

เอกสารหลักฐานที่ใช้ในการประเมินผลการสอนแบบที่ 2

รายวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

(Polymer Technology)

พลพัฒน์ รวมเจริญ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

2564

เอกสารหลักฐานที่ใช้ในการประเมินผลการสอนแบบที่ 2

รายวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

(Polymer Technology)

พลพัฒน์ รวมเจริญ

Ph.D. (Polymerization Engineering)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

2564

คำนำ

เอกสารคำสอนรายวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ (Polymer Technology) ผู้เขียนได้เรียบเรียงขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในรายวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ (4423206) ซึ่งเป็นวิชาเลือกสำหรับนักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2559 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีเอกสารคำสอนที่รวบรวมเนื้อหาตามที่หลักสูตรได้กำหนดไว้ เนื้อหาของเอกสารคำสอนนี้เป็นเนื้อหาในเชิงบรรยายที่มุ่งเน้นให้ผู้เรียนมีความรู้ความเข้าใจและใช้ประกอบการฝึกปฏิบัติด้วย

เอกสารคำสอนฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหา 5 บทซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายรายวิชา บทที่ 1 เกี่ยวกับชนิดและสมบัติของพอลิเมอร์ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันในปัจจุบัน รวมถึงพอลิเมอร์ชีวภาพที่สำคัญบางชนิด บทที่ 2 มีเนื้อหาเกี่ยวกับสารเคมีที่ใช้ผสมกับพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้เหมาะกับการใช้งาน บทที่ 3 เกี่ยวข้องกับการผสมพอลิเมอร์กับสารเคมี บทที่ 4 และ 5 เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป บทที่ 4 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดพอลิเมอร์และบทที่ 5 เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์

เนื้อหาในเอกสารคำสอนฉบับนี้ได้เรียบเรียงจากความรู้และประสบการณ์ของผู้เรียบเรียงและใช้เนื้อหาจากหนังสือ บทความวิจัยและบทความปริทรรศน์ในวารสาร รวมทั้งผลงานวิจัยของผู้เรียบเรียงดังปรากฏในเอกสารอ้างอิงเพื่อให้เกิดความทันสมัยและชัดเจนในการอธิบาย นอกจากนี้ผู้เรียบเรียงได้ใช้คำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์เป็นภาษาไทยจากพจนานุกรมศัพท์พอลิเมอร์ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ.2560

ผู้เขียนหวังว่าเอกสารคำสอนเล่มนี้จะอำนวยความสะดวกต่อการเรียนวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ทำให้นักศึกษาเกิดความเข้าใจในหลักการเนื้อหามากขึ้นรวมทั้งได้เรียนรู้เทคโนโลยีใหม่ ๆ ด้านพอลิเมอร์ที่อยู่ในเนื้อหาของเอกสารคำสอนฉบับนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ขอขอบคุณ บริษัทแล็บเทค เอนจิเนียริง จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์รูปถ่ายเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง คุณความดีและประโยชน์อันเกิดจากเอกสารประกอบการสอนฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่บิดามารดาและคณาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้เขียนขอน้อมรับไว้และจะปรับปรุงแก้ไขต่อไป

พลพัฒน์ รวมเจริญ

พฤศจิกายน 2564

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	(1)
สารบัญ	(3)
สารบัญรูป	(7)
สารบัญตาราง	(13)
แผนบริหารการสอนประจำรายวิชา	(15)
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 1	1
บทที่ 1 ชนิดและสมบัติของพอลิเมอร์	3
ความหมายของพอลิเมอร์	3
การแบ่งชนิดของพอลิเมอร์	3
ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สำคัญ	9
บทสรุป	35
คำถามทบทวน	35
ปฏิบัติการที่ 1 การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์	36
ปฏิบัติการที่ 2 สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์	37
ปฏิบัติการที่ 3 การเตรียมและสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทน	38
เอกสารอ้างอิง	40
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2	45
บทที่ 2 สารเคมีที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์	47
สารต้านออกซิเดชัน	47
สารเสถียรความร้อน	52
สารต้านการติดไฟ	54
สารเสริมสภาพพลาสติก	59
สารให้สี	63
สารต้านไฟฟ้าสถิต	65
สารต้านการเกิดฝ้า	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สารตัวเต็ม	67
บทสรุป	69
คำถามทบทวน	70
เอกสารอ้างอิง	71
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 3	75
บทที่ 3 การผสม	77
ความหมายและกลไกการผสม	77
การผสมแบบกะ	78
การผสมแบบต่อเนื่อง	85
บทสรุป	101
คำถามทบทวน	102
ปฏิบัติการที่ 4 การผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด	102
เอกสารอ้างอิง	103
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 4	105
บทที่ 4 การอัดรีดพอลิเมอร์และการพิมพ์สามมิติ	107
การอัดรีดพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว	107
การรีดแผ่นพอลิเมอร์	113
การเป่าฟิล์ม	116
การอัดรีดโพรไฟล์และท่อ	120
การอัดรีดหุ้มลวด	125
การอัดรีดเส้นใย	127
การพิมพ์สามมิติ	130
บทสรุป	133
คำถามทบทวน	133
ปฏิบัติการที่ 5 การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว	134
ปฏิบัติการที่ 6 การรีดแผ่นพอลิเมอร์	134
เอกสารอ้างอิง	136

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
แผนการบริหารการสอนประจำบทที่ 5	137
บทที่ 5 การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์	139
การฉีดยา	139
การเป่าภาชนะกลวง	147
การขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์ม	157
การขึ้นรูปแบบหมุน	160
บทสรุป	163
คำถามท้ายบท	163
เอกสารอ้างอิง	163
บรรณานุกรม	165

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างของพอลิเมอร์ร่วมสไตรีน-บิวทาไดอีน	7
1.2	พฤติกรรมการรับแรงดึง (stress-strain curve) ของ HDPE LDPE และ LLDPE	12
1.3	ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ที่ผลิตจากพอลิเอทิลีน	13
1.4	สปีนบอนด์พอลิโพรพิลีน	16
1.5	เปรียบเทียบกระบวนการผลิต ABS	19
1.6	ความแตกต่างระหว่าง mass morphology และ emulsion morphology	19
1.7	อนุภาคของ PVC ที่ได้จากเทคนิคการสังเคราะห์แบบแขวนลอย	21
1.8	กลไกการเกิดเจลของ PVC	22
1.9	ลักษณะผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนที่มีส่วนแข็งต่างกัน	30
2.1	วงจรการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน	49
2.2	วงจรการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและการป้องกัน	49
2.3	วงจรการติดไฟของพอลิเมอร์	54
2.4	วงจรการลุกไหม้ของพอลิเมอร์	55
2.5	โครงสร้างของ LDH	59
2.6	บทบาทของสารเสริมเสถียรภาพพลาสติกแบบพทาเลตเอสเทอร์	61
2.7	การดูดความชื้นจากบรรยากาศ	65
2.8	ผลของมุมสัมผัสของหยดน้ำที่เกาะบนผิวฟิล์มต่อการผ่านของแสง	67
3.1	การผสมแบบกระจายตัวและแตกตัว	78
3.2	ถังหมุน	79
3.3	เครื่องผสมแบบรีบบอน	80
3.4	เครื่องผสมแบบกรวยที่มีสกรูภายใน	80
3.5	เครื่องผสมความเร็วรอบสูงซึ่งมีใบพัดอยู่ด้านล่าง	81
3.6	ลักษณะของใบพัดเครื่องผสมความเร็วสูง	82
3.7	เครื่องผสมแบบปั่นเหวี่ยง	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.8	เครื่องผสมระบบปิด	83
3.9	ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาผสม	84
3.10	ส่วนประกอบของเครื่องอัดรีดพอลิเมอร์แบบสกรูเดียว	86
3.11	นิยามส่วนต่าง ๆ ของสกรู และนิยามขนาด	87
3.12	สกรูและช่วงต่าง ๆ ของสกรู	88
3.13	กระบอกสกรูและช่องสำหรับดูดอากาศบนกระบอกสกรู	88
3.14	แผ่นเบรกเกอร์และตะแกรงกรอง	89
3.15	การป้อนแบบเต็มร่องสกรู	90
3.16	การหลอมและการไหลของพอลิเมอร์ในร่องสกรู	90
3.17	การไหลของพอลิเมอร์หลอมในช่วงส่งพอลิเมอร์หลอมของเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดียว	91
3.18	สกรูดัดแปลงโดยการเพิ่มช่วงผสม	92
3.19	ช่วงผสมแบบ pin ที่อยู่บนสกรูของเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดียว	92
3.20	ช่วงผสมแบบกระจายตัว	92
3.21	ช่วงผสมแบบ Maddock	93
3.22	องค์ประกอบของเครื่อง Ko-Kneader (Buss AG)	93
3.23	ลักษณะทั่วไปของเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่	94
3.24	การหมุนของเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่	94
3.25	การซ้อนทับกันของสันเกลียว	95
3.26	สกรูแบบทรงกรวย	96
3.27	ลักษณะส่วนประกอบของสกรู	96
3.28	ชิ้นส่วนย่อยของสกรู	97
3.29	ลักษณะของชิ้นส่วนย่อยของสกรูสำหรับลำเลียงและผสมบนแกนสกรู	97
3.30	กระบอกสกรูของเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่	97
3.31	อุปกรณ์การป้อน	98
3.32	การป้อนแบบไม่เต็มร่องสกรู	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.33	การถ่ายโอนมวลสารในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	100
4.1	การไหลของพอลิเมอร์หลอมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว	108
4.2	รูปจำลองการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์หลอมในเครื่องอัดรีด	110
4.3	คุณลักษณะของการอัดรีด	111
4.4	เปรียบเทียบคุณลักษณะของการอัดรีดของสกรูและตาย	111
4.5	ลักษณะของการอัดรีดของสกรูและตายกรณีการไหลแบบ นอนนิวโทเนียน	112
4.6	ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีปัญหา	112
4.7	เครื่องรีดแผ่นพอลิเมอร์	114
4.8	ร่องทางไหลของตาย	114
4.9	ส่วนประกอบของตายสำหรับรีดแผ่นพอลิเมอร์	115
4.10	อุปกรณ์ประกอบหลังการอัดรีดแผ่นพอลิเมอร์	115
4.11	รูปวาดแสดงเครื่องเป่าฟิล์ม	116
4.12	ตายเครื่องเป่าฟิล์ม	117
4.13	อุปกรณ์ดึงฟิล์มและม้วนฟิล์ม	118
4.14	ลักษณะผลิตภัณฑ์ฟิล์มขณะเป่า	119
4.15	เครื่องทำโพรไฟล์	120
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปหน้าตัดของช่องเปิดตาย (die exit) และ รูปหน้าตัด/รูปทรงของผลิตภัณฑ์	121
4.17	ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์โพรไฟล์ที่ไม่ดีและการปรับปรุง	122
4.18	Stack plate die หน้าตัดตัวยู (U)	123
4.19	ตายโพรไฟล์หน้าตัดวงแหวน	124
4.20	ชุดอุปกรณ์ปรับขนาดและดึงขึ้นงาน	124
4.21	เครื่องอัดรีดหุ้มลวด	126
4.22	ตายเครื่องอัดรีดหุ้มลวด	126
4.23	สปินเนอเรต และพอลิเมอร์หลอมที่กำลังไหลผ่านสปินเนอเรต	128

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.24	กระบวนการอัดรีดเส้นใย	128
4.25	ลักษณะการจัดเรียงตัวของโซ่พอลิเมอร์หลอมตามแนวตั้งขณะออกจาก สปินเนอเรต	129
4.26	เครื่องพิมพ์สามมิติแบบอัดรีดเส้นพลาสติก	130
4.27	กระบวนการพิมพ์สามมิติด้วยระบบภาคเรซิน	131
4.28	กระบวนการพิมพ์สามมิติด้วยระบบหลอมผงพอลิเมอร์	132
5.1	เครื่องฉีดพลาสติกแบบก้านสูบ	140
5.2	เครื่องฉีดพลาสติกแบบสกรู	140
5.3	ลักษณะทั่วไปของแม่พิมพ์ฉีด	141
5.4	แม่พิมพ์ฉีดและตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการฉีด	142
5.5	ขั้นตอนการฉีด	143
5.6	แผนภาพ P-V-T ของพอลิเมอร์ออสันฐานระหว่างฉีดเข้าแม่พิมพ์	143
5.7	กระบวนการฉีดพอลิเมอร์แบบการฉีดขึ้นรูปแบบหลายชั้น	144
5.8	ลักษณะแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปแบบฉีดหุ้ม และตัวอย่างผลิตภัณฑ์	144
5.9	ลักษณะแม่พิมพ์ข้อต่อท่อน้ำพร้อมผลิตภัณฑ์	145
5.10	แผนภาพเครื่องฉีดขึ้นรูปโดยใช้แก๊สช่วย	145
5.11	ขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปโดยใช้ของไหลช่วย	146
5.12	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปโดยใช้ของไหลช่วย	146
5.13	สัณฐานวิทยาแบบ skin-core ของชิ้นงาน HDPE ที่ผ่านกระบวนการฉีด	147
5.14	เครื่องเป่าภาชนะกลวงแบบอัดรีด	148
5.15	ลักษณะตายของเครื่องเป่าภาชนะกลวงแบบอัดรีด	149
5.16	การทำงานของแม่พิมพ์แบบเลื่อนเข้าออก	150
5.17	การทำงานของแม่พิมพ์แบบล้อหมุน	150
5.18	กระบวนการอัดรีดเป่าภาชนะกลวง	151
5.19	ผลของลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ต่อความหนืด	151

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.20	ลักษณะกันภาชนะที่ผ่านกระบวนการเป่า	151
5.21	เครื่องฉีดเป่าภาชนะกลาง	152
5.22	กระบวนการฉีดเป่าภาชนะกลาง	153
5.23	ลักษณะกันภาชนะที่ได้จากกระบวนการฉีดเป่าภาชนะกลาง	154
5.24	กระบวนการฉีดเป่าภาชนะกลาง	155
5.25	เครื่องทำเทอร์มอฟอร์ม (ป้อนแผ่นพอลิเมอร์จากม้วน)	157
5.26	การขึ้นรูปโดยใช้เบ้าดินแผ่นพอลิเมอร์ก่อนแล้วใช้แรงดูดสุญญากาศ	158
5.27	การขึ้นรูปโดยใช้ความดัน หัวกด และสุญญากาศร่วมกัน	159
5.28	เครื่องขึ้นรูปเทอร์มอฟอร์ม แบบรางเลื่อน และแบบหมุนเหวี่ยง	161
5.29	สัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์จากการบวนการขึ้นรูปแบบหมุน	162

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	หลักการเรียกชื่อพอลิเมอร์ร่วม	6
1.2	สมบัติของพอลิเอทิลีนจากการสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งแบบซีเกลอร์-นัตตาและเมทาโลซีน	11
1.3	สมบัติของ LDPE LLDPE HDPE	11
1.4	สมบัติการใช้งานของ HDPE และ LDPE	13
1.5	แทกติซิตีของพอลิโพรพิลีน	14
1.6	โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์ร่วมพอลิโพรพิลีน-เอทิลีน	15
1.7	ตัวอย่างกระบวนการแปรรูป paste resin และผลิตภัณฑ์	24
1.8	ผลิตภัณฑ์ PET และความหนืดในตัว	26
1.9	การละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ	37
2.1	รูปร่างและ L:D ratio ของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ	68
3.1	สถานะที่ใช้ศึกษาการผสม	103
4.1	เปรียบเทียบกระบวนการเป่าฟิล์มและการรีดแผ่น	120
5.1	ข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการเป่าภาชนะกลวงประเภทต่าง ๆ	156

แผนบริหารการสอนประจำรายวิชา

รายวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
(Polymer Technology)

รหัสวิชา 4423206
จำนวนหน่วยกิต 3(2-3-6)

คำอธิบายรายวิชา

ชนิดและสมบัติของพอลิเมอร์ สารเคมีที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์ การผสมสารเคมีเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ เทคโนโลยีการแปรรูป ให้ฝึกปฏิบัติโดยให้สอดคล้องกับรายวิชา

จุดมุ่งหมายรายวิชา

1. เพื่อให้ผู้เรียนมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานทั่วไปของเทคโนโลยีพอลิเมอร์ตามคำอธิบายรายวิชา
2. เพื่อให้ผู้เรียนนำความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีพอลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้งานได้
3. เพื่อให้ผู้เรียนมีความรับผิดชอบในการร่วมทำกิจกรรมการเรียนรู้อย่างครบถ้วน และปฏิบัติงานตามที่ได้รับมอบหมายด้วยความตั้งใจ และเสร็จในเวลาที่กำหนด

เนื้อหา

แผนการสอนประจำสัปดาห์ที่ 1-5

จำนวน 25 ชั่วโมง

ชนิดและสมบัติของพอลิเมอร์

ความหมายของพอลิเมอร์

การแบ่งประเภทของพอลิเมอร์

ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สำคัญ

ปฏิบัติการที่ 1 การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์

ปฏิบัติการที่ 2 สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

ปฏิบัติการที่ 3 การเตรียมและสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทน

แผนการสอนประจำสัปดาห์ที่ 6-8

จำนวน 15 ชั่วโมง

สารเคมีที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์

สารด้านการออกซิเดชัน

สารเสถียรความร้อน

สารด้านการเกิดไฟ

สารเสริมสภาพพลาสติก

สารให้สี

สารต้านไฟฟ้าสถิต

สารต้านการเกิดฝ้า

แผนการสอนประจำสัปดาห์ที่ 9

สอบกลางภาค

แผนการสอนประจำสัปดาห์ที่ 10-11

จำนวน 10 ชั่วโมง

การผสม

ความหมายและกลไกการผสม

การผสมแบบกะ

การผสมแบบต่อเนื่อง

ปฏิบัติการบทที่ 4 การผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องผสมระบบปิด

แผนการสอนประจำสัปดาห์ที่ 12-13

จำนวน 10 ชั่วโมง

การอัดรีดพอลิเมอร์และการพิมพ์สามมิติ

การอัดรีดพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว

การรีดแผ่นพอลิเมอร์

การเป่าฟิล์ม

การอัดรีดโพรไฟล์และท่อ

การอัดรีดหุ้มหลอด

การอัดรีดเส้นใย

การพิมพ์สามมิติ

ปฏิบัติการที่ 5 การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว

ปฏิบัติการที่ 6 การรีดแผ่นพอลิเมอร์

แผนการสอนประจำสัปดาห์ที่ 14-15

จำนวน 10 ชั่วโมง

การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

การฉีด

การเป่าภาชนะกลวง

การขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์ม

การขึ้นรูปแบบหมุน

แผนการสอนประจำสัปดาห์ที่ 16

จำนวน 5 ชั่วโมง

กิจกรรมเยี่ยมชมโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

แผนการสอนประจำสัปดาห์ที่ 17

สอบปลายภาค

วิธีสอนและกิจกรรม

1. ผู้สอนชี้แจงหลักเกณฑ์และข้อตกลงร่วมกันในการเรียนการสอน และการแต่งกาย เวลา เข้าชั้นเรียน การลา ความรับผิดชอบ ความซื่อสัตย์สุจริต
2. บรรยายและอภิปราย
3. การแบ่งกลุ่มฝึกปฏิบัติการ เพื่อฝึกให้นักศึกษามีทักษะในการปฏิบัติงานจริงร่วมกัน
4. ฝึกวิเคราะห์ผลการปฏิบัติการ โดยการอภิปรายร่วมกัน
5. มอบหมายงานให้นักศึกษาค้นคว้าความรู้เพิ่มเติมด้วยตนเอง จัดทำรายงานเดี่ยวและ อภิปรายกลุ่มโดยประยุกต์ใช้หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
6. เยี่ยมชมโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปพอลิเมอร์

สื่อการเรียนการสอน

สื่อการเรียนการสอนประกอบด้วยสื่อ ดังนี้

1. เอกสารคำสอน/ตำราที่เกี่ยวข้อง
2. สไลด์ที่สร้างจากโปรแกรม MS Power Point
3. วิดิทัศน์ที่เกี่ยวข้อง
4. โรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปพอลิเมอร์

การวัดผลและการประเมินผล

1.การวัดผล

การวัดผลและการประเมินผล มีรายละเอียดดังนี้

1.1 คะแนนระหว่างภาค	ร้อยละ 70
1.1.1 ความรับผิดชอบและมีวินัยในการเรียน	ร้อยละ 10
1.1.2 รายงานปฏิบัติการและเยี่ยมชมโรงงาน	ร้อยละ 30
1.1.3 การทดสอบระหว่างเรียน	ร้อยละ 10
1.1.4 คะแนนสอบกลางภาค	ร้อยละ 20
1.2 คะแนนสอบปลายภาค	ร้อยละ 30

2. การประเมินผล

การประเมินผลโดยอิงเกณฑ์ ดังนี้

คะแนน	ระดับคะแนน	หมายถึง	ค่าระดับคะแนน
80-100	A	ดีเยี่ยม	4.0
75-79	B+	ดีมาก	3.5
70-74	B	ดี	3.0
60-70	C+	ดีพอใช้	2.5
50-60	C	พอใช้	2.0
45-49	D+	อ่อน	1.5
40-44	D	อ่อนมาก	1.0
0-39	E	ตก	0.0

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 1

ชนิดและสมบัติของพอลิเมอร์

จำนวนชั่วโมงที่สอน 25 ชั่วโมง

สัปดาห์ที่ 1-5

หัวข้อเนื้อหา

1. ความหมายของพอลิเมอร์
2. การแบ่งชนิดของพอลิเมอร์
3. ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สำคัญ

คำสำคัญ

1. พอลิเมอร์
2. พอลิเอทิลีน
3. พอลิโพรพิลีน
4. พอลิสไตรีน
5. พอลิไวนิลคลอไรด์
6. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
7. พอลิยูรีเทน
8. พอลิเมอร์ชีวภาพ

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อผู้เรียนศึกษาบทเรียนนี้แล้วสามารถ

1. อธิบายความหมายของนิยามที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ได้
2. จำแนกประเภทของพอลิเมอร์ได้
3. ยกตัวอย่างพอลิเมอร์ที่พบในชีวิตประจำวันได้
4. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง สัณฐานวิทยา และสมบัติของพอลิเมอร์ได้
5. มีทักษะและความรับผิดชอบในการฝึกปฏิบัติการ

การวัดผลและการประเมินผล

1. ประเมินผลจากการสังเกตพฤติกรรมการรับฟังการบรรยาย การร่วมอภิปราย และการซักถามระหว่างเรียน
2. ประเมินจากการตอบคำถามท้ายบทและการสอบข้อเขียน
3. ประเมินจากการฝึกปฏิบัติการและรายงานปฏิบัติการ

สื่อประกอบการสอน

1. เอกสารคำสอนรายวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
2. สื่อมัลติมีเดียและหนังสือที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีพอลิเมอร์
3. วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการฝึกปฏิบัติการ

บทที่ 1

ชนิดและสมบัติของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันและมีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง พอลิเมอร์มีสมบัติเด่นคือมีน้ำหนักเบาเนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ พอลิเมอร์สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่าง ๆ ได้ง่ายและใช้พลังงานในการขึ้นรูปต่ำกว่าโลหะมาก นอกจากนี้พอลิเมอร์ยังสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติให้เป็นไปตามต้องการได้ง่ายโดยการผสมสารเคมีอื่นร่วมด้วย เช่น สารเติมแต่ง เป็นต้น พอลิเมอร์จึงมีส่วนเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์หลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า วัสดุก่อสร้าง และวัสดุทางการแพทย์ เนื้อหาในบทนี้เกี่ยวข้องกับความรู้พื้นฐานของพอลิเมอร์โดยกล่าวถึง นิยามที่สำคัญ การจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ และตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สำคัญชนิดต่าง ๆ รวมทั้งสมบัติที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญด้านเทคโนโลยีพอลิเมอร์ที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

ความหมายของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ (polymer) หมายถึงสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และโมเลกุลประกอบด้วยอนุกรมของหน่วยซ้ำ (repeating unit) ต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์เป็นจำนวนมาก พอลิเมอร์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีที่เรียกว่า มอนอเมอร์ ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization)

การแบ่งชนิดของพอลิเมอร์

ในหนังสือหรือตำราแต่ละเล่มมีเกณฑ์การแบ่งประเภทของพอลิเมอร์แตกต่างกัน สำหรับในเอกสารคำสอนเล่มนี้ กล่าวถึงเกณฑ์การแบ่งประเภทของพอลิเมอร์ด้วยกัน 3 ประเภทคือ แบ่งตามที่มาของพอลิเมอร์ แบ่งตามชนิดของหน่วยที่ซ้ำกัน และ แบ่งตามสมบัติทางกายภาพ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ชนิดของพอลิเมอร์ตามแหล่งที่มา

พอลิเมอร์มีแหล่งที่มา 3 ประเภท คือจากการสังเคราะห์ จากธรรมชาติ และพอลิเมอร์กึ่งสังเคราะห์ พอลิเมอร์สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยสารตั้งต้นคือมอนอเมอร์ พอลิเมอร์ธรรมชาตินั้นเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ตามธรรมชาติ เช่น ยางธรรมชาติ แป้ง โปรตีน เซลลูโลส เป็นต้น ส่วนพอลิเมอร์กึ่งสังเคราะห์ คือพอลิเมอร์ที่ได้จากการดัดแปรโครงสร้างของพอลิเมอร์ธรรมชาติให้ได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างและสมบัติแตกต่างไปจากเดิม เช่น ยางธรรมชาติ

อีพ็อกไซด์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชันด้วยสารกลุ่มเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น ทำให้ได้ยางธรรมชาติที่มี หมู่งแหววนอีพ็อกไซด์บนโครงสร้าง ส่งผลทำให้ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ทนน้ำมันมากกว่ายางธรรมชาติ

2. ชนิดของพอลิเมอร์ตามชนิดของหน่วยซ้ำ

การแบ่งพอลิเมอร์ตามชนิดของหน่วยซ้ำอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้พอลิเมอร์เอกพันธุ์ และพอลิเมอร์ร่วม มีลักษณะสำคัญดังนี้

2.1 พอลิเมอร์เอกพันธุ์ (homopolymer) หมายถึงพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างซึ่ง ประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำกันเพียงชนิดเดียว ซึ่งอาจเกิดจากมอนอเมอร์เพียงหนึ่งชนิดหรือหลายชนิดก็ได้ เช่น พอลิเอทิลีน เป็นพอลิเมอร์เอกพันธุ์ที่เกิดจากมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียว ขณะที่พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตเป็นพอลิเมอร์เอกพันธุ์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ 2 ชนิด สำหรับหลักการอ่านชื่อพอลิเมอร์ เอกพันธุ์ใช้คำว่า ‘พอลิ’(poly) นำหน้าชื่อมอนอเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิโพรพิลีน (polypropylene) เป็นต้น และถ้าชื่อมอนอเมอร์ไม่ใช่คำเดียวให้เขียนชื่อภายในวงเล็บ เช่น พอลิไวนิล คลอไรด์ เขียนว่า poly(vinyl chloride)

2.2 พอลิเมอร์ร่วม (copolymer) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำตั้งแต่สอง ชนิดขึ้นไปซึ่งสามารถแบ่งชนิดของพอลิเมอร์ร่วมโดยพิจารณาการเรียงตัวของหน่วยที่ซ้ำกันบนโซ่ พอลิเมอร์ได้เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม แบบสลับ แบบกลุ่ม และแบบตอกิ่ง เพื่อใช้ในการอธิบายจึง แสดงหน่วยซ้ำ 2 ชนิด คือหน่วย A และหน่วย B ในพอลิเมอร์ร่วมได้ ดังนี้

2.2.1 พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (random copolymer) เป็นพอลิเมอร์ร่วมที่หน่วย ซ้ำ A และ B ในโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงลำดับอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังโครงสร้าง (1-1)

AAAAABAABBABAA

โครงสร้าง (1-1)

2.2.2 พอลิเมอร์ร่วมแบบสลับ (alternating copolymer) เป็นพอลิเมอร์ร่วม ประเภทที่มีหน่วยซ้ำ A และ B เรียงสลับกันในโซ่พอลิเมอร์อย่างต่อเนื่องเป็นระเบียบ ดังนี้

ABABABABABABABA

โครงสร้าง (1-2)

2.2.3 พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (block copolymer) เป็นพอลิเมอร์ร่วมที่มีหน่วย A หลายหน่วย จัดเรียงกันเป็นแถวและตามด้วยหน่วย B หลายหน่วย ดังโครงสร้าง (1-3)

AAAAAAAAAABBBBBBBBBBAAAAAAAAA

โครงสร้าง (1-3)

3.2 วัสดุยืดหยุ่น (elastomers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง โขโมเลกุลมักถูกเชื่อมขวางด้วยพันธะเคมี (chemical crosslink) โดยกระบวนการวัลคาไนเซชัน (vulcanization) เมื่อผลิตภัณฑ์วัสดุยืดหยุ่นได้รับแรงดึงสามารถยืดออกได้มาก โดยระยะยืดสูงถึงประมาณร้อยละ 500-1000 และเมื่อปล่อยแรงกระทำออก จะเกิดการหดกลับอย่างรวดเร็ว เช่น ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันแล้ว ซึ่งผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ เช่นถุงมือ ยางรัดสิ่งของ ยางรถยนต์ เป็นต้น

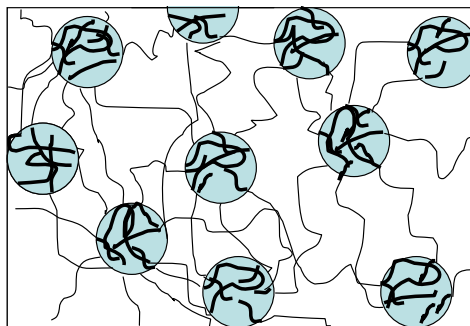
ตารางที่ 1.1 หลักการเรียกชื่อของพอลิเมอร์ร่วม

ชนิดของพอลิเมอร์ร่วม	การเรียกชื่อ	ตัวอย่างชื่อ	โครงสร้าง
แบบสุ่ม (random)	poly(A- <i>ran</i> -B)	ethylene vinyl acetate	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n \left[\text{CH}_2 - \text{CH} \left(\text{O} - \text{C}(=\text{O}) - \text{CH}_3 \right) \right]_m$
แบบสลับ (alternating)	poly(A- <i>alt</i> -B)	poly(α -methyl styrene- <i>alt</i> -methyl methacrylate)	$\left[\text{CH}_2 - \text{C} \left(\text{CH}_3 \right) \left(\text{C}_6\text{H}_5 \right) - \text{alt} - \text{CH}_2 - \text{C} \left(\text{CH}_3 \right) \left(\text{COOCH}_3 \right) \right]_m$
แบบกลุ่ม (block)	polyA- <i>block</i> -polyB*	polystyrene- <i>block</i> -polybutadiene- <i>block</i> -polystyrene	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH} \left(\text{C}_6\text{H}_5 \right) \right]_n \left[\text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 \right]_m \left[\text{CH}_2 - \text{CH} \left(\text{C}_6\text{H}_5 \right) \right]_n$
แบบตอกิ่ง (graft)	polyA- <i>graft</i> -polyB*	polyethylene- <i>graft</i> -polystyrene	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH} \right]_m \left[\text{CH}_2 - \text{CH} \left(\text{C}_6\text{H}_5 \right) \right]_n$

3.3 เทอร์โมเซต (thermosets) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการแปรรูป มีลักษณะโครงสร้างเป็นโซ่ที่มีการเชื่อมขวาง (crosslink) หรือเป็นโครงร่างแห (network structure) เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของเทอร์โมเซตและวัสดุยืดหยุ่นพบว่า เทอร์โมเซตมีปริมาณการเชื่อมขวางมากกว่า ทำให้โครงสร้างของเทอร์โมเซตมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า วัสดุยืดหยุ่นมาก จะเห็นได้ว่าทั้งวัสดุยืดหยุ่นและเทอร์โมเซตมีการเชื่อมขวางระหว่างโซ่โมเลกุล ดังนั้นจึงไม่สามารถนำผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ประเภทนี้กลับมาใช้ใหม่โดยการหลอมเหมือนเทอร์โมพลาสติกได้ พอลิเมอร์ประเภทนี้ ได้แก่ อีพ็อกซีเรซิน ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน เป็นต้น

3.4 วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic elastomers) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความยืดหยุ่นคล้ายยางที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่อได้รับความร้อนสามารถหลอมและไหลได้เหมือนเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างมีการเชื่อมขวางทางกายภาพ (physical crosslink) วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์โมพลาสติกสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

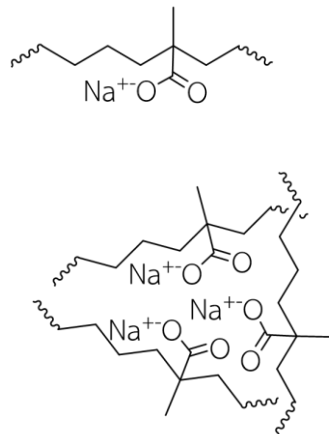
3.4.1 พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (block copolymers) เป็นพอลิเมอร์ร่วมซึ่งในโซ่พอลิเมอร์มีหน่วยซ้ำ 3 ส่วน โดย 2 ส่วนอยู่ตรงตำแหน่งปลายโซ่พอลิเมอร์ทั้ง 2 ข้างเป็นหน่วยที่มีสมบัติแข็งเกร็ง (rigid) เช่น พอลิสไตรีน และส่วนตรงกลางของโซ่มีลักษณะอ่อนนุ่มคล้ายยาง (rubbery) เช่น พอลิบิวทาไดอีน หรือพอลิไอโซพรีน จากโครงสร้างเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้ทั้งสองส่วนไม่สามารถเข้ากันได้ในระดับโมเลกุลจึงเกิดการแยกวัฏภาค (phase) ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนของโซ่พอลิเมอร์ที่มีความแข็งเกร็งจะทำหน้าที่ยึดวัฏภาคส่วนของโซ่ พอลิเมอร์ที่มีสถานะอ่อนนุ่มคล้ายยางเข้าไว้ด้วยกันซึ่งเรียกว่าการเชื่อมขวางทางกายภาพ (physical crosslink) ดังรูปที่ 1.1 เมื่อได้รับความร้อนทำให้วัฏภาคของพอลิเมอร์ที่มีความแข็งเกร็งอ่อนตัวลง และทำให้พอลิเมอร์ร่วมสามารถไหลตามแรงกระทำได้ แต่เมื่อได้รับความเย็นพอลิเมอร์ร่วมจะกลับมามีรูปร่างเดิม จะเห็นได้ว่าการเชื่อมขวางทางกายภาพจะแตกต่างจากการเชื่อมขวางด้วยพันธะเคมี เนื่องจากการเชื่อมขวางด้วยพันธะเคมีไม่สามารถผันกลับได้ด้วยความร้อนเหมือนการเชื่อมขวางทางกายภาพ



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของพอลิเมอร์ร่วมสไตรีน-บิวทาไดอีน เส้นหนา แทนส่วนของพอลิสไตรีน และเส้นบาง แทนส่วนของพอลิบิวทาไดอีน

3.4.2 พอลิเมอร์ผสม (polymer blends) เกิดจากการผสมพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดด้วยกัน สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทย่อยคือ ประเภทแรกเกิดจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์มอพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน กับยางที่ไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน เช่น ยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ โดยการผสมในเครื่องผสมที่ให้แรงเฉือนสูง พอลิเมอร์ที่ได้จะมีความแข็งแรงจากวัฏภาคของเทอร์มอพลาสติกและความยืดหยุ่นจากวัฏภาคของยาง เนื่องจากวัฏภาคทั้งสองไม่ได้เกิดการเชื่อมขวางกัน จึงสามารถไหลได้เมื่อได้รับความร้อนหรือแรงกระทำ เช่น ขณะขึ้นรูป ประเภทที่สองเกิดจากเทอร์มอพลาสติกกับยางวัลคาไนซ์ ซึ่งต่างจากประเภทแรกตรงที่ ประเภทที่สองต้องมีกระบวนการที่เรียกว่าไดนามิกส์ วัลคาไนเซชัน (dynamic vulcanization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ขณะผสมกับเทอร์มอพลาสติก และทำให้ยางซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายเกิดการเชื่อมขวางในวัฏภาคของเทอร์มอพลาสติก ข้อดีของวัสดุประเภทนี้คือ ขึ้นรูปได้ง่ายโดยใช้เทคนิคเดียวกับเทอร์มอพลาสติก และสามารถนำเศษ (scrap) กลับมาใช้ใหม่ได้

3.4.3 ไอออนอเมอร์ (ionomers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีกลุ่มไอออนจำนวนมากอยู่บนโซ่หลัก เช่น เกลือโซเดียมของพอลิเมอร์ร่วมเอทิลีน-กรดเมทาคริลิก poly (ethylene-co-methacrylic acid) ดังโครงสร้าง (1-5)



โครงสร้าง (1-5)

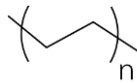
จากโครงสร้าง (1-5) จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ชนิดนี้มีหมู่แทนที่เป็นหมู่คาร์บอกซิเลต (-COO^-) ตลอดความยาวโซ่ และมีโซเดียมไอออน (Na^+) เป็นตัวทำให้คาร์บอกซิเลตไอออนเสถียร เมื่อพิจารณาหลาย ๆ โซ่ จะเห็นได้ว่าโซเดียมไอออนจะเกิดอันตรกิริยากับคาร์บอกซิเลตและอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม การที่กลุ่มของคาร์บอกซิเลตไอออนและโซเดียมไอออนอยู่รวมกันนี้เองเปรียบเสมือนเป็นจุดที่ยึดโซ่ไว้ด้วยกัน เมื่อได้รับความร้อนทำให้จุดยึดดังกล่าวแยกตัวออกและทำให้พอลิเมอร์สามารถไหลตามแรงกระทำได้ และเมื่อเย็นลงจะเกิดการแข็งตัวอีกครั้ง จากสมบัติที่เกิดจากการเชื่อมขวางทางกายภาพสามารถนำวัสดุชนิดนี้กลับมาใช้งานใหม่ได้ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้ไอออนอเมอร์ เช่น ผิวของลูกกอล์ฟ

ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สำคัญ

เนื้อหาในหัวข้อนี้เป็นตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่สำคัญที่มีการผลิตและใช้งานในชีวิตประจำวัน ในแต่ละหัวข้อจะมีเนื้อหาเกี่ยวกับโครงสร้างและสมบัติ ผลิตภัณฑ์ รวมทั้งการใช้เซลล์

1. พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากเอทิลีนมอนอเมอร์มาเชื่อมต่อเป็นสายโซ่ยาว มีโครงสร้างโมเลกุลของหน่วยย่อยดังนี้



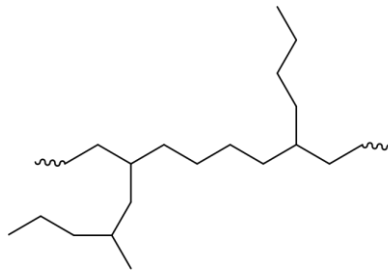
โครงสร้าง (1-6)

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดกึ่งผลึก มีความเป็นผลึกที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล

1.1 โครงสร้างและการสังเคราะห์ โครงสร้างของพอลิเอทิลีนสามารถแบ่งออกเป็น ชนิดความหนาแน่นสูง ความหนาแน่นต่ำ ความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และ พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง ยิงยวด ซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

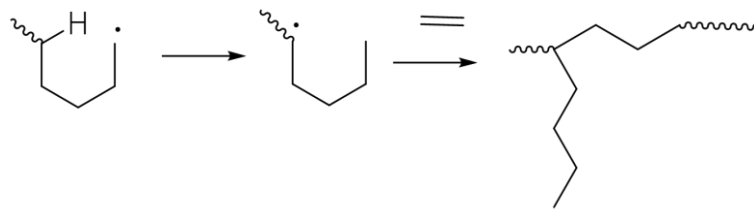
1.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE)

มีลักษณะโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขาดังโครงสร้าง (1-7)



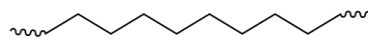
โครงสร้าง (1-7)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบใช้ความดันสูง (high pressure process) (1000-3000 bar) อุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ 80-100 °C โดยผ่านการสังเคราะห์แบบอนุกรมอิสระ ค้นพบโดยบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ในปี ค.ศ. 1933 ส่งผลให้โซ่โมเลกุลของ LDPE ที่สังเคราะห์ได้จะมีส่วนประกอบของกิ่งก้านสาขาทั้งแบบโซ่กิ่งสั้น (short chain branches) 10-30 กิ่ง/1000 อะตอมของคาร์บอนซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนโซ่ และแบบโซ่กิ่งยาว (long chain branches 1-3 กิ่ง/1000 อะตอมของคาร์บอน) สาเหตุของการเกิดกิ่งก้านสาขา คือ backbiting ดังปฏิกิริยา (1.1)



(1.1)

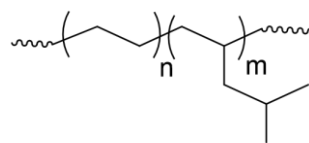
1.1.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) มีลักษณะโครงสร้างเป็นโซ่ตรง ดังนี้



โครงสร้าง (1-8)

การสังเคราะห์ HDPE ใช้ความดันปกติร่วมกับระบบของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ แบบฟิลิปส์ (Philips process) ซึ่งใช้โครเมียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แบบซีเกลอร์-นัตตา (Ziegler – Natta process) โดยใช้เกลือหรือออกไซด์ของโลหะหมู่ IV-B, V-B กับตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม เช่น Aluminium trialkyls กับ titanium tetrachloride, และแบบสแตนดาร์ดออยล์ (Standard Oil) ซึ่งใช้โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.1.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเป็นพอลิเมอร์ร่วม (copolymer) กับมอนอเมอร์ร่วม มอนอเมอร์ดังกล่าวเป็น α -olefin เช่น 1-butene, 1-hexene, และ 1-octene (Bensason et al., 1996) เป็นต้น ซึ่งผลจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ร่วมจะทำให้ได้ความยาวของกิ่งก้านสาขานโซ่หลักมีความสม่ำเสมอและสามารถควบคุมได้ เช่น โครงสร้าง (1-9)



โครงสร้าง (1-9)

ตัวเร่งสำคัญที่ใช้สังเคราะห์ LLDPE ในระยะแรก (ค.ศ. 1950-1960) คือ ซีเกลอร์-นัตตา (Ziegler & Gellert, 1953) ตัวเร่งชนิดนี้ส่งผลให้ได้พอลิเมอร์ร่วมซึ่งให้สมบัติเชิงกลของ LLDPE ที่ได้ดีกว่าแต่แปรรูปยากกว่าเมื่อเทียบกับ LDPE

ในปี 1990 ได้มีการค้นพบตัวเร่งชนิดใหม่ คือเมทาโลซีน (metallocene) (Kaminsky, 2012) ซึ่งใช้ methyl alumoxane (MAO) เป็น สารกระตุ้น (activator) การใช้ตัวเร่งเมทาโลซีนทำให้ได้โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีลักษณะเฉพาะดังตารางที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนที่สังเคราะห์จากเมทาโลซีนให้ค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง โดยพิจารณาได้

จากค่าดัชนีการกระจายแบบผสม (polydispersity index, PI) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแบบซีเกลอร์-นัตตา และให้ค่าความหนาแน่นและความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า อย่างไรก็ตามตัวเร่งเมทาโลซีนก็มีข้อจำกัดในการใช้งาน คือมีราคาแพงและเนื่องจากสามารถละลายเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดีจึงยากในการกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์เมื่อสิ้นสุดการสังเคราะห์

ตารางที่ 1.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนจากการสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งแบบซีเกลอร์-นัตตาและเมทาโลซีน

สมบัติ	ชนิดของตัวเร่ง	
	ซีเกลอร์-นัตตา	เมทาโลซีน
ค่าดัชนีการกระจายแบบผสม	5-20	น้อยกว่า 2
ความต้านทานต่อแรงดึง (psi)	7300	9400

ที่มา: (Chum & Swogger, 2008)

1.1.4 พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (ultrahigh molecular weight polyethylene, UHMWPE) ทำขึ้นจากพอลิเอทิลีนโซ่ยาวมากหรือน้ำหนักโมเลกุลสูง คือมีหน่วยซ้ำในช่วง 100,000 – 250,000 ต่อโซ่โมเลกุลเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีหน่วยซ้ำประมาณ 700-1,800 หน่วยต่อโซ่โมเลกุล การสังเคราะห์ใช้ตัวเร่ง metallocene เนื่องจากแต่ละโซ่ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งขึ้นกับความยาวโซ่ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ UHMWPE มีความแข็งแรงสูงมาก

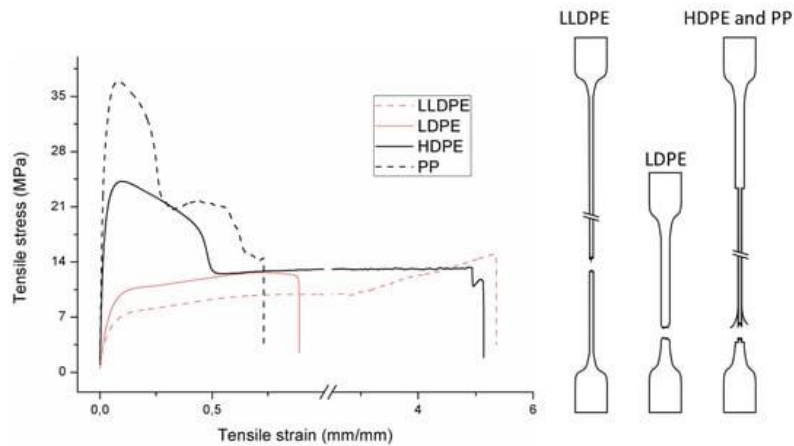
1.2 สมบัติของพอลิเอทิลีน พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีราคาถูกและมีสมบัติที่เอื้อต่อการใช้งานในชีวิตประจำวันหลายด้าน สมบัติของพอลิเอทิลีนขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วน อสัณฐาน (amorphous) และผลึก (crystalline) เช่น จุดหลอมเหลว สมบัติทางแสง และสมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัสแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด นอกจากนั้น น้ำหนักโมเลกุล และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล โครงสร้างของโซ่กิ่ง เป็นสิ่งที่กำหนดสมบัติของพอลิเอทิลีนอีกด้วย สมบัติทั่วไปของ LDPE LLDPE และ HDPE แสดงดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 สมบัติของ LDPE LLDPE HDPE

สมบัติ	LDPE	LLDPE	HDPE
ความเป็นผลึก (%)	30-50	55-65	>90
ความหนาแน่น (gcm ⁻³)	0.91-0.93	0.92-0.95	0.95-0.97
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	3-56	8-45	10-43
โมดูลัสแรงดึง (MPa)	110-1200	140-1000	180-1800
ระยะยืด ณ จุดยืดคราก (%)	13-400	8-30	6-45

ที่มา: (Chum & Swogger, 2008)

จากตารางที่ 1.3 การรับแรงดึงของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิด สัมพันธ์กับปริมาณผลึก โดยจะเห็นว่า HDPE มีปริมาณผลึกสูงกว่า LLDPE และ LDPE ส่งผลให้มีความต้านทานต่อแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่า LLDPE และ LDPE ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกัน HDPE ให้ระยะยืดที่น้อยกว่า LLDPE และ LDPE ตามลำดับดังรูปที่ 1.2 เทียบกับพอลิโพรพิลีน (PP)



รูปที่ 1.2 พฤติกรรมการรับแรงดึง (stress-strain curve) ของ HDPE LDPE และ LLDPE

ที่มา: (Van Belle et al., 2020)

สมบัติของ LLDPE ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของมอนอเมอร์ร่วมที่ใช้ ชนิดของมอนอเมอร์ร่วมที่ใช้มีผลต่อความยาวของโซ่กิ่ง และปริมาณของมอนอเมอร์ร่วมที่ใช้มีผลต่อจำนวนกิ่ง ซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณผลึกและความหนาแน่นต่อไป เมื่อจำนวนโซ่กิ่งมากขึ้นทำให้มีปริมาณผลึกน้อยลง และความหนาแน่นน้อยลงตามลำดับ (Bensason et al., 1996)

เมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE LLDPE ซึ่งทั้งสองเป็นพอลิเมอร์โซ่กิ่ง แต่โดยทั่วไป LLDPE มีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยกิ่งสาขาสั้น ๆ (short chain branch) ขณะที่ LDPE มีโมเลกุลที่ประกอบด้วยทั้งกิ่งสั้นและยาวผสมกัน จึงส่งผลให้สมบัติด้านการแปรรูปแตกต่างกันคือ LLDPE ให้ค่าความหนืดขณะหลอมสูงกว่า LDPE แต่ความแข็งแรงของ LLDPE ขณะหลอมระหว่างการขึ้นรูปเป็นฟิล์มต่ำกว่า LDPE เนื่องจากโซ่พอลิเมอร์เกาะเกี่ยวกันขณะไหลน้อยกว่า LDPE

1.3 การใช้งานพอลิเอทิลีน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

1.3.1 งานฟิล์มบรรจุภัณฑ์ พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ใช้ในส่วนใหญ่งานฟิล์มหรือบรรจุภัณฑ์ในชีวิตประจำวัน เช่น ถุงพลาสติก สมบัติการใช้งานของ LDPE และ HDPE สามารถเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 สมบัติการใช้งานของ HDPE และ LDPE

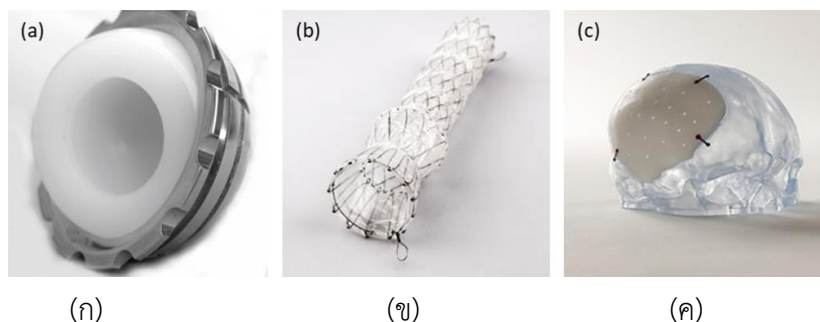
พอลิเมอร์	ผลิตภัณฑ์	ลักษณะภายนอก	การทนอุณหภูมิต่ำ	การทนอุณหภูมิสูง
LDPE	ถุงเย็น	ใส ไม่มันวาว เหนียว	แช่ช่องแข็งได้	อุณหภูมิเกิน 80 °C จะเสียรูป
HDPE	ถุงร้อนซุ่น	สีขาวซุ่น ไม่มันวาว	ใส่ของเย็นได้ แต่ช่อง แข็งไม่ได้ จะแตก	ใส่ของร้อนได้ประมาณ 100 °C

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ฟิล์มที่ได้ โดยจะเห็นได้ว่า LDPE ซึ่งมีความเป็นผลึกต่ำกว่า HDPE มีความใส และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า HDPE แต่ทนอุณหภูมิสูงได้น้อยกว่า HDPE

LLDPE มีความสำคัญในการผลิตแผ่นฟิล์ม ในปัจจุบัน 65-70% ของ LLDPE ได้ใช้งานในด้านฟิล์มบรรจุหีบห่อ ถุงบรรจุภัณฑ์ LLDPE มีจุดเด่นในแง่ของความแข็งแรงและความเหนียว แต่มีข้อด้อยในแง่ความใส เมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE แล้ว LDPE มีความใสมากกว่า

1.3.2 ผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ส่วนใหญ่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (injection molding) และการขึ้นรูปแบบหมุน (rotational molding) เป็นผลิตภัณฑ์หลักของ LLDPE เช่นถังบรรจุน้ำ ของเล่นเด็ก ทุ่นลอยน้ำ ฝาขวดน้ำดื่ม

1.3.3 ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่สำคัญทางชีววิทยา การแพทย์ UHMPE เป็นพอลิเมอร์ชนิดแรกที่ใช้เป็นส่วนประกอบของชุดข้อสะโพกเทียมดังรูปที่ 1.3 (ก) และใช้เป็นชุดขดลวดถ่างขยายหลอดอาหาร (oesophageal stent) ดังรูปที่ 1.3(ข) และ HDPE ช่วยในการปลูกถ่ายเนื้อเยื่อ ดังรูปที่ 1.3 (ค) ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานกับร่างกายเป็นเวลานานเมื่อเทียบกับโลหะ



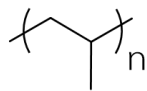
รูปที่ 1.3 ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ที่ผลิตจากพอลิเอทิลีน (ก) ชุดข้อต่อสะโพกเทียม (ข) ชุดขดลวดถ่างขยายหลอดอาหาร (oesophageal stent) และ (ค) HDPE ช่วยในการปลูกถ่ายเนื้อเยื่อ

ที่มา: (Paxton et al., 2019)

2. พอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) จัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีหน่วยโพรพิลีนต่อกันเป็นโซ่ยาว เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์มอพลาสติก

2.1 การสังเคราะห์และโครงสร้าง พอลิโพรพิลีนสังเคราะห์จากโพรพิลีนมอนอเมอร์ โครงสร้างแสดงดังโครงสร้าง (1-10) ในการสังเคราะห์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ ซีเกลอร์ แนต์ตา และ เมทาโลซีนซึ่งมีผลต่อแทคติซิตีหรือการเรียงสลับของหมู่เมทิลที่สัมพันธ์กับหมู่เมทิลของหน่วยซ้ำที่อยู่ข้างเคียง มี 3 แบบ แสดงดังตารางที่ 1.5 แทคติซิตีมีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน คือ พอลิโพรพิลีนชนิดไอโซแทกติกและซินดีโอแทกติกมีความเป็นผลึกสูงกว่าซินดีโอแทกติก



โครงสร้าง (1-10)

ตารางที่ 1.5 แทคติซิตีของพอลิโพรพิลีน

แทคติซิตี	โครงสร้าง
ไอโซแทกติก	
ซินดีโอแทกติก	
อะแทกติก	

2.2 ประเภทของพอลิโพรพิลีนและสมบัติ พอลิโพรพิลีนทางการค้ามักเป็นไอโซแทกติก ซึ่งมีสมบัติเฉพาะดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่มีข้อจำกัดคือความเปราะเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูง ในทางการค้าจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนให้มีความต้านทานแรงกระแทกได้โดยทำเป็นพอลิเมอร์รวม ดังนั้นพอลิโพรพิลีนจึงสามารถแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้

2.2.1 พอลิโพรพิลีนเอกพันธ์ เป็นพอลิโพรพิลีนชนิดไอโซแทกติก จัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก มีความหนาแน่นต่ำ (ประมาณ 0.96 g.cm^{-3}) มีความทนทานต่อการขีดข่วน มีจุดหลอมเหลวสูง ทนต่อสารเคมีประเภทกรดอินทรีย์ เบส และเกลือ แต่มีการผ่านของแสงและความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำ

เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างเป็นโซ่ตรง ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมมีค่าความแข็งแรงขณะหลอมต่ำ (เนื่องจากโซ่พอลิเมอร์ไม่เกาะเกี่ยวกันขณะไหล) และ

ขาดง่ายในสภาวะหลอมขณะขึ้นรูปด้วยบางกระบวนการ เช่น การผลิตเส้นใย พิล์ม เป็นต้น วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องใช้เทคนิคเฉพาะในการทำให้พอลิเมอร์หลอมเย็นตัวและตกผลึกอย่างรวดเร็วเมื่อไหลออกจากดาย เช่นการให้ความเย็นแก่ฟิล์มหรือเส้นใยอย่างรวดเร็วด้วยน้ำเย็น (รายละเอียดในบทที่ 4)

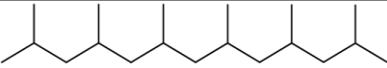
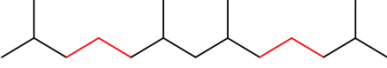
นอกจากนั้นปัจจุบันมีงานวิจัยที่รายงานการเพิ่มความแข็งแรงขณะหลอมโดยการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนให้มีกิ่งก้านสาขา โดยการใช้รังสี (Lugão et al., 2007) และกระบวนการอัดรีดเชิงปฏิกิริยา (reactive extrusion) (Tang et al., 2008)

2.2.2 พอลิเมอร์ร่วมของพอลิโพรพิลีน ผลิตขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทก แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม และ พอลิเมอร์ร่วมแบบรวมกลุ่ม ทั้งสองชนิดมีลักษณะที่สำคัญดังนี้

ก. พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (polypropylene random copolymer) เกิดจากพอลิเมอร์ร่วมของโพรพิลีน-เอทิลีน (โดยใช้เอทิลีนไม่เกิน 7%) เอทิลีนจะทำหน้าที่ลดส่วนโครงสร้างที่เป็นระเบียบของพอลิโพรพิลีนและส่งผลให้ความเป็นระเบียบของผลึกลดลง เพิ่มความต้านทานแรงกระแทกเล็กน้อย เพิ่มความอ่อนตัวและลดจุดหลอมเหลวลง

ข. พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (polypropylene block copolymer) เป็นพอลิเมอร์ร่วมของพอลิโพรพิลีน-เอทิลีนที่มีเอทิลีนอยู่ประมาณ 5-15% โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าแบบสุ่ม การที่มีหน่วยเอทิลีนมากทำให้เกิดการแยกวัฏภาคยาง (rubber phase) ออกมาจากเนื้อพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้ช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกสูงขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ (<-20°C)

ตารางที่ 1.6 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์ร่วมพอลิโพรพิลีน-เอทิลีน

โครงสร้างพอลิโพรพิลีน	โครงสร้าง
พอลิโพรพิลีนเอกพันธุ์	
พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม	
พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม	

หมายเหตุ — แทนหน่วยโพรพิลีน — แทนหน่วยเอทิลีน

2.3 ผลิตภัณฑ์พอลิโพรพิลีน จำแนกเป็นผลิตภัณฑ์งานฉีก ผลิตภัณฑ์เส้นใยและผ้า พิล์ม และผลิตภัณฑ์อัดรีด

2.3.1 ผลิตภัณฑ์ฉีก พอลิโพรพิลีนใช้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการฉีกมากที่สุด ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ได้แก่ ตัวเรือนอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน เช่น เครื่องเป่าผม เครื่องชงกาแฟ เครื่องปั๊มขมปัง บรรจุภัณฑ์สำหรับใช้ที่อุณหภูมิสูง เช่น ไมโครเวฟ อุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น กระบอกฉีดยา หรืออุปกรณ์ในการทำสเตอริไรซ์

2.3.2 ผลิตภัณฑ์เส้นใยและผ้า พอลิโพรพิลีนสามารถใช้ผลิตเป็นเส้นใยและผ้า สปันบอนด์ (spun bond non-woven fabrics) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก. **เส้นใย** ผลิตโดยอัดรีดพอลิโพรพิลีนผ่านรูเล็ก ๆ ที่เรียกว่าสปินเนอเร็ต ลงในอ่างน้ำเย็น จากนั้นนำเส้นใยที่ได้ตีเกลียวเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น เชือก ตาข่าย ซึ่งให้สมบัติที่แข็งแรงและความทนต่อความชื้น

ข. **ผ้าสปันบอนด์** คือผ้าที่เกิดจากการขึ้นรูปจากการเชื่อมยึดเส้นใยด้วยความร้อน แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 1.4 ผ้าสปันบอนด์มักใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง (disposable) เช่น แผ่นกรองในหน้ากากอนามัย ผ้าอ้อม ชุดผ่าตัดแพทย์



รูปที่ 1.4 สปันบอนด์พอลิโพรพิลีน

2.3.3 ผลิตภัณฑ์ฟิล์ม พอลิโพรพิลีนสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ แต่เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีค่าความแข็งแรงขณะหลอมต่ำส่งผลให้ขาดง่ายในสภาวะหลอมขณะขึ้นรูป ทำให้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ฟิล์มได้ยากเพราะต้องได้รับแรงดึงจากลูกกลิ้งดึงฟิล์ม และการพองด้านข้างออกด้วยลมที่เป่า ดังนั้นเครื่องเป่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนจึงต้องมีลักษณะที่แตกต่างจากการขึ้นรูปฟิล์มทั่วไปโดยต้องอัดรีดท่อพอลิเมอร์อ่อนลงน้ำเพื่อให้ความเย็นทำให้เกิดผลึกได้เร็ว (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในบทที่ 4)

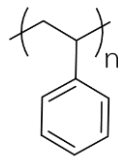
ฟิล์มอีกประเภทคือฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ถูกยืดออกไป 2 ทิศทาง (biaxially oriented polypropylene film, BOPP) ทำให้เกิดการยืดตัวน้อยลง ความต้านทานแรงดึงดีขึ้น ความแข็งแรงมากขึ้น ใสขึ้น และเงามัน ต้านทานต่อการผ่านของแก๊สดีขึ้น

2.3.4 ผลิตภัณฑ์อัดรีด ผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ ได้แก่ ท่อน้ำทั้งท่อน้ำร้อนและท่อน้ำเย็น โดยส่วนมากมักผลิตจากพอลิโพรพิลีนที่เป็นพอลิเมอร์รวมแบบสุ่ม

3. พอลิสไตรีน

พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์มอพลาสติก ได้รับการผลิตครั้งแรกในช่วงปี ค.ศ. 1930-1939 ช่วงแรกสไตรีนที่ผลิตขึ้นถูกนำไปใช้ในสงครามโลกครั้งที่ 2 เป็นหลัก มีลักษณะเด่นคือมีความใส และแข็งเปราะ สามารถปรับปรุงสมบัติความแข็งเปราะได้โดยการทำพอลิเมอร์ร่วม ปัจจุบันได้รับการทำเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด

3.1 การสังเคราะห์และโครงสร้าง การสังเคราะห์พอลิสไตรีนนิยมสังเคราะห์แบบบัลค์กับแบบแขวนลอย โดยใช้สไตรีนเป็นมอนอเมอร์ พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์โซ่ตรง มีหมู่ฟีนิลเป็นหมู่แทนที่ดังโครงสร้าง (1-11)



โครงสร้าง (1-11)

3.2 การแบ่งประเภทของพอลิสไตรีนและสมบัติ

3.2.1 พอลิสไตรีนแบบอะแทกติก เกิดจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกแบบอนุมูลอิสระ พอลิสไตรีนแบบอะแทกติกมีค่า T_g ประมาณ 100 °C โครงสร้างเป็นแบบอะแทกติก จึงอยู่ในรูปอสัณฐาน มีลักษณะแข็งเปราะ ใส ไม่ดูดความชื้น ไม่นำไฟฟ้า ทนต่อการกัด เบส สารออกซิไดซ์ และรีดิวส์ ข้อด้อยคือเปราะ แต่สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนในด้านต้านแรงกระแทกดีขึ้นได้ (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.3) นอกจากนั้นยังสามารถใช้ผลิตโฟม โดยการอัดแก๊ส เช่น เพนเทนในพอลิสไตรีนหลอม เม็ดพลาสติกจะขยายตัวถึง 40 เท่าจะได้โฟมตามต้องการ พอลิสไตรีนแบบอะแทกติกมีความใส แข็งเปราะ สามารถใช้เป็นของใช้ในชีวิตรประจำวันทั่วไป เช่น มีดโกนหวดแบบใช้แล้วทิ้ง ข้อนส้อมสำหรับอาหารกล่อง (Basavaraju, 2021)

3.2.2 พอลิสไตรีนแบบซินดิโอแทกติก พอลิสไตรีนแบบซินดิโอแทกติกมีหมู่แทนที่บนโซ่พอลิเมอร์ซึ่งเป็นหมู่ฟีนิลแต่ละหน่วยที่ติดกันหันสลับคนละด้านของโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งแตกต่างจากแบบอะแทกติก ซินดิโอแทกติกเกิดจากการสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งซีเกลอร์-เนตตา หรือ เมทาโลซีนส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบจนจัดว่าเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก และมีจุดหลอมเหลวประมาณ 270 °C มีค่า T_g ประมาณ 80 °C (Baugh & Schulz, 2020)

พอลิสไตรีนแบบซินดิโอแทกติกมีทั้งประเภทพอลิเมอร์เอกพันธุ์ และชนิดพอลิเมอร์ร่วมที่มีมอนอเมอร์ร่วมที่หลากหลาย ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถควบคุมมีจุดหลอมเหลวได้หลากหลาย สมบัติที่เด่นของพอลิสไตรีนแบบซินดิโอแทกติก คือ ทนความร้อน โดยมีจุดหลอมเหลวที่ 270 °C ทน

สารเคมี รวมทั้งสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ทำให้เหมาะในการใช้งานด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ ตลอดจนของใช้ในชีวิตประจำวันทั่วไป

3.2.3 พอลิเมอร์ร่วมของพอลิสไตรีน

ก. พอลิเมอร์ร่วมสไตรีน-บิวทาไดอิน (styrene-butadiene copolymer) จัดว่าเป็นพอลิสไตรีนที่ได้ปรับปรุงสมบัติให้มีสมบัติทนแรงกระแทกได้สูง (ไม่น้อยกว่า $40-80 \text{ kJm}^{-2}$) เมื่อเทียบกับพอลิสไตรีนแบบอะแทกติก ซึ่งมีความทนแรงกระแทกเพียง 20 kJm^{-2} เท่านั้น ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อว่าพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (high impact strength polystyrene, HIPS) การสังเคราะห์ HIPS ทำได้โดยการเกิดพอลิเมอร์แบบต่อกิ่งของสไตรีนไปบนพอลิบิวทาไดอิน ผลิตภัณฑ์ครั้งแรกโดยบริษัท Dow Chemicals ในปี ค.ศ. 1954 ลำดับในการเตรียมมี 2 ขั้นตอน คือ ละลาย (swell) พอลิบิวทาไดอินในสไตรีนจากนั้นทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยผ่านกลไกแบบอนุมูลอิสระระหว่างปฏิกิริยากำลังดำเนินไปทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งขึ้นระหว่างพอลิสไตรีนและพอลิบิวทาไดอิน ด้วยซึ่งช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของทั้งสองส่วน จนในที่สุดจะได้ HIPS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งโดยมีพอลิบิวทาไดอินเป็นโซ่หลักและมีพอลิสไตรีนเป็นโซ่กิ่ง

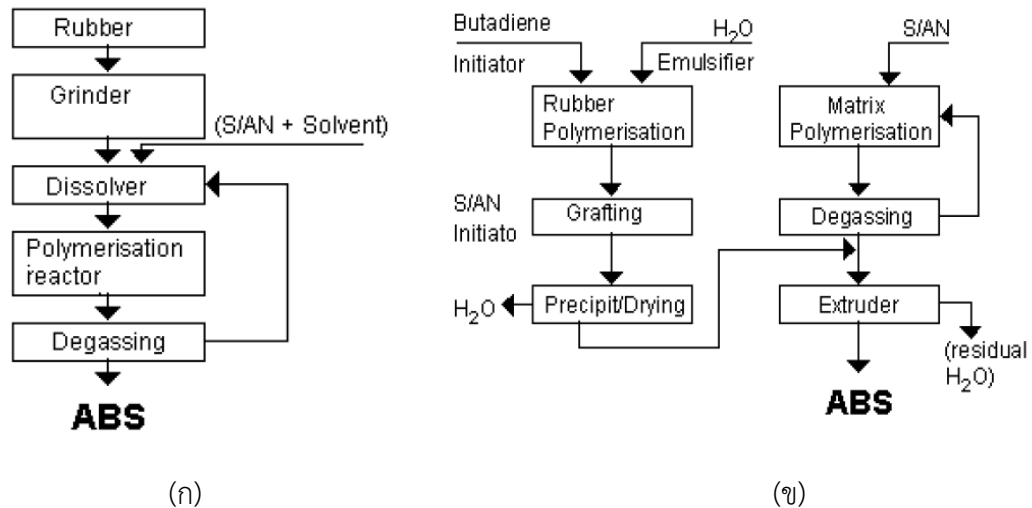
ข. พอลิเมอร์ร่วมสไตรีน-อะครีโลไนไทรล์ (styrene-acrylonitrile copolymer, SAN) เป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตโดยการเกิดพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนและอะครีโลไนไทรล์ ประกอบด้วยหน่วยของสไตรีนและอะครีโลไนไทรล์ในสัดส่วน 70 ต่อ 30 พอลิเมอร์ชนิดนี้ผลิตขึ้นครั้งแรกในช่วงปี ค.ศ. 1950 การสังเคราะห์ทำโดยการผสมมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดในแบบบัลก์หรือแบบอิมัลชันที่มีน้ำเป็นตัวกลาง และปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เกิดขึ้นโดยผ่านกลไกแบบอนุมูลอิสระ พอลิเมอร์ที่ได้มีความทนต่อความร้อนและตัวทำละลายดีกว่าพอลิสไตรีน SAN ใช้ในงานที่ต้องการความใส ไม่ละลายในไขมัน ได้แก่ กล่องใส่อาหาร ถ้วยชาม แต่ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ร่วมนั้นยังไม่พอเพียงสำหรับงานทางวิศวกรรม

ค. พอลิเมอร์ร่วมอะครีโลไนไทรล์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (acrylonitrile butadiene styrene, ABS) ลักษณะที่สำคัญของพอลิเมอร์ร่วม ABS คือ เป็นยางบิวทาไดอิน หรือพอลิเมอร์ร่วมของบิวทาไดอินที่กระจายเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ในเนื้อ SAN ABS มีสมบัติก้ำกึ่งระหว่างพลาสติกโคมะณัณฑ์ (commodity plastics) เช่น PS PP และพลาสติกวิศวกรรม (engineering plastics) เช่น พอลิคาร์บอเนต พอลิเอซีทัล ซึ่งมีราคาสูง การเตรียม ABS สามารถเตรียมได้ 2 วิธีคือ แบบ mass ABS และแบบ emulsion ABS แสดงดังรูปที่ 1.5

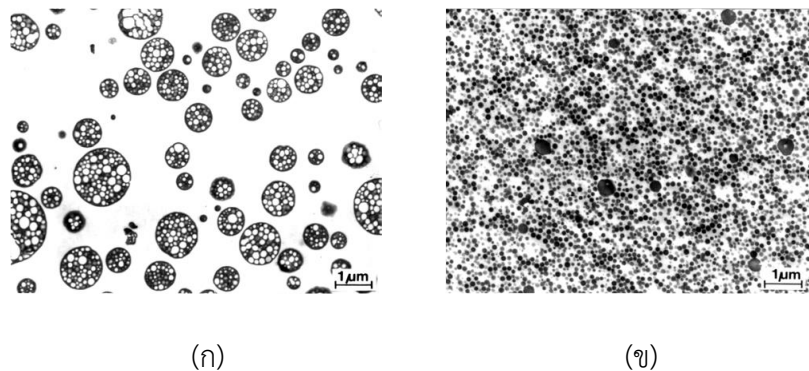
mass ABS ผลิตโดยละลายพอลิบิวทาไดอินในสารละลายของสไตรีนและอะครีโลไนไทรล์ จากนั้นจึงสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของสไตรีนและอะครีโลไนไทรล์ไปบนพอลิบิวทาไดอิน วิธีนี้อนุภาคของยางอยู่ในช่วง 1-10 ไมโครเมตร

emulsion ABS โดยการเตรียมอิมัลชันของบิวทาไดอินให้เป็นพอลิบิวทาไดอินเลเท็กซ์ (BR latex) จากนั้นทำปฏิกิริยาให้เกิดการเกาะติดของสไตรีนและอะครีโลไนไทรล์กับพอลิบิวทาไดอิน เลเท็กซ์

ดังกล่าวได้เป็นพอลิเมอร์ไดอินเลเท็กซ์ที่มี SAN ล้อมรอบหรือเรียกว่า “graft ABS” จากนั้นผสม graft ABS ที่สังเคราะห์ได้กับ SAN ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสไตรีนและอะครีโลไนไตรล์



รูปที่ 1.5 เปรียบเทียบกระบวนการผลิต ABS: (ก) แบบ mass (ข) แบบ emulsion
ที่มา: (Nießner, 2002)



รูปที่ 1.6 ความแตกต่างระหว่าง (ก) mass morphology (ข) emulsion morphology
ที่มา: (Nießner, 2002)

รูปที่ 1.6 แสดงผลของการเตรียม ABS ต่อสัณฐานวิทยา จะเห็นได้ชัดจากรูปที่ 1.6 (ก) เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ผ่านเทคนิคแบบ mass ABS ซึ่งมี inclusion ด้านใน ทำให้มีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ รูปที่ 1.6 (ข) เป็นสัณฐานวิทยาที่ใช้เทคนิคแบบ emulsion ABS ซึ่งจะได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าแบบ mass ABS

มอนอเมอร์แต่ละชนิดมีผลต่อสมบัติของ ABS ดังนี้ อะครีโลไนไตรล์ ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อสารเคมีและความร้อน บิวทาไดอินมีส่วนช่วยเพิ่มความเหนียวและความต้านทานต่อแรงกระแทก

สไตรีนช่วยเพิ่มความเงามันของพื้นผิวชิ้นงาน โดยทั่วไปใช้อะครีโลไนไตรล์ 21-27% บิวทาไดอีน 12-15% และสไตรีน 54-63% (Cha, 2006)

จุดเด่นของ ABS ที่เหนือกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นคือให้สีสดใสและเงามัน และ ABS ใช้แทนโลหะ (die casting) ได้ เช่น เหล็ก อลูมิเนียม และสังกะสีหล่อ เป็นต้น โดยการเคลือบผิวด้วยโลหะ (metal-plated) ทำให้มีสมบัติแข็งและเป็นเงา มีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ง่ายกว่าโลหะ ไม่เป็นสนิม เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของ ABS และ SAN พบว่า ด้านความใส SAN ใสมากกว่า ABS เนื่องจากไม่มีอนุภาคของยางขัดขวางการทะลุผ่านของแสง ทำให้แสงสามารถทะลุผ่านได้ง่าย ในด้านสมบัติเชิงกล SAN เปรียบว่าเนื่องจากไม่มีอนุภาคของยางคอยรับแรงกระแทก

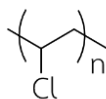
ผลิตภัณฑ์ของ ABS ได้แก่ ตัวเรือนเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น เครื่องดูดฝุ่น โทรศัพท์ และเครื่องครัวที่ต้องการผิวเงามัน

3.3 การนำพอลิสไตรีนกลับมาใช้ใหม่

การนำพอลิสไตรีนกลับมาใช้ใหม่ สามารถทำได้ 2 วิธีคือ ทางกล (mechanical recycling) และทางเคมี (chemical recycling) การนำพอลิสไตรีนกลับมาใช้ใหม่ทางกล เป็นการบด ล้าง แยก และทำให้แห้ง แล้วขึ้นรูปใหม่โดยกระบวนการขึ้นรูปทั่วไปได้ เช่น ฉีดขึ้นรูป อัดรีด ส่วนการนำพอลิสไตรีนกลับมาใช้ใหม่ทางเคมี เป็นกระบวนการเปลี่ยนพอลิสไตรีนให้เป็นมอนอเมอร์ หรือ โอลิโกเมอร์ วิธีนี้เรียกว่า “feed stock recycling” ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์ใหม่ได้ (González-Sánchez et al., 2016; Ignatyev et al., 2014)

4. พอลิไวนิลคลอไรด์

พอลิไวนิลคลอไรด์ (poly(vinyl chloride, PVC) มีลักษณะเด่นคือมีหมู่คลอไรด์อยู่บนโซ่แสดงดังโครงสร้าง (1-12)



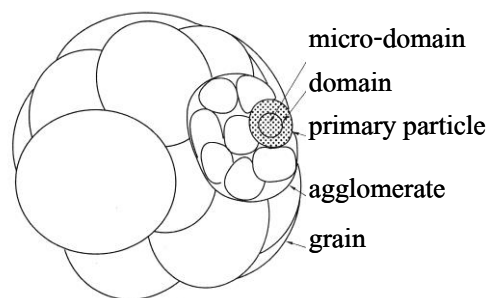
โครงสร้าง (1-12)

มีลักษณะสำคัญคือ สามารถใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งจนอ่อนนุ่มได้ และไม่ติดไฟ PVC มีอะตอมขนาดใหญ่ของคลอรีนต่อยูกับคาร์บอนในโครงสร้าง จึงส่งผลให้โซ่โมเลกุลของ PVC สามารถผลึกได้น้อย ดังนั้น PVC จึงมีความเป็นผลึกประมาณ 5-10% เท่านั้น นอกจากนั้นอะตอมของคลอรีนยังก่อให้เกิดสภาพขั้ว (dipole moment) ระหว่างโซ่โมเลกุลของ PVC

4.1 การสังเคราะห์ PVC สามารถสังเคราะห์ได้จากไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ (vinyl chloride monomer, VCM) การสังเคราะห์ PVC มี 3 วิธีคือ แบบแขวนลอย (suspension polymerization) แบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) และแบบบัลก์ (bulk polymerization)

โดยทั่วไปใช้การสังเคราะห์แบบแขวนลอย รายละเอียดของการสังเคราะห์ ผู้อ่านสามารถศึกษาได้ในรายวิชาเคมีพอลิเมอร์และบทความที่เกี่ยวข้อง (Endo, 2002; Saeki & Emura, 2002)

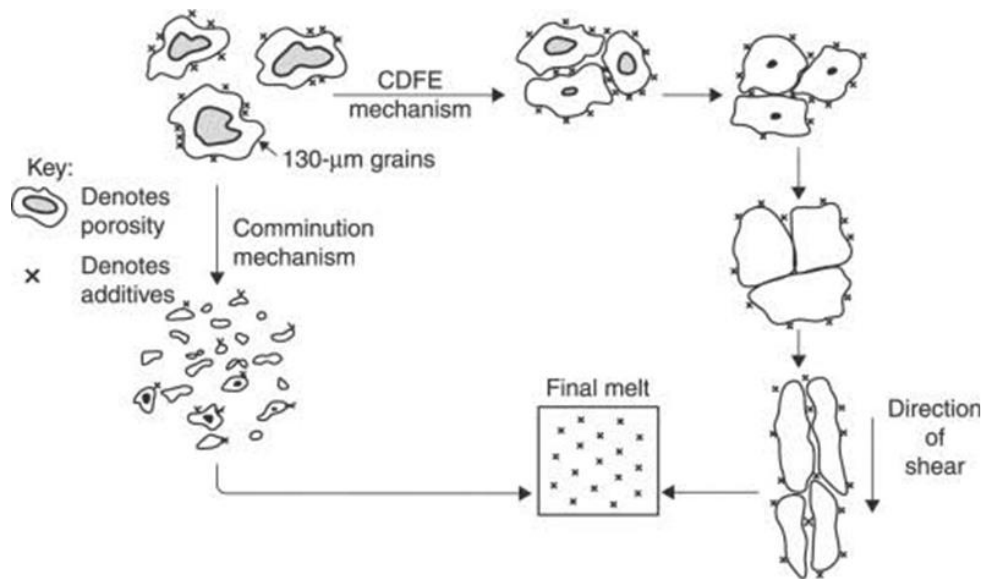
4.2 สันฐานวิทยาของอนุภาค PVC จากปฏิกิริยาการเกิด PVC แบบแขวนลอย ทำให้ได้อนุภาค (grain, particle) ของ PVC ซึ่งประกอบด้วยไมโครโดเมน (micro-domain) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.01 ไมโครเมตรและโดเมน (domain) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.1 ไมโครเมตรรวมกันเป็นของอนุภาคปฐมภูมิ (primary particles) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ไมโครเมตร เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปทำให้จำนวนอนุภาคปฐมภูมิเพิ่มขึ้นและรวมกันเป็นกลุ่ม (agglomerate) ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 อนุภาคของ PVC ที่ได้จากเทคนิคการสังเคราะห์แบบแขวนลอย
ที่มา: (Saeki & Emura, 2002)

4.3 สมบัติที่สำคัญของ PVC สมบัติที่สำคัญของ PVC ที่แตกต่างจากพอลิเมอร์ชนิดอื่น ซึ่งควรรู้จัก ได้แก่ การหลอมเหลว การติดไฟ และ K value ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.3.1 การหลอมของ PVC การหลอมของ PVC มีลักษณะเฉพาะ เรียกว่าการเกิดเจล (gelation) ซึ่งมี 2 แบบ คือแบบ กลไกการบดเป็นผง (comminution mechanism) และกลไกการอัดแน่น (densification mechanism) แสดงดังรูปที่ 1.8 เกิดการเจลของ PVC จะเป็นรูปแบบใดขึ้นอยู่กับสถานะของอนุภาค ความดัน และความเค้นเฉือนที่ PVC ได้รับซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ผสมหรือขึ้นรูป PVC



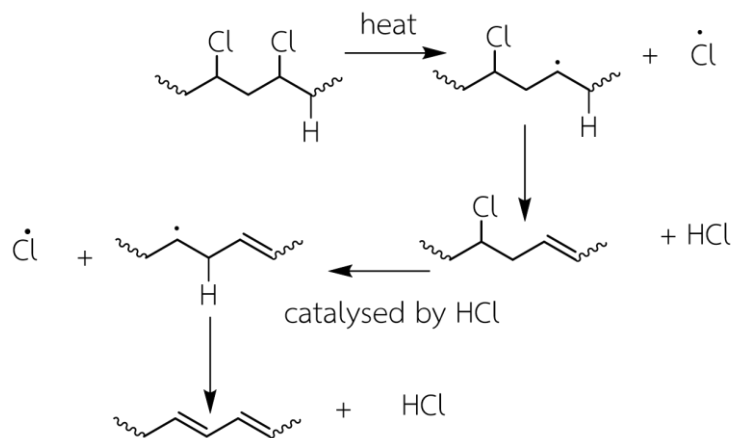
รูปที่ 1.8 กลไกการเกิดเจลของ PVC

ที่มา: (Allsopp, 1981)

กลไกการบดเป็นผง (comminution mechanism) เริ่มจากการทำให้อนุภาคของ PVC ที่มีขนาดอนุภาคหยาบ ๆ และมีรูพรุนแตกออกเป็นอนุภาคที่ละเอียดมากขึ้น ซึ่งมีขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร หรืออาจแตกออกจนมีขนาดประมาณ 200-800 อังสตรอม การที่อนุภาคแตกออกจนมีขนาดเล็กลงเท่าได้นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเค้นเฉือน และความดันที่ใช้ในการขึ้นรูป จากนั้นอนุภาคที่แตกออกจะถูกกดอัด และเริ่มหลอมจนเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างขอบอนุภาค (sintering or interdiffusion) โดยประเภทของเครื่องจักรที่ทำให้อนุภาคลดขนาดก่อนแล้วจึงเกิดการหลอมคือเครื่องผสมระบบปิด

กรณีกลไกการอัดแน่น (CDFE mechanism) อนุภาคของ PVC จะไม่เกิดการแตกออกของอนุภาค แต่อนุภาคจะเข้าสู่กระบวนการหลอม ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการกดอัด (compaction) ทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้น (densification) การหลอม (fusion) และการยืดออกของอนุภาค (elongation) ตามลำดับ หรือเรียกชื่อย่อว่า “CDFE” กลไกการหลอมแบบนี้เกิดขึ้นในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และ เครื่องอัดขึ้นรูป

4.3.2 การติดไฟ PVC เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติด้านการติดไฟโดยตัวของมันเอง เนื่องจากมีคลอรีนอะตอมมากกว่า 50% เมื่อ PVC ได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ จะเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชัน (dehydrochlorination) ดังปฏิกิริยา (1.2)



ปฏิกิริยานี้ให้แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ปกคลุมผิว PVC ไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ที่เกิดขึ้นสามารถรับรู้ได้โดยกลิ่นฉุน นอกจากนั้น PVC ยังคายความร้อนน้อยกว่าพอลิเมอร์อื่นขณะเผาไหม้ ทำให้การลุกติดไฟได้ไม่ดี และส่งผลให้เกิด intumescence ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นถ่านของคาร์บอน (carbonaceous structure) หรือที่เรียกทั่วไปว่า “char” โครงสร้างดังกล่าวนี้ทำหน้าที่ป้องกันการสลายตัวจากการลุกติดไฟได้

4.3.3 K value คือค่าความหนืดของสารละลาย PVC ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวของโซ่โมเลกุลหรือน้ำหนักโมเลกุลของ PVC ตามมาตรฐาน ISO 1628-2 หรือ DIN53726 การวัดน้ำหนักโมเลกุลของ PVC K value อยู่ในช่วง 50-80 ค่า K-value ต่ำนั้นหมายถึงน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งง่ายแก่การแปรรูปแต่มีสมบัติทางกายภาพที่ไม่ดี ขณะที่ PVC ที่มีค่า K-value สูงมีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งยากต่อการแปรรูปแต่สมบัติเชิงกลดี

4.4 ชนิดของ PVC และผลิตภัณฑ์

4.4.1 PVC resin เป็น PVC ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยตรง

4.4.2 PVC compound เป็น PVC ที่ผสมสารเคมี เช่น สารหล่อลื่น ซึ่งส่งผลให้ PVC สามารถไหลขณะแปรรูปได้ง่ายขึ้น สารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) ซึ่งช่วยเปลี่ยนสมบัติของ PVC จากแข็งเปราะเป็นอ่อน สารทำให้เสถียรต่อความร้อน (heat stabilizer) ซึ่งช่วยลดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของ PVC ในระหว่างแปรรูป

4.4.3 PVC paste resin เป็น PVC ที่ผสมสารเสริมสภาพพลาสติก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่นุ่ม หักงอได้ง่าย เป็นที่รู้จักในทางอุตสาหกรรมว่า plastisol หรือ organosol ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ การเคลือบผิวกระดาษหรือผ้า การจุ่ม หรือการขึ้นรูปแบบหมุน (rotational molding) จากการขึ้นรูป PVC paste ในตู้อบจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะนุ่มเป็นเจล เช่น wall paper ผนังเทียม โฟมปูพื้น ตุ๊กตาของเล่น รวมทั้งส่วนประกอบในรถยนต์ สามารถแสดงตัวอย่างกระบวนการแปรรูป PVC paste resin ได้ดังตารางที่ 1.7

ตารางที่ 1.7 ตัวอย่างกระบวนการแปรรูป PVC paste resin และผลิตภัณฑ์

กระบวนการ	ลักษณะกระบวนการ	ผลิตภัณฑ์
การเคลือบ	การเคลือบงานที่อ่อนตัวโดยใช้มีด ลูกกลิ้ง และ การหลอม ในเตาอบ	ผนัง wall paper โฟมบุพื้น
การจุ่ม	ให้พีวีซีเกาะติดอยู่บน former และขึ้นงานโดยการ จุ่มและการหลอมเหลวในเตาอบ	ถุงมือ สารเคลือบโลหะ
การขึ้นรูปแบบหมุน	ให้พีวีซีเกาะอยู่บนผิวด้านในของแม่พิมพ์กลวงที่ ร้อนและเกิดการหลอมเหลวที่ผิว	ตุ๊กตา รองเท้าบูท (boot) พนักพิงศีรษะ มือ ของเบาะรถยนต์ ของเล่นเด็ก

ที่มา: (Endo, 2002)

4.4.4 ผลิตภัณฑ์พอลิไวนิลคลอไรด์ เนื่องจากพอลิไวนิลคลอไรด์ สามารถควบคุม ให้มีสมบัติอ่อนนุ่มจนแข็งเกร็งได้โดยใช้สารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) (ดูรายละเอียดในบทที่ 2) ผลิตภัณฑ์พอลิไวนิลคลอไรด์ที่ไม่มีสารเสริมสภาพพลาสติกผสมหรือผสมในปริมาณน้อย จะเรียกว่า พีวีซี แข็ง (rigid PVC) ตัวอย่างเช่น ท่อแข็ง กรอบประตูหน้าต่าง ขณะที่ผลิตภัณฑ์ PVC ที่มีสารเสริมสภาพ พลาสติกผสมในปริมาณมาก เรียกว่า พีวีซีอ่อน (flexible PVC) ตัวอย่างเช่น ท่ออ่อน ผนังเทียม เสื้อ น้ำมัน รายละเอียดเพิ่มเติมของ plasticizers แสดงในบทที่ 2

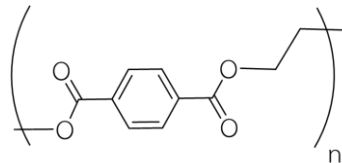
4.5 การนำ PVC กลับมาใช้ใหม่ PVC สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 2 วิธี คือวิธีทางกล (mechanical recycling) และทางเคมี (feedstock recycling) วิธีทางกลเป็นการใช้กรรมวิธีเชิงกล เช่น การบดเพื่อลดขนาดของชิ้นงานให้เล็กลง ชิ้นงานที่บดแล้วสามารถที่จะนำมาหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้ กระบวนการนี้ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น วิธีทางเคมีเป็นกระบวนการทางเคมี เป็นกระบวนการให้ความร้อน ใช้ในการเปลี่ยน PVC ให้กลายเป็นโซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และไฮโดรคาร์บอน เพื่อใช้ในการ สังเคราะห์พอลิไวนิลคลอไรด์อีกครั้ง (Bühl, 1999)

เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองวิธี กระบวนการทางเคมีจะดีกว่าทางกล เนื่องจากสามารถเปลี่ยน PVC ที่มาจากหลายแหล่งให้กลายเป็นสารตั้งต้น อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการทางเคมียังต้องใช้ ต้นทุนสูง

5. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate), PET) หรือเพ็ต เป็น พอลิเอสเตอร์ชนิดหนึ่ง มีประวัติการพัฒนาที่ยาวนานกว่า 70 ปี ในปี ค.ศ. 1941 PET ถูกนำมาผลิตและ ใช้งานรูปของเส้นใย โดยบริษัทแห่งหนึ่งในประเทศอังกฤษ โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า เทรีลีน (Terylene™) และถูกพัฒนาต่อโดยบริษัทดูปองท์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ในชื่อเส้นใย เดครอน (Dacron) เสื้อผ้าที่ผลิต จากเส้นใย PET มีสมบัติที่ดี คือไม่ยับง่าย ในปี 1952 บริษัทดูปองท์ได้พัฒนาเทคนิคการผลิตฟิล์ม พลาสติกที่มีความแข็งแรงสูงจาก PET ขึ้นโดยใช้ชื่อว่า ไมลาร์ (Mylar) เพื่อนำมาใช้สำหรับห่ออาหาร ทำลูกโป่ง แผ่นฟิล์มเอกซเรย์ และเทปสำหรับบันทึกเสียงเพลง ต่อมา PET ถูกนำมาผลิตเป็นขวดบรรจุ ภัณฑ์ที่มีความใส และทนแรงกระแทก

5.1 การสังเคราะห์และโครงสร้าง PET เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเกิดจากปฏิกิริยาการเตรียมเอสเทอร์ โดยใช้กรดเทเรพทาเลอิก (terephthalic acid, TPA) และเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) เป็นสารตั้งต้น หรือใช้ปฏิกิริยาการเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์โดยใช้เมทิลเทเรพทาเลต ร่วมกับเอทิลีนไกลคอล ได้โครงสร้างดังโครงสร้าง (1-13)



โครงสร้าง (1-13)

5.2 สันฐานวิทยาของ PET มีสันฐานวิทยาที่มีลักษณะเฉพาะ กรณีที่ PET บริสุทธิ์มากจะเป็นแบบอสันฐาน แต่สามารถควบคุมให้เกิดผลึกได้ หากหลอม PET ที่อุณหภูมิ 250-280 °C จากนั้นให้ความเย็นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่า T_g จะได้ PET ที่มีค่า T_g ประมาณ 80 °C ความเป็นผลึกของ PET สามารถปรับเพิ่มขึ้นได้ 2 วิธี

(1) การเกิดผลึกโดยใช้ความร้อน (thermally induced crystallization) โดยการหลอม PET ในรูปอสันฐาน แล้วให้ปล่อยใหเย็นตัวอย่างช้า ๆ จะได้ PET ที่มีผลึกขนาดใหญ่ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เม็ด PET มีลักษณะสีขาวขุ่นทึบแสงและเปราะ มี T_g เพิ่มขึ้นเป็น 250 °C และ T_m 265 °C สมบัติดังกล่าวยังไม่เหมาะสมที่จะใช้งานทางการค้า (Jabarin, 1982)

(2) การเกิดผลึกโดยใช้ความเค้น (stress-induced crystallization) โดยให้ความร้อนแก่ PET ที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g (ช่วง 95-100 °C) และยืดออกขณะให้ความร้อนจะเกิดผลึกเนื่องจากการดึงยืด จะได้เป็น PET ที่มีผลึกเล็ก แต่หากให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 150 °C ปริมาณผลึกจะเพิ่มขึ้น (เนื่องจากอัตราการตกผลึกสูงสุดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 150-180 °C) และขนาดของผลึกลดลงจนน้อยกว่าความยาวคลื่นแสง (visible light) จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความโปร่งใส มักเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเส้นใยและฟิล์มบาง (Salem, 1998)

ปัจจุบันมีการดัดแปรโครงสร้างของ PET เพื่อพัฒนาสมบัติเฉพาะในด้านการใช้งานเป็น packaging โดยทำเป็นพอลิเมอร์ร่วมกับมอนอเมอร์ร่วม ได้แก่ กรดไอโซพทาเลอิก (isophthalic acid, IPA) หรือ 1,4-cyclohexane-dimethanol เพื่อทำให้พอลิเมอร์มีปริมาณผลึกและจุดหลอมเหลวที่ต่ำลง ส่งผลให้มีความใสเพิ่มขึ้น และทนแรงกระแทกได้ดี

5.3 ผลิตภัณฑ์ของ PET ผลิตภัณฑ์ของ PET ที่สำคัญและมีการใช้งานในชีวิตประจำวัน ได้แก่ ขวดบรรจุภัณฑ์และเส้นใย ขึ้นอยู่กับค่าความหนืดในตัว ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวโซ่โมเลกุล และสมบัติความแข็งแรง

ตารางที่ 1.8 ผลิตกัณท์ PET และความหนืดในตัว

ผลิตกัณท์	ความหนืดในตัว (intrinsic viscosity, IV), dLg ⁻¹
เส้นใย	0.65
ขวดน้ำดื่ม	0.73-0.76
ขวดน้ำอัดลม ขวดเปียร์	0.80-0.84

ที่มา: (McGonigle et., 2004)

5.3.1 ขวดบรรจุภัณฑ์ ในปี ค.ศ. 1967 PET ถูกนำมาผลิตเป็นขวดน้ำดื่มที่ทนแรงกระแทก โดยทั่วไปการผลิตขวด PET มักใช้กระบวนการแบบฉีดเป่ายัด จากการฉีดเป็นพรีฟอร์มอสังฐาน และ เป่าพรีฟอร์มให้เป็นขวดน้ำตามลำดับ (ดูรายละเอียดในบทที่ 5) ทำให้เกิดการจืดเรียงตัวของโซ่พอลิเมอร์ให้เป็นระเบียบและมีปริมาณผลึกสูง ทำให้ขวดแข็งแรง สามารถป้องกันการแพร่ผ่านของแก๊ส และทนสารเคมีได้ ขวด PET สำหรับบรรจุเครื่องดื่มสามารถแบ่งได้เป็น ขวดน้ำดื่มและขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำดื่มทั่วไปซึ่งต้องเป็นขวดที่เน้นความใส แต่มีความแข็งแรงระดับหนึ่ง ดังนั้น PET ที่ใช้ผลิตขวดน้ำดื่มจึงมีค่าความหนืดในตัวเพียงประมาณ 0.73-0.76 dLg⁻¹ เกรดที่เหมาะสมจึงเป็นเกรดที่มี พอลิเมอร์รวมอยู่ด้วย สำหรับขวดที่ใช้บรรจุน้ำอัดลมต้องมีความแข็งแรงสูงเพื่อให้สามารถทนต่อแรงดันของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ที่อัดไว้ภายในขวดได้และสำหรับขวดเปียร์ต้องทนความร้อนที่ใช้ในการบรรจุเปียร์ที่อุณหภูมิ 60-65 °C โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือระเบิด จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ PET เกรดที่มีค่าความหนืด IV ของพอลิเมอร์อยู่ในช่วง 0.80-0.84 dLg⁻¹ และต้องมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนได้ดีกว่าขวดที่ใช้บรรจุเครื่องดื่มประเภทอื่น (McGonigle et al., 2004)

5.3.2 เส้นใย ผลิตโดยใช้กระบวนการทำเส้นใย (fiber spinning) (ดูรายละเอียดในบทที่ 4) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษได้ค้นพบเส้นใยพอลิเอสเทอร์โดยใช้ชื่อว่า TeryleneTM ในปี ค.ศ. 1941 ต่อมาในปี ค.ศ.1946 บริษัทดูปอง (DuPont) ได้ซื้อลิขสิทธิ์เพื่อพัฒนาสมบัติและได้ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้ชื่อว่า DacronTM ในปี ค.ศ. 1950 จากนั้นได้มีการพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดนี้ในรูปเส้นใยสังเคราะห์ โดยทั่วไป PET สามารถใช้ผลิตเป็นเส้นใยได้โดยผ้าที่ผลิตจากเส้นใยพอลิเอสเทอร์มีสมบัติที่ดีคือไม่ยับง่าย สวมใส่สบาย ดูแลรักษาง่าย ในการใช้งานยังนิยมผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยชนิดอื่น เช่น ฝ้าย ลินิน ขนสัตว์ และมักใช้ในปริมาณไม่ต่ำกว่า 60% เช่น พอลิเอสเทอร์ 65% ฝ้าย 35% เพื่อทำให้ง่ายต่อการซัก สบายต่อการสวมใส่ ไม่ยับง่าย (Tomisawa et al., 2017)

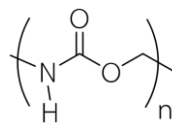
5.4 การนำ PET กลับมาใช้ใหม่ กระบวนการนำ PET กลับมาใช้ใหม่มี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางเคมี

กระบวนการทางกายภาพประกอบด้วย การกำจัดเอาสิ่งปนเปื้อนออกโดยการคัดแยกชิ้นงานที่ใช้แล้ว ล้าง และผ่านกระบวนการหลอม (Awaja & Pavel, 2005) กระบวนการทางเคมี ทำได้โดยการ

depolymerization ให้กลายเป็นมอนอเมอร์ หรือให้กลายเป็นโอลิโกเมอร์ (oligomer) สามารถทำได้โดยเมทานอล (methanolysis) อัลคาไลน์ ไฮโดรไลซิส และไกลโคไลซิส (Kosmidis et al., 2001) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมพอลิเมอร์ได้หลายชนิด เช่น พอลิยูรีเทน เพื่อใช้ประโยชน์เป็นกาว (Phetphaisit et al., 2013) วัสดุประสานในกาวไม้อัด (P. Ruamcharoen et al., 2012) สารเคลือบ (Phetphaisit et al., 2015) อย่างไรก็ตามการย่อยสลายโดยกระบวนการทางเคมีค่อนข้างใช้ต้นทุนสูงจึงอยู่ในขั้นของงานวิจัยเท่านั้น

6. พอลิยูรีเทน

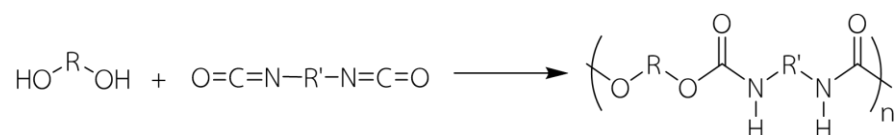
พอลิยูรีเทน (polyurethane, PU) เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ยูรีเทน ($-NHCOO-$) อยู่ในโมเลกุล แสดงดังโครงสร้าง (1-14) การผลิตในทางการค้าเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1937 โดยบริษัท Farbenfabriken Bayer ในเยอรมัน จากปฏิกิริยาไดไอโซไซยานาตกับไกลคอล จะได้พอลิยูรีเทนซึ่งมีสมบัติเป็นได้ทั้งพลาสติก ยาง และเส้นใย สามารถเตรียมให้มีลักษณะแข็งเหนียวจนกระทั่งนุ่มฟูแบบฟองน้ำ สามารถใช้เป็นกาว วัสดุเคลือบผิวและโฟมแข็งได้ด้วย ต่อมาในปี ค.ศ. 1950 ได้มีการพัฒนาพอลิยูรีเทนเป็นวัสดุยืดหยุ่นได้ จึงทำให้ปริมาณการใช้งานพอลิยูรีเทนในปัจจุบันมีแนวโน้มสูงขึ้น



โครงสร้าง (1-14)

6.1 การสังเคราะห์ โดยทั่วไปพอลิยูรีเทนสามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้ไดไอโซไซยานาตเป็นสารตั้งต้นและในปัจจุบันมีงานวิจัยที่รายงานการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนโดยไม่ใช้สารไดไอโซไซยานาต (non-isocyanate polyurethane) ดังนี้

6.1.1 การสังเคราะห์โดยใช้สารไดไอโซไซยานาต พอลิยูรีเทนสามารถสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบขั้น (stepwise polymerization) โดยทั่วไปสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะมี 2 ชนิดคือสารไดไอโซไซยานาต (isocyanates) และ พอลิออล (polyols) ดังปฏิกิริยา (1.3)



(1.3)

สารไอโซไซยานาตเป็นโมเลกุลที่มีจำนวนหมู่ NCO มากกว่าหรือเท่ากับ 2 หมู่ (หรือมี $f_n \geq 2$) ส่วนพอลิออลเป็นโมเลกุลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่าหรือเท่ากับ 2 หมู่เช่นกัน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาจะมีพันธะยูรีเทนเกิดขึ้น

สารไอโซไซยานาตที่ใช้ แบ่งเป็น อะโรแมติกไอโซไซยานาต ได้แก่ โทลูอินไดไอโซไซยานาต (toluene diisocyanates, TDIs) ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานาต (4,4-diphenyl methane diisocyanate, MDI) พอลิไอโซไซยานาต (polyisocyanates, p-MDI) และอะลิฟาติก ไอโซไซยานาต เป็นสารตั้งต้นที่ค่อนข้างเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น เฮกซะเมทิลีน ไดไอโซไซยานาต (hexamethylene diisocyanate, HDI)

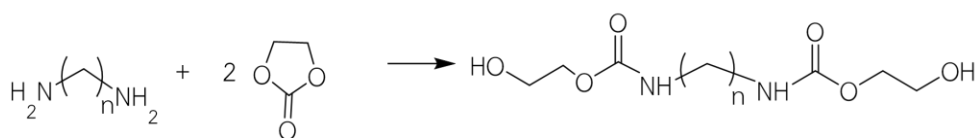
สารพอลิออลที่ใช้ ได้แก่ พอลิอีเทอร์พอลิออลและพอลิเอสเทอร์พอลิออลพอลิอีเทอร์พอลิออล คือพอลิอีเทอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลบนโครงสร้างหรือปลายโซ่โมเลกุล โดยส่วนใหญ่ คือ โพรพิลีนออกไซด์และเอทิลีนออกไซด์ พอลิเอสเทอร์พอลิออลผลิตมาจากไดแอซิดกับไกลคอล เช่น กรดอะดิปิกกับเอทิลีนไกลคอลหรือบิวเทนไดออล นอกจากนั้นยังได้จากปฏิกิริยาไกลโคไลซิสของ PET ซึ่งทำให้ได้พอลิออลที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นวงแหวนแอโรแมติกส์

นอกจากนั้นยังมีพอลิออลที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร (Tan et al., 2011) น้ำมันปาล์มดัดแปร (Tanaka et al., 2008) ยางธรรมชาติเหลวที่ได้จากการดัดแปรโครงสร้างยางธรรมชาติให้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีหมู่ไฮดรอกซิลทั้งบนโซ่และปลายโซ่ (Saetung et al., 2010)

ลักษณะที่บ่งบอกของไฮดรอกซิลคือ น้ำหนักโมเลกุลและจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพอลิออล ซึ่งเรียกว่าเลขไฮดรอกซิล (hydroxyl number) โดยทั่วไปแล้ว พอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้จากพอลิออลที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ และเลขไฮดรอกซิลสูง ๆ จะมีความแข็งแรงเนื่องจากมีโอกาสเกิดเป็นหมู่ยูรีเทนจำนวนมาก แต่สำหรับพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้เกิดหมู่ยูรีเทนจำนวนที่น้อยกว่ากรณีที่ใช้พอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติของพอลิยูรีเทนที่ได้มีความอ่อนตัว

จากลักษณะของปฏิกิริยาดังกล่าวหากใช้เฉพาะไดไอโซไซยานาต ทำปฏิกิริยากับไดออล (ซึ่งสารตั้งต้นทั้งสองมี $f_n = 2$) จะได้พอลิยูรีเทนที่มีโครงสร้างเชิงเส้นซึ่งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกแต่หากใช้สารตั้งต้นที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 2 หมู่ (หรือ $f_n > 2$) จะเกิดเป็นเทอร์โมเซตพอลิยูรีเทน

6.1.2 การสังเคราะห์โดยไม่ใช้สารไอโซไซยานาต จากเหตุผลทางสิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษของไอโซไซยานาตทำให้นักวิจัยปัจจุบันมุ่งเน้นการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนโดยไม่ใช้สารไอโซไซยานาต เช่น การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจาก ปฏิกิริยาระหว่างไดเอมีนและไซคลิกคาร์บอนเตตดังปฏิกิริยา (1.4) (Lee & Deng, 2015)



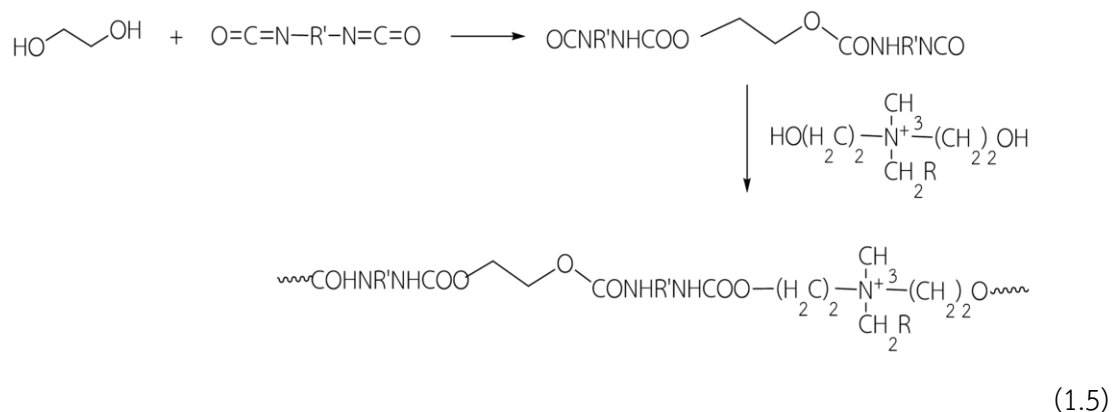
(1.4)

6.2 ผลิตภัณฑ์จากพอลิยูรีเทน ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเอกลักษณ์ของพอลิยูรีเทน คือ ผลิตภัณฑ์งานเคลือบ กาว สารอุดยาแนว และยางสังเคราะห์ หรือเป็นที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อย่อว่า “CASE” ซึ่งย่อมาจากภาษาอังกฤษ “coating- adhesive-sealant-elastomer”

6.2.1 ผลิตภัณฑ์สารเคลือบ กาว วัสดุยาแนว แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

ก. *Organic solvent based PU* ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มักละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ โดยส่วนใหญ่พอลิออลที่ใช้มักเป็นพอลิคาร์โพรแลคโตนพอลิออล พอลิคาร์บอนตพอลิออล และพอลิบิวทาไดอินพอลิออล ((Patri et al., 2006) นอกจากนี้ยังมีพอลิออลที่เป็นวัสดุพหุนิวรีนที่มาจากธรรมชาติ เช่น น้ำมันระหุ่ง (castor oil) (Madbouly et al., 2013) น้ำมันถั่วเหลือง (soybean oil) (Rajput et al., 2014) สำหรับสารไอโซไซยาเนต ได้แก่ aliphatic และ cycloaliphatic isocyanate ได้แก่ isophorone diisocyanate (IPDI) hexamethylene diisocyanate (HDI)

ข. *Water borne PU* สามารถที่จะ formulated ในรูปของ สารเคลือบและกาว ที่ใช้ตัวทำละลายน้อยหรือไม่ใช้เลย (Honarkar, 2018) ซึ่งช่วยลดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมจากตัวทำละลาย และไม่ติดไฟ WPU สามารถเกิดเป็นฟิล์มสารเคลือบได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อน และสามารถยึดติดหรือเคลือบอยู่บนพื้นผิวหลายประเภท เช่น แก้ว หรือ ผิวเส้นใยพอลิเมอร์ได้ โดยทั่วไปพอลิยูรีเทนมีความไม่ชอบน้ำ โดยธรรมชาติและไม่ละลายในน้ำ ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถกระจายในน้ำได้ต้องใส่ส่วน (segment) ที่ชอบน้ำ ซึ่งอาจเป็นไอออนิก และ/หรือ นอนไอออนิกในโครงสร้าง เช่น ปฏิกริยา (1.5)

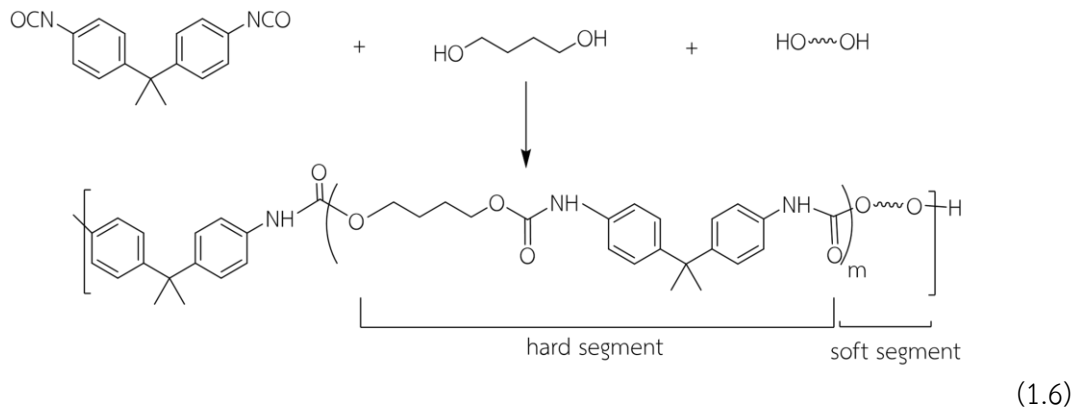


6.2.2 ยางพอลิยูรีเทน แบ่งเป็น 2 ประเภท

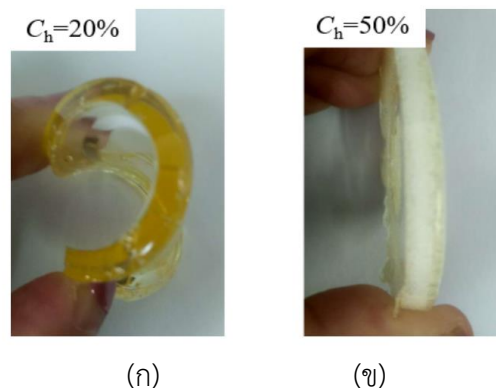
ก. *cast elastomer* องค์ประกอบของพอลิยูรีเทนชนิดนี้ประกอบด้วยสาร ไอโซไซยาเนต พอลิออล และสารเชื่อมขวาง ซึ่งโดยทั่วไป ได้แก่สารกลุ่มเอมีน หรือ ไฮดรอกซิลที่มี $f > 2$ สามารถเตรียมได้โดยการผสมสารเคมีแต่ละส่วนด้วยกันแล้วเทหรือฉีดใส่แม่พิมพ์

ข. *thermoplastic polyurethane (TPU)* จัดเป็นพอลิเมอร์รวมแบบกลุ่ม และเป็นวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกชนิดแรก โขโมเลกุลของ TPU ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

(i) ส่วนแข็ง (hard segment) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับ short chain diol เช่น 1,4 butane diol และ (ii) ส่วนนุ่ม (soft segment) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับพอลิเอสเตอร์หรือพอลิอีเทอร์พอลิออล ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ TPU เป็นดังปฏิกิริยา (1.6) (Jin et al., 2020)



ดังนั้นสมบัติของ TPU สามารถปรับเปลี่ยนได้จากการสังเคราะห์ หากมีองค์ประกอบของส่วนแข็งน้อย (20%) ดังจะมีความอ่อนตัว ดัดโค้งได้ รูปที่ 1.9 (ก) และหากมีส่วนแข็งมาก (50%) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแข็งเกร็งดังรูปที่ 1.9 (ข)



รูปที่ 1.9 ลักษณะผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนที่มีส่วนแข็งต่างกัน

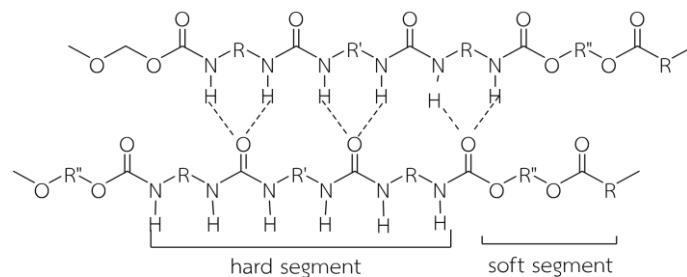
(ก) ส่วนแข็ง 20% และ (ข) ส่วนแข็ง 50%

ที่มา: (Jin et al., 2020)

เมื่อได้รับความร้อนทำให้วัสดุของพอลิเมอร์ที่มีความแข็งเกร็งอ่อนตัวลง และทำให้ TPU สามารถไหลตามแรงกระทำได้ แต่เมื่อได้รับความเย็นก็จะกลับมาแข็งตัวได้อีก ดังนั้น TPUs สามารถขึ้นรูปได้โดยการอัดรีด ฉีด หล่อเบ้า ในลักษณะเดียวกับการขึ้นรูปเทอร์มอพลาสติก

การนำ TPU ไปใช้ประโยชน์เหมาะกับงานที่ต้องการใช้วัสดุที่มีความทนต่อการขัดสีและมีความเหนียวสูง หรือมีสมบัติของการยืดหยุ่นต่ำ เช่น ใช้ทำวงล้อขนาดเล็กที่ติดกับเฟอ์นเจอร์ เพื่อให้เคลื่อนที่ได้ง่าย ใช้ทำสนรองเท้า ใช้ทำท่อและสายยางที่แข็งแรงมาก ๆ และใช้ทำแผ่นหน้าปัดรถยนต์

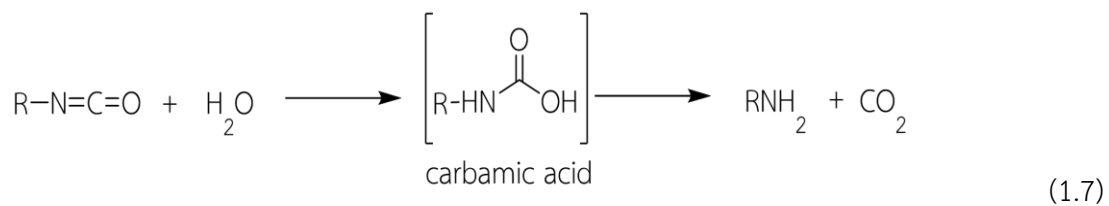
6.2.3 เส้นใยพอลิยูรีเทน พอลิยูรีเทนที่ใช้เป็นเส้นใยเป็นยางพอลิยูรีเทนที่เป็นพอลิยูรีเทน-ยูเรียพอลิเมอร์ สารตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์ได้แก่ MDI กับพอลิออลที่ให้ส่วนนุ่มและใช้ตัวขยายสายโซ่ชนิดไดเอมีน จากนั้นผลิตภัณฑ์พรีพอลิเมอร์ที่ได้จะทำปฏิกิริยากับตัวขยายสายโซ่ ทำให้ได้พอลิยูเรียซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดังโครงสร้าง 1.15 และถือว่าเป็นส่วนแข็ง สำหรับส่วนนุ่มเกิดจากไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับพอลิออล เช่น พอลิเทระเมทิลีนไกลคอล (polytetramethylene glycol, PTMG) ซึ่งจะให้สมบัติความยืดหยุ่น ดังนั้นทำให้สมบัติโดยรวมเหมือนยาง (elastomer) มีลักษณะเด่นคือสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ โดยเป็นที่รู้จักกันทั่วไปว่าเส้นใยสแปนเด็กซ์ (spandex fibers) ในการขึ้นรูปจะใช้วิธี spinning process แบบ dry spinning หรือ melt spinning (Hicks et al., 1965)



โครงสร้าง (1-15)

6.2.4 ผลิตภัณฑ์โฟม โฟมพอลิยูรีเทนเป็นพอลิยูรีเทนชนิดหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาของพรีพอลิเมอร์ 2 กลุ่ม คือ พอลิออลและไดไอโซไซยาเนตโดยมีน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เช่น สารกลุ่มเอมีน และออร์แกนโนทิน (organotin) ร่วมด้วย ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไอโซไซยาเนตทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นและแทรกอยู่ในเนื้อของพอลิยูรีเทน บางกรณีมีการใช้แก๊สหรือวัสดุระเหยง่าย เช่น เมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride) เป็นสารฟู (blowing agent) แทนน้ำ นอกจากนี้พอลิออลที่ใช้เตรียมยังได้มาจากธรรมชาติ เช่น จากยางธรรมชาติดัดแปร

โดยทั่วไปพอลิยูรีเทนโฟมสามารถเกิดจากปฏิกิริยาพื้นฐาน 2 ขั้นตอน คือปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตและแอลกอฮอล์หรือไดออลได้พอลิยูรีเทน ปฏิกิริยาที่ 2 เป็นปฏิกิริยาการพุดัวเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไอโซไซยาเนตที่มากเกินไปกับน้ำเกิดเป็นกรดคาร์บามิก (carbamic acid) ซึ่งเป็นสารมัธยันต์ (intermediate) ที่ไม่เสถียรและสามารถสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และเอมีนชนิดปฐมภูมิ (primary amine) ดังปฏิกิริยา (1.7) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการพุดัวในระบบได้เป็นผลิตภัณฑ์โฟม



โฟมพอลิยูรีเทนแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ (i) โฟมยืดหยุ่น (flexible foam) สังเคราะห์โดยใช้พอลิออลที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลน้อย ๆ เช่น กลีเซอรอล ($f = 3$) ไดพรอพิลีนไกลคอล ($f = 2$) มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2,000-4,000 ทำปฏิกิริยากับโทลูอิน ไดไอโซไซยาเนต (TDI) ให้สมบัติยืดหยุ่นได้ดี ใช้ทำหมอน แผ่นรองรับในรองเท้า (ii) โฟมแข็ง (rigid foam) ใช้พอลิออลที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลมาก ๆ และมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย ๆ (ประมาณ 250-1000) เช่น ซอร์บิทอล ($f=6$) ซูโครส ($f=8$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับ p-MDI ส่งผลให้มีปริมาณการเชื่อมขวางสูง มีความแข็งแรงมากกว่าโฟมชนิดยืดหยุ่น จึงใช้ทำโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เป็นฉนวนความร้อน และมีน้ำหนักเบา จึงมักใช้ทำฉนวน เช่น ฉนวนสำหรับ บูอาคร ตู้เย็น ห้องเย็น และ กระจก

6.3 การนำกลับมาใช้ใหม่ โดยทั่วไปพอลิยูรีเทนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยกระบวนการ mechanical recycling ทำได้โดยการบดโฟมพอลิยูรีเทนให้เป็นผง ขณะที่พอลิยูรีเทนสามารถนำมาใช้ใหม่ได้เลยหรือบดผงโฟม แล้วผสมกับกาว จากนั้นคงรูปด้วยความร้อนและแรงดันหรือกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ทางเคมี เช่น ไฮโดรไลซิส และไกลโคไลซิส (Wu et al., 2002, 2003)

7. พอลิเมอร์ชีวภาพ

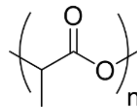
พอลิเมอร์ชีวภาพ (bio-based polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มาจากแหล่งชีวมวล ปัจจุบันพอลิเมอร์ชีวภาพได้รับการวิจัยและพัฒนาให้มีความหลากหลาย โดยในเอกสารคำสอนนี้จะแยกประเภทได้เป็น 4 ประเภท

7.1 แหล่งกำเนิดจากพืช (biomass) พอลิเมอร์ชีวภาพที่มีแหล่งกำเนิดจากพืชที่สำคัญคือ เทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch) เป็นพอลิเมอร์ได้จากพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคุ จัดอยู่ในกลุ่มที่มาจากธรรมชาติโดยตรง เป็นวัสดุหมุนเวียน ไม่เป็นพิษ และราคาถูก โดยทั่วไปแล้วแป้งไม่สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการทางความร้อนเหมือนพอลิเมอร์ทั่วไปเนื่องจากเกิดการไหม้และเสื่อมสภาพก่อนหลอม เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาแป้งให้สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการทางความร้อน ซึ่งทำได้โดยใช้สารเสริมสภาพพลาสติก เช่น น้ำ (Ismail et al., 2016) กลีเซอรอล (Corradini et al., 2006) เอทิลีนไกลคอล (Qiao et al., 2011) หรือสารเสริมสภาพพลาสติกผสม (Qiao et al., 2011) และให้สภาวะแรงเฉือน ความร้อน และความดันที่เหมาะสม กระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างกิ่งผลึกของแป้งให้มีโครงสร้างอสัณฐาน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแป้งมีความเปราะจึงมีการ

ปรับปรุงโดยการผสมยางธรรมชาติ และใช้นาโนเคลย์เป็นสารตัวเติม และ สารช่วยให้เข้ากันได้ (compatibilizer) (Ruamcharoen et al., 2020)

เทอร์มอพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการเดียวกันกับพอลิเมอร์ทั่วไป โดยส่วนใหญ่มักเป็นการเป่าฟิล์ม (Dang & Yoksan, 2021; Thunwall et al., 2008) และผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอัดขึ้นรูป ได้แก่ ถาด ถ้วย จาน ซึ่งมีการนำไปใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น

7.2 แหล่งกำเนิดมอนอเมอร์จากจุลินทรีย์ พอลิเมอร์ที่มีแหล่งกำเนิดจากจุลินทรีย์ (bioderived monomers) ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก คือ พอลิแลกติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) โครงสร้าง (1-16) จัดว่าเป็นพอลิเอสเทอร์แบบกิ่งผลึกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ผลิตจากกรดแลกติก (lactic acid) บางครั้งเรียกว่า พอลิแลกไทด์ (polylactide) กรดแลกติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี หรือกระบวนการหมักผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น อ้อย ข้าวโพด ข้าวสาลี และหัวบีท โดยใช้จุลินทรีย์เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดแลกติก เมื่อนำมาแยกให้บริสุทธิ์ แล้วจึงนำมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์เป็น PLA ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่กระบวนการที่นิยมใช้คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบเปิดวงแหวนแลกไทด์โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 100,000 และมีสมบัติที่ดีสามารถใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้

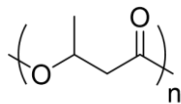


โครงสร้าง (1-16)

PLA ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่อุณหภูมิ 60 °C มีการย่อยสลายแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ การย่อยสลายผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสที่พื้นระเอสเทอร์ของพอลิเมอร์ ทำให้โซ่พอลิเมอร์ถูกตัดให้สั้นลงจนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง และสามารถย่อยสลายต่อโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ได้ง่าย เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ

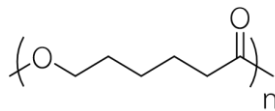
PLA สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป การเป่าฟิล์ม เทอร์มอฟอร์ม และการปั่นหลอมเส้นใย นอกจากนี้ PLA ยังเป็นวัสดุที่เข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อ เหมาะสำหรับงานทางการแพทย์ โดยใช้เป็นไหมละลาย วัสดุควบคุมการปลดปล่อยตัวยาหรือสารสำคัญได้

7.3 พอลิเมอร์ชีวภาพที่มีแหล่งกำเนิดจากจุลินทรีย์ พอลิไฮดรอกซี อัลคานอยด์ (polyhydroxyalkanoates, PHA) โครงสร้าง (1-17) เป็นพอลิเอสเทอร์แบบกิ่งผลึก ผลิตจากกระบวนการที่ใช้น้ำตาลเป็นสารอาหารในการเลี้ยงแบคทีเรียภายใต้สภาวะที่ควบคุม แบคทีเรียจะผลิต PHAs และเก็บสะสมไว้ในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน คล้ายการสะสมพอลิแซ็กคาไรด์ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต การเปลี่ยนสารอาหารของแบคทีเรียจะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกัน เช่น พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (poly(hydroxybutyrate, PHB)



โครงสร้าง (1-17)

7.4 พอลิเมอร์ชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จากสารปิโตรเคมี พอลิคาร์โพรแลกโตน (polycaprolactones, PCL) โครงสร้าง (1-18) เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพอีกชนิดในกลุ่ม แอลิฟาติก พอลิเอสเทอร์ ผลิตจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวงแหวนคาร์โพรแลกโตน (ϵ -caprolactone) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น stannous octoate และแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาเพื่อควบคุมการสังเคราะห์พอลิเมอร์ให้ได้น้ำหนักโมเลกุลตามต้องการ PCL ที่สังเคราะห์ขึ้นทางการค้าแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยใช้ น้ำหนักโมเลกุลเป็นเกณฑ์ กลุ่มแรกเป็น PCL ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 20000 มีลักษณะเป็นของแข็ง คล้ายแว็กซ์ หรือเป็นของเหลวหนืด ใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกใน PVC กลุ่มที่ 2 มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 20,000 เป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงเชิงกลสูง



โครงสร้าง (1-18)

PCL เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่ใช้งานกันทั่วไป มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น มีจุดหลอมเหลวประมาณ 59-64 °C มี T_g ประมาณ -60 °C จึงมีการใช้งานด้านการแพทย์สำหรับผลิตไหมละลายหรือวัสดุสำหรับปลดปล่อยตัวยา เช่น ชุดอุปกรณ์คุมกำเนิดซึ่งปลดปล่อยสารคุมกำเนิดในอัตราที่เหมาะสม ผ้าชนิดไม่ถักไม่ทอ หรือแผ่นปิดแผล วัสดุควบคุมปลดปล่อยปุ๋ยและยาฆ่าแมลงหรือวัชพืช

ถึงแม้ว่า PCL จะเป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากคาร์โพรแลกโตนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี แต่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอย่างสมบูรณ์ โดยมีกลไกการย่อยสลายเช่นเดียวกับ PLA แต่มีอัตราในการย่อยสลายที่ต่ำกว่า

บทสรุป

เนื้อหาในบทที่ 1 นี้เป็นการแนะนำให้ทราบถึงความหมายของพอลิเมอร์ การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามประเภทของแหล่งที่มา ชนิดของหน่วยซ้ำ สมบัติทางกายภาพ และยกตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สำคัญ ได้แก่

พอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน หรือเรียกกลุ่มนี้ว่า พอลิโอเลฟินส์ เป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง สมบัติของพอลิเมอร์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนอสัณฐาน และส่วนผลึก ซึ่งมีผลต่อสมบัติการใช้งานของพอลิเมอร์

พอลิสไตรีน พอลิสไตรีนแบบอะแทกติก เป็นพอลิเมอร์ที่มีความใส มีความแข็งแรง และพอลิสไตรีนแบบซินดิโอแทกติก เป็นพอลิสไตรีนที่มีความเป็นระเบียบ จัดว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีสัณฐานวิทยาแบบกิ่งผลึก ทนความร้อน พอลิสไตรีนสามารถทำเป็นพอลิเมอร์ร่วมกับบิวทาไดอีนและอะคริโลไนไทรล์ ให้เป็น HIPS SAN และ ABS เพื่อพัฒนาสมบัติความทนต่อแรงกระแทก

พอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่คลอไรด์ในโครงสร้าง ทำให้มีลักษณะเด่นคือเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้ว ไม่ติดไฟ มีความแข็งแรง แต่สามารถทำให้อ่อนนุ่มได้ด้วยสารเสริมสภาพพลาสติก

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นพอลิเอสเตอร์ ที่มีลักษณะเด่นที่มีความใส มีความทนแรงกระแทก ใช้ทำผลิตภัณฑ์หลัก เป็นขวดบรรจุภัณฑ์ และเส้นใยสังเคราะห์

พอลิยูรีเทน เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาของสารไอโซไซยานาต และพอลิออล และสามารถทำผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด ทั้ง สารเคลือบ กาว วัสดุยานว ยาง เส้นใย และโฟม ขณะนี้มีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนโดยไม่ใช้สารไอโซไซยานาตเป็นสารตั้งต้น ซึ่งช่วยลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมจากการใช้สารไอโซไซยานาต

พอลิเมอร์ชีวภาพ มีลักษณะสำคัญ คือเป็นพอลิเมอร์ที่มาจากแหล่งชีวมวลซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบหมุนเวียน พอลิเมอร์ฐานชีวภาพ ได้แก่ เทอร์โมพลาสติกสตาโรล PLA PHA PCL

คำถามทบทวน

1. จงเขียนสูตรโครงสร้างของพอลิเมอร์ต่อไปนี้

1.1 PE

1.2 PP

1.3 PVC

1.4 PS

1.5 PLA

2. จากพอลิเมอร์ในข้อ 1

2.1 พอลิเมอร์ชนิดใดในข้อ 1 ไม่ติดไฟ เพราะเหตุใด

2.2 พอลิเมอร์ชนิดใด ถือว่าเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ

3. พอลิเมอร์ชนิดใดมีความเหมาะสมในการใช้ทำภาชนะบรรจุน้ำมันเบนซินระหว่าง PET กับ LDPE เพราะเหตุใด

4. จงเปรียบเทียบหรือบอกความแตกต่างของ

- 4.1 โครงสร้างและสมบัติของเทอร์โมเซต และ เทอร์โมพลาสติก พร้อมทั้งยกตัวอย่างชื่อพอลิเมอร์
- 4.2 โครงสร้างและสมบัติของ PS และ HIPS
- 4.3 Organic Solvent based PU และ Water borne PU

การฝึกปฏิบัติการ

ปฏิบัติการที่ 1 การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์

วัตถุประสงค์

เพื่อจำแนกประเภทของพอลิเมอร์โดยการสังเกตลักษณะภายนอก การเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อน และการละลาย

อุปกรณ์การทดลอง

1. ตะเกียงแอลกอฮอล์ 1 อัน
2. หลอดทดลองขนาดเล็ก
3. แท่งแก้ว 1 อัน
4. คีมคีบ 1 อัน

วัสดุ

1. ตัวอย่างชิ้นงานพอลิเมอร์ (ยางดิบ ยางวัลคาไนซ์ PVC, HDPE, TPU, epoxy resin)
2. ตัวทำละลายต่าง ๆ

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 สังเกตลักษณะทั่วไปของพอลิเมอร์

สังเกตลักษณะทั่วไปของตัวอย่างชิ้นงานพอลิเมอร์ ได้แก่ รูปทรง สี ความใส

ตอนที่ 2 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อน

- 2.1 ใช้คีมจับพอลิเมอร์เหนือเปลวไฟจากตะเกียงแอลกอฮอล์ ถ้าติดไฟนำออกจากเปลวไฟห่างประมาณ 3 นิ้ว สังเกตและจดบันทึกสิ่งต่อไปนี้
- 2.2 พอลิเมอร์หลอมและไหม้ได้หรือไม่
- 2.3 ความสามารถในการติดไฟ เช่น เผาไหม้ ติดไฟแต่ดับได้เอง หรือไม่ติดไฟ
- 2.4 ค้อน เช่น ไม่มีควัน ควันดำ ควันเล็กน้อย ควันดำมากมีเขม่า

ข้อควรระวัง

คีมที่จับพลาสติกเผาไฟควรพันด้วยวัสดุกันความร้อนและควรทำการทดลองเหนือวัสดุไม่ติดไฟหรือบนภาชนะโลหะ ควรทำการทดลองในตู้ควัน และไม่ควรสูดหายใจควันจากการเผาไหม้พอลิเมอร์

ตอนที่ 3 ทดสอบการละลาย

3.1 ใส่พอลิเมอร์ชิ้นเล็ก ๆ บาง ๆ ในหลอดทดสอบ 2-3 ชิ้น

3.2 ใช้หลอดหยดสารดูดตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ลงในหลอดทดลองที่มีชิ้นพอลิเมอร์อยู่ ให้ตัวทำละลายท่วมชิ้นพอลิเมอร์

3.3 เขย่าและตั้งทิ้งไว้ อย่างน้อย 1 ชั่วโมง เขย่าอีกครั้ง จดบันทึกผล ละลายดี ไม่ละลาย หรือละลายบางส่วน โดยเทียบกับตารางที่ 1.9

ตารางที่ 1.9 การละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ

พอลิเมอร์	แอซิโตน	โพรพานอล	เฮกเซน	ไดเอทิลฟอร์มาไมด์
PVC	+/-	-	-	+/-
PE	-	-	+	-
PS	+	-	+/-	-
PP	-	-	+	-
epoxy resin	-	-	-	-

หมายเหตุ + หมายถึงละลายได้ดี - หมายถึง ไม่ละลาย +/- หมายถึง ละลายเล็กน้อย

จากข้อมูลผลการทดสอบพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ จงระบุว่าตัวอย่างที่ให้ทดสอบเป็นเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซต หรือ วัสดุยืดหยุ่น หรือวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์โมพลาสติกโดยอาศัยการวิเคราะห์ตามหลักการในบทที่ 1 พร้อมเหตุผลประกอบ

ปฏิบัติการที่ 2 สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลึก จุดหลอมเหลว และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

อุปกรณ์

1. เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)
2. เครื่องอัดขึ้นรูปและแม่พิมพ์ (Compression molding machine)
3. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Universal tester)

วัสดุ

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)
3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)
4. พอลิสไตรีน (PS)

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

ขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยการอัดขึ้นรูปโดยการอัดร้อน 7 นาที และอัดเย็น 3 นาที สังเกตตัวอย่างขึ้นงานที่ได้ หากไม่ได้ตัวอย่างขึ้นงานที่เต็มแม่พิมพ์สมบูรณ์ ให้ ปรับอุณหภูมิและระยะเวลาตามความเหมาะสม

ตอนที่ 2 ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดึงตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D638

2.1 ตัดตัวอย่างเป็นขึ้นทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (รูปดัมเบลล์) อย่างน้อย 5 ชิ้น

2.2 ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง โดยดึงที่อัตราเร็ว 50 mm.min^{-1} บันทึกลักษณะตัวอย่างขึ้นงานขณะรับแรงดึงพร้อมกับลักษณะความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด (หรือแรง-ระยะยืด)

ตอนที่ 3 ศึกษาจุดหลอมเหลวและปริมาณผลึกของพอลิเมอร์โดยใช้ DSC

3.1 ใส่ตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 50 มิลลิกรัมใน aluminum pan ใส่สารตัวอย่างแล้วปิดฝา สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ทดสอบแบบสแกนอุณหภูมิตั้งแต่ -50°C จนถึง 250°C ด้วยอัตราเร็ว $10^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$

3.2 หาจุดหลอมเหลว (T_m) และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์

3.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของชนิดพอลิเมอร์ ปริมาณผลึก และจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่ทดลอง

ปฏิบัติการที่ 3 การเตรียมและสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทน

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนของสารตั้งต้นในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนต่อพฤติกรรมการเกิดโฟมและสมบัติของโฟม

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นกวนเชิงกล (Mechanical stirrer)
2. เครื่องทดสอบความแข็งแรง (Durometer Shore C)
3. อุปกรณ์ทั่วไป เช่น ปีกเกอร์ แท่งแก้ว หลอดหยด
4. ภาชนะถ้วยกระดาษสำหรับผสมและเตรียมพอลิยูรีเทน

วัสดุ

1. พอลิไอโซไซยานต (p-MDI)
2. พอลิอีเทอร์พอลิออล มีเลขไฮดรอกซิล 183-223 mg KOH/g
3. ไตรเอทิลีน ไดเอมีน Dabco 33 LV (Triethylene diamine)

4. ไดบิวทิลทินไดลอเรต (Dibutyltin dilaurate, DBTDL)
5. ซิลิโคน
6. น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 เตรียมโฟมพอลิยูรีเทน

เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง p-MDI กับ พอลิอีเทอร์พอลิออลโดยแปรดัชนีบ่งชี้ไอโซไซยาเนต (NCO index) 90 100 และ 110

โดยการผสมสารเคมีโดยน้ำหนักของส่วนประกอบดังตารางที่ 1.10 คนส่วนผสมทั้งหมดในถ้วยกระดาษให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที โดยการปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกล ความเร็ว 1000 rpm จากนั้นปล่อยให้โฟมฟุ้งด้วยในขณะที่เกิดการฟุ้งได้มีการศึกษาพฤติกรรมการเกิดโฟมจนกระทั่งโฟมหยุดการฟุ้ง

ตารางที่ 1.10 สารเคมีและปริมาณที่ใช้ในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน

ส่วนประกอบ	ปริมาณสาร (g)		
	NCO Index 90	NCO Index 100	NCO Index 110
p-MDI	100	100	100
polyether polyol	69.74	62.89	59.95
silicone	0.94	0.94	0.94
tin catalyst	0.11	0.11	0.11
amine catalyst	0.11	0.11	0.11
น้ำกลั่น	2.51	2.51	2.51

ตอนที่ 2 ศึกษาพฤติกรรมการเกิดโฟม

การศึกษาพฤติกรรมการเกิดโฟม ซึ่งเป็นการติดตามระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนของการเกิดโฟมพอลิยูรีเทนตามมาตรฐาน ASTM D 2237 ตามลำดับดังนี้

ขั้นที่ 1 เวลาที่สารผสมเริ่มเกิดปฏิกิริยา (cream time) เป็นเวลาที่เริ่มเติม ไดไอโซไซยาเนต ผสมกับพอลิออลและองค์ประกอบต่างๆ (ตัวเร่งปฏิกิริยา ซิลิโคนและสารฟู) จนกระทั่งสังเกตเห็นการยกตัวหรือเปลี่ยนเป็นครีมขาว

ขั้นที่ 2 เวลาที่สารผสมเกิดเป็นเจล (gel time) เป็นระยะเวลาที่เริ่มการผลิตจนกระทั่งเมื่อนำแท่งแก้วไปสัมผัสผิวโฟมทำให้เกิดเป็นเส้นบาง ๆ

ขั้นที่ 3 เวลาที่โฟมฟุ้งสูงสุด (fully rise time) เป็นระยะเวลาที่เกิดฟุ้งตัวของโฟมจนกระทั่งโฟมฟุ้งเต็มที่

ขั้นที่ 4 เวลาที่ผิวโฟมไม่ติดวัสดุสัมผัส (tack free time) เป็นระยะเวลาที่เริ่มการผลิตจนกระทั่งผิวด้านนอกของโฟมแห้ง

ตอนที่ 3 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

1. หาคความหนาแน่นของโฟมพอลิยูรีเทนตามมาตรฐาน ASTM D 3574
2. ทดสอบความแข็ง (hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D 2240
3. ทดสอบความทนแรงอัดและมอดุลัสแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM D 1621

อภิปรายผลของสัดส่วนของสารตั้งต้นในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนต่อพฤติกรรมการเกิดโฟมและสมบัติความแข็งแรงความทนแรงอัดและมอดุลัสแรงอัด

เอกสารอ้างอิง

- Allsopp, M. W. (1981). The development and importance of suspension PVC morphology. *Pure and Applied Chemistry*, 53, 449–465.
- Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453–1477. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>
- Basavaraju, K. C. (2021). A New Composition of High Heat General Purpose Polystyrene (High Heat GPPS) Resin. *Academic Journal of Polymer Science*, 4(5), 555650. <https://doi.org/10.19080/ajop.2021.04.555650>
- Baugh, L. S., & Schulz, D. N. (2020). Discovery of Syndiotactic Polystyrene: Its Synthesis and Impact. *Macromolecules*, 53(10), 3627–3631. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c00350>
- Bensason, S., Minick, J., Moet, A., Chum, S., Hiltner, A., & Baer, E. (1996). Classification of Homogeneous Ethylene-Octene Copolymers Based on Comonomer Content. *Journal of Applied Polymer Science*, 34, 1301–1315.
- Bühl, R. (1999). Options for poly(vinyl chloride) feedstock recycling Results of research project on feedstock recycling processes. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 28(3), 131–135. <https://doi.org/10.1179/146580199101540231>
- Cha, J. (2006). Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Resin. In J. M. Margolis (Ed.), *Engineering Plastics Handbook* (p. 102). McGraw-Hill.

- Chum, P. S., & Swogger, K. W. (2008). Olefin polymer technologies-History and recent progress at The Dow Chemical Company. *Progress in Polymer Science*, 33(8), 797–819. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.003>
- Corradini, E., De Medeiros, E. S., Carvalho, A. J. F., Curvelo, A. A. S., & Mattoso, L. H. C. (2006). Mechanical and morphological characterization of starch/zein blends plasticized with glycerol. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(6), 4133–4139. <https://doi.org/10.1002/app.23570>
- Dang, K. M., & Yoksan, R. (2021). Thermoplastic starch blown films with improved mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 188, 290–299. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.027>
- Endo, K. (2002). Synthesis and structure of poly(vinyl chloride). *Progress in Polymer Science*, 27, 2021–2054. www.elsevier.com/locate/ppolysci
- González-Sánchez, C., Martínez-Aguirre, A., Pérez-García, B., Acosta, J., Fonseca-Valero, C., de la Orden, M. U., Sánchez, C., & Martínez Urreaga, J. (2016). Enhancement of mechanical properties of waste-sourced biocomposites through peroxide induced crosslinking. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 80, 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.032>
- Hicks, E. M., Ultee, A. J., & Drougas, J. (1965). Spandex elastic fibers. *Science*, 373–379.
- Honarkar, H. (2018). Waterborne polyurethanes: A review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39(4), 507–516. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1327818>
- Ignatyev, I. A., Thielemans, W., & Vander Beke, B. (2014). Recycling of polymers: A review. *ChemSusChem*, 7(6), 1579–1593. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300898>
- Ismail, S., Mansor, N., Majeed, Z., & Man, Z. (2016). Effect of water and [Emim][OAc] as plasticizer on gelatinization of starch. *Procedia Engineering*, 148, 524–529. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.542>
- Jabarin, S. A. (1982). Optical Properties of Thermally Crystallized Poly(ethylene terephthalate). *Polymer Engineering and Science*, 22(13), 815–821.
- Jin, X., Guo, N., You, Z., & Tan, Y. (2020). Design and performance of polyurethane elastomers composed with different soft segments. *Materials*, 13(21), 1–26. <https://doi.org/10.3390/ma13214991>

- Kaminsky, W. (2012). Discovery of Methylaluminoxane as Cocatalyst for Olefin Polymerization. *Macromolecules*, 45(8), 3289–3297.
<https://doi.org/10.1021/ma202453u>
- Kosmidis, V. A., Achilias, D. S., & Karayannidis, G. P. (2001). Poly(ethylene terephthalate) recycling and recovery of pure terephthalic acid. Kinetics of a phase transfer catalyzed alkaline hydrolysis. *Macromolecular Materials and Engineering*, 286, 640–647.
- Lee, A., & Deng, Y. (2015). Green polyurethane from lignin and soybean oil through non-isocyanate reactions. *European Polymer Journal*, 63, 67–73.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.023>
- Lugão, A. B., Artel, B. W. H., Yoshiga, A., Lima, L. F. C. P., Parra, D. F., Bueno, J. R., Liberman, S., Farrah, M., Terçariol, W. R., & Otaguro, H. (2007). Production of high melt strength polypropylene by gamma irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 76(11–12), 1691–1695.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.03.013>
- Madbouly, S. A., Xia, Y., & Kessler, M. R. (2013). Rheological behavior of environmentally friendly castor oil-based waterborne polyurethane dispersions. *Macromolecules*, 46(11), 4606–4616. <https://doi.org/10.1021/ma400200y>
- McGonigle, E.-A., Liggat, J. J., Pethrick, R. A., Jenkins, S. D., Daly, J. H., & Hayward, D. (2004). Permeability of N₂, Ar, He O₂ and CO₂ through oriented polyester films—dependence on free volume. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42(15), 2916–2929. <https://doi.org/10.1002/polb.20141>
- Nießner, N. (2002). ABS and styrene copolymers—an overview. *E-Polymers*, 003, 1–10.
<http://www.e-polymers.org>
- Patri, M., Rath, S. K., & Suryavansi, U. G. (2006). A novel polyurethane sealant based on hydroxy-terminated polybutadiene. *Journal of Applied Polymer Science*, 99(3), 884–890. <https://doi.org/10.1002/app.22815>
- Paxton, N. C., Allenby, M. C., Lewis, P. M., & Woodruff, M. A. (2019). Biomedical applications of polyethylene. *European Polymer Journal*, 118, 412–428.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.05.037>
- Phetphaisit, C. W., Bumee, R., Namahoot, J., Ruamcharoen, J., & Ruamcharoen, P. (2013). Polyurethane polyester elastomer: Innovative environmental friendly wood

- adhesive from modified PETs and hydroxyl liquid natural rubber polyols.
International Journal of Adhesion and Adhesives, 41, 127–131.
- Phetphaisit, C. W., Namahoot, J., Saengkiattiyut, K., Ruamcharoen, J., & Ruamcharoen, P. (2015). Green metal organic coating from recycled PETs and modified natural rubber for the automobile industry. *Progress in Organic Coatings*, 86, 181–189.
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.04.025>
- Qiao, X., Tang, Z., & Sun, K. (2011). Plasticization of corn starch by polyol mixtures. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 659–664.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.035>
- Rajput, S. D., Hundiware, D. G., Mahulikar, P. P., & Gite, V. V. (2014). Fatty acids based transparent polyurethane films and coatings. *Progress in Organic Coatings*, 77(9), 1360–1368. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.04.030>
- Rokicki, G., & Piotrowska, A. (2022). A new route to polyurethanes from ethylene carbonate, diamines and diols. *Polymer*, 43, 2927–2935.
www.elsevier.com/locate/polymer
- Ruamcharoen, J., Munlee, R., & Ruamcharoen, P. (2020). Improvement of water vapor barrier and mechanical properties of sago starch-kaolinite nanocomposites. *Polymer Composites*, 41(1), 201–209. <https://doi.org/10.1002/pc.25360>
- Ruamcharoen, P., Phetphaisit, C. W., Bumee, R., Ruamcharoen, J., Niyomdech, B., & Nillawat, S. (2012). The chemical modification of waste PET and its application for a wood-polymer composite binder. *Advanced Materials Research*, 488–489, 648–653. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.648>
- Saeki, Y., & Emura, T. (2002). Technical progresses for PVC production. *Progress in Polymer Science*, 27, 2055–2131. www.elsevier.com/locate/ppolysci
- Saetung, A., Rungvichaniwat, A., Campistron, I., Klinpituksa, P., Laguerre, A., Phinyocheep, P., & Pilard, J. (2010). Controlled degradation of natural rubber and modification of the obtained telechelic oligoisoprenes: Primary study of their potentiality as polyurethane foam precursors. *Journal of Applied Polymer Science*, 117, 1279–1289.
- Salem, D. R. (1998). Microstructure development during constant-force drawing of poly(ethylene terephthalate) film
 1An abbreviated version of this paper was presented at the SPE Annual Technical Conference, 6–10 May 1996, Indianapolis,

- Indiana, USA.1. *Polymer*, 39(26), 7067–7077. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00109-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00109-8)
- Tan, S., Abraham, T., Ference, D., & Macosko, C. W. (2011). Rigid polyurethane foams from a soybean oil-based Polyol. *Polymer*, 52(13), 2840–2846. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.04.040>
- Tanaka, R., Hirose, S., & Hatakeyama, H. (2008). Preparation and characterization of polyurethane foams using a palm oil-based polyol. *Bioresource Technology*, 99(9), 3810–3816. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.07.007>
- Tang, H., Dai, W., & Chen, B. (2008). A new method for producing high melt strength polypropylene with reactive extrusion. *Polymer Engineering and Science*, 48(7), 1339–1344. <https://doi.org/10.1002/pen.21105>
- Thunwall, M., Kuthanová, V., Boldizar, A., & Rigdahl, M. (2008). Film blowing of thermoplastic starch. *Carbohydrate Polymers*, 71(4), 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.07.001>
- Tomisawa, R., Ikaga, T., Kim, K. H., Ohkoshi, Y., Okada, K., Masunaga, H., Kanaya, T., Masuda, M., & Maeda, Y. (2017). Effect of melt spinning conditions on the fiber structure development of polyethylene terephthalate. *Polymer*, 116, 367–377. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.12.077>
- Van Belle, A. V., Demets, R., Mys, N., Van Kets, K. V., Dewulf, J., Van Geem, K. V., De Meester, S. D., & Ragaert, K. (2020). Microstructural contributions of different polyolefins to the deformation mechanisms of their binary blends. *Polymers*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/POLYM12051171>
- Wu, C. H., Chang, C. Y., Cheng, C. M., & Huang, H. C. (2003). Glycolysis of waste flexible polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*, 80(1), 103–111. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00390-7](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00390-7)
- Wu, C. H., Chang, C. Y., & Li, J. K. (2002). Glycolysis of rigid polyurethane from waste refrigerators. *Polymer Degradation and Stability*, 75(3), 413–421. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00237-3](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00237-3)
- Zeigler, K., & Gellert, H. G. (1953). *Polymerization of ethylene* (Patent US Patent 2699457).

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 4

การอัดรีดพอลิเมอร์และการพิมพ์สามมิติ

จำนวนชั่วโมงที่สอน 10 ชั่วโมง

สัปดาห์ที่ 12-13

หัวข้อเนื้อหา

1. การอัดรีดพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดียว
2. การรีดแผ่นพอลิเมอร์
3. การเป่าฟิล์ม
4. การอัดรีดโฟรไฟล์และท่อ
5. การอัดรีดหุ้มลวด
6. การอัดรีดเส้นใย
7. การพิมพ์สามมิติ

คำสำคัญ

1. การอัดรีดพอลิเมอร์
2. เครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดียว
3. ดาย
4. อุปกรณ์หลังการอัดรีด
5. การพิมพ์สามมิติ

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อผู้เรียนศึกษาบทเรียนนี้แล้วสามารถ

1. อธิบายกระบวนการอัดรีดพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้
2. อธิบายผลของกระบวนการอัดรีดต่อสัณฐานวิทยา และสมบัติของพอลิเมอร์ได้
3. เลือกใช้กระบวนการอัดรีดที่เหมาะสมสำหรับทำผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์แต่ละชนิดได้
4. มีทักษะและความรับผิดชอบในการฝึกปฏิบัติการ

การวัดผลและการประเมินผล

1. ประเมินผลจากการสังเกตพฤติกรรมการรับฟังการบรรยาย การร่วมอภิปราย และการซักถามระหว่างเรียน
2. ประเมินจากการตอบคำถามท้ายบทและการสอบข้อเขียน

3. ประเมินจากการฝึกปฏิบัติการและรายงานปฏิบัติการ

สื่อประกอบการสอน

1. เอกสารคำสอนรายวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
2. สื่อมัลติมีเดียและหนังสือที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีพอลิเมอร์
3. วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการฝึกปฏิบัติการ

บทที่ 4

การอัดรีดพอลิเมอร์และการพิมพ์สามมิติ

จากเนื้อหาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าจุดประสงค์หลักของการใช้งานเครื่องอัดรีดพอลิเมอร์ชนิดสกรูเดียวคือเพื่อการหลอมและขึ้นรูป ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้เริ่มต้นจากทฤษฎีพื้นฐานการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดียวเพื่อให้ผู้ศึกษาเข้าใจหลักการที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอัดรีดรวมทั้งปัญหาที่มักเกิดระหว่างกระบวนการอัดรีด จากนั้นเป็นเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปโดยอาศัยกระบวนการอัดรีด (extrusion based processes) แต่ละกระบวนการ ตัวอย่างกระบวนการเหล่านี้ ได้แก่ การรีดแผ่นพอลิเมอร์ กระบวนการเป่าฟิล์ม กระบวนการทำโพรไฟล์และท่อ กระบวนการอัดรีดหุ้มลวด กระบวนการอัดรีดเส้นใย การขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติ

การอัดรีดพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดียว

ทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับศึกษาการอัดรีดพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดียวคือ การวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์หลอม ซึ่งทำให้ผู้ศึกษาทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการไหลของพอลิเมอร์หลอม ตลอดจนปัญหาที่เกิดขึ้น แสดงได้ดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์หลอมในเครื่องอัดรีด

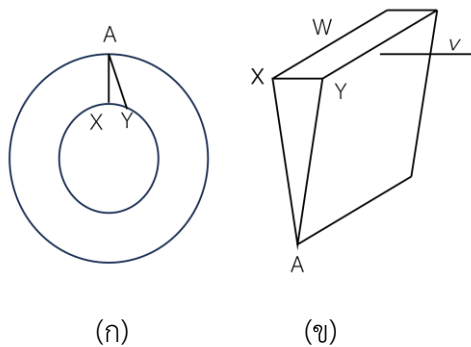
การวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์หลอมในเครื่องอัดรีดนั้น มีขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วงส่งพอลิเมอร์หลอม (metering zone) ด้วยสมการคณิตศาสตร์ที่มีข้ออนุโลม (approximation) ให้พอลิเมอร์หลอมมีความหนืดคงที่แบบของเหลว

นิวโทเนียน (Newtonian fluid) การไหลของพอลิเมอร์นั้นเป็นกระบวนการแบบอุณหภูมิคงที่ (isothermal) ในเครื่องอัดรีดที่มีสกรูที่แสดงในรูปที่ 3.11 นิยามโดยร่อง สกรูที่มีความกว้าง (W) มากกว่าลึก (H) และความลึกและความกว้างของสันเกลียวสกรู (screw pitch) มีขนาดคงที่ ในเอกสารคำสอนนี้ได้เรียบเรียงให้ง่ายเพื่อความเข้าใจระดับพื้นฐาน อย่างไรก็ตามผู้ศึกษาสามารถศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมจากหนังสือเกี่ยวกับการอัดรีดขั้นสูงได้ (Tadmor & Klevin, 1978; Tadmor & Gogos, 2006)

การไหลในช่วงส่งพอลิเมอร์หลอมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือการไหลแบบลาก (drag flow, Q_D) ซึ่งเกิดจากการหมุนของสกรูในกระบอกเทียบได้กับการไหลของของเหลวหนืดระหว่าง 2 ระบายที่ขนานกัน (parallel plate) โดยระบายหนึ่งอยู่กับที่ขณะที่อีกระบาย

เคลื่อนที่ ประเภทที่ 2 คือ (pressure flow, Q_p) เกิดจากการต่อตายหรือ breaker plate ที่ปลาย metering zone ทำให้ขบวนการไหลของพอลิเมอร์ไหลผ่านตาย นอกจากนั้น ช่องว่างเล็ก ๆ (clearance) ระหว่างสันเกลียวสกรูและกระบอกสกรูทำให้พอลิเมอร์ไหลย้อนกลับ (leakage flow, Q_L) และส่งผลให้ปริมาณการไหลรวมลดลงได้

1.1 การไหลแบบลาก (Drag flow, Q_D) เป็นการไหลของพอลิเมอร์ไหลจากการหมุนของสกรูในกระบอกสกรูเครื่องอัดรีด



รูปที่ 4.1 การไหลของพอลิเมอร์ไหลในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว:

(ก) ผลจากการบิดของแกนสกรู (ข) การไหลแบบลาก

ที่มา: (Brydson, 1981)

การไหลของพอลิเมอร์ไหลในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยรูปที่ 4.1(ก) เป็นหน้าตัดของสกรูที่หมุนในกระบอกสกรูซึ่งอยู่หนึ่งกับที่มีพอลิเมอร์เหลวก้นกลาง ก่อนการหมุนของเหลวอยู่ในแนวตั้ง (AX) เมื่อสกรูเริ่มหมุน ทำให้เกิดการไหลแบบลากเนื่องพอลิเมอร์ไหลไปในทิศทาง AY ด้วยความเร็ว v ทำให้เกิดแรงเฉือนรอบสกรู ขณะเดียวกันหากทำให้สกรูอยู่นิ่งแล้วกระบอกสกรูแทนก็จะได้ผลลัพธ์เท่ากัน

ค่าเฉลี่ยรวมของปริมาตรพอลิเมอร์ที่ไหลไปข้างหน้าเนื่องจากแรงเฉือนมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของปริมาตรพอลิเมอร์ไหลที่กำลังเคลื่อนที่ในร่องสกรูด้วยความเร็ว v ผ่านร่องสกรูที่มีความลึกเท่ากับ H ความกว้างของร่องสกรูที่ตั้งฉากกับเกลียวสกรูเท่ากับ w ดังรูปที่ 4.2(ข) ซึ่งเรียกว่าการไหลแบบลาก

$$Q_D = \frac{1}{2} vHW \quad (4.1)$$

โดยที่

$$v = \frac{\pi ND \cos \phi}{60} \quad (4.2)$$

D = เส้นผ่าศูนย์กลางสกรู

N = ความเร็วสกรู

ϕ = มุมเกลียว

$$W = \pi D \sin \phi - c \text{ หรือ } \pi D \tan \phi \cos \phi - c \quad (4.3)$$

แทนค่าตัวแปร v และ W ในสมการ (4.1) ได้เป็นสูตรสำเร็จดังต่อไปนี้

$$Q_D = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi \quad (4.4)$$

สมการ (4.4) ใช้ในการคำนวณ Q_D ของเครื่องอัดรีดที่ไม่ต่อตาย (open discharged extruder) หากมุม ϕ เท่ากับ 0 หมายถึง screw flight ตั้งฉากกับแนวระนาบ ทำให้ค่า $\sin \phi$ เท่ากับ 0 ซึ่งทำให้ทั้งพจน์เท่ากับ 0 คือไม่มี Q_D เกิดขึ้น

1.2 การไหลย้อนกลับเมื่อต่อตาย (pressure flow, Q_P) การต่อตายหรือ breaker plate ที่ปลายช่วงจ่ายพอลิเมอร์หลอม (metering zone) ทำให้เกิดการขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมผ่านตาย และเกิด pressure flow ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับ Q_D

$$Q_P = \frac{WH^3}{12\eta} \frac{dP}{dL} \quad (4.5)$$

η = ความหนืดของพอลิเมอร์หลอม

$\frac{dP}{dL}$ = gradient ของความดัน

หาก P เปลี่ยนแปลงตามระยะ L ในลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงส่งผลให้ $\frac{dP}{dL} = \frac{P}{L}$ และทำให้

$$Q_P = \frac{\pi DH^3 \sin^2 \phi}{12\eta} \quad (4.6)$$

เนื่องจากเกิดความดันสูงเมื่อต่อตายทำให้เกิดการไหลย้อนกลับซึ่งส่งผลให้ output ลดลง

1.3 การไหลย้อนกลับ (leakage flow, Q_L) พอลิเมอร์หลอมบางส่วนเกิดการไหลย้อนกลับผ่าน clearance สกรู การไหลชนิดนี้ขึ้นกับความแตกต่างของความดันที่ผ่าน clearance ซึ่งเท่ากับ ΔP

$$Q_L = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3}{12\eta e} \tan \phi \frac{dP}{dL} \quad (4.7)$$

1.4 การไหลรวม (total flow, Q_T) เกิดจาก Q_D Q_P และ Q_L

$$Q_T = Q_D - Q_P - Q_L \quad (4.8)$$

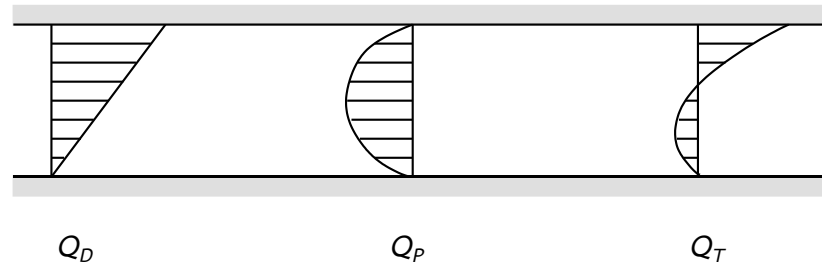
แทนค่า Q_D Q_P และ Q_L .

$$Q_T = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi DH^3 P \sin^2 \phi}{12\eta L} - \frac{\pi D^2 \delta^3}{12\eta e} \tan \phi \frac{dP}{dL} \quad (4.9)$$

หากใช้สกรูที่ยังไม่มีการสึกหรอมาก ไม่ต้องคำนึงถึงพจน์สุดท้าย ส่งผลให้ Q_T เป็นดังสมการ (4.10)

$$Q_T = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3 P \sin^2 \phi}{12 \eta L} \quad (4.10)$$

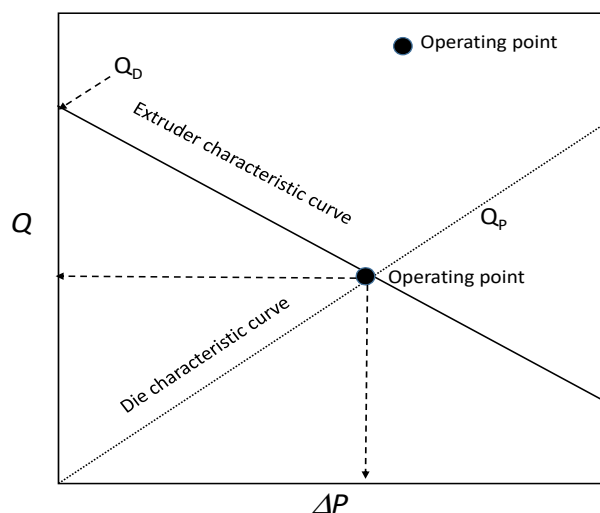
เพื่อสร้างความเข้าใจให้มากขึ้น รูปที่ 4.2 จำลองการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์หลอมในเครื่องอัดรีด แผ่นระบายบนแทนผนังกระบอกสกรู แผ่นระบายล่างแทนผิวสกรู เมื่อสกรูเกิดการหมุนทำให้พอลิเมอร์หลอมได้รับแรงเฉือนและไหลแบบลาก ไปด้านขวามือ ขณะเดียวกัน เมื่อต่อตาย ก็เกิดการไหลย้อนกลับเมื่อผนวกการไหลทั้งสองด้วยกันก็จะได้รูปจำลองการไหลดังรูปด้านขวามือสุด



รูปที่ 4.2 รูปจำลองการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์หลอมในเครื่องอัดรีด

2. ลักษณะของการอัดรีด

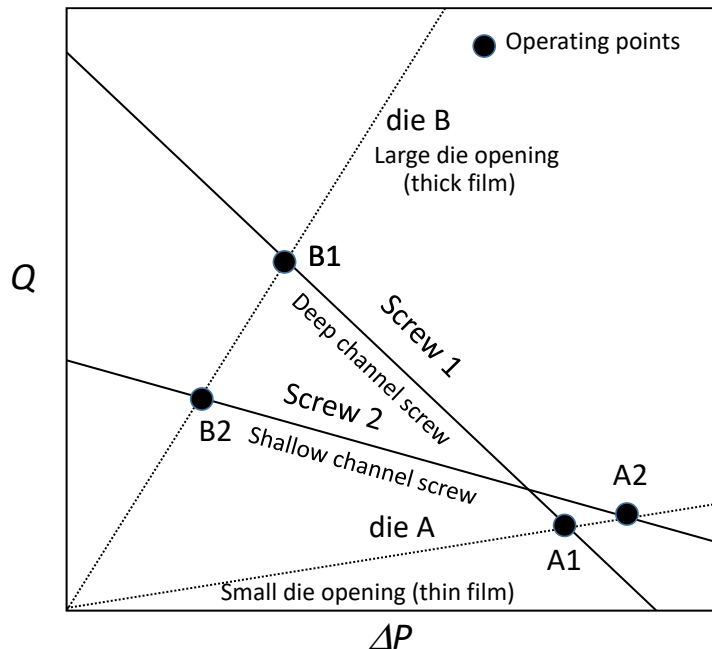
จากการวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์หลอมในเครื่องอัดรีดข้างต้น นำไปสู่การสร้างกราฟคุณลักษณะของการอัดรีด (extrusion performance characteristics) ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ΔP กับ Q หรือปริมาณการอัดรีด จากเส้น extruder characteristic curve เมื่อ ΔP เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการอัดรีดลดลง แต่เมื่อมีการต่อตาย เมื่อ ΔP เพิ่มขึ้นส่งผลให้ Q_P เพิ่มขึ้น ดังเส้น die characteristic curve จุดตัดที่เกิดขึ้นจากทั้งสองเส้นคือจุดเหมาะสมสำหรับการทำงาน (operating point)



รูปที่ 4.3 ลักษณะของการอัดรีด

ที่มา: (Osswald, 1998)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ระหว่าง ΔP กับ Q สามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการอัดรีดได้ แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.4 สกรูชนิดที่ 1 มีเกลียวลึก (H สูง) ซึ่งส่งผลให้มีการไหลแบบลากสูงกว่าสกรูที่ 2

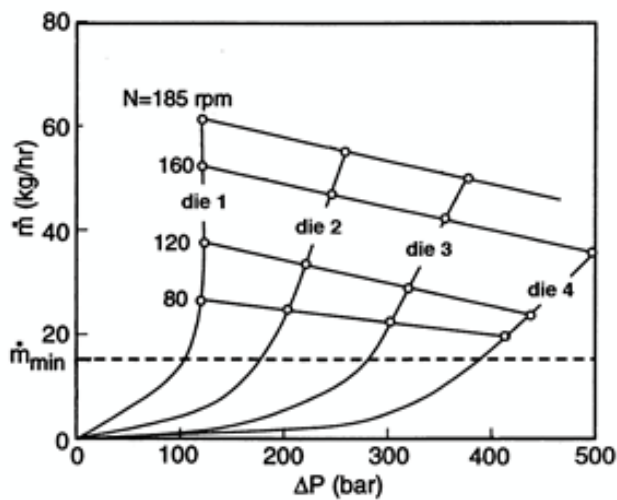


รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของการอัดรีดของสกรูและตาย

ที่มา: (Dealy & Wissbrun, 1990)

จากนั้นพิจารณาว่า สกรูทั้งสองนี้จะให้ปริมาณการอัดรีดอย่างไรเมื่อต่อกับตาย 2 ชนิด คือ ตาย A (die A) และ ตาย B (die B) จะเห็นได้ว่าตาย A ชั้้นน้อยกว่าตาย B แปลว่า ตาย A มีการต้านการไหลที่มากกว่าตาย B ดังนั้นจุดเหมาะสมสำหรับการทำงาน (แสดงดังจุด A1 และ A2) พบว่า A1 ให้ปริมาณการอัดรีดต่ำกว่า A2 แม้ว่า ความสามารถในการเกิดการไหลแบบลากของ สกรู 1 มากกว่า สกรู 2 ในทางกลับกัน หากพิจารณาสกรูทั้งสองกับตาย B ซึ่งชันกว่าเพราะให้ความต้านทานต่อการไหลน้อยกว่า ทำให้ปริมาณการอัดรีดของสกรู 1 มากกว่าสกรู 2

กรณีการไหลแบบนอนนิวโทเนียน (Non-Newtonian fluid) เป็นกรณีที่ได้ตามสภาพจริง ความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ไม่คงที่ ขึ้นกับอัตราการเฉือน และส่งผลต่อความดันและ Q_D ด้วยโดยแสดงดังรูปที่ 4.5

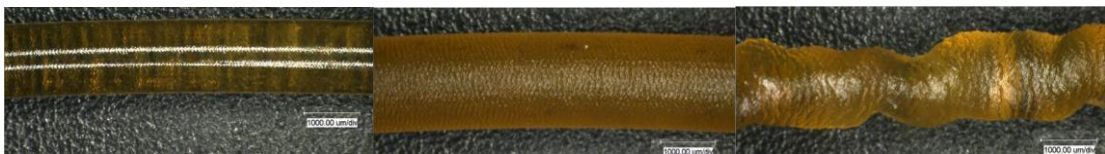


รูปที่ 4.5 ลักษณะของการอัดรีดของสกรูและตายกรณีการไหลแบบนอนนิวโทเนียน

ที่มา: (Dealy & Wissbrun, 1990)

3. ปัญหาผลิตภัณฑ์ของการอัดรีดที่มักพบ

ระหว่างที่พอลิเมอร์หลอมได้รับแรงกระทำจากการหมุนของสกรูภายในเครื่องอัดรีด พอลิเมอร์หลอมมักเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดจากเดิมทั้งแบบที่ไม่สามารถคืนกลับรูปร่างเดิมได้ ที่เรียกว่าการเสียรูปแบบถาวร (plastic deformation) และแบบที่คืนกลับสู่สภาพเดิมหรือที่เรียกว่าการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) แบบหลังนี้สามารถสะสมพลังงานไว้ได้ พลังงานที่สะสมไว้สามารถปลดปล่อยได้ เมื่อปล่อยแรงกระทำนั้นหลังจากที่พอลิเมอร์ไหลพ้นตาย การเสียรูปแบบยืดหยุ่นนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและรูปร่างของชิ้นงานขึ้นกับอัตราการเฉือน (หรือความเร็วรอบของสกรู) ได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ การบวมตัวของพอลิเมอร์หลอม การเกิดรอยฟั่นฉลามบนผิวผลิตภัณฑ์ การบิดเบี้ยวของรูปทรงผลิตภัณฑ์ ลักษณะผลิตภัณฑ์ดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีปัญหา: (ก) การบวมตัวของพอลิเมอร์หลอม (ข) การเกิดรอยฟั่นฉลามบนผิวผลิตภัณฑ์ (ค) การบิดเบี้ยวของรูปทรงผลิตภัณฑ์

ที่มา: (Dealy & Wissbrun, 1990)

การบวมตัวของพอลิเมอร์หลอม (die swell) เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่พบในกระบวนการอัดรีด ปรากฏการณ์นี้มักพบว่าพื้นที่หน้าตัดของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์มากกว่าขนาดของช่องเปิดของตาย (die orifice) สาเหตุเกิดจากพอลิเมอร์หลอมที่อยู่ในเครื่องอัดรีดก่อนเข้าตายมีโครงสร้าง (conformation) แบบ

ขดกันเป็นกลุ่ม (random coiling) เมื่อโมเลกุลพอลิเมอร์ถูกบังคับให้ไหลผ่านดายซึ่งมีขนาดแคบลง ทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัว (orientation) ของโซ่พอลิเมอร์ขณะผ่านดาย และเมื่อไหลออกจากดายแล้วโมเลกุลจะมี conformation แบบแบบขดกันเป็นกลุ่มอีกครั้ง การแก้ปัญหาอาจทำได้โดยเพิ่มความยาวของดาย เพิ่มอุณหภูมิ หรือลดอัตราเร็วการอัดรีดลง

รอยฟืนปลาฉลาม (sharkskin) เป็น defect อีกแบบหนึ่งที่สังเกตเห็นเป็นร่องคลื่น (ridge) ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล รอยฟืนปลาฉลามเกิดขึ้นจากผลของการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมที่รุนแรงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิของดายจะช่วยลดปัญหานี้ได้

การบิดเบี้ยวของรูปทรงผลิตภัณฑ์ (melt fracture) เกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์ไหลออกจากดายด้วยอัตราการไหลที่สูงกว่ากรณีเกิดการบวมตัวและรอยฟืนปลาฉลาม ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบลามินาร์ (laminar flow) ไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence flow) ทำให้ลักษณะรูปทรงผลิตภัณฑ์บิดเบี้ยว กรณีนี้แก้ไขโดยการลดอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมจากดายลง

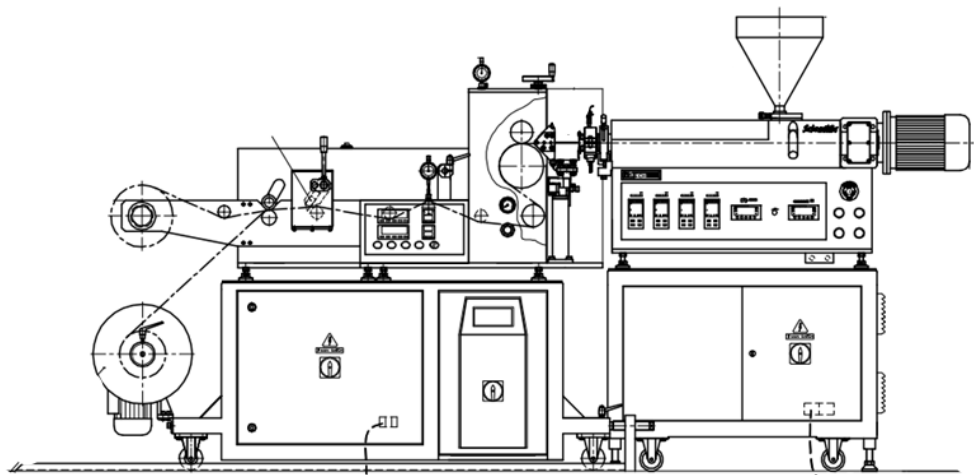
การรีดแผ่นพอลิเมอร์

การรีดแผ่นพอลิเมอร์แบบชั้นเดียว กระบวนการรีดแผ่นพอลิเมอร์เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตแผ่นพอลิเมอร์โดยการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมโดยเครื่องอัดรีดพอลิเมอร์ผ่านดายที่มีลักษณะเป็นช่องเปิดรูสี่เหลี่ยม ทำให้พอลิเมอร์หลอมที่ออกจากดายอย่างต่อเนื่องมีลักษณะแผ่นแบน จากนั้นลำเลียงแผ่นพอลิเมอร์ไปม้วนเก็บ

ก่อนการม้วนเก็บอาจผ่านกระบวนการอื่น ๆ เช่น การเล็มขอบ การปรับปรุงผิวฟิล์ม เพื่อให้เหมาะสมกับการพิมพ์หรือการเคลือบต่อไป รายละเอียดของเครื่องจักรที่ใช้รวมถึงส่วนประกอบที่สำคัญแสดงดังต่อไปนี้

1. เครื่องรีดแผ่นพอลิเมอร์และกระบวนการรีดแผ่นพอลิเมอร์

เครื่องรีดแผ่นพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.7 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องรีดแผ่นพอลิเมอร์ ได้แก่ ดายซึ่งต่อกับเครื่องอัดรีด และอุปกรณ์หลังการอัดรีดแผ่นพอลิเมอร์

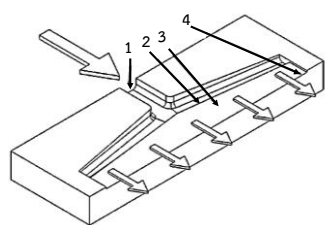


รูปที่ 4.7 เครื่องรีดแผ่นพอลิเมอร์

ที่มา: (แล็บเทค เอนจิเนียริง จำกัด)

1.1 ดาย แสดงดังรูปที่ 4.8 ส่วนประกอบของดายประกอบด้วย ทางเข้าของพอลิเมอร์ หลอมจากเครื่องอัดรีด (1) เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมไหลออกจากกระบอกสกรูของเครื่องอัดรีดมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก และปากดายมีลักษณะเป็นช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการผลิตต้องทำให้พอลิเมอร์หลอมที่ไหลเข้าดายทางช่องทางเข้าเกิดการแผ่กระจายออกเป็นแผ่นบางเต็มช่วงกว้างของดาย ร่องทางไหลของพอลิเมอร์เหลว (manifold) (2) และ island (3) ช่วยทำให้เกิดการกระจายของพอลิเมอร์หลอมเท่ากันจากทางเข้าดาย และปากดาย (4)

ร่องทางไหลของพอลิเมอร์หลอม มีความยาว (land length) และรูปทรงเรขาคณิตที่เหมาะสม ลักษณะร่องอาจเป็นร่องครึ่งวงกลมหรือทรงเหลี่ยมเพื่อให้มีการไหลของพอลิเมอร์หลอมกระจายที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในดาย การกระจายของพอลิเมอร์หลอมดังกล่าวทำให้ความเร็วของการไหลของพอลิเมอร์หลอมที่ปากทางออกดายคงที่ตลอดหน้ากว้างของดาย ส่งผลให้การบิดตัวของโซโมเลกุลพอลิเมอร์หลอมมีค่าใกล้เคียงกันทั่วแผ่นพอลิเมอร์ ส่งผลให้ได้แผ่นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลดี และมีสมบัติคล้ายกันตลอดทั้งแผ่น

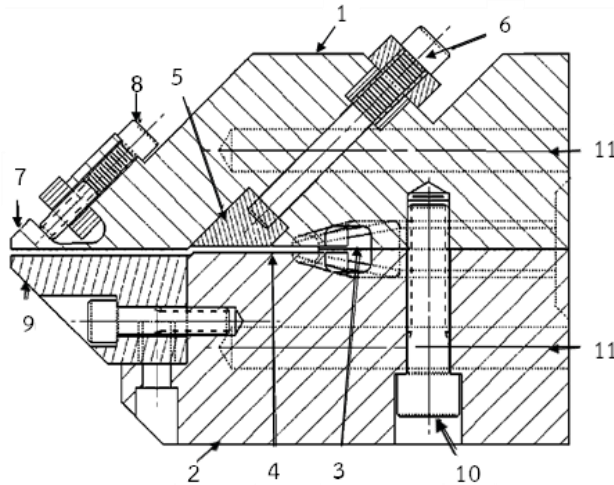


รูปที่ 4.8 ร่องทางไหลของดาย

ที่มา: (Kostic & Reifschneider, 2006)

ส่วนประกอบของดายสำหรับรีดแผ่นพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยประกอบด้วยแผ่นดาย ด้านบน (1) แผ่นดายด้านล่าง (2) ร่องทางไหลของเหลว (3) island (4) ตัวปรับความหนาของปากดาย (5)

น็อตตัวปรับความหนา (6) ปากตายและชุดปรับปากตาย (7)-(9) ชุดยึดตาย (10) แท่งให้ความร้อน (11)



รูปที่ 4.9 ส่วนประกอบของตายสำหรับรีดแผ่นพอลิเมอร์

ที่มา: (Kostic & Reifschneider, 2006)

1.2 อุปกรณ์ประกอบหลังการอัดรีดแผ่นพอลิเมอร์ อุปกรณ์ประกอบที่สำคัญแสดงดังรูปที่ 4.10 ได้แก่ ลูกกลิ้งเย็น (chill roll stack) (1) ซึ่งเป็นลูกกลิ้งขัดมันชุบโครเมียมเรียงเป็นชั้นทำหน้าที่กดรีดแผ่นพอลิเมอร์หลอมที่ออกจากตายและให้ความเย็นกับแผ่นพอลิเมอร์ที่รีดออกมา ทำให้ได้แผ่นพอลิเมอร์เรียบ ลูกกลิ้งวางลำเลียง (guide roll หรือ conveyer roller) (2) เพื่อลำเลียงแผ่นพอลิเมอร์จากลูกกลิ้งเย็น ลูกกลิ้งหนีบ (haul off roll) (3) ทำหน้าที่ดึงแผ่นพอลิเมอร์ด้วยอัตราเร็วที่ปรับได้และมีลูกกลิ้งม้วนเก็บ (wind-up unit) (4) สำหรับม้วนเก็บแผ่นพอลิเมอร์ที่ผลิตได้



รูปที่ 4.10 อุปกรณ์ประกอบหลังการอัดรีดแผ่นพอลิเมอร์

2. ผลิตภัณฑ์จากการรีดแผ่นและชนิดของพอลิเมอร์

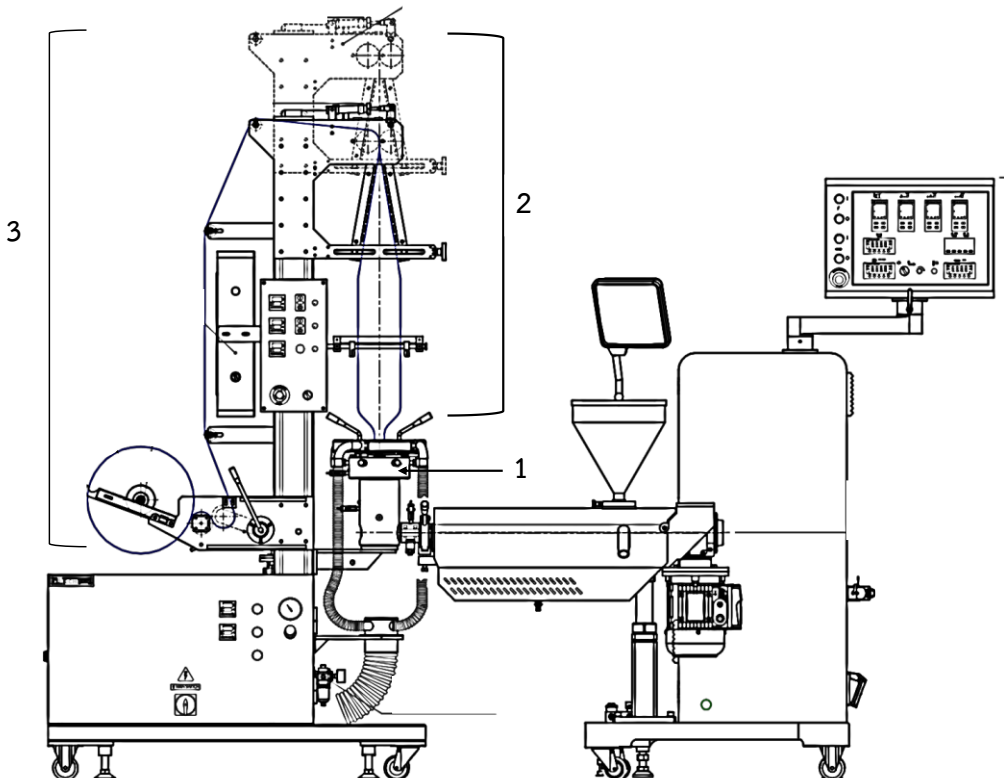
พอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากการอัดรีดแผ่นพอลิเมอร์ ได้แก่ ฉลากห่อ แผ่นสติ๊กเกอร์ เส้นน้ำมัน

การเป่าฟิล์ม

การเป่าฟิล์มเริ่มจากการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมผ่านดายที่มีหน้าช่องเปิดเป็นวงแหวนทำให้พอลิเมอร์ไหลออกมาอย่างต่อเนื่องเป็นหลอดทรงกระบอก ซึ่งต่อมาหลอดดังกล่าวจะถูกดึงขึ้นและถูกเป่าให้พองออกเป็นฟิล์มลูกโป่ง (bubble) ทรงกระบอกตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการ

1. เครื่องเป่าฟิล์มและกระบวนการเป่าฟิล์ม

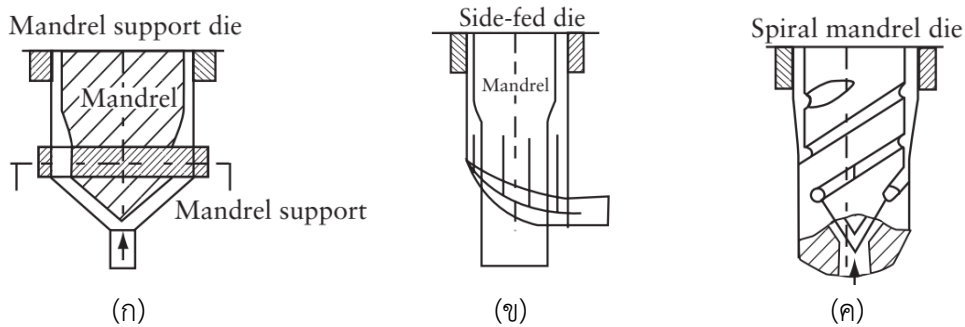
จากลักษณะของกระบวนการเป่าฟิล์มข้างต้น เครื่องเป่าฟิล์มมีลักษณะดังรูปที่ 4.11 ประกอบด้วยเครื่องอัดรีด และส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ ดาย (1) ชุดหล่อเย็นลูกโป่ง (2) และอุปกรณ์ดึงและม้วนฟิล์ม (3) แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.11 รูปวาดแสดงเครื่องเป่าฟิล์ม

ที่มา: (แล็บเทค เอนจิเนียริง จำกัด)

1.1 ดาย (die) เป็นดายวงแหวน มี 3 แบบ ได้แก่ ดายแบบขาแมงมุม ดายป้อนเข้าด้านข้าง และดายแบบเกลียวแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ดายเครื่องเป่าฟิล์ม: (ก) แบบขาแมงมุม (ข) แบบเข้าด้านข้าง (ค) แบบเกลียว

ที่มา: (Vlachopoulos et al., 2012)

ดายแบบขาแมงมุม (*spider leg die*) ดายประเภทนี้มีลักษณะดังรูปที่ 4.12 (ก) มีลักษณะสำคัญคือ มีขาแมงมุมยึด mandrel ไว้กับผนังดาย ทำให้เมื่อพอลิเมอร์หลอมไหลผ่าน mandrel support จะเกิดเส้นเชื่อมต่อ (*weld line*) ตรงตำแหน่งของขาแมงมุม นิยมใช้กับการผลิตฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ และฟิล์มที่ค่อนข้างไวต่อความร้อน หรือพอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง เป็นต้น

ดายแบบเข้าด้านข้าง (*side-fed die*) (รูปที่ 4.12 (ข)) เป็นดายที่พอลิเมอร์หลอมไหลเข้าด้านข้าง โดยไหลไปกระทบแกน แล้วไหลบรรจบกัน ข้อเสียของดายแบบนี้คือจะมีรอยต่อเกิดขึ้นที่ฟิล์มผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นจุดอ่อนง่ายต่อการฉีกขาดของฟิล์ม ปัจจุบันไม่นิยมใช้

ดายแบบเกลียว (*spiral die*) (รูปที่ 4.12 (ค)) เป็นดายมีแกน (*mandrel*) ที่ยึดไว้กับดายส่วนนอก ผิวของของแกนดายมีร่อง (*manifold*) เป็นจำนวนมากวนรอบแกน ตรงทางเข้าดายร่องมีความลึกมากที่สุด และความลึกจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงทางออกซึ่งจะมีร่องตื้นที่สุด ระบบไหลเวียนที่เกิดขึ้นทำให้พอลิเมอร์หลอมในแต่ละร่องสามารถเชื่อมกันได้ดีสนิท ดายประเภทนี้ให้ความแตกต่างของความดันที่สม่ำเสมอ ช่วงอุณหภูมิสม่ำเสมอ เหมาะสำหรับพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำถึงปานกลาง ไม่เหมาะกับพอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง

1.2 ชุดหล่อเย็น มี 2 ชุดคือ ชุดหล่อเย็นภายนอกและภายในฟิล์มลูกโป่ง การหล่อเย็นภายนอกฟิล์มโดยปกติใช้แหวนหล่อเย็นช่วยเป่ากระจายลมรอบลูกโป่งอย่างสม่ำเสมอและลมยังช่วยประคองลูกโป่งไม่แกว่งหรือสั่น สำหรับการหล่อเย็นภายในลูกโป่งเป็นการส่งลมเข้าไปในลูกโป่ง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนลมเป่าภายในลูกโป่งและส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศภายในลูกโป่งเย็นลง โดยหลักการนี้ทำให้ผลผลิตสูงขึ้นกว่าการหล่อเย็นภายนอกอย่างเดียว 30-50%

1.3 อุปกรณ์ดึงฟิล์มและม้วนฟิล์ม ได้แก่ กรอบบีบลูกโป่ง และลูกกลิ้งบีบลูกโป่ง กรอบบีบลูกโป่งมีลักษณะเป็นแผง ทำมุมเอียงคล้ายลิ้ม สามารถปรับมุมได้ตามต้องการ ส่วนใหญ่จะทำจากไม้ผิวเรียบหรือลูกกลิ้งเล็ก ๆ หมุนได้อย่างอิสระ ส่วนลูกกลิ้งบีบลูกโป่ง ส่วนใหญ่ใช้เหล็กหุ้มยางแข็งและต้องสามารถปรับแรงบีบได้ ดังรูปที่ 4.13 (ก) ทำหน้าที่ดึงแผ่นฟิล์มโดยมีอัตราดึงที่เหมาะสมและสอดคล้องกับ

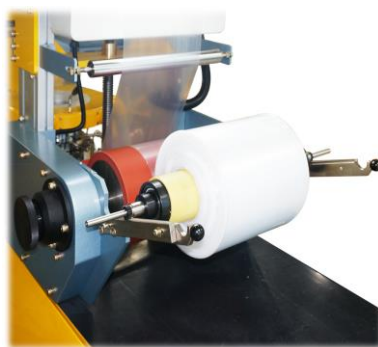
ขนาดของลูกโป่งและอัตราเร็วของสกรู ทำให้ฟิล์มจากลูกกลิ้งบีบลูกโป่งสามารถพันลงบนแกนม้วนดังรูปที่ 4.13 (ข) แล้วหมุนเก็บอย่างต่อเนื่องได้จนได้เป็นม้วนฟิล์มดังรูปที่ 4.13 (ค)



(ก)



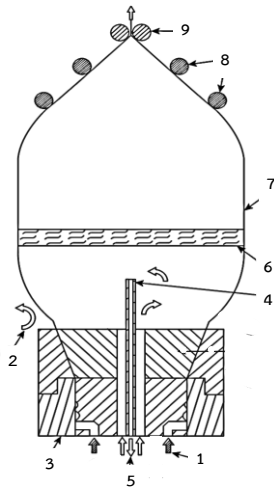
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.13 อุปกรณ์ดึงฟิล์มและม้วนฟิล์ม: (ก) อุปกรณ์ดึงฟิล์ม (ข) อุปกรณ์ม้วนฟิล์ม (ค) ม้วนฟิล์ม
ที่มา: (แล็บเทค เอนจิเนียริง จำกัด)

กระบวนการเป่าฟิล์มนี้ ทำให้ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งโดยอาศัยอากาศให้ความเย็นดังรูปที่ 4.14 เมื่อพอลิเมอร์หลอมเคลื่อนที่ขึ้นจากตาย (1) จากนั้นก็เย็นตัวลงและแข็งตัว โดยอาศัยแหวนลมหล่อเย็นรอบลูกโป่งเป่าลมออกมาหล่อเย็น (2) และท่อส่งลมหล่อเย็นเข้าไปภายในลูกโป่ง (3, 4) และทางระบายออกลมจากลูกโป่ง (5) ระยะทางจากตายจนถึงตำแหน่งที่เกิดการแข็งตัว เรียกว่าแนวเส้นแข็งตัว (freeze line หรือ frost-line) (6) ซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์เกิดการตกผลึก จากนั้นจะกลายเป็นฟิล์มของแข็ง (7) ซึ่งถูกรอบบีบลูกโป่ง (collapsing unit) (8) บีบห่อลูกโป่งให้เข้าหากัน และลูกกลิ้งบีบลูกโป่ง (nip rollers) (9) ด้านบนสุดรวบฟิล์มให้ติดกัน ส่งผลให้ท่อพองออกทันทีเมื่อออกจากตายและถูกดึงไปม้วนเก็บดังรูปที่ 4.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 ลักษณะผลิตภัณฑ์ฟิล์มขณะเป่า:

(ก) รูปวาด (ข) รูปถ่ายขณะเป่าฟิล์ม

ที่มา: (Kostic & Reifschneider, 2006)

2. ผลิตภัณฑ์และสมบัติของผลิตภัณฑ์จากการเป่าฟิล์ม

ฟิล์มเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ได้รับการยอมรับและมีการนำมาใช้แพร่หลาย ทั้งในชีวิตประจำวัน และกิจการอื่น ๆ งานบรรจุภัณฑ์ในทางการเกษตร อุตสาหกรรม การแพทย์ เป็นต้น ส่วนใหญ่วัสดุที่นำมาทำฟิล์มจะใช้พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ เช่น ถังพลาสติก ในการทำถังจะมีการตัดฟิล์มตามขนาดที่ต้องการและเชื่อมกันถัง

สมบัติของฟิล์มเป่าได้แก่ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด ทั้งในทิศทางเครื่องจักรและทิศทางขวางเครื่องจักร ความต้านทานแรงกระแทก ความใส ความหนา ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติเหล่านี้คือ อุณหภูมิการหลอมเหลว ความหนาของฟิล์ม อัตราส่วนการดึง (draw ratio) อัตราส่วนการเป่า (blow-up ratio) ความสูงของแนวเส้นแข็งตัว (frost line height) และความสม่ำเสมอของความดันซึ่งช่วยลดหรือจำกัดการเกิดเป็นคลื่น (surging)

3. เปรียบเทียบการเป่าฟิล์มและรีดแผ่นพอลิเมอร์

เนื่องจากการขึ้นรูปทั้งสองวิธีจะได้ผลิตภัณฑ์แผ่นฟิล์มหรือแผ่นพอลิเมอร์บาง อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีมีข้อแตกต่างที่น่าสนใจแสดงแสดงดังตารางที่ 4.1 นอกจากนั้นระดับขั้นของการดึงยึดในการรีดแผ่นพอลิเมอร์ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการเป่าฟิล์ม ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้การกระจายความหนาในทิศทาง cross direction นั้นค่อนข้างสม่ำเสมอ ($\pm 1.5\%$) อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลในทิศทาง cross direction ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการเป่าฟิล์มเนื่องจากระดับของการดึงยึดของการเป่าฟิล์มสูงกว่า

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการเป่าฟิล์มและการรีดแผ่น

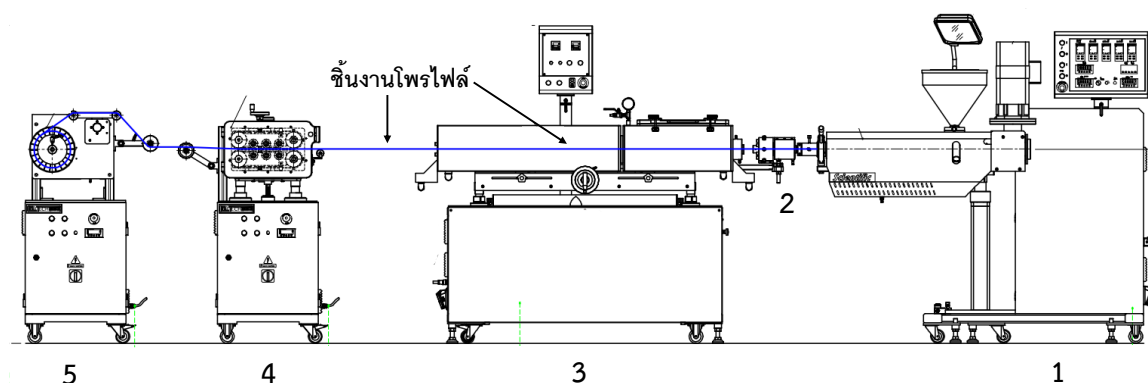
รายการ	การเป่าฟิล์ม	การรีดแผ่น
ลักษณะผลิตภัณฑ์	ได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์เป็นท่อกว้างบาง เมื่อตัดเชื่อมกันจะได้น้เป็นถุงพอลิเมอร์	ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแผ่น
การเรียงตัวของโมเลกุล	มีการเรียงตัวของโมเลกุลทั้งแนวเดียวกับการไหลออกจากเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร (biaxial orientation)	มีการเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์ในแนวเดียวกับการไหลออกจากเครื่องจักร (monoaxial orientation)
ความใส	อัตราการเย็นตัวช้าเนื่องจากให้ความเย็นด้วยลม ทำให้เกิดผลึกมีขนาดใหญ่	อัตราการเย็นตัวเนื่องจากสัมผัสกับลูกกลิ้งเย็น ทำให้ตกผลึกน้อยลง มีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มใส โดยเฉพาะฟิล์มพอลิโพรพิลีน

การอัดรีดโพรไฟล์และท่อ

การผลิตโพรไฟล์และท่อเป็นการผลิตที่อาศัยการอัดรีดแล้วส่งพอลิเมอร์ออกผ่านดายที่มีช่องเปิดเหมือนหน้าตัดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แต่กระบวนการทั้งสองแตกต่างกันตรงที่ลักษณะของดายซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีหน้าตัดต่างกัน กระบวนการนี้คล้ายคลึงกับการเป่าฟิล์มตรงที่พอลิเมอร์ที่ออกจากดายมีลักษณะเป็นท่อเหมือนกัน แต่แตกต่างจากการเป่าฟิล์มตรงที่ท่อมีความหนามากกว่าฟิล์ม

1. เครื่องอัดรีดโพรไฟล์และการอัดรีดโพรไฟล์

อุปกรณ์การผลิตโพรไฟล์และท่อประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญแสดงดังรูปที่ 4.15 ได้แก่ เครื่องอัดรีด (1) ดาย (2) อุปกรณ์ปรับขนาด (calibrator) และอุปกรณ์หล่อเย็น (cooling unit, sizing unit) (3) อุปกรณ์ดึงขึ้นงานโพรไฟล์ (haul off unit) (4) และ ม้วนหรือตัดขึ้นงาน(wind up/ cutting unit) (5)

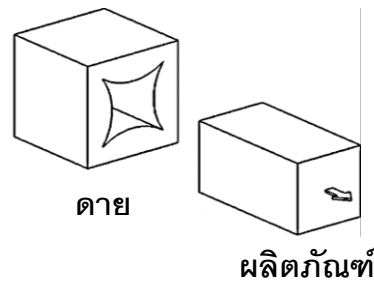


รูปที่ 4.15 เครื่องทำโพรไฟล์

ที่มา: (แล็บเทค เอนจิเนียริง จำกัด)

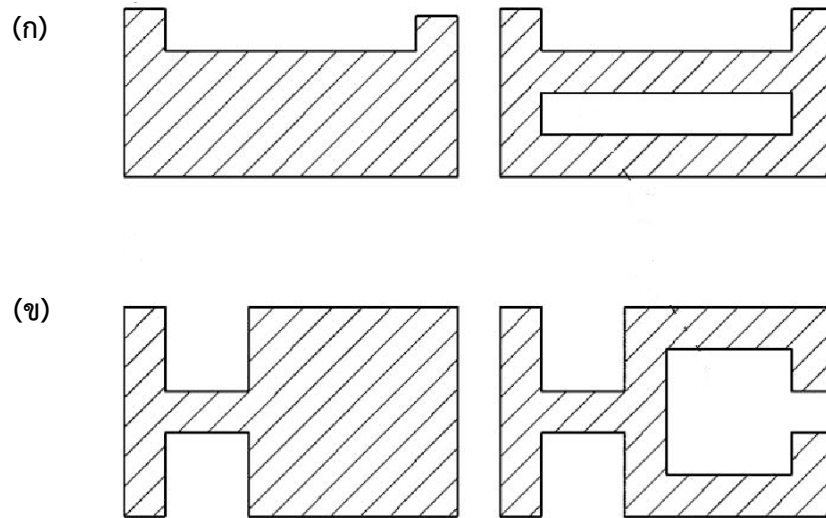
1.1 ดาย แบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์ได้ 2 แบบ คือ ดายโพรไฟล์และดายหน้าตัดวงแหวน (ท่อ) มีรายละเอียดต่อไปนี้

1.1.1 ดายโพรไฟล์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์โพรไฟล์ได้รับอิทธิพลจากการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมที่ตาย ดายจึงต้องมีลักษณะเฉพาะ เช่น เมื่อต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ช่องเปิดของดายที่ใช้ต้องไม่ใช่มุมฉากและผนังไม่เป็นแผ่นตรง ดังรูปที่ 4.16 เพื่อชดเชยการเกิดการบวมตัวดังกล่าวทำให้รูปร่างออกมาได้ฉากพอดี



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปหน้าตัดของช่องเปิดดาย (die exit) และ
รูปหน้าตัด/รูปทรงของผลิตภัณฑ์
ที่มา: (Kostic & Reifschneider, 2006)

กรณีดายที่มีรูปร่างที่เป็นขอบเหลี่ยม เช่น รูปตัวยู หรือตัวแอลเย็นลงด้วยอัตราเร็วที่ไม่เท่ากัน ก่อให้เกิดความเค้นตกค้างและการโก่งงอขึ้นในชิ้นงานผลิตภัณฑ์ (ดูหลักการพื้นฐานในวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์) ดังนั้นในการออกแบบต้องทำให้เกิดความหนาที่สม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงานมากที่สุด ตัวอย่างของโพรไฟล์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.17 เมื่อพิจารณาทั้งโพรไฟล์ (ก) และ (ข) ด้านซ้ายมือจะเห็นว่าหน้าตัดโพรไฟล์มีส่วนที่หนาและบางอยู่ด้วยกัน จากสาเหตุดังกล่าวเมื่อได้รับความเย็นส่วนที่บางจะเย็นและแข็งตัวก่อน ขณะที่ส่วนที่หนายังคงสภาพหลอมอยู่ ส่งผลให้ให้เกิดการหดตัวในส่วนที่หนาของผลิตภัณฑ์โดยโพรไฟล์ (ก) จะโก่งตัว (ห่อตัว) ในทิศทางลง และโพรไฟล์ (ข) จะโก่งตัวไปด้านขวา การแก้ปัญหาการโก่งตัวดังกล่าวสามารถทำได้โดยออกแบบให้หน้าตัดมีความหนาที่สม่ำเสมอทั้งโพรไฟล์ด้านขวา



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์โพรไพลีนที่ไม่ดี(ซ้าย)และการปรับปรุง (ขวา) เพื่อทำให้เกิดความหนาที่สม่ำเสมอ

ที่มา: (Kostic & Reifschneider, 2006)

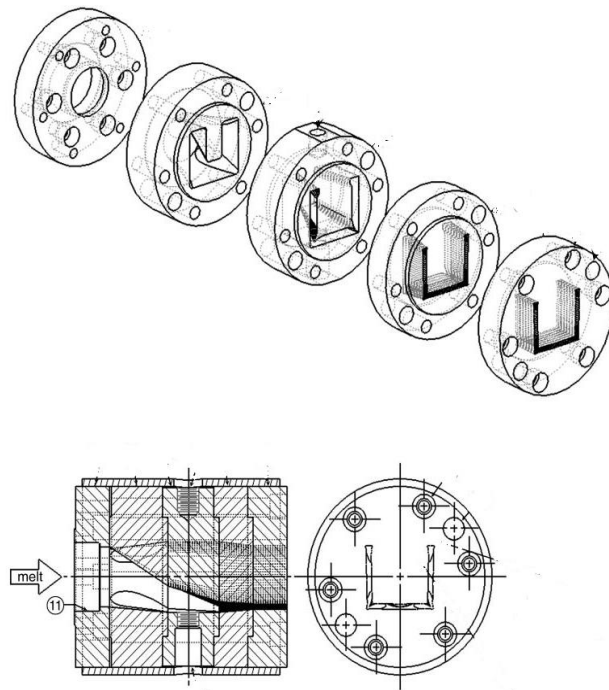
การออกแบบให้หน้าตัดมีความหนาที่สม่ำเสมอทำได้โดยทำแกน (mandrel) เพื่อให้ชิ้นงาน กลวงตรงกลาง ข้อดีของการออกแบบดังกล่าว มีดังนี้

(1) ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดีขึ้น เนื่องจากการเย็นตัวและหดตัวด้วยความสม่ำเสมอ ส่งผลให้หน้าตัดเกิดการแข็งตัวด้วยความสม่ำเสมอมากขึ้นและมีความเค้นตกค้างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

(2) เปลืองเนื้อพอลิเมอร์ในส่วนที่ไม่ได้ใช้งานลดลง

(3) มีอัตราเร็วการเย็นตัวที่เร็วขึ้นเนื่องจากมีเนื้อพอลิเมอร์ร้อนลดลง

การออกแบบ ดายโพรไพล์อาจทำได้ในลักษณะของ stack plate die คือเป็นแผ่นหลาย ๆ แผ่นซ้อนกัน ทำให้มีการเปลี่ยนเส้นทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมจากทางเข้ารูปวงกลมจนถึงทางออกซึ่งเป็นรูปหน้าตัดตามรูปลักษณะที่ต้องการ การออกแบบในลักษณะดังกล่าวทำให้ง่ายต่อการผลิตและสะดวกต่อการปรับแต่ง ตัวอย่างของ stack plate die ซึ่งทำให้เกิดหน้าตัดตัว U แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 Stack plate die หน้าตัดตัวยู (U)

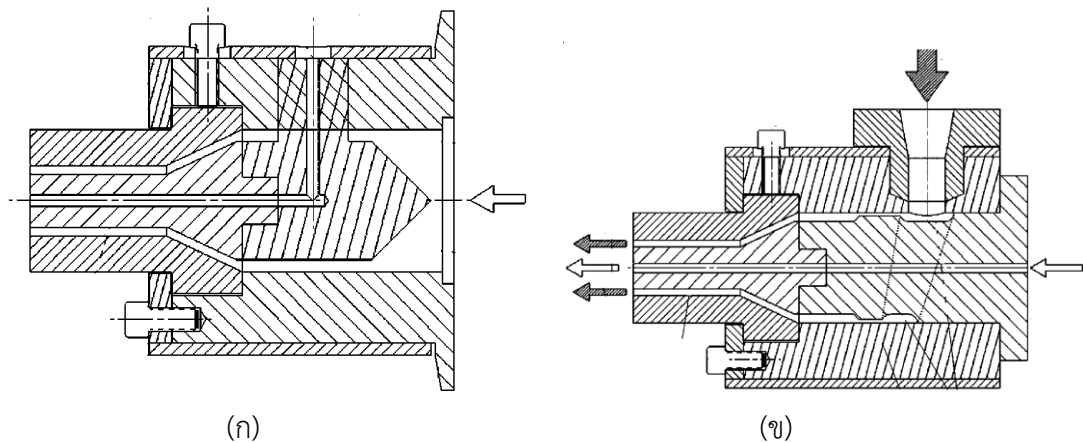
ที่มา: (Kostic & Reifschneider, 2006)

1.1.2 ดายหน้าตัดวงแหวน มี 2 แบบ คือ in-line dies (เรียกว่า spider dies) แสดงดังรูปที่ 4.19 (ก) และ cross-head dies แสดงดังรูปที่ 4.19 (ข)

องค์ประกอบหลักของ in-line die คือมี mandrel (torpedo) วางอยู่ที่กึ่งกลางตาย ยึดไว้โดยใช้ spider ซึ่งมี 3 ขา ขาหนึ่งขาจะมีท่อให้ลมผ่านเข้าไปในกลาง mandrel และ die pin ซึ่งอยู่ติดกับ mandrel เพื่อควบคุมให้พอลิเมอร์หลอมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในตามต้องการโดยสามารถปรับเปลี่ยนได้และมีท่ออากาศผ่านเพื่อป้องกันท่ออุดตันหลังจากตาย die land ทำหน้าที่ควบคุมขนาดความหนาของท่อโดยมี heater band ให้ความร้อนแก่ die และทำให้มีการหลอมและไหลได้อย่างเหมาะสม

in-line die นั้นเป็นการผลิตที่ใช้ต้นทุนน้อยที่สุดแต่มีข้อจำกัดคือทำให้เกิดรอยเชื่อม (weld lines) ที่เกิดจากพอลิเมอร์หลอมแยกออกจากกันเมื่อผ่าน spider leg และกลับมารวมกันอีกครั้ง

cross-head die สามารถแก้ปัญหารอยเชื่อมที่เกิดจาก spider leg ได้ โดยพอลิเมอร์หลอมเข้าด้านข้างของตายและหักมุม 90 องศา (side feed) เมื่อพอลิเมอร์ไหลผ่านช่องทางไหลซึ่งอยู่รอบ mandrel (เรียกอีกชื่อว่า core tube) ทำให้การไหลเกิดการแยกอย่างสม่ำเสมอตลอดช่องวงแหวนระหว่าง die pin และ die land นอกจากนี้ cross-head die ยังสามารถใช้ข้ออัดรีดหุ้มลวดได้ (ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป) แต่ต้องใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านแท่นและความยาวของ die pin ต้องสั้นลงเพื่อให้เส้นลวดสัมผัสกับท่อก่อนที่จะออกจาก die land

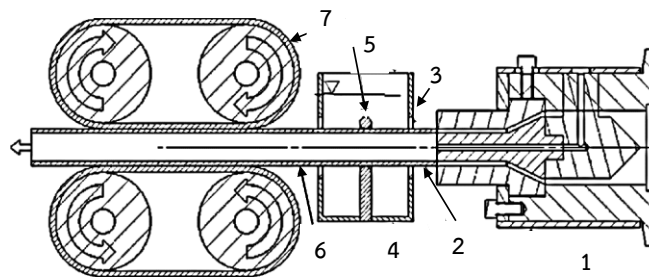


รูปที่ 4.19 ดายโพรไฟล์หน้าตัดวงแหวน (ก) in-line die (ข) cross-head die
(ลูกศรใหญ่แสดงถึงทางเข้าของพอลิเมอร์หลอมจากเครื่องอัดรีด)

ที่มา: (Kostic & Reifschneider, 2006)

1.2 ชุดอุปกรณ์ปรับขนาด (calibrator) หลังจากพอลิเมอร์หลอมไหลผ่านดายเกิดรูปทรงตามต้องการแล้วยังคงเป็นพอลิเมอร์หลอมอยู่จึงจำเป็นต้องรักษารูปทรงนั้นไว้จนกว่าพอลิเมอร์หลอมจะแข็งตัวขณะดึงขึ้นงานที่ผลิตได้อย่างต่อเนื่องและตัดโพรไฟล์ให้มีความยาวตามต้องการ การรักษารูปทรงโพรไฟล์เมื่อออกจากดายและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเรียกว่าการ sizing ทำได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ชุดอุปกรณ์ปรับขนาด (calibrator) ซึ่งให้ความเย็นพร้อมกับดูดอากาศเพื่อให้เกิดสถานะที่เป็นสุญญากาศไปด้วย รูปที่ 4.20 นี้แสดงถึงการให้ความเย็นโดยใช้น้ำ

ชุดอุปกรณ์ปรับขนาด แสดงดังรูปที่ 4.20 ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ ดาย (1) โพรไฟล์พอลิเมอร์หลอม (2) แผ่นกั้นอ่างน้ำ (baffle) (3) อ่างน้ำสุญญากาศ (vacuum water tank) (4) แหวนปรับขนาด (sizing ring) (5) ผลิตภัณฑ์โพรไฟล์พอลิเมอร์ (6) อุปกรณ์ดึงขึ้นงาน (haul-off equipment) (7)



รูปที่ 4.20 ชุดอุปกรณ์ปรับขนาดและดึงขึ้นงาน

ที่มา: (Kostic & Reifschneider, 2006)

กรณีการอัดรีดท่อ ขนาดภายนอกของท่อกำหนดโดย sizing ring ซึ่งวางไว้ในอ่างน้ำ สูญญากาศและมีความดันลมภายในท่อดันด้านไว้ไม่ให้ท่อยุบตัวขึ้นอยู่กับความเร็วในการดึง หากดึงเร็ว ขนาดของท่อก็ลดลง หากดึงช้าขนาดก็เพิ่มขึ้น

1.3 อุปกรณ์ดึงขึ้นงาน (Haul-off Equipment) ในการอัดรีดท่อและโพรไฟล์ ต้องมีอุปกรณ์ดึงท่อให้เคลื่อนไปข้างหน้า โดยอุปกรณ์ดังกล่าวทำหน้าที่จับท่อและดึงเคลื่อนไปด้วยความเร็วคงที่ที่สัมพันธ์กับความเร็วการอัดรีด นิยมใช้อุปกรณ์ดึงขึ้นงานแบบตีนตะขาบ (caterpillar haul-off unit) ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งประกอบด้วยสายพานลำเลียงสองชุด บนกับล่าง สายพานทั้งสองชุดสามารถปรับช่องว่างระหว่างกันได้ เพื่อบีบหรือคายการจับขึ้นงาน และสามารถปรับอัตราเร็วของการหมุนได้

1.4 อุปกรณ์ตัดขึ้นงาน ในกรณีการอัดรีดผลิตภัณฑ์ท่อ หรือโพรไฟล์แข็ง จำเป็นต้องตัดให้มีขนาดเหมาะสม ในการผลิตขึ้นงานจำนวนมากนิยมใช้อุปกรณ์การตัดอัตโนมัติ ซึ่งเป็นแท่นเลื่อย ในการทำงานเป็นรอบโดยตัดท่อเมื่อถึงระยะที่กำหนด หลังจากนั้นแท่นเลื่อยจะกลับมาอยู่ที่เดิม เพื่อรอจังหวะการทำงานในรอบต่อไป

2. ผลิตภัณฑ์จากการอัดรีดท่อและโพรไฟล์และชนิดพอลิเมอร์

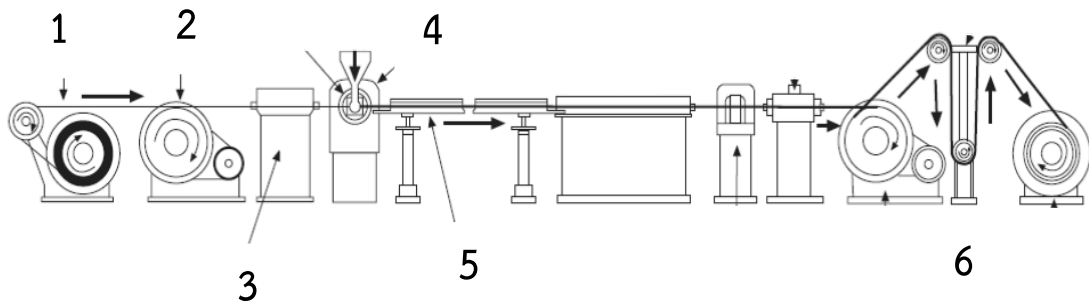
ตัวอย่างผลิตภัณฑ์โพรไฟล์ ได้แก่ รางน้ำฝน รางผ้าม่าน วงกบหน้าต่าง ประตู พอลิเมอร์ที่ใช้ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็ง พอลิเอทิลีน ฯลฯ นอกจากนั้น สำหรับผลิตภัณฑ์ท่อ มักใช้ PVC ทั้งชนิดแข็งและอ่อน พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน

การอัดรีดหุ้มลวด

การอัดรีดหุ้มลวดเป็นกระบวนการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมอย่างต่อเนื่องให้อยู่ในรูปท่อหุ้มไปบนลวดโลหะที่กำลังเคลื่อนที่ในแนวแกน หรือ ดึงลวดผ่านพอลิเมอร์หลอม

1. เครื่องอัดรีดหุ้มลวดและกระบวนการอัดรีดหุ้มลวด

เครื่องอัดรีดหุ้มลวดและกระบวนการอัดรีดหุ้มลวดแสดงดังรูปที่ 4.21 การทำงานเริ่มจากดึงลวดจากม้วน (1) ด้วยเครื่องดึงทางด้านหน้า (2) ผ่านเครื่องให้ความร้อนแก่ลวด (3) เพื่อให้อุณหภูมิของลวดใกล้เคียงกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมแล้วจึงส่งต่อเข้าผ่านดายเครื่องอัดรีด (4) จากนั้นส่งต่อไปยังอ่างน้ำหล่อเย็น (5) เครื่องม้วน (6) ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 เครื่องอัดรีดหุ้มลวด

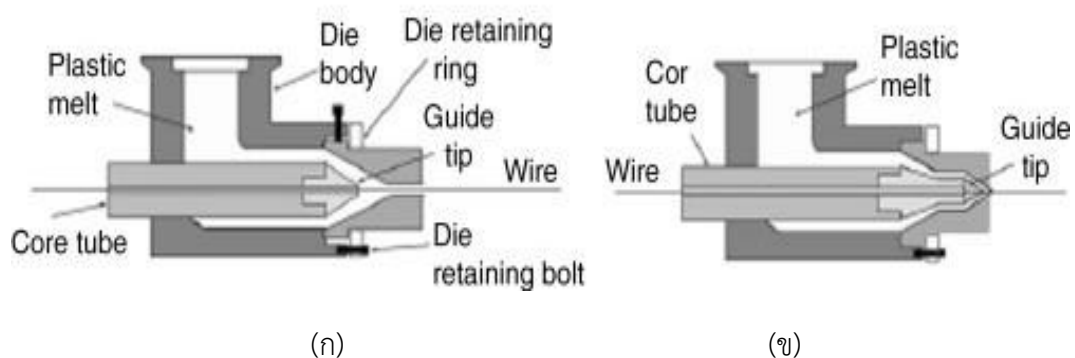
ที่มา: (Han & Rao, 1978)

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดรีดหุ้มลวด ได้แก่

1.1 ดาย ตำแหน่งของดายจะอยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของพอลิเมอร์หลอม ดายของเครื่องอัดรีดหุ้มลวดมี 2 ประเภท คือดายที่เคลื่อนด้วยความดัน (pressure type dies) และดายแบบท่อ (tubing type die)

ดายที่เคลื่อนด้วยความดันพอลิเมอร์หลอมถูกแรงกดให้แนบกับลวดภายในดาย แสดงดังรูปที่ 4.22 (ก) เส้นลวดที่กำลังเคลื่อนที่จะสัมผัสกับพอลิเมอร์หลอมในดาย ลักษณะเด่นของดายชนิดนี้คือ มีความดันสูง (ประมาณ 5,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ทำให้มีแรงบีบให้พอลิเมอร์หลอมเคลือบบนลวด แต่จะมีปัญหาจากการไหลย้อนกลับของพอลิเมอร์หลอมบางส่วนและมีปัญหาเรื่องความไม่สม่ำเสมอในการเคลือบ

ประเภทที่ 2 คือ ดายแบบท่อ ซึ่งผลิตได้โดยการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมจากดายในลักษณะเป็นท่อบางหุ้มล้อมรอบเส้นลวดและถูกดึงให้แนบกับผิวลวดขณะออกจากดาย อัตราการเคลื่อนที่ของเส้นลวดนั้นสูงจนกระทั่งท่อพอลิเมอร์ที่ออกมาถูกลากจนกระทั่งสัมผัสกับลวดและยึดแน่นกับเส้นลวดนอกดาย ทำให้เกิดการเคลือบด้านนอกดายดังรูปที่ 4.22 (ข) พอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีความหนืดสูงมาก ข้อดีของดายชนิดนี้คือ สามารถควบคุมความหนาได้ดีกว่าดายชนิดแรก



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.22 ดายเครื่องอัดรีดหุ้มลวด (ก) Pressure type die (ข) tubing type die

ที่มา: (Han & Rao, 1978)

1.2 อ่างน้ำเย็น สายไฟฟ้าที่ผลิตได้ออกจากเตาจะได้รับการหล่อเย็นโดยผ่านลงในอ่างน้ำเย็น (cooling bath) ความยาวของอ่างน้ำหล่อเย็นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเร็วของการดึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้า และความหนาของฉนวนพอลิเมอร์ ความยาวของอ่างน้ำจะเพิ่มขึ้นถ้าปัจจัยดังกล่าวเพิ่มขึ้น และการหล่อเย็นต้องทำอย่างช้า ๆ เป็นลำดับ หากฉนวนได้รับความเย็นเร็วเกินไป ฉนวนจะแข็งตัวและหดตัว ผลทำให้เกิดช่องว่าง (void) ระหว่างฉนวนและเส้นลวด การเคลือบพอลิเมอร์บนลวดต้องให้ความหนาของการเคลือบสม่ำเสมอ ให้ความหนาตามต้องการและสม่ำเสมอโดยใช้ก้าน (capstan) ควบคุมความเร็วให้คงที่ และลวดต้องวางตัวอยู่ที่แกนการเคลือบเสมอ

นอกจากนั้นหลังผ่านอ่างน้ำเย็น ต้องมีการตรวจสอบสายไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยตรวจสอบจุดอ่อนของการเคลือบ รวมทั้งความแปรปรวนของความหนาของการเคลือบให้เป็นไปตามมาตรฐานก่อนเข้าเครื่องม้วน

2. ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอัดรีดหุ้มลวด

ผลิตภัณฑ์ที่จัดอยู่ในกลุ่มสายไฟ สายเคเบิล โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิต ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ ชนิดอ่อน

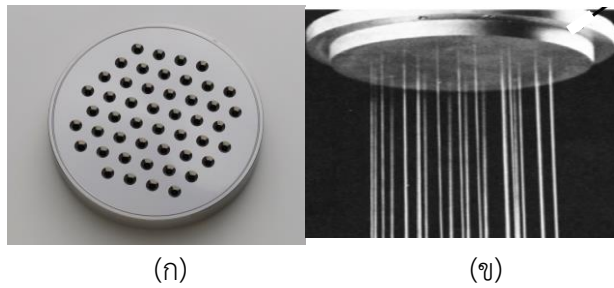
การอัดรีดเส้นใย

การอัดรีดเส้นใยเป็นการผลิตวัสดุที่มีความยาวมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง อย่างน้อย 100 เท่า การผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ทำได้ทั้งจากการใช้สารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งได้แก่ wet spinning ซึ่งพอลิเมอร์ได้ละลายในตัวทำละลายและอัดรีดผ่านสปินเนอร์เตลงสู่สารละลายอีกชนิดหนึ่ง dry spinning ซึ่งอัดรีดสารละลายพอลิเมอร์และระเหยตัวทำละลายนั่นออกเมื่อผ่านสปินเนอร์เต ซึ่งมักใช้ในกรณีพอลิเมอร์ที่ใช้หลอมยาก และ melt spinning ซึ่งเป็นการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมผ่านเตาที่เป็นรูเล็ก ๆ จากนั้นดึงพอลิเมอร์หลอมที่อัดได้ให้เป็นเส้นใยยาวแต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการผลิตเส้นใยจากพอลิเมอร์หลอมโดยการอัดรีดเท่านั้น

1. เครื่องอัดรีดเส้นใยและกระบวนการอัดรีดเส้นใย

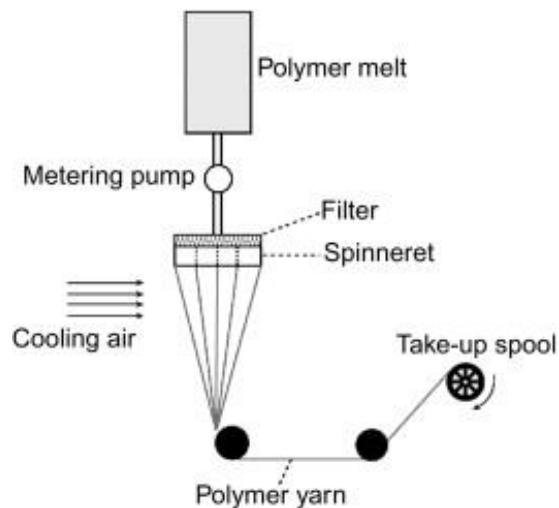
เครื่องอัดรีดเส้นใยประกอบด้วยเครื่องอัดรีดที่ต่อกับเตาที่มีลักษณะเฉพาะและเครื่องดึงเส้นใย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.1 เตาเครื่องผลิตเส้นใย ใช้ในการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมให้อยู่ในรูปของเส้นใย เรียกว่า เตาสปินเนอร์เต (spinneret die) มีลักษณะดังรูปที่ 4.23 (ก) และพอลิเมอร์ที่กำลังไหลผ่านเตาสปินเนอร์เต แสดงดังรูปที่ 4.23 (ข)



รูปที่ 4.23 (ก) สปินเนอร์และ (ข) พอลิเมอร์หลอมที่กำลังไหลผ่านดายสปินเนอร์
ที่มา: (Qin, 2016)

1.2 เครื่องดึงเส้นใย การดึงจะทำให้เส้นใยเกิดการยืดออกหลายเท่าตัว โดยทั่วไปใช้อัตราการดึงยืด (draw down ratio) ซึ่งวัดจากอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูสปินเนอร์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย เป็นตัววัดการยืดตัวของเส้นใย ใช้ลมเย็นเป่าระหว่างการดึงยืดทำให้เกิดการแข็งตัวของเส้นใยได้

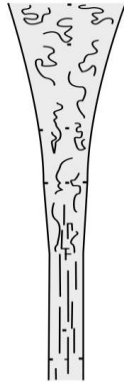


รูปที่ 4.24 กระบวนการอัดรีดเส้นใย
ที่มา: (Qin, 2016)

กระบวนการอัดรีดเส้นใย (ดังรูปที่ 4.24) เริ่มจากหลอมพอลิเมอร์ในเครื่องอัดรีด จากนั้นอัดรีดพอลิเมอร์หลอมให้ไหลผ่านตัวกรองหลายชั้นเพื่อกรองเอาสิ่งสกปรกออก (เนื่องจากเส้นใยที่ผลิตมีขนาดเล็กมาก การมีสิ่งสกปรกเจือปนทำให้เส้นใยขาดง่าย) จากนั้นดันให้พอลิเมอร์หลอมไหลผ่านดายสปินเนอร์ดึงเส้นใยด้วยเครื่องดึงจากดายจนถึงลูกกลิ้งรวบเส้นใย จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการดึงยืด โดยผ่านอุโมงค์ลมร้อนหรือผ่านอ่างน้ำร้อน โดยทั่วไปการผลิตเส้นใยไนลอนและพอลิเอสเตอร์มักใช้ลม ส่วนการผลิตเส้นใยจากพอลิโพรพิลีนจะใช้น้ำเนื่องจากมีความแข็งแรงขณะหลอมต่ำ ในขั้นตอนการดึงยืดนี้มักใช้อุณหภูมิของการดึงยืดให้สูงกว่าค่า T_g แต่ต่ำกว่าค่า T_m ส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวในแนวดึงที่สูงขึ้นกว่าตอนที่ออกจากดายก่อนเข้าสู่เครื่องม้วนเก็บ

2. ผลิตภัณฑ์เส้นใยและชนิดพอลิเมอร์

เส้นใยพอลิเมอร์มีใช้ในงานและในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น สิ่งทอ เสื้อผ้า เนื่องจากเมื่อดึงยืดเส้นใยแล้วทำให้เกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ มีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวของโซ่พอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโซ่พอลิเมอร์หลอมตามแนวตึงขณะออกจากสปินเนอร์
ที่มา: (Tadmor & Gogos, 2006)

พอลิเมอร์ที่มักใช้ในอุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต และ พอลิเอไมด์ 6 พอลิเอไมด์ 6,6 เมื่อผ่านกระบวนการอัดรีดแล้ว เส้นใยสามารถถูกรวบให้เข้ากันหรือตีเกลียว (twist) เข้าด้วยกันเป็นเส้นด้าย เส้นใยสังเคราะห์มีความเหนียว ทนต่อการเสียดสี มีความแข็งแรง สามารถย้อมสีได้

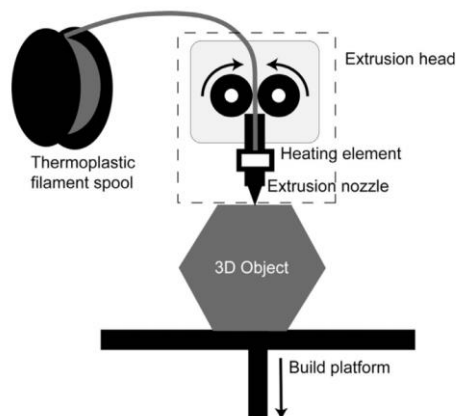
การพิมพ์สามมิติ

การพิมพ์สามมิติ (3D printing) สร้างชิ้นงาน 3 มิติโดยผ่านกระบวนการสร้างชิ้นพอลิเมอร์บาง ๆ ตามลักษณะหน้าตัดของชิ้นงาน ซ้อนทับกันจนเป็นชิ้นงาน 3 มิติ เป็นกระบวนการที่จัดว่าเป็นการผลิตแบบเพิ่มเนื้อ (additive manufacturing, AM) หรือ การสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว (rapid prototyping) การพิมพ์ 3 มิติแตกต่างจากเครื่องพิมพ์ 2 มิติทั่วไปที่ใช้พิมพ์หมึกลงบนกระดาษ กระบวนการแบบนี้ได้เริ่มต้นใช้ในวงจำกัดโดยองค์การนาซ่า เพิ่งได้รับความนิยมตั้งแต่ปี ค.ศ. 2009 นี้เอง และมีต้นทุนในการผลิตถูกลงในปัจจุบัน

1. กระบวนการพิมพ์สามมิติ

กระบวนการพิมพ์สามมิติเริ่มจากออกแบบและใช้แบบจำลอง CAD สร้างแบบ จากนั้นส่งข้อมูล (export) จากคอมพิวเตอร์ สู่อุปกรณ์พิมพ์ในลักษณะเดียวกัน คือ พิมพ์ 2 มิติแต่ชั้นในแนวระนาบก่อน ส่วนที่พิมพ์ก็คือภาคตัดขวางของวัตถุนั้น ๆ เมื่อเสร็จในสองมิติแล้วจะพิมพ์ในชั้นต่อไปอย่างต่อเนื่องตามแบบที่กำหนด จนได้รูปทรง 3 มิติ ระบบการพิมพ์แตกต่างกันไปตามกระบวนการและวัสดุที่ใช้พิมพ์ดังต่อไปนี้

1.1 ระบบอัดรีดเส้นพลาสติก (Fused Deposition Modeling, FDM, Material Extrusion) การทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติประเภทนี้เริ่มจากการป้อนเส้นเทอร์มอพลาสติกผ่านเครื่องอัดรีดซึ่งทำหน้าที่หลอมและอัดรีดพลาสติกหลอมผ่านหัวพิมพ์ (print head) ทำให้พอลิเมอร์ให้กระจายเต็มพื้นที่ตามแบบชิ้นงาน 1 ชั้น จากนั้นฐานวางชิ้นงานก็จะเคลื่อนตัวลงด้วยระยะทางที่เท่ากับความหนา 1 ชั้น เพื่อทำให้เกิดกระบวนการแบบเดียวกันในชั้นถัดไป กระบวนการดังกล่าวนี้เกิดซ้ำหลาย ๆ ครั้งจนกระทั่งได้ชิ้นงาน 3 มิติที่สมบูรณ์ (Stansbury & Idacavage, 2016) ส่วนประกอบของเครื่องพิมพ์แสดงดังรูปที่ 4.26 ซึ่งถือว่าการอัดรีดแบบหนึ่ง ดังนั้นจึงทำให้กระบวนการนี้มีชื่อเรียกว่า “material extrusion”



รูปที่ 4.26 เครื่องพิมพ์สามมิติแบบอัดรีดเส้นพลาสติก

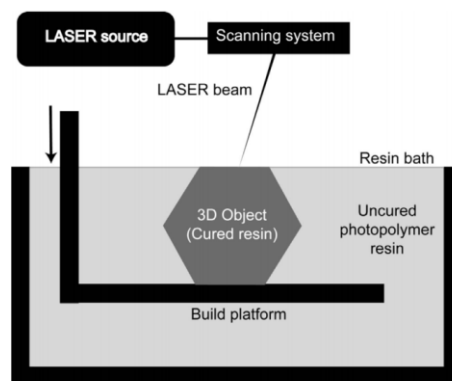
ที่มา: (Mohammed, 2016)

ระบบอัดรีดพลาสติกเป็นระบบที่นิยมมากที่สุด และต้นทุนต่ำที่สุด ใช้ได้กับงานทุกประเภท วัสดุที่ใช้พิมพ์ได้แก่ PLA ABS PET PA หรือพลาสติกผสม เช่น พลาสติกผสมผงไม้ พลาสติกผสมทองเหลือง เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีการดังกล่าวนี้ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ต้นแบบต่าง ๆ วิธีการดังกล่าวยังใช้กับงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เราเรียกว่า organ 3D printing หรือ bio-printing และในปัจจุบันนี้ได้นำมาใช้ในการพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอาหารอีกด้วย

1.2 รูปแบบเครื่องพิมพ์แบบอื่น ๆ

1.2.1 ระบบลาดเรซิน (stereolithography, SLA, resin printing) เป็นการฉายแสงเลเซอร์ไปยังพรีพอลิเมอร์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยใช้แสง (photopolymerization

หรือ photocure) กล่าวคือเมื่อคอมพิวเตอร์อ่านแบบ CAD จะส่งสัญญาณให้ หัวเลเซอร์ซึ่งอยู่ส่วนบนของ เครื่องมือวาดรูปตามแบบจำลอง CAD ลงบนผิวของพรีพอลิเมอร์ที่อยู่ด้านล่าง เมื่อพรีพอลิเมอร์ได้รับแสงก็ จะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นชั้นพอลิเมอร์บาง ๆ ตามที่กำหนดกระบวนการดังกล่าวจะเกิดซ้ำกันหลายครั้งจนได้ เป็นชิ้นงาน 3 มิติตามแบบจำลอง CAD เมื่อเสร็จกระบวนการ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการกำจัดพรีพอลิเมอร์ที่ไม่ เกิดปฏิกิริยาออกโดยการจุ่มในตัวทำละลาย และอบในตู้อบแสงอัลตราไวโอเลตเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโดย สมบูรณ์ ลักษณะเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยระบบลาดเรชินแสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 กระบวนการพิมพ์สามมิติด้วยระบบลาดเรชิน

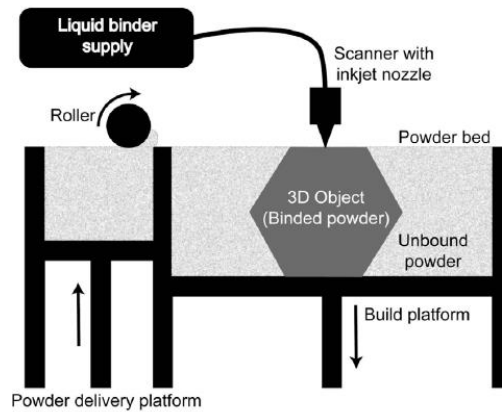
ที่มา: (Mohammed, 2016)

การพิมพ์ระบบนี้ เหมาะกับงานขนาดเล็กที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น หุ่นจำลอง และงาน ต้นแบบ (prototype) งานเครื่องประดับ งานชิ้นส่วนเล็กในอุตสาหกรรม พระเครื่อง

1.2.2 ระบบหลอมผงพอลิเมอร์ (selective Laser Sintering, SLS) เป็นการฉาย เลเซอร์ไปบนผงพอลิเมอร์ พลังงานความร้อนจะทำให้ผิวอนุภาคพอลิเมอร์เกิดการหลอม ส่งผลให้ผง พอลิเมอร์เหล่านั้นเชื่อมติดกันเป็นชิ้นงานจนเป็นชิ้นงานตามแบบ ลักษณะเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 4.28 กระบวนการเริ่มจากการถ่ายโอนผงพอลิเมอร์จากหน่วยป้อนผงพอลิเมอร์ (powder delivery platform) ไปยังหน่วยผลิตชิ้นงาน (build platform) จากนั้นหัวเลเซอร์ก็จะวาดรูปตามแบบที่ป้อน ความร้อนที่ได้ จากเลเซอร์จะทำให้ผงพอลิเมอร์เกิดการเชื่อม (bind) ติดกันเป็นแผ่นพอลิเมอร์บาง ๆ เรียกว่า “sintering” จากนั้นฐานของ หน่วยผลิตชิ้นงานจะลดลงระดับเพื่อให้เกิดการ sintering ในขั้นตอนต่อไป จนกระทั่งได้ รูปทรง 3 มิติของชิ้นงาน

เทคนิค SLS ได้รับการนำมาใช้กับวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ทั้งผลึกพลังงานความร้อนที่ใช้กับเทคนิค นี้มี 2 แหล่ง นอกจากพลังงานความร้อนที่ได้จากเลเซอร์นี้แล้ว ยังมีการให้ความร้อนกับผงพอลิเมอร์ที่อยู่ใน หน่วยผลิตชิ้นงานจนใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ แต่สูงกว่าอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) เพื่อ ควบคุมพลังงานจากเลเซอร์ไม่ให้สูงเกินไปซึ่งจะเกิดผลเสียทำให้เกิดการบิดเบี้ยว (distortion) ของชิ้นงาน ในบางตำแหน่งได้ กระบวนการ SLS แตกต่างจาก SLA ตรงที่ใช้วัสดุเริ่มต้นที่เป็นผงเทอร์โมพลาสติก

แทนที่จะเป็นพรีพอลิเมอร์ของเหลว และเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 ระบบแล้ว SLS และ SLA ทำงานได้รวดเร็วกว่า FDM



รูปที่ 4.28 กระบวนการพิมพ์สามมิติด้วยระบบหลอมผงพอลิเมอร์
ที่มา: (Mohammed, 2016)

2. ลักษณะเด่นของกระบวนการพิมพ์สามมิติ

ช่วยกระบวนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบโดยเปลี่ยนความคิดในการออกแบบให้เป็นชิ้นงานที่จับต้องได้อย่างรวดเร็ว เครื่องมีราคาถูก สามารถใช้งานได้ในธุรกิจขนาดย่อม

บทสรุป

การอัดรีดพอลิเมอร์โดยทั่วไปผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวเพื่อหลอมและขับพอลิเมอร์หลอมออกทางตาย ดังนั้นต้องทราบปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการอัดรีดและลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอัดรีด

การทำผลิตภัณฑ์จากการอัดรีดส่งพอลิเมอร์ที่ออกจากตายสู่อุปกรณ์ประกอบเพื่อให้เกิดการแข็งตัวและมีหน้าตัดที่ต้องการซึ่งมีลักษณะต่างกันในแต่ละวิธีการ สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

วิธีการ	ตาย	อุปกรณ์ประกอบ	ผลิตภัณฑ์
การรีดแผ่น	ตายสี่เหลี่ยมผืนผ้า	ลูกกลิ้งเย็น และ ลูกกลิ้งหนีบ	แผ่นฉลาก เสื่อน้ำมัน
การเป่าฟิล์ม	ตายวงแหวน -แบบขาแมงมุม -แบบป้อนเข้าด้านข้าง -แบบเกลียว	ลูกกลิ้งหนีบลูกโป่ง และ เครื่องเป่าลม	ถุงพลาสติก
การอัดรีดโพรไฟล์	ตายแบบมีแกนกลาง	อุปกรณ์ปรับขนาด	รางน้ำ ไม้เทียม
การอัดรีดท่อ	in line die crosshead die	sizing ring	ท่อน้ำ ท่อร้อยสายไฟ
การอัดรีดหุ้มลวด	ตายเคลือบด้วยความดัน ตายแบบท่อ	อ่างน้ำเย็น	สายไฟ สายเคเบิล
การอัดรีดเส้นใย	ตายสปินเนอร์	เครื่องดึงเส้นใย	เส้นใยสังเคราะห์

การพิมพ์สามมิติเป็นการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมผ่านหัวฉีดซึ่งเป็นรูขนาดเล็กให้เรียงกันเป็นชั้นจนได้รูปทรงสามมิติตามที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

คำถามทบทวน

- จงบอกชื่อกระบวนการที่ใช้ผลิตชิ้นงานดังต่อไปนี้
 - 1.1 ถุงพลาสติก 1.2 ท่อน้ำ 1.3 ฉลากขวดน้ำดื่ม 1.4 สายไฟ
- จงอธิบายความแตกต่างของกระบวนการรีดแผ่นพอลิเมอร์และเป่าฟิล์ม

ในแง่กลไกการทำงาน และผลของกลไกดังกล่าวต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติของชิ้นงานผลิตภัณฑ์
- จงเปรียบเทียบกระบวนการผลิตและชื่อเครื่องจักรที่ใช้การผลิตท่อแข็งและท่ออ่อน
- จงบอกหลักการทำงานและลักษณะเด่นของเครื่องพิมพ์สามมิติ

การฝึกปฏิบัติการ

ปฏิบัติการที่ 5 การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว

วัตถุประสงค์การทดลอง

1. ศึกษาลักษณะเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว
2. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อปริมาณการอัดรีดของพอลิเมอร์ และลักษณะผลิตภัณฑ์

อุปกรณ์

เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder)

วัสดุ

เม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 ศึกษาส่วนประกอบของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว

สังเกตลักษณะเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ซึ่งประกอบด้วย กรวยป้อน สกรู กระบอกสกรู ดาย อุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์วัดความดัน อุปกรณ์เสริม เช่น รางน้ำหล่อเย็น เครื่องตัดเม็ด รายงานรูปส่วนประกอบของเครื่องและระบุชื่อส่วนประกอบที่สำคัญและหน้าที่

ตอนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อปริมาณการอัดรีด ความดัน และลักษณะผลิตภัณฑ์

2.1 ตั้งค่าอุณหภูมิแต่ละช่วงจากกรวยป้อนถึงดายตามที่กำหนด

2.2 ตั้งค่าความเร็วรอบสกรูที่ 15 30 45 และ 60 rpm แต่ละค่าความเร็วสกรู ให้รอบประมาณ 30 วินาทีเพื่อให้เข้าสู่สภาวะคงตัวก่อนเก็บตัวอย่าง ใช้เวลา 2 นาทีสำหรับ 15 และ 30 rpm หรือใช้เวลาเก็บตัวอย่าง 1 นาทีสำหรับ 45 และ 60 รอบต่อนาที แต่ละรอบ เก็บตัวอย่าง 3 ครั้ง

2.3 ถอดดายออก แล้วตั้งค่าความเร็วรอบสกรูดังข้อ 2.2 เก็บตัวอย่างจากการอัดรีด

2.4 บันทึกค่าอุณหภูมิและความดันของแต่ละความเร็วรอบสกรู และชั่งน้ำหนักตัวอย่าง

2.5 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบกับน้ำหนักที่ชั่งได้

ปฏิบัติการที่ 6 การรีดแผ่นพอลิเมอร์

วัตถุประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาลักษณะและการทำงานของเครื่องรีดแผ่นพอลิเมอร์
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อลักษณะและสมบัติของแผ่นพอลิเมอร์ที่ได้

อุปกรณ์

1. เครื่องรีดแผ่นพอลิเมอร์ (extrusion cast film)
2. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

วัสดุ

เม็ดพอลิโพรพิลีน

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 ศึกษาเครื่องรีดแผ่นพอลิเมอร์

สังเกตลักษณะเครื่องรีดแผ่นพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วย เครื่องอัดรีด ดาย และลักษณะอุปกรณ์ประกอบหลังอัดรีดแผ่นพอลิเมอร์

ตอนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อลักษณะและสมบัติของแผ่นพอลิเมอร์ที่ได้

ตั้งค่าอุณหภูมิแต่ละช่วงจากกรวยบ้อนถึงดายเป็น 160, 175, 185, และ 210 °C ตามลำดับ

2.1 ผลของความเร็วสกรูต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์

ตั้งความเร็วสกรูที่ 20 30 40 และ 50 rpm แต่ละค่าความเร็วสกรู ให้รอประมาณ 30 วินาที เพื่อให้เข้าสู่สภาวะคงตัวก่อนเก็บตัวอย่าง ใช้เวลา 2 นาทีสำหรับ 20 และ 30 rpm หรือใช้เวลาเก็บตัวอย่าง 1 นาทีสำหรับ 40 และ 50 รอบต่อนาที บันทึกค่าอุณหภูมิและความดันของแต่ละความเร็วสกรู และชั่งน้ำหนักตัวอย่าง วัดความหนา ความกว้าง สังเกตลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบกับน้ำหนักที่ชั่งได้ ความหนา ความกว้าง ต่อเวลา โดยกำหนดให้ความเร็ว 0 เมตรต่อนาที หมายถึงฟิล์มไม่ได้รับการดึงและขนาดของฟิล์มเท่ากับขนาดความกว้างของปากดาย

2.2 ผลของความเร็วของลูกกลิ้งเย้นต่อผลิตภัณฑ์

ตั้งความเร็วสกรูที่ 35 rpm กำหนดให้ความเร็วลูกกลิ้งหนีบคงที่ 1.0 m.min⁻¹ แปรความเร็วลูกกลิ้งเย้นที่ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 m.min⁻¹ ม้วนเก็บแผ่นพอลิเมอร์ที่อัดรีดได้

2.3 ผลของความเร็วลูกกลิ้งหนีบต่อผลิตภัณฑ์

ตั้งความเร็วสกรูที่ 35 rpm กำหนดให้ความเร็วลูกกลิ้งเย้นคงที่ 1.0 mmin⁻¹ แปรความเร็วลูกกลิ้งหนีบที่ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 mmin⁻¹ ม้วนเก็บแผ่นพอลิเมอร์ที่อัดรีดได้

ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์และการหดตัวของแผ่นพอลิเมอร์

3.1 ศึกษาความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานในแนวการไหลของพอลิเมอร์ และแนวขวางการไหลของพอลิเมอร์

3.2 ศึกษาการหดตัวของแผ่นพอลิเมอร์

ตัดแผ่นพอลิเมอร์ให้มีขนาดความกว้าง 3.5 เซนติเมตร ยาว 7.5 เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 1 นาที จากนั้นนำชิ้นทดสอบออกจากตู้อบ วางพักให้เย็น วัดขนาดของชิ้นทดสอบอีกครั้ง เทียบกับชิ้นทดสอบก่อนอบ

ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความเร็วสกรู และความเร็วของลูกกลิ้ง ต่อลักษณะและสมบัติของแผ่นพอลิเมอร์ที่ได้

เอกสารอ้างอิง

- Brydson, J. A. (1981). *Flow properties of polymer melts* (2nd ed.). George Godwin Limited.
- Dae Han, C., & Rao, D. *Studies on Wire Coating Extrusion. 1. The Rheology of Wire Coating Extrusion.*
- Dealy, J. M., & Wissbrun, K. F. (1990). *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9738-4>
- Han, C. D., & Rao, D. (1978). Studies on Wire Coating Extrusion. 1. The Rheology of Wire Coating Extrusion. *Polymer Engineering and Science*, 18(13), 1019–1029.
- Kostic, M. M., & Reifschneider, L. G. (2006). Design of Extrusion Dies. In *Encyclopedia of Chemical processing* (1st ed., Vol. 10, pp. 633–649). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.1081/E-ECHP-120039324>
- Mohammed, J. S. (2016). Applications of 3D printing technologies in oceanography. In *Methods in Oceanography* (Vol. 17, pp. 97–117). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.08.001>
- Osswald, T. A. (1998). *Polymer Processing Fundamentals*. Hanser Publisher Inc.
- Qin, Y. (2016). A brief description of textile fibers. In *Medical Textile Materials*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100618-4.00003-0>
- Stansbury, J. W., & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 32(1), 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>
- Tadmor, Z., & Gogos, C. G. (2006). *Principles of polymer processing* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Tadmor, Z., & Klein, I. (1978). *Engineering Principle of Plasticating Extrusion*. Krieger.
- Vlachopoulos, J., Castillo, R., & Polychronopoulos, N. D. (2012). Blown film dies. In O. S. Carneiro & M. Nobrega (Eds.), *Design of extrusion forming tools* (1st ed.). Smithers Rapra.

บรรณานุกรม

- Allsopp, M. W. (1981). The development and importance of suspension PVC morphology. *Pure and Applied Chemistry*, 53, 449–465.
- Ambrogi, V., Carfagna, C., Cerruti, P., & Marturano, V. (2017). Additives in Polymers. In *Modification of Polymer Properties* (pp. 87–108). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-44353-1.00004-X>
- Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453–1477. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>
- Basavaraju, K. C. (2021). A New Composition of High Heat General Purpose Polystyrene (High Heat GPPS) Resin. *Academic Journal of Polymer Science*, 4(5), 555650. <https://doi.org/10.19080/ajop.2021.04.555650>
- Baugh, L. S., & Schulz, D. N. (2020). Discovery of Syndiotactic Polystyrene: Its Synthesis and Impact. *Macromolecules*, 53(10), 3627–3631. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c00350>
- Belcher, S. L. (2017). Blow Molding. In M. Kutz (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook* (2nd ed., pp. 265–289). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00013-4>
- Bensason, S., Minick, J., Moet, A., Chum, S., Hiltner, A., & Baer, E. (1996). Classification of Homogeneous Ethylene-Octene Copolymers Based on Comonomer Content. *Journal of Applied Polymer Science*, 34, 1301–1315.
- Black, T. (1998). Single-Screw Compounding. In D. B. Todd (Ed.), *Plastics compounding: Equipment and Processing* (p. 14). Hanser Publishers.
- Bourbigot, S., Le Bras, M., Duquesne, S., & Rochery, M. (2004). Recent advances for intumescent polymers. *Macromolecular Materials and Engineering*, 289(6), 499–511. <https://doi.org/10.1002/mame.200400007>

- Brito-Bazan, M., Fradette, L., & Tanguy, P. A. (2012). Experimental Flow Visualization and Residence Time Distributions in a Co-Kneader. *International Polymer Processing*, 27(4), 414–426. <https://doi.org/10.3139/217.2470>
- Brydson, J. A. (1981). *Flow properties of polymer melts* (2nd ed.). George Godwin Limited.
- Bühl, R. (1999). Options for poly(vinyl chloride) feedstock recycling Results of research project on feedstock recycling processes. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 28(3), 131–135. <https://doi.org/10.1179/146580199101540231>
- Campanelli, J. R., Gurer, C., Rose, T. L., & Varner, J. E. (2004). Dispersion, temperature and torque models for an internal mixer. *Polymer Engineering and Science*, 44(7), 1247–1257. <https://doi.org/10.1002/pen.20120>
- Cha, J. (2006). Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Resin. In J. M. Margolis (Ed.), *Engineering Plastics Handbook* (p. 102). McGraw-Hill.
- Chum, P. S., & Swogger, K. W. (2008). Olefin polymer technologies-History and recent progress at The Dow Chemical Company. *Progress in Polymer Science*, 33(8), 797–819. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.003>
- Chung, C. I. (2011). *Extrusion of Polymers: Theory and Practice*. Hanser Publishers.
- Corradini, E., De Medeiros, E. S., Carvalho, A. J. F., Curvelo, A. A. S., & Mattoso, L. H. C. (2006). Mechanical and morphological characterization of starch/zein blends plasticized with glycerol. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(6), 4133–4139. <https://doi.org/10.1002/app.23570>
- Cracknell, P. S., & Dyson, R. W. (1993). *Handbook of Thermoplastics Injection Mould Design*. Springer.
- Dae Han, C., & Rao, D. *Studies on Wire Coating Extrusion. 1. The Rheology of Wire Coating Extrusion*.
- Dang, K. M., & Yoksan, R. (2021). Thermoplastic starch blown films with improved mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 188, 290–299. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.027>

- Dealy, J. M., & Wissbrun, K. F. (1990). *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9738-4>
- der Chien, R., Cheng, C.-K., Chen, S.-C., & Yeh, H.-Y. (1999). Investigations on the Impact Performance of Gas-Assisted Injection Molded Polystyrene Parts. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 18(14), 1322–1335. <https://doi.org/10.1177/073168449901801404>
- Endo, K. (2002). Synthesis and structure of poly(vinyl chloride). *Progress in Polymer Science*, 27, 2021–2054. www.elsevier.com/locate/ppolysci
- Fenollar, O., Garcia-Sanoguera, D., Sanchez-Nacher, L., Lopez, J., & Balart, R. (2010). Effect of the epoxidized linseed oil concentration as natural plasticizer in vinyl plastisols. *Journal of Materials Science*, 45(16), 4406–4413. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4520-6>
- Frizelle, W. G. (2017). Injection Molding Technology. In K. Myer (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook* (2nd ed., pp. 191–202). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00010-9>
- González-Sánchez, C., Martínez-Aguirre, A., Pérez-García, B., Acosta, J., Fonseca-Valero, C., de la Orden, M. U., Sánchez, C., & Martínez Urreaga, J. (2016). Enhancement of mechanical properties of waste-sourced biocomposites through peroxide induced crosslinking. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 80, 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.032>
- Han, C. D., & Rao, D. (1978). Studies on Wire Coating Extrusion. 1. The Rheology of Wire Coating Extrusion. *Polymer Engineering and Science*, 18(13), 1019–1029.
- Hicks, E. M., Ultee, A. J., & Drougas, J. (1965). Spandex elastic fibers. *Science*, 373–379.
- Higa, C. M., Tek, A. T., Wojtecki, R. J., & Braslau, R. (2018). Non-migratory internal plasticization of poly(vinyl chloride) via pendant triazoles bearing alkyl or polyether esters. *Polymer Chemistry*, 56(21), 2397–2411.
- Honarkar, H. (2018). Waterborne polyurethanes: A review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39(4), 507–516. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1327818>

- Ignatyev, I. A., Thielemans, W., & Vander Beke, B. (2014). Recycling of polymers: A review. *ChemSusChem*, 7(6), 1579–1593. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300898>
- Ismail, S., Mansor, N., Majeed, Z., & Man, Z. (2016). Effect of water and [Emim][OAc] as plasticizer on gelatinization of starch. *Procedia Engineering*, 148, 524–529. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.542>
- Jabarin, S. A. (1982). Optical Properties of Thermally Crystallized Poly(ethylene terephthalate). *Polymer Engineering and Science*, 22(13), 815–821.
- Jaluria, Y. (2001). Fluid Flow Phenomena in Materials Processing-The 2000 Freeman Scholar Lecture. *Journal of Fluids Engineering*, 123, 173–210. <https://doi.org/10.1115/1.1350563>
- Jia, P., Zhang, M., Hu, L., & Zhou, Y. (2016). Green plasticizers derived from soybean oil for poly(vinyl chloride) as a renewable resource material. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 33(3), 1080–1087. <https://doi.org/10.1007/s11814-015-0213-9>
- Jiang, K.-Y., Zhang, Y., Yang, L., & Lu, Y. (2019). Study on Influence of Co-Injection Molding Process on Self-Reinforcing Characteristics of Self-Reinforced Polypropylene Composite via Visualization. *International Polymer Processing*, 34(4), 408–415. <https://doi.org/10.3139/217.3773>
- Jin, X., Guo, N., You, Z., & Tan, Y. (2020). Design and performance of polyurethane elastomers composed with different soft segments. *Materials*, 13(21), 1–26. <https://doi.org/10.3390/ma13214991>
- Kaminsky, W. (2012). Discovery of Methylaluminoxane as Cocatalyst for Olefin Polymerization. *Macromolecules*, 45(8), 3289–3297. <https://doi.org/10.1021/ma202453u>
- Kosmidis, V. A., Achilias, D. S., & Karayannidis, G. P. (2001). Poly(ethylene terephthalate) recycling and recovery of pure terephthalic acid. Kinetics of a phase transfer catalyzed alkaline hydrolysis. *Macromolecular Materials and Engineering*, 286, 640–647.
- Kostic, M. M., & Reifschneider, L. G. (2006). Design of Extrusion Dies. In *Encyclopedia of Chemical processing* (1st ed., Vol. 10, pp. 633–649). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.1081/E-ECHP-120039324>

- Latos-Brozio, M., & Masek, A. (2020). The application of natural food colorants as indicator substances in intelligent biodegradable packaging materials. *Food and Chemical Toxicology*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.110975>
- Lee, N. C. (2006). Blow Molding. In C. A. Harper (Ed.), *Handbook of Plastic Process*.
- Li, T. T., Feng, L. F., Gu, X. P., Zhang, C. L., Wang, P., & Hu, G. H. (2021). Intensification of Polymerization Processes by Reactive Extrusion. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 60(7), 2791–2806. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05078>
- Liu, P., Zhao, M., & Guo, J. (2006). Thermal stabilities of poly(vinyl chloride)/calcium carbonate (PVC/CaCO₃) composites. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 45(6), 1135–1140. <https://doi.org/10.1080/00222340600962650>
- Liu, S.-J., & Wu, Y.-C. (2007). Dynamic visualization of cavity-filling process in fluid-assisted injection molding-gas versus water. *Polymer Testing*, 26(2), 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.10.008>
- Liu, Y., & Wang, Q. (2009). The investigation on the flame retardancy mechanism of nitrogen flame retardant melamine cyanurate in polyamide 6. *Journal of Polymer Research*, 16(5), 583–589. <https://doi.org/10.1007/s10965-008-9263-6>
- Lugão, A. B., Artel, B. W. H., Yoshiga, A., Lima, L. F. C. P., Parra, D. F., Bueno, J. R., Liberman, S., Farrah, M., Terçariol, W. R., & Otaguro, H. (2007). Production of high melt strength polypropylene by gamma irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 76(11–12), 1691–1695. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.03.013>
- Madbouly, S. A., Xia, Y., & Kessler, M. R. (2013). Rheological behavior of environmentally friendly castor oil-based waterborne polyurethane dispersions. *Macromolecules*, 46(11), 4606–4616. <https://doi.org/10.1021/ma400200y>
- McCrum, N. G., Buckley, C. P., & Bucknall, C. B. (2011). *Principles of polymer engineering*. Oxford University Press.
- McGonigle, E.-A., Liggat, J. J., Pethrick, R. A., Jenkins, S. D., Daly, J. H., & Hayward, D. (2004). Permeability of N₂, Ar, He O₂ and CO₂ through oriented polyester films-dependence

- on free volume. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42(15), 2916–2929. <https://doi.org/10.1002/polb.20141>
- Mohammed, J. S. (2016). Applications of 3D printing technologies in oceanography. In *Methods in Oceanography* (Vol. 17, pp. 97–117). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.08.001>
- Mount, E. M. (2017). Applied Plastics Engineering Handbook Processing, Materials and Applications. In M. Kutz (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook* (2nd ed., pp. 217–264). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00012_2
- Muller, B. (2011). Colorants for Thermoplastic Polymers. In *Applied Plastics Engineering Handbook* (pp. 435–440). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10043-1>
- Najafi, V., & Abdollahi, H. (2020). Internally plasticized PVC by four different green plasticizer compounds. *European Polymer Journal*, 128, 109620. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109620>
- Nießner, N. (2002). ABS and styrene copolymers-an overview. *E-Polymers*, 003, 1–10. <http://www.e-polymers.org>
- Nyambo, C., Songtipya, P., Manias, E., Jimenez-Gasco, M. M., & Wilkie, C. A. (2008). Effect of MgAl-layered double hydroxide exchanged with linear alkyl carboxylates on fire-retardancy of PMMA and PS. *Journal of Materials Chemistry*, 18(40), 4827–4838. <https://doi.org/10.1039/b806531d>
- Osswald, T. A. (1998). *Polymer Processing Fundamentals*. Hanser Publisher Inc.
- Osswald, T. A., & Menges, G. (1995). *Material Science of Polymers for Engineers*. Hanser Pub Inc.
- Patri, M., Rath, S. K., & Suryavansi, U. G. (2006). A novel polyurethane sealant based on hydroxy-terminated polybutadiene. *Journal of Applied Polymer Science*, 99(3), 884–890. <https://doi.org/10.1002/app.22815>
- Paxton, N. C., Allenby, M. C., Lewis, P. M., & Woodruff, M. A. (2019). Biomedical applications of polyethylene. *European Polymer Journal*, 118, 412–428. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.05.037>

Phetphaisit, C. W., Bumee, R., Namahoot, J., Ruamcharoen, J., & Ruamcharoen, P. (2013).

Polyurethane polyester elastomer: Innovative environmental friendly wood adhesive from modified PETs and hydroxyl liquid natural rubber polyols. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 41, 127–131.

Phetphaisit, C. W., Namahoot, J., Saengkiattiyut, K., Ruamcharoen, J., & Ruamcharoen, P.

(2015). Green metal organic coating from recycled PETs and modified natural rubber for the automobile industry. *Progress in Organic Coatings*, 86, 181–189.

<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.04.025>

Plastics Technology. (2019, May 3). <https://www.Ptonline.com/Articles/Extrusion-Line>.

Polymer mixers. (2017, October 20). <https://www.lncmachine.com>.

Qiao, X., Tang, Z., & Sun, K. (2011). Plasticization of corn starch by polyol mixtures.

Carbohydrate Polymers, 83(2), 659–664. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.035>

Qin, Y. (2016). A brief description of textile fibers. In *Medical Textile Materials*. Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100618-4.00003-0>

Rahmah, M., Mohd Nurazzi, N., Nurdyana, A. R. F., & Anas, S. M. S. (2017). Effect of epoxidised soybean oil loading as plasticiser on physical, mechanical and thermal properties of polyvinylchloride. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 223(1), 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/223/1/012048>

Rajput, S. D., Hundiware, D. G., Mahulikar, P. P., & Gite, V. V. (2014). Fatty acids based transparent polyurethane films and coatings. *Progress in Organic Coatings*, 77(9), 1360–1368. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.04.030>

Rauwendaal, C. (1981). Analysis and experimental evaluation of twin screw extruders.

Polymer Engineering and Science, 21(16), 1092–1100.

Rauwendaal, C. (1998a). *Polymer mixing: A self-study guide* (1st ed.). Hanser Publishers.

Rauwendaal, C. (1998b). *Understanding Extrusion*. Carl Hanser Verlag.

- Ruamcharoen, J., Munlee, R., & Ruamcharoen, P. (2020). Improvement of water vapor barrier and mechanical properties of sago starch-kaolinite nanocomposites. *Polymer Composites*, 41(1), 201–209. <https://doi.org/10.1002/pc.25360>
- Ruamcharoen, P., Phetphaisit, C. W., Bumee, R., Ruamcharoen, J., Niyomdech, B., & Nillawat, S. (2012). The chemical modification of waste PET and its application for a wood-polymer composite binder. *Advanced Materials Research*, 488–489, 648–653. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.648>
- Ruan, C. (2018). “Skin-Core-Skin” Structure of Polymer Crystallization Investigated by Multiscale Simulation. *Materials*, 11(4), 610. <https://doi.org/10.3390/ma11040610>
- Saeki, Y., & Emura, T. (2002). Technical progresses for PVC production. *Progress in Polymer Science*, 27, 2055–2131. www.elsevier.com/locate/ppolysci
- Saetung, A., Rungvichaniwat, A., Campistron, I., Klinpituksa, P., Laguerre, A., Phinyocheep, P., & Pilard, J. (2010). Controlled degradation of natural rubber and modification of the obtained telechelic oligoisoprenes: Primary study of their potentiality as polyurethane foam precursors. *Journal of Applied Polymer Science*, 117, 1279–1289.
- Sakai, T. (1991). Report on the state of the art: Reactive processing using twin screw extruders. *Advances in Polymer Technology*, 11(2), 99–108.
- Salem, D. R. (1998). Microstructure development during constant-force drawing of poly(ethylene terephthalate) film. An abbreviated version of this paper was presented at the SPE Annual Technical Conference, 6–10 May 1996, Indianapolis, Indiana, USA. *Polymer*, 39(26), 7067–7077. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00109-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00109-8)
- Sastrohartono, T., Jalurla, Y., & Karwe, M. V. (1995). Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in twin-screw extruders for non Newtonian materials. *Polymer Engineering and Science*, 35(15), 1213–1221.
- Scharte, B. (2010). Phosphorus-based flame retardancy mechanisms-old hat or a starting point for future development? *Materials*, 3(10), 4710–4745. <https://doi.org/10.3390/ma3104710>

- Schmidt, F. M., Agassant, J. F., & Bellet, M. (1998). Experimental study and numerical simulation of the injection stretch/blow molding process. *Polymer Engineering & Science*, 38(9), 1399–1412. <https://doi.org/10.1002/pen.10310>
- Seldén, R. (2000). Co-injection molding: Effect of processing on material distribution and mechanical properties of a sandwich molded plate. *Polymer Engineering & Science*, 40(5), 1165–1176. <https://doi.org/10.1002/pen.11244>
- Sharma, N. K., Verma, C. S., Chariar, V. M., & Prasad, R. (2015). Eco-friendly flame-retardant treatments for cellulosic green building materials. *Indoor and Built Environment*, 24(3), 422–432. <https://doi.org/10.1177/1420326X13516655>
- Sriramulu, D., Reed, E. L., Annamalai, M., Venkatesan, T. V., & Valiyaveetil, S. (2016). Synthesis and Characterization of Superhydrophobic, Self-cleaning NIR-reflective Silica Nanoparticles. In *Scientific Reports* (Vol. 6). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/srep35993>
- Stansbury, J. W., & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 32(1), 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>
- Tadmor, Z., & Gogos, C. G. (2006). *Principles of polymer processing* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Tadmor, Z., & Klein, I. (1978). *Engineering Principle of Plasticating Extrusion*. Krieger.
- Tan, S., Abraham, T., Ference, D., & Macosko, C. W. (2011). Rigid polyurethane foams from a soybean oil-based Polyol. *Polymer*, 52(13), 2840–2846. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.04.040>
- Tanaka, R., Hirose, S., & Hatakeyama, H. (2008). Preparation and characterization of polyurethane foams using a palm oil-based polyol. *Bioresource Technology*, 99(9), 3810–3816. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.07.007>
- Tang, H., Dai, W., & Chen, B. (2008). A new method for producing high melt strength polypropylene with reactive extrusion. *Polymer Engineering and Science*, 48(7), 1339–1344. <https://doi.org/10.1002/pen.21105>

- Tao, W., & Li, J. (2018). Melamine cyanurate tailored by base and its multi effects on flame retardancy of polyamide 6. *Applied Surface Science*, 456, 751–762.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.215>
- Throne, J. (2017). Thermoforming. In M. Kutz (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications* (2nd ed., pp. 345–375).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00016-X>
- Thunwall, M., Kuthanová, V., Boldizar, A., & Rigdahl, M. (2008). Film blowing of thermoplastic starch. *Carbohydrate Polymers*, 71(4), 583–590.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.07.001>
- Thuy, N. T., & Duc, V. M. (2020). The epoxidized linseed oil as a secondary plasticizer in PVC processing. *Vietnam Journal of Chemistry*, 58(4), 534–539.
<https://doi.org/10.1002/vjch.202000023>
- Tomisawa, R., Ikaga, T., Kim, K. H., Ohkoshi, Y., Okada, K., Masunaga, H., Kanaya, T., Masuda, M., & Maeda, Y. (2017). Effect of melt spinning conditions on the fiber structure development of polyethylene terephthalate. *Polymer*, 116, 367–377.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.12.077>
- Van Belle, A. V., Demets, R., Mys, N., Van Kets, K. V., Dewulf, J., Van Geem, K. V., De Meester, S. D., & Ragaert, K. (2020). Microstructural contributions of different polyolefins to the deformation mechanisms of their binary blends. *Polymers*, 12(5).
<https://doi.org/10.3390/POLYM12051171>
- Vlachopoulos, J., Castillo, R., & Polychronopoulos, N. D. (2012). Blown film dies. In O. S. Carneiro & M. Nobrega (Eds.), *Design of extrusion forming tools* (1st ed.). Smithers Rapra.
- Wang, L., He, X., Lu, H., Feng, J., Xie, X., Su, S., & Wilkie, C. A. (2011). Flame retardancy of polypropylene (nano)composites containing LDH and zinc borate. *Polymers for Advanced Technologies*, 22(7), 1131–1138. <https://doi.org/10.1002/pat.1927>
- Wu, C. H., Chang, C. Y., & Li, J. K. (2002). Glycolysis of rigid polyurethane from waste refrigerators. *Polymer Degradation and Stability*, 75(3), 413–421.
[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00237-3](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00237-3)

Wu, C. H., Chang, C. Y., Cheng, C. M., & Huang, H. C. (2003). Glycolysis of waste flexible polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*, 80(1), 103–111.

[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00390-7](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00390-7)

Yousif, E., & Haddad, R. (2013). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: Review. In *SpringerPlus* (Vol. 2, Issue 1). SpringerOpen.

<https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-398>

Zeigler, K., & Gellert, H. G. (1953). *Polymerization of ethylene* (Patent US Patent 2699457).