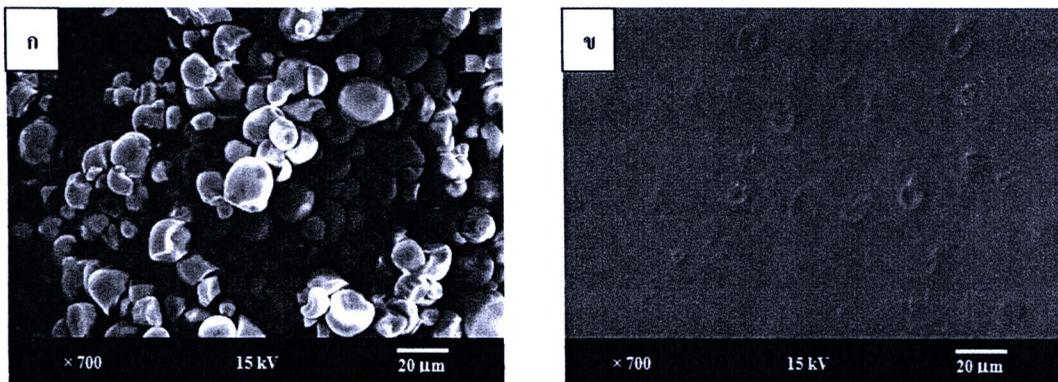


บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 โครงสร้างสมบัติของ TPS และ MTPS

4.1.1 สัณฐานวิทยาของ TPS และ MTPS

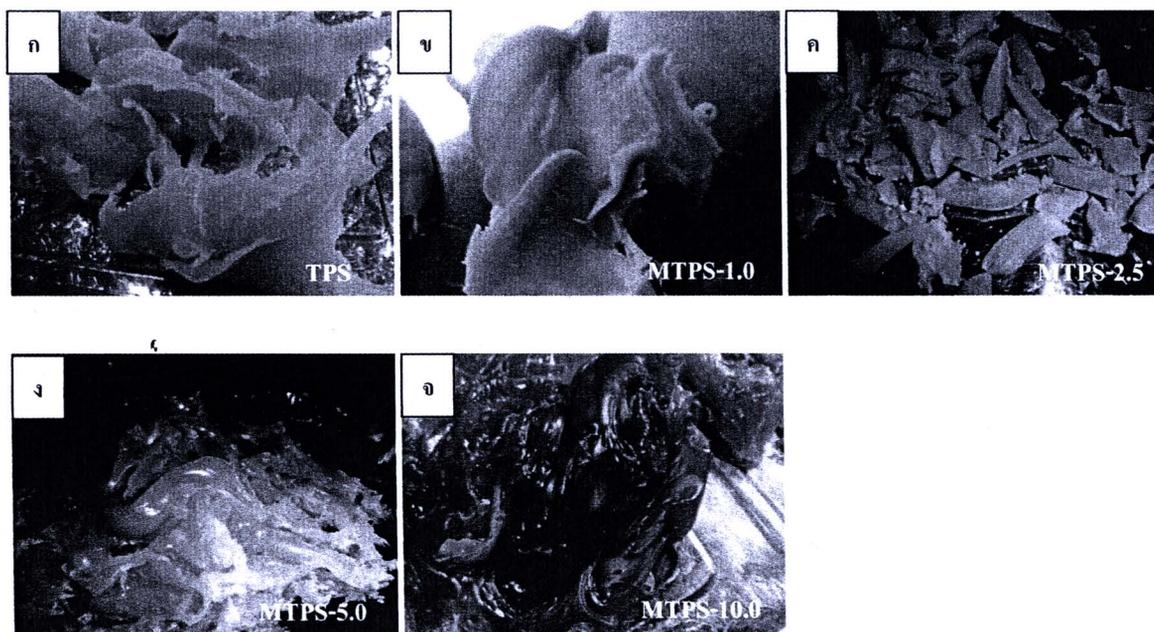
รูปที่ 4.1 แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งปกติและ TPS ที่ได้จากการเติมกลีเซอรอลร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าแป้งปกติมีลักษณะเป็นอนุภาคเม็ดกลม (รูปที่ 4.1ก) แต่เมื่อถูกผสมให้เป็น TPS พบว่าจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น (รูปที่ 4.1ข) เนื่องจากโมเลกุลของแป้งและกลีเซอรอลสามารถละลายเข้ากันได้และกลีเซอรอลสามารถทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแป้ง จึงทำให้โมเลกุลของแป้งสามารถเคลื่อนที่และหลอมเข้าหากัน [43]



รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ก) แป้งปกติ ข) TPS

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ของ TPS และ MTPS ที่ได้จากการกระบวนการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด จะเห็นได้ว่า MTPS มีสีเปลี่ยนไปจากสีขาวเป็นสีชมพูมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อถูกตัดแปลงด้วยการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณที่สูงขึ้น คาดว่าเกิดจากการที่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำปฏิกิริยามาเลชันกับแป้งบริเวณหมู่ไฮดรอกซี ส่งผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของแป้งมีพันธะคู่เกิดขึ้นบนโมเลกุลมากขึ้น จึงทำให้เกิดการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นต่างไปจากเดิม [48] นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งดังกล่าวมีลักษณะเหนียวเหนียวติดกันมากขึ้นเมื่อปริมาณ มาเลอิกแอนไฮไดรด์สูงขึ้น ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากการที่ความหนืดของแป้งลดลง อันเป็นผลมาจากหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่เกิดขึ้นบริเวณปลายสายโซ่ของ MTPS ดังรูปที่ 1.1 ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ของโมเลกุลแป้งผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากขึ้น [15]

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงเลือก MTPS-1.0 และ MTPS-2.5 ไปผสมในขั้นต่อไป เนื่องจากแป้งที่ตัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณสูง จะเกิดปัญหาการเหนียวติดและไม่สามารถตัดเป็นเม็ดเพื่อใช้ผสมในขั้นต่อไปได้



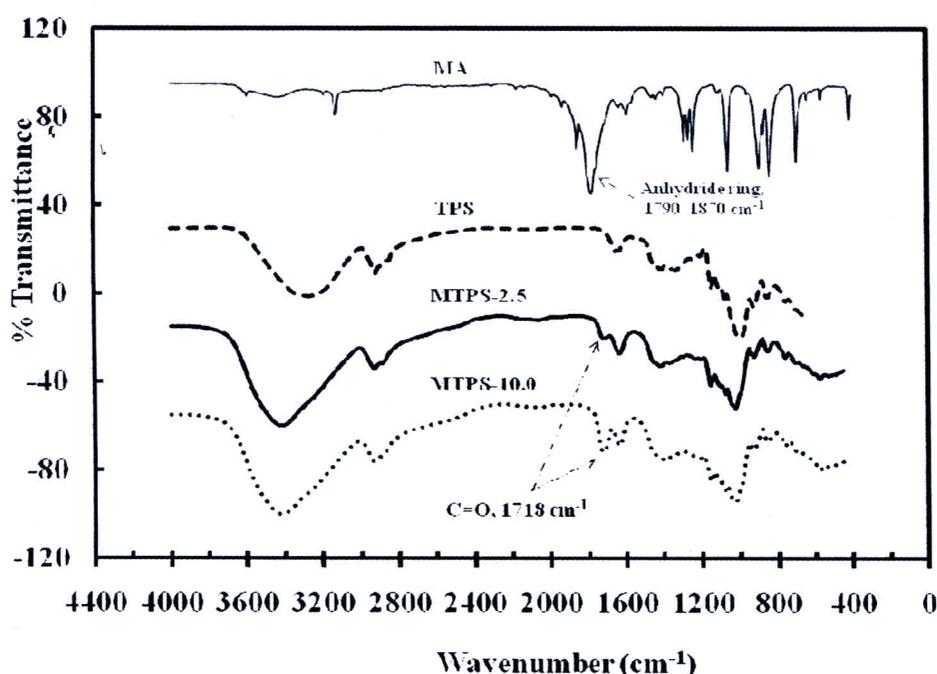
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ของ TPS ที่ตัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณต่างๆ
ก) 0 pph ข) 1.0 pph ค) 2.5 pph ง) 5.0 pph จ) 10.0 pph

4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของ MTPS

รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัม ATR-FTIR ของ TPS และ MTPS ซึ่งจากสเปกตรัมของ MTPS จะพบว่า มีพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1718 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะคาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ในหมู่มาเลอิกที่เกาะติดอยู่กับสายโซ่โมเลกุลของแป้งดังรูปที่ 1.1 ซึ่งพีคดังกล่าวไม่ปรากฏในสเปกตรัมของ TPS และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA)

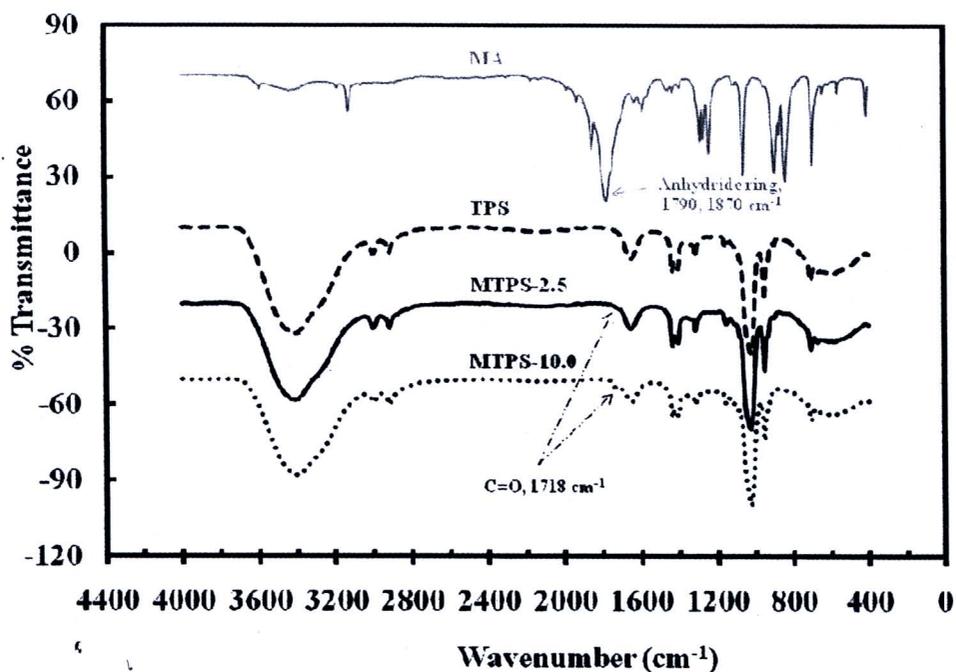
เมื่อเปรียบเทียบในเชิงสัดส่วนความสูงระหว่างพีคที่ตำแหน่ง 1718 cm^{-1} กับพีคที่ตำแหน่ง $2800 - 2980\text{ cm}^{-1}$ ของ Alkyl C-H Stretch ของโมเลกุลแป้ง ระหว่างสเปกตรัม ATR-FTIR ของ MTPS-10.0 และ MTPS-2.5 พบว่าความสูงพีคที่ตำแหน่ง 1718 cm^{-1} ของ MTPS-10.0 จะมีความสูงของพีคที่มากกว่า MTPS-2.5 ประมาณ 2 เท่า ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแป้งที่ผ่านการตัดแปลงโดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณสูงกว่า จะมีหมู่แทนที่ใน MTPS สูงกว่า

นอกจากนั้น เมื่อทำ curve fitting และทำการหาความสัมพันธ์ในเชิงสัดส่วนพื้นที่ใต้พีคของสเปกตรัม ATR-FTIR (รูปที่ 4.3) ภายใต้พีคระหว่าง O-H Stretch ($3200-3400\text{ cm}^{-1}$) ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ใต้พีค กับ Alkyl C-H Stretch ($2800-2980\text{ cm}^{-1}$) ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ใต้พีค พบว่า TPS, MTPS-2.5 และ MTPS-10.0 จะมีความสัมพันธ์ในเชิงสัดส่วนของพื้นที่เป็น 7.5, 13.9 และ 15.09 ตามลำดับ (รูปที่ ก1, ก2, ก3 ในภาคผนวก ก) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่ใต้พีค O-H Stretch มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการดัดแปลงแป้งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าแรงยึดเหนี่ยวของพันธะไฮโดรเจนภายในสายโซ่โมเลกุลของ MTPS มีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.3 สเปกตรัม ATR-FTIR ของ MA, TPS และ MTPS ที่ดัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ปริมาณ 2.5 pph (MTPS-2.5) และ 10.0 pph (MTPS-10.0)

ในทำนองเดียวกันรูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัม FTIR (transmission mode) ของ TPS และ MTPS ชนิดต่างๆ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าสเปกตรัมของ MTPS ปราศจากพีคที่ตำแหน่ง 1790 และ 1870 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ปราศจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ตกค้าง อนึ่ง มีข้อสังเกตว่าความสูงพีคที่ตำแหน่ง 1718 cm^{-1} ของ MTPS-2.5 และ MTPS-10.0 มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.3 คาดว่าเกิดจากการที่ตัวอย่างดังกล่าวถูกเก็บไว้นาน 8 เดือน ทำให้เกิดการขาดออกบริเวณปลายสายโซ่ที่มีหมู่แทนที่เป็นหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เกาะติดกับสายโซ่โมเลกุลของแป้งมากขึ้น



รูปที่ 4.4 สเปกตรัม FTIR (transmission mode) ของ MA, TPS และ MTPS ที่ดัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 2.5 pph (MTPS-2.5) และ 10.0 pph (MTPS-10.0) โดยแป็งคังกล่าว ถูกเก็บไว้นาน 8 เดือน

4.1.3 ปริมาณหมู่แทนที่ใน MTPS

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณหมู่แทนที่ในวัสดุชนิดต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณหมู่แทนที่ของ MTPS มากขึ้น เมื่อใช้สารมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในการดัดแปลงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากเทคนิค FTIR อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตว่า แป็งมันสำปะหลังกลีเซอรอลและ TPS มีค่าที่ได้จากการไตเตรตด้วยเช่นกัน ทั้งนี้สันนิษฐานว่าอาจเกิดจากหมู่ไฮดรอกซีที่อยู่บนโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุดังกล่าว

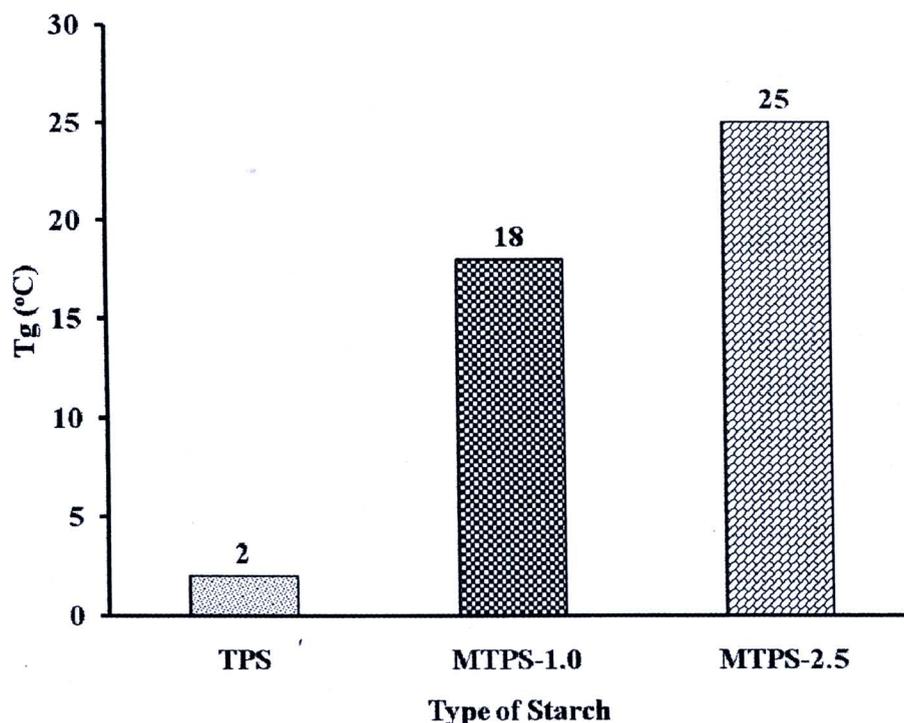
ตารางที่ 4.1 ปริมาณหมู่แทนที่ในวัสดุทดสอบชนิดต่างๆ

วัสดุทดสอบ	ปริมาณหมู่แทนที่ (DS Value)
แป็งมันสำปะหลัง	0.25 ± 0.04
กลีเซอรอล	0.27 ± 0.02
TPS	0.25 ± 0.03
MTPS-1.0	0.35 ± 0.05
MTPS-2.5	0.45 ± 0.03
MTPS-5.0	0.50 ± 0.01
MTPS-10.0	0.67 ± 0.09

4.1.4 สมบัติทางความร้อนของ MTPS

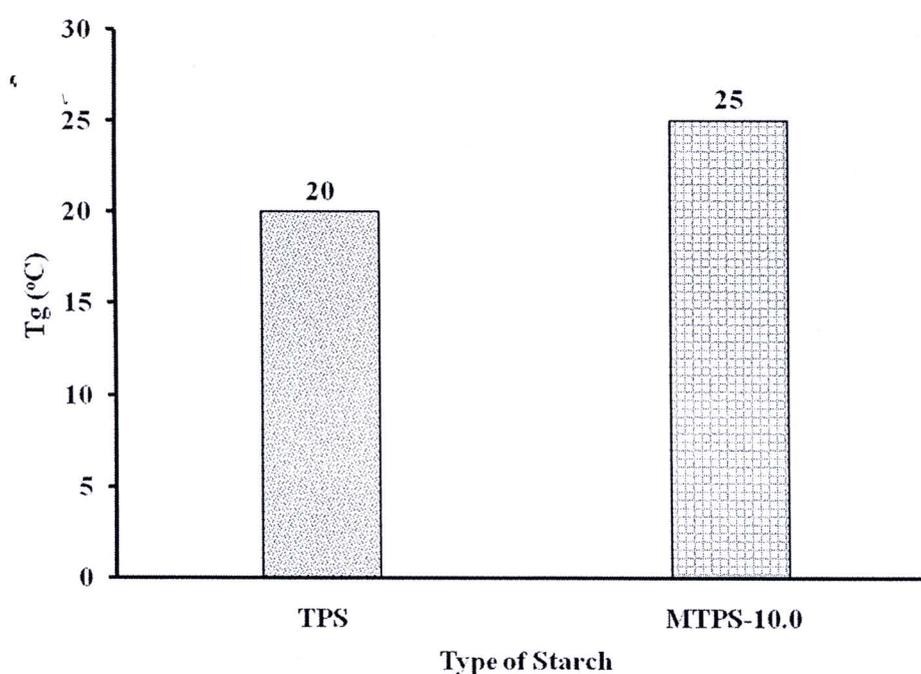
รูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ TPS, MTPS-1.0 และ MTPS-2.5 ที่ทำการทดสอบจากเทคนิค DMTA (โดยที่ลักษณะกราฟ DMTA เทอร์โมแกรมของแป้งชนิดต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ข1 ในภาคผนวก ข) จากแผนภูมิแท่งดังกล่าว พบว่าค่า T_g ของ TPS, MTPS-1.0 และ MTPS-2.5 มีค่าเท่ากับ 2, 18 และ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งค่า T_g ดังกล่าว มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่แทนที่หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าการเกิดปฏิกิริยามาเลชัน ส่งผลให้โมเลกุลของ TPS มี T_g สูงขึ้น เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลของแป้งมากขึ้น จึงส่งผลทำให้สายโซ่ของ MTPS สามารถเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นเมื่อได้รับความร้อน สำหรับพีคของ $\tan\delta$ (รูปที่ ข1) ที่ตำแหน่งประมาณ (-70) องศาเซลเซียส จะแสดงถึงค่า T_g ของกลีเซอรอล [51] ซึ่งสารดังกล่าวทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกในแป้งชนิดต่างๆ

ส่วนสารตัวอย่างชนิด MTPS-10.0 พบว่าไม่สามารถหาค่า T_g ด้วยเทคนิค DMTA ได้เนื่องจากว่า แป้งดังกล่าวมีความเหนียวเยิ้มติดกัน ทำให้ไม่สามารถเตรียมชิ้นงานทดสอบได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำชิ้นงานดังกล่าวไปทดสอบด้วยเทคนิค DSC ต่อไป



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ TPS และ MTPS ที่ผ่านการดัดแปลงด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 1.0 pph (MTPS-1.0) และ 2.5 pph (MTPS-2.5) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMTA

รูปที่ 4.6 แสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ MTPS-2.5 และ MTPS-10.0 ที่ทำการทดสอบด้วยเทคนิค DSC (โดยที่ลักษณะกราฟ DSC เทอร์โมแกรมของแป้งทั้งสองชนิดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ข2 ในภาคผนวก ข) จากแผนภูมิแท่งดังกล่าว พบว่าค่า T_g ของ MTPS-2.5 มีค่าประมาณ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า T_g ที่ทดสอบด้วยเทคนิค DMTA (รูปที่ 4.5) นอกจากนี้เมื่อทดสอบ MTPS-10.0 พบว่ามีค่า T_g สูงขึ้น ประมาณ 25 องศาเซลเซียส โดยจากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของ MTPS-2.5 กับ MTPS-10.0 พบว่า MTPS-2.5 จะมีหมู่แทนที่ (ที่เกิดจากการเปิดวงของกรดมาเลอิกแอนไฮไดรด์) น้อยกว่า จึงส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลของแป้งดังกล่าวน้อยกว่า



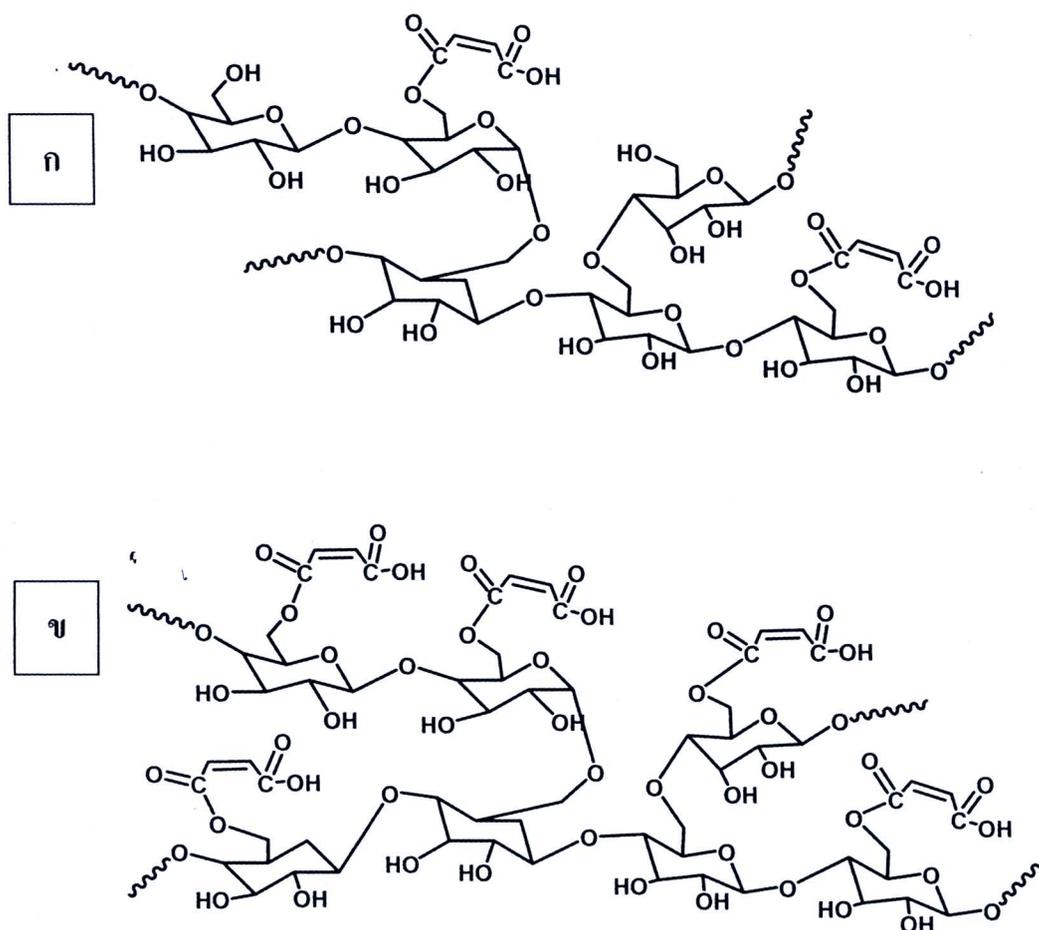
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ MTPS ที่ดัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ปริมาณ 2.5 pph (MTPS-2.5) และ 10.0 pph (MTPS-10.0) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC

4.1.5 การตรวจสอบการเกิดเจลในแป้งดัดแปลง

รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายสารละลายของ MTPS-1.0 ในตัวทำละลาย DMSO เป็นเวลา 12 ชั่วโมง อุณหภูมิห้อง พบว่า MTPS-1.0 สามารถละลายได้หมดโดยไม่เกิดเจล ทำนองเดียวกันกับ MTPS ชนิดต่างๆ (รูป ข3 ในภาคผนวก ข) ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าแป้งที่ผ่านการดัดแปลงด้วยปฏิกิริยามาเลอชันในที่นี้ ไม่เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ MTPS (รูปที่ 4.5 - 4.6) เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวภายในสายโซ่ที่มากขึ้น



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายสารละลาย MTPS-1.0 ในตัวทำละลาย DMSO เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง ก) ก่อนละลาย ข) หลังละลาย



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของ ก) MTPS-2.5 ข) MTPS-10.0

4.2 โครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

4.2.1 ผลของสัดส่วนผสม

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 ที่อุณหภูมิการผสม 190 องศาเซลเซียส เวลาผสม 12 นาที (สัดส่วนผสมต่างๆ) (โดยที่ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงกับความเครียดยืดดึงแสดงได้ดังรูปที่ ๓1 ในภาคผนวก ค) จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าการยืดตัวและค่าความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมจะมีแนวโน้มลดลง สาเหตุส่วนหนึ่งเชื่อว่าเมื่อปริมาณ MTPS มากขึ้น หมู่คาร์บอกซิลิก ณ บริเวณปลายสายโซ่ของแป้งดังกล่าว ก็จะมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งหมู่ดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการขาดออกของสายโซ่ PLA ระหว่างผสม โดยสังเกตได้จากค่าดัชนีการไหลที่เพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 สมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 ที่อุณหภูมิการผสม 190 องศาเซลเซียส เวลาผสม 12 นาที (สัดส่วนผสมต่างๆ)

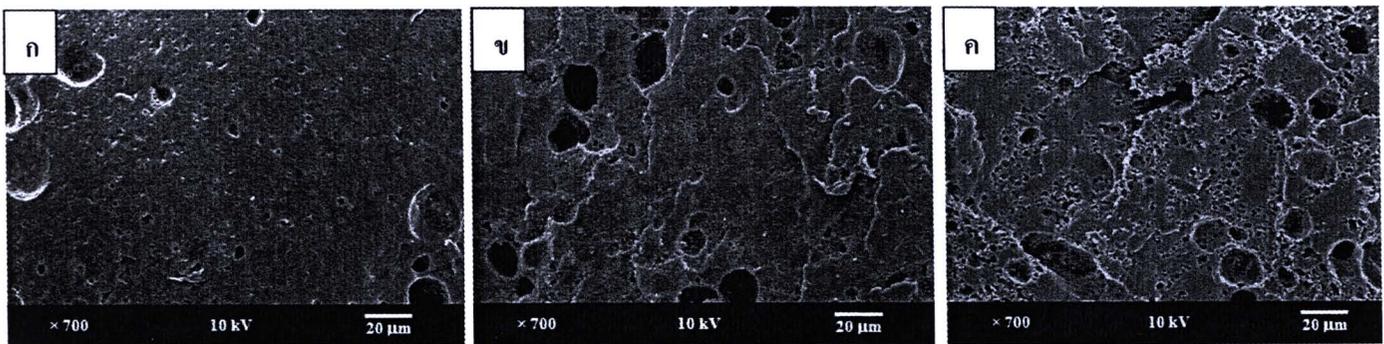
พอลิเมอร์ผสม	ปริมาณแป้ง (%)	ค่าทนแรงดึง (MPa)	ค่าการยืดตัว (%)	ค่ามอดุลัส (MPa)	ค่าความเหนียว (J)
PLA/MTPS-2.5	20	17.3 ± 0.57	555.7 ± 12.53	188.4 ± 19.85	5.3 ± 0.50
	30	13.0 ± 1.68	79.4 ± 19.65	141.0 ± 18.37	0.5 ± 0.08
	40	15.5 ± 0.89	55.9 ± 3.93	150.8 ± 7.65	0.4 ± 0.09

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 อุณหภูมิในการผสม 190 องศาเซลเซียส เวลาในการผสม 12 นาที ที่สัดส่วนผสมแตกต่างกัน

ปริมาณแป้ง (%)	ดัชนีการไหล (g /10 min)
0	8.76 ± 0.66
20	53.93 ± 2.01
30	57.00 ± 6.23
40	n/a

หมายเหตุ n/a หมายถึง ไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากพอลิเมอร์มีความหนืดต่ำมาก

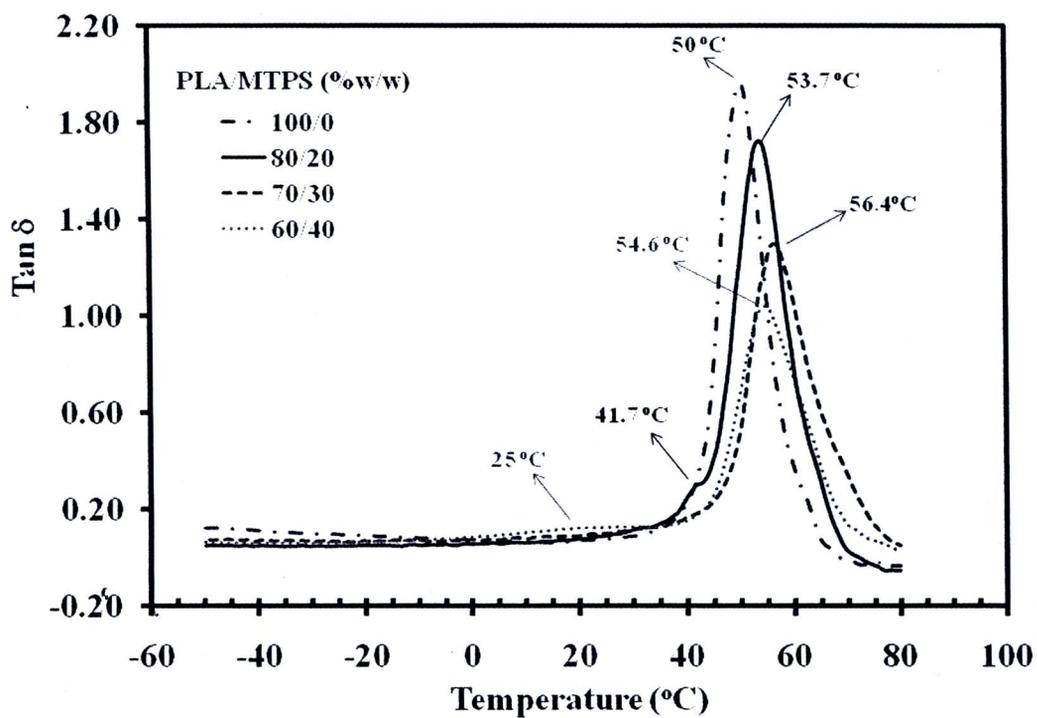
รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 ที่ได้จากการผสมที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เวลา 12 นาที ที่ปริมาณ MTPS ต่างๆ (ร้อยละ 20 - 40 โดยน้ำหนัก) จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมจะประกอบไปด้วยเฟสต่อเนื่องที่เป็น PLA คอมปาวด์และเฟสอนุภาคที่แสดงถึง MTPS (รูที่เกิดจากการสัคแบ่งด้วยกรด) กระจายตัวอยู่ นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ MTPS มากขึ้น ทำให้เฟสของแป้งดังกล่าวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจากขนาดอนุภาค 0.3 - 0.6 ไมโครเมตร เป็น 1.5 - 2.7 ไมโครเมตร เนื่องจาก PLA คอมปาวด์ไม่สามารถจะลดขนาดโมเลกุล MTPS ที่กระจายตัวให้เล็กลงได้ เพราะความหนืดของ PLA คอมปาวด์ต่ำลง ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากการขาดของสายโซ่โดยการชักนำของหมู่กรดใน MTPS ซึ่งข้อสันนิษฐานดังกล่าวสอดคล้องกับค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่สูงขึ้นตามปริมาณแป้งที่มากขึ้น (ตารางที่ 4.3) นอกจากนั้นขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นอาจเกิดจากการจับรวมตัวกันเองของ MTPS ด้วยเหตุผลต่างๆดังกล่าวข้างต้น จึงส่งผลทำให้สมบัติด้านการทนแรงดึงมีแนวโน้มที่ลดลงตามไปด้วย



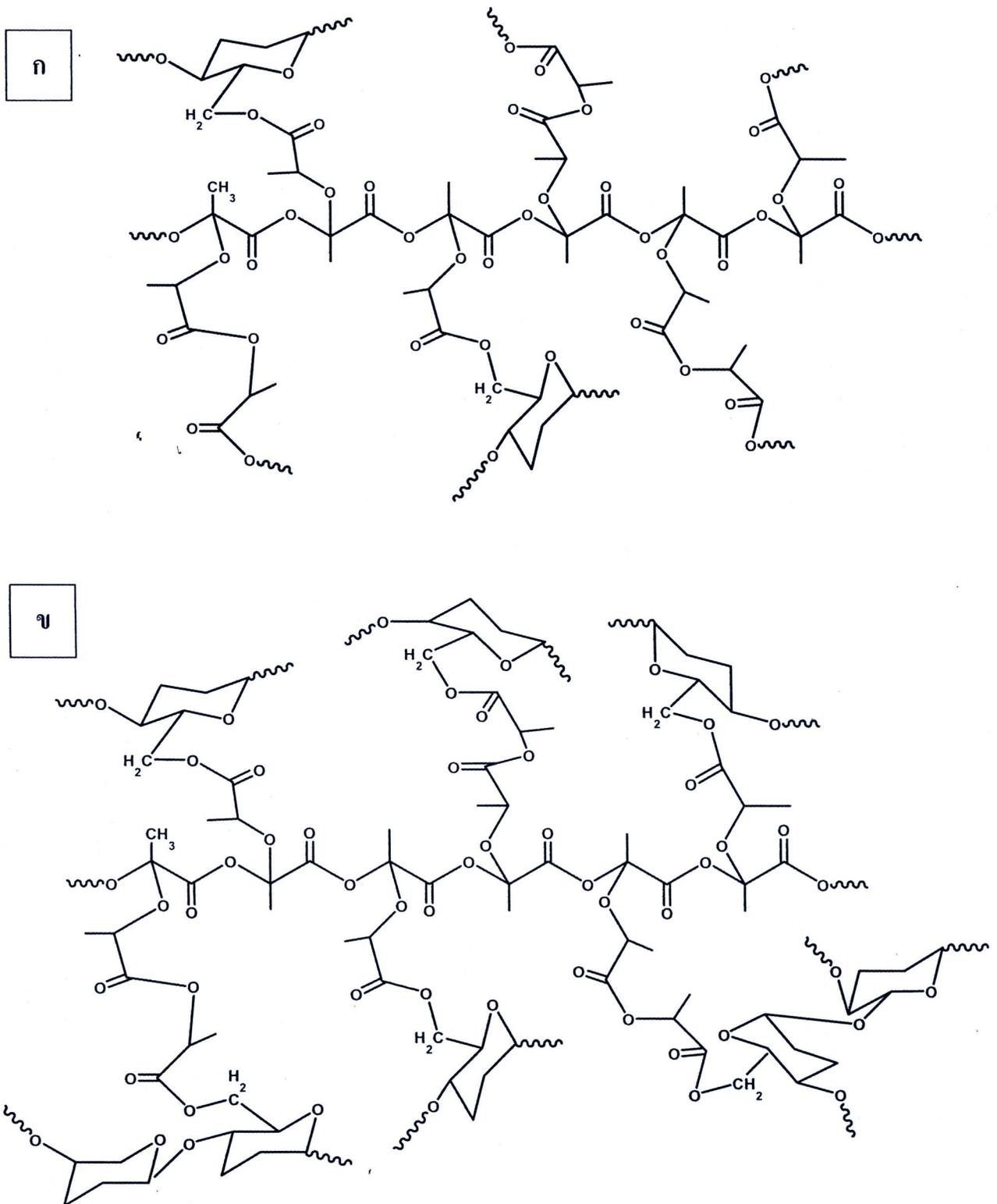
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เวลา 12 นาที ที่ปริมาณ MTPS-2.5 ต่างๆ
 ก) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ข) ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ค) ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.10 แสดง DMTA เทอร์โมแกรมของ PLA คอมปาวด์และพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จะเห็นได้ว่าเทอร์โมแกรมของ PLA คอมปาวด์ จะแสดงพีค $\tan\delta$ ปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเมื่อนำพอลิเมอร์ดังกล่าวผสมกับ MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 60/40) จะแสดงพีค $\tan\delta$ ปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 25 และ 54.6 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าเป็นอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ (T_g) ของ MTPS และพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟที่เกิดจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด (รูปที่ 4.11) ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตว่า เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนผสมของ MTPS-2.5 ลดลง จะไม่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นตัวแทนของเฟสแข็งในพอลิเมอร์ผสม ในขณะที่ความสูงของพีคในช่วง 53 – 57 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงตาม MTPS-2.5 ที่สัดส่วนสูงขึ้น คาดว่าเกิดจากโครงสร้างของพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟที่มีความซับซ้อน มีความเกาะเกาะและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างภายในโมเลกุลมากขึ้น (รูป 4.11 ข) จึงทำให้พอลิเมอร์ดังกล่าวมีความเป็นอิลาสติกเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่า $\tan\delta$ ลดลง นอกจากนั้นยังพบว่าจะมีพีคใหม่ปรากฏขึ้นในสัดส่วน MTPS ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ตำแหน่ง 41.7 องศาเซลเซียส คาดว่าเป็น T_g ของ PLA คอมปาวด์ที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและมีสายโซ่ที่สั้นลงเนื่องจากเกิดการขาดออกจากกันของสายโซ่พอลิเมอร์ดังกล่าว ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการไหลที่มากขึ้นดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.10 DMTA เทอร์โมแกรมของ PLA คอมปาวด์และพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 อุณหภูมิในการผสม 190 องศาเซลเซียส โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมของแป้งดัดแปลงที่ร้อยละ 0, 20, 30, 40 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.11 โครงสร้างผลิตภัณฑ์จากการผสมและทำปฏิกิริยาระหว่าง PLA กับ MTPS

ก) กรณีที่เกิดปฏิกิริยาการกราฟน้อย

ข) กรณีที่เกิดปฏิกิริยาการกราฟมากขึ้น

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรต (เพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน) พอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 ที่สัดส่วนผสมต่างๆ จะเห็นได้ว่าปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนแป้งที่มากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟมีแนวโน้มเกิดได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าปริมาณกรดที่ใช้ไตเตรตจะสัมพันธ์กับพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟและผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 1.2 ดังนั้นปริมาณกรดที่ลดลงจึงหมายถึงการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มากขึ้น (ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า T_g ที่สูงขึ้นเนื่องจากโครงสร้างมีความเกาะเกาะมากขึ้น) โดยจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว สามารถหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้จากปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตย้อนกลับห่มุ่กรดของผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้น โดยถ้าผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเกิดมากขึ้น ปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตก็จะวัดได้ปริมาณน้อยลง

ตารางที่ 4.4 ปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตเพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 เวลาในการผสม 12 นาที อุณหภูมิในการผสม 190 องศาเซลเซียส (ที่สัดส่วนผสมต่างๆ)

วัสดุทดสอบ	ปริมาณแป้ง (%)	ปริมาณกรด (ml)
PLA/MTPS-2.5	20	1.6 ± 0.07
	30	0.9 ± 0.01
	40	0.2 ± 0.05

จากผลการทดลองข้างต้น ทำให้สรุปได้ว่าการเติม MTPS ในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมโดยเฉพาะสมบัติด้านการยึดตัวและความเหนียว มีค่าต่ำมาก และค่าดัชนีการไหลที่สูงมาก (จนไม่สามารถวัดค่าได้ ดังในกรณีที่ใช้สัดส่วน MTPS-2.5 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก) ในขณะที่การเติมปริมาณ MTPS ที่น้อยเกินไป แม้ว่ามีสมบัติเชิงกลที่ดีแต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะลดต้นทุนวัตถุดิบของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/MTPS ดังนั้นในการดำเนินงานวิจัยในขั้นถัดไป จึงเลือกพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 สัดส่วน 70/30 มาทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการผสมต่อไป

4.2.2 ผลของอุณหภูมิในการผสม

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนการผสม 70/30) ที่เวลา 12 นาที (โดยที่ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับความเครียดยึดดึงแสดงได้ดังรูปที่ ค2 ในภาคผนวก ค) จากตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการผสมจาก 170

เป็น 190 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าการยึดตัวและค่าความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมลดลง ในขณะที่ค่าทนแรงดึงจะเพิ่มขึ้น โดยเชื่อว่าเกิดจาก 2 ปัจจัยคือ การขาดของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาระหว่างการผสม PLA กับ MTPS โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น เชื่อว่าการเกิดการขาดของสายโซ่มากขึ้น (สังเกตได้จากข้อมูลดัชนีการไหลในตารางที่ 4.6) ทำให้พอลิเมอร์มีการยึดตัวลดลง ในขณะเดียวกัน อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดมากขึ้น (ตารางที่ 4.7) ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีความซับซ้อน มีขนาดใหญ่ มีความเกาะเกาะและมีการเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่มากขึ้น (รูปที่ 4.11 ข) จึงส่งผลให้ความสูงของกราฟ (ความดันแรงดึง) สูงขึ้น

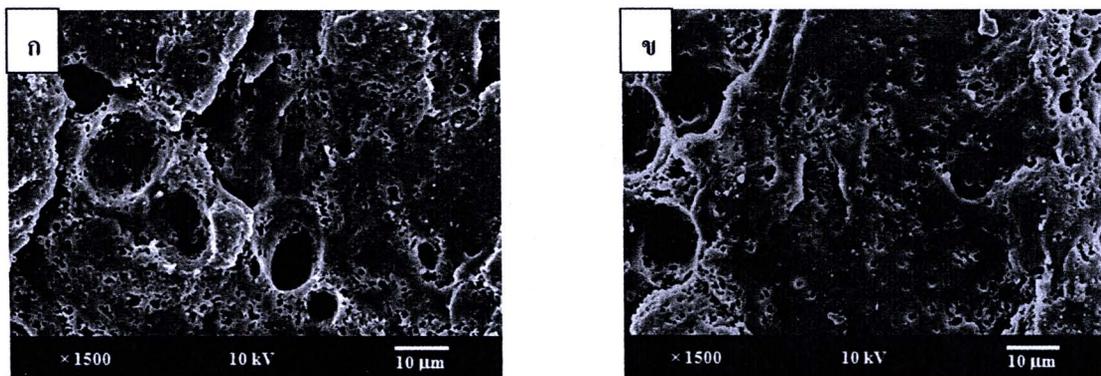
ตารางที่ 4.5 สมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) เวลาในการผสม 12 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ

พอลิเมอร์ผสม	อุณหภูมิในการผสม (°C)	ค่าทนแรงดึง (MPa)	ค่าการยึดตัว (%)	ค่ามอดุลัส (MPa)	ค่าความเหนียว(J)
PLA/MTPS-2.5	170	8.7 ± 0.48	212.1 ± 11.38	92.4 ± 4.86	1.2 ± 0.10
	190	13.0 ± 1.68	79.4 ± 19.65	141.0 ± 18.37	0.5 ± 0.08

ตารางที่ 4.6 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) เวลาผสม 12 นาที ที่อุณหภูมิผสมต่างๆ

อุณหภูมิในการผสม (°C)	ดัชนีการไหล (g /10 min)
170	29.04 ± 5.14
190	57.00 ± 6.23

รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว จะเห็นได้ว่าลักษณะผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส มีขนาดอนุภาค MTPS ประมาณ 0.5 – 1.5 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 190 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาคมีปริมาณลดลง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่ MTPS ผสมกับ PLA ได้เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟมากขึ้น ซึ่งเฟสอนุภาค MTPS จะไม่สามารถถูกสกัด (etching) ออกในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้มากขึ้น ดังตารางที่ 4.7 จึงทำให้จำนวนรูของ MTPS ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวลดลง

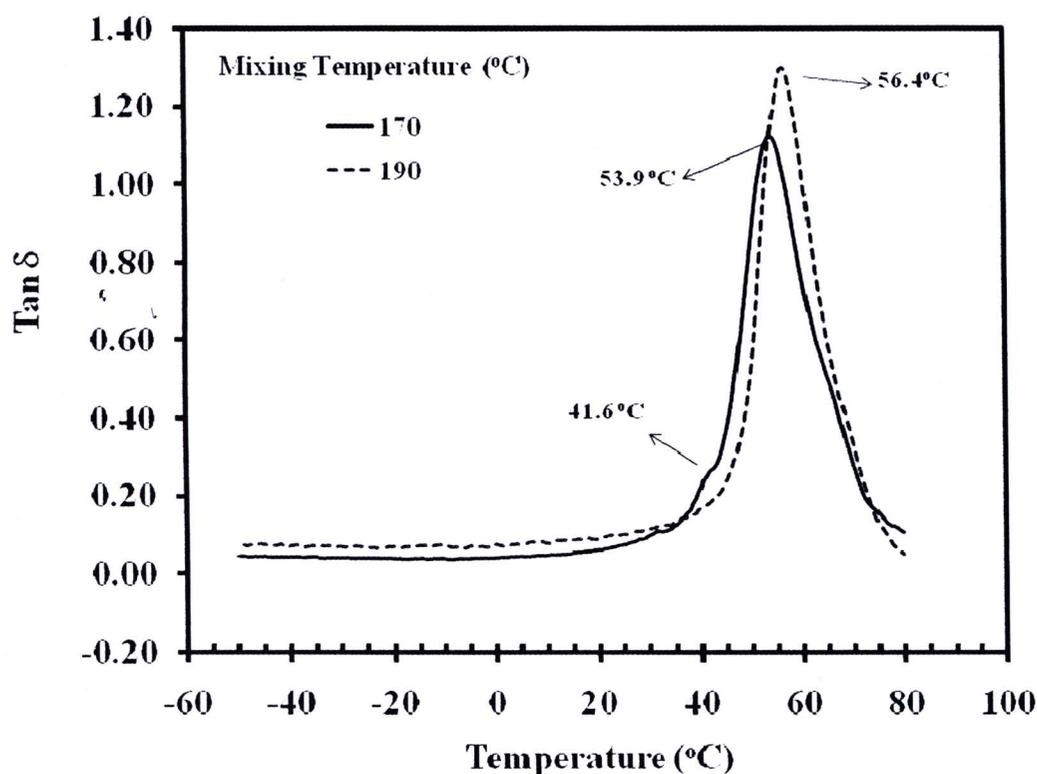


รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) เวลาผสม 12 นาที อุณหภูมิผสมต่างๆ ก) 170 องศาเซลเซียส ข) 190 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.13 แสดง DMTA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) ที่ผสมโดยใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จากเทอร์โมแกรมดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีพีค $\tan\delta$ เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 53.9 องศาเซลเซียส จึงคาดว่าเป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟที่โครงสร้างมีความซับซ้อนน้อย ขนาดโมเลกุลเล็กและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อย (รูปที่ 4.11 ก) และเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมเป็น 190 องศาเซลเซียส พบว่าตำแหน่งของพีค $\tan\delta$ มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยขยับไปที่ 56.4 องศาเซลเซียส จึงคาดว่าเกิดจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟมีขนาดโมเลกุลใหญ่ โครงสร้างมีความซับซ้อนและมีแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลมากขึ้น (รูปที่ 4.11 ข) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างพอลิเมอร์ดังกล่าวมากขึ้น สอดคล้องกับปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (ตารางที่ 4.7)

อนึ่ง มีข้อสังเกตว่าเทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จะปรากฏพีค $\tan\delta$ ขนาดเล็กที่อุณหภูมิประมาณ 41.6 องศาเซลเซียส จึงคาดว่าน่าจะเป็น T_g ของ PLA คอมปาวด์ที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยากับ MTPS และมีสายโซ่ที่สั้นลงเนื่องจากเกิดการขาดออกจากกันของสายโซ่ ส่งผลให้โครงสร้างของพอลิเมอร์ดังกล่าวมีความเกาะกันน้อยลง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการผสมเป็น 190 องศาเซลเซียส กลับพบว่าพีคดังกล่าวหายไป ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น สังเกตได้จากปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตลดลง (ตารางที่ 4.7) แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง PLA คอมปาวด์กับ MTPS สามารถเกิดได้มากกว่า ณ สภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้น

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาความสูงของพีค $\tan\delta$ ดังกล่าว พบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสม จาก 170 เป็น 190 องศาเซลเซียส คาดว่าเป็นผลจากการที่พอลิเมอร์มีความยาวโมเลกุลที่สั้นลง สังเกตได้จากค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น (ตารางที่ 4.6) ดังนั้นจึงทำให้พอลิเมอร์ดังกล่าวมีความเป็นออสติกน้อยลง



รูปที่ 4.13 DMTA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) โดยใช้ อุณหภูมิในการผสม 170 และ 190 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.7 ปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตเพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วน 70/30) เวลาผสม 12 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ

วัสดุทดสอบ	อุณหภูมิในการผสม (°C)	ปริมาณกรดที่เติม (ml)
PLA/MTPS-2.5	170	2.0 ± 0.1
	190	0.9 ± 0.01

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า ในการผสม PLA กับ MTSP ที่อุณหภูมิต่ำ (ในที่นี้คือ 170 องศาเซลเซียส) ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมโดยเฉพาะสมบัติด้านการยึดตัวและความเหนียว

มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นในการดำเนินงานวิจัยในขั้นถัดไป จึงเลือกพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) ที่ได้จากอุณหภูมิการผสมที่ 170 องศาเซลเซียส มาทำการศึกษาผลของเวลาในการผสม

4.2.3 ผลของเวลาในการผสม

ตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนการผสม 70/30) ที่อุณหภูมิผสม 170 องศาเซลเซียส (โดยที่ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงกับความเครียดยืดดึงแสดงได้ดังรูปที่ ค3 ในภาคผนวก ค) จากตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อลดเวลาในการผสมจาก 12 เป็น 7 นาที มีผลทำให้ค่าการยืดตัวและค่าความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ในขณะที่ค่าการทนแรงดึงมีค่าเท่าเดิม ซึ่งแตกต่างจากผลของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าการทนแรงดึง และสามารถอธิบายได้ว่าการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม ที่มากขึ้นเกิดจากการเสื่อมสภาพของ PLA คอมปาวด์มีปริมาณลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการไหลที่ลดลงตามเวลาที่สั้นลง ดังตารางที่ 4.9 ในขณะที่เมื่อพิจารณาค่าการทนแรงดึงพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งคาดว่าเกิดจากผลของเวลาส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟหรือส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้อยกว่าผลของอุณหภูมิ สังเกตได้จากปริมาณกรดที่ใช้ในการไทเตรตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ผสมที่ลดลง (ตารางที่ 4.10) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มากขึ้น

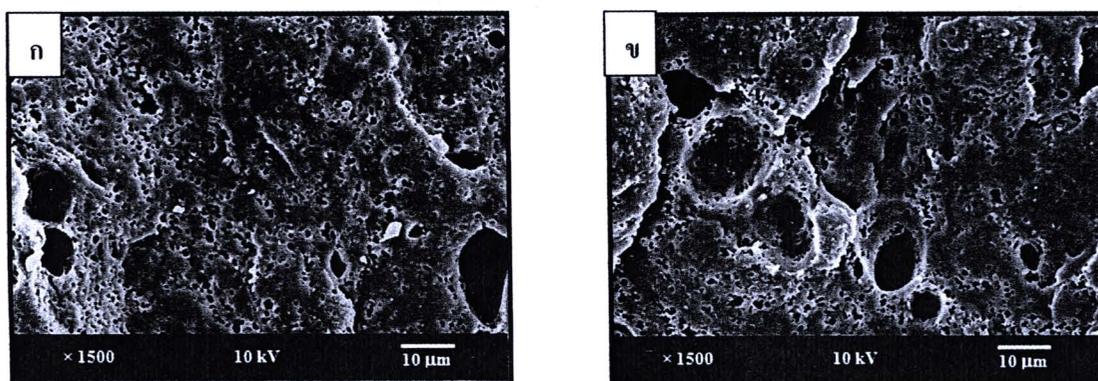
ตารางที่ 4.8 สมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) อุณหภูมิในการผสม 170 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการผสมต่างๆ

พอลิเมอร์ผสม	เวลาในการผสม (min)	ค่าทนแรงดึง (MPa)	ค่าการยืดตัว (%)	ค่ามอดุลัส (MPa)	ค่าความเหนียว (J)
PLA/MTPS-2.5	7	9.0 ± 0.78	376.9 ± 31.86	134.9 ± 13.77	2.3 ± 0.29
	12	8.7 ± 0.48	212.1 ± 11.38	92.4 ± 4.86	1.2 ± 0.10

ตารางที่ 4.9 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) อุณหภูมิในการผสม 170 องศาเซลเซียส ที่เวลาผสมต่างๆ

เวลาในการผสม (min)	ดัชนีการไหล (g /10 min)
7	21.41 ± 1.98
12	29.04 ± 5.14

ในด้านของสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.14) จะเห็นว่าพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมที่เวลา 7 และ 12 นาที มีขนาดอนุภาคของ MTPS ประมาณ 0.5–1.5 ไมโครเมตร กระจายตัวอยู่และเมื่อเวลาในการผสมมากขึ้นจะเห็นว่าปริมาณอนุภาคที่แสดงถึงเฟส MTPS มีปริมาณลดลงเล็กน้อย ซึ่งอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับผลของอุณหภูมิว่า เฟสของ MTPS ถูกสกัดออกได้น้อยลง (ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน) เนื่องจาก MTPS บางส่วนได้ถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มากขึ้นสอดคล้องกับข้อมูลจากการไตเตรตในตารางที่ 4.10 จึงทำให้เหลือจำนวนรูของ MTPS ที่ไม่ทำปฏิกิริยาลดลง อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าเวลา ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาน้อยเมื่อเทียบกับผลของอุณหภูมิ ดังนั้นจึงคาดว่าสมบัติการทนแรงดึงขึ้นอยู่กับผลของดัชนีการไหลเป็นส่วนมากดังตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) อุณหภูมิผสม 170 องศาเซลเซียส โดยศึกษาผลของเวลาในการผสมที่ ก) 7 นาที ข) 12 นาที

ตารางที่ 4.10 ปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตเพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วน 70/30) อุณหภูมิผสม 170 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ

วัสดุทดสอบ	เวลาในการผสม (min)	ปริมาณกรดที่เติม (ml)
PLA/MTPS-2.5	7	2.4 ± 0.07
	12	2.0 ± 0.1

อนึ่ง มีข้อสังเกตว่า จากผลการทดลองดัชนีการไหลและปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรต สังเกตเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบผลของเวลา (7 และ 12 นาที) กับผลของอุณหภูมิ (170 และ 190 องศาเซลเซียส) จะเห็นได้ว่าผลของเวลามีผลกระทบต่อค่าดัชนีการไหลและปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตน้อยกว่า

แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและการขาดออกจากกันของสายโซ่ PLA ที่สูงกว่า

จากผลการทดลองที่ผ่านมา ในส่วนของการศึกษาผลของสัดส่วนผสมหรือปริมาณ MTPS รวมทั้งผลของอุณหภูมิและเวลาในการผสมของ PLA/MTPS-2.5 สรุปได้ว่า สัดส่วนผสมที่ดีที่สุดในด้านของสมบัติเชิงกล คือ ร้อยละ 80/20 โดยน้ำหนัก (อุณหภูมิในการผสม 170 องศาเซลเซียส และเวลาในการผสม 7 นาที) อย่างไรก็ตาม การที่พอลิเมอร์ผสมมีปริมาณแป้งมากขึ้นจะช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบลงได้ ดังนั้นในการดำเนินงานวิจัยในขั้นถัดไป จึงเลือกพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 สัดส่วนผสม 70/30 โดยน้ำหนัก มาทำการศึกษาผลของชนิดหรือปริมาณหมู่แทนที่ใน MTPS

4.2.4 ผลของชนิดหรือปริมาณหมู่แทนที่ใน MTPS

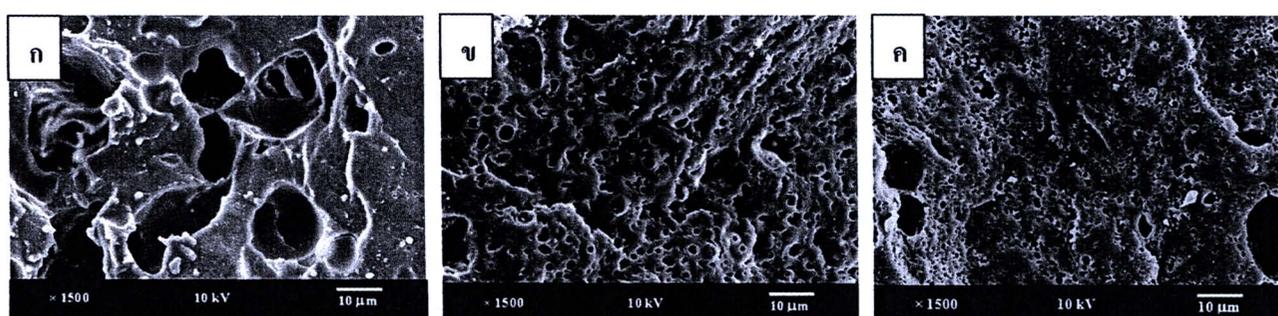
ตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/TPS, PLA/MTPS-1.0 และ PLA/MTPS-2.5 (โดยที่ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงกับความเครียดยืดดึงแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ในภาคผนวก ก) จากตารางพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของแป้งจาก TPS เป็น MTPS-1.0 และ MTPS-2.5 จะทำให้ค่าการยืดตัวและค่าความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น แต่ค่าการทนแรงดึงลดลง ซึ่งคาดว่าเป็นผลเนื่องมาจากพอลิเมอร์ผสม PLA/ MTPS มีความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง MTPS-2.5) สังเกตได้จากภาพถ่าย SEM (รูปที่ 4.15) ซึ่งจะเห็นว่าแป้งมีขนาดเล็กกลง ในขณะที่ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมทั้ง 3 ชนิด ไม่แตกต่างกันมากนัก (ตารางที่ 4.12) แสดงให้เห็นว่าปริมาณหมู่แทนที่ใน MTPS ที่ต่างกันในที่นี้ มีผลต่อการเกิด การขาดออกจากกันของสายโซ่ PLA ไม่มากนักเมื่อเทียบกับผลของเวลาและอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.11 สมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/TPS, PLA/MTPS-1.0 และ PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) อุณหภูมิผสม 170 องศาเซลเซียส เวลาผสม 7 นาที

พอลิเมอร์ผสม	ค่าทนแรงดึง (MPa)	ค่าการยืดตัว (%)	ค่ามอดุลัส (MPa)	ค่าความเหนียว (J)
PLA/TPS	22.44 ± 0.65	22.17 ± 0.45	213.34 ± 13.69	0.32 ± 0.02
PLA/MTPS-1.0	12.82 ± 1.66	63.60 ± 4.81	179.80 ± 16.70	0.87 ± 0.07
PLA/MTPS-2.5	9.0 ± 0.78	376.9 ± 31.86	134.9 ± 13.77	2.3 ± 0.29

ตารางที่ 4.12 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA คอมปาวด์กับ TPS ชนิดต่างๆ (สัดส่วนผสม 70/30)

วัสดุทดสอบ	ดัชนีการไหล (g /10 min)
PLA/TPS	16.54 ± 1.11
PLA/MTPS-1.0	16.64 ± 1.83
PLA/MTPS-2.5	21.41 ± 1.98



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม ก) PLA/TPS, ข) PLA/MTPS-1.0 และ ค) PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) อุณหภูมิผสม 170 องศาเซลเซียส เวลาในการผสม 7 นาที

ตารางที่ 4.13 แสดงปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆ พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/ MTPS-2.5 มีปริมาณกรดน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/ MTPS-1.0 สะท้อนให้เห็นถึงระดับการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มากกว่า ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก MTPS-2.5 มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากกว่า (รูปที่ 4.11 ข) จึงมีโอกาในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมากกว่า

ตารางที่ 4.13 ปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตเพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆ (สัดส่วน 70/30) อุณหภูมิผสม 170 องศาเซลเซียส ที่เวลา 7 นาที

วัสดุทดสอบ	ปริมาณกรดที่เติม (ml)
PLA/MTPS -1.0	3.5 ± 0.1
PLA/MTPS-2.5	2.4 ± 0 .07