ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

วศ บร
อว 14

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 7 ว

ของ
นางสาวจิราวรรณ หาญวัฒนกุล
นักวิทยาศาสตร์ 6 ว

เรื่องที่ 1
การศึกษาความเสถียรของพลาสติก

ผู้ร่วมดำเนินการ
นางสาวเดือนเพ็ญ วนิชพิมลอนันต์
นักวิทยาศาสตร์ 7 ว

กลุ่มบริหารจัดการทดสอบความชำนาญ
สำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

พ.ศ.2547

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 7 ว

ของ
นางสาวจิราวรรณ หาญวัฒนกุล
นักวิทยาศาสตร์ 6 ว

เลขหมู่ วพ ษ
ออ 14
เลขทะเบียน 13899
วันที่ 25 ต.ค. 49

เรื่องที่ 1
การศึกษาความเสถียรของพลาสติก

ผู้ร่วมดำเนินการ
นางสาวเดือนเพ็ญ วนิชพิมลอนันต์
นักวิทยาศาสตร์ 7 ว

กลุ่มบริหารจัดการทดสอบความชำนาญ
สำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

พ.ศ.2547

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

บทคัดย่อ

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของพลาสติก เช่น ความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่น ซึ่งสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ เหล่านี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อเก็บพลาสติกไว้เป็นเวลานาน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของพลาสติก เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่ระยะเวลาต่าง ๆ

จากการทดสอบพลาสติกเพื่อหาความต้านแรงดึง การยืดตัว ตามมาตรฐาน ASTM D 638 ความแข็ง และความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D 2240 และ ASTM D 792 ตามลำดับ สรุปได้ว่า

- ชิ้นทดสอบโพลิเอทิลีน สามารถเก็บไว้ได้ 10 10 9 และ 23 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็งและความหนาแน่น ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ

- ชิ้นทดสอบโพลิโพรพิลีน เมื่อเก็บไว้ 5 5 และ 4 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว และความแข็ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ แต่สามารถเก็บชิ้นทดสอบโพลิโพรพิลีนไว้ได้นานถึง 17 เดือน โดยที่ค่าความหนาแน่นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

- ชิ้นทดสอบไนลอน เมื่อเก็บไว้ 12 และ 4 เดือน ค่าความต้านแรงดึง และความหนาแน่นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ แต่สามารถเก็บชิ้นทดสอบไนลอนไว้ได้นานถึง 14 และ 21 เดือน โดยที่ค่าการยืดตัว และความแข็งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ

- ชิ้นทดสอบโพลิออกซิเมทิลีน เมื่อเก็บไว้ 8 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ แต่สามารถเก็บชิ้นทดสอบโพลิออกซิเมทิลีนไว้ได้นานถึง 23 เดือน โดยที่ค่าความหนาแน่นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

- ชิ้นทดสอบโคโพลิเมอร์ อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน เมื่อเก็บไว้ 14 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

- ชิ้นทดสอบโพลิไวนิลคลอไรด์ สามารถเก็บได้ 26 เดือน โดยที่ค่าความหนาแน่นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

- พลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนสามารถเก็บชิ้นทดสอบไว้ได้นานกว่าพลาสติกชนิดโพลิโพรพิลีน

- ค่าความหนาแน่นจะมีความเสถียรมากกว่าสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ อาจเนื่องมาจากน้ำหนักของพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่น

- ไนลอนมีค่าการยืดตัวเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมอย่างเห็นได้ชัดกว่าพลาสติกอีก 5 ชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไนลอนเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุล จึงให้ค่าการยืดตัวมากขึ้น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
สารบัญ	ii
สารบัญตาราง	iii
สารบัญภาพ	iv
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาทดลอง	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
1.4 ระยะเวลาดำเนินการ	2
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	3
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการ	31
3.1 ตัวอย่าง	31
3.2 วัสดุและอุปกรณ์	31
3.3 สารเคมี สารละลายและวิธีเตรียม	31
3.4 การศึกษาทดลอง	33
บทที่ 4 ผลการศึกษาทดลอง	35
4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยสถิติ t-test ของค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นของโพลิเอทิลีน	35
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยสถิติ t-test ของค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นของโพลิโพรพิลีน	36
4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยสถิติ t-test ของค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นของไนลอน โพลิออกซิเมทิลีน โคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน และโพลิไวนิลคลอไรด์	37
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษาทดลอง	38
กิตติกรรมประกาศ	39
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก ก. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ	41
ภาคนวก ข. ผลการศึกษาทดลองความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นของโพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน ไนลอน โพลิออกซิเมทิลีน โคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน และโพลิไวนิลคลอไรด์	43

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	แสดงขนาดชิ้นทดสอบความต้านแรงดึงและการยืดตัว	32
ตารางที่ 2	ผลการวิเคราะห์ด้วยสถิติ t-test ของค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นของโพลิเอทิลีน	35
ตารางที่ 3	ผลการวิเคราะห์ด้วยสถิติ t-test ของค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นของโพลิโพรพิลีน	36
ตารางที่ 4	ผลการวิเคราะห์ด้วยสถิติ t-test ของค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นของไนลอน โพลิออกซิเมทิลีน โคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน และโพลิไวนิลคลอไรด์	37
ตารางที่ 5	ผลการศึกษาทดลองค่าความต้านแรงดึงค่าเดิมของโพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน ไนลอน โพลิออกซิเมทิลีน โคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน	44
ตารางที่ 6	ผลการศึกษาทดลองค่าความต้านแรงดึงค่าใหม่ของโพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน ไนลอน โพลิออกซิเมทิลีน โคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน	45
ตารางที่ 7	ผลการศึกษาทดลองค่าการยืดตัวค่าเดิมของโพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน ไนลอน โพลิออกซิเมทิลีน โคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน	46
ตารางที่ 8	ผลการศึกษาทดลองค่าการยืดตัวค่าใหม่ของโพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน ไนลอน โพลิออกซิเมทิลีน โคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน	47
ตารางที่ 9	ผลการศึกษาทดลองค่าความแข็งค่าเดิมของโพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน ไนลอน	48
ตารางที่ 10	ผลการศึกษาทดลองค่าความแข็งค่าใหม่ของโพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน ไนลอน	49
ตารางที่ 11	ผลการศึกษาทดลองค่าความหนาแน่นค่าเดิมของโพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน ไนลอน โพลิออกซิเมทิลีน โพลิไวนิลคลอไรด์	50
ตารางที่ 12	ผลการศึกษาทดลองค่าความหนาแน่นค่าใหม่ของโพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน ไนลอน โพลิออกซิเมทิลีน โพลิไวนิลคลอไรด์	50
ตารางที่ 13	ตารางเปรียบเทียบผลการศึกษาทดลองค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นของโพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน	51
ตารางที่ 14	ตารางเปรียบเทียบผลการศึกษาทดลองค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นของ ไนลอน โพลิออกซิเมทิลีน โคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน โพลิไวนิลคลอไรด์	52

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1	โครงสร้างของโพลิเอทิลีน	3
รูปที่ 2	โครงสร้างโพลิโพรพิลีน	7
รูปที่ 3	โครงสร้างโพลิไวนิลคลอไรด์	9
รูปที่ 4	ปฏิกิริยาการเตรียมไวนิลคลอไรด์	10
รูปที่ 5	ปฏิกิริยาการเกิดโคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน	13
รูปที่ 6	ปฏิกิริยาการเกิดอะไครโลไนไตรล์	13
รูปที่ 7	ปฏิกิริยาการเกิดบิวตะไดอีน	13
รูปที่ 8	ปฏิกิริยาการเกิดสไตรีน	14
รูปที่ 9	การผลิต ABS TYPE I	14
รูปที่ 10	การผลิต ABS TYPE II	15
รูปที่ 11	ปฏิกิริยาระหว่างไดเอมีนกับกรดไดคาร์บอกซิลิกได้เกลือไนลอน	16
รูปที่ 12	ปฏิกิริยาควบแน่นตัวเองของกรด ω-อะมิโน	16
รูปที่ 13	ปฏิกิริยาการเปิดวงแลกทัม	16
รูปที่ 14	ปฏิกิริยาการกรดอะไดปิก	16
รูปที่ 15	ปฏิกิริยาการเกิดเฮกซาเมทิลีนไดเอมีน	17
รูปที่ 16	ปฏิกิริยาการเกิดไนลอน 6,6	18
รูปที่ 17	ปฏิกิริยาการเกิด ไนลอน 6,10	18
รูปที่ 18	ปฏิกิริยาการเกิด ไนลอน 6	18
รูปที่ 19	ปฏิกิริยาการเกิดไนลอน 11	19
รูปที่ 20	ปฏิกิริยาการเกิดไนลอน 12	19
รูปที่ 21	ปฏิกิริยาการเกิดพันธะไฮโดรเจนของไนลอน	22
รูปที่ 22	Stress-Strain Curve ในการทดสอบความต้านแรงดึงและการยืดตัว	25
รูปที่ 23	เครื่องมือวัดความต้านแรงดึงและการยืดตัว	26
รูปที่ 24	เครื่องมือวัดความแข็งแบบ Durometer Hardness (Shore D)	27
รูปที่ 25	อุปกรณ์หาความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ	29
รูปที่ 26	อุปกรณ์หาความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ	29
รูปที่ 27	แสดงการหาความหนาแน่นของตัวอย่างพอลิเมอร์	30
รูปที่ 28	แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ Type I และ Type IV	32

บทที่ 1
บทนำ

การควบคุมคุณภาพของการผลิตพลาสติกเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ผลผลิตมีคุณภาพคงที่และเป็นที่พอใจของลูกค้า การควบคุมคุณภาพทำโดยควบคุมทุกขั้นตอนในการผลิต รวมทั้งตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบด้วย ผลผลิตที่ได้ก็ต้องมีการตรวจสอบคุณภาพเช่นเดียวกัน เพื่อให้ได้มาตรฐานสากลหรือมาตรฐานระดับประเทศ

ในการตรวจสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์หรือวัตถุดิบก็ควรให้ห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน เช่น มาตรฐาน ISO/IEC 17025 ซึ่งจะต้องใช้บุคคลากรที่มีความชำนาญ วิธีการที่ได้มาตรฐาน เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องเป็นระยะ ๆ เพื่อให้มั่นใจว่าผลการทดสอบมีความถูกต้องแม่นยำ

1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาทดลอง

วิธีการหนึ่งในการตรวจสอบ (Validation) ความถูกต้องของเครื่องมือก็คือใช้วัสดุอ้างอิง (reference materials) ที่ทราบค่าที่ถูกต้อง หรือถ้าไม่มีอาจจะใช้ตัวอย่างที่เคยทดสอบมาแล้วจากเครื่องมือที่ตรวจสอบความถูกต้อง(Calibrate) มาแล้ว และใช้วิธีการที่ได้มาตรฐาน (Standard method) มาตรวจสอบเป็นระยะ ๆ และใช้หลักเกณฑ์ทางสถิติในการพิจารณาค่าที่ทดสอบมีค่าเท่าหรือใกล้เคียงจนเป็นที่ยอมรับได้หรือไม่ ถ้าค่าเดิมและค่าใหม่เท่าหรือใกล้เคียงกันจนเป็นที่ยอมรับได้ก็แสดงว่าเครื่องมือยังให้ผลการทดสอบถูกต้อง แม่นยำ เชื่อถือได้ แต่ถ้าได้ค่าที่ห่างกันมากแสดงว่าเครื่องมืออาจมีปัญหาหรืออาจเนื่องมาจากตัวอย่างที่นำมาทดสอบอาจมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือเกิดการเสื่อมสลายจนค่าที่ทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากต้องนำตัวอย่างใหม่มาทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมืออีกครั้ง

จากการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือทดสอบความต้านแรงดึง การยืดตัว และความแข็งเป็นระยะ ๆ พบว่าพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หรือเกิดการเสื่อมสลายจึงเป็นที่มาของการศึกษาครั้งนี้เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของพลาสติกที่ระยะเวลาต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาสมบัติทางกายภาพของพลาสติก 6 ชนิด คือ โพลิเอทิลีน (Polyethylene:PE) โพลิโพรพิลีน (Polypropylene:PP) ไนลอน โพลิออกซีเมทิลีน (Polyoxymethylene:POM) โคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตลีน (Acrylonitrile butadiene –styrene copolymer : ABS) โพลิไวนิล-คลอไรด์ (Polyvinychloride : PVC) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่ระยะเวลาต่าง ๆ

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.3.1 เพื่อใช้เป็นข้อมูลศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของพลาสติกแต่ละชนิดตามที่กล่าวในข้อ 1.2 ในระยะเวลาต่าง ๆ

1.3.2 เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับผู้ผลิต ผู้จำหน่ายและผู้ใช้พลาสติกได้ทราบถึงสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเพื่อใช้ในการกำหนดปริมาณการผลิตและปริมาณการสั่งซื้อได้เหมาะสม

1.4 ระยะเวลาในการดำเนินการ

26 มกราคม 2545-27 มีนาคม 2547

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

พลาสติกเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ เป็นวัสดุที่มีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันและในอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถสร้าง ดัดแปลงให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ง่าย และมีสมบัติทนต่อการสึกหรอและฉีกขาดได้ดี เหนียว คงรูป สีสรรค์สวยงาม แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะพลาสติกชนิดที่ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพ ดังนี้

2.1 พลาสติกชนิดต่าง ๆ

2.1.1 โพลิเอทิลีน (Polyethylene : PE)

สูตรโครงสร้าง $\left[-CH_2-CH_2-\right]_n$

รูปที่ 1 โครงสร้างโพลิเอทิลีน

ปัจจุบัน polyethyene) มีการผลิตโพลิเอทิลีนหลายชนิดทั้งแบบมีกิ่งสาขา ซึ่งจะมีความหนาแน่นต่ำ เรียกชื่อย่อว่า LDPE (low density polyethyene) , ความหนาแน่นต่ำแบบเส้นชื่อย่อว่า LLDPE (linear low density polyethyene MDPE (medium density polyethyene) และอีกตัวที่ผลิตได้นานมาแล้วแต่หลัง คือ) โพลิ-เอทิลีนความหนาแน่นสูงชื่อย่อว่า HDPE (high density polyethyene)

2.1.1.1 การเตรียมโพลิเอทิลีน

1) โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene : LDPE)

โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เป็นโพลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นในทางการค้า ด้วยกระบวนการผลิตแบบความดันสูง (High Pressure Process) ภาพใต้ความดัน 150-350 MPa (1,500-3,500 atm) และอุณหภูมิ 80-300 ^{o}C โดยการใช้สารเริ่มต้นที่ให้อนุมูลอิสระ เช่น อะโซไดไอโซบิวไทโรไนไตรล์ (azodi-isobutyronitrile) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์(benzoyl peroxide) หรือออกซิเจน (จะใช้ความดัน 1,500 atm อุณหภูมิ 200 ^{o}C และออกซิเจนประมาณ 0.03-0.1%)

การผ่านโมโนเมอร์ และสารเริ่มต้นเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ (reactor) จะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมาก ต้องใช้ระบบทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพสูง (ให้มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวปริมาตรสูงมากในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง) โดยใช้น้ำ หรือของเหลวเฉื่อย (inert liquid) เช่น เบนซีน ไหลผ่านท่อเพื่อช่วยระบายความร้อน

โมโนเมอร์จะเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ 10-30 % ภายหลังจากแยกพอลิเมอร์ออกจากแก๊สแล้ว โพลิ-เอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ได้จะถูกอัดรีดออกมาเป็นแถบเล็ก ๆ (ribbon) แล้วตัดเป็นเม็ดเล็ก ๆ ต่อไป

ลักษณะจำเพาะของการสังเคราะห์โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ภายใต้ความดันสูง คือ จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมาก และปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของโมโนเมอร์ อาจกล่าวได้ว่าการใช้โมโนเมอร์ความเข้มข้นสูง ๆ และความดันสูงจะทำให้ได้โมโนเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีกิ่งก้านสาขา จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy,IR) พบว่าโมเลกุลของโพลิเอทิลีนที่ได้จะมีหมู่ CH_3 อยู่ประมาณ 30 หมู่ ต่อคาร์บอน 1,000 อะตอม เนื่องจาก CH_3 จะอยู่เฉพาะที่ส่วนปลายของโมเลกุล แสดงให้เห็นโมเลกุลมีกิ่งก้านสาขามากมาย เพราะถ้าเป็นโมเลกุลแบบเส้น จะมีหมู่ CH_3 เพียง 2 หมู่เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่ากิ่งก้านที่เกิดขึ้นจะไม่ยาวนัก มีเพียง 2-3 C เท่านั้น การเกิดกิ่งก้านสาขา เชื่อว่ามาจากการย้ายอนุมูลภายในโมเลกุล หรือที่เรียกว่า " backbiting" ซึ่งเกิดได้ดีเมื่อเป็นวงแหวน 6 เหลี่ยม และกิ่งที่ได้เป็นหมู่บิวทิล

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความดัน, ชนิดของสารเริ่มต้น,ส่วนผสม, การใส่ตัวย้ายสายโซ่ (chain transfer agents) และการฉีดสารเริ่มต้นเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันทำให้ได้ โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น กิ่งก้านสาขา ,น้ำหนักโมโลกุล และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ได้จะมีความหนาแน่น 0.915-0.94 g/cm^3 เนื่องจากโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีกิ่งก้านสาขามาก ทำให้มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เกิดเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน ความหนาแน่นจึงต่ำ และค่อนข้างใส มีลักษณะอ่อนตัว และความเหนียวไม่สูงนัก

2) โพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene : HDPE)

โพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง มีการใช้งานกันมานานแล้ว แต่เกิดหลังโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ สายโมเลกุลแทบไม่มีกิ่งก้านสาขาเลย โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ จึงมีโครงสร้างที่เป็นผลึกมากกว่าโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และมีความหนาแน่นสูงกว่าด้วยจึงมีความแข็งแกร่ง, ความเหนียว, ความทนแรงดึง, ความแข็ง และความทนทานต่อความร้อนและสารเคมีมากกว่า โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

การสังเคราะห์โพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ต่างจากโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ตรงที่ใช้ความดัน และอุณหภูมิต่ำกว่ากระบวนการผลิต โพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่สำคัญมีดังนี้

กระบวนการซีเกลอร์ (Zeigler Process) กระบวนการซีเกลอร์ในการทางค้าจะกระทำภายใต้ความดันที่สูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย คือ 0.2-0.4 MPa อุณหภูมิ 50-75 ^{o}C โดยปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันเป็นแบบโคออร์ดิเนชัน(coordination polymerization) เพราะกลไกของปฏิกิริยาจะเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับโมเมอร์ (catalyst-monomeer coordination complex) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาโคออนิเนชันจะได้จากปฏิกิริยาระหว่างอัลคิลของโลหะหมู่ที่ I - I I กับเฮไลด์ของโลหะหมู่ที่ IV – VII ในตารางพีริออดิก

และตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ทิทาเนียมเตตระคลอไรด์, อะลูมิเนียมอัลคิล เช่น ไตรเอทิลอลูมิเนียม (triethyl aluminium) และไดเอทิลอะลูมิเนียมคลอไรด์ (diethyl aluminium chloride) เป็นต้น

โพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่ได้จากกระบวนการซีเกลอร์ มีความหนาแน่นปานกลาง (ประมาณ 0.945) g/cm^3 น้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันอาจทำได้โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของ Al-Ti ในตัวเร่งปฏิกิริยา หรือโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวย้ายสายโซ่ เพื่อหยุดการขยายขนาดของโมเลกุล และโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิของปฏิกิริยา โพลิเอทิลีนที่ได้จะต่างจากวิธีความดันสูง คือมีกิ่งก้านสาขาน้อยมาก (พบว่ามีหมู่เอทิล 5-7 หมู่ต่อ C 1000 อะตอมเท่านั้น และไม่พบหมู่บิวทิลเลย) จึงทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้น

กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips Process) การะบวนการนี้จะใช้ความดันประมาณ 3-4 MPa (30-40 atm) ที่อุณหภูมิ 90-160 ^{o}C และใช้โลหะออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เอทิลีนจะถูกลำเลียงเข้าไปในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน เช่น ไซโคลเฮกเซน (cyclohexane) ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยาแขวนลอยอยู่ ตัวทำละลายจะทำหน้าที่ละลายพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น และช่วยถ่ายเทความร้อนของปฏิกิริยา แต่จะเฉื่อยต่อปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิกิริยาที่นิยมใช้ ประกอบด้วย 5% โครเมียมออกไซด์ (ส่วนใหญ่เป็น Cr_2O_3) บนซิลิกา-อะลูมินาที่บดละเอียด (75-90%ซิลิกา) ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยความร้อนประมาณ 250 ^{o}C เมื่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันสิ้นสุดลง ให้ผ่านสารผสมที่ได้ไปยังถังแยกก๊าซ-ของเหลว เพื่อแยกเอทิลีนโมโนเมอร์ที่เหลือออกไป ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแยกออกจากของเหลวด้วยเครื่อง " hot centrifuge" และพอลิเมอร์ถูกแยกออกจากตัวทำละลายโดยใช้ความร้อนสูง หรือทำให้ตกตะกอนโดยใช้ความเย็น

โพลิเอทิลีนที่ได้อาจอยู่ในรูปของสารละลาย (solution) หรือของเหลวข้นหนืด (slurry) ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ ถ้าเป็น " solution process" จะทำที่ 120-160 ^{o}C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์ละลายได้ในสารเจือจาง และสารละลายพอลิเมอร์ที่ร้อนจะถูกดึงออกจากเครื่องปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง และเอทิลีนซึ่งเหลือจากปฏิกิริยาจะถูกล้างออก ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกกำจัดออกโดยการกรอง หรือใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง สำหรับ "slurry process" จะทำที่อุณหภูมิ 90-100 ^{o}C และที่อุณหภูมินี้โพลิเอทิลีนจะละลายในสารเจือจางได้เพียงเล็กน้อย จึงถูกทำให้ตกตะกอนออกมา

กระบวนการแสตนดาร์ดออยล์ (Stardard Oil Process) จะคล้ายกับกระบวนการฟิลลิปส์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน (transition metal oxide) ได้แก่ โมลิบดินัมออกไซด์บนอะลูมินาซึ่งเตรียมได้จากการเผาอะลูมินากับแอมโมเนียมโมลิบเดท ที่อุณหภูมิ 500-600 ^{o}C และผสมกับสารที่เป็นตัวรีดิวส์ เช่น โลหะ IA,IIA หรือพวกไฮไดรด์ เป็นตัวช่วยกระตุ้นให้ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยใช้ความดัน 4-10 MPa (40-80 atm) ที่อุณหภูมิ 200-300 ^{o}C ปฏิกิริยาจะเกิดในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน HDPE ที่ได้จากกระบวนการนี้ มีความหนาแน่นประมาณ 0.96 g/cm^3 คล้ายกับฟิลลิปส์พอลิเมอร์ อีกทั้งยังมีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันอีกด้วย

กระบวนการยูเนียนคาร์ไบด์ (Union Carbide Process) เอทิลีนจะถูกโพลิเมอรไรซ์ในเฟสที่เป็นแก๊ส (gas phase) ภายใต้ความดัน 0.7-2.0 MPa และอุณหภูมิประมาณ 100 ^{o}C ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบโครเมี่ยมอินทรีย์ เช่น chromacene [$(C_3H_2)_2$ Cr] กระบวนการนี้จะใช้ fluidized bed ที่มีเอทิลีนเป็น fluidized gas (รวมทั้งเป็นตัวทำละลายด้วย) HDPE ที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ด (ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ถูกกำจัดออกไป) และสามารถใช้ได้โดยตรง เนื่องจากไม่มีตัวทำละลายมาเกี่ยวข้อง จึงทำให้ "gas phase process" ควบคุมได้ง่าย และใช้พลังน้อยกว่ากระบวนการอื่น ๆ

3) โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น (Linear Low density polyethylene :LLDPE)

โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้นเป็นโคพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีนกับโคโมโนเมอร์ ประเภทแอลฟาโอเลฟิน(alpha olefin, α -olefin) โดยการใช้อุณหภูมิและความดันต่ำกว่ากระบวนการผลิต โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้นกระบวนการผลิต โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น มี 3 วิธี ดังนี้

กระบวนการผลิตแบบสารละลาย (Solution Process) ปฏิกิริยาจะดำเนินไปภายใต้ความดัน 2.5-10 MPa ที่อุณหภูมิ 25-300 ^{o}C โดยใช้โลหะทรานซิชั่นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อเสียของวิธีนี้คือตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวต่ำจึงต้องกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยา และแยกตัวทำละลายที่ตกค้างอยู่ก่อน ทำให้ต้นทุนการผลิตสูง

กระบวนการผลิตแบบสารแขวนลอย (Slurry Process) วิธีนี้จะได้อนุภาคของเม็ดโพลิเมอร์ที่แขวนลอยอยู่ในตัวทำละลาย อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง การผลิต โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้นมักไม่นิยมใช้วิธีนี้เพราะโพลิเอทิลีนจะละลายในตัวทำละลาย

กระบวนการผลิตสถานะแก๊ส (Gas Phase Process) การผลิต โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น วิธีนี้จะนิยมใช้มากที่สุด เริ่มต้นโดยดูปองค์ ประเทศแคนาดา และต่อมาร่วมมือกับบริษัทฟิลลิปส์ในปลายปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันบริษัทยูเนียนคาร์ไบด์ ได้พัฒนากระบวนการผลิตแบบสถานะแก๊ส โดยโมโนเมอร์และตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกป้อนเข้าไปในในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความดัน 0.7-2.1 MPa และอุณหภูมิ 100 ^{o}C หรือต่ำกว่า จะได้โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ 0.910-0.940 g/cm^3 แต่มีกิ่งก้านเป็นสาขาน้อยไม่รุงรังเหมือน โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำทั่ว ๆ ไป ซึ่งโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น จะเหนียวกว่าและทำฟิล์มได้บางกว่า การผลิตก็ใช้ความร้อนต่ำกว่าโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น มีชื่อทางการค้าว่า G-Resin และเรียกกระบวนการนี้ว่า " Unipol " (Fuidized Bed UNIPOL Process) ซึ่งสามารถควบคุมความหนาแน่น ,MFI, การกระจายน้ำหนักโมเลกุล และความยาวโมเลกุลของโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น ได้แน่นอน

2.1.1.2 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ของโพลิเอทิลีน

โพลิเอทิลีน จัดเป็นพอลิเมอร์พวกเทอร์โมพลาสติก ความยืดหยุ่นของพันธะ C-C ทำให้อุณหภูมิ T_g มีค่าต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนที่เป็นอสัณฐานและผลึก T_g มีค่าตั้งแต่ –130 ^{o}C ไปจนถึง 60 ^{o}C ซึ่งมีทั้งต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นโพลิเอทิลีนจึงมีลักษณะทั้งยืดหยุ่นและแข็งที่สภาวะปกติ แล้วแต่ชนิดของมัน อุณหภูมิ T_m ของโพลิเอทิลีนที่ได้จากวิธีใช้ความดันสูงมีค่าเท่ากับ 180 ^{o}C โพลีนเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการซีเกลอร์ T_m เท่ากับ 130 ^{o}C ที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์ และ Standard oil อุณหภูมิ T_m เท่ากับ 133 ^{o}C ความทนต่อแรงดึงมีค่าตั้งแต่ 1500-6100 lb./in^2 ความยืดตัว กรณี LDPE 100-700 % MDPE 50-650 % HDPE 10-650%

2.1.1.3 สมบัติในการละลาย

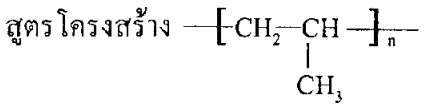
ปกติตัวโพลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวละลายใด ๆ ทั้งสิ้น ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าสูงกว่า 70 ^{o}C ขึ้นไปมันจะเริ่มพองและละลายได้ในตัวละลายพวกโทลูอีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไซลีน และไตรคลอโร-เอทิลีน เป็นต้น พวกที่มีความหนาแน่นต่ำจะใสมากแต่จะขุ่นขึ้นเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น ทนต่อกรดและด่างได้ดี จึงมักนำมาใช้ทำภาชนะบรรจุกรด ด่าง พวกตัวออกซิไดซ์แรง ๆ เช่น กรดไนตริกเข้มข้น หรือโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต โพลิเอทิลีนอาจถูกออกซิไดซ์ในอากาศได้ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย หรือถูกแสงแดด โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ เนื่องจากมีส่วนของอสัณฐานซึ่งมีปริมาตรอิสระยอมให้มีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลได้ จึงมีช่องว่างพอที่จะให้โมเลกุลของก๊าซซึมผ่านได้

2.1.1.4 สมบัติทางไฟฟ้า

เนื่องจากโพลิเอทิลีนเป็นพวกวัสดุไม่มีขั้ว ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จึงเหมาะกับงานที่ใช้เป็นฉนวน เช่น ทำสายไฟหุ้มทองแดง โพลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลางถึงสูง ใช้งานขึ้นรูปโดยการเป่าเกือบ 40 % ของผลผลิตทั้งหมด ใช้ทำขวด และภาชนะสำหรับบรรจุอื่น ๆ ที่ต้องใช้ความต้านทานสูง ทนต่อแรงเค้นสูง สำหรับที่ใช้กับงานที่ขึ้นรูปโดยการฉีด มีประมาณ 20 % ของผลผลิตทั้งหมด ใช้ทำของเด็กเล่น เครื่องใช้ในบ้าน นอกจากนี้ยังใช้ทำแผ่นฟิล์มด้วย ทำเชือก วัสดุเคลือบผิว ท่อ และรางน้ำ เป็นต้น

ปกติโพลิเอทิลีนที่ใช้งานมักจะมีการผามสารต่าง ๆ ด้วย เช่น ฟิลเลอร์ สี เพื่อให้ดูสวยงามน่าใช้ ตัวหน่วงเหนี่ยวการติดไฟ ตัวช่วยให้เกิดการเชื่อมโยง แอนติออกซิแดนต์ ผงคาร์บอนดำช่วยดูดกลืนแสง และสารเติมแต่งที่ช่วยป้องกันการเกิดประจุไฟฟ้าสถิต และช่วยทำให้คุณภาพในการใช้งานเหมาะสมดีขึ้น

2.1.2 โพลิโพรพิลีน (Polypropylene , PP)

สูตรโครงสร้าง 

รูปที่ 2 โครงสร้างโพลิโพรพิลีน

ในช่วงประมาณปี 1950 ขณะนั้นโพลีเมอร์ประเภทโพลีโอลิฟีนมีจำหน่ายอยู่เพียง โพลิเอทิลีน โพลิไอโซบิวทิลีน และโพลิไอโซบิวทิลีน-ไอโซพรีน โคพอลิเมอร์ เท่านั้น ความพยายามที่จะเตรียมโพลีโอลิฟีนตัวอื่น ๆ ยังไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากได้พอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำเกินไปจนกระทั่งปี 1954 แนตตาได้นำตัวเร่งที่ซีเกลอร์ค้นพบมาใช้เตรียมโพลิโพรพิลีน โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบของตัวเร่ง ปรากฏว่าแนตตาได้โพลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงแตกต่างกันไป และมีผลให้สมบัติแตกต่างกันไปด้วย แบบหนึ่งที่สำคัญมากคือไอโซแทกติกโพลิโพรพิลีนซึ่งมีความหนาแน่นสูงเหมือนโพลิเอทิลีน แต่มีจุดอ่อนตัวสูงกว่า และแข็งแรงกว่า ส่วนแบบอื่น ๆ เป็นอะแทกติกโพลิโพรพิลีนมีส่วนของอสัณฐาน ทำให้ความแข็งน้อยลง บริษัทที่ผลิตไอโซแทกติกโพลิโพรพิลีนในทางการค้าครั้งแรก คือ Montecatini (Moplen) ในปี 1957 หลังจากนั้นโพลิโพรพิลีนก็กลายเป็นพอลิเมอร์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง

2.1.2.1 วิธีเตรียม

การเตรียมโพลิโพรพิลีนโดยฟรีแรดดิคอลแบบรวมตัวจะได้พอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากโอกาศเกิด แอลลิล แรดดิคอลมีมาก (allyl radical) ซึ่งค่อนข้างเสถียร ไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ต่อ จึงได้โมเลกุลสั้น การใช้กระบวนการฟิลลิปส์ และ Standard Oil จะได้ผลิตผลต่ำเกินไป จึงไม่นิยมใช้ในทางการค้า

วิธีการที่ได้ผลดีคือกระบวนการแบบซีเกลอร์ ที่แนตตานำมาทดลองใช้ ตัวเร่งที่ใช้จึงเรียกตัวเร่งซีเกลอร์-แนตตา ที่นิยมใช้คือ ติเตเนียมไตรคลอไรด์ กับอลูมิเนียมไตรเอธิล อลูมิเนียมไตรบิวทิล หรืออลูมิเนียมไดเอธิลโมโนคลอไรด์ ในแนพธา ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน อาจใช้ตัวเร่ง 10% แนพธา 90% ผ่านเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ อุณหภูมิประมาณ 60 ^{o}C ประมาณ 8 ชั่วโมง จะได้พอลิเมอร์ถึง 80-85% เทคนิคการโพลิเมอไรเซชั่นมักจะใช้แบบแขวนลอยมากกว่าแบบสารละลาย การควบคุมน้ำหนักโมเลกุลทำได้โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวย้ายสายโซ่ หรืออาจจะปรับเปลี่ยนสัดส่วนของตัวเร่งอุณหภูมิ ความดันของโมโนเมอร์ หรือความเข้มข้นของตัวเร่ง วัสดุที่อยู่ในของผสมหลังปฏิกิริยามีคือไอโซแทกติก-โพลิโพรพิลีน, อะแทกติกโพลิโพรพิลีน,ตัวทำละลาย,โมโนเมอร์ .ตัวเร่ง ในการจะแยกไอโซแทกติกโพลิ-โพรพิลีนออก ทำได้โดยผ่านของผสมที่ได้จากเตาปฏิกรณ์ไปยัง flash drum เพื่อแยกโมโนเมอร์ที่เหลือออกไป แล้วผ่านต่อไปที่เครื่องเซนตริฟิวจ์เพื่อแยกตัวทำละลายซึ่งละลายอะแทกติกโพลิเมอร์อยู่ด้วยออกไป จากนั้นแยกตัวเร่งออกด้วยเมธานอลผสมกรดเกลือเล็กน้อย แล้วผ่านกระบวนการเซนตริฟิวจ์อีกเพื่อแยกเมธานอล พอลิเมอร์ที่ได้ล้างให้สะอาดและทำให้แห้งที่ประมาณ 80 ^{o}C

2.1.2.2 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

โพลิโพรพิลีนที่เตรียมได้โดยตัวเร่งซีเกลอร์-แนตตาจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 60,000 ถึง 200,000 เนื่องจากเป็นแบบสายโซ่ตรง จึงมีสมบัติคล้าย ๆโพลิเอทิลีนไม่ว่าจะเป็นการพองตัวเมื่อถูกตัวทำละลายหรือสมบัติทางไฟฟ้า แต่ที่แตกต่างไปก็มี เช่นความหนาแน่นต่ำกว่าคือประมาณ

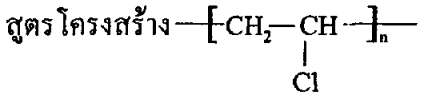
0.90 g/cm^3 อุณหภูมิ T_m 164-170°C (สูงกว่าโพลิเอทิลีน) สมบัติการละลายคล้ายโพลิเอทิลีนคือไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าเกิน 80 $^{\circ}$C ขึ้นไป จะละลายในอะโรเมติกไฮโดรคาร์บอน และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน

การเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความทนต่อแรงดึงลดลง ปกติประมาณ 4000-5000 lb/in^2 ความยืดตัวลดลง ดรรชนีความต้านทานการขีดหยุ่นลดลง แต่ค่าความทนต่อแรงกระทบสูงขึ้น ค่าความร้อนจำเพาะของโพลิโพรพิลีนต่ำกว่าของโพลีเอทิลีน แต่สูงกว่าทางโพลิสไตรีน

โพลิโพรพิลีนที่ใช้ในทางการค้า มักผสมด้วยสารเติมแต่ง เช่น สี ผงคาร์บอนดำ ใยแก้ว ยาง และตัวแอนติออกซิแดนต์ เป็นต้น เพื่อให้มีสมบัติดีขึ้นและเหมาะสมกับการใช้งาน

โพลิโพรพิลีนใช้ทำวัสดุของใช้ในครัว แผ่นฟิล์มสำหรับห่อ ถุงพลาสติกใส่ของร้อน เชือกปอพลาสติก กล่องแบตเตอรี่ กระเป๋า ถังขยะ ถังน้ำ ท่อน้ำ ชิ้นส่วนตู้เย็น เครื่องบิน และอื่น ๆ อีกมากมาย

2.1.3 โพลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC)

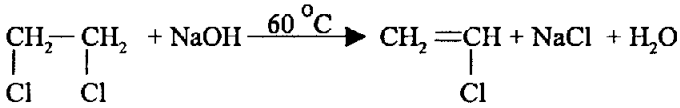
สูตรโครงสร้าง 

รูปที่ 3 โครงสร้างโพลิไวนิลคลอไรด์

พลาสติกชนิดนี้เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการตั้งแต่ปี 1872 แต่ยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เนื่องจาก เวลาหลอมเพื่อจะเข้ารูปแบบต่าง ๆ จะทำให้พอลิเมอร์นี้สลายตัวเสียก่อน จนกระทั่งปี 1928 ได้เริ่มมีผู้สนใจทางการค้า โดยบริษัท I.G. Farbenindustrie ของเยอรมัน Carbide&Carbon Chemical Corporation,และ E.I.du Pont de Nemours and Company ของอเมริกา โดยพบว่าถ้าผสมไวนิลอะซีเตตลงไปเป็น โคพอลิเมอร์แล้วจะได้ผลิตผลที่สามารถผ่านกระบวนแปรรูปได้โดยไม่สลายตัว และในปี 1930 บริษัท B.F.Goodrich Chemical Company ของอเมริกา พบว่าถ้าผสมของเหลวที่มีจุดเดือดสูง เช่น tritolyl phosphate เป็นพลาสติไซเซอร์ จะได้โพลิไวนิลคลอไรด์ที่มีสมบัติดีขึ้น จากนั้นในปี 1933 จึงได้เริ่มผลิตในทางการค้าในเยอรมันและอเมริกา โพลิไวนิลคลอไรด์ที่เติมพลาสติไซเซอร์ใช้ประโยชน์ได้มากกว่าโคพอลิเมอร์ ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 โพลิไวนิลคลอไรด์ใช้เป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิลปริมาณสูงมาก ปัจจุบันใช้ทำท่อน้ำ ถังน้ำ ถุงมือ ของเล่น ถ้วย ถาด ขวด เป็นต้น

2.1.3.1 การเตรียมไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์

ไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์เรียกย่อ ๆว่า VCM มีวิธีเตรียมทั่วๆ ไปอยู่ 3 วิธี วิธีแรกเหมาะกับการเตรียมในห้องปฏิบัติการ โดยเติมเอทิลีนไดคลอไรด์ลงในสารละลาย 10 % NaOH หรือ KOH ที่อุ่นเล็กน้อย และผสมอยู่กับ 1:1 เอทิลแอลกอฮอล์กับน้ำ ดังปฏิกิริยา



รูปที่ 4 ปฏิกิริยาการเตรียมไวนิลคลอไรด์

วิธีนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอยู่ระยะหนึ่งแต่มีข้อเสียที่คลอรีนในเอทิลีนคลอไรด์ จะไปเป็นเกลือ NaCl เสียครึ่งหนึ่ง อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ผลิตไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ คือการผสมกรดเกลือกับอะเซทิลีน ปฏิกิริยานี้ใช้ $HgCl_2$ บนactivated charcoal เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมากประมาณ 95.5 KJ/mole จึงต้องควบคุมโดยการทำให้เย็น รักษาอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 100-180 ^{o}C ความดัน 1 บรรยากาศ สำหรับอะเซทิลีนที่ใช้อาจเตรียมได้จากถ่านโค๊กกับแคลเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 300๐ ^{o}C ในเตาไฟฟ้า

อีกวิธีหนึ่งในการเตรียมไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคือใช้เอทิลีนทำปฏิกิริยากับคลอรีนในวัฏภาคของเหลว โดยใช้เหล็กคลอไรด์เป็นตัวเร่ง อุณหภูมิประมาณ 30-50 ^{o}C จะได้เอทิลีนไดคลอไรด์ จากนั้นทำดีไฮโดรคลอริเนต เพื่อเอาไฮโดรคลอคลอไรด์ออก โดยเผาที่ 300-600 ^{o}C จะได้ไวนิลคลอไรด์ตามต้องการ

สมบัติอันหลากหลายของโพลิไวนิลคลอไรด์เกิดจากกรรมวิธีการผลิตที่แตกต่าง กัน จึงมีการใช้งานที่แตกต่าง กันด้วย

2.2.3.2 กระบวนการผลิต โพลิไวนิลคลอไรด์ที่สำคัญมีดังนี้

1) การผลิตแบบแขวนลอย (suspension polymerization) โดยโพลิไวนิลคลอไรด์ที่ได้มีขนาดเล็กเหมาะกับการนำไปใช้งานทั่วไป ตอนเริ่มต้นปฏิกิริยาจะประกอบด้วย น้ำ ,โมโนเมอร์, สารเริ่ม-ต้น (initiator) ที่ละลายในโมโนเมอร์,สารช่วยการกระจายตัว (dispersing agent) + การกวนซึ่งจะทำให้โมโนเมอร์กระจายตัวเป็นหยดเล็ก ๆ (droplet) และช่วยป้องกันการรวมตัวของโมโนเมอร์ โดยทั่วไปสารช่วยการกระจายตัวจะเป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ เช่น โพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)

ปฏิกิริยาจะเกิดภายในหยดโมโนเมอร์ จนกลายเป็นอนุภาคของพอลิเมอร์ โดยแต่ละหยดจะเป็นอิสระต่อกันตลอดปฏิกิริยา แต่อาจจะพบการจับเป็นก้อนของอนุภาคของพอลิเมอร์ ตอนท้ายของปฏิกิริยาจะได้เป็นของเหลวข้นหนืดที่มีอนุภาคของพอลิเมอร์แขวนลอยอยู่ในน้ำ (จะตกตะกอนอย่างรวดเร็วถ้าไม่มีการกวน) เม็ด PVC ที่ได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 40-150 μm

การแยกน้ำและพอลิเมอร์ มี 2 ขั้นตอน คือ

1. Centrifuge จะแยกน้ำออกจากของเหลวข้นหนืดโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง จะได้ โพลิ-ไวนิลคลอไรด์เปียก เรียกว่า "cake"

2. Drying โดยการระเหยน้ำจาก cake จนได้ผงโพลิไวนิลคลอไรด์แห้งกระจายอยู่ในถังโลหะ

กระบวนการผลิตแบบนี้ นิยมใช้มากที่สุดทั้งในสหรัฐอเมริกา ยุโรป และประเทศไทย โดยใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อนออกจากปฏิกิริยา และมีสารเริ่มต้นละลายอยู่ในหยดโมโนเมอร์ กระจายอยู่ในถังโลหะเคลือบแก้ว โดยมีสารช่วยการกระจายตัวเป็นตัวช่วยการแพร่กระจาย PVC ที่ได้เรียกว่า S-PVC ซึ่งเหมาะกับงานทำท่อ PVC วงกบกรอบประตูหน้าต่าง และงานก่อสร้าง เป็นต้น หรืออาจเรียกเม็ด PVC นี้ว่า R-PVC หรือ "Rigid PVC "

จุดอ่อนของ S-PVC คือความไม่บริสุทธิ์จากสารช่วยการกระจายตัว ซึ่งอาจเจือปนออกมาด้วย

2) การผลิตแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) เหมาะกับงานเคลือบผิว ได้แก่ การทำหนังเทียม แบ่งขั้นตอนการผลิตออกเป็นดังนี้

การโพลิเมอไรเซชั่น ตอนเริ่มต้นจะมี น้ำ,โมโนเมอร์, สารเริ่มต้นที่ละลายในน้ำ ,อิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) ฯ เป็นสารที่มีขั้วและไม่มีขั้วอยู่ในสารเดียวกัน เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงจะได้เป็นลาเทกซ์ที่ประกอบด้วยอนุภาคเล็ก ๆ ของพอลิเมอร์ซึ่งอยู่ในรูปของคอยลอยด์กระจายอยู่ในน้ำ เรียกว่าเป็น "primary particle" และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05-1.5 μm

การทำให้แห้ง เป็นกระบวนการที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของ PVC อิมัลชัน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ spray dryer โดยการทำให้ลาเทกซ์พ่นออกมาเป็นหยดเล็ก ๆ (ภายในมี primary particle อยู่มากมาย) ซึ่งหยดเหล่านี้จะสัมผัสกับลมร้อน ทำให้น้ำระเหยไป และอนุภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกลมกลวง เรียกว่า "secondary particle" หรือ " cenosphere" ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-150 μm

การผลิตโพลิไวนิลคลอไรด์อิมัลชันทุกขั้นตอนไม่ว่าจะเป็นการโพลิเมอไรซ์ การทำให้แห้ง หรือการบดจะมีผลต่อ สมบัติของโพลิไวนิลคลอไรด์ทั้งสิ้น มีการผลิตแบบนี้น้อยกว่าการผลิตแบบแขวนลอย แม้จะมีสมบัติการหลอมตัวที่ดีกว่า และเหมาะสำหรับการทำเป็นฟิล์ม หรืองานที่ต้องการผิวเรียบ แต่มีข้อเสียดังนี้คือใช้เทคนิคที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่า ราคาแพงกว่า PVC บริสุทธิ์น้อยกว่า

การผลิตแบบอิมัลชัน จะได้เม็ดพลาสติกขนาดเล็กกว่า "S-PVC" ซึ่งเรียกว่า "E-PVC" เหมาะกับงานทำหระเป๋าหนังเทียม หุ้มเบาะเฟอร์นิเจอร์ในบ้านและในรถยนต์ กระเบื้องยาง ผ้าใบ ถุงมือเสื้อกันฝน และพื้นรองเท้า เป็นต้น

3) การผลิตแบบบัลก์ (bulk polymerization) ตอนเริ่มต้นจะมีเพียงโมโนเมอร์ และสารเริ่มต้นเท่านั้น เป็นวิธีง่าย ๆ และให้ผลผลิตที่มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีสารอื่นเจือปน bulk หรือ "Mass-PVC" เหมาะกับงานสัมผัสอาหาร เช่น การเป่าขวดบรรจุน้ำดื่ม, น้ำแร่, น้ำส้ม และอาหารอื่น ๆ แต่จะมีข้อเสียดังนี้

-ควบคุมอุณหภูมิการผลิตได้ยาก เพราะเมื่อเกิดพอลิเมอร์มากขึ้น จะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ความสามารถในการระบายความร้อนลดลง

- ควบคุมขนาดของโพลิไวนิลคลอไรด์ ได้ยาก
- กำจัด VCM ที่ตกค้างได้ยาก

4) **การผลิตแบบสารละลาย (solution polymerization)** ทั้งโมโนเมอร์และตัวเร่งปฏิกิริยา จะละลายในตัวทำละลาย ความร้อนจากปฏิกิริยาจะถูกถ่ายเทให้กับตัวทำละลาย และพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นอาจจะละลายหรือไม่ละลายในตัวทำละลายก็ได้ การผลิตแบบนี้ใช้น้อยมากกับโพลิไวนิลคลอไรด์ จะใช้กับการผลิตโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เหมาะกับการทำเม็ดโพลิไวนิลคลอไรด์ (copo) ชนิดพิเศษ งานเฉพาะคุณภาพเท่านั้น

2.3.2.5 การผลิตแบบไมโครซัสเพ็นชั่น (microsuspension polymerization) จะเป็นการผลิตแบบกึ่งอิมัลชัน และกึ่งแขวนลอย โดยมีวัตถุดิบดังนี้

- ตัวกลางสำหรับการกระจายตัว : น้ำ
- โมโนมอร์: VCM
- อิมัลซิฟายเออร์
- สารเริ่มต้นที่ละลายใน VCM

วัตถุดิบทั้งหมดจะถูกผสมในหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) ที่เตรียมไว้สำหรับการผสมซึ่งใช้แรงกลอัดเพื่อที่ได้หยด VCM ซึ่งมีขนาดเล็กมากในน้ำ (0.05 -1.5 μm) และภายในหยด VCM จะมีสารเริ่มต้นละลายอยู่ขนาดของ primary particle จะถูกกำหนดตั้งแต่ก่อนเริ่มการโพลิเมอไรซ์ (ต่างจากวิธีอิมัลชัน)

สารซึ่งได้จากการผสมจะถูกถ่ายไปยังหม้อนึ่งอัดไออีกตัวหนึ่ง เพื่อทำการโพลิเมอไรซ์ ณ อุณหภูมิคงที่ และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา จะได้ลาเทกซ์ที่มีการกระจายขนาดของ primary particle อย่างสม่ำเสมอ (0.05-0.1.5 um) ส่วนการทำให้แห้ง และการบดจะเหมือนการผลิตแบบอิมัลชัน

ปัจจุบันนี้ การผลิตเม็ด PVC ไม่ว่าจะเป็น S-PVC , E- PVC , Mass- PVC หรือ solution – PVCได้พัฒนาไปไกล มีประสิทธิภาพสูง ประหยัด และปลอดภัยในระดับที่น่าพอใจ สามารถควบคุมปริมาณ VCM หลงเหลือตกค้าง (residual VCM) ในเม็ด PVC ให้ต่ำกว่า 10 ส่วนใน 1,000,000 ส่วนได้อย่างมั่นใจ

2.1.4 โคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน

(Acrylonitrile-Butadiene –Styrene Copolymer : ABS)

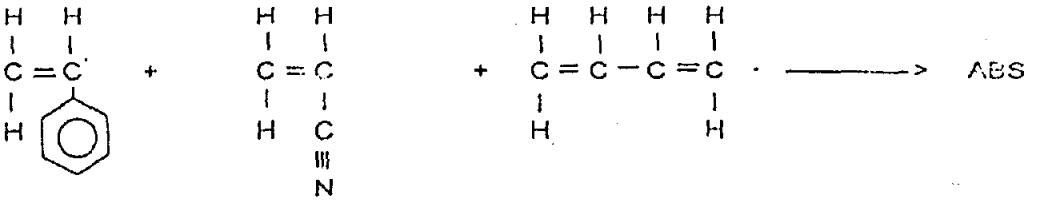
โคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีนเป็นเทอร์พอลิเมอร์(terpolymer) ที่เกิดจากโมโนเมอร์ 3 ชนิดได้แก่ อะคริโลไนไตรล์,บิวตะไดอีนและสไตรีน โมโนเมอร์แต่ละตัวจะมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ดังต่อไปนี้

- อะคริโลไนไตรล์ จะให้สมบัติทนทานต่อสารเคมีสูง(high chemical resistance) ทนความร้อน(high heat resistance) ให้ความแกร่ง แต่ฉีดขึ้น(Melt flow index,MFI ต่ำ)

-บิวตะไดอีน จะทำให้สามารถรับแรงกระแทกสูง

-สไตรีน จะทำให้แกร่ง ความทรงรูปสูง (high stiffness) และฉีดขึ้นรูปได้ง่าย (MFI สูง)

ปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีนสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5 ปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน

2.1.4.1 สมบัติของโคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน จึงขึ้นอยู่กับปริมาณของโมโนเมอร์ที่มีอยู่ ถ้าต้องการให้โคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน มีสมบัติเด่นใด ก็ให้เติมโมโนเมอร์ตัวนั้นมาก แต่จะทำให้สมบัติอื่นสูญเสียไปด้วย เช่น ถ้าต้องการ ABS ทนแรงกระแทกสูง ก็จะใช้ปริมาณบิวตะไดอีนมาก แต่ปริมาณการเติมสไตรีนและอะคริโลไนไตรล์จะลดน้อยลง ทำให้สูญเสียความทรงรูปไป

อะไครโลไนไตรล์ เป็นโมโนเมอร์ที่มีขั้ว ทำให้ทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่นน้ำมันและกรดบางชนิด ดังนั้นพอลิเมอร์ที่มีอะไครโลไนไตรล์เป็นองค์ประกอบ เช่น SAN หรือ ABS จึงนำ SAN (Styrene- Acrylonitrile) มาทำไฟแช็กหรือหม้อแบตเตอรีได้ ส่วน ABS เป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้ว จึงมีสมบัติดูดความชื้น (น้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว) ดังนั้นก่อนนำ มาใช้งานจึงจำเป็นต้องอบก่อนนำไปขึ้นรูป นอกจากนี้โคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน ยังทนต่อตัวทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันได้ดี อย่างไรก็ตาม โคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน จะทนต่อตัวทำละลายได้มากน้อยเพียงใดก็ตามขึ้นกับปริมาณของอะคริโลไนไตรล์ ๆ ในเชิงพาณิชย์ได้มาจากไฮโดรเจนไซยาไนด์กันอะเซททิลีน ดังปฏิกิริยาต่อนี้

$$\underset{\text{Hydrogen cyanide}}{HCN} + \underset{\text{Acetylene}}{HC\equiv CH} \longrightarrow \underset{\text{Acrylonitrile}}{H_2C{=}CHCN}$$

รูปที่ 6 ปฏิกิริยาการเกิดอะไครโลไนไตรล์

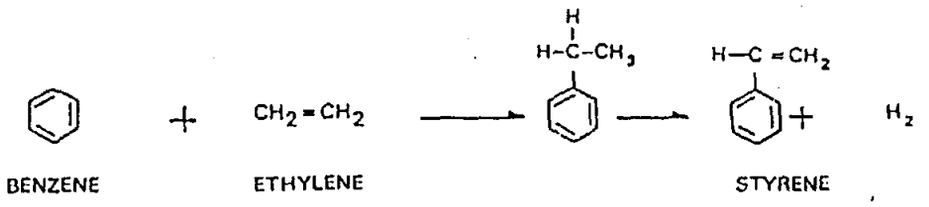
บิวตะไดอีนได้จากบิวเทนผ่านกรรมวิธี catalytic dehydrogeneration ภายใต้อุณหภูมิสูง

$$\underset{\text{Butane}}{H_2C\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_2} \longrightarrow \underset{\text{Butadiene}}{H_2C{=}CH\text{-}CH{=}CH_2} + H_2$$

รูปที่ 7 ปฏิกิริยาการเกิดบิวตะไดอีน

บิวตะไดอีน สามารถพอลิเมอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิห้องได้ ได้เป็นโพลิบิวตะไดอีน ซึ่งมีสมบัติเป็นยางเนื่องจากบิวตะไดอีนมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล จึงสมารถเชื่อมโยงโมเลกุลได้ มี Tg = -70 ^{o}C เมื่อรวมเป็นโคโพลิเมอร์จะทำให้มีความทนแรงกระแทกสูง

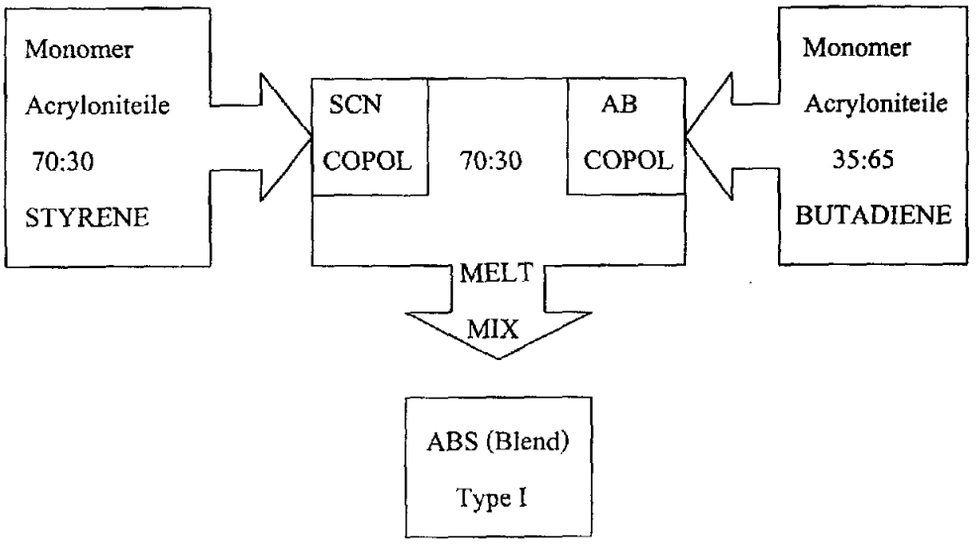
สไตรีน เป็นโมโนเมอร์ที่ไม่มีขั้ว จึงละลายในตัวทำลายที่ไม่มีขั้ว ได้แก่ เฮกเซน เบนซีน และน้ำมันเป็นต้น แต่ละลายน้ำได้เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อนำมาผลิตเป็นโพลิสไตรีนใส (GPPS) จะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ปฏิกิริยาการเกิดสไตรีนจากเบนซีนสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 8 ปฏิกิริยาการเกิดสไตรีน

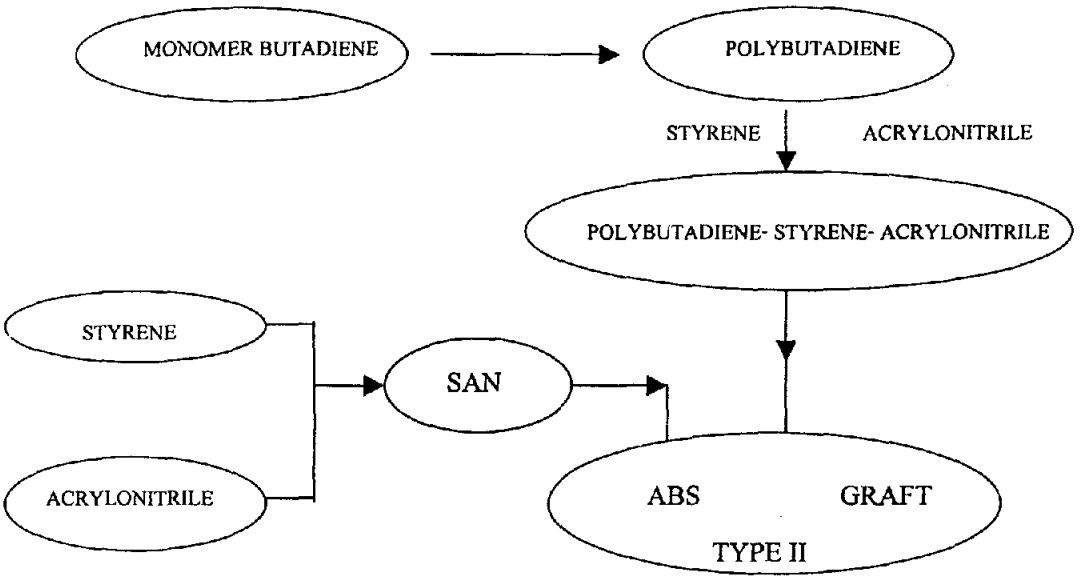
2.1.4.2 การผลิต โคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน

ABS Type I ได้จากการโคพอลิเมอร์ระหว่างอะคริโลไนไตร์ลกับสไตรีนเสียก่อนแล้วจึงนำไปผสม (bend) กับโคพอลิเมอร์ระหว่างบิวตะไดอีนกับอะคริโลไนไตร์ลดังแสดงในแผนภาพต่อไปนี้



รูปที่ 9 การผลิต ABS TYPE I

ABS Type II เป็นการสังเคราะห์ ABS ซึ่งนิยมใช้กันมาก และเป็นวิธีที่ดีที่สุดโดยการทำกราฟพอลิเมอร์ (Graft copolymer) จากปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชั่นระหว่างสไตรีน อะคริโลไนไตร์ล และโพลิบิวตะไดอีนที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C โดยมีโปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็น initiator



รูปที่ 10 การผลิต ABS TYPE II

2.1.4.3 การนำโคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน ไปใช้ประโยชน์

โคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน นิยมใช้ทำชิ้นส่วนและโครงของเครื่องใช้ไฟฟ้า ได้แก่ โทรทัศน์ วิทยุ เครื่องดูดฝุ่น เครื่องซักผ้า เตาอบไมโครเวฟ เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น พัดลม เครื่องเป่าผม เครื่องบดผสมอาหาร หรือเครื่องใช้สำนักงาน จากสมบัติการทนแรงกระแทกและสามารถชุบเคลือบผิวด้วยโลหะได้ จึงนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนรถยนต์ และมอเตอร์ไซด์ เช่น แผงหน้าปัด คอนโซล และชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดใหญ่ เป็นต้น จึงจัดเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบันมากกว่าพลาสติกวิศวกรรมชนิดอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นไนลอน อะคริลิก เป็นต้น

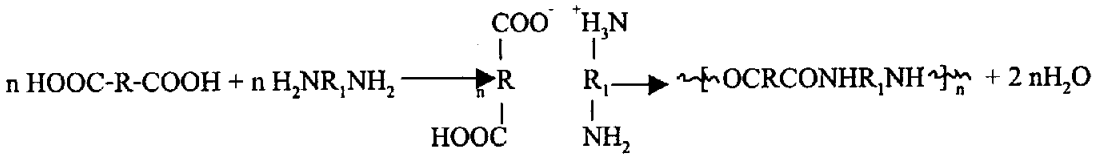
2.1.5 โพลิเอไมด์ (Polyamides)

โพลิเอไมด์เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีอะตอมอื่นเจือนอกจากคาร์บอนแทรกอยู่ในสายโซ่หลัก หนังสือบางเล่มจัดอยู่ในกลุ่ม heterochain polymers โพลิเอไมด์ปกติรู้จักกันดีในชื่อ**ไนลอน** ซึ่งหมายถึงโพลิเอไมด์ที่สังเคราะห์ขึ้นมา จะต้องมีหมู่เอไมด์ —(CO-NH)— อยู่ในสายโซ่หลัก มีชื่อเรียกตามจำนวนอะตอมคาร์บอนจากโมโนเมอร์ เช่น ไนลอน 6 ได้จากโมโนเมอร์ ω - caprolactum ไนลอน 6,6 ได้จากโมโนเมอร์เฮกซาเมธิลีน ไดเอมีน (hexametylenediamine) กับกรดอะไดปิก (adipic acid) เป็นต้น

ภรมวิทยาศาสตร์บริการ

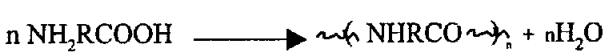
ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์สายโซ่ตรง ในทางอุตสาหกรรม มีอยู่ 3 แบบ คือ

- ปฏิกิริยาระหว่างไดเอมีน กับกรดไดคาร์บอกซิลิก ได้เกลือไนลอน ตัวอย่าง



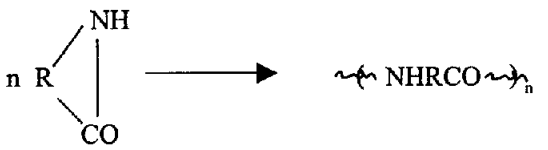
รูปที่ 11 ปฏิกิริยาระหว่างไดเอมีนกับกรดไดคาร์บอกซิลิก ได้เกลือไนลอน

- ปฏิกิริยาควบแน่นตัวเองของกรด ω -อะมิโน



รูปที่ 12 ปฏิกิริยาควบแน่นตัวเองของกรด ω -อะมิโน

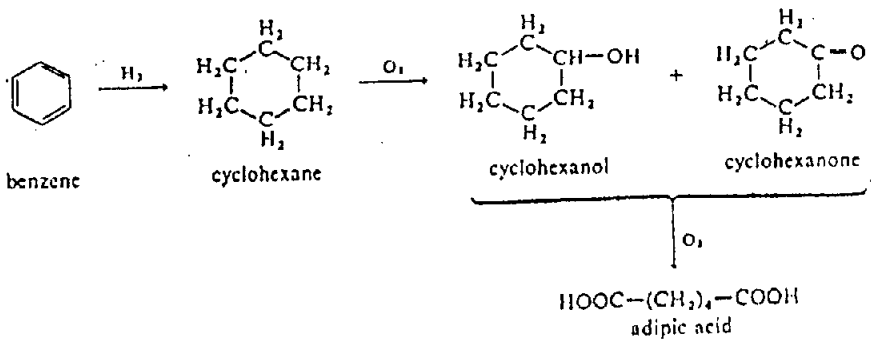
- ปฏิกิริยาการเปิดวงแลกทัม (lactam ring)



รูปที่ 13 ปฏิกิริยาการเปิดวงแลกทัม

2.1.5.1 วิธีเตรียมโมโนเมอร์ โมโนเมอร์ที่ใช้เตรียมโพลิเอไมด์มีอยู่ด้วยกันหลายตัว คือ

1) กรดอะไดปิก เตรียมได้จากเบนซีน โดยเติมไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 150-200 °C ความดัน 25 atm ใช้ Raney nickel เป็นตัวเร่ง จะได้ไซโคลเฮกเซนแล้วออกซิไดส์ไซโคลเฮกเซนด้วยcobalt naphthenate จะได้ ไซโคลเฮกซานอลกับไซโคลเฮกเซน 70% และมีกรดอะไดปิกเล็กน้อยผ่านการผสมนี้ให้ถูกออกซไดส์ด้วย 50% HNO_3 ที่ 75 °C มี copper-ammonium vanadate เป็นตัวเร่งทั้งหมดทำในสภาวะของเหลว จะได้กรดอะไดปิกตกผลึกออกมามีจุดหลอมเหลว 151 °C



รูปที่ 14 ปฏิกิริยาการเกิดกรดอะไดปิก

2) เฮกซาเมทิลีนไดเอมีน ในทางอุตสาหกรรมนิยมเตรียมจากกรดอะไดปิก ดังนี้

$$HOOC\text{-}(CH_2)_4\text{-}COOH \longrightarrow NC\text{-}(CH_2)_4\text{-}CN \longrightarrow H_2N\text{-}(CH_2)_6\text{-}NH_2$$

adipic acid adiponitrile hexamethylenediamine

รูปที่ 15 ปฏิกิริยาการเกิดเฮกซาเมทิลีนไดเอมีน

โดยที่ขั้นตอนแรกใช้กรดอะไดปิก ทำปฏิกิริยากับก๊าซแอมโมเนีย ที่ 305-350 °C มีโบรอนฟอสเฟส เป็นตัวเร่ง จะได้อะไดโปไนไตรล์ จากนี้ทำปฏิกิริยาต่อโดยเติมไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 130 °C ความดัน 670 atm . มีแอมโมเนียและโคบอลท์เป็นตัวเร่ง แล้วแยกผลิตผลที่ได้โดยการกลั่นภายใต้ความดันต่ำได้เฮกซาเมธิลีนไดเอมีน เป็นของเหลว จุดเดือด 90-92 °C ที่ความดัน 14 atm. Hg แต่ในสภาวะปกติเป็นของแข็งสีขาวจุดหลอมเหลว 39 °C

3) กรดเซบาซิก (sebacic acid) เตรียมได้จากน้ำมันระหุ่ง โดยทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 250 °C เกิดปฏิกิริยาซาพอนิฟิเคชั่น ได้กรด ricinoleicและจะสลายตัวได้กรดเซบาซิก กับ octonol —2 ผลผลิตที่ค้ประมาณ 50-55 % แม้ว่าจะต่ำ แต่เป็นการผลิตที่ราคาถูกวิธีอื่น จึงยังนิยมใช้อยู่ กรดเซบาซิกเป็นของแข็งไม่มีสี จุดหลอมเหลว 134.5 °C

4) คาโพรแลกทัม (caprolactum) ในทางอุตสาหกรรมนิยมเตรียมจากไซโครเฮกเซน โดยการออกซิไดส์ไซโครเฮกเซน ได้ไซโครเฮกซานอลกับไซโครเฮกซาโนน แยกของผสมนี้โดยการกลั่น แล้วนำไซโครเฮกซานอล มาทำปฏิกิริยาขจัดไฮโดรเจนโดยใช้ลวดทองแดงเป็นตัวเร่งจะได้ ไซโครเฮก - ซาโนน นำไปรวมกับที่แยกได้ครั้งแรก แล้วทำปฏิกิริยากับ hydroxylamine sulphate ที่ 20 °C ได้ cyclohexanone oxime ซึ่ง cyclohexanone oxime ที่ได้ทำให้เป็นกลางด้วยแอมโมเนีย และทำปฏิกิริยาต่อกับกรดกำมะถัน ที่อุณหภูมิประมาณ 140 °C โดยมีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์อยู่ด้วยแล้วทำให้เป็นกลางด้วยแอมโมเนียอีก คาโพรแลกทัมที่ได้เป็นของแข็งสีขาว จุดหลอมเหลว 70 °C แยกได้โดยการกลั่นที่ความดันต่ำ เป็นของเหลวจุดเดือด 120 °C ที่ความดัน 10 mm . Hg.

5) โดดีซิล แลกทัม(dodecyl lactum) เป็นโมโนเมอร์ที่ใช้เตรียมไนลอน 12 เตรียมได้จากบิวตะไดอีน โดยในขั้นแรกใช้ตัวเร่งซีเกลอร์-แนตตา ได้ cyclic trimer 1,5,9-cyclododecatriene จากนั้นเติมไฮโดรเจน ได้ cyclododecane ออกซิไดซ์ต่อได้ cyclododecanol กับ cyclododecanone ทำปฏิกิริยาต่อกับไฮดรอกซิลามีน ตามด้วยกรดกำมะถัน จะได้ dodecyl lactum

2.1.5.2 การเตรียมไนลอน

การนำโมโนเมอร์ที่ได้มาโพลิเมอไรซ์ เพื่อให้ได้ไนลอนตามต้องการนั้น ผลิตผลที่ได้ได้มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากโพลิเมอไรเซชันแบบขั้น ซึ่งจะพิจารณาเป็นชนิด ๆ ดังต่อไปนี้

1) ไนลอน 6,6 แคโรเธอร์ได้สังเคราะห์ขึ้นเป็นคนแรกตั้งแต่ปี 1935 และบริษัท Du Pont ได้เริ่มผลิตทางการค้าขึ้นในปี ค.ศ. 1939 ในรูปเส้นใย และในปี ค.ศ. 1941 ได้เริ่มผลิตในรูปหล่อแบบเป็นครั้งแรก และมาแพร่หลายมากในปี ค.ศ. 1950

ไนลอน 6,6 เตรียมได้จากโพลิเมอไรเซชั่นระหว่างกรดอะไดปิก กับเฮกซาเมทิลีนไดเอมีน ในเมทานอลที่เดือด

$$n\ H_2N\text{-}(CH_2)_6\text{-}NH_2 + n\ HOOC\text{-}(CH_2)_4\text{-}COOH \longrightarrow [\text{-}HN\text{-}(CH_2)_6\text{-}NH\text{-}OC\text{-}(CH_2)_4\text{-}CO\text{-}]_n + 2n\ H_2O$$

hexamethylenediamine adipic acid

รูปที่ 16 ปฏิกิริยาการเกิด ไนลอน 6,6

น้ำหนักโมเลกุลที่ได้จะต้องสูงถึง 10,000 หรือมากกว่า จึงจะนำไปปั่นเป็นเส้นใยได้ ในการเตรียมปกติจะได้เกลือไนลอน ซึ่งไม่ผ่านละลายในเมธานอลออกมาก่อน มีจุดหลอมเหลว 191 °C จากนั้นจึงละลายน้ำ แล้วผ่านสารละลายนี้เข้าไปใน autoclave มีกรดอะซีติกอยู่ด้วย เพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุลให้อยู่ในช่วง 10,000-15,000 อุณหภูมิประมาณ 220 °C ความดัน 20 atmประมาณ 1-2 ชั่วโมง แล้วเพิ่มอุณหภูมิ 270-280 °C รักษาความดันให้คงที่โดยปล่อยไอน้ำออกไปเล็กน้อย ประมาณ 1 ชั่วโมงค่อย ๆ ลดความดันลงให้ปกติคือ 1 atm จากนั้นรีดโพลีเมอร์ออกโดยก๊าซไนโตรเจนที่ปราศจากออกซิเจน แล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ จะได้ไนลอนออกมาเป็นลักษณะเส้นยาว (ribbon)

2) ไนลอน 6,10 ไนลอนชนิดนี้เตรียมได้จากกรดเซบาซิก (sebacic acid) กับเฮกซาเมธิลีนไดเอมีน จะได้ เกลือไนลอนที่มีจุดหลอมเหลว 170 °C วิธีการเตรียมเหมือนไนลอน 6,6 ทุกอย่าง เกิดโพลิเมอไรเซชั่นแบบขั้นเช่นเดียวกัน

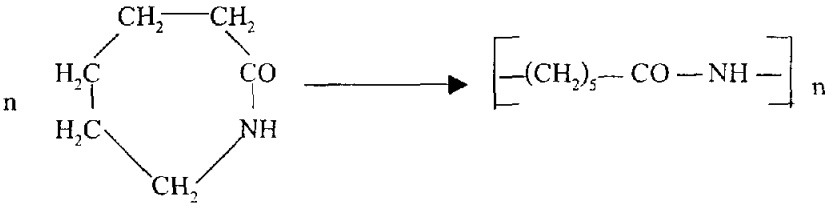
$$n\ H_2N\text{-}(CH_2)_6\text{-}NH_2 + n\ HOOC\text{-}(CH_2)_8\text{-}COOH \longrightarrow [\text{-}HN\text{-}(CH_2)_6\text{-}NH\text{-}OC\text{-}(CH_2)_8\text{-}CO\text{-}]_n + 2n\ H_2O$$

hexamethylenediamine sebacic acid

(6 carbon atoms) (10 carbon atoms)

รูปที่ 17 ปฏิกิริยาการเกิด ไนลอน 6,10

3) ไนลอน 6 เตรียมได้จากโมโนเมอร์ คือคาโพรแลกทัม เกิดโพลิเมอไรเซชั่นแบบเปิดวง

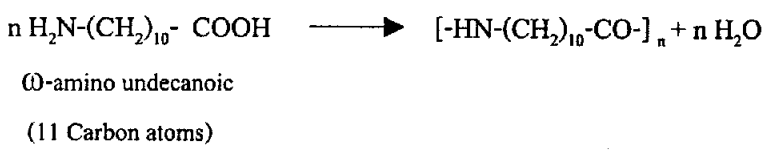


รูปที่ 18 ปฏิกิริยาการเกิดไนลอน 6

ในอุตสาหกรรมใช้คาโพรแลกทัมผสมกับน้ำ (ทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง)และใส่กรดอะซีติกเข้าไปเป็นตัวควบคุมน้ำหนักโมเลกุล ผ่านของผสมเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง จะได้โพลีเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 90 % และน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 10 % ใช้น้ำร้อนล้างพวกน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกไปได้

ในกระบวนการผลิตแบบหล่อไนลอน 6 ปัจจุบันนิยมใช้โพลิเมอไรเซชั่นโดยอิออนเป็นตัวเริ่ม โดยใช้อะซีติกคาโพรแลกทัม 0.1-1 โมลเปอร์เซนต์ ปฏิกิริยาทำที่อุณหภูมิ 140-180 °C

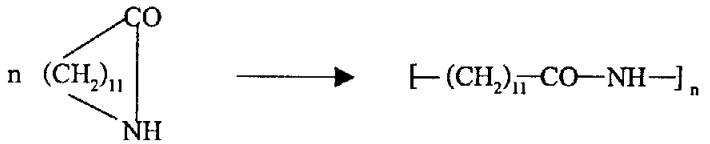
4) ไนลอน 11 โพลีเมอร์นี้เตรียมได้จากโมโนเมอร์ ω-amino undecanoic acid ทำปฏิกิริยาแบบควบแน่นด้วยตัวเอง ดังปฏิกิริยา



รูปที่ 19 ปฏิกิริยาไนลอน 11

ปฏิกิริยาทำที่อุณหภูมิ 220 °C ปฏิกิริยานี้สามารถติดตามได้โดยการวัดการนำไฟฟ้าของสารละลายใน m-cresol ในระหว่างโพลิเมอไรเซชั่น อาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงคือเกิดการควบแน่นภายในโมเลกุลได้แลกทัมแบบวง 12 เหลี่ยม ประมาณ 0.4-0.6 % แต่ไม่จำเป็นต้องแยกออกเพราะมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์น้อยมาก

5) ไนลอน 12 พอลิเมอร์นี้เตรียมจากโมโนเมอร์ dodecyl lactum เป็นโพลิเมอไรแบบเปิดวงเหมือนไนลอน 6 แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า คือประมาณ 300 °C ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ปฏิกิริยาที่เกิดไม่ผันกลับ จึงได้ผลิตผลสูงถึง 100 % ไม่มีพวกน้ำหนักโมเลกุลต่ำปนเลย



รูปที่ 20 ไนลอน 12

2.1.5.3 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

สมบัติของไนลอนแต่ละชนิดคล้าย ๆ กัน คือทนแรงกระแทกสูง เหนียว ยืดหยุ่นได้ และมีความต้านทานแรงขีดข่วนดี ในด้านสมบัติเชิงกลนั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถเป็นผลึกมากน้อยเพียงใด โครงสร้างที่แตกต่างกันในสายโซ่อะลิฟาติก ซึ่งจะทำให้หมู่เอไมด์สร้างพันธะไฮโดรเจนได้ไม่เท่ากัน และ

จะมีผลต่อดีกรีของความเป็นผลึก เฉพาะไนลอน 6,6 กับไนลอน 6,10 อุณหภูมิ T_m ของไนลอน 6,6 สูงกว่าอุณหภูมิ T_mของไนลอน 6,10 เพราะเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกว่า ความทนต่อแรงดึงก็สูงกว่า คือ ไนลอน 6,6 เท่ากับ 11,500 lb/in^2 ส่วนไนลอน 6,10 เท่ากับ 8500 lb/in^2 แต่ไนลอน 6,6 ยืดหยุ่นได้น้อยกว่าไนลอน 6,10 เพราะยืดออกได้แค่ 80-100 % แต่ไนลอน 6,10 ยืดออกได้ 100-150 % เป็นต้น

เพราะฉะนั้นการใช้งาน จึงต้องเลือกให้เหมาะสม เช่น ไนลอน 6,6 และไนลอน 6,10 ก็นำไปใช้ทำเป็นเส้นใยทำเสื้อผ้า แต่ ไนลอน 6,10 หรือไนลอน 11 ,ไนลอน 12 ทนต่อแรงดึงต่ำแต่ยืดหยุ่นมากทนต่อแรงกระทบได้มาก ก็นำไปใช้งานเป็นขนแปรงสีฟัน เอ็นสำหรับไม้เบดมินตัน ไม้เทนนิส เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีดจะนำไปทำสายเคเบิล ท่อส่งน้ำมัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการฉีดและหล่อ ใช้ทำพวกเกียร์ แบริ่ง บูช ซึ่งต้องรับแรงน้ำหนักแบะแรงเสียดทานสูง คุณสมบัติในการดูดซึมน้ำ จะเห็นว่าไนลอน 6,6 กับไนลอน 6,10 ดูดซึมน้ำดี ทำเป็นถุงเท้า เสื้อกล้ามได้ดี

ในด้านการละลาย ไนลอนทุกชนิดจะละลายในตัวทำละลายที่ชอบให้โปรตอน เช่น กรดอะซีติก กรดฟอร์มิก ฟีนอล แต่พวกที่มีค่าพารามิเตอร์การละลายสูง เช่น แอลกอฮอล์ ทำให้ไนลอนบวมแต่ไม่ละลาย ส่วนพวกไนโตรเบนซีน เบนซิลแอลกอฮอล์ และไกลคอลละลายไนลอนได้ที่อุณหภูมิสูง ขณะที่ตัวทำละลายอินทรีย์ สารเชื้อเพลิง น้ำมันไม่ละลายไนนอลเลย กรดแก่ เช่น กรดกำมะถัน กรดดินประสิว จะทำลายไนลอนรวดเร็วมาก แต่ถ้าเจือจางก็มีผลน้อย

ระดับความมันของไนลอน มีหลายระดับขึ้นกับการใช้งาน เช่นชนิดที่มีความสว่างจะใช้สำหรับผลิตผ้าซาติน ชนิดทึบสำหรับผลิตผ้าม่าน การลดความมันของเส้นใยไนลอนใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เข้าไปในเนื้อเส้นใย การผลิตไนลอนส่วนมากมักมีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นวงกลม แต่ก็มีทรงอื่น ๆบ้าง เช่น แบบสามเหลี่ยมมุมมน (trilobal) คล้ายไหม เช่น Antron ที่เป็นไนลอน 6,6 Enkaloft ที่เป็นไนลอน 6 จะมีพื้นที่หน้าตัดดังกล่าว

2.1.5.4 สมบัติทางกายภาพ

1) ลักษณะภายนอก ดูจากกล้องจุลทรรศน์ เส้นใยโดยทั่วไปพื้นที่หน้าตัดขวางเป็นทรงกลม ผิวเรียบคล้ายแท่งแก้วยาว มีทั้งเส้นสั้นและยาว และความยาวตลอดเส้นใยมีความต่อเนื่อง

2) สี โดยทั่วไปไนลอนมีสีขาว ความมันค่อนข้างสูง แต่การผลิตสามารถควบคุมระดับความมันตามความต้องการของลูกค้าในทุกระดับ

3) ความคงทน ไนลอนเป็นเส้นใยที่มีความคงทนสูง ความต้านแรงดึงของเส้นใยมีค่า 3.0-6.0 gpd สำหรับที่ใช้ทำเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ความต้านแรงดึงของเส้นใยมีค่า 6.0-9.5 gpd ผ้าใบยางรถยนต์ นอกจากนั้นยังทนต่อการขัดมี การคืนตัวดีมากไม่มีการยับ

4) ความสามารถในการดูดซึมน้ำ มีการดูดซึมน้ำต่ำ ความสามารถในการดูดซึมความชื้นประมาณ 4.0-4.5 % ทำให้เป็นจุดอ่อนที่สวมใส่ไม่สบายและเป็นปัญหาในระยะแรกเริ่มของการใช้ไนลอน

ด้วยผิวที่เรียบและเส้นใยเหยียดยาวการเกาะตัวกันระหว่างเส้นใยชิดกันมากในโครงสร้างของด้าย ทำให้เส้นด้ายแน่นและระบายไม่ดี

5) การทนความร้อน ไนลอนเมื่อได้รับความร้อนสูงจะหลอมเหลว คล้ายแอซีเทต ข้อควรระวังคือ ไนลอน 6 มีจุดหลอมเหลวที่ 420 ^{o}F (216 ^{o}C) ซึ่งต่ำกว่า ไนลอน 6,6 ซึ่งหลอมเหลวที่ 480 ^{o}F (250 ^{o}C)

6) การติดไฟ เป็นสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์หนึ่งของไนลอน คือ เมื่อไนลอนเข้าสู่เปลวไฟจะเกิดการหลอมเหลวและหดตัวออกจากเปลวไฟ จากนั้นจึงเกิดการติดไฟ ทำให้เส้นใยหลอมเหลวและเกิดเป็นหยด กลิ่นคล้ายคื่นไช้ มีควันขาวออกมา ขี้เถ้าที่เหลือมีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาล

7) ความถ่วงจำเพาะ 1.14 ถือได้ว่าค่อนข้างเบา

2.1.5.5 สมบัติทางเคมี

1) กรด ไนลอนถูกทำลายด้วยสารละลายกรดเข้มข้น เช่น กรดกำมะถัน กรดไฮโดร-คลอริก เป็นต้น หากต้มในสารละลาย 5% ของกรดไฮโดรคลอริก ไนลอนจะสลายตัวได้

2) ด่าง ไนลอนมีความทนทานต่อด่างได้ดี

3) สารละลายอินทรีย์ ทนทานต่อสารละลายอินทรีย์ได้ดี ไนลอนไม่ละลายในแอซีโตน แต่ละลายได้ในกรดฟอร์มิกที่เข้มข้น

4) สารซักฟอก ไนลอนแทบไม่ต้องมีการซักฟอกเพราะรักษาความขาวได้ดี แต่หากต้องซักฟอกก็สามารถใช้สารชนิดรีดิวส์ หรือออกซิไดซ์ได้ แต่ต้องไม่เป็นสารที่แก่จนเกินไป แต่ถ้าเป็นสารประเภทคลอรีนอาจต้องระวังเพราะมีผลเสียต่อไนลอนได้

5) ราและแมลง ไม่มีผลต่อไนลอนในสภาวะการใช้งานปรกติ

6) แสงแดด โดยทั่วไปไนลอนทนต่อแสงแดดได้ดี ไนลอนที่มความมันสูงหรือสว่างทนต่อแสงแดดได้ดีกว่าชนิดที่มีความมันน้อย

7) การย้อมสี ไนลอน 6 ย้อมสีได้ดีติดทนนานกว่าไนลอน 6,6 และย้อมได้ง่ายกว่าด้วย

2.1.5.6 การนำไปใช้งาน

การใช้งานไนลอนสามารถผสมกับเส้นใยอื่น ๆ เพื่อให้ได้สมบัติที่ดี เช่น ไนลอนผสมกับฝ้ายทำให้ได้เส้นใยที่เล็กและระเอียด สูงแต่แข็งแรงดี มีผิวเรียบ คล้ายไหม และไม่จับฝุ่นง่าย ในขณะที่ฝ้ายให้ความนุ่มนวลและการดูดซึมความชื้นดี ไนลอนผสมขนสัตว์ได้ผ้าที่เบาและทนทานมีการทิ้งตัว

2.2 การเสื่อมสภาพและความเสถียรของพลาสติก

พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพได้โดยสิ่งแวดล้อมทางเคมี ความร้อน แสง (โฟโตเคมิคัล) รังสีพลังงานสูง ออกซิเจนในอากาศและการเสื่อมสภาพเมื่อเวลาผ่านไป

เมื่อพลาสติกได้รับความร้อน แสง และรังสีพลังงานสูง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ต่าง ๆ กัน โดยพลังงานเหล่านี้อาจทำให้เกิด

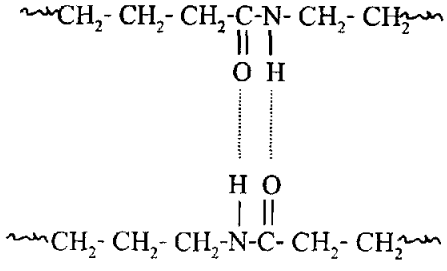
- การเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking)
- สายโซ่โมเลกุลขาดออก (chain scission)
- การปรับแต่งโครงสร้างของโมเลกุล (modification to chain structure)
- การปรับแต่งหมู่ซึ่งอยู่ด้านข้างของโพลิเมอร์ (modification to the side group of the polymer)
- การเปลี่ยนแปลงทางเคมีกับสารอื่น ๆ (other ingredients) ที่อยู่ในพลาสติก

2.2.1 การเสื่อมสภาพของพลาสติกแต่ละชนิด อาจจะเกิดได้ต่าง ๆ กันดังนี้

โพลิเอทิลีน และโพลิโพรพิลีน และโพลิไวนิลคลอไรด์ ปกติแล้วโพลิเอทิลีนและโพลิไวนิลคลอไรด์ทนต่อแสงได้ดี เพราะพันธะที่มีอยู่ไม่ดูดกลืนแสงบนผิวโลกที่มีความยาวคลื่นที่จะไปทำลายพันธะเหล่านี้ แต่อาจเกิดหมู่คาร์บอนิลหรือหมู่อื่น ๆ บนพอลิเมอร์ทั้งสองในระหว่างการขึ้นรูป ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมิคัล ทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองมีความทนต่อแสงได้จำกัด สาร antioxident ที่ใช้กับโพลิเอทิลีน อาจเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมิคัลขึ้นได้ รังสีที่มีพลังงานสูงอาจทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดออกและ/หรือเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล ซึ่งปกติพอลิเมอร์ที่เป็น monosubsitued ethylene มักเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล และโพลิเมอร์ที่เป็น disubsitued ethylene มักสลายตัว ยกเว้นโพลิโพรพิลีนจะสลายตัว และโพลิไวนิลคลอไรด์จะเกิดทั้งการสลายตัวและเชื่อมโยงโมเลกุล ทั้งนี้ขึ้นกับสภาวะแวดล้อม

โพลิไวนิลคลอไรด์ เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปซึ่งจำเป็นต้องใช้ความร้อน อาจเกิดการย่อยสลายได้โดยการขจัดไฮโดรเจนคลอไรด์ออกจากโมเลกุล โดยเกิดกระบวนการที่เรียกว่า unzipping (โมโนเมอร์จะหลุดออกทีละ 1 หน่วยจากสายโซ่โมเลกุล) การป้องกันโดยใช้สารเกลือสบู่ของโลหะหนัก เช่น แบเรียม แคดเมี่ยม ตะกั่ว สังกะสี และแคลเซียม ส่วนโพลิโพรพิลีน จะเกิดการย่อยสลายเร็วขึ้นก้ามีออกซิเจน

ไนลอน ภายในโมเลกุลของไนลอนจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ภายในโมเลกุล ดังนี้



รูปที่ 21 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของไนลอน

กลุ่มพอลิเมอร์โพลิเอไมด์ เมื่อได้รับแสงความยาวคลื่นสั้น (<300 nm) สามารถเกิดปฏิกิริยาทั้งการเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking) และสายโซ่โมเลกุลขาดออก (chain scission) ซึ่งการที่สายโซ่โมเลกุลขาดออกนั้นเกิดที่พันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนอะตอม จะปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์และไนโตรเจนอะตอม ส่วนการเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลนั้นจะเกิดจากไฮโดรเจนอะตอมของเมทิลีนกรุ๊ป ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดที่ใกล้ ๆ กับ NH กรุ๊ป

โพลิออกซิเมทิลีน ปฏิกิริยาการเกิดโพโตไลซีส มีความสำคัญต่อพอลิเมอร์ชนิดเอเทอโรอะตอม(hetero-atom) เช่นโพลิออกซิเมทิลีน โดยจะกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดออกที่สายโซ่หลักของโพลิออกซิเมทิลีน และเกิดดีพอลิเมอไรด์ (radicals depolymerising) อยู่บ้างได้ เป็นโมโนเมอร์และฟอร์มาดีไฮด์ (formaldehyde) ในรูปแรดิคัล และผลผลิตที่เกิดโพโตไลซีสของฟอร์มาดีไฮด์จะให้คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารระเหย

โคพอลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน จะเกิดปฏิกิริยาทั้งโพโตไลซีสและเทอร์มัล-ออกซิเดชั่น (thermal and photo-oxidation) ได้อะไลลิกกรุ๊ป (allylic group)

2.3 สมบัติทางกายภาพของพลาสติก

สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์มีหลายอย่างแต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในที่นี้ ได้แก่ความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และ ความหนาแน่น

2.3.1 ความต้านแรงดึงและการยืดตัว

สมบัติที่เกี่ยวกับความต้านแรงดึงมีความสำคัญในการควบคุมคุณภาพและกำหนดลักษณะของพลาสติก ใช้ในการค้นคว้าและวิจัยและการออกแบบด้านวิศวกรรม

คำจำกัดความที่เกี่ยวกับความต้านแรงดึงและการยืดตัวของพลาสติกได้กล่าวไว้ในมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 638 ดังนี้

2.3.1.1 ความต้านแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) หมายถึง แรงดึงสูงสุดที่ใช้ในการดึงตัวอย่างหารด้วย พื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดก่อนดึง ในระยะความยาวที่กำหนดอันหนึ่ง มักมีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล (MPa)

2.3.1.2 ความต้านแรงดึงที่ขณะใดขณะหนึ่ง (Tensile Stress) หมายถึง แรงดึงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุด ก่อนถูกดึงในระยะความยาวที่กำหนดอันหนึ่งในขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งมีหน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่หน้าตัด โดยปกติใช้หน่วย SI (MPa)

1) การคำนวณ

สูตรในการคำนวณเป็นดังนี้

ความต้านแรงดึง

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \qquad \text{..... (1)}$$

σ = ความต้านแรงดึง (MPa)

F = แรงดึง (N)

A_0 = พื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดก่อนดึง (mm^2)

2.3.1.3 การยืดตัว (Strain) หมายถึงอัตราส่วนของความยาวที่เพิ่มขึ้นต่อความยาวเริ่มต้น

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad \text{..... (2)}$$

ε = การยืดตัว

ΔL = ระยะความยาวที่เพิ่มขึ้นในช่วงความยาวที่กำหนดอันหนึ่ง (gage marks)

L_0 = ระยะความยาวเริ่มต้น(gage length) ซึ่งจะทำเครื่องหมายไว้(gage marks)ก่อนดึง

การยืดตัว ส่วนใหญ่จะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งมักเรียกว่า % Elongation

2.3.1.4 Modulus of elasticity หรือมีชื่อเรียกอย่างอื่นว่า elastic modulus หรือ young modulus หมายถึง อัตราส่วนของ stress ต่อ strain ที่สอดคล้องกันในช่วงที่เป็นเส้นตรงซึ่งปกติจะอยู่ที่ช่วงแรกของการดึง ดังสูตรต่อไปนี้

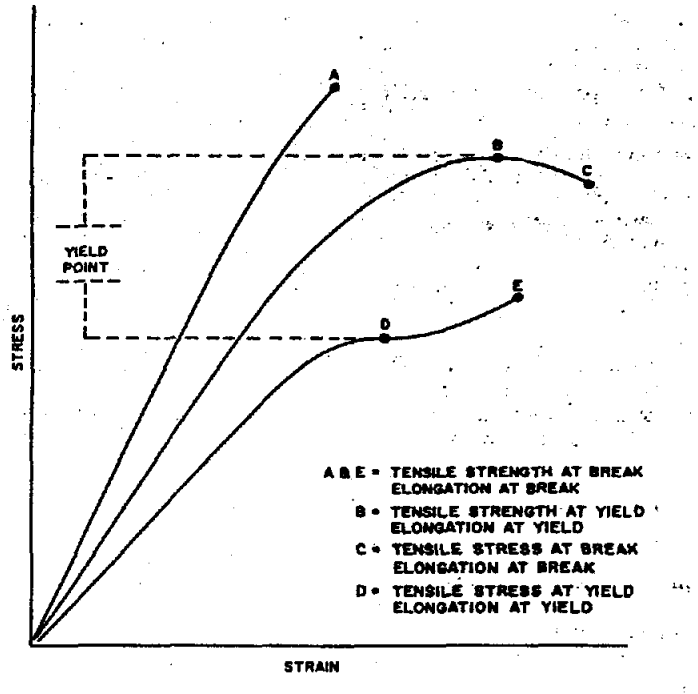
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad \text{..... (3)}$$

E = Modulus of Elasticity

ε = Strain

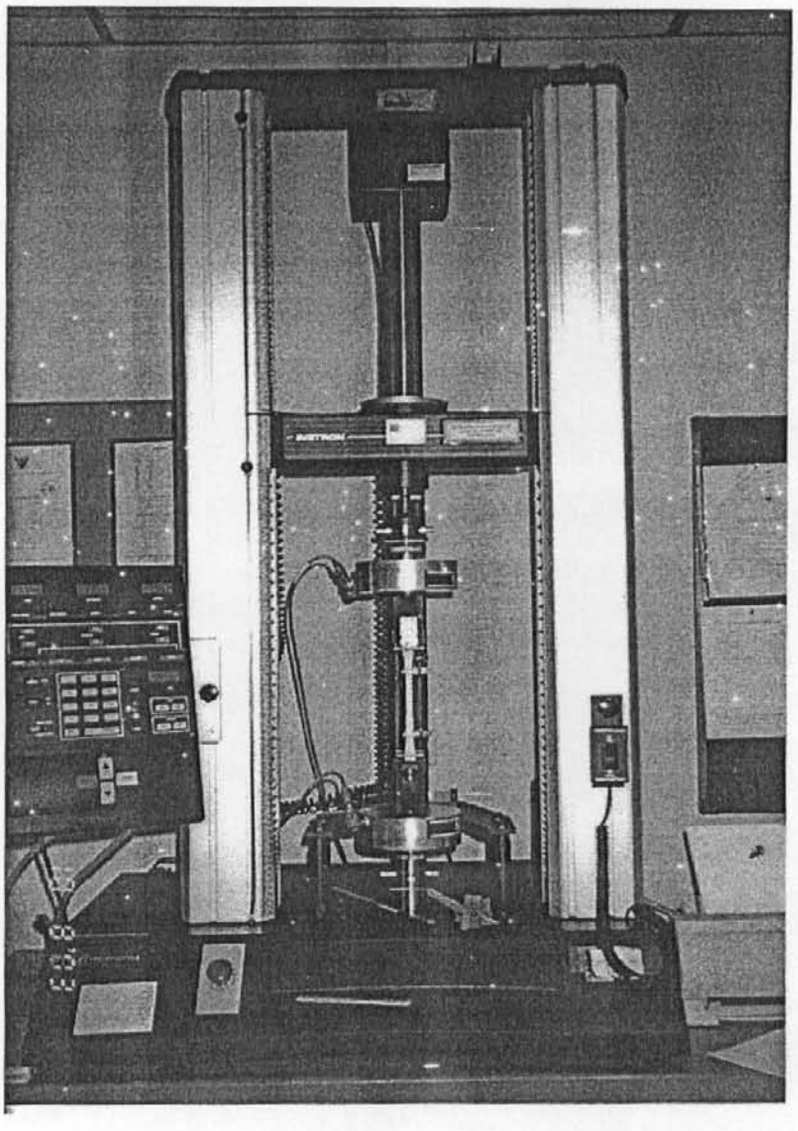
σ = Stress (F/A_0)

2.3.1.5 จุดคราก (yield point) หมายถึงจุดแรกบน stress-strain curve ซึ่งจุดนี้มีการยืดตัวโดยใช้แรงเพิ่มขึ้น ความต้านแรงดึงสูงสุดของพลาสติกอาจเกิดขึ้นที่จุดครากหรือจุดแตก(break point)ได้ ซึ่งสามารถศึกษาได้จากรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 22 Stress- Strain Curve ในการทดสอบความต้านแรงดึงและการยืดตัว

1) เครื่องมือวัดความต้านแรงดึงและการยืดตัวแสดงในรูปที่ 23

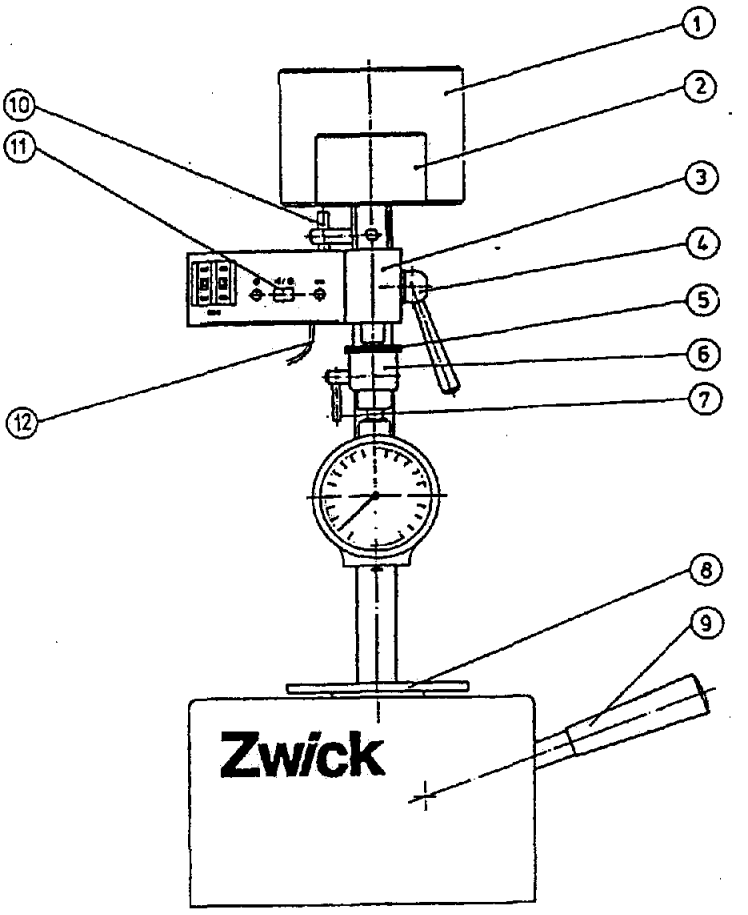


รูปที่ 23 เครื่องมือวัดความต้านแรงดึงและการยืดตัว

2.3.2 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงการทนต่อการเจาะทะลุ (penetration) หรือการขีดข่วน การทดสอบความแข็งส่วนใหญ่ ทดสอบโดยอาศัยหลักการทนต่อการเจาะทะลุ โดยใช้ Indentor กดลงบนแผ่นพอลิเมอร์ภายใต้น้ำหนักคงที่อันหนึ่ง เครื่องมือทดสอบความแข็งมีหลายแบบ เช่น Durometer Hardness Tester ซึ่งมีหลายสเกล เช่น shore A , shore D สเกล Shore A จะวัดพอลิเมอร์ที่มีลักษณะอ่อนนิ่มกว่า Shore D เช่นพวกยางและอิลาสโตเมอร์ ส่วนสเกล shore D จะใช้วัดพอลิเมอร์ที่เป็น พลาสติกเป็นส่วนใหญ่

ส่วนเครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell Hardness จะใช้วัดพอลิเมอร์หรือสารที่มีความแข็งมากขึ้นไปอีก ในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องวัดความแข็งแบบ Durometer Hardness ในสเกล shore D เครื่องมือชนิดนี้แสดงใน รูปที่ 24



1. Loading weight 50 N
2. Loading weight 12.5 N
3. Bracket arm
4. Clamping bolt for bracket arm
5. Locking nut
6. Ball-and-socket joint
7. Clamping lever for ball-and-socket joint
8. Specimens support table
9. Height-setting lever for test specimen
10. Signal tripping pin
11. Signal generator housing
12. Mains cable

รูปที่ 24 เครื่องมือวัดความแข็งแบบ Durometer Hardness (Shore D)

2.3.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของพลาสติกสามารถหาได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีเดนซิตี้-เกรเดียน เทคนิคตาม ASTM D 1505 Density of Plastics by Density-Gradient Technique, วิธีพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) ซึ่งกล่าวถึงใน ASTM D 792-66 (Reapproved 1979) Specific gravity and Density of Plastics by Displacement และ JIS K 7112 และมาตรฐานอื่น ๆ วิธีแทนที่ของเหลวตาม ASTM D 792-00

2.3.3.1 วิธีเดนซิตี้-เกรเดียน เทคนิค

มีอุปกรณ์คือคอลัมน์ที่จุ่มในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบต้องเป็นเม็ดหรือตัดให้มีขนาดเล็กประมาณเม็ดถั่วเขียว และไม่มีรูพรุน วิธีนี้มีหลักการคือจะต้องเตรียม Density-Gradient Column ซึ่งบรรจุของเหลว 2 ชนิด ที่มีความหนาแน่นต่างกัน ซึ่งครอบคลุมความ หนาแน่นของตัวอย่างที่ ต้องการทดสอบ ตัวอย่างของเหลวที่นำมาใช้ได้แก่ Diethylene glycol และ น้ำ ซึ่งมีความหนาแน่นในช่วง 0.79-1.00 กรัม/ลบ.ซม. สัดส่วนของ Diethylene glycol และ น้ำจากก้น คอลัมน์จนถึงส่วนบนสุดของของเหลวจะไม่เท่ากัน สัดส่วนของของเหลวที่มีความหนาแน่นมากต่อ ของเหลวที่มีความหนาแน่นน้อยจะมากที่ก้นคอลัมน์แล้วสัดส่วนนี้จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงส่วนบนสุด ของคอลัมน์ ดังนั้นที่ระยะความสูงต่าง ๆ ของคอลัมน์ของเหลวจะมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ส่วนล่างสุด ของคอลัมน์จะมีความหนาแน่นมากและความหนาแน่นจะค่อย ๆ ลดลง จนน้อยที่สุดที่ส่วนบนสุด ของของเหลวเมื่อหย่อนของเหลวและลูกแก้วมาตรฐาน(มากกว่า 12 ลูกขึ้นไป) ที่ทราบความหนาแน่นลงไป ตัวอย่างและลูกแก้วมาตรฐานจะจมลงไปในคอลัมน์แล้วมันจะหยุดนิ่งที่ตรงตำแหน่ง ที่ ของเหลวในคอลัมน์มีความหนาแน่นเท่ากับความหนาแน่นของตัวอย่างและความหนาแน่นของลูกแก้ว มาตรฐาน ความหนาแน่นของตัวอย่างสามารถคำนวณได้ จากการเปรียบเทียบระยะความสูงของตัวอย่าง กับระยะความสูงของลูกแก้วมาตรฐานที่ทราบความหนาแน่นซึ่งหยุดนิ่งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง ตัวอย่างควรเป็นชิ้นที่มีรูปร่างซึ่งง่ายต่อการหาจุดกึ่งกลางปริมาตร

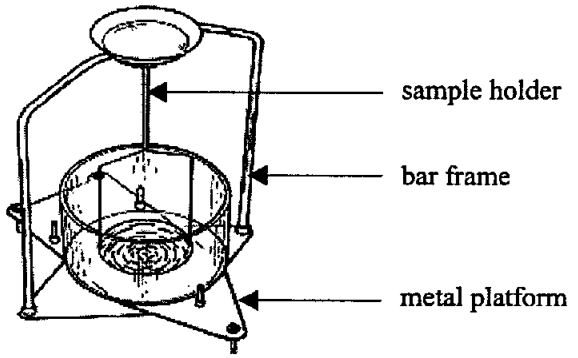
2.3.3.2 วิธีพิคโนมิเตอร์

ใช้อุปกรณ์คือขวดพิคโนมิเตอร์ ซึ่งมีปากแคบ ขนาดขวดมีปริมาตรมาตร 25-50 ลูกบาศก์เซนติเมตรมีจุกปิดซึ่งมีรูเล็ก ๆ ตรงกลางเพื่อให้เวลาปิดของเหลวในขวดจะไหลล้นออกมา ตัวอย่างที่จะหาความหนาแน่นจะต้องเป็นเม็ดหรือผง ที่สามารถใส่เข้าลงปากขวดพิคโนมิเตอร์ได้ของเหลวที่ใช้จะต้องไม่ละลายตัวอย่างที่นำมาหาความหนาแน่น ไม่ระเหยง่าย และเปียกตัวอย่าง ของเหลวที่นิยมใช้มากคือ Kerosine หลักการหาความหนาแน่นของวิธีนี้คือ ชั่งตัวอย่างในอากาศ และชั่งตัวอย่างในของเหลวในขวดพิคโนมิเตอร์ รวมทั้งหาความหนาแน่นของของเหลวที่ใช้ จากนั้นนำมาคำนวณหาความถ่วงจำเพาะของ

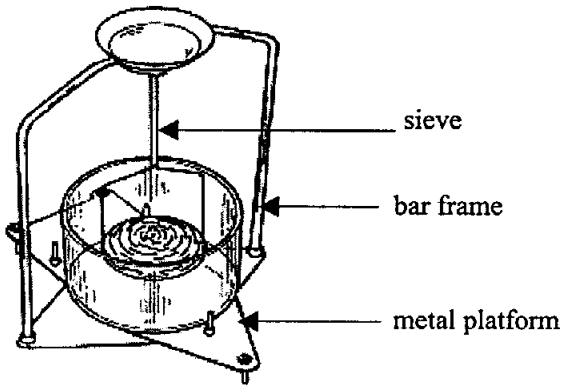
ตัวอย่างซึ่งเท่ากับน้ำหนักของตัวอย่างหารด้วยน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่าตัวอย่าง จากนั้นนำมาคำนวณหาความหนาแน่นของตัวอย่างได้

2.3.3.3 วิธีแทนที่ของเหลว

ตัวอย่างที่จะนำมาหาความหนาแน่นจะมีน้ำหนักประมาณ 1-50 กรัม เครื่องมือที่ใช้คือเครื่องชั่งและอุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ ฐานวางบีกเกอร์ซึ่งสำหรับใส่ของเหลวเพื่อหาความหนาแน่น (metal platform) กรอบสำหรับวางลวดแขวนตัวอย่างซึ่งกดน้ำหนักลงบนเครื่องชั่ง (bar frame) ลวดแขวนตัวอย่างซึ่งมีจานเล็กๆ ด้านบนและตะแกรงหงายวางตัวอย่างด้านล่าง (sample holder) ซึ่งใช้กรณีตัวอย่างจมน้ำ (รูปที่ 4) ถ้าตัวอย่างลอยน้ำจะใช้ sieve (รูปที่ 5) ซึ่งเป็นลวดมีจานชั่งตัวอย่างด้านบนและตะแกรงคว่ำกดตัวอย่างด้านล่าง



รูปที่ 25 อุปกรณ์หาความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ



รูปที่ 26 อุปกรณ์หาความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ

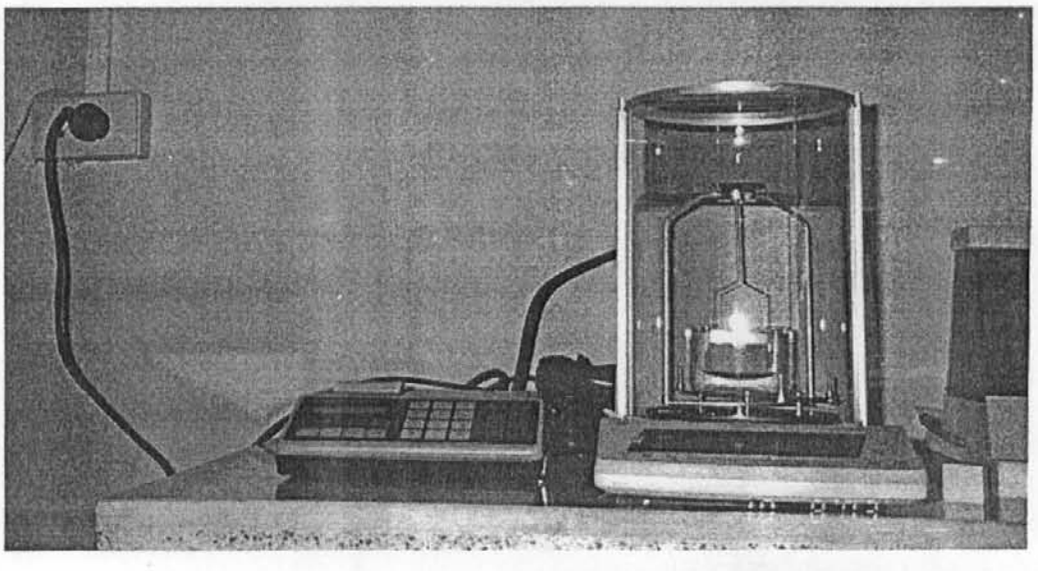
2.3.4 วิธีการหาความหนาแน่น คือเอาจานสำหรับชั่งตัวอย่างออกจากเครื่องชั่ง แล้ววางกรอบสำหรับวางลวดแขวนตัวอย่างแทนที่ จากนั้นวางฐานวางบีกเกอร์คร่อมกรอบสำหรับวางลวดแขวนตัวอย่าง โดยที่ฐานวางบีกเกอร์ไม่กดน้ำหนักลงบนเครื่องชั่งแล้วจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 25 ถ้าตัวอย่างจมน้ำ และรูปที่ 26 ถ้าตัวอย่างลอยน้ำ ใส่น้ำกลั่นต่ำกว่าขอบ บีกเกอร์ 0.5 เซนติเมตร แล้ว tare เครื่องชั่งให้เป็นศูนย์ วางชิ้นตัวอย่างบนจานด้านบนของลวดแขวนตัวอย่างชนิด (sample holder) หรือ sieve ถ้าตัวอย่างจมน้ำหรือลอยน้ำตามลำดับ บันทึกน้ำหนักที่ชั่งในอากาศเป็นกรัม $w_{(a)}$ แล้ว tare เครื่องชั่งในขณะที่ตัวอย่างยังอยู่บนจานด้านบนของลวดแขวนตัวอย่าง เครื่องชั่งจะอ่านเป็นศูนย์ แล้วค่อย ๆ คีบตัวอย่างวางในตะแกรงของลวดแขวนตัวอย่างชนิด sample holder (รูปที่ 26) หรือวางใต้ตะแกรงของลวดแขวนตัวอย่างชนิด sieve บันทึก น้ำหนัก G ที่อ่านได้จากเครื่องชั่ง (ไม่คิดเครื่องหมายซึ่งจะเป็นลบ) คำนวณหาความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่น ดังนี้

ความถ่วงจำเพาะ = $w_{(a)} / G$ ..... (4)

$w_{(a)}$ = น้ำหนักตัวอย่างชั่งในอากาศ, กรัม

G = แรงลอยตัว (buoyancy), กรัม

ความหนาแน่น = ความถ่วงจำเพาะ × ความหนาแน่นของน้ำที่ 23° C (0.99756)



รูปที่ 27 แสดงการหาความหนาแน่นของตัวอย่างพอลิเมอร์

บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการ

3.1 ตัวอย่าง

3.1.1 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ Type I ตามมาตรฐาน ASTM D 638

3.1.2 ชิ้นทดสอบเป็นแผ่นที่มีความหนา ความกว้างและความยาวเท่ากับ 10× 100 ×100 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 2240

3.1.3 ชิ้นทดสอบพลาสติกขนาด 1 ตารางมิลลิเมตร

3.2 วัสดุและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่อง Universal Testing Machine (Instron 4466)ซึ่งมีอุปกรณ์วัดการยืดตัว(extensometer)

3.2.2 เครื่องวัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบ วัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร

3.2.3 เครื่อง Injection Molding สำหรับฉีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

3.2.4 เครื่องมือวัดความแข็ง แบบ Durometer Hardness Tester (Zwick)

3.2.5 เครื่องอัดเม็ดพลาสติกเป็นแผ่นโดยวิธี Compression Molding

3.2.6 เครื่องชั่งละเอียด 5 ตำแหน่ง

3.2.7 อุปกรณ์สำหรับทดสอบความหนาแน่น คือ metal platform, bar frame, sample holder หรือ sieve

3.2.8 บีกเกอร์ใส่น้ำกลั่น

3.3 สารเคมี สารละลาย และวิธีเตรียม

3.3.1 น้ำกลั่น

3.3.2 เม็ดพลาสติก 6 ชนิด คือ โพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน ไนลอน โพลิออกซิเมตทิลีน โคโพลิเมอร์อะไครโลไนไตรล์- บิวตะไดอีน-สไตรีน และโพลิไวนิลครอไรด์

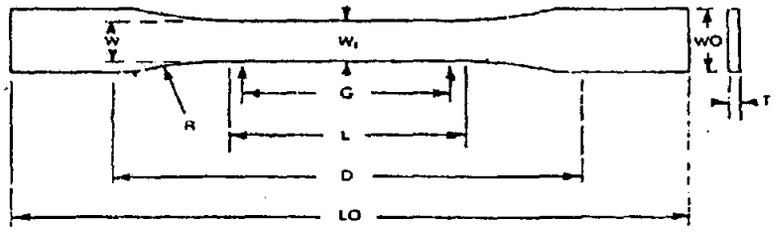
3.3.3 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสองบความต้านแรงดึงและการยืดตัว

3.3.3.1 ปรับตั้งเครื่อง Injection Molding สำหรับฉีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type I

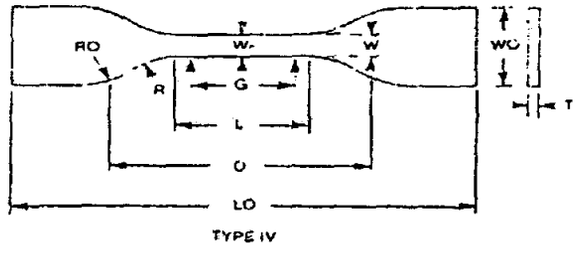
3.3.3.2 นำเม็ดพลาสติกใส่ในเครื่อง Injection Molding แล้วฉีดเป็นชิ้นทดสอบ

3.3.3.3 นำเม็ดพลาสติกอีก 5 ชนิดปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 3.3.3.2

Type I test specimen



Type IV test specimen



รูปที่ 28 แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบType I และ Type IV

ตารางที่ 1 แสดงขนาดชิ้นทดสอบความต้านแรงดึงและการยืดตัว

Dimension	Type I	Type IV	Tolerance
W = Width of narrow section	13	6	±0.5
L = Length of narrow section	57	33	±0.5
W_0 = Width over all	19	19	±0.5
L_0 = Length over all	165	115	no max
G = Gage length	50	25	±0.13
D = Distance between grips	115	65	±5
R = Radius of fillet	76	14	±1
R_0 = Outer radius	-	25	±1

3.3.4 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบความแข็ง

3.3.4.1 อัดเม็ดพลาสติกเป็นแผ่นด้วยวิธี Compresssion Molding ให้มีขนาดความหนา ความกว้างและความยาวเท่ากับ 10× 100 ×100 มิลลิเมตร

3.3.4.2 นำพลาสติกอีก 5 ชนิดปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 3.3.4.1

3.3.5 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบความหนาแน่น

3.3.5.1 นำชิ้นทดสอบในข้อ 3.3.3.2 หรือข้อ 3.3.4.1 ตัดให้ได้ขนาดประมาณ 1 ตารางมิลลิเมตร โดยปรับขอบผิวชิ้นทดสอบให้เรียบ

3.4 การศึกษาทดลอง

3.4.1 วิธีทดลองหาความต้านแรงดึงและการยืดตัว

3.4.1.1 ขีดระยะ gage length ตรงกึ่งกลางชิ้นทดสอบทั้ง 7 ชิ้นโดยใช้ระยะ 25 มิลลิเมตร

3.4.1.2 วัดความกว้าง และความหนา 3 จุด ภายในระยะ gage length ด้วยเครื่องวัดความหนา บันทึกค่าที่น้อยที่สุดของแต่ละชิ้นทดสอบ

3.4.1.3 อุ่นเครื่องดึงยืด 15 นาทีและทำการ calibrate load cell และ extensometer ตามคู่มือของเครื่อง

3.4.1.4 ตั้งโปรแกรมเพื่อให้เครื่องดึงชิ้นทดสอบ ที่เตรียมในข้อ 3.3.3 ด้วยอัตราเร็ว 50 มม./นาที จับชิ้นทดสอบชิ้นแรกโดยใช้ปากจับ (grip) บนและล่างของเครื่องดึงยืดเพื่อให้ความยาวของชิ้นทดสอบอยู่ในแนวเส้นตรงของแรงดึง

3.4.1.5 ใส่ค่าความกว้างและความหนาที่น้อยที่สุดของชิ้นทดสอบที่จะดึงยืดลงในโปรแกรมการทดสอบ

3.4.1.6 กดปุ่มเริ่มต้นการดึง ปล่อยให้ตัวอย่างถูกดึงจนขาด

3.4.1.7 เครื่องจะคำนวณค่าความต้านแรงดึงสูงสุดโดยการส่งสัญญาณค่าแรงดึงขาดจาก lode cell มายังตัววัดเพื่อคำนวณค่าต้านแรงดึงสูงสุด ส่วนค่า % Elongation วัดโดย extensometer บันทึกค่าความต้านแรงดึงสูงสุดและความยืดเมื่อขาด

3.4.1.8 นำชิ้นทดสอบที่เหลือทดสอบตามข้อ 3.4.1.5 ถึงข้อ 3.4.1.7

3.4.1.9 ทำการทดสอบซ้ำโดยปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 3.4.1.1 ถึง ข้อ 3.4.1.7 กับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมชิ้นทดสอบในคราวเดียวกันโดยเก็บชิ้นทดสอบในระยะเวลาต่าง ๆกัน

3.4.2 วิธีทดลองหาความความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2240

3.4.2.1 ปรับพื้นผิวสัมผัสที่วางตัวอย่าง (8) ให้ได้แนวระนาบ โดย ดูรูปที่ 24 ประกอบ

1) ปลดล็อค clamping lever for the ball-and-socket-joint (7)

2) วาง rectangular adjustment plate ลงบน specimen support table (8)

3) กด hight setting lever for test specimen (9) ลง แล้วจึงหมุน clamping lever ให้แน่น

3.4.2.2 ปรับระยะห่างของหัวเข็ม (Indentor) กับผิวชิ้นทดสอบ โดย

1) วางชิ้นทดสอบในข้อ 3.3.4.1 บน specimen support table (8)

2) ปลดล็อค clamping bolt for the braket arm (4)

3) เลื่อน braket arm (3) ขึ้นลง จนกระทั่งระยะห่างระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นทดสอบและหัวเข็มของเครื่อง อยู่ระหว่าง 5-12 มิลลิเมตร

3.4.2.3 การวัดค่าความแข็ง

1) วางชิ้นทดสอบลงบน specimen support table (8)

2) กด height setting lever for test specimen (9) ลงเบา ๆ จนพื้นผิวสัมผัสตรงส่วนที่หัวเข็มติดอยู่กับผิวสัมผัสของชิ้นทดสอบ ซึ่งการกดนี้ควรให้หัวเข็มห่างจากขอบของชิ้นทดสอบอย่างน้อย 13 มิลลิเมตร

3) อ่านค่าบนสเกลที่เข็มชี้ตรงหน้าปัด

4) ทำการวัดซ้ำอย่างน้อย 10 ครั้ง โดยให้แต่ละจุดที่เข็มเจาะห่างกันอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร บันทึกค่า แล้วหาค่าเฉลี่ย

5) ทำการทดสอบซ้ำกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่เตรียมชิ้นทดสอบในคราวเดียวกันโดยเก็บชิ้นทดสอบในระยะเวลาต่าง ๆ

3.4.3 วิธีทดลองหาความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D 792

3.4.3.1 วิธีทดสอบ

1) จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 25 ถ้าตัวอย่างจมน้ำ หรือรูป 26 ถ้าตัวอย่างลอยน้ำ

2) ชั่งตัวอย่างบนจานชั่งด้านบน sample holder หรือ sieve บันทึกน้ำหนักตัวอย่างในอากาศ

3) Tare น้ำหนักตัวอย่างขณะตัวอย่างอยู่บนจานชั่ง แล้วคีบตัวอย่างวางบน sample holde หรือใต้ sieve

5) บันทึกตัวเลขจากเครื่องชั่ง ค่า G ไม่คิดเครื่องหมาย

6) คำนวณหาค่าความหนาแน่นตามสูตรที่ (4)

7) ทำการทดสอบหาความหนาแแน่นของตัวอย่างพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่เตรียมชิ้นทดสอบในคราวเดียวกันโดยเก็บชิ้นทดสอบในระยะเวลาต่าง ๆ

8) บันทึกผลการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการศึกษาทดลอง

4.1 ผลการศึกษาทดลองความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็งและความหนาแน่นของพลาสติกชนิดต่าง ๆ โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ t-test ซึ่งแสดงดังตารางต่อไปนี้

4.1.1 ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ด้วยสถิติ t-test ของค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และ ความหนาแน่นของ โพลิเอทิลีน

ลำดับที่	ความต้านแรงดึง ,MPa		การยืดตัว,%		ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ , เดือน	ความแข็ง (Shore D)		ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ , เดือน	ความหนาแน่น g/cm^3		ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ , เดือน
	t_{cal}	t_{crit}	t_{cal}	t_{crit}		t_{cal}	t_{crit}		t_{cal}	t_{crit}	
1	0.587		-		5	-		-	-		-
2	1.401		-1.236		10	0.000	2.101	9	-		-
3	-2.371	2.179	7.277	2.179	11	0.000		7	-		-
4	-5.358		5.373		13	-	-	-	-	-	-
5	-39.47		5.910		23	- 4.828		23	-		-
6	-		-		-	-14.117	2.101	24	-		-
8	-		-		-	-20.412	2.101	22	- 0.955	2.776	23
9	-	-	-	-	-	-5.589		23	-		-
10	-		-		-	-		-	-	-	-
11	-		-		-	-17.810	2.101	33	-		-

จากตารางที่ 2 วิเคราะห์ได้ว่าชิ้นทดสอบโพลิเอทิลีน สามารถเก็บไว้ได้ 10 10 9 และ 23 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็งและความหนาแน่น ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่า $t_{cal} < t_{crit}$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.1.2 ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วยสถิติ t-test ของค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และ ความหนาแน่นของโพลิโพรพิลีน

ลำดับที่	ความต้านแรงดึง ,MPa		การยืดตัว,%		ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ , เดือน	ความแข็ง (Shore D)		ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ , เดือน	ความหนาแน่น g/cm^3		ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ , เดือน
	t_{cal}	t_{crit}	t_{cal}	t_{crit}		t_{cal}	t_{crit}		t_{cal}	t_{crit}	
1	-13.78		6.20		5	-		-	-		-
2	-7.04		10.33		7	-		-	-		-
3	-12.40		13.64		8	-		-	-	-	-
4	-3.19	2.179	-4.766	2.179	13	-	-	-	-		-
5	-		-		-	-12.677		26	-		-
6	-4.85		4.806	2.179	14	-7.520	2.101	26	-1.012	2.776	15
7	-13.45	2.179	-		25	-		-	-		-
8	-		-	-	-	-17.942	2.101	4	-2.240	2.776	5
9	-	-	-		-				-0.604		17

จากตารางที่ 3 วิเคราะห์ได้ว่าชิ้นทดสอบโพลิโพรพิลีน เมื่อเก็บไว้ 5 5 และ 4 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว และความแข็ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ แต่สามารถเก็บชิ้นทดสอบโพลิโพรพิลีนไว้ได้นานถึง 17 เดือน โดยที่ค่าความหนาแน่นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญนัยสำคัญโดยพิจารณาจากค่า $t_{cal} < t_{crit}$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.1.3 ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วยสถิติ t-test ของค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นของไนลอน (No.1-8) โพลิออกซิเมตทิลีน (No. 9-11) โคโพลิเมอร์ อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน (No.12) และโพลิไวนิลคลอไรด์ (No.13)

ลำดับที่	ความต้านแรงดึง, MPa		การยืดตัว,%		ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความแข็ง (Shore D)		ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความหนาแน่น g/cm^3		ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
	t_{cal}	t_{crit}	t_{cal}	t_{crit}		t_{cal}	t_{crit}		t_{cal}	t_{crit}	
1	12.43		-		12	-		-	4.750	2.776	13
2	-6.81		0.00		14	-	-	-	-	-	-
3	-7.55	2.179	-6.97	2.179	17	-		-	-8.041	2.776	17
4	-		-27.48		19	0.000		21	-		-
5	7.09		-13.18		19	-		-	-		-
6	-		-		-	0.000	2.101	21	-	-	-
7	-		-		-	-6.102		23	-		-
8	-		-		-	-		-	-5.033	2.776	23
9	-3.86	2.179	12.13	2.179	8	-		-	-		-
10	-4.94		7.95		8	-		-	-		-
11	-		-		-	-		-	0.000	2.776	23
12	-2.382	2.179	4.425	2.179	14	-		-	-	-	-
13	-		-		-	-		-	-0.940	2.776	39

จากตารางที่ 4 วิเคราะห์ได้ว่าชิ้นทดสอบไนลอน เมื่อเก็บไว้ 12 และ 4 เดือน ค่าความต้านแรงดึง และความหนาแน่นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ แต่สามารถเก็บชิ้นทดสอบไนลอนไว้ได้นานถึง 14 และ 21 เดือน โดยที่ค่าการยืดตัว และความแข็งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ

ชิ้นทดสอบโพลิออกซิเมทิลีน เมื่อเก็บไว้ 8 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ แต่สามารถเก็บชิ้นทดสอบโพลิออกซิเมทิลีนไว้ได้นานถึง 23 เดือน โดยที่ค่าความหนาแน่นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ชิ้นทดสอบโคโพลิเมอร์ อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน เมื่อเก็บไว้ 14 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ชิ้นทดสอบโพลิไวนิลคลอไรด์ สามารถเก็บได้ 26 เดือน โดยที่ค่าความหนาแน่นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญโดยพิจารณาจากค่า $t_{cal} < t_{crit}$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษาทดลอง

จากการทดสอบพลาสติกทั้ง 6 ชนิดเพื่อหาความต้านแรงดึง การยืดตัว ตามมาตรฐาน ASTM D 638 ความแข็งและความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D 2240 และ ASTM D 792 ตามลำดับ

- ชิ้นทดสอบโพลิเอทิลีน สามารถเก็บไว้ได้ 10 10 9 และ 23 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็งและความหนาแน่น ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ

- ชิ้นทดสอบโพลิโพรพิลีน เมื่อเก็บไว้ 5 5 และ 4 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว และความแข็ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ แต่สามารถเก็บชิ้นทดสอบโพลิโพรพิลีนไว้ได้นานถึง 17 เดือน โดยที่ค่าความหนาแน่นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

- ชิ้นทดสอบไนลอน เมื่อเก็บไว้ 12 และ 4 เดือน ค่าความต้านแรงดึง และความหนาแน่นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ แต่สามารถเก็บชิ้นทดสอบไนลอนไว้ได้นานถึง 14 และ 21 เดือน โดยที่ค่าการยืดตัว และความแข็งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ

- ชิ้นทดสอบโพลิออกซิเมทิลีน เมื่อเก็บไว้ 8 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ แต่สามารถเก็บชิ้นทดสอบโพลิออกซิเมทิลีนไว้ได้นานถึง 23 เดือน โดยที่ค่าความหนาแน่นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

- ชิ้นทดสอบโคโพลิเมอร์ อะไครโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน เมื่อเก็บไว้ 14 เดือน ค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

- ชิ้นทดสอบโพลิไวนิลคลอไรด์ สามารถเก็บได้ 26 เดือน โดยที่ค่าความหนาแน่นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

- พลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนสามารถเก็บชิ้นทดสอบไว้ได้นานกว่าพลาสติกชนิดโพลิโพรพิลีน

- ค่าความหนาแน่นจะมีความเสถียรมากกว่าสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ อาจเนื่องมาจากน้ำหนักของพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่น

- ไนลอนมีค่าการยืดตัวเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมอย่างเห็นได้ชัดกว่าพลาสติกอีก 5 ชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไนลอนเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุล จึงให้ค่าการยืดตัวมากขึ้น

การที่พลาสติกทุกชนิดมีสมบัติแปลี่ยนแปลงจากเดิมอาจเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นจากออกซิเจนในอากาศ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของพลาสติกได้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความร่วมมือจากบริษัทและหน่วยงานราชการที่เป็นผู้ส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ทดสอบ ดร. พีระวัฒน์ สมนึกที่ให้ความอนุเคราะห์ฉีดพลาสติกขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ ผู้ร่วมดำเนินการ และผู้เกี่ยวข้องในกลุ่มงานเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ 1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้อำนวยการโครงการฟิสิกส์และวิศวกรรมและหัวหน้ากลุ่มงานเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ 1

เอกสารอ้างอิง

1. ปรีชา พหลเทพ. **โพลิเมอร์.** มหาวิทยาลัยรามคำแหง: พิมพ์ครั้งที่ 7. 2536, หน้า 310-319, 327-328, 348-356.
2. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. **วิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ 1.** [ม.ป.ท.,ม.ป.ป.], หน้า 188 –191.
3. American Society for Testing and Materials. Standard test method for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement. D792-00. **In Annual book of ASTM standard:** plastics (I). D 256 – D 2343 vol. 08.01. 2003. p.155-160.
4. American Society for Testing and Materials. Standard test method for rubber property-durometer hardness. D2240-02b. **In Annual book of ASTM standard:** rubber, natural and synthetic-general test method vol. 09.01 2003. p.423-434.
5. American Society for Testing and Materials. Standard test method for tensile properties of plastics. D 638-02a. **In Annual book of ASTM standard:** plastics (I) natural and synthetic-general test method vol. 09.01. 2003. p.423-434.
6. Grassie, Norman , and Scott, Gerald. **Polymer degradation and stabilisation.** University of Combridge: 1985, p. 44,94,96,83-84,196.

ภาคผนวก ก.

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว และความแข็ง โดยเก็บชิ้นทดสอบในระยะเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบแตกต่างหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของประชากรสองกลุ่ม

- การทดสอบแบบสองทาง (Two-tailed test) โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

  $H_o=\mu_1=\mu_2$ (H_oเป็นสมมติฐานที่เกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ทราบค่าแน่นอน)

  $H_a=\mu_1\neq\mu_2$ (H_oเป็นสมมติฐานที่ตั้งเพื่อขัดแย้งกับ H_o)

- ขนาดของประชากรทั้งสองมีค่าน้อย ($n_1<30$ หรือ $n_2<30$ หรือทั้ง n_1 และ $n_2<30$)

- ความแปรปรวนของทั้งสองประชากรเท่ากัน ($\sigma_1^2=\sigma_2^2$)

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ

$$t=\frac{\overline{X_1}-\overline{X_2}}{\sqrt{(n_1-1)S_1^2+(n_2-1)S_2^2\left(\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}\right)}} \quad \text{.....(6)}$$

$\overline{X_1}$ = ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างในกลุ่มที่ 1

$\overline{X_1}$ = ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างในกลุ่มที่ 2

S_1^2 = ความแปรปรวนของตัวอย่างในกลุ่มที่ 1

S_2^2 = ความแปรปรวนของตัวอย่างในกลุ่มที่ 2

n_1 = จำนวนของตัวอย่างในกลุ่มที่ 1

n_2 = จำนวนของตัวอย่างในกลุ่มที่ 2

ด้วยระดับความเป็นอิสระ(degree of freedom: df) เท่ากับ n_1+n_2-2

4. ระดับนัยสำคัญ (α) ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนชนิด Simple Hypothesis (Simple Hypothesis เป็นสมมติฐานที่กำหนดข้อสมมติฐานเป็นค่าแน่นอนตายตัว) โดยกำหนดที่ $\alpha=0.05$
5. เขตวิกฤต (Critical region) เป็นเขตที่ค่าของตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบไม่ยอมรับ H_o ภายใต้ระดับนัยสำคัญ (α)
6. การสรุปผลว่ายอมรับหรือปฏิเสธ H_o ถ้าค่า t ที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าวิกฤต $F_{cal} < F_{crit}$ สรุปว่ายอมรับ H_o แสดงว่าค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ภาคผนวก ข.

ผลการศึกษาทดลอง

ความต้านแรงดึง

การยืดตัว

ความแข็ง

ความหนาแน่น

ผลการศึกษาทดลอง

ผลการศึกษาทดลองความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็งและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5 ถึงตารางที่ 12 ตามลำดับ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5 ความต้านแรงดึงค่าเดิม, MPa

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	ความต้านแรงดึงค่าเดิม, MPa								ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
		1	2	3	4	5	6	7	ค่าเฉลี่ย		
1	PE	24.36	24.28	24.32	24.15	23.98	23.98	24.06	**24.2**	0.1607	0
2	PE	33.72	36.11	34.06	36.84	35.21	33.46	32.50	**34.6**	1.5509	
3	PE	19.55	20.58	17.78	20.79	19.68	19.89	19.32	**19.7**	0.9864	
4	PE	13.71	13.73	13.52	13.41	13.45	13.42	13.49	**13.5**	0.1335	
5	PE	34.08	34.94	35.16	34.57	34.99	35.12	34.81	**34.8**	0.3782	
1	PP	34.34	34.06	34.28	34.31	34.45	33.60	33.85	**34.1**	0.2617	0
2	PP	32.52	31.64	31.21	31.72	3144	31.49	31.61	**31.7**	0.4135	
3	PP	28.26	28.39	28.11	28.01	28.30	28.14	28.07	**28.2**	0.1319	
4	PP	22.59	22.45	22.44	22.49	22.50	22.52	23.47	**22.7**	0.3711	
6	PP	17.00	17.62	17.77	17.71	17.53	17.42	17.43	**17.5**	0.2561	
7	PP	34.12	34.19	33.46	33.46	33.56	33.96	33.11	**33.7**	0.3895	
1	Nylon 6	53.88	52.90	52.37	52.46	53.44	52.58	52.30	**52.8**	0.6013	0
2	Nylon 6	53.34	53.28	53.24	53.52	53.59	50.14	53.06	**52.9**	1.2217	
3	Nylon	55.22	54.32	54.96	54.80	53.94	53.37	54.24	**54.4**	0.6390	
5	Nylon 6	63.76	63.06	62.45	63.97	62.66	63.54	64.00	**63.3**	0.6300	
1	POM	45.40	46.60	46.03	46.11	46.78	46.03	46.21	**46.2**	0.4461	0
2	POM	56.33	56.60	56.21	56.70	56.90	56.49	56.10	**56.5**	0.2825	
1	ABS	33.28	33.78	33.89	33.74	34.32	34.31	33.38	33.8	0.4058	0

ตารางที่ 6 ความต้านแรงดึงค่าใหม่, MPa

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	ความต้านแรงดึงค่าใหม่, MPa								ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
		1	2	3	4	5	6	7	ค่าเฉลี่ย		
1	PE	24.50	24.05	23.71	24.56	23.75	23.69	24.60	**24.1**	0.4209	5
2	PE	32.71	33.78	35.32	34.40	33.02	33.84	32.13	**33.6**	1.0784	10
3	PE	22.96	20.19	21.76	18.36	22.76	21.54	22.19	**21.4**	1.6208	11
4	PE	14.39	14.15	13.80	13.94	13.91	13.82	13.99	**14.0**	0.2077	13
5	PE	48.06	46.45	46.48	48.24	47.36	48.11	47.23	**47.4**	0.7552	23
1	PP	36.12	36.46	36.91	36.17	37.19	36.91	36.60	**36.6**	0.4024	5
2	PP	32.89	33.13	33.47	32.77	32.66	33.23	33.47	**33.1**	0.3259	7
3	PP	29.15	29.12	29.05	28.93	28.96	28.93	28.86	**29.0**	0.1083	8
4	PP	23.08	23.04	23.39	24.59	23.14	23.78	23.38	**23.5**	0.5491	13
6	PP	18.20	18.10	18.02	18.02	17.96	17.94	18.13	**18.0**	0.0943	14
7	PP	35.67	36.10	35.79	35.84	36.20	35.94	35.79	**35.9**	0.1880	25
1	Nylon 6	39.02	37.60	45.30	39.32	39.33	39.33	38.72	**40.0**	2.6574	12
2	Nylon 6	61.83	60.17	66.90	70.62	65.27	61.11	60.03	**63.7**	4.0151	14
3	Nylon	62.45	63.24	62.75	60.43	61.12	60.39	68.61	**62.7**	2.8360	17
5	Nylon 6	60.44	59.52	60.09	60.68	56.96	59.54	58.04	**59.3**	1.3536	19
1	POM	48.64	48.83	48.59	48.60	48.54	48.00	48.05	**48.5**	0.3141	8
2	POM	58.53	58.18	57.66	58.93	58.93	58.69	59.35	**58.6**	0.5557	8
1	ABS	39.02	37.60	45.30	39.32	39.33	39.33	38.72	**40.0**	2.6574	14

ตารางที่ 7 การยืดตัวค่าเดิม ,%

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	การยืดตัวค่าเดิม ,%								ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
		1	2	3	4	5	6	7	ค่าเฉลี่ย		
2	PE	8.215	12.350	8.349	28.51	23.410	22.255	13.718	**17**	8.0094	
3	PE	468.5	456.8	433.6	463.1	460.9	461.2	461.1	**458**	11.264	0
4	PE	644.3	509.5	559.2	622.3	649.1	631.9	518.9	**591**	60.167	
5	PE	8.671	11.480	8.322	11.030	10.680	17.360	10.390	**11.1**	2.9896	
6	PE	871.9	761.4	900.1	816.9	796.2	914.0	1008	**867**	83.550	
1	PP	548.7	533.2	525.1	503.1.	535.6	528.3	501.7	**525**	17.198	
2	PP	315.4	310.4	406.2	562.6	404.6	406.2	571.0	**425**	105.29	
3	PP	80.27	74.52	62.82	69.74	54.28	88.13	92.56	**75**	5.1092	
4	PP	33.83	35.54	44.08	31.22	30.01	37.07	29.42	**35**	5.1092	0
6	PP	60.99	50.55	56.16	46.89	43.74	62.58	54.12	**54**	6.9955	
2	Nylon 6	327.0	314.4	328.6	341.6	323.0	323.0	312.8	**324**	9.2711	
3	Nylon	170.1	110.9	216.1	217.9	95.50	48.08	125.0	**141**	63.594	0
4	Nylon 6	11.17	21.58	11.85	18.66	57.96	15.42	14.98	**22**	16.414	
5	Nylon 6	140.0	87.0	66.9	44.4	61.9	98.9	86.5	**84**	30.910	
1	POM	24.1	28.4	32.6	38.0	33.2	39.6	36.2	**33**	5.4650	0
2	POM	46.90	59.88	53.74	50.32	59.40	68.22	56.74	**57**	7.0144	
1	ABS	2.789	3.557	4.107	3.691	3.570	5.087	3.772	**3.8**	0.6949	0

ตารางที่ 8 การยืดตัวค่าใหม่ ,%

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	การยืดตัวค่าใหม่,%								ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
		1	2	3	4	5	6	7	ค่าเฉลี่ย		
2	PE	20.00	20..00	20.00	28.00	20.00	20.00	20.00	**21**	3.0237	10
3	PE	438.9	402.0	405.9	399.7	408.6	408.9	403.5	**410**	13.331	11
4	PE	468.1	471.8	399.2	443.8	360.8	492.1	419.9	**437**	46.163	13
5	PE	2.44	4.94	5.64	2.71	4.38	3.09	4.32	**3.9**	1.2051	23
6	PE	536.4	844.0	730.0	844.0	672.0	713.0	846.0	**741**	115.30	24
1	PP	409.7	264.7	290.9	467.9	319.1	236.5	305.0	**328**	82.270	5
2	PP	12.42	14.59	11.74	15.44	11.95	12.66	16.11	**14**	1.7847	7
3	PP	41.15	35.03	39.83	30.35	34.77	33.76	22.93	**34**	6.0921	8
4	PP	44.0	60.0	44.0	48.0	52.0	44.0	48.0	**49**	5.8554	13
6	PP	40.71	40.63	41.79	42.97	33.70	31.38	39.89	**39**	4.3882	14
2	Nylon 6	327.0	314.4	328.6	341.6	323.0	323.0	312.8	**324**	9.2711	14
3	Nylon	318.3	308.9	358.8	311.4	322.5	280.4	331.3	**319**	23.796	17
4	Nylon 6	255.7	246.6	264.4	280.1	248.2	253.7	231.7	**254**	15.151	19
5	Nylon 6	274.9	251.3	260.5	241.2	245.1	246.7	237.0	**251**	12.954	19
1	POM	8.0	8.0	8.0	8.0	6.0	8.0	8.0	**7.7**	0.7559	8
2	POM	35.42	37.36	35.01	35.29	33.25	30.68	35.10	**35**	2.0965	8
1	ABS	2.497	1.557	2.913	2.523	1.544	2.859	2.502	**2.3**	0.5670	14

ตารางที่ 9 ความแข็งค่าเดิม, Shore D

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	ความแข็งค่าเดิม, Shore D										ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระยะเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
3	PE	53.5	53.5	52.5	53.5	52	51.5	52.5	52	52	52.5	**53**	0.7246	
2	PE	68	69	69	66.5	67.5	67	68.5	69	68.5	67	**68**	0.9428	
8	PE	63.5	62	62	62	61.5	61.5	62.5	62	61.5	61.5	**62**	0.6236	0
9	PE	62	62	63	64	65	64	63	62	64	63.5	**63**	1.0341	
5	PE	63	63	63.5	63	63.5	63	63	63	63	62.5	**63**	0.2838	
6	PE	62.5	63	63	62.5	64	63	62.5	64	63	62.5	**63**	0.2582	
11	PE	50	48	48	50	51	48	48	47	47	50	**49**	1.4181	
8	PP	57	56	56	57	57	57.0	57.5	56.5	57.0	57.0	**57**	0.4830	
5	PP	64	64.5	64	65	64	63	64	64	64	63.5	**64**	0.5270	0
6	PP	61	61.5	62	61	60	61	61	62	61	60	**61**	0.6852	
4	Nylon 6	70.5	71.5	70.5	70.5	70.5	71	70.5	71.5	71	71.5	**71**	0.4565	
6	Nylon 6	72	72.5	73	74	72	72	73	73	72	71.5	**73**	0.7454	0
7	Nylon 6	75	76	72	74	71	72	70	71	69	68.5	**72**	2.4950	

ตารางที่ 10 ความแข็งค่าใหม่, Shore D

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	ความแข็งค่าใหม่, Shore D										ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
3	PE	53	52	51	54	54	53	52	53	52.5	54	**53**	1.0014	7
2	PE	66.5	67	69.5	66	68.5	69	68	68	67.5	69.5	**68**	1.2122	9
8	PE	68	67.5	68	67.5	67.5	67	67.5	67.5	66.5	67	**67**	0.4595	22
9	PE	65	65	64	64.5	64	65	64.5	64	65	65	**65**	0.4595	23
5	PE	64	65.5	65.5	66.5	66	68.5	64	69	68.5	64	**66**	1.9444	23
6	PE	66	68.5	68.5	67	67	67.5	67.5	66	67.5	67	**67**	0.8580	24
11	PE	63	62	63.5	68.5	69	68.5	65	67	65.5	69	**66**	2.6646	26
8	PP	65.5	62	64	63.5	64.5	64.5	64.5	63	62	63.5	**64**	1.1353	4
5	PP	66	68	68	69	68.5	68	68.5	69.5	70	69.5	**69**	1.1304	26
6	PP	64	64.5	63.5	64.5	65.5	64	64.5	63	62	62.5	**64**	1.0593	26
4	Nylon 6	69	70.5	70	71.5	71	69	71.5	71	70	71.5	**71**	0.9718	21
6	Nylon 6	75	73	74.5	73	71	71	74	74.5	72	73	**73**	1.4298	21
7	Nylon 6	80.5	78.5	79.5	76	75	77.5	78.5	76.5	78	75	**78**	1.8559	23

ตารางที่ 11 ความหนาแน่นค่าเดิม,กรัม/ลูกบาศก์เซ็นติเมตร

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	ความหนาแน่นค่าเดิม ,กรัม/ลูกบาศก์เซ็นติเมตร				ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย		
8	PE	0.93461	0.93451	0.93420	**0.934**	$2.138X10^{-4}$	0
8	PP	0.95126	0.95156	0.95000	**0.951**	$8.278X10^{-4}$	0
6	PP	0.95756	0.95216	0.94399	**0.951**	$6.832X10^{-3}$	
9	PP	1.11942	1.11404	1.11534	**1.116**	$2.8072X10^{-3}$	
1	Nylon 6	1.16925	1.70001	1.71230	**1.170**	$9.996X10^{-4}$	0
3	Nylon	1.12856	1.12854	1.12800	**1.128**	$3.177X10^{-4}$	
8	Nylon	1.15123	1.15143	1.15142	**1.151**	$1.127X10^{-4}$	
3	POM	1.41174	1.41194	1.41171	**1.412**	$1.250X10^{-4}$	0
1	PVC	1.32284	1.33357	1.33084	**1.329**	$5.577X10^{-3}$	0

ตารางที่ 12 ความหนาแน่นค่าใหม่,กรัม/ลูกบาศก์เซ็นติเมตร

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	ความหนาแน่นค่าใหม่ ,กรัม/ลูกบาศก์เซ็นติเมตร				ค่าบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย		
8	PE	0.93559	0.93540	0.93523	**0.935**	$1.801X10^{-4}$	23
8	PP	0.95316	0.95775	0.95526	**0.955**	$2.298X10^{-3}$	5
6	PP	0.95456	0.95501	0.95546	**0.955**	$4.500X10^{-4}$	15
9	PP	1.14690	1.14771	1.14804	**1.148**	$5.866X10^{-4}$	17
1	Nylon 6	1.16634	1.16662	1.16721	**1.167**	$4.441X10^{-4}$	13
3	Nylon	1.13704	1.14167	1.13868	**1.139**	$2.348X10^{-3}$	17
8	Nylon	1.15808	1.15519	1.15503	**1.156**	$1.717X10^{-3}$	23
3	POM	1.41188	1.41173	1.41138	**1.412**	$2.566X10^{-4}$	23
1	PVC	1.35119	1.32394	1.33605	**1.337**	$1.3653X10^{-2}$	26

จากตารางที่ 5-12 สรุปในรูปตารางเปรียบเทียบผลศึกษาทดลองค่าเดิมและใหม่ ได้ดังนี้

ตารางที่ 13 ตารางเปรียบเทียบผลการศึกษาทดลองค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่น

ผลทดสอบเดิม									ผลทดสอบใหม่						
ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	ความต้านแรงดึง (MPa)	ความยืด (%)	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความแข็ง (Shore D)	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความหนาแน่น ,g/cm^3	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความต้านแรงดึง (MPa)	ความยืด (%)	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความแข็ง (Shore D)	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความหนาแน่น g/cm^3	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
1	PE	24.2	-	5	-	-	-	-	23.6	-	5	-	-	-	-
2	PE	34.6	17	10	68	9	-	-	33.6	21	10	68	9	-	-
3	PE	19.7	458	11	53	7	-	-	21.4	410	11	53	7	-	-
4	PE	13.5	591	13	-	-	-	-	14.0	437	13	-	-	-	-
5	PE	34.8	11.1	23	63	23	-	-	47.4	3.9	23	66	23	-	-
6	PE	-	867	24	63	24	-	-	-	741	24	67	24	-	-
7	PE	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-
8	PE	-	-	-	62	22	0.934	23	-			67	22	0.935	23
9	PE	-	-	-	63	23	-	-	-	-		65	23	-	-
11	PE	-	-	-	49	26	-	-	-	-		66	26	-	-
1	PP	34.1	525	5	-	-	-	-	36.6	328	5	-	-	-	-
2	PP	31.7	425	7	-	-	-	-	33.1	14	7	-	-	-	-
3	PP	28.2	75	8	-	-	-	-	29.0	34	8	-	-	-	-
4	PP	22.7	35	13	-	-	-	-	23.5	49	13	-	-	-	-
5	PP	-	-	-	64	26	-	-	-	-	14	69	26	-	-
6	PP	17.5	54	14	61	26	0.951	15	18.0	39	14	64	26	0.955	15
7	PP	33.7	-	25	-	-	-	-	35.9	-	25	-	-	-	-
8	PP	-	-	-	57	4	0.951	5	-	-	-	64	4	0.955	5
9	PP	-	-	-	-	-	1.116	17	-	-	-	-	-	1.148	17

จากตารางที่ 5- 12 สรุปในรูปตารางเปรียบเทียบผลศึกษาทดลองค่าเดิมและใหม่ ได้ดังนี้

ตารางที่ 14 ตารางเปรียบเทียบผลการศึกษาทดลองค่าความต้านแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และความหนาแน่น (ต่อ)

ผลทดสอบเดิม									ผลทดสอบใหม่						
ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	ความต้านแรงดึง (MPa)	ความยืด (%)	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความแข็ง (Shore D)	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความหนาแน่น ,g/cm^3	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความต้านแรงดึง (MPa)	ความยืด (%)	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความแข็ง (Shore D)	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน	ความหนาแน่น g/cm^3	ระยะเวลาเก็บชิ้นทดสอบ, เดือน
1	Nylon 6	52.8	-	12	-	-	1.170	13	40.0	-	12	-	-	1.167	13
2	Nylon 6	52.9	324	14	-	-	-	-	63.7	324	14	-	-	-	-
3	Nylon	54.4	141	17	-	-	0.128	17	62.7	319	17	-	-	1.139	17
4	Nylon 6	-	22	19	71	21	-	-	-	254	19	71	21	-	-
5	Nylon 6	63.3	84	19	-	-	-	-	59.3	251	19	-	-	-	-
6	Nylon 6	-	-	-	73	21	-	-	-	-	-	73	21	-	-
7	Nylon 6	-	-	-	72	23	-	-	-	-	-	78	23	-	-
8	Nylon	-	-	-	-	-	1.151	23	-	-	-	-	-	1.156	23
1	POM	46.2	33	8	-	-	-	-	48.5	7.7	8	-	-	-	-
2	POM	56.5	57	8	-	-	-	-	58.6	35	8	-	-	-	-
3	POM	-	-	-	-	-	1.412	23	-	-	-	-	-	1.412	23
1	ABS	33.8	3.8	14	-	-	-	-	40.0	2.3	14	-	-	-	-
1	PVC	-	-	-	-	-	1.329	26	-	-	-	-	-	1.337	26