

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การวัดค่ามุมสัมผัส (Contact Angle Measurement)

4.1.1 การหาค่าพลังงานที่เหมาะสมในการทำคอโรนาเพื่อปรับผิวหน้าของฟิล์ม

ค่ามุมสัมผัสเป็นค่าที่สามารถบอกถึงค่าแรงดึงผิวเปียกหรือความสามารถในการเปียกของวัตถุ ถ้าฟิล์มมีค่ามุมสัมผัสต่ำจะมีค่าแรงดึงผิวเปียกสูงหมายถึงสามารถรับกาวหรือหมึกพิมพ์ได้ดีขึ้น ดังนั้นการหาค่ามุมสัมผัสของฟิล์มที่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจะทำให้ทราบได้ว่าฟิล์มนั้นมีความสามารถที่จะรับกาวหรือหมึกพิมพ์ได้ดีหรือไม่

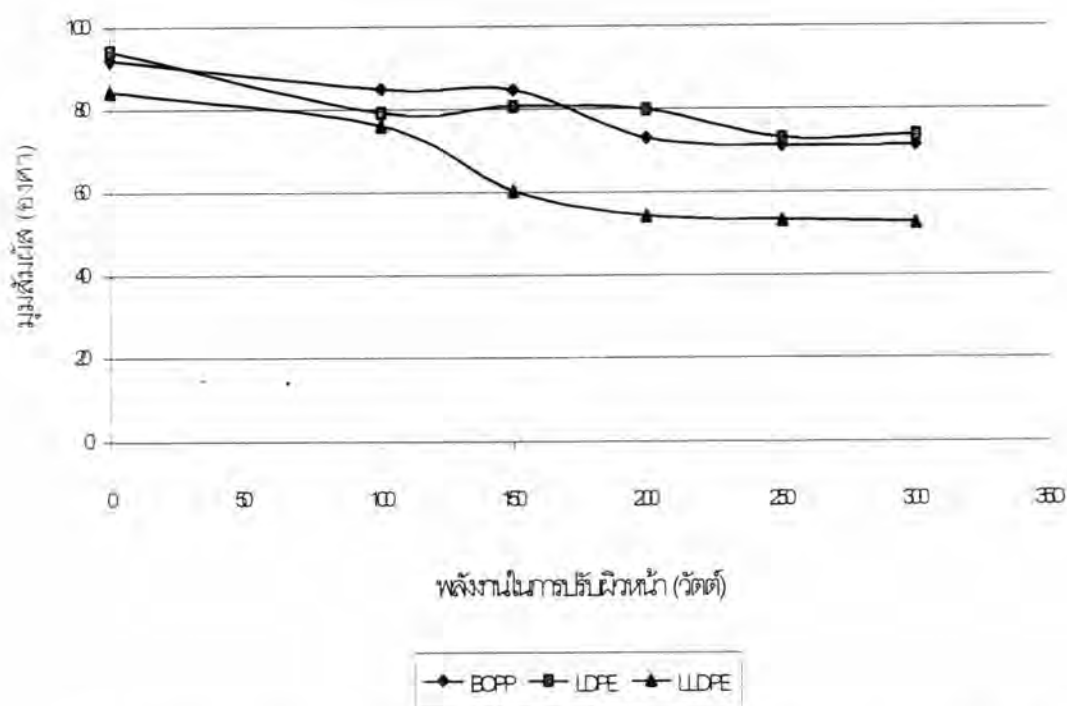
การหาพลังงานในการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาให้เหมาะสมของกับฟิล์มแต่ละชนิดจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เนื่องจากฟิล์มแต่ละชนิดจะตอบสนองต่อการปรับผิวหน้าแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการหาพลังงานที่เหมาะสมที่สุดในการปรับผิวหน้าของฟิล์มแต่ละชนิดเพื่อให้มีแรงยึดติดที่ดีตามที่ต้องการ พลังงานที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีตั้งแต่ 0 100 150 200 250 และ 300 วัตต์ตามลำดับ จากนั้นนำไปหาค่ามุมสัมผัสและแรงดึงผิวเปียก (Wetting Tension) ได้ผลดังกราฟที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าฟิล์มทั้ง 3 ชนิดมีการตอบสนองต่อการทำคอโรนาคล้ายคลึงกัน คือมีค่ามุมสัมผัสลดลงจนคงที่ในระดับหนึ่ง แต่มีรายละเอียดแตกต่างกันดังนี้

ฟิล์ม BOPP (Biaxially Oriented Polypropylene) จะมีค่ามุมสัมผัสลดลงจนคงที่ที่พลังงานในการปรับผิวหน้าเท่ากับ 200 วัตต์ มุมสัมผัสที่คงที่ประมาณ 72 องศา และมีค่าแรงดึงผิวเปียกเท่ากับ 39 ดายน์/เซนติเมตร

ฟิล์ม LDPE (Low Density Polyethylene) จะมีค่ามุมสัมผัสลดลงจนคงที่ที่พลังงานในการปรับผิวหน้าเท่ากับ 250 วัตต์ มุมสัมผัสที่คงที่ประมาณ 73 องศา และมีค่าแรงดึงผิวเปียกเท่ากับ 39 ดายน์/เซนติเมตร

ฟิล์ม LLDPE (Linear Low Density Polyethylene) จะมีค่ามุมสัมผัสลดลงจนคงที่ที่พลังงานในการปรับผิวหน้าเท่ากับ 200 วัตต์ มุมสัมผัสที่คงที่ประมาณ 53 องศา และมีค่าแรงดึงผิวเปียกเท่ากับ 46 ดายน์/เซนติเมตร

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มประเภทที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปข้อกำหนดของฟิล์มที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาต้องมียค่าแรงดึงผิวเปียกไม่ต่ำกว่า 38 ดายน์/เซนติเมตร จึงสรุปได้ว่า ค่าพลังงานที่เหมาะสมในการปรับผิวหน้าฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE มีค่าเท่ากับ 200 และ 250 วัตต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการปรับผิวหน้ากับมุมสัมผัส

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการปรับผิวหน้ากับมุมสัมผัส

พลังงานในการปรับ ผิวหน้า (วัตต์)	มุมสัมผัส (องศา)		
	BOPP	LDPE	LLDPE
0	91.9 ± 3.6	94.2 ± 1.3	84.2 ± 1.5
100	84.8 ± 0.7	79.2 ± 1.1	75.9 ± 0.9
150	84.6 ± 1.0	80.6 ± 2.4	60.2 ± 4.8
200	72.9 ± 1.7	79.8 ± 1.9	54.1 ± 2.5
250	71.0 ± 1.2	72.8 ± 2.8	53.2 ± 1.2
300	71.1 ± 1.1	73.6 ± 0.9	52.6 ± 2.9

ตารางที่ 4.2 แรงดึงผิวเปียกของฟิล์มที่ผ่านการปรับผิวหน้าที่มีพลังงานต่างๆกัน

พลังงานในการปรับ ผิวหน้า (วัตต์)	แรงดึงผิวเปียก (ดาเยน/เซนติเมตร)		
	BOPP	LDPE	LLDPE
0	32.0 ± 1.4	31.0 ± 0.7	34.6 ± 0.5
100	34.4 ± 0.5	36.8 ± 0.4	35.2 ± 1.6
150	34.8 ± 0.4	36.2 ± 1.3	43.6 ± 1.5
200	38.8 ± 0.8	36.4 ± 0.9	45.6 ± 0.9
250	40.4 ± 0.5	39.0 ± 1.0	45.8 ± 0.4
300	39.8 ± 0.4	38.6 ± 0.5	45.6 ± 0.9

4.1.2 ผลการปรับผิวหน้าต่อค่ามอดุลัสของฟิล์ม

งานวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาอิทธิพลของจำนวนครั้งและทิศทางในการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนส์ที่ใช้ทั้ง 3 ชนิด จึงแบ่งการปรับผิวหน้าออกเป็นทั้งหมด 5 ลักษณะ คือ 1) ไม่ปรับผิวหน้า 2) ปรับผิวหน้า 1 ครั้ง (1 Time, 1T) 3) ปรับผิวหน้า 2 ครั้งในทิศทางเดียวกัน (2 Time, 2T) 4) ปรับผิวหน้า 2 ครั้งในทิศทางตั้งฉากกัน (Cross Pattern, CP) และ 5) การปรับผิวหน้าจากโรงงาน (Factory, FC) โดยใช้พลังงานในการทำคอโรนา 200 วัตต์ สำหรับฟิล์ม BOPP 250 วัตต์ สำหรับฟิล์ม LDPE 200 วัตต์ สำหรับฟิล์ม LLDPE อัตราเร็วในการทำคอโรนา 0.22 เมตร/นาที ผลการวัดค่ามอดุลัสของฟิล์มที่ผ่านการทำคอโรนาทั้ง 5 ประเภท แสดงในตารางที่ 4.3 สรุปได้ว่า เมื่อฟิล์ม BOPP และ LDPE มีการปรับผิวหน้าเพิ่มขึ้น จาก 1 ครั้ง (1T) เป็น 2 ครั้ง (2T, CP) ค่ามอดุลัสไม่เกิดความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือมีค่าประมาณ 72 องศา สำหรับฟิล์ม BOPP และ 55 องศา สำหรับฟิล์ม LLDPE แต่สำหรับฟิล์ม LDPE ที่ปรับผิวหน้าในห้องทดลองจะมีค่ามอดุลัสลดลงเมื่อเพิ่มการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา 1 ครั้ง เป็น 2 ครั้ง (ทั้ง 2 T และ CP) คือ จาก 73 องศา เป็น 67 องศา แสดงว่า จำนวนครั้งในการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนามีอิทธิพลต่อค่ามอดุลัสและแรงดึงผิวเปียก ของฟิล์ม LDPE เพียงชนิดเดียว

ตารางที่ 4.3 มอดุลัสของการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาลักษณะต่างๆ

ลักษณะในการปรับผิวหน้า	มอดุลัส (องศา)		
	BOPP	LDPE	LLDPE
NT	91.9 ± 3.6	94.2 ± 1.3	84.2 ± 1.5
1T	72.9 ± 1.7	72.8 ± 2.8	54.1 ± 2.5
2T	71.7 ± 1.1	66.9 ± 0.8	55.0 ± 2.2
CP	70.9 ± 0.9	67.1 ± 1.9	58.3 ± 1.2
FAC	26.3 ± 2.7	73.9 ± 1.3	68.2 ± 1.4

ตารางที่ 4.4 แรงดึงผิวเปียกของการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาลักษณะต่างๆ

ลักษณะในการ ปรับผิวหน้า	แรงดึงผิวเปียก (ดาายน์/เซนติเมตร)		
	BOPP	LDPE	LLDPE
NT	32.0 ± 1.4	31.0 ± 0.7	34.6 ± 0.5
1 T	38.8 ± 0.8	39.0 ± 1.0	45.6 ± 0.9
2 T	39.8 ± 0.4	41.0 ± 0.7	43.8 ± 0.4
CP	39.4 ± 0.5	41.0 ± 0.7	43.8 ± 0.4
FAC	>46	38.4 ± 0.5	40.6 ± 0.5

นอกจากนั้นค่ามูมสัมพัทธ์ของฟิล์ม BOPP ที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจากโรงงานมีความแตกต่างจากการปรับผิวหน้าในห้องทดลองค่อนข้างมาก คือประมาณ 26 องศา และ 72 องศาตามลำดับ ความแตกต่างของมูมสัมพัทธ์ที่พบอาจเกิดจากความแตกต่างของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนา คือ อิเล็กโทรดในห้องทดลองทำจากเซรามิกซึ่งเหมาะสำหรับการปรับผิวหน้าวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ เช่น พวกออะลูมิเนียม ส่วนอิเล็กโทรดของโรงงานนั้นทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเหมาะสำหรับการปรับผิวหน้าวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น พลาสติก กระดาษ ฯลฯ อีกประเด็นหนึ่งคือ ในโรงงานจะใช้พลังงานในการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาสูงมาก ประมาณ 2-5 กิโลวัตต์เนื่องจากต้องปรับผิวหน้าอย่างรวดเร็วในกระบวนการผลิต นอกจากนี้โรงงานมักนิยมทำการปรับผิวหน้าฟิล์ม BOPP 2 ครั้งอีกด้วย ปัจจัยทั้ง 3 ข้อนี้อาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่ามูมสัมพัทธ์ของฟิล์มที่ผ่านการปรับผิวหน้าจากห้องทดลองมีค่าแตกต่างจากฟิล์มที่ทำคอโรนาจากโรงงานมาก

สำหรับมูมสัมพัทธ์ของฟิล์ม LDPE ที่ทำคอโรนาจากห้องทดลองทั้ง 3 แบบ (1T, 2 T และ CP) นั้นมีค่ามูมสัมพัทธ์ไม่แตกต่างกับฟิล์ม LDPE ที่ทำคอโรนาจากโรงงานมาก คือ ประมาณ 67-72 องศา สำหรับฟิล์ม LDPE ที่ปรับผิวหน้าในห้องทดลอง และ ประมาณ 74 องศา สำหรับฟิล์ม LDPE ที่ทำคอโรนาจากโรงงาน

ส่วนฟิล์ม LLDPE มีค่ามอดุลัสจากการปรับผิวหน้าโดยโรงงานสูงกว่าการปรับผิวหน้าจากห้องทดลอง อธิบายได้ว่า เนื่องจากการทำคอโรนามีข้อเสียที่สำคัญ (Suzer และคณะ) คือ ค่ามอดุลัสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายหลังการปรับผิวหน้าและจะคงที่ที่ค่าหนึ่งทำให้ฟิล์มดูซีมหมึกพิมพ์หรือขาวได้น้อยลง ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าฟิล์มจากโรงงานได้รับการปรับผิวหน้ามาเป็นระยะเวลาานมากกว่าการปรับผิวหน้าในห้องทดลองทำให้มีมอดุลัสเพิ่มขึ้นมากกว่าก็เป็นได้

จากทั้งหมดนี้สามารถสรุปได้ว่า การปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนานั้นทำให้มอดุลัสมีค่าลดลง (แรงดึงผิวเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น) โดยที่ฟิล์มทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มเดียวกัน คือ มีค่าลดลงจนคงที่ที่ค่าค่าหนึ่ง แต่จะแตกต่างกันตามชนิดของฟิล์ม นอกจากนี้การปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาในห้องทดลองจะมีความแตกต่างจากการปรับผิวโดยการทำคอโรนาจากโรงงาน ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะตัวของฟิล์มและสภาวะในการปรับผิวหน้าที่ต่างกัน เช่น แทงอเล็กโทรดที่ใช้ในการปรับผิวหน้า อัตราเร็วในการปรับผิวหน้า พลังงานในการปรับผิวหน้า เป็นต้น โดยที่ฟิล์ม LLDPE มีค่ามอดุลัสจากการทำคอโรนาในห้องทดลอง (1T 2T และ CP) ต่ำที่สุด คือ ประมาณ 55 องศา น้อยกว่า BOPP (72 องศา) และ LDPE (67 องศา) จึงอาจกล่าวได้ว่า ฟิล์ม LLDPE สามารถปรับผิวหน้าได้ง่ายกว่า BOPP และ LDPE เพราะมีสภาวะในการปรับผิวหน้าเหมือนกันแต่มอดุลัสมีค่าต่ำกว่าค่อนข้างมาก

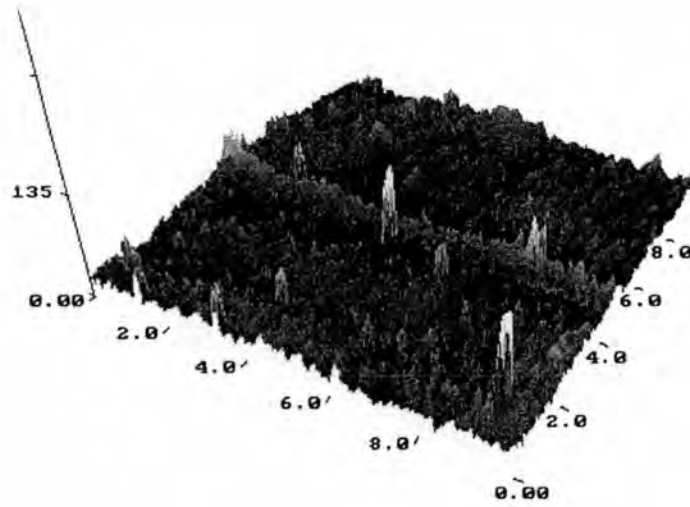
4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฟิล์ม

จากงานวิจัยจำนวนหนึ่ง (Enkio และคณะ; Suzer และคณะ) ซึ่งกล่าวไว้ว่าการปรับผิวหน้าฟิล์มโดยการทำคอโรนาทำให้เกิดรูเล็กๆ (micropit) ขึ้นบนผิวหน้าซึ่งทำให้ผิวหน้าของฟิล์มมีความขรุขระ (Roughness) เพิ่มขึ้นดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำฟิล์มที่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยคอโรนาในห้องทดลองทดสอบเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ปรับผิวหน้าโดยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM) ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้ ภาพจาก AFM ของฟิล์มทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะรวมกันที่เห็นชัดเจนประการหนึ่งคือ ภายหลังจากการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนานั้นจะพบว่าฟิล์มทั้ง 3 ชนิดมีรูเล็กๆเพิ่มขึ้นโดยสังเกตจากความแตกต่างของความเข้มของสีจากภาพของ AFM จะมีสีเข้มมากขึ้น (รูปที่ 4.2-4.7) แต่ฟิล์มมีความหยาบเฉลี่ย (Roughness average, R_a) เปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของฟิล์ม

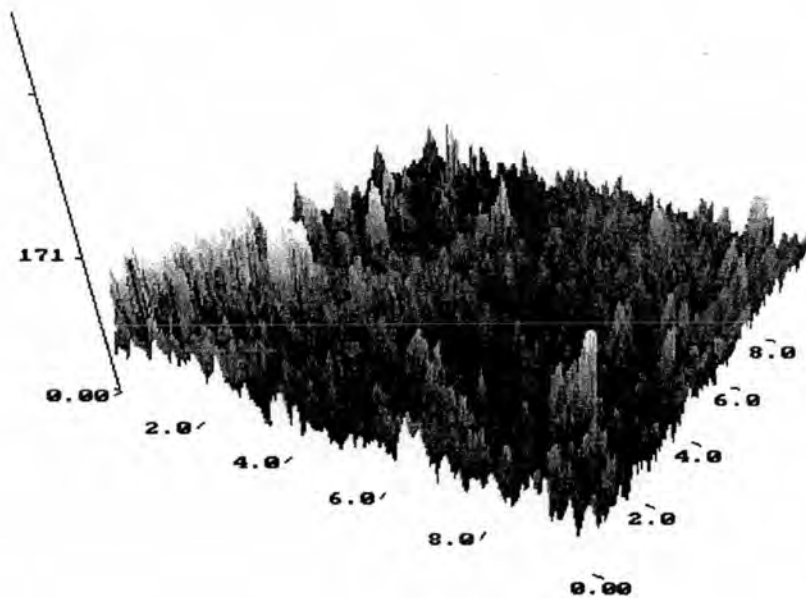
ฟิล์ม BOPP มีค่าความหยาบเฉลี่ยต่ำที่สุดและมีค่าน้อยกว่า LLDPE กับ LDPE คือมีค่าประมาณ 10 20 และ 40 นาโนเมตรตามลำดับ นอกจากนั้นสภาวะในการผลิตฟิล์มก็น่าจะมีผลต่อความขรุขระของฟิล์มเช่นเดียวกัน ดังนั้นการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาสามารถทำให้ฟิล์มเกิดความขรุขระเพิ่มขึ้นได้ในระดับนาโนเมตรซึ่งทำให้เกิดรูเล็กๆ ขึ้นบนฟิล์มได้

ตารางที่ 4.5 ค่าความขรุขระเฉลี่ยจากการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนา

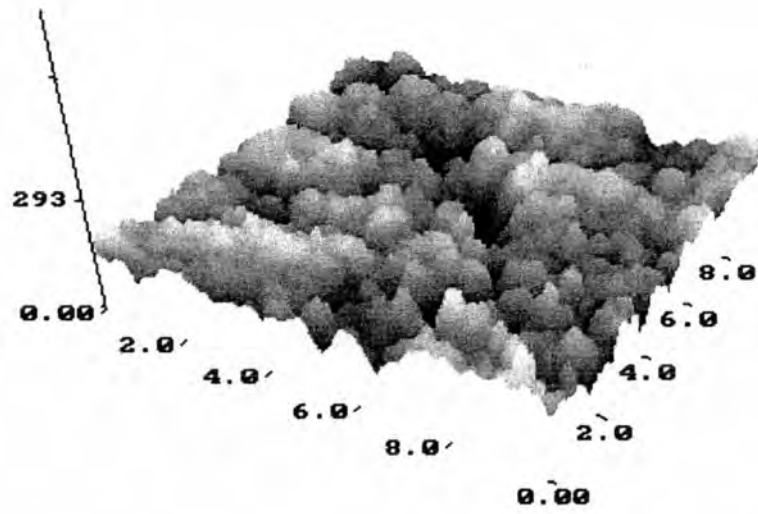
ชนิดของฟิล์ม/การปรับผิวหน้า	R_a (นาโนเมตร)	Root mean square (Rms)
BOPP/ไม่ปรับผิวหน้า	9.4	6.9
BOPP/ปรับผิวหน้า 1 ครั้ง	13.3	9.2
LLDPE/ไม่ปรับผิวหน้า	19.8	15.7
LLDPE/ปรับผิวหน้า 1 ครั้ง	24.5	19.2
LDPE/ไม่ปรับผิวหน้า	33.6	26.5
LDPE/ปรับผิวหน้า 1 ครั้ง	50.3	36.4



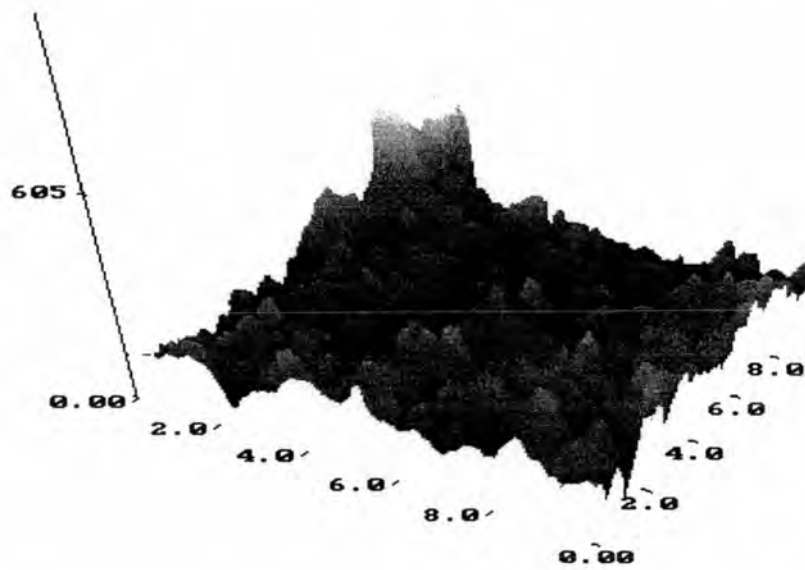
รูปที่ 4.2 ภาพ AFM ของฟิล์ม BOPP ที่ไม่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา



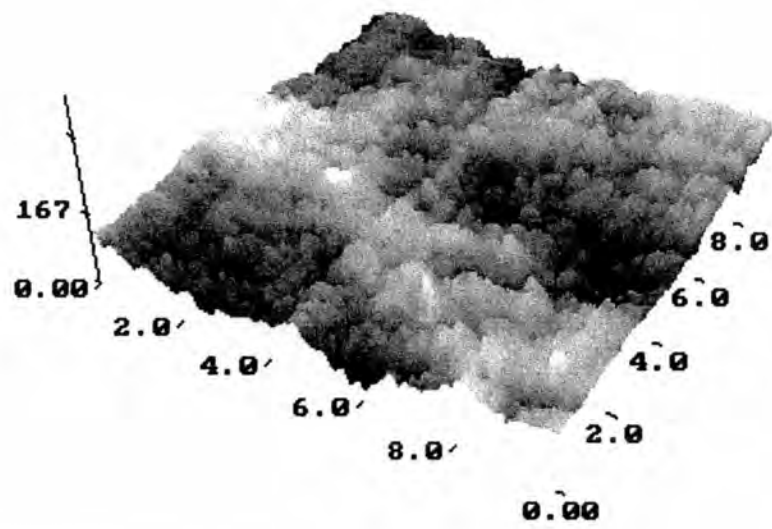
รูปที่ 4.3 ภาพ AFM ของฟิล์ม BOPP ที่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา



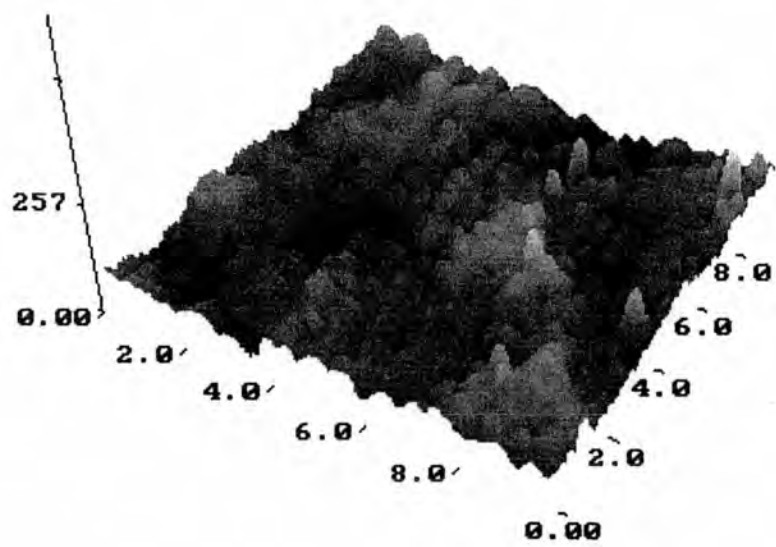
รูปที่ 4.4 ภาพ AFM ของฟิล์ม LDPE ที่ไม่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา



รูปที่ 4.5 ภาพ AFM ของฟิล์ม LDPE ที่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา



รูปที่ 4.6 ภาพ AFM ของฟิล์ม LLDPE ที่ไม่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา



รูปที่ 4.7 ภาพ AFM ของฟิล์ม LLDPE ที่ไม่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา

4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของฟิล์ม

การทำคอโรนาสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี คือ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวหน้าของฟิล์ม (Chan, 1994) งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มักสนใจหรือศึกษาเพียงฟิล์มที่ผ่านการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาเท่านั้น แต่ในงานวิจัยนี้จะศึกษาทั้งฟิล์มที่ผ่านการทำคอโรนาและฟิล์มที่ผ่านการประกบแบบแห้ง (Dry Lamination) ที่ถูกดึงลอกออกจากกัน เพื่อตรวจสอบการยึดติดของกาวกับฟิล์มว่าเป็นไปในลักษณะใดซึ่งผลการศึกษาจะแสดงได้ว่ากาวที่ใช้ในการประกบนั้นจะยึดติดอยู่บนฟิล์มชนิดใดหรืออยู่บนฟิล์มทั้ง 2 ชนิด

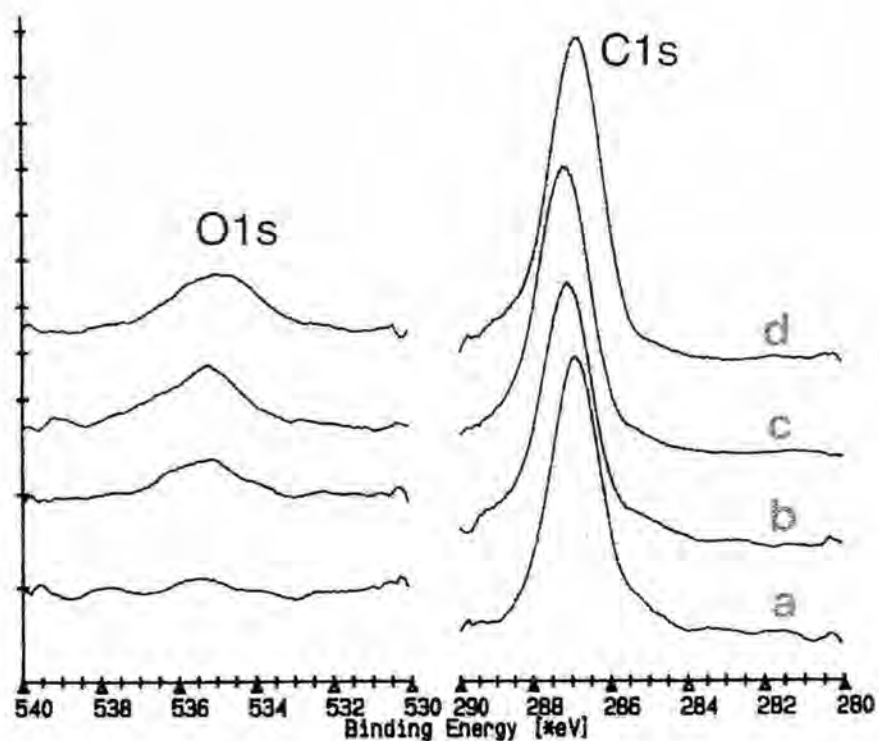
XPS เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของผิวหน้าของวัสดุ เนื่องจากผลการวิเคราะห์จาก XPS สามารถบอกการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางเคมี (Chemical state) ของธาตุแต่ละชนิดที่อยู่บนพื้นผิวได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ XPS ในการศึกษา การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นจากการทำคอโรนาบนผิวหน้าของฟิล์มและวิเคราะห์ลักษณะการยึดติดของกาวกับฟิล์มที่เกิดขึ้น

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังการปรับผิวหน้าฟิล์มโดยการทำคอโรนา

ฟิล์มที่ไม่ปรับผิวหน้าและปรับผิวหน้าทั้ง 4 ลักษณะ (NT, 1T, 2T และ CP) ได้รับความตรวจสอบผิวหน้าโดยใช้ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) โดยมีแหล่งกำเนิดพลังงานเป็น X-ray $MgK\alpha$ มุมในการทดสอบ 90 องศา และความลึกของการทดสอบประมาณ 5 นาโนเมตร

จากผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของคาร์บอน พบว่าสภาวะทางเคมีของคาร์บอนของฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE (จากรูปที่ 4.8 a 4.9 a และ 4.10 a) ที่ไม่ผ่านการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนามีจะมีพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) เท่ากับ 287 eV ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับสภาวะทางเคมีในรูปหรือพันธะ C-CI หรือ -O-C-O- แต่ตามปกติแล้วสภาวะทางเคมีของคาร์บอนของพอลิเอทิลีนและพอลิพรอพิลีน (ฟิล์มที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้) ควรจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 285 eV (มีสภาวะทางเคมีอยู่ในรูป $-CH_2-$) (Briggs และ Seah, 1994) ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของ PE และ PP ที่แตกต่างจากค่าปกตินี้อาจเกิดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์หรืออาจมีสารเติมแต่งลอยขึ้นมาที่ผิวหน้า ทำให้สภาวะทางเคมีของคาร์บอนมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE (รูปที่ 4.8 b, c, d 4.9 b, c, d และ 4.10 b, c, d) ที่ผ่านการปรับผิว

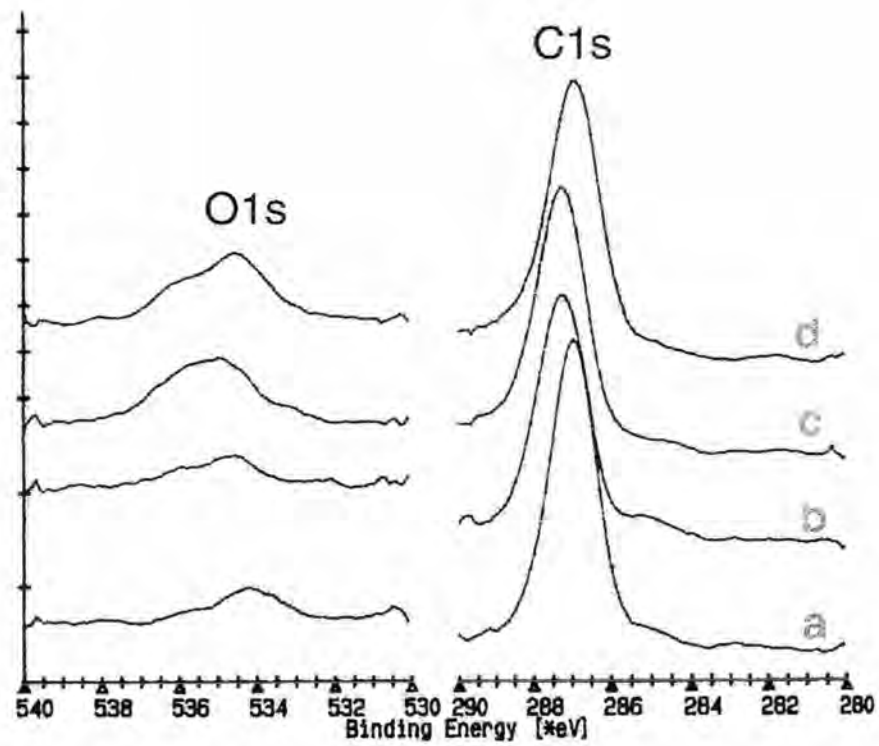
หน้าด้วยการทำ corona แบบ 1T และ 2T ปรากฏว่าพีคที่แสดงสภาวะทางเคมีของคาร์บอน (C1s) เลื่อนมายังตำแหน่งพลังงานที่สูงขึ้น คือ 287.3-287.4 eV แสดงว่าอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของ สภาวะทางเคมีของคาร์บอนขึ้น



รูปที่ 4.8 กราฟ XPS ของฟิล์ม BOPP a) ฟิล์ม BOPP ที่ไม่ผ่านการปรับผิวหน้า b) ฟิล์ม BOPP ที่ปรับผิวหน้า 1 ครั้ง c) ฟิล์ม BOPP ที่ปรับผิวหน้า 2 ครั้ง d) ฟิล์ม BOPP ที่ปรับผิวแบบ CP

ตารางที่ 4.6 ร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์บอนและออกซิเจนของฟิล์ม BOPP ทั้ง 4 ลักษณะ

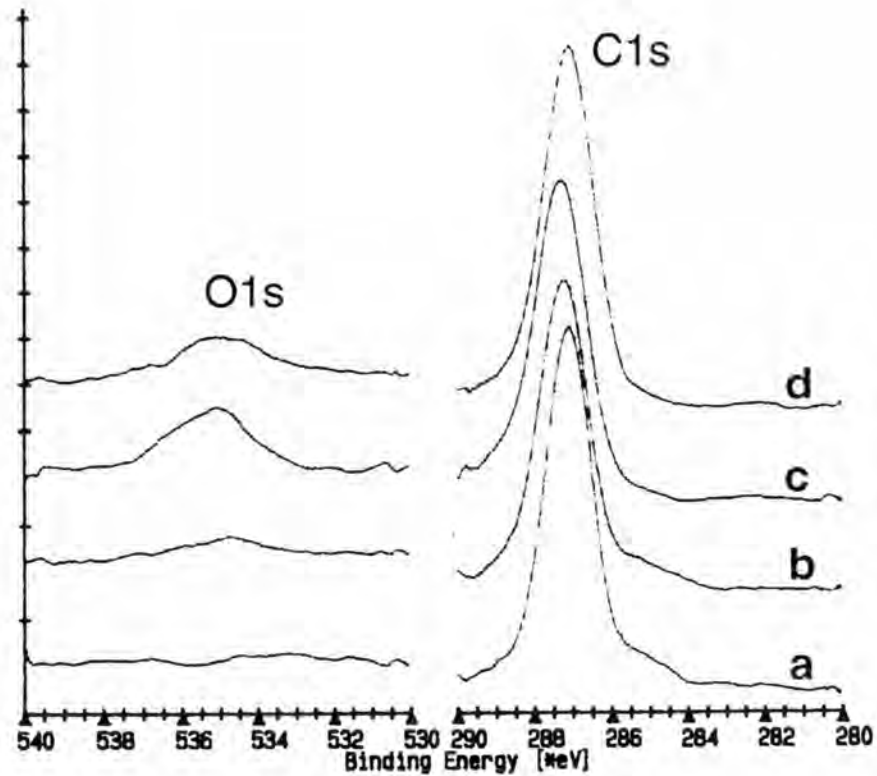
ลักษณะการปรับผิวหน้า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	C1S	O1S
NT	91.17	8.83
1T	84.16	15.84
2T	81.12	18.88
CP	82.97	17.03



รูปที่ 4.9 กราฟ XPS ของฟิล์ม LDPE a) ฟิล์ม LDPE ที่ไม่ผ่านการปรับผิวหน้า b) ฟิล์ม LDPE ที่ปรับผิวหน้า 1 ครั้ง c) ฟิล์ม LDPE ที่ปรับผิวหน้า 2 ครั้ง d) ฟิล์ม LDPE ที่ปรับผิวแบบ CP

ตารางที่ 4.7 ร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์บอนและออกซิเจนของฟิล์ม LDPE ทั้ง 4 ลักษณะ

ลักษณะการปรับผิวหน้า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	C1S	O1S
NT	92.34	7.66
1T	83.59	16.41
2T	79.37	20.63
CP	77.41	22.59



รูปที่ 4.10 กราฟ XPS ของฟิล์ม LLDPE a) ฟิล์ม LLDPE ที่ไม่ผ่านการปรับผิวหน้า b) ฟิล์ม LLDPE ที่ปรับผิวหน้า 1 ครั้ง c) ฟิล์ม LLDPE ที่ปรับผิวหน้า 2 ครั้ง d) ฟิล์ม LLDPE ที่ปรับผิวแบบ CP

ตารางที่ 4.8 ร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์บอนและออกซิเจนของฟิล์ม LLDPE ทั้ง 4 ลักษณะ

ลักษณะการปรับผิวหน้า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	C1S	O1S
NT	97.08	2.92
1T	90.56	9.44
2T	85.03	14.97
CP	86.75	13.25

สำหรับพีค C1s ของฟิล์มที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาแบบ CP ของฟิล์มทั้ง 3 ชนิด ไม่เกิดการเลื่อนของพีคมายังตำแหน่งเดียวกับฟิล์มที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาแบบอื่น (1T 2T และ CP) แสดงว่าการปรับผิวหน้าแบบ CP อาจไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (จาก 286 eV เป็น 287 eV) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาร่วมกับการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางเคมีของออกซิเจนของฟิล์มที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาแบบ CP ผลการวิเคราะห์ก็ปรากฏว่ามีปริมาณออกซิเจนมากกว่าฟิล์มที่ไม่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา แสดงว่าฟิล์มที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาแบบ CP มีสภาวะทางเคมีแตกต่างจากฟิล์มที่ไม่ได้ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา

สำหรับสภาวะทางเคมีของออกซิเจนบนฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE พบว่ามีการเลื่อนของพีคไปยังตำแหน่งด้านพลังงานที่สูงขึ้นของฟิล์มทั้ง 3 ชนิด คือมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 535 eV ซึ่งตามปกติแล้วจะมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 533 eV แสดงว่ามีการเลื่อนของพีคของออกซิเจนเช่นเดียวกับพีคของคาร์บอน การเลื่อนของพีคที่เกิดขึ้นน่าจะมีสาเหตุมาจากเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ ถึงแม้ว่าจะมีการเลื่อนของพีคเกิดขึ้นแต่เมื่อเปรียบเทียบความสูงของพีคที่แสดงสภาวะทางเคมีของออกซิเจนระหว่างฟิล์มที่ไม่ปรับผิวหน้ากับฟิล์มที่ปรับผิวหน้าทั้ง 3 แบบ (1T 2T และ CP) พบว่าความสูงของพีคจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการปรับผิวหน้าจำนวนครั้งมากขึ้น แสดงว่าเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจะทำให้ฟิล์มมีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.7 4.8 และ 4.9 ในทางกลับกันการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจะทำให้ปริมาณของคาร์บอนมีค่าลดลง

จากการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางเคมีของคาร์บอนและออกซิเจนที่กล่าวมา คือฟิล์ม ทั้ง 3 ชนิดจะมีการเลื่อนของพีคของคาร์บอนและออกซิเจน นอกจากนั้นยังมีการเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่เกิดขึ้น เป็นหลักฐานที่แสดงได้ว่าฟิล์มที่ได้รับการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีดังกล่าว และเพื่อให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้ง่ายขึ้นนั้นจำเป็นต้องรู้ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่แสดงถึงสภาวะทางเคมีต่างๆของคาร์บอนดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและหมู่ฟังก์ชัน
(Boyd และคณะ, 1997)

โครงสร้าง	หมู่ฟังก์ชัน	พลังงานยึดเหนี่ยว (อิเล็กตรอน โวลต์)
$-\text{CH}-$ $-\text{CH}_2-$ $-\text{CH}_3$	อัลคิล	285
$-\text{COOH}$ $-\text{COOR}$	คาร์บอกซิล เอสเทอร์	285.7
$-\text{O}-$ $-\text{OH}$ $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}-\text{H} \end{array}$	อีเทอร์ แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์	286.6
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}- \end{array}$	คีโตน	287.9
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}-\text{OR} \end{array}$	คาร์บอกซิเลต	289
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{O}-\text{C}-\text{OR} \end{array}$	คาร์บอเนต	290.4

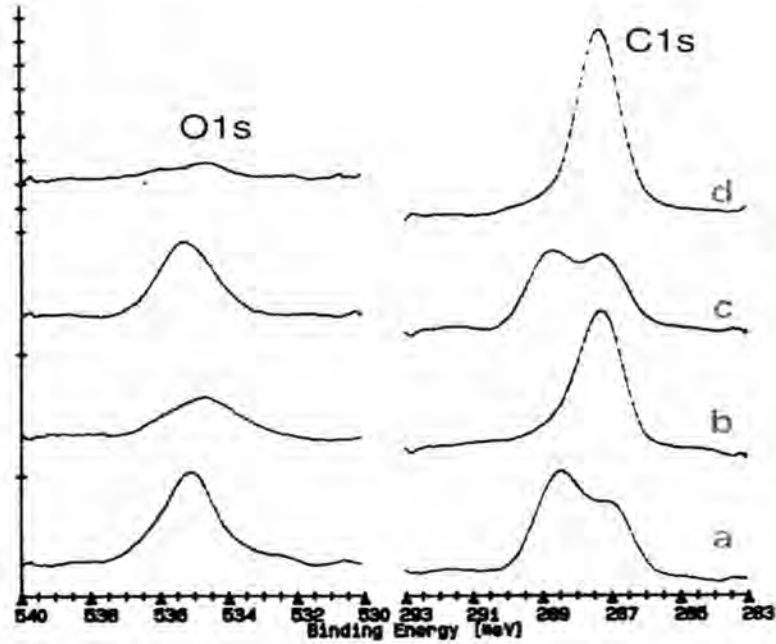
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของฟิล์มหลังจากเคลือบขาว

เมื่อฟิล์มได้รับการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาแล้วจะถูกนำไปประกบโดยอาศัยกระบวนการที่คล้ายคลึงกับการประกบแบบแห้งโดยมีกาวพอลิอีเทอร์ยูรีเทน (Polyether urethane) ช่วยในการยึดติดด้วย เมื่อฟิล์มที่ได้รับการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาถูกเคลือบด้วยกาวควรจะมีลักษณะทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างกาวกับฟิล์ม ดังนั้นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางผิวหน้าของฟิล์มโดยใช้ XPS จึงเป็นแนวทางในการหาคำตอบดังกล่าวได้

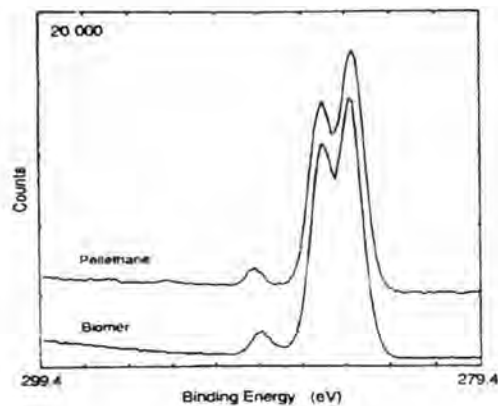
ฟิล์มที่ใช้ตรวจสอบของหัวข้อนี้ทำการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจากโรงงานทั้งหมด โดยการเคลือบขาวพอลิอีเทอร์ยูรีเทนลงบนฟิล์ม BOPP แล้วจึงนำไปประกบกับฟิล์ม LDPE และ LLDPE รูปที่ 4.11 เป็นกราฟ XPS ของพื้นผิวฟิล์มที่เคลือบขาวแล้วตั้งให้แยกจากกันด้วยการทดสอบความต้านแรงลอก เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นกราฟ XPS ของกาวพอลิยูรีเทนทางการค้า 2 ชนิด พบว่าฟิล์ม BOPP จะมีรูปร่างของพีค C1s คล้ายกับพีค C1s ของกาวพอลิยูรีเทน คือมีลักษณะเป็นดับเลท (doublet) แต่จะไม่เหมือนกันทีเดียวเพราะกาวที่ใช้วิเคราะห์อาจเป็นกาวพอลิยูรีเทนคนละชนิดกับกาวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ส่วนพีค C1s ของฟิล์ม LDPE และ LLDPE กลับไม่ปรากฏลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเลย ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า กาวพอลิยูรีเทนส่วนใหญ่อาจจะอยู่บนฟิล์ม BOPP อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณา พีค O1s ของฟิล์ม LDPE ที่ดึงลอกออกจากการประกบกับ BOPP ปรากฏว่าฟิล์ม LDPE มีลักษณะแตกต่างไปจากพีค O1s ของฟิล์ม LDPE ที่ปรับผิวหน้าจากโรงงานดังรูปที่ 4.13 ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่า อาจจะมีกาวบางส่วนติดอยู่บนฟิล์ม LDPE ทำให้กราฟ O1s เกิดการเปลี่ยนแปลงไป (มีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น) จากข้อสันนิษฐานข้างต้น ทำให้สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าแรงยึดติดระหว่างฟิล์ม BOPP กับ ฟิล์ม LDPE โดยใช้กาวเป็นตัวประสานนั้น เป็นแรงยึดติดแบบยึดติด (Adhesive Bonding หมายถึง การยึดติดระหว่างกาวกับฟิล์มเพียงชนิดเดียว) ผสมกับ แรงยึดติดแบบเชื่อมแน่น (Cohesive Bonding หมายถึง การยึดติดระหว่างกาวกับฟิล์มทั้งสองชนิด) ส่วนฟิล์มประกบ BOPP กับฟิล์ม LLDPE มีแรงยึดติดแบบยึดติดเพียงอย่างเดียวเนื่องจากไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆบนพีค O1s และ C1s ของฟิล์ม LLDPE ที่ผ่านการประกบกับฟิล์ม BOPP

สำหรับการเกิดปฏิกิริยาของกาวกับผิวหน้าของฟิล์มที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจะมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 เริ่มจากการที่ฟิล์มได้รับการปรับผิวหน้าแล้วจะเกิดไฮโดรเจนที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น (activated hydrogen) ขึ้นที่ปลายสายโซ่ของโมเลกุล

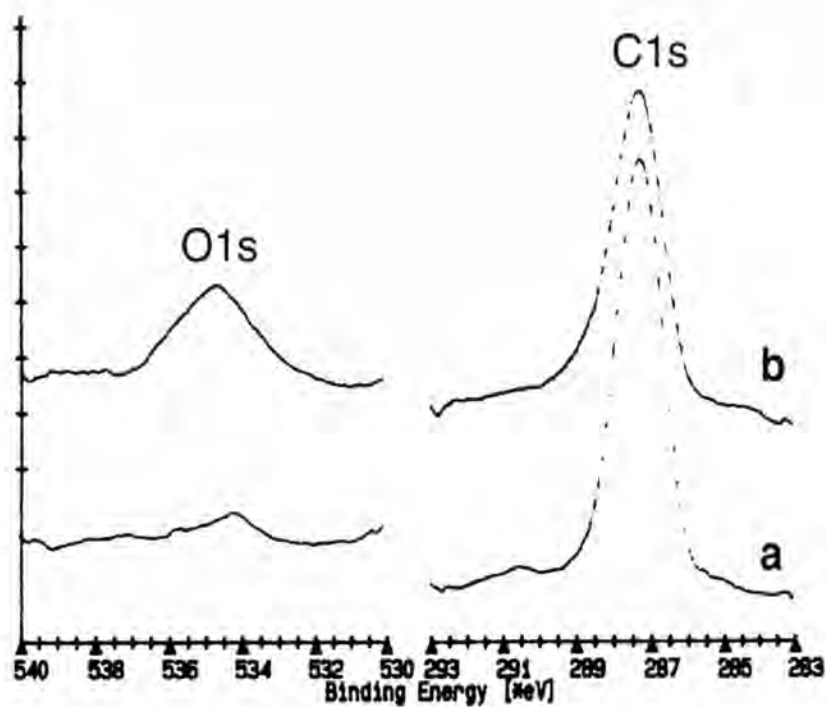
ซึ่งโมเลกุลที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ส่วนปลายของสายโซ่นั้นทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานตของกาวที่เหลือ จากปฏิกิริยาเชื่อมขวางของเกิดเป็นพันธะยูรีเทนขึ้นระหว่างผิวหน้าของฟิล์มกับโมเลกุลของกาวที่เกิด การเชื่อมขวางแล้ว ทำให้ฟิล์มกับกาวสามารถยึดติดกันได้



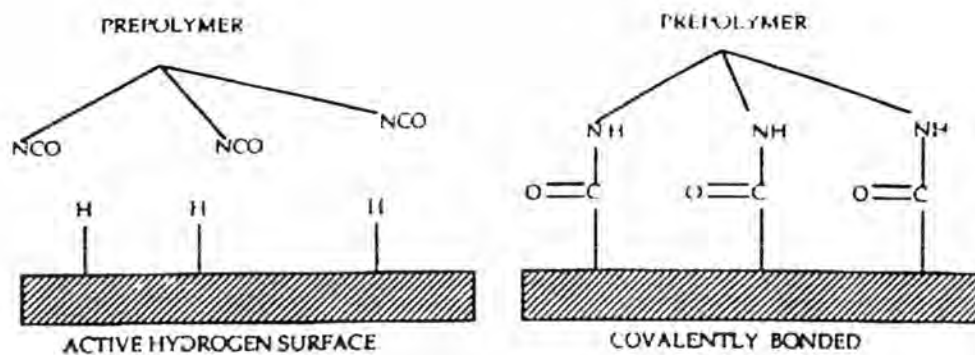
รูปที่ 4.11 กราฟ XPS ของฟิล์มที่ดึงลอกออกจากการประกบ a) ฟิล์ม BOPP ที่ประกบกับฟิล์ม LDPE b) ฟิล์ม LDPE ที่ประกบกับฟิล์ม BOPP c) ฟิล์ม BOPP ที่ประกบกับฟิล์ม LLDPE d) ฟิล์ม LLDPE ที่ประกบกับฟิล์ม BOPP



รูปที่ 4.12 กราฟ XPS ของฟิล์มพอลิอีเทอร์ยูรีเทนทางการค้าทั้ง 2 ชนิด คือ Biomer และ Pellethane (Briggs และ Seah, 1994)



รูปที่ 4.13 กราฟ XPS ของฟิล์ม LDPE ที่ปรับผิวหน้าจากโรงงาน (a) กับฟิล์ม LDPE ที่ถูกดึงลอกออกจากการประกบกับฟิล์ม BOPP (b) ฟิล์ม LDPE ที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจากโรงงาน



รูปที่ 4.14 ปฏิกริยาระหว่างกาวกับผิวหน้าของฟิล์ม

4.4 ความต้านแรงลอก (Peel Strength)

หัวข้อนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ของรูปแบบของการปรับผิวหน้าลักษณะต่างๆ (เช่น การปรับผิวหน้า 1 ครั้ง การปรับผิวหน้า 2 ครั้ง) กับแรงยึดติดของฟิล์มประกบ จึงทำการทดสอบค่าความต้านแรงลอกซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงแรงยึดติดระหว่างฟิล์มทั้ง 2 ชนิด โดยแบ่งฟิล์มประกบในงานวิจัยนี้ออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ BOPP/LDPE และ BOPP/LLDPE โดยใช้กาวพอลิเอเทอร์ยูรีเทนเป็นตัวประสาน (primer) ที่สภาวะจำลองคล้ายกระบวนการประกบแบบแห้งในอุตสาหกรรมดังนี้ คือ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 40 กิโลกรัม/ซม² เป็นเวลา 6 วินาที โดนใช้ลูกกลิ้งผิวเรียบ และ เครื่อง Hot Press ช่วยในการประกบของฟิล์มให้ติดกัน สำหรับฟิล์มแต่ละคู่จะใช้ Bar coater เบอร์ 12 และ 60 เป็นตัวกำหนดความหนาของชั้นกาวด้วย (Bar coater เบอร์ 60 จะให้ความหนาของชั้นกาวประมาณ 20 ไมครอน ขณะที่ เบอร์ 12 จะให้ความหนาของชั้นกาวประมาณ 5 ไมครอน)

4.4.1 ความต้านแรงลอกของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE

จากรูปที่ 4.15 พบว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาที่มีความต้านแรงลอกประมาณ 0 และ 4 กรัม/ 15 มิลลิเมตร สำหรับ Bar coater เบอร์ 12 และ 60 ตามลำดับ แสดงว่าฟิล์มที่ไม่ได้รับการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจะมีแรงยึดติดต่อกันน้อยมาก และเมื่อพิจารณาฟิล์มที่ปรับผิวหน้าแล้วเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อจำนวนครั้งในการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาเพิ่มขึ้นจาก 1 ครั้ง เป็น 2 ครั้งจะทำให้ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE มีความต้านแรงลอกสูงขึ้นจาก 4 กรัม/15 มิลลิเมตร เป็น 218 กรัม/15 มิลลิเมตร สำหรับการใช้ Bar coater เบอร์ 12 และจาก 73 กรัม/15 มิลลิเมตร เป็น 311 กรัม/15 มิลลิเมตร สำหรับการใช้ Bar coater เบอร์ 60 แต่ในกรณีของปรับผิวหน้าแบบ CP (Cross-Pattern Corona Treatment) กลับพบว่าฟิล์มประกบ BOPP/LDPE มีความต้านแรงลอกน้อยกว่าการปรับผิวหน้าแบบ 2T (ทำคอโรนา 2 ครั้งในทางเดียวกัน) ประมาณ 60% สำหรับ Bar coater เบอร์ 12 และ 55% สำหรับ Bar coater เบอร์ 60 ผลดังกล่าวอาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอในการปรับผิวหน้าของเครื่องปรับผิวหน้าด้วยคอโรนาภายในห้องทดลองซึ่งมีผลกระทบต่อความต้านแรงลอก

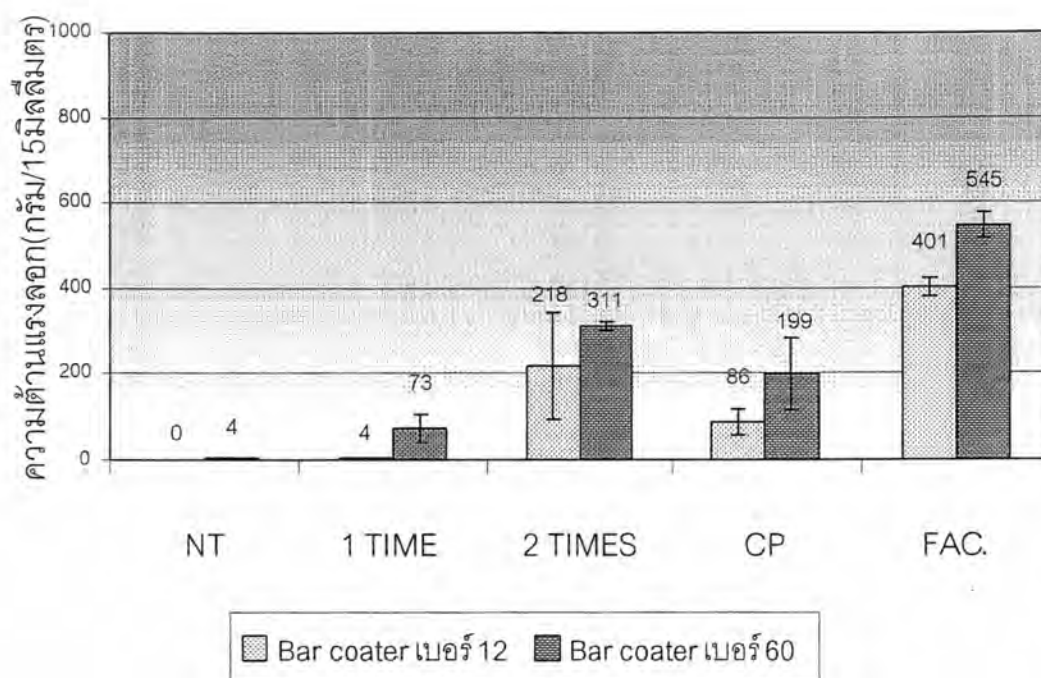
ค่าความต้านแรงลอกของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ที่ปรับผิวหน้าจากโรงงานมีค่าประมาณ 401 กรัม/15 มิลลิเมตร และ 545 สำหรับ Bar coater เบอร์ 12 และ 60 ตามลำดับ ซึ่งค่า

ความต้านแรงลอกของฟิล์มที่ปรับผิวหน้าจากโรงงานมากกว่าค่าความต้านแรงลอกของฟิล์มที่ปรับผิวหน้าในห้องทดลองทั้ง 3 แบบ (1T 2T และ CP) ประมาณ 100% 45% และ 80% ตามลำดับ (เปรียบเทียบจากการใช้ Bar coater เบอร์ 12) ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะในการปรับผิวหน้า ความสม่ำเสมอและชนิดของอิเล็กโทรด ที่แตกต่างกันส่งผลกระทบถึงค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) และค่าแรงตึงผิวเปียก (Surface Tension) ดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.1 ทำให้ฟิล์มที่ปรับผิวหน้าจากโรงงานและปรับผิวหน้าในห้องทดลองมีแรงยึดติดที่แตกต่างกัน

ความแตกต่างของ Bar coater ทั้ง 2 เบอร์ที่ใช้ทำให้ความหนาของชั้นกาวที่ใช้ในการประสานต่างกัน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.15 แล้วพบว่าการใช้ Bar coater เบอร์ 60 มีค่าความต้านแรงลอกสูงกว่า การใช้ Bar coater เบอร์ 12 นั่นคือ ความหนาของกาวที่เพิ่มขึ้นจาก 5 ไมครอน เป็น 20 ไมครอน มีผลกระทบต่อค่าความต้านแรงลอกที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความต้านแรงลอกเพิ่มขึ้นประมาณ 35 % (เปรียบเทียบจากค่าความต้านแรงลอกของฟิล์มประเภท BOPP/LDPE ที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจากโรงงาน) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของความหนาชั้นกาวที่มากกว่า 20 ไมครอน ต่อค่าความต้านแรงลอกอาจมีการศึกษาต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 4.10 ความต้านแรงลอกของฟิล์มประเภท BOPP/LDPE ที่ใช้ Bar coater เบอร์ 12 และ 60

วิธีการปรับผิวหน้า	ความต้านแรงลอก (กรัม/15มิลลิเมตร)	
	Bar coater เบอร์ 12	Bar coater เบอร์ 60
ไม่ปรับผิวหน้า (NT)	0	4 ± 0
ปรับผิวหน้า 1 ครั้ง (1T)	4 ± 1	73 ± 32
ปรับผิวหน้า 2 ครั้ง (2T)	218 ± 125	311 ± 199
ปรับผิวหน้า 2 ครั้ง (CP)	86 ± 30	199 ± 85
ปรับผิวหน้าจากโรงงาน (FAC)	401 ± 21	545 ± 30



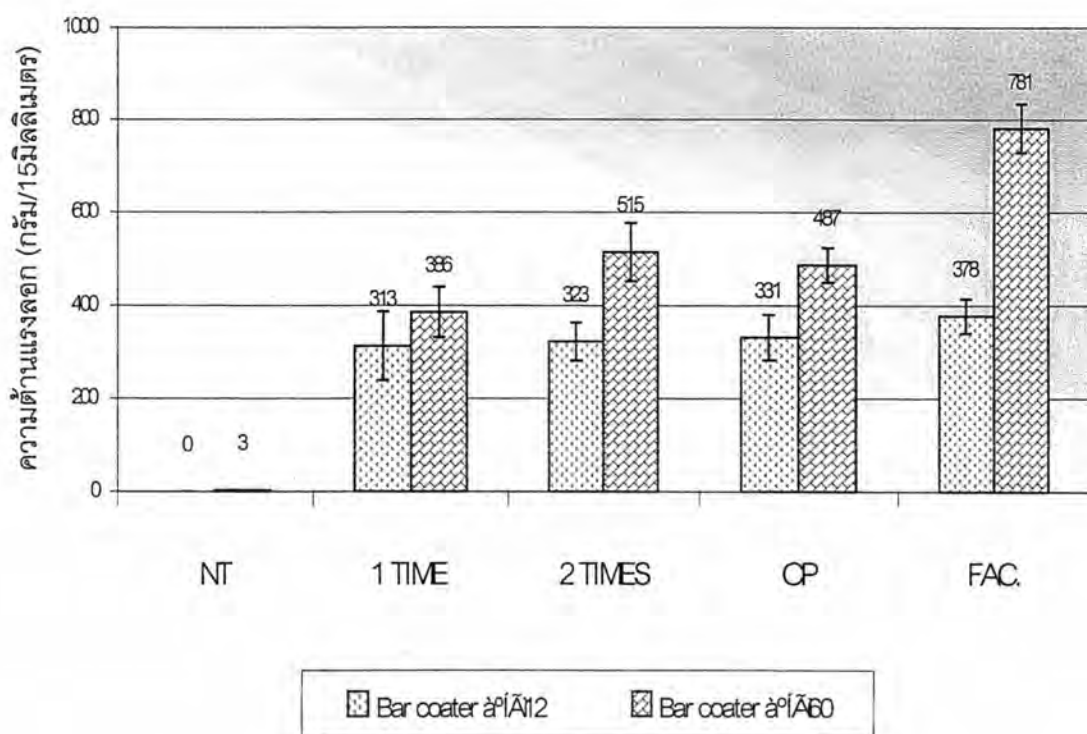
รูปที่ 4.15 ความต้านแรงลอกของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ใช้ Bar coater เบอร์ 12 และ 60

4.4.2 ความต้านแรงลอกของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE

ผลของความต้านแรงลอกของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ความหนา 5 ไมครอน (ใช้ Bar coater เบอร์ 12) จากรูปที่ 4.16 พบว่าฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ปรับผิวหน้าในห้องทดลองทั้ง 3 ลักษณะ (1T 2T และ CP) มีค่าความต้านแรงลอกไม่แตกต่างกันคือ ประมาณ 313 323 และ 331 กรัม/ 15มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีค่าความต้านแรงลอกต่ำกว่าฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ปรับผิวหน้าจากโรงงานเพียง 15% เท่านั้น

ตารางที่ 4.11 ความต้านแรงลอกของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ใช้ Bar coater เบอร์ 12 และ 60

วิธีการปรับผิวหน้า	ความต้านแรงลอก (กรัม/15มิลลิเมตร)	
	Bar coater เบอร์ 12	Bar coater เบอร์ 60
ไม่ปรับผิวหน้า (NT)	0	3 ± 0
ปรับผิวหน้า 1 ครั้ง (1T)	313 ± 74	386 ± 54
ปรับผิวหน้า 2 ครั้ง (2T)	323 ± 49	515 ± 62
ปรับผิวหน้า 2 ครั้ง (CP)	331 ± 49	487 ± 37
ปรับผิวหน้าจากโรงงาน (FAC)	378 ± 37	781 ± 53



รูปที่ 4.16 ความต้านแรงลอกของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ใช้ Bar coater เบอร์ 12 และ 60

สำหรับผลทดสอบความต้านแรงลอกของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่มีความหนาของชั้นกาวประมาณ 20 ไมครอน (ใช้ Bar coater เบอร์ 60) พบว่า ฟิล์มที่ปรับผิวหน้าจากห้องทดลองทั้ง 3 ลักษณะ (1T 2T และ CP) มีค่าความต้านแรงลอกประมาณ 386 515 และ 487 กรัม/15 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ปรับผิวหน้าจากโรงงาน (ใช้ Bar coater เบอร์ 60) มีค่าความต้านแรงลอกประมาณ 780 กรัม/ 15 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงว่าฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ปรับผิวหน้าจากโรงงานจะมีแรงยึดติดมากขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของกาวเช่นเดียวกับฟิล์มประกบ BOPP/LDPE โดยที่ฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่มีความหนาของกาวที่เพิ่มขึ้นจาก 5 ไมครอน เป็น 20 ไมครอน จะทำให้ค่าความต้านแรงลอกเพิ่มขึ้นประมาณ 20% สำหรับ Bar coater เบอร์ 12 และ 60% สำหรับ Bar coater เบอร์ 60

โดยสรุปแล้วการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาทำให้ฟิล์มสามารถดูดซึมหรือเกิดปฏิกิริยากับกาวได้ดีขึ้น โดยอาจเกิดจากการเชื่อมติดเชิงกล (mechanical interlocking) จากรูพรุนเล็กๆที่เกิดขึ้นภายหลังการทำคอโรนาและการเกิดพันธะทางเคมี (chemical bonding) ระหว่างกาวกับฟิล์มทำให้ฟิล์มมีแรงยึดติดที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมติดเชิงกลน่าจะมีอิทธิพลน้อยกว่าการเกิดพันธะทางเคมีเนื่องจากฟิล์มที่ปรับผิวหน้าแล้วแต่ประกบโดยไม่ใช้ตัวประสานจะไม่สามารถยึดติดกันได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยตัวประสานช่วยในการยึดติดร่วมด้วย นอกจากนั้นแล้วแรงยึดติดยังขึ้นกับชนิดของฟิล์มและประสิทธิภาพของการปรับผิวหน้าจากการทำคอโรนาด้วย ถ้าฟิล์มชนิดใดสามารถปรับผิวหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าจะมีแรงยึดติดที่สูงกว่า โดยที่ค่าความต้านแรงลอกที่อุตสาหกรรมทำฟิล์มประกบกำหนดไว้สำหรับการใช้งานคือ ไม่ต่ำกว่า 200 กรัม/ 15 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบความต้านแรงลอกของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE และ BOPP/LLDPE แล้วเห็นได้ว่ากระบวนการประกบที่ใช้ในการวิจัยนี้สามารถให้ค่าความต้านแรงลอกที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงเช่นเดียวกับกระบวนการผลิตฟิล์มประกบในอุตสาหกรรม

4.5 สมบัติเชิงกล

ฟิล์มแต่ละชนิดที่นำมาประกบกันย่อมมีสมบัติที่เป็นลักษณะเฉพาะตัว แต่เมื่อนำฟิล์มต่างชนิดมาประกบติดกันแล้วสมบัติของฟิล์มประกบจะมีลักษณะเป็นอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ประกบกัน ดังนั้นวัตถุประสงค์ในหัวข้อนี้จึงต้องการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบกับฟิล์มเดี่ยวแต่ละชนิดที่ยังไม่ได้นำมาประกบ นอกจากนั้นยังต้องการศึกษาอิทธิพลของการปรับผิวหน้าด้วยการทำ corona ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบอีกด้วย

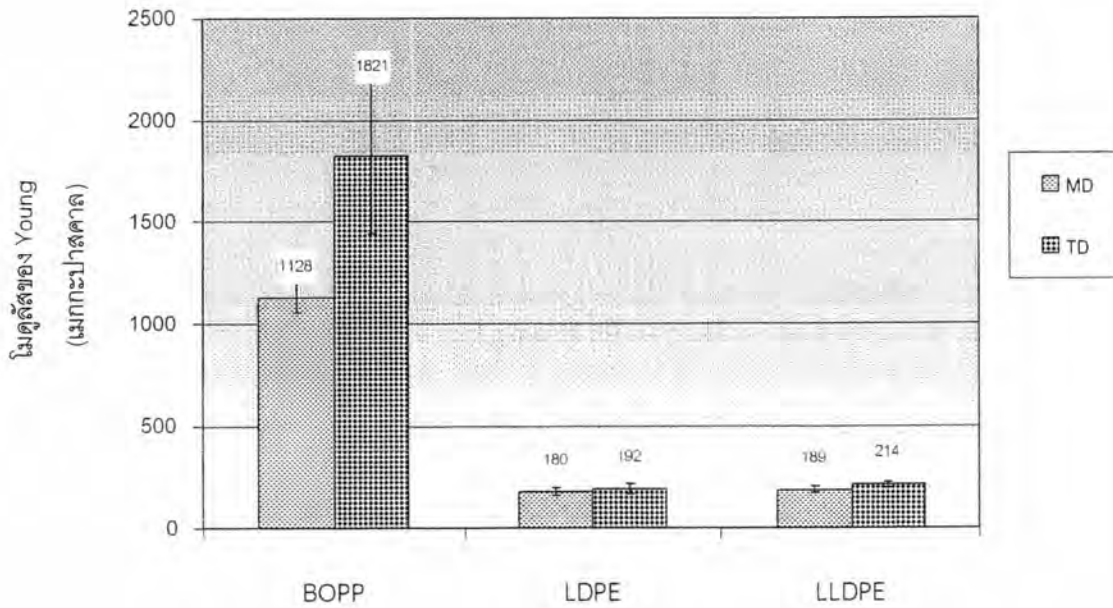
4.5.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE

ฟิล์ม BOPP มีค่าโมดูลัสและความเค้นที่จุดขาด (รูปที่ 4.17-4.18) ในแนว TD สูงกว่า ในแนว MD ประมาณ 60% และ 70% ตามลำดับ แสดงว่า ฟิล์ม BOPP ได้รับการยืดดึงในแนว TD มากกว่า MD ในทางกลับกัน ค่าความเครียดที่จุดขาด (รูปที่ 4.19) ในแนว MD ก็สูงกว่าแนว TD ประมาณ 70% ส่วนค่าความเหนียว (รูปที่ 4.20) ในแนว MD จะสูงกว่า TD ประมาณ 50% เนื่องจากในแนว MD ฟิล์มสามารถยืดตัวออกได้มากกว่านั่นเอง

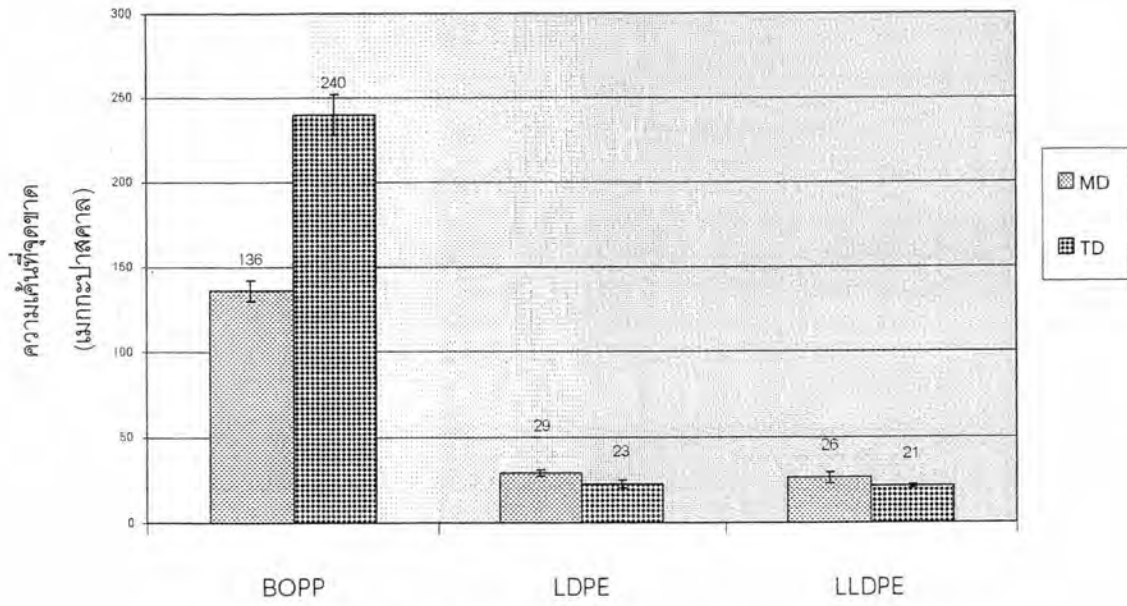
สำหรับฟิล์ม LDPE และ LLDPE มีค่าโมดูลัส และ ความเค้นที่จุดขาด (รูปที่ 4.17-4.18) ใกล้เคียงกันทั้งในแนว MD และ TD คือประมาณ 200 เมกกะปาสคาล และ 25 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ แต่ค่าความเครียดที่จุดขาด (รูปที่ 4.19) ของฟิล์ม LDPE และ LLDPE ในแนว TD มีค่าสูงกว่าในแนว MD ประมาณ 20% เนื่องจากฟิล์ม LDPE และ LLDPE ได้รับแรงดึงในแนวเครื่องจักรขณะม้วนเก็บนั่นเอง ส่วนของความเหนียว (รูปที่ 4.20) ไม่ต่างกันมากนักทั้งสองทิศทาง คือมีค่าประมาณ 130 เมกกะปาสคาล ทั้งฟิล์ม LDPE และ LLDPE

ตารางที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE

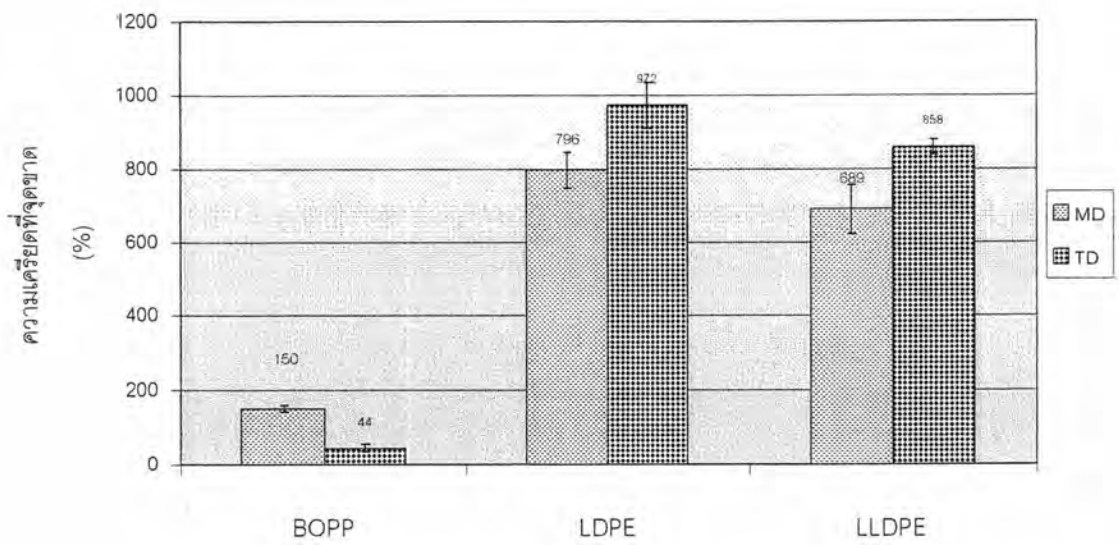
ฟิล์ม	แนวทดสอบ	โมดูลัสของ Young (เมกกะปัสคาล)	ความเค้นที่จุดขาด (เมกกะปัสคาล)	ความเครียดที่จุดขาด (%)	ความเหนียว (เมกกะปัสคาล)
BOPP	MD	1128 ± 78	136 ± 6	150 ± 9	136 ± 14
	TD	1821 ± 379	240 ± 12	44 ± 10	73 ± 25
LDPE	MD	180 ± 18	29 ± 2	796 ± 49	138 ± 12
	TD	192 ± 25	23 ± 2	972 ± 62	128 ± 15
LLDPE	MD	189 ± 15	26 ± 3	689 ± 67	127 ± 18
	TD	214 ± 15	21 ± 1	858 ± 21	110 ± 5



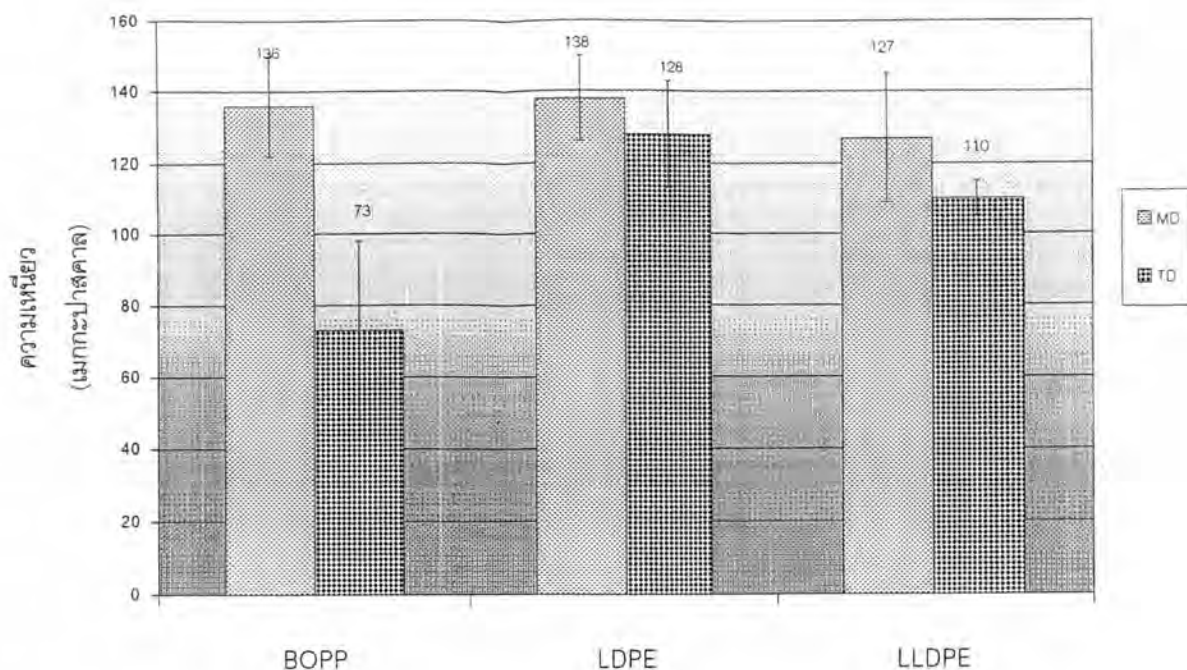
รูปที่ 4.17 ค่าโมดูลัสของ Young ของฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE



รูปที่ 4.18 ความเค้นที่จุดขาดของฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE



รูปที่ 4.19 ความเครียดที่จุดขาดของฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE

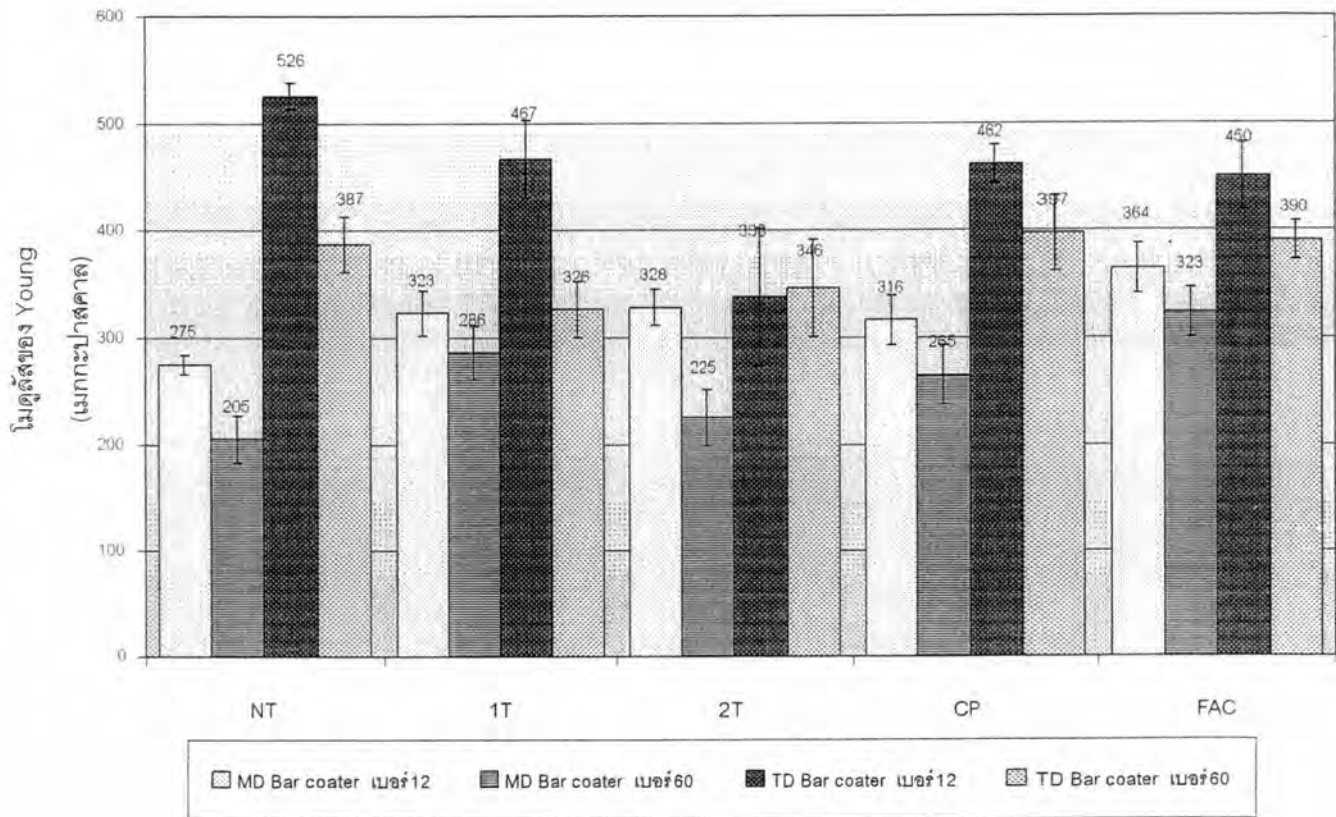


รูปที่ 4.20 ความเหนียวของฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE

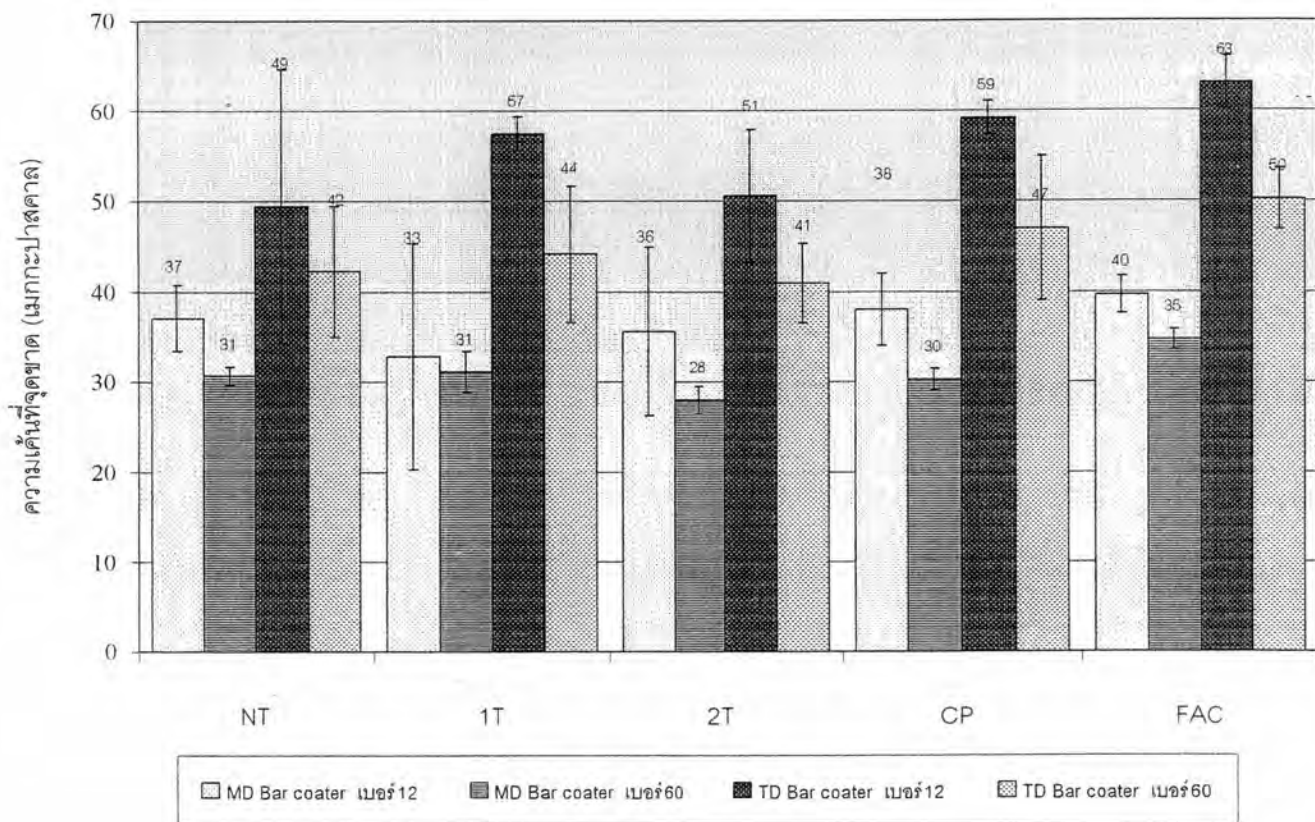
4.5.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE

ฟิล์มประกบที่ผ่านการปรับผิวหน้าด้วยการทำโครนามีค่าโมดูลัส (รูปที่ 4.21) ในแนว TD สูงกว่าในแนว MD ประมาณ 20% สำหรับการให้ Bar coater เบอร์ 12 และ 15% สำหรับการให้ Bar coater เบอร์ 60 (เปรียบเทียบจากฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ที่ปรับผิวหน้าจากโรงงาน) ค่าความเค้นที่จุดขาด (รูปที่ 4.22) ในแนว TD จะสูงกว่าแนว MD เช่นเดียวกับค่าโมดูลัสคือประมาณ 35% สำหรับการให้ Bar coater เบอร์ 12 และ 30% สำหรับการให้ Bar coater เบอร์ 60 ส่วนค่าความเครียดที่จุดขาด (รูปที่ 4.23) และความเหนียว (รูปที่ 4.24) ในแนว MD จะสูงกว่าแนว TD 70% และ 50% ตามลำดับ (ทั้ง Bar coater เบอร์ 12 และ 60) จากผลทดสอบที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าฟิล์มประกบ BOPP/LDPE จะมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่กล่าวมาคล้ายกับสมบัติเชิงกลของฟิล์ม BOPP มากกว่า ฟิล์ม LDPE แสดงว่า เมื่อประกบฟิล์มทั้งสองชนิดเข้า

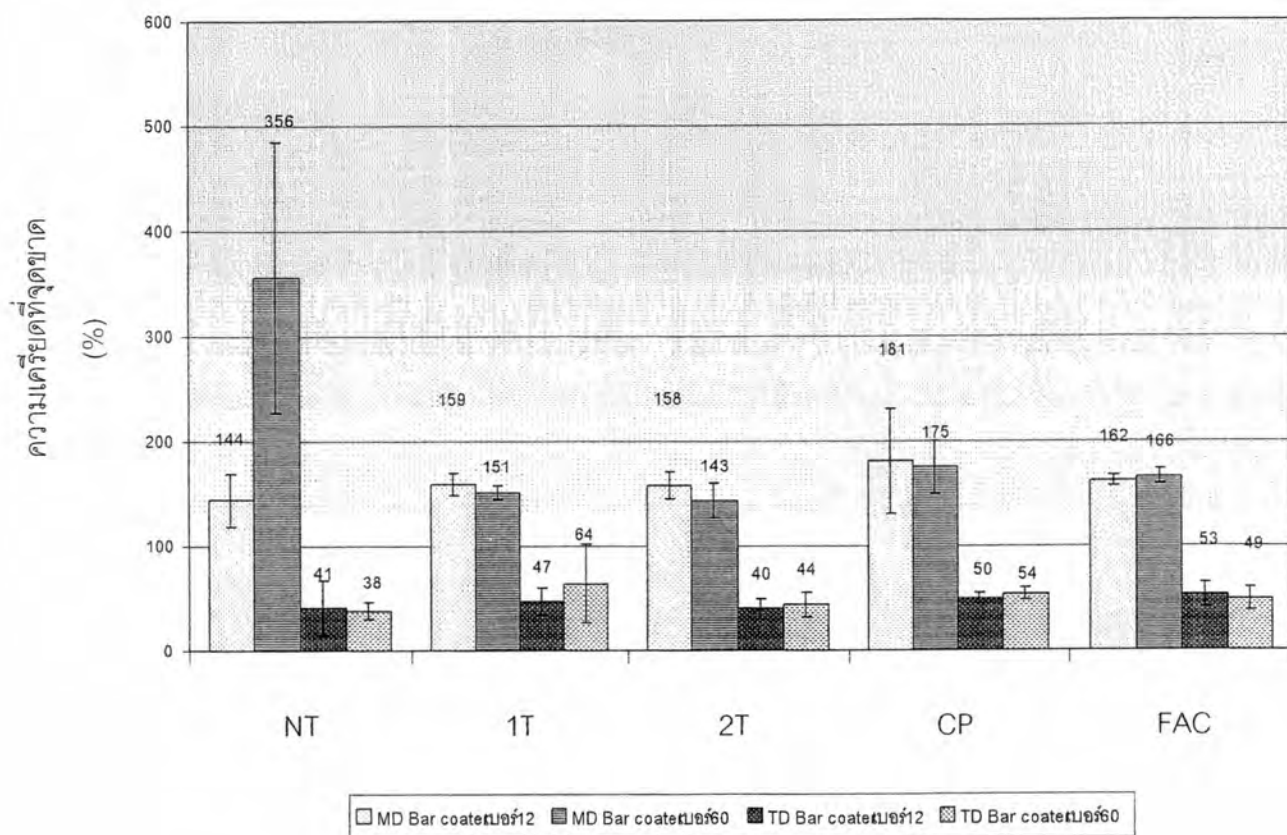
ด้วยกันแล้วสมบัติของฟิล์มประกบจะคล้ายกับฟิล์มที่มีสมบัติที่ดีกว่าหรือมีความแข็งแรงมากกว่าเป็นหลัก ในขณะที่ค่าของสมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบนั้นจะมีค่าความแข็งแรงอยู่ระหว่างฟิล์มทั้งสองชนิด



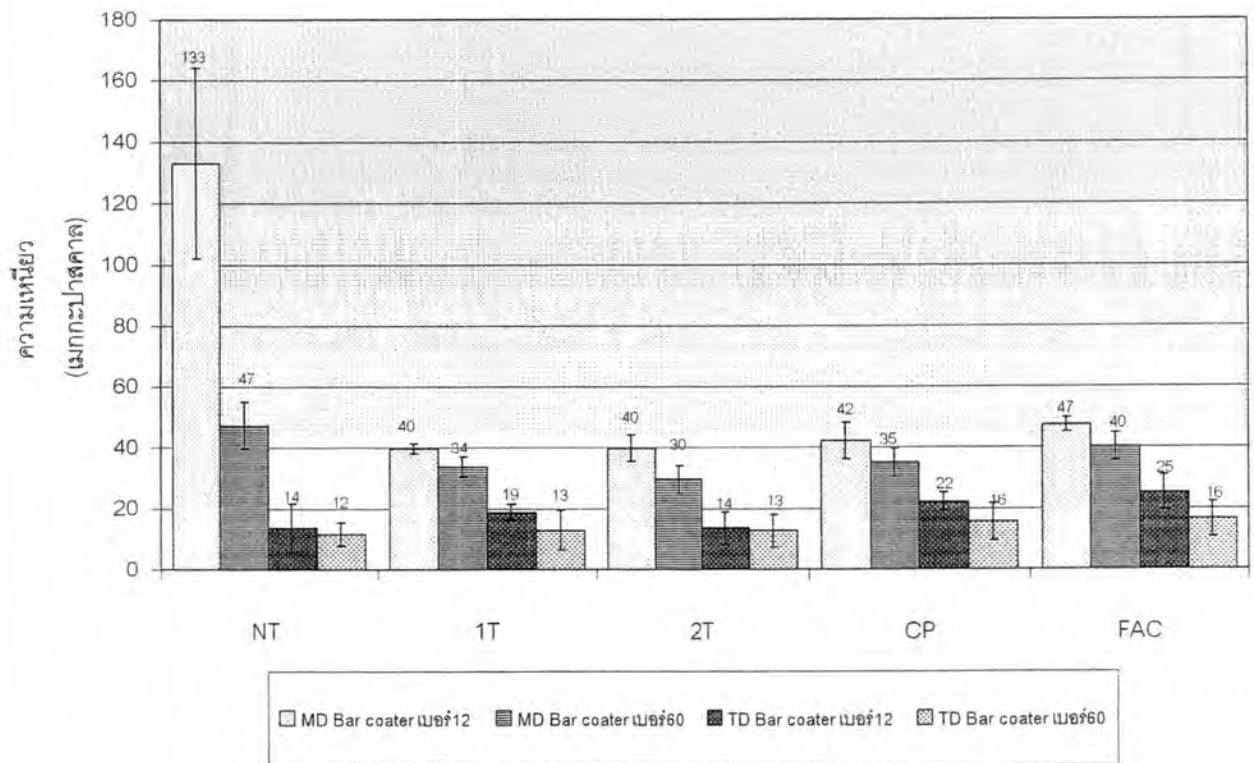
รูปที่ 4.21 ค่าโมดูลัสของ Young ของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE



รูปที่ 4.22 ค่าความเค้นที่จุดขาดของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE



รูปที่ 4.23 ค่าความเครียดที่จุดขาดของฟิล์มประเภท BOPP/LDPE



รูปที่ 4.24 ค่าความเนืยวของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE

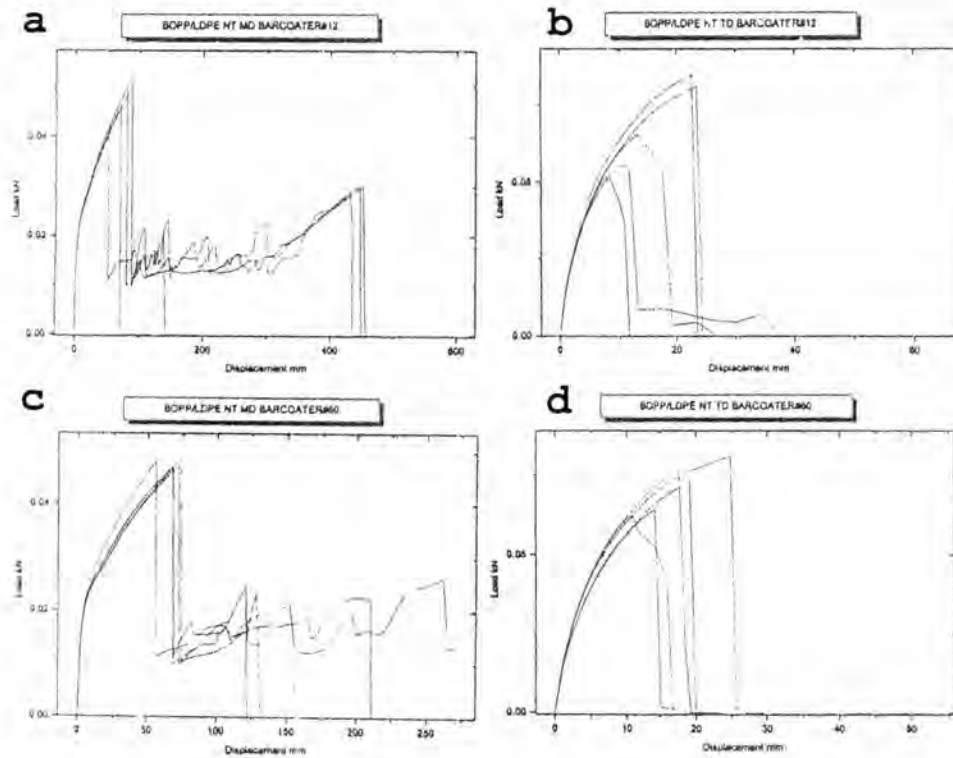
ความหนาของกาารเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลกล่าวคือ เมื่อพิจารณาในทิศทางเดียวกัน ฟิล์มประกบที่ชั้นกาารที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 5 ไมครอนเป็น 20 ไมครอน (ใช้ Bar coater เบอร์ 12 และ 60 ตามลำดับ) จะมีค่าโมดูลัส ความเค้นที่จุดขาด และความเนืยวลดลงประมาณ 10% 15% และ 25% ตามลำดับ (เปรียบเทียบในแนว MD ของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ที่ปรับผิวหน้าจากโรงงาน) และ 10% 15% และ 40% ตามลำดับ (เปรียบเทียบในแนว TD ของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ที่ปรับผิวหน้าจาก

โรงงาน) แต่สำหรับค่าความเครียดที่จุดขาดจะมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 165% ในแนว MD และ 50% ในแนว TD แม้ความหนาของกาวจะต่างกันก็ตาม จากที่กล่าวมานี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อพิจารณาสมการการหาค่าความเค้นซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสและค่าความเค้นที่จุดขาด ตามสมการที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อฟิล์มมีความหนามากขึ้นขณะที่สัดส่วนความต้านแรงดึงคงที่ ความเค้นจะมีค่าลดลง ทำให้ฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่ามีสมบัติต่างๆ สูงกว่านั่นเอง นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจาก โดยทั่วไปชั้นกาวที่อยู่ระหว่างฟิล์มชนิดหนึ่งๆ จะมีค่าวิกฤต (critical/optimum value) ซึ่งหากกาวมีความหนามากเกินค่าวิกฤตนี้ ส่วนที่เพิ่มขึ้นจะเป็นเสมือนชั้นที่ไม่แข็งแรง (weak layer) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล

$$\begin{aligned} \text{ความเค้น} &= \text{แรง/พื้นที่ของภาคตัดขวาง} & (4.1) \\ (\text{พื้นที่ของภาคตัดขวาง} &= \text{ความหนา} \times \text{ความกว้าง}) \end{aligned}$$

สำหรับฟิล์มประเภทที่ไม่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจะเกิดการแยกชั้นของฟิล์มทั้งในแนว MD และ TD เมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งการแยกของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นนี้สะท้อนให้เห็นว่าฟิล์มที่ไม่ได้รับการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจะไม่เกิดแรงยึดติดต่อกันเช่นเดียวกับผลการทดสอบความต้านแรงลอกในหัวข้อที่ 4.4 โดยต่อไปจะขอเรียกการแยกชั้นของฟิล์มว่า Delamination

ฟิล์มที่เกิด Delamination จะมีค่าโมดูลัส (คำนวณจากจุดที่ BOPP ขาด) ไม่แตกต่างไปจากฟิล์มที่ปรับผิวหน้า (ไม่เกิด Delamination) คือประมาณ 300 เมกกะปาสคาล ในแนว MD และ 500 เมกกะปาสคาล ในแนว TD (เปรียบเทียบจากการใช้ Bar coater เบอร์ 12) ส่วนค่าความเค้นที่จุดขาดที่อยู่ในรูปที่ 4.22 นั้นคิดจากตำแหน่งที่เกิดการขาดเป็นตำแหน่งแรก (ฟิล์ม BOPP ขาด) เพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้นซึ่งก็มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มที่ผ่านการปรับผิวหน้าแล้วเช่นเดียวกัน คือประมาณ 35 เมกกะปาสคาล ในแนว MD และ 50 เมกกะปาสคาล ในแนว TD (เปรียบเทียบจากการใช้ Bar coater เบอร์ 12) สำหรับค่าความเครียดที่จุดขาดและค่าความเหนียวของฟิล์มที่เกิด Delamination ในแนว MD จะมีค่าสูงกว่าฟิล์มประเภทที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาประมาณ 150% และ 250% ตามลำดับ เนื่องจากส่วนของฟิล์ม LDPE ที่ยืดออกไปได้มากกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.25 กราฟการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ที่เกิด Delmaination
 a) ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ไม่ปรับผิวหน้า ใช้แท่งเคลือบเบอร์ 12 แนว MD
 b) ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ไม่ปรับผิวหน้า ใช้แท่งเคลือบเบอร์ 12 แนว TD
 c) ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ไม่ปรับผิวหน้า ใช้แท่งเคลือบเบอร์ 60 แนว MD
 d) ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ไม่ปรับผิวหน้า ใช้แท่งเคลือบเบอร์ 12 แนว TD

ตารางที่ 4.13 สมบัติเชิงกลของฟิล์มประเภท BOPP/LDPE ที่ใช้ Bar coater เบอร์ 12

วิธีปรับ ผิวหน้า	แนว ทดสอบ	โมดูลัสของ Young (เมกกะปัสคาล)	ความเค้นที่จุด ขาด (เมกกะปัสคาล)	ความเครียดที่จุด ขาด (%)	ความเหนียว (เมกกะปัสคาล)
NT*	MD	275 ± 9	37 ± 4	144 ± 25	133 ± 31
	TD	526 ± 12	49 ± 15	41 ± 26	14 ± 8
1T	MD	323 ± 21	33 ± 13	159 ± 11	40 ± 2
	TD	467 ± 36	57 ± 2	47 ± 13	19 ± 3
2T	MD	328 ± 17	36 ± 9	158 ± 13	40 ± 4
	TD	338 ± 64	51 ± 7	40 ± 10	14 ± 5
CP	MD	316 ± 23	38 ± 4	181 ± 50	42 ± 6
	TD	462 ± 18	59 ± 2	50 ± 5	22 ± 3
FAC	MD	364 ± 23	40 ± 2	162 ± 5	47 ± 2
	TD	450 ± 32	63 ± 3	53 ± 12	25 ± 6

* เป็นค่าที่คำนวณจากการขาดที่จุดแรกๆของฟิล์ม BOPP

ตารางที่ 4.14 สมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ที่ใช้ Bar coater เบอร์ 60

วิธีปรับผิวหน้า	แนวทดสอบ	โมดูลัสของ Young (เมกกะปัสคาล)	ความเค้นที่จุดขาด (เมกกะปัสคาล)	ความเครียดที่จุดขาด (%)	ความเหนียว (เมกกะปัสคาล)
NT*	MD	205 ± 22	31 ± 1	356 ± 129	47 ± 8
	TD	387 ± 26	42 ± 7	38 ± 8	12 ± 4
1T	MD	286 ± 25	31 ± 2	151 ± 7	34 ± 3
	TD	326 ± 26	44 ± 8	64 ± 38	13 ± 6
2T	MD	225 ± 26	28 ± 2	143 ± 17	30 ± 5
	TD	346 ± 45	41 ± 4	44 ± 12	13 ± 5
CP	MD	265 ± 28	30 ± 1	175 ± 25	35 ± 5
	TD	397 ± 35	47 ± 8	54 ± 6	16 ± 6
FAC	MD	323 ± 23	35 ± 1	166 ± 7	40 ± 4
	TD	390 ± 17	50 ± 3	49 ± 11	16 ± 6

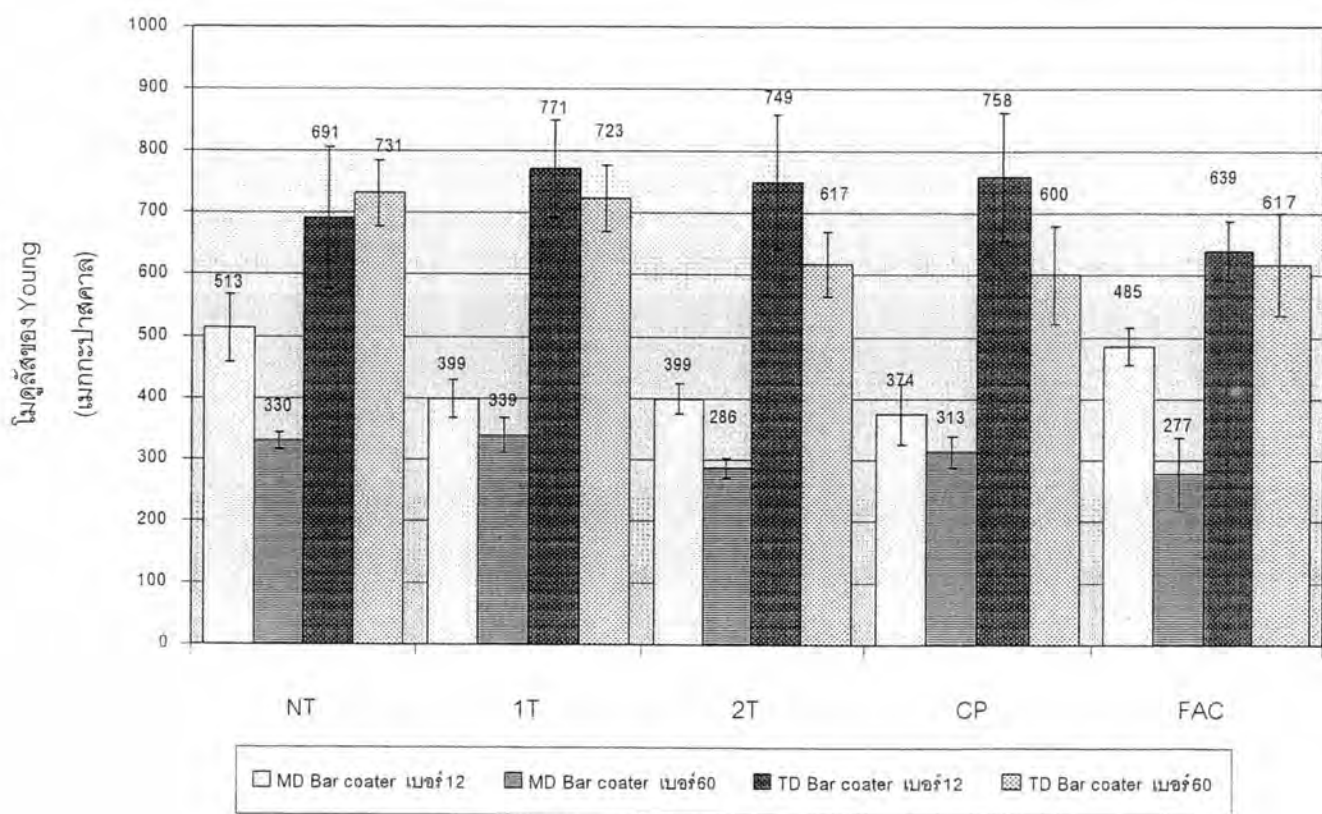
4.5.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE

ฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจะมีสมบัติใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP เช่นเดียวกับฟิล์มประกบ BOPP/LDPE คือ มีค่าโมดูลัสและค่าความเค้นที่จุดขาด (รูปที่ 4.26-4.27) แนว TD สูงกว่าในแนว MD ประมาณ 38% และ 41% ตามลำดับ (เปรียบเทียบจากฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจากโรงงานที่ใช้ Bar coater เบอร์ 12) และประมาณ 54% และ 48% เมื่อเปรียบเทียบจากฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจากโรงงานที่ใช้ Bar coater เบอร์ 60 สำหรับค่าความเครียดที่จุดขาด (รูปที่ 4.28) มีค่าประมาณ 120% ในแนว MD และ

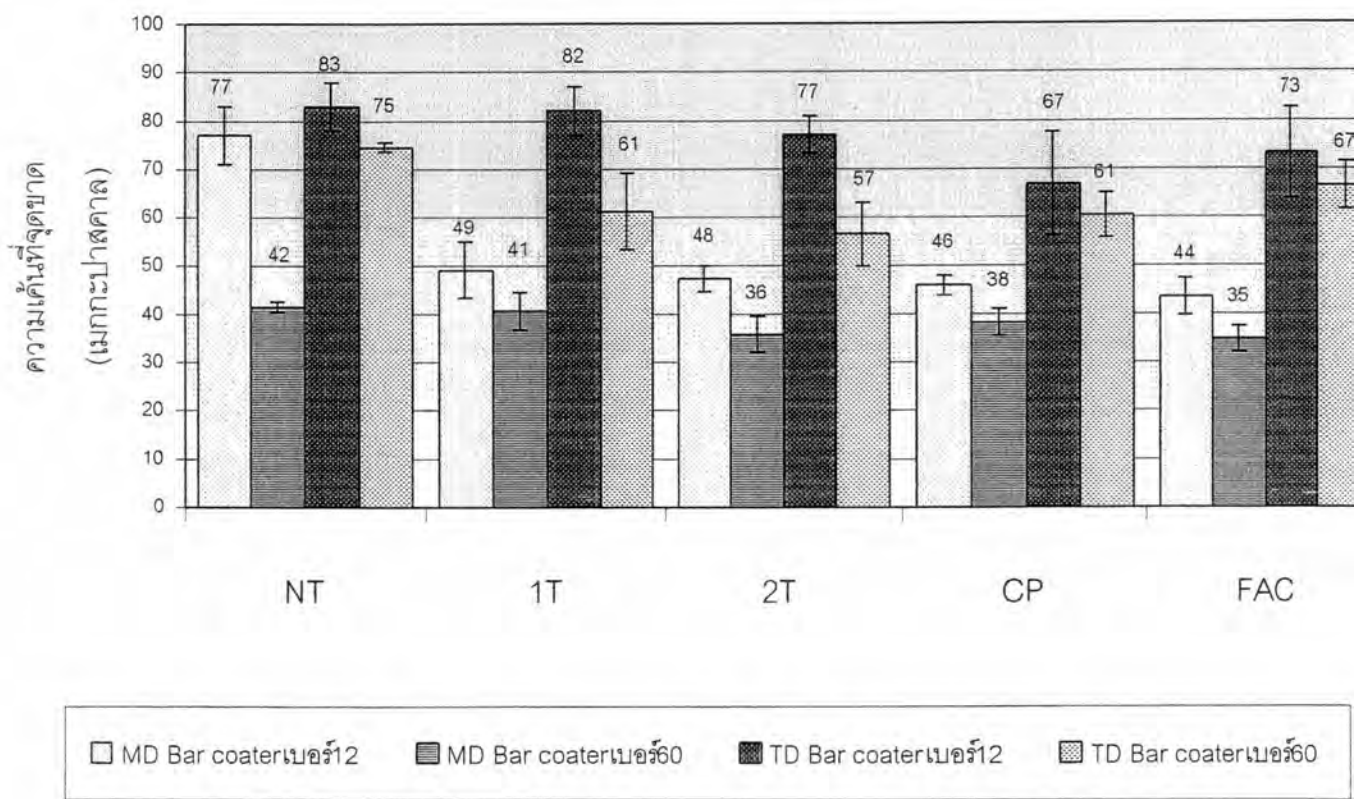
* เป็นค่าที่คำนวณจากการขาดที่จุดแรกๆของ BOPP

50% ในแนว TD (เปรียบเทียบจากฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจากโรงงานที่ใช้ Bar coater เบอร์ 12) และ 159% ในแนว MD และ 49% ในแนว TD เมื่อเปรียบเทียบจากฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจากโรงงานที่ใช้ Bar coater เบอร์ 60 ส่วนความเหนียว (รูปที่ 4.29) มีค่าในแนว MD มากกว่าแนว TD คือประมาณ 40 เมกกะปาสคาลในแนว MD และ 20 เมกกะปาสคาลในแนว TD (เปรียบเทียบจากฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ใช้ Bar coater เบอร์ 12) แต่ฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE จะมีสมบัติเชิงกลที่กล่าวมาทั้งหมดสูงกว่าฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ทั้งที่ฟิล์ม LDPE และ LLDPE มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เป็นเพราะฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE มีความต้านแรงลอกสูงกว่าฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ประมาณ 30% (แสดงถึงแรงยึดติดต่อกันที่ดีกว่า) ทำให้ฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE มีความแข็งแรงที่ดีกว่า สำหรับปัจจัยเรื่องความหนาของกาวก็มีลักษณะเหมือนกับฟิล์มประกบ BOPP/LDPE คือ ถ้ามีความหนาของกาวน้อยกว่าก็จะมีสมบัติต่างๆที่ดีกว่าดังผลการทดสอบที่กล่าวมา

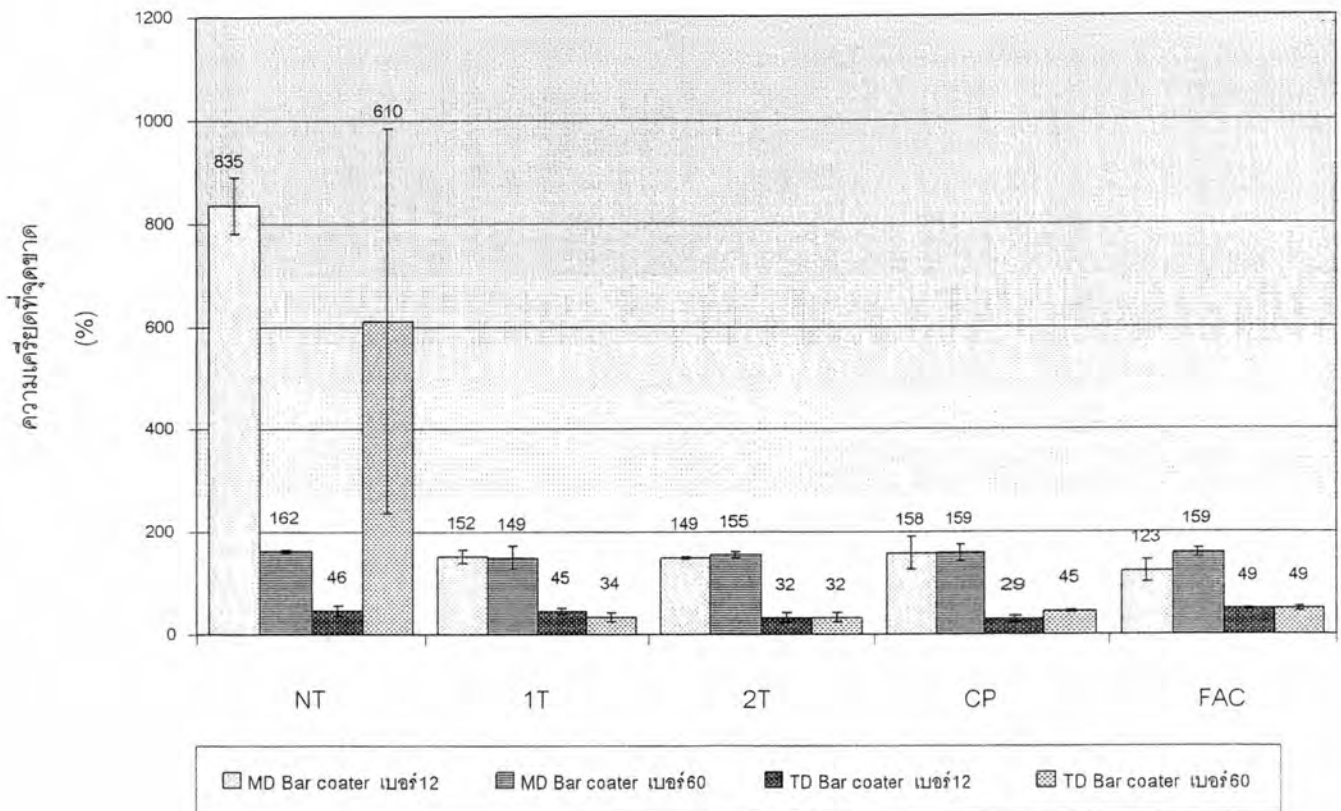
ฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ไม่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาสามารถเกิด Delamination ได้เช่นเดียวกับ ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE (พิจารณาจากรูปที่ 4.30) แต่มีลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องจากฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ในแนว MD ที่ใช้ Bar coater เบอร์ 60 นั้นเป็นฟิล์มที่ไม่ปรับผิวหน้าเพียงลักษณะเดียวที่ไม่เกิด Delamination อาจเป็นไปได้ว่าความไม่สม่ำเสมอในกระบวนการประกบเช่นแรงที่ใช้ในการประกบฟิล์มในขั้นตอนแรกนั้นต้องทำด้วยมือจึงไม่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอได้จึงทำให้ได้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน



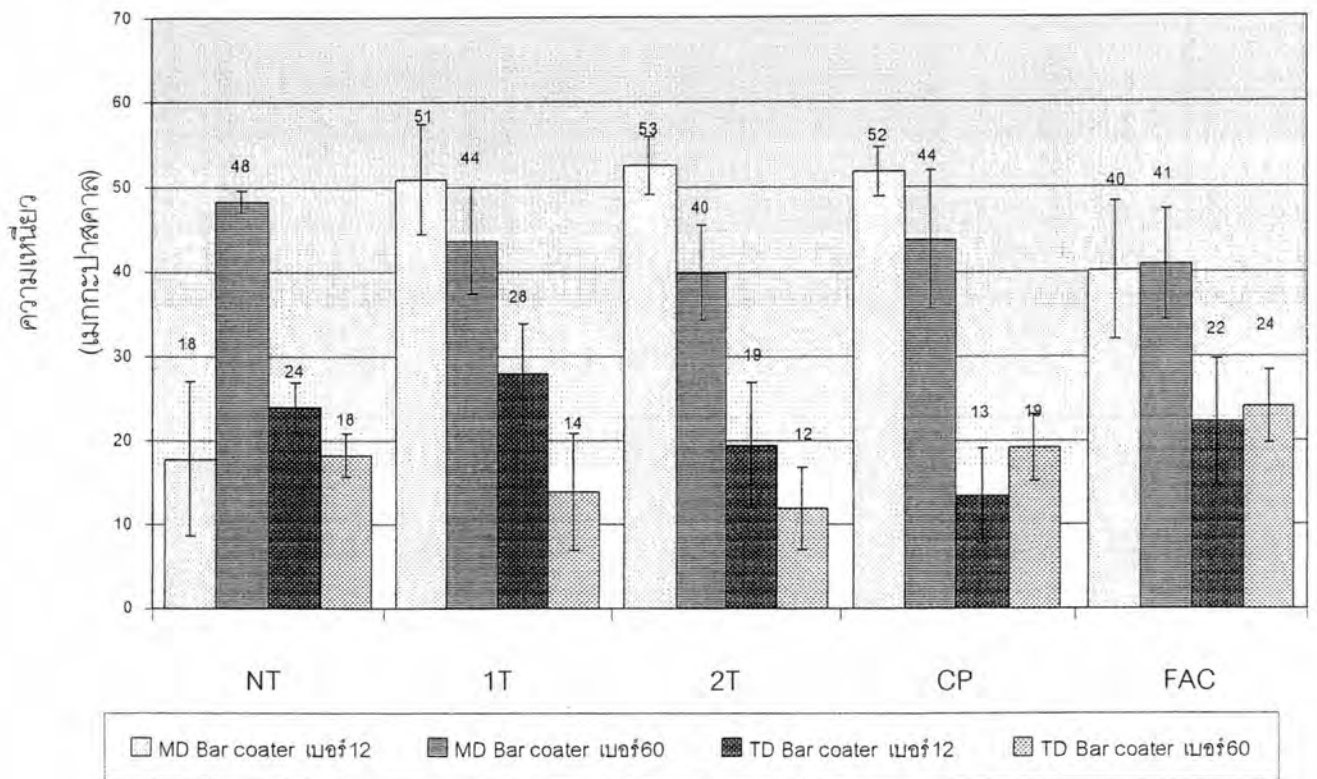
รูปที่ 4.26 ค่าโมดูลัสของ Young ของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE



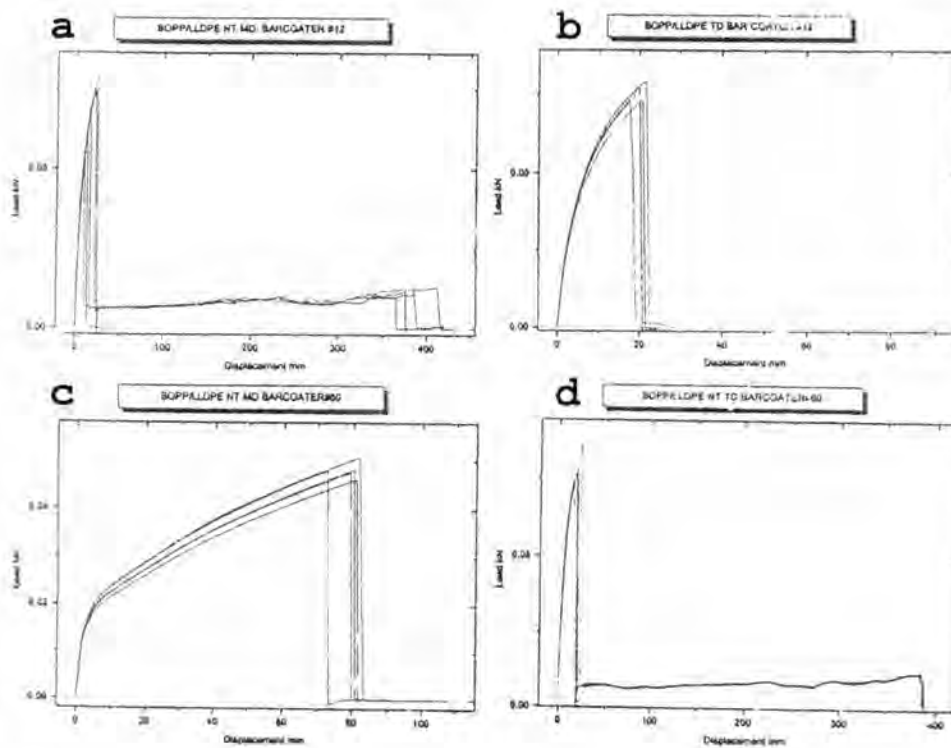
รูปที่ 4.27 ค่าความเค้นที่จุดขาดของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE



รูปที่ 4.28 ค่าความเครียดที่จุดขาดของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE



รูปที่ 4.29 ค่าความเหนียวของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE



รูปที่ 4.30 กราฟการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่เกิด Delamination
 a) ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ไม่ปรับผิวหน้า ใช้แท่งเคลือบเบอร์ 12 แนว MD
 b) ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ไม่ปรับผิวหน้า ใช้แท่งเคลือบเบอร์ 12 แนว TD
 c) ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ไม่ปรับผิวหน้า ใช้แท่งเคลือบเบอร์ 60 แนว MD
 d) ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ไม่ปรับผิวหน้า ใช้แท่งเคลือบเบอร์ 12 แนว TD

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งหมดนี้ ชี้ให้เห็นว่าการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอรอนานั้น นอกจากจะทำให้ฟิล์มประกบมีแรงยึดติดกันดีแล้วยังมีผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีอีกด้วยคือฟิล์มที่ปรับผิวหน้า จะไม่เกิด Delamination ไม่ว่าจะใช้สภาวะใดในการประกบซึ่งสอดคล้องกับผลของความต้านแรงลอก คือฟิล์มที่ผ่านการปรับผิวหน้าจะมีแรงยึดติดกันได้ดี และเห็นได้ชัดเจนว่าการปรับผิวหน้าในลักษณะต่างๆ (1T 2T CP และ FAC) มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มค่อนข้างน้อยเนื่องจากมีค่าต่างๆใกล้เคียงกันมาก (ยกเว้นค่าความเครียดที่จุดขาดของฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ที่ปรับผิวหน้าแบบ CP จะมีค่าสูงกว่าฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ที่ปรับผิวหน้าด้วยวิธีอื่น แต่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูงมากเช่นเดียวกัน (ประมาณ 88%) สำหรับสมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบนั้นจะมีค่าอยู่ระหว่างฟิล์มที่นำมาประกบกันคล้ายกับ

สมบัติของวัสดุคอมพอสิต และปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลคือชนิดของฟิล์มที่นำมาประกบและความหนาของกาวในการประกบ

ตารางที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ใช้ Bar coater เบอร์ 12

วิธีปรับผิวหน้า	แนวทดสอบ	โมดูลัสของ Young (เมกกะปัสคาล)	ความเค้นที่จุดขาด (เมกกะปัสคาล)	ความเครียดที่จุดขาด (%)	ความเหนียว (เมกกะปัสคาล)
NT*	MD	513 ± 55	77 ± 6	835 ± 54	18 ± 9
	TD	691 ± 115	83 ± 5	46 ± 10	24 ± 3
IT	MD	399 ± 31	49 ± 6	152 ± 14	51 ± 6
	TD	771 ± 78	82 ± 5	45 ± 6	28 ± 6
2T	MD	399 ± 24	48 ± 3	149 ± 3	53 ± 3
	TD	749 ± 109	77 ± 4	32 ± 9	19 ± 7
CP	MD	374 ± 49	46 ± 2	158 ± 32	52 ± 3
	TD	758 ± 103	67 ± 11	29 ± 7	13 ± 6
FAC	MD	485 ± 31	44 ± 4	123 ± 22	40 ± 8
	TD	639 ± 49	73 ± 9	49 ± 2	22 ± 8

* เป็นค่าที่คำนวณจากการขาดที่จุดแรกของ BOPP

ตารางที่ 4.16 สมบัติเชิงกลของฟิล์มประเภท BOPP/LLDPE ที่ใช้ Bar coater เบอร์ 60

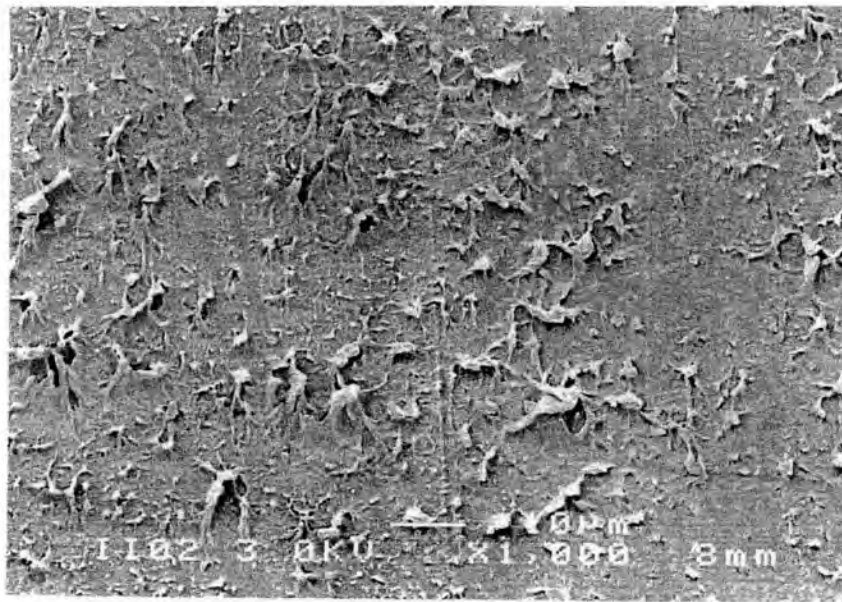
วิธีปรับผิวหน้า	แนวทดสอบ	โมดูลัสของ Young (เมกกะปัสคาล)	ความเค้นที่จุดขาด (เมกกะปัสคาล)	ความเครียดที่จุดขาด (%)	ความเหนียว (เมกกะปัสคาล)
NT*	MD	330 ± 13	42 ± 1	162 ± 3	48 ± 1
	TD	731 ± 53	74 ± 7	610 ± 374	18 ± 3
1T	MD	339 ± 28	41 ± 4	149 ± 23	44 ± 6
	TD	723 ± 54	61 ± 8	34 ± 9	14 ± 7
2T	MD	286 ± 16	36 ± 4	155 ± 6	40 ± 6
	TD	617 ± 52	57 ± 7	32 ± 9	12 ± 5
CP	MD	313 ± 25	38 ± 3	159 ± 16	44 ± 8
	TD	600 ± 79	61 ± 5	45 ± 2	19 ± 4
FAC	MD	277 ± 59	35 ± 3	159 ± 9	41 ± 7
	TD	617 ± 83	67 ± 5	49 ± 4	24 ± 4

* เป็นค่าที่คำนวณจากการขาดที่จุดแรกของ BOPP

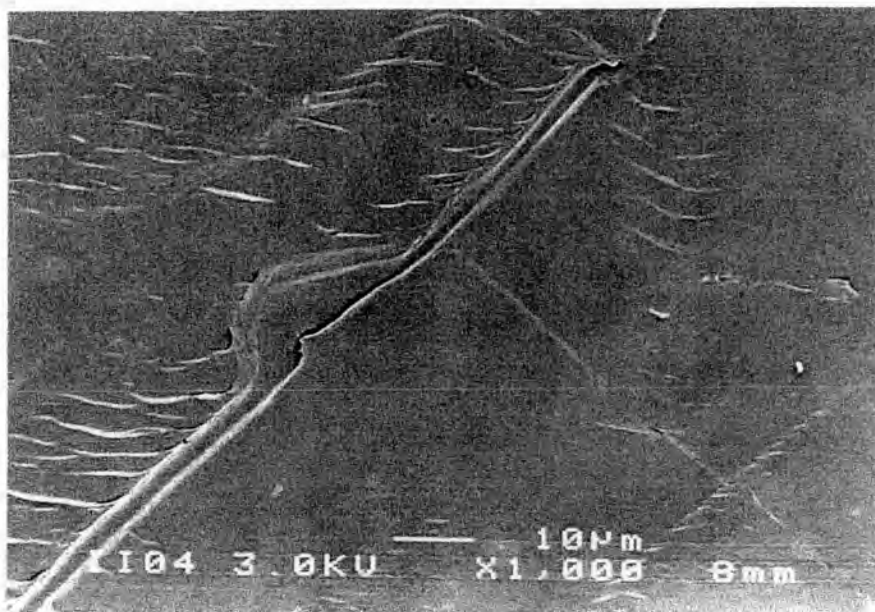
4.6 ผลจากการตรวจสอบด้วย SEM

ลักษณะของผิวหน้าฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ที่แยกออกจากกันด้วยการทดสอบความต้านแรงลอก แสดงไว้ในรูปที่ 4.31 ซึ่งเป็นผิวหน้าของฟิล์ม BOPP ที่ดึงลอกออกจากฟิล์ม LDPE และ รูปที่ 4.32 เป็นผิวหน้าของฟิล์ม LDPE ที่ดึงลอกออกจากฟิล์ม BOPP จากทั้ง 2 ภาพนั้นเห็นอย่างชัดเจนได้ว่า ฟิล์ม BOPP จะมีลักษณะขรุขระ ซึ่งอาจเป็นชั้นของกาวที่หลุดออกจากฟิล์มอีกด้านหนึ่ง (LDPE) ดังที่ได้สรุปไว้ในหัวข้อที่ 4.4 เนื่องจากตรวจพบหมู่ฟังก์ชันของกาวเกาะอยู่บนฟิล์ม BOPP ดังนั้นเมื่อนำมาพิจารณาพร้อมกับภาพจาก SEM ทำให้พอจะสรุปได้ว่ากาวส่วนใหญ่จะเกาะอยู่บนฟิล์ม BOPP ส่วนฝั่งของฟิล์ม LDPE นั้น จะพบส่วนที่เป็นกาวอยู่น้อยมาก (จากการตรวจสอบด้วย XPS ในหัวข้อ 4.4 พบการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางเคมีของออกซิเจนบนผิวฟิล์ม LDPE เช่นเดียวกันแต่ยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน)

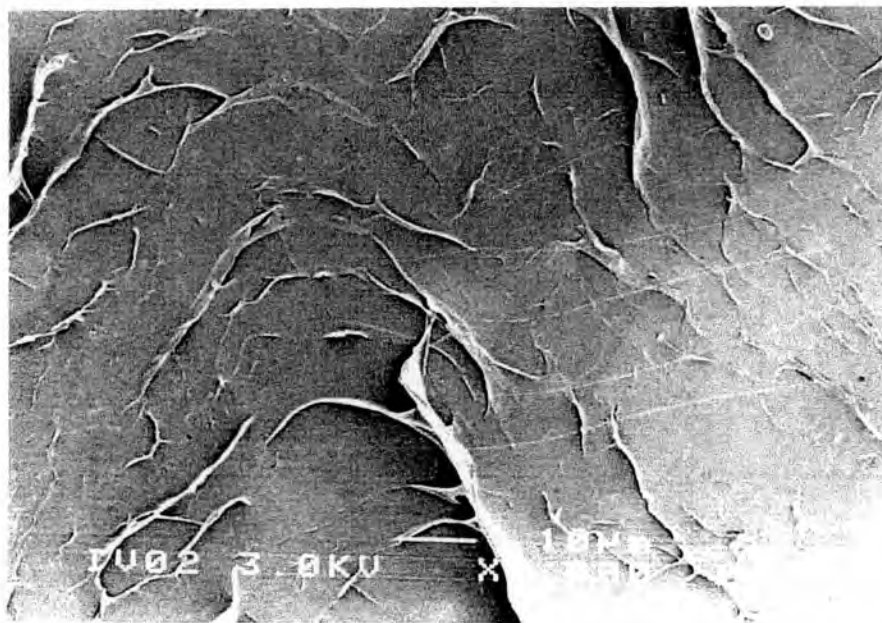
รูปที่ 4.33 และ 4.34 เป็นภาพผิวหน้าของฟิล์ม BOPP และ LLDPE จากการดึงลอกฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ออกจากกันด้วยการทดสอบความต้านแรงลอก จะพบลักษณะรอยขรุขระบนฟิล์ม BOPP ที่ดึงลอกออกจากฟิล์ม LLDPE เช่นเดียวกับพื้นผิวของฟิล์ม BOPP ในรูปที่ 4.31 ซึ่งจากข้อมูลนี้ตรงกับการตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มที่ดึงลอกออกจากการประกบด้วย XPS ซึ่งพบหมู่ฟังก์ชันของกาวบนฟิล์ม BOPP เป็นการยืนยันได้ว่ากาวสามารถเกิดปฏิกิริยาและเกาะติดอยู่บนฟิล์ม BOPP มากกว่าฟิล์ม LLDPE



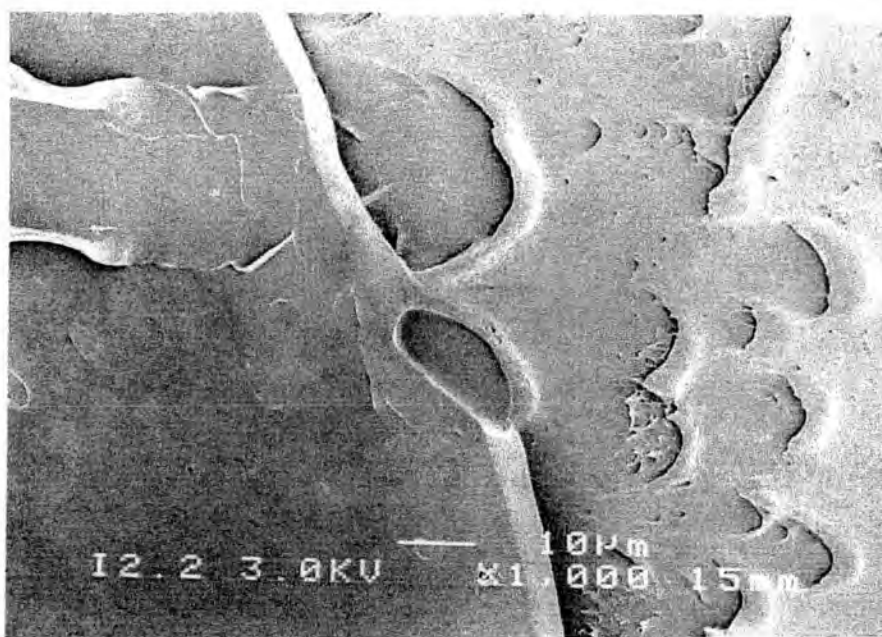
รูปที่ 4.31 พื้นผิวฟิล์ม BOPP ที่ถูกดึงออกจากฟิล์ม LDPE



รูปที่ 4.32 พื้นผิวฟิล์ม LDPE ที่ถูกดึงออกจากฟิล์ม BOPP



รูปที่ 4.33 พื้นผิวฟิล์ม BOPP ที่ถูกดึงออกจากฟิล์ม LLDPE



รูปที่ 4.34 พื้นผิวฟิล์ม LLDPE ที่ถูกดึงออกจากฟิล์ม LLDPE