บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้พยายามสร้างความเข้าใจพื้นฐานของการทำคอโรนาซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการผลิตฟิล์มประกบ (Laminated Film) โดยเลือกศึกษาฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวสองทิศทาง (Biaxially Oriented Polypropylene, BOPP) ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) และฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) ซึ่งฟิล์มทั้งสามชนิดเป็นฟิล์มที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้นำฟิล์มทั้งสามชนิดมาประกบกัน โดยแบ่งตามประเภทฟิล์มได้ 2 ระบบ คือ ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE และ ฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE รวมทั้งศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีบนผิวหน้าของฟิล์มที่ได้รับการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา ร่วมด้วยการตรวจสอบสมบัติการยึดติดและสมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบเพื่อศึกษาอิทธิพลของการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาที่มีผลต่อสมบัติการยึดติดและสมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบ นอกจากนี้งานวิจัยยังพยายามหาแนวทางในการลดปริมาณการใช้กาวซึ่งต้องใช้ตัวทำละลาย เช่น เอทิลแอซีเทต ซึ่งส่งผลเสียต่อสุขภาพของผู้ที่อยู่ในบริเวณกระบวนการผลิตฟิล์มประกบ โดยการลดความหนาของกาวที่ใช้ในการประกบ

การศึกษาหาค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) และแรงตึงผิวเปียก (Wetting Tension) ของฟิล์มที่ผ่านการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาด้วยพลังงานในการปรับผิวหน้า ตั้งแต่ 0-300 วัตต์ เพื่อตรวจสอบพลังงานที่เหมาะสมในการปรับผิวหน้าของฟิล์มทั้ง 3 ชนิดและใช้เป็นพลังงานที่ปรับผิวหน้าของฟิล์มก่อนขั้นตอนการประกบนั้นพบว่า ค่ามุมสัมผัสของฟิล์มทั้ง 3 ชนิดเมื่อปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาแล้วจะมีค่ามุมสัมผัสต่ำลง (แรงตึงผิวเปียกสูงขึ้น) จนคงที่ ดังนี้ ฟิล์ม BOPP ก่อนปรับผิวหน้ามีมุมสัมผัสและแรงตึงผิวเปียกประมาณ 92 องศา และ 32 ดายน์/เซ็นติเมตร ตามลำดับ และค่ามุมสัมผัสจะคงที่เมื่อใช้พลังงานในการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาเท่ากับ 200 วัตต์ ซึ่งมีค่ามุมสัมผัสและแรงตึงผิวเปียก ประมาณ 72 องศาและ 39 ดายน์/เซ็นติเมตร ตามลำดับ สำหรับฟิล์ม LDPE จะมีค่ามุมสัมผัสและแรงตึงผิวเปียกเมื่อยังไม่ปรับผิวหน้าประมาณ 94 องศา และ 31 ดายน์/เซ็นติเมตร ตามลำดับ และเมื่อปรับผิวหน้าด้วยพลังงานเท่ากับ 250 วัตต์ ค่ามุม

สัมผัสและแรงดึงผิวเปียก จึงคงที่ โดยมีค่าประมาณ 73 องศา และ 38 ดายน์/เซ็นติเมตร สุดท้าย ฟิล์ม LLDPE จะมีค่ามุมสัมผัสและแรงดึงผิวเปียกก่อนการปรับผิวหน้าประมาณ 84 องศาและ 35 ดายน์/เซ็นติเมตร และค่ามุมสัมผัสและแรงดึงผิวเปียกจะเริ่มคงที่เมื่อใช้พลังงานการปรับผิวหน้าเท่ากับ 200 วัตต์ โดยมีค่ามุมสัมผัสประมาณ 53 องศา และแรงดึงผิวเปียกประมาณ 44 ดายน์/เซ็นติเมตร ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มประกบที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปข้อกำหนดของฟิล์มที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา ต้องมีค่าแรงดึงผิวเปียกไม่ต่ำกว่า 38 ดายน์/เซ็นติเมตร จึงสรุปได้ว่า ค่าพลังงานที่เหมาะสมในการปรับผิวหน้าฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE มีค่าเท่ากับ 200 250 และ 200 วัตต์ ตามลำดับ

การศึกษาอิทธิพลของจำนวนครั้งและทิศทาง (pattern)ในการปรับผิวหน้าโดยการทำคอโรนาแบ่งออกเป็น 5 ลักษณะ คือ 1. ไม่ปรับผิวหน้า (No Treatment, NT) 2. ปรับผิวหน้า 1 ครั้ง (1 Time, 1 T) 3. ปรับผิวหน้า 2 ครั้ง ในทิศทาง MD (2 Treatments, 2T) 4. ปรับผิวหน้า 2 ครั้งในทิศทางตั้งฉากกัน (Cross-Pattern, CP) และ 5. ปรับผิวหน้าจากโรงงาน (Factory Treatment, FAC) สามารถสรุปผลการทดสอบได้ว่า ฟิล์มที่ปรับผิวหน้าแล้วทั้ง 4 ลักษณะ (1T,2T CP และ FAC) จะมีค่ามุมสัมผัสต่ำลง (หรือค่าแรงดึงผิวเปียกสูงขึ้น) ฟิล์ม BOPP และ LLDPE ที่ปรับผิวหน้าในห้องทดลองทั้ง 3 ลักษณะ (1T 2T และ CP) จะมีค่ามุมสัมผัสคงที่ ประมาณ 72 และ 55 องศาตามลำดับ และมีค่าแรงดึงผิวเปียกประมาณ 40 และ 44 ดายน์/เซ็นติเมตร สำหรับฟิล์ม LDPE ที่ปรับผิวหน้าในห้องทดลองจะมีค่ามุมสัมผัสลดลงเมื่อเพิ่มการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา 1 ครั้ง เป็น 2 ครั้ง (ทั้ง 2 T และ CP) จาก 73 องศา เป็น 67 องศา แสดงว่า จำนวนครั้งในการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนามีอิทธิพลต่อค่ามุมสัมผัสและแรงดึงผิวเปียก ของฟิล์ม LDPE เพียงชนิดเดียว

ส่วนฟิล์ม BOPP ที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจากโรงงานนั้นจะมีค่ามุมสัมผัสประมาณ 26 องศาซึ่งมีค่าน้อยกว่าฟิล์มที่ปรับผิวหน้าในห้องทดลองซึ่งมีค่ามุมสัมผัสประมาณ 72 องศา ข้อสังเกตนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของสภาวะในการปรับผิวหน้า เช่น พลังงานในการปรับผิวหน้า อัตราเร็วในการปรับผิวหน้าและอิเล็กโทรดที่ใช้ในการปรับผิวหน้า เป็นต้น สำหรับฟิล์ม LDPE และ LLDPE ที่ปรับผิวหน้าจากโรงงานจะมีค่ามุมสัมผัสเพิ่ม จาก 67 องศา เป็น 74 องศา และ จาก 58 องศา เป็น 68 องศา ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ปรับผิวหน้าจากห้องทดลองทั้ง 3 ลักษณะ (1T 2 T และ CP) อาจเนื่องมาจากข้อเสียหลักของวิธีการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา นั่นคือเมื่อปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาแล้วค่ามุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้น (แรงดึงผิวเปียกลดลง) อย่างรวดเร็วจนคงที่ที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าฟิล์ม LDPE และ LLDPE ที่ได้มาจากโรงงานนั้นได้รับการปรับผิวหน้ามาเป็นระยะเวลานานแล้ว

ภาพจาก AFM (Atomic Force Microscopy) สามารถบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฟิล์มที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาพบว่าฟิล์มแต่ละชนิดมีรูพรุนเล็กๆอยู่และมีค่าความขรุขระเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงไปในระดับนาโนเมตรภายหลังการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา ดังนี้ ฟิล์ม BOPP มีค่าความขรุขระเพิ่มขึ้นจาก 9.4 เป็น 13.3 นาโนเมตร ฟิล์ม LDPE เพิ่มขึ้นจาก 33.6 เป็น 50.3 นาโนเมตร และ ฟิล์ม LLDPE จาก 19.8 เป็น 24.5 นาโนเมตร นอกจากนี้จากการพิจารณารายละเอียดของภาพ AFM พบว่ารูพรุนของฟิล์มแต่ละชนิดมีความลึกมากขึ้นโดยสังเกตจากระดับสีที่เข้มขึ้นนั่นเอง แสดงว่าการปรับผิวหน้านั้นสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพได้จริงแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงในระดับนาโนเมตรเท่านั้น

ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ศึกษาจากเครื่อง X-Ray Photoeletron Spectroscopy (XPS) แสดงให้เห็นว่ามีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นบนผิวหน้าของฟิล์ม โดยกราฟ C1s ของฟิล์มที่ทำคอโรนาแล้วจะเลื่อนตำแหน่งจาก 287 eV ไปอยู่ที่ 287.3-287.4 eV (ตามปกติกราฟ C1s ของพอลิเทิลีนและพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้รับการปรับผิวหน้าจะอยู่ที่ตำแหน่ง 285 eV แต่ในการวิเคราะห์พบว่าฟิล์ม BOPP LDPE และ LLDPE ที่ยังไม่ผ่านการทำคอโรนามีกราฟ C1s อยู่ที่ 287 eV จึงอาจเป็นไปได้ว่าเนื่องจากสภาวะการวิเคราะห์ที่ไม่เหมาะสมทำให้ผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนไป 2 eV ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับผิวหน้าเป็นที่ 287 eV แทน 285 eV) การเลื่อนของกราฟ C1s ที่เกิดขึ้นแสดงว่ามีหมู่ฟังก์ชันประเภท อัลกอฮอล อัลดีไฮด์ หรือ คีโตน เกิดขึ้นบนผิวหน้าของฟิล์มหลังจากการทำคอโรนา นอกจากนี้กราฟ O1s ของฟิล์มทั้ง 3 ชนิดที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาแล้วแสดงถึงปริมาณของออกซิเจนที่มากขึ้น (จากความสูงของกราฟที่มากขึ้น) เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันนั่นเอง

ส่วนการศึกษาลักษณะของผิวหน้าฟิล์มที่แยกจากการประกบด้วยกาวพอลิอีเทอร์ยูรีเทนโดยผ่านการการทดสอบการดึงลอก (Peel Test) พบว่า ฟิล์ม BOPP ที่ถูกดึงลอกออกจากฟิล์ม LDPE และ LLDPE มีกราฟ C1s ที่มีลักษณะเหมือนกับกราฟ C1s ของกาวพอลิอีเทอร์ยูรีเทนทางการค้า แสดงว่าอาจมีกาวติดอยู่บนผิวของฟิล์ม BOPP ส่วนฟิล์ม LDPE และ LLDPE ไม่พบกราฟลักษณะดังกล่าว แต่กราฟ O1s ของฟิล์ม LDPE มีปริมาณของออกซิเจนเพิ่มขึ้นมากกว่าฟิล์มที่ปรับผิวหน้าแล้วประมาณ 90% ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่กาวส่วนใหญ่จะอยู่บนฟิล์ม BOPP ซึ่งเมื่อตรวจสอบผิวหน้าฟิล์มที่แยกจากการประกบกันด้วยภาพจาก SEM พบว่าฟิล์ม BOPP มีลักษณะขรุขระที่เกิดจากการแยกชั้นของกาวกับฟิล์มมากกว่าฟิล์ม LDPE และ LLDPE อย่างชัดเจน

ผลของการทำคอโรนาที่มีต่อสมบัติการยึดติด โดยมีกาวพอลิอีเทอร์ยูรีเทนเป็นตัวประสาน ซึ่งศึกษาโดยการหาความต้านแรงลอก (Peel Strength) พบว่าฟิล์มประกบ BOPP/LDPE และ BOPP/LLDPE ที่ไม่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาจะมีความต้านแรงลอก ประมาณ 0-4 กรัม/15 มิลลิเมตร แสดงว่าการทำคอโรนาช่วยทำให้การยึดติดระหว่างฟิล์ม 2 ชนิดดีขึ้น โดยอาจเกิดจากการที่ฟิล์มที่ได้รับการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา มีรูพรุนเล็กๆเกิดขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมติดเชิงกลระหว่างกาวกับฟิล์ม (mechanical interlocking) และการที่กาวสามารถเกิดพันธะเคมี (chemical bonding) กับฟิล์ม เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันหลายชนิดที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของฟิล์มภายหลังการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนานั่นเอง อย่างไรก็ตามอิทธิพลของการยึดติดน่าจะมาจากการเกิดพันธะเคมีมากกว่าการเชื่อมติดเชิงกล เนื่องจากฟิล์มประกบที่ปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนาโดยไม่มีกาวเป็นตัวประสานจะไม่เกิดแรงยึดติดต่อกัน ส่วนฟิล์มที่ปรับผิวหน้าภายในห้องทดลองทั้ง 3 ลักษณะ (1T 2T และ CP) จะมีค่าความต้านแรงลอกน้อยกว่า ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE และ BOPP/LLDPE ที่ได้รับการปรับผิวหน้าจากโรงงานประมาณ 40% และ 100% ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของ LLDPE (ประมาณ 68 องศา) ที่ต่ำกว่า LDPE (ประมาณ 74 องศา) จึงทำให้ฟิล์ม LLDPE สามารถดูดซึมกาวได้มากกว่า จึงทำให้มีแรงยึดติดได้ดีกว่าด้วย อย่างไรก็ตามแรงยึดติดของฟิล์มที่ปรับผิวหน้าภายในห้องทดลองนั้นมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ในอุตสาหกรรม (ฟิล์มประกบต้องมีค่าความต้านแรงลอกไม่ต่ำกว่า 200 กรัม/15 มิลลิเมตร) ดังนี้ ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE ที่ปรับผิวหน้าแบบ CP จะมีค่าแรงยึดติดประมาณ 220 กรัม/15 มิลลิเมตรสำหรับความหนากาว 5 ไมครอน และประมาณ 310 กรัม/15 มิลลิเมตร เมื่อมีความหนาของกาวเท่ากับ 20 ไมครอน ส่วนฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE ที่ปรับผิวหน้าในห้องทดลองทั้ง 3 ลักษณะ (1T 2T และ CP) จะมีค่าความต้านแรงลอกประมาณ 320 กรัม/15 มิลลิเมตรเมื่อมีกาวหนา 5 ไมครอน และ 500 กรัม/15 มิลลิเมตร ที่ความหนากาว 20 ไมครอน

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อศึกษาอิทธิพลของการทำคอโรนาต่อสมบัติเชิงกลนั้น พบว่า ฟิล์มประกบ BOPP/LDPE และ BOPP/LLDPE ที่มีแรงยึดติดต่อกันต่ำเนื่องจากไม่ได้รับการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนานั้น จะเกิดการแยกชั้นของฟิล์มทั้ง 2 ชนิด (Delamination) ส่วนฟิล์ม BOPP/LDPE และ BOPP/LLDPE ที่ได้รับการปรับผิวหน้าทั้ง 4 ลักษณะ คือ 1T 2T CP และ FAC นั้นเมื่อเป็นฟิล์มประกบ จะมีค่าโมดูลัสและค่าความเค้นที่จุดขาดในแนว TD สูงกว่าในแนว MD ประมาณ 100% ในทางกลับกันก็จะมีค่าความเครียดที่จุดขาดและความเหนียวในแนว TD ต่ำกว่าในแนว MD ประมาณ 200% และ 100% ตามลำดับ นอกจากนั้นทั้งฟิล์มประกบ BOPP/LDPE และ BOPP/LLDPE ที่มีความหนาของกาว 5 ไมครอน จะมีสมบัติเชิงกลดีกว่า ฟิล์มประกบที่มีความหนาของกาว 20 ไมครอน เนื่องจากชั้นของกาวมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่าฟิล์มทั้ง 3

ชนิด เมื่อความหนาของกาวเพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลของฟิล์มประกบจึงลดลง เช่น ค่าโมดูลัสของฟิล์มประกบ BOPP/LLDPE จะต่ำลงประมาณ 15% ในแนว MD และ 10% ในแนว TD สำหรับฟิล์มประกบ BOPP/LDPE จะมีค่าโมดูลัสลดลงประมาณ 25% แนว MD และ17% ในแนว TD

โดยสรุปแล้วการปรับผิวหน้าฟิล์มโดยการทำคอโรนานั้นมีอิทธิพลอย่างมากในการทำให้เกิดแรงยึดติดระหว่างฟิล์มซึ่งเกิดจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพบนผิวฟิล์มและมีผลโดยตรงต่อสมบัติของฟิล์มประกบ กล่าวคือฟิล์มที่ได้รับการปรับผิวหน้าอย่างเหมาะสมจะมีแรงยึดติดที่ดี ส่วนสมบัติเชิงกลนั้นก็จะมีแนวโน้มตามลักษณะของฟิล์มประกบที่มีความแข็งแรงสูงกว่า นอกจากนั้นการลดความหนาของกาวให้น้อยลงจาก 20 ไมครอน เป็น 5 ไมครอนนั้นยังสามารถทำให้ฟิล์มมีแรงยึดติดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามข้อกำหนดของอุตสาหกรรม (ค่าความต้านแรงลอกไม่ต่ำกว่า 200 กรัม/15 มิลลิเมตร) กระบวนการลดความหนาของกาวนี้นับว่าเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปริมาณการใช้ตัวทำละลายที่เป็นโทษต่อสุขภาพความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและสภาวะแวดล้อมในกระบวนการประกบฟิล์มได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากกระบวนการประกบและปรับผิวหน้าของฟิล์มยังมีความแตกต่างจากอุตสาหกรรมจริงอยู่พอสมควร ดังนั้นถ้าสามารถใช้เครื่องมือการประกบและเครื่องทำคอโรนาที่เหมือนในอุตสาหกรรมจริงได้จะได้ผลการทดลองที่เป็นประโยชน์และประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมจริงเพิ่มมากขึ้น

2. นอกจากแนวทางในการลดความหนาของกาวเพื่อหลีกเลี่ยงหรือลดปริมาณการใช้ตัวทำละลายที่เป็นอันตรายแล้ว วิธีการแก้ไขอีกวิธีหนึ่งคือการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวทำละลายชนิดอื่นที่มีลักษณะคล้ายกันแต่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและยังคงมีประสิทธิภาพและสมบัติใกล้เคียงกับเอทิลแอซีเตดมาทดแทน

3. ฟิล์มพลาสติกหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ยังมีอีกหลายชนิดเช่น ฟิล์มไนลอน (Nylon Film) ฟิล์มพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate Film) ฯลฯ ดังนั้นควรมีการศึกษาผลของการทำคอโรนาต่อฟิล์มชนิดอื่นๆ ด้วยเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ต่อไป

4. ปัญหาที่สำคัญในการปรับผิวหน้าด้วยการทำคอโรนา คือ ค่ามุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากการปรับผิวหน้าเป็นระยะเวลาหนึ่ง ดังนั้นจึงควรหาวิธียืดอายุของฟิล์มที่ปรับผิวหน้าแล้วให้ค่ามุมสัมผัสไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักภายหลังการปรับผิวหน้า