บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทดลองหาวิธีการแปรสภาพเศษผ้าฝ้าย 2 วิธีด้วยกัน แต่วิธีหลักที่ใช้ในการทำวิจัยคือ วิธีทางเคมี ซึ่งได้อธิบายไปแล้วในแผนภาพแนวทางการทดลอง จากรูปที่ 3.1 ข้อที่ 3.3 บทที่ 3 เพราะฉะนั้นในตอนต้นจะขอกล่าวถึงผลการทดลองเฉพาะของสารตัวเติมฝ้าย และสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการแปรสภาพเศษผ้าฝ้ายด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งจะอยู่ในข้อที่ 4.1 – 4.2 และจากนั้นในข้อที่ 4.3 – 4.4 จะกล่าวถึงผลการทดลองของสารตัวเติมฝ้ายที่ได้จากการแปรสภาพเศษผ้าฝ้ายด้วยวิธีทางเชิงกล ตลอดจนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสารตัวเติมฝ้ายดังกล่าว เปรียบเทียบกับสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสารตัวเติมฝ้ายที่ได้จากการแปรสภาพด้วยวิธีทางเคมี

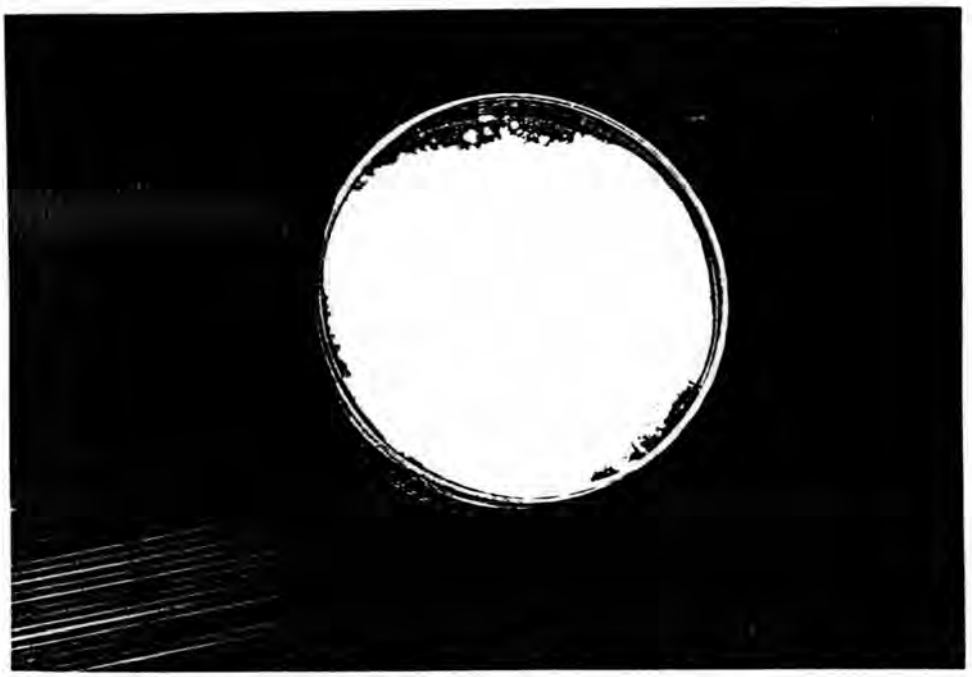
4.1 สมบัติของสารตัวเติมฝ้ายจากการแปรสภาพทางเคมี

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

Scanning Electron Microscopy (SEM)

การแปรสภาพด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอกริกเจือจางนั้น มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของฝ้ายอย่างมาก ซึ่งผลที่ได้หลังจากการแปรสภาพเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า ลักษณะผ้าฝืนหรือเส้นใยนั้นได้ถูกเปลี่ยนสภาพไปเป็นผงคล้ายผงแคลเซียมคาร์บอเนต และมีสีขาวซึ่งอาจเนื่องมาจากเศษผ้าฝ้ายที่ใช้นั้นมีสีขาว ดังรูปที่ 4.1 แต่ถ้านำผงฝ้ายที่ได้มาดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 350 เท่า จะเห็นว่าผงฝ้ายมีลักษณะเป็นเส้นยาวคล้ายเส้นใย แต่มีขนาดเล็กและสั้นลงมาก สังเกตว่ามีความยาวแตกต่างกันไปอยู่ในช่วงประมาณ 50 – 300 ไมครอน (μm) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 ไมครอน ดังรูปที่ 4.2 (1) และ 4.3 (1) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดจะ

ไปทำลายส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ของเส้นใยจึงทำให้ลำดับขั้นของการพอลิเมอร์ไรเซชั่น (degree of polymerization, DP) ของเส้นใยลดลงเรื่อยๆ มีผลทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กและสั้นลงเรื่อยๆ ตามการดำเนินไปของปฏิกิริยา และจะสิ้นสุดที่ค่าคงที่ของ ค่า DP ค่าหนึ่ง ดังได้อธิบายไปแล้วในข้อที่ 2.4 ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้สุดท้าย คือ เส้นใยฝ้ายที่มีขนาดเล็กและสั้นลงมากจนมองเห็นเป็นผงนั่นเอง



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของผงฝ้ายหลังจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด

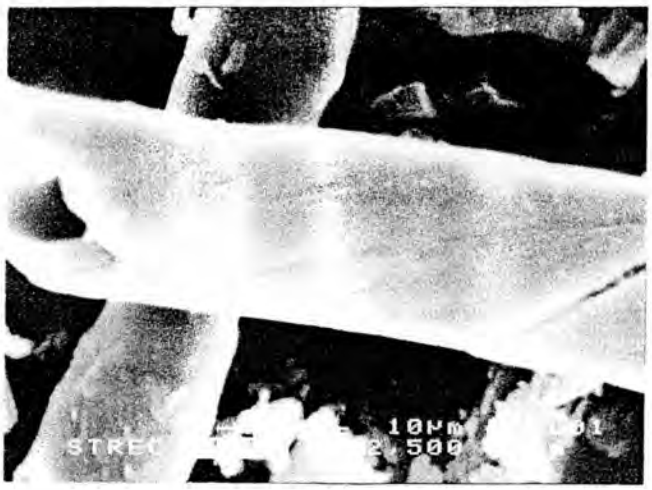
เมื่อนำผงฝ้ายดังกล่าวมาปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคมี 2 ชนิดคือ (1) มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟพอลิโพรพิลีน (maleic anhydride grafted polypropylene, MAHPP) และ (2) กรดสเตียริก (stearic acid) พบว่าสารเคมีทั้งสองสามารถเกาะติดอยู่บนพื้นผิวของผงฝ้ายได้ รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายกำลังขยายต่ำ 350 เท่า เปรียบเทียบลักษณะโดยรวมของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยสารเคมีทั้งสองชนิด พบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP (รูปที่ 4.2 (2)) มีเม็ดสารมากมายเกาะอยู่อย่างสม่ำเสมอโดยรอบผงฝ้ายซึ่งมีรูปร่างเป็นเส้นทุกเส้น ในขณะที่ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก(รูปที่ 4.2 (3)) พบว่าผงฝ้ายบางเส้นมีลักษณะขรุขระและมีเกล็ดของสารเกาะอยู่แต่ไม่สม่ำเสมอและไม่พบทั่วถึงในทุกเส้นเมื่อเปรียบเทียบกับผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP โดยลักษณะดังกล่าวนี้สามารถเห็นได้ชัดเจนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นภาพกำลังขยายสูงของรูปที่ 4.2 คือ 2,500 เท่า จะเห็นได้ชัดว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงจะมีพื้นผิวเรียบ ส่วนผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยสารเคมีทั้งสองชนิดจะมีลักษณะขรุขระ (roughness) บนพื้นผิวของ

(1)

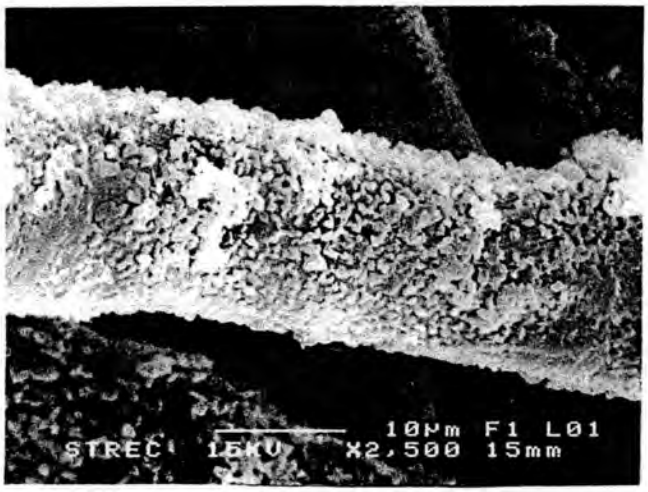
(2)

(3)

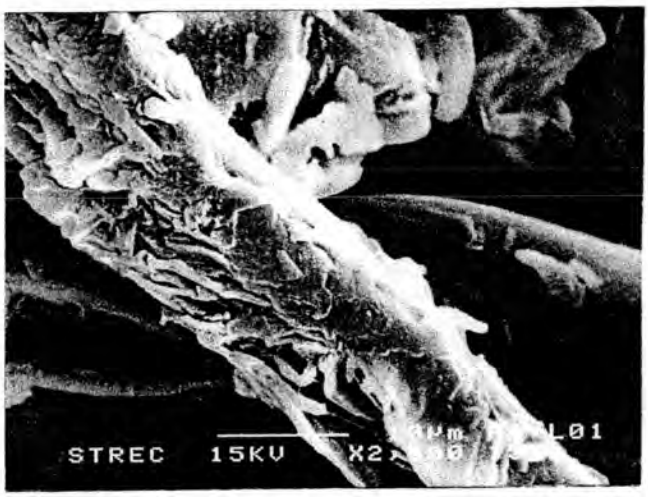
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผงฝ้าย ที่กำลังขยาย 350 เท่า
(1) ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง (2) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และ
(3) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก



(1)



(2)



(3)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผงฝ้าย ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า
(1) ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง (2) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และ
(3) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก

ผงฝ้าย ในลักษณะต่างกันคือ พื้นผิวของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPPจะมีลักษณะเป็นเม็ดสารเล็กๆ และละเอียดเกาะอยู่มากมาย แต่ในพื้นผิวของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกจะมีลักษณะเป็นเกล็ดใหญ่ และหยาบกว่า ซึ่งลักษณะขรุขระนี้แสดงถึงความสำเร็จในการเกาะติดของสารบนผงฝ้าย และความสามารถในการยึดติดกับเนื้อพลาสติกเมื่อนำผงฝ้ายนี้มาใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อทำเป็นวัสดุเชิงประกอบต่อไป

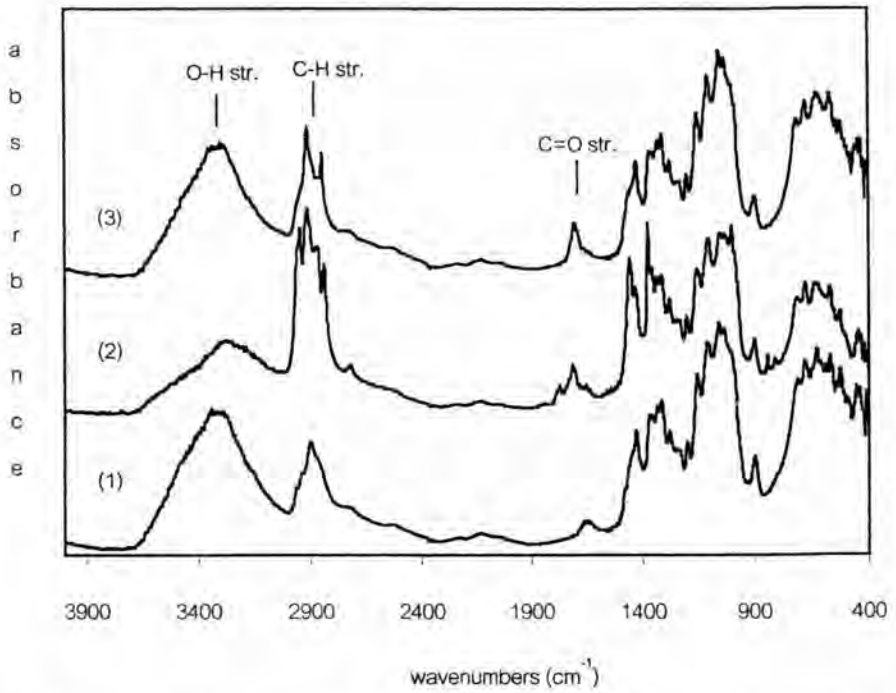
4.1.2 โครงสร้างทางเคมี

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การตรวจสอบ 2 เทคนิคด้วยกันในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปของผงฝ้ายเมื่อผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย MAHPP และกรดสเตียริก เปรียบเทียบกับผงฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง เพื่อยืนยันผลการปรับปรุงพื้นผิวผงฝ้าย ดังนี้

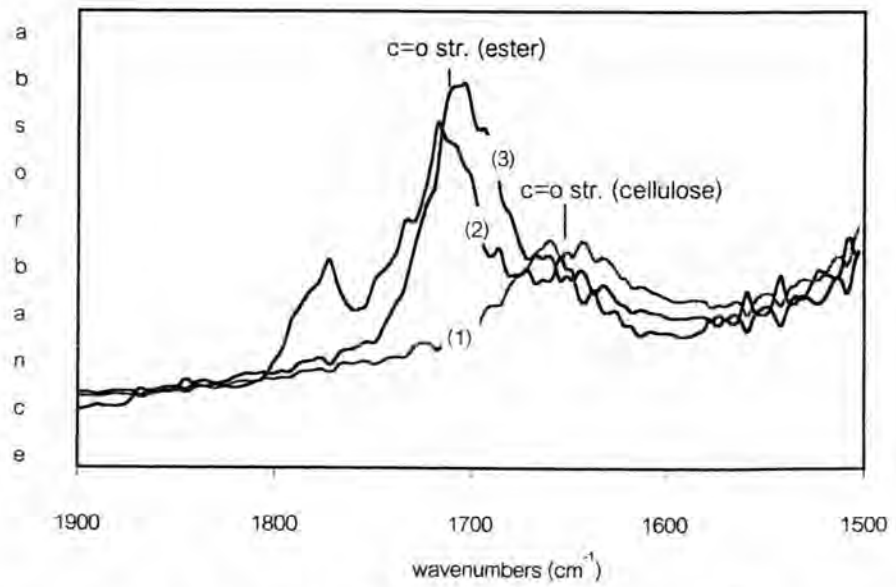
4.1.2.1 Fourier Transform Infared Spectroscopy (FT-IR)

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) แบบ Attenuated total Reflection (ATR) นี้ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพื้นผิวผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ผงฝ้ายทั้ง 3 ชนิด ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 โดยพบว่า ผงฝ้ายที่ได้จากการแปรสภาพทางเคมี แต่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง ปรากฏพีก (peak) ของอินฟราเรดสเปกตรัมที่ช่วงความยาวคลื่น (wave numbers) สำคัญ ๆ ดังนี้
(รูปที่ 4.4 (1))

ช่วงความยาวคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
3200 – 3300	O-H stretching
2850 – 2950	C-H stretching (aliphatic)
1620 – 1640	C=O stretching (cellulose)

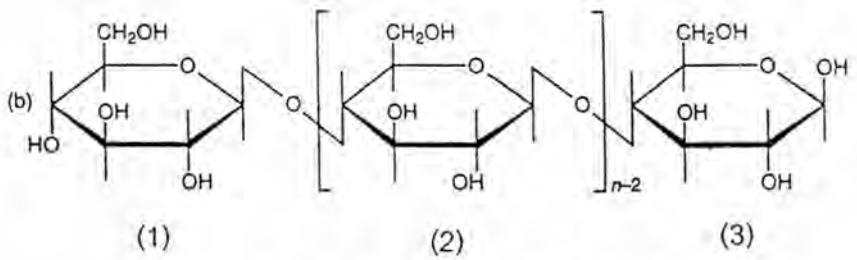


รูปที่ 4.4 ภาพอินฟราเรดสเปกตรัมของผงฝ้าย (1) ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง (2) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และ (3) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก

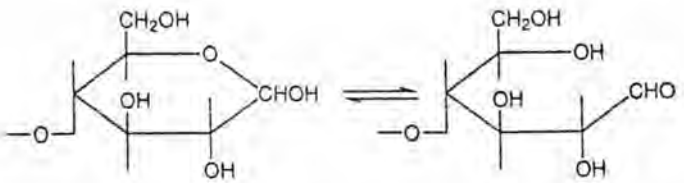


รูปที่ 4.5 ภาพขยายอินฟราเรดสเปกตรัมของผงฝ้ายในช่วงความยาวคลื่น 1500 – 1900 cm^{-1}
(1) ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง (2) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และ
(3) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก

พีกที่ปรากฏนี้เป็นลักษณะที่พบได้ในเซลลูโลสหรือเส้นใยธรรมชาติทั่วไป ดังโครงสร้างในรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสแบบ Haworth (Shore, 1995) โดยสามารถแบ่งส่วนหลักๆ ในโครงสร้างดังกล่าวได้เป็น 3 ส่วน คือ (1) ส่วนปลายสายโซ่โมเลกุล (end group) ที่เป็น non-reducing (2) ส่วนกลาง (intermediate units) และ (3) ส่วนปลายสายโซ่โมเลกุลที่เป็น reducing ซึ่งในส่วนที่ (3) นี้เป็นลักษณะของวงแหวนเฮมิอะซิทัล (hemiacetal cyclic) ซึ่งสามารถเปลี่ยนโครงสร้างของปลายสายโซ่โมเลกุลดังกล่าวไปเป็นโครงสร้างของแอลกอฮอร์และอัลดีไฮด์ได้ ดังรูปที่ 4.7 และสามารถเปลี่ยนโครงสร้างของแอลกอฮอร์และอัลดีไฮด์กลับมาเป็นวงแหวนตามเดิมได้ จากที่กล่าวมานี้เป็นสาเหตุให้ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงปรากฏพีกช่วงความยาวคลื่น 1620 – 1640 cm^{-1} (รูปที่ 4.4 (1) และรูปที่ 4.5 (1)) ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (carbonyl, C=O) ของอัลดีไฮด์ในเซลลูโลสที่ตำแหน่งปลายสายโซ่โมเลกุลในส่วน reducing นั่นเอง



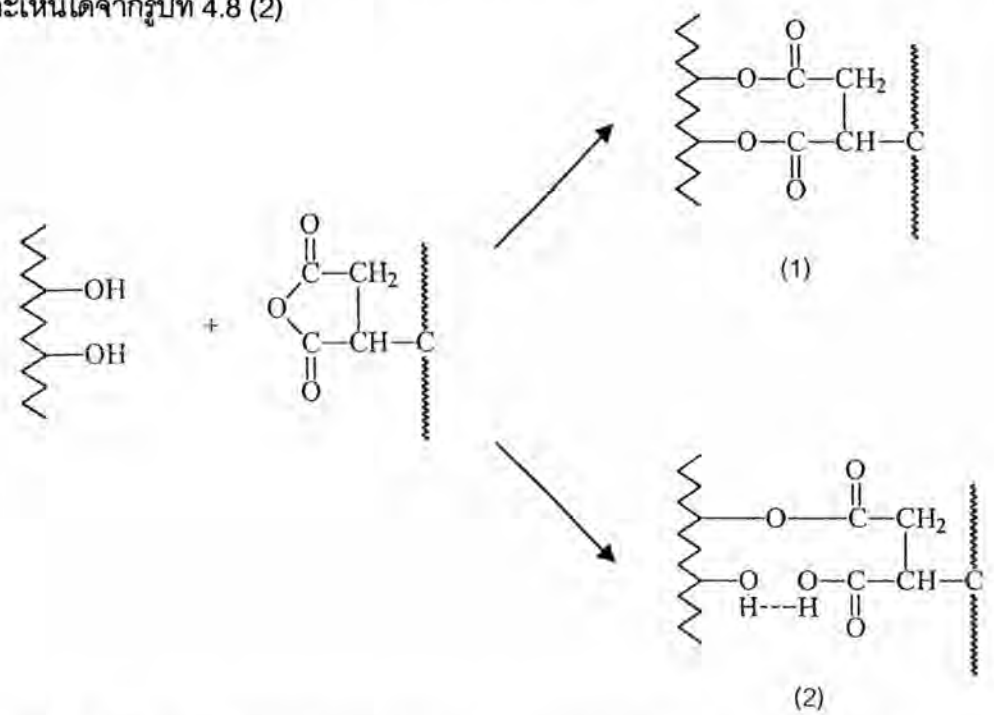
รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวงแหวนเฮมิอะซิทัลในเซลลูโลส

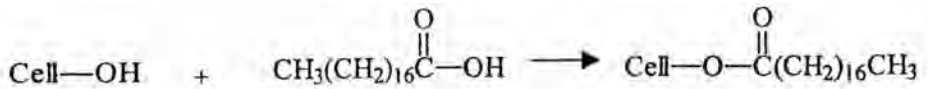
รูปที่ 4.4 (2) แสดงพีกของอินฟราเรดสเปกตรัมของผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสาร MAHPP พบว่าการปรับปรุงด้วย MAHPP ทำให้พีกที่ช่วงความยาวคลื่น 3200 – 3300 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl, O-H) (Young และ Lovell, 1991) ของเซลลูโลสในผงฝ้าย ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเกิดการหายไปของหมู่ไฮดรอกซิล

เนื่องจากเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของผงฝ้ายและวงแหวนแอนไฮไดร์ (anhydride) ของMAHPP ดังรูปที่ 4.8 (1) นอกจากนี้รูปที่ 4.8 (1) ยังแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงผงฝ้ายด้วย MAHPP นั้น สามารถไปลดสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic) ของผงฝ้ายลงได้ เพราะหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่ที่ว่องไวต่อน้ำและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดีนั้นลดลง ซึ่งโดยปกติแล้วเส้นใยธรรมชาติจะสามารถดูดซึมน้ำได้ดีเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้างเป็นจำนวนมากนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการแยกของปลายพีกที่ช่วงความยาวคลื่น 2850 – 2950 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสายโซ่โมเลกุลยาวของไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbon) และพีกดังกล่าวมีลักษณะสูงขึ้นด้วย อาจกล่าวได้ว่าเกิดจากการมีอยู่ของสายโซ่โมเลกุลพอลิโพรพิลีนซึ่งมาจาก MAHPP บนผิวหน้าของผงฝ้าย ทำให้เกิดการเสริมของพีกให้สูงขึ้นและเกิดการแยกตรงส่วนปลายของพีกนั่นเอง นอกจากพีกดังกล่าวแล้ว ที่สำคัญพบว่ามีพีกใหม่ขนาดเล็ก เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 1703 – 1751 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl, C=O) ในสารประกอบเอสเทอร์ ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดในรูปที่ 4.5 (2) พีกที่ปรากฏนี้เป็นการยืนยันของการทำปฏิกิริยากันระหว่างผงฝ้ายและสาร MAHPP เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ตรงตำแหน่งของหมู่คาร์บอนิลที่เกิดขึ้นใหม่นั่นเอง และจากการสังเกตจะเห็นว่ามีพีกเล็กๆ ข้างเคียงซึ่งแยกออกมา คาดว่าแสดงถึงหมู่คาร์บอนิลปลายวงแหวนแอนไฮไดรด์ที่แตกออกมาแต่ไม่เกิดปฏิกิริยาเพียงแต่เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของผงฝ้ายเท่านั้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.8 (2)



รูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาระหว่างฝ้ายและมาเลอิกแอนไฮไดร์ดกราฟพอลิโพรพิลีน (MAHPP)

สำหรับในกรณีของผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก (รูปที่ 4.4 (3)) พบว่าพีกของหมู่ไฮดรอกซิลไม่ได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเหมือนในการปรับปรุงด้วย MAHPP ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากการหลงเหลือของกรดสเตียริกที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ด้วย แต่พบว่าพีกที่ช่วงความยาวคลื่น 2850 – 2950 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสายโซ่โมเลกุลยาวของไฮโดรคาร์บอน มีลักษณะสูงขึ้น และเกิดการแยกของปลายพีกเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังเกิดพีกใหม่ที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะของหมู่คาร์บอนิลในสารประกอบเอสเทอร์ (รูปที่ 4.5 (3)) และเป็นการยืนยันของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฝ้ายและกรดสเตียริก ดังรูปที่ 4.9

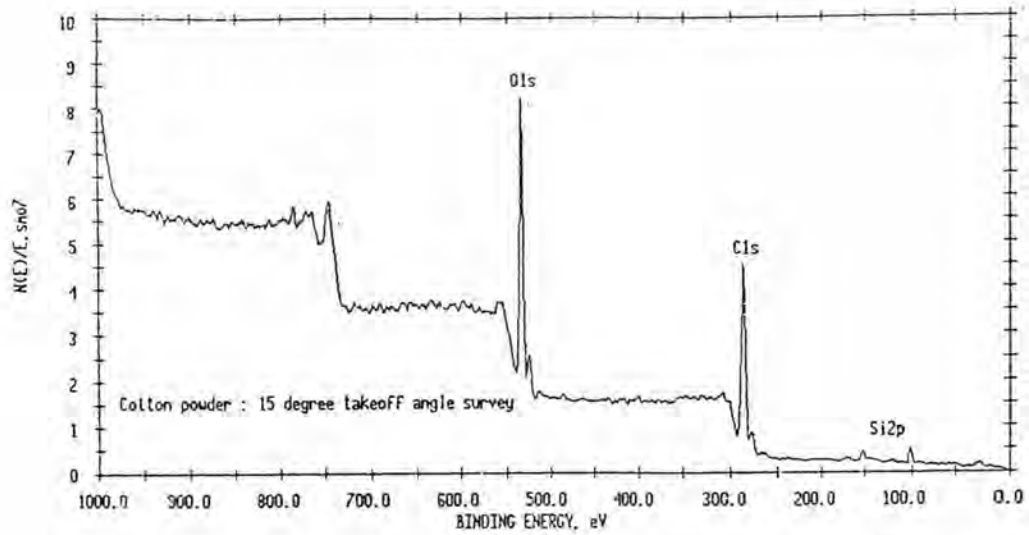


รูปที่ 4.9 ปฏิกิริยาระหว่างฝ้ายและกรดสเตียริก

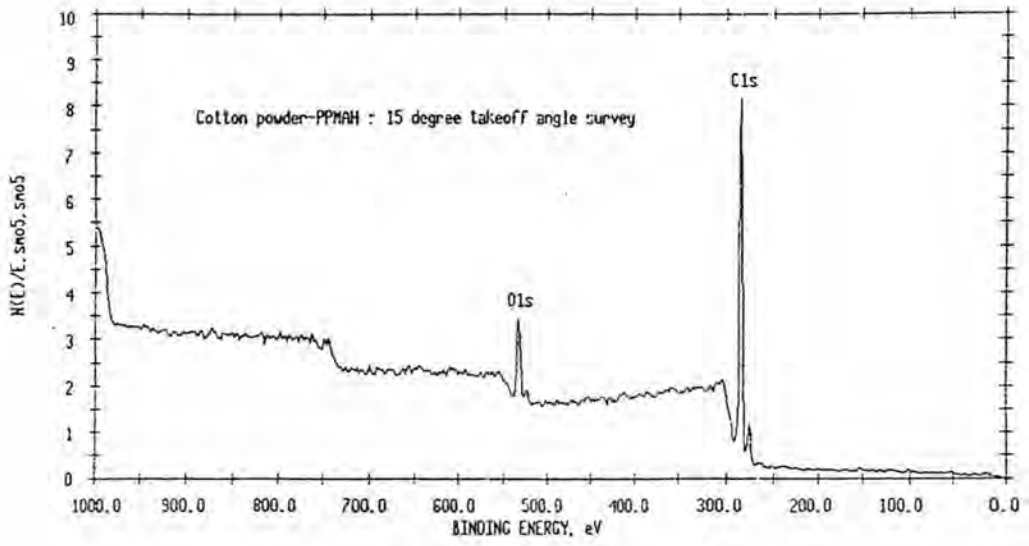
4.1.2.2 Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA)

ESCA หรือ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ตรวจสอบสมบัติของผิวหน้าวัสดุ เนื่องจากผลการวิเคราะห์สามารถบอกการเปลี่ยนแปลงภาวะทางเคมี (chemical state) ของธาตุแต่ละชนิดที่อยู่บนพื้นผิวได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้เทคนิค ESCA ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีบนพื้นผิวผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก เปรียบเทียบกับผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ซึ่งทำการวิเคราะห์พื้นผิวผงฝ้ายโดยมีแหล่งกำเนิดพลังงานเป็น X-ray MgK_{α} และใช้มุมในการตรวจสอบ 15 องศา

ผลจากวิเคราะห์ผงฝ้ายทั้ง 3 ชนิด พบว่าปรากฏพีกของคาร์บอนที่พลังงานการยึดเหนี่ยว (binding energy) ประมาณ 285 eV และ พีกของออกซิเจนที่พลังงานการยึดเหนี่ยวประมาณ 533 eV (รูปที่ 4.10) และพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงมีความสูงของพีกของคาร์บอนและออกซิเจนแตกต่างกัน จากรูปที่ 4.10 (2) จะเห็นว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP มีพีกของคาร์บอนสูงกว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงมาก และในทางเดียวกันพีกของออกซิเจนก็ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับพีกของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง เมื่อพิจารณารูปที่ 4.10 (3) ซึ่งแสดงพีกของคาร์บอนและออกซิเจนของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก จะเห็นว่าพีกของคาร์บอน

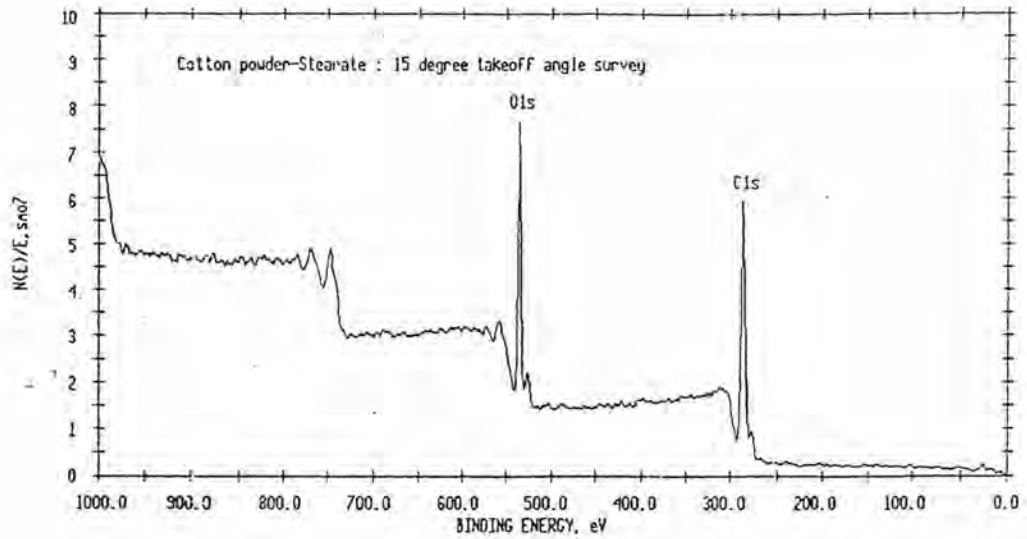


(1)



(2)

รูปที่ 4.10 กราฟ ESCA ของผงฝ้าย (1) ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง (2) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และ (3) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก



(3)

รูปที่ 4.10 (ต่อ)

สูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพีกของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง และในทางเดียวกันพีกของออกซิเจนก็ต่ำลงเพียงเล็กน้อยจากพีกของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง

เพื่อความชัดเจนในการวิเคราะห์จึงทำการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟหรือใต้พีกของอะตอมแต่ละชนิด ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟที่คำนวณได้นี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของอะตอมนั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมอื่นๆ ในโมเลกุลโดยคิดให้ปริมาณของทุกอะตอมรวมกันเป็น 100% ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงปริมาณของอะตอมคาร์บอนและออกซิเจนของผงฝ้ายทั้ง 3 ชนิด พบว่า ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP มี ปริมาณของคาร์บอนสูงขึ้นถึง 21.79% หรืออาจกล่าวได้ว่ามีปริมาณของออกซิเจนต่ำลง 21.79 % เช่นเดียวกัน และเมื่อทำการฟิต (fit) พีกของคาร์บอน ดังรูปที่ 4.11 ทำให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นถึงการเปลี่ยนแปลงภาวะทางเคมีของคาร์บอนระหว่างผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ซึ่งค่าพลังงานการยึดเหนี่ยวและความเข้มของภาวะทางเคมีของคาร์บอนได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และ 4.3 โดยพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP ปรากฏพีกที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่พลังงานการยึดเหนี่ยว 284.24 eV และมีความเข้ม (intensity) ถึง 9543 counts/sec. (รูปที่ 4.11 (1)) เมื่อเปรียบเทียบกับพีกของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงที่พลังงาน

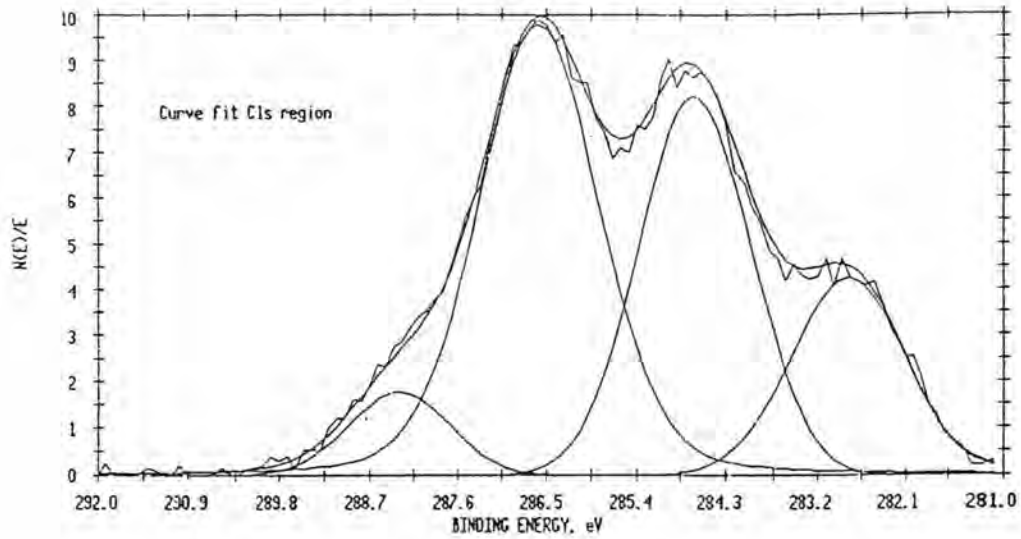
การยึดเหนี่ยว 284.69 eV โดยมีความเข้มเพียง 3266 counts/sec (รูปที่ 4.11 (2)) กล่าวคือพีกที่ตำแหน่งดังกล่าวของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง คือพีกที่แสดงถึง

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอะตอมคาร์บอนและออกซิเจนในผงฝ้าย

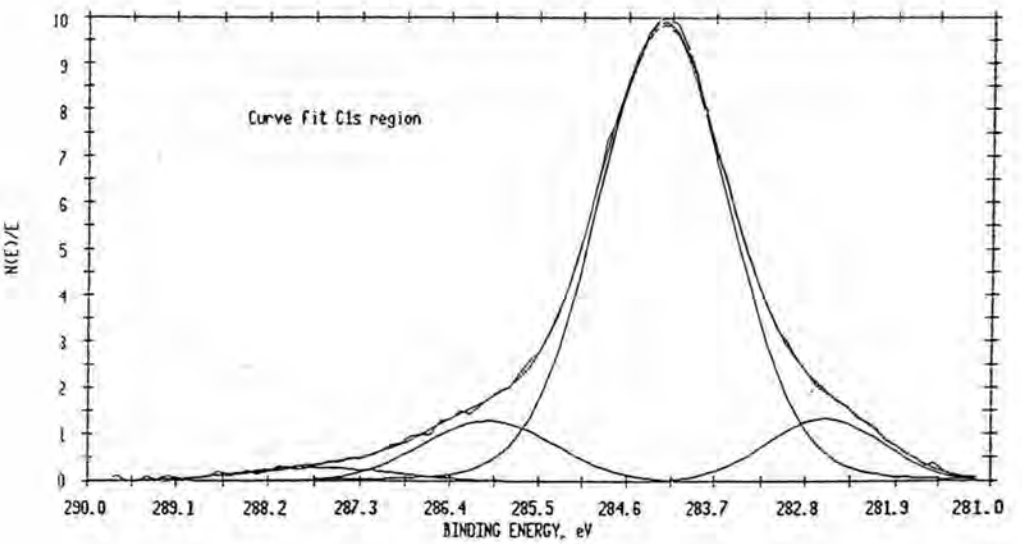
ชนิดของสารตัวเติม	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอะตอม	
	C1s	O1s
ผงฝ้าย	68.24	31.76
ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP	90.03	9.97
ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก	73.31	26.69

ภาวะเคมีของคาร์บอนที่อยู่ในรูป $-CH_2-$ (Boyd และคณะ, 1997) ซึ่งปกติแล้วจะปรากฏที่ตำแหน่ง 285 eV ซึ่งค่าพลังงานการยึดเหนี่ยวที่เลื่อนไปเล็กน้อยของผงฝ้ายนี้อาจเนื่องมาจากภาวะทางเคมีของธาตุข้างเคียงที่แตกต่างกันนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบพีกสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาอีกคือที่พลังงานการยึดเหนี่ยว 286.01 eV ของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP (รูปที่ 4.11(2)) ซึ่งพบว่ามีความเข้ม ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงซึ่งมีพีกดังกล่าวที่พลังงานการยึดเหนี่ยว 286.60 eV (รูปที่ 4.11(1)) โดยมีความเข้มลดลงจาก 3892 counts/sec. เป็น 1265 counts/sec. ตามลำดับ ซึ่งที่พลังงานการยึดเหนี่ยว 286.60 eV นี้แสดงถึง ภาวะทางเคมีของคาร์บอนที่อยู่ในรูป C ที่ต่อกับ –OH (Boyd และคณะ, 1997)

การเปลี่ยนแปลงภาวะทางเคมีเหล่านี้เป็นการยืนยันว่า MAHPP สามารถทำปฏิกิริยาและเกิดพันธะกับพื้นผิวของผงฝ้ายได้จริง โดยผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP มีความเข้มข้นของคาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งคาร์บอนดังกล่าวอยู่ในรูปของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน แสดงว่าเกิดจากสายโซ่โมเลกุลยาวของพอลิโพรพิลีนใน MAHPP ที่เกาะอยู่บนผิวหน้าของผงฝ้าย และนอกจากนี้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ลดลงอย่างมาก เป็นการแสดงถึงการหายไปของหมู่ไฮดรอกซิล เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเซลลูโลสของผงฝ้าย กับสาร MAHPP จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีผลให้ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP มีสมบัติความชอบน้ำลดลง

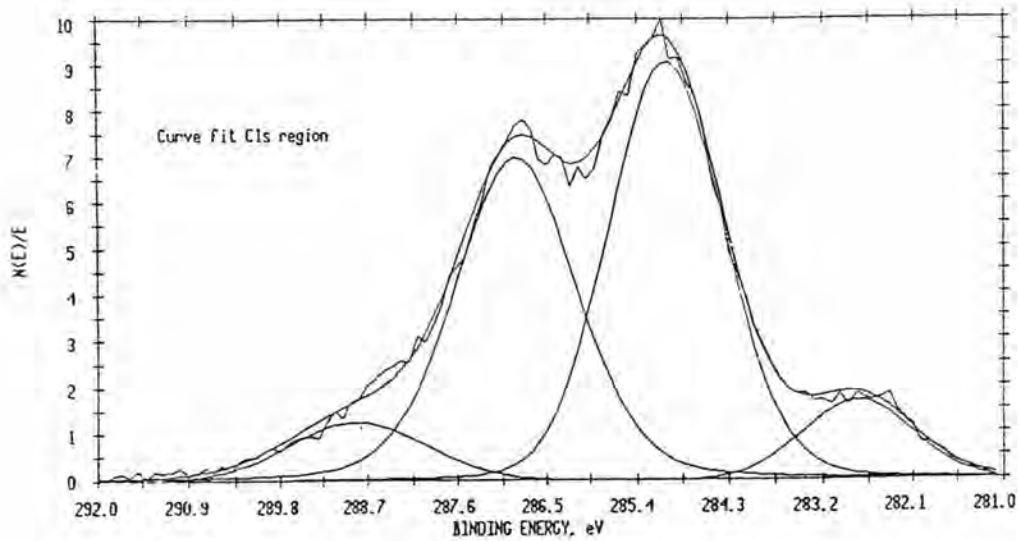


(1)



(2)

รูปที่ 4.11 กราฟ ESCA ของธาตุคาร์บอนในผงฝ้าย (1) ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง (2) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และ (3) ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก



(3)

รูปที่ 4.11 (ต่อ)

ตารางที่ 4.2 ค่าพลังงานการยึดเหนี่ยวและความเข้มที่ภาวะทางเคมีของคาร์บอนใน รูป $-CH_2-$ ของผงฝ้าย

ชนิดของสารตัวเติม	พลังงานการยึดเหนี่ยว (eV)	ความเข้ม (counts/sec.)
ผงฝ้าย	284.69	3266
ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP	284.24	9543
ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก	285.04	4773

ตารางที่ 4.3 ค่าพลังงานการยึดเหนี่ยวและความเข้มที่ภาวะทางเคมีของคาร์บอนในรูปที่ต่อกับ -OH ของผงฝ้าย

ชนิดของสารตัวเติม	พลังงานการยึดเหนี่ยว (eV)	ความเข้ม (counts/sec.)
ผงฝ้าย	286.60	3892
ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP	286.01	1265
ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก	286.88	3678

สำหรับผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก จากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงปริมาณของอะตอมคาร์บอนและออกซิเจน พบว่ามีปริมาณของคาร์บอนสูงขึ้นเพียง 5.07% หรืออาจกล่าวได้ว่ามีปริมาณของออกซิเจนต่ำลง 5.07% เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อทำการฟิตพีกของคาร์บอน ดังรูปที่ 4.11(3) จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงภาวะทางเคมีของคาร์บอนขึ้นจริง โดยพบว่าที่พลังงานการยึดเหนี่ยว 285.04 eV ของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกนั้น มีความเข้มของพีกที่สูงขึ้น (รูปที่ 4.11(3)) เมื่อเปรียบเทียบกับผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงซึ่งมีพีคปรากฏที่พลังงานการยึดเหนี่ยว 284.69 eV (รูปที่ 4.11(1)) โดยมีความเข้มของพีกเป็น 4773 และ 3266 counts/sec. ตามลำดับ ซึ่งพีกที่ตำแหน่งดังกล่าวแสดงถึงภาวะเคมีของคาร์บอนที่อยู่ในรูป $-CH_2-$ ดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น นอกจากนี้ยังพบว่าพีกที่พลังงานการยึดเหนี่ยว 286.88 eV (รูปที่ 4.11(3)) มีความเข้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพีกของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ซึ่งมีพีกดังกล่าวที่พลังงานการยึดเหนี่ยว 286.60 eV (รูปที่ 4.11(1)) โดยมีความเข้มเป็น 3678 และ 3892 counts/sec. ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งพลังงานการยึดเหนี่ยว 286.60 eV นี้ แสดงถึงภาวะทางเคมีของคาร์บอนที่อยู่ในรูป C ที่ต่อกับ –OH

จากที่กล่าวข้างต้นแสดงว่ากรดสเตียริกสามารถปรับปรุงพื้นผิวของผงฝ้ายได้ โดยสังเกตจากความเข้มข้นของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคาร์บอนดังกล่าวอยู่ในรูปของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน แสดงว่าเกิดจากสายโซ่โมเลกุลอะลิฟาติกที่ประกอบด้วยคาร์บอน 17 อะตอมของกรดสเตียริกซึ่งมาจากกรดสเตียริกจำนวนมากที่เกาะอยู่บนผิวหน้าของผงฝ้าย นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของออกซิเจนลดลง ซึ่งแสดงว่ามีการทำปฏิกิริยาของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเซลลูโลสของผงฝ้าย กับกรดสเตียริก จึงมีผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลหายไป ซึ่งจะทำให้ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกมีสมบัติความชอบน้ำลดลงได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP พบว่า

ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกมีการเพิ่มขึ้นของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนและการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลที่ต่ำกว่า ทำให้สรุปได้ว่ากรดสเตียริกสามารถปรับปรุงผงฝ้ายให้ลดสมบัติความชอบน้ำได้ แต่ไม่ดีเท่า MAHPP

4.1.3 ค่ามุมสัมผัสของผิววัสดุกับน้ำ

Contact Angle Measurement

การวัดค่ามุมสัมผัสเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถยืนยันสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic) หรือความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของวัสดุได้ ถ้าค่ามุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิววัสดุมีค่าสูง แสดงว่าน้ำสามารถซึมผ่านผิววัสดุได้ยาก โดยจะปรากฏให้เห็นว่าหยดน้ำมีลักษณะเป็นทรงกลมหรือเกือบเป็นทรงกลมอยู่บน พื้นผิววัสดุ ในทางตรงกันข้ามถ้าค่ามุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิววัสดุมีค่าต่ำ แสดงว่าน้ำสามารถซึมผ่านผิววัสดุได้ง่าย โดยจะปรากฏให้เห็นว่าหยดน้ำมีลักษณะแบนราบอยู่บนพื้นผิววัสดุ

หลังจากนำผงฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง ผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก ไปวัดค่ามุมสัมผัสกับน้ำบริสุทธิ์ (น้ำกลั่น) โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค sessile drop แล้ว ได้ผลของค่ามุมสัมผัสตามตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ค่ามุมสัมผัสของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยสารเคมี

ชนิดของตัวเติม	ค่ามุมสัมผัส (องศา)
ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง	10
ผงฝ้ายที่ปรับปรุง MAHPP	155* / 150**
ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก	60

---

* ค่ามุมสัมผัสสูงสุด , ** ค่ามุมสัมผัสต่ำสุด

จากตารางพบว่า ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงมีค่ามุมสัมผัสต่ำ และลักษณะหยดน้ำแบนราบไปกับพื้นผิวฝ้าย แสดงว่าน้ำสามารถซึมผ่านผิวหน้าของผงฝ้ายได้ง่าย บ่งบอกถึงสมบัติความชอบน้ำของผงฝ้าย ซึ่งเป็นสมบัติที่พบเห็นโดยทั่วไปในสารเซลลูโลสหรือเส้นใยธรรมชาติต่าง ๆ รวมถึงฝ้ายด้วย เนื่องจากเส้นใยดังกล่าวมีหมู่ไฮดรอซิลอยู่ในโครงสร้างทางเคมีและมีสวนอสัณฐานอยู่ในโครงสร้างทางกายภาพ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้มีความว่องไวต่อน้ำ และเป็นส่วนสำคัญในการดูดซึมน้ำหรือรับสีเวลาย้อม แม้ว่าผงฝ้ายดังกล่าวได้ผ่านการแปรสภาพทางเคมีโดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซึ่งจะไปทำลายส่วนอสัณฐานของฝ้ายลงก็ตาม แต่เนื่องจากผงฝ้ายที่ได้ยังคงมีโครงสร้างทางเคมีเช่นเดิม คือมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มากมายในสายโซ่โมเลกุล ดังจะเห็นได้จากพีกของอินฟราเรดสเปกตรัมในรูปที่ 4.4 (1) ข้อที่ 4.1.2 ทำให้ผงฝ้ายยังคงสมบัติความชอบน้ำและสามารถดูดซึมน้ำได้ดีอยู่

เมื่อพิจารณาผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วย MAHPP พบว่ามีค่ามุมสัมผัสสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามุมสัมผัสของผงฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง และมีลักษณะหยดน้ำเกือบเป็นทรงกลมกับพื้นผิวของผงฝ้าย แสดงว่า MAHPP สามารถปรับปรุงผงฝ้ายให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำได้เป็นผลดีเยี่ยม โดยน้ำที่หยดลงไปสามารถซึมผ่านพื้นผิวของผงฝ้ายได้ยาก นอกจากนี้เนื่องจากน้ำที่หยดลงไปยังคงลักษณะของทรงกลมทำให้สามารถหาค่ามุมสัมผัสสูงสุด (advancing angle) และค่ามุมสัมผัสต่ำสุด (receding angle)ได้ โดยค่ามุมสัมผัสทั้งสองหาได้จากการเพิ่มหรือลดปริมาตรของหยดน้ำบนพื้นผิวของผงฝ้าย ในขณะที่ผงฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงและผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกไม่สามารถหาได้โดยสามารถหาได้เพียงค่ามุมสัมผัสที่หยดน้ำอยู่นิ่งเท่านั้น (static angle) และพบว่าค่ามุมสัมผัสสูงสุดและค่ามุมสัมผัสต่ำสุดที่หาได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ยาก

ในส่วนของผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกพบว่ามีค่ามุมสัมผัสสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยจากผงฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง เมื่อเทียบกับค่ามุมสัมผัสที่ได้จากผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วย MAHPP แสดงว่าการปรับปรุงผงฝ้ายด้วยกรดสเตียริกทำให้ผงฝ้ายมีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นแต่ไม่สูงเท่ากับการปรับปรุงด้วย MAHPP ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอาจเกิดจากการคงมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิลในปริมาณที่สูงของผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลของผงฝ้ายที่ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกนั่นเอง ดังจะเห็นได้จากพีกของอินฟราเรดสเปกตรัมในรูปที่ 4.4 (3) ข้อที่ 4.1.2 ทำให้ผงฝ้ายดังกล่าวยังคงความสามารถในการดูดซึมน้ำได้

4.1.4 สมบัติทางความร้อน

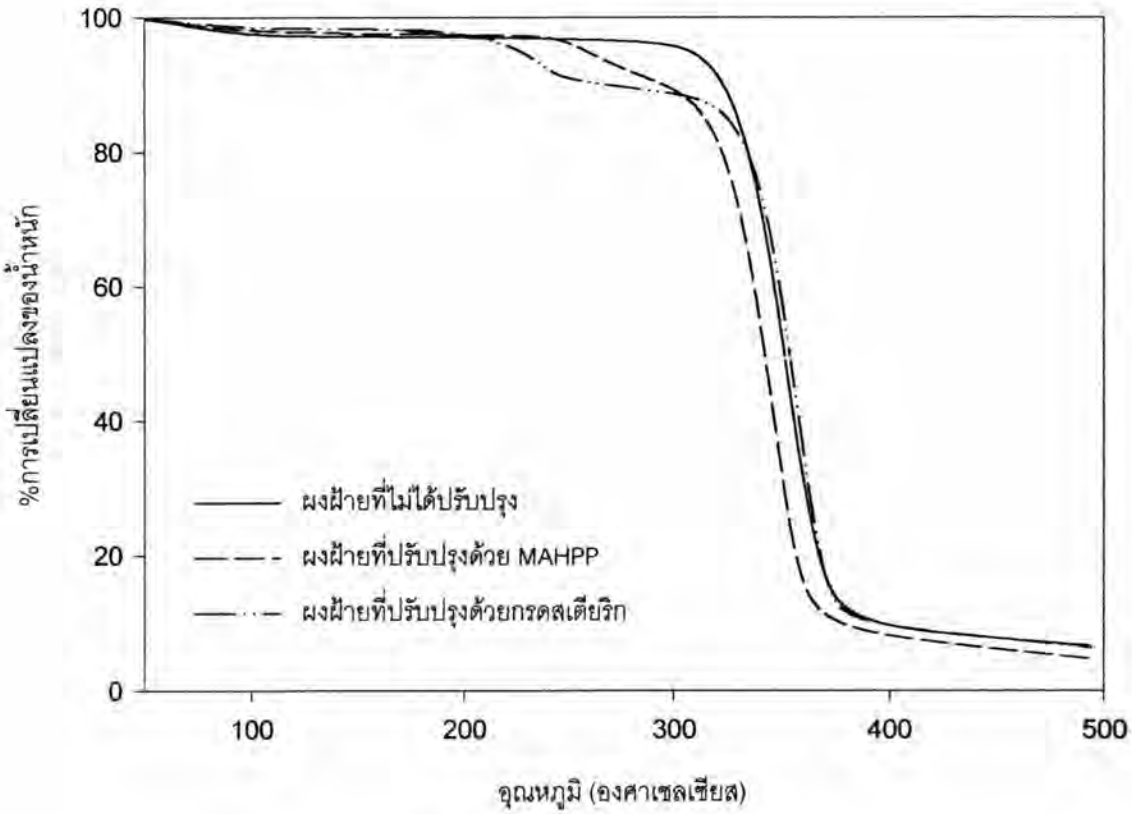
Thermogravimetric Analysis (TGA)

TGA เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนที่วัดการเปลี่ยนแปลงมวลหรือน้ำหนักของสารตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งนิยมใช้ในการหาอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature , T_d) ของสาร และส่วนประกอบของวัสดุผสมหรือวัสดุเชิงประกอบ โดยเทคนิคนี้จะรายงานผลในรูปของกราฟซึ่งพล็อตระหว่างเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (% weight change) และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนไป

ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค TGA มาใช้วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก เพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์ส่วนประกอบของผงฝ้ายภายหลังการปรับปรุง และหาอุณหภูมิการสลายตัว ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของสารตัวเติมสำหรับวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากสารตัวเติมควรมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ เพราะการสลายตัวของสารตัวเติมมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบลดลงได้

รูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ผงฝ้ายทั้ง 3 ชนิดด้วยเทคนิค TGA พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรก (onset degradation temperature) ของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงมีค่าสูงกว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และกรดสเตียริก และสังเกตเห็นว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงมีอุณหภูมิการสลายตัวสองช่วง ซึ่งสามาถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกนั้นจะเป็นการหายไปของสารทั้งสองชนิดที่ใช้ในการปรับปรุงซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าผงฝ้าย และสามารถเกิดการสูญเสียไประหว่างการทดสอบได้ จึงเป็นสาเหตุให้ผงฝ้ายที่ปรับปรุงมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรกต่ำกว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงเล็กน้อย ส่วนในช่วงที่สองจะเป็นการสลายตัวของผงฝ้ายที่อุณหภูมิประมาณ 314°C เช่นเดียวกับผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงนั่นเอง

อย่างไรก็ตามอุณหภูมิการสลายตัวของผงฝ้ายทั้ง 3 ชนิดถือว่าเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิโพรพิลีน ทั้งนี้เนื่องจากผงฝ้ายทั้ง 3 ชนิดมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรกสูงกว่าอุณภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนซึ่งใช้ที่อุณหภูมิ 195°C นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่ามีการหายไปของน้ำหนักของผงฝ้ายในช่วงแรกของกราฟ คือ ที่ประมาณ 5 - 6% ซึ่งคาดว่าเกิดจากความชื้นที่มีอยู่ในผงฝ้าย และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการสลายตัวจุดสุดท้าย (final temperature) ยังพบว่าผงฝ้ายยังคงมีมวลหลงเหลือภายหลังอุณหภูมิการสลายตัวจุดสุดท้าย ซึ่งอธิบายได้ว่าเกิดจากมวลของธาตุคาร์บอนที่หลงเหลืออยู่หรือขี้เถ้าของฝ้ายนั่นเอง โดยมีมวลหลงเหลืออยู่ที่ประมาณ 6 - 7 % ที่อุณหภูมิประมาณ 390°C



รูปที่ 4.12 อุณหภูมิการสลายตัวของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง และปรับปรุงด้วย MAHPP และกรดสเตียริก

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรกของผงฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมี

ชนิดของสารตัวเติม	Td (^{o}C) Onset
ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง	314.671
ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP	259.318
ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก	232.886

4.2 สมบัติของวัสดุเชิงประกอบจากผงฝ้าย

วัสดุเชิงประกอบที่ทำการวิเคราะห์สมบัติในข้อที่นี้ มีดังนี้

(1) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย คือ วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนซึ่งมีผงฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเป็นสารตัวเติม

(2) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP คือ วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนซึ่งมีผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วย MAHPP เป็นสารตัวเติม

(3) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก คือ วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนซึ่งมีผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกเป็นสารตัวเติม

4.2.1 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของวัสดุเป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากต่อการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุให้ตรงกับงานและมีประสิทธิภาพ การทดสอบสมบัติเชิงกลเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ โดยแสดงในรูปของความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ซึ่งความเค้น

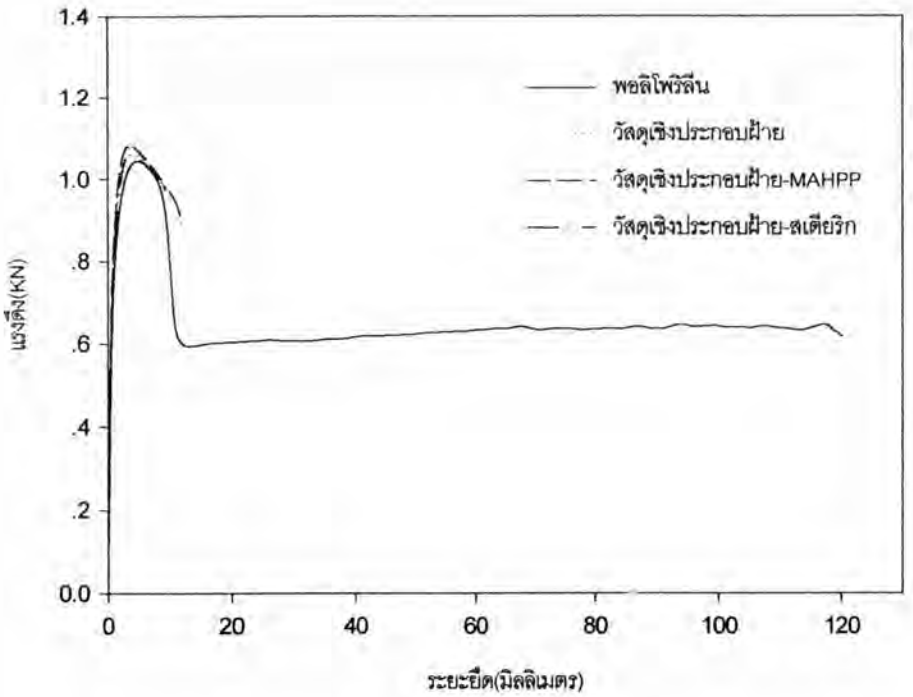
เป็นแรงต้านทานภายในของวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ หรืออาจกล่าวได้ว่า ความเค้นเท่ากับอัตราส่วนของแรงที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (F/A) ส่วนความเครียด (strain) เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทางของแรงที่มากระทำ หรืออาจกล่าวได้ว่า ความเครียดเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการยืดหรือหด ต่อความยาวเดิมของวัสดุก่อนถูกแรงกระทำ ($\Delta L / L_0$) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลโดยเปรียบเทียบความทนทานของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก เมื่อได้รับแรงกระทำที่ต่าง ๆ กัน ได้แก่ แรงดึง (tensile) แรงดัดโค้ง (flexural) และแรงกระแทก (impact)

4.2.1.1 **ความทนแรงดึง** (Tensile Strength)

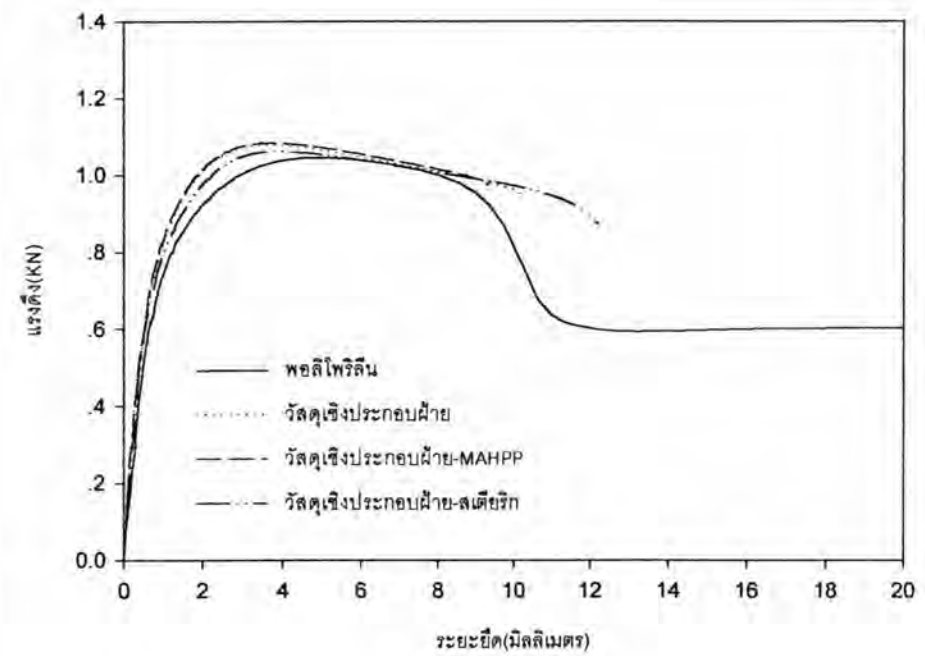
ผลของสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ได้มาจากการนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ISO 527 มาทดสอบความทนแรงดึง ที่ภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50 % อุณหภูมิ 23°C และใช้ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตร/นาที หลังการทดสอบพบว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีพฤติกรรมในการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างต่อแรงดึงที่มากระทำ ดังรูปที่ 4.13 (1) – (3) ซึ่งรูปที่ 4.13 (2) และ (3) ได้แสดงถึงลักษณะพฤติกรรมความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีปริมาณผงฝ้ายที่เติมลงไปมากขึ้น โดยเลือกปริมาณผงฝ้ายที่เติมลงไปต่ำสุดและสูงสุดในงานวิจัยนี้มาเปรียบเทียบ

<u>ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด</u> (Stress – Strain Relationships)

จากพฤติกรรมความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนก่อนการเติมผงฝ้าย ในรูปที่ 4.13 (1) พบว่าว่าเส้นกราฟในช่วงแรกเป็นเส้นตรงและมีความชันสูง แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอิลาสติก (elastic deformation) หรือการเกิดความเครียดอิลาสติก (elastic strain) ซึ่งความเครียดในช่วงนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้น และจากการสังเกตพฤติกรรมของชิ้นงานขณะถูกยืดดึงควบคู่กันไป พบว่าชิ้นงานในระยะเส้นอ้างอิง (gauge length) ที่ถูกยืดดึงยังคงมีพื้นที่หน้าตัดเท่าเดิมอยู่ หลังจากนั้นจะเห็นว่ากราฟเริ่มมีลักษณะโค้งและถึงจุดสูงสุดที่แรงดึงประมาณ 1.04 KN พร้อมทั้งเกิดจุดคราก (yield point) ขึ้น ซึ่งเป็นจุดที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (plastic deformation) หรือความเครียดพลาสติก (plastic strain) เริ่มเกิดขึ้น แสดงว่าเริ่มมี

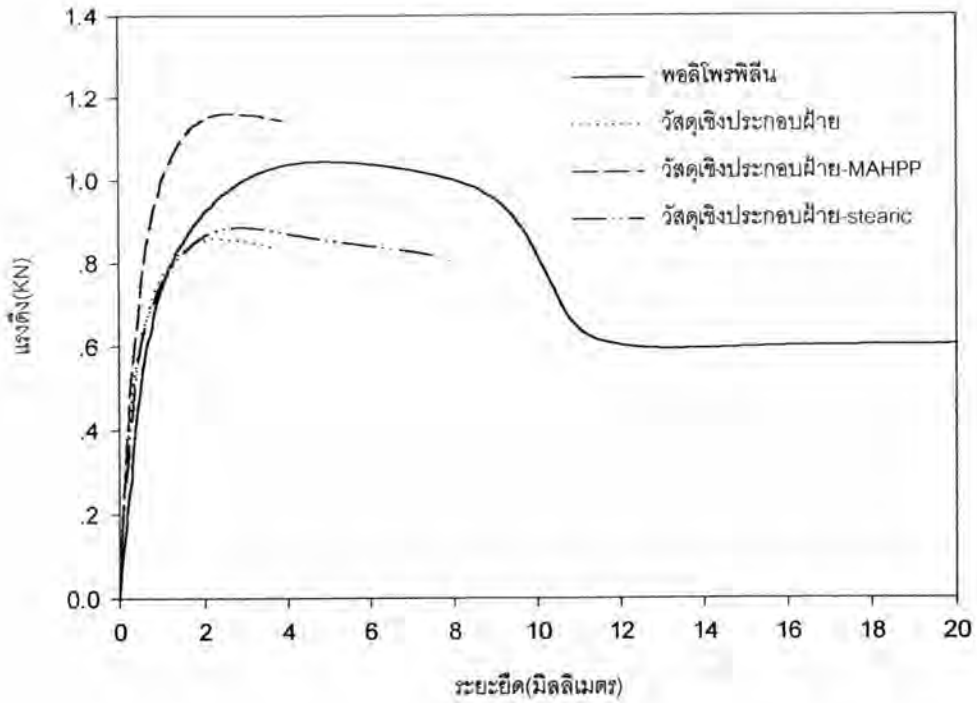


(1)



(2)

รูปที่ 4.13 กราฟความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบจากผงฝ้าย ที่ปริมาณผงฝ้าย (1) และ(2) 5% และ (3) 20% โดยน้ำหนัก



(3)

รูปที่ 4.13 (ต่อ)

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานไปอย่างถาวร หลังจากจุดครากพบว่ากราฟเริ่มโค้งและลดลงอย่างรวดเร็วถึงจุดแรงดึงจุดหนึ่งและค่อนข้างคงที่ไปตลอดจนถึงจุดขาดซึ่งมีระยะยืดทั้งหมดประมาณ 120 มิลลิเมตร พฤติกรรมของกราฟที่ลดลงอย่างรวดเร็วนี้สามารถอธิบายได้ว่า หลังจากจุดครากพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานในระยะเส้นอ้างอิงได้ลดลงอย่างรวดเร็วและเกิดคอคอด (necking) มีผลให้แรงดึงหรือความเค้นลดลง และเมื่อถึงจุดหนึ่งความเค้นจะเป็นค่าคงที่ทำให้เห็นกราฟเป็นเส้นตรงเนื่องจากเกิดจากการยืดตัวต่อไปของคอคอดนั่นเอง ซึ่งกระบวนการการยืดตัวต่อไปของคอคอดนั้นรู้จักกันดีในชื่อของการดึงแบบเย็น (cold drawing) โดยในกรณีนี้เกิดขึ้นจากพฤติกรรมของพอลิโพรพิลีนเอง จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าพอลิโพรลีนก่อนการเติมผงฝ้ายมีความอ่อนเหนียว (ductility) สูงเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกในช่วงระยะการยืดยาว และมีความเหนียว (toughness) สูง ซึ่งสังเกตได้จากมีพื้นที่ใต้กราฟที่มากนั่นเอง

เมื่อพิจารณากราฟความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบฝ้ายที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.13 (2) สังเกตเห็นว่ากราฟในช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติก

มีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีความชันสูงมากกว่ากราฟของพอลิโพรพิลีนแสดงว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้ายมีความแข็งตึง (stiffness) เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนก่อนการเติมผงฝ้าย และจากการพิจารณาดูลักษณะกราฟต่อไปพบว่ากราฟมีลักษณะโค้งพร้อมทั้งเกิดจุดครากที่แรงดึงสูงสุดประมาณ 1.07 kN ซึ่งมีค่าสูงกว่ากราฟของพอลิโพรพิลีนเล็กน้อย อาจกล่าวได้ว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้ายที่มีปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรง (strength) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน หลังจากจุดครากกราฟมีลักษณะยืดออกและโค้งลงอย่างช้าๆ จนถึงจุดขาดที่ระยะยืดประมาณ 10.20 มิลลิเมตร แสดงถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกของวัสดุเชิงประกอบ แต่พบว่ากราฟไม่มีลักษณะโค้งลงอย่างรวดเร็วและเกิดเป็นเส้นตรงคงที่เหมือนในกราฟของพอลิโพรพิลีน พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้จากการสังเกตลักษณะการยืดของชิ้นงานพบว่าชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบฝ้ายไม่เกิดลักษณะคอคอดและการยืดออกของคอคอดก่อนการแตกหักเหมือนในชิ้นงานของพอลิโพรพิลีน เนื่องจากผงฝ้ายไปลดพฤติกรรมความอ่อนเหนียวของพอลิโพรพิลีนให้ต่ำลงและไปเพิ่มพฤติกรรมความแข็งตึงให้สูงขึ้นดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และเมื่อสังเกตลักษณะของชิ้นงานพบว่ามีลักษณะของรอยรานสีขาว (crazing) เกิดขึ้นเล็กน้อยในระหว่างการยืดดึงก่อนการแตกหัก ซึ่งเกิดในลักษณะทิศทางตั้งฉากกับแรงดึง ซึ่งรอยรานสีขาวนี้เกิดจากอนุภาคผงฝ้ายไปขัดขวางแนวการแตกหัก (cracking) ที่เกิดขึ้นของพอลิโพรพิลีน หรืออาจกล่าวได้ว่าผงฝ้ายเป็นตัวดูดซับแรงดึงที่มากระทำไว้ก่อนที่แรงดึงนั้นจะกระทำต่อเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนทำให้เกิดกลไกการหน่วงไม่ให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้จากการเกิดความเครียดแบบพลาสติกที่สามารถยืดไปได้ในระยะหนึ่งหลังจากจุดคราก (รูปที่ 4.13 (2))

และเมื่อเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.13 (3) พบว่ากราฟของวัสดุเชิงประกอบฝ้ายที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก มีจุดครากที่ต่ำลงและมีการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกที่สั้นกว่ากราฟของวัสดุเชิงประกอบฝ้ายที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก คาดว่าการเติมผงฝ้ายในปริมาณที่มากไปของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย ทำให้ผงฝ้ายกลายเป็นตัวขัดขวางการเชื่อมติดกันของเมทริกซ์พอลิโพร-พิลีนและอาจเกิดการรวมตัวกันเองของผงฝ้ายซึ่งมีผลให้เกิดตำหนิ (flaws) ในชิ้นงานและทำให้ความทนแรงดึงลดลงได้ จากที่กล่าวมาแล้วสามารถสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้ายมีความอ่อนเหนียวและความเหนียวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนซึ่งสามารถสังเกตได้จากความเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกที่สั้นลงและพื้นที่ใต้กราฟที่น้อยลงตามลำดับ แต่พบว่ามีความแข็งตึงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากมีความชันในช่วงแรกของกราฟซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติกสูงขึ้นและมีจุดครากที่ตำแหน่งสูงกว่ากราฟของพอลิโพรพิลีนเล็กน้อย และเมื่อเปรียบ

เทียบปริมาณการเติมผงฝ้ายพบว่าการเติมผงฝ้ายที่ปริมาณมากขึ้นแม้ว่าจะทำให้ความแข็งตึงเพิ่มขึ้น แต่จะมีผลให้ทั้งความอ่อนเหนียว ความเหนียว และความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบลดลงได้

สำหรับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP พบว่ากราฟของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.13 (2)) มีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟของวัสดุเชิงประกอบฝ้ายมากจนทับเป็นเส้นเดียวกันซึ่งหมายถึงการมีความชันของกราฟสูงขึ้นในช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติกและมีจุดครากที่ตำแหน่งสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของพอโพรพิลีน ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP มีความแข็งตึงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากพอลิโพรพิลีนเช่นเดียวกับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.13 (3)) พบว่าพฤติกรรมของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP แสดงในทางตรงกันข้ามกับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย นั่นคือเมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลจะเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบฝ้ายเมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลจะลดลง ซึ่งสังเกตเห็นว่าความชันของกราฟในช่วงแรกซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติกสูงขึ้นพร้อมกับตำแหน่งจุดครากที่สูงขึ้นด้วย โดยอยู่ตำแหน่งแรงดึงประมาณ 1.16 kN ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบฝ้ายที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก มีแรงดึงที่จุดครากลดลงจาก 1.07 kN ที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก มาเป็น 0.86 KN แสดงว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP มีทั้งความแข็งตึงและความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงฝ้าย-MAHPPที่เติมลงไป ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดผลของปริมาณผงฝ้ายที่เปอร์เซ็นต์อื่นๆ ในข้อที่ต่อไป

แต่อย่างไรก็ตามพบว่ากราฟของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกที่สั้นลงและทำให้มีพื้นที่ใต้กราฟที่น้อยลงด้วย ซึ่งแสดงว่าวัสดุเชิงประกอบมีความอ่อนเหนียวและความเหนียวลดลงเมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก และเมื่อสังเกตลักษณะการยืดดึงของชิ้นงานพบว่าไม่มีคอคอดและการยืดของคอคอด นอกจากนี้ยังพบว่ามีการขาดของชิ้นงานที่เร็วกว่าด้วยโดยสิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้กราฟมีพื้นที่ใต้กราฟต่ำลง กล่าวโดยสรุปจะเห็นว่าที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้ายจะมีพฤติกรรมกราฟความทนแรงดึงคล้ายกัน แต่เมื่อพิจารณากราฟที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก พบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP มีความแข็งตึงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นพฤติกรรมที่แตกต่างจากวัสดุเชิงประกอบฝ้าย อย่างไรก็ตามความอ่อนเหนียวและความเหนียวยังคงลดลงตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมเดียวกันที่พบในวัสดุเชิงประกอบฝ้ายด้วย คาดว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการปรับปรุงผงฝ้ายด้วยสาร MAHPP ทำให้ผงฝ้ายสามารถยึดติดและกระจาย

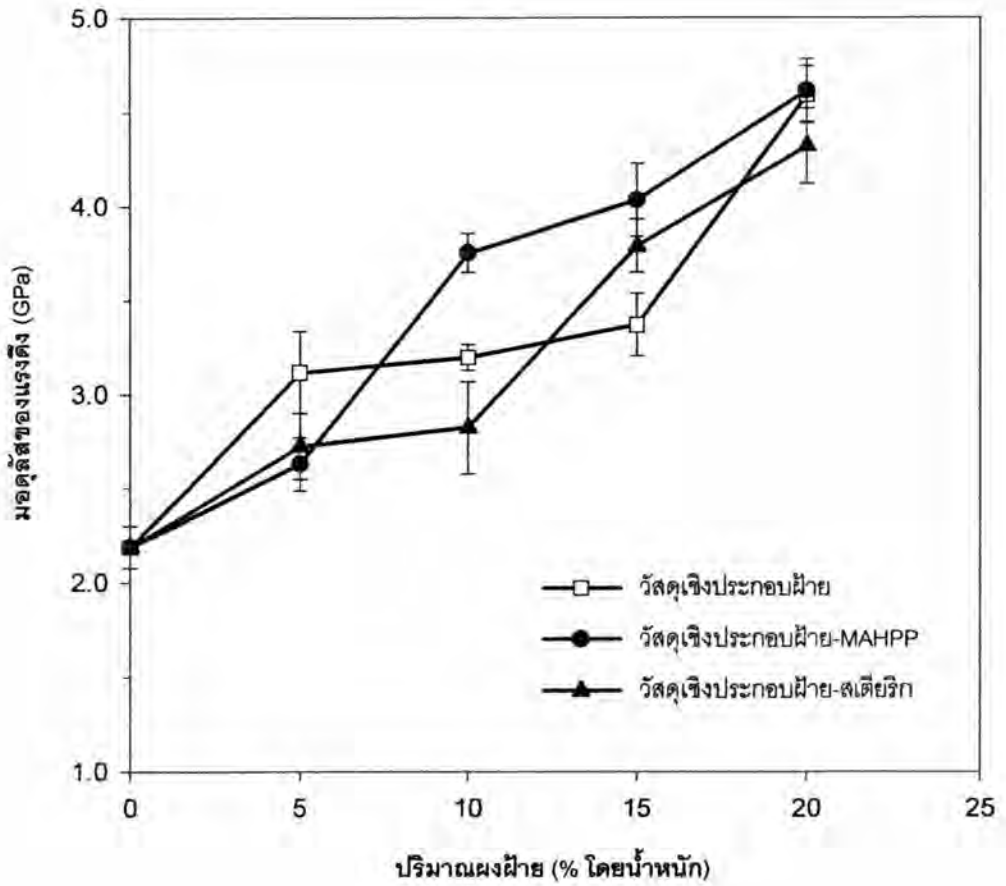
ตัวในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนได้ดี และส่งผลถึงสมบัติความทนแรงดึงอันได้แก่ ความแข็งตึง และความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นด้วย

สำหรับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกที่ปริมาณผงฝ้าย 5% (รูปที่ 4.13 (2)) พบว่ามีลักษณะพฤติกรรมของกราฟใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP เช่นกัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกที่ยาวกว่า โดยหลังจากจุดครากกราฟมีลักษณะยืดออกยาวกว่ากราฟของวัสดุเชิงประกอบชนิดอื่นซึ่งมีระยะยืดที่จุดขาดถึงประมาณ 12.20 มิลลิเมตร แสดงว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีความอ่อนเหนียวและความเหนียวมากกว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ส่วนสมบัติความแข็งตึงและความแข็งแรงมีค่าใกล้เคียงกับในวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP โดยพบว่ามีจุดครากอยู่ที่ตำแหน่งแรงดึงประมาณ 1.06 kN

แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกที่ปริมาณผงฝ้าย 20% (รูปที่ 4.13(3)) พบว่ามีแนวโน้มของความชันของกราฟในช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติกและจุดครากลดลงคล้ายกับในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย พร้อมกับการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกที่สั้นลงเล็กน้อย แสดงว่าการเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีความแข็งแรง ความอ่อนเหนียวและความเหนียวลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย พบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกยังคงมีจุดครากสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงที่สูงกว่า และมีการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกที่ยาวกว่าพร้อมทั้งมีพื้นที่ใต้กราฟที่มากกว่าแสดงว่ามีความอ่อนเหนียวและความเหนียวที่สูงกว่าด้วย และเมื่อสังเกตพฤติกรรมของชิ้นงานขณะยืดดึงยังคงพบว่ามีลักษณะร้อยร้าวสีขาวเกิดขึ้นและเห็นได้ชัดเจนเช่นเดียวกับในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย จากที่กล่าวมาพอจะสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีพฤติกรรมคล้ายกับวัสดุเชิงประกอบฝ้ายคือมีความแข็งแรง ความอ่อนเหนียวและความเหนียวลดลงเมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีพฤติกรรมที่แตกต่างจากวัสดุเชิงประกอบชนิดอื่น คือมีการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกที่มากกว่าซึ่งแสดงถึงการมีความอ่อนเหนียวและความเหนียวที่มากกว่านั่นเอง คาดว่าการปรับปรุงผงฝ้ายด้วยกรดสเตียริกจะสามารถช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างผงฝ้ายและเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนได้ไม่ดีเท่ากับการปรับปรุงด้วย MAHPP แต่การปรับปรุงผงฝ้ายด้วยกรดสเตียริกจะช่วยเพิ่มสมบัติความอ่อนเหนียวและความเหนียวให้กับวัสดุเชิงประกอบได้

ผลของปริมาณผงฝ้ายต่อความทนแรงดึง

ปริมาณผงฝ้ายที่เติมในพอลิโพรพิลีนเพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบในงานวิจัยนี้ได้แก่ 5 10 15 และ20 % โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมีผลต่อสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบเป็นอย่างมาก จากรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.6 แสดงค่ามอดุลัสของแรงดึง (tensile modulus) ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติกโดยในช่วงนี้ความเค้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จะเห็นว่าค่ามอดุลัสของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 ค่ามอดุลัสของแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

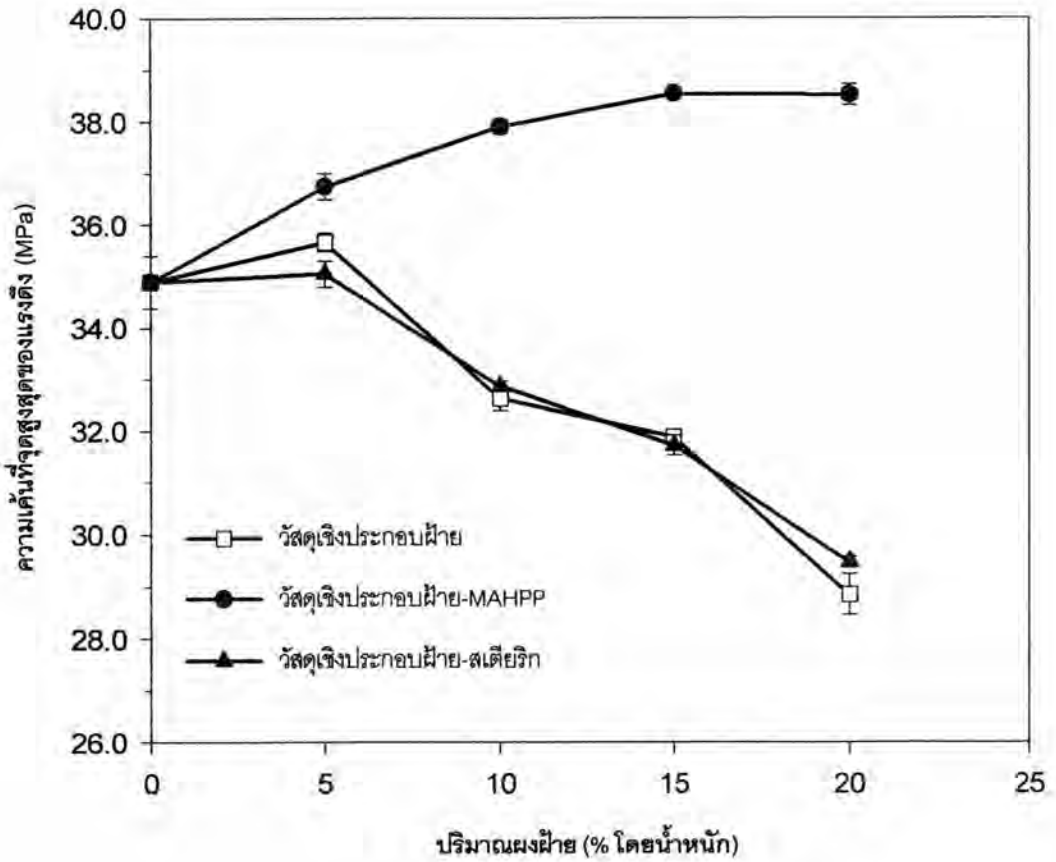
ตารางที่ 4.6 ค่ามอดุลัสของแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

ปริมาณผงฝ้าย (% โดยน้ำหนัก)	มอดุลัสของแรงดึง (GPa)		
	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก
0 (PP)	2.19 ± 0.11	2.19 ± 0.11	2.19 ± 0.11
5	3.12 ± 0.22	2.63 ± 0.14	2.72 ± 0.18
10	3.20 ± 0.07	3.75 ± 0.10	2.82 ± 0.25
15	3.37 ± 0.17	4.03 ± 0.19	3.79 ± 0.14
20	4.60 ± 0.15	4.62 ± 0.17	4.32 ± 0.20

ตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น พบว่าที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก วัสดุเชิงประกอบฝ้ายมีค่ามอดุลัสสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ตามลำดับ แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมากขึ้นกลับพบว่าในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP จะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่ามอดุลัสอย่างรวดเร็ว ซึ่งพบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPPที่ปริมาณผงฝ้ายทั้ง 10 15 และ 20 % โดยน้ำหนัก มีค่ามอดุลัสสูงกว่าที่ปริมาณผงฝ้ายเดียวกันของวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก จากที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงว่าการเพิ่มปริมาณผงฝ้ายจะมีผลให้ความแข็งตึงของวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้น โดยสังเกตจากค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP มีแนวโน้มความแข็งตึงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุเชิงประกอบชนิดอื่น เมื่อปริมาณผงฝ้ายมากขึ้น

จากรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึง (tensile stress at maximum load) พบว่าปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นมีผลกับวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดในแนวโน้มต่างกัน ซึ่งสังเกตเห็นว่าที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก วัสดุเชิงประกอบฝ้ายมีค่าความเค้นที่จุดสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPPมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นมากกว่า แต่สำหรับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับที่ปริมาณผงฝ้าย 0% โดยน้ำหนักหรือพอลิโพรพิลีนก่อนการเติมผงฝ้ายนั่นเอง หลังจากนั้นเมื่อเติมผงฝ้ายในปริมาณที่มากขึ้นจะสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของผลของปริมาณผงฝ้ายต่อวัสดุเชิงประกอบแต่ละชนิดได้ชัดเจนขึ้น โดยพบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีค่าความเค้นที่จุดสูงสุดลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงฝ้ายซึ่งค่าความเค้นลดลงต่ำสุดที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดย

น้ำหนัก แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP มีค่าความเค้นที่จุดสูงสุดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงฝ้าย และพบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP เริ่มมีค่าความเค้นที่จุดสูงสุดใกล้เคียงกันที่ปริมาณผงฝ้าย 15 และ 20% โดยน้ำหนัก จากที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงว่าปริมาณผงฝ้ายมีผลต่อค่าความเค้นที่จุดสูงสุดแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งในวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกพบว่าเมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบลดลง ซึ่งสังเกตได้จากค่าความเค้นที่จุดสูงสุดมีแนวโน้มลดลงนั่นเอง แต่ในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP พบว่าปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นได้ โดยเริ่มมีค่าคงที่ของการเพิ่มขึ้นที่ปริมาณผงฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก

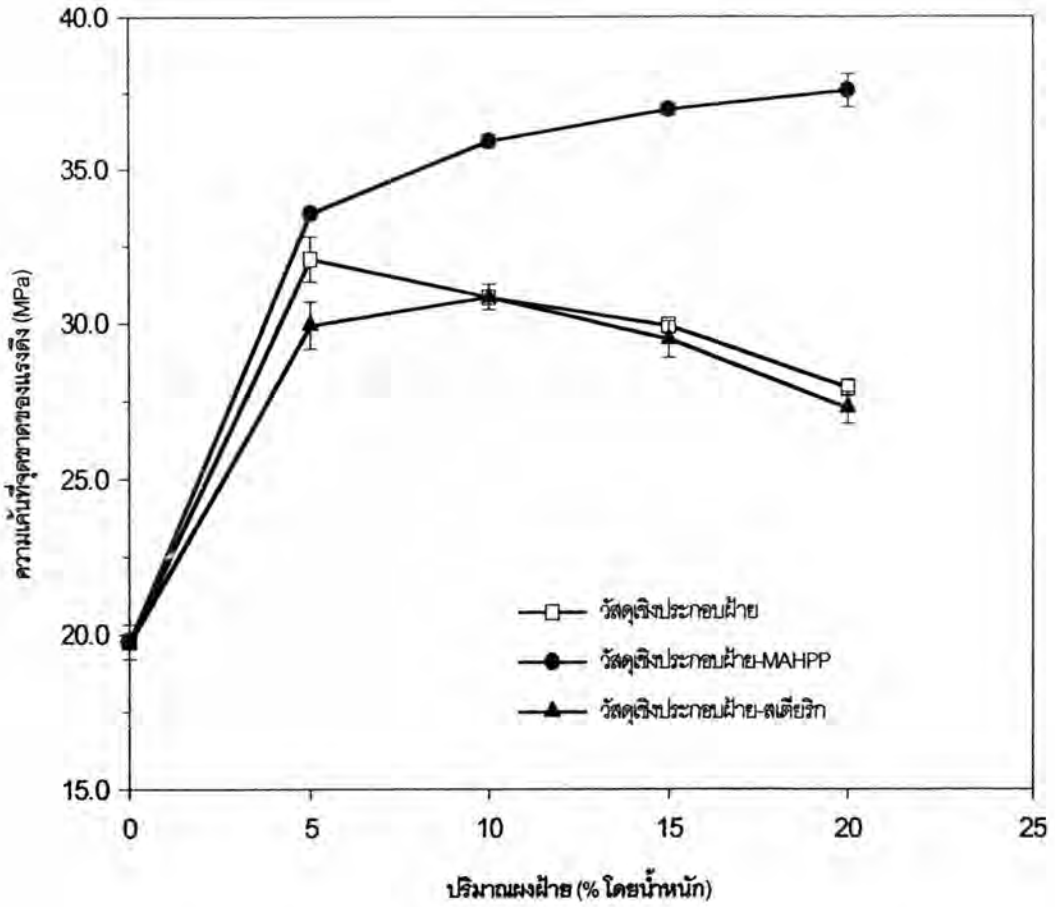


รูปที่ 4.15 ค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 4.7 ค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

ปริมาณผงฝ้าย (% โดยน้ำหนัก)	ความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึง (MPa)		
	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก
0 (PP)	34.89 ± 0.50	34.89 ± 0.50	34.89 ± 0.50
5	35.66 ± 0.18	36.74 ± 0.26	35.04 ± 0.25
10	32.63 ± 0.23	37.90 ± 0.13	32.86 ± 0.10
15	31.87 ± 0.15	38.54 ± 0.12	31.71 ± 0.19
20	28.85 ± 0.39	38.51 ± 0.20	29.47 ± 0.10

สำหรับผลของปริมาณผงฝ้ายต่อค่าความเค้นที่จุดขาดของแรงดึง (tensile stress at break) แสดงในรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.8 พบว่าปริมาณผงฝ้ายมีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของวัสดุเชิงประกอบแต่ละชนิดแตกต่างกันเช่นเดียวกับค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึง จะเห็นว่าที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก ทั้งวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก มีแนวโน้มของค่าความเค้นที่จุดขาดเพิ่มขึ้นเพิ่มอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงฝ้ายกลับพบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีแนวโน้มของค่าความเค้นที่จุดขาดลดลง โดยลดลงต่ำสุดที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามการลดลงของค่าความเค้นที่จุดขาดในวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกนี้ ยังคงพบว่ามีค่าความเค้นที่จุดขาดสูงกว่าพอลิโพรพิลีนหรือที่ปริมาณผงฝ้าย 0% โดยน้ำหนักนั่นเอง ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP พบว่าการเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมีผลให้ค่าความเค้นที่จุดขาดสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกที่เริ่มเติมผงฝ้ายที่ปริมาณ 5 % โดยน้ำหนัก และเพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับเมื่อเติมปริมาณผงฝ้ายเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีค่าความเค้นที่จุดขาดสูงสุดที่ปริมาณผงฝ้าย 20 % โดยน้ำหนัก จากที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงว่าผลของปริมาณผงฝ้ายต่อค่าความเค้นที่จุดขาดคล้ายคลึงกับค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึง แต่พบว่าการเติมปริมาณผงฝ้ายเพียงเล็กน้อยมีผลให้วัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีความแข็งแรงที่จุดขาดเพิ่มขึ้นได้ แต่ถ้าเติมผงฝ้ายในปริมาณที่มากกว่า 5% โดยน้ำหนักจะส่งผลให้ความแข็งแรงที่จุดขาดลดลงได้เช่นกัน ส่วนในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP พบว่าการเติมผงฝ้ายในปริมาณที่มากขึ้นมีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงที่จุดขาดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ



รูปที่ 4.16 ค่าความเค้นที่จุดขาดของแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 4.8 ค่าความเค้นที่จุดขาดของแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

ปริมาณผงฝ้าย (% โดยน้ำหนัก)	ความเค้นที่จุดขาดของแรงดึง (MPa)		
	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก
0 (PP)	19.78 ± 0.56	19.78 ± 0.56	19.78 ± 0.56
5	32.07 ± 0.73	33.57 ± 0.22	29.94 ± 0.77
10	30.83 ± 0.25	35.92 ± 0.24	30.84 ± 0.41
15	29.91 ± 0.25	36.95 ± 0.20	29.47 ± 0.59
20	27.90 ± 0.26	37.57 ± 0.55	27.25 ± 0.51

ผลของการปรับปรุงผงฝ้ายต่อความทนแรงดึง

ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงผงฝ้ายด้วยสารเคมี 2 ชนิดอันได้แก่ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟพอลิโพรพิลีน (MAHPP) และ กรดสเตียริก แล้วนำไปเติมในพอลิโพรพิลีนเพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก และนอกจากนี้ยังได้เตรียมวัสดุเชิงประกอบฝ้ายซึ่งเติมผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงในพอลิโพรพิลีนอีกด้วย ทั้งนี้เพื่อทำการเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงผงฝ้ายต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบก่อน สำหรับความทนแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป โดยจากรูปที่ 4.14 และ ตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าทั้งผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก มีผลให้ค่ามอดุลัสของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP สามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มของค่ามอดุลัสสูงที่สุด โดยค่ามอดุลัสสูงสุดสำหรับสำหรับทุกวัสดุเชิงประกอบอยู่ที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถเรียงลำดับค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้นเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนได้ดังนี้ วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP 110.83% ส่วนวัสดุเชิงประกอบฝ้าย109.78% และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก 97.30% ส่วนผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกพบว่าส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่ามอดุลัสต่ำกว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงเล็กน้อย จากที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงว่าผงฝ้ายทั้ง 3 ชนิดสามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งตึงเพิ่มขึ้นโดยดูจากค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP พบว่ามีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งตึงสูงที่สุด ส่วนผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกพบว่าสามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งตึงน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ซึ่งคาดว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกนี้มีผลต่อการเพิ่มความอ่อนเหนียวและความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบ (รูปที่ 4.10 (2) และ (3))ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความแข็งตึงไม่สูงเท่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงนั่นเอง

จากรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.7 พบว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และกรดสเตียริก ส่งผลให้ค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มของค่าความเค้นที่จุดสูงสุดลดลงตามการเพิ่มปริมาณของผงฝ้าย ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้สามารถพบได้เช่นเดียวกันในกรณีของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก แต่สำหรับผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP พบว่าสามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความเค้นที่จุดสูงสุดเพิ่มขึ้นได้โดยจะเพิ่มตามปริมาณของผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก และที่ปริมาณนี้มีค่าความเค้นที่จุดสูงสุดเพิ่มขึ้น 10.40% เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน จากที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงว่าผง

ฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกมีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงลดลงโดยสังเกตได้จากค่าความเค้นสูงสุดที่ลดลง และพบว่าแนวโน้มของความแข็งแรงจะลดลงตามการเพิ่มปริมาณผงฝ้าย แต่เมื่อพิจารณาผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP จะพบว่าสามารถช่วยเสริมให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นได้ และยังพบว่ามีแนวโน้มความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงความเค้นที่จุดขาดของการดึง พบว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มผลของค่าความเค้นที่จุดขาดใกล้เคียงกันเช่นเดิม ซึ่งพบว่าในตอนแรกเมื่อเติมผงฝ้ายเพียงปริมาณเล็กน้อยจะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความเค้นที่จุดขาดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมผงฝ้ายในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความเค้นที่จุดขาดลดลง แต่เมื่อพิจารณาผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP พบว่าสามารถเพิ่มค่าความเค้นที่จุดขาดให้กับวัสดุเชิงประกอบได้ตามการเพิ่มของปริมาณผงฝ้าย โดยค่าความเค้นที่จุดขาดสูงสุดอยู่ที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าความเค้นที่จุดขาดเพิ่มขึ้นจากพอลิโพรพิลีนถึง 89.96% จากที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดเสตียริกมีสมบัติใกล้เคียงกันคือสามารถไปเพิ่มความแข็งแรงที่จุดขาดให้กับวัสดุเชิงประกอบได้เมื่อเติมผงฝ้ายเพียงปริมาณต่ำเท่านั้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมากขึ้นจะมีผลให้ความแข็งแรงที่จุดขาดลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงข้ามพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP จะสามารถเพิ่มความแข็งแรงที่จุดขาดให้กับวัสดุเชิงประกอบได้ตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น

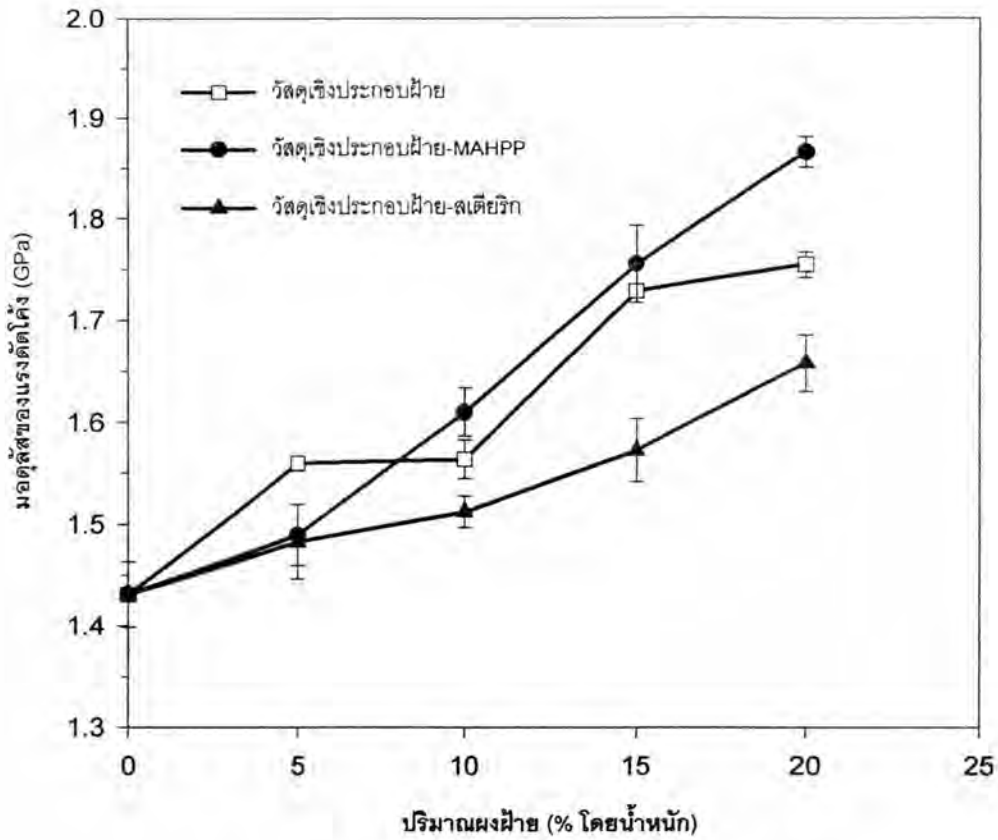
4.2.1.2 **ความทนแรงดัดโค้ง** (Flexural Strength)

ผลของสมบัติความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ได้มาจากการนำชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาทดสอบความทนแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ISO 178 ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% อุณหภูมิ 23°C และใช้ความเร็วในการกดเพื่อดัดโค้งชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร/นาที หลังการทดสอบพบว่าชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ไม่เกิดการแตกหัก และเมื่อสังเกตลักษณะของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนขณะถูกกดเพื่อดัดโค้งจะเห็นว่ามีรอยสีขาวหรือความเค้นสีขาว (stress whitening) บริเวณชิ้นงานที่ถูกกด ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับชิ้นงานรูปดัมเบลที่ถูกยืดดึงว่ารอยสีขาวเกิดจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลพอลิโพรพิลีน

อีกครั้งเมื่อมีแรงดัดโค้งมากระทำ และนอกจากนี้ในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก พบว่ามีความเค้นสีขาวเกิดขึ้นด้วยซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนกว่าในพอลิโพรพิลีน ซึ่งความเครียดสีขาวที่เกิดขึ้นนี้คือรอยราน (crazing) ที่เกิดขึ้นระหว่างการกดเพื่อดัดโค้งซึ่งแสดงถึงกลไกการต้านทานแรงดัดโค้งอันเนื่องมาจากผงฝ้าย หรืออาจกล่าวได้ว่าผงฝ้ายเป็นตัวดูดซับแรงดัดโค้งก่อนที่แรงนั้นจะกระทำต่อเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน และยังสังเกตเห็นว่าจะเห็นรอยร้าวสีขาวได้ชัดเจนมากขึ้นตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นด้วย

ผลของปริมาณผงฝ้ายต่อความทนแรงดัดโค้ง

ปริมาณผงฝ้ายที่เติมในพอลิโพรพิลีนเพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบในงานวิจัยนี้ได้แก่ 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก จากผลทดสอบพบว่าปริมาณผงฝ้ายมีผลต่อความทนแรงดัดโค้งเป็นไปในแนวทางเดียวกับความทนแรงดึงซึ่งได้กล่าวไปแล้วในข้อที่ที่ 4.2.1.1 นั่นคือจากรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.9 พบว่าค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้ง (flexural modulus) ของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าที่ปริมาณผงฝ้าย 5 % โดยน้ำหนัก วัสดุเชิงประกอบฝ้ายมีค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบชนิดอื่น ส่วนวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPPและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก พบว่ามีค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมากขึ้นพบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP มีแนวโน้มของค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นแนวเส้นตรงกับการเพิ่มปริมาณของผงฝ้าย ส่วนวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกพบว่ามีแนวโน้มของค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงฝ้าย จากที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงว่าการเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมีผลให้วัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการต้านทานแรงดัดโค้งสูงขึ้นหรือมีความแข็งตึงสูงขึ้นนั่นเอง

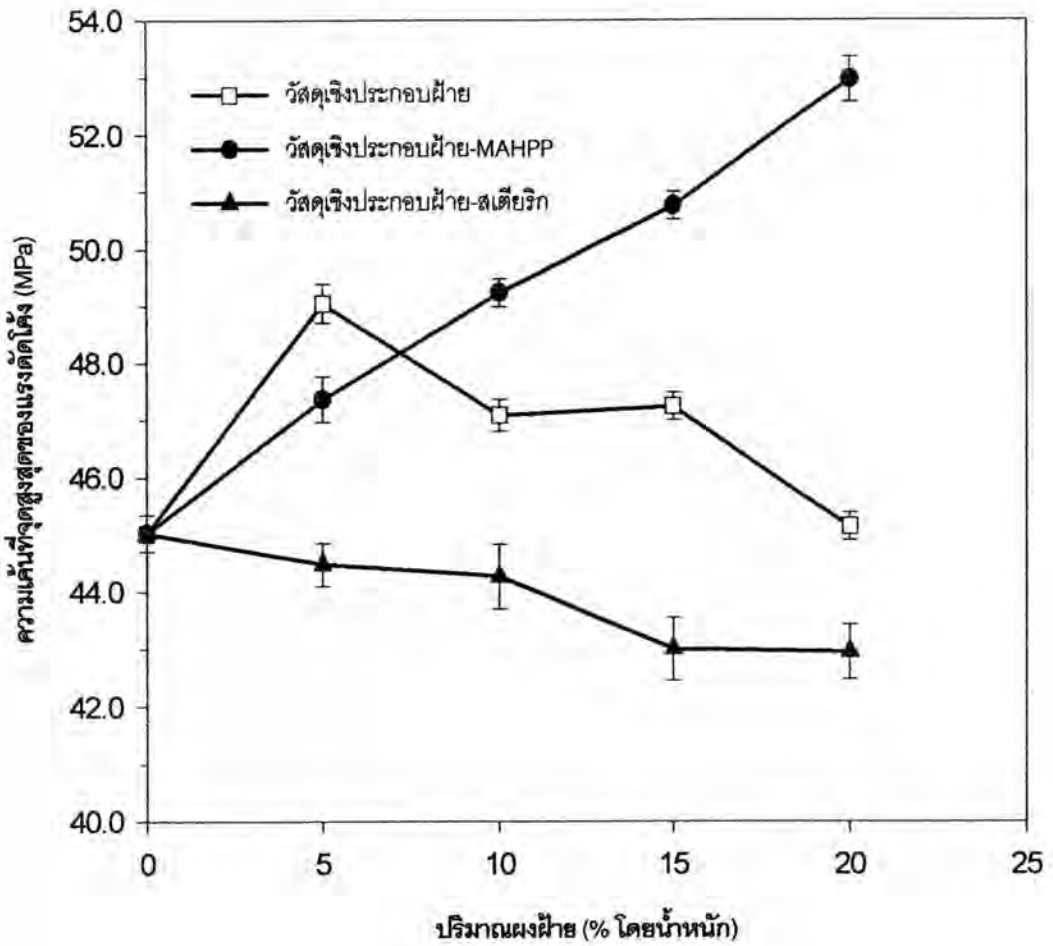


รูปที่ 4.17 ค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 4.9 ค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบ

ปริมาณผงฝ้าย (% โดยน้ำหนัก)	มอดุลัสของแรงดัดโค้ง (GPa)		
	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก
0 (PP)	1.43 ± 0.03	1.43 ± 0.03	1.43 ± 0.03
5	1.56 ± 0.01	1.49 ± 0.03	1.48 ± 0.04
10	1.56 ± 0.02	1.61 ± 0.02	1.51 ± 0.02
15	1.73 ± 0.01	1.76 ± 0.04	1.57 ± 0.03
20	1.76 ± 0.01	1.87 ± 0.02	1.66 ± 0.03

จากรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.10 ซึ่งแสดงค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้ง (flexural stress at maximum load) พบว่าปริมาณผงฝ้ายมีผลต่อค่าความความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้งแตกต่างกันไปตามวัสดุเชิงประกอบแต่ละชนิด เมื่อพิจารณาปริมาณผงฝ้ายที่ 5% โดยน้ำหนัก พบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้ายมีค่าความเค้นสูงที่สุดและรองลงมาคือวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ซึ่งมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นจากพอลิโพรพิลีนหรือที่ปริมาณผงฝ้าย 0% โดยน้ำหนักเล็กน้อย แต่สำหรับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกกลับพบว่ามีค่าความเค้นลดลงเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมากขึ้นจะเห็นว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีแนวโน้มของค่า



รูปที่ 4.18 ค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 4.10 ค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบ

ปริมาณผงฝ้าย (% โดยน้ำหนัก)	ความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้ง (MPa)		
	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก
0 (PP)	45.02 ± 0.32	45.02 ± 0.32	45.02 ± 0.32
5	49.05 ± 0.35	47.36 ± 0.40	44.48 ± 0.38
10	47.08 ± 0.28	49.23 ± 0.24	44.26 ± 0.57
15	47.24 ± 0.24	50.76 ± 0.24	43.00 ± 0.55
20	45.14 ± 0.24	52.97 ± 0.39	42.95 ± 0.48

ความเค้นลดลงไปเรื่อยๆ และสำหรับวัสดุเชิงประกอบฝ้ายพบว่าที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนักเริ่มมีค่าความเค้นใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีนและมีแนวโน้มลดลงไปได้อีกถ้าเติมผงฝ้ายในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันพบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP มีแนวโน้มของค่าความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นเส้นตรงตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น จากที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงว่าปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบแต่ละชนิดไม่เหมือนกันโดยสังเกตจากค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้งที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยพบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้ายและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกมีแนวโน้มของความแข็งแรงลดลงเมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่าในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณผงฝ้าย

ผลของการปรับปรุงผงฝ้ายต่อความทนแรงดัดโค้ง

จากที่กล่าวไปแล้วว่าในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบ 3 ชนิดด้วยกันคือวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกเพื่อทำการเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงผงฝ้าย ซึ่งจากการทดสอบความทนแรงดัดโค้งพบว่า ผลของการปรับปรุงผงฝ้ายต่อความทนแรงดัดโค้งคล้ายกับความทนแรงดึง จากรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.9 พบว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยMAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกมีผลให้ค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณผงฝ้าย

โดยพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP สามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มของค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งสูงที่สุด โดยค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งสูงสุดสำหรับทุกวัสดุเชิงประกอบอยู่ที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถเรียงลำดับค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งสูงสุดที่เพิ่มขึ้นเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนได้ดังนี้ วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP 30.40% วัสดุเชิงประกอบฝ้าย 22.64% และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก 15.86% ตามลำดับ และสังเกตเห็นว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกมีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งต่ำกว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงเล็กน้อย จากที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงว่า ผงฝ้ายทั้ง 3 ชนิดสามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งตึงเพิ่มขึ้นซึ่งดูได้จากค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความแข็งตึงนี้คือความสามารถในการต้านทานแรงดัดโค้งนั่นเอง และพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP สามารถช่วยเสริมความแข็งตึงให้กับวัสดุเชิงประกอบได้ดีกว่าผงฝ้ายชนิดอื่น และพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกมีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งตึงน้อยกว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง คาดว่าอาจเนื่องมาจากกรดสเตียริกซึ่งน่าจะมีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความอ่อนเหนียวและความเหนียวเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้ง ในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.10 พบว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก ส่งผลให้ค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้งมีแนวโน้มแตกต่างกันไป โดยพบว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในช่วงแรกที่ปริมาณผงฝ้ายต่ำๆ คือ 0-5 % โดยน้ำหนักเท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมากขึ้นค่าความเค้นจะลดลง ซึ่งพบพฤติกรรมคล้ายกันนี้ในการปรับปรุงผงฝ้ายด้วยกรดสเตียริก แต่พบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความเค้นลดลงเมื่อเริ่มเติมผงฝ้ายลงไป โดยจะลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP มีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเป็นไปในลักษณะเส้นตรงตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่า ที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก มีค่าความเค้นของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นจากพอลิโพรพิลีน 17.33% จากที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบได้เล็กน้อยที่ปริมาณผงฝ้ายต่ำ ๆ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมากขึ้นพบว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงจะมีผลทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกจะมีผลทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบลดลงเช่นเดียวกันและลดลงมากกว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงเมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้น ส่วนผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP พบว่ามีความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบได้ โดยวัสดุเชิงประกอบจะมีแนวโน้มความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น

4.2.1.3 **ความทนแรงกระแทก** (Impact Strength)

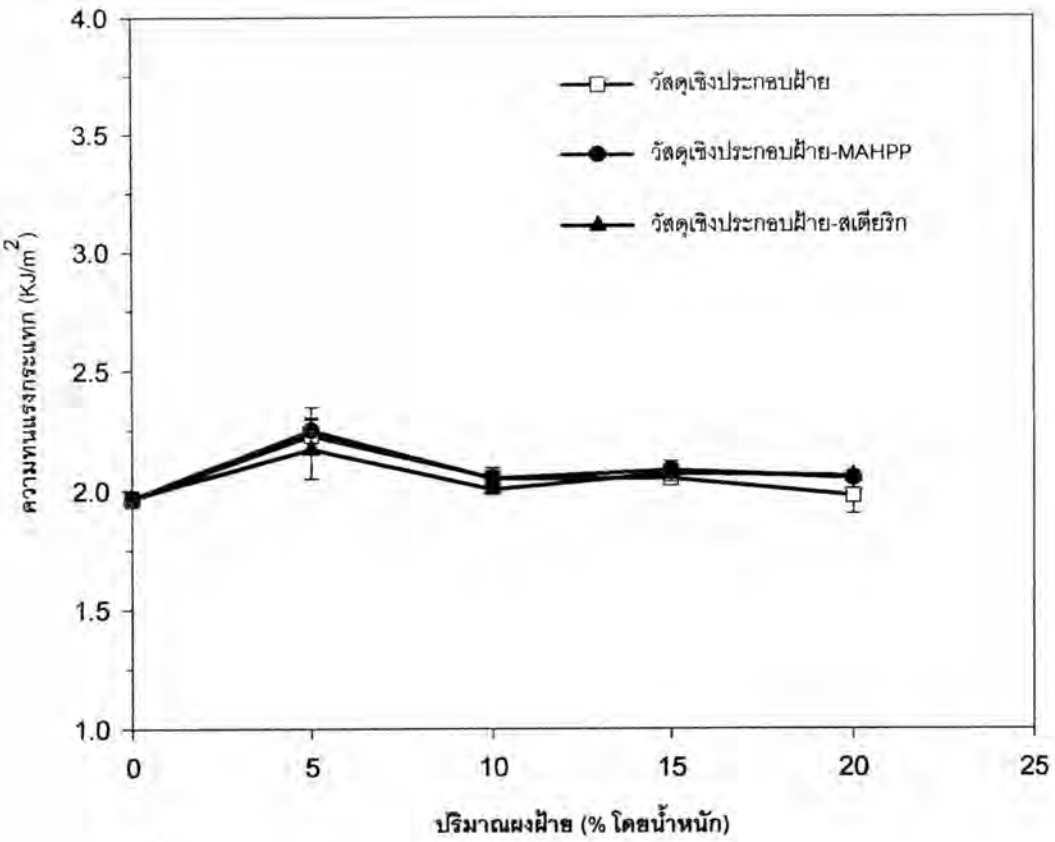
ผลของสมบัติความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP วัสดุเชิงประกอบ-สเตียริก ได้มาจากการนำชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยนผืนผ้าขนาด 80 x 10 x 3 มิลลิเมตร มาทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ISO 179 ที่ภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% อุณหภูมิ 23°C หลังการทดสอบพบว่าชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดเกิดการแตกหักแบบสมบูรณ์

<u>ผลของปริมาณผงฝ้ายต่อความทนแรงกระแทก</u>

ปริมาณผงฝ้ายที่เติมในพอลิโพรพิลีนเพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบในงานวิจัยนี้ได้แก่ 5 10 15 และ20 % โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.11 พบว่าการเพิ่มปริมาณผงฝ้ายมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความทนแรงกระแทกอย่างไม่มีนัยสำคัญ และพบว่าที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก มีการเพิ่มขึ้นของค่าความทนแรงกระแทกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนที่ปริมาณผงฝ้าย 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าความทนแรงกระแทกใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีน ลักษณะดังกล่าวพบว่าเกิดขึ้นกับทั้งวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ซึ่งมีแนวโน้มของค่าความทนแรงแทกเมื่อเพิ่มปริมาณผงฝ้ายที่เหมือนกัน

<u>ผลของการปรับปรุงผงฝ้ายต่อความทนแรงกระแทก</u>

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงผงฝ้ายที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบโดยเปรียบเทียบผงฝ้าย 3 ชนิดที่ใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบคือ ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก ซึ่งจากผลการทดสอบความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ (รูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.11) พบว่าการปรับปรุงผงฝ้ายทั้ง 2 ชนิดมีผลต่อค่าความทนแรงกระแทกใกล้เคียงกัน จากรูป 4.19 จะเห็นว่าเส้นกราฟของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันและเกือบทับเป็นเส้นเดียวกัน และค่าความทนแรงกระแทกที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน หรืออาจกล่าวได้ว่าการปรับปรุงผงฝ้ายไม่มีผลต่อความทนแรงกระแทกนั่นเอง



รูปที่ 4.19 ค่าความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 4.11 ค่าความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ

ปริมาณผงฝ้าย (% โดยน้ำหนัก)	ความทนแรงกระแทก (KJ/m^2)		
	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP	วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก
0 (PP)	1.97 ± 0.04	1.97 ± 0.04	1.97 ± 0.04
5	2.23 ± 0.08	2.25 ± 0.10	2.17 ± 0.12
10	2.05 ± 0.04	2.05 ± 0.04	2.00 ± 0.01
15	2.05 ± 0.03	2.09 ± 0.04	2.07 ± 0.04
20	1.98 ± 0.07	2.05 ± 0.01	2.06 ± 0.02

จากที่กล่าวมาทั้งผลของปริมาณผงฝ้ายและการปรับปรุงผงฝ้ายต่อความทนแรงกระแทกนั้น จะพบว่ามีค่าความทนแรงกระแทกต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอาจเกิดจากความไม่เหมาะสมของขนาดชิ้นงานและการให้แรงในการตีของค้อน เนื่องจากข้อจำกัดของชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำให้ชิ้นงานที่ใช้มีขนาด 80 x 10 x 3 มิลลิเมตร ในขณะที่ใช้แรงในการตี 0.5 J ซึ่งโดยปกติตามมาตรฐาน ISO 179 ชิ้นงานที่ทำการทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy ควรมีขนาด 80 x 10 x 4 มิลลิเมตร ทำให้คาดว่าขนาดของชิ้นงานที่ต่างไปจากมาตรฐานนี้จะมีผลทำให้ค่าแรงกระแทกในงานวิจัยนี้ต่ำกว่าความเป็นจริงได้

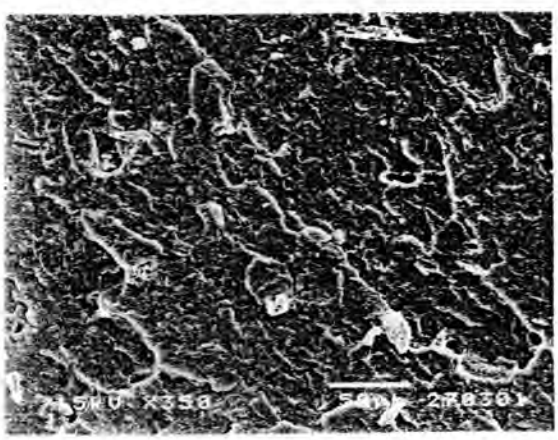
4.2.2 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวที่แตกหัก

วัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ถูกทำให้แตกหักโดยการหักในไนโตรเจนเหลว สำหรับทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 350 เท่า เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงฝ้ายที่มีต่อวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิด ซึ่งปริมาณผงฝ้ายที่เติมในพอลิโพรพิลีนเพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบในงานวิจัยนี้ได้แก่ 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก และนอกจากนี้ได้ทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 2000 เท่า เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงผงฝ้ายที่มีต่อวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ผงฝ้ายในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบดังนี้ คือ ผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก โดยพบว่าผลการตรวจสอบมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเช่นกัน

<u>ผลของปริมาณผงฝ้ายต่อลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบ</u>

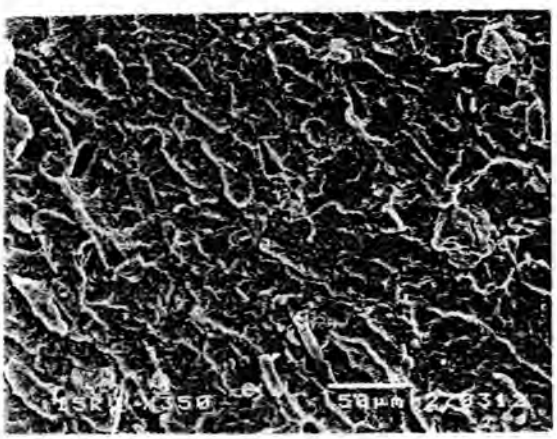
จากรูปที่ 4.20 แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย พบว่าเมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้นมีผลให้พื้นผิวที่แตกหักมีลักษณะขรุขระและมีความหยาบมากขึ้น และจะเห็นว่าผงฝ้ายสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิโพรพิลีนได้ค่อนข้างดีทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะความเป็นผงของฝ้ายซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กทำให้สามารถแทรกอยู่ในเนื้อพลาสติกได้ดี และไม่ปรากฏให้เห็นชัดนักเมื่อเกิดการแตกหักแม้ว่าที่ปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตเห็น

รู (holes) ขนาดเล็กๆ ซึ่งเกิดจากการหลุดออกไปของผงฝ้าย และนอกจากนี้ยังพบว่าโอกาสในการพบรูเหล่านี้มีมากขึ้น เมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้น และอาจพบรูที่มีขนาดใหญ่ที่ปริมาณผงฝ้ายสูงด้วยเช่นกัน ซึ่งรูในลักษณะดังกล่าวนี้อาจเกิดจากการหลุดออกไปของผงฝ้ายที่เกาะกลุ่มกันอยู่ในวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณผงฝ้ายค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้โอกาสในการรวมตัวกันของผงฝ้ายมีเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงมีความสามารถในการยึดติดกับพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ได้ต่ำ เพราะผงฝ้ายยังคงมีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลสอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลให้มีสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic) หรือกล่าวได้ว่าผงฝ้ายเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว (polar) นั่นเอง ในขณะที่พอลิโพรพิลีนมีสมบัติตรงกันข้ามคือความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (non-polar) ซึ่งสมบัติที่แตกต่างกันนี้ทำให้เกิดความสามารถการยึดติดระหว่างผิวหน้า (interfacial adhesion) ที่ไม่ดีระหว่างผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน ซึ่งมีผลให้ผงฝ้ายสามารถหลุดออกจากเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนได้ง่ายเมื่อเกิดการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบขึ้น โดยจะเห็นเป็นรูตามพื้นผิวที่แตกหัก และนอกจากนี้การมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากส่งผลให้ผงฝ้ายสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างผงฝ้ายด้วยกันและเกิดการรวมตัวกันเองทำให้พบรูที่มีขนาดใหญ่ตามพื้นผิวที่แตกหักด้วย จากข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าสิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย อันได้แก่ ความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึง ความเค้นที่จุดขาดของแรงดึง และความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้งมีค่าลดลงตามปริมาณของผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

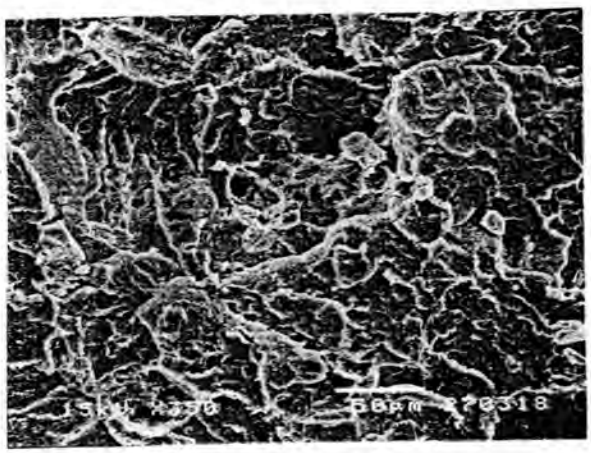


(1)

(2)

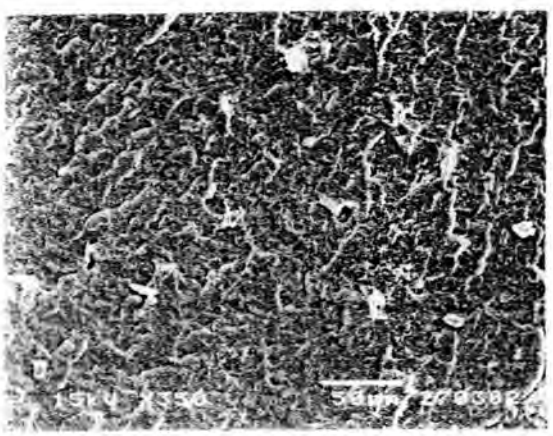


(3)

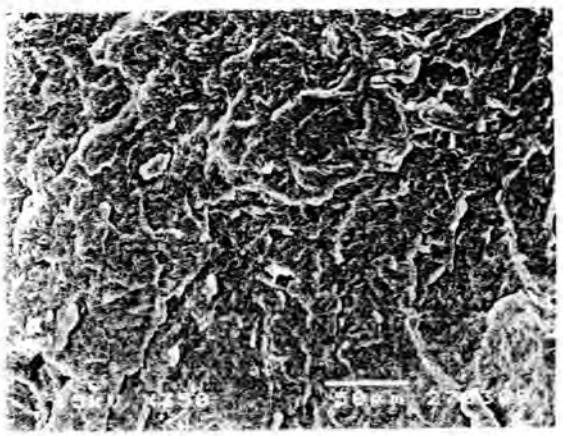


(4)

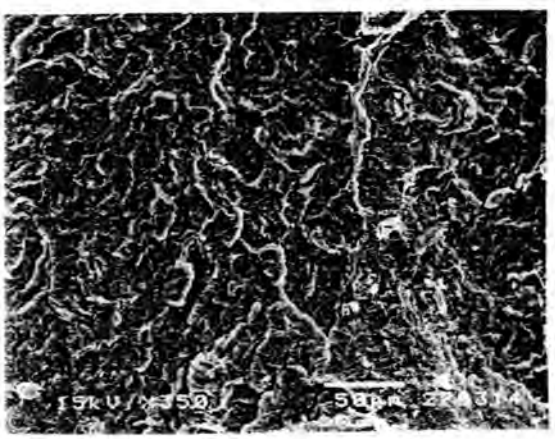
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย ที่กำลังขยาย 350 เท่า ที่ปริมาณผงฝ้าย (1) 5% (2) 10% (3) 15% และ (4) 20% โดยน้ำหนัก



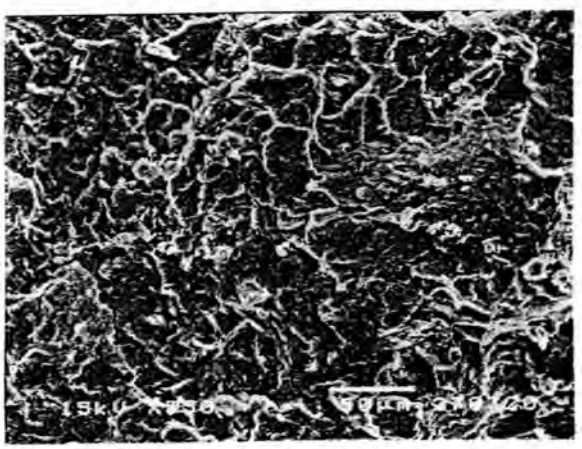
(1)



(2)

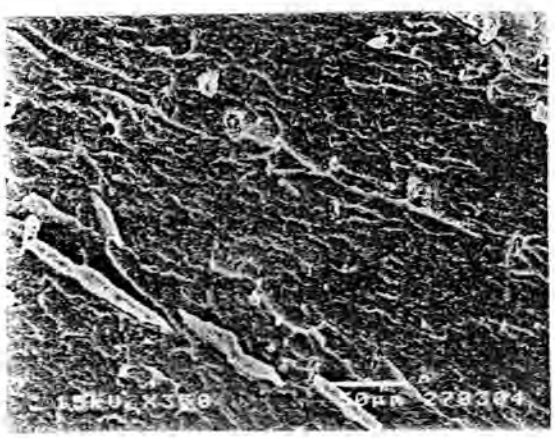


(3)

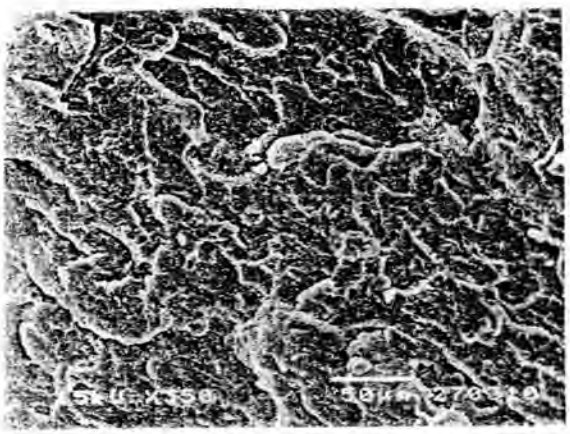


(4)

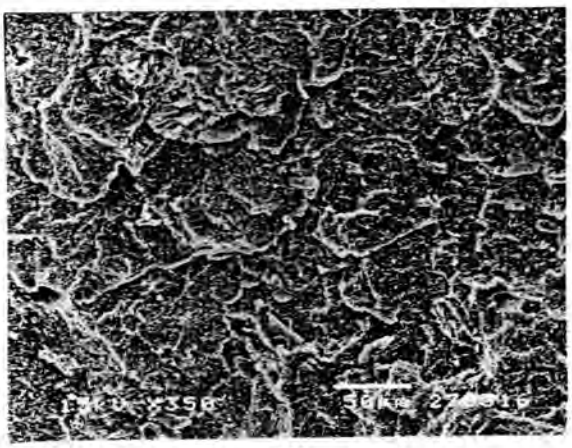
รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่กำลังขยาย 350 เท่าที่ปริมาณผงฝ้าย (1) 5% (2) 10% (3) 15% และ (4) 20% โดยน้ำหนัก



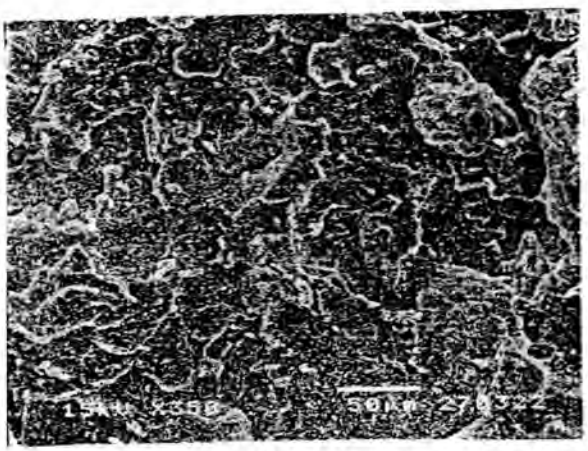
(1)



(2)



(3)



(4)

รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ที่กำลังขยาย 350 เท่าที่ปริมาณผงฝ้าย (1) 5% (2) 10% (3) 15% และ (4) 20% โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.21 ซึ่งแสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้ายต่างๆ กัน พบว่ามีลักษณะคล้ายกับวัสดุเชิงประกอบฝ้ายคือมีลักษณะของพื้นผิวที่แตกหักขรุขระและหยาบมากขึ้นเมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้น แต่จะสังเกตเห็นว่าจำนวนรูที่พบมีน้อยกว่าและมีขนาดของรูเล็กกว่าในวัสดุเชิงประกอบฝ้ายแม้ว่ามีการเพิ่มปริมาณผงฝ้ายให้มากขึ้นก็ตาม แสดงว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP สามารถเพิ่มการยึดติดระหว่างผิวหน้าผงฝ้ายและเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนได้ คาดว่าการปรับปรุงด้วย MAHPP จะช่วยลดสมบัติความชอบน้ำของผงฝ้ายให้ลดลงได้ ซึ่งส่งผลให้ความมีขั้วของผงฝ้ายลดลง ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP ด้วย FT-IR จากรูปที่ 4.8 หัวข้อ 4.1.2 ซึ่งแสดงปฏิกิริยาระหว่างฝ้ายและMAHPP โดยหมู่แอนไฮไดรด์จะแตกออกและไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส ดังนั้นหมู่ไฮดรอกซิลในผงฝ้ายจึงลดลง ทำให้ความมีขั้วลดลงด้วย หรือความไม่มีขั้วเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ส่งผลให้ผงฝ้ายสามารถเข้ากันได้และยึดติดกับพอลิโพรพิลีนซึ่งมีสภาพความไม่มีขั้วเช่นเดียวกัน ทำให้พบการหลุดออกของผงฝ้ายจากเมทริกซ์น้อยลง และนอกจากนี้การหายไปของหมู่ไฮดรอกซิลนี้ทำให้ผงฝ้ายมีโอกาสสร้างพันธะไฮโดรเจนและมารวมตัวกันเองน้อยลงด้วย ซึ่งสังเกตได้จากไม่พบรูขนาดใหญ่บนพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลซึ่งทำให้วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP มีสมบัติดีกว่าวัสดุเชิงประกอบชนิดอื่น คือพบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP มีทั้งค่าโมดูลัสและความเค้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นทั้งในการทดสอบความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้ง

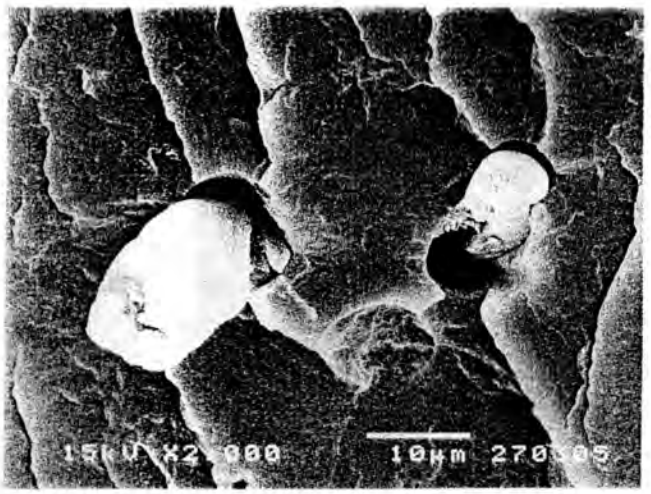
สำหรับในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกพบว่าเมื่อปริมาณผงฝ้ายเพิ่มขึ้นจะมีลักษณะพื้นผิวที่แตกหักขรุขระและหยาบมากขึ้นเช่นกัน ดังรูปที่ 4.22 และมีความคล้ายคลึงกับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP คือ พบรูจำนวนน้อยกว่าและมีขนาดเล็กกว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย แต่กลับพบว่ามีลักษณะของเกล็ดสีขาวขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกและยังพบว่าเกล็ดสีขาวเหล่านี้จะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเกล็ดเล็กๆ สีขาวเหล่านี้เป็นผลมาจากกรดสเตียริกที่ไม่ทำปฏิกิริยากับผิวของผงฝ้าย และคาดว่าเกิดการหลุดออกจากผิวของผงฝ้ายในขั้นตอนการขึ้นรูป และอาจกล่าวได้ว่าเกิดจากการใช้กรดสเตียริกที่มากเกินพอในการปรับปรุงผงฝ้าย โดยในงานวิจัยนี้ใช้กรดสเตียริกที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักของผงฝ้าย ซึ่งอาจทำให้อาจมีการหลงเหลือของกรดสเตียริกที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์กับผิวของผงฝ้าย ซึ่งมีผลให้เกิดการหลุดออกจากผิวของผงฝ้ายได้ง่าย โดยกรดสเตียริกที่เกินมาเหล่านี้คาดว่าอาจจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกด้วย คือมีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความอ่อนเหนียวและความเหนียวเพิ่มขึ้น (จากรูปที่ 4.13) แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึง ความเค้นที่จุดขาดของแรงดึง

และความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้งมีค่าลดลงตามปริมาณของผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับที่พบในวัสดุเชิงประกอบฝ้ายนั่นเอง

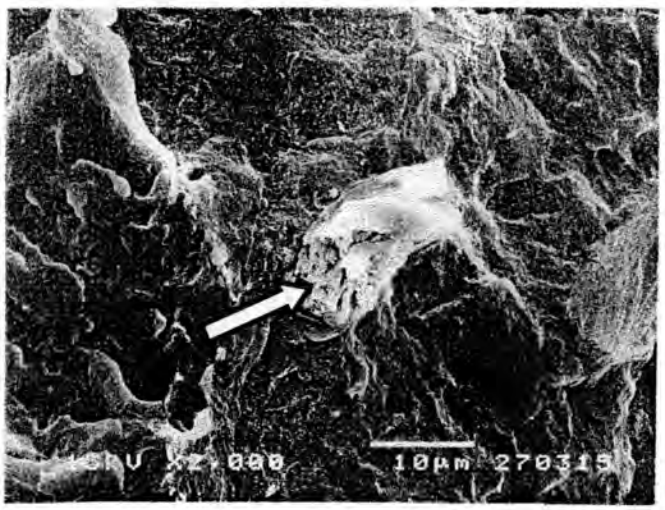
ผลของการปรับปรุงผงฝ้ายต่อลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบ

จากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบที่กำลังขยายสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.23 พบว่าสามารถเห็นลักษณะของผงฝ้ายซึ่งยังคงรูปร่างเป็นเส้นฝังตัวอยู่บนพื้นผิวที่แตกหัก ซึ่งได้แสดงรูปร่างของผงฝ้ายก่อนเติมในพอลิโพรพิลีนไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.23 (1) ซึ่งแสดงลักษณะการฝังตัวของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง บนพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย พบว่ามีช่องว่าง (void) ขนาดใหญ่บริเวณรอบผงฝ้าย ซึ่งฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเปียก (wetting) ที่ต่ำระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานผิวหน้า (surface energy) หรือแรงตึงผิว (surface tension) ของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและพอลิโพรพิลีนมีค่าที่ต่างกันมากทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและพอลิโพรพิลีนต่ำไปด้วย นอกจากนี้จากรูปจะเห็นว่าผงฝ้ายมีการหลุดออกมาเผยให้เห็นถึงรูปร่างที่เป็นเส้นของผงฝ้าย และสังเกตเห็นว่าผิวของผงฝ้ายที่หลุดออกมานั้นมีลักษณะเรียบ แสดงว่าผิวของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงมีการยึดติดที่ไม่ดีกับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความแตกต่างกันระหว่างสมบัติความมีขั้วและความชอบน้ำของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง และสมบัติความไม่มีขั้วและความไม่ชอบน้ำของพอลิโพรพิลีนซึ่งอธิบายไปแล้วข้างต้นในเรื่องผลของปริมาณผงฝ้าย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสและสมบัติเชิงกลกล่าวคือทำให้ค่าสมบัติเชิงกลทั้งความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบฝ้ายมีค่าต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP

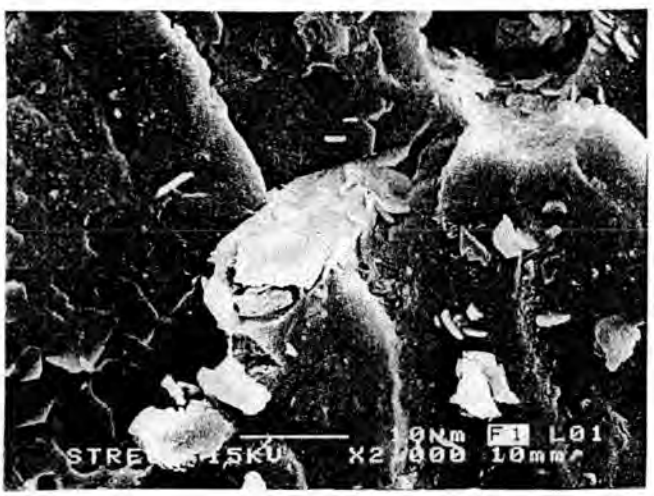
เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.23 (2) ซึ่งแสดงลักษณะการฝังตัวของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP บนพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP จะเห็นว่าไม่พบช่องว่างบริเวณรอบผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP แต่กลับพบว่ามีการฝังตัวแน่นของผงฝ้ายในเมทริกซ์พอลิโพริลีน แสดงว่าการปรับปรุงฝ้ายด้วย MAHPP ส่งผลให้ความสามารถในการเปียกระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงฝ้ายเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่ามีการปกคลุมอย่างทั่วถึงของเมทริกซ์ไปสู่ผงฝ้าย อาจกล่าวได้ว่าการปรับปรุงผงฝ้ายด้วย MAHPP นั้นจะมีผลให้พลังงานผิวหน้าของผงฝ้ายลดต่ำลงในระดับที่ใกล้เคียงกับพลังงานผิวหน้าของเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนมากขึ้น ซึ่งพลังงานผิวหน้าที่ลดต่ำลงนี้



(1)



(2)



(3)

รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบ ที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 2000 เท่า (1) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย (2) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และ(3) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก

สามารถยืนยันได้จากผลของค่ามุมสัมผัส ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2 ว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP มีค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่ามีค่าแรงตึงผิวหน้า (surface tension) หรือค่าพลังงานผิวหน้าลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP ไม่มีการหลุดออกจากเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนเหมือนกับผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง อีกทั้งยังพบว่ามีลักษณะการแตกเป็นเส้น (fibrils) ในอนุภาคของผงฝ้าย (ตำแหน่งที่ลูกศรชี้) ซึ่งแสดงถึงการยึดติดที่ดีระหว่างผิวหน้าของผงฝ้ายและเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน ลักษณะเส้นที่แตกออกนี้สามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากความสามารถในการถ่ายเทพลังงานระหว่างการแตกหักจากเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนไปสู่ผงฝ้าย ซึ่งการยึดติดที่ดีทำให้ผงฝ้ายสามารถดูดซับพลังงานการแตกหักเอาไว้ ส่งผลให้ภายในอนุภาคของผงฝ้ายเกิดการแตกออกเป็นเส้นเมื่อมีแรงมากระทำเพื่อหักวัสดุเชิงประกอบ การยึดติดที่ดีนี้เนื่องมาจากการเกิดพันธะทางกายภาพ (physical bonding) และการดึงดูดระหว่างผิวหน้าของผงฝ้ายซึ่งมีพอลิโพรพิลีนจาก MAHPP เกาะอยู่ กับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน หรือที่เรียกว่า cohesive coupling นั่นเอง ซึ่งการยึดติดที่ดีนี้ส่งผลให้ผลทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP. มีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบชนิดอื่น โดยไม่พบการลดลงของค่าความเค้นตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นดังที่พบในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 (3) ซึ่งแสดงลักษณะการฝังตัวของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก บนพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก จะเห็นว่าไม่พบช่องว่างบริเวณรอบผงฝ้ายที่ฝังตัวอยู่เช่นเดียวกันกับกรณีของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP แต่เมื่อสังเกตจะพบว่าไม่มีลักษณะการฝังตัวแน่นในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนดังที่พบในกรณีของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP เนื่องจากสังเกตเห็นลักษณะของผงฝ้ายที่หลุดออกมาและไม่พบลักษณะการแตกเป็นเส้นไฟบริล แสดงว่าการปรับปรุงผงฝ้ายด้วยกรดสเตียริกทำให้ความสามารถในการเปียกระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงฝ้ายเพิ่มขึ้นได้แต่ไม่ดีเท่าการปรับปรุงด้วย MAHPP ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลของค่ามุมสัมผัสของผงฝ้ายในหัวข้อ 4.1.2 ซึ่งพบว่าค่ามุมสัมผัสของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกมีค่าต่ำกว่าค่ามุมสัมผัสของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP ซึ่งแสดงว่าการปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกสามารถไปลดพลังงานผิวหน้าให้กับผงฝ้ายได้น้อยกว่าการปรับปรุงด้วย MAHPP นอกจากนี้จากรูปจะเห็นว่ามีการหลุดออกมาของผงฝ้ายซึ่งเผยให้เห็นผิวของผงฝ้ายซึ่งมีลักษณะไม่เรียบและมีเกล็ดของสารซึ่งคาดว่าเป็นกรดสเตียริกเกาะอยู่ ซึ่งเป็นการแสดงว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกนี้มีการยึดติดกับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนที่ไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP โดยอาจจะสามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากโครงสร้างของกรดสเตียริกซึ่งมีสายโซ่โมเลกุลประเภทแอลเคน ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมเพียง 17 ตัว ทำให้การดึงดูดกันระหว่างสายโซ่

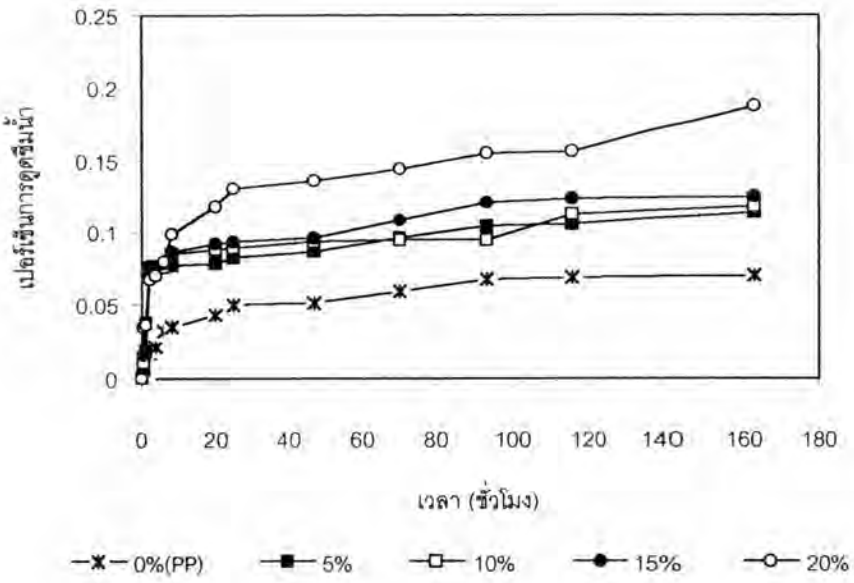
โมเลกุลแอลเคนซึ่งเกาะอยู่บนผิวผงฝ้ายกับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนไม่ดีเท่าสายโซ่พอลิโพรพิลีนใน MAHPP ดังนั้นค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกจึงมีค่าต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และมีพฤติกรรมของสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบฝ้ายซึ่งมีผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงเป็นสารตัวเติม

4.2.3 ความสามารถในการดูดซึมน้ำ

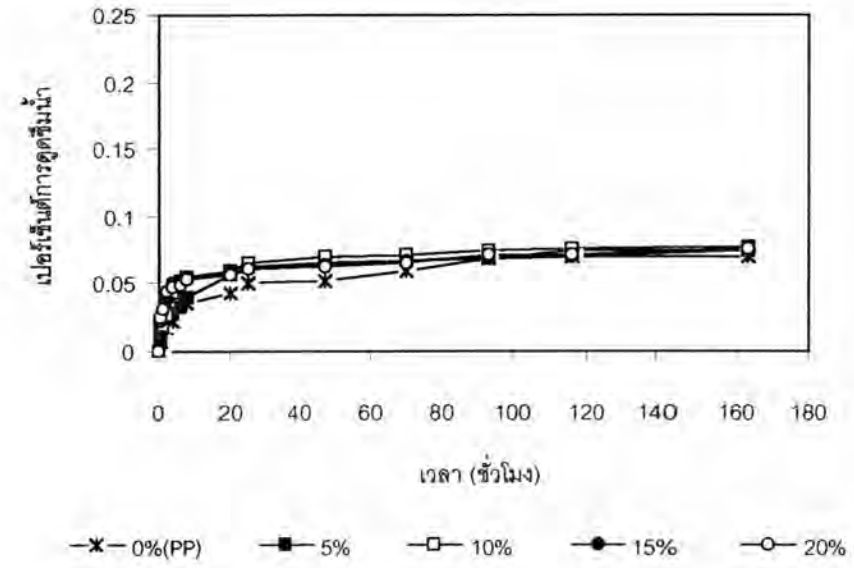
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบตามมาตรฐาน ASTM D750-95 และใช้เวลาในการทดสอบทั้งหมด 163 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบทั้งวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ที่ปริมาณผงฝ้าย 5 10 15 และ20% โดยน้ำหนัก พบว่าวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มในการดูดซึมน้ำที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบชนิดอื่นที่มีเส้นใยธรรมชาติเป็นสารตัวเติม (Kasemsook, 1999) โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นจากพอลิโพรพิลีนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้จากการทดสอบพบว่าปริมาณผงฝ้ายและวิธีการปรับปรุงผงฝ้ายมีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ ดังนี้

<u>ผลของปริมาณผงฝ้ายต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ</u>

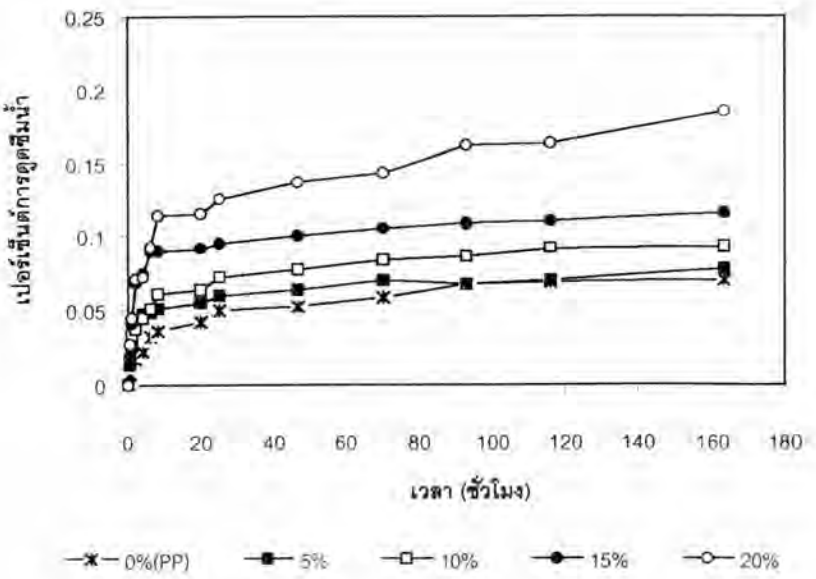
รูปที่ 4.24 แสดงความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบฝ้ายซึ่งมีผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงเป็นสารตัวเติม ที่ปริมาณผงฝ้ายต่าง ๆ กัน พบว่า เมื่อเติมผงฝ้ายในปริมาณที่มากขึ้นจะมีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มในการดูดซึมน้ำที่มากขึ้น จากกราฟจะเห็นว่าในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ ทุกปริมาณผงฝ้ายจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำค่อนข้างเร็ว ต่อจากนั้นกราฟจะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเกือบคงที่เมื่อเวลาในการทดสอบผ่านไปเรื่อย ๆ จนถึง 163 ชั่วโมง ยกเว้นที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนักจะเห็นว่ามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำได้อีก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยธรรมชาติโดยทั่วไปแล้ว กล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีค่าต่ำมาก นั่นคือเมื่อสิ้นสุดเวลาในการทดสอบ พบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้ายที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการดูดซึมน้ำเพียงประมาณ 0.19%



รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบฝ้ายที่ปริมาณผงฝ้ายต่างๆ กัน เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้ายต่างๆ กันเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



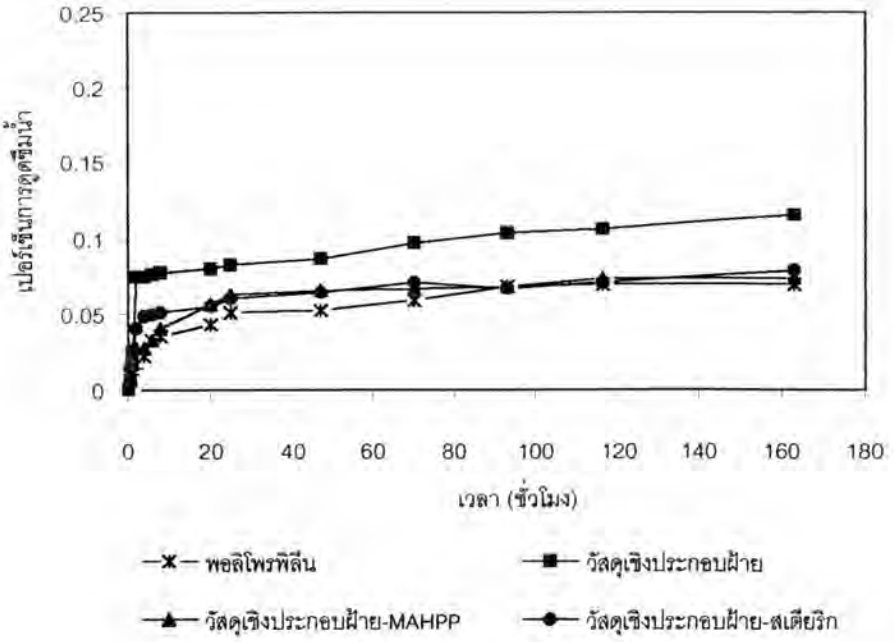
รูปที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ที่ปริมาณผงฝ้ายต่างๆ กันเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

สำหรับปริมาณผงฝ้ายอื่นๆ ก็เช่นเดียวกัน นั่นคือพบว่ามีความสามารถในการดูดซึมน้ำอยู่ในระดับที่ต่ำใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วง 0.11 – 0.12% แสดงว่าการเพิ่มปริมาณของผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงมีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เมื่อพิจารณาที่สมบัติของฝ้ายโดยทั่วไปที่สามารถดูดซึมน้ำได้ดี ความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่ค่อนข้างต่ำนี้สามารถอธิบายได้ว่าอาจเป็นผลมาจากการแปรสภาพทางเคมีของเศษผ้าฝ้ายให้เป็นผงฝ้ายด้วยวิธีการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเจือจาง โดยวิธีการดังกล่าวจะทำลายส่วนที่เป็นอสัณฐานของเส้นใยฝ้าย ซึ่งส่วนอสัณฐานนี้เองที่เป็นส่วนที่ว่องไวต่อน้ำ สามารถดูดซึมและรับน้ำจากสิ่งแวดล้อมได้ดี (Shore, 1995) ดังนั้นจึงมีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบที่มีผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงเป็นสารตัวเติมมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่ำไปด้วย แต่ถึงอย่างไรก็ตามผงฝ้ายที่ได้ยังคงมีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นเซลลูโลสซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโมเลกุลเป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงฝ้ายในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น

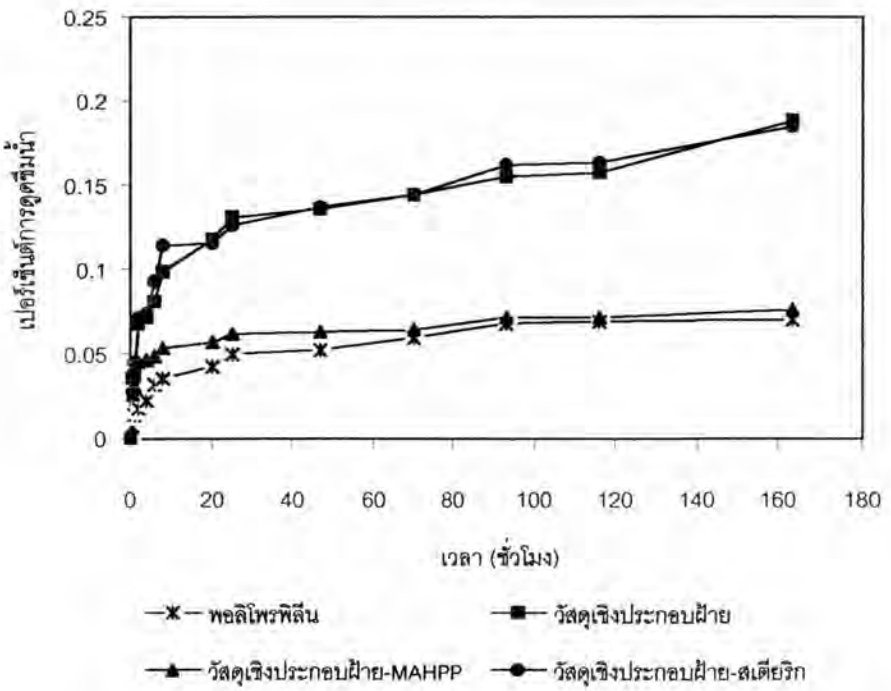
เมื่อนำผงฝ้ายมาผ่านการปรับปรุงด้วย MAHPP แล้วเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP พบว่าผลของปริมาณผงฝ้ายต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำได้เปลี่ยนไป ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าที่ทุกปริมาณผงฝ้าย อันได้แก่ 5 10 15 และ20% โดยน้ำหนัก วัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน โดยในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของการทดสอบพบว่าเปอร์เซ็นต์การ

ดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนเกือบเป็นค่าคงที่ เช่นเดียวกับในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย ซึ่งความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ 163 ชั่วโมงที่ใช้ในการทดสอบของทุกปริมาณผงฝ้ายอยู่ในช่วงประมาณ 0.07 – 0.08% ซึ่งเป็นความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่ำมากและต่ำกว่าในวัสดุเชิงประกอบฝ้ายซึ่งผงฝ้ายไม่ได้ผ่านการปรับปรุงด้วย MAHPP แสดงว่าปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP ไม่ส่งผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ โดยพบว่าทุกปริมาณจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่ต่ำมากและมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากการปรับปรุงด้วย MAHPP ส่งผลให้ผงฝ้ายมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลของค่ามุมสัมผัสกับน้ำ ในหัวข้อ 4.1.2 ซึ่งพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP มีค่ามุมสัมผัสที่สูงมาก แสดงถึงการดูดซึมน้ำที่ต่ำนั่นเอง

สำหรับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกซึ่งมีผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกเป็นสารตัวเติมนั้นพบว่า มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่มากกว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งจะเห็นว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยใน 2 ชั่วโมงแรกจะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ต่อมาจะมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนเกือบเป็นค่าคงที่ ยกเว้นที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก คาดว่าวัสดุเชิงประกอบอาจจะสามารถดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้นอีกภายหลังจาก 163 ชั่วโมง ที่ใช้ในการทดสอบ พฤติกรรมดังกล่าวนี้คล้ายกับในวัสดุเชิงประกอบฝ้าย ดังรูปที่ 4.24 โดยพบว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก เมื่อเวลาผ่านไป 163 ชั่วโมง วัสดุเชิงประกอบมีค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำประมาณ 0.19% และที่ปริมาณผงฝ้าย 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำประมาณ 0.08 0.9 และ 0.11% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกเพิ่มขึ้น วัสดุเชิงประกอบจะสามารถดูดซึมน้ำได้เพิ่มมากขึ้น และมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบฝ้าย ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงผงฝ้ายด้วยกรดสเตียริกนั้นมีผลทำให้ผงฝ้ายมีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นแต่ในระดับที่น้อยกว่าการปรับปรุงด้วย MAHPP ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลของค่ามุมสัมผัสกับน้ำ ในหัวข้อ 4.1.2 ซึ่งพบว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกมีค่ามุมสัมผัสที่ต่ำกว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP แสดงถึงการเข้ากันกับน้ำได้ดีกว่านั่นเอง ส่งผลให้เมื่อปริมาณผงฝ้ายมากขึ้นวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกจึงมีโอกาสในการดูดซึมน้ำได้มากขึ้น



รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบชนิดต่างๆ ที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบชนิดต่างๆ ที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก

ผลของการปรับปรุงผงฝ้ายต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ

จากรูปที่ 4.27 ซึ่งแสดงความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน พบว่า วัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างของความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ไม่มากนัก นั่นคือมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ยกเว้นวัสดุเชิงประกอบฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง โดยพบว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงมีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่สูงกว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย-MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกเล็กน้อย ซึ่งจะเห็นว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย-MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีน

และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณผงฝ้ายมากขึ้น ดังรูปที่ 4.28 แสดงความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก ที่ปริมาณผงฝ้าย 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณผงฝ้ายที่มากที่สุดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่า วัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างของค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำอย่างเห็นได้ชัด จะเห็นว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกมีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP ซึ่งการปรับปรุงผงฝ้ายด้วย MAHPP สามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่ำมากจนใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีน จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP สามารถส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่ำมากกว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก แม้ว่าที่ปริมาณผงฝ้ายสูงๆ ก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความไม่ชอบน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อผงฝ้ายผ่านการปรับปรุงด้วย MAHPP ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในเรื่องผลของปริมาณผงฝ้ายนั่นเอง

4.2.4 สมบัติทางความร้อน

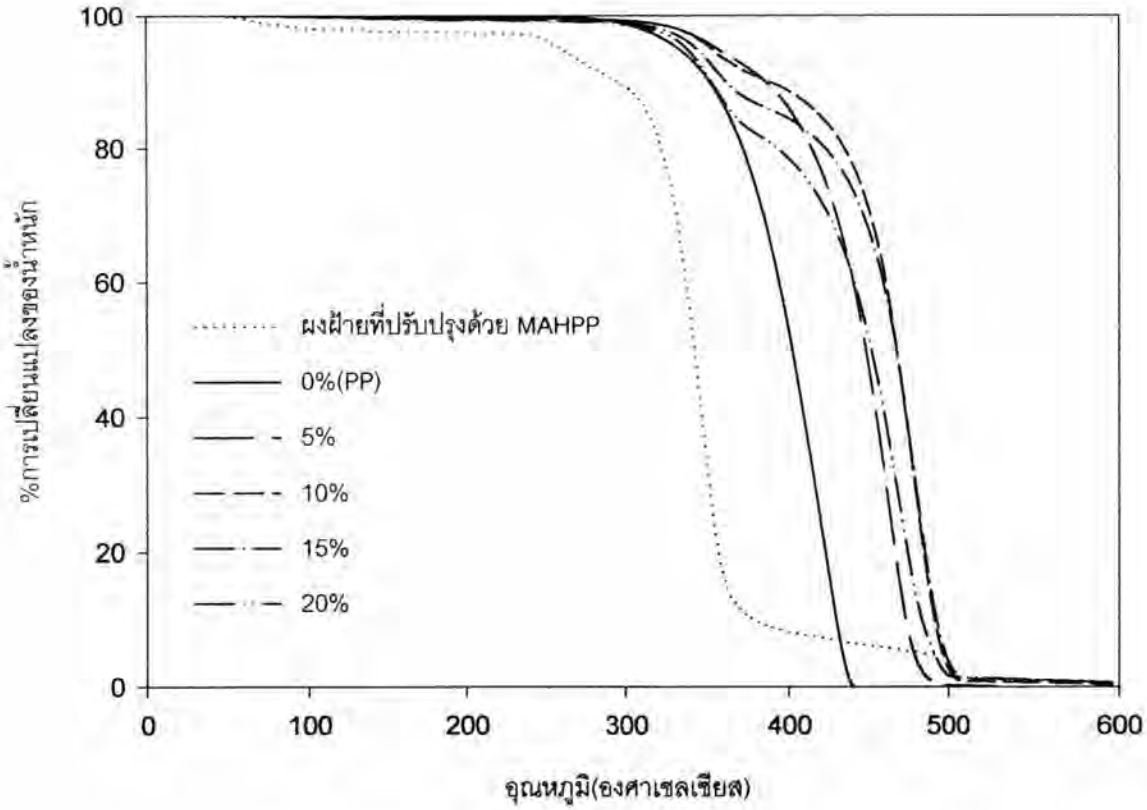
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิค 2 ชนิด คือ Thermogravimetric Analysis (TGA) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อความครอบคลุมในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก

4.2.4.1 Thermogravimetric Analysis (TGA)

วัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดถูกวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature, T_d) ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20°C /นาที โดยทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงฝ้ายและสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงผงฝ้ายที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุเชิงประกอบ

<u>ผลของปริมาณผงฝ้ายต่ออุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุเชิงประกอบ</u>

เนื่องจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลและความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ ทำให้พบว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานจริงมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกทำการวิเคราะห์เฉพาะวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้าย 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.29 และตารางที่ 4.12 พบว่าการเติมผงฝ้ายในปริมาณเพียงเล็กน้อยมีผลให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนักพบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรก (onset degradation temperature) เพิ่มขึ้นประมาณ 24°C แสดงว่าผงฝ้ายสามารถส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากการใส่ผงฝ้ายมีผลให้พันธะภายในโมเลกุล (intramolecular bonding) ของพอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้การทำลายพันธะดังกล่าวเพื่อจะสลายตัวเป็นไปได้ยากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนจึงสูงขึ้นนั่นเอง และจากรูปที่ 4.29 จะเห็นว่าทุกปริมาณผงฝ้ายมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรกที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นนั้นมิได้มีผลต่อความแข็งแรงของพันธะภายในโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 4.29 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้ายต่างๆ กัน

นอกจากนี้ยังพบว่าที่ปริมาณผงฝ้ายมากขึ้น เช่นที่ 10% โดยน้ำหนักจะสังเกตเห็นอุณหภูมิการสลายตัวแบ่งเป็นสองช่วง ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่ามีของผสมมากกว่าหนึ่งชนิดอยู่ด้วยกันในวัสดุเชิงประกอบ และยังพบว่าที่ปริมาณผงฝ้ายมากขึ้นจะเห็นการแบ่งของอุณหภูมิการสลายตัวได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งการสลายตัวในช่วงแรกนั้นเกิดขึ้นเนื่องมาจากผงฝ้าย ส่วนการสลายตัวในช่วงหลังเกิดจากพอลิโพรพิลีนนั่นเอง หลังจากนั้นกราฟจะมีการลดลงของน้ำหนักไปเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิการสลายตัวจุดสุดท้าย (final degradation temperature) และจากการสังเกตพบว่าพอลิโพรพิลีนไม่มีมวลหลงเหลือภายหลังอุณหภูมิการสลายตัวสุดท้ายที่ประมาณ 440°C ซึ่งอธิบายได้ว่าว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของธาตุคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำระเหยออกไปจนหมด ทั้งนี้เนื่องจากถ้วยอะลูมิเนียม (pan) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบ

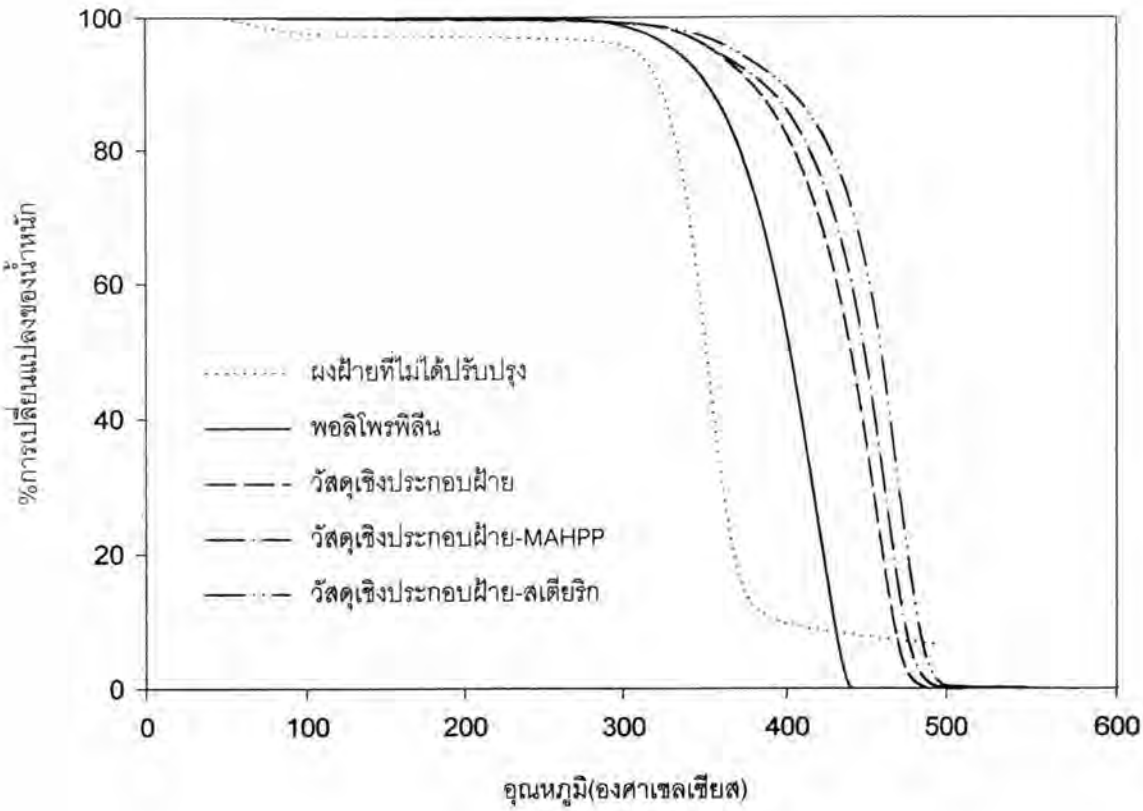
ระบบเปิดนั่นเอง แต่เมื่อสังเกตวัสดุเชิงประกอบ พบว่าที่ปริมาณผงฝ้ายมากขึ้นจะสังเกตเห็นว่ามีมวลหลงเหลือเล็กน้อยประมาณ 2% ภายหลังอุณหภูมิการสลายตัวจุดสุดท้ายที่ประมาณ 500 – 510°C โดยสามารถเริ่มสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่ปริมาณผงฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากปริมาณผงฝ้ายที่มากขึ้นจึงมีผลให้มีมวลของธาตุคาร์บอนภายหลังการเผาไหม้หรือขี้เถ้าของฝ้ายหลงเหลืออยู่

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้ายต่างๆ กัน

ปริมาณผงฝ้าย (% โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรก (°C)
0 (PP)	313.29
5	337.70
10	336.57
15	334.58
20	333.71

ผลของการปรับปรุงผงฝ้ายต่ออุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุเชิงประกอบ

ในการวิเคราะห์นี้ได้เลือกปริมาณผงฝ้ายที่ 5% โดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบที่มีผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกเป็นสารตัวเติม เนื่องจากที่ปริมาณผงฝ้ายดังกล่าววัสดุเชิงประกอบทุกชนิดมีสมบัติเชิงกลและความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ดีและสามารถยอมรับได้ ดังที่ได้ทดสอบไปแล้ว จากรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.13 พบว่าการเติมผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP และผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก ต่างก็สามารถทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงกว่าพอลิโพรพิลีน โดยที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนักของวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดนี้พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรกอยู่ที่ประมาณ 338 – 340°C ในขณะที่พอลิโพรพิลีนมีค่าประมาณ 313°C แสดงว่าผงฝ้ายทั้งที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงสามารถส่งผลให้พอลิโพรพิลีนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้นได



รูปที่ 4.30 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนและวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.30 ยังแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงผงฝ้ายด้วย MAHPP และกรดสเตียริกไม่มีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรก เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวของวัสดุเชิงประกอบทั้ง 2 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงพบว่า มีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรกเพิ่มขึ้นจากพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ ประมาณ 24 - 26°C ใกล้เคียงกัน แสดงว่าการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนนั้นมีผลมาจากผงฝ้ายที่ใส่เข้าไปเพียงอย่างเดียว หรืออาจกล่าวได้ว่าผงฝ้ายเท่านั้นที่มีผลให้พันธะภายในโมเลกุลของพอลิโพรพิลีนแข็งแรงขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาดูพบว่าผงฝ้ายทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนักจะไม่สามารถสังเกตเห็นการสลายตัวของวัสดุเชิงประกอบซึ่งแบ่งเป็นสองช่วงได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณผงฝ้ายมีน้อยมากจนทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนและวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก

ชนิดของวัสดุ	อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรก (^{o}C)
พอลิโพรพิลีน (PP)	313.289
วัสดุเชิงประกอบฝ้าย	337.677
วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP	337.700
วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก	339.343

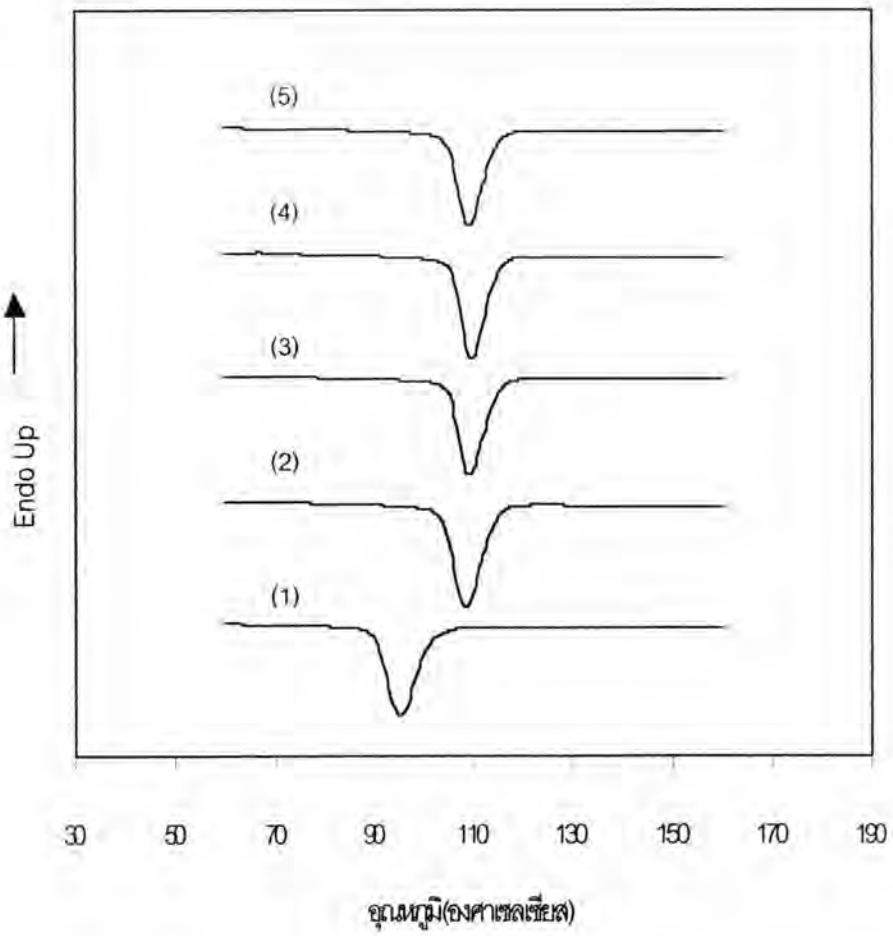
4.2.4.2 Differential scanning calorimeter (DSC)

วัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดถูกวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เพื่อหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อหาอุณหภูมิการหลอมเหลว 10^{o}C/นาที และรายงานผลในรูปของอุณหภูมิการหลอมเหลวในครั้งที่สอง (second heating temperature) ส่วนอุณหภูมิการเกิดผลึกใช้อัตราการลดอุณหภูมิ 20^{o}C/นาที โดยทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงฝ้ายและการปรับปรุงฝ้ายที่มีต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลว และพลังงานความร้อน (heat of fusion ,ΔH_f) ของการหลอมเหลว

<u>ผลของปริมาณผงฝ้ายต่ออุณหภูมิการเกิดผลึกและอุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุเชิงประกอบ</u>

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DSC นี้ได้เลือกทำการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้าย 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนักเช่นเดียวกับเทคนิค TGA จากรูปที่ 4.31 และตารางที่ 4.14 พบว่าเมื่อเติมผงฝ้ายลงไปเพียงเล็กน้อยมีผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของวัสดุเชิงประกอบสูงขึ้น โดยสังเกตเห็นว่าที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนักสามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงขึ้นประมาณ 13^{o}C และยังพบว่าทุกปริมาณของผงฝ้ายส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงขึ้นใกล้เคียงกันด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับ

พอลิโพรพิลีน ทั้งนี้แสดงว่าผงฝ้ายที่เติมลงไปในพอลิโพรพิลีนนั้นสามารถแสดงพฤติกรรมเป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ซึ่งจะประพฤติตัวเสมือนเป็นนิวคลีไอ (nuclei) หรือแกนของผลึก โดยสามารถชักนำให้เกิดการก่อผลึกในพอลิโพรพิลีนได้เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้เติมผงฝ้าย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณผงฝ้ายที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่มีผลต่อการก่อผลึกแต่อย่างใด



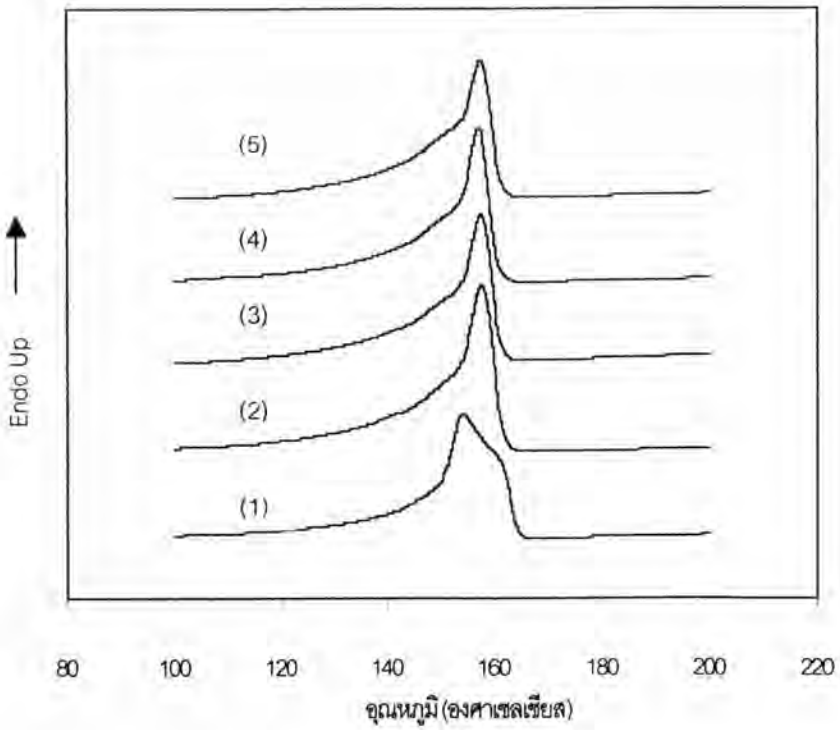
รูปที่ 4.31 อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้ายต่างๆ กัน (1) 0%(PP) (2) 5% (3) 10% (4) 15% และ (5) 20% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC ของวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้ายต่างๆ กัน

ปริมาณผงฝ้าย (% โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิการเกิดผลึก (^{o}C)	อุณหภูมิการหลอมเหลว (^{o}C)	ΔH_f ของการหลอมเหลว (J/g)		เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP (%)
			PP+ ฝ้าย	PP	
0 (PP)	95.27	154.37	76.04	76.04	33.06
5	108.60	157.70	77.62	81.71	35.53
10	109.27	157.53	74.38	82.64	35.93
15	109.93	157.20	69.90	82.23	35.75
20	109.27	157.53	67.30	84.13	36.58

เมื่อพิจารณา รูปที่ 4.32 คู่กับตารางที่ 4.14 พบว่าการเติมผงฝ้ายลงไปในพอลิโพรพิลีนเพียงเล็กน้อยมีผลให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น ซึ่งจากตารางจะเห็นว่าที่ปริมาณผงฝ้ายเพียง 5% โดยน้ำหนัก วัสดุเชิงประกอบมีอุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้นประมาณ 3^{o}C เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน และยังพบว่าทุกปริมาณของผงฝ้ายส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงขึ้นใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกับอุณหภูมิการสลายตัวที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าผงฝ้ายมีผลให้พันธะระหว่างโมเลกุล (intermolecular bonding) ของผลึกพอลิโพรพิลีนแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ส่งผลให้ต้องใช้ความร้อนสูงขึ้นในการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุล ซึ่งพบว่าปริมาณผงฝ้ายมิได้มีผลต่อความแข็งแรงของพันธะระหว่างโมเลกุลในผลึกพอลิโพรพิลีน หากแต่เป็นผลอันเนื่องมาจากผงฝ้ายที่เติมลงไปเท่านั้น

นอกจากนี้ยังพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนในวัสดุเชิงประกอบสูงขึ้นโดยสูงขึ้นจากพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้เติมผงฝ้ายประมาณ 2 – 3% ใกล้เคียงกันในทุกปริมาณผงฝ้าย สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องมาจากผงฝ้ายประพฤติตัวเป็นแกนของผลึก ชักนำให้พอลิโพรพิลีนก่อผลึก จึงมีผลให้ความเป็นผลึกทั้งหมดของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นด้วย แต่พบว่าปริมาณผงฝ้ายที่มากขึ้นนั้นไม่มีผลต่อความเป็นผลึกทั้งหมดของพอลิโพรพิลีน

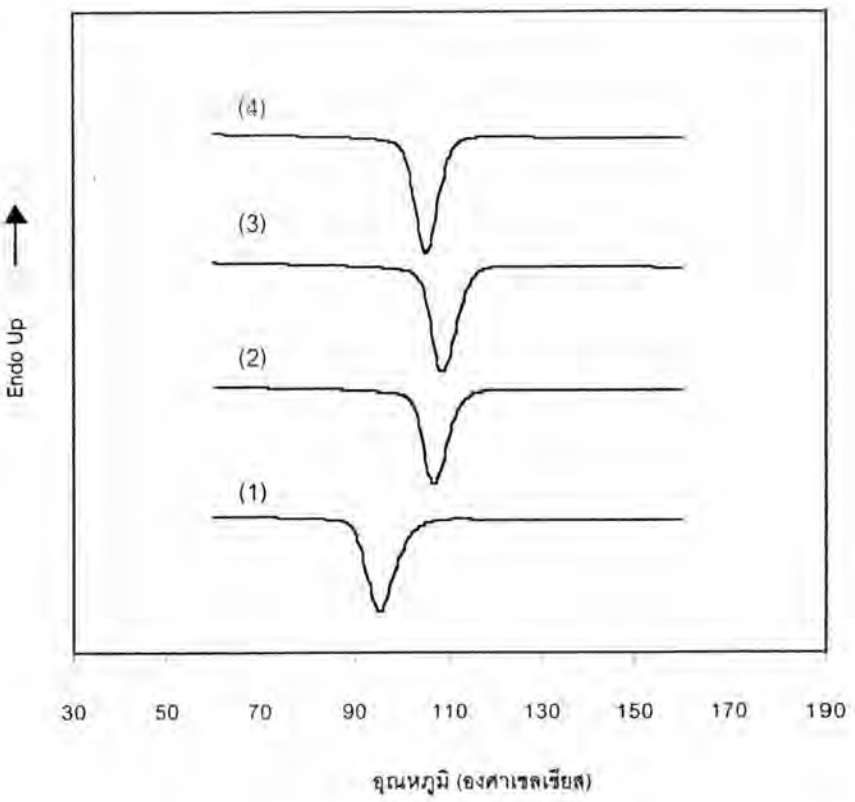


รูปที่ 4.32 อุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนและวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณผงฝ้ายต่างๆ กัน (1) 0%(PP) (2) 5% (3) 10% (4) 15% และ (5) 20% โดยน้ำหนัก

<u>ผลของการปรับปรุงผงฝ้ายต่ออุณหภูมิการเกิดผลึกและอุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุเชิงประกอบ</u>

สำหรับการศึกษาผลของการปรับปรุงผงฝ้ายด้วยการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DSC นี้ได้เลือกทำการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับเทคนิค TGA จากรูปที่ 4.33 และตารางที่ 4.15 พบว่าทั้งผงฝ้ายที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงมีผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกสูงขึ้นจากพอลิโพรพิลีนได้เช่นเดียวกัน แต่จะเห็นว่าผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงสุด รองลงมาคือผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกตามลำดับ แสดงว่าผงฝ้ายทั้ง 3 ชนิด สามารถแสดงพฤติกรรมเป็นสารก่อผลึกได้ เนื่องจากผงฝ้ายที่เติมลงไปในพอลิโพรพิลีนนั้นจะประพฤติตัวเสมือนเป็นแกนของผลึกซึ่งสามารถชักนำให้เกิดการก่อผลึกในพอลิโพรพิลีนได้เร็วขึ้น แต่สำหรับผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP มีผลให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการก่อผลึกได้เร็วกว่าผงฝ้ายชนิดอื่นเล็กน้อย คาดว่าเนื่องจากการปรับปรุงด้วย MAHPP ทำให้มีส่วนของสายโซ่โมเลกุลยาวของ

พอลิโพรพิลีนเกาะอยู่ที่ผิวหน้าผงฝ้าย ซึ่งสามารถดึงดูดกับสายโซโมเลกุลยาวในเมทริกซ์พอลิโพร-พิลีนได้ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบและก่อผลึกในบางส่วนของสายโซ่โมเลกุล (segmental crystallization) ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยเสริมให้ผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP มีการก่อผลึกได้เร็วกว่าผงฝ้ายชนิดอื่น ส่วนผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกนั้นพบว่ามีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีอุณหภูมิการเกิดผลึกต่ำกว่าผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP คาดว่าเนื่องจากความไม่เป็นระเบียบของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน 17 ตัวในกรดสเตียริซึ่งมีความยาวสั้นกว่าในสายโซ่โมเลกุลของ MAHPP มาก อาจมีผลต่อการชักนำในการก่อผลึกได้ไม่ดีเท่าการปรับปรุงด้วย MAHPP



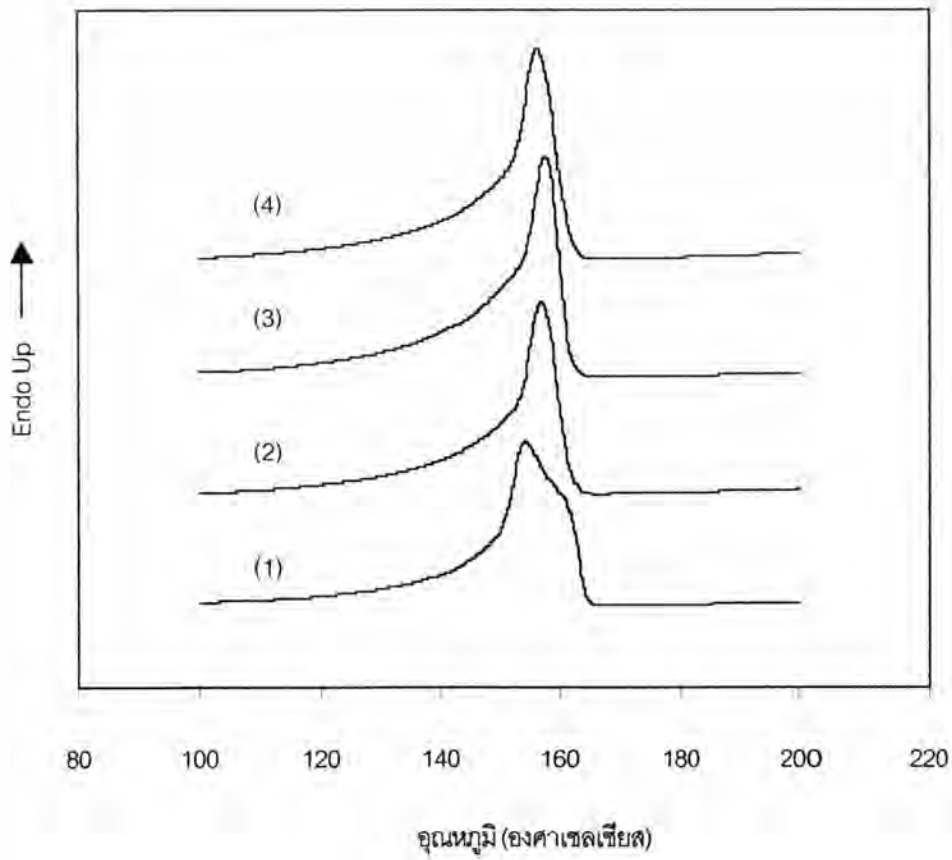
รูปที่ 4.33 อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนและวัสดุเชิงประกอบต่างชนิดกัน ที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก (1) พอลิโพรพิลีน (2) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย (3) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และ (4) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC ของวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก

ชนิดของตัวอย่าง	อุณหภูมิการเกิดผลึก (^{o}C)	อุณหภูมิการหลอมเหลว (^{o}C)	ΔH_f ของการหลอมเหลว (J/g)		เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP (%)
			PP+ ฝ้าย	PP	
พอลิโพรพิลีน (PP)	95.27	154.37	76.04	76.04	33.06
วัสดุเชิงประกอบฝ้าย	106.60	157.03	77.81	81.95	35.63
วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP	108.60	157.70	77.62	81.73	35.53
วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก	104.93	156.37	76.23	80.26	34.90

จากรูปที่ 4.34 และตารางที่ 4.15 พบว่า ผงฝ้ายทั้งที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงสามารถส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีอุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้นได้ใกล้เคียงกัน โดยเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเล็กน้อยประมาณ 2 - 3^{o}C และพบว่ามีผลสอดคล้องเช่นเดียวกับอุณหภูมิการสลายตัว ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การปรับปรุงไม่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงให้กับพันธะระหว่างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน โดยความแข็งแรงของพันธะระหว่างโมเลกุลของผลึกพอลิโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดเนื่องมาจากตัวของผงฝ้ายเอง

นอกจากนี้ยังพบว่าทั้งผงฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงต่างก็มีผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นได้เช่นเดียวกัน แสดงว่าความเป็นผลึกทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นของพอลิโพรพิลีนนั้นเกิดเนื่องมาจากผงฝ้ายที่ใส่เข้าไปเพียงอย่างเดียว ส่วนการปรับปรุงไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเป็นผลึกทั้งหมด



รูปที่ 4.34 อุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนและวัสดุเชิงประกอบต่างชนิดกัน ที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก (1) พอลิโพรพิลีน (2) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย (3) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP และ (4) วัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริก

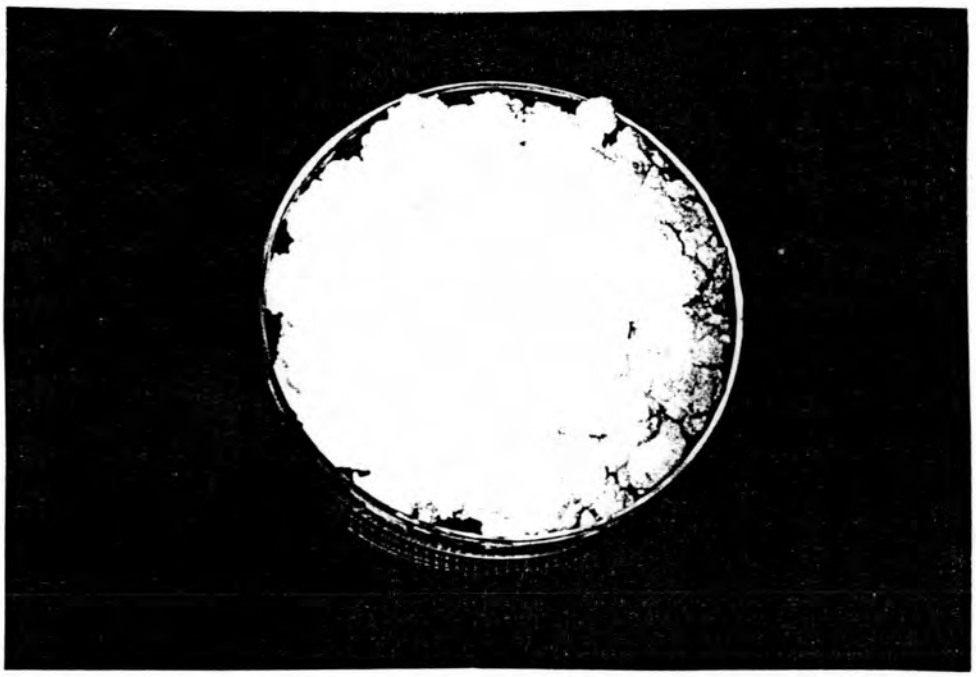
เป็นที่น่าสังเกตว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-สเตียริกนั้นมีอุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลว และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบฝ้าย และวัสดุเชิงประกอบฝ้าย-MAHPP เล็กน้อย คาดว่าเนื่องมาจากความไม่เป็นระเบียบของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน 17 ตัวในกรดสเตียริก ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่ถึงอย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอยฝ้าย-สเตียริกยังคงมีอุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลว และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงกว่าพอลิโพร-พิลีนที่ไม่ได้เติมผงฝ้าย ซึ่งเกิดจากผลของผงฝ้ายที่มีต่อพอลิโพรพิลีนนั่นเอง

4.3 สมบัติของสารตัวเติมฝ้ายจากการแปรสภาพทางเชิงกล

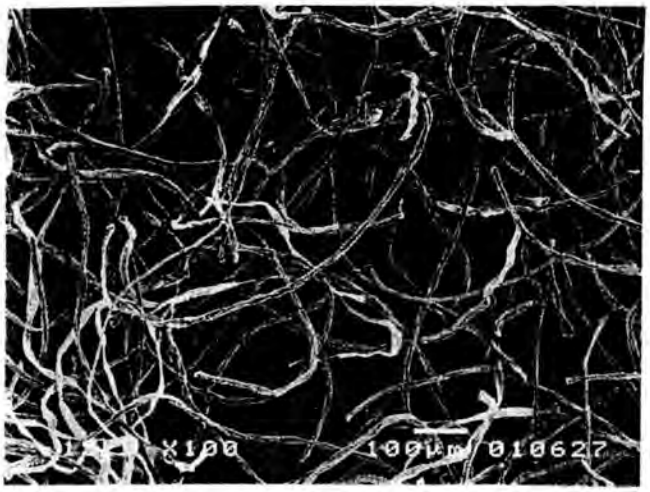
ในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงผลการทดลองของสารตัวเติมฝ้ายที่ได้จากการแปรสภาพเศษผ้าฝ้ายด้วยวิธีทางเชิงกลและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารตัวเติมฝ้ายดังกล่าว ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการแปรสภาพเศษผ้าฝ้ายผืน สองวิธีด้วยกัน คือวิธีทางเคมีและวิธีทางเชิงกล เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของสารตัวเติมฝ้ายที่ได้หลังการแปรสภาพ และเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนซึ่งทำจากสารตัวเติมฝ้ายลักษณะแตกต่างกันนี้ แต่พบว่าการแปรสภาพเศษผ้าฝ้ายด้วยวิธีทางเชิงกลทำได้ยากกว่าและต้องอาศัยระยะเวลานานกว่า ดังนั้นจึงได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากสารตัวเติมฝ้ายดังกล่าวเพียงหนึ่งตัวอย่างเท่านั้นเพื่อทำการเปรียบเทียบ โดยพิจารณาจากผลการทดลองของสารตัวเติมผงฝ้าย และวัสดุเชิงประกอบจากผงฝ้าย ซึ่งได้เลือกการปรับปรุงสารตัวเติมฝ้ายที่เหมาะสมที่สุดและเลือกปริมาณฝ้ายที่น้อยที่สุด คือ การปรับปรุงสารตัวเติมฝ้ายด้วย-MAHPP และปริมาณเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และทำการเตรียมได้เป็น "วัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก"

ลักษณะทางกายภาพ

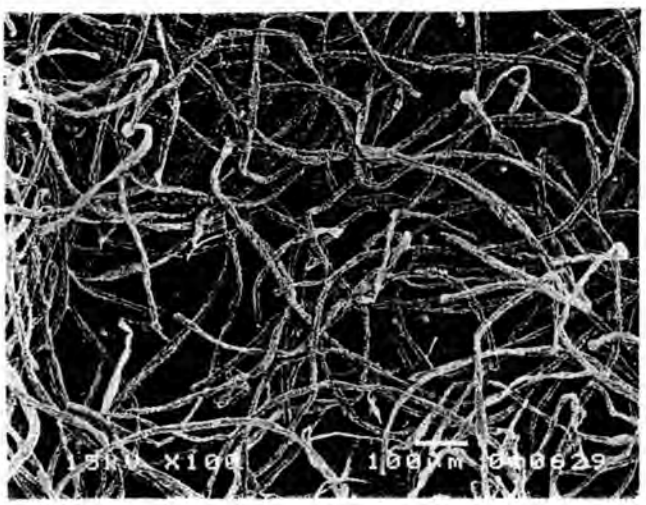
การแปรสภาพด้วยวิธีทางเชิงกลโดยการตัดเศษผ้าฝ้ายให้มีขนาดเล็ก แล้วนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นนั้น มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพจากลักษณะผ้าผืนไปเป็นเส้นใยสั้นๆ ดังรูปที่ 4.35 และเมื่อนำเส้นใยสั้นของฝ้ายดังกล่าวมาปรับปรุงพื้นผิวด้วย MAHPP แล้วนำส่วนของเส้นใยฝ้ายสั้น ๆ หรือที่เรียกว่า linter มาดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 4.36 ซึ่งเปรียบเทียบลักษณะโดยรวมของเส้นใยฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงและเส้นใยฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP พบว่า เส้นใยฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วย MAHPP มีเม็ดสารมากมายเกาะอยู่อย่างสม่ำเสมอโดยรอบเส้นใยฝ้ายทุกเส้น เช่นเดียวกับที่พบในผงฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP โดยลักษณะดังกล่าวนี้สามารถเห็นได้ชัดเจนขึ้น ในรูปที่ 4.37 ซึ่งเป็นภาพกำลังขยายสูง 1500 เท่า ของรูปที่ 4.37 จะเห็นว่าเส้นใยฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงมีลักษณะของผิวเส้นใยที่เรียบ ส่วนเส้นใยฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP จะมีลักษณะของผิวเส้นใยที่ขรุขระ ซึ่งแสดงถึงการมีสาร MAHPP เกาะติดอยู่ที่พื้นผิวของเส้นใยนั่นเอง



รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายของเส้นใยฝ้ายหลังการแปรสภาพด้วยวิธีทางเชิงกล

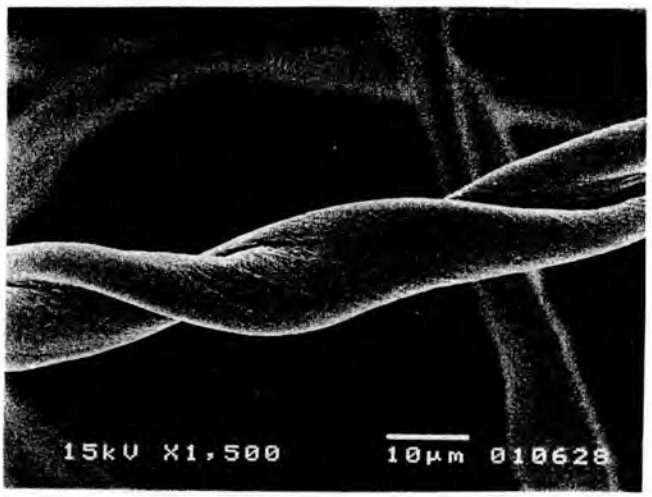


(1)

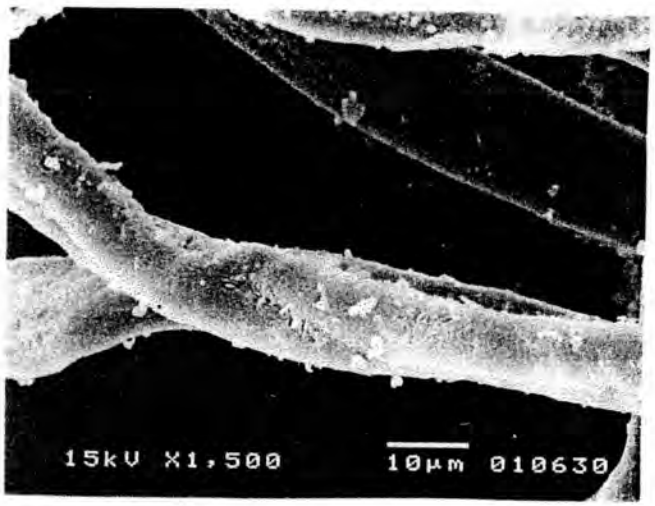


(2)

รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเส้นใยฝ้าย ที่กำลังขยาย 100 เท่า
(1) เส้นใยฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง และ (2) เส้นใยฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP



(1)



(2)

รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเส้นใยฝ้าย ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (1) เส้นใยฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุง และ (2) เส้นใยฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP

4.4 สมบัติของวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยฝ้าย

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่างานวิจัยในส่วนนี้ได้เตรียมวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยสั้นของฝ้ายเพียงตัวอย่างเดียวเท่านั้น คือ วัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้าย-MAHPP ที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก เพื่อทำการเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะของสารตัวเติมฝ้ายที่แตกต่างกันซึ่งได้มาจากการแปรสภาพเศษผ้าฝ้ายฝืนด้วยวิธีทางเคมีและทางเชิงกล ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โดยในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ 2 ชนิด ดังนี้

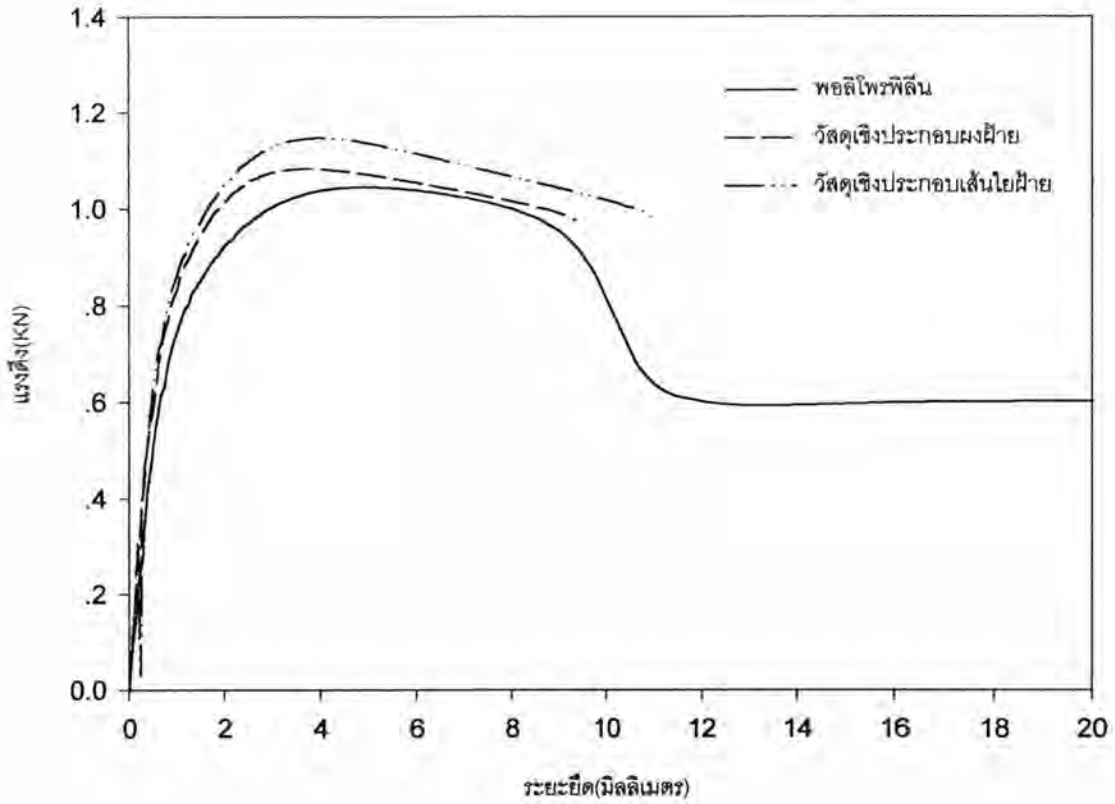
(1) วัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย คือ วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนซึ่งมีผงฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วย MAHPP เป็นสารตัวเติม ที่ปริมาณผงฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก

(2) วัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้าย คือ วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนซึ่งมีเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วยMAHPP เป็นสารตัวเติม ที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก

4.4.1 สมบัติเชิงกล

ผลของสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้าย อันได้แก่ ความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทก ได้มาจากการทดสอบตามมาตรฐาน ISO เช่นเดียวกับวัสดุเชิงประกอบผงฝ้ายทุกประการ จากรูปที่ 4.38 ซึ่งแสดงพฤติกรรมในการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างต่อแรงดึงที่มากระทำ พบว่ากราฟของวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้ายมีความชันของกราฟในช่วงแรกใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย แต่มากกว่าพอลิโพรพิลีน ซึ่งความชันดังกล่าวแสดงถึงความแข็งตึง (stiffness) ของวัสดุเชิงประกอบนั่นเอง และเมื่อพิจารณาต่อมาพบว่ากราฟของวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้ายมีจุดคราก (yield point) ที่ต่ำแหน่งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบผงฝ้ายเล็กน้อย แสดงว่าความทนแรงดึงหรือความแข็งแรง (tensile strength) ของวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้ายมากกว่าวัสดุเชิงประกอบผงฝ้ายไม่มากนัก นอกจากนี้ยังพบว่ากราฟของวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้ายมีการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกที่ยาวกว่าเล็กน้อยภายหลังจากจุดคราก และส่งผลให้มีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าในกราฟของวัสดุเชิงประกอบผงฝ้ายด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกและพื้นที่ใต้กราฟนี้จะแสดงถึงความอ่อนเหนียว (ductility) และความเหนียว (toughness) ตามลำดับ ดัง

นั้นอาจกล่าวได้ว่าวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้ายจะมีลักษณะของความอ่อนเหนียวและความเหนียวมากกว่าวัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย



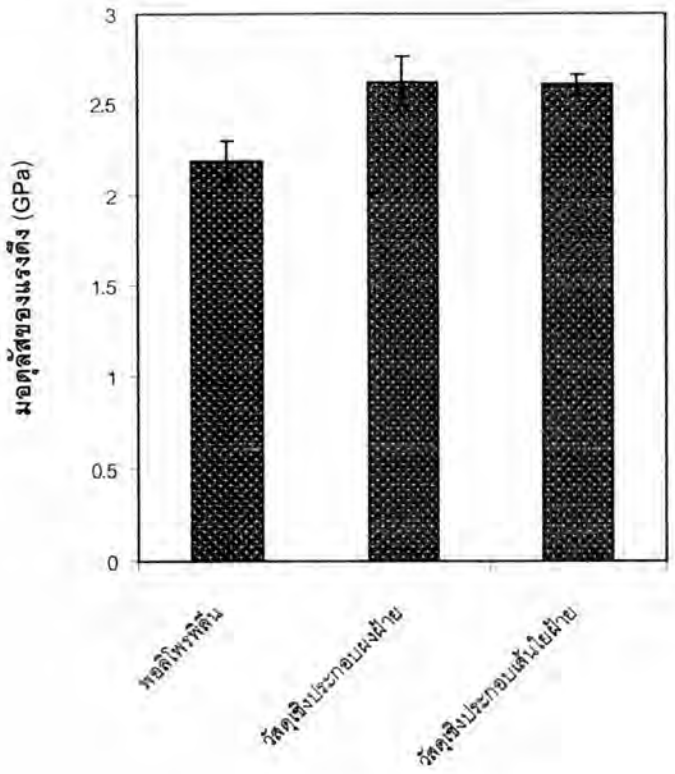
รูปที่ 4.38 กราฟความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบจากสารตัวเติมฝ้ายลักษณะแตกต่างกัน ที่ปริมาณฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก

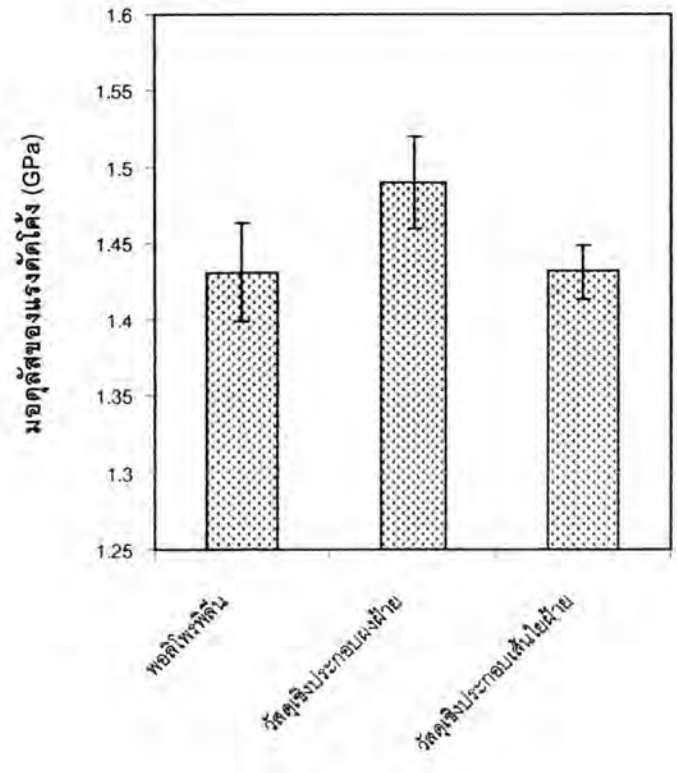
กล่าวโดยสรุปคือ จากกราฟการทดสอบความทนแรงดึงจะสามารถบอกได้ว่า วัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้ายนั้นมีความแข็งตึงที่ใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย แต่จะมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุเชิงประกอบผงฝ้ายเล็กน้อย และมีแนวโน้มของความอ่อนเหนียวและความเหนียวมากกว่าวัสดุเชิงประกอบผงฝ้ายอย่างเห็นได้ชัด

ผลกระทบของลักษณะสารตัวเติมฝ้ายต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

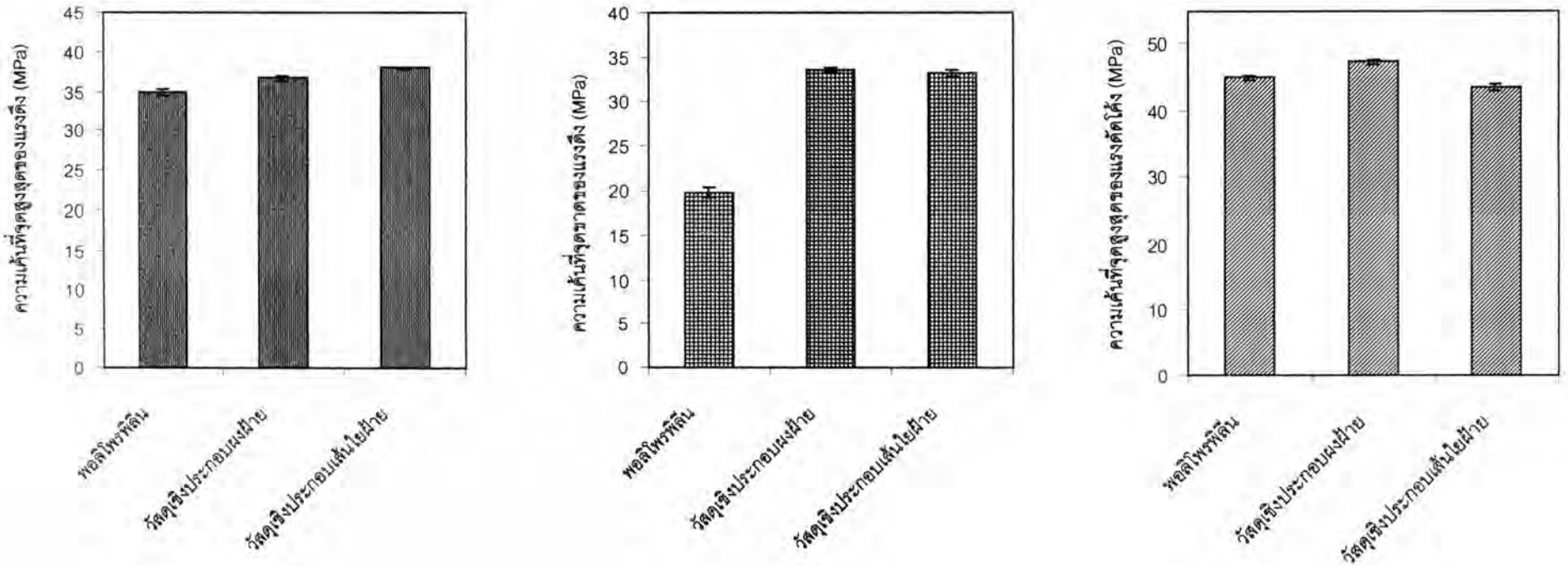
ลักษณะสารตัวเติมฝ้ายที่ใช้เติมในพอลิโพรพิลีนเพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบมี 2 ลักษณะดังกล่าวไปแล้ว คือ ลักษณะผงฝ้ายและเส้นใยฝ้าย จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าลักษณะของสารตัวเติมฝ้ายที่แตกต่างกันนั้นมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเพียงเล็กน้อย และพบว่าทั้งผงฝ้ายและเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณฝ้าย 5% โดยน้ำหนักนี้ มีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นจากพอลิโพรพิลีนไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณฝ้ายที่ต่ำเกินไป ซึ่งรูปที่ 4.39 (1) แสดงให้เห็นว่าผงฝ้ายและเส้นใยฝ้ายส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่ามอดุลัสของแรงดึงใกล้เคียงกัน โดยมีค่ามอดุลัสแรงดึงสูงกว่าพอลิโพรพิลีนเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณา รูปที่ 4.39 (2) จะเห็นว่า เส้นใยฝ้ายจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้งต่ำกว่าผงฝ้ายจนมีค่าใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีน แสดงว่าเส้นใยฝ้ายอาจจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความต้านทานแรงดัดโค้งลดลง ซึ่งแสดงถึงความแข็งตึงของวัสดุเชิงประกอบที่ลดลงนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย

รูปที่ 4.40 (1) – (3) แสดงค่าความเค้นของการทดสอบความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้ง พบว่าเส้นใยฝ้ายมีผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึงมากกว่าผงฝ้ายเล็กน้อย ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับ รูปที่ 4.38 กล่าวคือเส้นใยฝ้ายสามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความทนแรงดึงหรือความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าผงฝ้ายเล็กน้อย และจะเห็นว่าเส้นใยฝ้ายส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความเค้นที่จุดขาดของแรงดึงใกล้เคียงกับผงฝ้าย โดยวัสดุเชิงประกอบทั้งสองมีค่าความเค้นที่จุดขาดของแรงดึงเพิ่มขึ้นจากพอลิโพรพิลีนอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อพิจารณาการทดสอบแรงดัดโค้ง (รูปที่ 4.40 (3)) พบว่าเส้นใยฝ้ายกลับจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้งต่ำกว่าผงฝ้ายเล็กน้อยทำนองเดียวกับค่ามอดุลัสของแรงดัดโค้ง ซึ่งพฤติกรรมของผลการทดสอบแรงดัดโค้งดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.38 โดยคาดว่าเมื่อเติมเส้นใยฝ้ายลงไปนั้น ลักษณะของเส้นใยจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการยืดตัว (elongation) ได้มากกว่าลักษณะของผงฝ้าย ทำให้วัสดุเชิงประกอบเส้นใยมีความอ่อนเหนียวและความเหนียวมากกว่า ซึ่งความอ่อนเหนียวนี้ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบดังกล่าวสามารถทนต่อแรงดัดโค้งได้น้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย ดังจะเห็นได้จากการทดลองว่าวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้ายมีทั้งมอดุลัสแรงดัดโค้งและความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้งน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบผงฝ้ายนั่นเอง



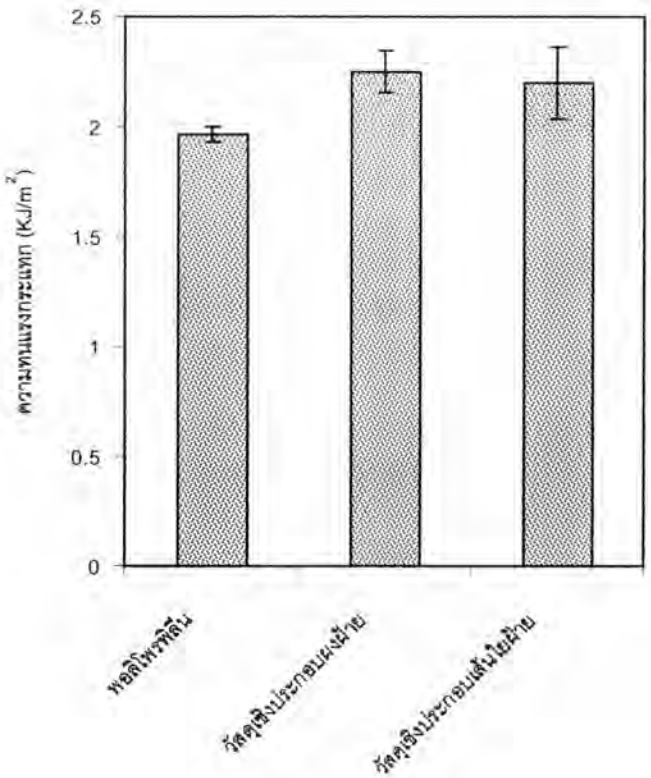


รูปที่ 4.39 ค่ามอดุลัสของวัสดุเชิงประกอบจากสารตัวเติมฝ้ายลักษณะแตกต่างกัน ที่แรงกระทำในการทดสอบ (1) และ (2) แรงดึง และ (3) แรงดัดโค้ง



รูปที่ 4.40 ค่าความเค้นของวัสดุเชิงประกอบจากสารตัวเติมฝ้ายลักษณะแตกต่างกัน ที่แรงกระทำในการทดสอบ (1) และ (2) แรงดึง และ(3) แรงดัดโค้ง

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความทนแรงกระแทกจากรูปที่ 4.41 พบว่า ผงฝ้ายและเส้นใยฝ้าย ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก มีผลต่อความทนแรงกระแทกคล้ายกัน คือส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่าพอลิโพรพิลีนเพียงเล็กน้อย หรืออาจกล่าวได้ว่าผงฝ้ายและเส้นใยฝ้ายมีความสามารถในการช่วยดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกที่กระทำกับวัสดุเชิงประกอบได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งสังเกตได้จากเส้นความผิดพลาดของวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้ายสูงใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบผงฝ้ายนั่นเอง



รูปที่ 4.41 ค่าความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบจากสารตัวเติมฝ้ายลักษณะแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.16 สมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนและวัสดุเชิงประกอบจากสารตัวเติมฝ้ายลักษณะแตกต่างกัน

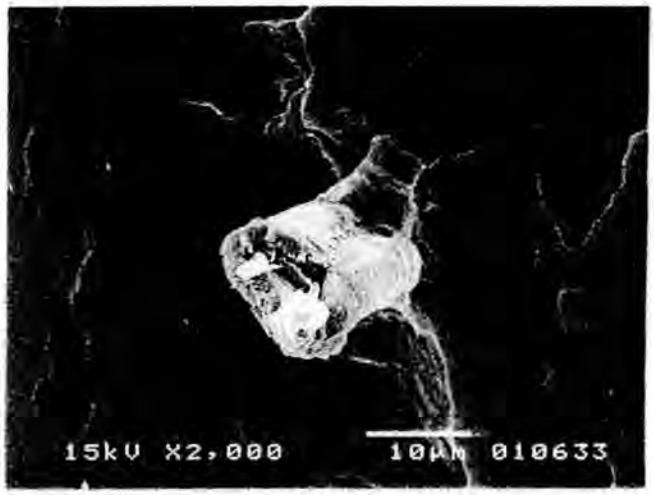
สมบัติเชิงกล	พอลิโพรพิลีน	วัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย	วัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้าย
มอดุลัสของแรงดึง (GPa)	2.19 $\pm$ 0.11	2.63 $\pm$ 0.14	2.61 $\pm$ 0.06
มอดุลัสของแรงดัดโค้ง (GPa)	1.43 $\pm$ 0.03	1.49 $\pm$ 0.03	1.43 $\pm$ 0.02
ความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดึง (MPa)	34.89 $\pm$ 0.50	36.74 $\pm$ 0.26	37.99 $\pm$ 0.15
ความเค้นที่จุดขาดของแรงดึง (MPa)	19.78 $\pm$ 0.56	33.57 $\pm$ 0.22	33.19 $\pm$ 0.41
ความเค้นที่จุดสูงสุดของแรงดัดโค้ง (MPa)	45.02 $\pm$ 0.32	47.36 $\pm$ 0.40	43.44 $\pm$ 0.80
ความทนแรงกระแทก (KJ/m^2)	1.97 $\pm$ 0.04	2.25 $\pm$ 0.10	2.20 $\pm$ 0.16

4.4.2 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวที่แตกหัก

ผลของลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวที่แตกหักวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้าย ได้มาจากการหักวัสดุเชิงประกอบในไนโตรเจนเหลวเช่นเดียวกับที่กระทำกับวัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย และทำการตรวจดูพื้นผิวที่แตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จากรูปที่ 4.42 (1) ซึ่งทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 350 เท่า พบว่าพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบมีความขรุขระและหยาบเนื่องจากเส้นใยฝ้ายที่เติมลงไป และพบลักษณะของเส้นใยฝ้ายที่โผล่ออกมาจากเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน แต่ไม่สังเกตพบรู ซึ่งเกิดการหลุดออกไปของฝ้ายมากนัก อาจเนื่องจากการปรับปรุงเส้นใยฝ้ายด้วย MAHPP ซึ่งช่วยให้เส้นใยฝ้ายสามารถยึดติดกับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนได้ดีเช่นเดียวกับกรณีของผงฝ้าย ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไปแล้วในหัวข้อ 4.2.2 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.42 (2) ซึ่งเป็นรูปกำลังขยายสูงของรูปที่ 4.42 (1) คือกำลังขยาย 2000 เท่า จะพบว่าลักษณะผิวของเส้นใยที่โผล่ออกมาจากเมทริกซ์นั้น มีความหยาบและขรุขระมากกว่าเส้นใยฝ้ายก่อนเติมในพอลิโพรพิลีน (รูปที่ 4.37(2)) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยฝ้ายที่ปรับปรุงด้วย MAHPP นั้นสามารถยึดติดได้ดีกับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน ทำให้มีพอลิโพรพิลีนติดออกมาด้วยตามผิวของเส้นใยด้วย

(1)

รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยฝ้าย ที่กำลังขยาย (1) 350 และ (2) 2000 เท่า

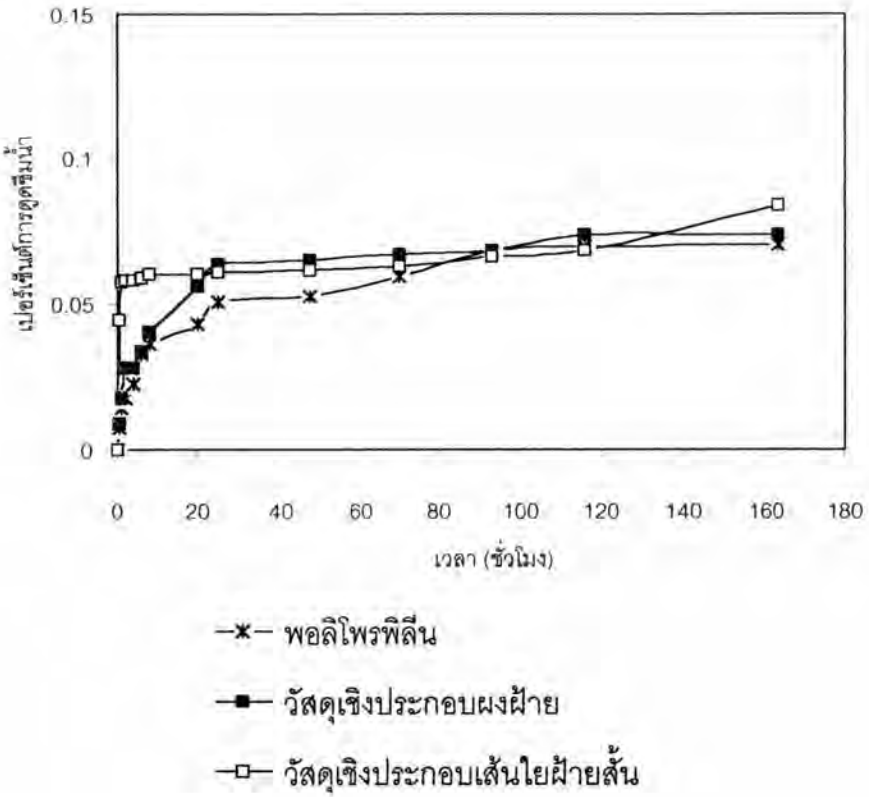


(2)

รูปที่ 4.42 (ต่อ)

4.4.3 ความสามารถในการดูดซึมน้ำ

ทำการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้ายตามมาตรฐาน ASTM D750-95 และใช้เวลาในการทดสอบทั้งหมด 163 ชั่วโมง เช่นเดียวกับวัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย และจากรูปที่ 4.43 พบว่าเส้นใยฝ้ายมีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่ำใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีนและวัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย ทั้งนี้อาจเนื่องจากการปรับปรุงผงฝ้ายและเส้นใยฝ้ายด้วยสาร MAHPP เหมือนกัน ซึ่งสามารถส่งผลให้สมบัติของเส้นใยฝ้ายซึ่งแต่เดิมมีความชอบน้ำ กลายเป็นเส้นใยฝ้ายที่มีลักษณะชอบน้ำลดลงได้ โดยเมื่อเวลาผ่านไป 163 ชั่วโมงพบว่า มีความสามารถในการดูดซึมน้ำเพียงประมาณ 0.08% แต่จากการสังเกตพบว่าในช่วง 1 ชั่วโมงแรก กราฟเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบเส้นใยฝ้ายได้มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าในวัสดุเชิงประกอบผงฝ้าย คาดว่าเกิดจากลักษณะโครงสร้างของเส้นใยซึ่งมีส่วนอสัณฐานอยู่มาก ทำให้เส้นใยฝ้ายยังคงส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้เร็วกว่าผงฝ้ายซึ่งลักษณะอสัณฐานได้ถูกทำลายไปแล้วเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากการแปรสภาพทางเคมีโดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเจือจางนั่นเอง



รูปที่ 4.43 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบจากสารตัวเติมฝ้ายลักษณะแตกต่างกัน ที่ปริมาณฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก