

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

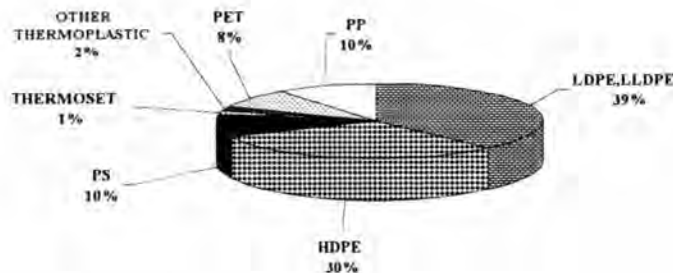
2.1 พลาสติกในงานบรรจุภัณฑ์

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ได้นำพลาสติกมาใช้ทดแทนบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้ว กระจก และโลหะเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะพลาสติกที่อยู่ในรูปของฟิล์มนั้นมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยสามารถทำได้ทั้งฟิล์มชั้นเดียวและฟิล์มหลายชั้น (สามารถประกบกับพลาสติกด้วยตัวเอง หรือวัสดุชนิดอื่น เช่น กระจก หรือ อะลูมิเนียมก็ได้) และยังมีชื่อตีมากมายหลายอย่าง ได้แก่ (มยุรี ภาคลำเจียก, 2543)

1. พลาสติกมีมากมายหลายชนิดให้เลือกใช้ ตามสมบัติที่ต้องการ
2. พลาสติกหลายชนิดมีความสามารถในการป้องกันผลิตภัณฑ์ให้มีอายุการใช้งานหรือเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้นเนื่องจากมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส กลิ่น ฯลฯ ได้ดี
3. พลาสติกสามารถนำมาพิมพ์เพื่อตกแต่งให้สวยงามได้ ทำให้สินค้าน่าเลือกซื้อ มากขึ้น
4. พลาสติกมีรูปแบบการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ถุง (bag) ซอง (sachet) ฟิล์มหด (shrink film) ฉลาก (label) ฯลฯ
5. มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

จากสถิติปริมาณการใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ของประเทศไทยตั้งแต่ ค.ศ. 1997-2000 (พ.ศ. 2541-2543) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะพบว่าพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefin) ซึ่งประกอบด้วย พอลิเอทิลีนและพอลิพรอพิลีน (Polypropylene) มีปริมาณการใช้งานสูงมากถึง 76 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีราคาถูก สามารถขึ้นรูปทรงต่างๆ ได้ง่าย ฯลฯ ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับพอลิโอเลฟินส์ที่มีการใช้งานกันมากในอุตสาหกรรมบรรจุ

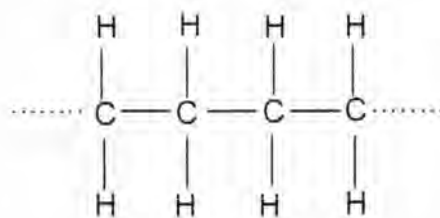
ภัณฑ์และเป็นพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตามลำดับ



รูปที่ 2.1 ปริมาณการใช้พลาสติกแต่ละชนิดในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ตั้งแต่ ค.ศ. 1997-2000 (อำนาจ ลากเกษมสุข, 2539)

2.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพอลิเมอร์ชนิดแรกในตระกูลพอลิเอทิลีนที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ มีเอทิลีนมอนอเมอร์ (Ethylene monomer) ต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบหัวต่อหัว (head-to-head) ดังรูปที่2.2

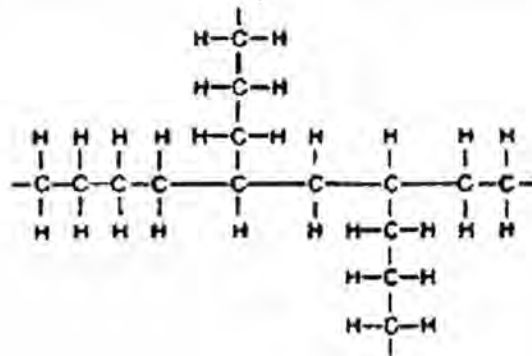


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

กระบวนการผลิต LDPE จะใช้ความดันสูง ที่ประมาณ 25,000 psi อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียสมีอนุมูลอิสระ (free radical) เป็นตัวเร่ง (promoter) เรียกกระบวนการนี้ว่า การเกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ (free radical polymerization) หลังจากปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์แล้ว จะลดความดันให้เท่ากับความดันบรรยากาศ และนำมอนอเมอร์และตัวทำละลายที่เหลืออยู่กลับ

มาใช้ใหม่ ส่วนพอลิเอทิลีนที่เกิดขึ้นแล้วจะถูกนำมาหลอมอัดรีดเพื่อตัดเป็นเม็ดและนำไปใช้งานต่อไป (Selke, 1997)

ขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะมีกิ่ง (branch) เกิดขึ้นในสายโซ่ของโมเลกุลดังรูปที่ 2.3 กิ่งที่เกิดขึ้นจะไปขัดขวางการเกิดผลึก ส่งผลให้สมบัติบางประเภทด้อยลง เช่น ความแข็งตึง (stiffness) ความเหนียว (toughness) ความทนแรงกระแทก (impact) แต่ก็ทำให้มีความใสดีขึ้น



รูป 2.3 กิ่งที่เกิดขึ้นบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

การที่ฟิล์ม LDPE ไม่มีกลิ่นและรส ทำให้ได้รับความนิยมในงานบรรจุภัณฑ์ รวมทั้งยังมีการผนึกด้วยความร้อนได้ง่ายและให้รอยเชื่อมที่มีความเหนียวดี ฟิล์ม LDPE มีผิวหน้าค่อนข้างมัน นอกจากนั้นฟิล์ม LDPE ยังมีความเฉื่อยและความไม่มีขั้วที่ผิวหน้าทำให้พิมพ์ติดสีได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการปรับผิวหน้าด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การปรับผิวหน้าด้วยเปลวไฟ การปรับผิวหน้าด้วยสารเคมี และการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา (ชัชวาล สุรัสวดี, 2528) และถึงแม้ฟิล์ม LDPE จะมีความคงตัวที่ดีแต่เมื่อต้องอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นเช่นในขณะพิมพ์ จะทำให้มีความทนแรงดึงต่ำลง ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้ฟิล์ม LDPE เป็นชั้นสำหรับการพิมพ์

2.1.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE)

การผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น จะแตกต่างกับการผลิตของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ คือ ใช้ความดันต่ำ (ประมาณ 300 psi) และมีการเติมโคมอนอเมอร์ เช่น บิวทีน (butene) เฮกซีน (hexene) หรือ ออกทีน (octene) ลงไปด้วย ความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นจะอยู่ในช่วงเดียวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แต่จะมี

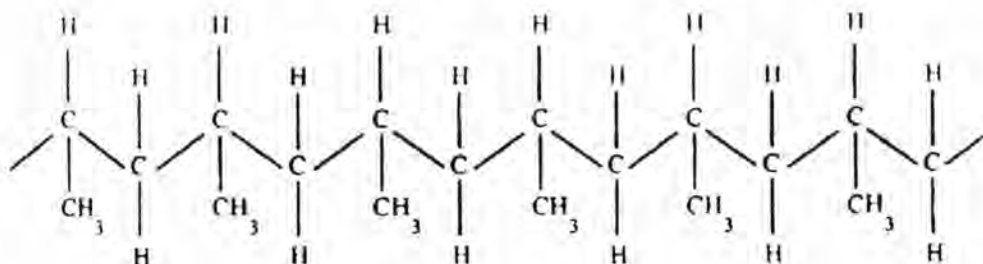
กึ่งสั้นและน้อยกว่า จึงทำให้มีสมบัติดีของทั้ง LDPE และ HDPE คือ ความแข็งแรง (Strength) กับ ความเหนียว (Toughness) ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและความใสกับการ ผนึกด้วยความร้อนคล้ายกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำรวมเข้าไว้ด้วยกัน ตามปกติแล้ว เวลानำไปใช้งาน มักจะผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงและ สมบัติการยึดติดให้ดียิ่งขึ้น พอลิเมอร์ผสมของ LLDPE และ LDPE มักนำไปใช้งานเป็นชั้นผนึกของ ถุงนมและประกบกับฟิล์มในลอนสำหรับใส่อาหารแช่แข็ง

ตัวอย่างการใช้งาน PE ที่สำคัญมีดังต่อไปนี้ (ปูน คงเจริญเกียรติ และ สมพร คงเจริญ เกียรติ, 2541)

1. ใช้ห่อหรือบรรจุอาหารได้เกือบทุกชนิดโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค แต่ไม่ควร ใช้ LDPE กับอาหารร้อน
2. นิยมใช้ทำถุงบรรจุขนมปัง เนื่องจาก PE ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีจึงช่วย ป้องกันมิให้ขนมปังแห้ง เนื่องจากสูญเสียความชื้นออกไป นอกจากนั้นราคาของ PE ไม่สูงเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับราคาขนมปัง
3. นิยมใช้ทำถุงบรรจุผักและผลไม้สด เนื่องจาก PE ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี ทำให้มีก๊าซ ออกซิเจนซึมผ่านเข้ามาเพียงพอให้พืชหายใจ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชคาย ออกมาก็สามารถซึมผ่านออกไปได้ง่าย ในบางกรณีจำเป็นต้องเจาะรูที่ถุงเพื่อช่วย ระบายไอน้ำที่พืชคายออกมา
4. นิยมใช้ LDPE เป็นชั้นสำหรับการปิดผนึกด้วยความร้อน เนื่องจากกระดาษและแผ่น เพลวอะลูมิเนียมซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นถุงหรือซองบรรจุอาหาร ไม่สามารถปิดผนึกด้วย ความร้อนได้ จึงนิยมนำ LDPE มาประกบติดกับวัสดุต่างๆเหล่านี้ โดยให้ LDPE อยู่ ชั้นในสุด และทำหน้าที่เป็นชั้นสำหรับปิดผนึกด้วยความร้อน ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ของบะหมี่สำเร็จรูป แผ่นปิดถ้วยโยเกิร์ต เป็นต้น
5. PE ไม่นิยมใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารที่มีไขมันสูงเช่น เนย ถั่วทอด ขนมขบเคี้ยวเนื่อง จากมีจุดอ่อนที่สามารถปล่อยให้ไขมันซึมผ่านได้ง่าย

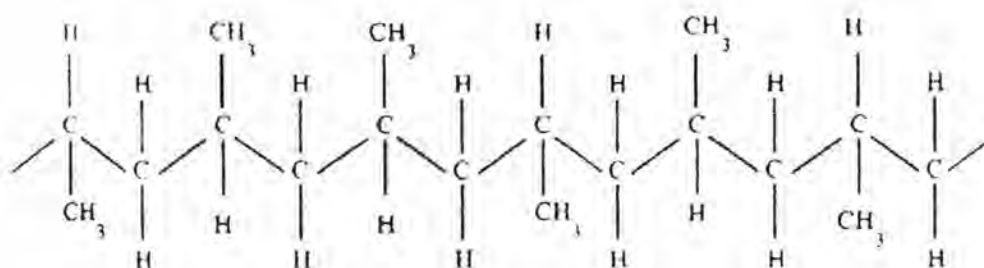
2.1.3 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP)

โครงสร้างของพอลิพรอพิลีนแตกต่างจากพอลิเอทิลีน คือ มีหมู่เมทิล (methyl group) อยู่ใน เมอร์ (mer) ซึ่งต่อกันแบบ หัวต่อหาง (head-to-tail) ซึ่งทำให้โมเลกุลมีความสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน

ถ้าโมเลกุลของพอลิพรอพิลีนมีความสม่ำเสมอดังรูปที่ 2.4 จะเรียกว่าไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน (isotactic polypropylene) จะมีสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง แต่มีจุดอ่อนคือ ความแข็งแรง (Strength) และความแข็ง (Stiffness) สูงกว่า ส่วนอะแทกติกพอลิพรอพิลีน (atactic polypropylene) ดังรูปที่ 2.5 จะมีลักษณะเหนียวเหนียว (sticky) คล้ายกาวเหมาะสำหรับใช้เป็นสารยึด (adhesive)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะแทกติกพอลิพรอพิลีน

พอลิพรอพิลีน มีความหนาแน่นประมาณ 0.90 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มี ความใส การซึมผ่านของแก๊ส ความชื้น ความแข็งแรงและจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเอทิลีน ด้วยสมบัติที่ดีเหล่านี้จึงทำให้พอลิพรอพิลีนได้รับความนิยมอย่างมากในงานบรรจุภัณฑ์

การใช้งานของ PP กับผลิตภัณฑ์อาหาร (ปูน คงเจริญเกียรติ และ สมพร คงเจริญเกียรติ, 2541)

1. ใช้บรรจุอาหารร้อน เช่น ถูกร้อน (ชนิดใส)
2. ใช้บรรจุอาหารที่ต้องผ่านความร้อนในการฆ่าเชื้อโรค โดยที่ PP จะเป็นองค์ประกอบหนึ่งของวัสดุที่ใช้ผลิตของประเภทนี้ ซึ่งนิยมเรียกว่า Retort Pouch ของนี้ จะสามารถใช้แทนกระป๋องโลหะได้บางครั้งจึงเรียกว่า Flexible can
3. ใช้ทำถุงบรรจุผักและผลไม้
4. ใช้ทำของบรรจุอาหารแห้ง เช่น บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป และอาหารที่มีไขมันอายุการเก็บรักษาไม่สูง เช่น คุกกี้ ถั่วทอด เป็นต้น
5. ใช้ทำกล่องอาหาร ลัง ถาด ตะกร้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของฟิล์ม BOPP LDPE และLLDPE ที่ความหนาของฟิล์มเท่ากับ 25 ไมครอน (Briston, 1974)

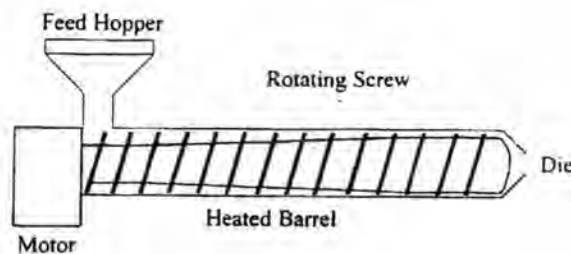
Property	LDPE	LLDPE	PP
Density (g/cm ³)	0.91-0.925	0.918-0.923	0.90
Yield Strength (kg/m ²)	42.0	42.5	44.0
Tensile strength (kpsi)	1.5-5	3-8	20-30
Elongation at break (%)	200-600	400-800	50-275
Haze (%)	5-10	6-13	3
Seal temperature (°C)	120-150	105-170	90-150
Service temperature (°C)	-56 to 80	-30 to 105	4 to 121

2.2 กระบวนการผลิตฟิล์ม

การผลิตฟิล์มเป็นการเปลี่ยนพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของของแข็งที่เป็นเม็ด ผง แผ่น แกล็ด ให้เป็นแผ่นฟิล์มบนลูกกลิ้งโดยประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ

2.2.1 การเปลี่ยนรูปเม็ดพลาสติกให้เป็นพลาสติกเหลวด้วยเครื่องอัดรีด (Extrusion sequence)

เม็ดพลาสติกจะถูกเปลี่ยนเป็นพลาสติกเหลวด้วยเครื่องอัดรีด (extruder) ดังรูปที่ 2.6 โดยเครื่องอัดรีดจะประกอบด้วยสกรูเหล็กที่อยู่ภายในกระบอกลูกสูบ (barrel) และหมุนได้ด้วยกำลังจากมอเตอร์ ตลอดช่วงของกระบอกลูกสูบจะมีแหล่งให้ความร้อน (heater) ส่วนการป้อนเม็ดพลาสติกเข้าเครื่องจะป้อนที่กรวยช่วยป้อน (hopper) ในส่วนของสกรูสามารถแบ่งออกได้ 3 ช่วง คือ ช่วงป้อนพลาสติก (feed section) ช่วงหลอมเหลวพลาสติก (melt section) และช่วงส่งพลาสติกเหลว (metering section) ซึ่งส่งพลาสติกไปยังหัวตาย (die) โดยหัวตายจะเป็นตัวกำหนดขนาดและความหนาของแผ่นฟิล์ม



รูป 2.6 เครื่องอัดรีด

กระบวนการในขั้นตอนการเปลี่ยนรูปเม็ดพลาสติกให้เป็นพลาสติกแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วงตามช่วงของสกรู สำหรับช่วงป้อนพลาสติก เม็ดพลาสติกที่ป้อนลงไปในการจะตกลงสู่สกรูที่อยู่ภายในกระบอกลูกสูบตามแรงโน้มถ่วงของโลก ในกรณีที่เม็ดพลาสติกที่ใช้มีขนาดไม่สม่ำเสมอซึ่งจะมีผลต่ออัตราการป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่เครื่องอัดรีดและอาจทำให้เม็ดพลาสติกเกิดการอุดตันในช่วงคอกของกรวยได้ การแก้ไขสามารถทำได้โดยการใช้สกรูเล็ก ๆ ช่วยในการป้อนเม็ดพลาสติกหรือโดยการสั่นกรวยป้อน อีกปัญหาที่พบคือในกรณีที่เม็ดพลาสติกมีจุดหลอมเหลว

ต่ำเกินไปจะทำให้เม็ดพลาสติกเกิดการอ่อนตัวและมีผิวที่เหนียวติดช่วงคอกของกรวยได้ทำให้กรวยเกิดการอุดตันขึ้น วิธีแก้ไขคือการทำให้ช่วงป้อนเย็นตัวลงเพื่อลดการอ่อนตัวของเม็ดพลาสติก

ช่วงหลอมเกิดขึ้นในขณะที่สกรูในกระบอกสูบหมุนรับเม็ดพลาสติกจากช่วงป้อนเข้ามา และทำการหลอม ในขณะเดียวกันเม็ดพลาสติกจะถูกผสมไปด้วย เม็ดพลาสติกจะเกิดการหลอมได้จากความร้อนที่ได้รับโดยเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า (electrical heater) หรือน้ำร้อนหรือไอน้ำที่อยู่ภายนอกของกระบอกสูบ อุณหภูมิที่ผนังของกระบอกสูบจะสูงพอที่จะทำให้เม็ดพลาสติกเกิดการหลอมได้ โดยที่อุณหภูมิที่ผนังกระบอกสูบจะสูงที่สุดแล้วค่อยๆลดลงมาจนถึงที่ผนังของสกรูที่อยู่ภายในกระบอกสูบนั่น นอกจากนี้เม็ดพลาสติกอาจเกิดการหลอมโดยได้รับความร้อนจากการเกิดแรงเฉือน (shear force) ที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างของสกรูกับกระบอกสูบหรือเกิดความดันย้อนกลับ (back pressure) ดังนั้นในการตั้งอุณหภูมิสำหรับการหลอมจึงต้องคำนึงถึงความร้อนที่พลาสติกจะได้รับจากแหล่งอื่นด้วย โดยอุณหภูมิในการหลอมที่ตั้งไว้ต้องไม่สูงเกินไปจนทำให้พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) หรือต่ำเกินไปจนพลาสติกเกิดการหลอมที่ไม่สมบูรณ์

ช่วงส่งเป็นช่วงสุดท้ายของสกรูที่จะส่งพลาสติกเหลวไปยังทางออกของเครื่องอัดรีดซึ่งจะพบกับหัวดาย จากนั้นหัวดายจะทำการขึ้นรูปพลาสติกเหลวให้เป็นแผ่นฟิล์ม โดยก่อนที่จะส่งต่อไปยังหัวดายนั้นอาจมีการกรองสิ่งสกปรกในพลาสติกเหลวก่อนโดยการใช้ตัวกรอง (filter)

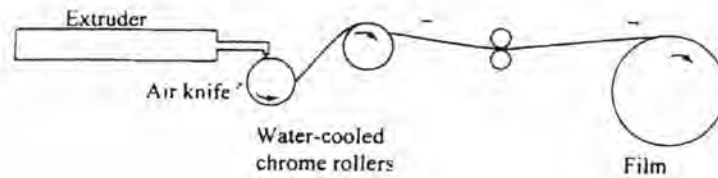
2.2.2 การเปลี่ยนรูปพลาสติกเหลวเป็นแผ่นฟิล์มบาง (Film formation)

ขนาดและรูปร่างของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับลักษณะของหัวดาย ดังนั้นในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มจะแบ่งตามลักษณะของหัวดายได้ 2 วิธีคือ กระบวนการหล่อฟิล์ม (cast film process) และ กระบวนการเป่าฟิล์ม (blown film process)

2.2.2.1 กระบวนการหล่อฟิล์ม

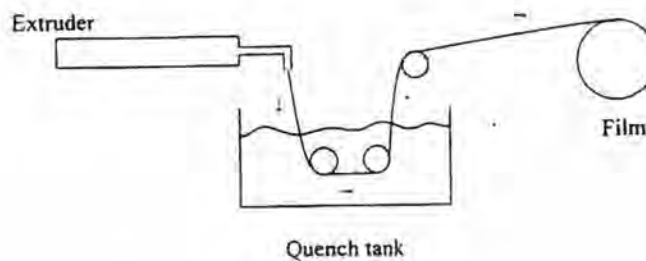
กระบวนการหล่อฟิล์มเป็นการขึ้นรูปฟิล์มโดยใช้หัวดายที่เป็นรูปตัวที (T-die) เมื่อพลาสติกผ่านหัวดายออกมาแล้วพลาสติกเหลวจะอยู่ในรูปเป็นฟิล์มเหลว (melt film) ฟิล์มเหลวจะถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยการสัมผัสกับผิวลูกกลิ้งเย็นที่หมุนได้ (chill roll) ดังรูปที่ 2.7 โดยภายในลูกกลิ้งเย็นจะมีน้ำเย็นหรือสารละลายที่เย็นตัวหมุนเวียนอยู่ โดยลูกกลิ้งเย็นนี้จะอยู่ห่างจากหัวดายประมาณ 1.0-2.5 นิ้ว และเพื่อให้ฟิล์มเหลวแนบสนิทกับลูกกลิ้งเย็นจะมีการใช้มีดลม (air knife) เป่าฟิล์มเหลวให้สัมผัสกับลูกกลิ้งเย็น นอกจากนั้นมีดลมนี้ยังช่วยลดช่องว่างระหว่าง

ฟิล์มเหลวกับลูกกลิ้งเย็นไม่ให้อากาศเข้าไปแทรกซึ่งอากาศที่เข้าไปจะมีผลทำให้ฟิล์มเย็นตัวช้าลง



รูปที่ 2.7 การขึ้นรูปฟิล์มหล่อด้วยลูกกลิ้งเย็น

การขึ้นรูปฟิล์มหล่อด้วยลูกกลิ้งเย็นนี้จะมีข้อดีคือสามารถผลิตฟิล์มได้ในอัตราเร็วสูง แต่มีข้อเสียอยู่ 2 ประการคือ ฟิล์มเหลวจะถูกทำให้เย็นตัวเพียงด้านเดียวคือด้านที่สัมผัสกับลูกกลิ้งเย็น แม้ว่าจะมีการแก้ไขโดยเพิ่มลูกกลิ้งเย็นอีกลูกหนึ่งเข้าไปยังผิวด้านตรงกันข้ามได้ก็ตามแต่กลับเป็นการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการผลิตให้ยุ่งยากซับซ้อนขึ้น ข้อเสียอีกข้อหนึ่งคือ การเย็นตัวของฟิล์มเหลวมักจะถูกขัดขวางโดยการเกิดฟิล์มบางของอากาศคั่นอยู่ระหว่างฟิล์มเหลวกับลูกกลิ้งเย็น การแก้ไขปัญหทั้งสองประการสามารถทำได้โดยการใช้น้ำหล่อเย็น (water quenching) แทนการใช้ลูกกลิ้งเย็น ดังรูปที่ 2.8 กระบวนการหลังนี้จะมีน้ำเป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งมักจะมีการกวนน้ำเพื่อให้อุณหภูมิหล่อเย็นคงที่และสม่ำเสมอ โดยการกวนน้ำจะต้องไม่แรงเกินไปจนทำให้เกิดรอยน้ำบนผิวหน้าของฟิล์มได้ ดังนั้นอัตราการการผลิตฟิล์มจึงถูกจำกัดโดยการหมุนวนของน้ำ การขึ้นรูปวิธีนี้จึงผลิตฟิล์มได้ช้ากว่าการหล่อฟิล์มที่ใช้ลูกกลิ้งในการหล่อเย็น

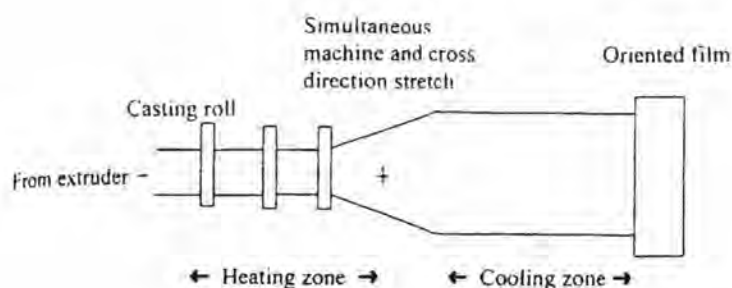


รูปที่ 2.8 การขึ้นรูปฟิล์มหล่อด้วยน้ำหล่อเย็น

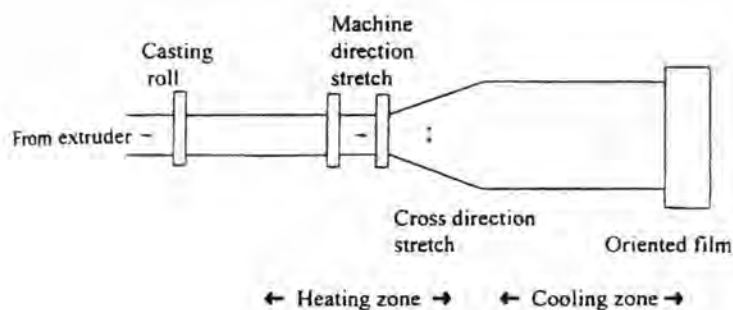
อย่างไรก็ดีไม่ว่าจะใช้วิธีใดในการผลิตฟิล์ม เมื่อฟิล์มเย็นลงปัญหาที่เกิดขึ้นเสมอ คือ การหดตัวบริเวณขอบ ทำให้มีความหนาที่ขอบมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องตัดบริเวณนั้นทิ้งไป อีกสาเหตุที่ทำให้ความหนาของฟิล์มไม่สม่ำเสมอ คือ หัวตายมีลักษณะผิดปกติ เช่น เป็นรอยหรือไม่เรียบ ซึ่งจะส่งผลไปตลอดทั้งม้วน ตามปกติแล้วฟิล์มหล่อจะมีความไม่สม่ำเสมอของความหนาประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

การปรับปรุงสมบัติของแผ่นฟิล์มสามารถทำได้โดยการดึงยืดเพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุล การจัดเรียงตัวของโมเลกุลจะมีอยู่ใน 2 แนวคือ แนวขนานเครื่อง (machine direction, MD) และแนวขวางเครื่อง (transverse direction, TD) การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในทิศทางเดียว เรียกว่า การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในแนวเดียว (uniaxial orientation) ส่วนการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง เรียกว่า การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในสองทิศทาง (biaxial orientation) การจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในฟิล์มนี้จะเป็นการปรับปรุงสมบัติบางประการของฟิล์ม เช่น ความใส หรือมีสมบัติเป็นขั้นสกัดกันความชื้นและแก๊สได้ดี มีความทนต่อแรงกระทบที่อุณหภูมิต่ำดี มีความคงรูป ฯลฯ

ในกรณีที่ฟิล์มหล่อไม่ได้รับการดึงยืดในทิศทางของเครื่องจักรคือไม่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลทั้งสองทิศทาง ดังนั้นสมบัติเชิงกลของทั้งสองทิศทางจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ถ้าเพิ่มอัตราเร็วในการม้วนเก็บให้มากกว่าอัตราการอัดรีด (extrusion rate) พอลิเมอร์ก็จะถูกดึงยืดและมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในทิศทางเดียว และถ้ามีการเพิ่มการดึงยืดในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของเครื่องจักร ฟิล์มจะมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในสองทิศทาง ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ 1 ขั้นตอน (single step) และ 2 ขั้นตอน (two step) ดังรูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 กระบวนการทำการจัดเรียงตัวของฟิล์มแบบ 1 ขั้นตอน



รูปที่ 2.10 กระบวนการทำการจัดเรียงตัวของฟิล์มแบบ 2 ขั้นตอน

การจัดเรียงตัวในสองทิศทางอาจจะเท่าหรือไม่เท่ากันก็ได้ แล้วแต่อัตราการดึงยืดของแต่ละทิศทาง ถ้าต้องการให้การจัดเรียงตัวเกิดขึ้นได้ดี อุณหภูมิขณะดึงยืดควรมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ แต่ก็ต้องสูงพอที่จะให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ สิ่งที่เราควรระวังคือ ถ้าให้อุณหภูมิสูงเกินไปโมเลกุลจะเกิดการเคลื่อนไหวได้มากเกินไป การจัดเรียงตัวอาจจะเกิดขึ้นได้น้อยลง หลังจากผ่านการดึงยืดแล้วจะให้ความร้อนแก่ฟิล์มระยะเวลาหนึ่ง (Anneal) เพื่อให้เกิดความคงตัวทางความร้อน (Thermal stability) จากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงเพื่อรักษาสภาพการจัดเรียงตัวที่เกิดขึ้นไว้ สุดท้ายจึงคลายแรงดึงออก

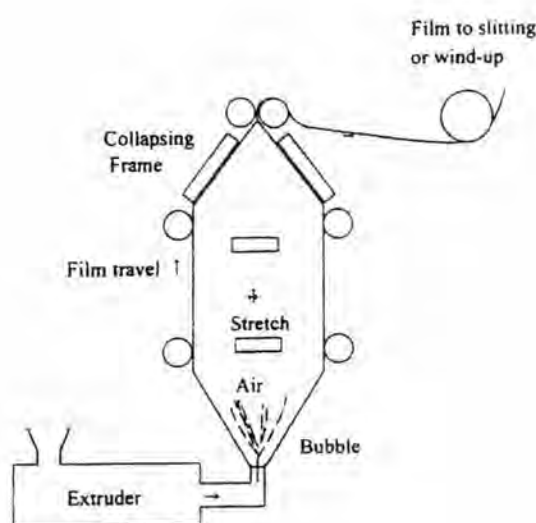
การผลิตฟิล์มจัดเรียงตัวสองทิศทาง แบบสองขั้นตอนนิยมใช้กับฟิล์มพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly ethylene terephthalate film) ซึ่งจะดึงยืดออกได้ 3-4 เท่า ของความยาวและความกว้างเดิม นอกจากนั้นยังนิยมใช้กับการผลิตฟิล์มพอลิพรอพิลีนซึ่งสามารถดึงยืดได้ถึง 8 เท่า

2.2.2.2 กระบวนการเป่าฟิล์ม

ฟิล์มเป่าจะอัดรีดผ่านดายที่มีลักษณะเป็นวงแหวนออกมา มีลักษณะเป็นท่อ (tube) หรือลูกโป่ง (bubble) โดยอาศัยแรงดันจากลมภายใน โดยทั่วไปพอลิเมอร์จะถูกอัดรีดผ่านดายในแนวตั้ง (ในบางครั้งก็เป็นแนวนอนหรือแนวตั้ง) สำหรับการหล่อเย็นจะทำโดยการเป่าลมเย็นให้สัมผัสกับฟิล์มผ่านวงแหวนที่อยู่ด้านนอกของดาย (เรียกว่า Cooling ring) ซึ่งสามารถทำได้ทั้งภายในและภายนอกของลูกโป่ง แต่ก็มีในบางกรณีที่ทำการหล่อเย็นอย่างรวดเร็วแล้วให้ความร้อนใหม่อีกครั้งก่อนที่ฟิล์มจะถูกดึงยืดด้วยแรงดันลม สำหรับหน้ากว้างของฟิล์มจะควบคุมด้วยอัตราการขยายของลูกโป่ง (Blow-up ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้าย

ของลูกโป่งของฟิล์มกับเส้นผ่านศูนย์กลางของด้าย โดยที่แรงดันลมจากภายในจะส่งผ่านไปที่แกน (mandrel) ของด้ายก่อนที่จะส่งผ่านไปยังผนังของลูกโป่ง

หลังจากขั้นตอนการขยายตัวของฟิล์มเป่าแล้ว ฟิล์มยังจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ช่วยรักษา รูปทรงของลูกโป่งไว้ เช่น หน่วยรองรับลูกโป่ง (sizing basket) หลังจากฟิล์มเย็นตัวลงจึงรวบลูกโป่งให้ตีบเข้าโดยลูกกลิ้ง 2 ตัว (nip rolls) โดยฟิล์มเคลื่อนผ่านแผงลูกกลิ้ง (collapsing frame) ซึ่งทำหน้าที่พยุ่งและนำฟิล์มเป่าที่ถูกบีบเข้าที่ละน้อยไปยังลูกกลิ้ง 2 ตัว จากนั้นจึงผ่านหน่วยดึง (haul-off unit) และม้วนเก็บในขั้นตอนสุดท้ายด้วยตัวม้วนฟิล์ม (winder) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กระบวนการเป่าฟิล์ม

ปัญหาสำคัญในการผลิตฟิล์มเป่าคือการเป่าพอลิเมอร์หลอมเหลวเป็นลูกโป่งเป็นกระบวนการที่มีตัวแปรการผลิตจำนวนมากทำให้การควบคุมเป็นไปได้ค่อนข้างยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ดังนั้นการผลิตแต่ละครั้งจึงต้องสูญเสียเม็ดพอลิเมอร์ไปเป็นจำนวนมาก กว่าที่จะเป่าฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอและลูกโป่งที่มีความคงรูป (stable bubble) หรือทรงตัวได้อย่างต่อเนื่อง แต่ข้อดีของฟิล์มเป่าก็คือ สามารถผลิตฟิล์มได้ครั้งละมากๆ ผู้ผลิตจึงนิยมใช้วิธีนี้ในการผลิต นอกจากนี้ยังมีปัญหาในเรื่อง ความใสและความสม่ำเสมอของผิวฟิล์ม เนื่องจากฟิล์มเป่าจะมีอัตราการหล่อเย็นที่ช้าทำให้มีเวลาในการเกิดผลึกมากและหรือผลึกก็จะมีขนาดใหญ่ ความใสจึงลดลงหรืออีกนัยหนึ่งฟิล์มเป่าทั่วไปมีลักษณะขุ่นหรือโปร่งแสงมากกว่าโปร่งใส

สำหรับฟิล์มเป่าจะเกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง โดยในแนวขนานเครื่องการดึงยืดจะเกิดจากแรงดึงระหว่างลูกลึงกับตาย และในแนวขวางเครื่องนั้นจะเกิดจากการขยายตัวของลูกโป่ง

2.3 การประกบ (Lamination)

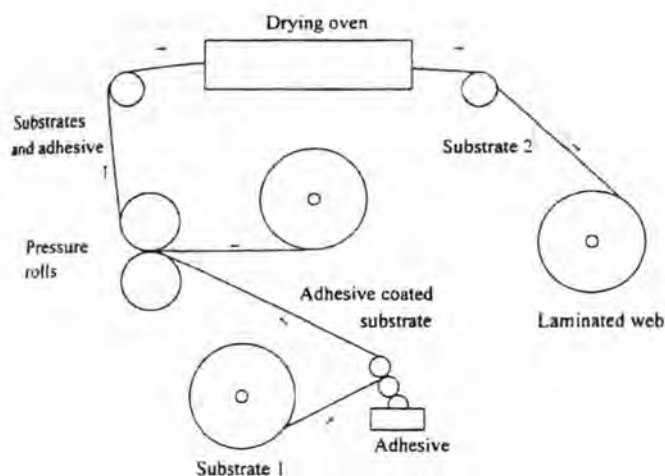
การประกบเป็นการนำวัสดุสองชนิดที่แตกต่างกันหรือเหมือนกันมาเชื่อมติดเป็นชั้นเดียวกัน โดยวัสดุที่นำมาประกบกันอาจเป็น พลาสติก กระดาษ อลูมิเนียมฟอยล์ ฯลฯ โดยไม่จำกัดจำนวนชั้นในการประกบ แต่สิ่งหนึ่งที่ต้องควบคุมคือการยึดติดระหว่างวัสดุทั้งสองจะต้องมีการยึดติดที่ดีพอแก่การประกบ วัตถุประสงค์ในการประกบฟิล์มพลาสติกเข้าด้วยกันคือเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม เช่น ความเหนียว (toughness) สมบัติการเป็นชั้นสัดกันแก๊สหรือไอน้ำ เป็นต้น สำหรับการประกบนั้นมีหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมากจะมีอยู่ 2 วิธีได้แก่

2.3.1 การประกบโดยใช้กาว (Adhesive lamination)

การประกบวิธีนี้จะใช้กาวเป็นตัวประสานวัสดุที่จะติดเข้าด้วยกัน ซึ่งกาวที่ใช้จะมีหลายชนิด เช่น กาวที่ไม่มีตัวทำละลาย (Solventless adhesive) และ กาวที่มีตัวทำละลาย (Solvent-based adhesive) ดังจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 2.4 สำหรับวิธีการประกบโดยใช้กาวยังแบ่งออกได้อีกเป็น 2 แบบคือ

2.3.1.1 การประกบแบบเปียก (Wet lamination)

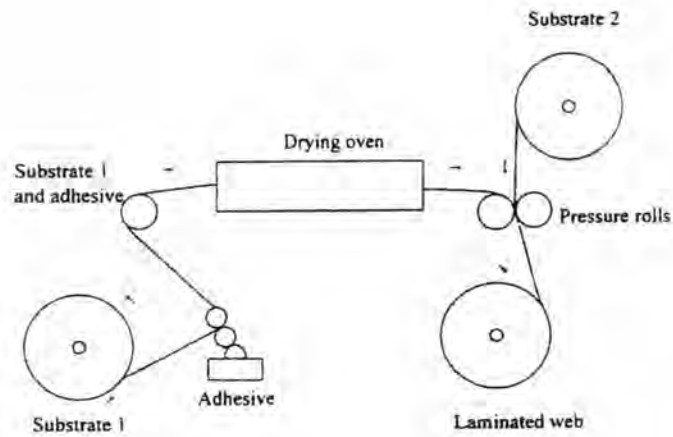
การประกบแบบเปียก เป็นเทคนิคการประกบที่ใช้เมื่อแผ่นวัสดุอย่างน้อยชนิดหนึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุน เช่น กระดาษ ดังนั้นการประกบแบบเปียกจึงมักใช้ในการประกบระหว่างกระดาษกับฟอยล์ กระดาษกับฟิล์ม หรือ กระดาษกับกระดาษ ส่วนกาวที่ใช้ประกบมีทั้งชนิดกาวน้ำ (water-soluble adhesive) และกาวที่มีตัวทำละลาย โดยจะทาภาวลงบนผิววัสดุหนึ่ง แล้วนำมาประกบติดกับอีกวัสดุหนึ่ง จากนั้นจึงทำให้แห้งโดยผ่านเข้าไปในเตาอบเพื่อให้ความร้อนไล่ตัวทำละลายของกาวออกไปดังรูปที่ 2.12 ตัวทำละลายของกาวที่ระเหยออกไปนี้จะต้องไม่มีผลทำให้แผ่นวัสดุเกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.12 การประกบแบบเปียก (Selke, 1997)

2.3.2.2 การประกบแบบแห้ง (Dry lamination)

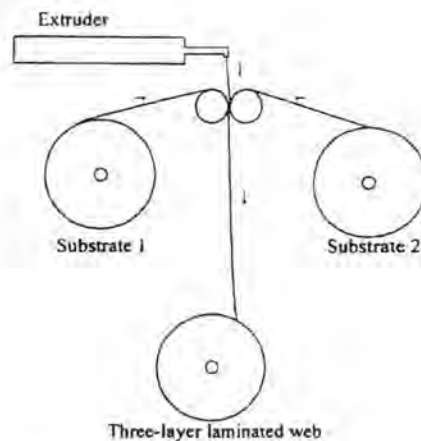
การประกบแบบแห้ง เป็นเทคนิคการประกบที่เหมาะสมสำหรับการประกบระหว่างฟิล์มพลาสติกกับวัสดุชนิดอื่นและฟิล์มพลาสติกกับฟิล์มพลาสติก กาวที่ใช้ในการประกบแบบแห้งเป็นกาวที่มีตัวทำละลาย ขั้นตอนการประกบเริ่มจากการนำกาวเคลือบลงบนแผ่นฟิล์มชนิดหนึ่งก่อนแล้วจึงนำไปอบให้ตัวทำละลายของกาวระเหยออกไป จากนั้นจึงนำไปประกบกับอีกวัสดุหนึ่งให้ติดกันด้วยลูกกลิ้งหนีบดังรูปที่ 2.13 ปัจจัยที่ต้องควบคุมขณะทำการประกบคือ การควบคุมความตึง การทากาว และการควบคุมการแห้งตัวของกาว โดยปกติกระบวนการประกบแบบแห้งควรมีความตึงบนแผ่นฟิล์มน้อยที่สุด ทั้งนี้ขึ้นกับระยะทางที่ฟิล์มถูกตึง และการเปลี่ยนทิศทางของฟิล์มขณะถูกตึงบนลูกกลิ้งต่างๆ วิธีควบคุมความตึงที่ง่ายที่สุดคือ พยายามให้ลูกกลิ้งแต่ละลูกอยู่ในแนวเดียวกัน แต่ถ้าหากหลีกเลี่ยงไม่ได้ควรใช้ความเร็วของลูกกลิ้งต่ำ สำหรับผิวกาวที่ทาลงไปบนแผ่นฟิล์มก่อนนำไปประกบนั้นควรเรียบสม่ำเสมอ และกาวที่ทาควรมีความหนืดคงที่ ถ้าขาดสิ่งเหล่านี้แล้วฟิล์มอาจเกิดการแยกออกจากกัน (Delamination)



รูปที่ 2.13 การประกบแบบแห้ง (Selke, 1997)

2.3.2 การประกบโดยการอัดรีด (Extrusion lamination)

การประกบแบบอัดรีดเป็นเทคนิคการประกบฟิล์มพลาสติกชนิดหนึ่งกับวัสดุอีกชนิดหนึ่ง เช่น กระดาษ/พอลิเอทิลีน/อะลูมิเนียมฟอยล์ และ กระดาษ/พอลิเอทิลีน/ฟิล์มเซลลูโลส กาวที่ใช้ในการประกบแบบนี้มากที่สุดคือ LDPE เนื่องจาก LDPE มีความทนต่อแรงกระแทก (impact strength) ดี LDPE จะถูกหลอมออกมาจากเครื่องรีดก่อนแล้วจึงเคลือบลงไประหว่างแผ่นวัสดุ 2 แผ่นที่นำมาประกบกัน จากนั้นจึงทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วด้วยลูกกลิ้งเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 การประกบแบบอัดรีดจะให้สมบัติด้านสกัดกันต่อไอน้ำได้ดี และมักจะมี ความเหนียวและความยืดหยุ่น เนื่องจากวิธีนี้ใช้กาวที่ไม่มีตัวทำละลาย จึงทำให้เหมาะต่อการนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร

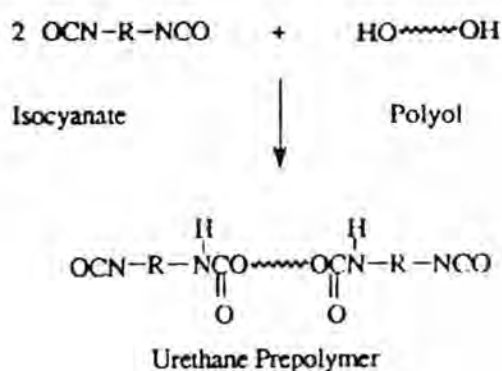


รูปที่ 2.14 การประกบโดยการหลอมอัดรีด (Selke, 1997)

2.4 สารยึด (Adhesive)

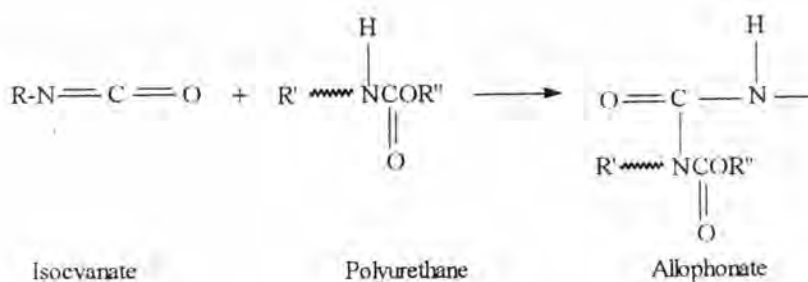
ในกระบวนการทำฟิล์มประกบแบบใช้กาวนั้น จะมีสารยึดหรือกาวที่นิยมใช้กันอยู่ 2 ประเภท คือ กาวที่มีตัวทำละลายเป็นองค์ประกอบ และกาวที่ไม่มีตัวทำละลายเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะมีข้อแตกต่างกันในเรื่องของราคา และความปลอดภัยในการใช้งาน กล่าวคือ กาวที่ไม่มีตัวทำละลายจะมีราคาแพง แต่มีความปลอดภัยในการใช้งานมากกว่า อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่ยังคงนิยมการประกบฟิล์มด้วยกระบวนการประกบแบบแห้งซึ่งต้องใช้กาวที่มีตัวทำละลาย เนื่องจากมีราคาถูก สำหรับกาวที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ พอลิเอเทอร์ยูรีเทน (Polyether urethane)

ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงขอกล่าวถึงกาวพอลิยูรีเทนเป็นหลัก การเตรียมพอลิยูรีเทนดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะใช้ไอโซไซยาเนต (isocyanate) กับพอลิโออล (polyol) เป็นสารตั้งต้น โดยในปฏิกิริยาแตกที่ไฮโดรเจนของพอลิโออลจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนอะตอมของไอโซไซยาเนต ส่วนพอลิอัลคอกไซด์ (polyalkoxide) ที่เหลือจะไปต่อกับหมู่คาร์บอนิลต่อไป



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิยูรีเทน (Pizzi and Mittal, 1994)

แต่ถ้าในระบบมีไอโซไซยาเนตมากเกินไป พอลิยูรีเทนที่เกิดขึ้นจะสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเกิดเป็น อะโลโฟเนต (allophonate) โดยมีแอมีน (amine) หรือ โลหะ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การเกิดอะโลไฟเนต

อัตราการบ่ม (curing rate) ของสารยึดพอลิยูรีเทนจะขึ้นกับ ชนิดของพอลิโออล ไอโซไซยาเนต ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ตัวอย่างเช่น อะโรมาติกไอโซไซยาเนต (aromatic isocyanate) จะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า อะลิฟาติกไอโซไซยาเนต (aliphatic isocyanate) และ แอลกอฮอล์ปฐมภูมิ (primary alcohol) จะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าแอลกอฮอล์ทุติยภูมิ (secondary alcohol) เนื่องจากมีโมเลกุลเล็กกว่านั่นเอง

โดยทั่วไปไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้ คือ โทลูอินไดไอโซไซยาเนต [Toluene diisocyanate (TDI)] แต่จะมีข้อเสีย คือ ส่วนที่ระเหยออกมาจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพได้ นอกจากนั้นไอโซไซยาเนตประเภทอื่นที่นิยมใช้กันคือ อนุพันธ์ของเมทิลีนไดอะนีน (Methylene dianiline) ที่เป็น ไดเมอร์ (dimer) หรือ ไตรเมอร์ (trimer) ไอโซโฟรอน ไดไอโซไซยาเนต (Isophoron diisocyanate) และ เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (hexamethylene diisocyanate) เป็นต้น

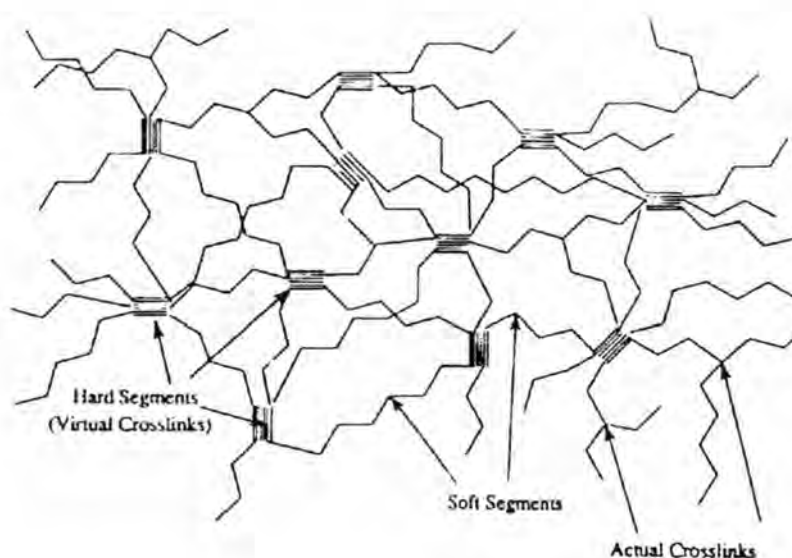
ในส่วนของพอลิโออลที่นิยมใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ พอลิเอสเทอร์พอลิโออล (Polyester polyol) พอลิอีเทอร์พอลิโออล (Polyether polyol) และ พอลิบิวตะไดอินพอลิโออล (Polybutadiene polyol)

พอลิอีเทอร์พอลิโออลที่ใช้จะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 10,000 ดาลตัน (dalton) ที่นิยมใช้ มีอยู่ 2 ชนิด คือ พอลิตเตตระเมทิลีนออกไซด์ พอลิโออล (Polytetramethylene oxide polyols) และ พรอปิลีนอีเทอร์พอลิโออล (Propylene ether polyols)

พอลิเอสเตอร์พอลิโออลส่วนใหญ่ทำมาจากคาโปรแลกโตน (Caprolactone) และมีน้ำหนักโมเลกุลหลายช่วง นอกจากนั้นยังนิยมทำมาจาก พอลิเมอร์ของอะดิพิคแอซิด (Adipic acid) อีกด้วย

สำหรับพอลิบิวตะไดอินพอลิโออลนั้นจะประกอบไปด้วย พอลิบิวตะไดอินที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้นๆ ที่มีส่วนปลายสุดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ซึ่งจะทำให้ได้พอลิยูรีเทนที่มีกิ่งในสายโซ่โมเลกุล

โครงสร้างของกาวพอลิยูรีเทนจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่อ่อนตัวได้ (soft segment) และส่วนที่แข็ง (hard segment) ดังรูปที่ 2.17 ส่วนที่อ่อนตัวได้จะเป็นส่วนที่อยู่ในสายโซ่โมเลกุลของพอลิโออลซึ่งช่วยทำให้กาวพอลิยูรีเทนมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ และที่อุณหภูมิห้องก็จะมีสมบัติของอีลาสโตเมอร์ (elastomeric property) นอกจากนั้นการเลือกชนิดของพอลิโออลยังเป็นตัวกำหนดสมบัติ ความทนทานต่อสารเคมีและความทนทานต่อความร้อนอีกด้วย



รูปที่ 2.17 ส่วนที่แข็งและส่วนที่อ่อนตัวได้ในโมเลกุลของกาวพอลิยูรีเทน (Pizzi และ Mittal, 1994)

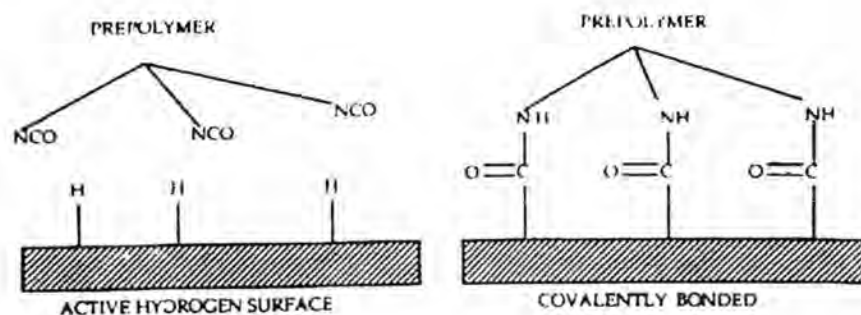
สำหรับส่วนที่แข็งจะเกิดจากการเติมเซนเอ็กเทนเดอร์ (chain extender) พวกดิโออล (diol) หรือ ไดเอมีน (diamine) ลงไปเพื่อช่วยให้โมเลกุลของไดไอโซไซยาเนตเกิดการจับกลุ่ม (aggregate) กันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจนของหมู่ที่มีขั้ว (polar group) ในโครง

สร้าง ดังรูปที่ 2.17 ผลที่ตามมาจะทำให้กาวพอลิยูรีเทนในส่วนนั้นมีอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (Glass Transition Temperature, T_g) สูงขึ้น

การที่โมเลกุลของกาวพอลิยูรีเทนมีทั้งส่วนที่แข็งและอ่อนตัวได้อยู่กัน ส่งผลให้มีอุณหภูมิกลาสทรานสิชันอยู่หลายค่า คือ ตั้งแต่ -30 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส และมากกว่า 150 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นยังทำให้มีทั้งความเหนียว (มาจากส่วนที่อ่อนตัวได้) และสมบัติเชิงกลที่ดี (มาจากส่วนที่แข็ง)

ข้อดีของพอลิยูรีเทนที่ทำให้เป็นที่นิยมในการใช้งานคือ

- สามารถเปียก (wet) ได้ดีบนวัสดุที่มีแรงตึงผิว (surface tension) ต่ำ เช่น พอลิเอทิลีนส์
- สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) กับพื้นผิวของวัสดุได้
- โมเลกุลขนาดเล็กที่อยู่ในโครงสร้าง สามารถซึม (permeate) ผ่านวัสดุที่มีรูพรุนได้
- สามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับวัสดุที่มีแอกทีฟไฮโดรเจนได้ (active hydrogen) ดังรูปที่ 2.18
- ความคงทนต่อความร้อน (heat resistance) ดี
- ความคงทนต่อสารเคมี (chemical resistance) ดี
- ช่วงเวลาการบ่มตัว (curing time) เร็ว
- สามารถใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหารได้



รูปที่ 2.18 การเกิดพันธะโควาเลนต์กับพื้นผิวที่มีแอกทีฟไฮโดรเจน (Pizzi และ Mittal, 1994)

2.5 การยึดติด (Adhesion)

การยึดติดเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับความรู้หลายแขนง เช่น เคมีกายภาพของพื้นผิว (Physical chemistry of surface) วัสดุศาสตร์ (material science) การแตกหัก (fracture) ฯลฯ และมีความหมายค่อนข้างกว้างขึ้นกับสิ่งที่เราสนใจ เช่น หมายถึงการเกิดรอยต่อระหว่างผิวสัมผัส (interface) ของวัสดุ 2 ชนิด โดยมีสารยึดทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (เมื่อสนใจการยึดติด) หรือ หมายถึงการศึกษาการแตกหักของรอยต่อระหว่างวัสดุที่ยึดติดกันแล้ว (เมื่อสนใจการแตกหัก)

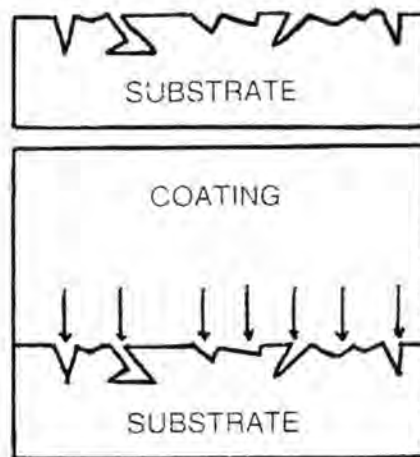
ในปัจจุบันมีแบบจำลองทางทฤษฎี (theoretical model) ที่ใช้อธิบายเรื่องการยึดติดของวัสดุต่างๆอยู่หลายทฤษฎี ได้แก่

1. การเชื่อมติดเชิงกล (Mechanical interlocking)
2. ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic theory)
3. ทฤษฎีการดูดกลืนหรือทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Adsorption theory or thermodynamic theory)
4. ทฤษฎีชั้นที่มีแรงยึดติดต่ำและรอยต่อของผิวสัมผัส (Theory of weak boundary layers and interphase)

ทฤษฎีเหล่านี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่กล่าวถึงการยึดเกาะเชิงกลและกลุ่มที่กล่าวถึงการยึดติดแบบเฉพาะเจาะจง ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของการเกิดพันธะ (bonding) เช่น พันธะทุติยภูมิ (secondary bonding) พันธะอิเล็กโทรสแตติก (electrostatic bond) ฯลฯ ดังนั้น การนำเอาทฤษฎีเหล่านี้ไปใช้อธิบายกลไกการยึดติด จึงควรพิจารณาถึงชนิดและลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุที่เกิดการยึดติดและวิธีการยึดติดที่เลือกใช้ ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละทฤษฎี

2.5.1 การเชื่อมติดเชิงกล (Mechanical interlocking)

ทฤษฎีการเชื่อมติดเชิงกล (MacBain และ Hopkins, 1925 อ้างถึงใน Pizzi และ Mittal, 1994) กล่าวถึง การที่พื้นผิวของชิ้นติด (adherend) มีความขรุขระ (roughness) ซึ่งเกิดจากมีรูพรุน (pore) เล็กๆ อยู่มากมาย เมื่อเคลือบสารยึดลงบนชิ้นติด สารยึดจะเคลื่อนที่ลงไปอยู่ในรูพรุนเล็กๆ เหล่านั้นเปรียบเหมือน เสียบลูกกุญแจลงในรูกุญแจ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ผิวหน้าที่หยาบสามารถเกิดการเชื่อมติดเชิงกล

ทฤษฎีนี้เหมาะสำหรับใช้อธิบายกับระบบการยึดติดที่ตัวของชั้นติดมีความหยาบ (roughness) หรือมีรูพรุน (pore) อยู่ เช่น การติดยางกับผ้าเข้าด้วยกันหรือการติดโลหะกับพอลิเมอร์ที่มีการปรับผิวหน้าเข้าด้วยกัน มีการทดลองที่สามารถใช้ยืนยันการเชื่อมติดเชิงกลได้เป็นอย่างดี คือ การทดลองของ Arrowsmith (Pocius, 1997) ได้ทำการกัดผิวหน้าโลหะทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าให้มีความหยาบระดับหนึ่ง ดังรูปที่ 2.20 ลักษณะของพื้นผิวสัมผัส (interface) ที่กัดผิวหน้าแล้วจะมีรูปร่างต่างๆกัน (ขนาดเป็นไมครอน) แล้วนำไปติดกับทองแดงที่มีลักษณะแบบเดียวกันโดยใช้ฟอกซีเรซินเป็นสารยึด จากนั้นจึงนำไปวัดค่าความต้านแรงลอก (peel strength) โดยการดึงลอกแผ่นทองแดงที่ติดกันออกจากกัน จากการทดลองของ Arrowsmith จะเห็นได้ว่าความต้านแรงลอกมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหยาบที่มากขึ้น แสดงว่าความหยาบของพื้นผิวทองแดง (surface roughness) ที่เกิดขึ้นจากการกัดผิวหน้าทำให้ผิวทองแดงมีแรงยึดติดต่อกันดีขึ้น

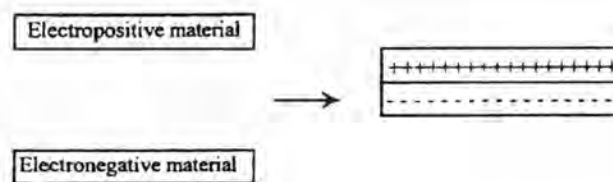
Surface topography of copper foil		Mean peel load lb/in
	Diagrammatic representation	
3μ high angle pyramids		
Flat		1.75
Flat + 0.3μ dendrites		1.8
Flat + 0.3μ dendrites + oxide		4.4
3μ pyramids (high angle)		5.9
2μ low angle pyramids + 0.3μ dendrites		7.3
2μ low angle pyramids + 0.2μ dendrites + oxide		8.8
3μ high angle pyramids + 0.2μ dendrites + oxide		13.5

รูปที่ 2.20 ตารางผลการทดลองของ Arrowsmith

แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ก็ไม่สามารถใช้อธิบายกับการยึดติดได้กับทุกระบบ เช่นระบบการยึดติดพื้นผิวเรียบ (smooth surface) ของแผ่นซิลิกาที่มีการยึดติดที่ตีมากเป็นต้น

2.5.2 ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic theory)

ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Deryaguin และคณะ, 1948 อ้างถึงใน Pocius, 1997) กล่าวถึงกลไกของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างชั้นติดกับสารยึดซึ่งมีโครงสร้างของแถบอิเล็กทรอนิกส์ (electron band) ต่างกัน จึงทำให้เกิดสมดุลของระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) นำไปสู่การเกิดอิเล็กตรอน 2 ชั้น ที่อยู่ติดกัน ณ พื้นผิวสัมผัสเป็นผลให้มีแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ (electrostatic force) เกิดขึ้น ช่วยทำให้การยึดติดมีความแข็งแรงมากขึ้น สารยึดติดกับชั้นติดจะถูกมองคล้ายตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การเกิดแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างผิวสัมผัส

เมื่อเกิดการแยกตัวที่ผิวสัมผัสของสารยึดและชั้นติดทำให้มีความต่างศักย์ (potential) เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีการคายประจุเกิดขึ้น พลังงานของการแยกตัวที่ผิวสัมผัส G_e จะมีความสัมพันธ์กับ ศักย์การคายประจุ (discharge potential, V_e) ตามสมการที่ 2.1

$$G_e = \frac{h\varepsilon_d}{8\pi} \left(\frac{\partial V}{\partial h} \right) \quad (2.1)$$

h = ระยะทางการคายประจุ (discharge distance)

ε_d = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

นอกจากนั้น Deryaguin (Deryaguin และคณะ, 1948) ยังเสนอว่าความสัมพันธ์ของการยึดติดตามทฤษฎีนี้ยังขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ขณะทำการวัดแรงยึดติด แต่ก็มีนักวิจัยบางคนไม่เห็นด้วยกับผลของความดันที่มีต่อแรงยึดติด แต่ก็ยังยอมรับความคิดหลักของทฤษฎีนี้อยู่

2.5.3. ทฤษฎีการดูดกลืนหรือทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Adsorption theory or thermodynamic theory)

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการยึดติดเสนอโดย Sharpe and Schonhurn (Sharpe และ Schonhurn, 1963 อ้างถึงใน Pizzi และ Mittal, 1994) เป็นทฤษฎีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน โดยอยู่บนพื้นฐานความเชื่อที่ว่าสารยึดจะติดกับพื้นผิว เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างอะตอม (แรงแวนเดอร์วาลส์) และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ณ รอยต่อของผิวสัมผัส ความมากน้อยของแรงเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัสดุ เช่น พลังงานอิสระของพื้นผิว (surface free energy)

ในระบบที่เป็นของแข็งกับของเหลว ความสามารถในการเปียก (Wettability) สามารถดูได้จากลักษณะของหยดของของเหลวบนพื้นผิวของแข็งที่มีลักษณะเรียบ ตามสมการของ Young (Young's equation) ที่ได้อธิบายความสัมพันธ์ของค่าแรงตึงผิว (surface tension, γ) ณ จุดสัมผัสของวัสดุที่สัมผัสกันทั้ง 3 ภูมิภาค คือ ของแข็ง ของเหลว ใต้น้ำ กับสมมูลของมุมสัมผัส (contact angle, θ) ณ จุดนั้น (จะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อ 2.7.1) ดังสมการที่ 2.2

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2.2)$$

โดยที่ γ_{sv} = พลังงานอิสระของผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคที่เป็นของแข็งกับใต้น้ำ

γ_{sl} = พลังงานอิสระของผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคที่เป็นของแข็งกับของเหลว

γ_{lv} = พลังงานอิสระของผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคที่เป็นของเหลวกับใต้น้ำ

ค่าพลังงานอิสระของผิวสัมผัสภายหลังเกิดสมมูลระหว่างการดูดซึมใต้น้ำกับของเหลว มักจะมีค่าต่ำกว่าพลังงานอิสระของผิวสัมผัสของของแข็ง (γ_s) ในสุญญากาศ ค่าพลังงานอิสระของผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคที่เป็นของแข็งกับใต้น้ำที่ลดลงเกิดจากความดัน (pressure, $\pi = \gamma_s - \gamma_{sv}$) ของใต้น้ำกระจายไปสู่ของแข็ง โดยส่วนใหญ่ในกรณีของพอลิเมอร์ ความดันที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้หรือมีค่าเท่ากับ 0 จึงสามารถใช้ค่า γ_s แทนค่าของ γ_{sv} ได้ ดังนั้นถ้าพิจารณาตามสมการที่ 2.2 ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 0 แสดงว่า ของเหลวไม่สามารถทำให้พื้นผิวของของแข็งเปียกได้ทั้งหมดหรือเปียกได้เพียงบางส่วน ในทางกลับกันถ้ามุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าของเหลวทั้งหมดสามารถทำให้พื้นผิวเปียกหรือสามารถกระจายตัวได้บนของแข็ง ระบบที่สามารถเกิดการเปียกได้เองควรมีสมการเป็น

$$\gamma_s \geq \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \quad (2.3)$$

หรือ

$$S = \gamma_s - \gamma_{SL} - \gamma_{LV} \geq 0 \quad (2.4)$$

โดยที่ S หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจาย (Spreading coefficient)

ตามปกติ สมการที่ 2.4 จะใช้เป็นเกณฑ์วัดความสามารถการเปียก (wetting criterion) ของพื้นผิววัสดุ สำหรับสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อค่าการเปียก คือ ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว เช่น ความหยาบ (roughness) สภาวะในการขึ้นรูป (processing condition) เช่น ความดัน นอกจากนี้ยังมีการนิยามเกณฑ์วัดความเปียกในลักษณะอื่นโดยอาศัยพื้นฐานของธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับผิวสัมผัสซึ่งอาศัยการคำนวณพลังงานอิสระของแรงดึงดูดระหว่างวัสดุ 2 ชนิด ที่เกิดขึ้น แต่จะไม่กล่าวถึงไว้ในที่นี้

สำหรับวัสดุที่มีพลังงานพื้นผิวดำ (surface energy) เช่น พอลิเมอร์ การหาพลังงานอิสระของพื้นผิวทำได้โดยการวัดมุมสัมผัส (Contact-Angle Measurement) โดยใช้ค่าของมุมสัมผัสในการหาแรงดึงผิวตามสมการที่ 2.5

$$\gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.5 จะเห็นว่าค่าโคไซน์ของมุมสัมผัส ($\cos \theta$) ของของเหลวที่ใช้ทดสอบมุมสัมผัสจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับแรงดึงผิว กล่าวคือถ้าโคไซน์ของมุมสัมผัสมีค่ามาก แรงดึงผิวจะมีค่ามาก

2.5.4. ทฤษฎีชั้นที่มีแรงยึดติดต่ำและรอยต่อของผิวสัมผัส (Theory of weak boundary layers and interphase)

ทฤษฎีของชั้นที่มีแรงยึดติดต่ำและรอยต่อของผิวสัมผัส เสนอโดย Bikerman (Bikerman, 1961 อ้างถึงใน Pizzi และ Mittal, 1994) กล่าวว่าแรงยึดติดของสารยึดหรือชั้นติดที่มีค่าน้อยเกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุมีความต้านเชื่อมแน่น (cohesive strength) ที่รอยต่อของผิวสัมผัสต่ำ ซึ่งมีสาเหตุมาจากบริเวณที่มีแรงยึดติดน้อยจะมีชั้นที่มีแรงยึดติดต่ำ (Weak boundary layer) เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วทฤษฎีนี้มักใช้อธิบายการยึดติดที่เราไม่สามารถที่จะใช้ทฤษฎีอื่นในการอธิบายได้ เช่น ในกรณีที่คิดว่าใช้สารยึดที่เหมาะสมแล้วแต่แรงยึดติดกลับน้อยกว่าที่คาดไว้ ดัง

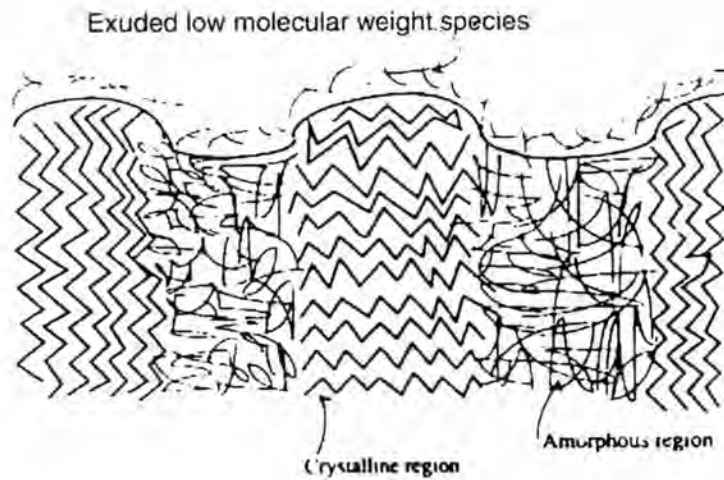
ตัวอย่างการทดลองเรื่อง การหลอมอัดรีด PE กับ PET (Pocius, 1997) เป็นฟิล์มประกบ เมื่อนำไปทดสอบหาค่างานของการยึดติด (work of adhesion) ด้วยการหาความต้านแรงลอก (Peel strength) แล้วพบว่ามีงานของการยึดติดมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงตรวจสอบพื้นผิวของรอยแยกระหว่างฟิล์ม PET กับ PE ด้วย XPS และ SIMS พบว่ารอยแยกระหว่างฟิล์มทั้งสองชนิดเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสทั้งหมด

ยังมีตัวอย่างของการเกิดขึ้นที่มีแรงยึดติดต่ำอีกหลายกรณี เช่น การยึดติดโลหะที่ไม่ได้กำจัด mill oil พื้นผิวที่เปียกน้ำหรือโลหะที่เกิดสนิม เป็นต้น แต่ชั้นที่มีแรงยึดติดต่ำกลับมีประโยชน์ในการทำแผ่นลอกเลเบลสกอตเทป (release liner) ซึ่งต้องมีคุณสมบัติที่สามารถติดได้ดีแต่ก็ต้องดึงออกได้ง่าย นอกจากนั้นยังนำไปสู่การพัฒนาการยึดติดที่แข็งแรงโดยการหาวิธีป้องกันการเกิดของชั้นที่มีแรงยึดติดต่ำนั่นเอง

2.6 การปรับผิวหน้า (Surface Treatment)

ลักษณะของผิวหน้าพลาสติกที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 แสดงผิวหน้าที่มีลักษณะเรียบและมีสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (อาจเป็นสารเติมแต่งหรือพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้นๆ) แพร่ออกมาอยู่บนพื้นผิว ส่วนภายในก็มีทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และ ส่วนอสัณฐาน (Amorphous) จะเห็นได้ว่าแม้การปรับปรุงผิวหน้าของพอลิเมอร์สามารถช่วยปรับปรุงแรงยึดติดของพอลิเมอร์กับวัสดุอื่นให้ดีขึ้นได้ แต่การปรับปรุงผิวหน้าของพอลิเมอร์ควรมีวิธีการที่เหมาะสมโดยคำนึงถึง สิ่งสำคัญต่อไปนี้

1. สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แพร่มาอยู่บนผิวหน้าทำให้เกิดชั้นที่แรงยึดติดต่ำขึ้นบนผิวหน้าซึ่งมีผลทำให้แรงยึดติดลดลง ดังนั้นจึงต้องกำจัดชั้นนี้ออกเพื่อเพิ่มแรงยึดติดให้ดีขึ้น
2. ใช้การปรับผิวหน้าช่วยให้ผิวหน้ามีพลังงานที่ผิวหน้า (Surface energy) สูงขึ้น เพื่อให้สารยึดหรือกาวสามารถเปียกบนพื้นผิวได้ดีขึ้น



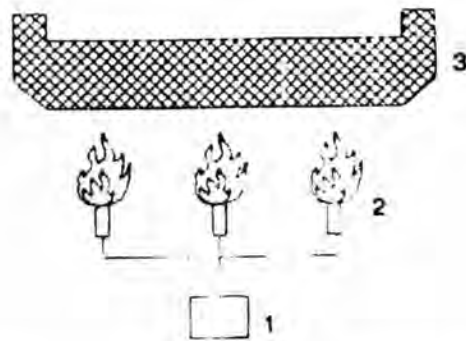
รูปที่ 2.22 ผิวหน้าของพอลิเมอร์ที่ต้องการการปรับผิวหน้าเพื่อเพิ่มแรงยึดติด

ดังนั้นก่อนที่จะนำฟิล์มพลาสติกไปใช้งานร่วมกับสารยึดจึงจำเป็นต้องมีการเตรียมผิวหน้าของฟิล์มให้พร้อมสำหรับการใช้งานกับกาวหรือหมึกพิมพ์ การปรับผิวหน้าของพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ การปรับผิวหน้าด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical method) และการปรับผิวหน้าด้วยวิธีทางเคมี (Chemical method) การปรับผิวหน้าทั้งสองแบบจะสามารถทำให้เกิดทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีบนพื้นผิวของฟิล์มเหมือนกัน อย่างไรก็ตามทั้งสองกระบวนการมีความแตกต่างอยู่ที่วิธีในการปรับผิวหน้า นั่นคือ ถ้าเป็นการปรับผิวหน้าด้วยวิธีทางกายภาพมักจะใช้รังสีที่มีพลังงานสูงๆเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงผิวหน้า ส่วนการปรับผิวหน้าด้วยวิธีทางเคมี จะนำฟิล์มพลาสติกจุ่มลงในอ่างสารเคมีหรือเคลือบผิวหน้าด้วยสารเคมี แต่ไม่ว่าจะใช้วิธีการใดก็ตามจุดประสงค์ก็เพื่อให้มีแรงยึดติดที่ผิวหน้าดีขึ้นเช่นกัน ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงเฉพาะการปรับผิวหน้าด้วยวิธีทางกายภาพซึ่งนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

2.6.1 การปรับผิวหน้าด้วยเปลวไฟ (Flame Treatment)

การปรับผิวหน้าด้วยเปลวไฟเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมานาน วิธีการนี้จะใช้หลักการของการทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนผิวหน้าของฟิล์มพลาสติก ทำให้ผิวหน้าพลาสติกสามารถดูดซับหมึกพิมพ์และกาวได้ดีขึ้นเนื่องจากความมีขั้วที่เพิ่มขึ้นที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เกิดมาจากเมื่อทำการปรับผิวหน้าด้วยเปลวไฟแล้วจะมีอนุมูล (radical) ไฮดรอกซิล

(ions) และโมเลกุลในสภาวะกระตุ้น (excited molecule) เกิดขึ้น อนุภาคเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวหน้าของพอลิเมอร์ทำให้มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆเกิดขึ้น



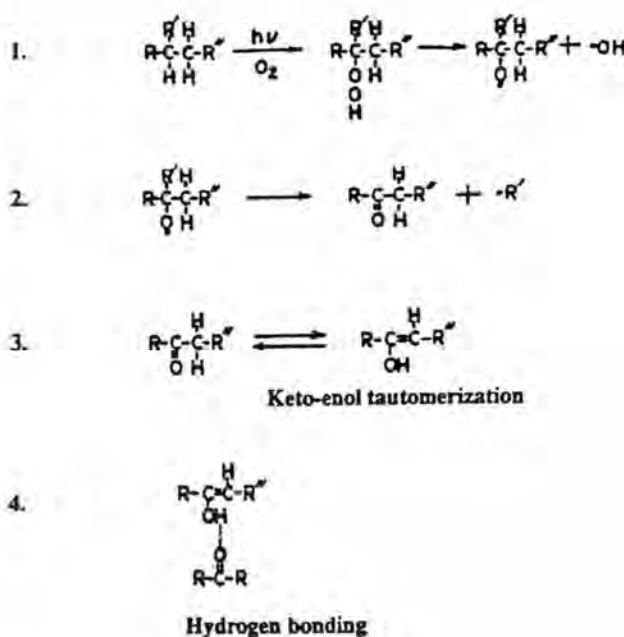
รูปที่ 2.23 แบบจำลองเครื่องปรับผิวหน้าด้วยเปลวไฟ

จากรูปที่ 2.23 จะเห็นว่าเครื่องปรับผิวหน้าด้วยเปลวไฟจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดเปลวไฟซึ่งจะติดตั้งให้มีระยะห่างคงที่จากตัวฟิล์มและปล่อยให้ฟิล์มวิ่งผ่านด้วยอัตราเร็วที่กำหนด สำหรับตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการปรับผิวหน้า คือ องค์ประกอบของเปลวไฟ อุณหภูมิ ระยะห่างของฟิล์มกับเปลวไฟ และอัตราเร็วในการปรับผิวหน้า ซึ่งมีความสำคัญค่อนข้างมากเนื่องจากถ้าควบคุมไม่เหมาะสมอาจทำให้ผิวหน้าของฟิล์มถูกทำลายได้ ส่งผลให้ความแข็งแรงและการยึดติดของฟิล์มมีค่าน้อยลง นอกจากนี้อัตราส่วนของแก๊สและอากาศที่ผสมกันจะมีผลต่อองค์ประกอบของเปลวไฟเช่นเดียวกัน

2.6.2 การปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา (Corona Treatment)

การทำคอโรนาเป็นวิธีการปรับผิวหน้าที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ที่ต้องมีการพิมพ์สี (printing) และการประกบ (lamination) จุดประสงค์ของการทำคอโรนาก็เช่นเดียวกับการปรับผิวหน้าแบบอื่น คือทำให้ผิวหน้าพลาสติกสามารถรับหมึกพิมพ์หรือกาวได้ดีขึ้น แต่ที่แตกต่างกันคือ หลักการในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนผิวหน้าซึ่งมีหลักการดังนี้ กระบวนการคอโรนา (Chan, 1994) เป็นกระบวนการที่เกิดจากการทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (electric field) โดยให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงเกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrod) โมเลกุลของแก๊สต่างๆที่อยู่ในสนามไฟฟ้านั้นจะแตกตัว (ionized) ทำให้อิเล็กตรอน (electron) ที่อยู่ชั้นนอกสุดของระดับพลังงานหลุดออกมา และสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของแก๊สโมเลกุลอื่นๆหลุดต่อเนื่องไปได้เรื่อยๆ ส่วนแผ่นฟิล์มจะวางอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าที่มีประจุเป็นบวกทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไปชนที่ผิวหน้าของฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีขึ้นที่บริเวณนั้น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้น คือ มีรูพรุนเล็กๆเกิดขึ้น (micropit) ทำให้ผิว

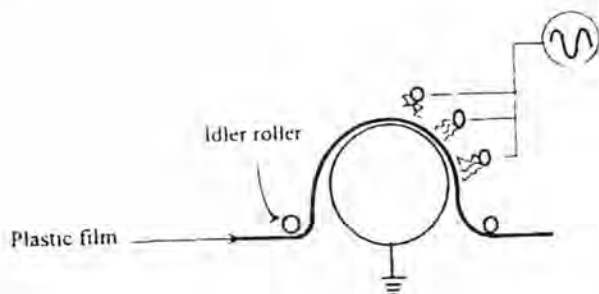
หน้ามีความขรุขระ (roughness) ช่วยให้เกิดการยึดเกาะเชิงกล (mechanical interlocking) ส่งผลให้มีแรงยึดติดได้ดีขึ้น สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้น (รูปที่ 2.24) ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ซึ่งเกิดจากแก๊สออกซิเจน แก๊สโอโซน หรือ ความชื้นที่อยู่ในบรรยากาศบริเวณที่ทำการทำคอบรินา จะถูกกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าให้ไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ (free radical) ที่อยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีหมู่ คีโตน อัลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ แอลดีด และหมู่เอสเทอร์ ทำให้ผิวหน้าบริเวณนั้นเกิดความมีขรุขระและหากนำไปประกบกับฟิล์มชนิดอื่นก็จะช่วยให้มีแรงยึดติดสูงขึ้น (นอกจากนี้ยังช่วยให้รับหมึกพิมพ์ได้ดีขึ้นเช่นเดียวกันเพราะว่ามีผิวหน้าของฟิล์มพลาสติกมีแรงยึดเกาะกับโมเลกุลของหมึกพิมพ์เพิ่มมากขึ้น) อีกปฏิกิริยาหนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้จากการทำคอบรินาคือ ปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (crosslink) ซึ่งเกิดจากการที่เปอร์ออกซีแรดิคัล (COO^*) ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันไปทำปฏิกิริยากับเปอร์ออกซีแรดิคัลของโมเลกุลอื่น ส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลดีขึ้น แต่ถ้าพลังงานที่ใช้ในการทำคอบรินามากเกินไปหรือใช้เวลานานเกินไปก็อาจเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลได้



รูปที่ 2.24 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากการทำคอบรินา

จากรูปที่ 2.25 ฟิล์มพลาสติกจะถูกลำแสงผ่านลูกกลิ้งซึ่งเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) ซึ่งต่อกับสายดินอยู่ ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจะถูกปรับระยะให้เหมาะสมกับสถานะในการปรับผิวหน้าอื่นๆ เช่น อัตราเร็วในการปรับผิวหน้า ชนิดของฟิล์มพลาสติก หน้ากว้างของฟิล์ม ฯลฯ นอกจากนั้นตัวขั้วไฟฟ้าเองยังแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ขั้วไฟฟ้าที่ทำจาก

เซรามิกส์ (ceramic electrode) ซึ่งเหมาะสำหรับปรับผิวหน้าวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ เช่น อะลูมิเนียมฟอยล์ กระดาษที่เคลือบด้วยโลหะ (metallized paper) ฯลฯ อีกประเภทหนึ่งคือ ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะ (metal electrode) ซึ่งเหมาะสำหรับปรับผิวหน้าวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น พลาสติก กระดาษ เป็นต้น



รูปที่ 2.25 แบบจำลองการทำงานของเครื่องคอโรนา

การปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา มีตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง ได้แก่ บรรยากาศ (atmosphere) กำลังไฟฟ้า (power input) จำนวนขั้วไฟฟ้า ความเร็วในการปรับผิวหน้า ความกว้างของขั้วไฟฟ้า และช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากับฟิล์ม (air-gap) เป็นต้น

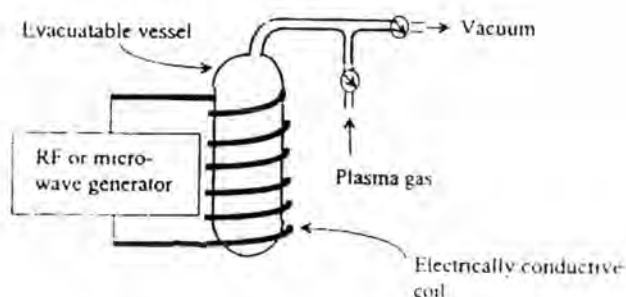
นอกจากการปรับผิวหน้าฟิล์มพลาสติกที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อน เช่น ฟิล์มแล้ว ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาให้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่มีรูปทรงซับซ้อนมากขึ้น เช่น แก้วน้ำ ขดลวด ฯลฯ โดยอาศัยการออกแบบขั้วไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้า เป็นต้น

2.6.3 การปรับผิวด้วยวิธีพลาสมา (Plasma treatment)

วิธีการปรับผิวหน้าโดยการใช้พลาสมาเป็นกระบวนการที่ใช้แก๊สที่แตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบในปริมาณเท่าๆกัน ทำปฏิกิริยากับไอออนหรืออิเล็กตรอนบนผิวหน้าของวัสดุ นอกจากนั้นบางครั้งขณะเกิดปฏิกิริยาผิวหน้าของวัสดุสามารถดูดกลืนแสงเหนือม่วง (Ultraviolet light) ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นได้เช่นเดียวกัน พลังงานของไอออนหรืออนุภาคลอิสระต่างๆ ที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าประมาณ 10 อิเล็กตรอนโวลต์ (electronvolt, eV) ซึ่งมีค่ามากเพียงพอจะทำลายพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนหรือคาร์บอนกับไฮโดรเจนบริเวณผิวหน้าของวัสดุได้ แต่วิธีการปรับผิวหน้าด้วยพลาสมาไม่ค่อยนิยมใช้ในอุตสาหกรรมจริงแต่กลับใช้ในการวิจัยมากกว่า เนื่องจากต้องใช้ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงมากและที่สำคัญคือ ไม่สามารถทำเป็นกระบวนการต่อเนื่องได้ ดังนั้นการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโร

นาและการใช้เปลวไฟที่ทำได้ง่าย ราคาถูก และที่สำคัญเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องได้จึงใช้กันมากกว่าในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

รูปที่ 2.26 แสดงการทำงานอย่างง่ายๆของเครื่องปรับผิวหน้าด้วยพลาสมา วัสดุที่จะถูกปรับผิวหน้าจะใส่ไว้ในท่อที่ดูดอากาศออกได้ (Evacuate vessel) จากนั้นจึงปล่อยแก๊สเข้าไปภายใน แก๊สที่ใช้นั้นสามารถเลือกใช้ได้หลายชนิด (Pocius, 1997) ซึ่งจะส่งผลต่อหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ผ่านการปรับผิวหน้า เช่น แก๊สเฉื่อย ประเภทอาร์กอน (Argon) หรือ ซีซีนอน (Xenon) แก๊สออกซิเจน ไนโตรเจน และ แก๊สฟลูออรีนเต็ด หลังจากเติมแก๊สเข้าไปในท่อแล้วจะมีการให้ความถี่ช่วงคลื่นวิทยุ (radio frequency) หรือ ช่วงคลื่นไมโครเวฟ (Microwave frequency) ไปที่ขดลวดที่พันรอบท่อที่ดูดอากาศออกได้แล้ว เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพลาสมาในท่อนั้น



รูปที่ 2.26 แบบจำลองเครื่องปรับผิวหน้าด้วยการทำพลาสมา (Pocius, 1997)

2.7 การวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์ม (Film's Surface Analysis)

เนื่องจากฟิล์มที่ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์โดยทั่วไปนั้นจะต้องผ่านการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาซึ่งทำให้พื้นผิวของฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี เช่นการเกิดรูพรุนเล็กๆและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อให้มีแรงยึดติดที่ดีขึ้นและสามารถรับหมึกพิมพ์ได้มากขึ้น (Chan, 1994) การตรวจสอบลักษณะของการปรับผิวด้วยการทำคอโรนาจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ฟิล์มที่ได้รับการปรับผิวหน้ามีสมบัติตามที่ต้องการ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวจึงเป็นเทคนิคที่สำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของฟิล์มที่จะนำไปใช้งาน รายละเอียดในหัวข้อนี้จึงนำเสนอเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวที่นิยมใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงต่างๆของฟิล์มภายหลังการปรับผิวหน้า

2.7.1 การวิเคราะห์มุมสัมผัส (Contact Angle Analysis)

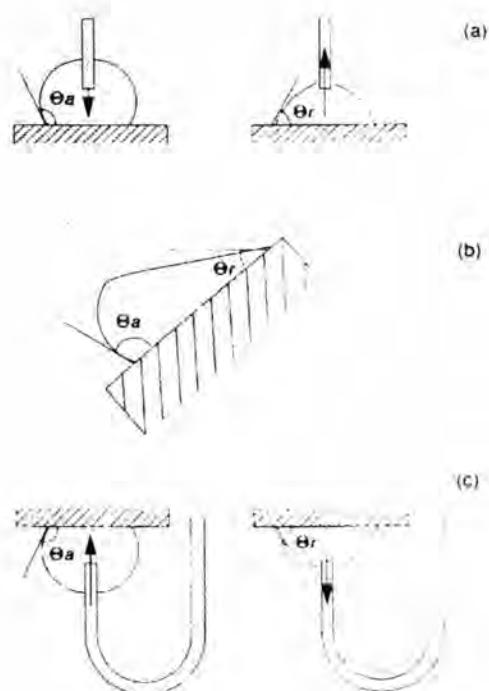
การวัดมุมสัมผัสเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากสำหรับตรวจสอบฟิล์มที่ได้รับการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา แต่สำหรับในอุตสาหกรรมนั้นนิยมดูจากค่าแรงตึงผิวเปียก (Wetting Tension) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่ามุมสัมผัสนั่นเอง

ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.6.3 เกี่ยวกับหลักการของมุมสัมผัสซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการของ Young (สมการที่ 2.2) ซึ่งได้อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรไว้แล้วในหัวข้อดังกล่าว ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงอธิบายเฉพาะรายละเอียดของวิธีการหาค่ามุมสัมผัสและแรงตึงผิวเปียก

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sv} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2.2)$$

วิธีการวัดมุมสัมผัสที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปมี อยู่ 3 วิธี (Garbassi, Morra, และ Occhiello, 1994) คือ

1. การวิเคราะห์มุมสัมผัสแบบ sessile drop เป็นการใช้ของเหลวที่มีความบริสุทธิ์หยดลงบนพื้นผิวของแข็งที่จะตรวจสอบ โดยใช้ ไมโครไซลิงค์ (Microsyringe) หรือ ไมโครปิเปต (Micropipete) ในการหยดของเหลวให้มีปริมาตรที่แน่นอน ร่วมด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำช่วยในการวัดมุมสัมผัส เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เรียกว่า โคนิโอมิเตอร์ (Goniometer) การหาค่ามุมสัมผัสสูงสุด (Maximum contact angle or Advancing contact angle) และ ค่ามุมสัมผัสต่ำสุด (Minimum contact angle or Receding contact angle) สามารถหาได้จากการเพิ่มและลดปริมาตรของหยดของเหลวจนกระทั่งหยดของเหลวเคลื่อนที่บนพื้นผิวของตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.27 a) สิ่งสำคัญที่ต้องระมัดระวังขณะที่ทำการวัดมุมสัมผัส คือ การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของหยดของเหลว ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อค่ามุมสัมผัสที่วัดได้



รูปที่ 2.27 การวัดค่ามุมสัมผัสสูงสุด (Advancing contact Angle, θ_a) และมุมสัมผัสต่ำสุด (Receding contact angle, θ_r) a) การวัดแบบ Sessile drop b) การวัดแบบ Wilhelmy plate technique และ c) การวัดแบบ Captive bubble technique

2. การวิเคราะห์มุมสัมผัสด้วยวิธี Wilhelmy plate technique อาศัยหลักการทางพลศาสตร์ (Dynamic) โดยทำการวัดมุมสัมผัสขณะที่หยดของเหลวนั้นกำลังเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ส่วนวิธีการหาค่ามุมสัมผัสสูงสุดและต่ำสุด จะใช้เทคนิคการเอียงเพลท (Tilting plate) โดยการเอียงพื้นผิวโพรบ (Probe) จนกระทั่งหยดของเหลวเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.26 b) แต่วิธีการวัดแบบนี้มีข้อเสียตรงที่ใช้ระยะเวลานานในการวัดแต่ละครั้ง ดังนั้นบริเวณรอยต่อของผิวสัมผัสจึงอาจเกิดการรวมตัวของสิ่งเจือปนในบรรยากาศกับขึ้นตัวอย่างทำให้ผลการวัดผิดพลาดได้

3. การวัดมุมสัมผัสด้วยวิธี Captive bubble technique ทำการวัดโดยใช้หลอดรูปตัวยู (U-shaped needle) หยดของเหลวหรือฟองอากาศใต้พื้นผิวที่จมอยู่ในของเหลว ในกรณีที่ใช้ของเหลวในการวัดนั้นต้องใช้ของเหลวที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (immiscible) กับของเหลวอีกชนิดที่ใช้ในการทดสอบ เช่นการใช้ไฮโดรคาร์บอนเหลวกับน้ำ เป็นต้น วิธีการวัดนี้เหมาะสำหรับของแข็งที่ต้องใช้ในสภาวะที่มีของเหลวล้อมรอบ ส่วนวิธีการหาค่ามุมสัมผัสสูงสุดและต่ำสุดนั้นจะใช้หลักการเดียวกับวิธี sessile drop คือการเพิ่มและลดปริมาณของของเหลวที่หยดบนพื้นผิวขึ้นทดสอบ ดังรูปที่ 2.26 c)

เทคนิคที่กล่าวมาทั้ง 3 วิธีเป็นวิธีการวัดมุมสัมผัสของพื้นผิวของแข็งในสภาวะต่าง ๆ กัน ค่ามุมสัมผัสที่ได้นั้นจะต้องนำไปเปลี่ยนเป็นแรงตึงผิวเปียก ซึ่งมีวิธีการเปลี่ยนค่ามุมสัมผัสเป็นแรงตึงผิวเปียกหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การเปลี่ยนค่ามุมสัมผัสตามมาตรฐาน ASTM D5946 ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\gamma_c = k_1 \gamma_{LV} - (1 - \cos\theta)/k_2 \quad (2.6)$$

โดยที่	γ_c	เป็นค่าแรงตึงผิวเปียกของของแข็ง
	γ_{LV}	เป็นค่าแรงตึงผิวเปียกระหว่างรอยต่อของผิวสัมผัสของแก๊สกับของเหลว ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 0.72 mN/m
	k_1	เป็นค่าคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.75-0.9
	k_2	เป็นค่าคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.35-0.46
	θ	เป็นมุมสัมผัส

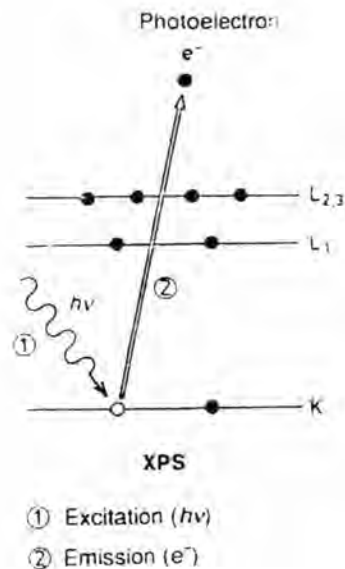
ค่าแรงตึงผิวเปียกที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าแรงตึงผิวเปียกของของเหลวและเป็นค่าโดยประมาณของพลังงานพื้นผิวของของแข็ง (Solid's surface energy) ด้วย สำหรับในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ที่ต้องใช้การปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาจะใช้ค่าแรงตึงผิวเปียกในการตรวจสอบฟิล์มที่ปรับผิวหน้า โดยกำหนดค่าแรงตึงผิวเปียกไว้ไม่ต่ำกว่า 38 ดายน์/เซนติเมตร

2.7.2 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

XPS หรืออีกชื่อหนึ่งที่นิยมคือ ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) เป็นเทคนิคการตรวจสอบพื้นผิวที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจาก XPS สามารถใช้กับตัวอย่างที่เป็น ของแข็ง ของเหลว หรือ แก๊ส ได้และที่สำคัญเป็นเทคนิคแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Nondestructive) อีกด้วย สำหรับการวิเคราะห์พื้นผิวของพอลิเมอร์ XPS (Chan, 1994) สามารถให้รายละเอียดของสภาวะทางเคมี (Chemical state) ผลจากการปรับผิวหน้า การเคลื่อนไหวนิวของสายโซ่โมเลกุล ฯลฯ

หลักการทำงานของ XPS จะฉายรังสีเอกซ์ (X-ray) ไปที่ชั้นทดสอบ จากนั้นโฟตอน (photon) ของรังสีเอกซ์จะเข้าไปกระตุ้นอิเล็กตรอน (Electron) ชั้นในสุดของอะตอมให้เกิดปฏิกิริยา

กิริยาการถ่ายโอนพลังงานจากโฟตอนไปยังอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นมีพลังงานเพียงพอที่จะหลุดออกมาจากระดับพลังงานนั้น โดยเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) กระบวนการที่กล่าวมาแสดงไว้ในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การเกิดโฟโตอิเล็กตรอน

ธาตุแต่ละชนิดจะมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของแต่ละระดับพลังงานเป็นค่าเฉพาะตัว ดังนั้นถ้าเราทราบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเราจะสามารถทราบได้ว่ามีธาตุชนิดใดอยู่บนชั้นทดสอบ เทคนิค XPS สามารถหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวได้โดยอาศัยหลักการคำนวณดังนี้ พลังงานศักย์ (E_k) ของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนหรือ $h\nu$ (h = ค่าคงที่ของ Plank, ν = ความถี่ของรังสีเอ็กซ์) กับพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy, E_b) ของระดับพลังงานชั้นในสุด เนื่องจากในการวิเคราะห์เราจะทราบค่าของ $h\nu$ ที่ใช้และค่า E_k นั้นสามารถทราบได้จากการทดลอง ดังนั้นเราจึงหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวได้ตามสมการที่ 2.7

$$E_b = h\nu - E_k \quad (2.7)$$

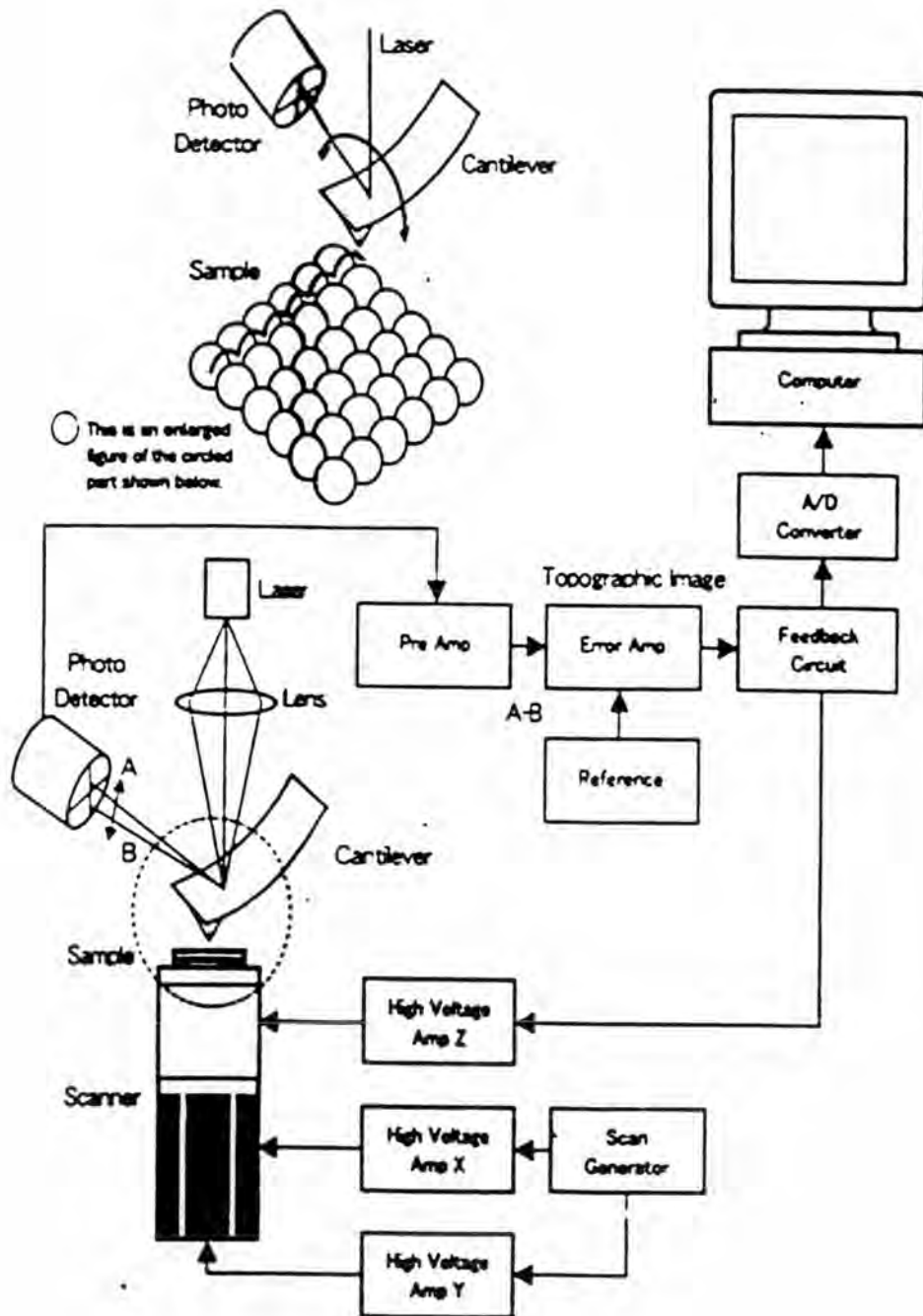
ตารางที่ 2.2 ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของธาตุต่างๆในแต่ละระดับพลังงาน (Chan, 1994)

Element	Binding energies (eV)						
	1 S _{1/2}	2 S _{1/2}	2 P _{1/2}	2 P _{3/2}	3 S _{1/2}	3 P _{1/2}	3 P _{3/2}
H	14						
He	25						
Li	55						
Be	111						
B	188			5			
C	284			7			
N	399			9			
O	532	24		7			
F	686	31		9			
Ne	867	45		18			
Na	1072	63		31			
Mg	1305	89		52			
Al		118	74	73			
Si		149	100	99	8		3
P		189	136	135	16		10
S		229	165	164	16		8
Cl		270	202	200	18		7
A		320	247	245	25		12
K		377	297	294	34		18
Ca		438	350	347	44		26
Sc		500	407	402	54		32
Ti		564	461	455	59		34
V		628	520	513	66		38
Cr		695	584	575	74		43
Mn		769	652	641	84		49
Fe		846	723	710	95		56
Co		926	794	779	101		60
Ni		1008	872	855	112		68
Cu		1096	951	931	120		74
Zn		1194	1044	1021	131		87

2.7.3 Atomic Force Microscopy (AFM)

AFM เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของพื้นผิววัสดุในระดับที่ต้องการกำลังขยายสูงมากๆ เพื่อหาลักษณะความเปลี่ยนแปลงทางผิวหน้า เช่น ความขรุขระที่เกิดขึ้น เป็นต้น หลักการทำงานของ AFM (Sawyer และ Grubb, 1996) เป็นการสร้างภาพจากสัญญาณการขยับขึ้นลง (Deflection) ของคานรองรับ (Cantilever) บนพื้นผิว ซึ่งที่ปลายของคานรองรับจะมีโพรบ (Probe) ที่มีความยาวประมาณ 100 ไมครอน กว้างประมาณ 70 ไมครอน และ

หนาไม่เกิน 1 ไมครอน เนื่องจากการขยับของคานรองรับมีระย่น้อยมากจึงต้องใช้โฟโตดีเทกเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณดังกล่าว แล้วจึงผ่านหน่วยประมวลผลแปรสัญญาณออกมาเป็นรูปดังแผนภาพที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แผนภาพการทำงานของเครื่อง AFM

ภาพจาก AFM นั้นไม่ใช่ภาพถ่ายจริงของพื้นผิวแต่เป็นการสร้างภาพจากความสูงต่ำของพื้นผิว ดังนั้นจึงมีประโยชน์ต่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของพื้นผิวที่มีความละเอียดสูงถึงระดับอะตอม เนื่องจากปลายของโพรบจะมีระยะห่างจากพื้นผิวเพียง 2-3 นาโนเมตรเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น การหาความขรุขระของพื้นผิว เป็นต้น

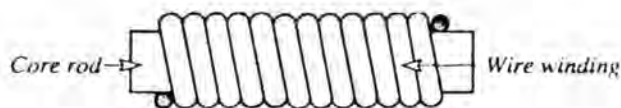
2.8 แท่งเคลือบ (Bar coater)

แท่งเคลือบเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเคลือบกาวลงบนฟิล์ม มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กกลม (rod) ที่มีขดลวด (wire) พันอยู่โดยรอบดังรูปที่ 2.30 เนื่องจากแท่งเคลือบเป็นเครื่องมือที่ใช้เคลือบผิวหน้าที่มีลักษณะเด่นตรงที่สามารถควบคุมความหนาของสารที่จะเคลือบ โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเป็นตัวกำหนดความหนาดังสมการที่ 2.8 (Brown, 1992)

$$K = 0.1073D \quad (2.8)$$

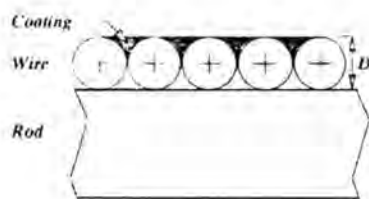
โดยที่ K = ความหนาของสารที่เคลือบลงบนฟิล์ม

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด



รูปที่ 2.30 แท่งเคลือบ

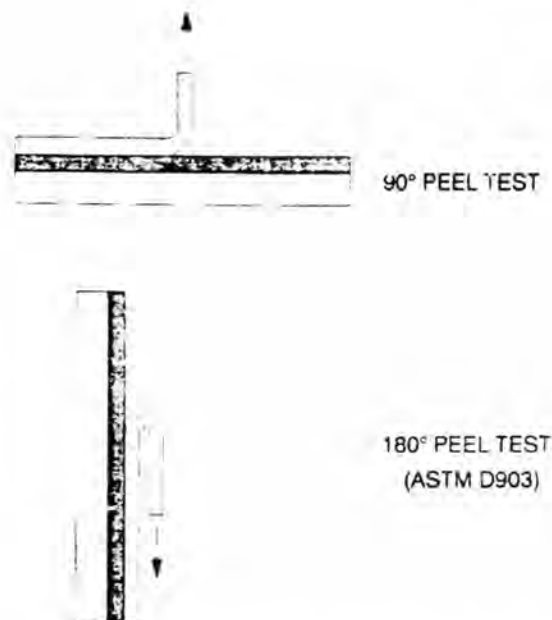
จากสมการ 2.8 แสดงให้เห็นว่า ความหนาของกาวที่เคลือบจะมีค่าประมาณ 1 ใน 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด นอกจากนั้นการที่แท่งเคลือบสามารถเคลือบสารบนฟิล์มโดยมีความหนาที่สม่ำเสมอเนื่องจากขณะเคลือบสารเช่นกาวลงบนฟิล์ม กาวจะไหลเข้าไปในช่องว่างระหว่างขดลวดจนเต็มดังนั้นกาวบริเวณผิวหน้าของแท่งเคลือบจึงมีความเรียบและสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.31 สำหรับกาวส่วนเกินจะไม่สัมผัสกับฟิล์มและไหลออกไปตามช่องว่างระหว่างขดลวด ขณะดึงหรือลากแท่งเคลือบไปตามผิวหน้าของฟิล์ม จึงทำให้กาวที่เคลือบอยู่บนฟิล์มมีความหนาที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.31 ภาคตัดขวางของแท่งเคลือบที่มีกาวอยู่ระหว่างช่องว่างของขดลวด

2.9 ความต้านแรงลอก (Peel Strength)

การวัดความต้านแรงลอก (Peel Test) เป็นวิธีการที่ใช้วัดแรงยึดติด (adhesion) ระหว่างวัสดุสองชนิดที่ยึดติดกัน โดยวัสดุชนิดใดชนิดหนึ่งหรือทั้งสองชนิดต้องเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น (flexible) เช่น พลาสติกกับพลาสติก พลาสติกกับอะลูมิเนียม เป็นต้น การวัดความต้านแรงลอกมีอยู่หลายวิธี เช่น การวัดความต้านแรงลอก 90 องศา (90° peel test) การวัดความต้านแรงลอก 180 องศา (180° peel test) เป็นต้น ลักษณะของการทดสอบแสดงวัดความต้านแรงลอก 90 และ 180 องศา แสดงไว้ในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 การทดสอบความต้านแรงลอก 90 องศา และ 180 องศา

การทดสอบความต้านแรงลอกที่อุตสาหกรรมผลิตฟิล์มประกอบนิยมใช้ คือ การวัดความต้านแรงลอก 180 องศา ค่าความต้านแรงลอกสามารถหาได้จากสมการที่ 2.9 โดยค่าความต้าน

แรงลอกที่อุตสาหกรรมตั้งไว้เป็นมาตรฐานสำหรับการทำฟิล์มประกบ คือ ไม่ต่ำกว่า 200 กรัม/15 มิลลิเมตร

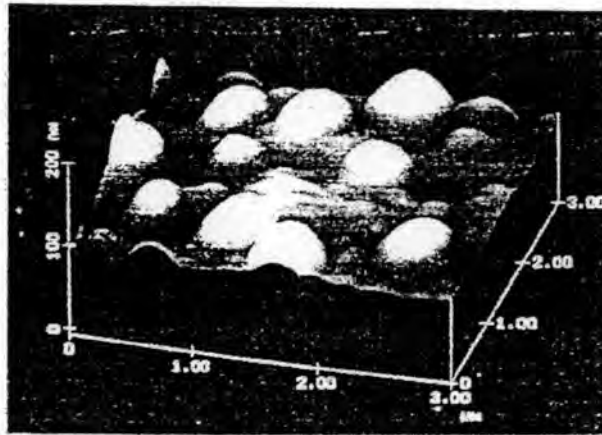
$$\text{ความต้านแรงลอก} = \text{แรงดึงลอก/ความกว้างของชั้นทดสอบ} \quad (2.9)$$

ในการทดสอบความต้านแรงลอกมีปัจจัยที่ต้องคำนึงหลายอย่าง เช่น มุมที่ใช้ในการดึงลอก (Kenton และ Wilmer, 1992) อัตราเร็วในการดึงลอกและวัสดุที่นำมาทดสอบ (Garbassi, 1994) เป็นต้น ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าความต้านแรงลอกควรจะใช้มาตรฐานในการทดสอบที่เหมือนกันด้วย เนื่องจากการทดสอบแต่ละแบบก็จะให้ค่าความต้านแรงลอกที่แตกต่างกันไปตามสภาวะที่ใช้ทดสอบ

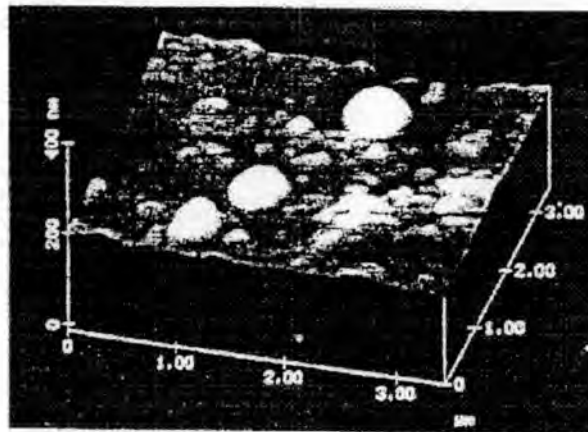
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากฟิล์มพอลิโพรพิลีนเป็นฟิล์มที่ใช้กันมากที่สุดในงานบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฟิล์มประเภทนี้ค่อนข้างมาก โดยงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งประเด็นความสนใจในหัวข้อของการทำคอโรนาเพื่อปรับผิวหน้าฟิล์ม เพราะฟิล์มที่ใช้ในอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่น การรับหมึกพิมพ์ การยึดติด ดังนั้นการปรับผิวหน้าฟิล์มด้วยการทำคอโรนาจึงเป็นวิธีการสำคัญที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อที่ 2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่

Overney และคณะ ได้ใช้อะตอมมิคฟอสไมโครสโคปี (Atomic Force Microscopy ,AFM) ศึกษาผิวหน้าของฟิล์ม พอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียว (Oriented PolyPropylene, OPP) และ พอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวสองทิศทาง (Biaxially orientated Polypropylene, BOPP) โดยเปรียบเทียบผิวหน้าของฟิล์มทั้งสองชนิดที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยวิธีคอโรนา จากการวิจัยสรุปได้ว่า ฟิล์มโอพีพี (OPP) ที่ได้รับการปรับผิวหน้าจะเกิดอนุภาคคล้ายหยดน้ำ (droplet) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการปรับผิวหน้า คือหากใช้พลังงานในการปรับผิวหน้าสูงกว่าค่าวิกฤตค่าหนึ่งอนุภาคคล้ายหยดน้ำนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการยึดติดกับฟิล์มชนิดเดียวกัน (selfadhesion) มีค่าต่ำลง ในขณะที่ฟิล์มบีโอพีพี (BOPP) ก็มีขนาดอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายหยดน้ำเช่นเดียวกันแต่จะมีปริมาณน้อย และขนาดก็เล็กกว่าอนุภาคคล้ายหยดน้ำของฟิล์มโอพีพีที่ระดับพลังงานปรับผิวหน้าเท่ากัน (รูปที่ 2.33 และรูปที่ 2.34) ทำให้มีแรงยึดติดกับตัวเองสูงกว่าฟิล์มโอพีพี



รูป 2.33 ลักษณะอนุภาคคล้ายหยดน้ำของฟิล์มไอพีพี



รูป 2.34 ลักษณะอนุภาคคล้ายหยดน้ำของฟิล์มบีไอพีพี

Foldes และคณะ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลางเชิงเส้น (Linear-Middle Density Polyethylene, L-MDPE) และ พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดผสมกันในอัตราส่วน 80:20 (LDPE:L-MDPE) ผลการวิจัยพบว่าภายหลังการทำคอโรนา ค่าแรงดึงผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีนทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความหยาบของผิวหน้า (surface roughness) ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักหลังจากการทำคอโรนา แต่มีลักษณะเฉพาะขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์อีกด้วย ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี พบว่าการทำคอโรนาเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวหน้าของฟิล์มทุกชนิด แต่เมื่อเก็บฟิล์มไว้ 160 วัน แล้วนำมาทดสอบใหม่ พบว่า ฟิล์มทั้ง 3 ชนิดจะมี แรงดึง

ผิวและความหยาบลดลง สันนิษฐานว่าเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่ของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ เช่น สารเติมแต่งขึ้นมาที่ชั้นผิวหน้า

Argun และคณะ ได้นำฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่ทำการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาในอุตสาหกรรมจริงมาใช้ในการวิจัย จากการศึกษาความหยาบที่ผิวหน้าไม่พบความแตกต่างระหว่างฟิล์มที่ผ่านการทำคอโรนาและไม่ผ่านการทำคอโรนา ส่วนมุมสัมผัสจากน้ำ (water-contact angle) หลังจากการปรับผิวหน้าจะมีค่าลดลง (แรงดึงผิวเพิ่มขึ้น) และจะมีค่าเพิ่มขึ้น (แรงดึงผิวลดลง) เมื่อเก็บฟิล์มไว้เป็นระยะเวลา 144 ชั่วโมงแล้วนำมาทดสอบใหม่ นอกจากนั้นการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนายังทำให้บริเวณผิวหน้ามีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น (เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปจะมีค่าลดลงเช่นเดียวกับมุมสัมผัสจากน้ำ

จากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าผลของการทำคอโรนาเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.7.2 โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งไปที่การลดลงของแรงดึงผิวภายหลังการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งที่ยังไม่สามารถหาทางแก้ไขได้ แต่ยังไม่มียานวิจัยใดสนใจประเด็นของการวิเคราะห์ฟิล์มประกบด้วยกระบวนการประกบแบบแห้ง ประเด็นนี้มีสิ่งที่น่าสนใจ คือ ถ้าลองเปลี่ยนลักษณะการทำคอโรนา เช่น การปรับผิวหน้าหลายครั้งหรือทิศทางในการทำคอโรนา เช่น การปรับผิวหน้า 2 ครั้งในแนวตั้งฉากกัน (Cross-Pattern, CP) จะมีผลอย่างไรต่อการยึดติดของฟิล์ม ประเด็นนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้กระบวนการประกบแบบแห้งในการประกบฟิล์ม เนื่องจากอาจมีแนวทางใหม่ๆที่สามารถเพิ่มแรงยึดติดโดยการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา ประเด็นต่อมาคือ ถ้าสามารถเพิ่มแรงยึดติดด้วยการทำคอโรนาได้แล้วอาจจะสามารถช่วยลดปริมาณของตัวทำละลายในกาที่ใช้ในการประกบแบบแห้งได้ เนื่องจากกลิ่นของตัวทำละลายสามารถทำให้อันตรายต่อผู้ที่สูดดมเข้าไปได้ ซึ่งทั้งสองประเด็นเป็นส่วนหนึ่งในวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อใช้ในการสร้างความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำคอโรนาให้กับผู้ผลิตฟิล์มประกบในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ นอกจากนั้นยังเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป