บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

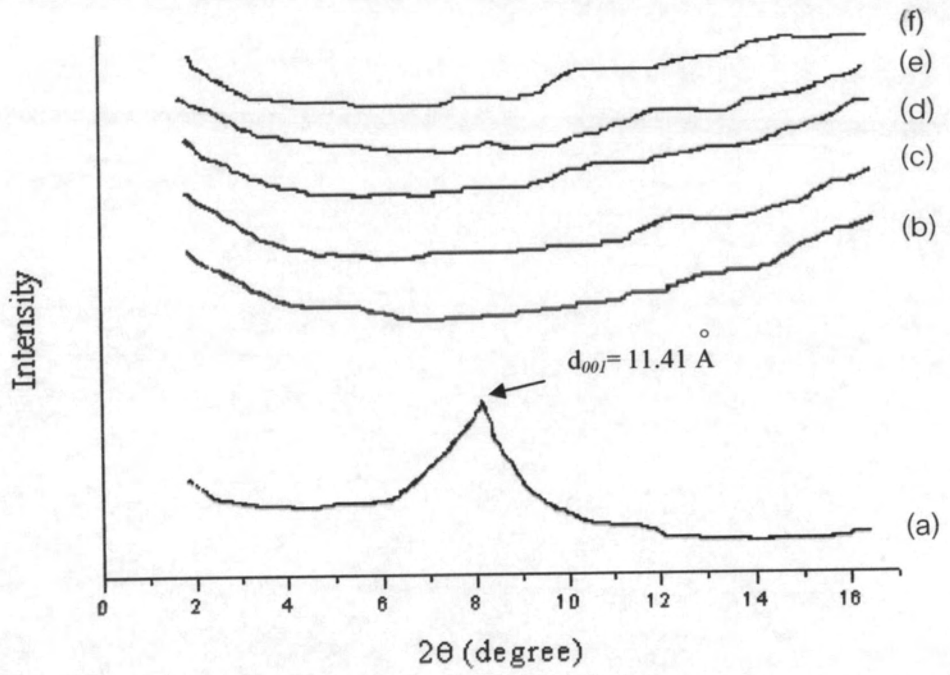
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิเมอร์คอมพอสิต ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้วิเคราะห์หาขนาดหรือระยะห่างระหว่างชั้นของอะลูมิเนียมซิลิเกต สามารถคำนวณได้จากองศาการเบี่ยงเบนของรังสี X-Ray ซึ่งจะวัดที่มุม 2θ และนำมาคำนวณหาระยะระหว่างชั้นของอะลูมิเนียมซิลิเกต ในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ที่กระจายอยู่ในชิ้นงานพอลิเมอร์คอมพอสิต โดยอาศัยสมการของแบรก คือ

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

4.1.1 โครงสร้างผลึกของยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

รูปที่ 4.1 แสดง X-ray pattern ของมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT), ยางธรรมชาติ (NR) และยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (NR/MMT nanocomposites) ที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน



รูปที่ 4.1 X-ray pattern ของ (a) MMT, (b) NR,

(c) 100 NR/1 MMTnanocomposite,

(d) 100 NR/2 MMTnanocomposite,

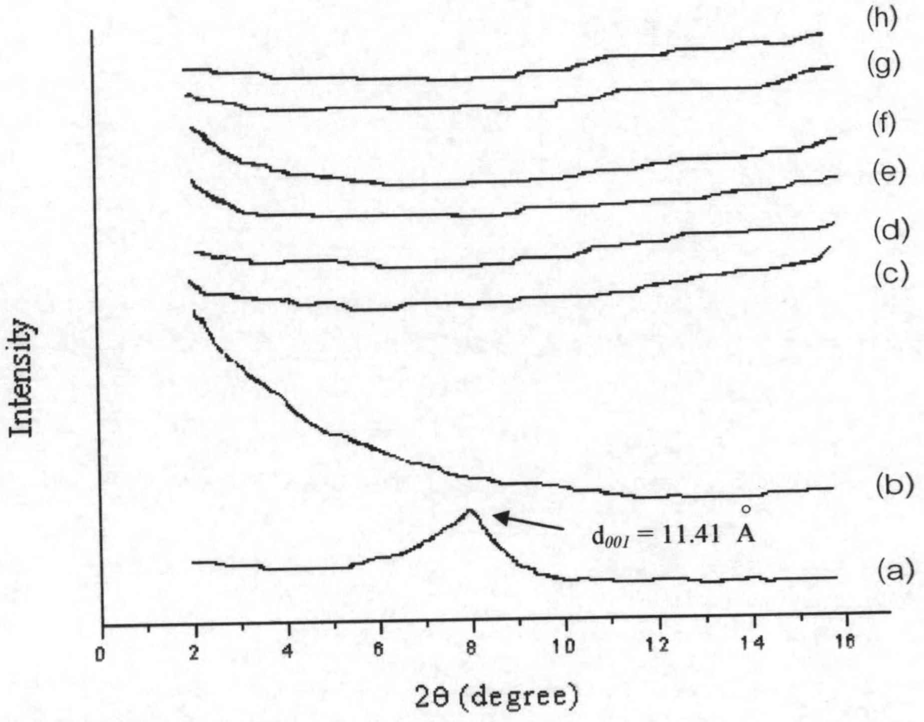
(e) 100 NR/3 MMTnanocomposite

(f) 100 NR/4 MMTnanocomposite

รูปที่ 4.1 แสดงพีกโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ตำแหน่ง 2θ = 7.75° ซึ่งเมื่อคำนวณจากสมการของแบรก ได้ค่า d_{001} = 11.41 Å แต่ของยางธรรมชาติไม่ปรากฏพีกให้เห็น ซึ่งแสดงถึงความเป็นอสัณฐาน ส่วนพีกโครงสร้างของยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (ทุกสูตร) พีกของระนาบ 001 ของมอนต์มอริลโลไนต์ได้หายไป แสดงว่าโมเลกุลของยางธรรมชาติได้แทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ และทำให้ชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์แตกออกจากกัน ดังนั้น วัสดุนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้อาจมีโครงสร้างเป็นแบบ exfoliate ทั้งนี้เนื่องจากได้ทำการปั่นกวนสารดิสเพอร์ชันของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกลชนิดความเร็วรอบสูงที่ความเร็ว 11,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำไปเติมลงในน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งการปั่นกวนด้วยความเร็วสูงทำให้เกิดแรงเฉือนมากพอที่ทำให้ชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ขยายกว้างขึ้นจนสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถแทรกเข้าไปและทำให้ชั้นดินแยกออกจากกัน

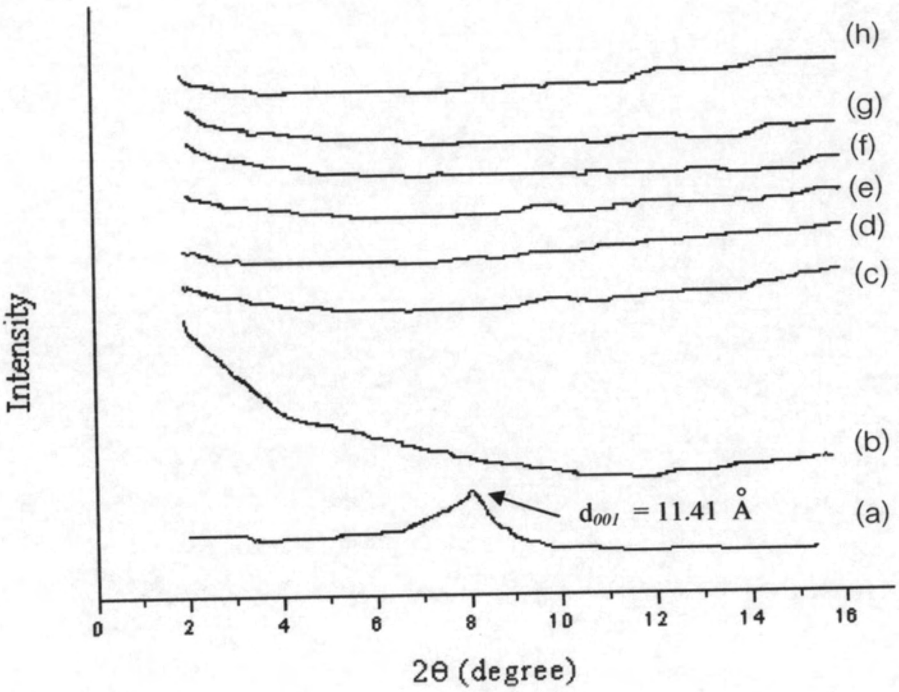
4.1.2 โครงสร้างผลึกของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

รูปที่ 4.2 แสดง X-ray pattern ของมอนต์มอริลโลไนต์, ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (อัตราส่วนของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 100/30) ที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน



รูปที่ 4.2 X-ray pattern ของ (a) MMT, (b) starch, (c) NR,
(d) 100 NR/30 starch,
(e) 100 NR/30 starch/1 MMT nanocomposite,
(f) 100 NR/30 starch/2 MMT nanocomposite,
(g) 100 NR/30 starch/3 MMT nanocomposite,
(h) 100 NR/30 starch/4 MMT nanocomposite

รูปที่ 4.3 แสดง X-ray pattern ของมอนต์มอริลโลไนต์, ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (อัตราส่วนของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 100/40) ที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน



รูปที่ 4.3 X-ray pattern ของ (a) MMT, (b) starch, (c) NR,

(d) 100 NR/40 starch,

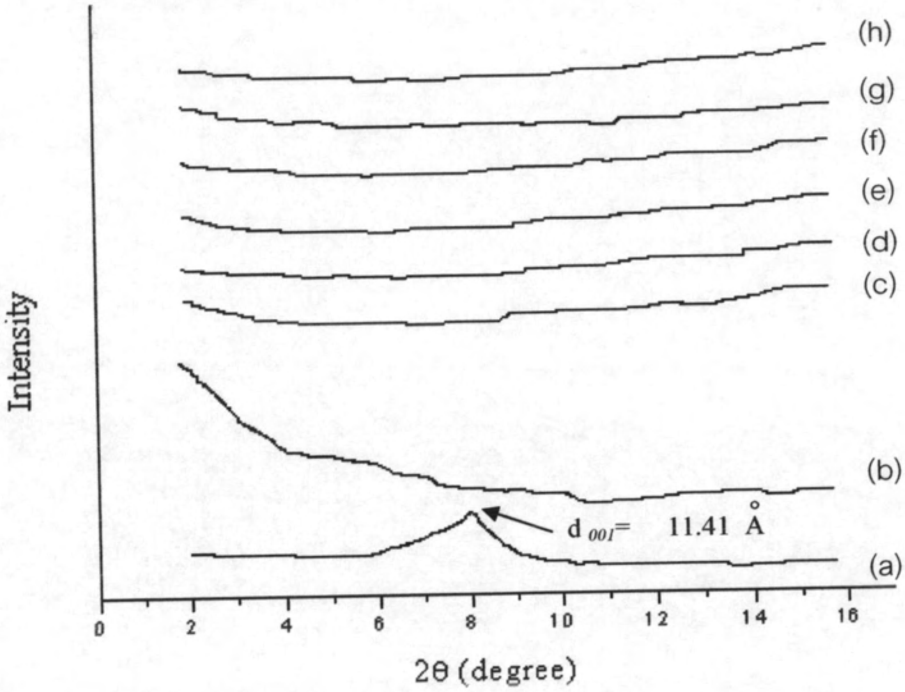
(e) 100 NR/40 starch/1 MMT nanocomposite,

(f) 100 NR/40 starch/2 MMT nanocomposite,

(g) 100 NR/40 starch/3 MMT nanocomposite,

(h) 100 NR/40 starch/4 MMT nanocomposite

รูปที่ 4.4 แสดง X-ray pattern ของมอนต์มอริลโลไนต์, ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (อัตราส่วนของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 100/50) ที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน



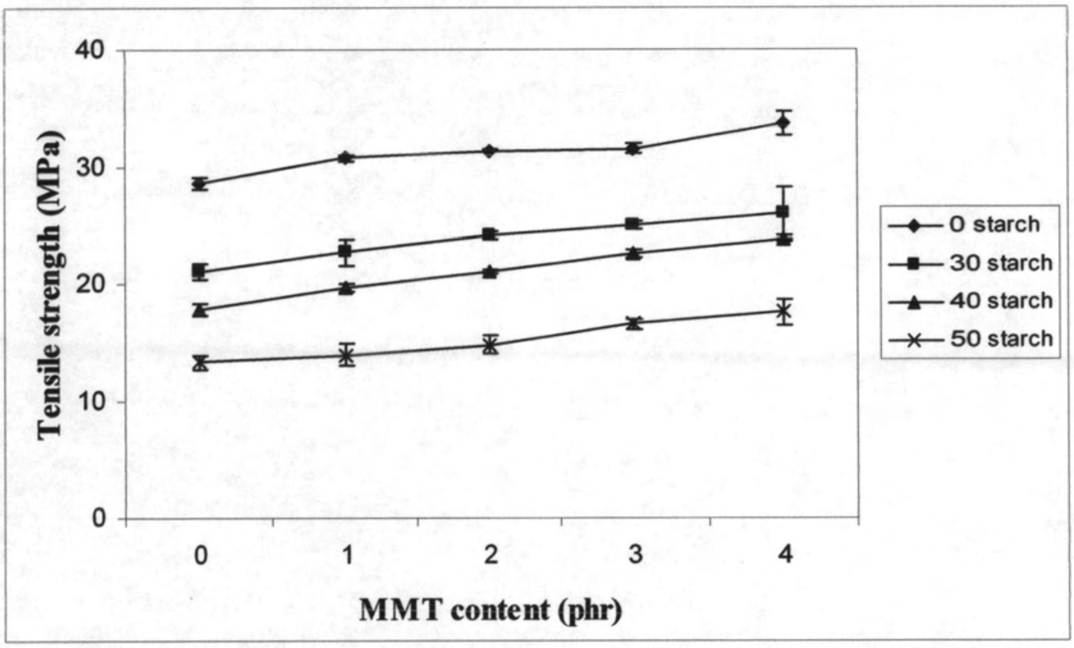
รูปที่ 4.4 X-ray pattern ของ (a) MMT, (b) starch, (c) NR,
(d) 100 NR/50 starch,
(e) 100 NR/50 starch/1 MMT nanocomposite,
(f) 100 NR/50 starch/2 MMT nanocomposite,
(g) 100 NR/50 starch/3 MMT nanocomposite,
(h) 100 NR/50 starch/4 MMT nanocomposite

รูปที่ 4.2-4.4 แสดงให้เห็นว่าวัสดุนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ (ทุกสูตร) อาจมีโครงสร้างเป็นแบบ exfoliate เพราะไม่ปรากฏพีกของระนาบ (001) ในมอนต์มอริลโลไนต์ ทั้งนี้เนื่องจากได้ทำการปั่นกวนสารดิสเพอร์ชันของแป้ง/มอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกลชนิดความเร็วรอบสูงที่ความเร็ว 11,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำไปเติมลงในน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบสูงทำให้เกิดแรงเฉือนมากพอที่ทำให้ชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ขยายกว้างขึ้นจนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถสอดแทรกเข้าไปและทำให้ชั้นดินแยกออกจากกัน

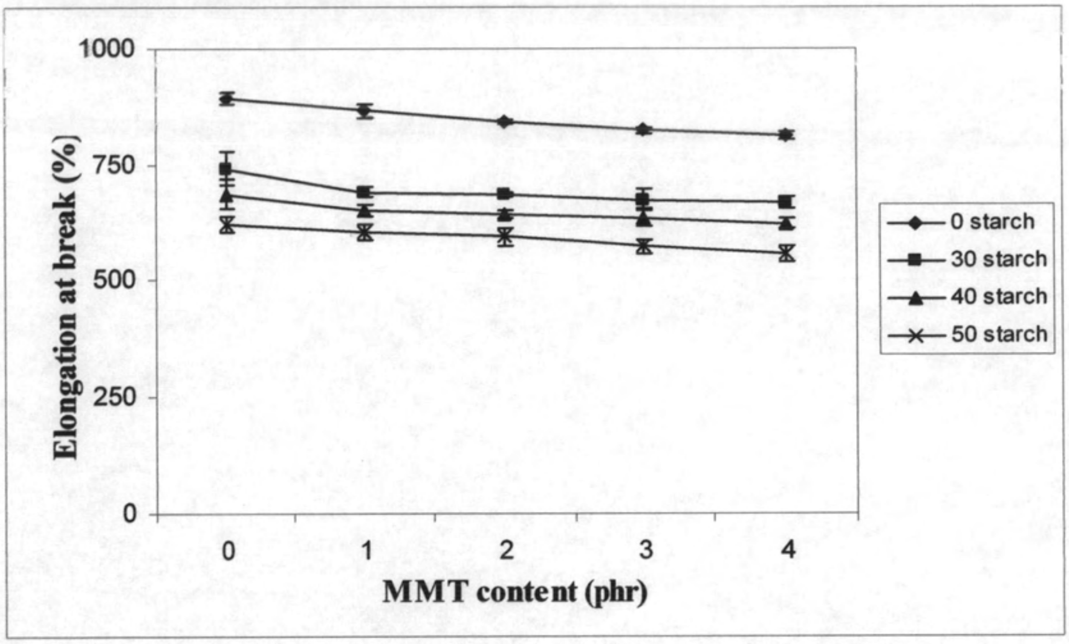
4.2 สมบัติด้านแรงดึงของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

ชิ้นทดสอบนาโนคอมพอสิตนำมาวิเคราะห์สมบัติด้านแรงดึง ได้แก่ ความต้านแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และมอดุลัสที่ระยะยืด 300 % ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาผลของแป้งมันสำปะหลัง และปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีผลต่อสมบัติด้านแรงดึงของชิ้นทดสอบนาโนคอมพอสิต

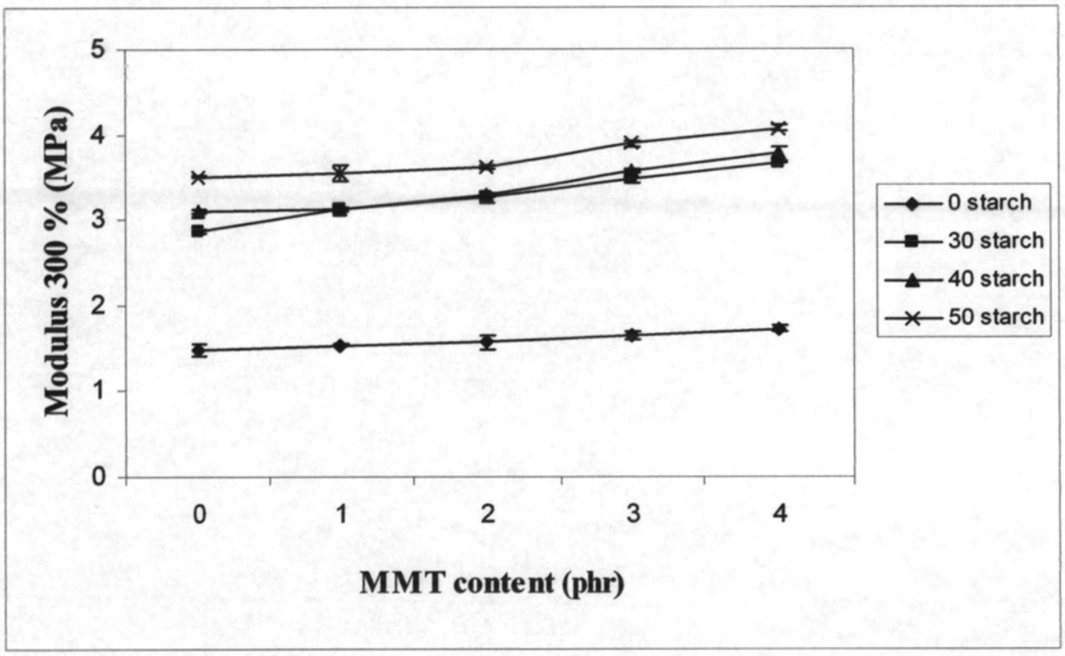
การทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D-412 โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ของ LLOYD รุ่น LR 5K เพื่อตรวจสอบความต้านแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และมอดุลัสที่ระยะยืด 300 % ได้ผลการทดสอบดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ และตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดของสมบัติเหล่านี้



รูปที่ 4.5 ความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต



รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิต



รูปที่ 4.7 มอดุลัสที่ระยะยืด 300 % ยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.1 สมบัติด้านความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

NR/starch/MMT	ความต้านแรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสที่ระยะยืด 300 % (MPa)
100/0/0	28.5	894.2	1.48
100/0/1	30.7	865.9	1.53
100/0/2	31.3	841.3	1.57
100/0/3	31.5	823	1.65
100/0/4	33.6	810.3	1.72
100/30/0	21.1	740.7	2.87
100/30/1	22.7	690	3.12
100/30/2	24.1	683	3.26
100/30/3	25	673	3.48
100/30/4	25.9	665.3	3.67
100/40/0	17.75	683.9	3.10
100/40/1	19.7	651	3.13
100/40/2	21.1	640.3	3.28
100/40/3	22.5	634.2	3.57
100/40/4	23.8	619.9	3.77
100/50/0	13.2	619.2	3.50
100/50/1	13.9	603.7	3.55
100/50/2	14.7	592.8	3.61
100/50/3	16.5	571.7	3.89
100/50/4	17.6	556.4	4.07

เมื่อพิจารณาค่าความต้านแรงดึงจากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.1 พบว่า การเติมแป้งมันสำปะหลังเข้าไปในยางธรรมชาติมีผลทำให้ความต้านแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมีสมบัติแข็งและเปราะ จึงไม่ได้ช่วยเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ แต่กลับมีผลทำให้ความต้านแรงดึงลดลง โดยเฉพาะเมื่อใส่เข้าไปในปริมาณสูงถึง 50 phr ซึ่งการเติมมอนต์มอริลโลไนต์เข้าไปในปริมาณเล็กน้อย มีส่วนช่วยให้ความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเสริมแรงของมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน โดยโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้สอดแทรกเข้าไปในชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ชั้นดินแตกออกจากกัน เกิดการกระจายตัวที่ดีของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์และช่วยเพิ่มพื้นผิวสำหรับการยึดเกาะอีกด้วย

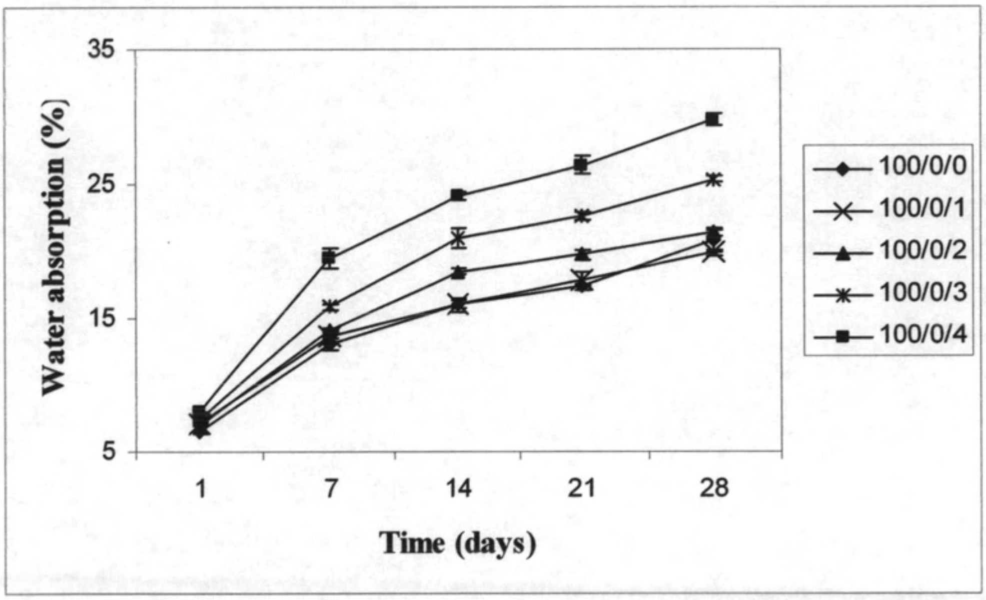
จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลงเมื่อเติมทั้งแป้งมันสำปะหลังและมอนต์มอริลโลไนต์เข้าไปในยางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งเปราะ ส่วนมอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็ง ดังนั้น เมื่อใส่เข้าไปผสมกับยางธรรมชาติจึงมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ลดลง อีกทั้งอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังและมอนต์มอริลโลไนต์ยังขัดขวางการยืดตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม การใส่แป้งมันสำปะหลังมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงมากกว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์

ผลของมอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของวัสดุนาโนคอมพอสิตในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อใส่แป้งมันสำปะหลังและมอนต์มอริลโลไนต์เข้าไปในยางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังและมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงมีผลทำให้มอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งแป้งมันสำปะหลังและมอนต์มอริลโลไนต์ยังขัดขวางการยืดตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ทำให้ต้องใช้แรงในการดึงยืดที่สูงมากขึ้น หากแต่การใส่แป้งมันสำปะหลังมีผลทำให้มอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์

4.2 การดูดซึมน้ำ

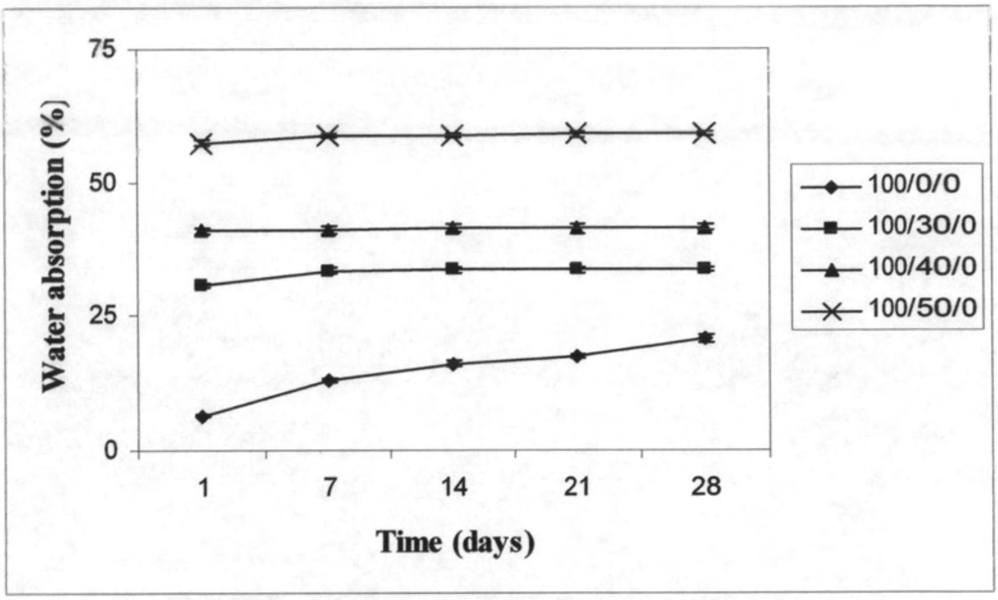
ทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานนาโนคอมพอสิตซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570-98 ที่ระยะเวลา 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน

รูปที่ 4.8 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน ซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570-98 ที่ระยะเวลา 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน



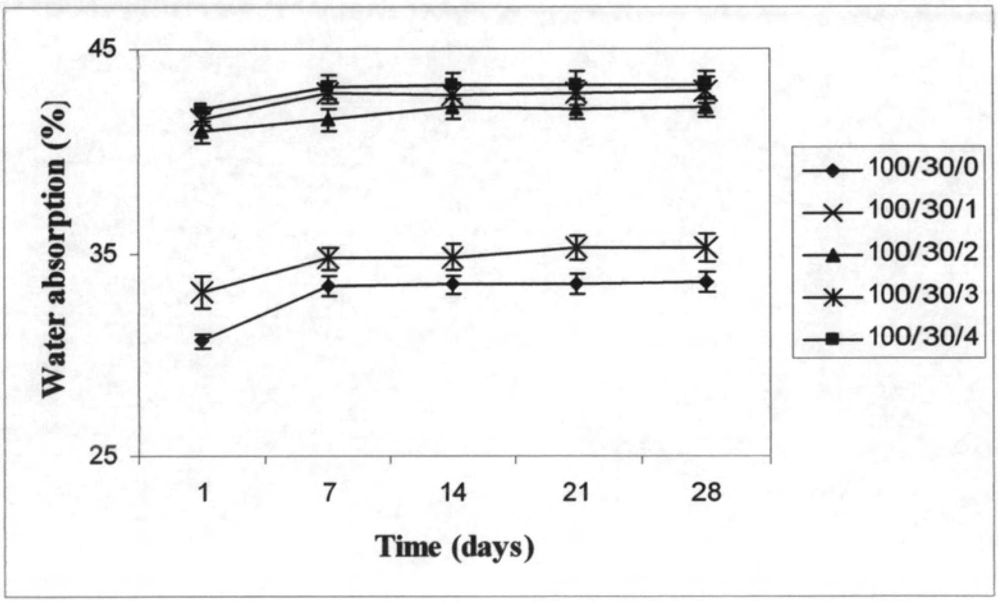
รูปที่ 4.8 การดูดซึมน้ำของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคคมพคสิต

รูปที่ 4.9 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570-98 ที่ระยะเวลา 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน



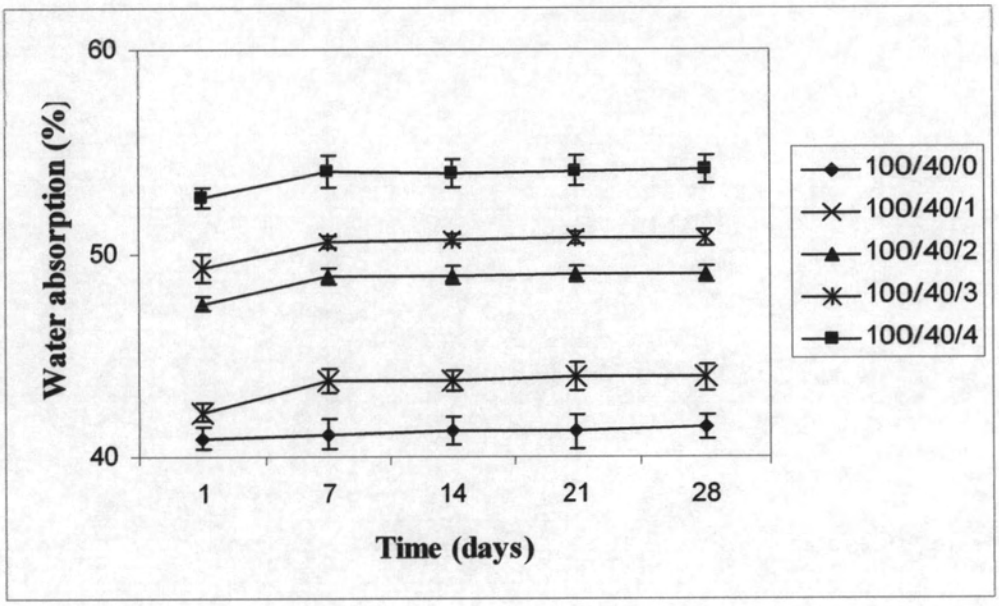
รูปที่ 4.9 การดูดซึมน้ำของยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง

รูปที่ 4.10 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 100/30 เปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโน-คอมพอสิตที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังเท่ากัน แต่มีปริมาณมอนต์มอริล-โลไนต์ต่างกัน ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570-98 ที่ระยะเวลา 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน



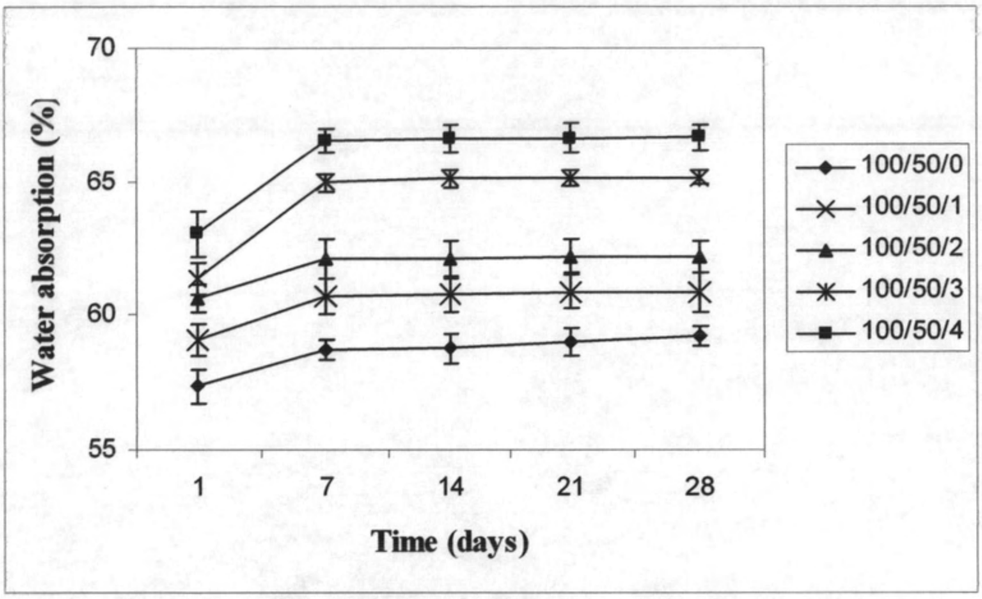
รูปที่ 4.10 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/30) และ ยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/30/MMT)

รูปที่ 4.11 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 100/40 เปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโน-คอมพอสิตที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังเท่ากัน แต่มีปริมาณมอนต์มอริล-โลไนต์ต่างกัน ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570-98 ที่ระยะเวลา 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน



รูปที่ 4.11 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/40) และ ยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/40/MMT)

รูปที่ 4.12 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 100/50 เปรียบเทียบกับการดูดซึมน้ำของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอ-ริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังเท่ากัน แต่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570-98 ที่ระยะเวลา 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน



รูปที่ 4.12 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/50) และ
ยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/50/MMT)

ตารางที่ 4.2 แสดงรายละเอียดของค่าการดูดซึมน้ำของยางธรรมชาติ, พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.2 การดูดซึมน้ำของยางธรรมชาติ, พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

NR/starch/MMT	การดูดซึมน้ำ (%)				
	เวลา (วัน)				
	1	7	14	21	28
100/0/0	6.46	13.03	15.97	17.35	20.77
100/0/1	7.10	13.67	16.04	17.88	19.85
100/0/2	6.99	14.10	18.50	19.73	21.44
100/0/3	7.46	15.84	20.96	22.56	25.37
100/0/4	7.94	19.46	24.10	26.39	29.79
100/30/0	30.67	33.41	33.44	33.50	33.57
100/30/1	33.07	34.71	34.78	35.26	35.26
100/30/2	40.95	41.52	42.11	42.02	42.19
100/30/3	41.58	42.86	42.71	42.82	42.97
100/30/4	42.07	43.17	43.22	43.22	43.23
100/40/0	40.93	41.11	41.26	41.28	41.44
100/40/1	42.21	43.71	43.71	43.92	43.91
100/40/2	47.51	48.83	48.90	48.97	48.99
100/40/3	49.26	50.53	50.68	50.74	50.72
100/40/4	52.70	53.99	53.90	54.02	54.08
100/50/0	57.35	58.70	58.73	58.98	59.21
100/50/1	59.04	60.70	60.74	60.87	60.87
100/50/2	60.62	62.08	62.09	62.19	62.20
100/50/3	61.38	64.94	65.09	65.12	65.16
100/50/4	63.04	66.52	66.60	66.63	66.65

จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำไม่ต่างกันมากนัก และในช่วง 7 วัน แรก พบว่า ชิ้นงานมีอัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากโมเลกุลของน้ำได้แทรกเข้าไปในปริมาตรอิสระ (free volume) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติซึ่งมีความยืดหยุ่น และหลังจากนั้นอัตราการดูดซึมน้ำค่อยๆ ลดลง เพราะปริมาณของปริมาตรอิสระลดน้อยลง โดยมีน้ำเข้าไปแทรกอยู่ และเมื่อพิจารณาชิ้นงานนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน พบว่า ชิ้นงานมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความชอบน้ำ ถึงแม้ได้ถูกดัดแปรให้มีความชอบพอลิเมอร์มากขึ้น แต่ยังอาจมีส่วนที่ชอบน้ำเหลืออยู่ในโครงสร้างผลึกของดิน

จากรูปที่ 4.9 และและตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้ใส่แป้งอย่างเห็นได้ชัด และสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้นตามปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ –OH จำนวนมาก ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ โดยดูดซึมน้ำได้มากจนเกือบอิ่มตัวตั้งแต่แช่ชิ้นงานไว้เพียง 1 วัน เท่านั้น และอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปจนครบ 28 วัน

จากรูปที่ 4.10-4.12 และและตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และมีแนวโน้มของการดูดซึมน้ำไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ ในช่วงแรกมีอัตราการดูดซึมน้ำมากและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปหลัง 7 วันแรก และอาจกล่าวได้ว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังและมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

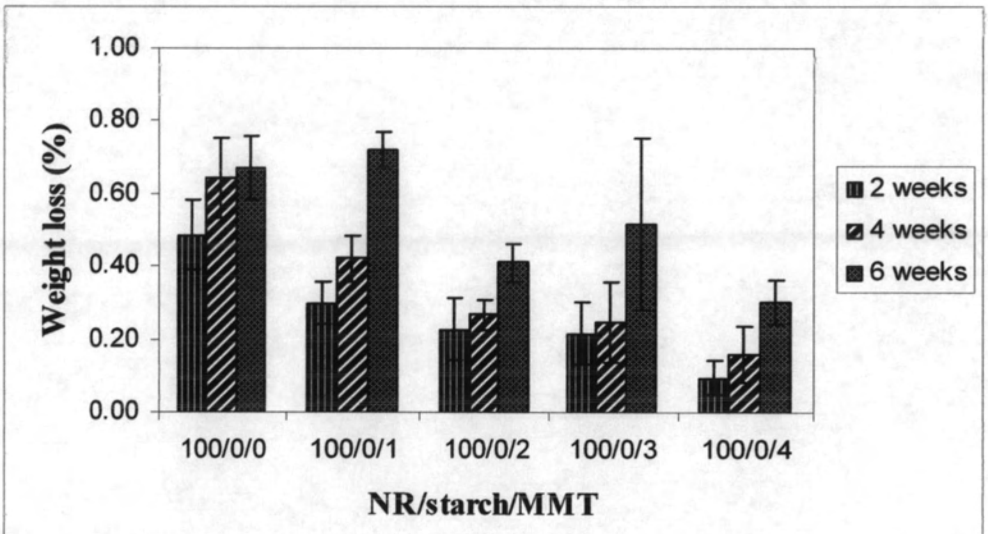
4.4 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติ/แป้งมัน-สำปะหลัง/ มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตทำโดยตรวจสอบหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์ และตรวจสอบสมบัติด้านแรงดึงของชิ้นงานที่ลดลงภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

4.4.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน

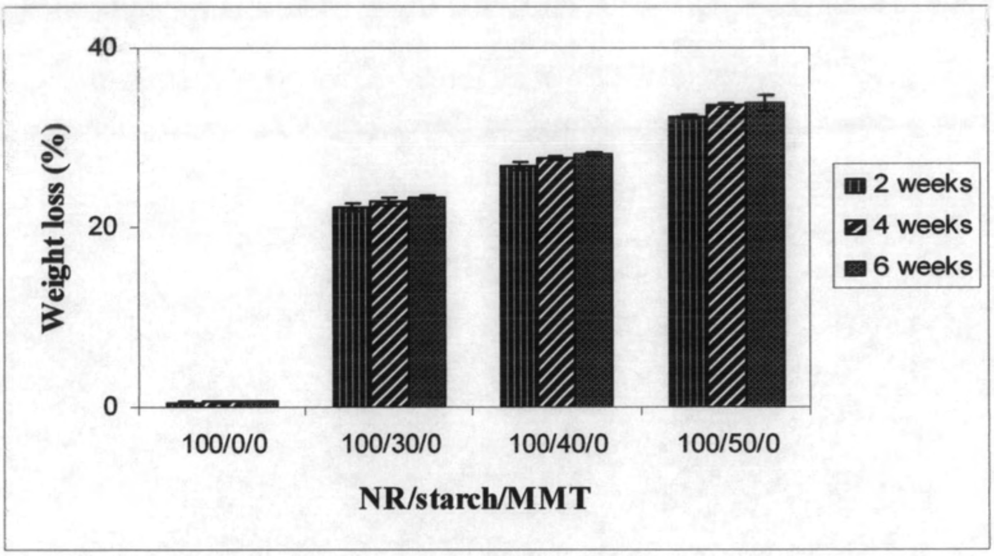
การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติ/แป้งมัน-สำปะหลัง/ มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต โดยตรวจสอบหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน



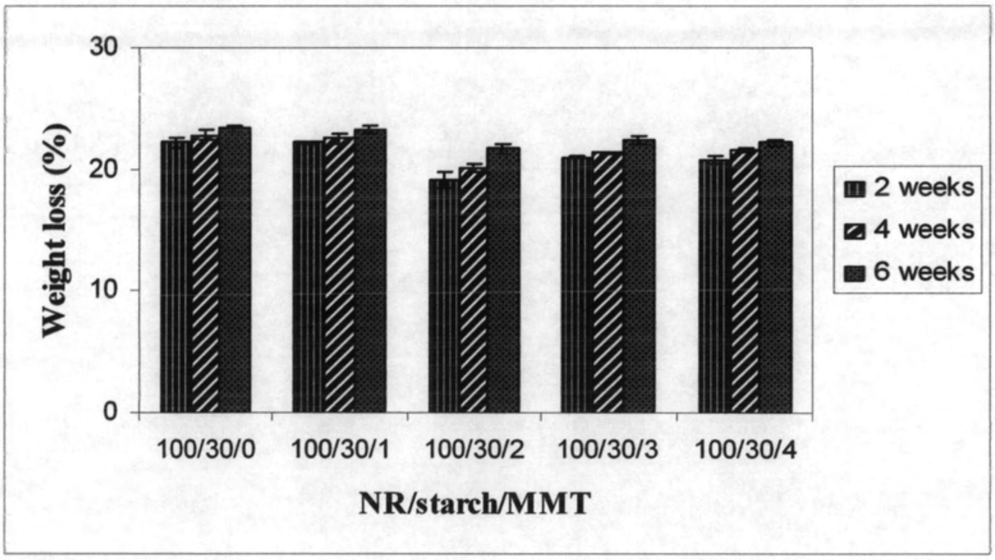
รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

รูปที่ 4.14แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ กัน



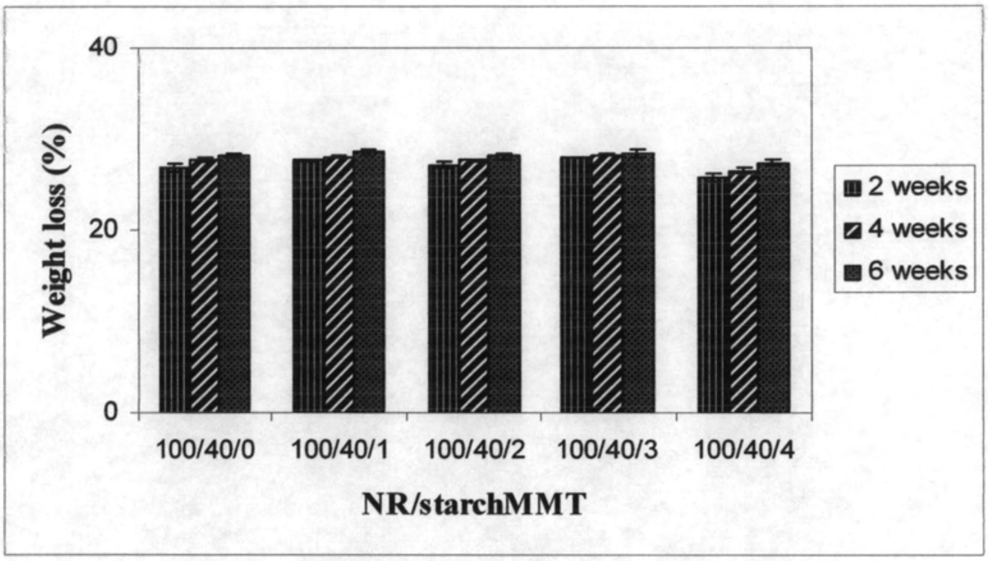
รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง

รูปที่ 4.15แสดงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 100/30 เปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์-มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังเท่ากัน แต่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน



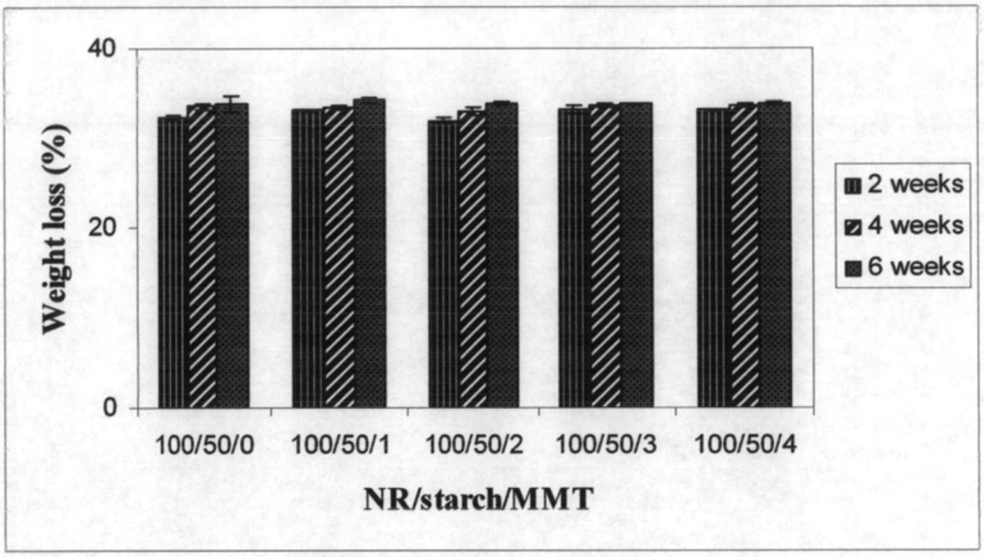
รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/30) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/30/MMT)

รูปที่ 4.16 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 100/40 เปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์-มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังเท่ากัน แต่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน



รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/40) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/40/MMT)

รูปที่ 4.17 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 100/50 เปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์-มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังเท่ากัน แต่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน



รูปที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/50) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/50/MMT)

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของยางธรรมชาติ. พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของยางธรรมชาติ, พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโน-คอมพอสิตภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

NR/starch/MMT	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป		
	ระยะเวลาในการฝังดิน		
	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์	6 สัปดาห์
100/0/0	0.49	0.64	0.67
100/0/1	0.30	0.42	0.72
100/0/2	0.23	0.27	0.41
100/0/3	0.22	0.25	0.52
100/0/4	0.09	0.16	0.30
100/30/0	22.24	22.80	23.34
100/30/1	22.18	22.52	23.25
100/30/2	19.14	20.07	21.69
100/30/3	21.00	21.39	22.38
100/30/4	20.79	21.63	22.18
100/40/0	26.85	27.62	28.13
100/40/1	27.62	28.00	28.53
100/40/2	27.07	27.59	28.06
100/40/3	27.91	28.17	28.39
100/40/4	25.66	26.45	27.32
100/50/0	32.35	33.53	33.83
100/50/1	33.08	33.39	34.21
100/50/2	31.93	32.96	33.85
100/50/3	33.19	33.54	33.80
100/50/4	33.14	33.57	33.91

จากรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาที่นำชิ้นงานไปฝังดินเพิ่มขึ้น พบว่า ทั้งยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แต่มีค่าต่ำมากไม่ถึง 1% และถ้านำแป้งมันสำปะหลังมาผสมกับยางธรรมชาติ พบว่า เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และน้ำหนักได้หายไปมากในช่วง 2 สัปดาห์แรก หลังจากนั้นอัตราการหายไปของน้ำหนักเริ่มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงถึงการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินได้บริโภคแป้งในชิ้นงานเป็นอาหาร ดังนั้น เมื่อปริมาณแป้งในชิ้นงานเพิ่มขึ้น มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากรูปที่ 4.15-4.17 และตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในวัสดุนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้น และน้ำหนักได้หายไปมากใน ช่วง 2 สัปดาห์แรก หลังจากนั้นอัตราการหายไปของน้ำหนักเริ่มลดลงเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักของชิ้นงานที่หายไปส่วนใหญ่เกิดจากแป้งได้ถูกบริโภคโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน และชิ้นงานมีแนวโน้มที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

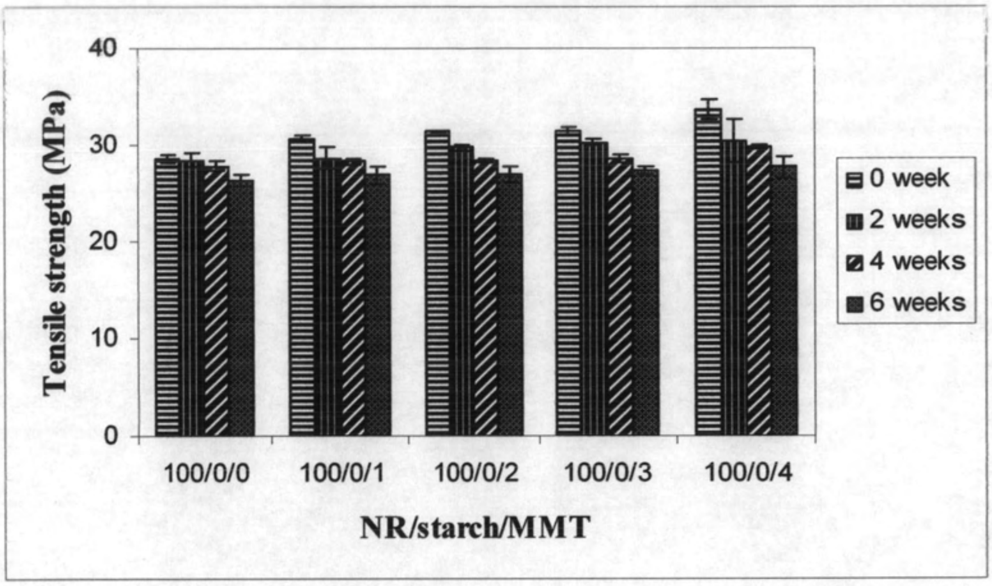
4.4.2 สมบัติด้านความแรงดึงที่เปลี่ยนไป

การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติ/แป้งมัน-สำปะหลัง/ มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต ทำโดยตรวจสอบสมบัติด้านแรงดึงของชิ้นงานที่ลดลงภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

4.4.2.1 ความต้านแรงดึง

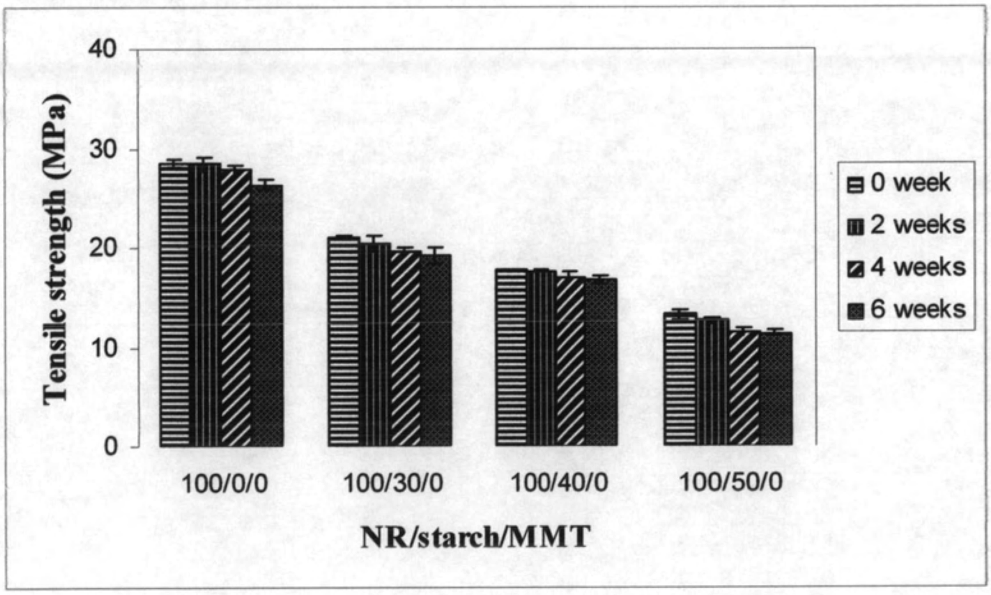
การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติ/แป้งมัน-สำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต โดยตรวจสอบความต้านแรงดึงของชิ้นงานที่ลดลงภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.18 แสดงค่าความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



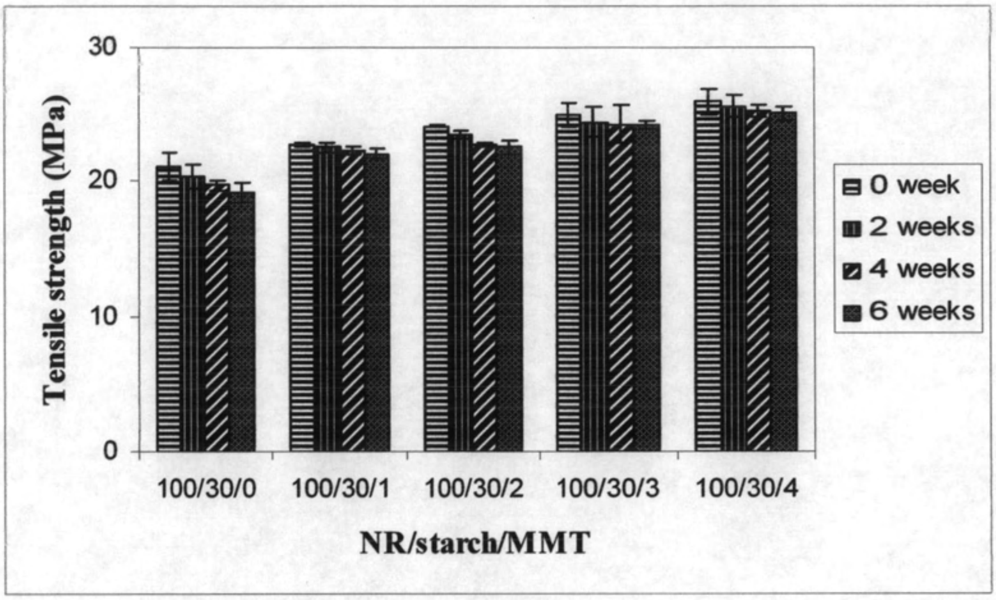
รูปที่ 4.18 ความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิตที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.19 แสดงค่าความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



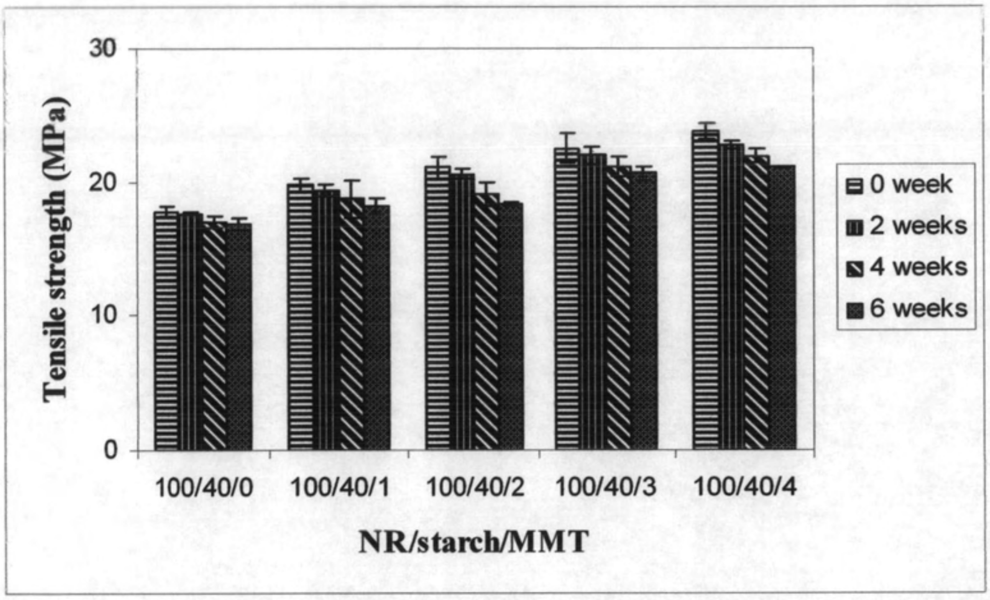
รูปที่ 4.19 ความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.20 แสดงความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/30) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/30/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



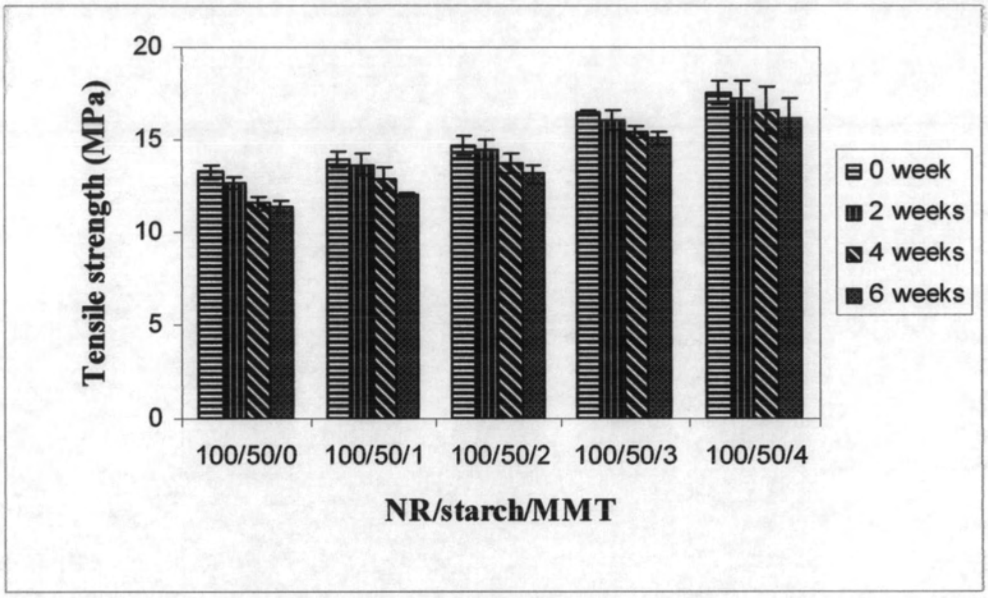
รูปที่ 4.20 ความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/30) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/30/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.21แสดงความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/40) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/40/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



รูปที่ 4.21 ความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/40) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/40/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.22 แสดงความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/50) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/50/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



รูปที่ 4.22 ความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/50) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/50/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดของความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติ, พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

ตารางที่ 4.4 ความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติ, พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

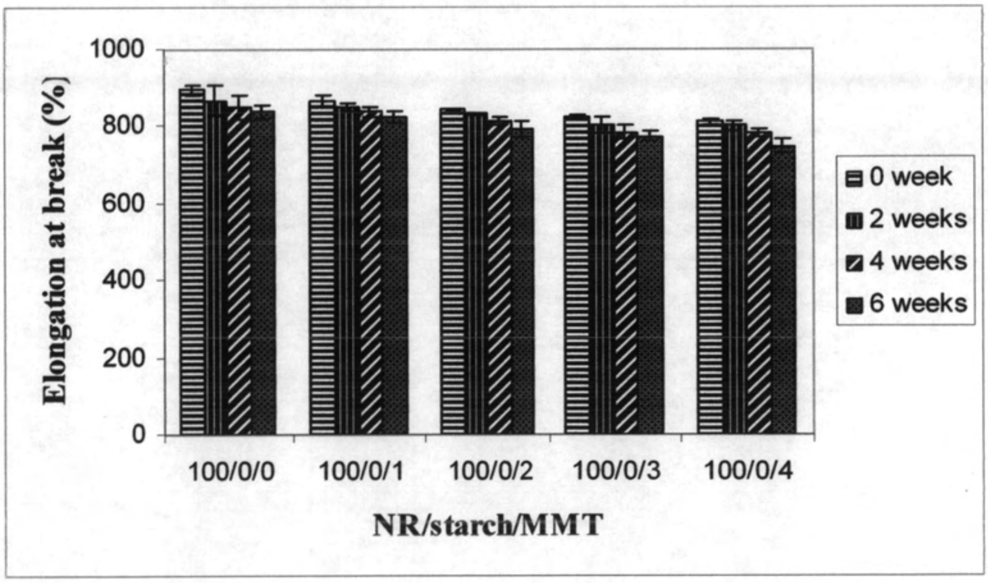
NR/starch/MMT	ระยะเวลาในการย่อยสลาย			
	ไม่ฝัง	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์	6 สัปดาห์
100/0/0	28.54	28.43	27.79	26.32
100/0/1	30.7	28.66	28.32	26.84
100/0/2	31.35	29.7	28.4	26.95
100/0/3	31.5	30.26	28.61	27.36
100/0/4	33.64	30.47	29.75	27.67
100/30/0	21.05	20.37	19.68	19.15
100/30/1	22.71	22.53	22.27	22
100/30/2	24.1	23.46	22.71	22.51
100/30/3	24.96	24.38	24.27	24.18
100/30/4	25.92	25.58	25.27	25.03
100/40/0	17.75	17.64	17.05	16.8
100/40/1	19.73	19.33	18.73	18.17
100/40/2	21.06	20.58	19.11	18.33
100/40/3	22.52	21.98	21.13	20.65
100/40/4	23.81	22.78	21.9	21.07
100/50/0	13.25	12.7	11.56	11.41
100/50/1	13.93	13.66	12.84	12.01
100/50/2	14.73	14.45	13.7	13.18
100/50/3	16.5	16.09	15.41	15.07
100/50/4	17.56	17.19	16.58	16.17

จากรูปที่ 4.18-4.22 และตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทั้งหมดมีความต้านแรงดึงลดลงเมื่อระยะเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านแรงดึงไม่มากนักทั้งที่เปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เพราะน้ำหนักที่หายไปส่วนใหญ่เป็นน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง และอาจเป็นเพราะชิ้นงานได้ดูดซับน้ำเข้าไปในโดยน้ำได้ทำหน้าที่เป็น พลาสติไซเซอร์ให้กับแป้งมันสำปะหลัง ทำให้มีความอ่อนตัวมากขึ้น ความแข็งเปราะลดลงจึงยังคงทำให้ชิ้นงานมีความต้านแรงดึงไม่ลดต่ำลงมากนัก ดังนั้น การหายไปของแป้งซึ่งเป็นพอลิ-เมอร์ที่แข็งเปราะจึงมีผลทำให้ความต้านแรงดึงลดลงไม่มากนัก

4.4.2.2 **เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด**

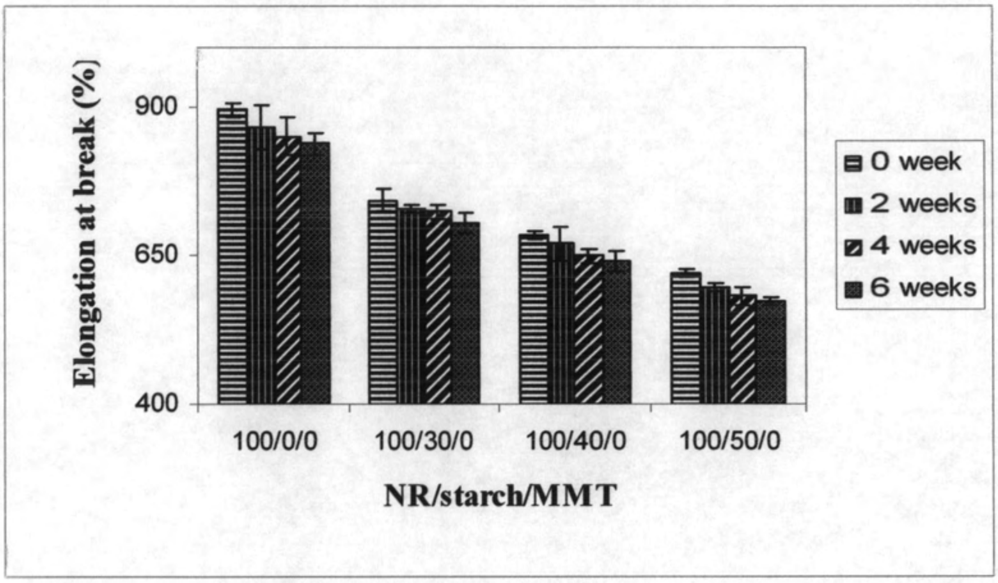
การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติ/แป้งมัน-สำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต โดยตรวจสอบเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานที่ลดลงภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.23 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



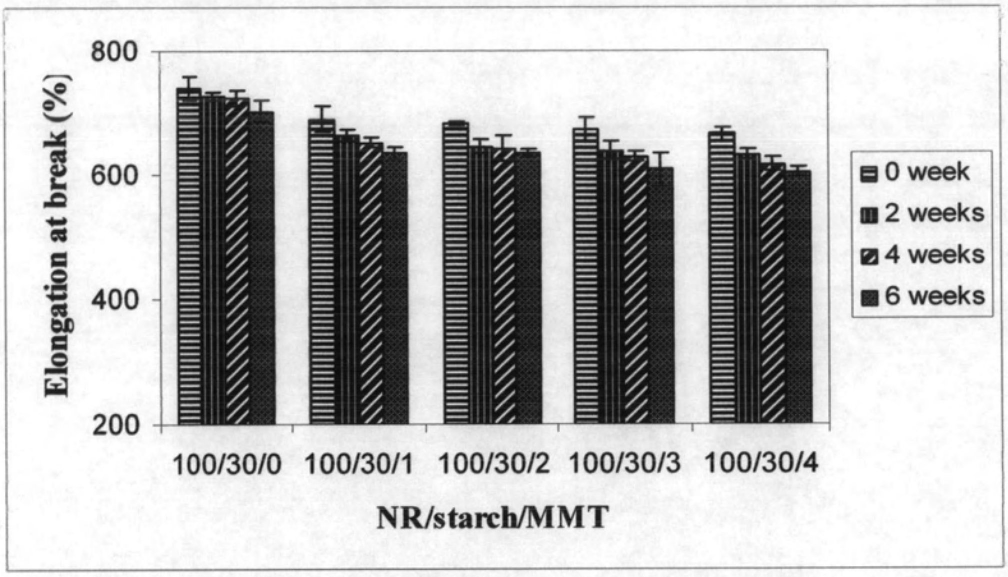
รูปที่ 4.23 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.24 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



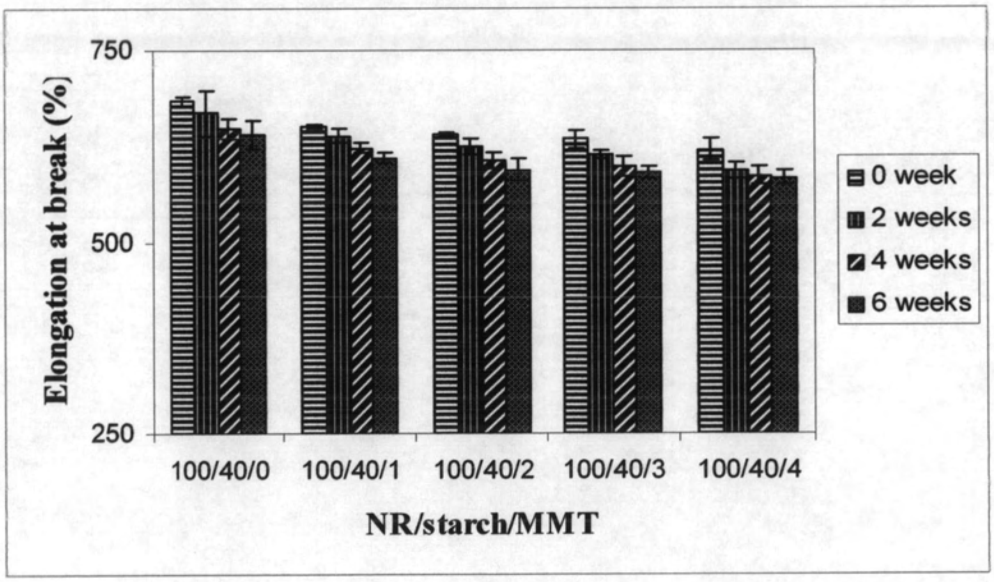
รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.25 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/30) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/30/MMT) ที่ เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



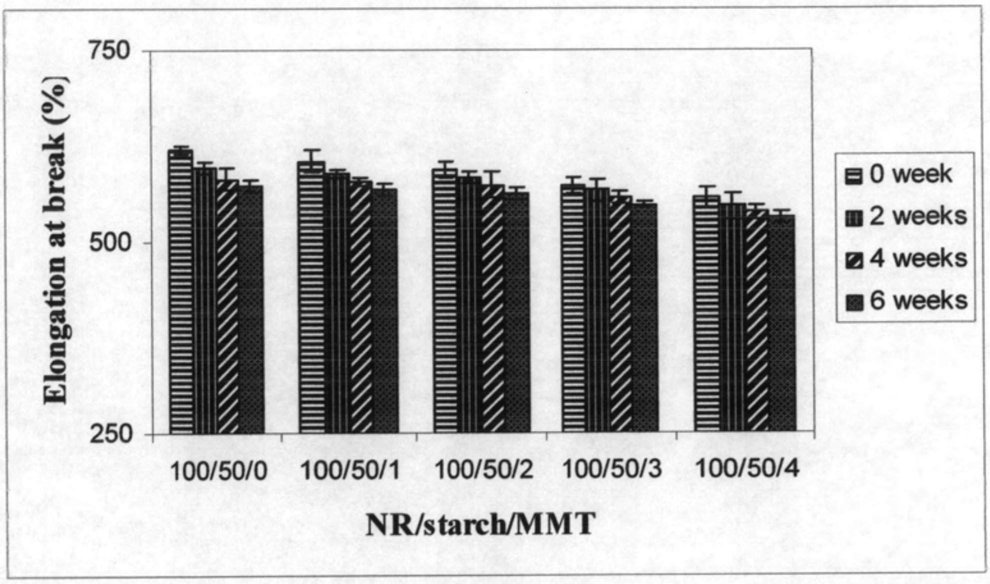
รูปที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/30) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/30/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.26 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/40) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/40/MMT) ที่ เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



รูปที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/40) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/40/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.27 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/50) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/50/MMT) ที่ เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/50) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/50/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

ตารางที่ 4.5 แสดงรายละเอียดของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์-มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ, พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์

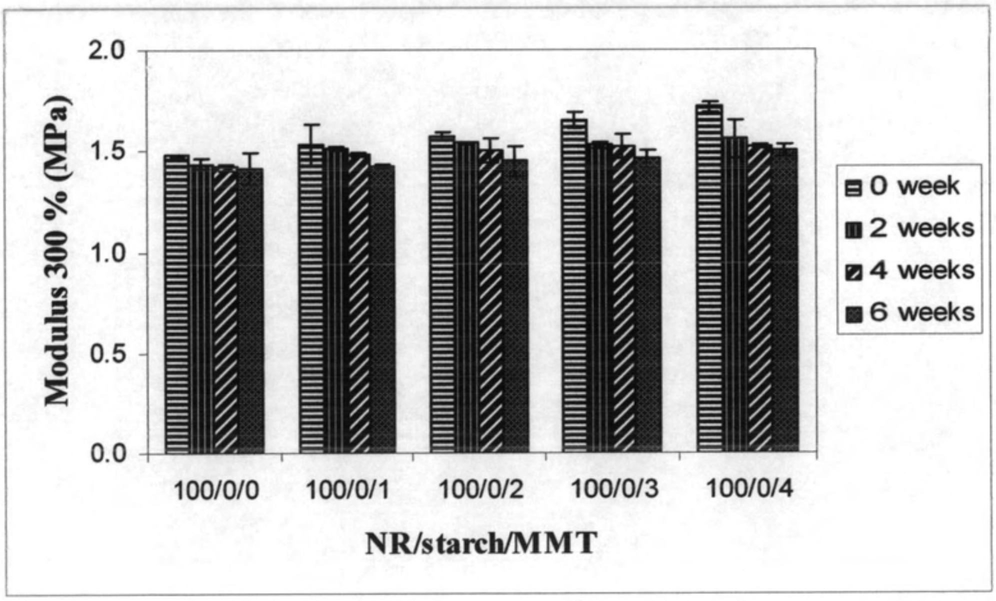
NR/starch/MMT	ระยะเวลาในการย่อยสลาย			
	ไม่ฝัง	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์	6 สัปดาห์
100/0/0	894.16	866.73	848.7	837.7
100/0/1	865.9	849.4	836.07	822.87
100/0/2	841.3	831.4	811.9	791.3
100/0/3	823	803.13	782.8	772.97
100/0/4	810.3	801.23	779.5	746.2
100/30/0	740.7	727.3	722.6	702.3
100/30/1	690	664.7	651.53	635.8
100/30/2	683	646	642.8	634.7
100/30/3	673	639.47	630.07	608.6
100/30/4	665.3	633.13	616.9	604.27
100/40/0	690	664.7	651.53	635.8
100/40/1	651	638.73	622.5	609.7
100/40/2	640.3	624.97	606.1	593.77
100/40/3	634.2	613.5	598.03	590.47
100/40/4	619.93	593.8	586.27	583.5
100/50/0	619.17	595.67	580.97	571.93
100/50/1	603.7	587.4	577.07	565.9
100/50/2	592.83	583.53	573.13	561.57
100/50/3	571.7	565.5	556.43	547.03
100/50/4	556.38	544.8	536.7	529.7

จากรูปที่ 4.23-4.27 และตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทั้งหมดมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเมื่อระยะเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดไม่มากนักทั้งที่เปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เพราะน้ำหนักที่หายไปส่วนใหญ่เป็นน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งเปราะจึงมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงไม่มากนักและอาจเป็นเพราะชิ้นงานได้ดูดซับน้ำเข้าไปในโดยน้ำได้ทำหน้าที่เป็น พลาสติไซเซอร์ให้กับแป้งมันสำปะหลัง ทำให้มีความอ่อนตัวมากขึ้น ความแข็งเปราะลดลง จึงยังคงทำให้ชิ้นงานมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดไม่ลดต่ำลงมากนัก

4.4.2.3 **มอดุลัสที่ระยะยืด 300%**

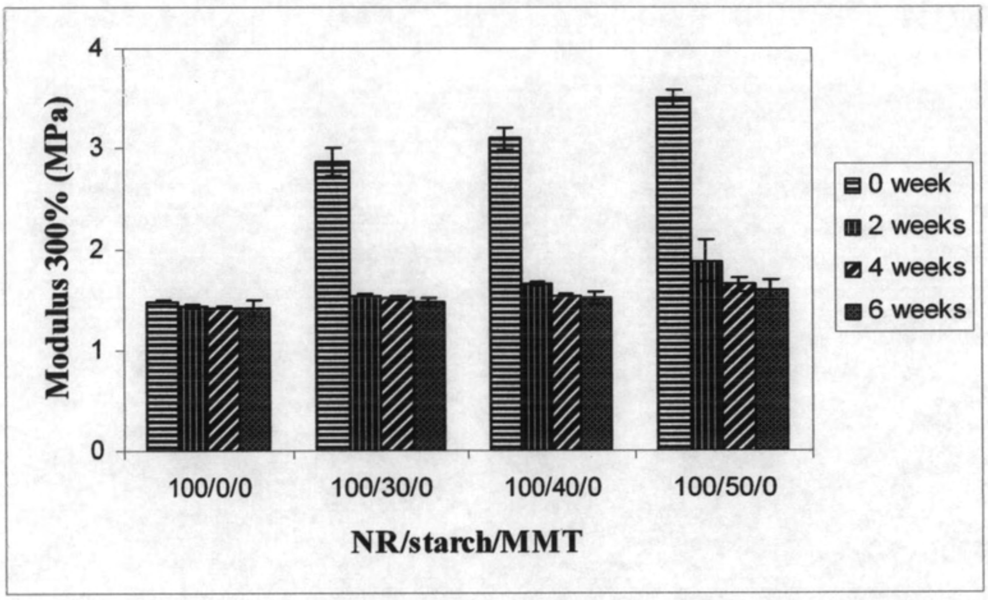
การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติ/แป้งมัน-สำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต โดยตรวจสอบความแข็งของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบมอดุลัสที่ระยะยืด 300%ของชิ้นงานที่ลดลงภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.28 แสดงมอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



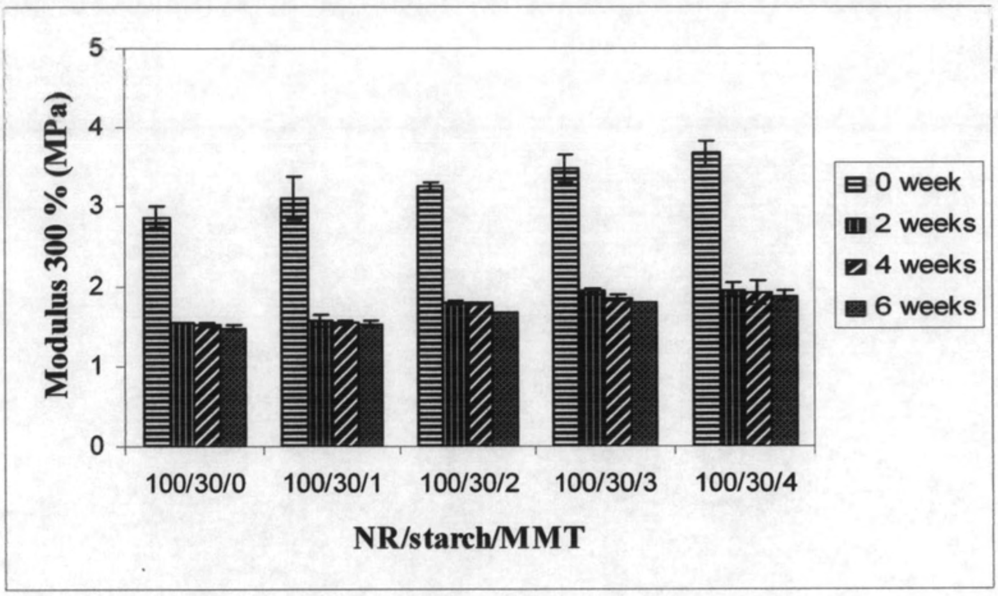
รูปที่ 4.28 มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.29 แสดงมอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



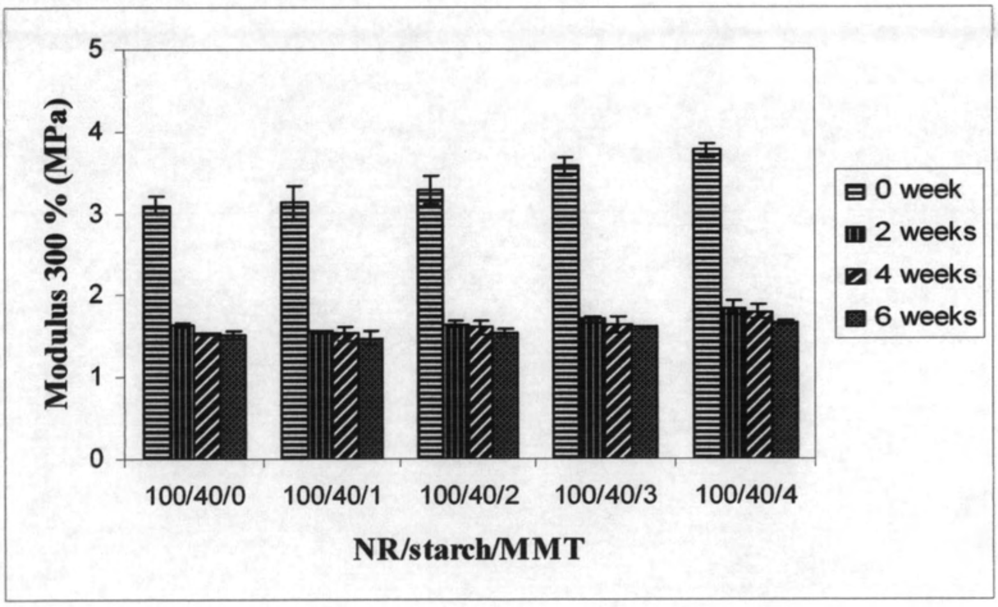
รูปที่ 4.29 มอดุลัสที่ระยะยืด 300%ของยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.30 แสดงมอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/30) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/30/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



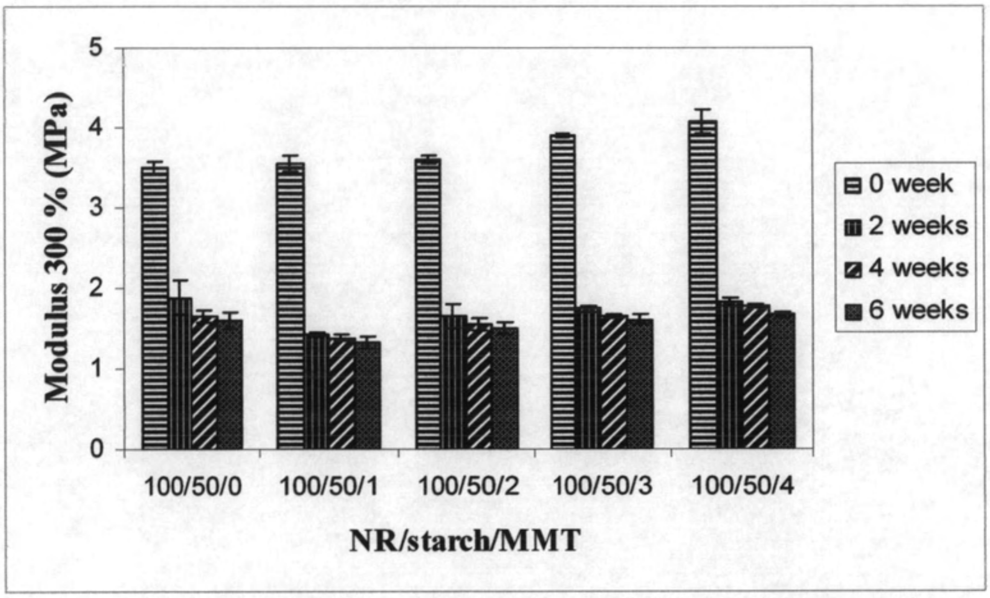
รูปที่ 4.30 มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/30) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/30/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.31 แสดงมอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/40) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/40/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



รูปที่ 4.31 มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/40) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/40/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.32 แสดงมอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมัน-สำปะหลัง (100/40) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/40/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์



รูปที่ 4.32 มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง (100/50) และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (100/50/MMT) ที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

ตารางที่ 4.6 แสดงรายละเอียดของมอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของยางธรรมชาติ, พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่เปลี่ยนไปภายหลังการฝังดินเป็นเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์

ตารางที่ 4.6 มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของยางธรรมชาติ, พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์

NR/starch/MMT	ระยะเวลาในการย่อยสลาย			
	ไม่ฝัง	**2 สัปดาห์**	**4 สัปดาห์**	**6 สัปดาห์**
100/0/0	1.48	1.44	1.42	1.41
100/0/1	1.53	1.51	1.48	1.42
100/0/2	1.57	1.54	1.50	1.45
100/0/3	1.65	1.53	1.52	1.46
100/0/4	1.72	1.56	1.52	1.50
100/30/0	2.87	1.54	1.51	1.47
100/30/1	3.12	1.58	1.54	1.53
100/30/2	3.26	1.79	1.78	1.67
100/30/3	3.48	1.93	1.85	1.79
100/30/4	3.67	1.95	1.92	1.87
100/40/0	3.10	1.65	1.54	1.52
100/40/1	3.13	1.57	1.54	1.48
100/40/2	3.28	1.65	1.61	1.54
100/40/3	3.57	1.70	1.64	1.61
100/40/4	3.77	1.85	1.80	1.67
100/50/0	3.50	1.88	1.65	1.60
100/50/1	3.55	1.42	1.38	1.33
100/50/2	3.61	1.64	1.55	1.51
100/50/3	3.89	1.74	1.65	1.61
100/50/4	4.07	1.82	1.77	1.67

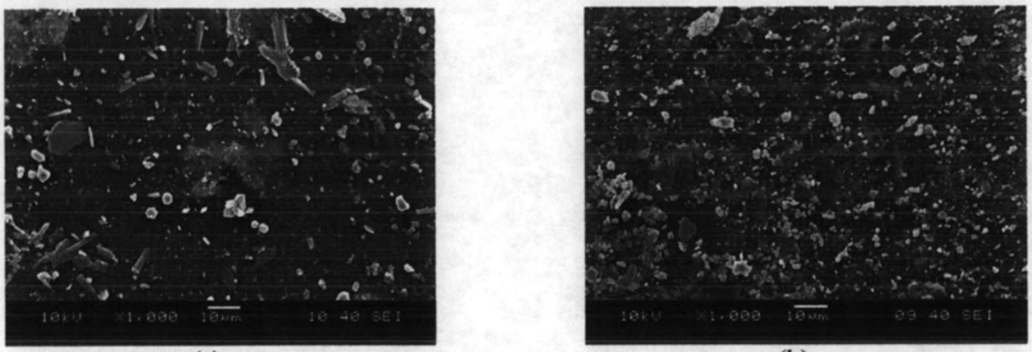
จากรูปที่ 4.28-4.32 และตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทั้งหมดมีมอดุลัสที่ระยะยืด 300% ลดลงอย่างเห็นได้ชัดภายหลังจากฝังดินไว้เป็นเวลา 2 สัปดาห์ และหลังจากนั้นอัตราการลดลงของมอดุลัสที่ระยะยืด 300% เริ่มลดลงจนเกือบคงที่ ทั้งนี้เพราะน้ำหนักที่หายไปส่วนใหญ่เป็นน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งเปราะและอาจเป็นเพราะชิ้นงานได้ดูดซับน้ำเข้าไปในโดยน้ำได้ทำหน้าที่เป็น พลาสติไซเซอร์ให้กับแป้งมันสำปะหลัง ทำให้มีความอ่อนตัวมากขึ้น ความแข็งเปราะลดลง จึงมีผลทำให้มอดุลัสของชิ้นงานลดลงมาก

จากผลการทดสอบสมบัติด้านความต้านแรงดึง พบว่า สมบัติต่างๆ มีค่าลดลงภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลาทั้งหมด 6 สัปดาห์ จึงอาจกล่าวได้ว่าชิ้นงานมีแนวโน้มที่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพ โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินได้เข้าไปในชิ้นงานผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำซึ่งถูกดูดซับไว้ และบริโภคแป้งมันสำปะหลังเป็นอาหาร

4.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

การตรวจสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์-มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต โดยตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ ด้วยเทคนิค SEM

รูปที่ 4.33 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

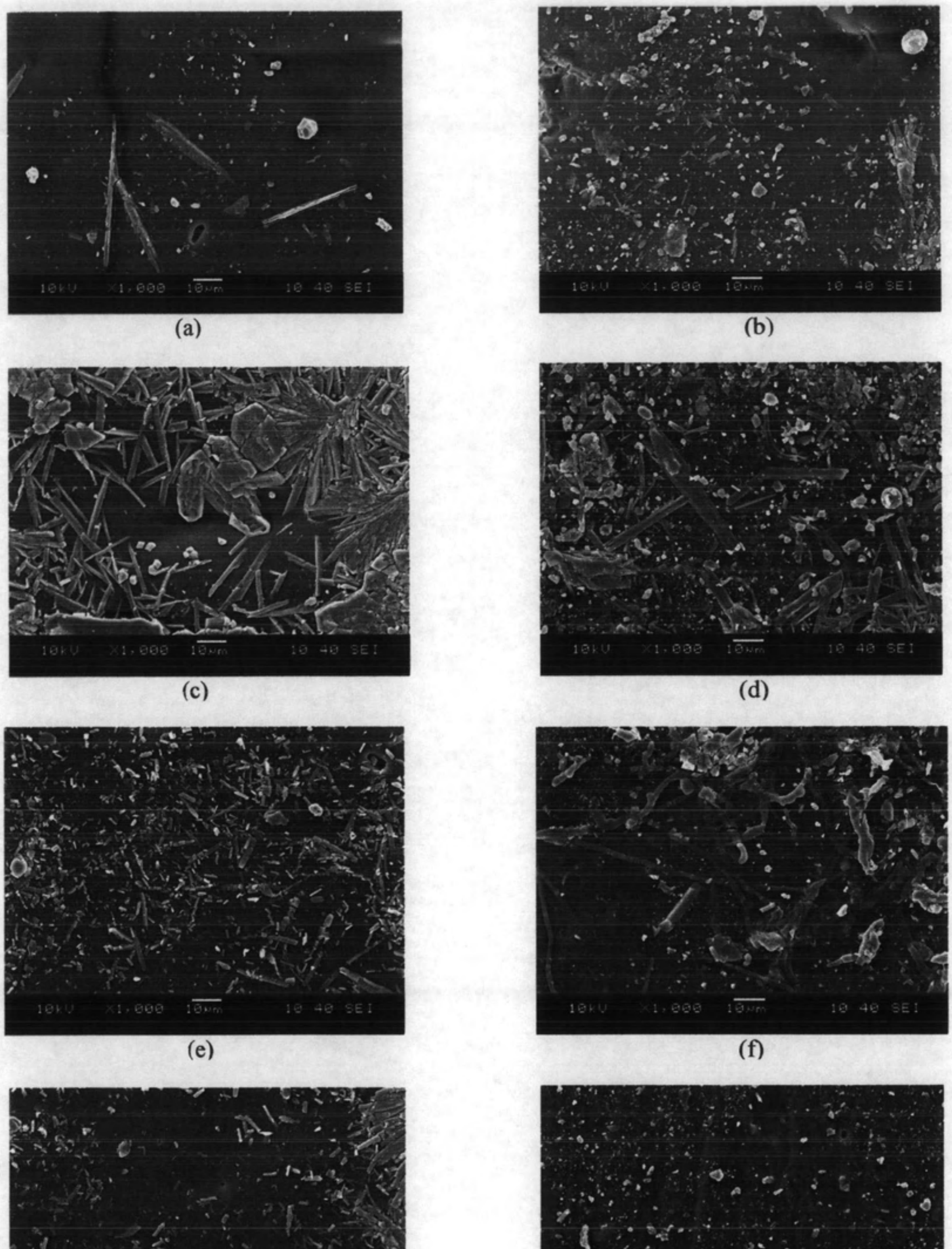


(a) (b)

รูปที่ 4.33 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ : (a) ก่อนฝังดิน และ (b) หลังฝังดิน 6 สัปดาห์

จากรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นอนุภาคของสารเติมแต่งที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ ซึ่งมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ และภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยสังเกตเห็นพื้นผิวมีความหยาบมากขึ้นเล็กน้อย

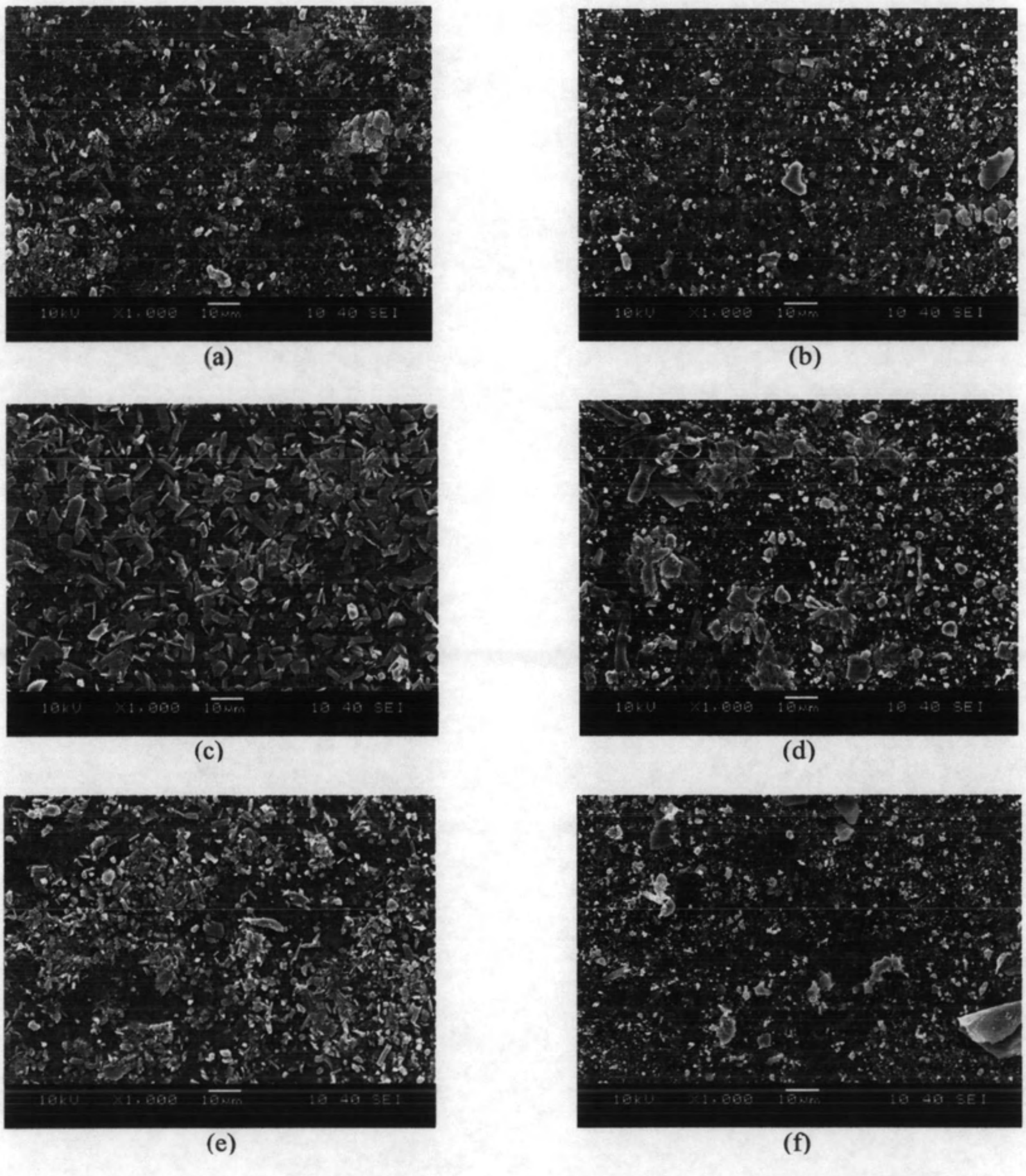
รูปที่ 4.34 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานของยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต โดยเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.34 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต :
(a) 100 NR/1 MMT ก่อนฝังดิน, (b) 100 NR/1 MMT หลังฝังดิน,
(c) 100 NR/2 MMT ก่อนฝังดิน, (d) 100 NR/2 MMT หลังฝังดิน,
(e) 100 NR/3 MMT ก่อนฝังดิน, (f) 100 NR/3 MMT หลังฝังดิน,
(g) 100 NR/4 MMT ก่อนฝังดิน และ (h) 100 NR/4 MMT หลังฝังดิน

จากรูปที่ 4.34 แสดงสัณฐานวิทยาที่มีลักษณะคล้ายรูปที่ 4.33 โดยมองเห็นอนุภาคของสารเติมแต่งที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ ซึ่งมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ และภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ จะสังเกตเห็นพื้นผิวมีความหยาบมากขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกัน

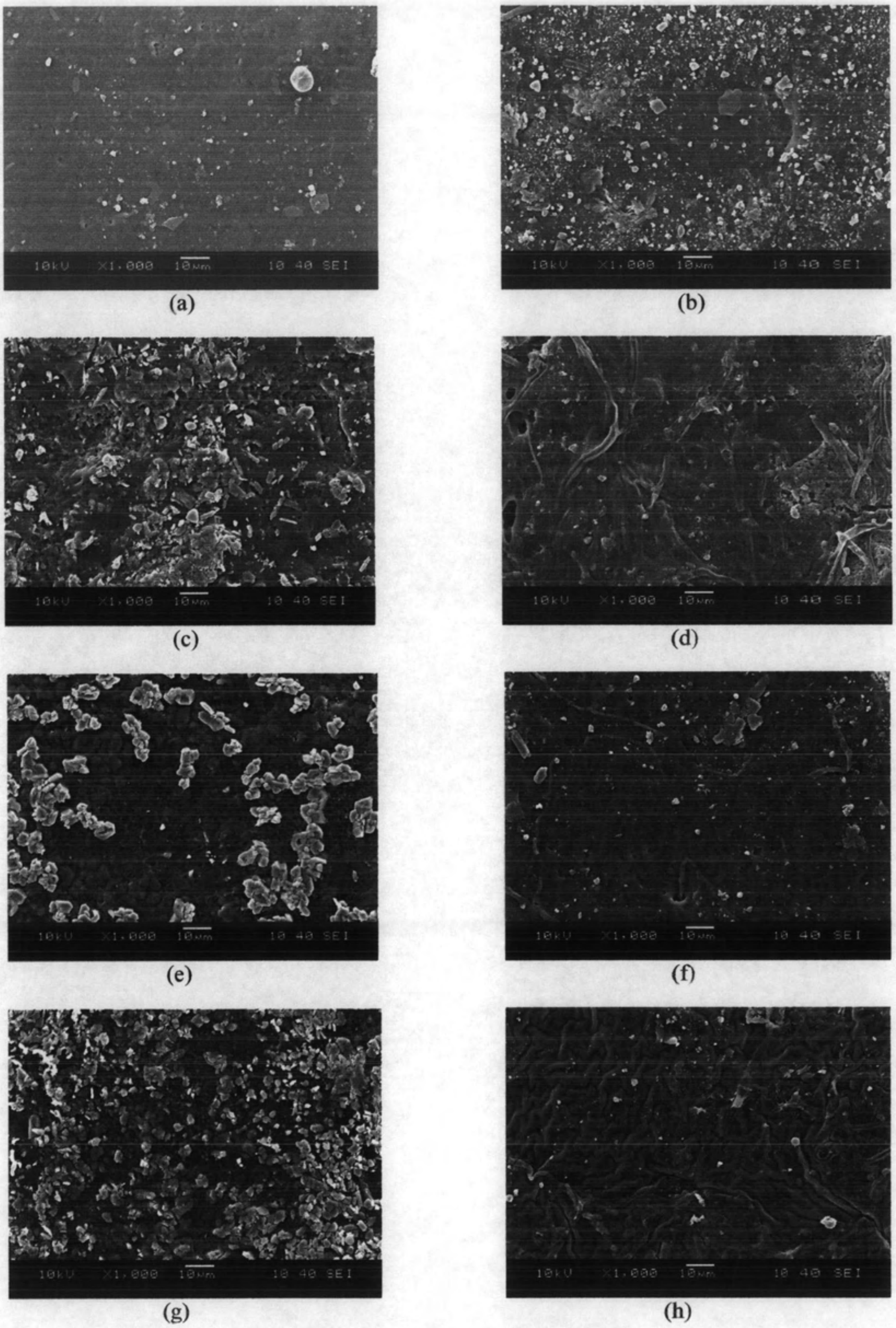
รูปที่ 4.35 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง โดยเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.35 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง :
(a) 100 NR/30 starch ก่อนฝังดิน, (b) 100 NR/30 starch หลังฝังดิน,
(c) 100 NR/40 starch ก่อนฝังดิน, (d) 100 NR/40 starch หลังฝังดิน,
(e) 100 NR/50 starch ก่อนฝังดิน, (f) 100 NR/50 starch หลังฝังดิน

จากรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นอนุภาคของสารเติมแต่งที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ ซึ่งมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ และภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลังในปริมาณต่างๆ ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยสังเกตเห็นพื้นผิวมีรูพรุนเล็กๆ กระจายอยู่บนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งอาจเกิดจากการที่แบคทีเรียทำลายพื้นผิวของชิ้นงานในส่วนที่เป็นแป้ง

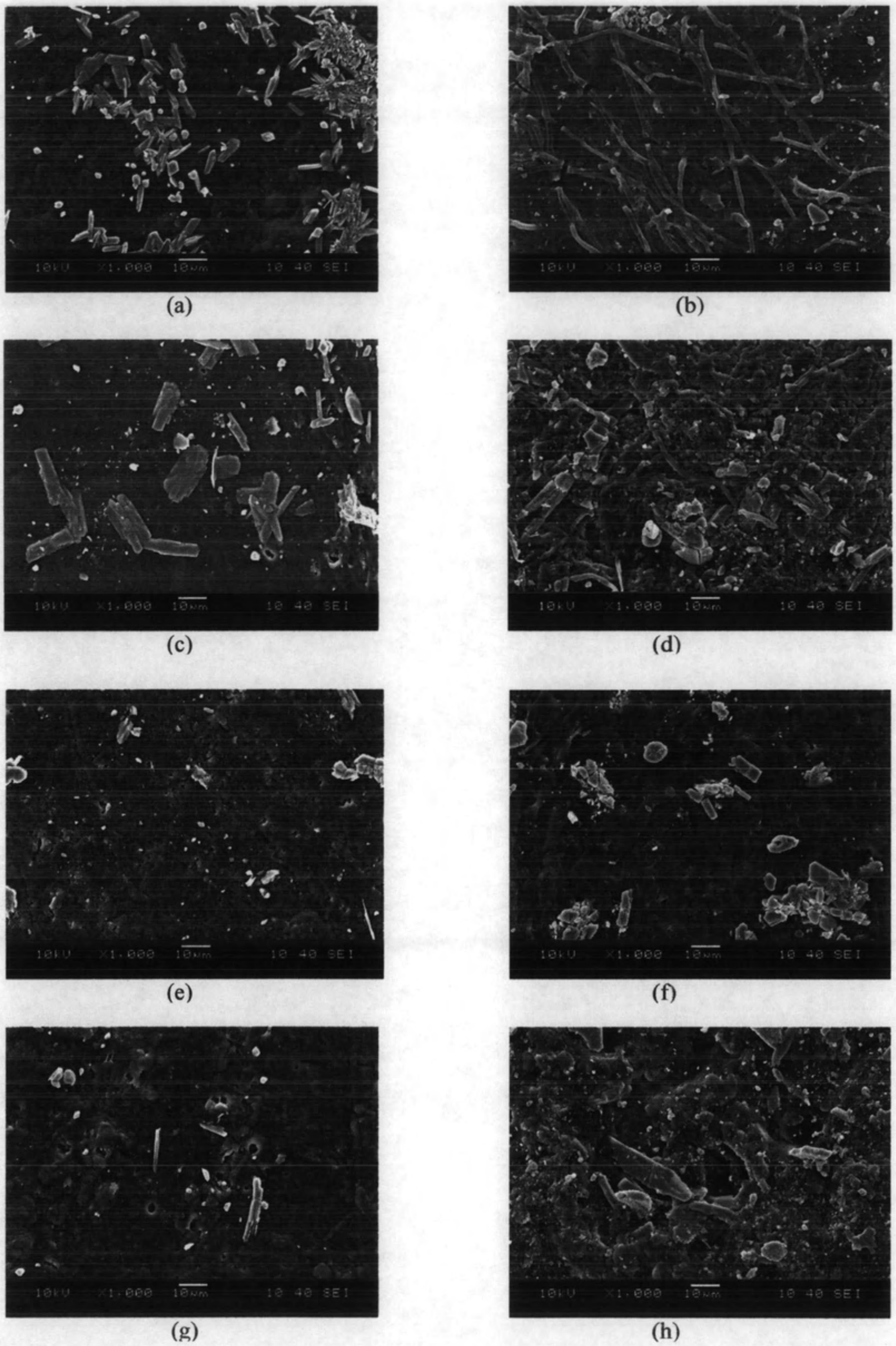
รูปที่ 4.36 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 100/30และปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน โดยเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.36 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/มันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต :
(a) 100 NR/30 starch/1 MMT ก่อนฝังดิน, (b) 100 NR/30 starch/1 MMT หลังฝังดิน,
(c) 100 NR/30 starch/2 MMT ก่อนฝังดิน, (d) 100 NR/30 starch/2 MMT หลังฝังดิน,
(e) 100 NR/30 starch/3 MMT ก่อนฝังดิน, (f) 100 NR/30 starch/3 MMT หลังฝังดิน,
(g) 100 NR/30 starch/4 MMT ก่อนฝังดิน และ (h) 100 NR/30 starch/4 MMT หลังฝังดิน

รูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นอนุภาคของสารเติมแต่งที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ ซึ่งมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ และภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง30 phr/มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่างๆ มีลักษณะคล้ายกัน โดยสังเกตเห็นพื้นผิวมีการถูกทำลาย เนื่องจากพบรูพรุนที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และพบเชื้อราหรือแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวอยู่บนชิ้นงาน กระจายตัวบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งอาจเกิดจากการที่แบคทีเรียทำลายพื้นผิวของชิ้นงานในส่วนที่เป็นแป้ง

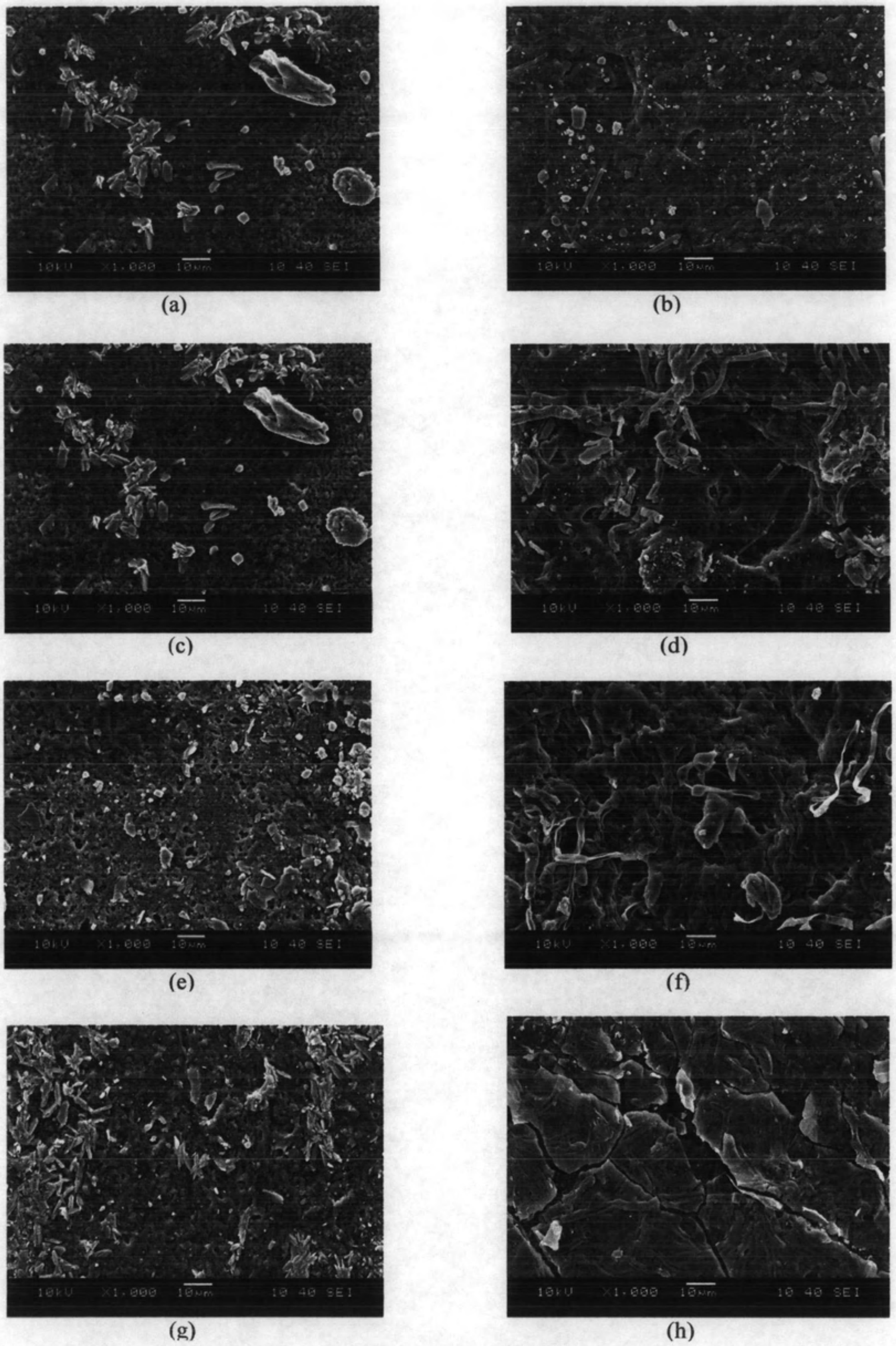
รูปที่ 4.37 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 100/40และปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน โดยเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.37 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/มันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต :
(a) 100 NR/40 starch/1 MMT ก่อนฝังดิน, (b) 100 NR/40 starch/1 MMT หลังฝังดิน,
(c) 100 NR/40 starch/2 MMT ก่อนฝังดิน, (d) 100 NR/40 starch/2 MMT หลังฝังดิน,
(e) 100 NR/40 starch/3 MMT ก่อนฝังดิน, (f) 100 NR/40 starch/3 MMT หลังฝังดิน,
(g) 100 NR/40 starch/4 MMT ก่อนฝังดิน และ (h) 100 NR/40 starch/4 MMT หลังฝังดิน

รูปที่ 4.37 แสดงให้เห็นอนุภาคของสารเติมแต่งที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ ซึ่งมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ และภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง40 phr/มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่างๆ มีลักษณะคล้ายกัน โดยสังเกตเห็นพื้นผิวมีการถูกทำลายมากขึ้น เนื่องจากพบรูพรุนที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และพบเชื้อราหรือแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวอยู่บนชิ้นงาน กระจายตัวบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งอาจเกิดจากการที่แบคทีเรียทำลายหรือบริโภคในส่วนที่เป็นแป้ง

รูปที่ 4.38 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 100/50และปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน โดยเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.38 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/มันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต :
(a) 100 NR/50 starch/1 MMT ก่อนฝังดิน, (b) 100 NR/50 starch/1 MMT หลังฝังดิน,
(c) 100 NR/50 starch/2 MMT ก่อนฝังดิน, (d) 100 NR/50 starch/2 MMT หลังฝังดิน,
(e) 100 NR/50 starch/3 MMT ก่อนฝังดิน, (f) 100 NR/50 starch/3 MMT หลังฝังดิน,
(g) 100 NR/50 starch/4 MMT ก่อนฝังดิน และ (h) 100 NR/50 starch/4 MMT หลังฝังดิน

รูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นอนุภาคของสารเติมแต่งที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ ซึ่งมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ และภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/แป้งมันสำปะหลัง50 phr/มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่างๆ มีลักษณะคล้ายกัน โดยสังเกตเห็นพื้นผิวมีการถูกทำลายมากกว่าเนื่องจากมีปริมาณแป้งในชิ้นงานมาก จึงทำให้แบคทีเรียสามารถทำการย่อยสลายได้มากกว่าสูตรที่มีแป้งในปริมาณที่น้อยกว่า และพบรูพรุนที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และพบเชื้อราหรือแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวอยู่บนชิ้นงาน กระจายตัวบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งอาจเกิดจากการที่แบคทีเรียทำลายหรือบริโภคในส่วนที่เป็นแป้ง

สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/แป้ง/ MMTภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 6 สัปดาห์ แสดงความบกพร่องของชิ้นงาน เนื่องจากบริเวณพื้นผิวชิ้นงานถูกทำลายโดยพบเชื้อราหรือแบคทีเรีย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างสามารถถูกย่อยสลายโดยกระบวนการทางธรรมชาติ