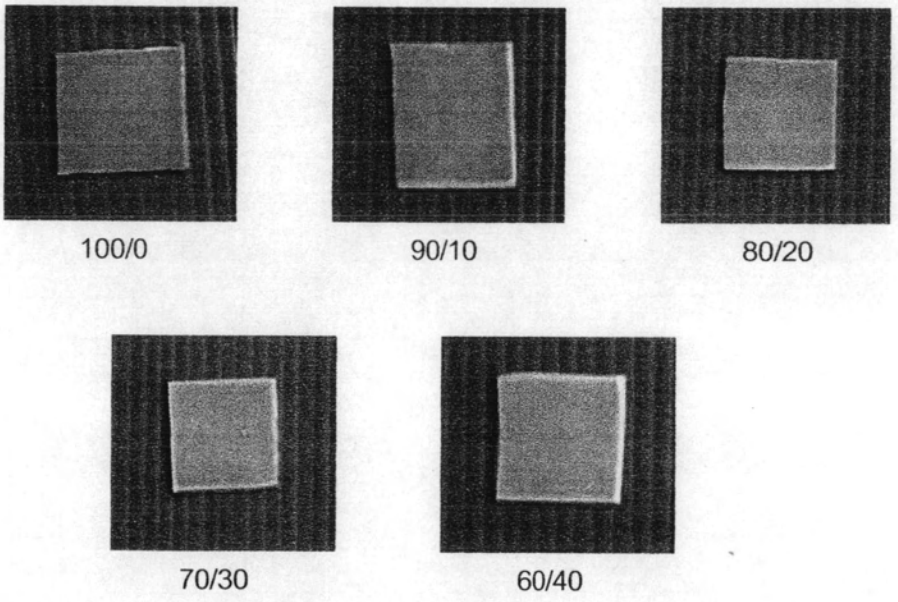
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะของชิ้นงาน

4.1.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 ซึ่งทำการผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง และอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นให้มีความหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแบบ

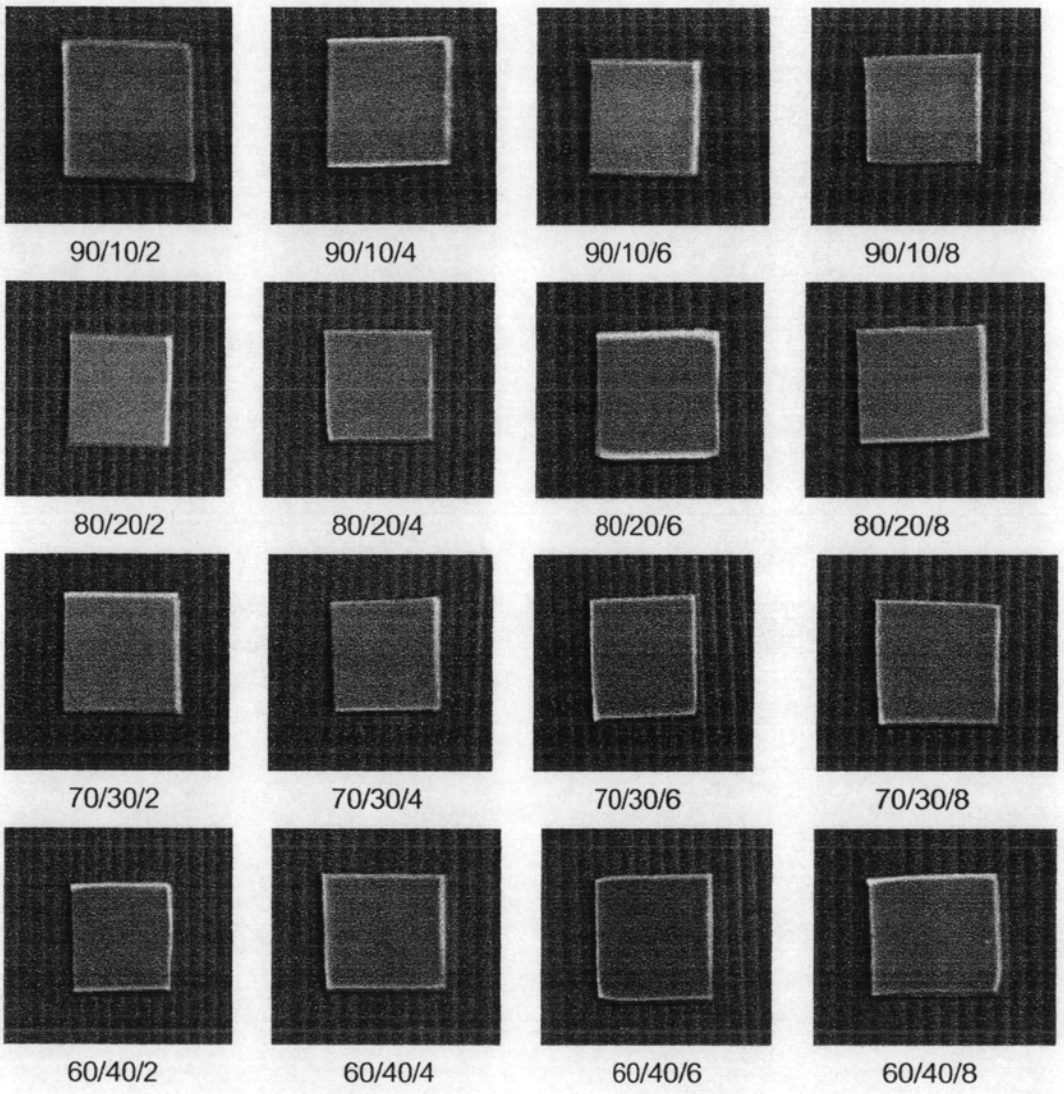


รูปที่ 4.1 ลักษณะชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานของ LDPE มีลักษณะค่อนข้างโปร่งแสง แต่เมื่อผสมแป้งมันสำปะหลังเข้าไป พบว่า ชิ้นงานมีสีเหลืองและทึบแสงมากขึ้นตามปริมาณแป้งที่ใส่เข้าไป

4.1.2 นาโนคอมพอสิตของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะชิ้นงานของนาโนคอมพอสิตระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ ที่ทำการผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง และอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นให้มีความหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแบบ โดยนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมัน-สำปะหลังทุกอัตราส่วน (100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40) มาผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 2, 4, 6 และ 8 ส่วนต่อพอลิเมอร์ผสม 100 ส่วน (phr)

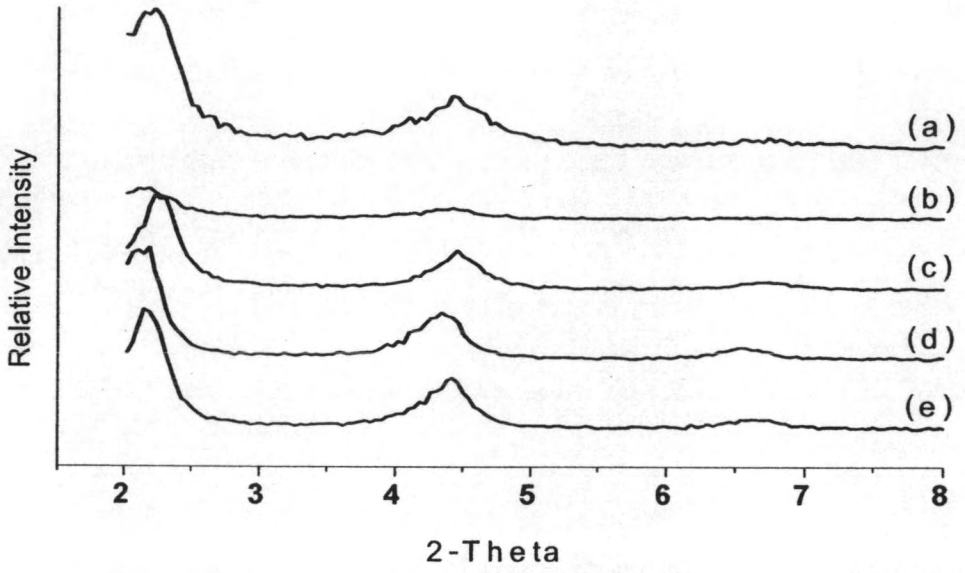


รูปที่ 4.2 ลักษณะชิ้นงานของนาโนคอมพอสิตระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ

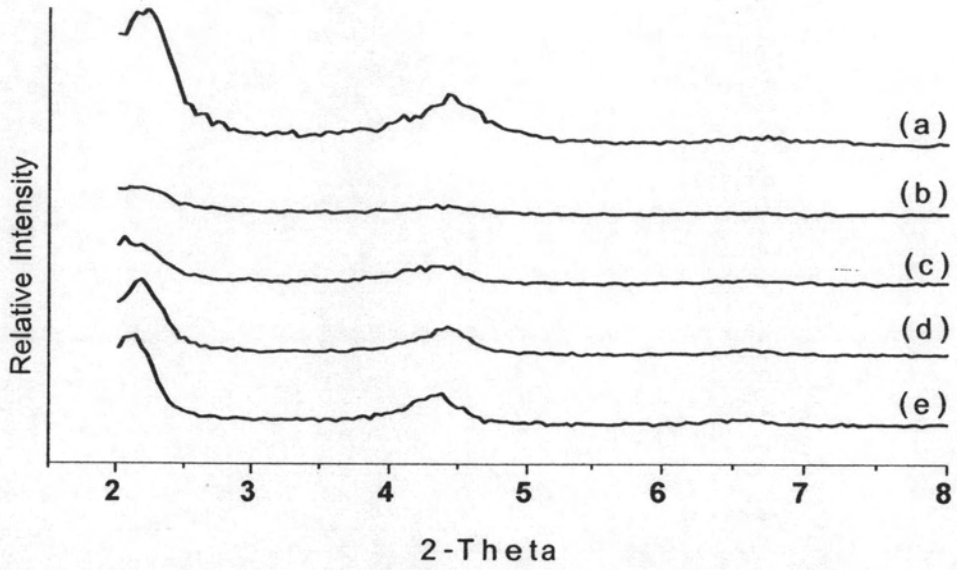
จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ชิ้นงานมีสีเหลืองอมน้ำตาล และมีสีเข้มขึ้นตามปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ชิ้นงานมีผิวเรียบเนียน

4.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค XRD

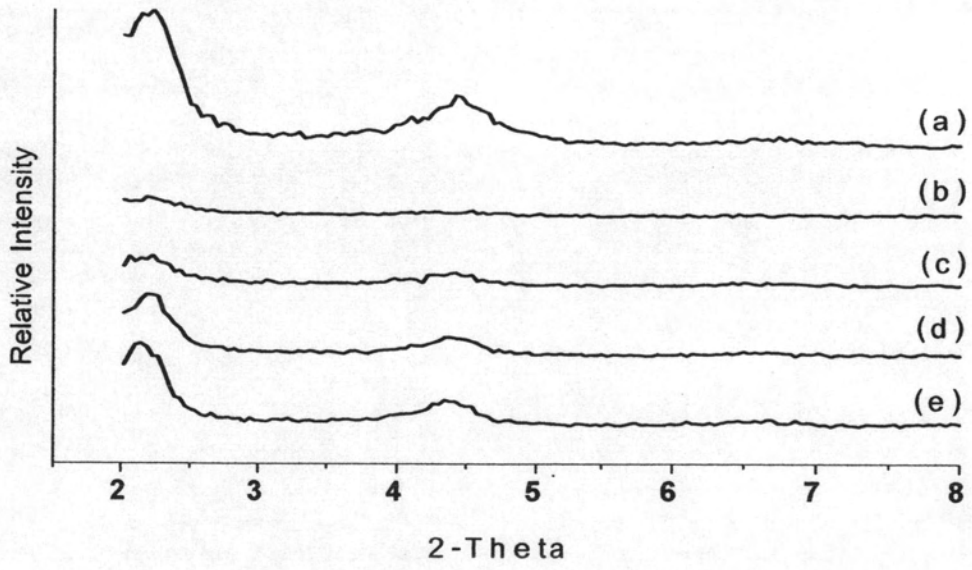
รูปที่ 4.3-4.6 แสดง XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของวัสดุนาโนคอมพอสิตระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ตารางที่ 4.1 แสดงค่า 2 theta ของนาโนคอมพอสิตที่คำนวณจากพีก (001)



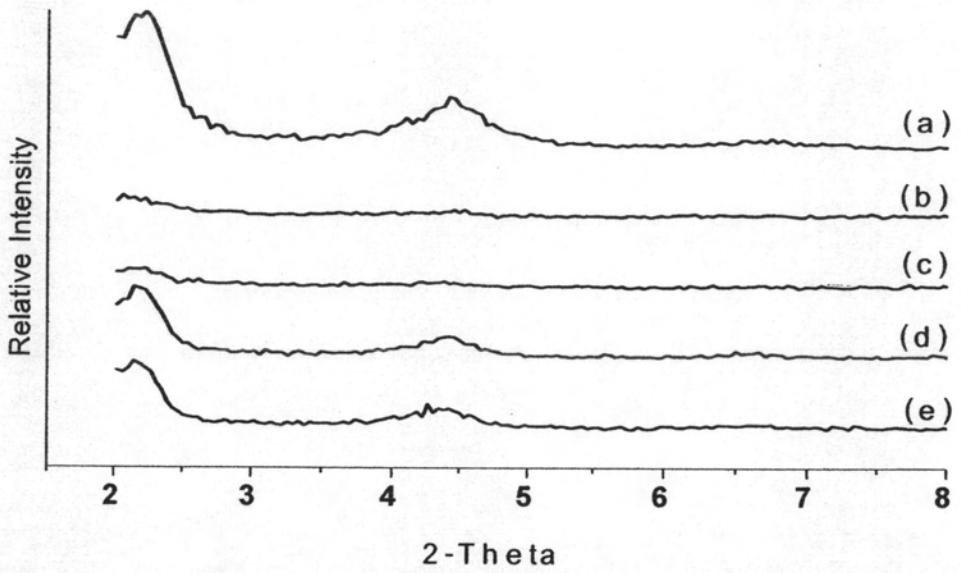
รูปที่ 4.3 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ (a) MMT เปรียบเทียบกับของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ : (b) 90/10/2, (c) 90/10/4, (d) 90/10/6 และ (e) 90/10/8



รูปที่ 4.4 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ (a) MMT เปรียบเทียบกับของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ : (b) 80/20/2, (c) 80/20/4, (d) 80/20/6 และ (e) 80/20/8



รูปที่ 4.5 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ (a) MMT เปรียบเทียบกับของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ : (b) 70/30/2, (c) 70/30/4, (d) 70/30/6 และ (e) 70/30/8



รูปที่ 4.6 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ (a) MMT เปรียบเทียบกับของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ : (b) 60/40/2, (c) 60/40/4, (d) 60/40/6 และ (e) 60/40/8

ตารางที่ 4.1 ระยะห่างระหว่างชั้นดินในวัสดุนาโนคอมพอสิต

LDPE/starch/MMT	2θ (°)	d_{001} (nm)
90/10/2	-	-
90/10/4	2.22	3.976-
90/10/6	2.17	4.068
90/10/8	2.13	4.144
80/20/2	-	-
80/20/4	2.07	4.264
80/20/6	2.17	4.068
802008	2.13	4.144
70/30/2	-	-
70/30/4	2.21	3.994
70/30/6	2.19	4.031
70/30/8	2.14	4.125
60/40/2	-	-
60/40/4	2.16	4.086
60/40/6	2.14	4.125
60/40/8	2.14	4.125
MMT	2.23	3.959

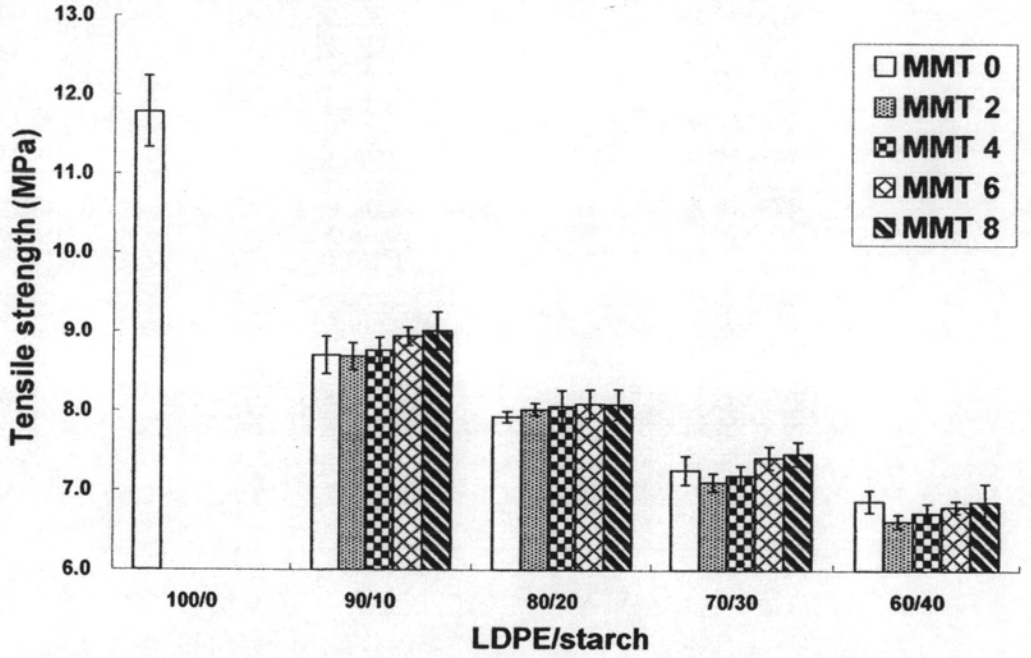
จากรูปที่ 4.3-4.6 และตารางที่ 4.1 พบว่า ระนาบ (001) ของมอนต์มอริลโลไนต์ในวัสดุนาโนคอมพอสิตขยายกว้างขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงว่าโมเลกุลของทั้ง LDPE และแป้งมันสำปะหลังแทรกตัวเข้าไปใน gallery ของมอนต์มอริลโลไนต์ได้จำนวนไม่มากนัก ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างที่เป็นแบบ intercalated นอกจากนี้ นาโนคอมพอสิตบางสูตรไม่แสดงพีกของระนาบ (001) โดยเฉพาะเมื่อใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 2 phr ในทุกอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์มีปริมาณน้อยมาก หรือเป็นเพราะเวลาที่ใช้และแรงเฉือนที่เกิดในระหว่างการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งน้อยเกินไป ทำให้การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ไม่ดีและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน[14]

นอกจากนี้ ยังพบพีกที่ 2 ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 4.46 ในวัสดุนาโนคอมพอสิตบางสูตร ซึ่งอาจเป็นพีกของระนาบ (002) โดยมี d_{002} เท่ากับ 1.98 หรือเป็นของระนาบ (001) ในมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ถูก intercalate ด้วยโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทั้งนี้เพราะมีระยะระหว่างชั้นเท่ากับของมอนต์มอริลโลไนต์ (พีก a) [15]

4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

4.3.1 สมบัติด้านแรงดึง

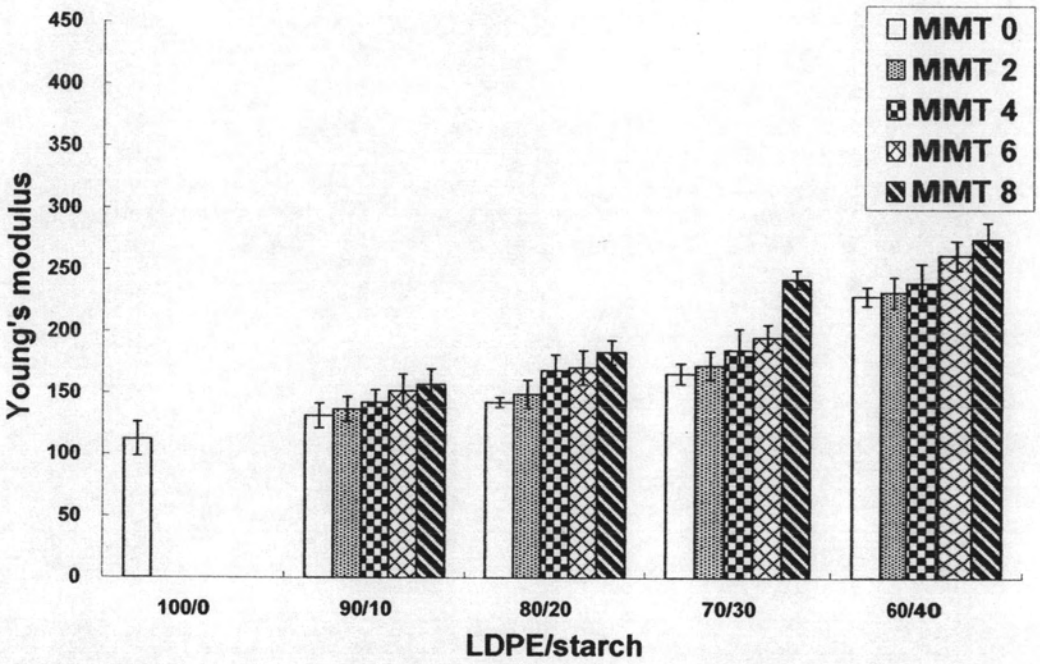
รูปที่ 4.7-4.9 แสดงของผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านแรงดึงของวัสดุนาโนคอมพอสิตของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการตรวจสอบค่าความต้านแรงดึง, ยังส์มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด



รูปที่ 4.7 ความต้านแรงดึงของนาโนคอมพอสิตระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ

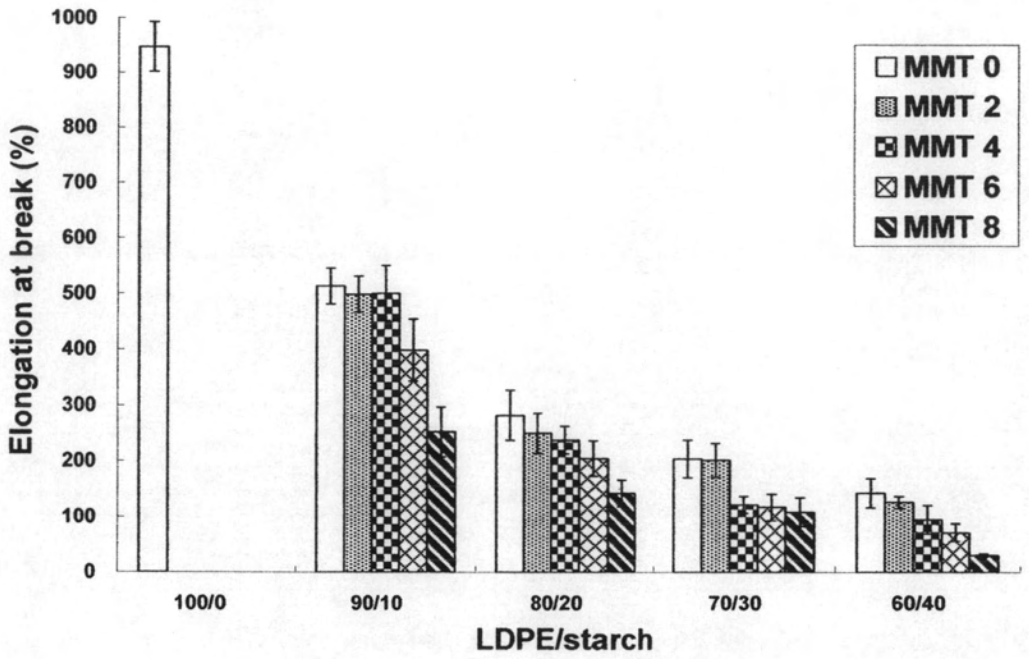
จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านแรงดึงของวัสดุนาโนคอมพอสิตทุกอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลังที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 2, 4, 6 และ 8 phr มีค่าใกล้เคียงกับที่ไม่ได้ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และมีค่าต่ำกว่าความต้านแรงดึงของ LDPE อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เพราะ LDPE

เป็นวัสดุที่มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งเมื่อผสมแป้งมันสำปะหลังเข้าไป พบว่า ความต้านแรงดึงของวัสดุนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะแป้งเป็นพอลิเมอร์ที่แข็งเปราะ อย่างไรก็ตาม การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ไม่ได้ช่วยปรับปรุงให้สมบัติความต้านแรงดึงดีขึ้นมากนัก และในบางสูตรกลับทำให้มีความต้านแรงดึงต่ำกว่าที่ไม่ได้ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ เพราะโมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นดินได้มากนัก ดังแสดงผลในตารางที่ 4.1 อีกทั้งมอนต์มอริลโลไนต์อาจจับตัวเป็นกลุ่มก้อนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.8 ยังส์มอดุลัสของนาโนคอมพอสิตระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปแสดงให้เห็นว่าวัสดุนาโนคอมพอสิตทุกสูตรมีค่ายังส์มอดุลัสมากกว่าของ LDPE ทั้งนี้เพราะ LDPE เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงจึงเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดึง การผสมแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งเปราะ มีผลทำให้นาโนคอมพอสิตมีค่ายังส์มอดุลัสสูงขึ้น นอกจากนี้ การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ยังช่วยปรับปรุงให้วัสดุนาโนคอมพอสิตมีค่ายังส์มอดุลัสเพิ่มขึ้นอีกด้วย เพราะมอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็ง อีกทั้งแป้งมันสำปะหลังและมอนต์มอริลโลไนต์ยังขัดขวางการยืดตัวของสายโซ่โมเลกุลของ LDPE ทำให้ต้องใช้แรงดึงยืดที่สูงมากขึ้น

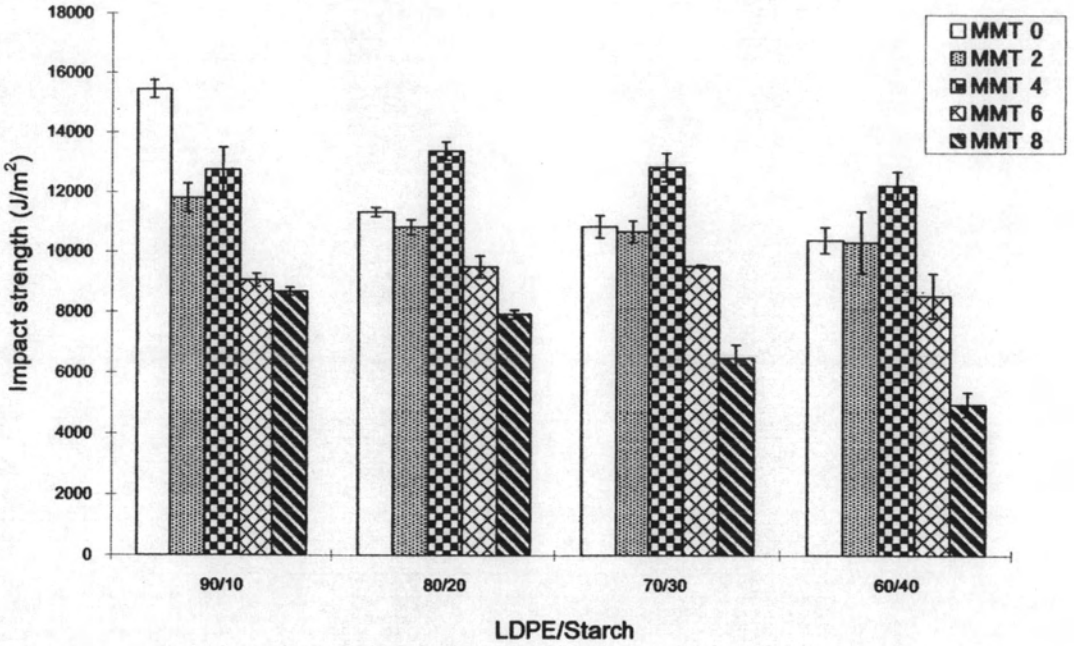


รูปที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของนาโนคอมพอสิตระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปแสดงให้เห็นว่าวัสดุนาโนคอมพอสิตทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำกว่าของ LDPE อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เพราะ LDPE เป็นวัสดุที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง สามารถยืดตัวได้มากเมื่อได้รับแรงดึง ดังนั้น การผสมแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่แข็งเปราะ และการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็ง มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงมาก อีกทั้งแป้งมันสำปะหลังและมอนต์มอริลโลไนต์ยังขัดขวางการยืดตัวของ LDPE อีกด้วย

4.3.2 ความต้านแรงกระแทก

รูปที่ 4.10 แสดงค่าความต้านแรงกระแทก (impact strength) ของวัสดุนาโนคอมพอสิตของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ แต่ไม่ได้แสดงค่าความต้านแรงกระแทกของ LDPE ทั้งนี้เพราะ LDPE มีความเหนียวมากจึงไม่เกิดการแตกหักเนื่องจากการทดสอบ



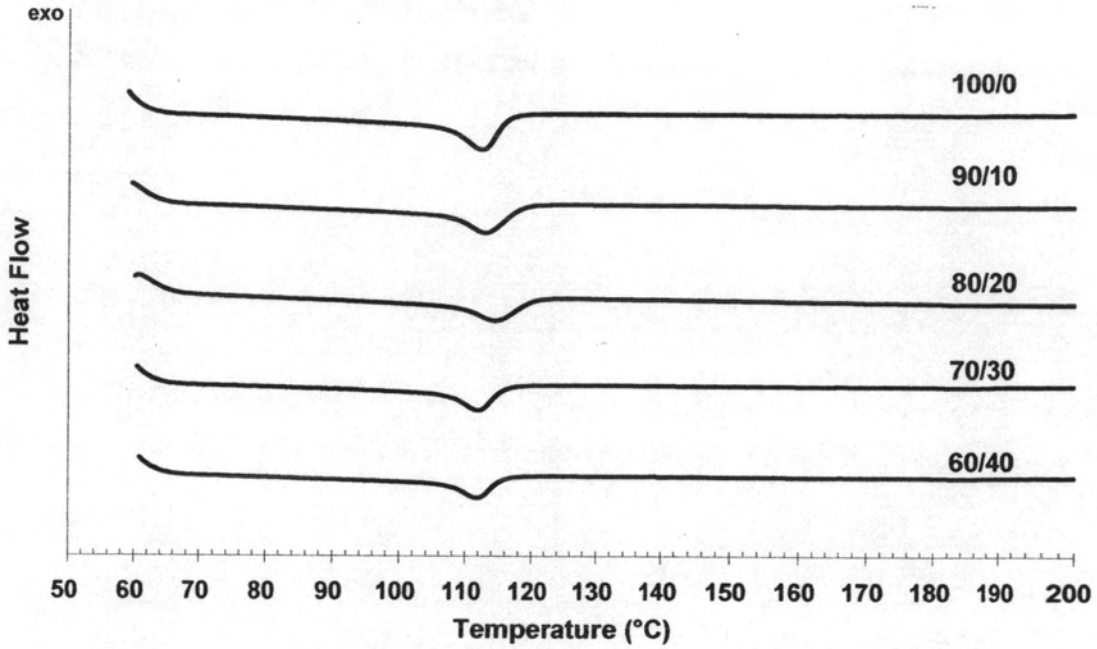
รูปที่ 4.10 ความต้านแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิตระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ได้จากการผสม LDPE กับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ใส่มอนต์-มอริลโลไนต์ (MMT = 0) มีความต้านแรงกระแทกลดลงเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังเป็นวัสดุที่มีความแข็งเปราะ อีกทั้งการใส่แป้งเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณ LDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นในชิ้นงานลดน้อยลง จึงทำให้ความต้านแรงกระแทกลดลง และเมื่อได้ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เข้าไปในวัสดุคอมพอสิต พบว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 2 phr ไม่มีผลทำให้ชิ้นงานมีความต้านแรงกระแทกสูงขึ้น เนื่องจากใส่ในปริมาณน้อยเกินไป การกระจายตัวเกิดได้ไม่ทั่วทั้งชิ้นงาน แต่ในวัสดุนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ LDPE สูงๆ (แป้งน้อย) ก็ยังมีความต้านแรงกระแทกมากกว่าที่มีปริมาณ LDPE น้อยๆ (แป้งมาก) แต่การเติมมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มเป็น 4 phr ในวัสดุนาโนคอมพอสิตทุกอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง พบว่า ชิ้นงานถูกปรับปรุงให้มีความต้านแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มมากขึ้นมีการกระจายตัวที่ดีโดยยอมให้โมเลกุลของพอลิเมอร์สอดแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นดิน (ดังผลที่แสดงในตารางที่ 4.1) อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นเป็น 6 และ 8 phr กลับมีผลทำให้ความต้านแรงกระแทกลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งทำให้เกิดแรงเฉือนไม่มากพอที่ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์สอดแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นดินได้ทั่วถึง และถ้าภาวะที่ใช้ขึ้นรูปไม่ดีพอจะทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เกาะกันเป็นกลุ่ม และเกิดเป็นความบกพร่องขึ้นในชิ้นงาน

4.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน

4.4.1 การตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวด้วยเทคนิค DSC

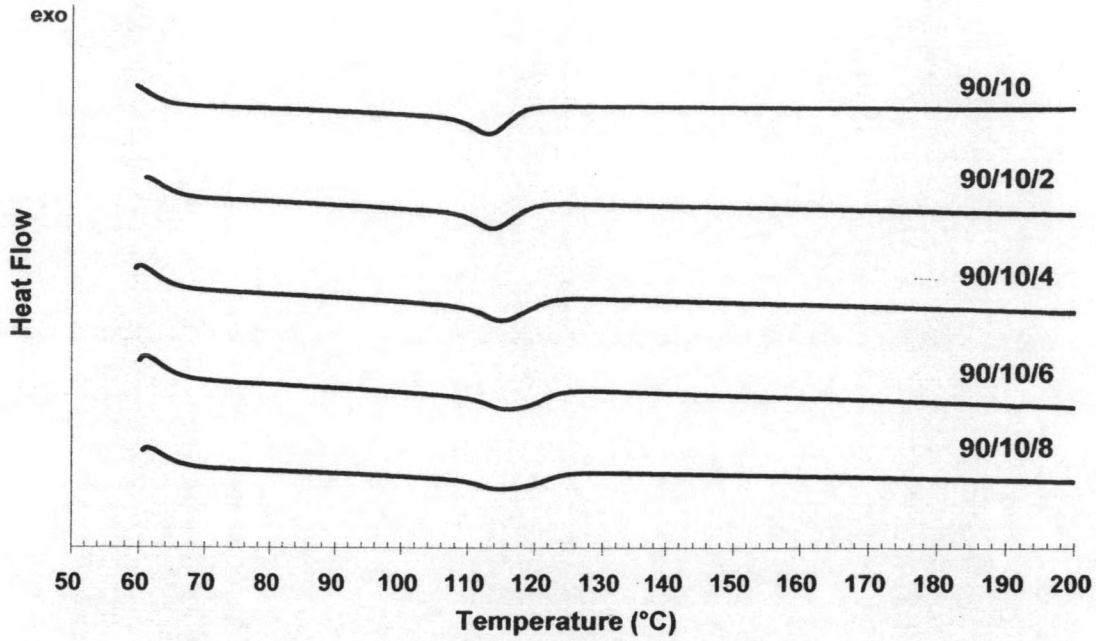
รูปที่ 4.11 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมัน-สำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ตามลำดับ



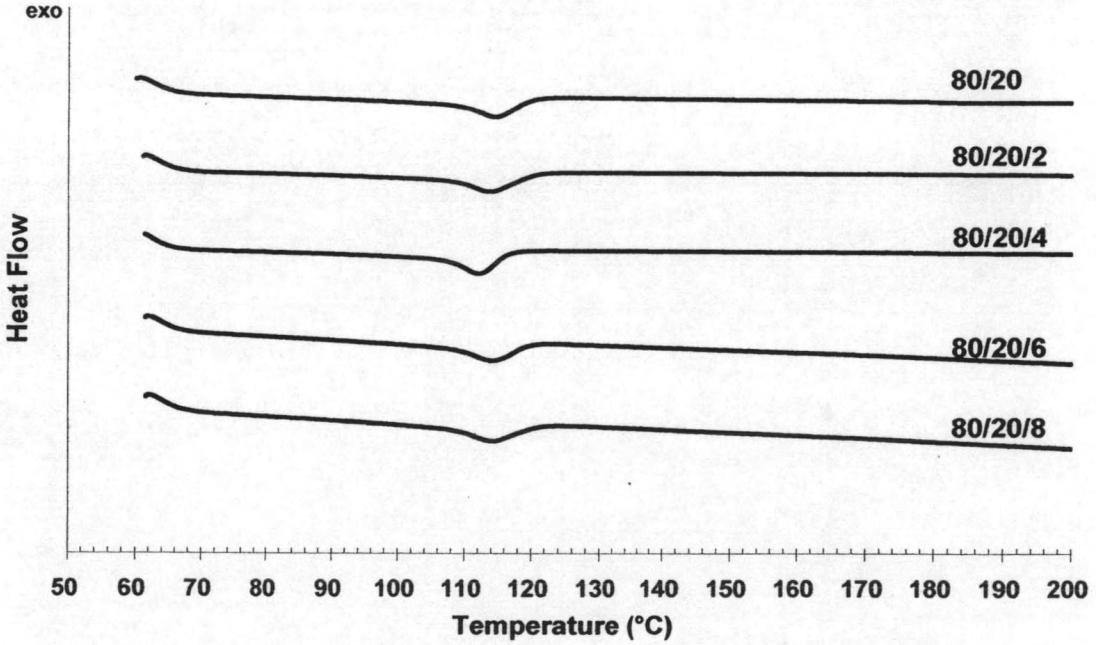
รูปที่ 4.11 อุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง ต่างๆ กัน มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 111-115 องศาเซลเซียส กล่าวคือ แป้งมันสำปะหลังมีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมน้อยมาก

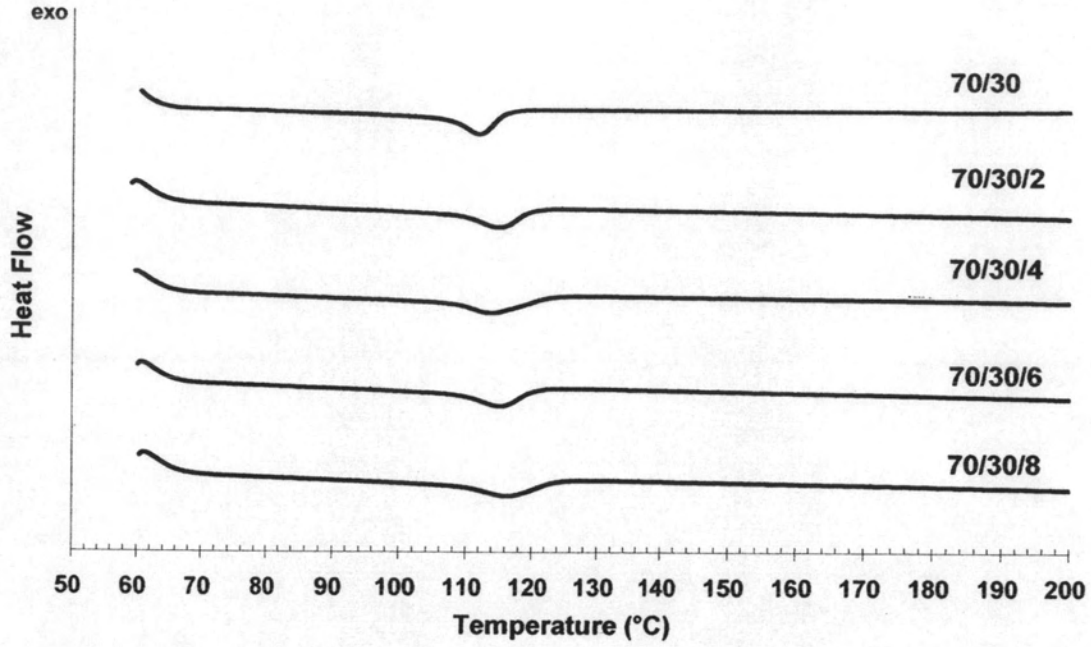
รูปที่ 4.12-4.15 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในวัสดุนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 ตามลำดับ ที่ผสมกับมอนต์-มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน



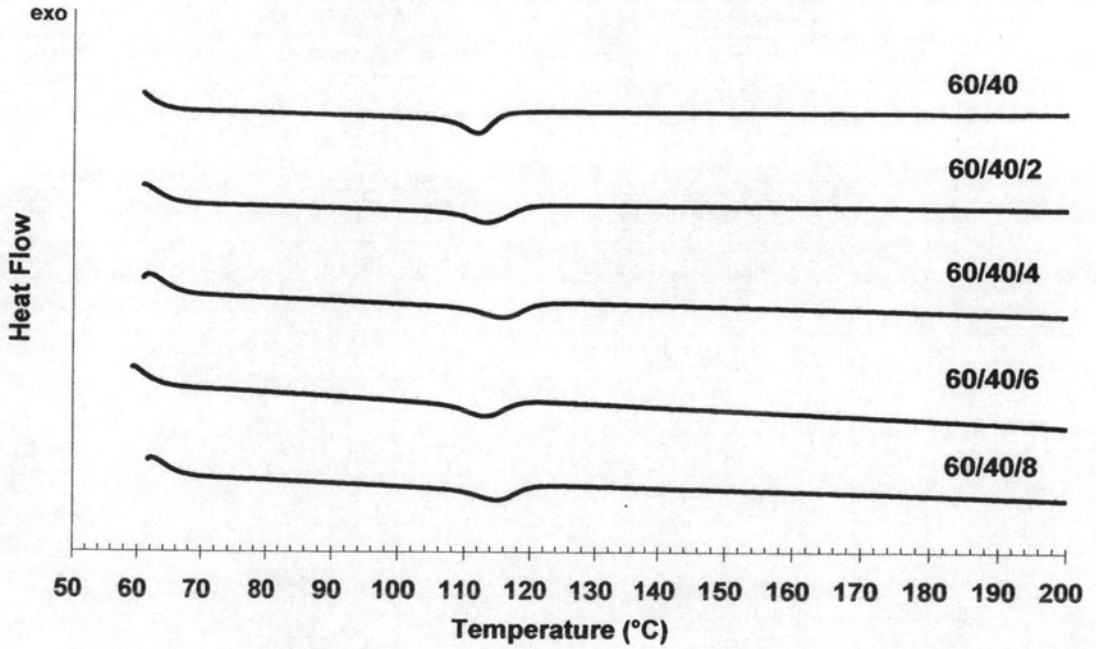
รูปที่ 4.12 อุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในนาโนคอมพอสิตที่มี LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 90/10 และใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.13 อุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในนาโนคอมพอสิตที่มี LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 80/20 และใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.14 อุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในนาโนคอมพอสิตที่มี LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 70/30 และใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.15 อุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในนาโนคอมพอสิตที่มี LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 60/40 และใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.2 แสดงรายละเอียดของอุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง และในนาโนคอมพอสิตของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมและในนาโนคอมพอสิต

LDPE/starch/MMT	T_m
100/0	112.40
90/10	113.04
80/20	114.53
70/30	111.95
60/40	111.81
90/10/2	113.70
90/10/4	115.01
90/10/6	116.03
90/10/8	115.07
80/20/2	113.72
80/20/4	112.10
80/20/6	114.15
80/20/8	114.21
70/30/2	115.02
70/30/4	113.88
70/30/6	115.24
70/30/8	116.31
60/40/2	113.24
60/40/4	115.76
60/40/6	117.13
60/40/8	115.02

จากรูปที่ 4.12-4.15 และตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ในวัสดุนาโนคอมพอสิตมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะมอนต์มอริลโลไนต์มีส่วนช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของ LDPE ได้ไม่มากนัก เนื่องจากใส่เข้าไปในปริมาณน้อย อีกทั้งยังมีการกระจายตัวและการสอดแทรกของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เข้าไปในระหว่างชั้นดินยังไม่มากพอ (ดังแสดงผลในตารางที่ 4.1) โดยอุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2-6 องศา เซลเซียส

4.4.2 เสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัว

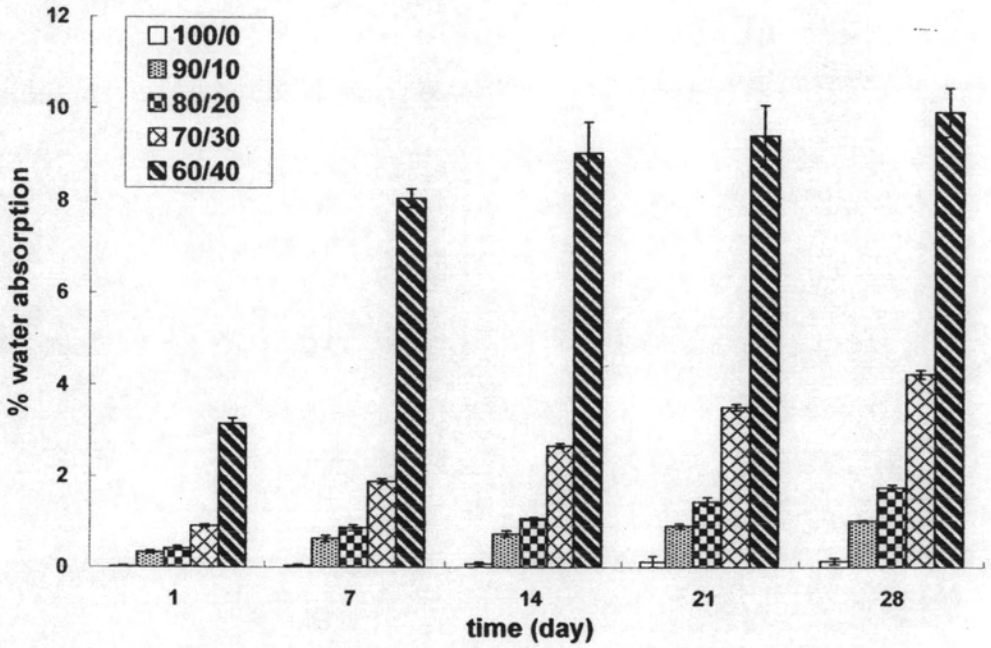
การตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุนาโนคอมพอสิตสามารถทำได้โดยใช้เทคนิค TGA ดังแสดงผลในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่า พอลิเมอร์ผสมของ LDPE/แป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิการสลายตัว 2 ขั้น โดยขั้นแรกอยู่ในช่วง 307-310 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่า LDPE เนื่องจากภายในโมเลกุลต่อกันด้วยพันธะอีเทอร์ และมีหมู่อัลดีไฮด์ในโมเลกุลจึงว่องไวต่อการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน [3] และขั้นที่สองอยู่ในช่วง 450-458 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของ LDPE โดยอุณหภูมิการสลายตัวทั้ง 2 ขั้นนี้ในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลังมีค่าไม่ต่างกันมากนัก และเมื่อพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุนาโนคอมพอสิตของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ พบว่า มีอุณหภูมิการสลายตัวในขั้นที่ 1 และขั้นที่ 2 สูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง แสดงให้เห็นว่าวัสดุมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นเมื่อได้ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เข้าไป (รูป TGA เทอร์โมแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิต

LDPE/starch/MMT	อุณหภูมิสลายตัว	
	$T_{onset\ 1}$	$T_{onset\ 2}$
100/0/0	—	456.54
90/10/0	309.06	458.56
90/10/2	313.04	465.42
90/10/4	314.56	464.47
90/10/6	311.85	463.66
90/10/8	312.63	451.79
80/20/0	307.56	452.03
80/20/2	312.24	487.59
80/20/4	312.72	469.39
80/20/6	310.71	479.09
80/20/8	310.77	465.55
70/30/0	307.98	456.80
70/30/2	312.68	461.80
70/30/4	312.63	468.34
70/30/6	313.04	469.85
70/30/8	311.92	471.52
60/40/0	310.57	450.41
60/40/2	311.38	465.72
60/40/4	311.86	468.25
60/40/6	310.47	471.69
60/40/8	310.99	471.80

4.5 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำ

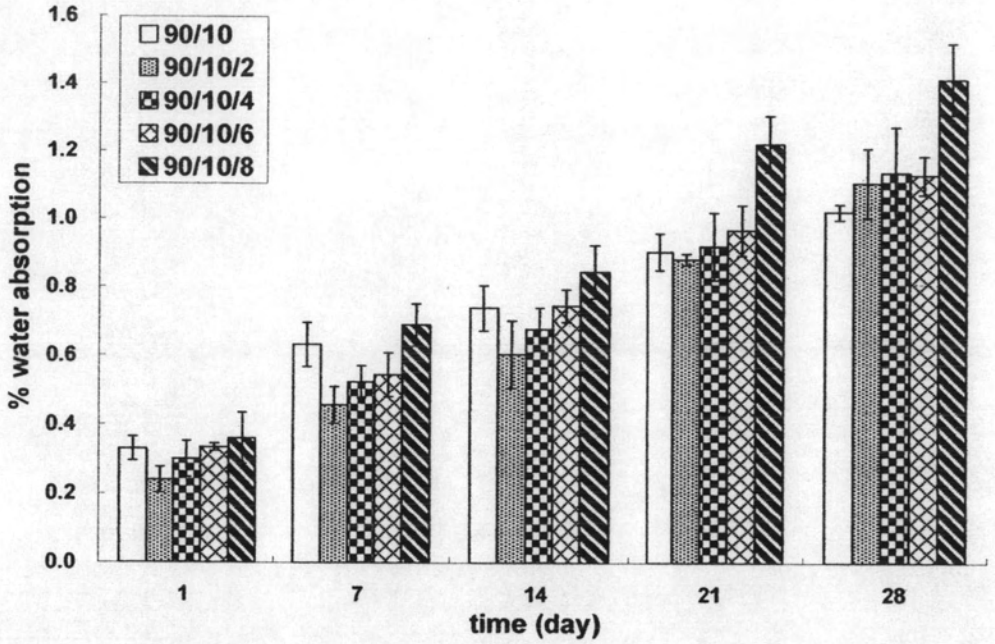
รูปที่ 4.16 แสดงผลของการทดสอบการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมัน-สำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ



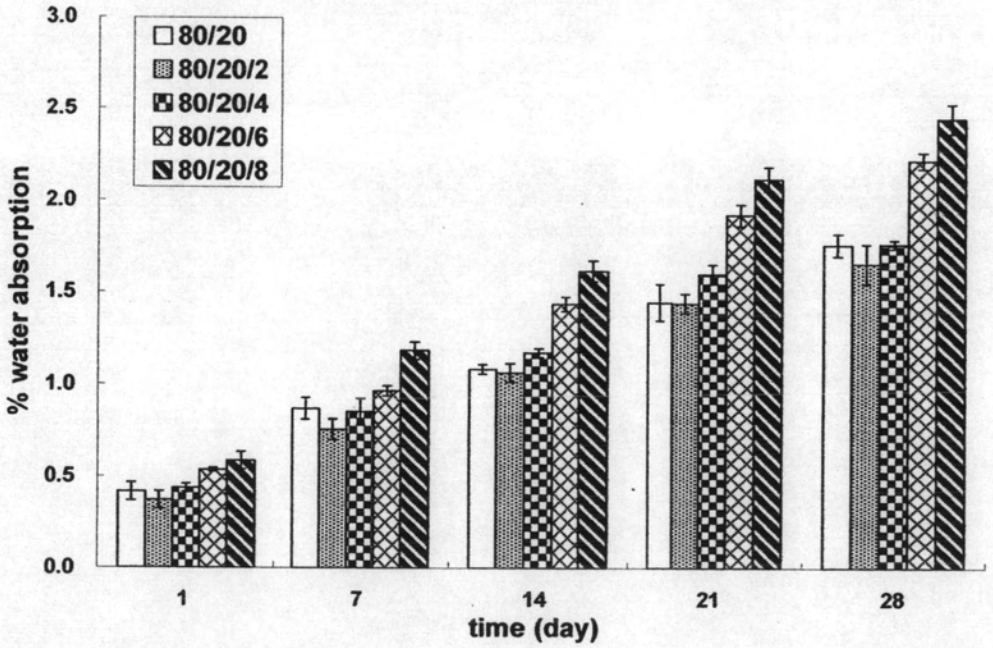
รูปที่ 4.16 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า LDPE มีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำมาก เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว และเมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วสูงเข้าไป พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นเป็น 40 ส่วน และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไปจนครบเวลาที่ทำการทดสอบ (28 วัน) แต่อัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นในช่วง 7 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการดูดซึมน้ำค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากชิ้นงานได้ดูดซับน้ำไว้จนใกล้อิ่มตัว

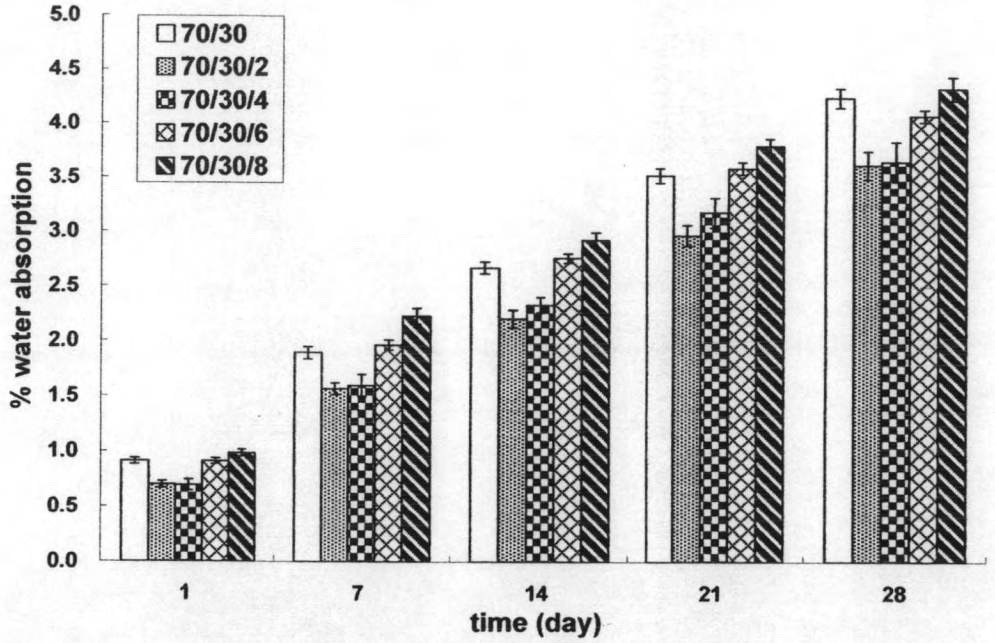
รูปที่ 4.17-4.20 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุนาโนคอมพอสิตระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน



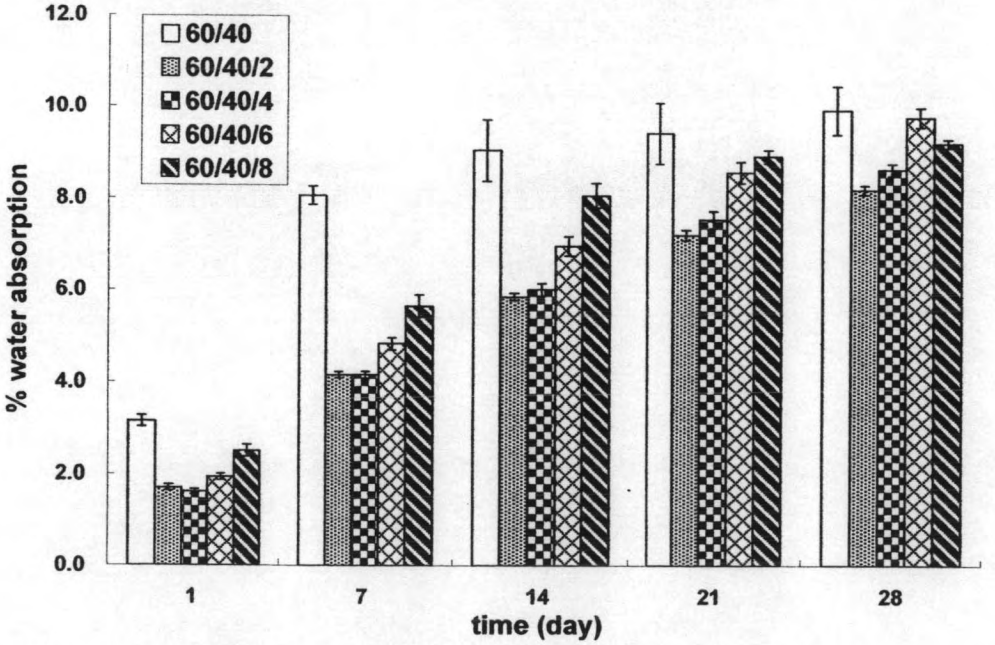
รูปที่ 4.17 การดูดซึมน้ำของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 90/10 ที่ผสมมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 80/20 ที่ผสมมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.19 การดูดซึมน้ำของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 70/30 ที่ผสมมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.20 การดูดซึมน้ำของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 60/40 ที่ผสมมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน

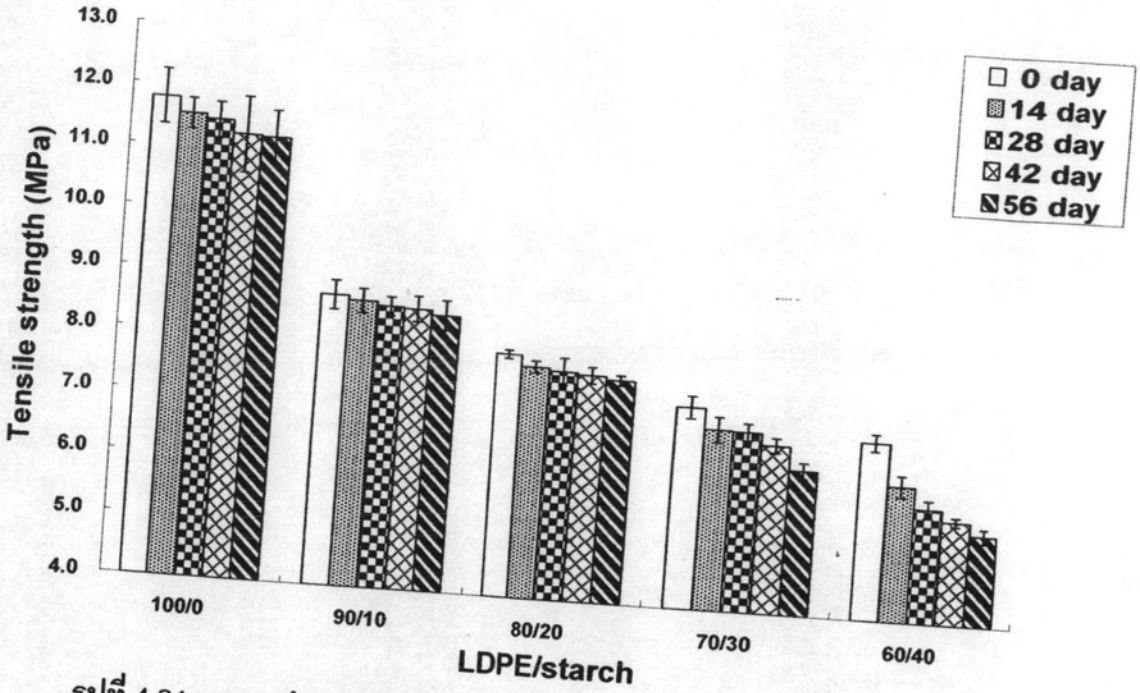
จากรูปที่ 4.17-4.18 แสดงให้เห็นว่านาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 90/10 และ 80/20 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำค่อนข้างต่ำ เนื่องจาก LDPE ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น การดูดซึมน้ำจึงมาจากแป้งมันสำปะหลังที่มีอยู่น้อยกว่า โดยน้ำแทรกเข้าไปอยู่ในปริมาตรอิสระ (free volume) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ลงไปเล็กน้อย ไม่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่กลับทำให้มีค่าลดลง เพราะมอนต์มอริลโลไนต์อาจเข้าไปทำให้ปริมาตรอิสระลดลง อย่างไรก็ตาม เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป โดยเฉพาะชิ้นงานที่ใส่มอนต์-มอริลโลไนต์ปริมาณ 8 phr ทั้งนี้อาจเนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์ไม่สามารถกระจายตัวได้ดี จึงเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้มีความบกพร่องภายในชิ้นงาน และปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น และมอนต์มอริลโล-ไนต์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความชอบน้ำ ถึงแม้ได้ถูกดัดแปรให้มีความชอบพอลิเมอร์มากขึ้น แต่ยังอาจมีส่วนที่ชอบน้ำเหลืออยู่ในโครงสร้างผลึกของดิน

จากรูปที่ 4.19-4.20 แสดงให้เห็นว่านาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 70/30 และ 60/40 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ลงไปเล็กน้อย ไม่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่กลับทำให้มีค่าลดลง เพราะมอนต์มอริลโลไนต์อาจเข้าไปทำให้ปริมาตรอิสระลดลง แต่เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งการย่อยสลายทางชีวภาพโดยอาศัยจุลินทรีย์นั้นเอนไซม์สามารถผ่านเข้าไปในเนื้อพลาสติกได้ทางตัวกลางที่เป็นน้ำ ดังนั้น ผลการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำจึงแสดงแนวโน้มของการถูกย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งอาจยืนยันได้จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลและการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวชิ้นงานด้วยเทคนิค SEM ต่อไป

4.6 การย่อยสลายทางชีวภาพ

4.6.1 ความต้านแรงดึงที่เปลี่ยนไป

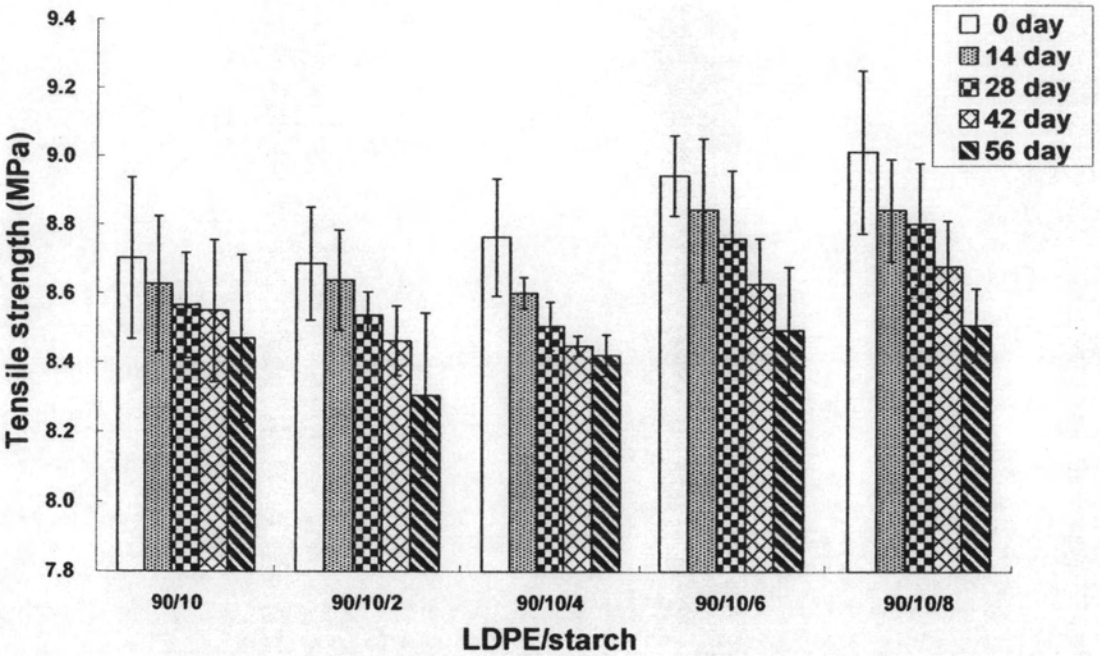
รูปที่ 4.21 แสดงค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ โดยแสดงค่าความต้านแรงดึงก่อนและหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน



รูปที่ 4.21 ความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน

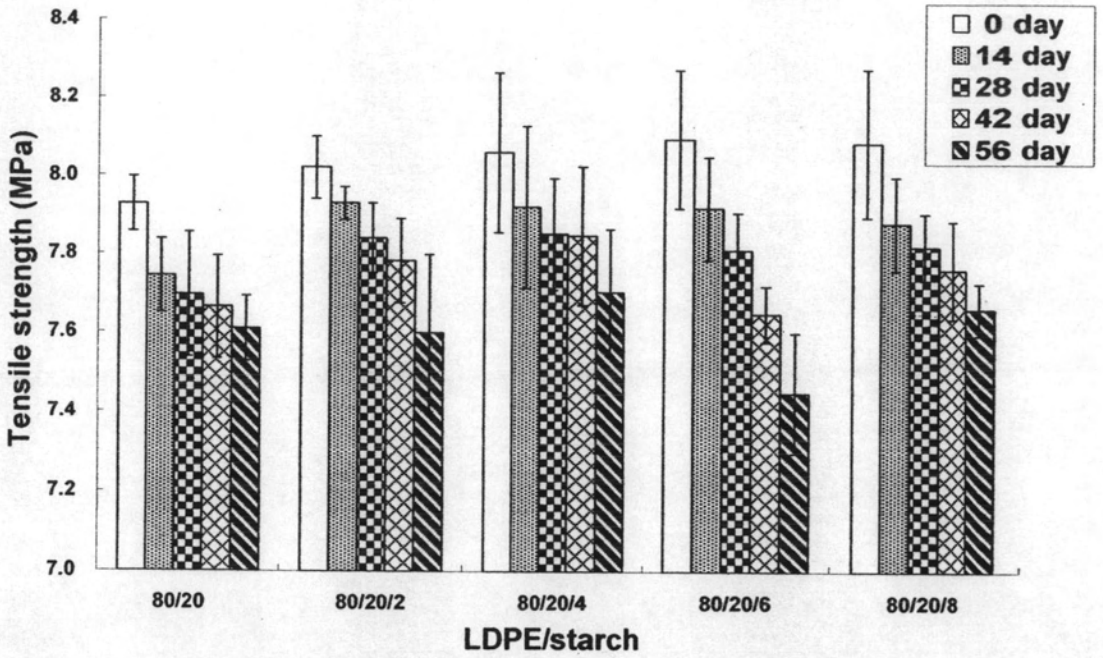
จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน มีค่าความต้านแรงดึงลดลงไม่มากนัก ทั้งที่บางสูตรสามารถดูดซับน้ำได้สูงมาก (จากรูปที่ 4.16) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปได้ทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ให้กับแป้งมันสำปะหลังทำให้มีความอ่อนตัวมากขึ้น ความแข็งเปราะลดลง จึงยังคงทำให้ชิ้นงานมีความต้านแรงดึงไม่ลดต่ำมากนัก ถึงแม้แป้งบางส่วนจะถูกบริโภคโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน

รูปที่ 4.22 แสดงค่าความต้านแรงดึงของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต ที่มีอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 90/10 ซึ่งใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน โดยแสดงค่าความต้านแรงดึงก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน



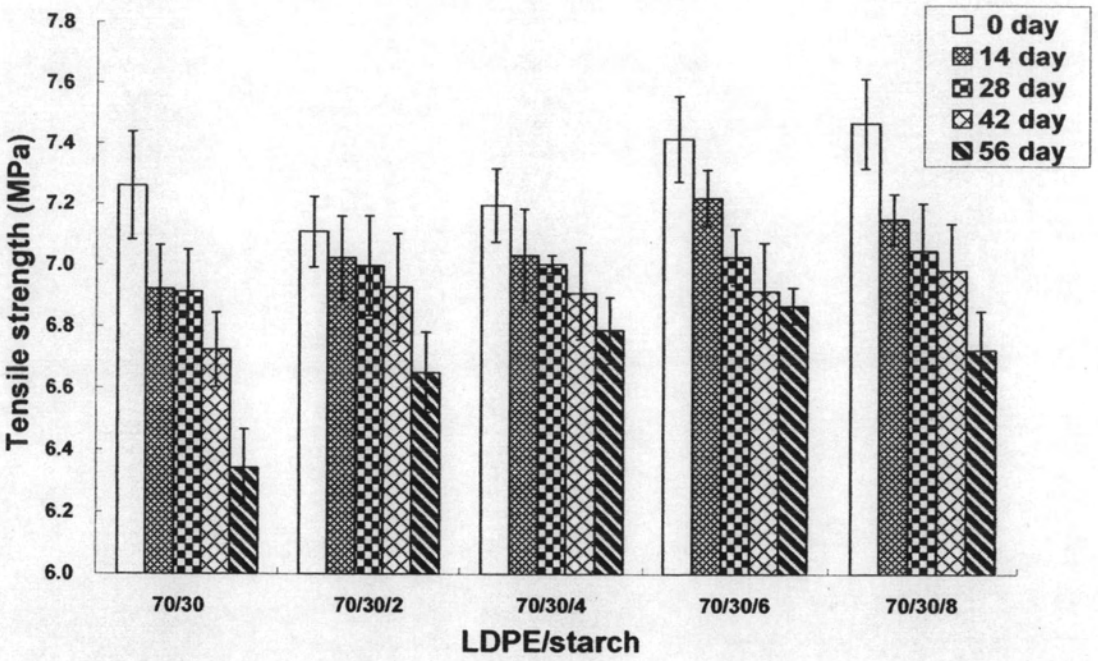
รูปที่ 4.22 ความต้านแรงดึงของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต ที่มีอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 90/10 ที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน

รูปที่ 4.23 แสดงค่าความต้านแรงดึงของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 80/20 ที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน โดยแสดงค่าความต้านแรงดึงก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน



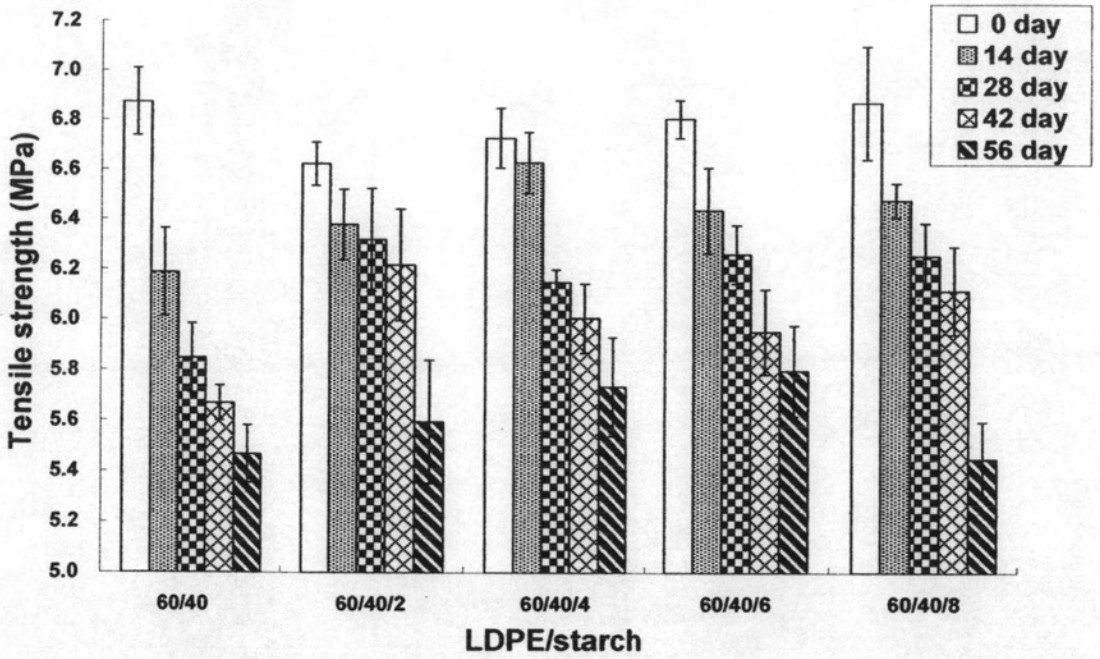
รูปที่ 4.23 ความต้านแรงดึงของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต ที่มีอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 80/20 ที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน

รูปที่ 4.24 แสดงค่าความต้านแรงดึงของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 70/30 ที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน โดยแสดงค่าความต้านแรงดึงก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน



รูปที่ 4.24 ความต้านแรงดึงของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต ที่มีอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 70/30 ที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน

รูปที่ 4.25 แสดงค่าความต้านแรงดึงของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 60/40 ที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน โดยแสดงค่าความต้านแรงดึงก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน

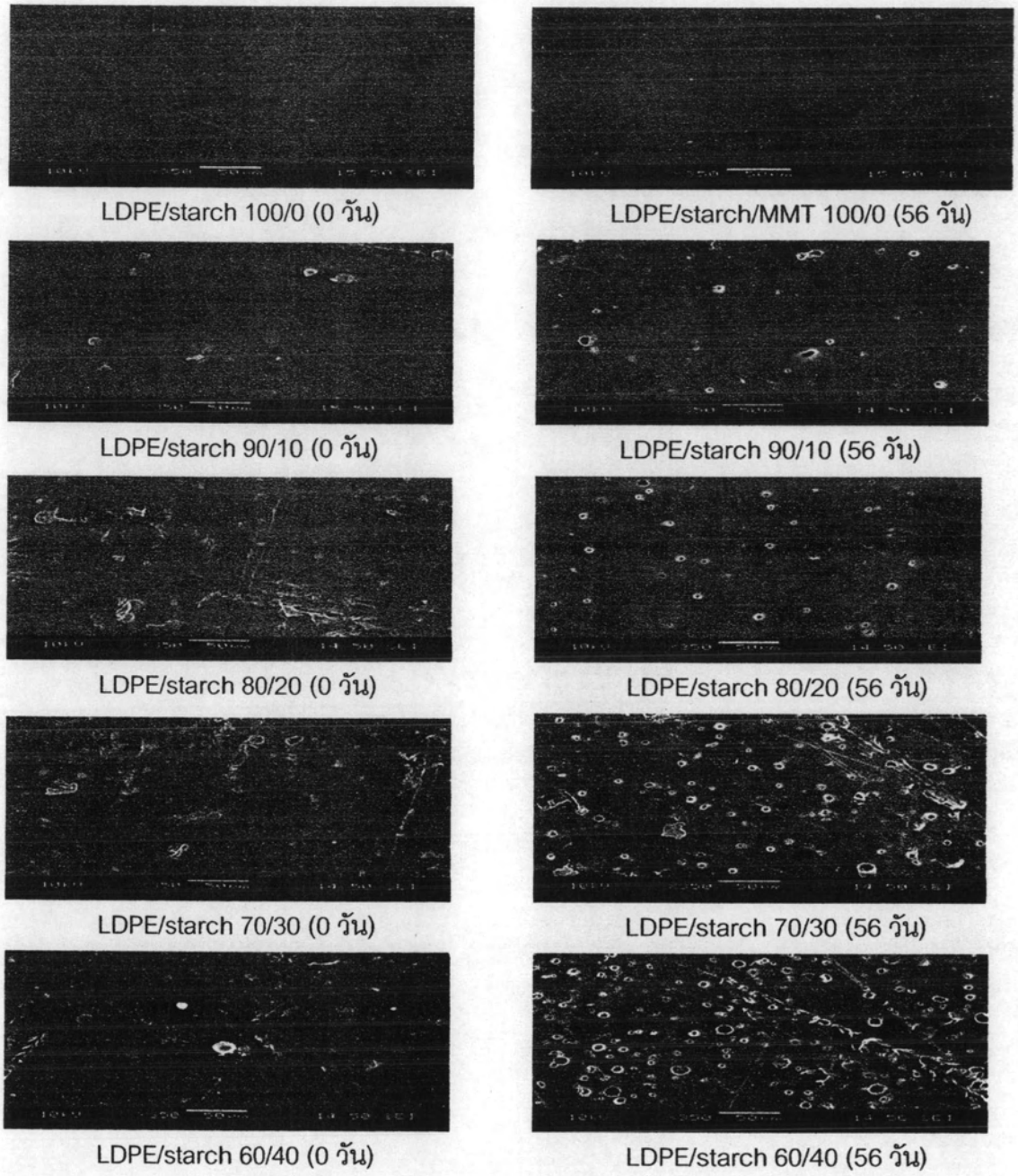


รูปที่ 4.25 ความต้านแรงดึงของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต ที่มีอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 60/40 ที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน

จากรูปที่ 4.22-4.25 แสดงให้เห็นว่านาโนคอมพอสิตของ LDPE/แป้งมันสำปะหลังมอนต์-มอริลโลไนต์ทุกสูตรภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 14, 28, 42 และ 56 วัน มีค่าความต้านแรงดึงลดลง โดยเฉพาะสูตรที่มีปริมาณแป้งมากๆ ค่าความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลงได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม ความต้านแรงดึงลดลงไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปได้ทำหน้าที่เป็นพลาสติไซ-เซอร์ให้กับแป้งมันสำปะหลังทำให้มีความอ่อนตัวมากขึ้น ความแข็งเปราะลดลง จึงยังคงทำให้ชิ้นงานมีความต้านแรงดึงลดต่ำลงไม่มากนัก ส่วนการเติมมอนต์มอริลโลไนต์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านแรงดึงไม่มากนัก

4.6.2 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานก่อนและหลังฝังดิน

รูปที่ 4.26 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 เปรียบเทียบกับก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 56 วัน ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 350 เท่า

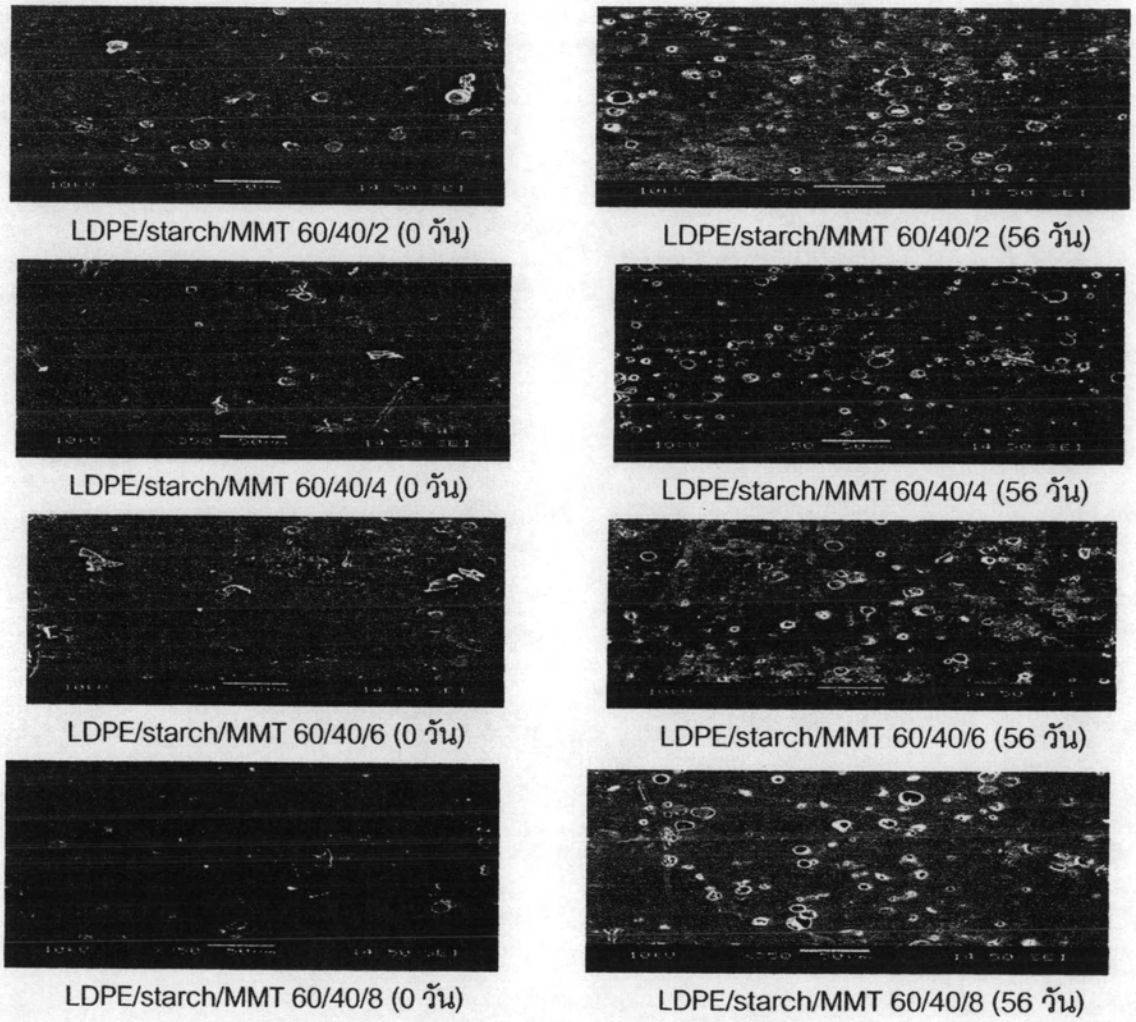


รูปที่ 4.26 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ทั้งก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 56 วัน (กำลังขยาย 350 เท่า)

จากรูปแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่มีแป้งมันสำปะหลังไม่มากนัก ลักษณะพื้นผิวแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 56 วัน แต่เมื่อปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดรูพรุนบนพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากการหลุดของแป้งออกจากชิ้นงาน จึง

อาจกล่าวได้ว่าเกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้นเมื่อปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.27 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต เฉพาะที่อัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 60/40 ที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับก่อนและหลังฝังดินเป็นระยะเวลา 56 วัน ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 350 เท่า



LDPE/starch/MMT 60/40/2 (0 วัน) LDPE/starch/MMT 60/40/2 (56 วัน)

LDPE/starch/MMT 60/40/4 (0 วัน) LDPE/starch/MMT 60/40/4 (56 วัน)

LDPE/starch/MMT 60/40/6 (0 วัน) LDPE/starch/MMT 60/40/6 (56 วัน)

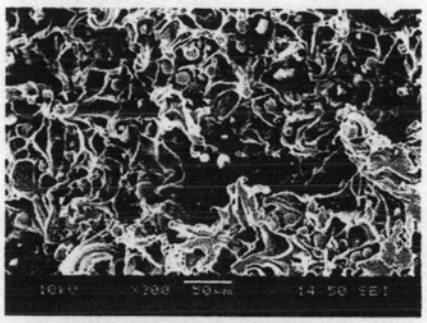
LDPE/starch/MMT 60/40/8 (0 วัน) LDPE/starch/MMT 60/40/8 (56 วัน)

รูปที่ 4.27 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต ที่อัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 60/40 ที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน ทั้งก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 56 วัน (กำลังขยาย 350 เท่า)

รูปที่ 4.27 เป็นสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของนาโนคอมพอสิตสูตรที่มีอัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 60/40 โดยพบว่าเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ในนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น สัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานไม่แตกต่างจากสูตรที่ไม่ได้เติมมอนต์มอริลโลไนต์มากนัก ซึ่งแสดงว่าการย่อยสลายทางชีวภาพขึ้นกับแป้งมันสำปะหลังมากกว่ามอนต์มอริลโลไนต์

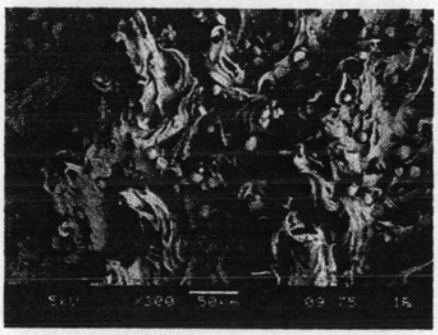
4.7 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของชิ้นงาน

รูปที่ 4.28 แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสม LDPE/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า

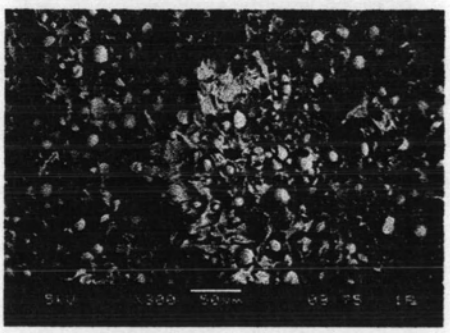


LDPE/starch 90/10

LDPE/starch 80/20



LDPE/starch 70/30

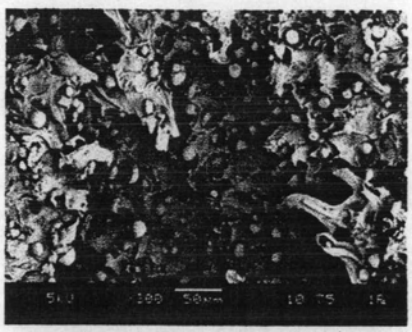


LDPE/starch 60/40

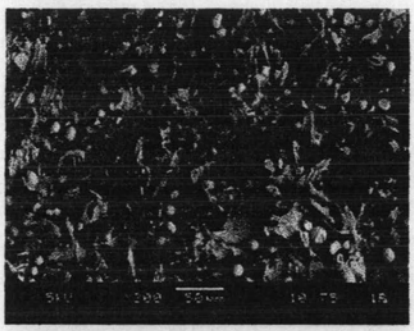
รูปที่ 4.28 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสม LDPE/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (กำลังขยาย 300 เท่า)

จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ทำให้เม็ดแป้งรวมตัวกันเป็นก้อนกลมใหญ่ขึ้น และชิ้นงานมีความบกพร่องมากขึ้น จึงมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดลงเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น

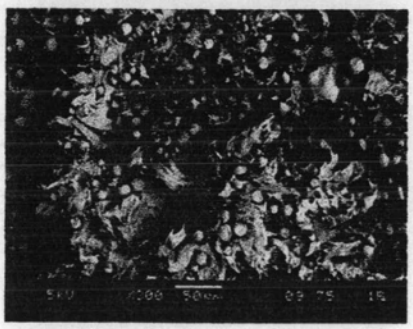
รูปที่ 4.29 แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโล-ไนต์นาโนคอมพอสิต ที่อัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 60/40 ที่ใส่มอนต์มอริลโล-ไนต์ปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า



LDPE/starch/MMT 60/40/2



LDPE/starch/MMT 60/40/4



LDPE/starch/MMT 60/40/6

LDPE/starch/MMT 60/40/8

รูปที่ 4.29 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วนของ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 60/40 ที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน (กำลังขยาย 300 เท่า)

จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ในนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นจะเกิดการรวมตัวกับเม็ดแป้ง ทำให้เกิดความบกพร่องในชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิตต่ำลง