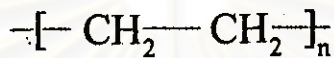


บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเกิดจากเอทิลีนมอนอเมอร์ (ethylene monomer) มาต่อกันเป็นสายยาว สูตรโมเลกุลของพอลิเอทิลีนแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโมเลกุลของพอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุด เพราะมีสมบัติที่เด่นหลายประการ ได้แก่ ราคาถูก มีสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า ทนต่อสารเคมี ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่าย

พอลิเอทิลีนได้จากการพอลิเมอไรซ์เอทิลีนมอนอเมอร์ ด้วยกระบวนการแบบรวมตัว (addition polymerization) โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนมีทั้งแบบเชิงเส้น (linear) หรือแบบกิ่งก้านสาขา (branched) ขึ้นกับกระบวนการที่ใช้ในการผลิต โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนจะมีผลต่อสมบัติต่างๆ กล่าวคือพอลิเอทิลีนแบบเชิงเส้น สามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบมากกว่าพอลิเอทิลีนแบบกิ่งก้านสาขา จึงเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกได้มากกว่า เป็นเหตุให้มีความหนาแน่น จุดหลอมเหลว จุดอ่อนตัว และความแข็งตึง (stiffness) สูงกว่า

การแบ่งประเภทของพอลิเอทิลีนในปัจจุบันจะแปรตามความหนาแน่น (density) ซึ่งแบ่งได้เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene : MDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene : LLDPE) มาตรฐาน ASTM ได้จำแนกพอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นได้ 4 ประเภท (Marachin, 1986) ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงการจำแนกชนิดของพอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นตามมาตรฐาน
ASTM

ชนิดของพอลิเอทิลีน	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ชื่อที่เรียก
1	0.910 - 0.925	Low Density Polyethylene
2	0.926 - 0.940	Medium Density Polyethylene
3	0.941 - 0.959	High Density Polyethylene
4	0.960 ขึ้นไป	High Density Polyethylene

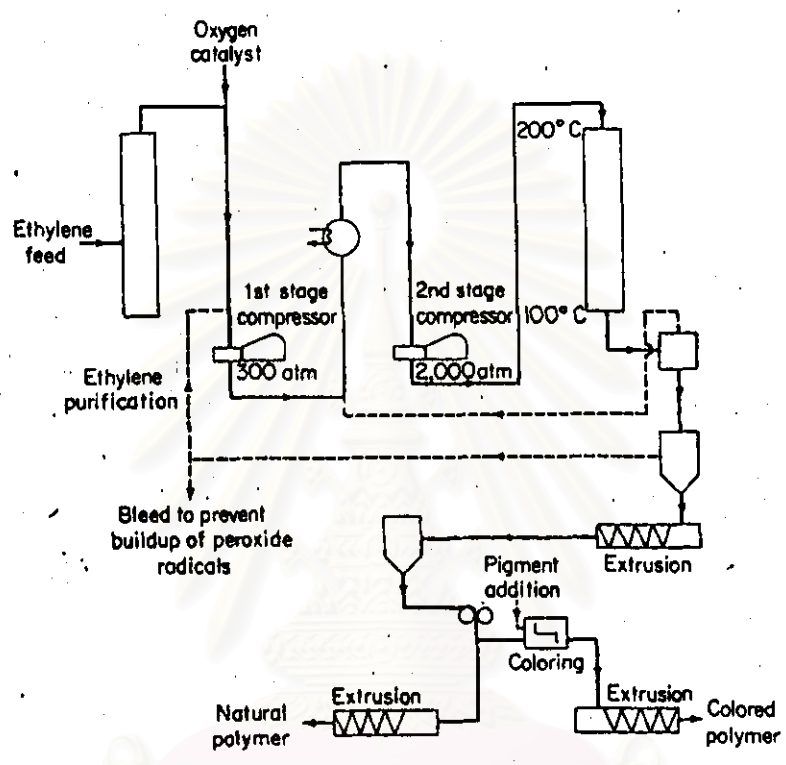
ต่อมาได้มีการผลิต พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาก (Very Low Density Polyethylene : VLDPE) ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่า 0.910 กรัม/ลบ.ซม. ออกมาอีกด้วย

2.1.1 กระบวนการผลิต LDPE

LDPE เป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นในทางการค้า เมื่อปี ค.ศ. 1939 โดยบริษัท อิมพีเรียลเคมีคัลอินดัสตรี (ICI) ประเทศอังกฤษ ในการผลิต LDPE จะใช้กระบวนการความดันสูง (high pressure process) ปกติจะใช้ความดันประมาณ 1,000 ถึง 3,000 บรรยากาศ อุณหภูมิ 80 ถึง 300 องศาเซลเซียส กระบวนการพอลิเมอไรเซชันเริ่มต้นจากการใส่เอทิลีนมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยาซึ่งจะแตกตัวให้ฟรีแรดิคัล (free radical) เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) อะโซไดโซบูทไทรไนไตรท์ (azodi-isobutyronitrile) เข้าไปในเตาปฏิกรณ์ (reactors) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมาก จึงต้องมีการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพสูง เช่น ใช้น้ำหรือของเหลวเฉื่อย (inert liquid) เช่น เบนซีน ไทลด์ผ่านท่อเพื่อช่วยระบายความร้อน มอนอเมอร์จะเปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 แล้วแยกพอลิเอทิลีนออกจากเอทิลีนมอนอเมอร์ LDPE ที่ได้จะถูกอัดรีดออกมาเป็นแถบเล็ก ๆ แล้วถูกตัดเป็นเม็ดต่อไป

ลักษณะเฉพาะของการสังเคราะห์ LDPE ภายใต้อุณหภูมิสูงคือ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมากปฏิกิริยาจะขึ้นกับความเข้มข้นของมอนอเมอร์ จึงกล่าวได้ว่าการใช้มอนอเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูงๆทำปฏิกิริยาที่ความดันสูงๆจะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีกิ่งก้านสาขา กิ่งก้านสาขาที่เกิดขึ้นจะไม่ยาวนานก็คาร์บอนเพียง 2 ถึง 4 อะตอม

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา ส่วนผสม ตัวย้ายโซ่ (chain transfer agent) และการใส่ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ทำให้ได้ LDPE ที่มีลักษณะแตกต่างกันซึ่ง LDPE ที่ได้จะมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา ทำให้การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ความหนาแน่นต่ำ แผนภาพการเตรียม LDPE ในเตาปฏิกรณ์ที่ความดันสูง แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



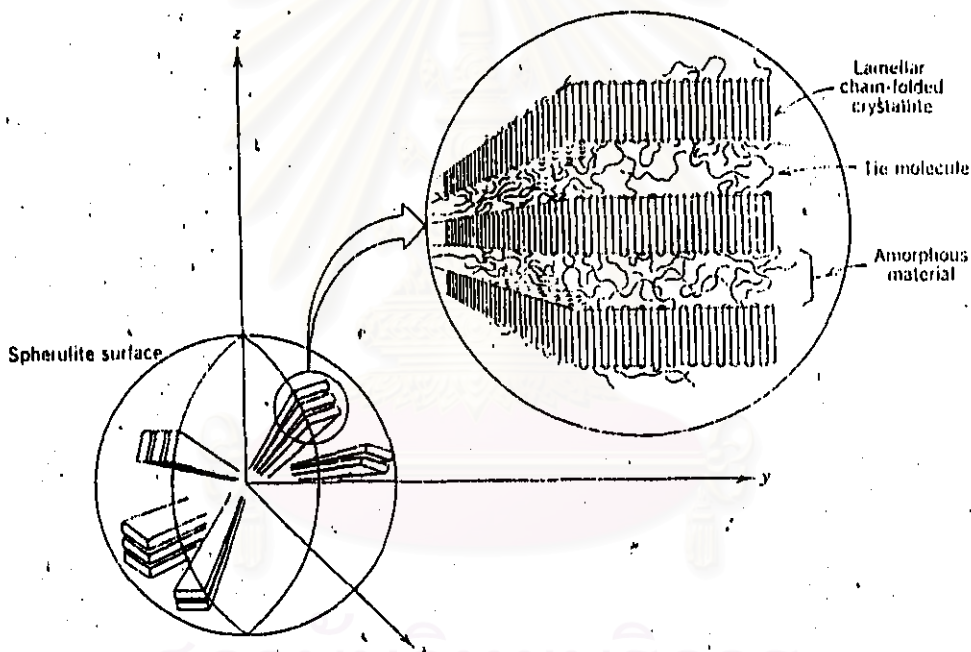
รูปที่ 2.2 แผนภาพการเตรียม LDPE ในเตาปฏิกรณ์ที่ความดันสูง (ปริชา ทลทพ., 2536)

2.1.2 โครงสร้างและสมบัติเฉพาะตัวของ LDPE

LDPE มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขาแยกออกจากสายโซ่โมเลกุลหลักมากมาย ซึ่งจะมีทั้งกิ่งสั้น (short chain branch : SCB) และกิ่งยาว (long chain branch : LCB) กระจายปะปนกันอย่างไม่เป็นระเบียบตลอดความยาวของสายโซ่โมเลกุล ทำให้มีความหนาแน่นต่ำ โมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ และไม่สม่ำเสมอ พอลิเอทิลีนจะค่อนข้างใส มีความเหนียวพอสมควร สมบัติต่างๆ ของ LDPE จะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (average molecular weight) ปริมาณการเกิดผลึก (crystallinity) และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight distribution)

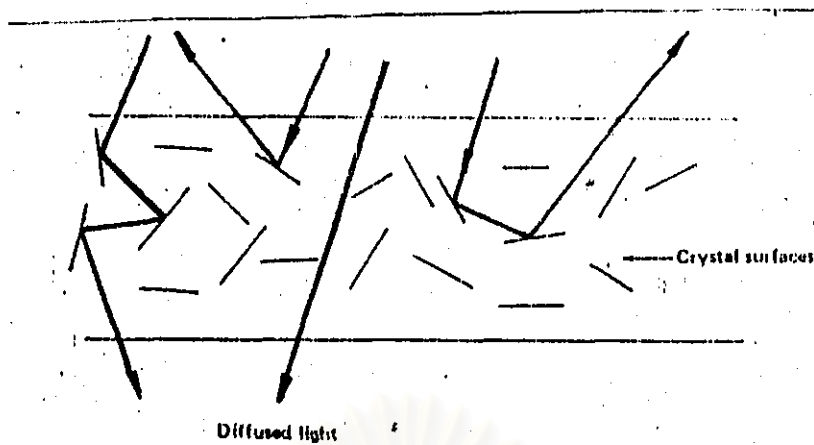
ในการผลิตฟิล์มจะใช้ LDPE ที่มีคระชนิการไหล (melt index ; MI) ในช่วง 20 ถึง 0.1 กรัม/10 นาที พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีค่าคระชนิการไหลต่ำฟิล์มที่ได้จาก LDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีสมบัติทนแรงดึงแรงกระแทกสูงและความใสจะลดลง อย่างไรก็ตาม LDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะขึ้นรูปได้ยาก เนื่องจากมีความหนืดและจุดหลอมเหลวสูง

เมื่อ LDPE อยู่ในสถานะของแข็งจะมีโครงสร้างเป็นสเฟียรูไลต์ (spherulite) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยโมเลกุลของพอลิเมอร์จะพับไปพับมาในบริเวณที่เกิดผลึกและมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (platelet) ซ้อนกันเป็นชั้นๆ (lamellar) บริเวณอสัณฐานเกิดจากกิ่งก้านสาขาสั้นๆ (SCB) ไปรบกวนการพับไปพับมาของโมเลกุล รายละเอียดโครงสร้างของสเฟียรูไลต์แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงรายละเอียดโครงสร้างของสเฟียรูไลต์ (เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, ม.ป.ป.)

ขนาดและการกระจายของสเฟียรูไลต์นั้น มีผลต่อสมบัติทางแสงของพอลิเมอร์ กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีผลึกน้อยมาก จะมีความใสมาก พวกที่มีผลึกปานกลาง เช่น LDPE จะมีลักษณะขุ่น และเริ่มทึบแสง ส่วนพอลิเมอร์ที่มีผลึกมากๆ และมีการจัดเรียงตัวของผลึกดีจะทึบแสง เนื่องจากผลึกจะขัดขวางทางเดินของแสง และทำหน้าที่กระจายแสงดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้จะผลิตเป็นฟิล์มหรือแผ่นบางๆ ซึ่งจะทำให้แสงสามารถผ่านได้บ้าง



รูปที่ 2.4 การยอมให้แสงผ่านพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกต่างกัน
(เสาวรจน์ ช่วยจุดจิตร, ม.ป.ป.)

นอกจากนี้ขนาดของผลึกและการกระจายของผลึก ยังมีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์อีกด้วย กล่าวคือสเฟียรูไลต์ที่มีขนาดเล็กจะมีความทนแรงกระทำได้สูงกว่า ขาดยากและเหนียวกว่าพอลิเมอร์ที่มีสเฟียรูไลต์ขนาดใหญ่

กิ่งยาวๆ (LCB) ของ LDPE มีอิทธิพลต่อการเกิดผลึกและความหนาแน่นน้อยมาก แต่จะมีผลทำให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์มีค่าสูง ทั้งนี้เพราะกิ่งยาวๆ จะเพิ่มการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (entanglement) เมื่อนำ LDPE ที่มีกิ่งยาวๆ จำนวนมากไปผ่านกระบวนการเป่าฟิล์ม จะทำให้เสถียรภาพของลูกโป่ง (bubble stability) เพิ่มขึ้นกว่าการใช้ LDPE ที่มีกิ่งยาวๆ จำนวนน้อยกล่าวคือลูกโป่งไม่แตกง่ายในขณะเป่าฟิล์ม

โดยสรุปสมบัติทั่วไปของ LDPE คือ มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.910 ถึง 0.925 กรัม/ลบ.ซม. มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง มีกิ่งก้านสาขาภายในโมเลกุลมาก เป็นพอลิเมอร์ออสฐาน มีความใส อ่อนตัว ทนต่อแรงดึงและแรงกระทำพอสมควร มีการไหลตัวดี การใช้งานของ LDPE สามารถนำไปทำเป็นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ถุงพลาสติก ผ้าพลาสติก ทำของใช้ในบ้าน ในครัว ของเด็กเล่น ใช้หุ้มทวดไฟฟ้าและใช้ในงานก่อสร้าง เป็นต้น

2.2 แป้ง (starch)

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนเกิดจากกลูโคสแต่ละหน่วยมาต่อกันเป็นสายยาว เมื่อเติมกรด หรือเอนไซม์ที่สามารถย่อยแป้งได้ จะทำให้แป้งถูกย่อยสลายกลายเป็นน้ำตาลและกลูโคส

แป้งมีความหนาแน่นประมาณ 1.5 กรัม/ลบ.ซม. เม็ดแป้งส่วนใหญ่มีรูปร่างกลมหรือเป็นแท่ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ถึง 1,000 ไมโครเมตร สำหรับแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในงานวิจัยครั้งนี้มีขนาดตั้งแต่ 4 ถึง 20 ไมโครเมตร

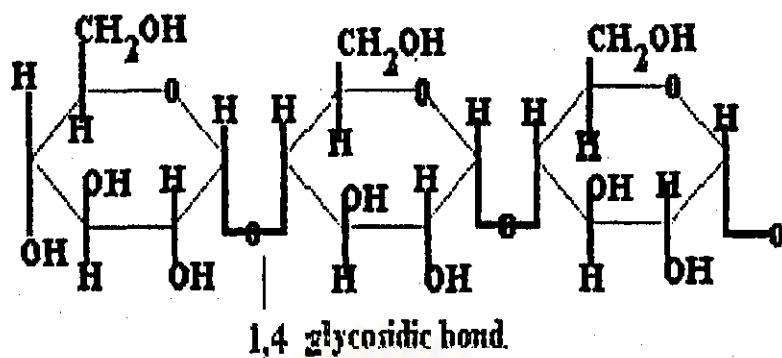
หน่วยย่อยที่สุดของแป้งประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 สามารถเขียนสูตรเคมีได้ $C_6H_{10}O_5$ แป้งจัดเป็นพอลิเมอร์แบบควบแน่นของกลูโคส หน่วยของกลูโคสที่อยู่ในแป้งจัดเป็นหน่วยของกลูโคสที่ปราศจากน้ำ (anhydroglucose unit) น้ำในโมเลกุลของกลูโคสนั้นหายไปขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบขั้น (step polymerization) พันธะที่เชื่อมต่อกันระหว่างกลูโคสแต่ละหน่วยในโมเลกุลของแป้งเรียกว่า พันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ซึ่งพันธะนี้สามารถถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) ได้โดยกรด

2.2.1 องค์ประกอบและสมบัติของแป้งธรรมชาติ

ในโครงสร้างของแป้งประกอบด้วยโมเลกุลหลัก 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกติน (amylopectin) ปกติแป้งจะมีอะมิโลสประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 และมีอะมิโลเพกตินประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 สำหรับโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยอะมิโลส ร้อยละ 18 และอะมิโลเพกตินร้อยละ 82

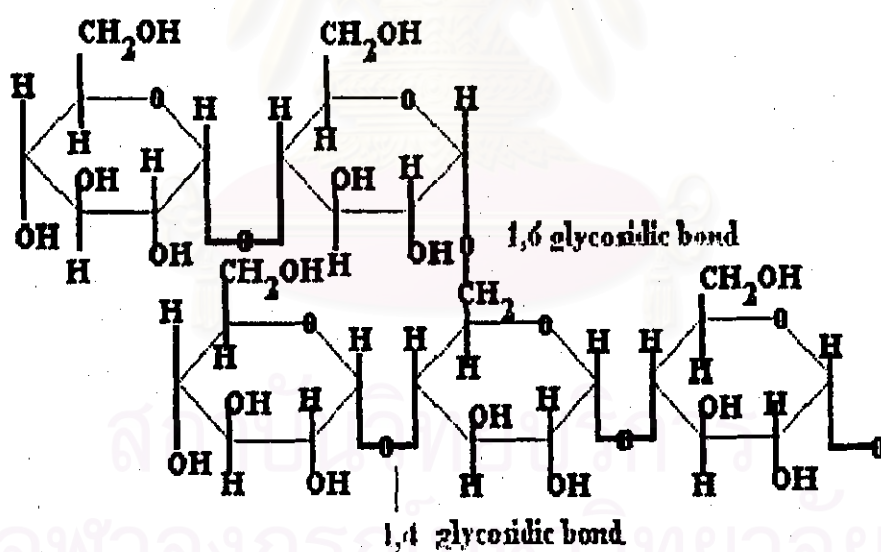
โครงสร้างหลักของแป้ง 2 ชนิดมีรายละเอียดดังนี้

1. อะมิโลส (amylose) คือ ส่วนของกลูโคสที่มาต่อกันเป็นสายยาวไม่มีกิ่งก้านสาขา มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 2,000 ถึง 500,000 ในโครงสร้างของอะมิโลสประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสมาต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α - 1,4 (α - 1,4 glycosidic) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อะมิโลสเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญที่ทำให้แป้งเกิดเป็นเจลจากการพองตัวเมื่อไม่มีการกวน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลทำให้โมเลกุลหดตัวลงและมีความหนาแน่นมากขึ้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะมิโลส

2. อะมิโลเพกติน (amylopectin) เป็นส่วนของกลูโคสที่ต่อกันเป็นสายมีกิ่งก้านสาขาแตกแขนงออกไป โครงสร้างที่เป็นสายประกอบไปด้วยหน่วยของกลูโคสที่มาต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α - 1,4 (α - 1,4 glycosidic) ส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างสายโซ่หลักกับกิ่งก้านจะต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α - 1,6 (α - 1,6 glycosidic) ประมาณร้อยละ 4 ถึง 5 โครงสร้างของอะมิโลเพกตินแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน

อะมิโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าอะมิโลสประมาณ 1,000 เท่า กิ่งก้านสาขาของอะมิโลเพกตินจะขัดขวางการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลในการเกิดเจล อะมิโลเพกตินไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่จะตุน้ำและเกิดการพองตัวขึ้น

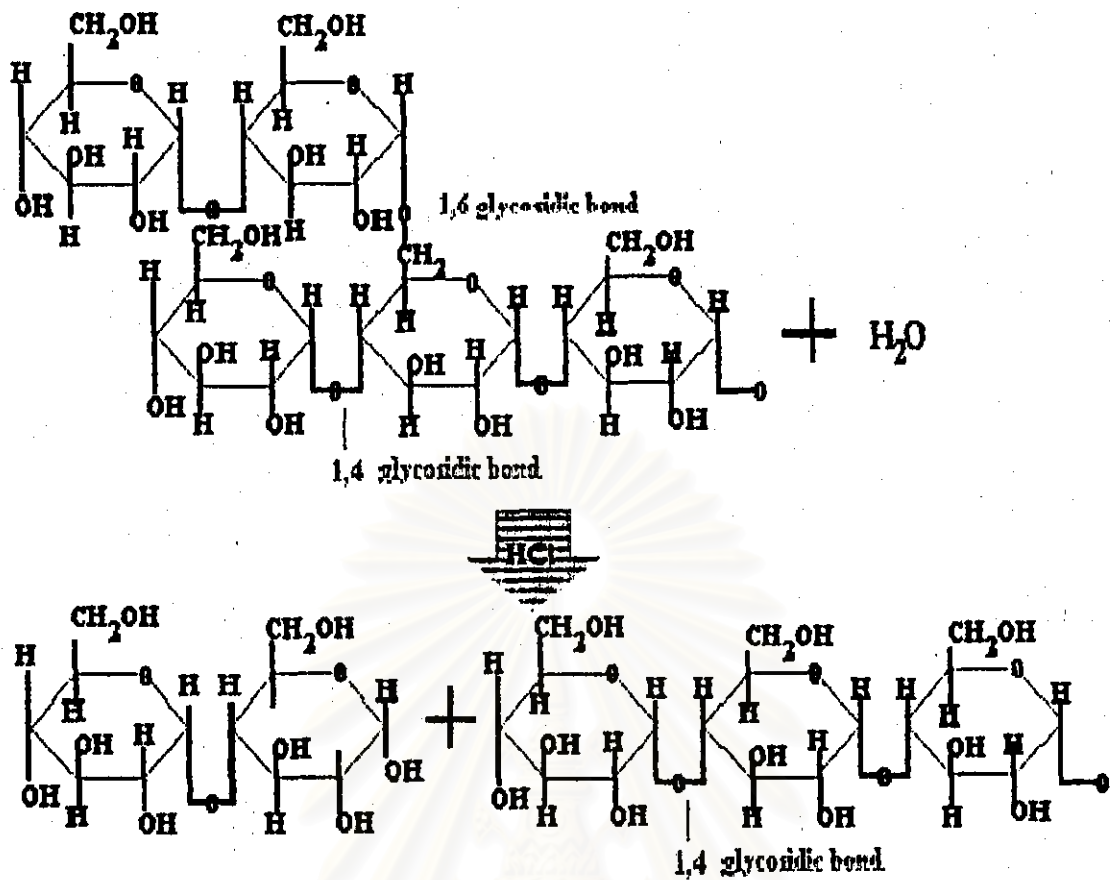
สมบัติทั่วไปของแป้งธรรมชาติ คือ ไม่ละลายในน้ำเย็น แต่จะคุดน้ำไว้ประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพกตินในแป้ง จะมีทั้งส่วนที่จัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบ และส่วนที่จัดเรียงตัวกันอย่างไม่มีระเบียบ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในส่วนที่เป็นระเบียบคลายความหนาแน่นลง เป็นผลให้โมเลกุลของแป้งสามารถรับน้ำได้มากขึ้น แป้งก็จะพองตัวมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งสูงกว่าจุดพองตัวของแป้ง แป้งจะแตกตัวทำให้ละลายน้ำได้

สมบัติที่สำคัญมากที่สุดของแป้ง คือ การเกิดความหนืดเมื่อรวมตัวกับน้ำ ซึ่งเป็นผลจากการเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) ในแป้ง กล่าวคือน้ำสามารถเข้าไปในโมเลกุลของแป้งในส่วนที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่มีระเบียบได้ ถ้าให้ความร้อนกับแป้งที่อุณหภูมิ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส แป้งจะเกิดการพองตัว อุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า อุณหภูมิเจลาตินในเซชัน (gelatinization temperature) ณ อุณหภูมินี้โมเลกุลของแป้งในส่วนที่เป็นระเบียบจะคลายตัวลง เกิดการคุดน้ำ ได้เป็นสารละลายแป้งที่มีความหนืด และใสขึ้น นอกจากนี้ความหนืดของแป้งยังเป็นผลมาจากการมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ ซึ่งจะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้สารละลายแป้งมีความหนืด

2.2.2 แป้งที่ผ่านกระบวนการไฮโดรลิซิสด้วยกรด

สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของแป้งในธรรมชาติ คือ มีความหนืดขณะร้อนสูง ทำให้เป็นอุปสรรคในการนำแป้งไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมกับพลาสติก เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกต้องใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้นแป้งจะมีความหนืดสูงมากทำให้รวมตัวกับพลาสติกได้ยาก จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของแป้งให้มีความหนืดขณะร้อนลดลง วิธีหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงสมบัติของแป้งให้มีความหนืดขณะร้อนลดลง คือ การนำแป้งมาผ่านกระบวนการไฮโดรลิซิสด้วยกรด วิธีนี้ค้นพบเป็นครั้งแรกโดยชาวเยอรมันชื่อ C.J.Linter ในปีค.ศ. 1886 โดยให้แป้งอยู่ในรูปของสารแขวนลอยในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 7.5 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำแป้งมาล้างจนหมดความเป็นกรดด้วยน้ำกลั่น แล้วทำให้แห้ง แป้งที่ได้เรียกว่า Linter's starch

แป้งที่ผ่านกระบวนการไฮโดรลิซิสด้วยกรดมีความหนืดต่ำ เนื่องจากพันธะไกลโคซิดิกในแป้งถูกทำลาย ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 การไฮโดรลิจิตแบ่งด้วยกรด

ในอุตสาหกรรมการผลิตแป้งที่มีความหนืดต่ำ ทำได้โดยการทำแป้งให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยโดยการกวนตลอดเวลาในสารละลายกรดเจือจาง เช่น กรดไฮโดรคลอริก หรือกรดซัลฟูริก ที่ 70-80 องศาเซลเซียส เมื่อถึงเวลาที่กำหนดแป้งออกมาข้างบนกระทงเป็นกลางแล้วทำให้แห้ง

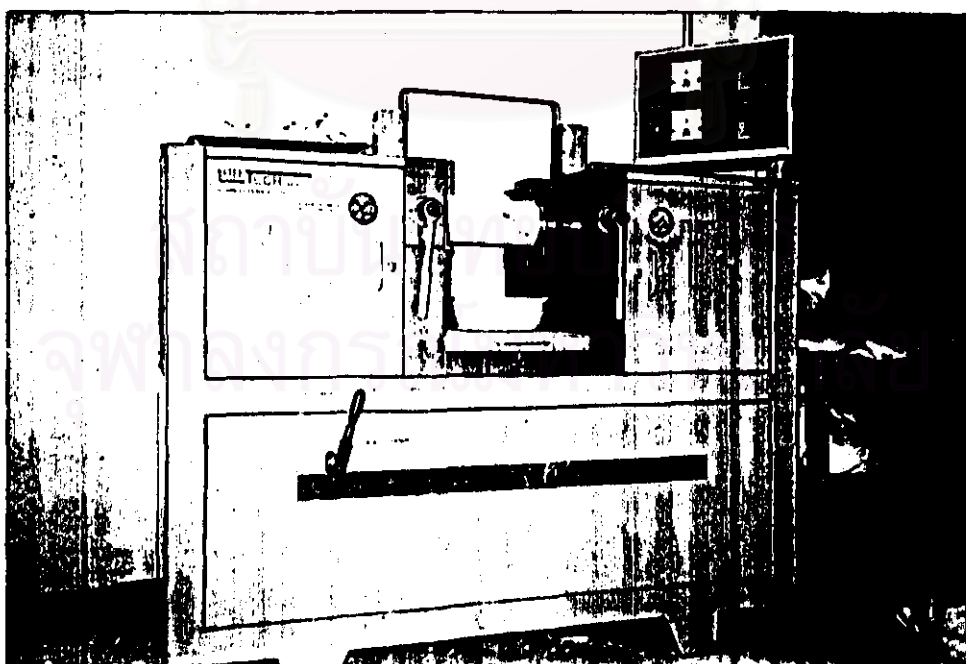
ในปี พ.ศ. 2528 คาร์มี อุมาภินันท์ และ สุนีย์ ทิพย์ชัชวาลกุล ได้ทำการศึกษาเรื่องตัวแปรที่มีผลต่อการแปรสภาพแป้งมันสำปะหลังด้วยกรด พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการแปรสภาพแป้งมันสำปะหลังอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.6 โมลาร์ กล่าวคือ ถ้าความเข้มข้นสูงกว่าช่วงนี้โมเลกุลของแป้งจะสลายตัวสูงเกินไป ทำให้ไม่สามารถวัดค่าความหนืดขณะร้อนได้ ระยะเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพของแป้งด้วยกรด คือ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของแป้งในสารละลายกรดที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

2.3 กระบวนการที่ใช้ในการผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ตัดแปรด้วยแปรงซึ่งผ่านกระบวนการไฮโดลิจิสต์ด้วยกรด

2.3.1 การผสมพลาสติกกับแปรงโดยเครื่องผสมสองลูกกิ้ง

เครื่องผสมสองลูกกิ้งเป็นเครื่องผสมระบบเปิด ประกอบด้วยลูกกิ้ง 2 ลูก วางในแนวนอน ระยะห่างระหว่างลูกกิ้งทั้งสองสามารถปรับให้มีขนาดความต้องการได้ ในขณะที่เครื่องทำงานลูกกิ้งทั้งสองจะหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน ขนาดและความเร็วของลูกกิ้งเป็นแฟกเตอร์สำคัญในการควบคุมการกระจายตัวของแปรงให้สามารถผสมกับพลาสติกได้ดี

ในการผสมพลาสติกกับแปรงจะเริ่มด้วยการให้ความร้อนที่ลูกกิ้งทั้งสองให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ โดยลูกกิ้งด้านหน้าจะมีอุณหภูมิสูงกว่าลูกกิ้งด้านหลัง ปรับระยะห่างระหว่างลูกกิ้งทั้งสองตามต้องการ ผ่านส่วนผสมเม็ดพลาสติกและแปรงเข้าไปในช่องระหว่างลูกกิ้งทั้งสอง ในขณะที่ลูกกิ้งกำลังหมุนบดพลาสติกจนนิ่ม พลาสติกจะค่อยๆ หลอมตัวเกาะติดกับลูกกิ้ง ต้องให้พลาสติกผ่านลูกกิ้งเข้าไปมาหลายๆ ครั้ง วิธีนี้ทำได้โดยการใช้มีดตัดพลาสติกที่หันอยู่บนลูกกิ้งด้านหน้าไปตามยาวประมาณ 1/4 เท่าของความยาวลูกกิ้ง มีวนพลาสติกที่ถูกตัดเข้ามาทาบบนผิวของพลาสติกบนลูกกิ้ง เมื่อพลาสติกหันรอบบริเวณผิวลูกกิ้งจนทั่วก็ทำการตัดพลาสติกซ้ายขวาสลับกัน ดังที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 2.8 เครื่องผสมสองลูกกิ้ง

ขณะที่พลาสติกถูกผสมอยู่นั้นพลาสติกจะแผ่กระจายบนผิวลูกกลิ้งในเนื้อที่จำกัด เพราะมีแผ่นชีด (guides) อยู่บริเวณหัวและท้ายของลูกกลิ้ง แผ่นนี้จะช่วยควบคุมปริมาณพลาสติกในขณะผสม และช่วยไม่ให้พลาสติกเป็นน้ำมันหล่อลื่นที่บริเวณปลายลูกกลิ้งด้วย

พลาสติกที่ผ่านช่องระหว่างลูกกลิ้งในช่วงแรกจะยังไม่หลอมตัวติดกับลูกกลิ้งทั้งหมด แต่เมื่อบดพลาสติกต่อไปพลาสติกจะเริ่มอ่อนนิ่มลงจนพันรอบลูกกลิ้งได้หมด ในการผสมพลาสติกกับแป้ง สามารถใส่แป้งลงไปผสมกับพลาสติกได้ทันทีหลังจากที่พลาสติกพันรอบลูกกลิ้ง การบดพลาสติกให้อ่อนตัว เป็นการทำให้พลาสติกเกิดการฉีกขาด การบดพลาสติกให้นิ่มก่อนเป็นสิ่งจำเป็นในการทำให้พลาสติกสามารถพันรอบลูกกลิ้งได้ การเติมแป้งลงไปในพลาสติกนั้นต้องทำในช่วงที่พลาสติกพันลูกกลิ้งจนมีลักษณะเป็นผิวเรียบรอบลูกกลิ้ง เครื่องบดผสมจะบดผสมแป้งกับพลาสติกให้เข้ากัน ทำการตัดพลาสติกดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น จนสังเกตเห็นว่าแป้งผสมเป็นเนื้อเดียวกับพลาสติก ขั้นสุดท้ายปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้แคบลงเพื่อรีดพลาสติกที่ผสมกับแป้งให้สม่ำเสมอ แล้วจึงใช้มีดตัดพลาสติกไปตามความยาวของลูกกลิ้ง จับแผ่นพลาสติกออกจากเครื่อง นำแผ่นพลาสติกนี้ไปบดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อเตรียมขึ้นรูปต่อไป

เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง เป็นเครื่องมือที่ต้องใช้กำลังมากและเกิดความร้อนสูงขณะบด ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกไหม้ จึงต้องมีระบบทำให้ลูกกลิ้งเย็น โดยผ่านน้ำเย็นเข้าไปในส่วนของลูกกลิ้ง

ลูกกลิ้งที่ใช้บดพลาสติกจะต้องมีผิวหน้าแข็งทนทานต่อการใช้งาน โดยเฉพาะทนต่อมีดที่กรีดบนผิวลูกกลิ้งขณะบดพลาสติก ดังนั้นลูกกลิ้งจึงต้องทำจากเหล็กหล่ออย่างดีมีผิวหน้าเรียบ

2.3.2 การผลิตฟิล์ม

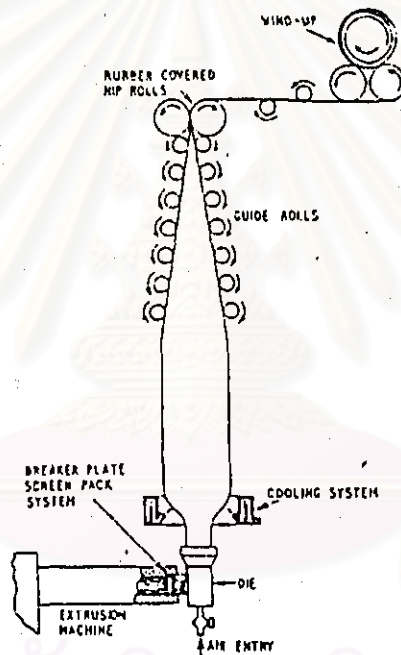
ฟิล์ม หมายถึง แผ่นพอลิเมอร์ที่มีความหนาน้อยกว่า 254 ไมครอน การผลิตฟิล์มจะใช้วัตถุดิบในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก พอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีความหนืดขณะหลอมเหลว และทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิใช้งานได้

2.3.2.1 กระบวนการเป่าฟิล์ม

เครื่องจักรที่ใช้ในงานเป่าฟิล์ม ได้แก่ เครื่องเป่าฟิล์มชนิดสกรูเดี่ยว (single screw - blown film extruder) ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. เครื่องอัดรีด จะเหมือนกับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว
2. คาย หรือหัวเป่าฟิล์ม มีอยู่ 3 ชนิด คือ side - fed dies , spider - type dies และ spiral mandrel dies แต่ละชนิดจะมีการถ่ายเทของพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวออกมาในลักษณะที่แตกต่างกันไป จากนั้นหล่อเย็นด้วยลมภายนอก (external bubble cooling) หรือบางเครื่องอาจจะมีระบบหล่อเย็นภายใน (internal bubble cooling) อยู่ด้วย ซึ่งช่วยให้การหล่อเย็นมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น
3. guide rolls สามารถปรับระดับความสูงได้ มีหน้าที่ควบคุมเสถียรภาพของลูกโป่ง
4. nip roll อยู่ส่วนบนเหนือ guide rolls มีหน้าที่รีดให้ลูกโป่งประกบกันเป็นแผ่นฟิล์ม
5. tension roll มีหน้าที่มีวาล์วดึงฟิล์มเพื่อให้โมดูลของพอลิเมอร์มีการยืดเรียงตัวกันดี ทำให้ฟิล์มแข็งแรง

เครื่องเป่าฟิล์มชนิดสกรูเดี่ยวแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เครื่องเป่าฟิล์มชนิดสกรูเดี่ยว

หลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสำหรับเป่าฟิล์ม จะคล้ายกับเครื่องอัดรีดเม็ดพลาสติก เมื่อป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่เครื่องอัดรีดทางกรวยเติม เม็ดพลาสติกจะถูกถ่ายเทไปยังหน้างานออกจากคาย ซึ่งมีระบบการเป่าด้วยลมค่ออยู่ด้วย พลาสติกที่หลอมเหลวออกมาจากคาย เมื่อถูกเป่าจะพองออกเป็นลูกโป่ง ภายในจะเป็นสูญญากาศ รอบนอกลูกโป่งจะมีลมเป่าเพื่อทำหน้าที่หล่อเย็นฟิล์ม ลูกโป่งจะถูกส่งผ่าน guide roll ไปยัง nip roll ซึ่งทำจากยาง เพื่อประกบลูกโป่งให้เข้าหากันเกิดเป็นแผ่นฟิล์ม จากนั้นฟิล์มจะถูกส่งไปยังลูกกลิ้งสำหรับดึง และถูกส่งเข้าสู่ที่ม้วนเก็บ หรือถูกส่งไปยังเครื่องปิดผนึกและตัด ตามลำดับ

การเป่าฟิล์ม LDPE จะต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆ ดังนี้

1. เครื่องจักรสำหรับเป่าฟิล์ม LDPE ควรมีส่วนอัตราส่วนระหว่าง L/D ประมาณ 18 : 1 ถึง 32 : 1 โดยทั่วไปนิยมใช้อัตราส่วน 24 : 1 การเลือกใช้อัตราส่วนต่างๆ กันนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น กำลังการผลิตของเครื่อง การควบคุมการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ ความสม่ำเสมอของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลว และการกระจายตัวของสารเติมแต่ง เป็นต้น

2. อัตราส่วนการอัดของสกรู (screw compression ratio) สำหรับ LDPE ควรที่จะมีค่าประมาณ 2.5 : 1 ถึง 4.5 : 1 ในงานเป่าฟิล์มจะนิยมค่าต่ำๆ แต่ถ้าเป็นฟิล์มที่ต้องการความใสสูงและมีการกระจายตัวของพอลิเมอร์ดีจะเลือกค่านี้อีก

3. ในการเป่าฟิล์ม ถ้าอัตราการผลิตสูงและอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำ จะทำให้ barrier screw ทำงานดีขึ้น เนื่องจากมีการฉีกตัวลงภายในเครื่องจักร

4. บริเวณการผสม (mixing section) ที่ดี barrier screw ควรพาพอลิเมอร์ที่ยังไม่หลอมเหลวไปได้ตลอด และมีการกระจายตัวของสารเติมแต่ง หรือพอลิเมอร์ผสมอย่างทั่วถึง

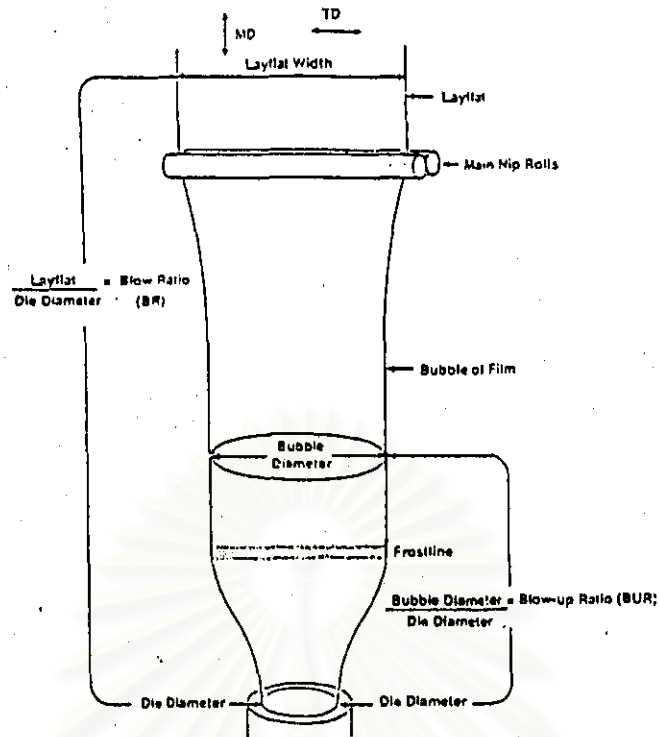
5. ช่องคาย (die gap) ควรออกแบบให้เหมาะสมกับความหนืดของพอลิเมอร์ที่ใช้และยอมให้พอลิเมอร์ผ่านไปได้โดยไม่ติดค้าง นอกจากนี้เมื่อใช้อัตราการผลิตสูงบริเวณคายนควรออกแบบให้สามารถรับแรงดันได้สูง เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความเรียบและสม่ำเสมอ ถ้าใช้คายนที่มีความสามารถรับแรงดันได้ในระดับปานกลางหรือต่ำอาจทำให้ฟิล์มที่ได้ไม่สม่ำเสมอ

2.3.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเป่าฟิล์ม

ในกระบวนการผลิตฟิล์ม จะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิหลอมเหลว เพราะมีผลต่อลักษณะของผิวฟิล์ม ถ้าหากใช้อุณหภูมิในการหลอมเหลวพอลิเมอร์ต่ำเกินไป ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะผิวหยาบ และมีรอยตำหนิเกิดขึ้น ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พอลิเมอร์จะไหลได้ง่ายขึ้น ฟิล์มจะมีผิวเรียบและใสขึ้น นอกจากนี้ยังมีการเรียงตัวตามแนวขวางดีขึ้นอีก

2. อัตราการเป่ง หรือ blow up ratio (BUR) เป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งกับเส้นผ่านศูนย์กลางของคายน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 การเพิ่มหรือลด BUR จะมีผลต่อการเรียงตัวของฟิล์ม ถ้าลด BUR จะมีผลทำให้ฟิล์มมีความฝืดลดลง ความทนแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดในแนวเครื่องเพิ่มขึ้น แต่สมบัติในแนวขวางแทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

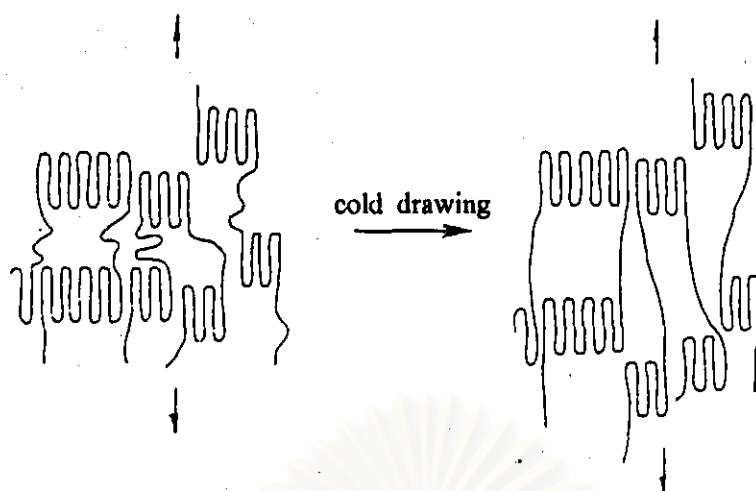


รูปที่ 2.10 ลักษณะของฟิล์มที่ได้จากการเป่าฟิล์ม

3. ขนาดของช่องคาย (die gaps) จะมีผลต่อการเรียงตัวของโมเลกุล ถ้ายังมีขนาดใหญ่มากขึ้นจะทำให้โมเลกุลมีการเรียงตัวตามแนวเครื่องคี่ขึ้น แต่การเรียงตัวตามแนวขวางลดลง ขนาดของช่องคาย ความหนาของฟิล์ม และ BUR สามารถนำมาคำนวณหาอัตราส่วนการดึง (draw down - ratio, DDR) ได้ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1

$$\text{DDR} = \frac{\text{ขนาดของช่องคาย}}{\text{ความหนาของฟิล์ม} \times \text{BUR}} \quad (2.1)$$

การที่ฟิล์มมี DDR สูง BUR ต่ำ แสดงว่าระหว่างการผลิต ฟิล์มถูกดึง (cold drawing) มาก ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ซ้อนกันหลายๆ ชั้น (lamellar) ถูกดึงมาก ส่วนที่ขดอยู่ระหว่างชั้นจะถูกชีกออกจนตั้ง (tie chain) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ทำให้เกิดการเรียงตัวในแนวเครื่องคี่ มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ฟิล์มจึงมีความต้านทานต่อการฉีกขาดในแนวเครื่องสูง นอกจากนี้ลักษณะของ tie chain ยังช่วยเสริมให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นอีกด้วย แต่ถ้าฟิล์มถูกดึงน้อยหรือมี BUR สูง จะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดในแนวเครื่องน้อยลง DDR และ BUR แทบจะไม่มีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดในแนวขวาง



รูปที่ 2.11 tie chain ที่เกิดขึ้นจากแรงดึง (Daniels, 1989)

4. อัตราการผลิต เมื่ออัตราการผลิตเพิ่มขึ้น พิล์มจะมีความฝืดและความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง แต่จะมีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น

5. การหล่อเย็น เป็นการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเย็นตัวลง และแข็งตัวเป็นฟิล์มด้วย กระแสลมที่เป่าออกมารอบนอกถูกโป่ง อากาศที่เป่าจะต้องมีการกระจายอย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอ ถูกโป่งที่ถูกหล่อเย็นจะปรากฏแนวการเย็นตัว (frostline height) ให้เห็น มีลักษณะเส้นแบ่งเขตแดนระหว่างส่วนที่โตกับส่วนที่ยุบของถูกโป่งขณะเป่าฟิล์ม บริเวณใต้เส้นมีอุณหภูมิสูงกว่า จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นออสถฐาน จึงใส่ สำหรับบริเวณแนวการเย็นตัวจะเริ่มมีการจัดเรียงโมเลกุล บางส่วนมีลักษณะเป็นผลึกจึงยุบ เมื่ออัตราการเย็นตัว (quenching rate) ลดลง แนวการเย็นตัวจะเพิ่มสูงขึ้น พอลิเมอร์มีการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ จึงเกิดผลึกมาก ถ้าลดระดับแนวการเย็นตัวลง ความเป็นผลึกจะเกิดขึ้นน้อย พิล์มจะใสขึ้น

2.4 การสลายตัวของพลาสติก

2.4.1 ลักษณะการสลายตัวของพลาสติก

การสลายตัวตามธรรมชาติของพลาสติกสามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การสลายตัวโดยสภาวะแวดล้อม (environment degradation) คือ การที่พลาสติกเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ จากผลของสภาวะแวดล้อม ได้แก่ แสงอาทิตย์ ความร้อน น้ำ อากาศ เป็นต้น

2. การสลายตัวด้วยแสง (photodegradation) คือการที่พลาสติกเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ เมื่อได้รับแสงอาทิตย์ หรือแสงที่มีรังสีอัลตราไวโอเลต (ultraviolet radiation)

3. การสลายตัวโดยการทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจน หรือโอโซนในอากาศ (oxidation degradation)

4. การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) คือ การที่พลาสติกเกิดการสลายตัว จากการย่อยสลายธาตุคาร์บอนในโมเลกุลโดยจุลินทรีย์ แบคทีเรีย และเชื้อรา (พันธ์ จันทรวะดิน , 2539)

งานวิจัยนี้ศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการไฮโดรลิซิสด้วยกรด

2.4.2 การสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติก

การสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติก เป็นการสลายตัวเนื่องจากสิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการนี้ได้แก่ จุลินทรีย์ โดยเฉพาะแบคทีเรียและเชื้อรา สิ่งมีชีวิตเหล่านี้ มีความสามารถในการย่อยสลายสารได้หลายประเภท และสามารถปรับความสามารถนี้ได้มาก เพราะสามารถผลิตเอนไซม์ย่อยสารได้หลายชนิด ขณะเดียวกันก็เกิดมีจุลินทรีย์ชนิดใหม่ๆ ขึ้นมาเรื่อยๆ อันเนื่องมาจากผลของการค้าเหล่า และกระบวนการคัดเลือกโดยธรรมชาติ อัตราการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับสภาวะของสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก จุลินทรีย์ที่เหมาะสมต้องมีปริมาณอยู่พอเพียง และควรจะต้องมีอยู่มากกว่า 1 ชนิด การที่จุลินทรีย์จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาพแวดล้อมจะต้องมีอุณหภูมิ และระดับความชื้นที่พอเหมาะสม มีออกซิเจนและมีสารอาหารพอเพียง ถึงแม้ว่าจุลินทรีย์จะสามารถใช้พอลิเมอร์เป็นแหล่งของธาตุคาร์บอน แต่ก็จำเป็นต้องหาธาตุอื่นมาใช้ด้วย เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และโลหะอื่นๆ ส่วนใหญ่ธาตุเหล่านี้มักจะไม่อยู่ในพอลิเมอร์สังเคราะห์ จึงจำเป็นต้องหาจากสภาพแวดล้อม

การย่อยสลายพลาสติกโดยจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์ออกมาออกเซลล์ เอนไซม์นี้ผ่านไปถึงพลาสติกได้ทางตัวกลางที่เป็นน้ำ เอนไซม์ดังกล่าวนี้จะย่อยสลายโมเลกุลของพอลิเมอร์ไปเป็นสารผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่จะเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ เพื่อย่อยให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กต่อไปอีก

จากขั้นตอนของการย่อยสลายข้างต้นจะเห็นว่าพลาสติกส่วนใหญ่ไม่ค่อยถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เพราะโมเลกุลของพลาสติกไม่ยอมให้ผ่านเข้าออก จึงทำให้โอกาสที่เอนไซม์เข้าย่อย

สลายน้อยลง การย่อยสลายพลาสติกจึงต้องเริ่มที่ผิวด้านนอกก่อน การแบ่งพลาสติกออกเป็นชิ้นเล็กๆ จะช่วยให้กระบวนการย่อยสลายนี้เกิดเร็วขึ้น

พอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนใหญ่จะไม่ถูกย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิต ยกเว้นพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเตอร์ในสายโซ่โมเลกุลหลัก เช่น เอลิฟาทิกพอลิเอสเตอร์ (aliphatic polyesters) พอลิยูรีเทน (polyurethanes) เป็นต้น นอกจากนี้พอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้รับการปรับเปลี่ยนแล้ว เช่น เรยอน (rayon) เซลลูโลสอะซีเตต (cellulose acetate) ก็สามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้

ความสามารถของการย่อยสลายจะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติกเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของการย่อยสลายกับน้ำหนักโมเลกุล มีสิ่งที่ควรกล่าวถึง 2 ประการ ประการแรก คือ ถ้าพอลิเมอร์มาทำการย่อยสลายโดยปฏิกิริยาเคมี (เป็นการลดน้ำหนักโมเลกุล) จะเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายขึ้น ประการที่สอง ถ้าพอลิเมอร์มีช่วงการกระจายตัวของน้ำหนักกว้าง อัตราเร็วของการย่อยสลายจะลดลง เมื่อโมเลกุลขนาดเล็กถูกย่อยสลายไปแล้ว (อภิชาติ สุขตาราญ, 2534)

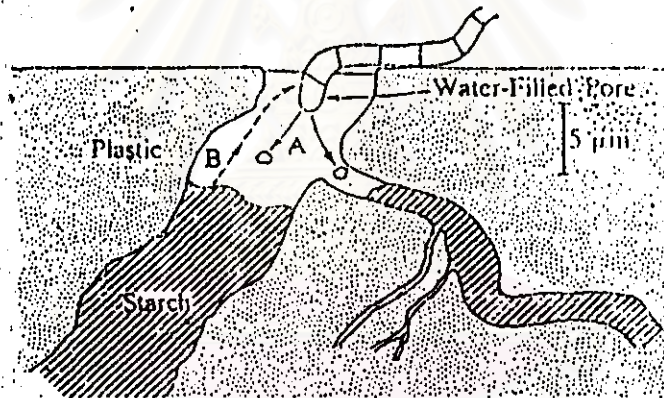
2.4.3 แนวทางการผลิตพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

ในช่วงเวลาที่ผ่านมา มีการพัฒนาแนวทางการผลิตพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ 3 แนวทาง คือ

1. พัฒนาวิธีการในการปรับปรุงพอลิเมอร์ธรรมชาติซึ่งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ให้ มีสมบัติดีขึ้นเหมาะกับการใช้งาน
2. เตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่ย่อยสลายได้โดยสิ่งมีชีวิต พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่สังเคราะห์ขึ้นมา และถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น acrolein - aryllic acid polymers , polyamidotriazoles , polyphosphazenes พอลิเมอร์เหล่านี้ได้มาจาก amino acid esters และ acrylonitrile copolymer ที่ถูกไฮโดรไลซ์แล้ว
3. ใช้สารที่สิ่งมีชีวิตย่อยสลายได้เติมเข้าไปในพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายไม่ได้ เป็นการเติมสารเติมแต่งที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (biodegrading additive) ลงในพลาสติกสังเคราะห์ สารเติมแต่งดังกล่าวมักจะเป็นสารจำพวกแป้ง (starch) ที่สามารถเป็นอาหารของจุลินทรีย์ได้ ทำให้เกิดรูพรุนในพลาสติก แนวทางที่ 3 นี้เป็นแนวทางที่ใช้ในการผลิตฟิล์มพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ในงานวิจัยนี้

ในขณะนี้บริษัท St. Lawrence Starch ได้ผลิตแป้งชื่อว่า Ecostar เป็นแป้งข้าวโพดที่นำมาปรับปรุงสมบัติด้วย silane coupling agent เพื่อให้แป้งดังกล่าวรวมตัวกับพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำได้ แป้งดังกล่าวจะมีความชื้นเพียงร้อยละ 10 ถึง 12 ขณะนำแป้งดังกล่าวไปผสมกับพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน จะมีการเติมไขมันที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated fat) หรือกรดไขมัน (fatty acid) ที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ลงไปด้วย จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่ได้ไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ต่อไป

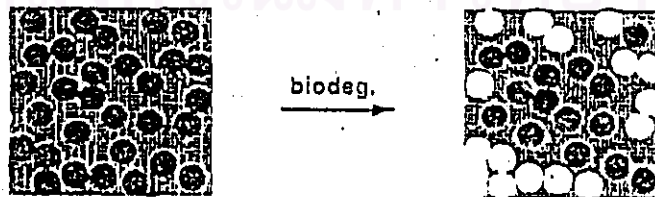
กลไกการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่ผสมสารเติมแต่งที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นแรกที่จุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) เข้าย่อยสลายแป้งในพลาสติกทางตัวกลางที่เป็นน้ำ เอนไซม์นี้จะย่อยโมเลกุลของแป้งให้มีขนาดเล็กลง จนสามารถเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์เพื่อถูกย่อยสลายต่อไป ทำให้เม็ดแป้งหายไปจากเนื้อของพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13 ทำให้พลาสติกอ่อนลงและมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.12 กลไกการย่อยสลายแป้งในพลาสติกโดยจุลินทรีย์

A: Diffusion of amylase to starch

B: Diffusion of digestion products to fungus



รูปที่ 2.13 การหายไปของเม็ดแป้งในพลาสติก

ชั้นที่สองเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโลหะหรือน้ำในดิน เกิดเป็นสารเปอร์ออกไซด์ขึ้น สารดังกล่าวจะเข้าไปกระตุ้นโมเลกุลของพอลิเมอร์ให้เกิดการแตกตัว ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง จุลินทรีย์จึงสามารถเข้าไปย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

อัตราเร็วของการย่อยสลายทางชีวภาพขึ้นกับอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความชื้น จำนวนและชนิดของจุลินทรีย์ เกือบของโลหะ สารอาหารที่อยู่ในดิน รวมไปถึงความหนาของผลิตภัณฑ์ (Hocking, 1992)

2.5 การทดสอบสมบัติของฟิล์มที่สลายตัวทางชีวภาพ

2.5.1 ความแข็งแรงของวัสดุ

ความแข็งแรง (strength) คือ ความสามารถของวัสดุที่ต้านทานแรงที่มากระทำต่อวัสดุ นั้นๆ โดยไม่ทำให้เกิดการแตกหัก แรงที่มากระทำต่อวัสดุส่วนใหญ่ คือ แรงกด และแรงเฉือน

ในการใช้งานของฟิล์มพลาสติกต่างๆ ไปนั้น แรงที่มากระทำต่อฟิล์มส่วนใหญ่มักจะเป็นแรงดึง ดังนั้นในการวัดความแข็งแรงของฟิล์มจึงมักวัดในรูปของความทนแรงดึง (tensile strength)

ความทนแรงดึง หมายถึง ความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้ในการทดสอบแรงดึง ถ้าเป็นความเค้นสูงสุดที่จุดครากจะเรียกว่า ความทนแรงดึงที่จุดคราก (tensile strength at yield) แต่ ถ้าเป็นความเค้นที่จุดขาด จะเรียกว่าความทนแรงดึง (tensile strength at break or ultimate tensile strength)

ความทนแรงดึง (tensile strength) สามารถคำนวณได้จาก สมการดังนี้

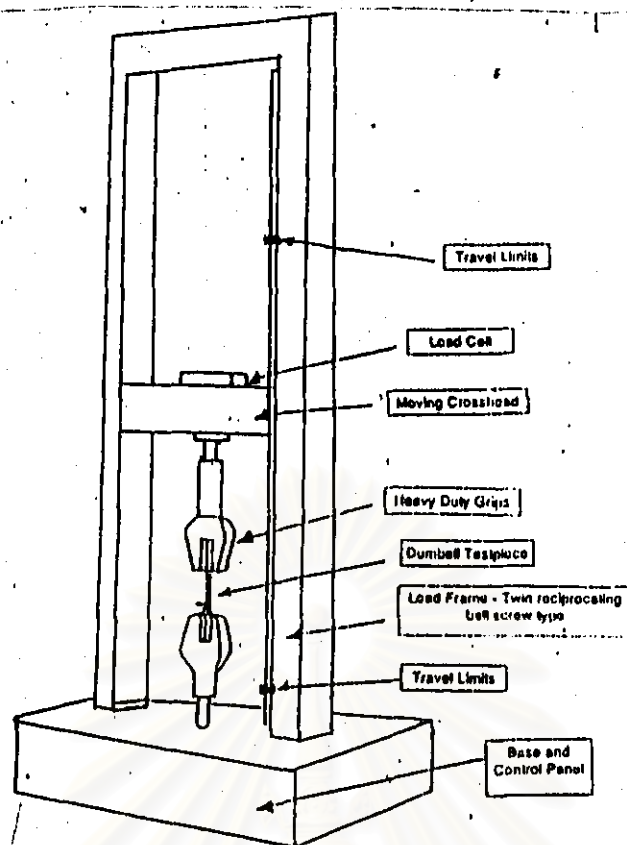
$$\delta = F / A$$

โดยที่ δ = ความทนแรงดึง (tensile strength at break) มีหน่วยเป็น นิวตัน / ตารางมิลลิเมตร

F = แรงที่กระทำต่อวัสดุ ณ จุดขาด มีหน่วยเป็น นิวตัน

A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ มีหน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร

ในการทดสอบความทนแรงดึง ทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (tensile strength machine) ดังแสดงไว้ในรูป 2.14

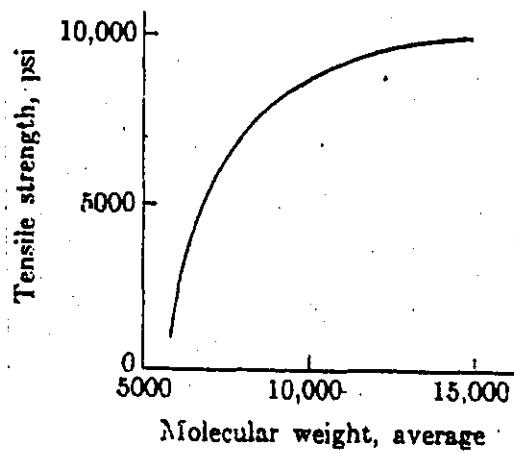


รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง

ในการทดสอบขึ้นทดสอบจะถูกยึดไว้ระหว่างหัวจับ (crosshead) ทั้ง 2 ข้าง โดยหัวจับตัวหนึ่งจะอยู่กับที่ส่วนอีกตัวหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อัตราเร็วของการทดสอบ (test rate) หรืออัตราการเคลื่อนที่ของหัวจับ (crosshead rate) จะมีผลต่อการทดสอบ ถ้าขึ้นทดสอบถูกทำให้ยืดอย่างรวดเร็ว จะทำให้มีจุดครากและความทนแรงดึงสูงขึ้น ส่วนใหญ่เทอร์โมพลาสติกที่อ่อน เช่น พอลิเอทิลีน ค่ามอดูลัสจะขึ้นกับอัตราเร็วของการยืดตัว เมื่ออัตราเร็วของความเครียดเพิ่มขึ้น ความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงแรกของการถูกดึงจะเพิ่มขึ้น

2.5.2 น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)

น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์อย่างยิ่ง พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีความแข็งแรงและทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและความทนแรงดึง



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและความทนแรงดึง
(เสาวรจน์ ช่วยจตุจักร, ม.ป.ป.)

ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ โมเลกุลของพอลิเมอร์จะขยายใหญ่ขึ้นต่าง ๆ กัน ทำให้แต่ละโมเลกุลมีน้ำหนักโมเลกุลไม่เท่ากัน ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จึงเป็นค่าเฉลี่ย และค่าที่วัดได้จะแตกต่างกันไปขึ้นกับวิธีการที่ใช้

วิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ คือ การอาศัยความหนืดของสารละลายของพอลิเมอร์คำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยอาศัยสมการ Mark, Houwink และ Sakurada ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง intrinsic viscosity ของสารละลายพอลิเมอร์กับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ดังนี้

$$[\eta] = K\bar{M}_v^a \quad (2.2)$$

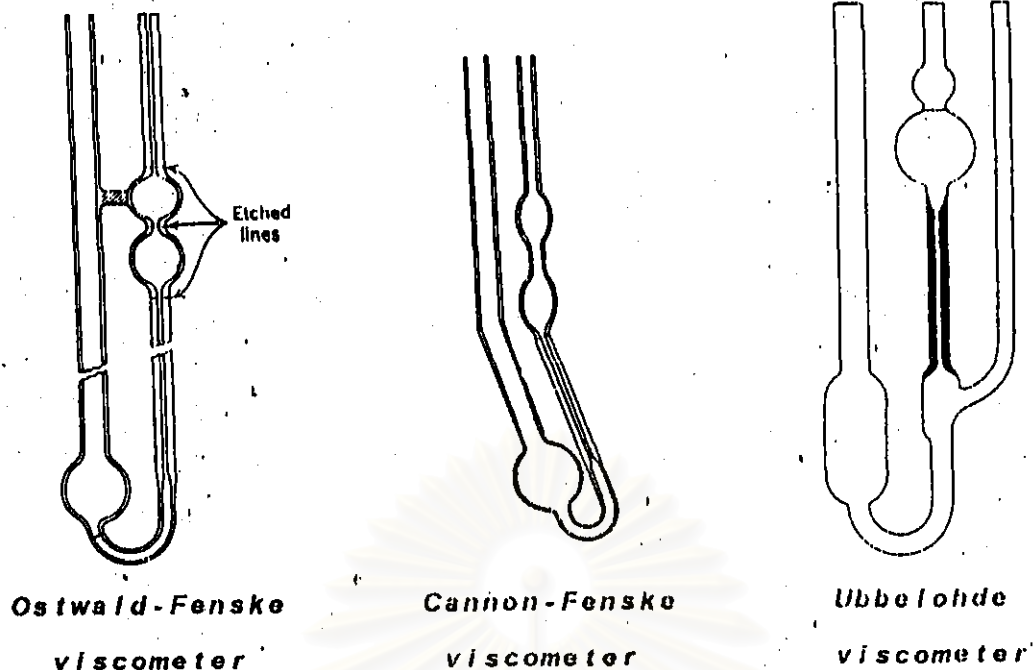
โดยที่ $[\eta]$ = intrinsic viscosity ของสารละลายพอลิเมอร์

K และ a = ค่าคงที่ ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ตัวทำละลายและอุณหภูมิโดยปกติ

a มีค่าอยู่ระหว่าง 0.50 - 0.80

\bar{M}_v = น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เฉลี่ยโดยน้ำหนัก

การหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยวิธีวัดความหนืด สามารถทำได้ง่ายในห้องทดลองและเป็นที่ยอมรับกันมาก โดยเฉพาะในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากวิธีทดสอบค่อนข้างง่าย สะดวก และให้ค่าที่แม่นยำพอสมควร อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เครื่องวัดโคมิเตอร์ (viscometer) มีด้วยกันหลายแบบ เช่น แบบออสต์วัลด์ - เฟนสค์ (Ostwald - Fenske), แบบแคนนอน - เฟนสค์ (Cannon - Fenske) และแบบอับบีโลห์เด (Ubbelohde), ดังแสดงในรูป 2.16



รูปที่ 2.16 เครื่องวัดโคมิเตอร์แบบต่างๆ

หลักการวัดความหนืดของสารละลาย คือ ปล่อยสารละลายพอลิเมอร์ให้ไหลผ่านหลอดรูเล็ก (capillary tube) ซึ่งอยู่ภายในเครื่องวัดโคมิเตอร์ แล้วจับเวลาที่ของเหลวไหลลงมาโดยแรงโน้มถ่วงจากระดับหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่ง ซึ่งมีเครื่องหมายกำหนดไว้บนเครื่องวัด ของเหลวที่มีความหนืดสูงจะไหลได้ช้า (ใช้เวลานาน) กว่าของเหลวที่มีความหนืดต่ำ (ใช้เวลาน้อย)

วิธีการหา intrinsic viscosity แสดงในภาคผนวก เมื่อเราหาค่า intrinsic viscosity ได้แล้ว นำค่าที่หาได้ไปแทนลงในสมการ 2.2 เพื่อหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย