บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

บรรจุภัณฑ์เป็นปัจจัยหนึ่งที่เอื้ออำนวยต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบันให้มีความสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น เริ่มจากการที่มนุษย์สามารถล่าสัตว์เป็นอาหารเพียงเพื่อประทังชีวิตไปวันหนึ่ง ๆ ไม่มีการเก็บรักษาหรือการเคลื่อนย้ายไปในระยะไกล การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ในช่วงนี้จึงเป็นไปอย่างง่าย ๆ เพียงเพื่อความสะดวกในการใช้ผลิตภัณฑ์ เช่น มนุษย์เรียนรู้ว่าการใช้ถ้วยเพื่อตักน้ำดื่มนั้นง่ายกว่าการใช้มือ เมื่อทักษะและประสบการณ์ของมนุษย์มีมากขึ้น มนุษย์ก็สามารถหาอาหารได้เกินความต้องการซึ่งทำให้มนุษย์ต้องมีการเก็บรักษาอาหารและการเคลื่อนย้ายอาหารเพื่อการค้าขาย ณ จุดนี้เองทำให้มีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์อย่างรวดเร็วเพื่อสามารถป้องกันผลิตภัณฑ์จากสิ่งแวดล้อมและเพื่อความสะดวกต่อการขนส่งและการจำหน่าย (Kelsey , 1989) ดังนั้นการบรรจุจึงเป็นเทคนิคในการเตรียมสินค้าเพื่อการขนส่งหรือเป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อป้องกันและรักษาผลิตภัณฑ์ก่อนถึงมือผู้บริโภค

2.1 ความหมายของบรรจุภัณฑ์

บรรจุภัณฑ์ หมายถึง ศาสตร์ ศิลปะ และ เทคโนโลยีในการเตรียมสินค้าเพื่อการขนส่งและการจำหน่าย หรืออาจหมายถึงการให้ความปลอดภัยต่อสินค้าก่อนส่งไปยังผู้บริโภค โดยสูญเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด (Paine , 1962) การแบ่งชนิดของบรรจุภัณฑ์สามารถแบ่งได้หลายแนวทาง ดังนี้คือ

2.1.1 แบ่งตามส่วนประกอบของวัสดุ เช่น กระปุกแก้ว ถังไม้ กระป๋องโลหะ กล่องกระดาษแข็ง ขวดพลาสติก ฯลฯ

2.1.2 แบ่งตามผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ เช่น การบรรจุน้ำมันเครื่อง อาหาร อาหารแช่แข็ง เครื่องมือทางอุตสาหกรรม ฯลฯ

2.1.3 แบ่งตามหน้าที่อย่างกว้าง ๆ เช่น ใช้ในการห่อ ใส่เครื่องหมาย ใช้เป็นกระป๋อง ถุง ถัง กล่อง ขวด ฯลฯ

2.1.4 แบ่งตามหน้าที่อย่างละเอียด เช่น ซองพลาสติก (pouch คือซองที่มีการปิดผนึกทั้ง 4 ด้าน) ที่มีการปิดผนึกอย่างแน่นหนา คอนเทนเนอร์บรรจุของเหลว

2.1.5 แบ่งตามสมบัติ เช่น บรรจุภัณฑ์ชนิดแข็ง (rigid) กึ่งแข็ง (semirigid) อ่อนหรือยืดหยุ่น (flexible) หรือบรรจุภัณฑ์ประเภทติดไฟและไม่ติดไฟ หรือบรรจุภัณฑ์ประเภทโปร่งใสและทึบแสง (Sacharow และ Griffin , 1973)

การแบ่งบรรจุภัณฑ์ตามสมบัติเป็นชนิดแข็ง กึ่งแข็ง และอ่อนหรือยืดหยุ่นนี้เป็นรูปแบบพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์ซึ่งสามารถอธิบายแต่ละชนิดได้ดังนี้

<u>บรรจุภัณฑ์ชนิดแข็ง</u> เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ทำมาจากวัสดุที่มีความแข็งแรงและเป็นวัสดุที่มีมวลเพียงพอที่จะทำให้ได้รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ที่แน่นอนและจะยังคงรักษารูปทรงนั้นไว้ได้เมื่อบรรจุผลิตภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์ชนิดนี้จะไม่เสียรูป นอกจากมีแรงที่มากพอที่จะทำให้เกิดการเสียโครงสร้างทั้งหมดของบรรจุภัณฑ์ วัสดุที่ใช้ได้แก่ แก้ว โลหะ กระดาษแข็ง และพลาสติก โดยจะผลิตในรูปของ ขวด กระป๋อง และกล่อง

<u>บรรจุภัณฑ์ชนิดกึ่งแข็ง</u> มีลักษณะคล้ายคลึงกับบรรจุภัณฑ์ชนิดแข็งแต่จะทำมาจากวัสดุที่บางกว่าและแข็งแรงน้อยกว่า จึงทำให้บรรจุภัณฑ์ชนิดนี้เกิดการเสียรูปได้ง่ายกว่าเมื่อมีผลิตภัณฑ์อยู่ แต่ในบางกรณีผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอาจจะเป็นตัวช่วยเสริมลักษณะรูปทรงของบรรจุภัณฑ์ให้คงอยู่ได้ ตามปกติแล้วบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้จะสามารถคืนรูปทรงเดิมได้เมื่อมีแรงมากระทำแล้วนำแรงกระทำนั้นออก ตัวอย่างของบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้ เช่น กระดาษแข็งที่ใช้ทำกล่องพับ แผ่นพลาสติก (sheet) และ ฟอยล์โลหะที่ใช้ทำจานและถ้วย

<u>บรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนหรือยืดหยุ่น</u> ทำจากวัสดุที่บางและอ่อน เช่น กระดาษ ฟิล์มพลาสติก ฟอยล์โลหะ มีรูปทรงที่แน่นอนเมื่อไม่มีผลิตภัณฑ์อยู่ แต่เมื่อบรรจุผลิตภัณฑ์ลงไปก็จะเปลี่ยนรูปทรงไปตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะเกิดการเสียรูปทรงได้ง่ายและจะไม่คืนรูปเมื่อนำแรงที่มากระทำออก (Griffin , 1985)

2.2 หน้าที่พื้นฐานของบรรจุภัณฑ์

หน้าที่พื้นฐานของบรรจุภัณฑ์มีดังนี้คือ

2.2.1 การรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ก่อนการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์เราต้องทราบถึงธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ที่จะบรรจุ เช่น วัสดุ น้ำหนัก ขนาด และรูปทรงของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังต้องทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ในขณะทำการเคลื่อนย้ายหรือใช้งานผลิตภัณฑ์นั้น ๆ จากข้อมูลที่ได้ดังกล่าวจะทำให้เราสามารถประเมินหาวัสดุและรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้ในภาวะที่เหมาะสม

2.2.2 ความต้องการของลูกค้า ลูกค้าหรือผู้ซื้อสินค้าทุกคนย่อมต้องการได้รับสินค้าที่ยังคงสภาพดี ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุสินค้าจึงต้องสามารถป้องกันและรักษาสินค้านั้นไว้ได้และมีราคาที่เหมาะสม โดยราคาของบรรจุภัณฑ์จะต้องไม่ทำให้ราคาสินค้าสูงขึ้น เพราะอาจจะทำให้เกิดปัญหาในด้านการจำหน่าย บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ควรจะมีลักษณะที่ใช้ง่ายและมีความปลอดภัยในขณะใช้งาน นั่นคือ สามารถเปิดหรือนำผลิตภัณฑ์ออกมาใช้ได้ง่าย และไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

2.2.3 ความเหมาะสมในแง่การผลิตและการบรรจุ บรรจุภัณฑ์จะต้องมีความเหมาะสมต่อปริมาณการผลิตและได้อัตราการบรรจุที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต

2.2.4 การตลาด การแข่งขันในทางการตลาดนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณภาพและราคาแล้วยังขึ้นอยู่กับการโฆษณาสินค้านั้น ๆ ด้วย ดังนั้นหน้าที่ของบรรจุภัณฑ์ในแง่นี้จึงรวมไปถึงการตกแต่ง การพิมพ์ การให้สี และลักษณะปรากฏของบรรจุภัณฑ์ โดยจะต้องทำให้เกิดภาพลักษณ์ของบรรจุภัณฑ์ที่ตรงต่อความต้องการของตลาด

2.2.5 กฎหมาย เป็นการยากที่จะบ่งบอกถึงกฎที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ แต่บรรจุภัณฑ์จะต้องมีสิ่งที่มีความสัมพันธ์ต่อผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ นั่นคือบรรจุภัณฑ์จะต้องมีฉลากบอกถึงวิธีการใช้ ประโยชน์ ส่วนประกอบและอันตรายของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ และบรรจุภัณฑ์ที่ใช้จะต้องมีความปลอดภัยต่อผลิตภัณฑ์ทั้งในขณะที่บรรจุและในขณะใช้งาน (Paine , 1990)

จากหน้าที่พื้นฐานของบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวข้างต้น หน้าที่สำคัญต่อการบรรจุคือ การรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้คงอยู่ไปจนถึงมือผู้บริโภค ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบรรจุ วัสดุที่ใช้ในเทคโนโลยีการบรรจุนั้นมีมากมายหลายชนิดซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามรูปแบบของบรรจุภัณฑ์นั้น ๆ พลาสติกเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อย่างกว้างขวาง เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิโพรพิลีน (polypropylene) ไนลอน (nylon) พอลิเอสเตอร์ (polyester) ฯลฯ โดยจะทำให้พลาสติกนั้นอยู่ในรูปของฟิล์มพลาสติก (film) หรือ แผ่นพลาสติก (sheet) ก่อนการนำไปขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ ฟิล์มพลาสติกจะเป็นพลาสติกบางอ่อนหยุ่นมีความหนาไม่เกิน 0.010 นิ้ว (250 ไมโครเมตร) ส่วนแผ่นพลาสติกจะมีความหนามากกว่า 0.010 นิ้วขึ้นไป (Hanlon , 1971) ในการนำฟิล์มพลาสติกมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนหรืออ่อนหยุ่นนั้น ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงในแง่การรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือ การปิดผนึก (sealing) ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

2.3 กระบวนการผลิตฟิล์มพลาสติก

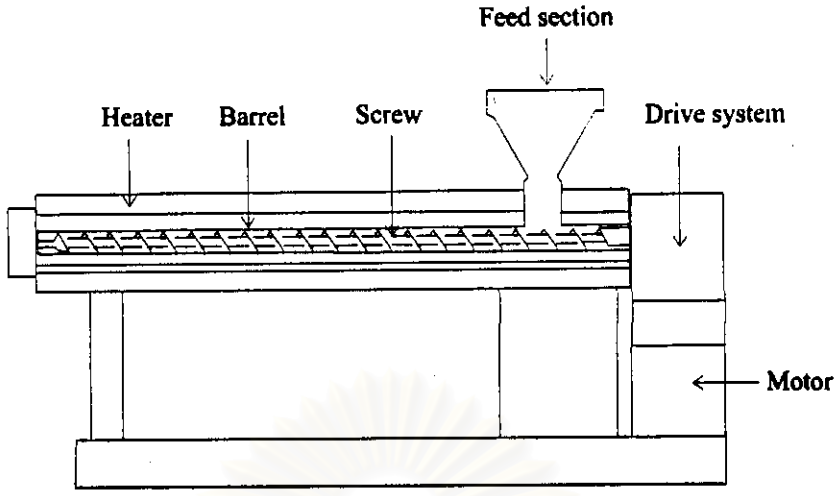
หมายถึง กระบวนการเปลี่ยนเม็ดพลาสติกให้เป็นแผ่นฟิล์มบนถูกกลิ้ง

2.3.1 การผลิตฟิล์มพลาสติกชั้นเดียว จะประกอบด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอนคือ

2.3.1.1 การเปลี่ยนรูปเม็ดพลาสติกให้เป็นพลาสติกเหลวด้วยเครื่องรีด (extrusion sequence)

เม็ดพลาสติกจะถูกเปลี่ยนเป็นพลาสติกเหลวด้วยเครื่องรีด (extruder) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ภาคตัดขวางของเครื่องรีด (Osborn และ Jenkins , 1992)

เครื่องรีดจะประกอบด้วยสกรูเหล็กที่อยู่ภายในกระบอกสูบและหมุนได้ด้วยกำลังจากมอเตอร์ ตลอดช่วงของกระบอกสูบจะมีแหล่งให้ความร้อน (heater) การป้อนเม็ดพลาสติกเข้าเครื่องจะป้อนที่กรวยของช่วงป้อน (feed section or hopper) ในส่วนของสกรูสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือช่วงป้อนพลาสติก (feed section) ช่วงหลอมเหลวพลาสติก (melt section) และช่วงส่งพลาสติกเหลว (metering section) ซึ่งจะส่งพลาสติกเหลวไปยังหัวดาย (die) หัวดายจะเป็นตัวกำหนดขนาดและรูปร่างของพลาสติกเหลวให้เกิดเป็นรูปแผ่นฟิล์มขึ้น กระบวนการผลิตจะเริ่มจากการป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่กรวย แล้วเม็ดพลาสติกจะเข้าสู่ช่วงต่าง ๆ ของสกรูดังนี้คือ

<u>ช่วงป้อน</u> เม็ดพลาสติกที่ป้อนลงไปในกรวยจะตกลงสู่สกรูที่อยู่ภายในกระบอกสูบตามแรงโน้มถ่วงของโลก ปกติแล้วเม็ดพลาสติกที่ผลิตจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) มักจะมีขนาดต่าง ๆ กันในช่วงกว้างหรือมีขนาดที่เล็กเกินไปซึ่งจะมีผลต่ออัตราการป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่เครื่องและอาจทำให้เม็ดพลาสติกเกิดการอุดตันในช่วงคอของกรวยได้ การแก้ไขสามารถทำได้โดยการใช้สกรูเล็ก ๆ ช่วยในการป้อนเม็ดพลาสติกหรือโดยการสั่นกรวยป้อน ในกรณีที่เม็ดพลาสติกมีจุดหลอมเหลวต่ำเกินไปก็อาจทำให้เกิดปัญหานี้ได้เช่นเดียวกัน นั่นคือ เม็ดพลาสติกจะเกิดการอ่อนตัวและมีผิวที่เหนียวติดช่วงคอของกรวยได้ ทำให้กรวยเกิดการอุดตันขึ้น ดังนั้นมักจะลดการอ่อนตัวของเม็ดพลาสติกโดยการทำให้ช่วงป้อนเย็นตัวลง การเคลือบผิวเม็ดพลาสติกหรือการทำให้ผิวเม็ดพลาสติกเป็นผลึกก็สามารถช่วยแก้ไขการอ่อนตัวของเม็ดพลาสติกได้บ้าง

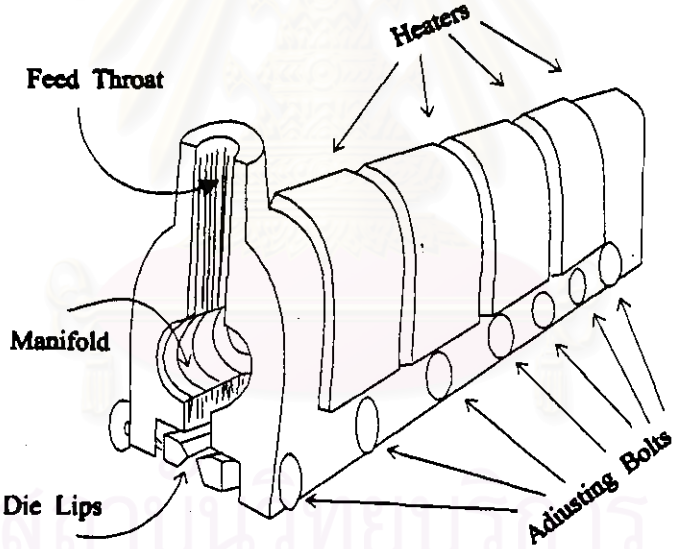
<u>ช่วงหลอม</u> สกรูที่อยู่ในกระบอกสูบจะหมุนรับเม็ดพลาสติกจากช่วงป้อนเข้าสู่ช่วงหลอมและทำการผสมเม็ดพลาสติกในขณะเดียวกันด้วย เม็ดพลาสติกจะเกิดการหลอมโดยการได้รับความร้อนจากเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า (electrical heater) หรือน้ำร้อนหรือไอน้ำที่อยู่ภายนอกของกระบอกสูบ อุณหภูมิที่ผนังกระบอกสูบจะสูงพอที่จะทำให้เม็ดพลาสติกเกิดการหลอมได้ โดยที่อุณหภูมิที่ผนังกระบอกสูบจะสูงที่สุด แล้วค่อย ๆ ลดลงจนมาถึงที่ผนังของสกรูที่อยู่ภายในกระบอกสูบนั้น นอกจากนี้เม็ดพลาสติกอาจเกิดการหลอมโดยได้รับความร้อนจากการเกิดแรงเฉือน (shear force) ที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างของสกรูและกระบอกสูบหรือเกิดขึ้นจากความดันย้อนกลับ (back pressure)

ดังนั้นในการตั้งอุณหภูมิในการหลอมจึงต้องคำนึงถึงความร้อนที่พลาสติกจะได้รับจากแหล่งอื่นด้วย โดยที่จะต้องตั้งอุณหภูมิในการหลอมให้มีความสม่ำเสมอและไม่สูงเกินไปจนทำให้พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) หรือต่ำเกินไปจนพลาสติกเกิดการหลอมที่ไม่สมบูรณ์

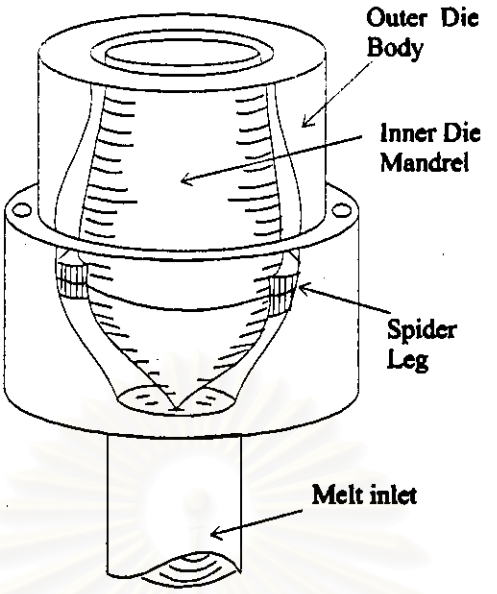
<u>ช่วงส่ง</u> เป็นช่วงสุดท้ายของสกรูที่จะส่งพลาสติกเหลวไปยังทางออกของเครื่องรีดซึ่งจะพบกับหัวดาย แล้วหัวดายจะทำการขึ้นรูปพลาสติกเหลวให้เป็นแผ่นฟิล์ม โดยก่อนที่จะส่งต่อไปยังหัวดายนั้นอาจมีการกรองสิ่งสกปรกในพลาสติกเหลวก่อนโดยการใช้ตัวกลางกรอง (filtration media)

2.3.1.2 การเปลี่ยนรูปพลาสติกเหลวเป็นแผ่นฟิล์มบาง (film-making sequence)

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าขนาดและรูปร่างของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับลักษณะของหัวดาย หัวดายที่ใช้ในการผลิตฟิล์มโดยทั่ว ๆ ไปจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือ หัวดายฟิล์มแบบเรียบ (flat film dies) ดังรูปที่ 2.2 และหัวดายฟิล์มแบบวง (tubular film dies or circular film dies) ดังรูปที่ 2.3 (Osborn และ Jenkins , 1992) ดังนั้นในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มจากพลาสติกเหลวจะแบ่งไปตามลักษณะของหัวดายได้ 2 วิธีคือ กระบวนการหล่อฟิล์ม (cast film process) และกระบวนการเป่าฟิล์ม (blown film process)

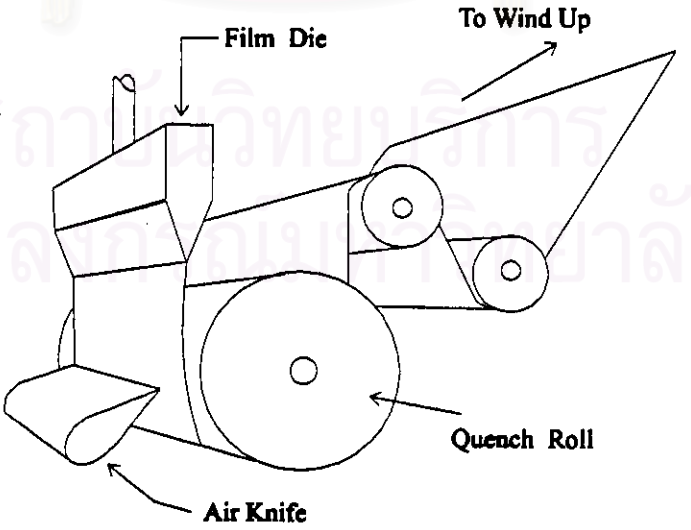


รูปที่ 2.2 หัวดายฟิล์มแบบเรียบ



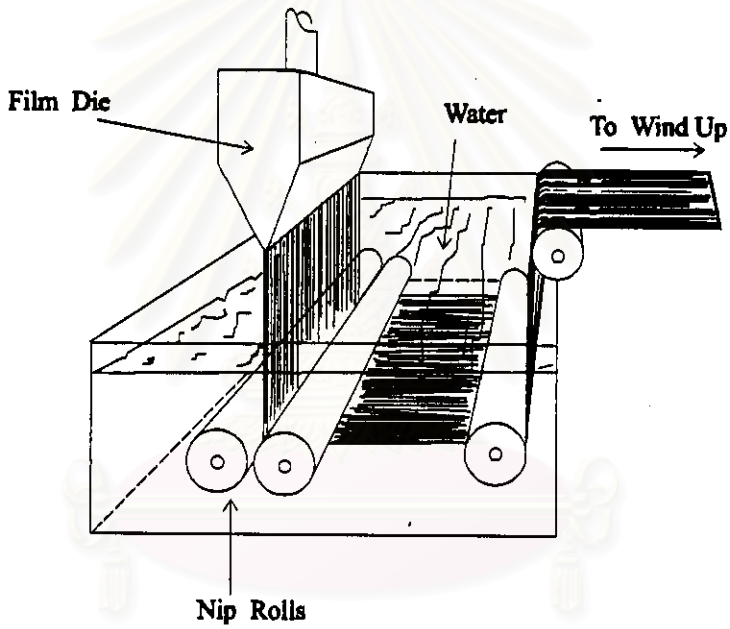
รูปที่ 2.3 หัวดายฟิล์มแบบวง

<u>กระบวนการหล่อฟิล์ม</u> เป็นกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มโดยใช้หัวดายฟิล์มแบบเรียบ เมื่อพลาสติกเหลวผ่านหัวดายแบบเรียบนี้ออกมาพลาสติกเหลวจะอยู่ในรูปเป็นฟิล์มเหลว (melt film) ฟิล์มเหลวจะถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการสัมผัสกับผิวโลหะเย็นของลูกกลิ้งเย็น (quench roll) โดยภายในลูกกลิ้งเย็นจะมีน้ำเย็นหรือสารละลายเย็นตัวหมุนเวียนอยู่และลูกกลิ้งเย็นนี้จะอยู่ห่างจากปากของดายประมาณ 1.0 - 2.5 นิ้ว และเพื่อให้ฟิล์มเหลวแนบสนิทกับลูกกลิ้งเย็นก็จะใช้มีดลม (air knife) เป่าฟิล์มเหลวให้สัมผัสกับลูกกลิ้งเย็นดังรูปที่ 2.4 มีดลมจะช่วยอุดช่องว่างระหว่างฟิล์มเหลวกับลูกกลิ้งเย็นไม่ให้มีอากาศเข้าไปแทรก ซึ่งจะมีผลทำให้ฟิล์มเหลวเย็นตัวได้ช้าลง



รูปที่ 2.4 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยลูกกลิ้งเย็น

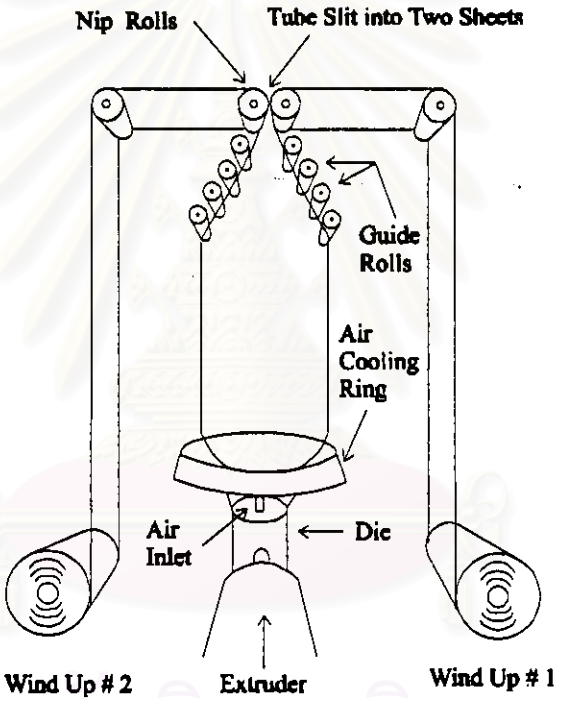
กระบวนการหล่อฟิล์มแบบนี้จะมีข้อดีคือสามารถผลิตฟิล์มได้ในอัตรารวดเร็วสูง แต่มีข้อเสียอยู่ 2 ประการ คือ ฟิล์มเหลวจะถูกทำให้เย็นตัวเพียงด้านเดียวคือด้านที่สัมผัสกับลูกกลิ้งเย็น ถึงแม้ว่าจะสามารถเพิ่มลูกกลิ้งเย็นอีกลูกหนึ่งเข้าไปยังผิวด้านตรงกันข้ามได้ก็ตาม แต่ก็เป็นการเพิ่มกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากซับซ้อนขึ้น ข้อเสียอีกข้อหนึ่งคือ การเย็นตัวของฟิล์มเหลวมักจะถูกขัดขวางโดยการเกิดฟิล์มบางของอากาศคั่นอยู่ระหว่างฟิล์มเหลวกับลูกกลิ้งเย็น การแก้ไขปัญหาทั้งสองประการนี้สามารถทำได้โดยการใช้น้ำหล่อเย็น (water quenching) แทนการใช้ลูกกลิ้งเย็นดังรูปที่ 2.5 ในกระบวนการนี้จะมีน้ำเป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งมักจะมีการกวนน้ำเพื่อให้ได้อุณหภูมิหล่อเย็นที่คงที่และสม่ำเสมอ โดยที่การกวนน้ำเพื่อให้น้ำเกิดการหมุนวนจะต้องไม่สูงเกินไปจนทำให้เกิดรอยน้ำบนผิวของฟิล์มได้ ดังนั้นอัตราการผลิตฟิล์มจึงถูกจำกัดโดยการหมุนวนของน้ำในอ่าง การขึ้นรูปฟิล์มวิธีนี้จึงช้ากว่าวิธีการหล่อฟิล์มที่ใช้ลูกกลิ้งเย็นในการหล่อเย็นฟิล์ม



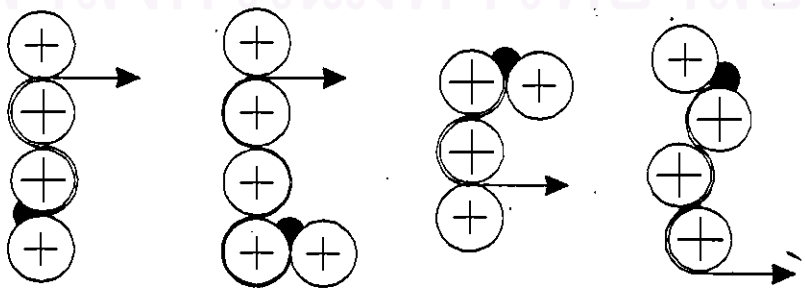
รูปที่ 2.5 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยน้ำหล่อเย็น

<u>กระบวนการเป่าฟิล์ม</u> เป็นกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มโดยใช้หัวดายฟิล์มแบบวงซึ่งจะทำการเป่าพลาสติกเหลวให้เกิดเป็นรูปลูกโป่ง โดยจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งมากขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวดาย นั่นคือเมื่อพลาสติกเหลวออกจากหัวดายฟิล์มแบบวงแล้วจะถูกทำให้เกิดการพองตัวโดยความดันอากาศ อากาศที่ฉีดผ่านเข้าไปในลูกโป่งนี้จะมีแหล่งที่มาจากแกนของหัวดายหรือหลอดที่ติดอยู่ระหว่างร่องของลูกกลิ้งหนีบ (nip roll) เมื่อลูกโป่งผ่านออกมาจากหัวดายแล้วจะมีลมภายนอกเป่าออกมาด้านกับลมที่อยู่รอบ ๆ ลูกโป่งซึ่งจะเป็นการควบคุมอัตราการเย็นตัวของฟิล์ม ปลายสุดของลูกโป่งที่พองตัวจะมีลูกกลิ้งหนีบซึ่งทำหน้าที่ตัดท่อออกเป็นสองส่วนออกมาเป็นฟิล์ม 2 แผ่นเพื่อรักษาความดันอากาศภายใน กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 (Osborn และ Jenkins , 1992)

กระบวนการผลิตฟิล์มพลาสติกชั้นเดียวอีกวิธีหนึ่งคืองานรีดฟิล์ม (calendering) เป็นการผลิตฟิล์มโดยการให้ความร้อนต่อพลาสติกที่อยู่ระหว่างลูกกลิ้ง 2 ลูกหรือมากกว่า แล้วรีดพลาสติกนั้นออกมาเป็นแผ่นฟิล์มยาวต่อเนื่องกัน (Briston , 1983) กระบวนการผลิตเริ่มจากการนำส่วนผสมต่าง ๆ มาผสมให้เข้ากันโดยวิธีการปั่นก่อน แล้วจึงให้ความร้อนเริ่มต้นต่อส่วนผสมและกำจัดสิ่งสกปรกออกจากส่วนผสมด้วยวิธีการกรอง ต่อจากนั้นจึงนำส่วนผสมเข้าสู่งานรีดฟิล์มซึ่งจะมีชุดลูกกลิ้งที่มีลูกกลิ้ง 4 ถึง 5 ลูกจัดเรียงกันอยู่อย่างเป็นระเบียบในรูปแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.7 (บรรเลง ศรนิล , 2535) เมื่อพลาสติกถูกรีดออกจากชุดลูกกลิ้งแล้วก็จะถูกทำให้เย็นด้วยชุดลูกกลิ้งหล่อเย็น ได้ฟิล์ม ส่งต่อไปยังเครื่องม้วนต่อไป งานรีดฟิล์มนี้เหมาะสำหรับการผลิตฟิล์มพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก (thermoplasic) โดยเฉพาะพอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี (polyvinylchloride : PVC) และเป็นงานการผลิตฟิล์มที่ให้ความหนาสม่ำเสมอกว่าการใช้เครื่องรีดและยังเป็นงานที่มีการผสมส่วนผสมได้ดีอีกด้วย



รูปที่ 2.6 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า



รูปที่ 2.7 การจัดระเบียบลูกรีดแบบต่าง ๆ

2.3.2 การผลิตฟิล์มพลาสติกหลายชั้น เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ฟิล์มพลาสติกเพียงชั้นเดียวไม่สามารถผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติตามความต้องการได้ การผลิตฟิล์มพลาสติกหลายชั้นจะมีวิธีการต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.3.2.1 การเคลือบฟิล์ม (film coating) วัตถุประสงค์ของการเคลือบสารบาง ๆ ลงไปบนแผ่นฟิล์มก็เพื่อให้ได้การพิมพ์และการยึดติด (adhesion) ที่ดี แต่ถ้าหากมีการเคลือบสารลงบนแผ่นฟิล์มหนาขึ้นขนาด 0.1 - 0.5 มิล (mil) มักจะเป็นการเคลือบเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของแผ่นฟิล์ม เช่น สมบัติการปิดผนึกด้วยความร้อน (heat sealing) หรือสมบัติการสกัดกั้น (barrier) โดยจะใช้ระบบการเคลือบสารลงไปบนแผ่นฟิล์ม 2 แบบคือ การเคลือบแบบดิสเพอร์ชัน (dispersion coating) จะเป็นแบบที่ใช้น้ำเป็นตัวกระจายสารเคลือบพอลิเมอร์ และการเคลือบแบบตัวทำละลาย (solvent coating) จะเป็นแบบที่สารเคลือบพอลิเมอร์ละลายอยู่ในตัวทำละลาย ในด้านการเคลือบเพื่อการปิดผนึกด้วยความร้อนนั้น สารเคลือบพอลิเมอร์จะต้องมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าตัวฟิล์ม และมีความอ่อนตัว มีน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมต่อการไหล พร้อมทั้งมีความยืดหยุ่นและปริมาณของแข็งที่มากพอที่จะทำให้เกิดการยึดติดที่แข็งแรง (high solid cohesive strength) ส่วนในด้านการเคลือบเพื่อการสกัดกั้นนั้น พบว่าสารเคลือบพอลิเมอร์ที่มีผลึกมากจะช่วยสกัดกั้นโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น น้ำ ออกซิเจนได้ดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารเคลือบนั้นด้วยว่ามีส่วนที่จะทำให้เกิดพันธะภายในโมเลกุลหรือพันธะระหว่างโมเลกุลหรือไม่ การเกิดพันธะจะทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวหนาแน่นขึ้นและแข็งตัวขึ้นสามารถป้องกันการซึมผ่านของโมเลกุลเล็ก ๆ ได้ดี

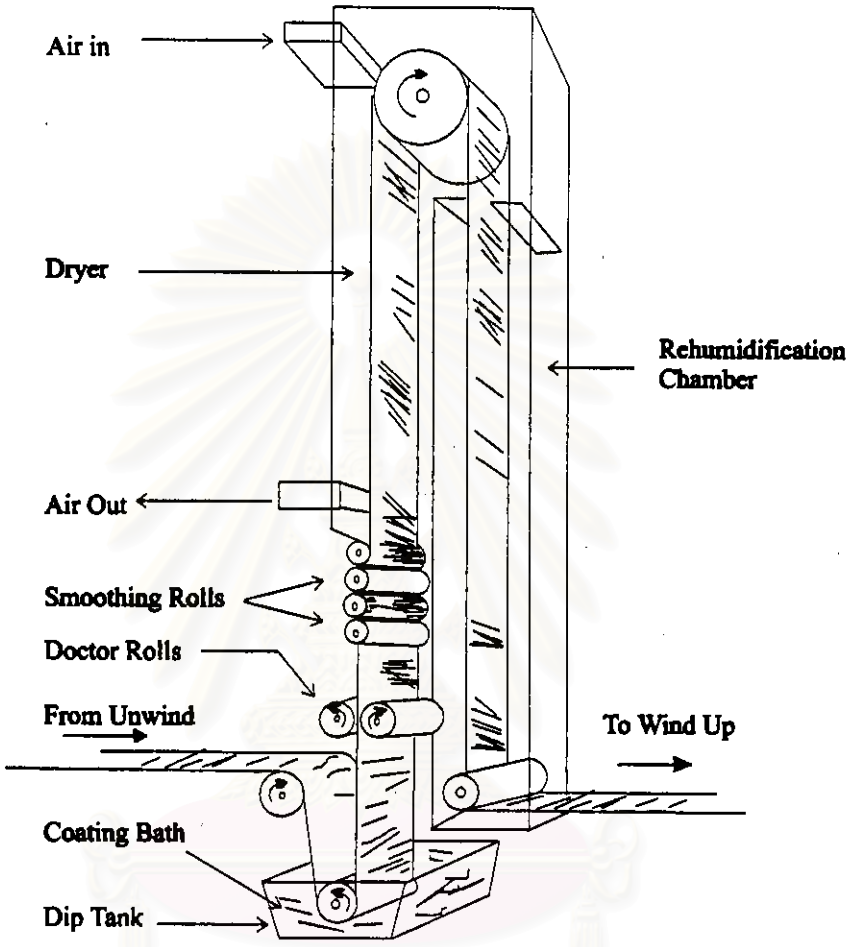
การเคลือบแบบดิสเพอร์ชันบนฟิล์มพลาสติกจะเริ่มจากการกรอแผ่นฟิล์มออกจากม้วนเข้าสู่การเคลือบในอ่างให้ได้ความหนาตามต้องการ แล้วจึงทำให้ส่วนเคลือบแห้งด้วยอากาศร้อนก่อนนำฟิล์มที่เคลือบแล้วเข้าม้วนซึ่งแบ่งการเคลือบแบบนี้ได้ 2 วิธีคือ

<u>การเคลือบแบบมากเกินพอ</u> จะใช้สารเคลือบมากเกินความต้องการเคลือบลงไปบนแผ่นฟิล์มก่อนแล้วจึงนำส่วนเกินออกในภายหลัง เช่น การเคลือบเซลโลเฟนดังแสดงในรูปที่ 2.8 (Osborn และ Jenkins, 1992) ซึ่งจะนำสารเคลือบส่วนเกินออกโดยใช้ลูกกลิ้งดอกเตอร์ (doctor roll)

<u>การเคลือบแบบพอเหมาะ</u> แสดงดังรูปที่ 2.9 จะใช้ลูกกลิ้งที่มีหลุม (gravure roll) เป็นตัวรับสารเคลือบในอ่างสารเคลือบและก่อนที่สารเคลือบจะเคลือบลงไปบนแผ่นฟิล์มจะมีมีดปาด (scraper blade) กวาดเอาสารเคลือบส่วนเกินออก เพื่อให้ปริมาณของสารเคลือบพอเหมาะต่อการเคลือบลงไปบนแผ่นฟิล์ม

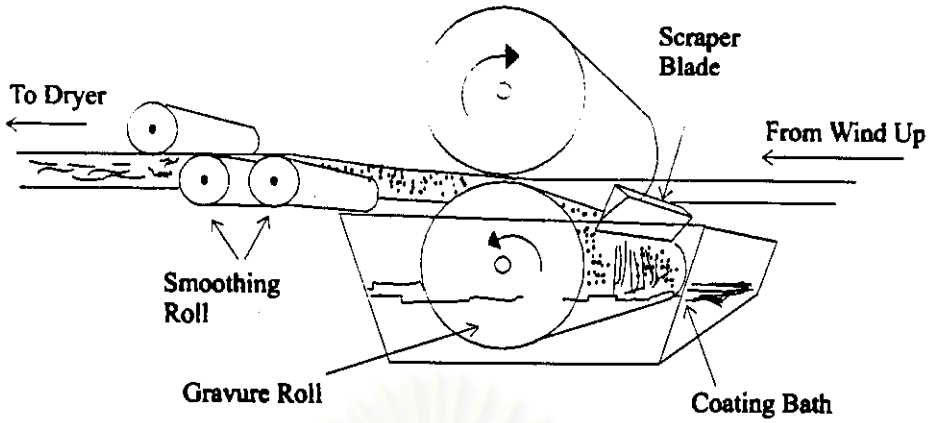
การเคลือบแบบตัวทำละลายจะมีตัวทำละลายที่จะช่วยทำให้การยึดติดระหว่างฟิล์มกับสารเคลือบดีขึ้นโดยการเข้าไปละลายผิวบางส่วนของแผ่นฟิล์ม ในบางกรณีอาจมีการเติมสารบางชนิดที่ละลายในตัวทำละลายได้ลงไปในอ่างสารเคลือบด้วย เช่น การเติมพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เพื่อลดจุดหลอมเหลวของสารเคลือบ หรือการเติมขี้ผึ้ง (wax) เพื่อเพิ่มความสามารถในการปิดผนึกด้วยความร้อนโดยไม่สูญเสียความสามารถในการเป็นชั้นสกัดกั้น นอกจากนี้ในอ่างสารเคลือบจะมีการปรับปรุงสูตรสารเคลือบด้วยการเติมสารบางชนิดลงไป เพื่อให้สารเคลือบมีแรงดึงดูดทางเคมีต่อแผ่นฟิล์ม ปัญหาประการหนึ่งที่เกิดขึ้นในการเคลือบฟิล์มด้วยตัวทำละลาย คือการเกิดไฟฟ้าสถิตใน

ขณะที่กรอแผ่นฟิล์มออกจากม้วนด้วยความเร็วสูง ไฟฟ้าสถิตจะทำให้สิ่งสกปรกมาเกาะติดแผ่นฟิล์ม หรืออาจทำให้แผ่นฟิล์มยึดติดกันแน่นจนไม่สามารถที่จะดึงแยกออกจากกันได้ในขณะใช้งาน การแก้ไขปัญหาที่ดีที่สุดของการเกิดไฟฟ้าสถิตคือ การทำให้แผ่นฟิล์มพลาสติกมีการนำไฟฟ้าที่ถาวร เช่น การทำให้มีปริมาณน้ำสูง หรือการทำให้มีขั้วสูง ซึ่งจะต้องมีขั้วที่สูงพอที่จะทำให้การเกิดไฟฟ้าสถิตหมดไป



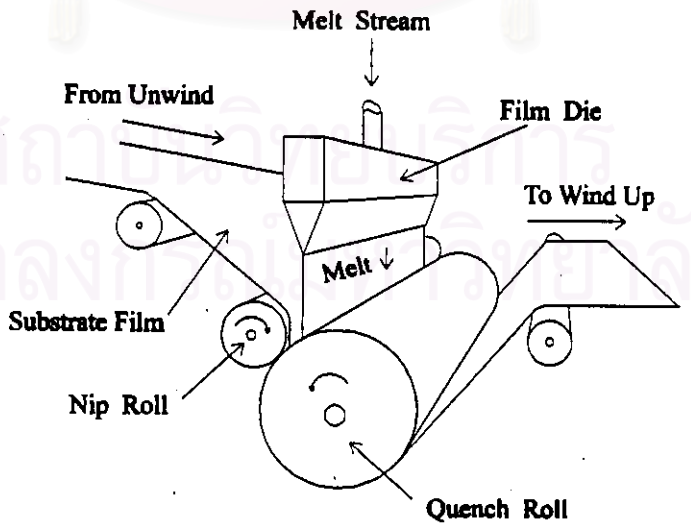
รูปที่ 2.8 กระบวนการเคลือบเซลโลเฟนแบบสารเคลือบมากเกินพอ

กระบวนการเคลือบทั้ง 2 แบบนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน เพียงแต่กระบวนการเคลือบแบบตัวทำละลายนั้นจะต้องมีขั้นตอนการกำจัดไฟฟ้าสถิตและการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่เพิ่มเติมขึ้น ในปัจจุบันกระบวนการเคลือบแบบตัวทำละลายจะมีการใช้งานน้อยกว่าการเคลือบแบบดิสเพอร์ชันเนื่องจากฟิล์มพลาสติกส่วนใหญ่สามารถถูกทำลายได้ง่ายด้วยตัวทำละลายและการกำจัดตัวทำละลายออกจากแผ่นฟิล์มทำได้ยาก ในขณะที่การเคลือบแบบดิสเพอร์ชันนั้นจะไม่มีการใช้ตัวทำละลายแต่จะใช้น้ำแทน ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายและสามารถนำไปใช้ในการบรรจุอาหารได้อีกด้วย



รูปที่ 2.9 กระบวนการเคลือบฟิล์มแบบสารเคลือบพอเหมาะ

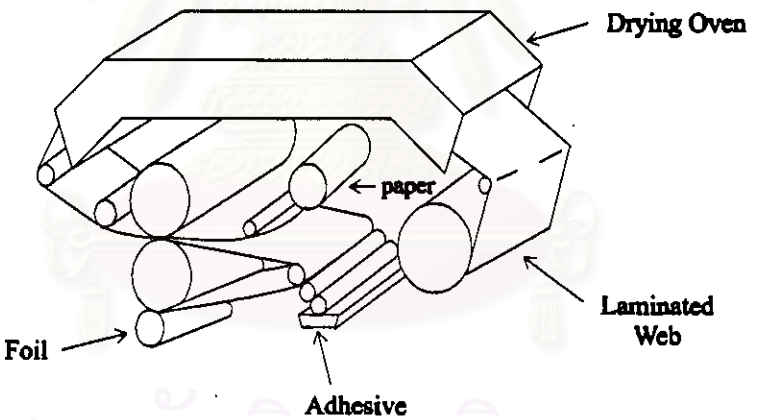
2.3.2.2 การเคลือบฟิล์มแบบอัดรีด (extrusion coating) เป็นกระบวนการเคลือบพอลิเมอร์ลงไปบนกระดาษ กระดาษแข็ง หรือ อะลูมิเนียมฟอยล์ แต่มักจะไม่ใช้ในการเคลือบฟิล์มพลาสติก เนื่องจากการเพิ่มชั้นพอลิเมอร์ที่อัดรีดลงบนแผ่นฟิล์มพลาสติกนั้นสามารถทำได้ในการรีดร่วม (coextrusion) ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป การเคลือบฟิล์มแบบอัดรีดจะมีขั้นตอนการผลิตเหมือนกับการหล่อฟิล์มซึ่งจะใช้ลูกกลิ้งเย็นในการให้ความเย็นต่อแผ่นฟิล์ม แต่ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมพอลิเมอร์ของเครื่องอัดรีดในการเคลือบฟิล์มแบบอัดรีดจะสูงกว่าการหล่อฟิล์ม เช่น ปกติจะอัดรีดพอลิเอทิลีนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส แต่ในการเคลือบฟิล์มแบบอัดรีดจะใช้อุณหภูมิในการหลอมเท่ากับ 220 - 320 องศาเซลเซียส กระบวนการเคลือบจะเริ่มจากการกรอแผ่นฟิล์มออกจากม้วนผ่านเข้าไประหว่างลูกกลิ้ง 2 ลูกคือลูกกลิ้งหล่อเย็นกับลูกกลิ้งหนีบ เพื่อเข้าไปรับพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกมาจากเครื่องรีด ดังรูปที่ 2.10 ในกระบวนการนี้ถ้าหากพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ใช้มีอุณหภูมิสูงมาก ควรใช้แผ่นฟิล์มที่มีความคงทนต่ออุณหภูมิสูงได้



รูปที่ 2.10 กระบวนการเคลือบฟิล์มแบบอัดรีด

2.3.2.3 การประกบฟิล์ม (film lamination) เป็นการนำกาว (adhesive) หรือพลาสติกที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ มาเชื่อมระหว่างฟิล์มพลาสติกต่างชนิดกัน หรือระหว่างฟิล์มพลาสติกกับวัสดุชนิดอื่น เช่น กระดาษ แผ่นอะลูมิเนียม ให้เข้ากันด้วยพันธะที่แข็งแรง โดยไม่มีข้อจำกัดจำนวนชั้นในการประกบ แต่สิ่งหนึ่งที่ต้องควบคุมคือ การยึดติดระหว่างวัสดุทั้งสองจะต้องมีการยึดติดที่ดีพอต่อการประกบ วัตถุประสงค์ในการประกบพลาสติกเข้ากับวัสดุอื่นก็เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความหนักแน่นคงรูป (stiffness) ความเหนียว (toughness) และสมบัติด้านการเป็นชั้นสกัดกั้นแก๊สหรือไอน้ำของฟิล์มประกบ เทคนิคที่ใช้ในการประกบจะมีอยู่หลายวิธีด้วยกันดังนี้คือ การประกบแบบเปียก (wet lamination) การประกบแบบแห้ง (dry bond lamination) การประกบแบบอัดรีด (extrusion lamination) การประกบด้วยความร้อน (heat lamination) และการประกบด้วยของเหลวร้อน (hot melt lamination) (Athalye , 1992)

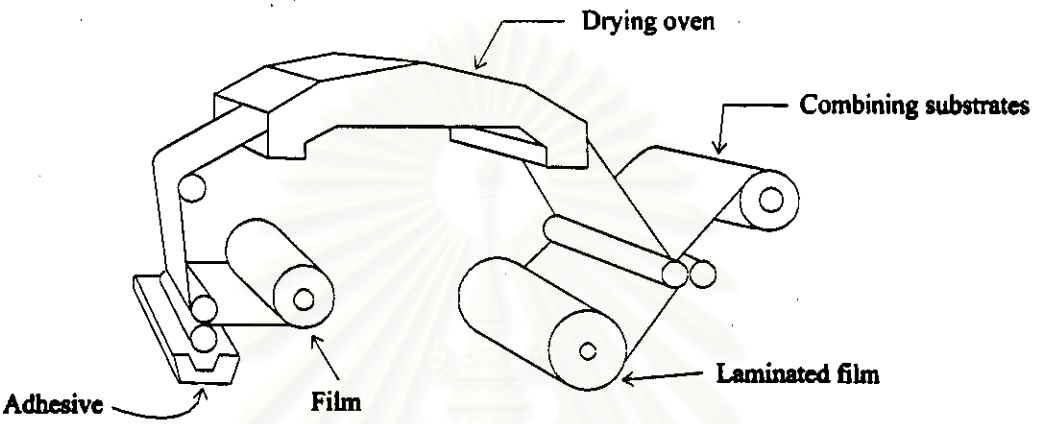
การประกบแบบเปียก เป็นเทคนิคการประกบที่ใช้เมื่อแผ่นวัสดุชนิดหนึ่งหรือมากกว่ามีรูพรุน วัสดุที่มีรูพรุน เช่น กระดาษ ดังนั้นจึงมักใช้ในการประกบระหว่างกระดาษกับฟอยล์ กระดาษกับฟิล์ม หรือ กระดาษกับกระดาษ ส่วนกาวที่ใช้ประกบมีทั้งชนิดกาวน้ำหรือกาวตัวทำละลาย (emulsion or solvent adhesive) โดยจะทากาวลงบนผิววัสดุหนึ่ง แล้วนำมาประกบติดกับอีกวัสดุหนึ่ง จากนั้นจึงทำให้แห้งโดยผ่านเข้าไปในเตาอบ เพื่อให้ความร้อนไล่ตัวทำละลายของกาวออกไปดังรูปที่ 2.11 ตัวทำละลายของกาวที่ระเหยออกไปนี้จะต้องไม่มีผลทำให้แผ่นวัสดุเกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.11 การผลิตฟิล์มหลายชั้นโดยการประกบแบบเปียก

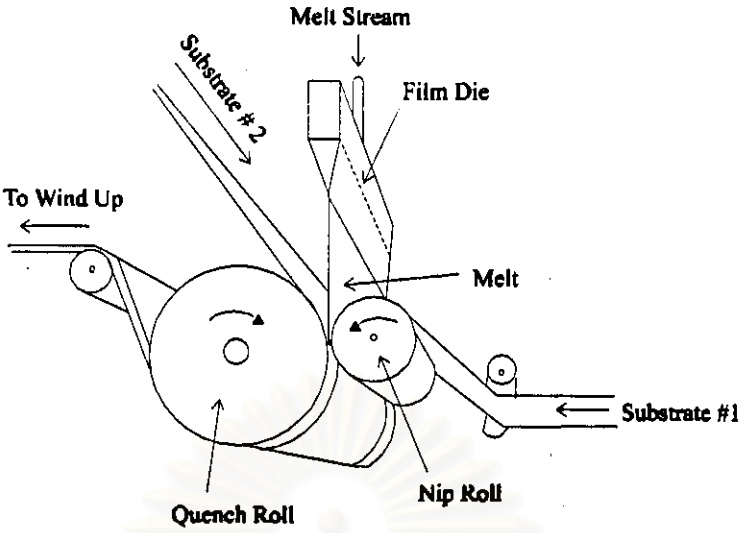
การประกบแบบแห้ง เป็นเทคนิคการประกบที่เหมาะสำหรับการประกบระหว่างฟิล์มพลาสติกกับวัสดุชนิดอื่น กาวที่ใช้ในการประกบมีทั้งชนิดที่มีส่วนประกอบพื้นฐานมาจากน้ำ ตัวทำละลาย และยาง ขั้นตอนการประกบเริ่มจากการนำกาวทาลงบนแผ่นฟิล์มชนิดหนึ่งก่อน แล้วจึงนำไปอบให้ส่วนประกอบพื้นฐานของกาวระเหยออกไป จากนั้นจึงนำไปประกบกับอีกวัสดุหนึ่ง ให้ติดกันด้วยลูกกลิ้งหนีบดังรูปที่ 2.12 ปัจจัยที่ต้องควบคุมขณะทำการประกบคือ การควบคุมความตึง การทากาว และการควบคุมการแห้งตัวของกาว โดยปกติจะทำให้เกิดความตึงบนแผ่นฟิล์มน้อยที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางที่ฟิล์มถูกดึง และการเปลี่ยนทิศทางของฟิล์มขณะถูกดึงบนลูกกลิ้งต่าง ๆ วิธีควบคุมความตึงที่ง่ายที่สุดคือ พยายามให้ลูกกลิ้งแต่ละลูกอยู่ในแนวเดียวกัน แต่ถ้าหากหลีกเลี่ยง

ไม่ได้ควรใช้ความแร็วของลูกกลิ้งต่ำผิวกาวที่ทาลงไปบนแผ่นฟิล์มก่อนนำไปประกบนั้นควรเรียบสม่ำเสมอ และมีปริมาณที่เหมาะสม เพราะถ้าขาดสิ่งเหล่านี้แล้วฟิล์มอาจเกิดการแยกออกจากกันได้ และกาวที่ทาควรมีความหนืดที่คงที่ด้วย ส่วนในกระบวนการอบฟิล์มที่ทากาวแล้วนั้นจะต้องมิให้มีตัวทำละลายหลงเหลืออยู่ เนื่องจากเมื่อนำฟิล์มที่มีตัวทำละลายหลงเหลืออยู่ไปประกบกับวัสดุอีกชนิดหนึ่ง ณ ลูกกลิ้งหนีบ จะทำให้เกิดการแยกของฟิล์มได้



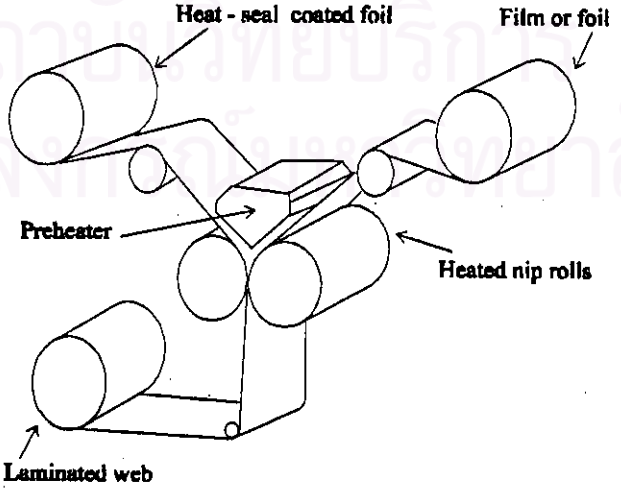
รูปที่ 2.12 การผลิตฟิล์มหลายชั้นโดยการประกบแบบแห้ง

การประกบแบบอัดรีด เป็นเทคนิคการประกบฟิล์มพลาสติกชนิดหนึ่งลงไปกับวัสดุอีกชนิดหนึ่ง เช่น กระดาษ/พอลิเอทิลีน/อะลูมิเนียมฟอยล์ กระดาษ/พอลิเอทิลีน/ฟิล์มเซลลูโลส กาวที่ใช้ในการประกบแบบนี้มากที่สุดคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำหรือแอลดีพีอี (low density polyethylene : LDPE) เนื่องจากกาวตัวนี้จะทนต่อแรงกระแทกได้ดี กาวจะถูกหลอมออกมาจากเครื่องรีดก่อนแล้วจึงทาลงไประหว่างแผ่นวัสดุ 2 แผ่นที่นำมาประกบกัน จากนั้นจึงทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วด้วยลูกกลิ้งเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2.13 การติดแน่นของผิวหน้าระหว่างฟิล์มทั้งสองเกิดจากการยึดเหนี่ยวของกลุ่มที่มีขั้วไฟฟ้า การทำให้ฟิล์มพลาสติกมีขั้วไฟฟ้าทำได้โดยการควบคุมระบบออกซิเดชันหรือโดยการใช้สารเคมีที่ผิวหน้าของฟิล์มพลาสติกก่อนการประกบ (มยุรี และ อมรรัตน์ , 2533) การประกบแบบอัดรีดจะให้สมบัติด้านสกัดกั้นต่อไอน้ำได้ดี และมักจะมีความเหนียวและความยืดหยุ่น เนื่องจากวิธีนี้ใช้กาวที่ไม่มีส่วนประกอบของตัวทำละลาย จึงทำให้เหมาะต่อการนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร

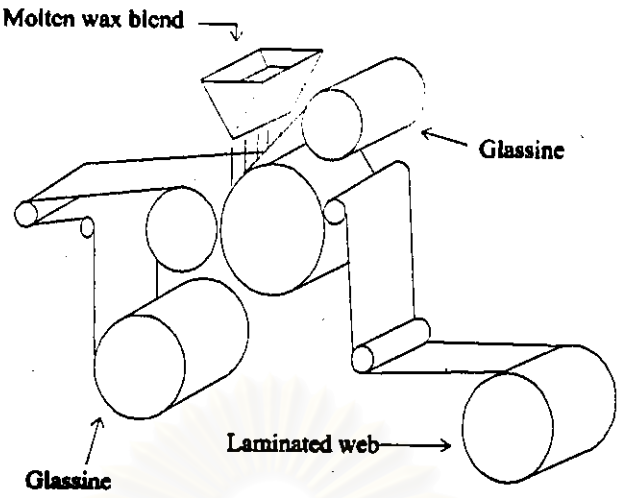


รูปที่ 2.13 การผลิตฟิล์มหลายชั้นโดยการประกบแบบอัดรีด

การประกบด้วยความร้อน เป็นเทคนิคที่ใช้ในการประกบวัสดุเคลือบ (coated material) เช่น การประกบระหว่างพอลิเมอร์เคลือบกระดาษกับฟิล์มหรือฟอยล์ชนิดอื่น โดยจะมีการพิมพ์สีลงบนวัสดุเคลือบก่อนก็ได้ วัสดุเคลือบจะได้รับความร้อนเริ่มต้นก่อนเล็กน้อย เพื่อให้ชั้นเคลือบมีความอ่อนตัว แล้วจึงนำไปประกบกับอีกวัสดุหนึ่ง ผ่านลูกกลิ้งร้อนที่มีความดัน ให้แผ่นวัสดุทั้งสองประกบกัน และเชื่อมติดกันอันเนื่องมาจากความร้อน ดังรูปที่ 2.14 ความร้อนที่ให้ในระหว่างการประกบ จะมีผลทำให้ฟิล์มเปราะได้ เนื่องจากความชื้นถูกไล่ออกไป ดังนั้นในบางครั้งจึงมีการพ่นไอน้ำลงไปบนแผ่นฟิล์มก่อนการประกบ หรือการเติมน้ำลงไปในขณะที่ฟิล์มถูกหนีบด้วยความดัน ส่วนในรูปที่ 2.15 (Athalye , 1992) เป็นการประกบด้วยของเหลวร้อน ซึ่งใช้ในการประกบกลาสซีน (glassine) กลาสซีนเป็นกระดาษที่ผ่านกระบวนที่ทำให้มีความต้านทานต่อไขน้ำมัน (grease) ซึ่งเมื่อประกบกันด้วยขี้ผึ้งที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้ได้แผ่นประกบที่มีสมบัติในการป้องกันความชื้นและแก๊สดีมาก จึงมักนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ในการบรรจุชัญญาพืช (Snow , 1977)

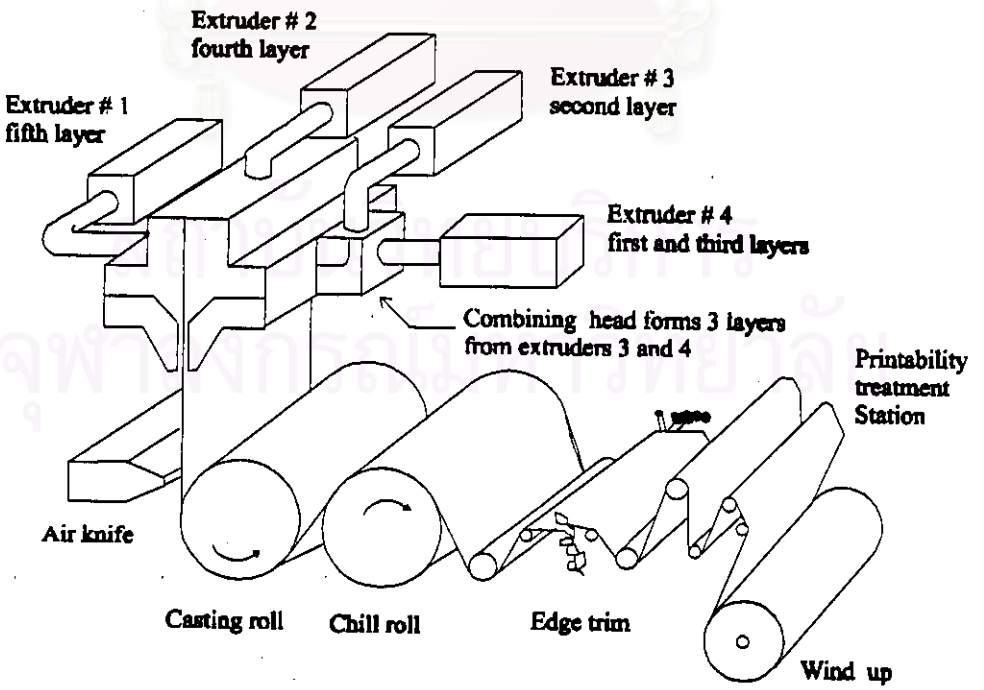


รูปที่ 2.14 การผลิตฟิล์มหลายชั้นโดยการประกบด้วยความร้อน

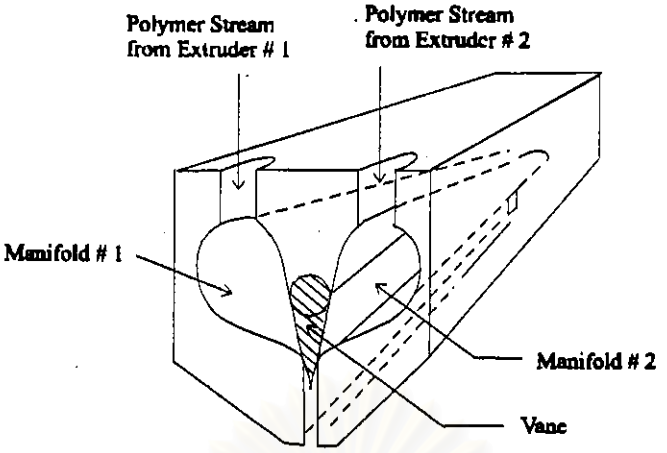


รูปที่ 2.15 การผลิตฟิล์มหลายชั้นโดยการประกบด้วยของเหลวร้อน

2.3.2.4 การรีดร่วม (coextrusion) เป็นการผลิตฟิล์มพลาสติกหลายชั้น ซึ่งอาจเป็นพลาสติกชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยจะทำการรีดแต่ละชั้นออกมาพร้อมกัน และมาสัมผัสกัน ณ จุดหนึ่ง ซึ่งในแต่ละชั้นอาจมีกาวคั่น เพื่อให้การยึดติดระหว่างชั้นดีขึ้น ในการรีดจะใช้เครื่องรีดตั้งแต่สองตัวขึ้นไปในการหลอมพลาสติกแต่ละชนิดให้เป็นพลาสติกเหลวออกมาเป็นชั้นสัมผัสกัน โดยจะแบ่งให้เห็นเป็นแต่ละชั้นอย่างชัดเจน และจะเกิดเป็นฟิล์มหลายชั้นขึ้นเมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มหลอมเหลว (melt film formation) และทำให้ฟิล์มหลอมเหลวนั้นเย็นตัวลงดังรูปที่ 2.16 (Athalye , 1992) การสัมผัสกันของพลาสติกเหลวที่ออกมาจากเครื่องรีดแต่ละเครื่องนั้นจะมีอยู่ 2 วิธี คือการสัมผัสกันที่หัวดาย และการสัมผัสกันที่บล็อคป้อน (feed block) (Osborn และ Jenkins , 1992)

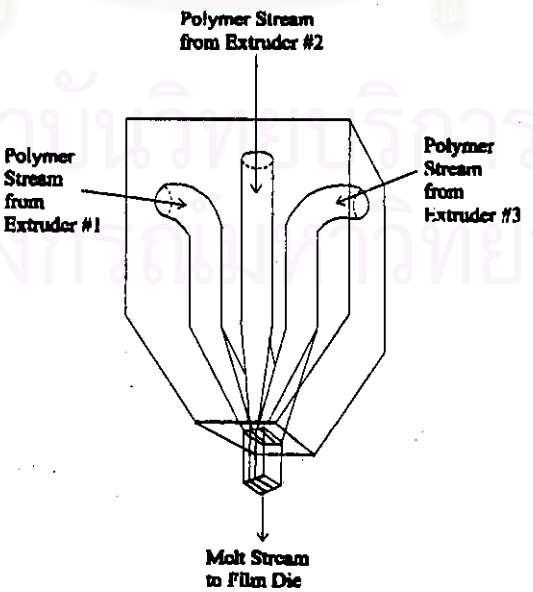


รูปที่ 2.16 การรีดร่วม



รูปที่ 2.17 หัวดายแบบเรียบของการรีดร่วม

การสัมผัสกันของพลาสติกเหลวที่หัวดายแบบเรียบจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 พลาสติกเหลวแต่ละชนิดจะแยกเส้นทางเดินเข้าสู่หัวดาย แล้วเกิดการสัมผัสกันก่อนออกสู่ปากดายหรือสัมผัสกันที่ปากดายก็ได้ การสัมผัสกันของพลาสติกในขณะที่ยังหลอมเหลวอยู่นี้ จะช่วยทำให้ได้ฟิล์มที่มีแรงยึดติดในแต่ละชั้นดี และถ้าหากพลาสติกเหลวแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันในด้านความหนืดหรือความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนแล้ว มักจะออกแบบให้พลาสติกเหลวมาสัมผัสกันใกล้ปากดายมากยิ่งขึ้น ปกติการสัมผัสกันของพลาสติกเหลวที่หัวดายแบบนี้จะขาดความยืดหยุ่น ดังนั้นมักจะเพิ่มความยืดหยุ่นโดยการใช้เวน (vane) ซึ่งจะเป็นตัวปรับอัตราการไหลของพลาสติกเหลวก่อนที่จะไปรวมกัน หลักการสัมผัสกันของพลาสติกเหลวที่หัวดายแบบเรียบนี้สามารถนำไปใช้ได้เช่นเดียวกันกับการสัมผัสกันของพลาสติกเหลวที่หัวดายแบบวง ส่วนการสัมผัสกันของพลาสติกเหลวที่บล็อคป้อนนั้นจะเป็นการสัมผัสกันของพลาสติกเหลวก่อนเข้าสู่หัวดาย เพื่อทำการปรับอัตราการไหลของพลาสติกเหลวให้คงที่และสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.18 (Osborn และ Jenkins , 1992)



รูปที่ 2.18 บล็อคป้อนของการรีดร่วม

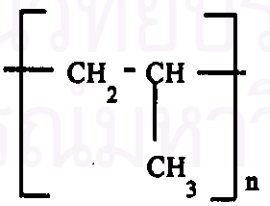
การผลิตฟิล์มหลายชั้นโดยวิธีรีดร่วมนี้จะมีข้อดีอยู่หลายประการคือ ได้ฟิล์มที่สามารถควบคุมการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำได้ มีความถี่นและความหนักแน่นคงรูปในขณะใช้งานบรรจุภัณฑ์ สามารถนำเศษพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยให้อยู่ชั้นกลางของฟิล์มหลายชั้น สามารถเพิ่มความสามารถในการปิดผนึกด้วยความร้อนได้ และ เพิ่มความสามารถในการพิมพ์และการเคลือบด้วยโลหะ (Jenkins และ Harrington , 1991) จากข้อดีต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้มีการพัฒนาการผลิตฟิล์มหลายชั้นโดยวิธีรีดร่วมนี้มากขึ้นจนกระทั่งในปัจจุบันนี้สามารถผลิตฟิล์มหลายชั้นได้มากถึง 11 ชั้น

2.4 ส่วนประกอบของแผ่นฟิล์ม

ฟิล์มที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์มีทั้งฟิล์มชั้นเดียวและฟิล์มหลายชั้น จุดประสงค์ของการผลิตฟิล์มหลายชั้น ก็เพื่อเพิ่มความสามารถของฟิล์มชั้นเดียวโดยเฉพาะในด้านการปิดผนึกด้วยความร้อน และการเป็นชั้นสกัดกั้นผลิตภัณฑ์จากสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตฟิล์มหลายชั้นจะมีความสลับซับซ้อนมากกว่ากระบวนการผลิตฟิล์มชั้นเดียว กล่าวคือ ในบางกรณีการผลิตฟิล์มหลายชั้นอาจผลิตขึ้นจากฟิล์มชั้นเดียวก่อน แล้วจึงนำฟิล์มชั้นเดียวนี้ไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ ให้เกิดเป็นฟิล์มหลายชั้นขึ้น ฟิล์มชั้นเดียวที่นำไปผลิตเป็นฟิล์มหลายชั้นนี้จะเรียกว่า วัสดุหลัก (substrate) ซึ่งจะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของฟิล์ม หากนำฟิล์มชั้นเดียวมาผ่านกระบวนการเคลือบ ส่วนประกอบของแผ่นฟิล์มก็จะมีวัสดุหลักกับสารเคลือบ แต่ถ้านำฟิล์มชั้นเดียวมาผ่านกระบวนการประกบ แผ่นฟิล์มก็จะมีส่วนประกอบของวัสดุหลักตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไปกับกาวที่ใช้ประกบ ส่วนวิธีสุดท้ายคือการรีดร่วม วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องผลิตฟิล์มชั้นเดียวก่อน แต่จะผลิตฟิล์มหลายชั้นในคราวเดียวกันจึงมีส่วนประกอบของวัสดุหลักตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป และอาจมีชั้นกาวเพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างพลาสติกทั้งสอง

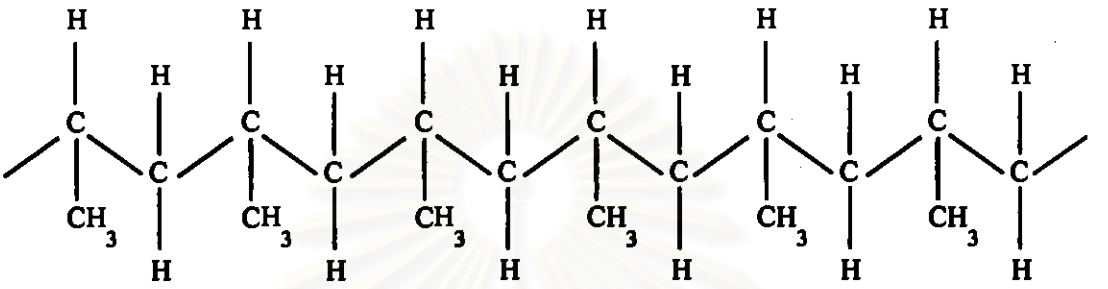
2.4.1 วัสดุหลัก พลาสติกหลายชนิดที่สามารถใช้เป็นวัสดุหลักในงานบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อน เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน ไนลอน พอลิเอทิลีนเทเรฟะทาเลตหรือพีอีที (polyethylene terephthalate : PET) แต่ในงานวิจัยนี้จะเน้นในการใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีน

2.4.1.1 พอลิโพรพิลีนหรือพีพี มีโครงสร้างอย่างง่ายเป็น



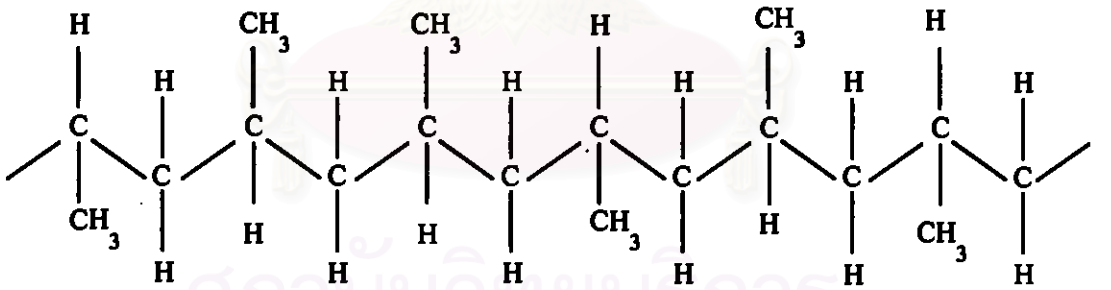
การผลิตพอลิโพรพิลีนในช่วงต้น ๆ จะใช้วิธีการพอลิเมอร์ไรเซชันโพรพิลีนที่ความดันสูงซึ่งผลผลิตที่ได้จะไม่มีคุณค่าในทางการค้า เพราะผลผลิตที่ได้จะเป็นเพียงของเหลวคล้ายน้ำมันหรือเป็นยางแข็งเท่านั้น ต่อมาศาสตราจารย์แนททาได้ค้นพบกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของแนททา (Natta ' s polymerization) ซึ่งเป็นกระบวนพอลิเมอร์ไรเซชันการที่คล้ายคลึงกับกระบวนการซีเกอร์ (Ziegler process) ที่ใช้ในการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงหรือเอชดีพีอี (high density polyethylene : HDPE) (Briston , 1992) ทั้งสองกระบวนการจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี

ความจำเพาะเจาะจง (stereospecific catalyst) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะเป็นตัวควบคุมตำแหน่งของโมโนเมอร์แต่ละหน่วยที่จะเข้าไปต่อในสายโซ่พอลิเมอร์ที่กำลังเจริญเติบโตอยู่ เพื่อทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างสม่ำเสมออยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า โครงสร้างแบบไอโซแทกติก (isotactic form) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (Briston , 1983) จะมีเห็นว่ากลุ่มเมทิล ($-CH_3$) อยู่ในแนวเดียวกันตลอดสายโซ่พอลิเมอร์



รูปที่ 2.19 โครงสร้างพอลิโพรพิลีนแบบไอโซแทกติก

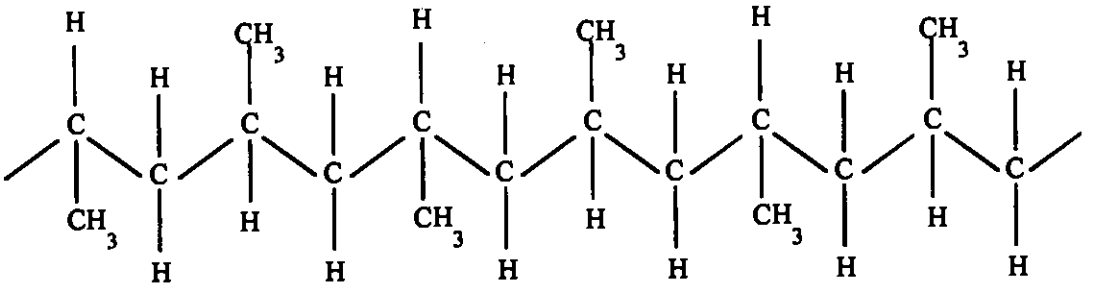
แต่ถ้าหากในกระบวนการผลิตไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความจำเพาะเจาะจงนี้แล้ว เช่น การพอลิเมอร์ไรเซชันในวัฏภาคแก๊ส (gas-phase polymerization) จะได้โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ไม่สม่ำเสมอเรียกว่าแบบอะแทกติก (atactic form) ดังแสดงในรูปที่ 2.20



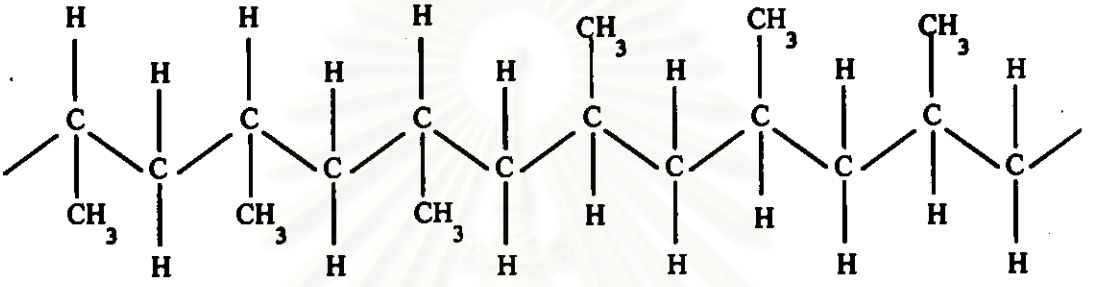
รูปที่ 2.20 โครงสร้างพอลิโพรพิลีนแบบอะแทกติก

กลุ่มเมทิลจะอยู่ในตำแหน่งแบบสุ่มไม่เป็นระเบียบ นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนอีก 2 แบบคือ แบบซินดิโอแทกติก (syndiotactic form) และ แบบสเตอริโอบล็อค (stereoblock form) ดังรูปที่ 2.21 และ 2.22 ตามลำดับ พอลิโพรพิลีนจะมีความแข็งและจุดอ่อนตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและมีความมันเงาสูง นอกจากนี้พอลิโพรพิลีนยังมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำคือ มีความหนาแน่น 0.90 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เท่านั้น การมีน้ำหนักเบานี้เองทำให้มีการใช้พอลิโพรพิลีนในงานบรรจุภัณฑ์อย่างกว้างขวางทั้งในบรรจุภัณฑ์ชนิดแข็งและบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อน ในบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนจะทำการผลิตพอลิโพรพิลีนให้อยู่ในรูปของฟิล์มก่อนซึ่งจะมีการใช้งานทั้งในด้านเป็นฟิล์มชั้นเดียวหรือฟิล์มหลายชั้นโดยมีกระบวนการผลิตและวัตถุประสงค์ของการใช้งานแตกต่างกันไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.21 โครงสร้างพอลิโพรพิลีนแบบซินดิโอแทกติก



รูปที่ 2.22 โครงสร้างพอลิโพรพิลีนแบบสเตอริโอบล็อค

<u>ฟิล์มพอลิโพรพิลีนชั้นเดียว</u>

การผลิตฟิล์มพอลิโพรพิลีนชั้นเดียวสามารถผลิตได้โดยใช้กระบวนการหล่อฟิล์มหรือกระบวนการเป่าฟิล์ม ในขั้นตอนแรกของทั้งสองกระบวนการคือการหลอมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องรีดนั้นจะใช้เครื่องรีดที่มีอัตราส่วนความยาวของสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูสูง ทั้งนี้เพราะพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าการนำความร้อนต่ำมาก การใช้สกรูที่ยาวขึ้นจะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมตัวได้สมบูรณ์ขึ้น แต่บางส่วนของพอลิเมอร์อาจสัมผัสกับความร้อนนานเกินไปซึ่งพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่ไวต่อการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนั้นในขั้นตอนการหลอมพอลิโพรพิลีนจึงมักมีการเติมสเตบิไลเซอร์ (stabilizer) ลงไปด้วย เพื่อป้องกันการสลายตัว ส่วนในขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มนั้นในกระบวนการหล่อฟิล์มจะหล่อเย็นฟิล์มอย่างรวดเร็วด้วยลูกกลิ้งหล่อเย็นจึงจะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความใส มีความมันเงา และมีความแข็งแรง แต่ถ้าฟิล์มหนาขึ้นการหล่อเย็นอย่างรวดเร็วจะเป็นไปได้ยากทำให้เกิดผลึกที่มีขนาดใหญ่ ฟิล์มที่ได้ก็จะขุ่น (haze) ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความใสของฟิล์มจะลดลงเมื่อฟิล์มหนาขึ้น ส่วนในกระบวนการเป่าฟิล์มจะหล่อเย็นอย่างรวดเร็วด้วยน้ำ โดยจะมีน้ำไหลครอบถูกโป่งและเมื่อฟิล์มถูกหนีบด้วยลูกกลิ้งหนีบก็จะถูกนำมาผ่านอ่างน้ำเย็นอีกครั้งทำให้ฟิล์มมีอัตราการเย็นตัวที่สูง การมีอัตราเย็นตัวสูงนี้เป็นการป้องกันมิให้ฟิล์มมีผลึกขนาดใหญ่ ฟิล์มที่ได้จึงมีความใสและแข็งแรงมากกว่าฟิล์มที่ได้จากกระบวนการหล่อฟิล์มถึง 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ ฟิล์มพอลิโพรพิลีนชั้นเดียวมักจะนำมาใช้ทำเป็นถุงในการบรรจุสิ่งทอและเสื้อผ้า ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการบรรจุอาหารที่มีความชื้น เนื่องจากพบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนชั้นเดียวนี้มีอัตราการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในความหนาที่เท่ากัน ในทางปฏิบัติจึงมีการนำฟิล์มพอลิโพรพิลีน

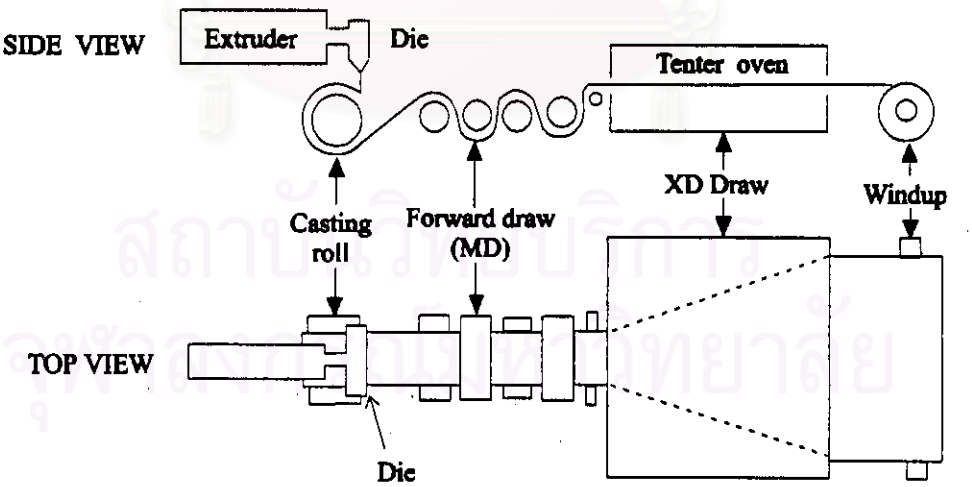
ขั้นเดียวนี้มาทำการดึงยืด (stretch) เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุล (orientation) ภายในฟิล์ม การจัดเรียงตัวของโมเลกุลจะมีอยู่ 2 แนวคือ แนวขนานเครื่องและแนวขวางเครื่อง การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในทิศทางเดียวเรียกว่า การจัดเรียงตัวของโมเลกุลแนวเดียว (uniaxially orientation) ซึ่งมักจะใช้ในการผลิตเส้นใย ส่วนการจัดเรียงตัวในสองทิศทางนั้นเรียกว่า การจัดเรียงตัวของโมเลกุลสองทิศทาง (biaxially orientation) ซึ่งจะใช้มากในงานบรรจุภัณฑ์ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในฟิล์มนี้จะเป็นการปรับปรุงสมบัติบางประการของฟิล์มดังตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิโพรพิลีน (Oswin , 1975) นอกจากนี้พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการจัดเรียงโมเลกุลแล้วหรือเรียกว่า โอพีพี (oriented polypropylene film : OPP) จะใสขึ้น มีสมบัติเป็นชั้นสกัดกั้นความชื้นและแก๊สได้ดี มีความทนต่อแรงกระทบกระแทกที่อุณหภูมิต่ำดี มีความคงรูปและเหนียวกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และมีจุดหลอมเหลวสูงจึงทำให้สามารถนำไปใช้งานในบรรจุภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูงได้ การทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในแผ่นฟิล์มสามารถทำได้ในขณะทำการผลิตฟิล์มชั้นเดียว โดยจะมีการเพิ่มขั้นตอนบางประการในการดึงยืดแผ่นฟิล์มเพื่อให้การเจริญเติบโตของผลึกลดลง

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติระหว่างฟิล์มพอลิโพรพิลีน 2 ชนิด

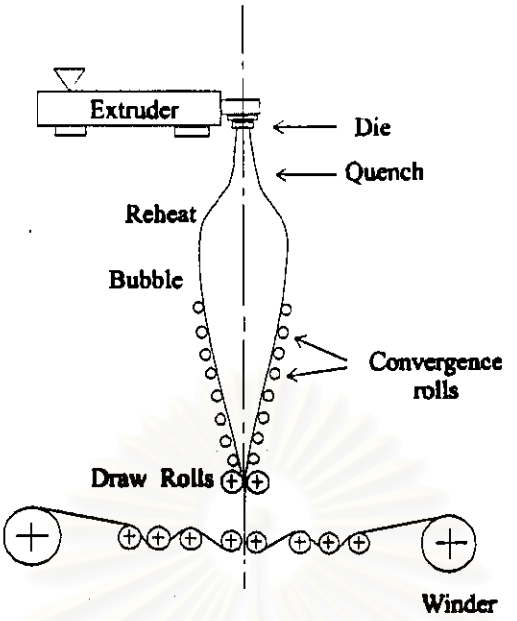
Property	Chill cast PP	Biax. OPP
Thickness (mm)	32	14
Yield (m^2/kg)	38 (0.9)	84 (2)
Tensile strength (kN/m)	0.9 (2.5)	3.5 (10)
Extensibility at break	800% (3)	50% (0.1)
Young 's modulus (GN/m^2)	1.2	2.4
Resistance to water vapor (GN.s/mol at 25 °C)	1.4 (1.8)	1.2 (1.5)
Resistance to oxygen (GN.s/mol at 25 °C)	45 (2.2)	45 (2.2)

การดึงยืดแผ่นฟิล์มสามารถทำได้ทั้งในขณะที่ฟิล์มเป็นแผ่นในกระบวนการหล่อฟิล์ม หรือในขณะที่ฟิล์มเป็นลูกโป่งในกระบวนการเป่าฟิล์ม ในการดึงยืดแผ่นฟิล์มในขณะทำการผลิตแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อฟิล์มนั้น กระบวนการจะเริ่มจากการผลิตแผ่นฟิล์มที่มีความหนามากกว่าปกติ แล้วจึงทำให้แผ่นฟิล์มเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เพื่อลดการเจริญเติบโตของผลึก จากนั้นจึงผ่านแผ่นฟิล์มเข้าไปในชุดลูกกลิ้งร้อนเป็นการให้ความร้อนต่อแผ่นฟิล์มอีกครั้ง พร้อมกับการดึงยืด

แผ่นฟิล์มโดยการจัดให้ลูกกลิ้งมีความเร็วสูงขึ้น ถ้าในการดึงยืดขณะนี้ทำที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และมีการดึงยืด 1200 เปอร์เซ็นต์ จะเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอ แต่ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์จะทำการดึงยืดที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และมีการดึงยืด 800 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะให้สมบัติด้านการต้านทานแรงดึงดีเช่นกัน จากขั้นตอนดังกล่าวจะเห็นว่ามีการดึงยืดเฉพาะในแนวขนานเครื่องเท่านั้น หากต้องการดึงยืดในสองทิศทางคือเพิ่มการดึงยืดในแนวขวางเครื่องแล้วจะต้องเพิ่มเครื่องมือเข้าไป นั่นคือ การเพิ่มเทนเตอร์ (tenter) กระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 2.23 ส่วนในการดึงยืดแผ่นฟิล์มในขณะทำการผลิตแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าฟิล์มนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.24 (Matin , 1986) ในกระบวนการนี้จะมีการดึงยืดทั้งสองทิศทางได้โดยไม่ต้องใช้เทนเตอร์ดังเช่นในกระบวนการหล่อฟิล์ม กล่าวคือ การดึงยืดในแนวขนานเครื่องจะเกิดจากความเร็วที่แตกต่างกันของลูกกลิ้งหนีบที่หนีบอยู่ระหว่างลูกโป่งและการดึงยืดในแนวขวางเครื่องเกิดจากความดันของอากาศที่อยู่ภายในลูกโป่งซึ่งจะมีแรงดันในทิศทางต่าง ๆ จากกระบวนการดึงยืดทั้งสองกระบวนการพบว่าฟิล์มที่ได้จากการเป่าฟิล์มจะให้สมบัติด้านการต้านทานแรงดึง (tensile properties) ที่สมดุลทั้งในแนวขนานและแนวขวางของเครื่องมากกว่ากระบวนการหล่อฟิล์ม แต่การหล่อฟิล์มจะให้สมบัติในด้านความเสถียรทางมิติ (dimensional stability) ที่สมดุลในแนวขนานกับแนวขวางของเครื่องมากกว่ากระบวนการเป่าฟิล์ม ฟิล์มที่ผ่านการจัดเรียงโมเลกุลแล้วจะนำไปปิดผนึกได้ยาก เนื่องจากฟิล์มมักจะเกิดการหดตัวเมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นจึงนำฟิล์มชนิดนี้ไปประกบกับฟิล์มชนิดอื่นหรือเคลือบสารบางชนิดลงไปบนแผ่นฟิล์ม เพื่อใช้เป็นชั้นสำหรับการปิดผนึก



รูปที่ 2.23 การดึงยืดแผ่นฟิล์มในกระบวนการหล่อฟิล์ม



รูปที่ 2.24 การดึงยืดแผ่นฟิล์มในกระบวนการเป่าฟิล์ม

<u>การเคลือบและการประกบฟิล์มพอลิโพรพิลีน</u>

ฟิล์มที่ผ่านการจัดเรียงโมเลกุลแล้วจะนำมาทำการปิดผนึกด้วยความร้อนได้ยาก เนื่องจากฟิล์มจะเกิดการหดตัวและบิดงอที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการปิดผนึก การแก้ไขทางหนึ่งคือการเคลือบผิวพอลิโพรพิลีนด้วยพลาสติกที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเพื่อใช้เป็นชั้นปิดผนึก เช่น การเคลือบแบบดิสเพอร์ชันด้วยโคพอลิเมอร์ (copolymer) ของพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์หรือพีวีดีซี (polyvinylidene chloride : PVDC) ลงบนฟิล์มพอลิโพรพิลีน ซึ่งนอกจากจะช่วยในด้านการปิดผนึกแล้วยังช่วยเพิ่มสมบัติด้านสกัดกั้นอีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.2 (Osborn และ Jenkins , 1992) จะเป็นการเปรียบเทียบสมบัติพอลิโพรพิลีนที่ยังไม่ได้เคลือบและที่เคลือบแล้วด้วยอะคริลิค (acrylic) หรือพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์ ในการเคลือบด้วยอะคริลิคจะมีช่วงอุณหภูมิในการปิดผนึกด้วยความร้อนกว้าง ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องการความเร็วสูงได้

ตารางที่ 2.2 สมบัติของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่เคลือบและถูกเคลือบด้วยพีวีดีซีหรืออะคริลิค

Property	Uncoated	Acrylic Coated	PVDC
Haze (%)	3	3	3
Heat Seal Range (°C)	0	110 - 150	120 - 150
Oxygen Permeability (cm^3-mil/day-100 in^2-atm)	160	150	1 - 3

กระบวนการเคลือบผิวพอลิโพรพิลีนที่ง่ายอีกวิธีหนึ่งคือ การใช้เครื่องรีดโดยวิธีการรีดร่วม โดยจะรีดพอลิโพรพิลีนออกมาพร้อมกับพลาสติกที่ต้องการเคลือบ เช่น การรีดพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการจัดเรียงโมเลกุลแล้วพร้อมกับโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับโพรพิลีน (OPP/ethylene-propylene copolymer) จะได้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนเคลือบที่มีช่วงอุณหภูมิการปิดผนึกด้วยความร้อนที่ 88 - 149 องศาเซลเซียส และความแข็งแรงของรอยผนึกเท่ากับ 700 กรัม/นิ้ว ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงของรอยผนึกสูงกว่าการเคลือบแบบดิสเพอร์ชันด้วยโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์ ซึ่งมีค่าเพียง 200 กรัม/นิ้ว ถึงแม้ว่าการเคลือบพอลิโพรพิลีนแบบนี้จะขาดสมบัติด้านการสกัดกั้นแก๊ส เนื่องจากการขาดชั้นของพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์ก็ตาม แต่โดยธรรมชาติของพอลิโพรพิลีนแล้วจะมีสมบัติเป็นชั้นสกัดกั้นความชื้นได้ทำให้การเคลือบฟิล์มพอลิโพรพิลีนแบบการรีดร่วมนี้เหมาะต่องานบรรจุภัณฑ์หลายชนิด นอกจากนี้ยังสามารถปรับช่วงอุณหภูมิการปิดผนึกและปรับปรุงความแข็งแรงของรอยผนึกได้ด้วยการปรับปรุงสารที่นำมาเคลือบ หรือการเปลี่ยนไปใช้ไอโอโนเมอร์ (ionomer) เป็นสารเคลือบ แต่วิธีการดังกล่าวนี้ยังไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงของรอยผนึกได้สูงถึง 4500 กรัม/นิ้ว วิธีหนึ่งที่จะทำได้คือการเปลี่ยนมาใช้กระบวนการประกบฟิล์มโดยมีแอลดีพีอีเป็นชั้นปิดผนึก เช่น โครงสร้างฟิล์มโอพีพีหนา 1 มิล ที่เคลือบด้วยพีวีดีซีแล้วนำไปประกบกับฟิล์มแอลดีพีอีที่มีความหนา 2 มิล โดยมีกาวเป็นตัวเชื่อมในการประกบ (PVDC coated OPP/adhesive/LDPE) ซึ่งสามารถสรุปสมบัติของฟิล์มได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3 (Osborn และ Jenkins , 1992) การผลิตฟิล์มแบบนี้นอกจากจะใช้การประกบแล้วอาจใช้วิธีการเคลือบฟิล์มแบบอัดรีดก็ได้ โดยการอัดรีดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเคลือบลงบนโอพีพีที่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์มาแล้ว แต่กระบวนการผลิตวิธีนี้จะทำได้ยากเนื่องจากวัสดุหลักมีความไวต่อความร้อน

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติการประกบฟิล์มพอลิโพรพิลีนด้วยแอลดีพีอี

Properties of a Lamination	PVDC Coated OPP/Adhesive/LDPE
Thickness	2.9 mils
Seal Strength	4500 g/inch
Oxygen Permeability	0.9 (cm^3-mil/day-100 in^2-atm)
Tear Strength	66 - 230 g/inch (MD-TD)

2.4.2 วัสดุเพื่อการปิดผนึกด้วยความร้อน (heat sealable material)

วัสดุหลักชั้นเดียวที่ผ่านการดึงยืดเพื่อจัดเรียงโมเลกุลนั้น มักจะทำการปิดผนึกด้วยความร้อนได้ยาก การแก้ไขนอกจากจะเปลี่ยนวิธีการปิดผนึกแล้วยังอาจใช้วิธีการปรับปรุงผิวฟิล์มได้ โดยการเคลือบสารหรือการประกบแผ่นฟิล์มลงไปบนวัสดุหลัก เมื่อทำการปิดผนึกความร้อนจะหลอมสารปิดผนึก (sealant) ที่เคลือบหรือประกบบนวัสดุหลักนั้นด้วยความดันและเวลาที่เหมาะสม แล้วจะได้รอยผนึกเมื่อนำความร้อนออก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการแข็งตัวของสารปิดผนึก

การเพิ่มชั้นวัสดุเพื่อการปิดผนึกโดยวิธีเคลือบฟิล์มนั้นวัสดุพอลิเมอร์ควรจะมีสมบัติอ่อนจุดหลอมเหลวต่ำและมีน้ำหนักโมเลกุลที่จะให้ความหนืดที่เหมาะสมต่อการสร้างความแข็งแรงและความยืดหยุ่นเมื่อเคลือบลงไปบนวัสดุหลัก การเคลือบชั้นวัสดุเพื่อการปิดผนึกสามารถทำได้ทั้ง 2 วิธี คือ แบบดิสเพอร์ชัน และแบบตัวทำละลาย โดยสารเคลือบหรือสารปิดผนึกจะเป็นชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุหลักที่ใช้ ถ้าวัสดุหลักเป็นฟิล์มหรือกระดาษอาจเคลือบด้วยโคพอลิเมอร์ระหว่างไวนิลอะซีเตดกับไวนิลคลอไรด์ (vinyl acetate-vinyl chloride copolymer) ไนโตรเซลลูโลส (nitrocellulose) อะคริลิค หรือพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์ การเคลือบด้วยพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์จะให้สมบัติด้านการสกัดกั้นเท่ากับสมบัติด้านการปิดผนึกด้วยความร้อน ส่วนโคพอลิเมอร์ระหว่างไวนิลอะซีเตดกับไวนิลคลอไรด์จะเคลือบลงบนฟิล์มหรือฟอยล์ก็ได้โดยการเคลือบลงบนฟอยล์ก็เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของฟอยล์อันเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ วัสดุหลักที่เป็นเซลโลเฟนจะเคลือบด้วยขี้ผึ้ง (waxes) หรือไนโตรเซลลูโลส แต่ถ้าวัสดุหลักเป็นกระดาษ ขี้ผึ้งจะช่วยป้องกันความชื้นได้ด้วย การปรับปรุงขี้ผึ้งเพื่อใช้ในงานปิดผนึกมักจะทำโดยการผสมกับแอลดีพีอีหรือการเติมเอทิลีนไวนิลอะซีเตดหรืออีวีเอ (ethylene vinyl acetate : EVA) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงไปด้วย เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงและป้องกันการเหนียวติดถูกกลิ้งในขณะทำการเคลือบ ส่วนการเคลือบผิวเพื่อการปิดผนึกด้วยความร้อนของพอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงโมเลกุลสองทิศทางหรือบีโอพีพี (biaxially oriented polypropylene : BOPP) มักจะเคลือบด้วยอะคริลิคดังแสดงในตารางที่ 2.2 นอกจากสารปิดผนึกดังกล่าวข้างต้นแล้วยังมีเทอร์โมพลาสติกอีกหลายชนิดที่สามารถนำมาเคลือบเพื่อใช้ในการปิดผนึกได้ โดยจะใช้เทอร์โมพลาสติกเหล่านี้ในรูปของเหลวร้อน (hot melt) ตัวอย่างเช่น เอทิลเซลลูโลส (ethyl cellulose) อีวีเอ พอลิเอไมด์ (polyamide)

ส่วนการเพิ่มชั้นวัสดุเพื่อการปิดผนึกโดยวิธีการเคลือบฟิล์มแบบอัดรีด การประกบและการรีดร่วมนั้นมักจะใช้สารปิดผนึกที่เป็นเม็ดพลาสติกหรือแผ่นฟิล์มของพอลิโอลิฟิน (polyolefin) (Matin , 1986) ดังนี้คือ

<u>แอลดีพีอี</u> เป็นสารปิดผนึกที่ใช้กันมากและมีหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกันในด้านความหนาแน่น ดัชนีการหลอมเหลวและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล สมบัติที่แตกต่างกันภายในช่วงของแอลดีพีอีนี้เองจะมีผลต่องานปิดผนึก กล่าวคือเมื่อความหนาแน่นสูง อุณหภูมิในการปิดผนึก ความต้านทานความร้อน ความแข็งแรงและความคงรูปจะเพิ่มสูงขึ้นตาม แต่ช่วงของการปิดผนึก ความใส และการเป็นชั้นสกัดกั้นจะลดลง และเมื่อดัชนีการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น ช่วงการปิดผนึกและความใสจะเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิการปิดผนึก ความต้านทานความร้อน ความแข็งแรง ความคงรูปและการต้านทานต่อสารเคมีจะลดลง ปกติพอลิเมอร์ที่มีดัชนีการหลอมเหลวในช่วง 0.24 ถึง 5.0 จะใช้ในการเป่าฟิล์ม และถ้าอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 30.0 จะใช้ในการหล่อฟิล์มและการเคลือบฟิล์มแบบอัดรีด ในส่วนการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลพบว่าถ้าพอลิเมอร์มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลแคบแล้ว จะมีช่วงการปิดผนึกแคบกว่าพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง การที่แอลดีพีอีมีมากมายหลายชนิดนี้เองจึงทำให้สามารถปรับให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการใช้งานบรรจุภัณฑ์ด้านต่าง ๆ ได้มากมายทั้งในด้านการเคลือบฟิล์มแบบอัดรีด การประกบ และการรีดร่วม ซึ่งจะรวมทั้งการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำชิงเส้นหรือแอลแอลดีพีอี (linear low density polyethylene : LLDPE) เข้าไปร่วมด้วย ความหนาแน่นของแอลแอลดีพีอีจะอยู่ในช่วงของแอลดีพีอี แต่จะมีสมบัติบางประการที่เหมือนกับ

เอชดีพีอีและมีสมบัติบางประการที่แตกต่างจากแอลดีพีอี เช่นแอลแอลดีพีอีจะมีอุณหภูมิการปิดผนึกเริ่มต้นและความแข็งแรงสูงกว่าแอลดีพีอี ดังนั้นในการใช้งานที่เหมือนกันอาจใช้แอลแอลดีพีอีได้บางกว่าการใช้แอลดีพีอี สามารถนำแอลแอลดีพีอีไปผสมกับแอลดีพีอีที่ให้สมบัติอยู่ระหว่างแอลแอลดีพีอีกับแอลดีพีอีหรืออาจนำไปผสมกับอีวีเอเพื่อเพิ่มสมบัติด้านการปิดผนึก

<u>พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางหรือเอ็มดีพีอี</u> (medium density polyethylene : MDPE) มีสมบัติด้านการต้านทานความร้อนและการสกัดกั้นสูงขึ้นเล็กน้อย จะใช้เป็นฟิล์มชั้นในของถุงที่ต้องการต้ม ในทางการแพทย์จะใช้ในการสเตอไรด์ได้ บางครั้งจะมีการใช้แอลแอลดีพีอีผสมแทนการใช้เอ็มดีพีอี

<u>เอชดีพีอี</u> ใช้ในการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนน้อย เนื่องจากมีอุณหภูมิในการปิดผนึกสูงและมีช่วงการปิดผนึกแคบ ดังนั้นใช้เฉพาะในงานที่ต้องการความต้านทานต่อความร้อนและความแข็งแรงสูง

<u>พอลิโพรพิลีน</u> มักจะไม่ค่อยใช้เป็นสารปิดผนึกยกเว้นในการใช้เป็นส่วนประกอบของการรีดร่วม และส่วนมากจะใช้โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนและเอทิลีนเป็นสารปิดผนึกในการรีดร่วมกับพอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงโมเลกุล 2 ทิศทาง

<u>โคพอลิเมอร์ของเอทิลีน</u> เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับโมโนเมอร์ชนิดอื่น ๆ เช่น ไวนิลอะซีเตต อะคริลิคแอซิด (acrylic acid) เมตาคริลิคแอซิด (mathacrylic acid) แล้วจะได้เอทิลีนไวนิลอะซีเตต เอทิลีนอะคริลิคแอซิดหรืออีเอเอ (ethylene-acrylic acid : EAA) เอทิลีนเมตาคริลิคแอซิดหรืออีเอ็มเอเอ (ethylene-mathacrylic acid : EMAA) ตามลำดับ ซึ่งจะมีสมบัติแตกต่างจากแอลดีพีอีและแอลแอลดีพีอี โคพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีเปอร์เซ็นต์ของโคโมโนเมอร์แตกต่างกันออกไป เช่น ในเอทิลีนไวนิลอะซีเตดจะมีเปอร์เซ็นต์ของไวนิลอะซีเตต 4 - 30 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเปอร์เซ็นต์ของโคโมโนเมอร์เพิ่มขึ้น ความใสและช่วงอุณหภูมิการปิดผนึกจะเพิ่มขึ้น แต่ความเป็นผลึก ความคงรูป และอุณหภูมิในการปิดผนึกจะลดลง การที่โคพอลิเมอร์ของเอทิลีนมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเปอร์เซ็นต์ของโคโมโนเมอร์จึงทำให้มีโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนมากมายหลายชนิดที่สามารถนำไปใช้ในงานผลิตฟิล์มหลายชั้นโดยกรรมวิธีที่แตกต่างกันได้ ทั้งวิธีการเคลือบฟิล์มแบบอัดรีด การประกบ และการรีดร่วม เอทิลีนอะคริลิคแอซิดและเอทิลีนเมตาคริลิคแอซิดถือว่าเป็นโคพอลิเมอร์กรดที่มีการยึดติดกับโลหะได้ดีเหมือนกับไอโอโนเมอร์ ซึ่งไอโอโนเมอร์ก็ถือว่าเป็นโคพอลิเมอร์กรดชนิดหนึ่งที่ได้จากการปรับปรุงโครงสร้างของเอทิลีนเมตาคริลิคแอซิดให้มีอะตอมของโซเดียมและสังกะสีเพิ่มขึ้น

สรุปแล้วตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงเมื่อต้องการเลือกฟิล์มเพื่อการปิดผนึก คือ ความหนาแน่น ดัชนีการหลอมเหลว การกระจายตัวน้ำหนักโมเลกุล โฮโมพอลิเมอร์หรือโคพอลิเมอร์ ชนิดและปริมาณของโคโมโนเมอร์ พอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมและความหนาของฟิล์มที่จะปิดผนึก และสิ่งหนึ่งที่ควรระมัดระวังอย่างยิ่งคือการใช้โคพอลิเมอร์กับผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อการสูญเสียกลิ่นและรสชาดของอาหาร เช่น ในการทดลองการวัดการสูญเสียรสชาดของน้ำส้มโดยใช้สารปิดผนึกด้วยความร้อน 3 ชนิด คือแอลดีพีอี ไอโอโนเมอร์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟะทาเลต พบว่าไอโอโนเมอร์ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับเมตาคริลิคแอซิดจะทำให้น้ำส้มสูญเสียรสชาดมากที่สุด รองลงมาคือแอลดีพีอีและพอลิเอทิลีนเทเรฟะทาเลตจะทำให้สูญเสียรสชาดน้อยที่สุด (Paik , 1992)

2.4.3 พอลิเมอร์เพื่อการสกัดกั้น (barrier polymer)

ในอดีตการเก็บรักษาอาหารและเครื่องดื่มมักจะเก็บในภาชนะประเภทแก้วและโลหะ เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีการสกัดกั้นอากาศและความชื้นได้ดี ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาการใช้พอลิเมอร์ที่มีการสกัดกั้นสูงก็สามารถนำพอลิเมอร์เหล่านี้มาใช้แทนแก้วและโลหะได้ เนื่องจากพอลิเมอร์มีข้อดีกว่าแก้วและโลหะหลายประการคือราคาถูก น้ำหนักเบา ต้านทานต่อการแตก โปร่งใส ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟได้ สะดวกต่อการใช้งานและเป็นที่นิยมของผู้บริโภค นอกจากนี้ยังสามารถนำพอลิเมอร์มาออกแบบเป็นบรรจุภัณฑ์ได้ในหลายลักษณะและสามารถสัมผัสโดยตรงกับอาหารได้ พอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นชั้นสกัดกั้นส่วนใหญ่อย่างน้อยจะต้องมีโครงสร้างของไฮดรอกซิล (hydroxyl -OH) ไซยาโน (cyano -C ≡N) ฮาโลเจน (halogen -Cl or -F) เอสเตอร์ (-C(=O)-O) หรือแอไมด์ (amide -C(=O)-NH-) ตัวอย่างของพอลิเมอร์เพื่อการสกัดกั้นแสดงดังตารางที่ 2.4 ซึ่งจะมีส่วนประกอบของโครงสร้างดังกล่าว โครงสร้างเหล่านี้จะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่แข็งแรงเป็นการจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่เพื่อป้องกันการซึมผ่าน ส่วนพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการเป็นชั้นสกัดกั้นได้น้อยลงแสดงได้ดังตารางที่ 2.5 (Salame , 1986)

จากตารางที่ 2.4 และ 2.5 จะเห็นว่านอกจากปัจจัยด้านโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์แล้วยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการเป็นชั้นสกัดกั้นของพอลิเมอร์ดังนี้คือ

<u>อัตราการอัดตัวของสายโซ่ จำนวนผลึก และการจัดเรียงตัวของผลึก</u> ในขณะที่ปล่อยให้พอลิเมอร์เหลวเย็นตัวลงพอลิเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่ให้อัดแน่นติดกัน โดยปริมาณการอัดแน่นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ การอัดแน่นอย่างสมบูรณ์ทำให้เกิดเป็นผลึกขึ้น เมื่อผลึกเกิดมากขึ้นสมบัติการสกัดกั้นก็จะมากขึ้น ในส่วนที่ไม่เป็นผลึกภายในพอลิเมอร์จะเรียกว่าอสัญฐาน (amorphous) ซึ่งเป็นส่วนทำให้แก๊สซึมผ่านได้ การจัดเรียงตัวของผลึกสามารถทำได้โดยการดึงยืดสายโซ่ในขณะเย็นตัวลง ความเป็นระเบียบของผลึกจะช่วยให้การซึมผ่านได้น้อยลง

<u>การไวต่อความชื้น</u> สมบัติการสกัดกั้นอาจลดลงได้หากพอลิเมอร์มีดูดกลืนความชื้น เนื่องจากความชื้นจะเข้าไปกระทำต่อพันธะที่เชื่อมระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ มีผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์อยู่กันอย่างหลวม ๆ แก๊สจึงซึมผ่านเข้าไปได้ น้ำจากความชื้นเป็นสารที่มีขั้วสูงจะทำปฏิกิริยาเฉพาะกับพอลิเมอร์ที่มีขั้ว พอลิเมอร์ที่มีขั้วสำหรับการสกัดกั้นคือ การมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งจะมีโครงสร้างของ -OH และ -C(=O)-NH ส่วนกลุ่มที่มีขั้วอื่น ๆ ถึงแม้ว่าจะดูดกลืนน้ำได้แต่จะไม่มีผลต่อสมบัติการเป็นชั้นสกัดกั้นเนื่องจากสมบัติการสกัดกั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับพันธะไฮโดรเจน

<u>ผิวพอลิเมอร์</u> การปรับปรุงผิวพอลิเมอร์จะช่วยให้พอลิเมอร์มีสมบัติด้านการสกัดกั้นได้บ้าง เช่น พอลิเอทิลีนเป็นสารที่ไม่มีขั้วจึงไวต่อของเหลวที่ไม่มีขั้ว เช่น ไฮโดรคาร์บอนเหลว แต่ถ้าปรับปรุงผิวพอลิเอทิลีนด้วยแก๊สฟลูออรีนแล้วจะทำให้พอลิเอทิลีนมีสมบัติการสกัดกั้นของเหลวไฮโดรคาร์บอนได้

ตารางที่ 2.4 พอลิเมอร์เพื่อการสกัดกั้น (Salame , 1986)

Polymer	O_2 permeation[a]	Water barrier
1. Poly(vinyl alcohol)[b]	<0.01 [<0.04] (0%rh)	poor
2. Poly(acrylonitrile)[b]	0.04 [0.116]	good
3. ethylene-vinyl alcohol,70%VOH	0.017 [0.066] (0%rh)	poor
4. PVDC homopolymer[b]	0.10	excellent
5. cellophane[b]	0.17 [0.66] (0%rh)	poor
6. ethylene-vinyl alcohol,60%VOH	0.17 [0.66] (0%rh)	poor
7. PVDC copolymer (90%VDC)	0.25 [0.97]	excellent
8. PVDC copolymer (80%VDC)	0.50 [109]	excellent
9. Poly(acrylonitrile) copolymer[c,d],70%ACN	1.0 [3.9]	fair
10. Poly(acrylonitrile) copolymer[e],70%ACN	1.1 [4.3]	fair
11. PVDC, plasticized	1.3 [5.1]	excellent
12. Polyamide (nylon-6)	1.5 [5.8] (0%rh)	poor
13. Polyamide (nylon-6,6)	2.5 [9.7] (0%rh)	poor
14. epoxy,thermoset(Bis A/Amine)[b]	3.0 [12]	poor
15. Poly(ethylene terephthalate) film	3.0 [12]	good
16. Poly(chlorotrifluoroethylene)	3.0 [12]	excellent
17. Polyamide copolymer	4.5 [17]	poor
18. Poly(vinylidene fluoride)	4.5 [17]	excellent
19. Poly(ethylene terephthalate) bottle	5.0 [19]	good
20. Polyamide (nylon-6,10)	6.0 [23]	fair
21. Poly(vinyl chloride)[d]	8.0 [31]	good
22. Polybisphenol-epichlorohydrin	7.0 [27]	fair
23. Poly(ethylene terephthalate) , amorphous	10.0 [39]	fair
24. Polyacetal	10.0 [39] (0%rh)	poor
25. Poly(vinyl chloride) bottle[e]	12.0 [47]	good

a cm^3.mil/100 in^2.d.atm [3.886 cm^3 .mm/(m^2.d.kPa)] at 23 °C , 50%rh unless noted.

b Cannot be melt-extruded and/or must be applied from solution or emulsion.

c Polymer used to manufacture beverage containers (Monsanto). Not commercially available.

d Pure polymer , no modifiers.

e Contains an impact modifier (rubber).

ตารางที่ 2.5 พอลิเมอร์สกัดกั้นที่มีการซึมผ่านต่ำ (Salame , 1986)

Polymer	O_2 permeation[a]	Water barrier
1. Poly(vinyl fluoride)	15.0 [58]	excellent
2. Poly(methyl methacrylate)	17.0 [66]	poor
3. Poly(methyl methacrylate)[b]	25.0 [971]	poor
4. Polyamide (nylon-11)	26 [100]	fair
5. Poly(ethylene terephthalate) copolymer	26 [100]	poor
6. Polystyrene copolymer (25%acrylonitrile)	65 [250]	poor
7.cellulose nitrate	100 [389] (0%rh)	poor
8. styrene/AN/rubber	100 [3890]	poor
9. Polyethylene(d=0.96)	110 [4270]	excellent
10. Polyurethane, elastomer	135 [5250] (0%rh)	poor
11. Polypropylene	150 [583]	excellent
12. Polysulfone	200 [777]	poor
13. Polycarbonate	225 [874]	poor
14. Polybutene	330 [1280]	excellent
15. Polyethylene/vinyl acetate	350 [1360]	fair
16. Polystyrene	420 [1630]	poor
17. Polyethylene (d=0.92)	480 [1870]	excellent
18. Polytetrafluorethylene	500 [1940]	excellent
19. Polyethylene ionomer	550 [2140]	good
20. SBR rubber	1,500 [5830]	good
21. Polybutadiene	2,500 [9710]	poor
22. Polymethyl pentene	4,000 [15,500]	poor
23. silicone elastomer	>90,000 [>350,000]	poor

a cm^3.mil/100 in^2.d.atm [3.886 cm^3 .mm/(m^2.d.kPa)] at 23 ℃ , 50% rh unless noted.
b rubber modified.

<u>การใช้สารเติมแต่งหรือการปรับปรุงสูตร</u> จะมีผลต่อการเพิ่มหรือลดสมบัติด้านการสกัดกั้นได้ ในด้านการเพิ่มสมบัติการสกัดกั้น เช่น การผสมระหว่างไนลอน (มีสมบัติสกัดกั้นแก๊สได้ดี) กับพอลิเอทิลีน (มีสมบัติการสกัดกั้นแก๊สต่ำ) พบว่าของผสมที่ได้จะมีสมบัติด้านการสกัดกั้นแก๊สดีกว่าพอลิเอทิลีนโดยทั่ว ๆ ไป ในด้านการลดสมบัติการสกัดกั้น เช่นการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปในพอลิไวนิลคลอไรด์ จะมีผลทำให้สมบัติการสกัดกั้นลดลงเนื่องจากสารพลาสติกไซเซอร์จะทำให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและทำให้สายโซ่อยู่กันแบบหลวม ๆ เปิดโอกาสให้แก๊สซึมผ่านเข้าไปได้

ในการเพิ่มชั้นพอลิเมอร์เพื่อการสกัดกั้นในวัสดุหลักนี้สามารถทำได้หลายวิธีตั้งแต่การเคลือบฟิล์ม การประกบ และการรีดร่วมโดยสมบัติการสกัดกั้นรวมของฟิล์มหลายชั้นสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้ (Salame , 1986)

$$\frac{L_1}{P_1} + \frac{L_2}{P_2} + \frac{L_3}{P_3} + \cdots\cdots\cdots\cdots = \frac{L_T}{P_T}$$

เมื่อ L_1 , L_2 , L_3 เป็นความหนาของแต่ละชั้น L_T เป็นความหนารวม

P_1 , P_2 , P_3 เป็นอัตราการซึมผ่านของแต่ละชั้น P_T เป็นอัตราการซึมผ่านรวม

การเพิ่มสมบัติการสกัดกั้นของฟิล์มพลาสติก นอกจากการใช้พอลิเมอร์แล้วยังสามารถเพิ่มได้โดยการใช้อะลูมิเนียมฟอยล์ซึ่งมักจะใช้เป็นชั้นสกัดกั้นในการผลิตซองแชมพู เนื่องจากอะลูมิเนียมฟอยล์มีสมบัติเป็นชั้นสกัดกั้นทั้งในด้านการสกัดกั้นแก๊สและความชื้นได้ดีมาก ปกติจะใช้ความหนาประมาณ 0.009 มิลลิเมตร การใช้อะลูมิเนียมฟอยล์ความหนาเพียง 0.009 มิลลิเมตรนี้จะมีปัญหาในด้านการฉีกขาดได้ง่ายเนื่องจากการนำฟอยล์ไปรวมกับวัสดุที่มีการยืดตัวได้สูงอย่าง พอลิทีนซึ่งจะทำให้ฟอยล์เกิดการแตกหักและเกิดการซึมผ่านได้ในที่สุด ดังนั้นมักจะเพิ่มความแข็งแรงและความคงรูปโดยการเพิ่มชั้นกระดาษหรือฟิล์มเซลลูโลส และเพื่อให้มีสมบัติการสกัดกั้นที่ดีจะให้ฟอยล์อยู่ชั้นกลางระหว่างพอลิทีนชั้นในและกระดาษหรือฟิล์มเซลลูโลสชั้นนอก นอกจากนี้พบว่าฟอยล์ยังใช้เป็นชั้นสกัดกั้นแสงได้ดีมากอีกด้วยซึ่งจะมีความสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์แชมพูบางสูตรที่เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อถูกแสง (Gilbert , 1974)

2.4.4 กาว (adhesive)

กาว หมายถึง สารที่เมื่อแทรกอยู่ระหว่างผิววัสดุ 2 ชนิด แล้วจะมีผลทำให้วัสดุทั้งสองเกิดการประกบติดกันได้ (Paine , 1962) การเลือกกาวที่เหมาะสมจะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จในการผลิตบรรจุภัณฑ์โดยจะนำกาวมาใช้เป็นส่วนประกอบภายในโครงสร้างของวัสดุบรรจุภัณฑ์เพื่อการรวมวัสดุหลักเข้าไว้ด้วยกันหรือการใช้กาวในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ เช่น การใช้กาวขึ้นรูปกล่อง นอกจากนี้อาจใช้กาวในการใส่ป้าย (label) และการพิมพ์ภาพโดยการเคลือบแบบอัดรีด (Ashley , 1995) กาวที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์สามารถแบ่งออกตามลักษณะทางกายภาพได้ 3 ระบบคือ กาวในน้ำ (waterborne system) กาวในตัวทำละลาย (solvent system) และกาวเหลวร้อน (hot-melt system) (Kaye , 1986)

2.4.4.1 กาวในน้ำ เป็นระบบที่เก่าแก่และใช้กันมากในงานบรรจุภัณฑ์พวกกระดาษและกระดาษแข็ง สามารถทำเป็นสารประกอบได้โดยผสมกับพลาสติกไซเซอร์ ฟิลเลอร์ (filler) แอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) และสารอื่น ๆ ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงกาวให้ใช้ได้ในการผลิตฟิล์มเพื่องานบรรจุภัณฑ์ กาวในน้ำจะมีทั้งชนิดกาวธรรมชาติและกาวสังเคราะห์

<u>กาวธรรมชาติ</u> กาวที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์มีหลายชนิดรวมทั้งพวกแป้ง โปรตีน กาวจากสัตว์ คาซอิน (casein) และ น้ำยาง แป้งจะเป็นกาวที่ยึดติดได้ดีมากกับกระดาษหรือพวกที่ไม่ใช้เทอร์โมพลาสติกซึ่งจะให้ความต้านทานต่อความร้อนได้ดี ใช้งานง่าย มีราคาถูกและทำความสะอาดได้ง่าย ส่วนโปรตีนจากสัตว์จะมีการใช้งานในบรรจุภัณฑ์น้อย แต่กาวที่ได้จากสัตว์โดยการนำส่วนผิวหรือกระดูกของสัตว์มาสกัดเอาคอลลาเจน (collagen) ให้แขวนลอยอยู่ในน้ำ แล้วนำมาใช้ในรูปของเจล หรือเม็ดจะนำมาใช้เป็นกาวในการผลิตกล่องกระดาษแข็งได้ คาเซอินก็เป็นกาวธรรมชาติอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ 2 อย่างคือ ใช้เป็นกาวในการติดฉลากขวดเบียร์และใช้เป็นส่วนผสมของกาวในการประกบอะลูมิเนียมฟอยล์กับกระดาษ ส่วนน้ำยางจากต้นยางนั้นใช้มากในการเป็นส่วนประกอบของกาวเพื่อใช้ในการประกบฟิล์มพอลิเอทิลีนกับกระดาษ

<u>กาวสังเคราะห์</u> พอลิไวนิลอะซีเตดจะเป็นกาวสังเคราะห์ที่ใช้กันมากรวมไปถึงโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลอะซีเตดด้วย ซึ่งจะใช้เอทิลีนหรืออะคริลิคเอสเตอร์เข้าร่วมเพื่อปรับปรุงสมบัติในด้านความยืดหยุ่น การต้านทานน้ำมันและการยึดติด นอกจากนี้พบว่าการใช้โคพอลิเมอร์จะเหมาะสำหรับการยึดติดวัสดุที่มีรูพรุนเข้ากับวัสดุที่ไม่มีรูพรุน เช่นการยึดติดระหว่างฟิล์มกับกระดาษแข็ง กาวสังเคราะห์ตัวอื่น ๆ เช่น พอลิอะคริเลต (polyacrylate) ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ (phenol formadehyde) และพวกยางสังเคราะห์ เนื่องจากการใช้กาวในน้ำนี้จะไม่มีตัวทำละลายเข้าไปเกี่ยวข้องจึงทำให้กาวชนิดนี้มีความปลอดภัยในแง่การไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีรส

2.4.4.2 กาวในตัวทำละลาย การใช้ตัวทำละลายจะเป็นการปรับปรุงการยึดติด ความหนืด และความเร็วในการป้อนกาว (Danton , 1990) มักจะใช้ในการประกบฟิล์มอ่อน แต่เนื่องจากปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัจจัยทางด้านความปลอดภัยทำให้มีการใช้กาวในตัวทำละลายน้อย และจะใช้ก็ต่อเมื่อการใช้กาวในน้ำหรือกาวเหลวร้อนใช้ไม่ได้ เช่น พบว่าการใช้สารละลายยางจะค่อย ๆ หมดไป แต่จะมีการใช้กาวในน้ำหรือกาวเหลวร้อนแทน กาวพอลิยูรีเทน (polyurethane) จะใช้มากในการประกบฟิล์มพลาสติกในบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนซึ่งจะให้โครงสร้างเป็นฟิล์มหลายชั้นที่พบในการผลิตบรรจุภัณฑ์ประเภทถุง ถุงปิดผนึกทั้ง 4 ด้านสำหรับการบรรจุอาหารประเภทขนมคบเคี้ยว เนื้อสัตว์ และเนย ถึงแม้ว่าการใช้กาวพอลิยูรีเทนจะให้สมบัติด้านการยึดติด ความเหนียว ความยืดหยุ่น ความใส และความต้านทานต่อความร้อนได้ดีเพียงใดก็ตาม แต่เนื่องจากความเป็นพิษและปัญหามากมายจากการใช้ตัวทำละลายจึงมีการหันมาใช้อะคริลิคที่มีโครงสร้างคล้ายในน้ำแทน ซึ่งจะเหมาะต่อการบรรจุอาหารประเภทขนมคบเคี้ยว

2.4.4.3 กาวเหลวร้อน เป็นกาวเทอร์โมพลาสติกที่อยู่ในรูปของแข็ง 100 เปอร์เซ็นต์ แต่จะแปรสภาพเป็นของเหลวร้อนเมื่อถูกความร้อนในขณะใช้งาน โดยมีอุณหภูมิในการใช้งานในช่วง 120 ถึง 210 องศาเซลเซียสขึ้นไป และจะเกิดพันธะในการประกบเมื่อเย็นตัวลง (Shorten , 1967) การพัฒนากาวชนิดนี้เพื่อนำมาใช้ในงานบรรจุภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกาวชนิดนี้จะมีอัตราการเกิดพันธะได้เร็วทำให้ได้อัตราการผลิตบรรจุภัณฑ์สูง วัสดุเทอร์โมพลาสติกที่ใช้กันมากชนิดหนึ่งคือ โคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับไวนิลอะซีเตต เนื่องจากโคพอลิเมอร์ชนิดนี้มีเสถียรภาพในขณะเป็นของเหลวดี มีการยึดติดและความเหนียวในช่วงอุณหภูมิกว้างดี นอกจากนี้อาจปรับปรุงสมบัติการเป็นกาวโดยการทำเป็นสารประกอบกับพวกขี้ผึ้งหรือเรซินตัวอื่น ๆ กาวเหลวร้อนที่มีการใช้ถัดมาจะมีพื้นฐานมาจากพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งจะมีการยึดติดไม่ดีนักแต่ก็พอใช้ได้กับการเชื่อมกระดาษ ส่วนกาวที่มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากพอลิโพรพิลีนอสัญฐานซึ่งเป็นผลิตผลข้างเคียงจากการพอลิเมอร์ไรเซชันไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะมีราคาถูก แต่จะมีความอ่อนแอและมีการใช้งานจำกัด กาวเหลวร้อนตัวอื่น ๆ เช่น กาวเหลวร้อนที่มีพื้นฐานมาจากยางเทอร์โมพลาสติก พอลิแอไมด์ พอลิเอสเตอร์ จากสูตรส่วนประกอบของกาวเหลวร้อนจะเห็นว่ากาวจะไม่เกิดปัญหาในด้านกลิ่นรส และความเป็นพิษ เนื่องจากกาวชนิดนี้ไม่มีการใช้ตัวทำละลายจึงทำให้มีความปลอดภัยต่อการใช้งาน นอกจากนี้พบว่ากาวเหลวร้อนยังสามารถช่วยให้วัสดุที่มีการยึดติดกับกระดาษได้ยาก เช่น อะลูมิเนียมฟอยล์หรือฟิล์มพอลิเมอร์ให้เกิดการยึดติดกันได้

2.5 การปิดผนึกฟิล์ม (sealing of film)

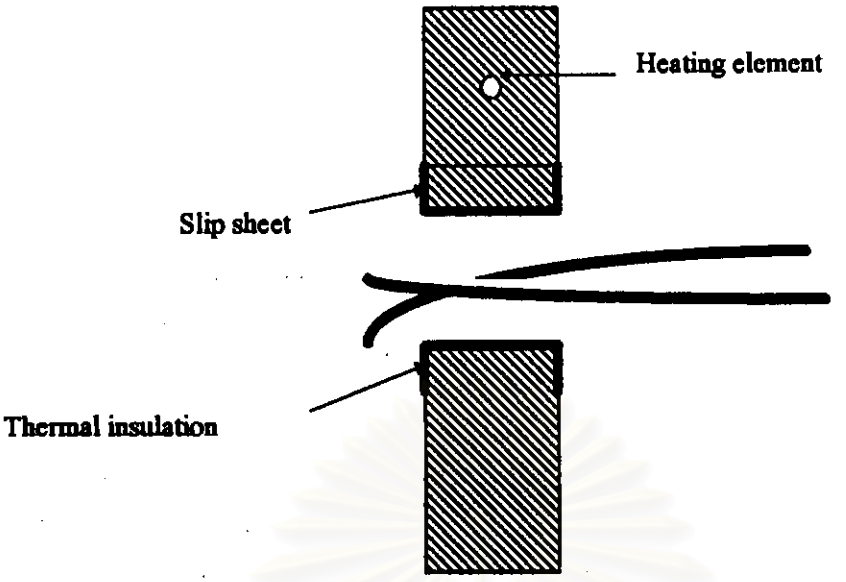
การปิดผนึก (sealing) หมายถึง การทำให้เกิดพันธะระหว่างฟิล์มพลาสติก ซึ่งจะมีความหมายแตกต่างจากการเชื่อม (welding) ที่หมายถึง การทำให้เกิดพันธะระหว่างแผ่นพลาสติก (Jambro , 1976) การทำให้เกิดพันธะระหว่างฟิล์มพลาสติกหรือแผ่นพลาสติกนี้จะมีอยู่หลายวิธีที่ต้องอาศัยปัจจัยต่าง ๆ ที่จะทำให้เกิดพันธะหรือการเชื่อมนั้นขึ้นได้คือ การใช้แรงทางกล การใช้ความร้อน การใช้ไฟฟ้าความถี่สูง (high frequency current) การใช้อุลตราโซนิค และการใช้กาว (Briston , 1983) การใช้ความร้อนในการปิดผนึกหรือการเชื่อมนี้เป็นวิธีหนึ่งที่มีความสำคัญและนิยมใช้กันมากสำหรับเทอร์โมพลาสติก โดยความร้อนที่ให้แก่เทอร์โมพลาสติกอาจเป็นการให้ความร้อนโดยตรงหรือโดยทางอ้อมก็ได้ เมื่อกล่าวถึงการปิดผนึกด้วยความร้อนมักจะหมายถึงการให้ความร้อนโดยตรงต่อเทอร์โมพลาสติก แต่การปิดผนึกด้วยแรงทางกล ไฟฟ้าความถี่สูง อุลตราโซนิค หรือการใช้กาวนั้นมักจะมีการให้ความร้อนโดยทางอ้อมเข้าไปเป็นส่วนร่วมด้วยเสมอ เช่น การใช้อุลตราโซนิคจะเป็นวิธีที่ทำให้เกิดความร้อน โดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานการสั่นทางกลที่ส่งไปยังผิวสัมผัสของฟิล์มทั้งสอง ทำให้ผิวทั้งสองเกิดการสั่นแล้วเปลี่ยนแรงทางกลนี้ให้เป็นความร้อนที่จะหลอมผิวฟิล์มให้เกิดการเชื่อมติดกันได้ จะเห็นว่าการใช้อุลตราโซนิคก็เป็นการปิดผนึกด้วยความร้อนเช่นกัน แต่เป็นการให้ความร้อนโดยทางอ้อม (Young , 1987)

2.5.1 การปิดผนึกด้วยความร้อน (heat sealing)

เป็นการปิดผนึกโดยการให้ความร้อนโดยตรงต่อฟิล์มเทอร์โมพลาสติกโดยวิธีการให้ความร้อนนี้จะมีอยู่ 2 แบบคือ การให้ความร้อนแบบต่อเนื่องซึ่งจะเรียกว่า การปิดผนึกด้วยความร้อนแบบเทอร์มอล (thermal heat sealing) และการให้ความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งจะเรียกว่า การปิดผนึกด้วยความร้อนแบบอิมพัลส์ (impulse sealing) (Farkas , 1964)

2.5.1.1 การปิดผนึกด้วยความร้อนแบบเทอร์มอล

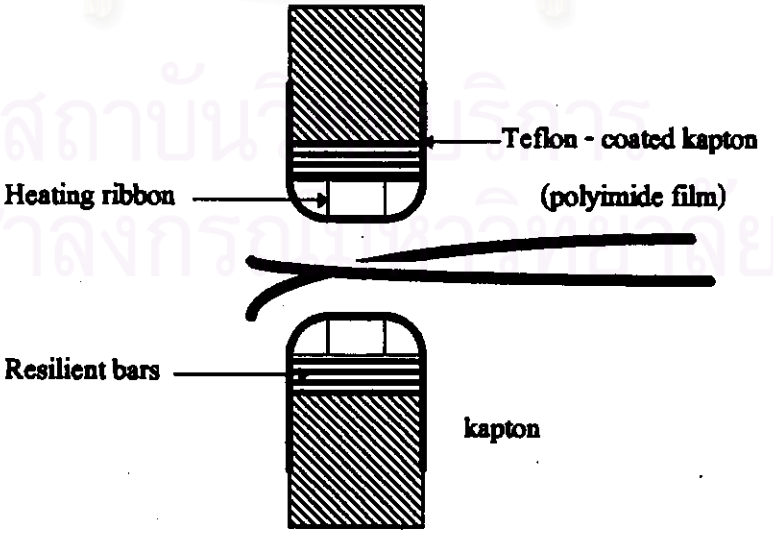
เป็นการปิดผนึกด้วยความร้อนที่ให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องและมีอุณหภูมิคงที่ แหล่งให้ความร้อนอาจมาจากไอน้ำ อากาศร้อน น้ำร้อน น้ำมันร้อน และไฟฟ้า จะให้ความร้อนต่อเครื่องมือปิดผนึก (sealing tool) ที่จะนำความร้อนไปสู่ฟิล์มพลาสติกที่ต้องการปิดผนึก เครื่องมือปิดผนึกอาจมีลักษณะเป็นแท่ง (bar or jaw) เป็นเส้นลวด เป็นแท่งปิดผนึกที่หมุนรอบได้ (rotary-type bar) หรือเป็นแถบยาง (band) ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานโดยที่แท่งปิดผนึกอาจสลักเป็นลวดลายเพื่อให้ได้รอยผนึกที่แข็งแรงขึ้น การปิดผนึกเริ่มจากการนำฟิล์มทั้งสองมาประกบกันภายใต้ความดัน ณ วลานี้แผ่นฟิล์มจะได้รับความร้อนโดยตรงจากแท่งปิดผนึกซึ่งอาจจะมีแหล่งให้ความร้อนเพียงด้านเดียวหรือทั้งสองด้านก็ได้ ความร้อนจะเคลื่อนผ่านผิวฟิล์มเข้าไปสู่ผิวสัมผัสระหว่างฟิล์มทั้งสอง ทำให้ผิวสัมผัสเกิดการหลอมและสร้างพันธะต่อกันขึ้น หลังจากนั้นจึงนำความดันออกปล่อยให้รอยผนึกเย็นตัวลงดังรูปที่ 2.25 (Patton , 1976) ในรูปจะเห็นว่าแท่งปิดผนึกบนจะถูกครอบด้วยแผ่นหล่อลื่น (slip sheet) ซึ่งครอบเพื่อป้องกันการเหนียวติดของฟิล์มพลาสติกกับแท่งปิดผนึกที่อุณหภูมิสูง แผ่นหล่อลื่นที่ใช้มักจะเป็นเทฟลอน (teflon) หรือยางซิลิโคน ส่วนแท่งปิดผนึกล่างจะถูกครอบด้วยฉนวนความร้อน (thermal insulation) ซึ่งมักจะใช้ยางซิลิโคน ทั้งนี้เพราะยางซิลิโคนมีสมบัติในการทนต่อความร้อนสูงและมีสมบัติการหล่อลื่น นอกจากนี้ยางซิลิโคนยังมีความยืดหยุ่นช่วยให้ได้ความดันในการปิดผนึกสม่ำเสมอ การปิดผนึกโดยวิธีนี้จะใช้ในการปิดผนึกฟิล์มพลาสติกที่บาง แต่ถ้าเป็นฟิล์มพลาสติกที่หนาอาจต้องใช้เครื่องมือที่ให้ความร้อน ณ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างฟิล์มพลาสติกทั้งสองเพิ่ม ปัจจัย 3 ประการที่ต้องควบคุมในขณะทำการปิดผนึกเพื่อให้ได้รอยผนึกที่ดีคืออุณหภูมิ ความดันและเวลาของเครื่องปิดผนึก เพราะถ้าหากปัจจัยทั้ง 3 นี้มีค่าน้อยเกินไปจะทำให้รอยผนึกเกิดการแยกออกจากกันได้ แต่ถ้าปัจจัยทั้ง 3 นี้มากเกินไปพลาสติกอาจเกิดการเสียรูปและเกิดฟองอากาศขึ้นได้ การควบคุมปัจจัยทั้ง 3 นี้จะต้องมีความสอดคล้องกัน เช่นถ้าใช้ความดันสูงมากก็ควรใช้เวลาน้อยลง ส่วนอุณหภูมิที่ใช้จะขึ้นอยู่กับฟิล์มพลาสติกที่ใช้ ฟิล์มพลาสติกที่ใช้กันมากในการปิดผนึกโดยวิธีนี้คือ พอลิเอทิลีนและไวนิล โดยพอลิเอทิลีนจะตั้งที่อุณหภูมิประมาณ 121 องศาเซลเซียส และไวนิลจะตั้งที่อุณหภูมิประมาณ 185 องศาเซลเซียส ข้อดีของวิธีนี้คือ ราคาถูก ง่าย และรวดเร็ว ส่วนข้อเสียคือในการปิดผนึกมิได้ปล่อยให้รอยผนึกเย็นตัวลงภายใต้ความดัน ทำให้รอยผนึกไม่แข็งแรงเนื่องจากอาจจะมีบางส่วนของฟิล์มหลอมเหลวอยู่ขณะเปิดแท่งปิดผนึก ดังนั้นวิธีที่จะกล่าวถึงต่อไปจะเป็นวิธีที่มีการเย็นตัวของรอยผนึกภายใต้ความดัน วิธีนั้นก็คือ การปิดผนึกด้วยความร้อนแบบอิมพัลส์



รูปที่ 2.25 การปิดผนึกด้วยความร้อนแบบเทอร์มอล

2.5.1.2 การปิดผนึกด้วยความร้อนแบบอิมพัลส์

เป็นการปิดผนึกด้วยความร้อนที่เหมือนกับการปิดผนึกด้วยความร้อนแบบเทอร์มอลตรงที่ต้องการความร้อนจากภายนอกเข้ามาหลอมฟิล์มเทอร์โมพลาสติก แต่จะต่างจากการปิดผนึกด้วยความร้อนแบบเทอร์มอลตรงที่การปิดผนึกด้วยความร้อนแบบอิมพัลส์จะมีแท่งปิดผนึกให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิไม่คงที่และให้ความร้อนเป็นจังหวะ โดยอุณหภูมิของแท่งปิดผนึกจะสูงขึ้นเมื่ออยู่ในช่วงให้ความร้อนและจะลดลงเมื่อปล่อยให้รอยผนึกเย็นตัวลงภายใต้ความดัน ดังนั้นแท่งปิดผนึกควรจะมีค่าความจุความร้อนต่ำเพื่อที่จะทำให้ร้อนและเย็นตัวได้อย่างรวดเร็ว ส่วนประกอบของการปิดผนึกด้วยความร้อนแบบอิมพัลส์ แสดงดังรูปที่ 2.26 (Young , 1986)



รูปที่ 2.26 การปิดผนึกด้วยความร้อนแบบอิมพัลส์

I17150474

แท่งปิดผนึกแต่ละแท่งจะถูกครอบด้วยผิวที่ยืดหยุ่น (resilient surface) ของยางซิลิโคน แล้วลวดนิโครมจะวางอยู่เหนือผิวที่ยืดหยุ่นนี้และถูกครอบด้วยฉนวนไฟฟ้าของวัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้า เช่น ยางซิลิโคนเคลือบเส้นใยแก้ว เทฟลอนเคลือบเส้นใยแก้ว หรือเทฟลอนเคลือบแคพตัน (kapton) เมื่อวางฟิล์มพลาสติกระหว่างแท่งปิดผนึกทั้งสอง แท่งปิดผนึกจะปิดลงภายใต้ความดันแล้วจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดนิโครมในระยะเวลาสั้น ๆ ความต้านทานของลวดนิโครมจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นความร้อนใช้ในการหลอมฟิล์มให้ผนึกติดกัน หลังจากนั้นความร้อนก็จะถูกนำออกโดยน้ำหรืออากาศที่อยู่ภายในแท่งปิดผนึกและลวดนิโครมก็จะถูกทำให้เย็นตัวลงด้วย รอยผนึกก็จะถูกทำให้เย็นตัวลงภายใต้ความดันที่ยังกดทับอยู่ เมื่อรอยผนึกเย็นตัวลงแล้วจึงค่อยเปิดแท่งปิดผนึก การทำให้รอยผนึกเย็นตัวภายใต้ความดันนี้จะทำให้ได้รอยผนึกที่แข็งแรง เนื่องจากรอยผนึกถูกทำให้เย็นตัวลงก่อนที่จะถูกแรงภายนอกมากระทำหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโมเลกุล ทำให้ได้รอยผนึกที่ดีไม่ย่น ปัจจัยที่ต้องควบคุมในการปิดผนึกนี้คือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลา โดยที่การตั้งเวลาจะขึ้นอยู่กับความหนาและชนิดของฟิล์มพลาสติกที่ใช้ รอยผนึกที่กว้างนั้นจะต้องการความดันที่สูงขึ้น และเมื่อไรก็ตามที่เพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนแล้วจะต้องมีการเพิ่มอัตราการเย็นตัวด้วย จะเห็นว่าการปิดผนึกด้วยวิธีนี้จะมีอัตราการเย็นตัวเข้าไปเกี่ยวข้องด้วยทำให้อัตราเร็วของการปิดผนึกวิธีนี้ช้ากว่าวิธีการปิดผนึกด้วยความร้อนแบบเทอร์มอล นอกจากนี้ลวดนิโครมจะมีการขยายตัวในขณะให้ความร้อนและจะหดตัวกลับในขณะที่ทำให้เย็นตัวลงจึงมีผลทำให้ลวดนิโครมเกิดความล้าและแตกหักได้ในที่สุด จึงต้องมีการเปลี่ยนลวดนิโครมบ่อย ๆ การปิดผนึกด้วยวิธีนี้จึงมีค่าใช้จ่ายสูง ส่วนใหญ่แล้ววิธีนี้จะใช้ก็ต่อเมื่อวิธีการปิดผนึกด้วยความร้อนแบบเทอร์มอลใช้ไม่ได้ผลเท่านั้น

2.5.2 การทดสอบรอยผนึก

2.5.2.1 ความแข็งแรงของรอยผนึก (seal strength)

ความแข็งแรงของรอยผนึก หมายถึง แรงที่ใช้ในการแยกรอยผนึกออกจากกันต่อความกว้างของรอยผนึก มักจะรายงานในหน่วยของนิวตัน/เซนติเมตร แรงที่ใช้ในการแยกรอยผนึกในที่นี้จะหมายถึงแรงที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสระหว่างสารปิดผนึก (sealant) ที่นำมาประกบกัน ณ ผิวสัมผัสนี้จะเกิดการสูญเสียความเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากสารปิดผนึกจะเกิดการหลอมเข้าด้วยกันในขณะทำการปิดผนึก ดังนั้นในบางครั้งการขาดอาจเกิดที่วัสดุหลักก็ได้ เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงของรอยผนึกจะมีรูปแบบของการขาด (mode of failure) ได้ใน 3 ลักษณะคือ การลอก (peel) การแยกประกบ (delamination) และฟิล์มขาด (film break) ถ้าสารปิดผนึกมีแรงยึดระหว่างกันต่ำ ตัวอย่างเช่น ขี้ผึ้ง การขาดของรอยผนึกจะอยู่ที่ผิวสัมผัสของสารปิดผนึกซึ่งจะเข้าไปไม่ถึงสารปิดผนึก การขาดในลักษณะนี้เรียกว่าการลอก ในบางครั้งสารปิดผนึกจะเกิดการแตกใกล้ ๆ กับรอยปิดผนึกและจะเกิดการลอกออกจากโครงสร้างที่สมดุลของฟิล์มในกรณีนี้แรงที่ทำให้สารปิดผนึกเกิดการแตกจนทำให้เกิดการลอกออกจากวัสดุหลักนี้จะมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงพันธะ (bond strength) ที่ใช้ยึดระหว่างสารปิดผนึกกับวัสดุหลัก นั่นคือแรงที่ทำให้สารปิดผนึกแยกออกจากวัสดุหลัก เรียกลักษณะการแยกของสารปิดผนึกออกจากวัสดุหลักนี้ว่าเป็นการขาดแบบการแยกประกบ และในบางครั้งโครงสร้างทั้งหมดของฟิล์มอาจเกิดการขาดในลักษณะถูกดึงแยกออกจากกัน (tensile mode) โดยไม่เกิดการขาดที่ตำแหน่ง

รอยผนึก แต่จะเกิดการขาดที่ฟิล์มแทนเรียกลักษณะการขาดนี้ว่าฟิล์มขาด ซึ่งการขาดในลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความแข็งแรงของรอยผนึกมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มนั่นเอง การทดสอบความแข็งแรงของรอยผนึกสามารถทดสอบได้ตามมาตราฐาน JIS Z0238 หรือ ASTM F88 ซึ่งจะเป็นการทดสอบรอยปิดผนึกด้วยความร้อนที่อธิบายถึงขั้นตอนการทดสอบ เครื่องมือที่ใช้และวิธีที่ใช้ร่วมกับการทดสอบ ทำให้สามารถเปรียบเทียบความแข็งแรงของรอยผนึกระหว่างวัสดุต่างชนิดกันหรือวิธีการปิดผนึกต่างกันได้ การทดสอบความแข็งแรงของรอยผนึกเป็นวิธีที่ไม่สามารถวัดความสมบูรณ์หรือความต่อเนื่องของรอยผนึกได้ ซึ่งในบางกรณีพบว่ารอยผนึกมีค่าความแข็งแรงของรอยผนึกสูงแต่กลับให้ค่าความสมบูรณ์ของรอยผนึกต่ำ (Young , 1986)

2.5.2.2 ความทนต่อการลอก (peel strength)

ความทนต่อการลอก หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงต่อความกว้างของรอยผนึกที่ต้องใช้ในการแยกวัสดุที่ยึดหลุ่นออกจากวัสดุแข็งหรือออกจากวัสดุอ่อน การปิดผนึกบรรจุภัณฑ์เป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งต่อการป้องกันผลิตภัณฑ์ เพราะถึงแม้ว่าบรรจุภัณฑ์จะมีการใช้วัสดุที่มีการสกัดกั้นสูงมากเพียงใดก็ตามแต่ก็จะไม่มีความหมายเลย หากปราศจากรอยปิดผนึกที่มีความสมบูรณ์และความต่อเนื่อง การมีรูรั่วหรือช่องว่างเพียงเล็กน้อยภายในรอยผนึกจะเป็นสาเหตุทำให้บรรยากาศภายนอกสามารถทะลุผ่านบรรจุภัณฑ์เข้าทำลายผลิตภัณฑ์ภายในได้ พบว่ารอยผนึกที่ลอกได้ (peelable seal) สามารถควบคุมความสมบูรณ์ของบรรจุภัณฑ์ได้ ดังนั้นจึงมีการวัดค่าความทนต่อการลอกเพื่อใช้ในการบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของรอยผนึกซึ่งสามารถวัดได้ตามมาตราฐาน JIS K6854 หรือ ASTM D1876 ส่วนในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยผนึกจะดูค่าความสมบูรณ์ของรอยผนึกได้ที่รูปแบบของการขาดของรอยผนึกขณะทำการทดสอบ นอกจากนี้การหาค่าความสมบูรณ์ของรอยผนึกอาจวัดโดยการใช้ถุงที่มีการปิดผนึกทั้ง 4 ด้านวางในอ่างสุญญากาศภายใต้น้ำ นำอากาศในอ่างออกโดยปั๊มสุญญากาศซึ่งจะมีผลทำให้ความดันภายในถุงเพิ่มขึ้น การเกิดฟองอากาศจะเป็นจุดบ่งบอกถึงการมีรอยรั่วเกิดขึ้นบนรอยผนึก (Young , 1986)

2.5.2.3 ความแข็งแรงของรอยผนึกขณะร้อน (hot tack)

ความแข็งแรงของรอยผนึกขณะร้อน หมายถึง ความต้านทานต่อการแยกของรอยผนึกทันทีที่นำความดันและอุณหภูมิในการปิดผนึกออก ความแข็งแรงของรอยผนึกขณะร้อนเป็นสมบัติที่สำคัญของสารปิดผนึกที่เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อน โดยเฉพาะในงานที่ต้องการอัตราเร็วสูง (Young , 1986) นอกจากนี้ความแข็งแรงของรอยผนึกขณะร้อนยังมีความสำคัญอย่างมากต่อการบรรจุโดยเครื่องขึ้นรูป-บรรจุ-ปิดผนึก ในกรณีที่เครื่องทำงานในแนวตั้ง รอยปิดผนึกในแนวขวางจะต้องมีค่าความแข็งแรงของรอยผนึกขณะร้อนสูงเพียงพอที่จะต้านทานน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุลงมา และรอยปิดผนึกในแนวตั้งจะต้องสามารถต้านทานแรงดันของแก๊สที่พ่นเข้าไปได้ ในทำนองเดียวกับเครื่องบรรจุในแนวนอน แม้จะไม่ต้องรับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์โดยตรง แต่รอยปิดผนึกจะต้องมีค่าความแข็งแรงของรอยผนึกขณะร้อนสูงพอที่จะต้านทานแรงดันของแก๊สที่พ่นเข้าไป

(งามทิพย์ , 2537) ส่วนมากขี้ผึ้งจะมีค่าความแข็งแรงของรอยผนึกขณะร้อนต่ำ แต่ฟิล์มโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนโดยเฉพาะไอโอโนเมอร์จะมีค่าความแข็งแรงของรอยผนึกขณะร้อนสูง

2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการปิดผนึก

ปัจจัยที่มีผลต่อการปิดผนึกนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ปัจจัยคือ ปัจจัยจากเครื่องจักร ปัจจัยจากเรซิน และปัจจัยจากฟิล์ม (Robertson , 1993)

2.5.3.1 ปัจจัยจากเครื่องจักร (machine factors)

การปิดผนึกฟิล์มเพื่อให้ได้รอยผนึกที่ดีนั้นปัจจัยสำคัญที่จะต้องควบคุมในขณะทำการปิดผนึกคือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาของเครื่องปิดผนึก ทั้งนี้การเลือกค่าที่เหมาะสมก็ขึ้นอยู่กับฟิล์มที่จะทำการปิดผนึก (Schricker , 1986) ตามปกติแล้วมักจะเลือกอุณหภูมิในการปิดผนึกให้สูงกว่าจุดหลอมเหลวสุดท้าย (final melting point) ของฟิล์มเล็กน้อย ส่วนความดันที่ใช้ควรให้อยู่ในช่วงต่ำที่สุดคือประมาณ 5 ถึง 15 นิวตัน/ตารางเซนติเมตร เพื่อลดการเกิดรอยบุบเบี้ยวบนผิวผนึก เวลาที่ใช้ควรจะยาวนานเพียงพอที่จะทำให้ผิวฟิล์มมีอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิของแท่งปิดผนึก (Meka และ Stehling , 1994) จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการปิดผนึกจะเป็นไปตามสมการ (Schricker , 1986)

$$T = \frac{const}{t} + T_s$$

เมื่อ T = อุณหภูมิแท่งปิดผนึก

Ts = อุณหภูมิที่ต้องการเพื่อให้เกิดรอยผนึก ณ จุดที่สัมผัสกับผิวฟิล์ม

t = เวลาในการปิดผนึก

const = ค่าคงที่

จากสมการจะเห็นว่าหากต้องการอัตราการผลิตสูงหรือใช้เวลาในการปิดผนึกน้อยแล้วจะต้องเพิ่มอุณหภูมิในการปิดผนึกให้สูงขึ้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิจะถูกจำกัดจากความร้อนที่สูงขึ้นซึ่งอาจเข้าไปทำลายฟิล์มบรรจุภัณฑ์ได้ เช่น อาจทำให้เกิดการแยกประกบของฟิล์มหลายชั้นหรือเกิดการเสียรูปของฟิล์มพลาสติกในตำแหน่งที่ปิดผนึก (Schricker , 1986) การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการปิดผนึกให้สูงขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยผนึกสูงขึ้น โดยเวลาในการปิดผนึกจะมีผลต่อความแข็งแรงของรอยผนึกในช่วงเวลาสั้น ๆ เท่านั้น หากยังคงเพิ่มเวลาต่อไปอีกก็จะไม่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยผนึก แต่อุณหภูมิยังคงเป็นปัจจัยสำคัญต่อความแข็งแรงของรอยผนึก (Meka และ Stehling , 1994) เช่น ในการศึกษาการปิดผนึกด้วยความร้อนของฟิล์มพอลิ-โพรพิลีนชนิดหล่อหรือซีพีพี (cast polypropylene : CPP) พบว่าอุณหภูมิในการปิดผนึกจะมีผลต่อการเพิ่มค่าความแข็งแรงของรอยผนึกมากกว่าเวลาที่ใช้ในการปิดผนึก เมื่อให้ความดันคงที่เท่ากับ 15 ปอนด์แรงต่อตารางนิ้ว (psi) (Nicastro , 1993) ส่วนในการศึกษาด้าน

ความดันของการปิดผนึกพบว่าความดันจะมีผลต่อความแข็งแรงของรอยผนึกน้อยมากหรืออาจไม่มีเลยเช่น ในการศึกษาฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ความดัน 27.56 และ 275.56 นิวตัน/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 80 - 127 องศาเซลเซียส พบว่าความดันมีผลต่อความแข็งแรงของรอยผนึกน้อยมาก และ ในการศึกษาฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเมื่อใช้ความดัน 0.69 ถึง 413.4 นิวตัน/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส พบว่าความดันไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยผนึกเลย (Meka และ Stehling, 1994)

2.5.3.2 ปัจจัยจากเรซิน (resin factors)

เรซินที่นำมาใช้เป็นชั้นวัสดุหลักหรือชั้นสารปิดผนึกในการปิดผนึกฟิล์มนั้นมีมากมายหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดหรือภายในชนิดเดียวกันจะมีสมบัติบางประการแตกต่างกัน ความแตกต่างในสมบัติบางประการนี้เองจะมีผลต่อการปิดผนึก ดังได้กล่าวมาแล้วในวัสดุเพื่อการปิดผนึก สารปิดผนึกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีความหนาแน่น ดัชนีการหลอมเหลว และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน จะมีผลต่ออุณหภูมิในการปิดผนึก และช่วงอุณหภูมิของการปิดผนึก กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นหรือดัชนีการหลอมเหลวลดลงจะทำให้อุณหภูมิในการปิดผนึกสูงขึ้น แต่ช่วงอุณหภูมิของการปิดผนึกจะแคบลง และถ้าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลแคบก็จะมีผลทำให้ช่วงอุณหภูมิของการปิดผนึกแคบตามด้วย

พอลิโอลิฟินหลายชนิดสามารถใช้เป็นชั้นปิดผนึกได้ในโครงสร้างของบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนโดยการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ ภาวะในการบรรจุผลิตภัณฑ์ และวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เพื่อให้ได้ชั้นปิดผนึกที่มีเสถียรภาพ (seal layer performance) จะมีปัจจัยหลายประการที่ต้องคำนึงถึงเมื่อทำการปิดผนึก ในแง่ปัจจัยทางด้านพอลิเมอร์แล้วจะมีการควบคุมที่โครงสร้างโมเลกุลและสารเติมแต่ง (additive) (Dirk , 1992) สำหรับเอทิลีนพอลิเมอร์การควบคุมโครงสร้างโมเลกุลสามารถแบ่งแยกได้โดยอาศัยตัวแปรทางโครงสร้างคือ น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล ชนิด ปริมาณ และการกระจายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์สาขา (branch) สำหรับเอทิลีนพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลถูกอธิบายได้โดยใช้ดัชนีการหลอมเหลว และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลจะใช้อัตราส่วนดัชนีการหลอมเหลว (melt index ratio) เป็นสิ่งอธิบาย ปริมาณของพอลิเมอร์สาขาสามารถควบคุมโดยการควบคุมปริมาณโคโมโนเมอร์ที่ใช้ และจะใช้ความหนาแน่นในการวัดปริมาณของพอลิเมอร์สาขา ในการทดลองเปรียบเทียบฟิล์ม 3 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เอทิลีนไวนิลอะซีเตด และเอทิลีนพอลิเมอร์ตัวใหม่ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของโคโมโนเมอร์แคบ พบว่าเอทิลีนพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของโคโมโนเมอร์แคบนี้จะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก ๆ หรือวีแอลดีพีอี (very low density polyethylene : VLDPE) นอกจากนี้การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของโคโมโนเมอร์แคบจะทำให้ได้โครงสร้างผลึกที่มีความสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบที่ดัชนีการหลอมเหลวและความหนาแน่นเท่ากัน ในการเปรียบเทียบฟิล์มทั้ง 3 ในแง่ของการปิดผนึกพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการปิดผนึกต่ำ เอทิลีนพอลิเมอร์ตัวใหม่จะให้ค่าความแข็งแรงของรอยผนึกขณะร้อน และความแข็งแรงของรอยผนึกสูง เนื่องจากการมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอนั้นเองที่จะ

ช่วยให้ชั้นปิดผนึกมีเสถียรภาพดีขึ้น ปกติการเติมสารเติมแต่งลงในส่วนผสมของฟิล์มมักจะเป็นสารลื่น (slip) หรือ สารป้องกันการเหนียวติด (antiblock) ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเหนียวติดของฟิล์มกับแท่งปิดผนึก ซึ่งถ้าหากมีการใช้สารเติมแต่งน้อยลงจะช่วยทำให้การปิดผนึกดีขึ้นเมื่อทำการปิดผนึกด้วยความร้อน (Dirk ,1992) ผลของการเติมสารเติมแต่งในการปิดผนึกด้วยความถี่สูงจะแตกต่างจากการปิดผนึกด้วยความร้อน นั่นคือในการเติมสารลื่นลงในส่วนผสมของฟิล์มพบว่า ถ้าหากเป็นฟิล์มบางสารลื่นจะไม่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยผนึก แต่ถ้าหากเป็นฟิล์มหนาสารลื่นจะช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงของรอยผนึก ส่วนสารป้องกันการเหนียวติดจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงของรอยผนึกมากกว่าสารลื่น เมื่อเติมลงไปเป็นส่วนประกอบของฟิล์ม และในการศึกษาผลของโคโมโนเมอร์ที่มีผลต่อความสามารถในการปิดผนึกของการปิดผนึกด้วยความถี่สูงนั้นพบว่า เมื่อปริมาณโคโมโนเมอร์เพิ่มขึ้นความสามารถในการปิดผนึกจะเพิ่มขึ้นด้วยและชนิดของโคโมโนเมอร์ที่มีผลต่อความสามารถในการปิดผนึกจะเรียงจากมากไปหาน้อยดังนี้ บิวทิล อะคริเลต > คาร์บอนมอนอกไซด์ โคพอลิเมอร์ > เมทิล อะคริเลต โคพอลิเมอร์ > ไวนิลอะซีเตต โคพอลิเมอร์ > อะคริลิคแอซิดซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการปิดผนึกน้อยที่สุด (Davis , 1995)

จากการศึกษาการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกในระหว่างการปิดผนึกด้วยความร้อนของฟิล์มพอลิโพรพิลีน พบว่าความแข็งแรงของรอยผนึกจะสูงขึ้นเมื่อมีผลึกเพิ่มขึ้นแต่ก็มิได้หมายความว่าความแข็งแรงของรอยผนึกที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลึก การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของรอยผนึกจะพิจารณาจากปริมาณการแลกเปลี่ยนสายโซ่พอลิเมอร์ของฟิล์มทั้งสองที่นำมาสัมผัสกันในขณะทำการปิดผนึก โดยที่การเกิดผลึกจะเกิดขึ้นหลังจากการแลกเปลี่ยนสายโซ่พอลิเมอร์หลอมเหลว ดังนั้นความเป็นผลึกจะมีผลต่ออัตราการแลกเปลี่ยนของสายโซ่พอลิเมอร์น้อยและยังผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยผนึกน้อยด้วย นอกจากนี้การเกิดผลึกในปริมาณมากจะมีผลทำให้บริเวณที่ทำการปิดผนึกมีความเปราะ ฟิล์มชั้นปิดผนึกอาจเกิดการแยกประกบหรือเกิดการแตกหักได้เมื่อทำการหักงอฟิล์ม (Nicastro , 1993)

2.5.3.3 ปัจจัยจากฟิล์ม (film factors)

ปัจจัยจากฟิล์มที่มีผลต่อการปิดผนึกมีดังนี้

<u>ความหนาของชั้นกาว</u> ในส่วนประกอบของฟิล์มหลายชั้นจะมีชั้นกาวที่ใช้เพื่อเชื่อมแผ่นฟิล์มทั้งสองโดยกาวที่ใช้เชื่อมจะต้องมีความแข็งแรงสามารถสร้างพันธะกับฟิล์มทั้งสองได้ พันธะที่สร้างขึ้นจะต้องมีความต่อเนื่องตลอดช่วงของฟิล์มเพื่อป้องกันมิให้ฟิล์มเกิดรูรั่วขึ้น การทดสอบความต่อเนื่องของกาวสามารถทดสอบได้โดยการวัดความทนต่อการลอกของฟิล์มระหว่างชั้นกาวหรือฟิล์มที่กาวสร้างพันธะอยู่ซึ่งจะมีความหนาของกาวเข้าไปเกี่ยวข้องด้วย ในการทดสอบหากพลังงานที่ใช้ในการลอกฟิล์มให้แยกออกจากกันเป็นพลังงานที่ผิวจริง ๆ (true surface energy) คือ พลังงานไม่เกิดการแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อของกาวเลย แล้วจะพบว่าแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิว (peel force) และพลังงานที่ผิวจะไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของกาว แต่จากการทดลองจะสังเกตเห็นว่าเมื่อความหนาของชั้นกาวเพิ่มขึ้นแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวก็จะสูงขึ้นในความหนาของกาวระดับหนึ่งแล้วจะคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับ

ความหนาของกาวอีกต่อไป ในช่วงแรกที่ความหนาของกาวไม่สูงมากนักแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวจะแปรผันตรงกับความหนาของกาวนั้นสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความหนาของกาวมากขึ้น ปริมาตรของกาวที่ถูกทำให้เสียรูปต่อพื้นที่ในการแยกก็จะสูงขึ้น ดังนั้นงานทั้งหมดที่ใช้ในการลอกก็จะสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นไปตามสมการของอิการาชิ (Igarashi) คือ

$$\frac{2P}{\omega} = 2W_a + Ua$$

เมื่อ P = แรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวในลักษณะการดึงแบบตัวที
Wa = พลังงานที่ผิว (surface energy)
U = พลังงานที่แพร่กระจายต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของกาว
a = ความหนาของกาว
w = ความกว้างของฟิล์ม

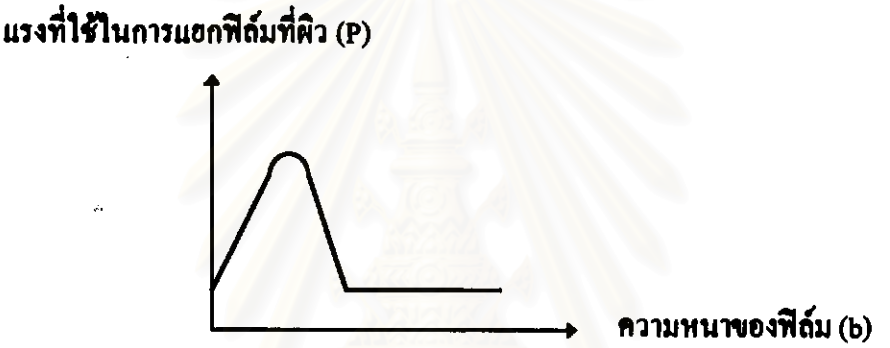
แต่ถ้าความหนาของกาวยังสูงขึ้นต่อไปถึงจุดหนึ่งแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวจะคงที่หรือไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของกาวอีกต่อไป สามารถอธิบายได้ว่าแรงที่ใช้รอบ ๆ จุดที่เกิดการแยกมีค่าน้อยกว่าความหนาของชั้นกาวหรืออาจกล่าวได้ว่าพลังงานที่แพร่กระจายเข้าไปในเนื้อกาวในขณะลอกฟิล์มนั้นจะไม่เกิดการแพร่กระจายเข้าไปในส่วนเนื้อทั้งหมดของกาว แต่จะแพร่กระจายเข้าไปถึงจุดหนึ่งของความหนาของกาวเท่านั้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความหนาของกาวจะมีผลต่อค่าการทนต่อการลอกเฉพาะที่กาวมีความหนาต่ำเท่านั้น (Gent, 1977)

<u>ความหนาของฟิล์ม</u> ในขณะทำการทดสอบความทนต่อการลอก ชิ้นงานจะถูกดึงแยกออกจากกันเป็นรูปตัวที หากชิ้นงานมีความยาวมากพอพลังงานความโค้งงอ (bending energy) จะคงที่ตลอดการลอก และถ้าฟิล์มมีสมบัติความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ก็จะไม่มีส่วนของพลังงานแพร่กระจายเข้าไปในฟิล์มเลย อย่างไรก็ตามถ้าหากการยืดตัดมีค่าสูงพอหรือฟิล์มมีความบางมากพอ แรงที่ใช้ในการดึงแยกฟิล์มจะทำให้ส่วนของฟิล์มเสียรูปได้และงานจากการแยกฟิล์มจะขยายต่อไปในลักษณะทำให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) ของฟิล์ม หากรัศมีความโค้งในการดึงแยกฟิล์มมีค่าคงที่แล้วพบว่าแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวจะสูงขึ้นตามความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นตามสมการ

$$P = \frac{bS_y}{4}$$

เมื่อ b คือ ความหนาของฟิล์ม
Sy คือ แรงเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูป (yield stress)

แต่ถ้าหากรัศมีความโค้งในการดึงแยกฟิล์มมีค่าสูงขึ้น แรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวจะตกลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเป็นศูนย์ การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวกับความหนาของฟิล์มนั้นพบว่าในช่วงแรกเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่งแล้วแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวจะลดลงเท่ากับแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวที่ความหนาเท่ากับศูนย์และจะคงค่าแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวค่านั้นไปตลอดความหนาที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.27 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวเพิ่มขึ้นตามความหนาเนื่องจากการมีพลังงานกระจายเข้าไปในเนื้อฟิล์ม เมื่อฟิล์มหนาขึ้นพลังงานก็จะกระจายเข้าไปได้มากขึ้น แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวจะลดลงจนคงที่นั้นก็เนื่องมาจากความหนา ณ จุดนี้เมื่อทำการถอกฟิล์มฟิล์มจะไม่เกิดการเสียรูปแบบพลาสติก นั่นคือ ฟิล์มจะไม่เกิดการยืดตัวไปตามแรงที่ได้รับ แต่จะเกิดแรงย้อนกลับไปที่ผิวสัมผัสทำให้ผิวสัมผัสของฟิล์มทั้งสองเกิดการแยกกันได้ง่ายขึ้นและไม่ต้องใช้แรงในการดึงแยกมาก (Gent , 1977)



รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการแยกฟิล์มที่ผิวกับความหนาของฟิล์ม

<u>อุณหภูมิในการเก็บฟิล์ม</u> (storage temperature) ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเก็บฟิล์มต่อความสามารถในการปิดผนึกด้วยความร้อนของฟิล์มพอลิโพรพิลีนนั้นจะได้ผลการทดลองดังนี้คือ เมื่ออุณหภูมิในการเก็บฟิล์มสูงขึ้น จะมีผลทำให้ฟิล์มมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมากขึ้น เมื่อนำฟิล์มนี้ไปปิดผนึกด้วยความร้อนที่ความดัน 30 ปอนด์แรง/ตารางนิ้ว ในเวลา 1 วินาที พบว่าฟิล์มที่มีอุณหภูมิในการเก็บฟิล์มสูงขึ้นจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่จะทำให้เกิดรอยผนึกได้สูงขึ้นและมีช่วงอุณหภูมิสำหรับการปิดผนึกแคบลง นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิในการเก็บฟิล์มสูงขึ้นความเป็นผลึกในฟิล์มก็จะสูงขึ้นแล้วความสามารถในการปิดผนึกของฟิล์มจะลดลงด้วย (Nicratro , 1993)

นอกจากปัจจัยทั้ง 3 ดังกล่าวข้างต้นแล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการปิดผนึก เช่น ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุลงในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นผง เป็นน้ำ หรือไขมันอาจเข้าไปปนเปื้อนบนรอยผนึกได้ทำให้การผนึกเป็นไปได้ยาก ซึ่งอาจแก้ไขโดยการใส่สารต่อต้านไฟฟ้าสถิต (anti-static) เพื่อป้องกันมิให้ฟิล์มเกิดแรงดึงดูดกับสารปนเปื้อนที่เข้าไปขัดขวางต่อการปิดผนึก หรืออาจเปลี่ยนไปใช้สารปิดผนึกที่สามารถผนึกผ่านผงประเภทนี้ได้