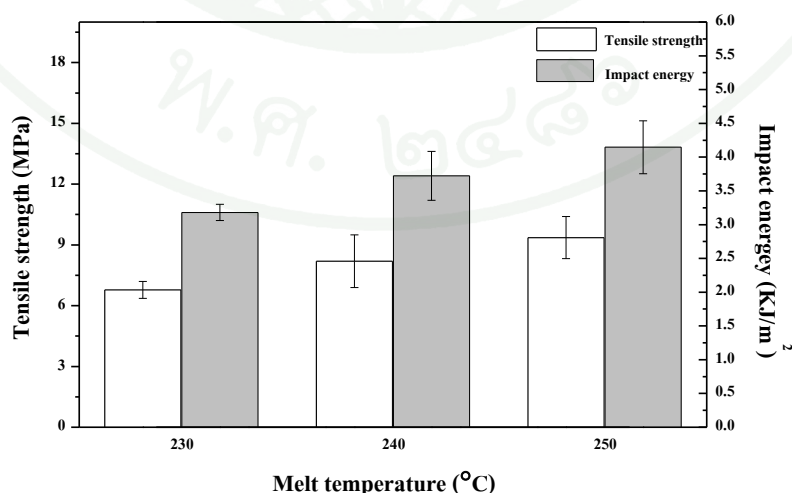


ภาพที่ 39 แผนการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความสามารถในการยึดเกาะ

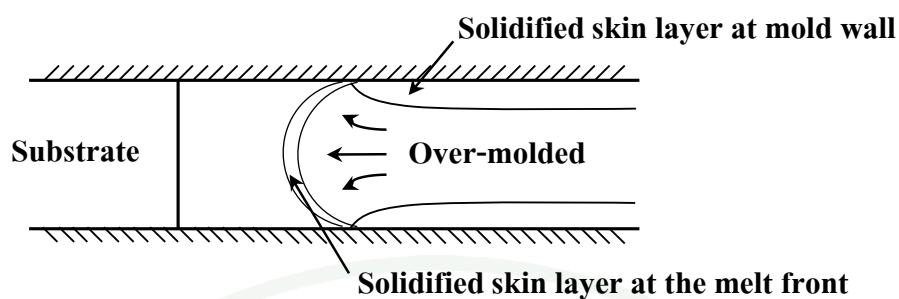
ผลและวิจารณ์

1. อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลดิ้ง

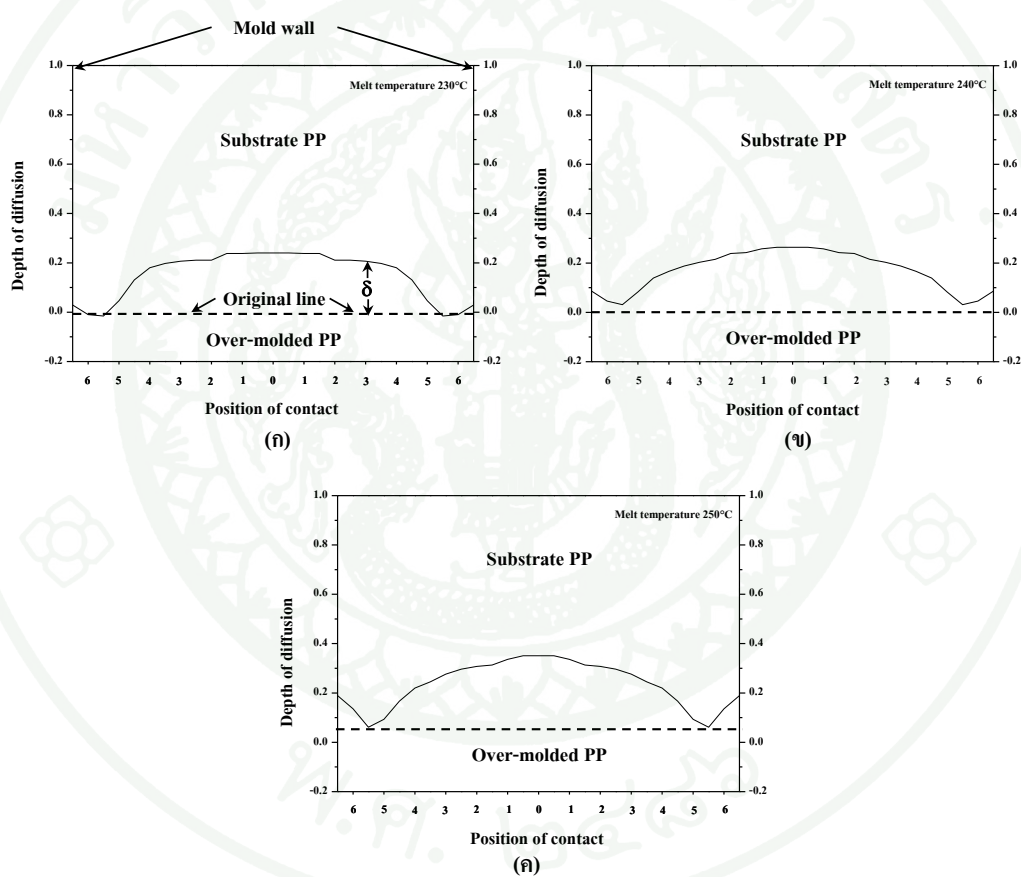
จากผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง โดยใช้อุณหภูมิวัสดุพื้นเท่ากับ 60°C และใช้แรงดันคงที่ 900 bar ดังแสดงในภาพที่ 40 พบว่าเมื่ออุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับเพิ่มขึ้นจาก 230°C ถึง 250°C ส่งผลให้ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการหลอมละลาย (Remelt) ของวัสดุพื้นและยึดเกาะกับวัสดุซ้อนทับเป็นเนื้อเดียวกัน รวมไปถึง ความหนาของชั้นผิวที่เย็นตัว (Solidified skin layer) ซึ่งเกิดจากพฤติกรรมไหลแบบน้ำพุ (Fountain flow) ของพอลิเมอร์หลอมเหลว มีค่าลดลง จึงทำให้บริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุซ้อนทับ (Bond interface) มีพื้นที่ผิวสัมผัส (Contact area) มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 41 นอกจากนี้หากพิจารณาระยะความลึกการหลอมละลาย (Depth of diffusion, δ) หรือปริมาณการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุล (Intermolecular diffusion) บริเวณหน้าสัมผัสดังแสดงในภาพที่ 42 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ส่งผลให้ระยะความลึกการหลอมละลายตลอดแนวสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัส ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่มากขึ้นจึงทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 40 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

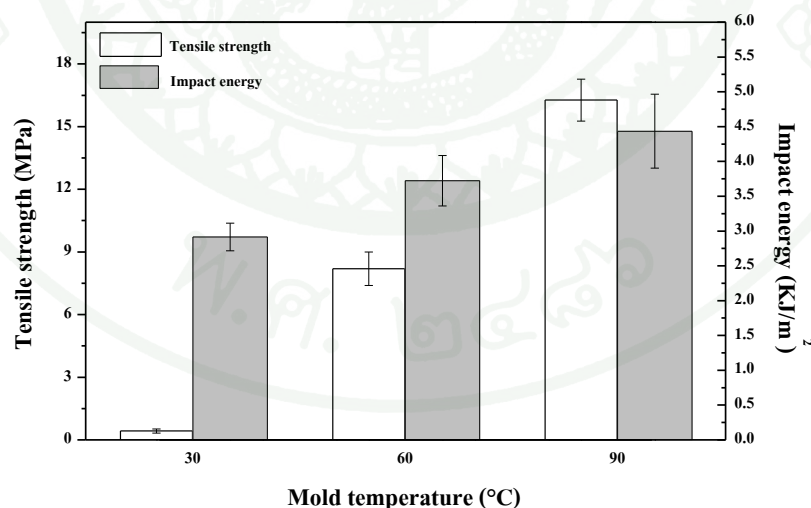


ภาพที่ 41 พฤติกรรมการไหลแบบน้ำพุ

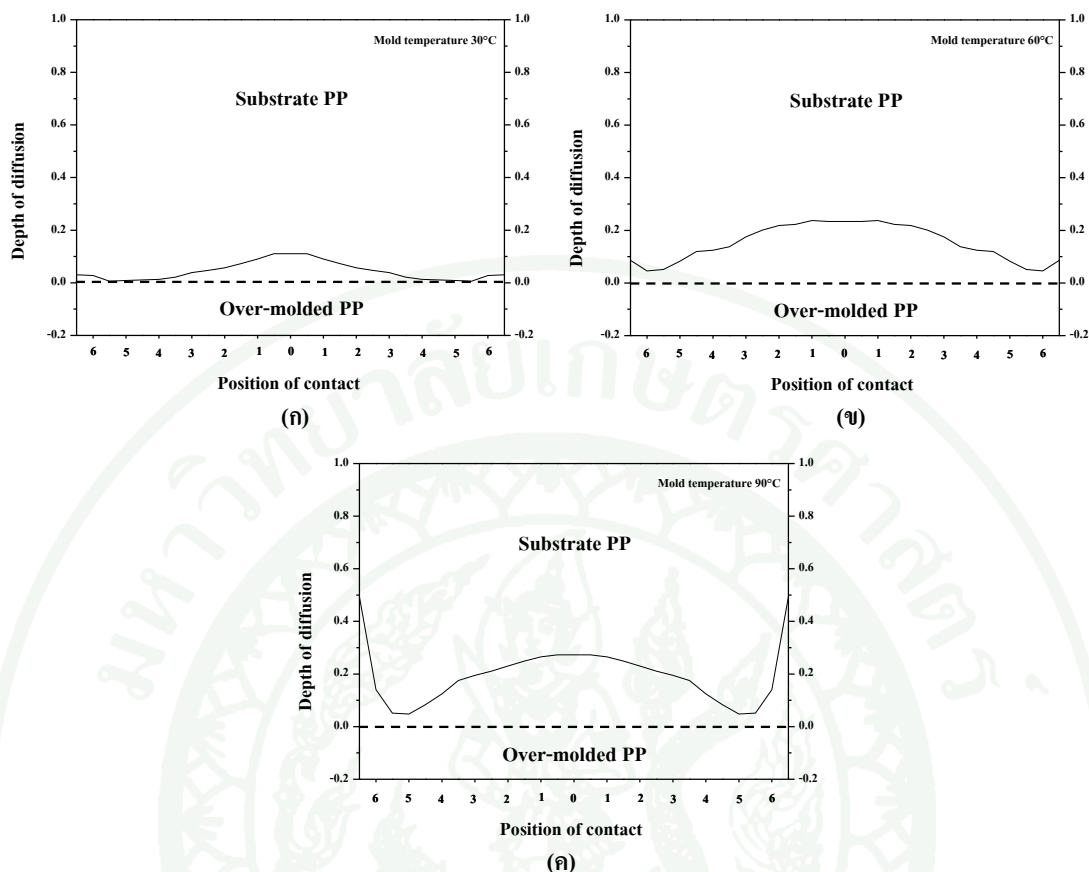


ภาพที่ 42 ระยะความลึกการหลอมละลายที่อุณหภูมิฉีดวัสดุขึ้นที่ (ก) 230°C (ข) 240°C และ (ค) 250°C

หากพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างวัสดุซ้อนทับและวัสดุพื้น ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ิ่ง โดยใช้อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ 240 °C และแรงดันคงค้าง 900 bar ดังแสดงในภาพที่ 43 พบว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้น ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีอัตราการเย็นตัวภายในแม่พิมพ์ที่ช้าลง ทำให้เวลาในการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลระหว่างผิวสัมผัสมากขึ้น ทั้งนี้อุณหภูมิวัสดุพื้นที่ยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนาของชั้นผิวที่เย็นตัวลดลง เนื่องจากความร้อนจากพอลิเมอร์หลอมเหลวมีการถ่ายเทไปยังแม่พิมพ์ได้น้อยลง จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับมากขึ้น นอกจากนี้หากพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อระยะความลึกการหลอมละลาย ดังแสดงในภาพที่ 44 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้น ส่งผลให้ระยะความลึกการหลอมละลายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากอัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ที่ช้าลงจึงทำให้หน้าสัมผัสของวัสดุซ้อนทับมีเวลาในการแพร่ข้ามมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอุณหภูมิของวัสดุพื้นที่ยิ่งเพิ่มสูงขึ้น พบว่าระยะการหลอมละลายบริเวณของผนังชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนเฉือน (Shear heating) ระหว่างพอลิเมอร์ชั้นผิวที่เย็นตัวและชั้นแกนกลาง ซึ่งส่งผลให้ความหนืดของวัสดุซ้อนทับที่ผนังมีค่าที่ลดลง ดังนั้นจึงมีการแพร่ข้ามที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้น

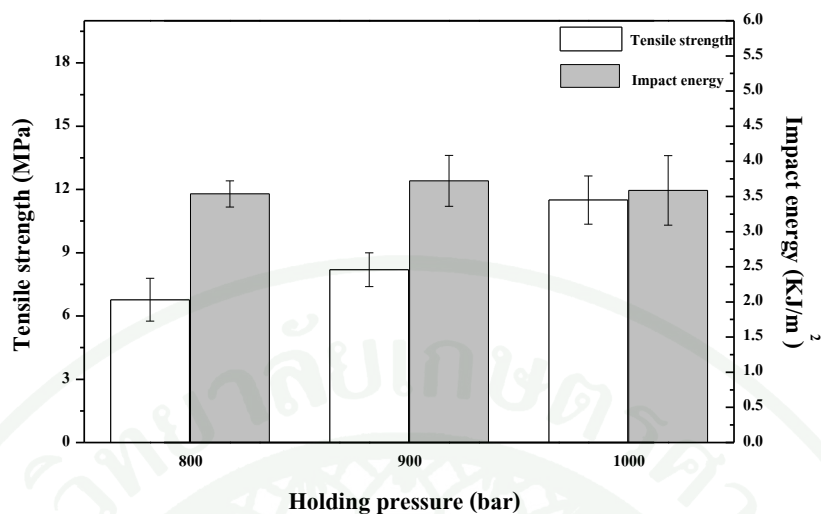


ภาพที่ 43 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

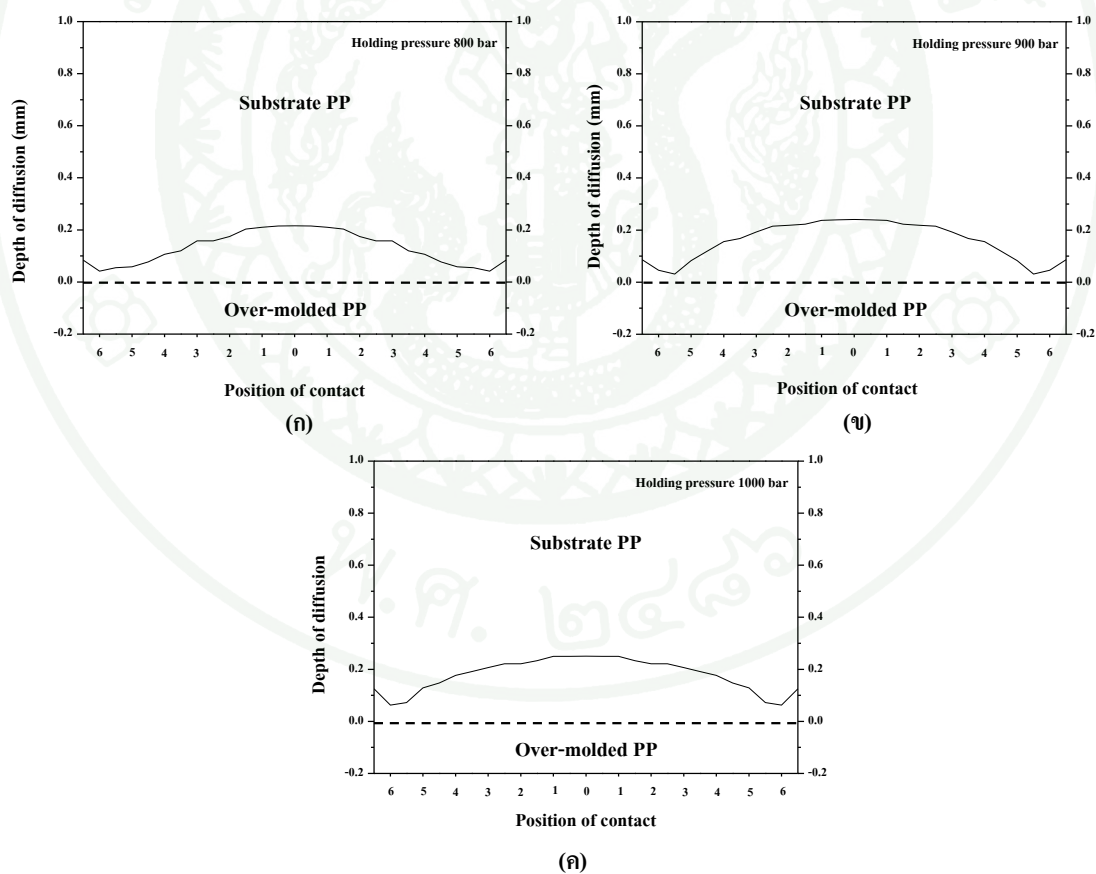


ภาพที่ 44 ระยะความลึกการหลอมละลายที่อุณหภูมิวัสดุพื้น (ก) 30°C (ข) 60°C และ (ค) 90°C

ภาพที่ 45 แสดงอิทธิพลของการเพิ่มแรงดันคงค้างที่มีต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ โดยใช้อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ 240 °C และอุณหภูมิวัสดุพื้น 60 °C ผลที่ได้พบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจาก การเพิ่มแรงดันคงค้างส่งผลให้ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณหน้าสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้เกิดการแพร่ข้ามระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่มากขึ้น ดังนั้นสมบัติการยึดเกาะจึงมีแนวโน้มที่มากขึ้นอย่างไรก็ตาม หากพิจารณาถึงภาพถ่ายบริเวณหน้าสัมผัสพบว่าเมื่อแรงดันคงค้างเพิ่มสูงขึ้น ความลึกของการหลอมละลายหรือปริมาณการแพร่ข้ามของวัสดุซ้อนทับ มีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพที่ 46 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มแรงดันคงค้าง ไม่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลของวัสดุซ้อนทับ และอัตราการเย็นตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความลึกของการหลอมละลายมีการเปลี่ยนแปลง ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น



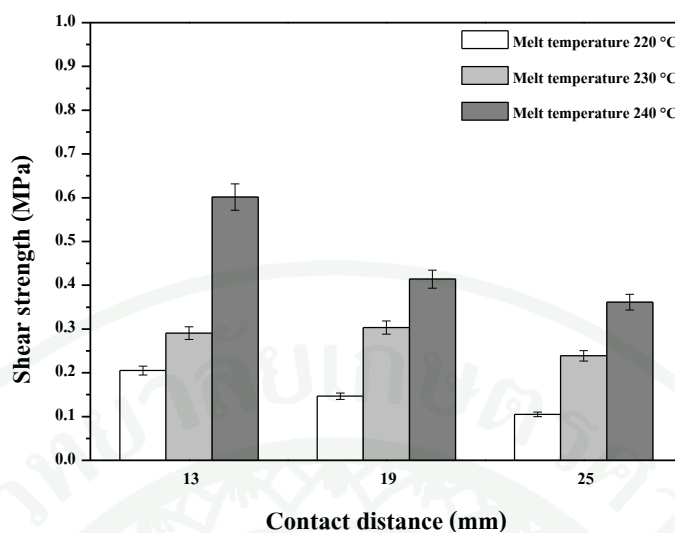
ภาพที่ 45 อิทธิพลของแรงดันคงค้างที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก



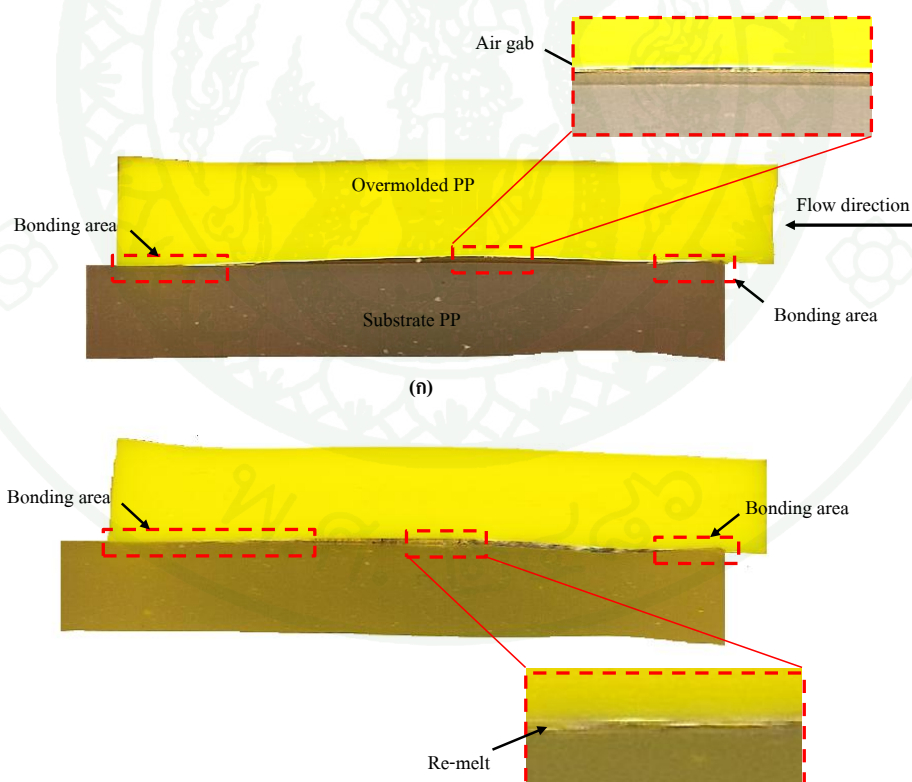
ภาพที่ 46 ระยะเวลาการหลอมละลายที่อุณหภูมิฉีดวัสดุขึ้นที่ (ก) 800 bar (ข) 900 bar และ (ค) 1000 bar

2. อิทธิพลของอุณหภูมิฉนวนวัสดุซ้อนทับที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงเฉือนของพอลิโพรพิลีนแบบแผ่นเรียบที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิฉนวนวัสดุซ้อนทับและระยะสัมผัส ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) เมื่อใช้วัสดุพื้นเป็นชิ้นงานพอลิโพรพิลีนแบบผิวเรียบที่อุณหภูมิ 30°C ดังแสดงในภาพที่ 47 พบว่า เมื่ออุณหภูมิวัสดุซ้อนทับเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง มีสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิฉนวนวัสดุซ้อนทับที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายของวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับดังแสดงในภาพที่ 48(ก) ในขณะที่ภาพ 48(ข) เกิดช่องว่างอากาศ (Air gap) จากการใช้อุณหภูมิวัสดุซ้อนทับ 220 °C ทั้งนี้ช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้น มีสาเหตุจากการหดตัวที่ต่างกันในแต่ละด้านของวัสดุซ้อนทับ กล่าวคือ วัสดุซ้อนทับด้านที่ติดผนังของแม่พิมพ์มีการถ่ายเทความร้อนได้ดี จึงเกิดเป็นชั้นผิวที่เย็นตัว (Solidified skin layer) ซึ่งมีความหนามากกว่า ในขณะที่วัสดุซ้อนทับด้านที่สัมผัสกับวัสดุพื้นมีการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำมาก ดังนั้นเมื่อชั้นแกนกลางของวัสดุซ้อนทับเริ่มเย็นตัว จึงทำให้วัสดุซ้อนทับด้านที่สัมผัสกับวัสดุพื้นมีการหดตัวมากกว่าด้านที่สัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ เกิดเป็นช่องว่างอากาศขนาดเล็กบริเวณหน้าสัมผัส ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะมีค่าที่ลดลง ทั้งนี้หากพิจารณาอิทธิพลของระยะสัมผัส พบว่า ความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มมีการเย็นตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณด้านหน้าการไหล ส่งผลให้อัตราการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลมีแนวโน้มลดลง



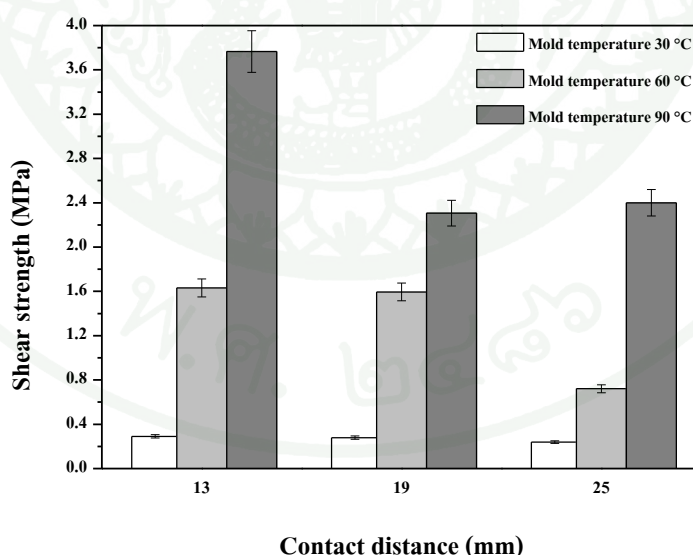
ภาพที่ 47 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะสัมผัสต่างๆ กันของพอลิโพรพิลีน แบบแผ่นเรียบ



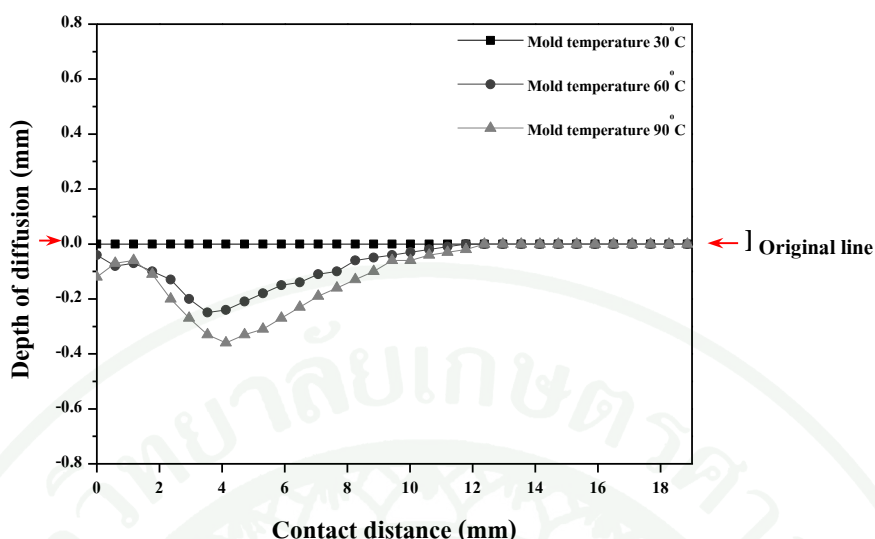
ภาพที่ 48 ภาพตัดตามแนวยาวของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลด์ิง ที่อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับเท่ากับ (ก) อุณหภูมิฉีด 220 °C และ (ข) 240 °C

3. อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงเฉือนของพอลิโพรพิลีนแบบแผ่นเรียบที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นและระยะสัมผัสที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อความแข็งแรงในการยึดเกาะของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ ดังแสดงในภาพที่ 49 โดยใช้วัสดุพื้นแบบแผ่นเรียบ และอุณหภูมิฉีดวัสดุขึ้นที่เท่ากับ 240°C พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้นส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุขึ้นที่ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว จึงส่งผลให้วัสดุขึ้นที่ที่มีความลึกและระยะการหลอมละลายที่มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 50 และหากพิจารณาอิทธิพลของระยะสัมผัสที่มากขึ้น พบว่า ในกรณีของอุณหภูมิวัสดุพื้น 30°C สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิของวัสดุพื้นเท่ากับ 60°C และ 90°C พบว่า ความแข็งแรงของการยึดเกาะมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุขึ้นที่ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอัตราการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลที่ลดลงรวมถึงระยะการหลอมละลายที่เริ่มมีค่าไม่แตกต่างกันที่ระยะทางการไหลประมาณ 12 mm (ดังแสดงในภาพที่ 50)



ภาพที่ 49 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุพื้นที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะสัมผัสต่างๆ กันของพอลิโพรพิลีน แบบแผ่นเรียบ

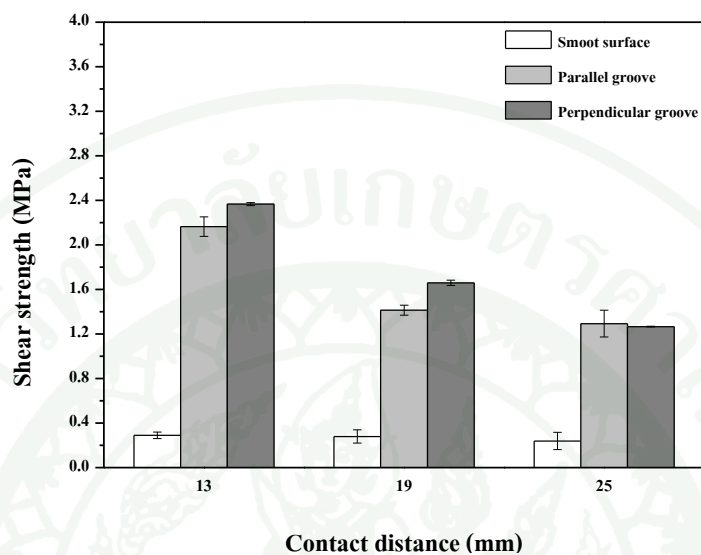


ภาพที่ 50 ความลึกและระยะทางการหลอมละลายของวัสดุพื้น เมื่อใช้ระยะสัมผัสเท่ากับ 19 mm

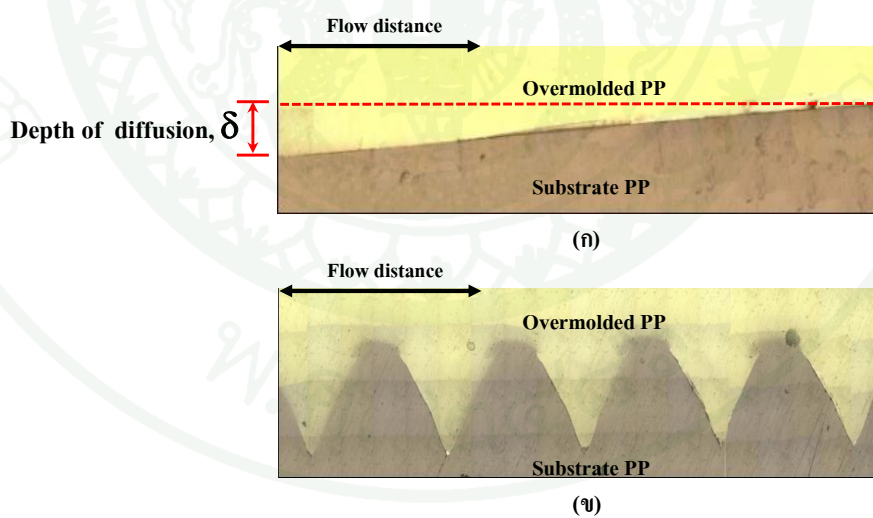
4. อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงเฉือนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง

ภาพที่ 51 แสดงผลการทดสอบอิทธิพลของลักษณะพื้นผิว (Surface pattern) และระยะสัมผัส ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน โดยใช้อุณหภูมิวัสดุขึ้นทับเท่ากับ 230 °C และอุณหภูมิวัสดุพื้น 30 °C ตามลำดับ จากการทดสอบผลที่ได้พบว่าความแข็งแรงของการยึดเกาะของชิ้นงานที่ใช้วัสดุพื้นแบบแผ่นร่องแนวนานทิศทางการไหล และแบบร่องแนวตั้งจากทิศทางการไหล มีสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ใช้วัสดุพื้นแบบผิวเรียบ ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานแผ่นร่องทั้ง 2 แบบ มีค่ามากกว่าพื้นที่ผิวสัมผัสแบบแผ่นเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 52 จึงทำให้วัสดุขึ้นทับและวัสดุพื้นมีพื้นที่ในการยึดเกาะเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ใช้วัสดุพื้นที่มีผิวสัมผัสแบบร่องแนวตั้งจากมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้พื้นผิวสัมผัสแบบร่องแนวนานที่ระยะสัมผัส 13 และ 19 mm ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วัสดุพื้นที่มีรูปร่างผิวสัมผัสแบบร่องแนวตั้งจาก เกิดการยึดเกาะทางกล (Mechanical interlock) อย่างไรก็ตามเมื่อระยะสัมผัสเพิ่มมากขึ้น (ที่ระยะสัมผัส 25 mm) พบว่าความแข็งแรงของการยึดเกาะจากวัสดุพื้นที่มีพื้นผิวสัมผัสแบบร่องแนวนานและร่องแนวตั้งจาก มีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวสัมผัสแบบร่องแนวตั้งจาก ขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ส่งผลให้ความเร็วในการไหลของวัสดุขึ้นทับเริ่มลดลง เมื่อระยะทางในการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุขึ้นทับ

มีความหนาของชั้นผิวที่แข็งตัวบริเวณด้านหน้าการไหลมากกว่าพื้นผิวสัมผัสแบบร่องขนาน ส่งผลให้เริ่มมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะที่ลดลง

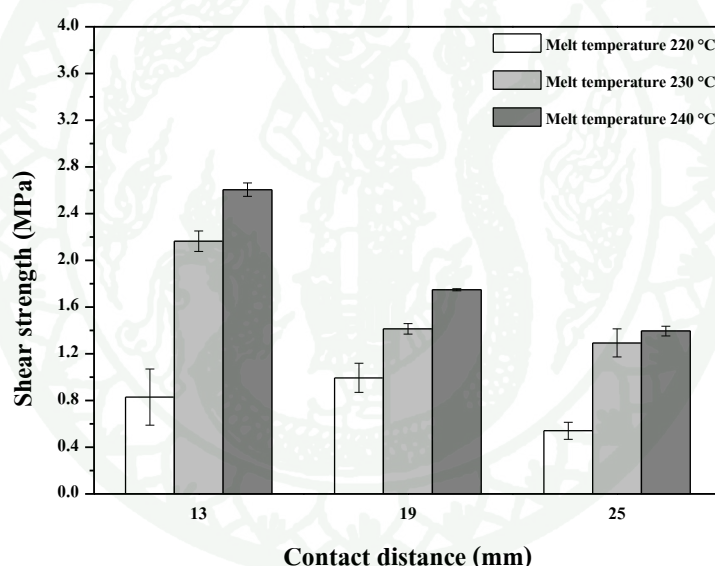


ภาพที่ 51 อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะสัมผัสต่างๆ

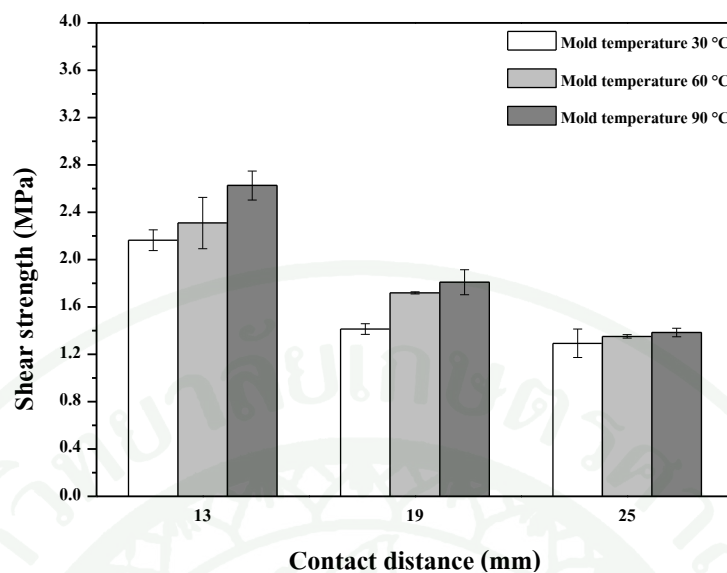


ภาพที่ 52 ภาพตัดตามแนวยาวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุซ้อนทับและวัสดุพื้นแบบ (ก) แผ่นเรียบ และ (ข) แผ่นร่องแนวตั้งฉาก

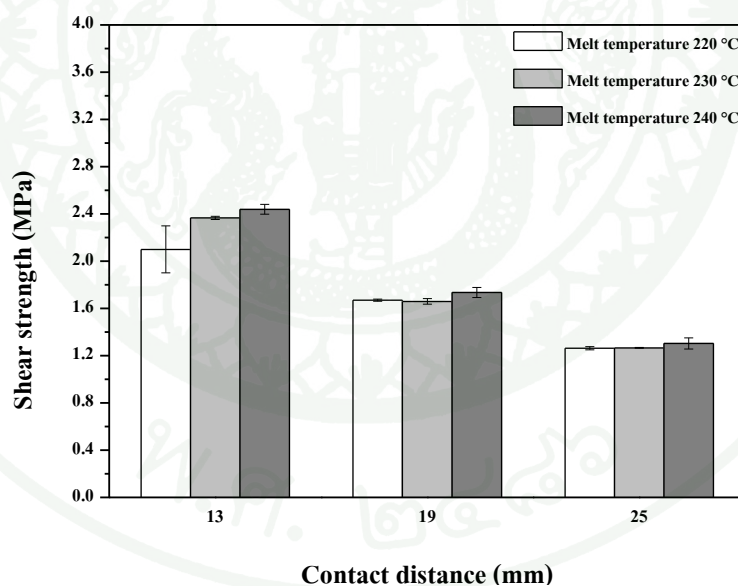
หากพิจารณาเปรียบเทียบถึงอิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับและอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะเมื่อมีการใช้วัสดุพื้นที่มีผิวสัมผัสแบบร่องแนวขนานดังแสดงในภาพที่ 53 และ 54 และร่องแนวตั้งฉาก ดังแสดงในภาพที่ 55 และ 56 จากผลการทดลองพบว่า ในกรณีของชิ้นงานที่ใช้วัสดุพื้นซึ่งมีผิวสัมผัสแบบร่องแนวขนานมีสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับและอุณหภูมิวัสดุพื้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับและวัสดุพื้น ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับและอุณหภูมิของวัสดุพื้น เมื่อใช้วัสดุพื้นที่มีผิวสัมผัสแบบร่องแนวตั้งฉาก พบว่าความแข็งแรงของการยึดเกาะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากพื้นผิวสัมผัสแบบร่องตั้งฉาก ขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น



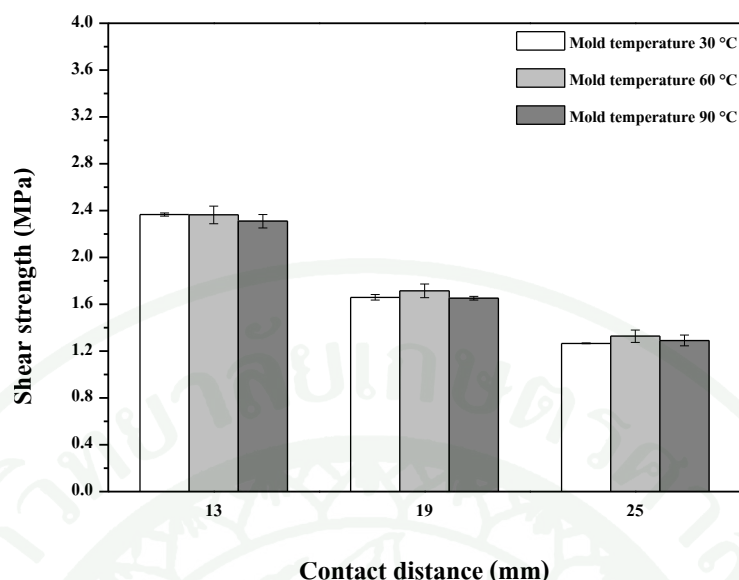
ภาพที่ 53 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับต่อความแข็งแรงของชิ้นงานแบบร่องแนวขนานที่ระยะสัมผัสต่างๆ



ภาพที่ 54 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นต่อความแข็งแรงของชิ้นงานแบบร่องแนวขนานที่ระยะสัมผัสต่างๆ



ภาพที่ 55 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับต่อความแข็งแรงของชิ้นงานแบบร่องแนวตั้งฉากที่ระยะสัมผัสต่างๆ



ภาพที่ 56 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นต่อความแข็งแรงของชิ้นงานแบบร่องแนวตั้งฉากที่ระยะสัมผัสต่างๆ

5. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายความแข็งแรงการยึดเกาะของชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนแบบผิวเรียบ เมื่อใช้วัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับพอลิโพรพอลีนจากสมการที่ 12 ทำการหาสมการ C: ซึ่งเป็นฟังก์ชันพหุนามแบบจัดในรูปผลรวมของผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ และปัจจัยในกระบวนการผลิต ที่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน ได้แก่ อุณหภูมิฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลว (T_{melt}) อุณหภูมิวัสดุพื้น (T_{mold}) และระยะผิวสัมผัส (S)

เมื่อทำการวิเคราะห์การถดถอยในโปรแกรม MATLAB ของสมการ C เพื่อทำนายค่าความแม่นยำความสามารถในการยึดเกาะดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมการ C ที่ใช้ทำนายความแข็งแรงการต้านทานต่อแรงเฉือน

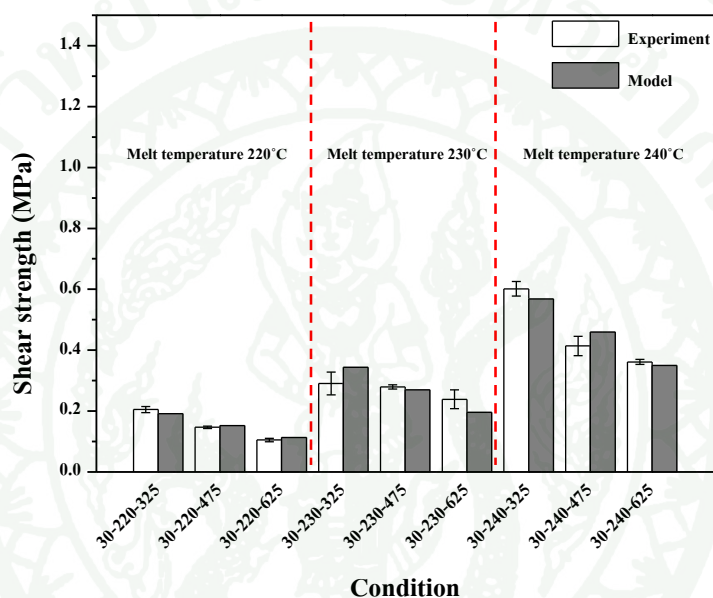
สมการค่า C	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
$a_1T_{mt} + a_2T_{md} + a_3S$	264.183298
$a_1T_{mt} + a_2T_{md} + a_3S + a_4(t_{mt} \times t_{md}) + a_5(t_{md} \times S) + a_6(t_{mt} \times S)$	54.40446
$a_1T_{mt} + a_2T_{md} + a_3S + a_4(t_{mt} \times t_{md}) + a_5(t_{md} \times S) + a_6(t_{mt} \times S) + a_7t_{mt}^2 + a_8t_{md}^2 + a_9S^2$	37.93221
$a_1T_{mt} + a_2T_{md} + a_3S + a_4(t_{mt} \times t_{md}) + a_5(t_{md} \times S) + a_6(t_{mt} \times S) + a_7t_{mt}^2 + a_8t_{md}^2 + a_91/(S^2)$	37.93221
$a_1T_{mt} + a_2T_{md} + a_3S + a_4(t_{mt} \times t_{md}) + a_5(t_{md} \times S) + a_6(t_{mt} \times S) + a_7t_{mt}^2 + a_8t_{md}^2 + a_9S^2 + a_{10}(t_{mt} \times t_{md} \times S)$	37.93221
$a_1T_{mt} + a_2T_{md} + a_3S + a_4(t_{mt} \times t_{md}) + a_5(t_{md} \times S) + a_6(t_{mt} \times S) + a_7t_{mt}^2 + a_8t_{md}^2$	26.78132

จากสมการ C ในตารางที่ 4 ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด คือ 26.78132% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละพจน์ของฟังก์ชันพหุนาม สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นชนิดหลายตัวแปร โดยใช้โปรแกรม MATLAB มีค่าดังตารางที่ 5

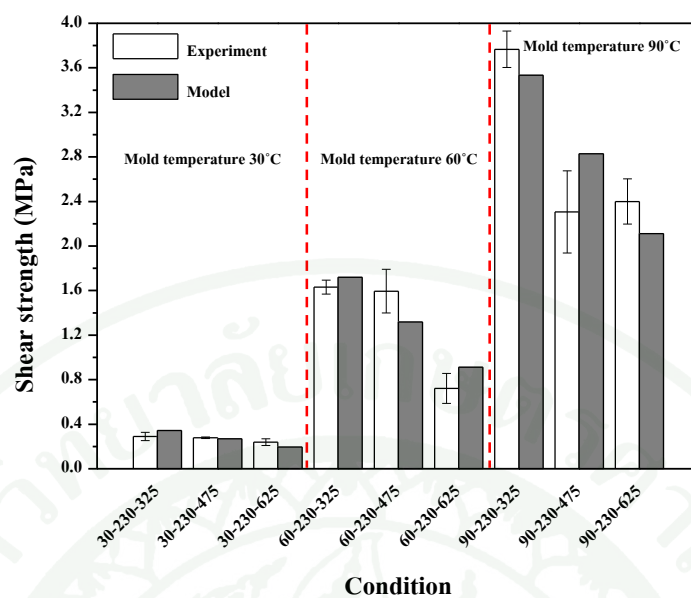
ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ (a_i) ของแต่ละพจน์ในสมการ C

พจน์ของปัจจัยกระบวนการผลิตในสมการ C	ค่าสัมประสิทธิ์
a_1	0.032082325
a_2	-0.162052098
a_3	-0.064715597
a_4	0.000633576
a_5	0.000672482
a_6	0.000212954
a_7	-0.000131924
a_8	-0.00010129

เมื่อแทนค่าที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นชนิดหลายตัวแปรกลับลงไป ในสมการที่ 12 เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 57 สำหรับการทำนายความแข็งแรงของการยึดเกาะอิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุซ้อนทับพบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความแม่นยำ แต่ผลจากอิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นพบว่ายังคงมีความคลาดเคลื่อนทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในภาพที่ 58



ภาพที่ 57 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองและจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิวัสดุซ้อนทับและระยะสัมผัสต่างกัน



ภาพที่ 58 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองและจากสมการทางคณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิวัสดุพื้นและระยะสัมผัสต่างกัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตแบบโอเวอร์โมลด์ซึ่งมีต่อสมบัติการยึดเกาะซึ่งได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงกระแทก และความต้านทานต่อแรงเฉือนของพอลิโพรพิลีนที่เป็นวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนซ้อนทับโดยปัจจัยสำคัญที่ศึกษาสำหรับความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก ได้แก่ อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิวัสดุพื้น และแรงดันคงค้าง จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้นส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ในขณะที่การเพิ่มแรงดันคงค้างไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงในการยึดเกาะมากนัก

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือนซึ่งได้แก่ อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิวัสดุพื้นระยะทางและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสพบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและอุณหภูมิวัสดุพื้น ในขณะที่การเพิ่มระยะสัมผัสส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลง และหากพิจารณาอิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน พบว่าผิวขึ้นงานแบบแผ่นร่องแนวนานและแบบแผ่นร่องแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลให้สมบัติการยึดเกาะที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับผิวขึ้นงานแบบแผ่นเรียบ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่า ในระยะทางการไหลที่เท่ากัน รวมถึงการยึดเกาะทางกลที่เกิดขึ้น

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายความต้านทานต่อแรงเฉือนของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่มีผิวสัมผัสแบบแผ่นเรียบ จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบพบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองจริงโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณร้อยละ 26.78

ข้อเสนอแนะ

หาแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายความแข็งแรงการยึดเกาะเมื่อใช้วัสดุพื้นที่มีผิวสัมผัสในลักษณะต่างกัน เช่นแบบแผ่นร่องแนวนอน และแผ่นร่องแนวตั้งจากกับทิศทางการไหลของพอลิโพรพิลีน



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2548. พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

วุฒิพงษ์ รั้งยี่สันติวานนท์ และ ชีระพนธ์ เข้มวงษ์. 2550. การพัฒนาเทคโนโลยีการฉีดพลาสติกโดยใช้น้ำช่วย. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

Ajbani, M., C. Kiehl and T.F.E. Materne. 2006. **Overmolded Grip**. U.S. Patents 7150919.

Barinaga, L.C. and D.D. Dowell. 2004. **Overmolded Elastomeric Diaphragm for Pressurization in Inkjet Printing Systems**. U.S. Patents 6824139.

Birley, A.W., B. Haworth and J. Batchelor. 1992. Physics of Plastics. *In Processing, Properties and Materials Engineering*. Hanser Publishers, New York.

Chia, C.J., S.S. Lim and M. Alagaratnam. 1998. **Method of Improving Molding of and Overmolded Package Body in a Substrate**. U.S. Patents 5744084.

Chen, S.-C., T.-J. Chen, R.-D. Chien and S.-C. Chen. 2007. Investigation on the weldline strength of thin-wall injection molded ABS parts. **Heat and Mass Transfer**. 34: 448-455.

Chien, R.D., S.-C. Chen, H.-S. Peng, P.-L. Su and C.-S. Chen. 2004. Investigation on the weldline strength of thin-wall injection molded parts. **Reinforced Plastics And Composites**. 23 (6): 575-588.

Clearfield, H. M., D.K. McNamara and G.D. Davis. 1991. **Adhered Surface Preparation for Structural Adhesive Bonding**. Plenum Press, New York.

Clements, H.H. 2007. **Bonding Strength at Solid-melt Interface in a Two-component Injection Molding Process**. Technical University of Eindhoven, Department Mechanical Engineering, Polymer Technology Group.

Dondero, M., J.M. Pastor, S.M. Carella and C.J. Perez. 2009. Adhesion Control for Injection Overmolding of Polypropylene With Elastomeric Ethylene Copolymers. **Polymer Engineering and Science**: 1886-1893.

Kim, S.G. and Suh, N. P. 1986. Performance Prediction of Weldline Structure in Amorphous Polymers. **Polymer Engineering and Science**. 36: 1200-1207.

Kinloch, A.J. 1990. **Adhesion and Adhesives**. Science and Technology, Chapman and Hall, London.

Lee, L. H. 1991. **Adhesive Bonding**. Plenum Press, New York.

Modic, M.J. 1999. **Block Copolymers with Improved Overmolding Adhesion**. U.S. Paents 5969034.

Osswald, T.A. 1998. **Polymer Processing Fundamental**. Carl HanserVerlag, Munich.

Packham, D.E. 2005. **Handbook of Adhesion**. John Wiley & Sons, New York.

Pocius, A.V. 2002. **Adhesion and Adhesives Technology**. Hanser Publishers, New York.

Rossa-Sierra, A., M. Sánchez-Soto, M. Sánchez-Soto, S. Illescas, M. Ll. MasPOCH.
2009. Study of the interface behaviour between MABS/TPU bi-layer structures obtained through overmoulding. **Materials and Design**. 30: 3979-3988.

Rosato Donald, V. and Rosato Dominick, V. 1995. **Injection Molding Handbook: The Complete Molding Operation Technology, Performance, Economics, Second Edition.** Chapman & Hall, New York.

Sombatsompop, N. and W. Chaiwattanpipat. 2000. Temperature profiles of glass fibre-filled polypropylene melts in injection moulding. **Polymer Testing.** 19: 713-724.

Voyutskii, S.S. 1963. **Autohesion and Adhesion of Polymer.** Interscience, New York.

Zhao, J., Yu, S.Z., Chen, G., and Juay, Y.K. 2008. **Over-molding Technologies for Automotive Plastic Components Manufacturing Applications.** SIM Tech technical 9.





ภาคผนวก ก

ผลทดสอบความแข็งแรงของการยึดเกาะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป
ด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์แบบทิศทางเดียว

ตารางผนวกที่ ก1 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุชั้นทับที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

อุณหภูมิวัสดุชั้นทับ (°C)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
230	6.78063	0.42161
240	8.19658	2.79679
250	9.36040	4.03971

ตารางผนวกที่ ก2 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

อุณหภูมิวัสดุพื้น (°C)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
30	0.42735	0.10000
60	8.19658	2.79679
90	16.26952	1.50053

ตารางผนวกที่ ก3 อิทธิพลของแรงดันคงค้างที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

แรงดันคงค้าง (Bar)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
800	6.77078	1.01323
900	8.19658	2.79679
1000	11.4984	3.14193

ตารางผนวกที่ ก4 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุชั้นทับที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

อุณหภูมิวัสดุชั้นทับ (°C)	ความต้านทานต่อแรงกระแทก (J)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
230	0.11929	0.00457
240	0.1396	0.01357
250	0.15549	0.02467

ตารางผนวกที่ ก5 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

อุณหภูมิวัสดุพื้น(°C)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
30	0.10928	0.00746
60	0.13960	0.01357
90	0.16628	0.02988

ตารางผนวกที่ ก6 อิทธิพลของแรงดันคงค้างที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

แรงดันคงค้าง (Bar)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
800	0.13263	0.00698
900	0.1396	0.01357
1000	0.1345	0.01856

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ระยะความลึกของการหลอมละลายที่ระยะต่างๆของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป
ด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์แบบทิศทางเดียว

พ.ศ. ๒๕๕๖

ตารางผนวกที่ ข1 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุชั้นทับที่มีผลต่อระยะความลึกของการหลอม
ละลายตลอดแนวสัมผัสของชิ้นงาน โอเวอร์โมลด์แบบทิศทางเดียว

ระยะต่างๆ (mm)	อุณหภูมิวัสดุชั้นทับ (°C)		
	230	240	250
0.0	0.02889	0.08627	0.18922
0.5	-0.01000	0.04577	0.13579
1.0	-0.01556	0.03105	0.06151
1.5	0.04667	0.08259	0.09344
2.0	0.13111	0.13941	0.16729
2.5	0.18000	0.16623	0.21964
3.0	0.19778	0.18782	0.24519
3.5	0.20667	0.20305	0.27669
4.0	0.21111	0.21514	0.29669
4.5	0.21111	0.23882	0.30778
5.0	0.23778	0.24250	0.31332
5.5	0.23811	0.25723	0.33609
6.0	0.24000	0.26355	0.35121
6.5	0.24000	0.26355	0.35121
7.0	0.23811	0.25723	0.33609
7.5	0.23778	0.24250	0.31332
8.0	0.21111	0.23882	0.30778
8.5	0.21111	0.21514	0.29669
9.0	0.20667	0.20305	0.27669
9.5	0.19778	0.18782	0.24519
10.0	0.18000	0.16623	0.21964
10.5	0.13111	0.13941	0.16729
11.0	0.04667	0.08259	0.09344
11.5	-0.01556	0.03105	0.06151
12.0	-0.01000	0.04577	0.13579
12.5	0.02889	0.08627	0.18922

ตารางผนวกที่ ข2 อิทธิพลของอุณหภูมิผิววัสดุพื้นที่มีผลต่อระยะความลึกของการหลอมละลาย
ตลอดแนวสัมผัสของชิ้นงาน โอเวอร์โมลด์แบบทิศทางเดียว

ระยะต่างๆ (mm)	อุณหภูมิผิววัสดุพื้นที่ (°C)		
	30	60	90
0.0	0.03076	0.08627	0.49368
0.5	0.02752	0.04577	0.14047
1.0	0.00648	0.05137	0.05137
1.5	0.00886	0.08259	0.04818
2.0	0.01086	0.11941	0.08319
2.5	0.01324	0.12455	0.12455
3.0	0.02133	0.13782	0.17547
3.5	0.03886	0.17547	0.19456
4.0	0.04695	0.20092	0.21092
4.5	0.05666	0.21882	0.23047
5.0	0.07285	0.2225	0.24911
5.5	0.09066	0.23723	0.26547
6.0	0.11038	0.23355	0.27275
6.5	0.11038	0.23355	0.27275
7.0	0.09066	0.23723	0.26547
7.5	0.07285	0.2225	0.24911
8.0	0.05666	0.21882	0.23047
8.5	0.04695	0.20092	0.21092
9.0	0.03886	0.17547	0.19456
9.5	0.02133	0.13782	0.17547
10.0	0.01324	0.12455	0.12455
10.5	0.01086	0.11941	0.08319
11.0	0.00886	0.08259	0.04818
11.5	0.00648	0.05137	0.05137
12.0	0.02752	0.04577	0.14047
12.5	0.03076	0.08627	0.49368

ตารางผนวกที่ ๓3 อิทธิพลของแรงดันคงค้างที่มีผลต่อระยะความลึกของการหลอมละลายตลอด
แนวสัมผัสของชิ้นงาน โอเวอร์โมลด์แบบทิศทางเดียว

ระยะต่างๆ (mm)	แรงดันคงค้าง (Bar)		
	800	900	1000
0.0	0.08398	0.08627	0.12558
0.5	0.04199	0.04577	0.06233
1.0	0.05491	0.03105	0.07233
1.5	0.05814	0.08259	0.12883
2.0	0.07752	0.11941	0.14783
2.5	0.10659	0.15623	0.17683
3.0	0.11951	0.16782	0.19166
3.5	0.15827	0.19305	0.20699
4.0	0.15827	0.21514	0.22118
4.5	0.17442	0.21882	0.22118
5.0	0.20318	0.2225	0.23332
5.5	0.21026	0.23723	0.24966
6.0	0.21583	0.24091	0.25049
6.5	0.21583	0.24091	0.25049
7.0	0.21026	0.23723	0.24966
7.5	0.20318	0.2225	0.23332
8.0	0.17442	0.21882	0.22118
8.5	0.15827	0.21514	0.22118
9.0	0.15827	0.19305	0.20699
9.5	0.11951	0.16782	0.19166
10.0	0.10659	0.15623	0.17683
10.5	0.07752	0.11941	0.14783
11.0	0.05814	0.08259	0.12883
11.5	0.05491	0.03105	0.07233
12.0	0.04199	0.04577	0.06233
12.5	0.08398	0.08627	0.12558



ภาคผนวก ค

ผลทดสอบความแข็งแรงการต้านทานต่อแรงเฉือนของการยึดเกาะของชิ้นงานที่ผ่าน
การขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ดิ้ง

ตารางผนวกที่ ค1 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ระยะต่างๆ

ระยะสัมผัส (mm)	อุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับ (°C)					
	220	SD	230	SD	240	SD
13	205.12821	81.40771	290.59830	29.60769	601.53851	195.32911
19	146.66667	54.49338	303.50873	68.66796	414.03510	135.39494
25	104.88888	16.07390	238.80000	77.49890	361.33332	13.33333

ตารางผนวกที่ ค2 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ระยะต่างๆ

ระยะสัมผัส (mm)	อุณหภูมิวัสดุพื้น (°C)					
	30	SD	60	SD	90	SD
13	290.5983	29.6077	1630.7692	248.8808	3765.7692	237.9592
19	279.5321	68.6680	1594.7368	396.9840	2306.3158	289.8365
25	238.8000	77.4989	721.3667	284.7914	2399.8000	208.0291

ตารางผนวกที่ ค3 อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน

ระยะสัมผัส (mm)	ลักษณะพื้นผิว					
	แผ่นเรียบ	SD	แผ่นร่อง แนวนาน	SD	แผ่นร่อง แนวตั้งฉาก	SD
13	1630.76923	248.88084	2309.85822	216.81094	2363.12251	75.58633
19	1594.73684	396.98401	1719.65396	9.52423	1714.94645	58.75407
25	721.36667	284.79139	1351.65837	14.98657	1326.97218	51.82782

ตารางผนวกที่ ค4 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะผิวสัมผัสต่าง ๆ กันของชิ้นงานแผ่นร่องแนวนาน

ระยะสัมผัส (mm)	อุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับ (°C)					
	220	SD	230	SD	240	SD
13	829.75322	239.97107	2164.05512	88.59544	2605.30587	57.22305
19	994.22644	125.15962	1412.72421	44.60476	1747.42828	8.83207
25	541.41168	72.89343	1292.98395	120.40678	1395.03809	41.72635

ตารางผนวกที่ ค5 อิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุพื้นที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะผิวสัมผัสต่าง ๆ กันของชิ้นงานแผ่นร่องแนวนาน

ระยะสัมผัส (mm)	อุณหภูมิวัสดุพื้น (°C)					
	30	SD	60	SD	90	SD
13	2164.05512	88.59544	2309.85822	216.81094	2626.40518	122.35687
19	1412.72421	44.60476	1719.65396	9.52423	1808.78285	106.18237
25	1292.98395	120.40678	1351.65837	14.98657	1384.81181	35.68729

ตารางผนวกที่ ค6 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสต่าง ๆ กันของชิ้นงานแผ่นร่องแนวตั้งฉาก

ระยะสัมผัส (mm)	อุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นทับ (°C)					
	220	SD	230	SD	240	SD
13	2098.97981	198.95853	2365.87459	13.57571	2439.03415	41.15109
19	1670.22509	8.56025	1659.39781	23.43692	1734.87492	43.64890
25	1263.28896	12.81998	1265.55485	3.30495	1303.00153	47.35568

ตารางผนวกที่ ๗ อิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุพื้นที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะผิวสัมผัส
ต่าง ๆ กันของชิ้นงานแผ่นร่องแนวตั้งฉาก

ระยะสัมผัส (mm)	อุณหภูมิวัสดุพื้น (°C)					
	30	SD	60	SD	90	SD
13	2365.87459	13.57571	2363.12251	75.58633	2308.99819	57.85925
19	1659.39781	23.43692	1714.94645	58.75407	1651.70888	15.68292
25	1265.55485	3.30495	1326.97218	51.82782	1290.36029	45.89890

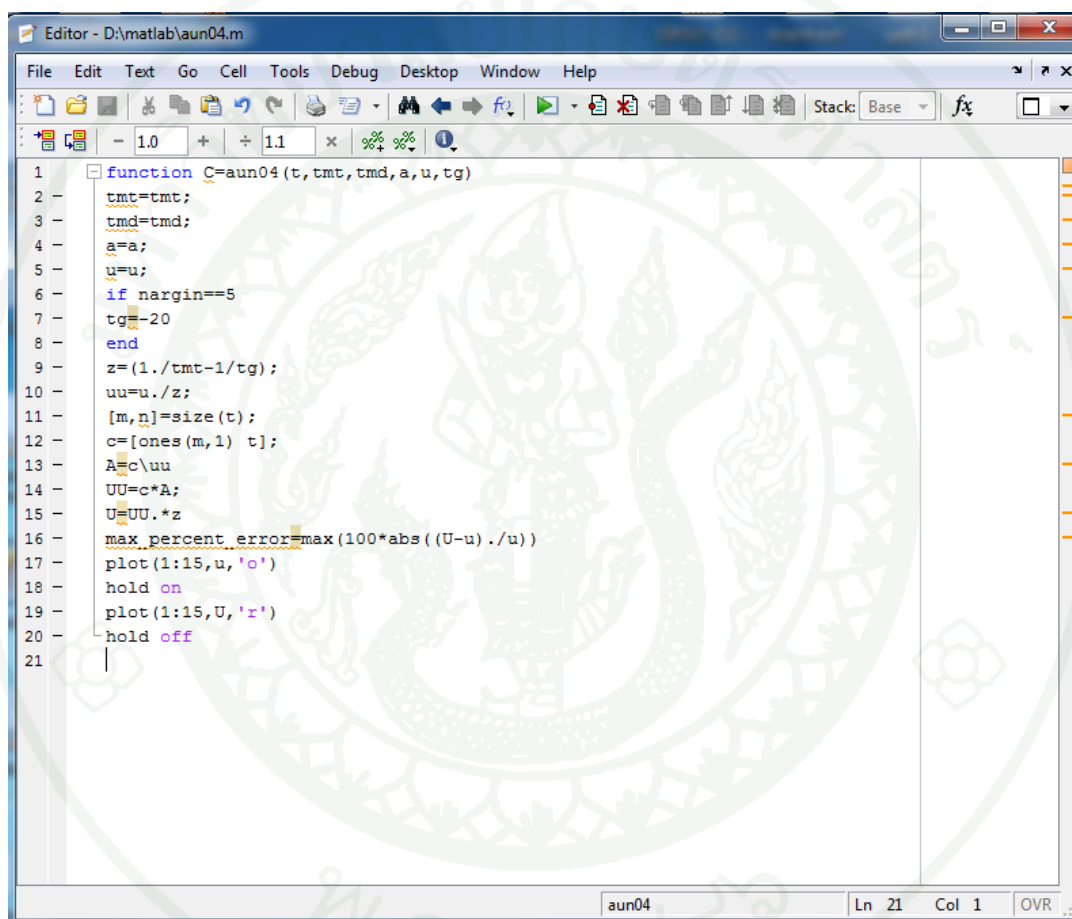


ภาคผนวก ง

ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB

ขั้นตอนการวิเคราะห์การคดโดยโดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB

1. เปิดโปรแกรม MATLAB
2. ทำการเขียนคำสั่งเพื่อให้โปรแกรมหาค่า U

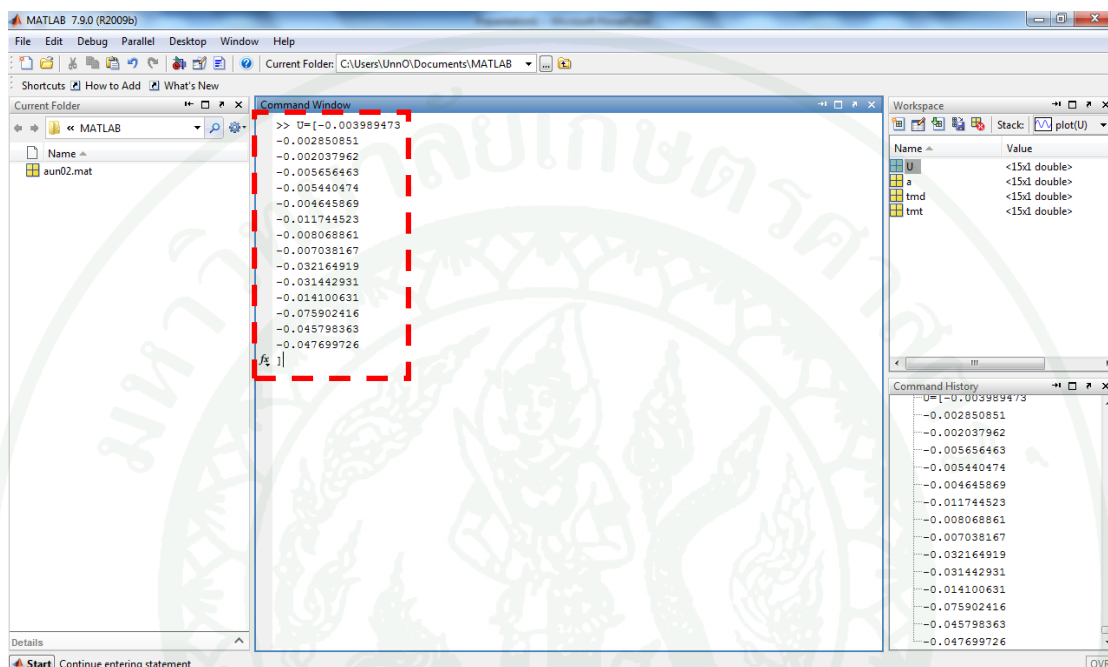


```

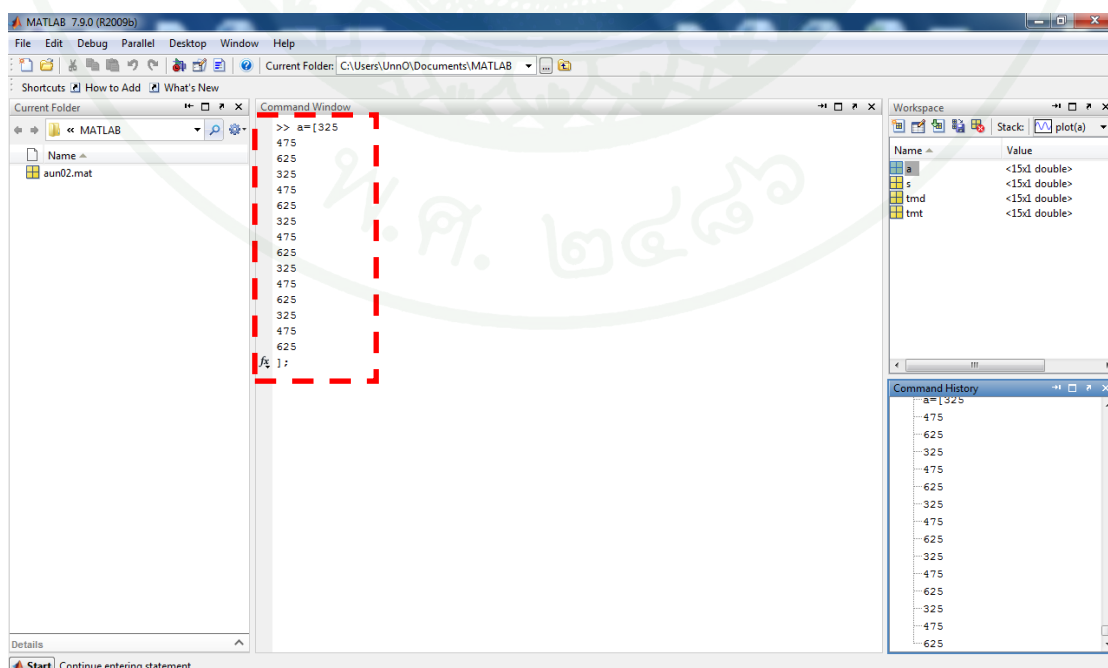
1 function C=aun04 (t, tmt, tmd, a, u, tg)
2     tmt=tmt;
3     tmd=tmd;
4     a=a;
5     u=u;
6     if nargin==5
7         tg=-20
8     end
9     z=(1./tmt-1/tg);
10    uu=u./z;
11    [m,n]=size(t);
12    c=[ones(m,1) t];
13    A=c\uu
14    UU=c*A;
15    U=UU.*z
16    max_percent_error=max(100*abs((U-u)./u))
17    plot(1:15,u,'o')
18    hold on
19    plot(1:15,U,'r')
20    hold off
21
  
```

3. กำหนดค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอย ดังนี้

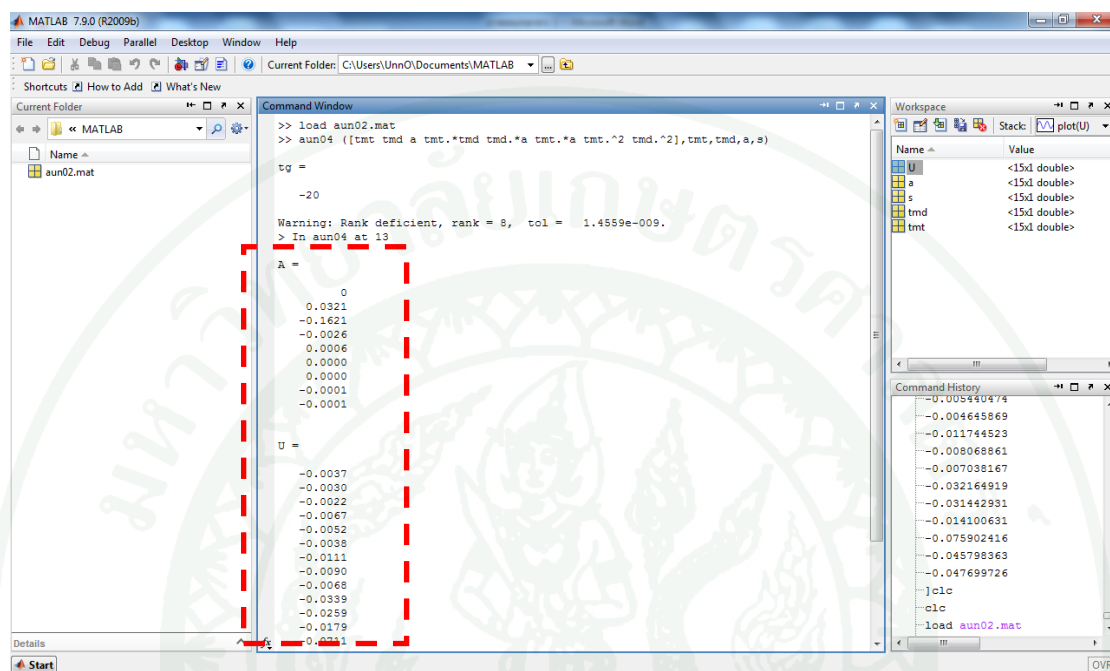
กำหนดค่า U ที่ได้จากการทดลอง



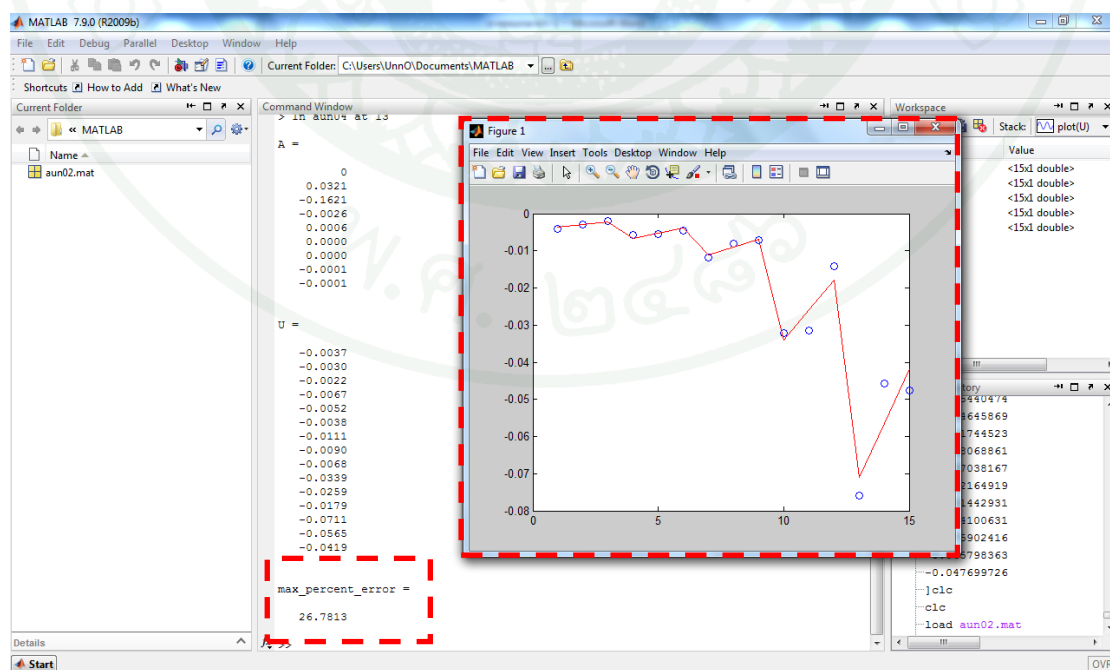
กำหนดค่าพื้นที่ผิวสัมผัส (a)



4. ป้อนสมการ C ที่ได้กำหนดในรูปฟังก์ชันพหุนาม เพื่อหาค่า U และค่าสมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยจากโปรแกรม MATLAB



พร้อมกับได้ค่าความคลาดเคลื่อน



ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายจตุพงศ์ ครองธนาอินทร์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 25 กันยายน 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมวัสดุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษา	โครงการวิจัยของ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ สนับสนุนทุนวิจัย รหัสโครงการ MT-B-53-POL-11-489-G