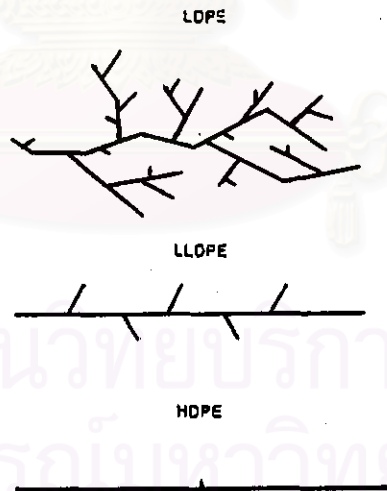


บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low-density polyethylene, LDPE)

LDPE คือพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขา (branching) ผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) แบบใช้ความดันสูง ประมาณ 1,000 - 3,000 บรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ได้พอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลยาว แต่มีกิ่งก้านสาขามาก ทำให้โมเลกุลวางตัวไม่เป็นระเบียบ ที่เรียกว่าอสัณฐาน (amorphous) โมเลกุลอยู่อย่างห่าง ๆ ความหนาแน่นจึงต่ำ (ซีซวาลย์ สุรัสวดี, 2528: 7)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของ LDPE เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างโมเลกุลของ LLDPE และ HDPE (Butler, 1992: 454)

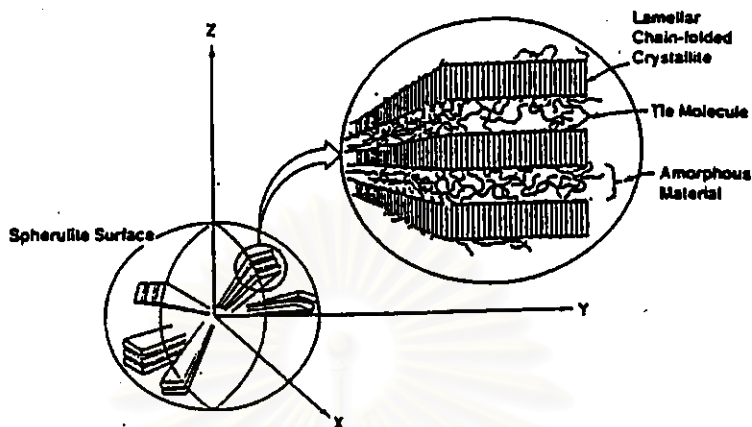
2.1.1 ลักษณะโครงสร้างและสมบัติของ LDPE

Briston (1983) กล่าวว่า โครงสร้างโมเลกุลของ LDPE นอกจากจะมีผลต่อความหนาแน่นแล้ว ยังมีผลกับสมบัติอื่น ๆ ด้วย สมบัติอย่างหนึ่งที่สำคัญก็คือ ความเป็นผลึก (crystallinity) สายโซ่พอลิเมอร์ที่ยาวมาก ๆ มักจะเกิดการพันกัน ทำให้การเกิดผลึก (crystallization) ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่เป็นผลึกบางส่วน

บริเวณที่สายโซ่โมเลกุลเรียงตัวขนานกัน และอัดตัวกันแน่น จะเป็นส่วนของผลึก บริเวณที่ไม่เป็นระเบียบจะเป็นอสัณฐาน เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกทำให้เย็นลงอย่างช้า ๆ จนมีสถานะเป็นของแข็ง จะมีโครงสร้างเป็นสเฟียรูไลต์ (spherulite) ซึ่งโมเลกุลจะพับตัวไปมา ในลักษณะการจัดตัวขนานเกิดเป็นชั้น ๆ (lamella) อยู่ร่วมกับพอลิเมอร์ส่วนที่เป็นอสัณฐานซึ่งเกิดจากกิ่งก้านสาขา ไปจัดขบวนการพับตัวของโมเลกุล ดังรูปที่ 2.3 ความเป็นผลึกของ LDPE ตามปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 55 - 70 % (HDPE มีความเป็นผลึก 75 - 90 %)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสเฟียรูไลต์ (Butler, 1992: 457)

สมบัติอีกอย่างหนึ่งที่สัมพันธ์กับการเกิดกิ่งก้านสาขาคือ จุดอ่อนตัว (softening point) การที่สายโซ่โมเลกุลไม่สามารถเข้าใกล้กันได้นั่น ทำให้แรงดึงดูด (attractive force) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง เมื่อใช้พลังงานในรูปความร้อนเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เคลื่อนที่ออกจากกันและเกิดการไหลได้ จุดอ่อนตัวของ LDPE จะมีค่าต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำเล็กน้อย ทำให้ไม่สามารถใช้ LDPE เป็นวัสดุที่ต้องผ่านการฆ่าเชื้อ (sterilization) ด้วยน้ำเดือดหรือไอน้ำได้

LDPE มีความเหนียว เป็นวัสดุที่โปร่งแสง และมีผิวเรียบมัน มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.916 - 0.935 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น สมบัติที่จะสูงขึ้นคือ ความทนแรงดึง (tensile strength) การคงรูปหรือความแข็งเกร็ง (rigidity) ความแข็ง ความทนทานต่อความร้อน ความทนทานต่อสารเคมี และความทนทานต่อการแทรกซึมของแก๊ส (ัชชาลย์ สุรัสวดี, 2528: 7)

การขึ้นรูปให้เป็นฟิล์มทำได้โดยการเป่าหรือการอัดผ่านช่องตาย (slit die) แล้วผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็น (chill-roll cast) กระบวนการที่ผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็นจะให้ฟิล์มที่ใสกว่า แต่การเป่าฟิล์มก็สามารถทำให้ได้ความใสที่ดี โดยการปรับปรุงการหล่อเย็นลูกโป่ง (bubble)

LDPE มีความทนทานต่อสารเคมีมาก โดยเฉพาะกรด ค่าง และสารละลายอินทรีย์ (organic solution) แต่ไม่ทนต่อสารละลายไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) และ

แฮโลจิเนตเตดไฮโดรคาร์บอน (halogenated hydrocarbon) และไมทนค่อน้ำมัน (greases) โดยจะเกิดการดูดซึมและเกิดการบวม สารเคมีที่มีขั้ว (polar organic chemical) จะทำให้เกิดภาวะการแตกเมื่อได้รับแรงเค้น (stress) จะทำให้เกิดการแตกของพื้นผิว (surface cracking) หรือแม้กระทั่งเกิดความเสียหายกับวัสดุทั้งสิ้น สารเคมีเหล่านี้ ได้แก่ ผงซักฟอก น้ำมันบางชนิด เบนซิลดีไฮด์ และไนโตรเบนซีน (nitrobenzene) การเกิดภาวะการแตกเมื่อได้รับแรงเค้นจะลดลง ในพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

การที่ LDPE ไม่มีกลิ่นและรส ทำให้ถูกใช้มากในงานหีบห่อ การเชื่อมด้วยความร้อนทำได้ง่าย และให้รอยเชื่อมที่มีความเหนียวดี การเชื่อมโดยใช้กาว (adhesive) ทำได้ยากเพราะ LDPE มีความสามารถในการดูดซึมต่ำ

การที่มีผิวหน้าค่อนข้างมัน รวมทั้งความเฉื่อยและไม่มีขั้วของผิวหน้าฟิล์ม ทำให้ยากแก่การพิมพ์ ดังนั้นก่อนทำการพิมพ์ ต้องมีการเตรียมผิวหน้าด้วยการลนเปลวไฟ ออกซิ-อะเซทิลีน (oxy-acetylene) หรือเปลวไฟแก๊สทุ้งต้ม เพื่อให้ได้ออกไซด์ที่ผิวหน้าอีกชั้นหนึ่งก่อน หรืออาจจะใช้การกัดผิวหน้าด้วยสารเคมี (ซัลฟิวริก สตรีคติก, 2528: 7) และถึงแม้ว่า LDPE จะมีความคงตัวที่ดี แต่เมื่อต้องอยู่ในสภาพที่มีความชื้นในขณะพิมพ์ ทำให้มีความทนแรงดึงต่ำ ดังนั้นจึงต้องหลีกเลี่ยงการดูดกระซากในระหว่างที่ผ่านเข้าไปในเครื่องพิมพ์

2.1.2 การใช้งาน

ฟิล์ม LDPE ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในงานหีบห่อ ที่ใช้มากที่สุดได้แก่ ถุง เช่น ถุงขยะ ถุงสินค้า ถุงขนมปังและเบเกอรี่ ถุงแช่แข็ง เป็นต้น รวมทั้งการหีบห่อทางอุตสาหกรรม

ใช้ในงานด้านการก่อสร้างและเกษตรกรรม เช่น ฟิล์มที่ใช้คลุมหน้าดิน ฟิล์มที่ใช้คลุมเรือนเพาะชำ (greenhouse covering) ฟิล์มสำหรับปูพื้นบ่อน้ำ และการทำหีบห่อสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

ฟิล์ม LDPE ยังถูกใช้ในการทำฟิล์มเคลือบ (laminates) เนื่องจากสมบัติที่มีการเชื่อมที่ดี และสามารถเข้ากันได้กับวัสดุอื่น ๆ เช่น กระดาษ กระดาษโลหะ (foil) หรือพลาสติก

ในรูปของภาชนะขึ้นรูป เช่น ขวด ถ้วย ถาด สำหรับการบรรจุผลิตภัณฑ์อาหารและยา เป็นต้น

2.2 การผลิตฟิล์ม

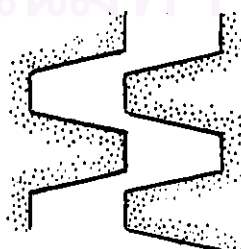
2.2.1 การผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder)

Morton (1989: 97) ได้อธิบายว่า เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่จะทำงานเหมือนเป็นลูกสูบซึ่งเกิดแรงเสียดทานน้อย มีการควบคุมอัตราการเดินและอุณหภูมิได้ดี จึงเหมาะกับวัสดุซึ่งมีความไวต่อความร้อน เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.2.1.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนสวนทางกัน (counter-rotating twin screw extruder)

เมื่อใช้ฟันสกรู (flight) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความหนา จะทำให้ไม่มีช่องว่างระหว่างสกรู ดังนั้นพอลิเมอร์จะอยู่ในลักษณะรูปตัว C ล้อมรอบแต่ละสกรู พอลิเมอร์จะถูกกวาดไปยังจุดที่ฟันสกรูขัดกันซึ่งมีลักษณะเหมือนการบด ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นอย่างมากเหมือนกับวัสดุถูกบีบภายใต้แรงเฉือน (shear) และมีแนวโน้มที่จะทำให้สกรูและเรือนสกรู (barrel) เกิดการสึก

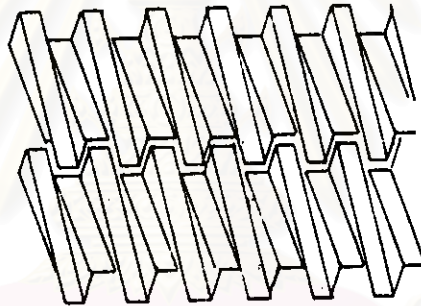
แต่ถ้าทำให้ฟันสกรูบางลง จะลดปัญหาความดันที่สูงเกินไปได้ โดยการออกแบบฟันสกรูเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal) ดังรูปที่ 2.4 จะเหมาะสมกว่า ฟันสกรูแบบนี้จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างสกรู ทำให้เกิดการผสม แต่จุดที่ฟันสกรูขัดกันจะยังคงมีปัญหาลดแรงเฉือนที่สูงและความดันที่ยังคงมีอยู่



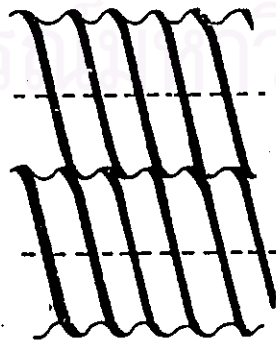
รูปที่ 2.4 ลักษณะของฟันสกรูรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและช่องสกรู

2.2.1.2 เครื่องจักรรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนทางเดียวกัน (co-rotating twin screw extruder)

จะใช้พื้นสกรูรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่ได้ แต่ควรรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 2.5 โดยจะทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ไปมาระหว่างสกรูเป็นรูปเลข 8 ดังนั้นจึงไม่เกิดการบด ณ จุดที่พอลิเมอร์อยู่ตรงกลางระหว่างสกรู และลดแรงขับเคลื่อน พื้นสกรูที่ใช้อีกแบบ คือ แบบ sinusoidal ดังรูปที่ 2.6 จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์รอบสกรูทั้งสองเป็นรูปเลข 8 ขนาดใหญ่ เกิดการผสมได้ดีและไม่มีความดันระหว่างสกรู ทำให้อัตราเร็วการหมุนของสกรูสูงขึ้น แต่จะสูญเสียประสิทธิภาพในการขับเคลื่อน



รูปที่ 2.5 ลักษณะของสกรูที่หมุนทางเดียวกันโดยมีพื้นสกรูเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 2.6 สกรูแบบ sinusoidal self-wiping

2.2.2 กระบวนการ เป่าฟิล์ม

2.2.2.1 การอัดรีด (extrusion)

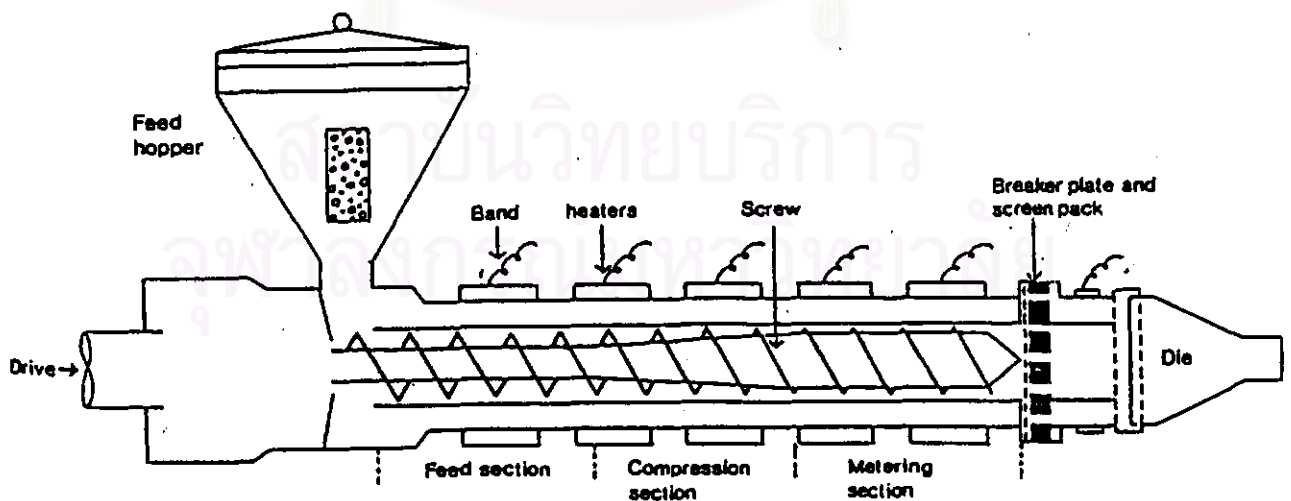
การอัดรีด หมายถึง การผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ยาวต่อเนื่องกันไม่รูดจากสารพลาสติกที่เป็นผงหรือเป็นเม็ด (บรรณเลข ศรนิล, 2537: 35)

Briston (1983: 67) กล่าวว่า เครื่องมือสำหรับการอัดรีดฟิล์ม ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลัก ๆ ดังนี้

1. เครื่องอัดรีด (extruder) ซึ่งต่อกับหัวตาย (die) ที่เหมาะสม
2. เครื่องมือที่จะทำให้ฟิล์มเหลว (molten film) เย็นลงและแข็งตัว
3. เครื่องฉุดดึง (haul-off machine)
4. เครื่องม้วนเก็บ (wind-up unit)

หลักการสำคัญของกระบวนการอัดรีดมีดังนี้

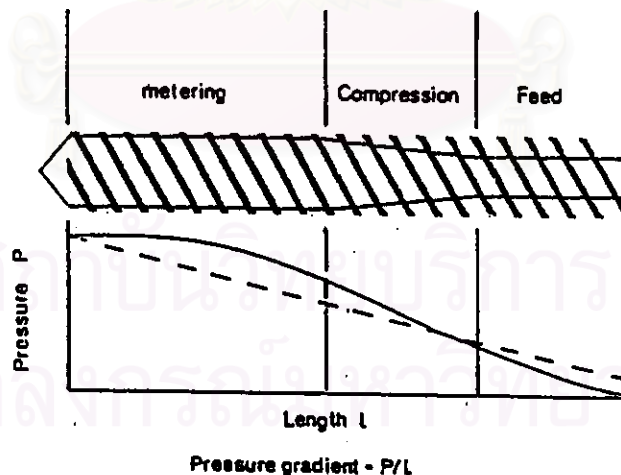
1. ทำวัตถุดิบที่อยู่ในรูปเม็ดหรือผงให้อ่อนตัวลง
2. ส่งผลิตภัณฑ์ให้อ่อนตัวผ่านหัวตายเพื่อให้ได้รูปร่างตามต้องการ
3. ทำให้เกิดการแข็งตัวเป็นรูปร่างตามต้องการ
4. ม้วนเก็บ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder)
(Morton, 1989: 75)

ลักษณะของเครื่องอัดรีดแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 จะประกอบด้วยสกรูที่อยู่ในเรือนสกรูที่มีการให้ความร้อน โดยเม็ดพลาสติกจะถูกป้อนเข้าไปทางกรวยเติม (hopper) ที่อยู่ด้านใดด้านหนึ่งของเรือนสกรู และถูกส่งผ่านเรือนสกรูโดยการหมุนของสกรู เมื่อเม็ดเคลื่อนที่ผ่านสกรู จะเกิดการหลอมโดยการสัมผัสกับผนังร้อนของเรือนสกรู และโดยความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน (friction) สกรูจะขับพลาสติกเหลวผ่านหัวตาย ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์

ส่วนที่สำคัญที่สุดของเครื่องอัดรีด คือสกรู สกรูแบบต่าง ๆ กัน ก็ถูกออกแบบมาให้ใช้สำหรับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ กัน ลักษณะของสกรูถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D) และอัตราส่วนการอัด (compression ratio) ซึ่งคืออัตราส่วนของปริมาตรระหว่างพื้นสกรูของสกรูด้านกรวยเติมต่อปริมาตรระหว่างพื้นสกรูด้านหัวตาย โดยทั่วไปอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูที่ใช้กันมากในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว คือ $15:1 - 30:1$ และอัตราส่วนการอัดที่ใช้คือ $2:1 - 4:1$



รูปที่ 2.8 ส่วนต่าง ๆ ของสกรูในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Morton, 1989: 76)

สกรูของเครื่องอัดรีดดังแสดงในรูปที่ 2.8 มักจะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

1. ส่วนนำเข้า (feed zone) เป็นส่วนที่มีการส่งวัตถุดิบจากกรวยเติมไปยังส่วนที่ทำให้ความร้อนของเรือนสกรู

2. ส่วนการอัด (compression zone) เป็นส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกของฟันเกลียว ทำให้เกิดแรงอัดจึงทำให้เม็ดพลาสติกหลอม กลไกหลักคือการเพิ่มแรงเฉือนให้กับพลาสติกเหลว โดยขึ้นกับการเคลื่อนที่ของผิวหน้าสกรูไปสัมผัสกับผนังเรือนสกรู จะทำให้เกิดการผสมได้ดีขึ้น และเพิ่มความร้อนจากแรงเสียดทาน รวมทั้งทำให้การกระจายความร้อนในพลาสติกเหลวสม่ำเสมอ

3. ส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียว (metering zone) เป็นส่วนที่ทำให้พลาสติกเหลวผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และส่งผ่านไปยังหัวตายอย่างสม่ำเสมอ

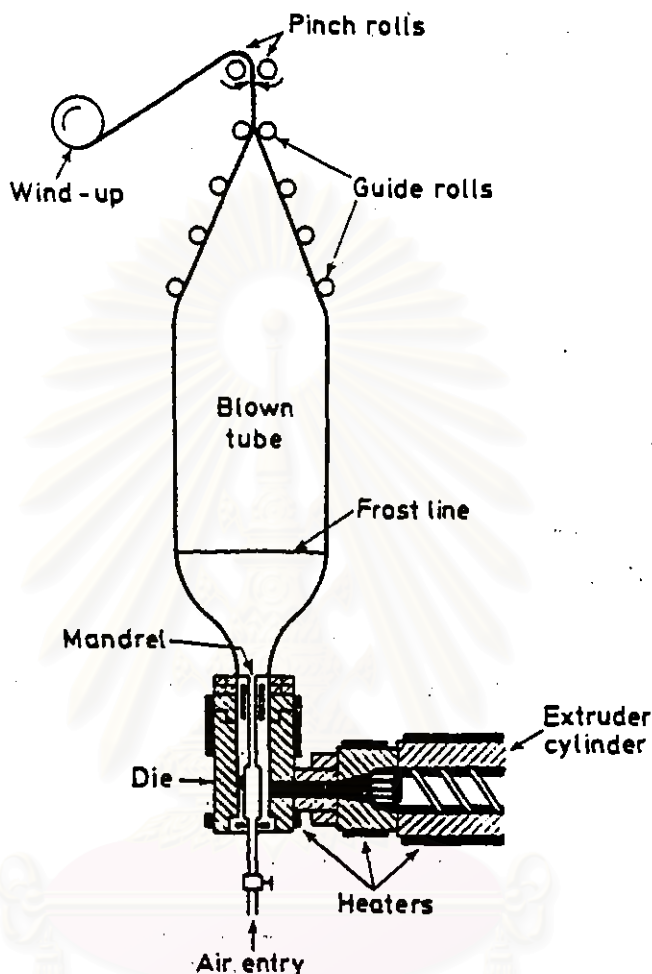
ก่อนที่พลาสติกเหลวจะเคลื่อนที่ไปถึงหัวตาย จะต้องผ่านส่วนที่เป็นแผ่นที่เป็นตัวหยุด (breaker plate) ซึ่งก็คือตะแกรงกรอง (screen pack) จะมีลักษณะเป็นตะแกรงลวดละเอียดหรือหยาบ ซึ่งทำหน้าที่ดังนี้

1. เป็นตัวกรองเพื่อกันสิ่งเจือปนต่าง ๆ ไม่ให้ผ่านไปยังหัวตาย เพราะอาจจะทำให้เกิดความเสียหายกับหัวตาย หรือในกรณีที่ขึ้นรูปฟิล์มบางมาก ๆ สิ่งเจือปนเหล่านี้อาจทำให้เกิดความเสียหายกับฟิล์มและทำให้ฟิล์มขาดได้

2. เป็นตัวเพิ่มความดันกลับ (back pressure) ในเครื่องอัดรีด ทำให้พลาสติกเหลวผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2.2 การเป่าฟิล์ม (blown film extrusion)

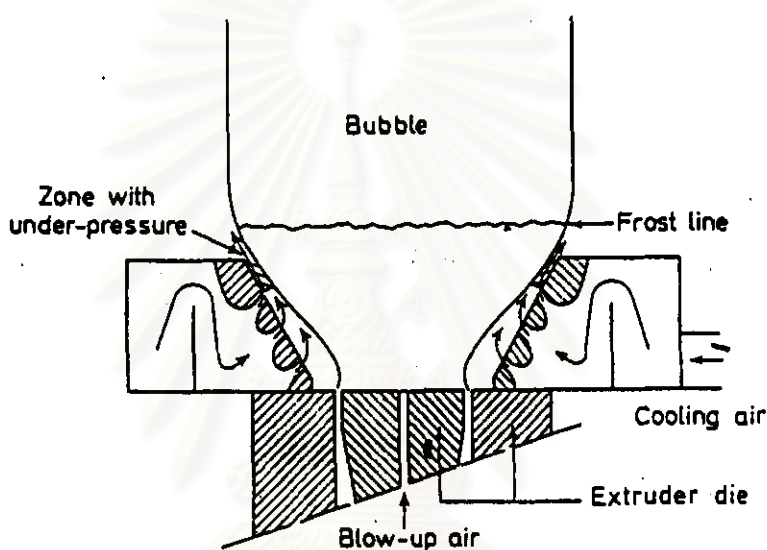


รูปที่ 2.9 เครื่องอัดรีดสำหรับเป่าฟิล์ม (blown film extruder)

จากรูปที่ 2.9 จะแสดงส่วนประกอบของเครื่องอัดรีดสำหรับเป่าฟิล์ม พลาสติกเหลวจากเครื่องอัดรีดจะผ่านเข้าสู่หัวตายจากทางด้านข้าง และผ่านหัวตายรูปวงแหวนในรูปท่อ จากนั้นท่อจะถูกทำให้ขยายตัวกลายเป็นลูกโป่ง (bubble) ที่มีขนาดตามต้องการ โดยใช้ความดันลมที่เป่าขึ้นมาจากด้านล่าง ลูกโป่งจะขยายขนาดขึ้นพร้อม ๆ กับการลดความหนาของฟิล์ม โดยทั่วไปการเป่าฟิล์มมักจะเป่าขึ้น แต่ก็สามารถเป่าลงหรือเป่าด้านข้างได้ ความดันของลมที่เป่าจะต้องถูกควบคุมให้คงที่เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาและความกว้างคงที่ ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อความหนาของฟิล์มได้แก่ ความเร็วในการดูดดึง (haul-off speed) และอุณหภูมิหัวตายกับเรือนสกรู

ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วในการเป่าฟิล์มคืออัตราการหล่อเป็นลูกโป่ง การหล่อเป็นทำได้

โดยการเป่าลมเป็นรอบ ๆ ผิวด้านนอกของลูกโป่ง แต่ถ้าใช้ความเร็วของลมสูงเกินไป จะทำให้ลูกโป่งเกิดการบิดเบี้ยว วงแหวนหล่อเย็น (air cooling ring) จึงถูกออกแบบให้เกิดการหล่อเย็นที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะประกอบด้วยวงแหวนรูปกรวยที่มีช่องลม 3 ช่อง ระยะระหว่างวงแหวนหล่อเย็นกับลูกโป่งจะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดของวงแหวน



รูปที่ 2.10 วงแหวนหล่อเย็นที่ออกแบบโดย Shell

2.2.3 ข้อบกพร่องที่เกิดกับฟิล์มที่ขึ้นรูปโดยการเป่า

การอัดรีดเป่าฟิล์มเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก และมีปัญหามาก ในการที่จะให้ได้ฟิล์มคุณภาพดี ข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น ความหนาของฟิล์มไม่สม่ำเสมอ ข้อบกพร่องที่เกิดกับผิวฟิล์ม เช่น เกิดลายผิวส้ม (orange peel) หรือจุดตาปลา (fish eye) เกิดการติดกันของฟิล์ม (blocking) และเกิดการย่น (wrinkling)

การย่นของฟิล์มเป็นปัญหาที่สำคัญอันหนึ่ง เพราะจะนำไปสู่การเกิดความไม่เรียบในผิวฟิล์ม การย่นของฟิล์มสามารถเกิดได้จากหลาย ๆ สาเหตุ เช่น การปรับขนาดช่องตายไม่เหมาะสม ทำให้ได้ฟิล์มที่หนาไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ลูกกลิ้งหนีบดึงฟิล์มได้ไม่สม่ำเสมอ หรืออาจเกิดจาก

การส่ายของลูกโป่งฟิล์ม และทำให้เกิดการบ่นในขั้นตอนของการม้วนเก็บ ส่วนสาเหตุอื่น ได้แก่ การที่ลูกกลิ้งต่าง ๆ เรียงตัวกันไม่ดี หรือความดันที่ลูกกลิ้งหนีบไม่สม่ำเสมอ

การเกิดข้อบกพร่องของผิวฟิล์ม เช่น เกิดจุดตาปลาและการเกิดลายผิวส้ม เกิดจากพลาสติกผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันไม่สมบูรณ์ และการมีสิ่งเจือปน ซึ่งทั้ง 2 สาเหตุ สามารถถูกควบคุมโดยการใช้ตะแกรงกรอง

2.3 การเกิดการติดกันของฟิล์ม (blocking)

2.3.1 สาเหตุ

บริษัทไทยโพลีเอททีลีน จำกัด (2538: 9) ได้อธิบายไว้ว่า การติดกันของฟิล์มหมายถึง การติดกันของผิวหน้าฟิล์มที่สัมผัสกันอย่างใกล้ชิด โดยอาจเกิดกับฟิล์มพลาสติกที่ผิวเรียบมาก อันเนื่องมาจากการมีโครงสร้างแบบอสัณฐานสูง ทำให้แนบติดกันโดยไม่มีอากาศแทรกอยู่ระหว่างฟิล์ม หรืออาจเกิดกับฟิล์มพลาสติกที่อยู่ภายใต้ความดัน หรืออุณหภูมิ หรือทั้ง 2 ปัจจัย ทำให้เกิดการหลอมของผิวหน้าที่สัมผัสกัน

โครงสร้างของฟิล์ม LDPE จะมีความเรียบ เงามัน และใส เนื่องจากโครงสร้างฟิล์มมีการตกผลึกต่ำ เป็นผลให้เมื่อเป่าฟิล์มผ่านเครื่องแปรรูป ขณะที่ผิวทั้ง 2 ด้านประกบกันบริเวณลูกกลิ้งหนีบ จะทำให้ผิวฟิล์มทั้งสองแนบสนิทกันมีสภาพคล้ายสุญญากาศ จึงทำให้ฟิล์มเกิดการติดกัน นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากการเก็บในรูปม้วนฟิล์มที่แน่น หรือเป็นแผ่นฟิล์มหรือถุงที่วางซ้อนกันภายใต้ความดัน การแยกแผ่นฟิล์มที่เกิดการติดกันก่อให้เกิดความยุ่งยากและเสียเวลาแก่ผู้ที่จะนำไปใช้ในงานบรรจุภัณฑ์

สำหรับสาเหตุและการแก้ไขปัญหาการติดกันของฟิล์มสรุปได้คร่าว ๆ ดังนี้

สาเหตุ	การแก้ไข
1. อุณหภูมิของระบบหล่อเย็น (ผ่านลมหรือน้ำ) ต่ำ	1. เพิ่มอุณหภูมิของระบบหล่อเย็นหรือเพิ่มปริมาตรสารหล่อเย็นระหว่างผิวฟิล์มและสารลดการติดกันของฟิล์ม (slip และ antiblocking-agent)

สาเหตุ	การแก้ไข
2. เป่าฟิล์มบางมาก	2. เพิ่มปริมาณสารหล่อลื่นระหว่างผิวฟิล์มและสารลดการติดกันของฟิล์ม
3. แรงดันระหว่างลูกกลิ้งหนีบมากเกินไป	3. ปรับและคลายแรงดันลูกกลิ้งหนีบให้เหมาะสม

2.3.2 สารลดการติดกันของฟิล์ม (antiblocking-agent)

Horne และ Suarez (1969: 35-36) อธิบายว่า สารลดการติดกันของฟิล์ม แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. fatty acid amide ทำหน้าที่เป็นทั้งสารหล่อลื่น (lubricant) และสารลดการติดกันของฟิล์ม โดยทั่วไปจะใช้ mono unsaturated amide เช่น oleamide และ erucamide และ saturated amide เช่น stearamide และ behenamide

fatty acid amide ที่ถูกเติมเข้าไปในเม็ดพลาสติกที่ถูกหลอมและผสมในเครื่องอัดรีด จะละลายและกระจายในพอลิเมอร์เหลว (polymer melt) หลังจากนั้นมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มแล้ว fatty acid amide ที่เติมเข้าไปจะไหลซึมออกมาที่ผิวหน้าฟิล์ม ทำให้เกิดการหล่อลื่นระหว่าง 2 ชั้นฟิล์ม

2. สารเติมแต่งที่ถูกเติมเข้าไปและทำให้กระจายในพอลิเมอร์ ทำหน้าที่เป็นสารลดการติดกันของฟิล์ม โดยการทำให้ผิวหน้าของฟิล์มขรุขระ เป็นการลดพื้นที่ผิวสัมผัสของผิวหน้าฟิล์ม สารประเภทนี้ ได้แก่ ceramic sphere, แคลเซียมคาร์บอเนต, ทัลก์, ซิลิกา เป็นต้น แต่ที่ใช้กันมากคือซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1 - 6 ไมครอน อนุภาคของซิลิกาจะไม่เข้ากันกับเนื้อพลาสติกและไม่ไหลซึมออกมา แต่จะยังคงอยู่ที่ของมัน ปริมาณซิลิกาที่ใช้ถูกจำกัดโดยสมบัติทางแสง (optical property) ของฟิล์ม เพราะความขรุขระของฟิล์มที่เติมซิลิกา จะลดการมองเห็นทะลุผ่าน (see-through clarity) ของฟิล์มลง โดยเฉพาะเมื่อใช้ปริมาณซิลิกามากกว่า 0.1 %

2.4 ซิลิกา (silica)

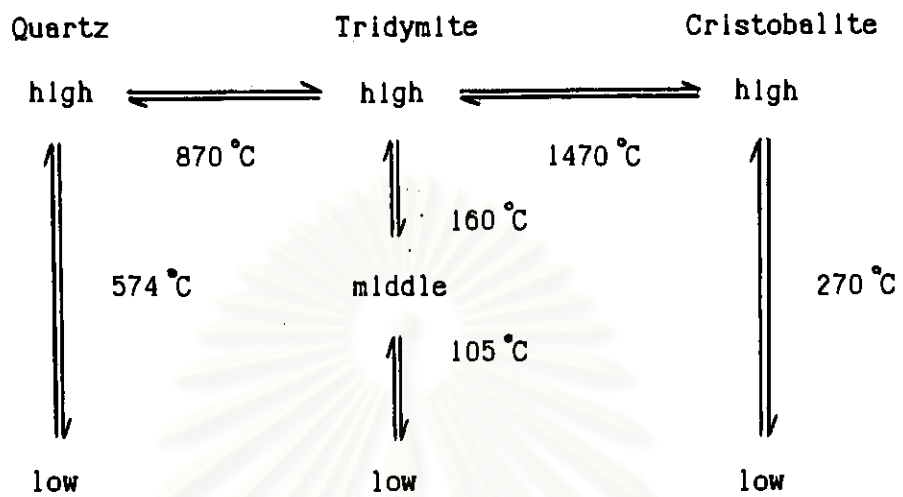
ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO_2) เป็นสารประกอบของซิลิกอนและออกซิเจน ซึ่งทั้ง 2 ธาตุ มีอยู่มากมายบนพื้นโลก มีทั้งที่เกิดเองตามธรรมชาติและจากการสังเคราะห์เพื่อให้มีสมบัติตามต้องการ ที่เกิดในธรรมชาติมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น หินเจียวนุมนาน ทราวย โอปอล (opal) หรือซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต (biogenic silica) เช่น ซิลิกาที่อยู่ในโครงสร้างของตัวไดอะตอม (diatom) และซิลิกาที่อยู่ในโครงสร้างของพืช เช่น ต้นไผ่ ปาล์ม ต้นข้าว ในพืชมีหนาม (Parfitt และ Sing, 1976: 353) การใช้งานหลัก ๆ ของซิลิกา เช่น เป็นวัสดุสำหรับขัด (abrasive) เซรามิก (ceramic) แก้ว งานหล่อ (foundry use) สี กระจก หมึกพิมพ์ ยาง พลาสติก ยา เครื่องสำอาง เป็นต้น (Sekutowski, 1992: 521)

2.4.1 รูปแบบของซิลิกา

2.4.1.1 ซิลิกาที่เป็นรูปผลึก

Market และคณะ (1982) ได้อธิบายไว้ว่าซิลิกามีรูปแบบหลัก 3 แบบ ที่ภาวะความดันบรรยากาศ คือ ควอตซ์ (quartz) จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870 องศาเซลเซียส ไทรไดไมต์ (tridimite) จะเสถียรที่อุณหภูมิ 870 - 1470 องศาเซลเซียส คริสโตบาไลต์ (cristobalite) เสถียรที่อุณหภูมิ 1470 องศาเซลเซียส จนถึงจุดหลอมเหลวคือ 1723 องศาเซลเซียส

การเปลี่ยนรูประหว่างรูปผลึกหลัก ๆ ของซิลิกาแสดงได้ดังนี้



ซิลิกาที่เป็นรูปผลึกแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของซิลิกาที่เป็นรูปผลึก (Preeda และคณะ, 1991: 4)

ชนิดของผลึก	ชนิดของ lattice	ความหนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion) (10^{-6} K^{-1})
common polymorphs			
low-T quartz	trigonal	2.65	12.3
high-T quartz	hexagonal		
low-T cristobalite	tetragonal	2.33	10.3
high-T cristobalite	cubic		
low-T tridymite	monoclinic	2.27	21.0
high-T tridymite	hexagonal		

2.4.1.2 ซิลิกาที่ไม่เป็นรูปผลึก

1. วิเทรียสซิลิกา (vitreous silica)

วิเทรียสซิลิกาหรือที่เรียกว่า silica glass เกิดจากการหลอมซิลิการูปผลึก แล้วทำให้เป็นตัวอย่างอย่างรวดเร็ว มีลักษณะแข็งไม่มีรูพรุน มีความทนทานต่อสารเคมีสูง มีค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อน (coefficient of thermal expansion) ต่ำ

2. ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica)

มีหลายรูปแบบ สามารถแบ่งได้ดังนี้

ก. คอลลอยคอลลซิลิกา (colloidal silica หรือ silica sols) คืออนุภาคของซิลิกาอสัณฐานที่กระจายตัวอยู่อย่างเสถียรในน้ำ

ข. ซิลิกาเจล (silica gel) มีลักษณะแข็ง มีรูพรุน ซึ่งในรูพรุนจะมีตัวกลาง (medium) ที่ใช้ในการเตรียมเจล ทำให้สามารถแบ่งซิลิกาเจลได้ดังนี้

- ไฮโดรเจล (hydrogel) ตัวกลางที่อยู่ในรูพรุนคือน้ำ

- ซีโรเจล (xerogel) เกิดจากการนำตัวกลาง (น้ำ) ในรูพรุนออก ทำให้เกิดการหดตัวของเจลโดยแรงตึงผิว (surface tension force) โครงสร้างถูกอัดและความเป็นรูพรุนลดลง มีลักษณะแห้ง

- แอลกอฮอล์เจล (alcogel) ตัวกลางที่อยู่ในรูพรุนเป็นพวกแอลกอฮอล์ (alcohol)

- แอโรเจล (aerogel) เกิดจากการนำตัวกลาง (alcohol) ในรูพรุนออก โดยการให้ความร้อน ทำให้ตัวกลางระเหย ไม่มีผลกระทบจากแรงตึงผิว ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหดตัว ทำให้ได้ซิลิกาเจลที่แห้งและมีปริมาตรสูง

ค. ซิลิกาที่เตรียมจากการตกตะกอน (precipitated silica) เกิดจากการตกตะกอนของอนุภาคซิลิกาใน aqueous medium ภายใต้อิทธิพลของเกลือความเข้มข้นสูง หรือตัวที่ทำให้ตกตะกอน (coagulant) จากนั้นจึงแยกเอาอนุภาคซิลิกาออกมาล้างแล้วทำให้แห้ง

ง. ซิลิกาที่เตรียมจากการเผาไหม้ (fumed silica หรือ pyrogenic silica) โดยทั่วไปผลิตด้วยกระบวนการ vapor - phase hydrolysis ของซิลิกอนเตตระเฮไลด์ (silicon tetrahalide) หรือการทำออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงและไฮโดรไลซิสสารประกอบซิลิกอน เช่น ซิลิเกตเอสเทอร์

จ. ซิลิกาจากสิ่งมีชีวิต (biogenic silica) เป็นซิลิกาที่เกิดตามธรรมชาติในสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ เช่น ไดอะตอม ฟองน้ำ (sponge) หรือเกิดในโครงสร้างของพืชบางชนิด เช่น ข้าว ต้นไผ่ ต้นปาล์ม โดยสิ่งมีชีวิตและพืชเหล่านี้จะดูดซึมซิลิกาที่ละลายอยู่ในน้ำเข้าไป และเกิดการตกตะกอนสะสมอยู่ในโครงสร้างของต้นพืช เช่น เปลือก หนาม

ซิลิกาที่อยู่ในพืช แม้ว่าจะไม่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่พืชบางชนิดจะใช้ซิลิกาในการสร้างส่วนโครงสร้าง (skeleton) หรือช่วยให้มีความทนทานต่อศัตรู หรือเป็นตัวทำให้เกิดความสมดุลของสารละลายสารอาหารในดิน

ในข้าว ซิลิกาถูกใช้เป็นสารอาหารของต้นอ่อน และมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดรวงข้าว ซิลิกาช่วยปกป้องต้นบาร์เลย์ (barley) อ่อนจากการถูกทำลายด้วยความเย็น และเพิ่มการเกิดเมล็ดของดอกทานตะวัน ในเกสรพืชบางชนิด เช่น *Lychnis alba* จะมีซิลิกาถึง 2 % เพื่อช่วยให้เกิดความทนทานต่อลมฟ้าอากาศ (Iler, 1979)

2.4.2 การใช้งาน

ซิลิกาในรูปผลึกที่พบอยู่ในรูปแบบของแร่ เช่น ควอตซ์ ทราซ ถูกใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมแก้ว และใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง

สำหรับซิลิกาอสัณฐาน Parfitt และ Sing (1976: 415-419) ได้รวบรวมการใช้งานไว้ดังนี้

2.4.2.1 สารเคลือบผิว (surface coating) เนื่องจากการที่ซิลิกาสามารถผลิตให้มีขนาดเล็กและใกล้เคียงกัน รวมทั้งการที่มีความหนาแน่นเชิงปริมาตร (bulk density) ต่ำ ทำให้มีจำนวนอนุภาคต่อกรัมสูง จึงสามารถใช้ได้ในงานเคลือบผิว แต่ก็อาจเกิดปัญหาการนอนกันในตัวกลางอินทรีย์ (organic media) ทำให้ยากที่จะกระจายได้อีกครั้ง จึงต้องมีการเคลือบซิลิกาด้วยไข (wax) สารอินทรีย์ หรือ สารอนินทรีย์

2.4.2.2 สารลดการติดกันของฟิล์ม ฟิล์มพอลิเอทิลีนมักจะขึ้นรูปโดยการอัดรีดพอลิเมอร์ผ่านลมร้อนเพื่อทำให้เกิดท่อ จากนั้นท่อจะถูกทำให้เป็นแผ่นเรียบและม้วนเก็บ ซิลิกาจะถูกเติมเข้าไปในพอลิเมอร์เพื่อทำให้เกิดความขรุขระของผิวฟิล์ม แผ่นฟิล์มจึงไม่สามารถสัมผัสแนบ

ชิดกันแน่นได้ แต่อนุภาคของซิลิกาที่ใช้จะต้องไม่ทำให้การมองเห็นทะลุผ่านฟิล์มซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญในงานที่บดลดลง ดังนั้นควรรู้อใช้ซิลิกาที่มีความหนาแน่นต่ำ (มีจำนวนอนุภาคต่อกรัมสูง) และสามารถควบคุมให้มีขนาดใกล้เคียงกันและกระจายได้ง่าย

2.4.2.3 สารเพิ่มความข้น (thickener และ thixotrope) นิยมใช้ซิลิกาที่เตรียมจากการเผาไหม้ ซึ่งจะทำงานได้ดีในระบบที่ไม่มีพันธะไฮโดรเจนภายใน เช่น ในพอลิเอสเตอร์เรซิน (polyester resin)

2.4.2.4 สารเสริมแรงในยาง (rubber reinforcer) โดยทั่วไปคาร์บอนแบล็ก (carbon black) จะถูกใช้เป็นสารเสริมแรงในยาง แต่สำหรับยางที่ไม่เป็นสีเทา จำเป็นต้องใช้สารเสริมแรงตัวอื่น ซิลิกาที่เตรียมจากการตกตะกอนจึงถูกใช้ในงานนี้

2.4.2.5 carrier เนื่องจากการที่มีรูพรุนทำให้ซิลิกาสามารถใช้เป็นตัวพาของเหลวไปได้ ตัวที่มีประสิทธิภาพที่สุดคือ แอโรเจล

2.4.2.6 สารดูดซึม (absorption) การเลือกใช้ซิลิกาสำหรับงานนี้ ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของตัวที่จะถูกดูดซึม โดยต้องพิจารณาเลือกใช้ซิลิกาที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม

2.4.2.7 สารขัดในยาสีฟัน (toothpaste abrasive) นิยมใช้ในยาสีฟันชนิดใส โดยมีจุดประสงค์ 2 ข้อ คือ ใช้เป็นสารขัด (นิยมใช้ซิลิโวลที่บดให้มีขนาดเหมาะสม) และใช้เป็นสารเพิ่มความข้น (นิยมใช้แอโรเจล)

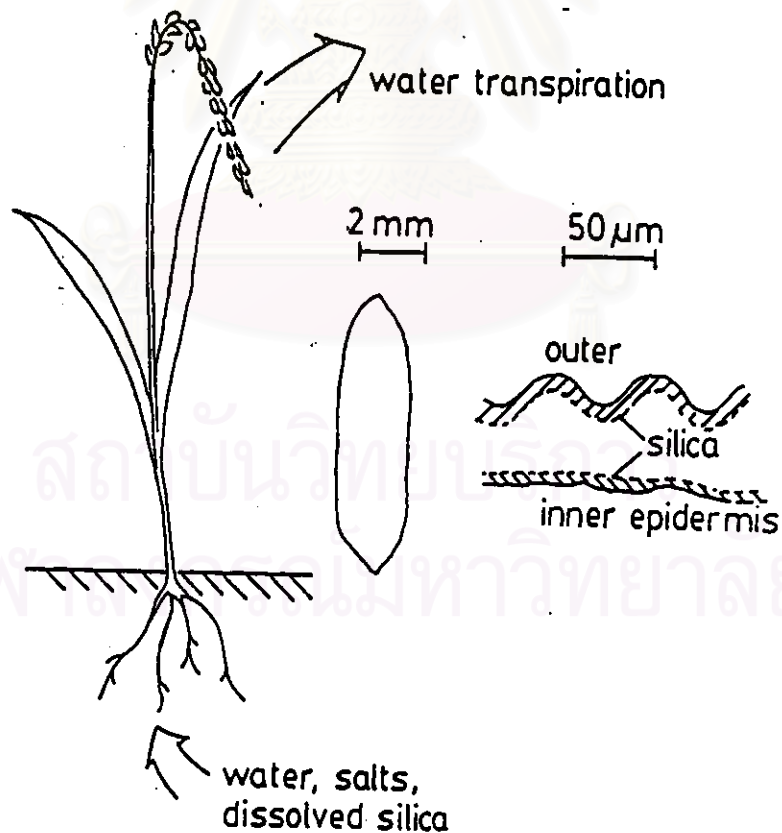
2.4.3 อันตรายของซิลิกา

โดยทั่วไปซิลิกาจะมีความเฉื่อยทางเคมีในระบบร่างกายของสิ่งมีชีวิต แต่อันตรายจะเกิดจากการหายใจเอาฝุ่นของซิลิกาเข้าไปเป็นเวลานาน ๆ โดยเฉพาะซิลิกาในรูปผลึกจะเป็นสาเหตุให้เกิดโรคที่เกี่ยวกับปอดที่มีชื่อว่า ซิลิโกซิส (silicosis) สำหรับซิลิกาอสัณฐาน ไม่มีรายงานว่ามีอันตรายกับปอดจากการสูดดม แต่อาจเป็นอันตรายต่อทางเดินหายใจเนื่องจากสมบัติ

การดูดซึม และการทำให้แห้ง ซิลิกาอสัณฐานสามารถถูกใช้เป็นส่วนป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (anticaking agent) ในปริมาณสูงถึง 2 % ในอาหารและยา โดยไม่เป็นอันตราย องค์การอาหารและยา (The Food and Drug Administration) อนุญาตให้ใช้ซิลิกาในอาหารสูงถึง 2 % ในยาและเครื่องสำอางสูงถึง 3 % โดยน้ำหนัก (Sekutowski, 1992: 527-528)

2.5 ซิลิกาจากแกลบ

Preeda และคณะ (1991: 27) ได้กล่าวว่า ซิลิกาจะถูกดูดซึมเข้าสู่ต้นข้าวพร้อม ๆ กับน้ำและธาตุอื่น ๆ ในรูปซิลิกาที่ละลายน้ำ (dissolved silica) และจะเกิดการสะสมจนมีความเข้มข้นสูงในบริเวณที่น้ำระเหยออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การดูดซึมและการสะสมซิลิกาในต้นข้าว

ต้นข้าวเป็นแหล่งสะสมซิลิกาปริมาณมาก โดยจะสะสมอยู่ทั้งในลำต้น ใบ และแกลบ ซึ่งทุกส่วนของต้นข้าวจะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแกลบจะมีซิลิกาสะสมอยู่มากที่สุด Houston (1972: 301-306) กล่าวว่าปริมาณซิลิกาอยู่ในแกลบประมาณ 20 %

ดังนั้นจึงมีงานวิจัยมากมายที่ค้นคว้าเกี่ยวกับแกลบ ซึ่งเป็นแหล่งของสารประกอบซิลิกา เพื่อนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยมุ่งเน้นในด้านการเตรียมซิลิกาอสังขฐานที่มีความบริสุทธิ์สูงจากแกลบ

2.5.1 แกลบ

Hsu และ Luh (1980: 736-740) ได้อธิบายไว้ว่า องค์การอาหารและการเกษตรของสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nation, FAO) กล่าวว่า 1 ใน 5 ของน้ำหนักข้าวทั้งหมดคือแกลบ และโดยสมบัติของแกลบ เช่น มีลักษณะเป็นวัสดุสำหรับขัด มีคุณค่าทางอาหารต่ำ มีความหนาแน่นเชิงปริมาตรต่ำ และมีปริมาณเถ้าสูง จึงถูกนำมาใช้งานน้อยด้วยมูลค่าต่ำ เช่น เป็นอาหารสัตว์ เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น ส่วนแกลบที่เหลือจะถูกนำไปเผาทำลาย โดยเป็นการเผาแบบเปิดในที่โล่ง ดังนั้นการที่มีแกลบปริมาณมากไม่ได้ถูกนำไปใช้ จะก่อให้เกิดปัญหาที่เก็บและมลพิษในภาวะแวดล้อมได้

2.5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของแกลบ

แกลบส่วนใหญ่จะมีสีเหลืองทองหรือสีฟาง แต่บางชนิดอาจมีสีขาว สีน้ำตาลแดง หรือสีดำ มีความยาวประมาณ 5 - 10 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 2.5 - 5 มิลลิเมตร มีความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ในช่วง 96 - 160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การที่มีซิลิกาความเข้มข้นสูงที่ผิวของแกลบ ทำให้แกลบมีความแข็ง จึงสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับขัดได้

ผิวของแกลบจะประกอบด้วยเซลล์รูปเหลี่ยม (dentate rectangular element) มีซิลิกาที่มีความเข้มข้นสูงอยู่บริเวณชั้นนอก โดยถูกปิดทับด้วยคิวติเคิล (cuticle) หนา และขน (surface hair) ส่วนในของแกลบ คือเส้นใยและเซลล์ที่ประกอบด้วยเส้นใยต่าง ๆ ในบริเวณส่วนกลางจะมีปริมาณซิลิกาอยู่น้อย



รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางของแกลบจากเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)
(กำลังขยาย 900 เท่า)(Houston, 1972: 305)

โดยสรุปแล้ว โครงสร้างของแกลบมีลักษณะดังนี้

1. ผิวชั้นนอกมีเซลล์ที่มีลักษณะเป็นปุ่ม (sinuous cell) ที่มีซิลิกาอยู่ ถูกปิดทับด้วยคิวติเคิลหนาและขนสั้น ๆ
2. สเคอร์เรนโคมา (sclerenchyma) จะมีผนังที่ประกอบด้วยลิกนินและซิลิกา
3. พาเรนโคมา (parenchyma) เป็นเซลล์ที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ มีรูพรุนและมีรูปร่างแตกต่างกันไป
4. ผนังชั้นในจะเป็นเซลล์ที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน (isodiametric cell)

2.5.1.2 องค์ประกอบของแกลบ

องค์ประกอบหลัก ๆ ของแกลบได้แก่ สารอินทรีย์ ซิลิกา และสิ่งเจือปน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 เมื่อวิเคราะห์ถึงปริมาณสารอินทรีย์ในแกลบพบว่าประกอบด้วย คาร์บอน 51.2 % ไฮโดรคาร์บอน 6.9 % และออกซิเจน 41.9 % โดยน้ำหนัก ปริมาณซิลิกาที่อยู่ในเต้ามีประมาณ 87 - 97 %

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในแกลบ
(Preeda และคณะ, 1991: 16)

องค์ประกอบ	น้ำหนัก (%)
เถ้า	13 - 29
เซลลูโลส	34 - 44
ลิกนิน	19 - 47
น้ำตาล*	17 - 26

* D-xylose, L-arabinose, Methylglucuronic acid, D-galactose

2.5.2 การสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบ

Uralwan (2535) ได้ทำการเตรียมและศึกษาคุณลักษณะซิลิกาคุณภาพสูงจากแกลบ โดยนำแกลบมาผ่านกระบวนการด้วยสารเคมี โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลส และกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าแกลบที่ผ่านกระบวนการด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 : 4 หรือกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1 : 4 จะได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์ของซิลิกาสูงถึงร้อยละ 99.4 %

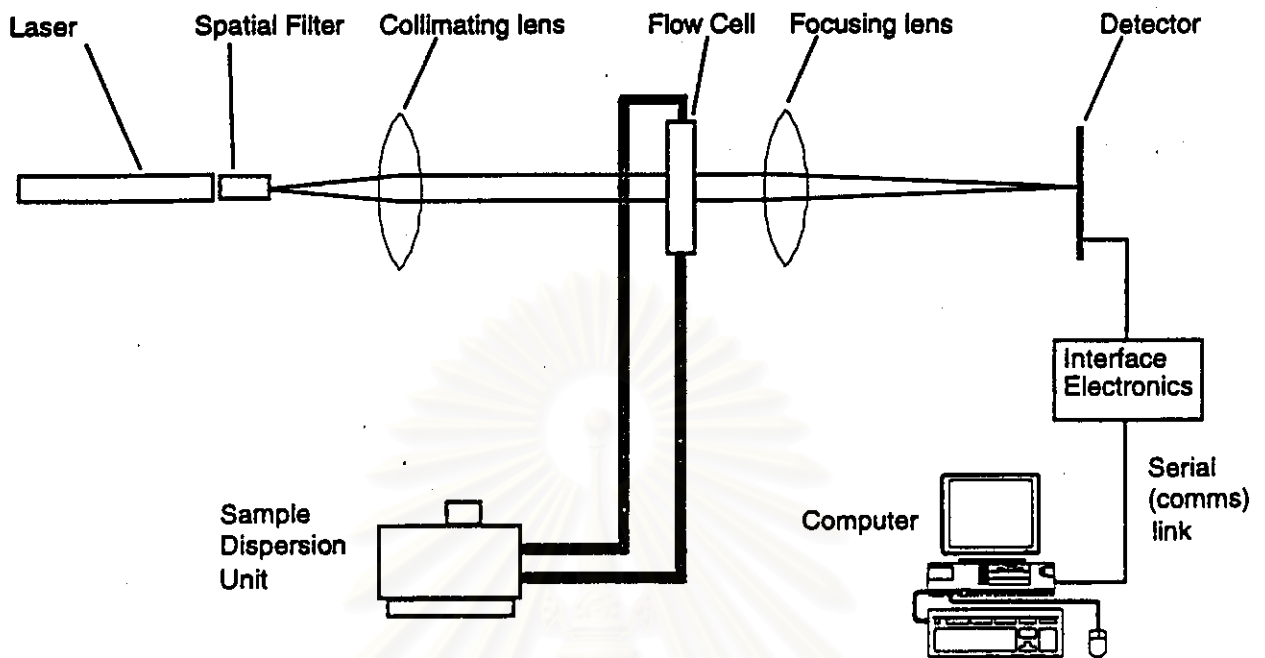
ศุภรัตน์ (2538) ได้นำแนวทางในการวิจัยนี้มาใช้ในการสังเคราะห์ซิลิกาสัณฐานจากแกลบเพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงในยาง โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ ขั้นแรกต้องทำการล้างเศษดินและสิ่งสกปรกออกให้หมดแล้วจึงทำให้แห้ง จากนั้นทำการสกัดสิ่งเจือปน โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวสกัดพร้อมทั้งการให้ความร้อน ที่เรียกว่าการทำ reflux โดยใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

หลังจากสกัดสิ่งเจือปนด้วยกรดแล้ว นำแกลบที่ได้มาล้างทำความสะอาดให้มี pH เป็นกลาง แล้วนำไปอบให้แห้ง จากนั้นนำมาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แกลบที่ได้จะมีสีขาวปนเทา ลักษณะยาวรี และมีปริมาณซิลิกาเป็นองค์ประกอบถึง 99 % ซิลิกาที่ได้นี้คิดเป็นน้ำหนักประมาณ 20 % ของแกลบเริ่มต้น

2.6 การทดสอบสมบัติของซิลิกา

2.6.1 ขนาดอนุภาค (particle size) คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ในกรณีที่อนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลมสม่ำเสมอ ถ้าอนุภาคมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ การวัดขนาดต้องทำในทิศทางที่เหมาะสม ซึ่งอาจต้องวัดมากกว่าหนึ่งทิศทาง เช่น รูปทรงกรวยต้องวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง รูปทรงสี่เหลี่ยมต้องวัดความยาว ความกว้าง และความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จะถูกเปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาครูปทรงกลม ดังนั้นอนุภาครูปลูกบาศก์ 1 หน่วย จะมีปริมาตรเท่ากับอนุภาครูปทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.24 หน่วย (Allen, 1981: 102)

การหาขนาดของอนุภาคทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ตะแกรงร่อน (sieve) โดยขนาดอนุภาคจะเท่ากับความยาวด้านของช่องสี่เหลี่ยมที่เล็กที่สุดของตะแกรงร่อน ที่อนุภาคสามารถผ่านได้ แต่มีข้อจำกัดในการวัด คือวัดขนาดอนุภาคได้เล็กที่สุด 44 ไมครอน สำหรับตะแกรงร่อนแห้ง และ 20 ไมครอน สำหรับตะแกรงร่อนเปียก (Galli, 1989: 45) เทคนิคที่ใช้วัดขนาดอนุภาคที่เล็กกว่านั้น ทำได้โดยการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ เช่น เครื่อง SEM หรือ TEM และอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ คือการอาศัยหลักการของการกระเจิงแสง (light scattering) โดยการฉายแสงผ่านกลุ่มของอนุภาคที่กระจายอยู่ในตัวกลางโปร่งแสง ที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากอนุภาค แสงที่กระเจิงโดยอนุภาค จะถูกตรวจวัดและวิเคราะห์ผลออกมาในรูปของขนาดอนุภาค ระบบในการวัดแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระบบของเครื่องวัดขนาดอนุภาค

2.6.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) เป็นสมบัติทั่วไปของอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับช่องว่างของอนุภาค ที่สามารถถูกแทนที่โดยโมเลกุลอื่น ในทางคณิตศาสตร์ พื้นที่ผิวของอนุภาครูปทรงลูกบาศก์จะเท่ากับ $6l^2$ เมื่อ l คือ ความยาวด้าน และพื้นที่ผิวของอนุภาครูปทรงกลมจะเท่ากับ $4\pi r^2$ เมื่อ r คือรัศมีของอนุภาค แต่ในความเป็นจริง ความขรุขระของผิวหน้าอนุภาคอื่นเนื่องมาจากการมีรูพรุน (pore) และรูปทรงที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาค จะทำให้พื้นที่ผิวที่วัดได้มากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์

วิธีการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะเรียกว่า BET-method โดยผู้คิดค้นคือ Brunauer, Emmet และ Teller โดยอาศัยหลักการที่อนุภาคดูดซับ (absorb) โมเลกุลของแก๊ส เช่น ไนโตรเจน ไว้บนผิวหน้ารวมทั้งในรูพรุน แล้วหาพื้นที่ผิวจำเพาะได้จากจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่สามารถเกิดขึ้นโมเลกุลเดี่ยว (monomolecular layer) ที่สมบูรณ์บนผิวหน้าของอนุภาคด้วยพื้นที่ตัดขวางของโมเลกุล (Lowell, 1979: 16)

2.6.3 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (bulk density) คือความหนาแน่นทั้งหมดของสารรวมทั้งรูพรุนที่อยู่ภายในเนื้อสาร และรูพรุนที่เกิดจากกระบวนการผลิต (Richerson, 1982:

32) คำนวณได้จากสมการที่ 2.1 (Budworth, 1970: 156)

$$\rho_s = M / V_s \quad (2.1)$$

$$\text{โดย } V_s = V_t + V_c + V_o \quad (2.2)$$

$$\rho_s = \text{ความหนาแน่นเชิงปริมาตร}$$

$$M = \text{มวลทั้งหมดของสาร}$$

$$V_t = \text{ปริมาตรของสาร}$$

$$V_c = \text{ปริมาตรของรูพรุนปิด (closed pore)}$$

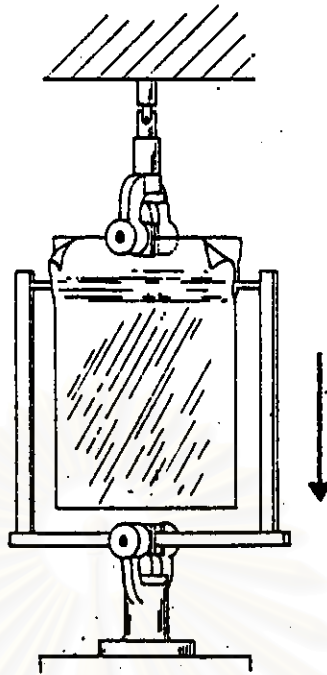
$$V_o = \text{ปริมาตรของรูพรุนเปิด (open pore)}$$

สำหรับในกรณีของซิลิกา ความหนาแน่นเชิงปริมาตรจะคำนวณจากมวลของอนุภาคซิลิกาทั้งหมดต่อปริมาตรของซิลิกา รวมทั้งรูพรุนที่อยู่ภายในอนุภาคและรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาค

การหาความหนาแน่นเชิงปริมาตรในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ ทำได้โดยการชั่งน้ำหนักและหาปริมาตรโดยการวัดขนาด ถ้าชิ้นงานมีขนาดเล็กหาได้โดยวิธีของอะคีมิดีส (Archimedes' method) ด้วยการชั่งน้ำหนักและหาปริมาตรของปรอท (หรือของเหลวอื่นที่ไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของชิ้นงานได้) ที่ถูกแทนที่ด้วยชิ้นงาน หรือถ้าชิ้นงานมีขนาดเล็กมาก ๆ สามารถทำโดยการเคลือบชิ้นงานด้วยฟิล์มที่รู้ความหนาแน่น เช่น พาราฟิน (paraffin) แล้วหาความหนาแน่นเชิงปริมาตรด้วยวิธีของอะคีมิดีส (Kingery, 1960: 417)

2.7 การทดสอบสมบัติของฟิล์ม LDPE

2.7.1 การติดกันของฟิล์ม (blocking) คือการบดติดกันระหว่างแผ่นฟิล์มที่มีผิวเรียบและสัมผัสกันแนบแน่นในสภาพสุญญากาศ โดยเฉพาะเมื่ออยู่ภายใต้ความดัน การทดสอบค่าการติดกันของฟิล์มแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 โดยการวัดแรงที่ใช้ในการดึงแท่งทรงกลม (rod) ผ่านระหว่าง 2 แผ่นฟิล์มที่เกิดการติดกันอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วสม่ำเสมอ จนกระทั่งฟิล์มแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ แรงเฉลี่ยที่วัดได้ระหว่างการทดสอบต่อหน่วยความกว้างของฟิล์มที่ติดกัน คือค่า blocking force (Park, 1969)



รูปที่ 2.14 การทดสอบการติดกันของฟิล์ม

2.7.2 ความทนแรงดึง (tensile strength) คือค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้เมื่อได้รับแรงดึง หรือคืออัตราส่วนของแรงสูงสุดที่ให้กับชิ้นงานระหว่างการทดสอบต่อพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน สำหรับความเค้นสูงสุดที่จุดครากเรียกว่า ความทนแรงดึงที่จุดคราก (tensile strength at yield point) และค่าความเค้นที่จุดขาดเรียกว่า ความทนแรงดึงจนขาด (tensile strength at break) (Briston, 1983)

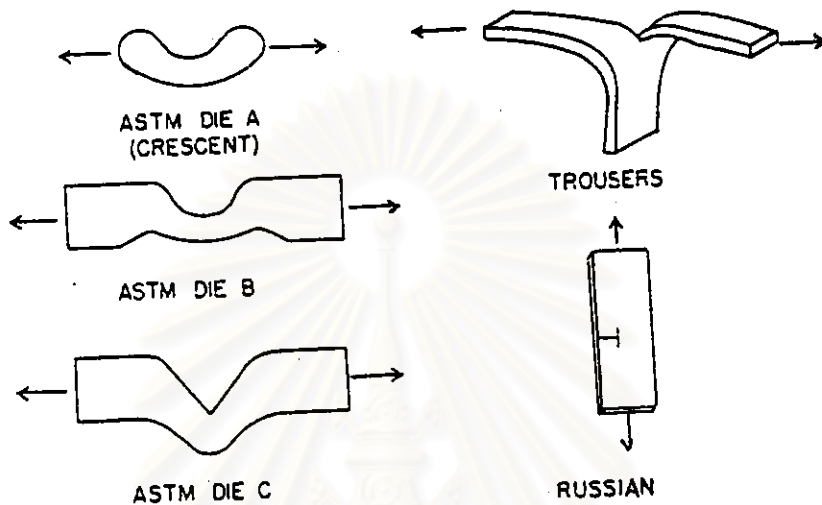
2.7.3 การบีดออกที่จุดขาด (% elongation at break) คือเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนของความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแรงดึงต่อความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน แสดงดังสมการที่ 2.3

$$\% \text{ การบีดออกที่จุดขาด} = [(L - L_0) / L_0] \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ L = ความยาวที่จุดขาดของชิ้นงาน

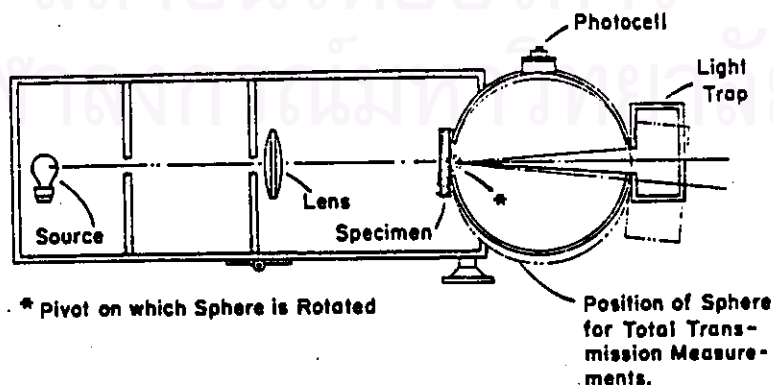
L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน

2.7.4 ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) คือแรงดึงสูงสุดที่ทำให้วัสดุเกิดการฉีกขาดต่อหน่วยความหนา การทดสอบมีหลายวิธี ซึ่งมีรูปแบบของชิ้นงานแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ชิ้นทดสอบความต้านทานการฉีกขาด

2.7.5 ความฝ้า (haze) คือความขุ่นมัวของวัสดุ วัดในรูปเปอร์เซ็นต์ของลำแสงที่ส่องทะลุผ่านวัสดุ (transmitted light) ซึ่งเบี่ยงเบนไปมากกว่ามุมปกติของลำแสงที่ตกกระทบ (incident beam) มากกว่า 2.5 องศา สาเหตุที่ทำให้เกิดความขุ่นในฟิล์มคือเกิดการกระเจิงของแสงโดยผิวหน้าที่บกพร่องของฟิล์มอันเกิดจากฟองอากาศ (void) ผลิตขนาดใหญ่ หรือจากสารเติมแต่งที่ละลายไม่สมบูรณ์ (Briston, 1983)



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของเครื่องวัดความฝ้า (Haze meter)(Park, 1969: 96)

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความฝ้าแสดงดังสมการที่ 2.4

$$\text{ความฝ้า (\%)} = [I_d / I_1] \cdot 100 \quad (2.4)$$

$$\text{เมื่อ } I_2 = I_3 / I_1 \quad (2.5)$$

$$I_d = [I_4 - I_3(I_2/I_1)] / I_1 \quad (2.6)$$

โดย I_1 = ความเข้มของแสงที่ตกกระทบบทั้งหมด

(intensity of total incident light)

I_2 = แสงทั้งหมดที่ส่องทะลุผ่านตัวอย่าง

(total light transmitted by the sample)

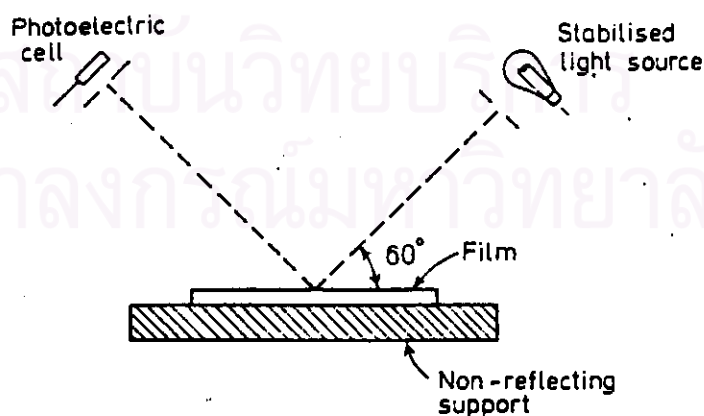
I_3 = แสงที่กระเจิงโดยเครื่องมือ

(light scattered by the instrument)

I_4 = แสงที่กระเจิงโดยทั้งเครื่องมือและฟิล์ม

(light scattered by both instrument and film)

2.7.6 ความเงามัน (gloss) คือความสามารถของผิวหน้าของวัสดุที่จะสะท้อนแสงได้อย่างสม่ำเสมอ การทดสอบทำได้โดยให้ลำแสงส่องตกกระทบบผิวหน้าฟิล์มที่มุม 60 องศา (หรือมุมอื่นที่เหมาะสม เช่น 20 หรือ 80 องศา) และมีตัวตรวจจับแสง (photodetector) อยู่ในตำแหน่งที่จะรับแสงสะท้อนในแนวระจกของผิวหน้าฟิล์มนั้น (ค่ามุมเดียวกับมุมตกกระทบบ) (Park, 1969)



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของเครื่องวัดความเงามัน (Gloss meter)

(Briston, 1983: 113)