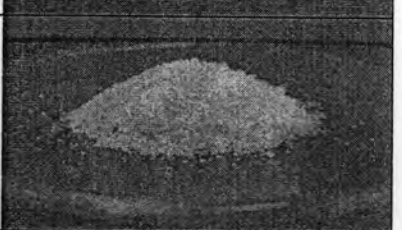
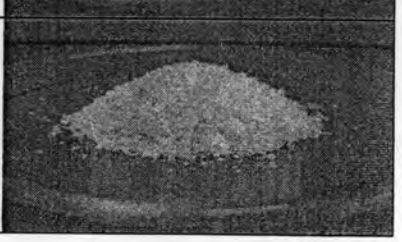
บทที่ 4

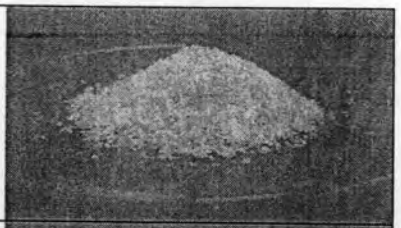
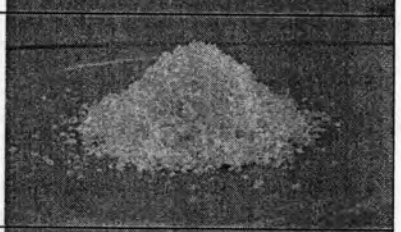
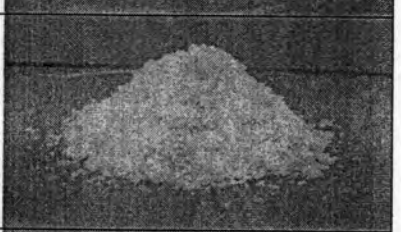
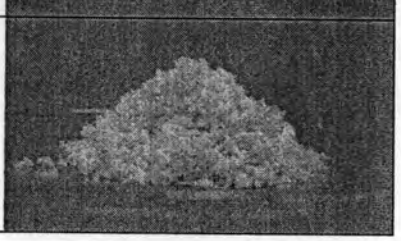
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

หลังจากดัดแปรผิวผงเพตด้วยสารช่วยผสมแล้ว ได้เคลือบผงเพตด้วยฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง โดยในการทดลองนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มแป้งที่สัดส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ ดังนี้ เพต : แป้ง , 90 : 10, 80 : 20 และ 70 : 30 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ใส่เข้าไป จะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสีน้ำตาลเข้มขึ้น เช่นเดียวกันกับเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสมในขั้นตอนการดัดแปรผิวก็จะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสีน้ำตาลเข้มขึ้นเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.1 ภาพผงเพตที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสูตรต่างๆ

สูตร	สารช่วยผสม (g/100 g PET)	สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง	ภาพผงเพตที่เคลือบด้วยฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง
1	10	90 : 10	
2	10	80 : 20	
3	10	70 : 30	
4	20	90 : 10	

5	20	80 : 20	
6	20	70 : 30	
7	30	90 : 10	
8	30	80 : 20	
9	30	70 : 30	

4.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

เครื่องมือที่ใช้ในการผสมเพตและแป้งมันสำปะหลังในการทดลองนี้คือ เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยพบว่าในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งมันสำปะหลังนั้น การปรับอุณหภูมิในแต่ละโซนของบาร์เรลสกรูมีผลอย่างมากต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสม โดยการปรับอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น ทำให้แรงบิด (torque) สูงจนเกินกว่าที่เครื่องจะสามารถทำงานต่อไปได้ เนื่องจากพอลิเมอร์เพตยังหลอมตัวไม่ดีพอ หรือถ้าปรับตั้งอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้ฟิล์มแป้งไหม้ และความหนืดของพอลิเมอร์ผสมลดลงอย่างมาก การไหลของพอลิเมอร์จะไม่ต่อเนื่อง พอลิเมอร์จะไหลออกมาในลักษณะเป็นหยดๆ และมีสีดำเนื่องจากแป้งเกิดการสลายตัวเมื่ออุณหภูมิของบาร์เรล

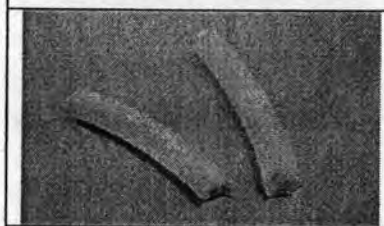
สกรูสูงกว่า 255 องศาเซลเซียส ดังนั้นการปรับอุณหภูมิในแต่ละโซนของสกรูจึงมีความสำคัญเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสีเข้ม และการไหลออกมาแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจากตารางทำให้สรุปได้ว่า ความเข้มข้นของสารช่วยผสมมีอิทธิพลต่อการปรับอุณหภูมิของบาร์เรลสกรู โดยจะสังเกตเห็นว่าในสูตรที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยผสมสูงขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิของบาร์เรลลดลง

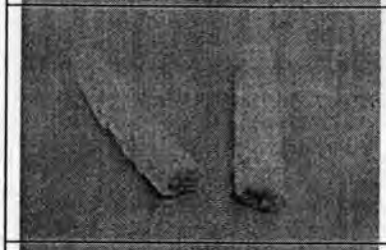
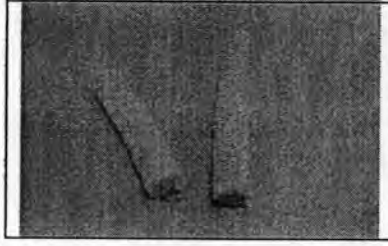
ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม

สูตร	สารช่วยผสม (g/100g PET)	สัดส่วน เพต : แป้งมัน สำปะหลัง	อุณหภูมิในช่วงต่างๆของสกรู (องศาเซลเซียส)				
			ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ช่วงที่ 4	ช่วงที่ 5
1	0	100 : 0 (เพตบริสุทธิ์)	260	258	250	250	255
2	10	90 : 10	255	250	245	245	250
3	10	80 : 20	248	243	238	238	243
4	10	70 : 30	240	235	230	230	235
5	20	90 : 10	245	240	235	235	240
6	20	80 : 20	239	234	230	230	234
7	20	70 : 30	232	227	222	222	227
8	30	90 : 10	240	235	230	230	235
9	30	80 : 20	235	230	225	225	230
10	30	70 : 30	230	225	220	220	225

จากรูปในตาราง 4.3 ซึ่งแสดงรูปและลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว จะสังเกตได้ว่า พอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการผ่านการอัดรีดในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จะมีสีเข้มขึ้นตามปริมาณของแป้ง มีรูพรุน น้ำหนักเบา และเปราะมากขึ้นเมื่อเทียบกับเพตบริสุทธิ์

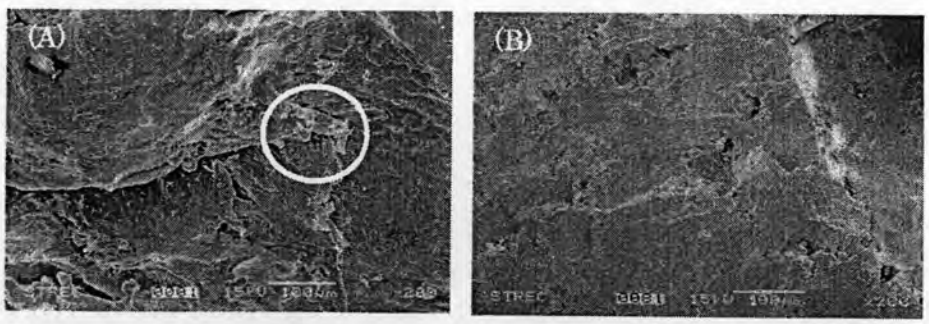
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงรูปและลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ภาพถ่ายของพอลิเมอร์ผสม	ส่วนผสม และลักษณะของชิ้นงาน
	1)สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง , 90 : 10 สารช่วยผสม 10 g/100 g PET ลักษณะของชิ้นงาน ผิวชิ้นงานเรียบ แข็ง มีสีขาว เนื้อแน่น
	2)สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง , 80 : 20 สารช่วยผสม 10 g/100 g PET ลักษณะของชิ้นงาน ผิวชิ้นงานขรุขระเล็กน้อย สีขาวปนเทา เนื้อชิ้นงานมีรูพรุนเล็กน้อย
	3) สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง , 70 : 30 สารช่วยผสม 10 g/100 g PET ลักษณะของชิ้นงาน ผิวชิ้นงานขรุขระเล็กน้อย สีขาวปนเทา เนื้อมีรูพรุน
	4) สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง , 90 : 10 สารช่วยผสม 20 g/100 g PET ลักษณะของชิ้นงาน ผิวชิ้นงานขรุขระ สีขาวปนน้ำตาล เนื้อมีรูพรุน
	5) สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง , 80 : 20 สารช่วยผสม 20 g/100 g PET ลักษณะของชิ้นงาน ผิวชิ้นงานขรุขระ สีขาวปนน้ำตาล เนื้อมีรูพรุน
	6) สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง , 70 : 30 สารช่วยผสม 20 g/100 g PET ลักษณะของชิ้นงาน ผิวชิ้นงานขรุขระ สีขาวปนน้ำตาล เนื้อมีรูพรุน

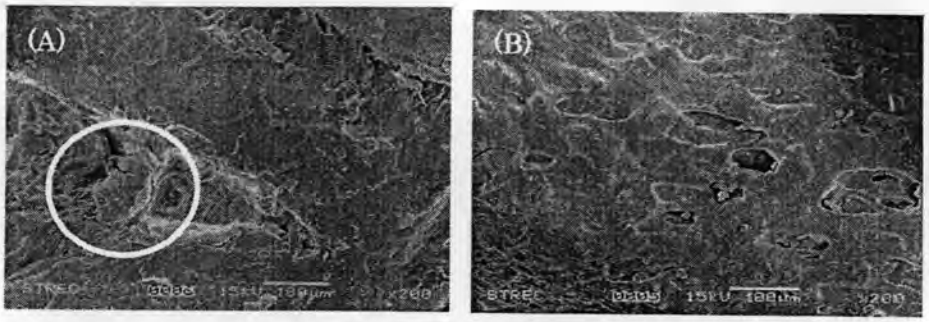
	7) สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง , 90 : 10 สารช่วยผสม 30 g/100 g PET ลักษณะของชิ้นงาน ผิวชิ้นงานขรุขระ สีขาวปนน้ำตาล เนื้อมีรูพรุน
	8) สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง , 80 : 20 สารช่วยผสม 30 g/100 g PET ลักษณะของชิ้นงาน ผิวชิ้นงานขรุขระ สีขาวปนน้ำตาล เนื้อมีรูพรุน
	9) สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง , 70 : 30 สารช่วยผสม 30 g/100 g PET ลักษณะของชิ้นงาน ผิวชิ้นงานขรุขระเล็กน้อย สีขาวปนน้ำตาล เนื้อมีรูพรุนเล็กน้อย

4.1.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เพต/แป้งมันสำปะหลัง ก่อนและหลังขึ้นรูปจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ด้วยเทคนิค SEM

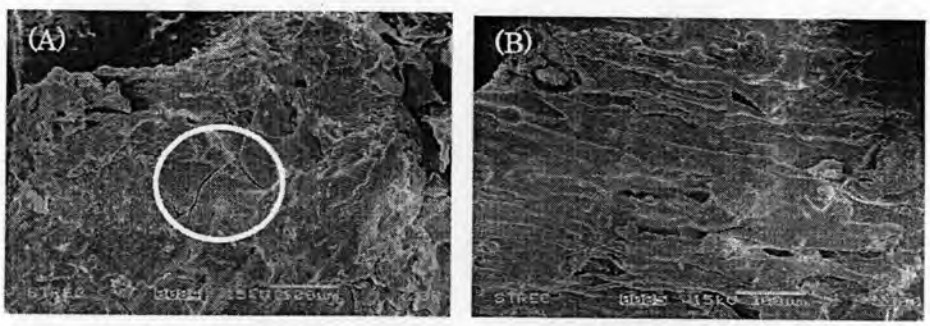
รูปที่ 4.1 – 4.3 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เพต/พอลิเอทิลีนไกล-โคเลตบิสฟีนอลเอ/แป้งมันสำปะหลัง โดยมีปริมาณ พอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอ 10 g/100 g PET และสัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 10 g/100 g PET และสัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง, 90 : 10 โดยที่ (A) ก่อนผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (B) หลังผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่



รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 10 g/100 g PET และสัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง, 80 : 20 โดยที่ (A) ก่อนผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (B) หลังผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่



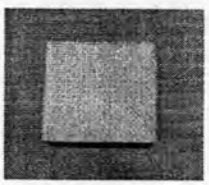
รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 10 g/100 g PET และสัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง, 70 : 30 โดยที่ (A) ก่อนผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (B) หลังผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

จากรูปที่ 4.1-4.3 จะเห็นว่าเมื่อเคลือบแป้งมันสำปะหลังบนเพตที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอแล้ว ก่อนผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (A) พบชั้นของแป้งเคลือบบนผิวของเพตอยู่และหลังจากผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่แล้วชั้นของแป้งที่พบจะหายไป (B) โดยที่เนื้อของพอลิเมอร์ผสมจะเกิดรูพรุนขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปที่ 4.1(A) , 4.2(A) และ 4.3(A) พบว่า 4.1(A) ชั้นของแป้งจะเป็นฟิล์มบางๆเคลือบอยู่ที่ผิวของเพตเนื่องจากมีปริมาณของแป้งที่น้อย และเมื่อเพิ่มสัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลังเป็น 80 : 20 (รูปที่ 4.2A), 70 : 30 (รูปที่ 4.3A) จะพบรอยแตกของชั้นแป้งที่เคลือบอยู่เนื่องจากปริมาณแป้งที่มากขึ้น

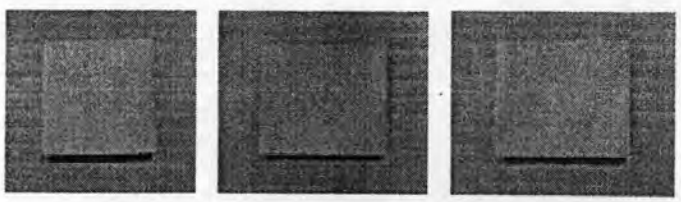
4.1.3 **สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปด้วย** compression molding

พอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ มาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง compression molding และใช้ dioctyl terephthalate (DOP) เป็นสารพลาสติไซเซอร์เพื่อทำหน้าที่ช่วยขึ้นรูป โดยในการทดลองนี้ได้ใช้สัดส่วนของ DOP ที่ 5 % เทียบกับน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ลักษณะของสัณฐานวิทยาของชิ้นงานอัดขึ้นรูปแสดงในรูปที่ 4.4-4.5

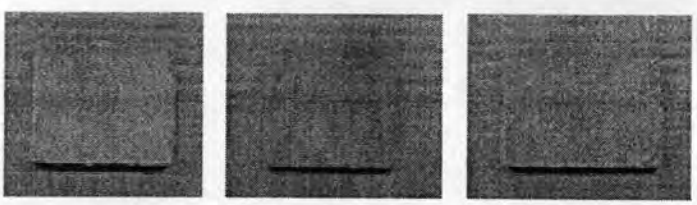


เพตบริสุทธิ์

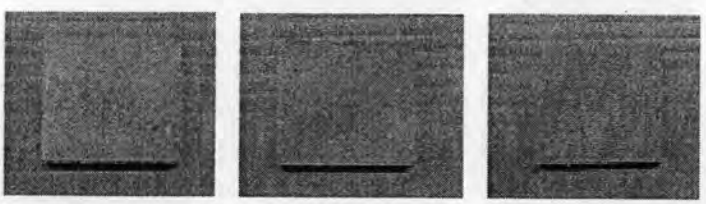
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะชิ้นงานอัดขึ้นรูปชิ้นงานของเพตบริสุทธิ์



(a) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 10 g/ 100 g PET)



(b) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 20 g/ 100 g PET)



(c) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 30 g/ 100 g PET)

รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมเพต:แป้ง (90 : 10, 80 : 20, 70 : 30)

(a) สารช่วยผสม 10 g/ 100 g PET 30), (b) สารช่วยผสม 20 g/ 100 g PET 30),

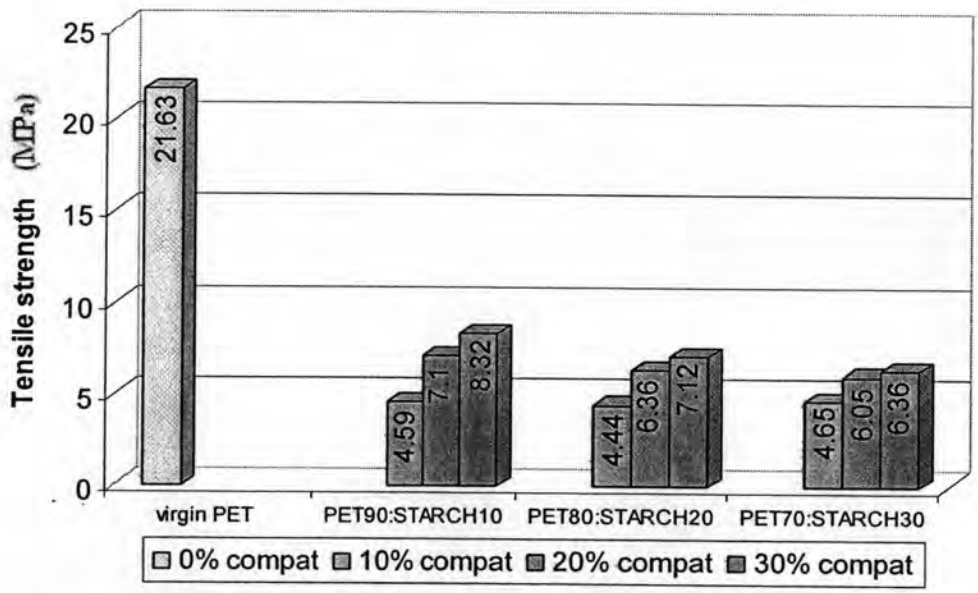
(c) สารช่วยผสม 30 g/ 100 g PET

จากรูปที่ 4.4-45 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานของเพตบริสุทธิ์ จะมีสีขาวซึ่งเป็นสีปกติของเพต ในขณะที่ พอลิเมอร์ผสมมีสีน้ำตาลเข้มและมีจุดขาวกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอ สีน้ำตาลของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมอาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากส่วนของแป้งเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิขึ้นรูปที่ 235 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้นานกว่าตอนผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

4.2.1 สมบัติด้านแรงดึง

เมื่อนำชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ มาทดสอบหาสมบัติการต้านแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638 ได้ผลค่าความต้านแรงดึงที่วัดได้จากการทดสอบ ดังแสดงในรูปของกราฟในรูปที่ 4.6



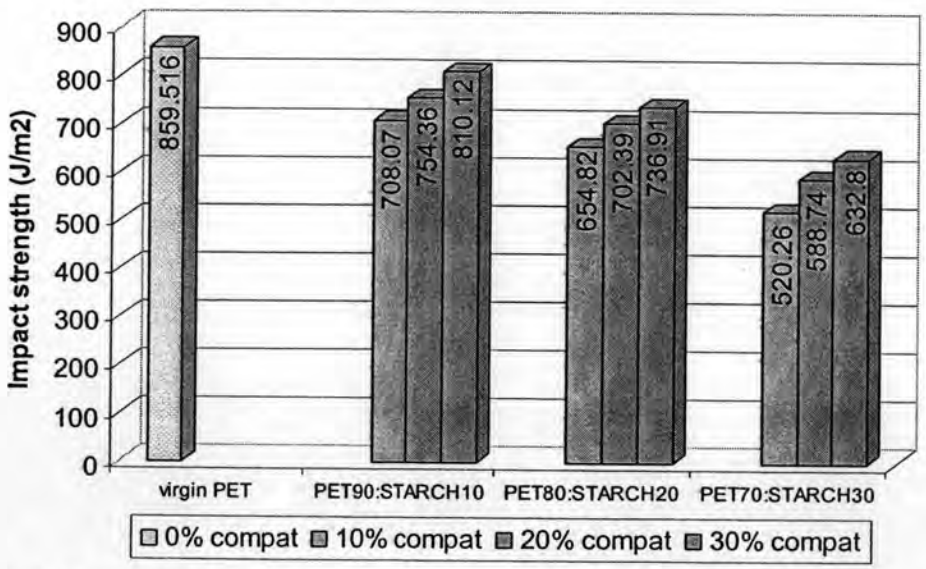
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET/สารช่วยผสม/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการตรวจสอบค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาด

จากรูปจะเห็นว่าความต้านแรงดึงของเพตบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 21.63 MPa ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าต้านแรงดึงต่ำกว่าเพตบริสุทธิ์ ในทุกอัตราส่วนของ เพต : แป้งมันสำปะหลัง ยกตัวอย่างเช่น ที่อัตราส่วนเพต (ดัดแปรผิวด้วยสารช่วยผสม 20 g/ 100 g PET) : แป้งมันสำปะหลัง

90 : 10, 80 : 20 และ 70 : 30 วัดค่าความต้านแรงดึงได้เท่ากับ 7.10, 6.36 และ 6.05 MPa ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเฟสของแป้งยังไม่เข้ากันได้ดีกับแมทริกซ์ของเพต ส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้มีความพยายามเพิ่มสมบัติแรงดึงของ พอลิเมอร์ผสมโดยการศึกษาผลของสารช่วยผสม โดยได้ทำการดัดแปรผิวของผงเพตด้วยสารช่วยผสมที่สามความเข้มข้นคือ ร้อยละ10, 20 และ 30 ของน้ำหนักเพต ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณของสาร ช่วยผสมสามารถทำให้ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมได้ ยกตัวอย่างเช่นสูตร พอลิเมอร์ผสมเพต : แป้งมันสำปะหลัง 80 : 20 เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมจาก 10 เป็น 20 และ 30 g/100 g PET จะทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงเพิ่มขึ้นจาก 4.44 เป็น 6.36 และ 7.12 MPa ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมจะทำแป้งมันสำปะหลังกระจายตัวใน พอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

4.2.2 ความต้านแรงกระแทก

เมื่อนำชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ โดยเพตได้ผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารช่วยผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป มาทดสอบหาความต้านแรงกระแทก (impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ได้ผลค่าความต้านแรงกระแทก ดังแสดงในรูปของกราฟในรูปที่ 4.7

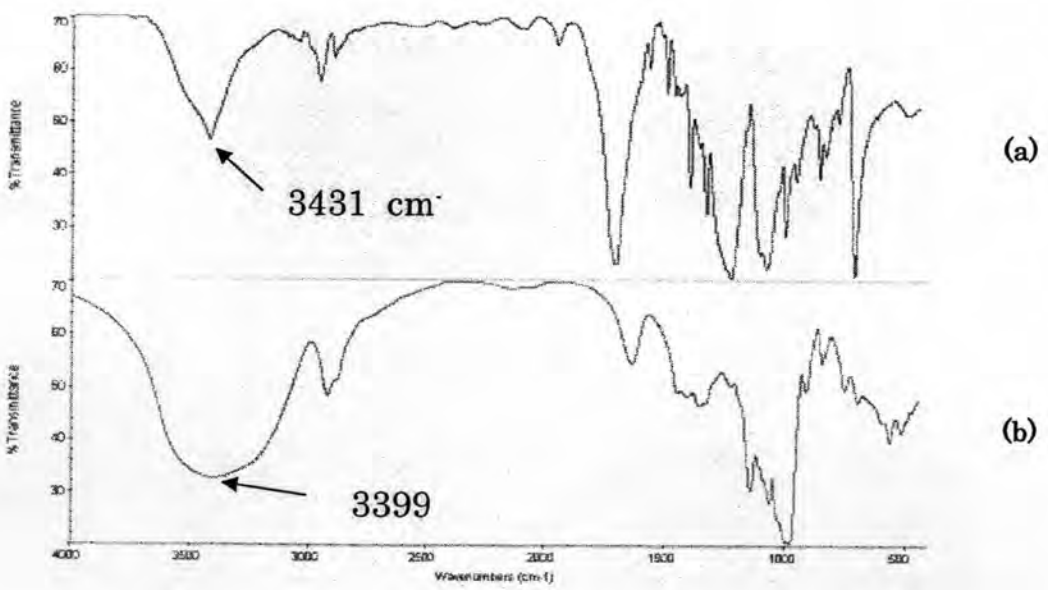


รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบความต้านแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET/สารช่วยผสม/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความต้านแรงกระแทกของเพตบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 859.52 J/m^2 ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าความต้านแรงกระแทกต่ำกว่าเพตบริสุทธิ์ ทั้งนี้ค่าความต้านแรงกระแทกที่ลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณแป้งนั้นเนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ที่แข็งเปราะ ตัวอย่างเช่น ที่ปริมาณสารช่วยผสม 10 g/100 g PET เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเป็น 10,20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความต้านแรงกระแทกจะมีค่าเท่ากับ 708.07,654.82 และ 520.26 J/m^2 ซึ่งลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การเติมสารช่วยผสมจะช่วยปรับปรุงให้สมบัติความต้านแรงกระแทกดีขึ้น ดังจะเห็นได้จากที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม:แป้งมันสำปะหลัง 90:10 เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไปคือ 10, 20 และ 30 g/100 g PET ความต้านแรงกระแทกจะมีค่าเท่ากับ 708.07,754.36 และ 810.12 J/m^2 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมจะทำแป้งมันสำปะหลังกระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งเพตได้ผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารช่วยผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไปคือ 10, 20 และ 30 g/100 g PET ก่อนที่จะนำผสมกับแป้งมันสำปะหลัง จากนั้นนำสารที่ได้มาทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปของกราฟรูปที่ 4.8



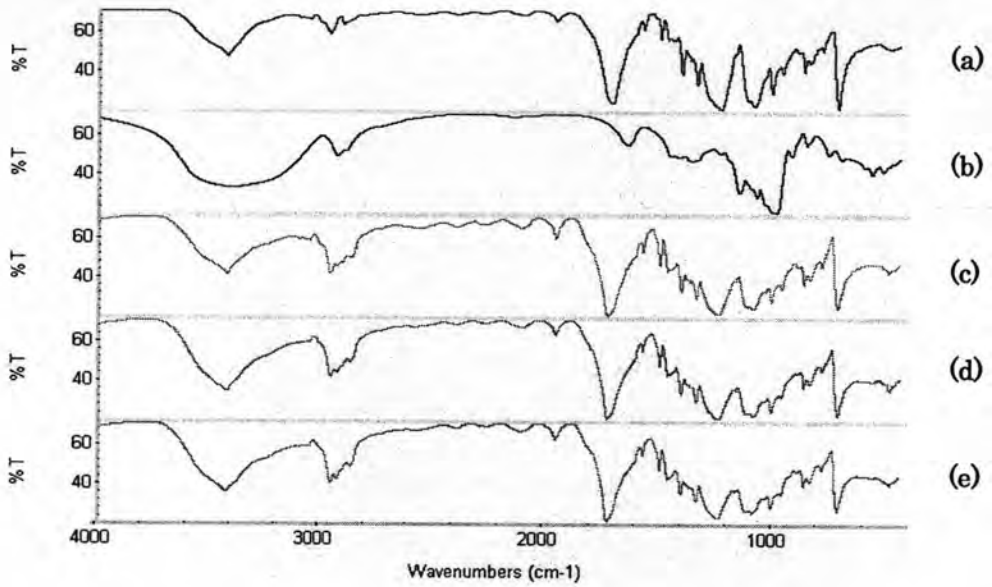
รูปที่ 4.8 FT-IR สเปกตรัมของ (a) virgin PET และ (b) STARCH

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งของพีกสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของ เพต บริสุทธิ์, แป้งมันสำปะหลัง

ตำแหน่ง ($ซม^{-1}$)	หมู่ฟังก์ชัน
3000-3500	หมู่ไฮดรอกซิล, -OH
2800-3000	$-CH_2$
1600-1800	หมู่คาร์บอนิล, C=O
1200-1400	-C-O-C
1000-1100	-C-OH
700-800	aromatic ester

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของเพตบริสุทธิ์ ปรากฏพีกการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่สำคัญในตำแหน่ง 3431 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายสุดของโมเลกุลพอลิเอททิลลีนเทเรฟทาเลท ลักษณะของพีกจะแคบแสดงให้เห็นว่าหมู่ไฮดรอกซิลของเพตมีอยู่ในปริมาณน้อยและไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่อื่นข้างเคียง ในขณะที่สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังพบว่าพีกของหมู่ไฮดรอกซิลมีช่วงพีกกว้างกว่าคือระหว่าง 3000 – 3600 cm^{-1} และลักษณะพีกแบบ broad แสดงให้เห็นถึงหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้งนั้นเกิดอันตกริยากันแบบ intermolecular hydrogen bonding จึงทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเป็นลักษณะช่วงคลื่น

อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมแสดงไว้ในรูปที่ 4.9 โดยพอลิเมอร์ผสมสูตรที่เพตผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารช่วยผสมคงที่ที่ 10 g/100 g PET และปรับสัดส่วนของเพต:แป้งมันสำปะหลังเป็น 90:10, 80:20 และ 70:30



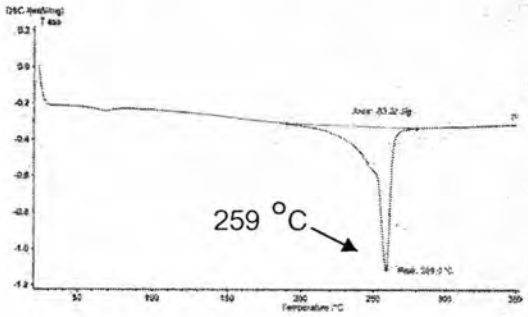
รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของ เพตบริสุทธิ์, แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสม เพต/แป้งมัน-สำปะหลัง โดยที่ (a) เพตบริสุทธิ์, (b) แป้งมันสำปะหลัง, (c) พอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10, (d) 80 : 20, (e) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 10 g/100 g PET

จากรูปได้เปรียบเทียบสเปกตรัมของ PET บริสุทธิ์, แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสม พบว่าพีกในช่วง 3200 – 3600 cm^{-1} ของพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะผสมผสานกันระหว่างพีกหมู่ไฮดรอกซิลของเพตและพีกหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันสำปะหลัง อย่างไรก็ตามยังพบว่าเพตและแป้งมันสำปะหลังมีความเข้ากันได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น สังเกตจากพีกหมู่ไฮดรอกซิลในพอลิเมอร์ผสมไม่แสดงลักษณะเป็นพีกแบบ broad ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับสมบัติแรงต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ต่ำกว่าเพตบริสุทธิ์

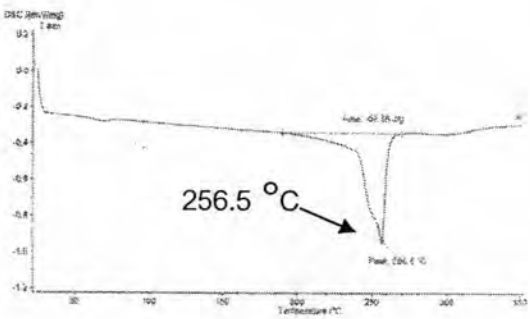
4.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน

4.4.1 การตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวด้วยเทคนิค DSC

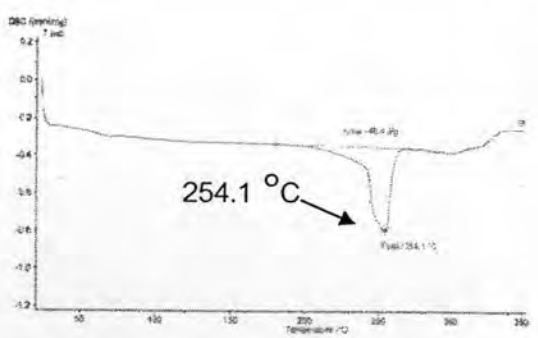
ผลการตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวของเพตในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งเพตได้ผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารช่วยผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป คือ 10, 20 และ 30 g/100 g PET ก่อนที่จะนำผสมกับแป้งมันสำปะหลัง จากนั้นนำสารที่ได้มาทดสอบด้วยเทคนิค DSC ได้ผลอุณหภูมิการหลอมเหลวของเพตในพอลิเมอร์ผสมที่วัดได้จากการทดสอบดังแสดงในรูปของกราฟในรูปที่ 4.10-4.19 และตาราง 4.4



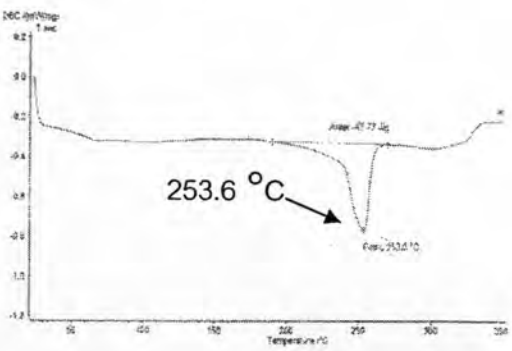
รูปที่ 4.10 DSC เทอร์โมแกรมของ virgin PET



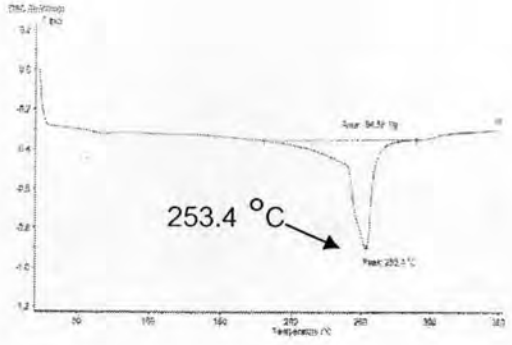
รูปที่ 4.11 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต (สารช่วยผสม10 g /100 g PET) และแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 90 : 10



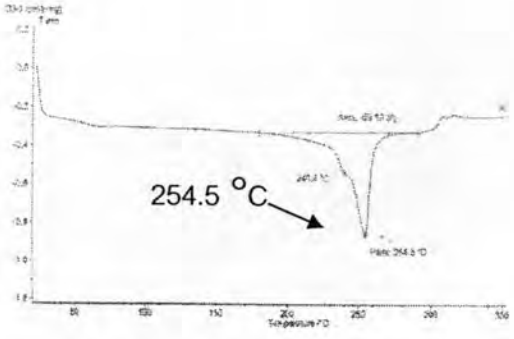
รูปที่ 4.12 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต (สารช่วยผสม10 g /100 g PET) และแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 80 : 20



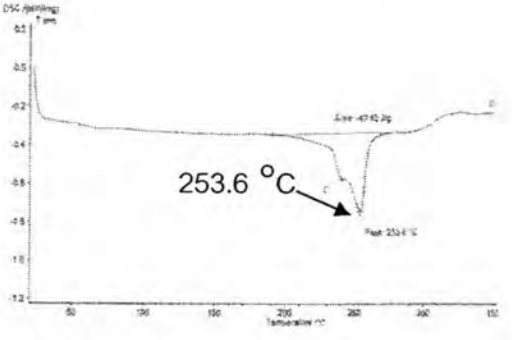
รูปที่ 4.13 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต(สารช่วยผสม10 g /100 g PET) และแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 70 : 30



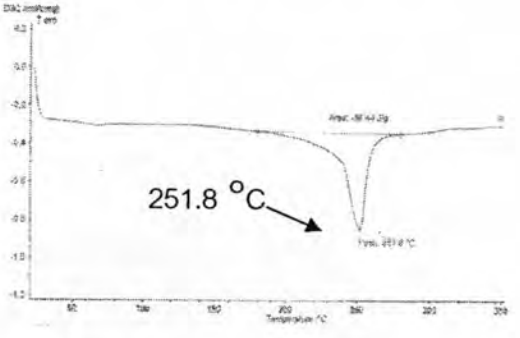
รูปที่ 4.14 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต (สารช่วยผสม20 g /100 g PET) และแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 90 : 10



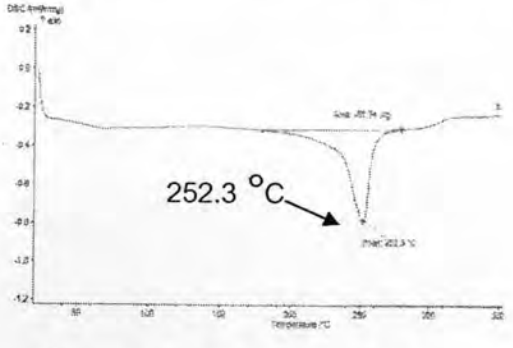
รูปที่ 4.15 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต (สารช่วยผสม20 g /100 g PET)และแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 80 : 20



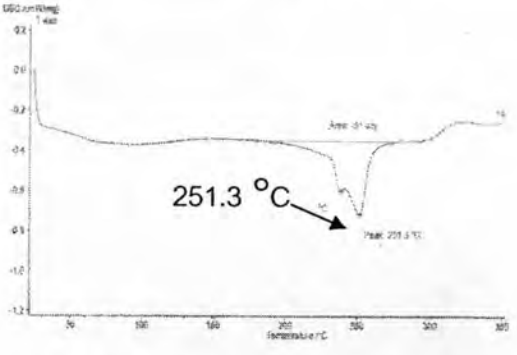
รูปที่ 4.16 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต (สารช่วยผสม20 g /100 g PET) และแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 70 : 30



รูปที่ 4.17 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต (สารช่วยผสม30 g /100 g PET)และแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 90 : 10



รูปที่ 4.18 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต (สารช่วยผสม30 g /100 g PET) และแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 80 : 20



รูปที่ 4.19 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต(สารช่วยผสม30 g /100 g PET) และแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 70 : 30

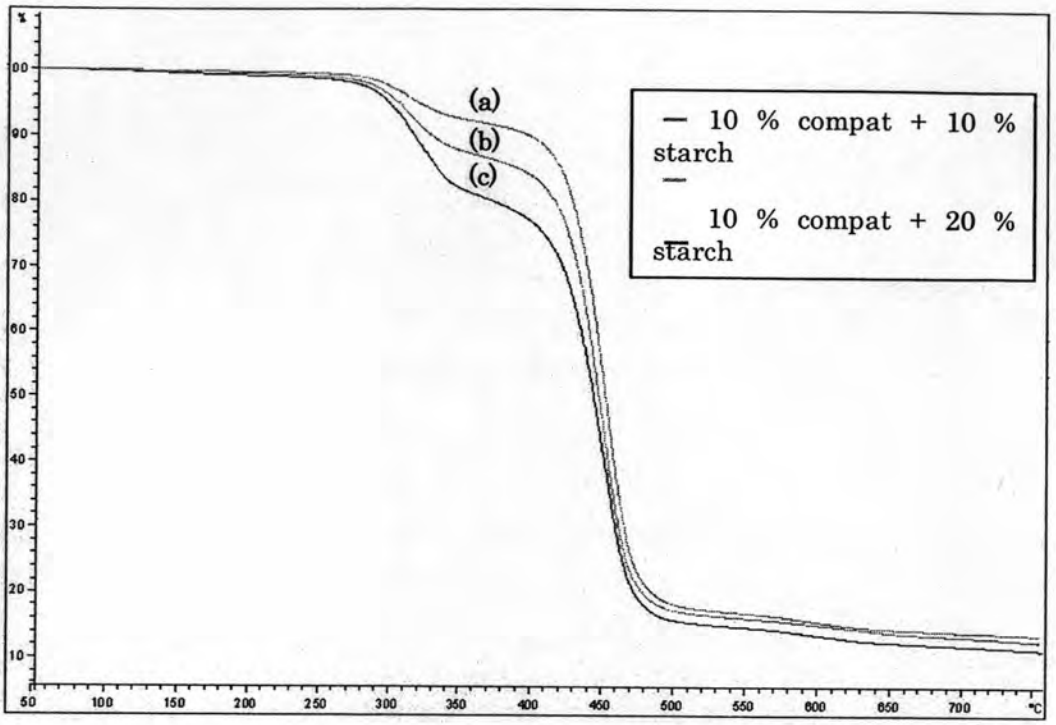
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิหลอมเหลวของ PET ในพอลิเมอร์ผสม

สูตร	สารช่วยผสม (g/100g PET)	สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง	พลาสติไซเซอร์ (wt% พอลิเมอร์ผสม)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
1	0	100:0	5	259
2	10	90:10	5	256.5
3	10	80:20	5	254.1
4	10	70:30	5	253.6
5	20	90:10	5	253.4
6	20	80:20	5	254.5
7	20	70:30	5	253.6
8	30	90:10	5	251.8
9	30	80:20	5	252.3
10	30	70:30	5	251.3

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าสารช่วยผสมที่ใช้ในขั้นตอนการดัดแปรผิวเพตมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงจากอุณหภูมิหลอมตัวของเพตบริสุทธิ์ที่259°C เช่น เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต:แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 90 : 10 โดยปรับปริมาณสารช่วยผสมในขั้นตอนการดัดแปรผิวเพตเป็น 10 และ 20 g/ 100 g PET พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าลดลงจาก 256.5 °C เป็น 253.4 °C อาจเนื่องมาจากการที่สารช่วยผสมเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของเพต ทำให้มีความเป็นไปได้ที่ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของเพตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

4.4.2 เสถียรภาพทางความร้อน และอุณหภูมิการสลายตัว

การตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิค TGA ซึ่งในที่นี้จะนำมาดัดแปลงเพื่อหาอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสม ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.20 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน (a) 90:10, (b) 80:20 และ(c) 70:30 (ดัดแปรผิวเพตด้วยสารช่วยผสม 10 g/ 100 g PET)

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET/สารช่วยผสม/แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะอุณหภูมิการสลายตัวคล้ายมี 2 ขั้น ซึ่งรอยต่อระหว่างอุณหภูมิของการสลายของแป้งมันสำปะหลังและของเพตจะสังเกตเห็นได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากพอลิเมอรีทั้งสองเกิดการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยขั้นแรกจะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 270°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังที่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่า PET เนื่องจากภายในโมเลกุลต่อกันด้วยพันธะอีเทอร์ และมีหมู่อัลดีไฮด์ในโมเลกุลจึงว่องไวต่อการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน และขั้นที่สองจะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 365°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของ PET

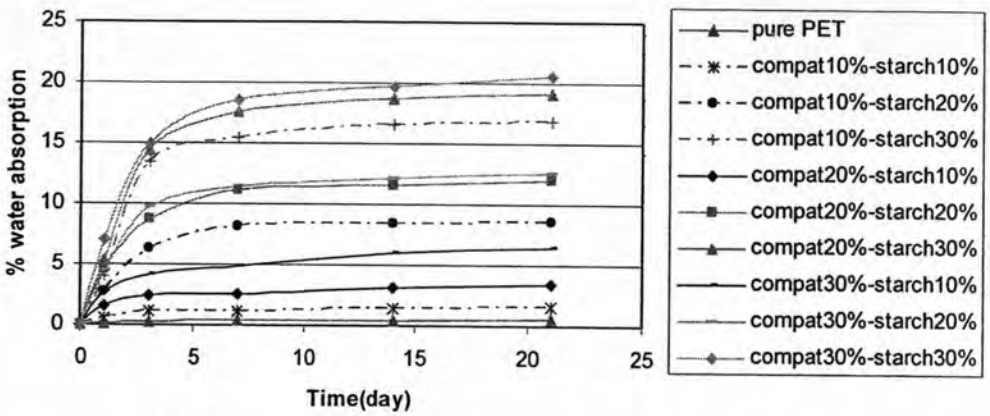
ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังที่วัดได้ในพอลิเมอร์ผสม

สูตร	สารช่วยผสม (g/100g PET)	สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง	พลาสติไซเซอร์ (wt% พอลิเมอร์ผสม)	เปอร์เซ็นต์แป้งที่วัดได้
1	0	100:0	5	0
2	10	90:10	5	7.2
3	10	80:20	5	12.3
4	10	70:30	5	18.0
5	20	90:10	5	9.0
6	20	80:20	5	12.7
7	20	70:30	5	20.0
8	30	90:10	5	9.1
9	30	80:20	5	17.8
10	30	70:30	5	22.7

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสมที่ใส่ลงไปนั้น จะทำให้ปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่วัดค่าได้ในพอลิเมอร์ผสมมีมากขึ้น เช่นเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต/แป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 90 : 10 โดยปรับปริมาณสารช่วยผสมในขั้นตอนการดัดแปรผิวเพตเป็น 10 และ 20 g/ 100 g PET จะเห็นว่าปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 7.2 % เป็น 9 % เนื่องจากการเติมสารช่วยผสมในปริมาณที่มากขึ้นทำให้แป้งมันสำปะหลังกระจายตัวและเกาะกับพอลิเมอร์ผสมได้ดีขึ้น

4.5 ผลทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ

เมื่อนำชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งเพตได้ผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารช่วยผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป มาทดสอบหาสมบัติการดูดซึมน้ำ เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานทดสอบที่วัดได้จากการทดสอบ ถูกนำมาแสดงในรูปของกราฟในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ร้อยละการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET/สารช่วยผสม/แป้งมันสำปะหลังที่มีอัตราส่วนต่างๆกัน

ตารางที่ 4.7 ร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม

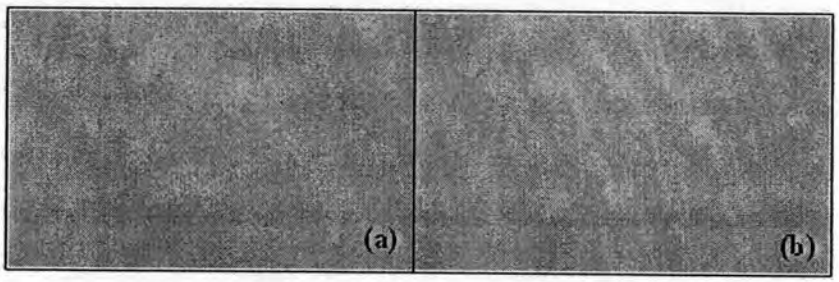
สูตร	สารช่วยผสม (g/100g PET)	สัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง	พลาสติไซเซอร์ (wt% พอลิเมอร์ผสม)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ (ที่ระยะเวลา 21 วัน)
1	0	100:0	5	0.5
2	10	90:10	5	1.5
3	10	80:20	5	8.6
4	10	70:30	5	16.9
5	20	90:10	5	3.4
6	20	80:20	5	12.0
7	20	70:30	5	19.2
8	30	90:10	5	6.5
9	30	80:20	5	12.6
10	30	70:30	5	20.6

จากรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.7 แสดงค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของ PET/สารช่วยผสม/แป้งมันสำปะหลังที่มีอัตราส่วนต่างๆกัน พบว่าเพตบริสุทธิ์ มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ต่ำมาก เนื่องจาก PET เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว และเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งที่เติมลงไปจะส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำสูงมากขึ้น เนื่องจากแป้งมีความเป็นขั้วสูง และเมื่อเวลาผ่านไปค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่นที่ระยะเวลา 14 วัน เพตบริสุทธิ์จะมีร้อยละการดูดซับน้ำ 0.5 % ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสม 10 g/100 g PET เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเป็น 10,20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่วัดได้เป็น 1.2 %, 8.1 % และ 15.4% ตามลำดับ

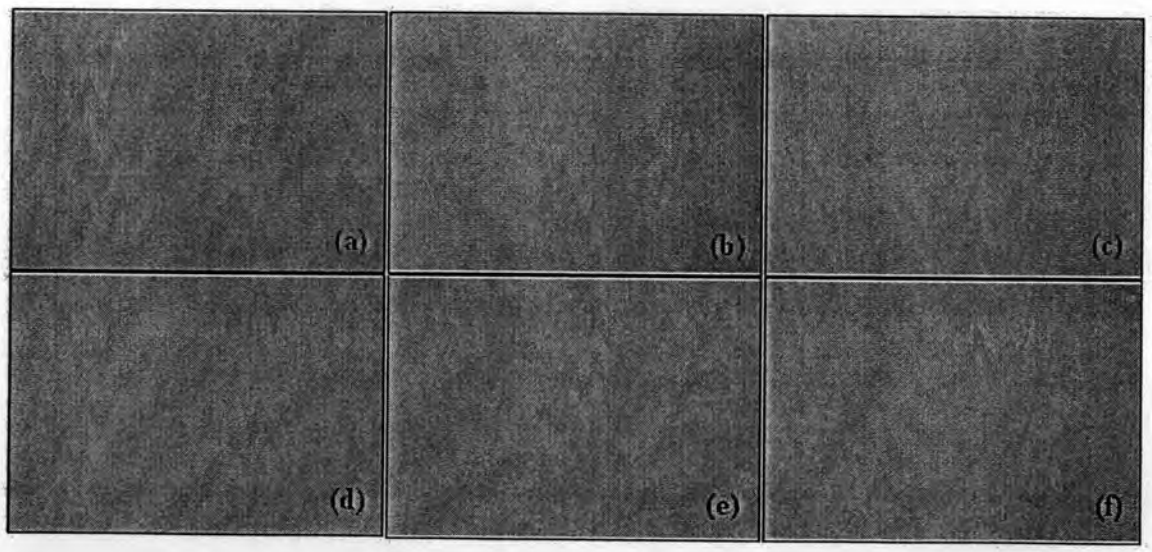
และเมื่อทำการเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างเพต:แป้งมันสำปะหลังคงที่และมีการเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสมเป็น 10,20 และ 30 g/100 g PET ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่สารช่วยผสมเป็นสารซึ่งมีความเป็น hydrophilic จึงทำให้ตัวสารช่วยผสมสารมารถดูดซึมน้ำได้ ยกตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างเพต/แป้งมันสำปะหลัง 80:20 เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมเป็น 10,20 และ 30 g/100 g PET จะทำให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.4 เป็น 12.0 และ 19.2 ตามลำดับ

4.6 ผลทดสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมเมื่อผ่านการแช่กรด

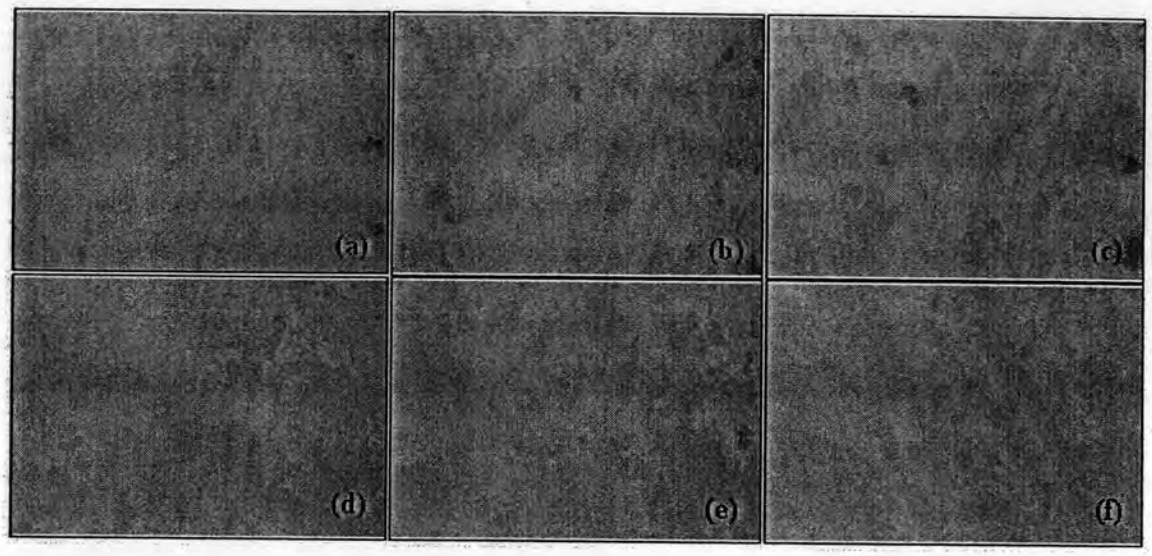
ชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งเพตได้ผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารช่วยผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป มาทดสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมเมื่อผ่านการแช่กรดด้วยเครื่อง Optical microscope ผลการทดสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมเมื่อผ่านการแช่กรด ถูกนำมาแสดงในรูปของกราฟในรูปที่ 4.22-4.25



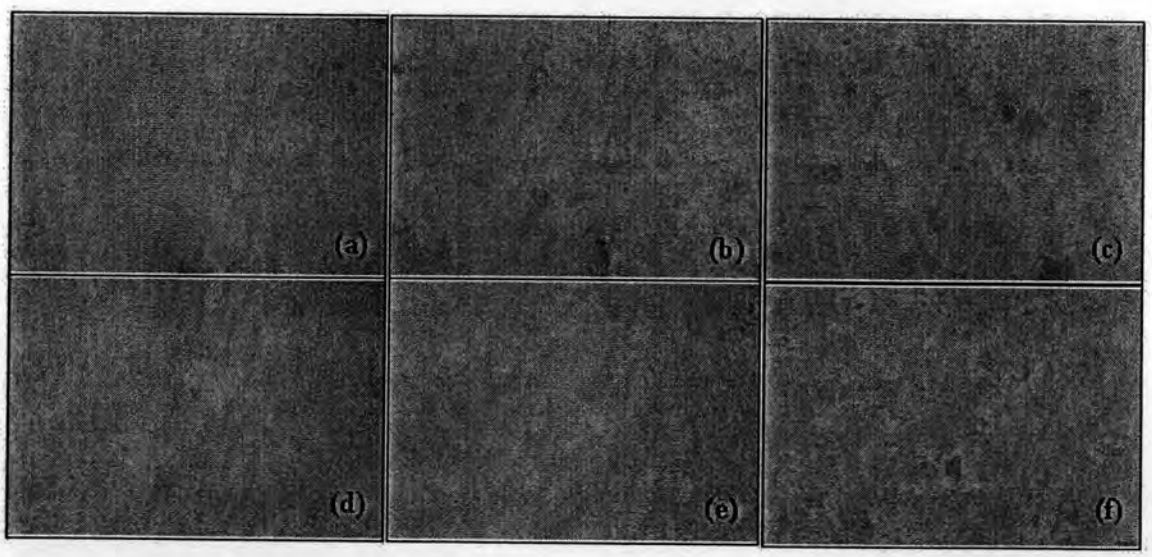
รูปที่ 4.22 แสดงผิวหน้าชิ้นงาน virgin PET (a) ก่อนการแช่กรด, (b) หลังการแช่กรด



รูปที่ 4.23 แสดงผิวหน้าชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารช่วยผสม 10 g/100 g PET
(a-c) อัตราส่วนระหว่างเพตต่อแป้งมันสำปะหลัง 90:10, 80:20, 70:30 ตามลำดับ (ก่อนการแช่กรด)
(d-f) อัตราส่วนระหว่างเพตต่อแป้งมันสำปะหลัง 90:10, 80:20, 70:30 ตามลำดับ (หลังการแช่กรด)



รูปที่ 4.24 แสดงผิวหน้าชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารช่วยผสม 20 g/100 g PET
(a-c) อัตราส่วนระหว่างเพตต่อแป้งมันสำปะหลัง 90:10, 80:20, 70:30 ตามลำดับ (ก่อนการแช่กรด)
(d-f) อัตราส่วนระหว่างเพตต่อแป้งมันสำปะหลัง 90:10, 80:20, 70:30 ตามลำดับ (หลังการแช่กรด)

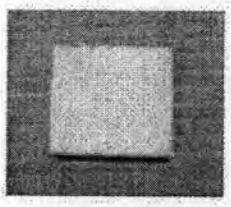


รูปที่ 4.25 แสดงผิวหน้าชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารช่วยผสม 30 g/100 g PET
(a-c) อัตราส่วนระหว่างเพตต่อแป้งมันสำปะหลัง 90:10, 80:20, 70:30 ตามลำดับ (ก่อนการแช่กรด)
(d-f) อัตราส่วนระหว่างเพตต่อแป้งมันสำปะหลัง 90:10, 80:20, 70:30 ตามลำดับ (หลังการแช่กรด)

จากรูปที่ 4.22-4.25 จะสังเกตเห็นว่าชิ้นงานก่อนการแช่กรดจะมีจุดสีน้ำตาลซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสภาพของแป้งมันสำปะหลังจากความร้อนการขึ้นรูปบริเวณผิวของชิ้นงาน และเมื่อผ่านการแช่ด้วยกรดจุดสีน้ำตาลบริเวณผิวของชิ้นงานหายไปและมีรูเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากแป้งที่ละลายในกรดหลุดออกไป จากผลดังกล่าวทำให้เห็นว่าในผิวหน้าของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่ได้นั้นมีรูที่เกิดจากการหลุดออกของแป้งกระจายอยู่ที่ผิวของชิ้นงานด้วย

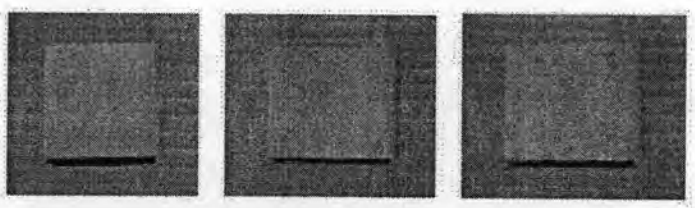
4.7 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อนำชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งเพตได้ผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารช่วยผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป มาทดสอบหาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมเมื่อผ่านระยะเวลา 30, 60 และ 90 วัน ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมเมื่อผ่านระยะเวลา 30, 60 และ 90 วัน ถูกนำมาแสดงในรูปของกราฟในรูปที่ 4.26 - 4.33

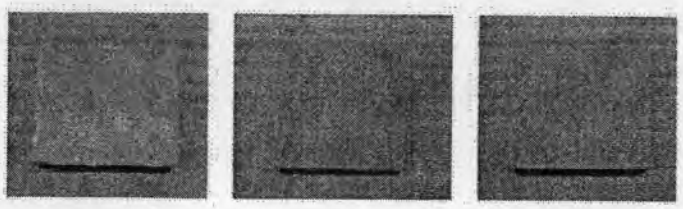


เพตบริสุทธิ์

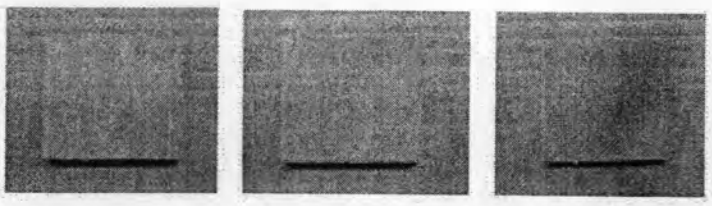
รูปที่ 4.26 ลักษณะชิ้นงานก่อนการฝังดินของเพตบริสุทธิ์



(a) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 10 g/ 100 g PET)

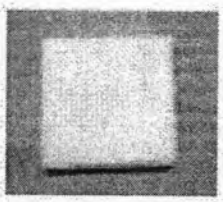


(b) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 20 g/ 100 g PET)

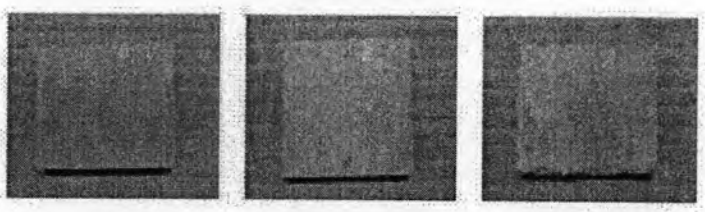


(c) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 30 g/ 100 g PET)

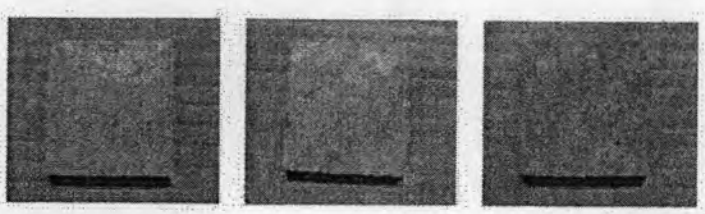
รูปที่ 4.27 ลักษณะชิ้นงานก่อนการฝังดิน ของพอลิเมอร์ผสมเพต:แป้ง (90 : 10, 80 : 20, 70 : 30)
(a) สารช่วยผสม 10 g/ 100 g PET, (b) สารช่วยผสม 20 g/ 100 g
และ (c) สารช่วยผสม 30 g/ 100 g PET



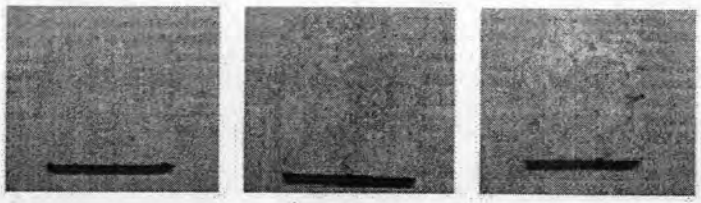
รูปที่ 4.28 ลักษณะชิ้นงานหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 30 วัน ของเพตบริสุทธิ์



(a) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 10 g/ 100 g PET)

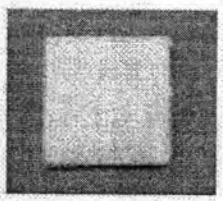


(b) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 20 g/ 100 g PET)

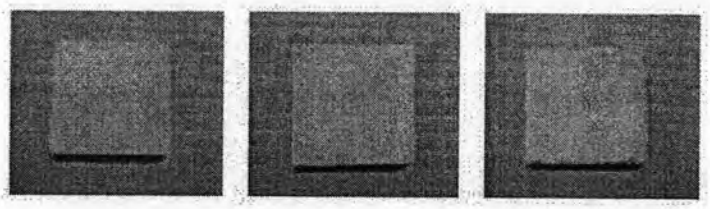


(c) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 30 g/ 100 g PET)

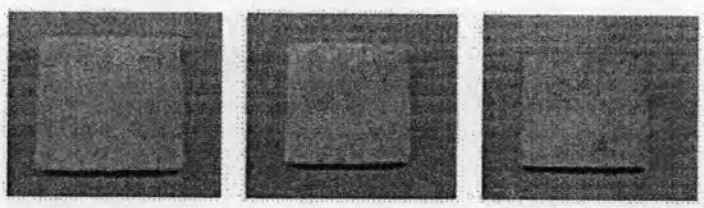
รูปที่ 4.29 ลักษณะชิ้นงานหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 30 วัน ของพอลิเมอร์ผสมเพต:แป้ง (90 : 10, 80 : 20, 70 : 30) (a) สารช่วยผสม 10 g/ 100 g, (b) สารช่วยผสม 20 g/ 100 g และ (c) สารช่วยผสม 30 g/ 100 g PET



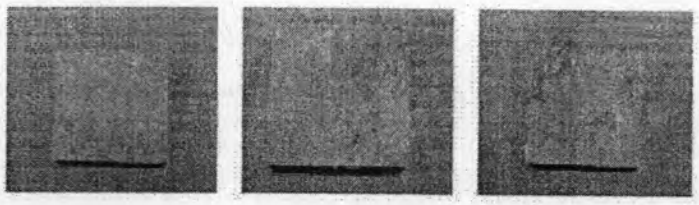
รูปที่ 4.30 ลักษณะชิ้นงานหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 60 วัน ของเพตบริสุทธิ์



(a) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 10 g/ 100 g PET)

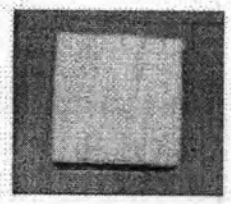


(b) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 20 g/ 100 g PET)

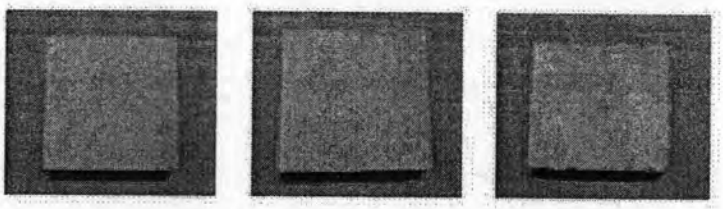


(c) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 30 g/ 100 g PET)

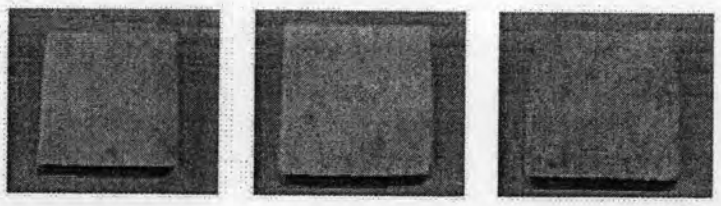
รูปที่ 4.31 ลักษณะชิ้นงานหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 60 วัน ของพอลิเมอร์ผสมเพต:แป้ง (90 : 10, 80 : 20, 70 : 30) (a) สารช่วยผสม 10 g/ 100 g, (b) สารช่วยผสม 20 g/ 100 g และ (c) สารช่วยผสม 30 g/ 100 g PET



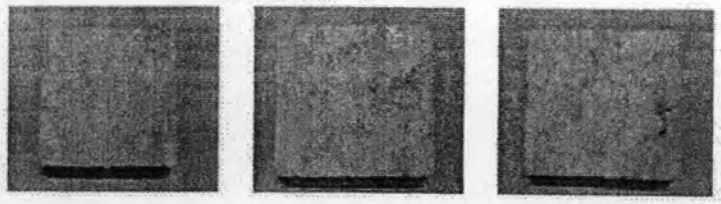
รูปที่ 4.32 ลักษณะชิ้นงานหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 60 วัน ของเพตบริสุทธิ์



(a) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 10 g/ 100 g PET)



(b) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 20 g/ 100 g PET)



(c) PET 90 : Starch 10, PET 80 : Starch 20, PET 70 : Starch 30 (สารช่วยผสม 30 g/ 100 g PET)

รูปที่ 4.33 ลักษณะชิ้นงานหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 90 วัน ของพอลิเมอร์ผสมเพต:แป้ง (90 : 10, 80 : 20, 70 : 30) (a) สารช่วยผสม 10 g/ 100 g, (b) สารช่วยผสม 20 g/ 100 g และ (c) สารช่วยผสม 30 g/ 100 g PET

จากผลของการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมโดยการฝังดิน พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป ชิ้นงานที่มีส่วนผสมของแป้งในพอลิเมอร์ผสมจะมีสีน้ำตาลที่แตกต่างไปจากเดิมเกิดขึ้นกระจายทั่วชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่แป้งเกิดการสลายตัว ส่วนที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมเพต:แป้ง 80:20 และ 70 : 30 ที่ปริมาณสารช่วยผสม 30 g/100 g PET นั้นจะสังเกตเห็นว่าชิ้นงานมีรอยแตกเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณสารช่วยผสมที่มากขึ้นทำให้แป้งที่เติมลงไปสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้นและปริมาณแป้งที่เติมเข้าไปในปริมาณมากทำให้เกิดการย่อยสลายมากขึ้น