

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การผสมและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบแผ่นเพื่อทดสอบสัดส่วนต่อการขึ้นรูป

ผลการศึกษาสัดส่วนระหว่างสารละลาย 1% PHAs กับน้ำยางธรรมชาติ ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เม็ดบีทกันกระแทก (ภาพที่ 4.1) จากผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แบบแผ่นเพื่อพัฒนาการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เม็ดบีทกันกระแทก คือ ที่สัดส่วนระหว่างสารละลาย PHAs และน้ำยางธรรมชาติ 1:1, 2:3 และ 3:2 (ภาพที่ 4.1 (ง) (จ) และ (ฉ)) เนื่องจากตัวอย่างที่ได้รับจากสัดส่วนทั้ง 3 นี้มีลักษณะปรากฏทางกายภาพที่ดี สำหรับตัวอย่างที่มีสัดส่วนของสารละลาย PHAs มากกว่าน้ำยางธรรมชาติ คือที่สัดส่วน 9:1, 4:1 และ 7:3 ตัวอย่างมีความอ่อนตัวมากจนไม่สามารถคงรูปเป็นแผ่นได้ โดยเฉพาะที่สัดส่วน 9:1 (ภาพ 4.1 (ก)) สำหรับสัดส่วนที่มีปริมาณน้ำยางธรรมชาติมากกว่าสารละลาย PHAs ดังตัวอย่างในสัดส่วน 3:7, 1:4 และ 1:9 ตัวอย่างที่ได้มีลักษณะแข็งและสีเหลืองใสแสดงถึงปริมาณยางธรรมชาติที่มาก โดยเฉพาะที่สัดส่วน 1:9 (ภาพ 4.1 (ฉ))

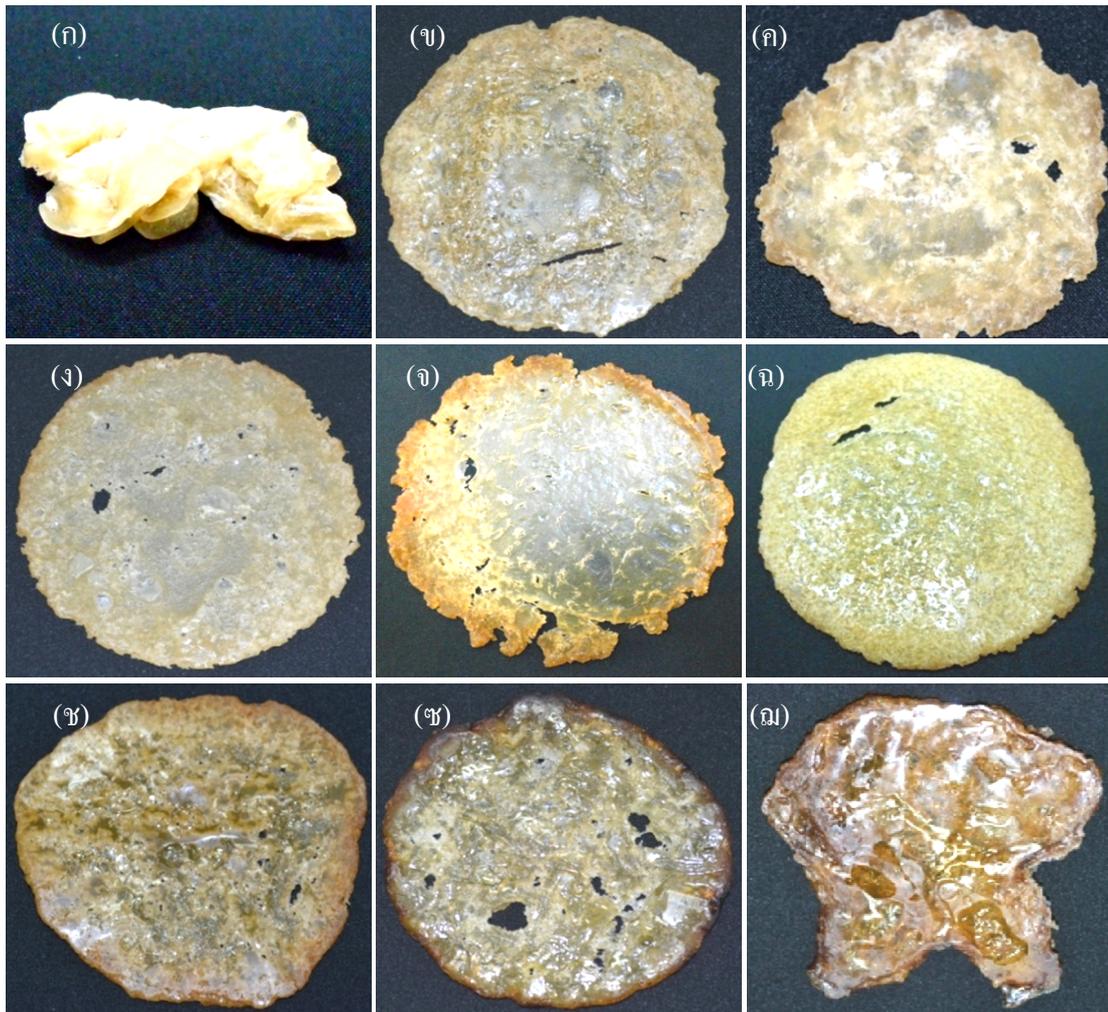
4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เม็ดบีทกันกระแทก

4.2.1 ลักษณะพื้นที่ผิว (Surface area) ของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการสลายตัวทางชีวภาพ

การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ระหว่าง 1%, 2% และ 3% PHAs กับน้ำยางธรรมชาติด้วย SEM ทั้งก่อน (ภาพที่ 4.2) และหลัง (ภาพที่ 4.3) การสลายตัวทางชีวภาพ พบว่าตัวอย่างทั้งก่อนและหลังการสลายตัวทางชีวภาพปรากฏรู (pore) บนพื้นที่ผิวในทุก ๆ ตัวอย่าง โดยตัวอย่างปรากฏรูพรุน (porosity) เพิ่มขึ้นหลังการสลายตัวทางชีวภาพ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่ทำการย่อยตัวอย่างเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอน (carbon source) ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

4.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณความพรุน (Porosity)

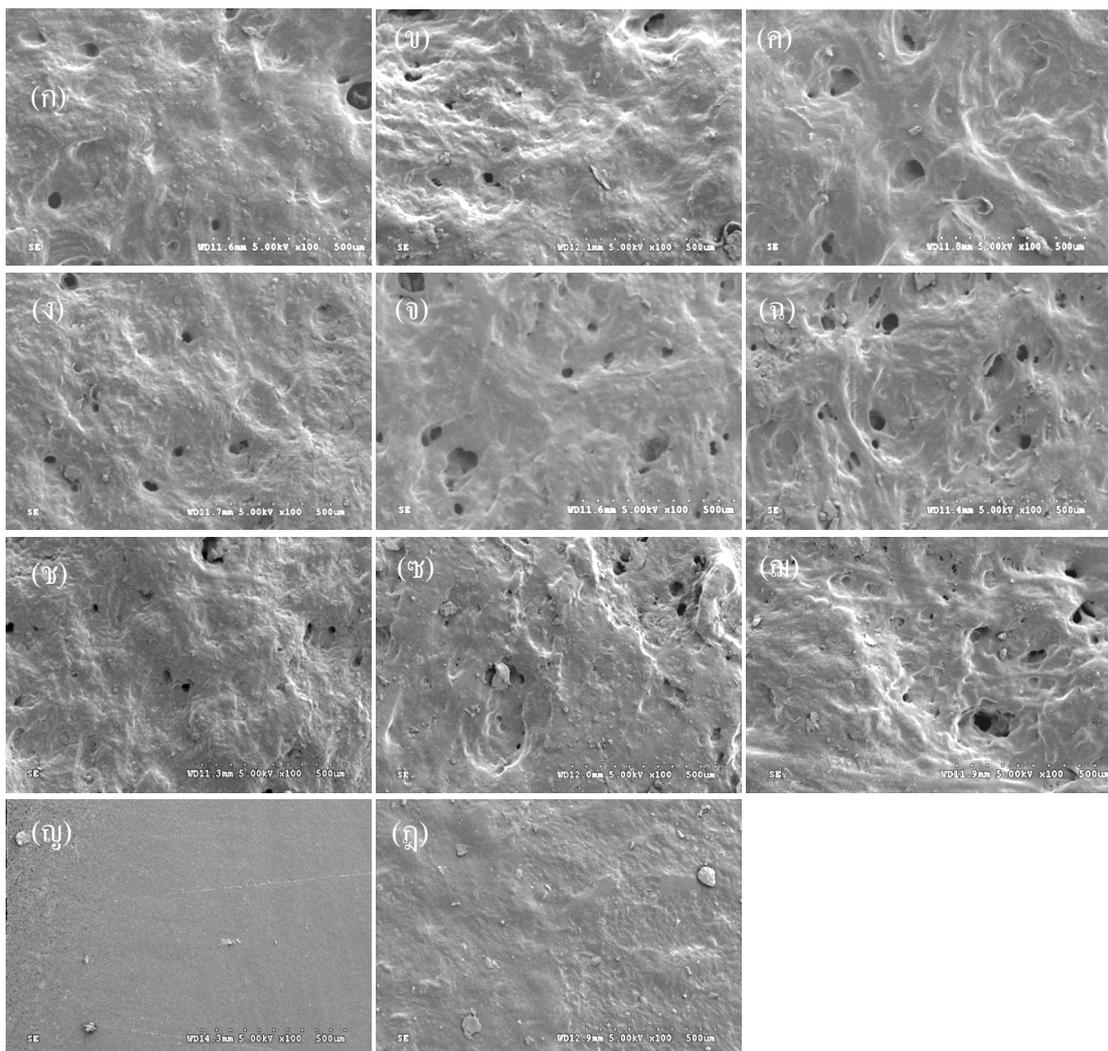
ปริมาณความพรุนเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุ เนื่องจากความพรุนมีผลกับทั้งคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพ ปริมาณความพรุนสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio) ของตัวอย่างทำได้โดยนับเฉพาะช่องว่างเปรียบเทียบ



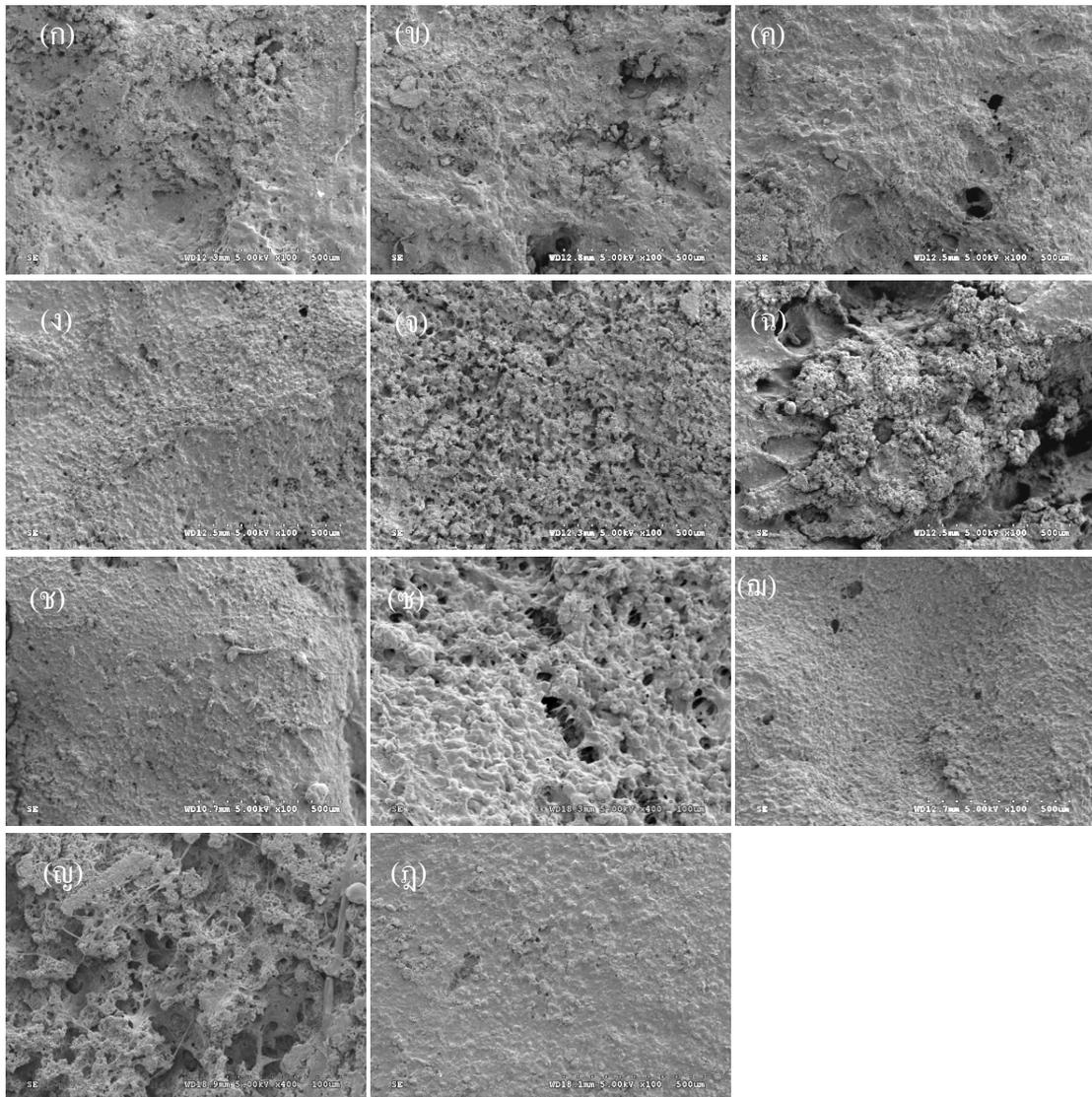
ภาพที่ 4.1 ผลการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมต่อผสมและการขึ้นรูปตัวอย่างระหว่าง PHAs และน้ำยางธรรมชาติ (ก) P₁9:R1, (ข) P₁4:R1, (ค) P₁7:R3, (ง) P₁3:R2, (จ) P₁1:R1, (ฉ) P₁2:R3, (ช) P₁3:R7, (ซ) P₁1:R4 และ (ณ) P₁1:R9 (P₁ = 1% PHAs, P₁9 = 1% PHAs สัดส่วน 90%, R1 = Natural rubber 10%)

กับพื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวอย่าง ปริมาณความพรุนที่มากสามารถเพิ่มพื้นที่ผิว ซึ่งการมีพื้นที่ผิวมากขึ้นส่งผลให้การสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างเพิ่มขึ้น (Teramoto et al, 2004) ปริมาณความพรุนแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยความพรุนที่ปรากฏบนผิวของผลิตภัณฑ์อาจคาดการณ์ได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความพรุนลักษณะคล้ายฟองน้ำอยู่ภายใน แต่ไม่สามารถคาดการณ์เกี่ยวกับปริมาณความพรุนภายในผลิตภัณฑ์ได้ ผลการตรวจสอบปริมาณความพรุนของตัวอย่างก่อนการสลายตัวทางชีวภาพพบว่า PHAs บริสุทธิ์มีปริมาณความพรุนมากที่สุดร้อยละ 12.79 ของพื้นที่ผิว ส่วนยางธรรมชาติมีปริมาณความพรุนน้อยที่สุด คือร้อยละ 0.04 ของพื้นที่ผิว สำหรับตัวอย่างผสมมีปริมาณความพรุน

อยู่ระหว่างร้อยละ 0.60 -1.06 ของพื้นที่ผิว จากปริมาณความพรุนทำให้ทราบว่า ตัวอย่างประกอบ ด้วยยางธรรมชาติมากกว่าสารละลาย PHAs ดูได้จากปริมาณความพรุนที่มีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติมากกว่า PHAs ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Kaewkannetra and Promkottra (2013) ที่พบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติทำให้ความพรุนของตัวอย่างที่ได้จากการผสมระหว่าง PHAs และ ยางธรรมชาติมีปริมาณลดลง สัดส่วนของยางธรรมชาติจึงแปรผกผันปริมาณความพรุนของตัวอย่าง



ภาพที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นผลิตภัณฑ์จากเครื่อง SEM ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพของ ตัวอย่างจากสารละลาย PHAs ทั้ง 3 ความเข้มข้น คือ 1% PHAs สัดส่วน (ก) P₁:R₂, (ข) P₁:R₁, (ค) P₂:R₃, 2% PHAs สัดส่วน (ง) P₂:R₂, (จ) P₂:R₁, (ฉ) P₂:R₃, 3% PHAs สัดส่วน (ช) P₃:R₂, (ซ) P₃:R₁, (ฌ) P₃:R₃, รวมทั้งสารตัวอย่างบริสุทธิ์ (ญ) PHAs และ (ฎ) ยางธรรมชาติ ที่กำลังขยาย 100 เท่า สเกลของภาพ 500 μ m (P₁ = 1% PHAs, P₆ = 1% PHAs สัดส่วน 60%, R₄ = Natural rubber 40%)



ภาพที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นผลิตภัณฑ์จากเครื่อง SEM หลังการสลายตัวทางชีวภาพของ ตัวอย่างจากสารละลาย PHAs ทั้ง 3 ความเข้มข้น คือ 1% PHAs สัดส่วน (ก) P₁:R₂, (ข) P₁:R₁, (ค) P₁:R₃, (ง) P₂:R₂, 2% PHAs สัดส่วน (จ) P₂:R₁, (ฉ) P₂:R₃, 3% PHAs สัดส่วน (ช) P₃:R₂, (ซ) P₃:R₁*, (ฉ) P₃:R₃, รวมทั้งสารตัวอย่างบริสุทธิ์ (ญ) PHAs* และ (ฎ) ยางธรรมชาติ ที่กำลังขยาย 100 เท่า สเกลของภาพ 500 μm, *กำลังขยาย 400 เท่า สเกลของภาพ 100 μm (P₁ = 1% PHAs, P₁:R₆ = 1% PHAs สัดส่วน 60%, R₄ = Natural rubber 40%)

สำหรับตัวอย่างหลังผ่านการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพ พบว่าทุกตัวอย่างมีปริมาณความพรุนเพิ่มมากขึ้น โดย PHAs บริสุทธิ์มีปริมาณความพรุนมากที่สุด โดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.79 เป็นร้อยละ 26.26 ของพื้นที่ผิว และยางธรรมชาติมีปริมาณความพรุนน้อยที่สุด โดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.04 เป็นร้อยละ 0.74 ของพื้นที่ผิว สำหรับตัวอย่างผสมมีปริมาณความพรุนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.60-1.06 ของพื้นที่ผิวเป็นร้อยละ 1.32-5.97 ของพื้นที่ผิว (ตารางที่ 4.1) จากการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปริมาณความพรุนบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการสลายตัวทางชีวภาพ พบว่าปริมาณความพรุนบนพื้นที่ผิวของตัวอย่างผสมหลังการสลายตัวทางชีวภาพมีความพรุนมากกว่าตัวอย่างก่อนการสลายตัวทางชีวภาพสูงสุด 8 เท่า สำหรับ PHAs และยางธรรมชาติ มีความพรุนบนพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น 2 และ 18 เท่า ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความพรุนบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์หลังการสลายตัวทางชีวภาพสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Teramoto และคณะ (2004)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความพรุนก่อนและหลังการศึกษการสลายตัวทางชีวภาพ

PHAs Concentration (% w/v)	Ratios (v:v) PHAs:NR	ปริมาณความพรุน (ร้อยละของพื้นที่ผิว)	
		ก่อนการสลายตัว ทางชีวภาพ	หลังการสลายตัว ทางชีวภาพ
1	P ₁ 3:R2	1.06	2.58
	P ₁ 1:R1	0.84	2.84
	P ₁ 2:R3	0.69	2.16
2	P ₂ 3:R2	0.80	1.32
	P ₂ 1:R1	0.66	5.73
	P ₂ 2:R3	0.96	5.97
3	P ₃ 3:R2	0.60	2.77
	P ₃ 1:R1	0.83	2.72
	P ₃ 2:R3	0.86	1.33
Control	PHAs	12.79	26.26
Control	Rubber	0.04	0.74

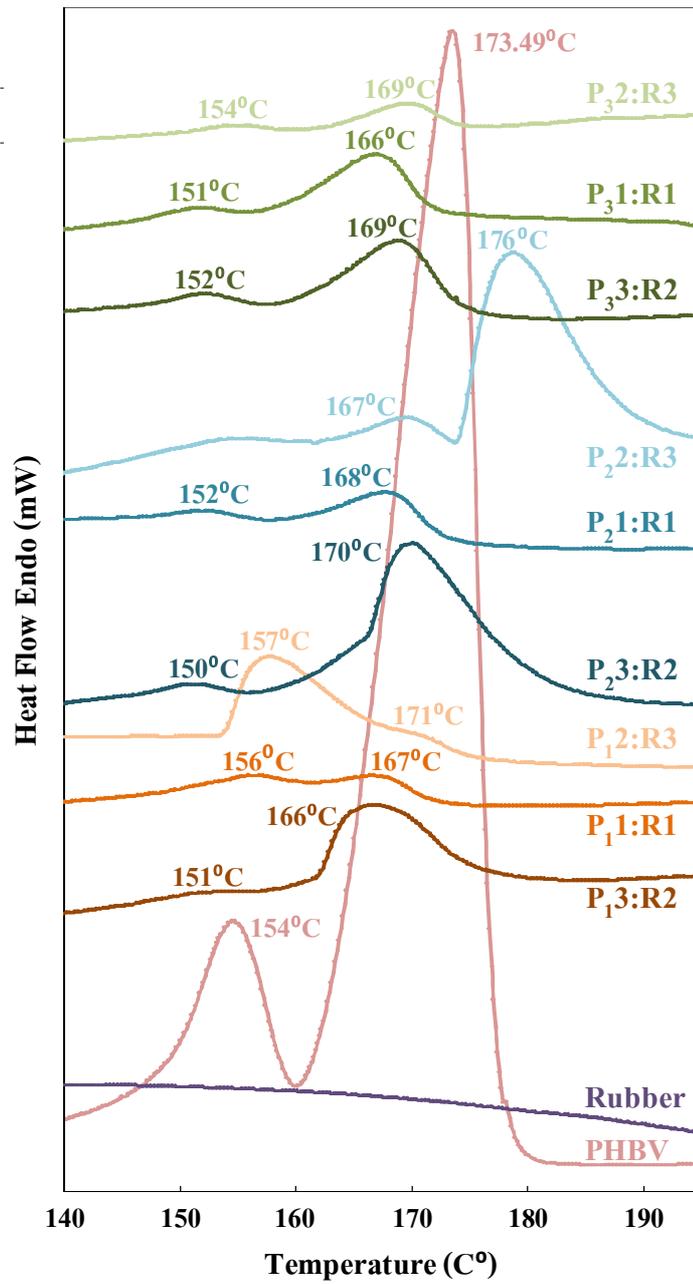
4.2.3 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal property)

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนก่อนการศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่าง จากการตรวจสอบอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (melting point temperature, T_m) ของตัวอย่างผสมระหว่าง PHAs และน้ำยางธรรมชาติ พบว่า PHAs บริสุทธิ์ มีค่า T_m 2 ค่า (ภาพที่ 4.4) ที่บ่งบอกว่าเป็น PHBV ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ร่วมที่ประกอบด้วย polyhydroxybutyrate (PHB) และ polyhydroxyvalerate (PHV) (Weng, 2010) โดย T_m ค่าแรกของตัวอย่างผสมมีค่าอยู่ในช่วง 150-157 องศาเซลเซียส ส่วน T_m ค่าที่สองอยู่ในช่วง 166-176 องศาเซลเซียส และตัวอย่างผสมโดยส่วนใหญ่มี T_m ค่าที่สองอยู่ในช่วง 166-171 องศาเซลเซียส มีเพียงหนึ่งตัวอย่างที่มี T_m ค่าที่สองสูงที่สุด คือ P₂:R3 เท่ากับ 176 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงกว่า PHBV บริสุทธิ์ ประมาณ 3 องศาเซลเซียส ส่วนตัวอย่าง P₁:R2 มี T_m ค่าที่สองต่ำที่สุด เท่ากับ 166 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำกว่า PHBV บริสุทธิ์ประมาณ 7 องศาเซลเซียส ขณะที่ PHBV บริสุทธิ์มี T_m ค่าที่สองเท่ากับ 173 องศาเซลเซียส

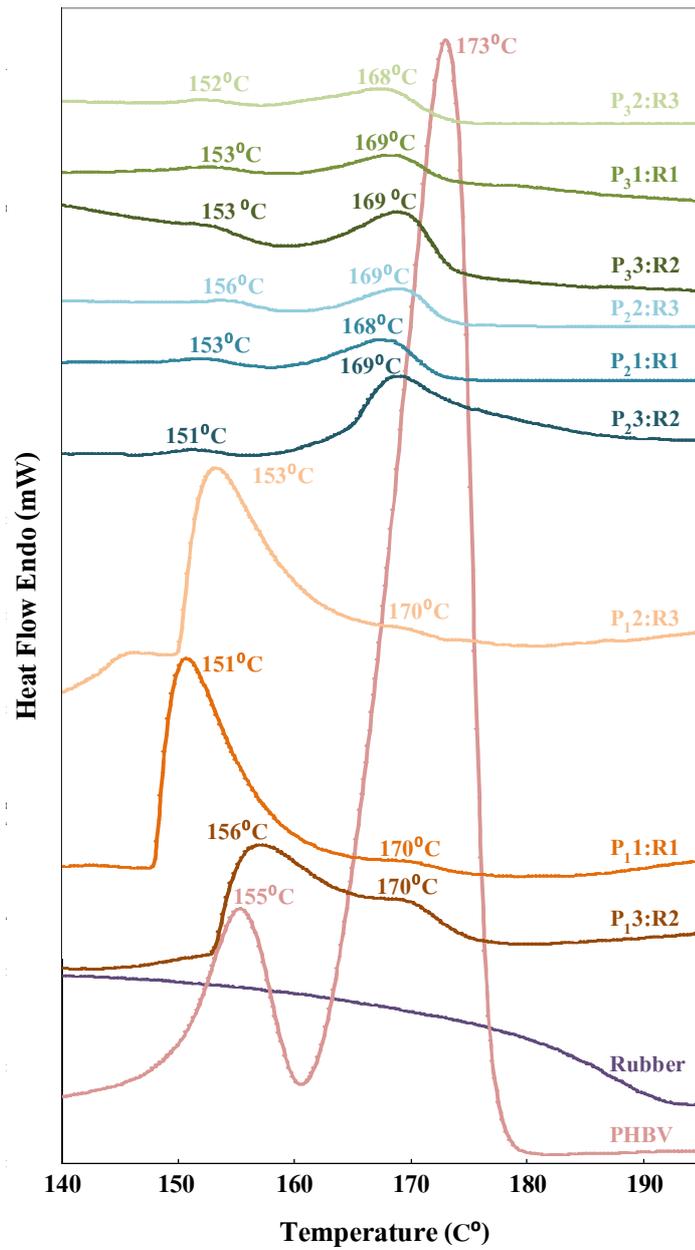
ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์เหล่านี้ได้แสดงให้เห็นการเกิดขึ้นของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เนื่องจาก PHBV เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (random copolymers) (Smith, 2005) ฉะนั้นการผสมสารละลาย PHBV กับน้ำยางธรรมชาติ อาจทำให้เกิดการจับกันเองระหว่าง PHB กับ PHB หรือ PHV กับ PHV จึงทำให้ค่า T_m ของตัวอย่างแต่ละสัดส่วนเปลี่ยนแปลง (Yoshie, 2001) บางตัวอย่างมีการรวมตัวกันของ PHB ในสัดส่วนที่มากจึงทำให้ตัวอย่างมีค่า T_m สูง เช่น ตัวอย่างที่ P₂:R3 มีค่า T_m เท่ากับ 176 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Zhang (1998) ที่พบว่า สัดส่วนของ PHB ต่อ Polyethylene glycol (PEG) มีผลต่อค่า T_m โดยการผสม PHB กับ PEG ทำให้ T_m ของ PHB ลดลงแปรผันกับสัดส่วนของ PEG ที่เพิ่มขึ้น โดย PHB บริสุทธิ์ แสดงค่า T_m ที่ 177-179 องศาเซลเซียส เมื่อสัดส่วนของ PHB ลดลงเหลือร้อยละ 90 มีค่า T_m อยู่ที่ 172-174 องศาเซลเซียส และเมื่อสัดส่วนของ PHB ลดเหลือร้อยละ 80 มีค่า T_m ลดลงมาอยู่ที่ 160-162 องศาเซลเซียส บางตัวอย่างมีการรวมกันระหว่าง PHV ในสัดส่วนที่มากจึงทำให้ค่า T_m ต่ำ เช่น ตัวอย่าง P₁:R2 ที่มีค่า T_m เท่ากับ 166.29 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Holmes (1988) ที่พบว่า การเพิ่ม PHV สามารถลดค่า T_m ของวัสดุนั้นได้ ในขณะที่ PHBV บริสุทธิ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า T_m น้อยมากจนแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า T_m ที่เกิดขึ้นอาจแสดงถึงการรวมตัวกันระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับสารละลาย PHBV โดยการผสมยางธรรมชาติอาจช่วยเติมกิ่งหรือสาขา (branches) ของโครงสร้างหลักของ PHBV ทำให้โครงสร้าง PHBV เกิดการพับงอ (lamellae) เพื่อเกิดบริเวณผลึกได้ลดลงส่งผลให้ T_m ของตัวอย่างผสมลดลงตาม (Acevedo et al, 2008) สำหรับตัวอย่างผสมหลังการสลายตัวทางชีวภาพพบว่ามี T_m ค่าแรกอยู่

ในช่วง 151 - 156 องศาเซลเซียส และ T_m ค่าที่สองอยู่ในช่วง 168 - 170 องศาเซลเซียส ซึ่งมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่แคบกว่าตัวอย่างก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ

สำหรับร้อยละความเป็นผลึกของตัวอย่างนั้น โดยส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกับสัดส่วนและปริมาณของสารละลาย PHBV โดยพบว่าร้อยละความเป็นผลึกของตัวอย่างผสม 3% PHBV ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพมีแนวโน้มความเป็นผลึกสูงกว่าตัวอย่างผสม 1% PHBV เนื่องจากมี PHBV ในปริมาณที่น้อยมาก เทอร์โมแกรม (thermogram) จาก DSC ของตัวอย่างจึงแสดงคุณสมบัติความเป็นผลึกของ PHBV ได้ไม่ชัดเจน สังเกตได้จากตัวอย่างผสม 1% และ 2% PHBV ที่มีค่า T_m ที่ไม่เป็นระเบียบเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมแกรม DSC ของตัวอย่างผสม 3% PHBV สำหรับร้อยละความเป็นผลึกของตัวอย่างหลังการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างผสม 3% PHBV มีแนวโน้มความเป็นผลึกสูงกว่าตัวอย่างผสม 1% และ 2% PHBV ตามลำดับ แต่ตัวอย่างผสม 2% PHBV ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพไม่ได้เป็นไปตามแนวโน้มนี้อาจมีสาเหตุมาจากขั้นตอนการผสมที่ยังเข้ากันไม่ดีเท่าที่ควร กล่าวคือ ทั้งก่อนและหลังผ่านการสลายตัวทางชีวภาพ แนวโน้มร้อยละความเป็นผลึกของตัวอย่างขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและสัดส่วนของสารละลาย PHBV ในตัวอย่างผสม 3% PHBV แสดงแนวโน้มความเป็นผลึกสูงกว่าตัวอย่างผสม 2% และ 1% PHBV และตัวอย่างที่มีสัดส่วนของสารละลาย PHBV สูงมีแนวโน้มการแสดงความเป็นผลึกสูงกว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วนสารละลาย PHBV ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kaewkannetra and Promkotra (2011) ที่พบว่าความเป็นผลึกของตัวอย่างผสมที่ได้จากสารละลาย PHAs ทางการค้าที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ผสมกับแป้งมันสำปะหลังปรากฏความเป็นผลึกลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลัง



ภาพที่ 4.4 เทอร์โมแกรม DSC ของ PHBV และยางธรรมชาติก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ
(P₁ = 1% PHBV, P₁2 = 1% PHBV สัดส่วน 40%, R3 = Natural rubber 60%)



ภาพที่ 4.5 เทอร์โมแกรม DSC ของ PHBV และยางธรรมชาติหลังการสลายตัวทางชีวภาพ
(P₁ = 1% PHBV, P₁2 = 1% PHBV สัดส่วน 40%, R3 = Natural rubber 60%)

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากเทอร์โมแกรม DSC ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ

PHAs Concentration (% w/v)	Ratios (v:v) PHAs:NR	Heat of Fusion ^a (ΔH_m , J/g)	Melting Temperature ^a (°C)	Heat of Fusion ^b (ΔH_m , J/g)	Melting Temperature ^b (°C)	Degree of Crystallinity (%)
1	P ₁ 3:R2	0.22	151.48	6.16	166.29	5.65
	P ₁ 1:R1	0.52	156.08	0.63	167.08	0.57
	P ₁ 2:R3	4.78	157.50	0.10	171.35	0.10
2	P ₂ 3:R2	0.40	150.82	12.00	170.13	11.01
	P ₂ 1:R1	0.41	152.01	2.59	168.01	2.38
	P ₂ 2:R3	0.78	167.29	9.64	175.93	8.85
3	P ₃ 3:R2	0.60	152.00	5.17	169.14	4.74
	P ₃ 1:R1	0.49	151.07	4.27	166.73	3.92
	P ₃ 2:R3	0.38	154.52	1.87	169.35	1.71
Control	PHAs	7.02	154.49	61.31	173.49	56.25
Control	Rubber	-	-	-	-	-

^a= อุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 1, ^b= อุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 2

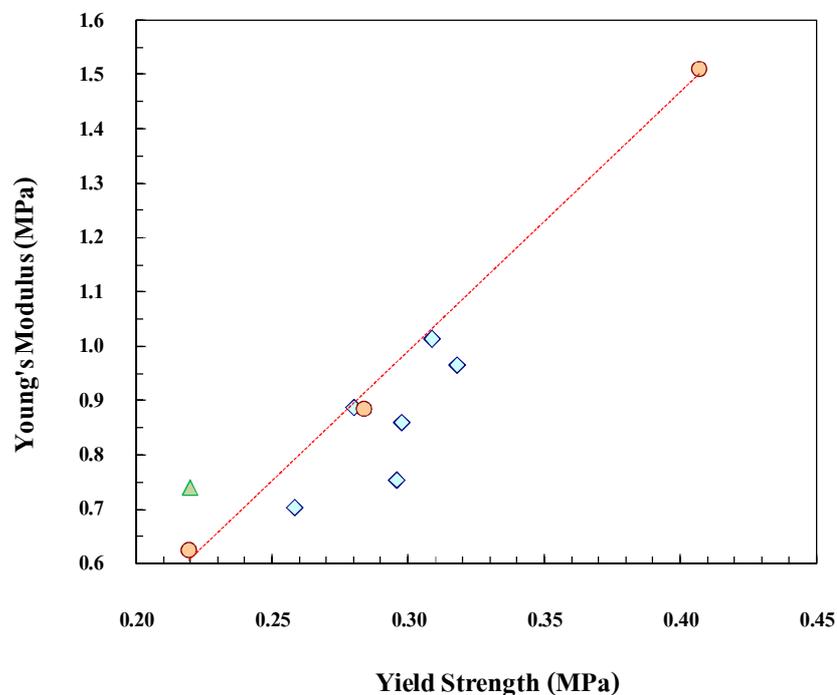
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากเทอร์โมแกรม DSC หลังการสลายตัวทางชีวภาพ

PHAs Concentration (% w/v)	Ratios (v:v) PHAs:NR	Heat of Fusion ^a (ΔH_m , J/g)	Melting Temperature ^a (°C)	Heat of Fusion ^b (ΔH_m , J/g)	Melting Temperature ^b (°C)	Degree of Crystallinity (%)
1	P ₁ 3:R2	2.02	156.15	0.18	170.16	0.16
	P ₁ 1:R1	4.71	150.62	0.05	170.16	0.05
	P ₁ 2:R3	4.53	153.11	0.03	170.13	0.03
2	P ₂ 3:R2	0.11	150.91	3.55	168.73	3.25
	P ₂ 1:R1	0.13	152.65	1.46	168.15	1.34
	P ₂ 2:R3	0.08	154.71	0.59	169.21	0.54
3	P ₃ 3:R2	0.09	152.99	1.21	168.82	1.11
	P ₃ 1:R1	0.23	152.53	1.09	168.52	1.00
	P ₃ 2:R3	0.06	152.08	0.75	167.91	0.69
Control	PHAs	7.63	155.38	57.76	173.12	52.99
Control	Rubber	-	-	-	-	-

^a= อุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 1, ^b= อุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 2

4.2.4 การทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile strength)

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (yield point) กับมอดุลัสของยัง (Young's modulus) แสดงให้เห็นค่ามอดุลัสของตัวอย่างที่ได้รับจากการผสมระหว่างสารละลาย PHAs ที่ความเข้มข้นต่างกัน 3 แบบ กับน้ำยางธรรมชาติ (ภาพที่ 4.6) สำหรับตัวอย่าง PHAs บริสุทธิ์นั้นไม่สามารถทดสอบความต้านแรงดึงได้ เนื่องจากตัวอย่างแข็งและเปราะจนไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบได้ ยางธรรมชาติมีค่ามอดุลัสอยู่ที่ 0.740 เมกะปาสกาล (MPa) จากผลการทดสอบแสดงแนวโน้มเกี่ยวกับส่วนผสมของวัสดุ โดยสามารถแสดงเป็นแนวโน้มได้ 2 แบบอย่างชัดเจน คือ แนวโน้มที่ 1 แสดงค่ามอดุลัสที่ไม่เป็นระเบียบของตัวอย่างผสม 1% และ 2% PHBV ส่วนแนวโน้มที่ 2 แสดงค่ามอดุลัสที่เป็นระเบียบของตัวอย่างตัวอย่างผสม 3% PHAs จากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวอย่างผสม 1% และ 2% PHAs แสดงค่ามอดุลัสที่กระจายกันอย่างไม่เป็นระเบียบ อาจเป็นการแสดงถึงการกระจายตัวของ PHAs ที่ไม่สม่ำเสมอในน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจากสารละลาย PHAs มีความเข้มข้นต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างผสม 3% PHAs ที่แสดงค่ามอดุลัสตามสัดส่วน PHAs โดยตัวอย่างที่สัดส่วน $P_3:R_2$ มีค่ามอดุลัสสูงที่สุดเท่ากับ 1.511 รองลงมาคือที่สัดส่วน $P_3:R_1$ และ $P_2:R_3$ มีค่ามอดุลัสเท่ากับ 0.886 และ 0.626 เมกะปาสกาล



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (yield point) กับค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) (◆ = 1% และ 2% PHAs, ● = 3% PHAs, ▲ = Natural Rubber)

ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) ฉะนั้นตัวอย่างผสม 3% PHAs นี้จึงเป็นตัวอย่างที่แสดงการกระจายตัวของ PHAs ที่มีความสม่ำเสมอเนื่องจากมีค่ามอดูลัสที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารละลาย PHAs ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่ามอดูลัสของตัวอย่างผสม 3% PHAs สอดคล้องกับผล DSC ที่แสดงค่า T_m ของ PHAs ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 อย่างเป็นระเบียบ ค่ามอดูลัสที่สอดคล้องกับสัดส่วนของ PHAs ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 สามารถแสดงความเป็นผลึกของ PHAs ได้ เนื่องจากค่ามอดูลัสเป็นสมบัติเชิงกล โดยสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับ การผสมของ โครงสร้างผลึก การมีผลึกมากทำให้มีคุณสมบัติเชิงกลสูงตามไปด้วย (Fischer, 2004) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาความเป็นผลึก (Crystallinity) ที่พบว่า ตัวอย่างผสม 3% PHAs สัดส่วน P₃:R₂ มีความเป็นผลึกสูงที่สุด โดยเท่ากับร้อยละ 4.742 รองลงมาคือ 3.916 และ 1.711 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) นอกจากนี้ค่าการทดสอบความต้านแรงดึงของ ตัวอย่างผสม 3% PHAs ยังสอดคล้องกับอัตราส่วนช่องว่างก่อนการศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพ โดยพบว่าตัวอย่างผสม 3% PHAs ที่สัดส่วน P₃:R₂ ซึ่งมีค่ามอดูลัสสูงที่สุด

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบโดยเครื่อง UTM

PHAs Concentration (% w/v)	Ratios (v:v) PHAs:NR	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Young's Modulus (MPa)
1	P ₁ 3:R ₂	0.577	467.197	0.755
	P ₁ 1:R ₁	0.537	456.920	0.860
	P ₁ 2:R ₃	0.448	471.173	0.704
2	P ₂ 3:R ₂	0.685	467.107	0.887
	P ₂ 1:R ₁	0.694	460.027	0.966
	P ₂ 2:R ₃	0.607	486.430	1.013
3	P ₃ 3:R ₂	0.894	463.807	1.511
	P ₃ 1:R ₁	1.597	455.763	0.886
	P ₃ 2:R ₃	0.447	464.513	0.626
Control	PHAs	-	-	-
Control	Rubber	0.335	547.389	0.740

เท่ากับ 1.511 เมกะปาสกาล มีอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 0.6 ของพื้นที่ผิว สำหรับสัดส่วน $P_3:1:R1$ และ $P_3:2:R3$ ที่มีค่ามอดุลัสลดลงเป็น 0.886 และ 0.626 เมกะปาสกาล พบว่าสอดคล้องกับอัตราส่วนช่องว่างที่เพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 0.83 และ 0.86 ของพื้นที่ผิวตามลำดับ

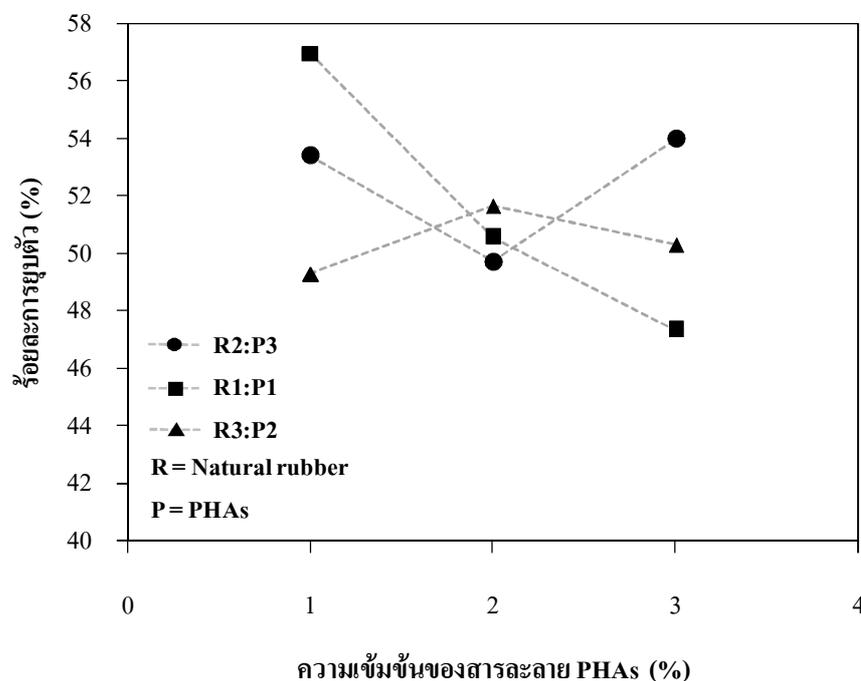
4.2.5 การทดสอบแรงกด (Compressive test)

การทดสอบคุณสมบัติความเค้นอัดของเม็ดบีทกั้นกระแทกจาก PHAs ผสมกับยางธรรมชาติ โดยทดสอบการรับแรงกด 4 ขนาด ได้แก่ แรงขนาด 250, 500, 750 และ 1000 นิวตัน จาก การทดสอบพบว่า การรับแรงกดแต่ละขนาดของเม็ดบีทกั้นกระแทกทำให้มีร้อยละการยุบตัวที่แตกต่างกัน ตัวอย่างที่มีร้อยละการยุบตัวของเม็ดบีทกั้นกระแทกต่ำที่สุดเมื่อรับแรงกดขนาด 1000 นิวตัน คือ ตัวอย่างที่ประกอบด้วย 1% PHAs สัดส่วน $P_1:1:R1$ โดยมีร้อยละการยุบตัว เท่ากับ 24.72 ตัวอย่างที่มีร้อยละการยุบตัวของเม็ดบีทกั้นกระแทกที่สูงที่สุด คือ ตัวอย่างที่ประกอบด้วย 2% PHAs สัดส่วน $P_2:1:R1$ โดยมีร้อยละการยุบตัว เท่ากับ 33.32 (ตารางที่ 4.5) แนวโน้มการยุบตัวของเม็ดบีทกั้นกระแทก

ตารางที่ 4.5 ผลการยุบตัวของตัวอย่างเม็ดบีทกั้นกระแทกชีวภาพจาก PHAs ต่อยางธรรมชาติ รวมถึงตัวอย่างจากยางธรรมชาติบริสุทธิ์ที่เกิดจากการรับแรงกดขนาดต่าง ๆ สี่แบบ

PHAs Concentration (% w/v)	Ratios (v:v) PHAs:NR	ร้อยละการยุบตัว Compressive load (N)			
		250	500	750	1000
1	$P_3:3:R2$	18.4	23.2	26.8	29.96
	$P_1:1:R1$	15.9	18.72	21.6	24.72
	$P_1:2:R3$	16.9	24.44	28.32	31.72
2	$P_2:3:R2$	16.3	21.8	25.68	28.52
	$P_2:1:R1$	20.4	25.96	30	33.32
	$P_2:2:R3$	17.2	20.96	23.36	27.04
3	$P_3:3:R2$	18.15	23.04	27.36	31.2
	$P_3:1:R1$	16.25	21.76	26.08	29.68
	$P_3:2:R3$	13.8	19.24	22.92	26.56
Control	Rubber	17.75	24.32	28.12	30.72

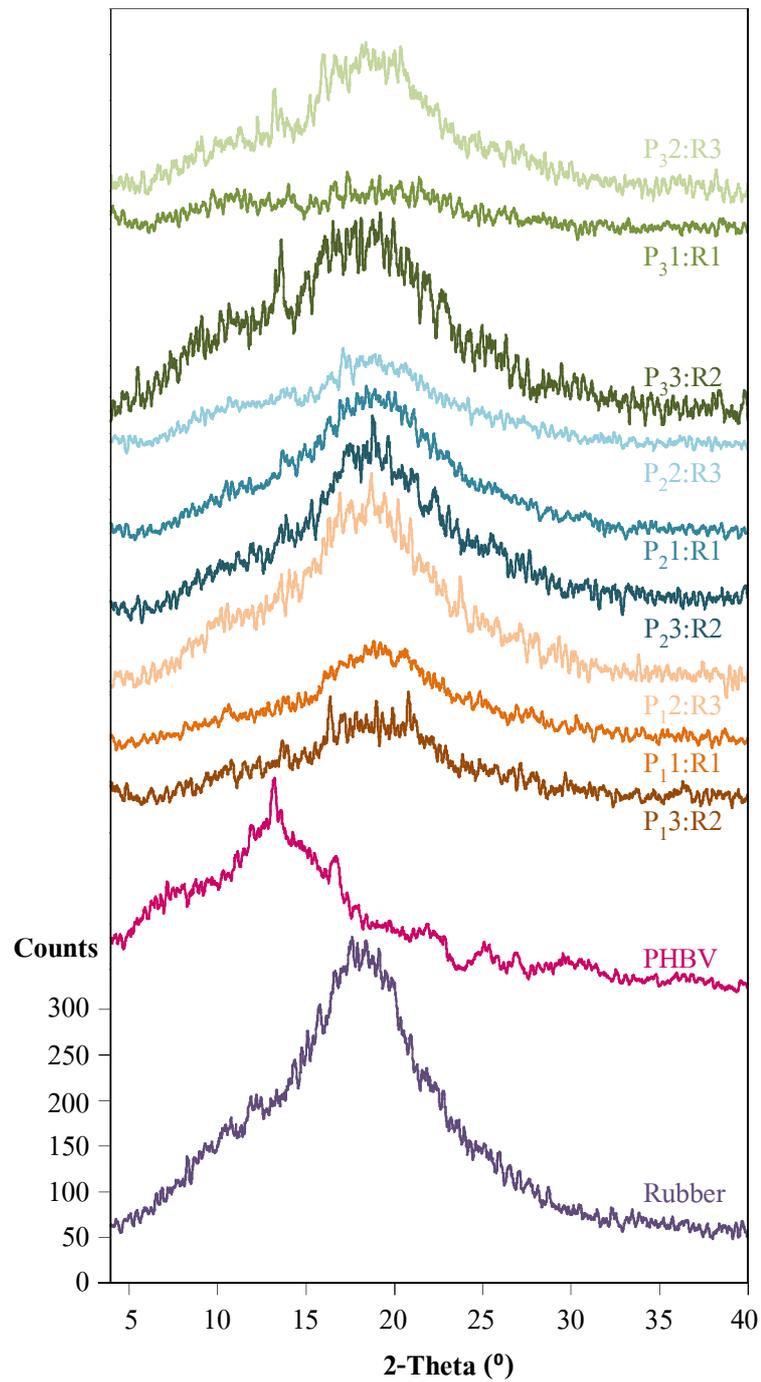
ที่ประกอบด้วย 3% PHAs มีแนวโน้มการยวบตัวที่ชัดเจน โดยสัดส่วน P₃:R₂ มีร้อยละการยวบตัวสูงที่สุดที่เท่ากับ 31.2 รองลงมาคือที่สัดส่วน P₃:R₁ และ P₃:R₃ โดยมีร้อยละการยวบตัว เท่ากับ 29.68 และ 26.56 ตามลำดับ ในขณะที่เมื่คบิทกันกระแทกที่ประกอบด้วยสารละลาย 1% และ 2% PHAs ไม่ปรากฏแนวโน้มการยวบตัวตามสัดส่วนของ PHAs ต่ออย่างธรรมชาติที่ชัดเจน สำหรับเมื่คบิทกันกระแทกจากยางธรรมชาติบริสุทธิ์มีร้อยละการยวบตัวอยู่ที่ 30.72 (ตารางที่ 4.5) ซึ่งแนวโน้มการยวบตัวของเมื่คบิทกันกระแทกที่ประกอบด้วย 3% PHAs เมื่อรับแรงกดขนาด 1000 นิวตัน มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับยวบตัวสูงสุด (load at break) ของเมื่คบิทกันกระแทกที่ประกอบด้วย 3% PHAs เมื่อได้รับแรงกดขนาด 1000 นิวตัน สำหรับยางธรรมชาติมีร้อยละการยวบตัวสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 50 (ภาพที่ 4.7) เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการยวบของตัวอย่างกับค่ามอดูลัสจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างที่สัดส่วน P₃:R₂ มีร้อยละการยวบตัวสูงที่สุดและมีความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างสูงสุดเช่นกัน ในขณะที่ปริมาณความพรุณต่ำสุด การมีปริมาณความพรุณต่ำทำให้มีความต้านทานแรงดึงได้มาก แต่การมีปริมาณความพรุณที่ต่ำทำให้มีพื้นที่สำหรับการแทนที่อากาศในรูต่ำตาม จึงทำให้มีร้อยละการยวบตัวที่สูง



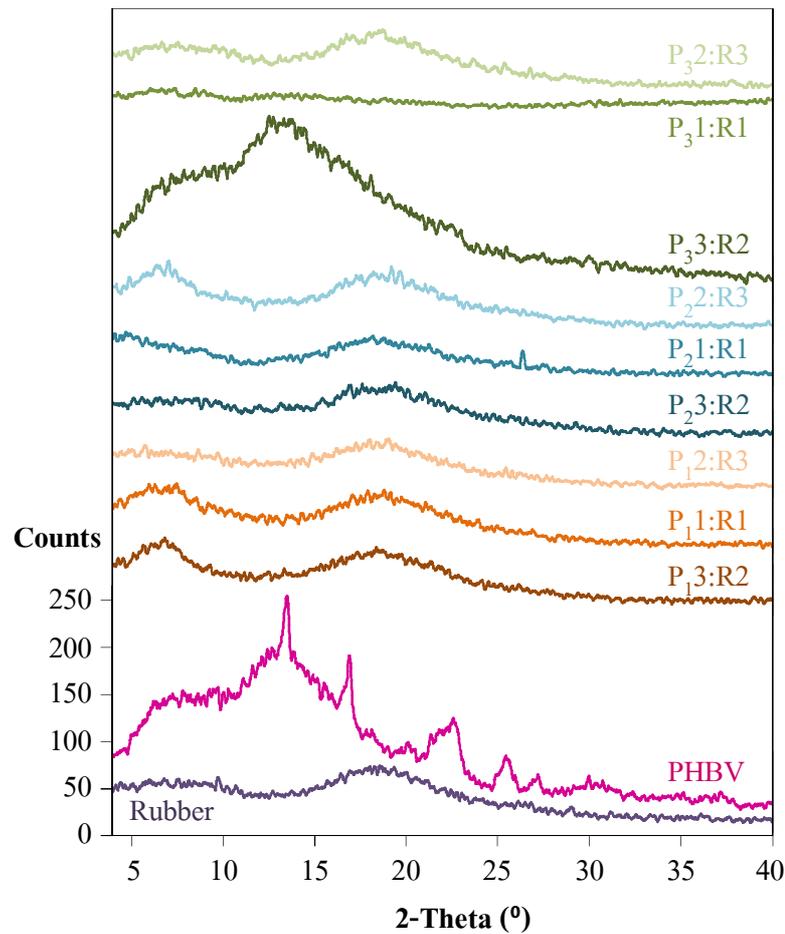
ภาพที่ 4.7 การยวบตัวสูงสุด (load at break) ของตัวอย่างเมื่คบิทกันกระแทกชีวภาพที่เกิดจากการรับแรงกดขนาด 1000 นิวตัน

4.2.6 การวิเคราะห์ขั้นการเป็นผลึก (Degree of crystallization)

ผลการวิเคราะห์ XRD ของ PHAs ยางธรรมชาติและตัวอย่างผสม ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ แสดงดังภาพที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ากราฟ XRD ของ PHAs บริสุทธิ์ จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนทำให้ทราบว่า PHAs เป็นพอลิเมอร์ชนิด PHBV เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟ XRD ของยางธรรมชาติ พบความแตกต่างอย่างชัดเจน (ภาพที่ 4.8) โดยเอกลักษณ์ความเป็นผลึกของ PHBV ที่มุม 2θ คือ 13.30 และ 16.68 องศา (Gonçalves, 2013) เนื่องจากสารทั้งสองมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน โดย PHBV เป็นสารที่มีความเป็นผลึกสูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ การตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ของ PHBV พบยอดกราฟอย่างชัดเจน เมื่อตรวจสอบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ X'Pert Plus, version 10.1 พบยอดกราฟที่ตำแหน่งมุม 13.26, 16.82, 25.34 และ 26.79 องศา การตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของยางธรรมชาติ พบว่ายอดกราฟมีลักษณะกว้างมาก หรือเรียกว่าลักษณะ broad peak เนื่องจากยางธรรมชาติไม่มีคุณสมบัติความเป็นผลึก หรือเรียกอีกอย่างว่าเป็นวัสดุอสัณฐาน กราฟที่ได้จากวัสดุทั้งสองจึงแตกต่างกันอย่างชัดเจน ฉะนั้นลักษณะรูปแบบของดิฟแฟรคโทแกรมที่เปลี่ยนแปลงไปจึงสามารถแสดงถึงส่วนประกอบของตัวอย่างได้ สำหรับตัวอย่างผสม ลักษณะของกราฟมีแนวโน้มไปในด้านส่วนผสมของยางธรรมชาติเป็นอย่างมากจนแทบไม่ปรากฏลักษณะของกราฟที่เป็นส่วนผสมของ PHBV เมื่อนำกราฟของตัวอย่าง PHBV บริสุทธิ์หลังผ่านการสลายตัวทางชีวภาพมาตรวจสอบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ X'Pert Plus, version 10.1 พบยอดกราฟที่ตำแหน่งมุม 13.53, 16.94, 22.70, 25.51 27.07 และ 37.16 0 (ภาพที่ 4.9) การเปลี่ยนแปลงของยอดกราฟหลังการสลายตัวทางชีวภาพพบว่ายังปรากฏยอดกราฟที่เป็นเอกลักษณ์ผลึกของ PHBV แสดงให้เห็นว่าการสลายตัวทางชีวภาพไม่ได้เกิดขึ้นบริเวณยอดกราฟที่เป็นเอกลักษณ์ของ PHBV ตัวอย่างเนื่องจากการสลายตัวทางชีวภาพของ PHBV จะเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นอสัณฐาน จึงทำให้ยอดกราฟของ PHBV ปรากฏเพิ่มขึ้นหลังการสลายตัวทางชีวภาพ (Boyandin et al, 2012) ยางธรรมชาติหลังผ่านการสลายตัวทางชีวภาพปรากฏยอดกราฟที่มีลักษณะกว้าง 2 ยอดกราฟเป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงหลังการสลายตัวทางชีวภาพสำหรับตัวอย่างผสมลักษณะของกราฟหลังการสลายตัวทางชีวภาพยังมีลักษณะที่เป็นยอดกราฟกว้างสองยอด คล้ายมีแต่ส่วนผสมของยางธรรมชาติจึงไม่ปรากฏลักษณะของกราฟที่เป็นส่วนผสมของ PHBV



ภาพที่ 4.8 ดิฟแฟรคโทแกรมของรังสีเอกซ์ของ PHBV และยางธรรมชาติก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ ($P_1 = 1\%$ PHBV, $P_2 = 1\%$ PHBV สัดส่วน 40%, R3 = Natural rubber 60%)

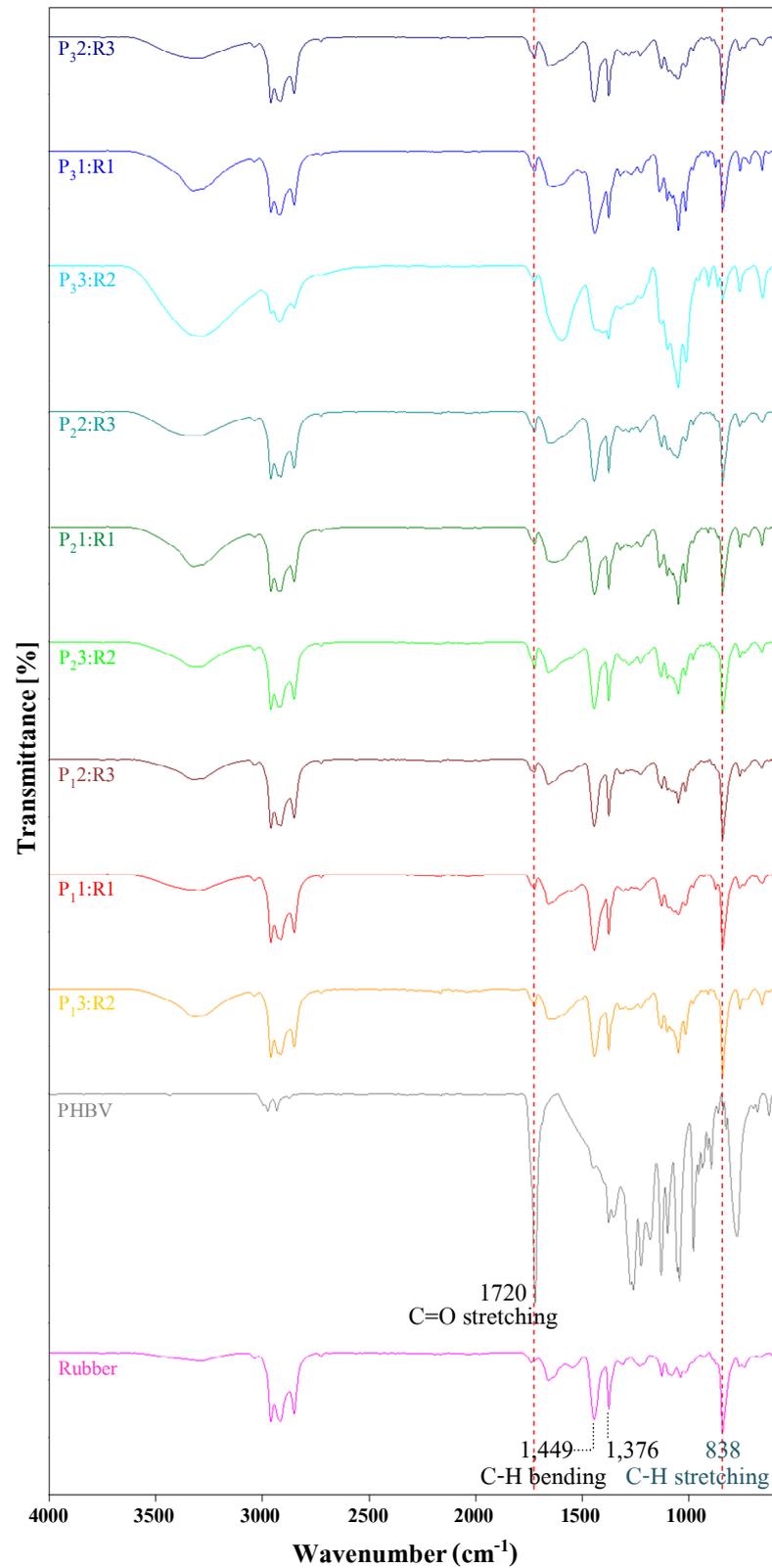


ภาพที่ 4.9 ดิฟแฟร็กโทแกรมของรังสีเอกซ์ของ PHBV และยางธรรมชาติหลังการสลายตัวทางชีวภาพ ($P_1 = 1\%$ PHBV, $P_2 = 1\%$ PHBV สัดส่วน 40%, R3 = Natural rubber 60%)

4.2.7 การตรวจสอบหมู่ทำหน้าที่

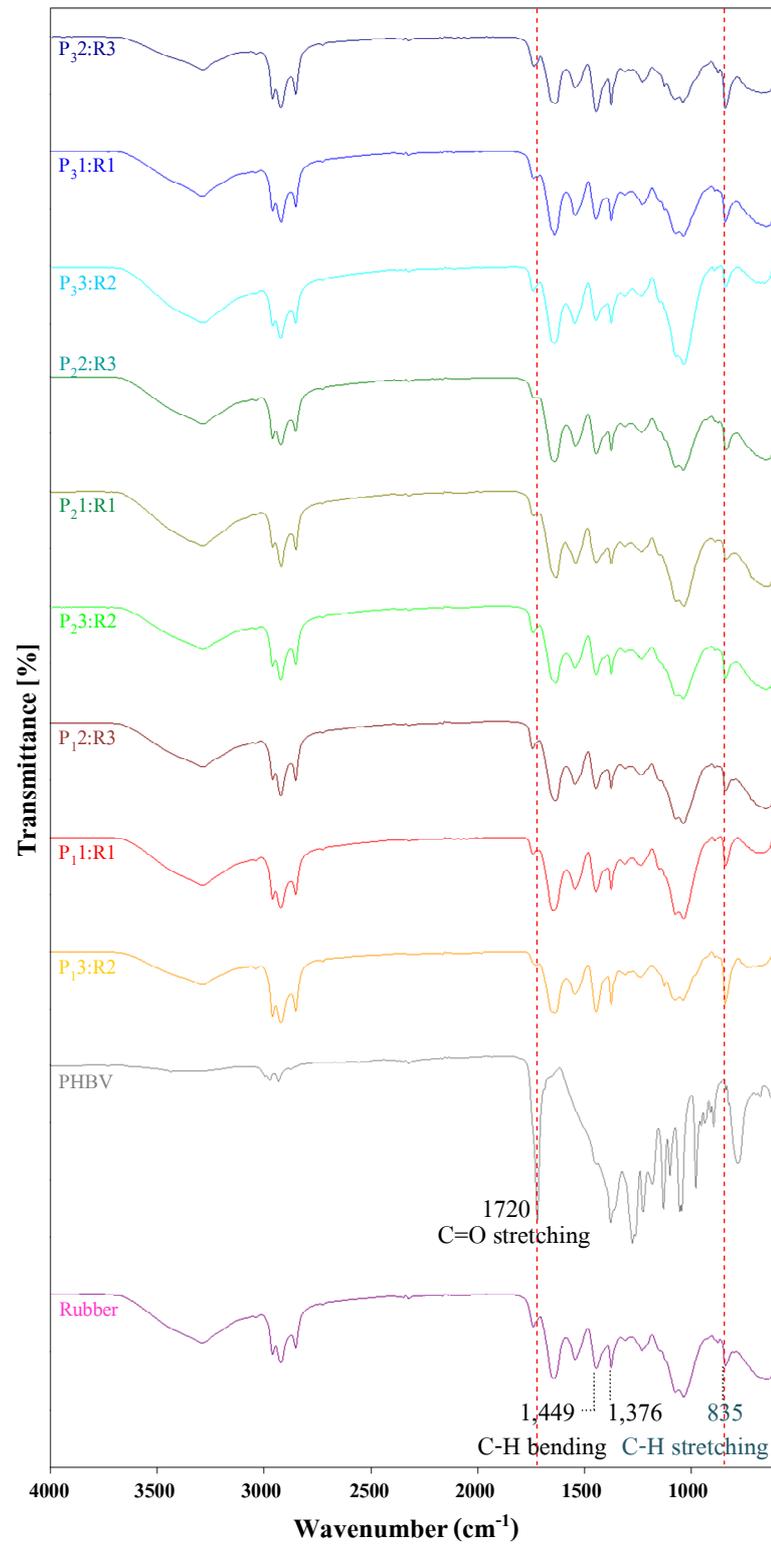
การตรวจสอบหมู่ทำหน้าที่ของสารก่อนและหลังการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างจากการผสมระหว่างสารละลาย PHAs และน้ำยางธรรมชาติด้วยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดโดยเครื่อง FTIR จากผลการศึกษาพบว่าตัวอย่าง PHAs ชนิด PHBV ก่อนการศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพ (ภาพที่ 4.10) มีเอกลักษณ์ของสารที่เลขคลื่น $1,720$ เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงการสั่นของ C=O ในหมู่ทำหน้าที่คาร์บอนิล (C=O stretching) ซึ่งเป็นบริเวณผลึกของ PHBV (Unger, et. al. 2009) สำหรับยางธรรมชาติปรากฏ 7 ยอดกราฟที่สำคัญ ได้แก่ $2,962$, $2,928$, $2,855$, $1,664$, $1,450$, $1,378$ และ 838 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะเฉพาะโครงสร้างมอลโมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยเฉพาะที่เลขคลื่น 838 ซึ่งเป็นบริเวณเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติที่โครงสร้างของยางแบบ cis-1,4-polyisoprene สำหรับตัวอย่างผสมระหว่าง PHAs และยางธรรมชาติ แต่ละสัดส่วนแสดงเอกลักษณ์

ของ PHAs ชนิด PHBV ที่เลขคลื่นช่วง 1,723-1,725 เซนติเมตร⁻¹ พบว่า PHBV มีความเป็นผลึกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง PHBV บริสุทธิ์ (ที่เลขคลื่น 1,720 เซนติเมตร⁻¹) โดยสังเกตได้จากความสูงของยอดกราฟที่แตกต่างกันของแต่ละตัวอย่าง ปรากฏการณ์นี้อาจบ่งบอกได้ว่าการตกผลึกของ PHBV ลดลง ซึ่งขั้นตอนการเกิดผลึก PHBV เกี่ยวข้องกับยางธรรมชาติ (Weng, 2010) สอดคล้องกับการปรากฏยอดกราฟที่บริเวณเลขคลื่น 3,325-3,289 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นบริเวณ O-H stretching ของหมู่ทำหน้าที่ไฮดรอกซิล มีความเป็นไปได้ว่ายางธรรมชาติเข้าไปทำปฏิกิริยากับ PHBV จึงทำให้ปรากฏโอลิโกเมอร์ (oligomer) ของหมู่ทำหน้าที่ไฮดรอกซิล และความเป็นผลึกของ PHBV ที่ลดลงสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของ T_m ที่วิเคราะห์ได้จากเทอร์โมแกรม DSC นอกจากนี้หลังการศึกษากการสลายตัวทางชีวภาพ (ภาพที่ 4.11) พบว่ายอดกราฟที่ 1,376-1,449 เซนติเมตร⁻¹ (C-H bending) และ 838 เซนติเมตร⁻¹ (C-H stretching ของพันธะ C=C ใน cis-1,4-polyisoprene) ซึ่งเป็นยอดกราฟของยางธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลง คือ ความสูงของยอดกราฟลดลง (Nakason et al, 2004) การที่ความสูงของ 838 ลดลงแปลว่า polyisoprene ลดจำนวนลง สอดคล้องกับการปรากฏโอลิโกเมอร์ของหมู่ทำหน้าที่ไฮดรอกซิลที่ 3,291 เซนติเมตร⁻¹ (O-H stretching ของหมู่ทำหน้าที่ไฮดรอกซิล) จึงมีความเป็นไปได้ว่าการสลายตัวทางชีวภาพของ polyisoprene ทำให้เกิดไฮดรอกซิล ซึ่งการเกิดหมู่ไฮดรอกซิลหลังการสลายตัวอาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันและความสูงยอดกราฟผลึกของ PHBV บริสุทธิ์หลังการสลายตัวทางชีวภาพก็ลดลงเช่นกัน โดย Chen and Wu (2005) ได้อธิบายไว้ว่าพอลิเมอร์ร่วม (copolymer) สามารถเกิดกระบวนการสลายตัวทางชีวภาพได้หลายกระบวนการซึ่งขั้นตอนส่วนใหญ่เกิดการสูญเสียน้ำหนักโมเลกุลเกิดขึ้นก่อนที่จะสูญเสียมวลเป็นจำนวนมาก



ภาพที่ 4.10 สเปกตรัมอินฟราเรดของ PHBV และยางธรรมชาติก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ

(P₁ = 1% PHBV, P₁:2 = 1% PHBV สัดส่วน 40%, R3 = Natural rubber 60%)

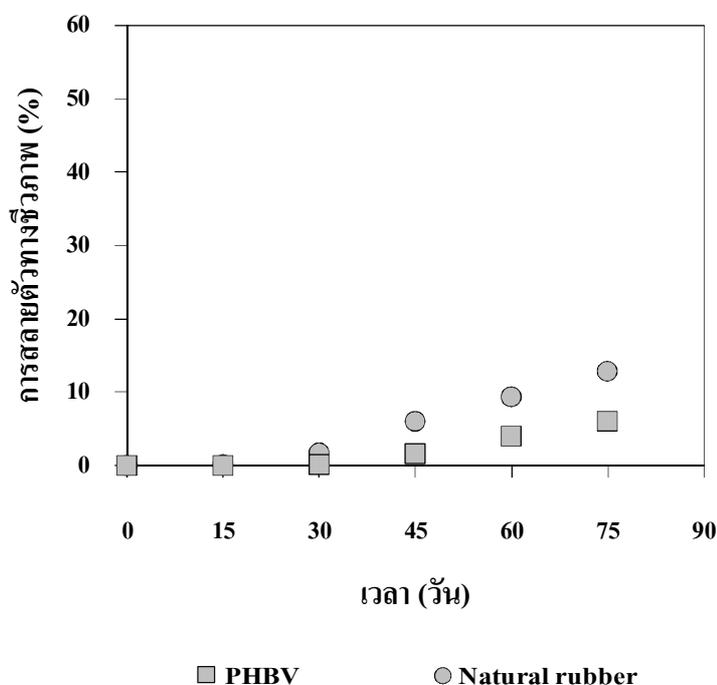


ภาพที่ 4.11 สเปกตรัมอินฟราเรดของ PHBV และยางธรรมชาติหลังการสลายตัวทางชีวภาพ
(P₁ = 1% PHBV, P₂ = 1% PHBV สัดส่วน 40%, R3 = Natural rubber 60%)

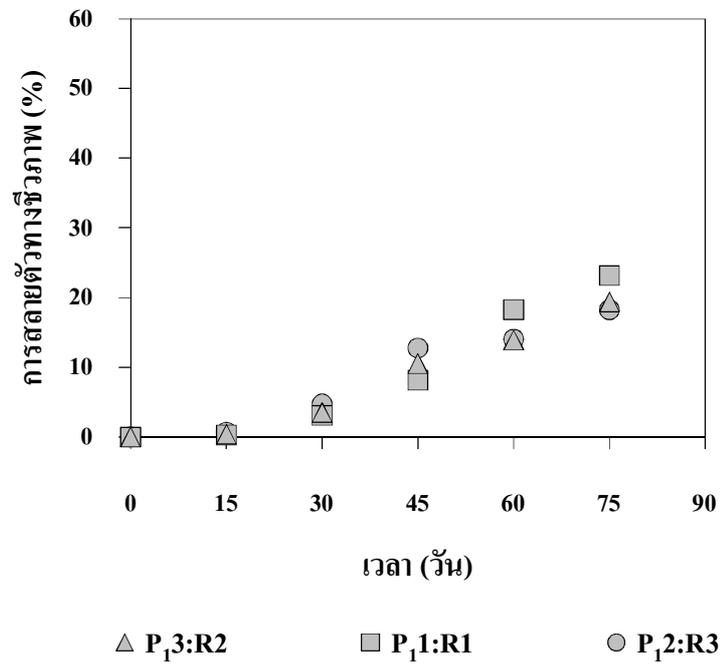
4.3 การศึกษาการสลายตัวของชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทก

4.3.1 การสลายตัวของชีวภาพในดินของเม็ดบีทกันกระแทก

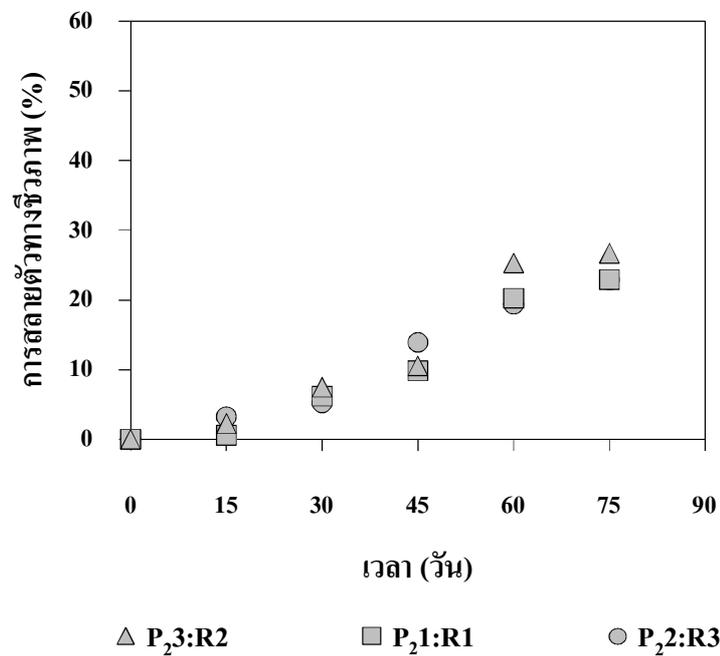
จากการศึกษาการสลายตัวของชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทกในดิน ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบได้บันทึกอุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างของดิน โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของดินในระยะเวลา 75 วัน อยู่ที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส และมีค่ากรด-ด่างประมาณ 8 และมีความชื้นดินเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 12 ทั้ง PHAs และยางธรรมชาติหลังผ่านการทดสอบการสลายตัวของชีวภาพเป็นเวลา 75 วัน พบว่ามีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพเท่ากับ 6.01 และ 12.86 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.12) สำหรับตัวอย่างผสมระหว่าง PHAs ทั้ง 3 ความเข้มข้นกับน้ำยางธรรมชาติ (ภาพที่ 4.13-4.15) มีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพอยู่ในช่วง 18-26 ตัวอย่าง 1% PHAs สัดส่วน P₁:R₂ มีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพต่ำที่สุดอยู่ที่ 18.22 ตัวอย่าง 2% PHAs สัดส่วน P₂:R₃ มีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพสูงที่สุดอยู่ที่ 26.65 จากกราฟการสลายตัวของชีวภาพพบว่าร้อยละการสลายตัวของชีวภาพเริ่มปรากฏชัดเมื่อเวลาผ่านไป 15 วัน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากจุลินทรีย์ในดิน โดยจุลินทรีย์มาพบตัวอย่างซึ่งแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จากนั้นจุลินทรีย์จึงเริ่มยึดเกาะตัวอย่างและเริ่มย่อยสลาย โดยการใช้แหล่งคาร์บอนจากตัวอย่าง หลังวันที่ 15 ปฏิกริยาการสลายตัวของชีวภาพได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



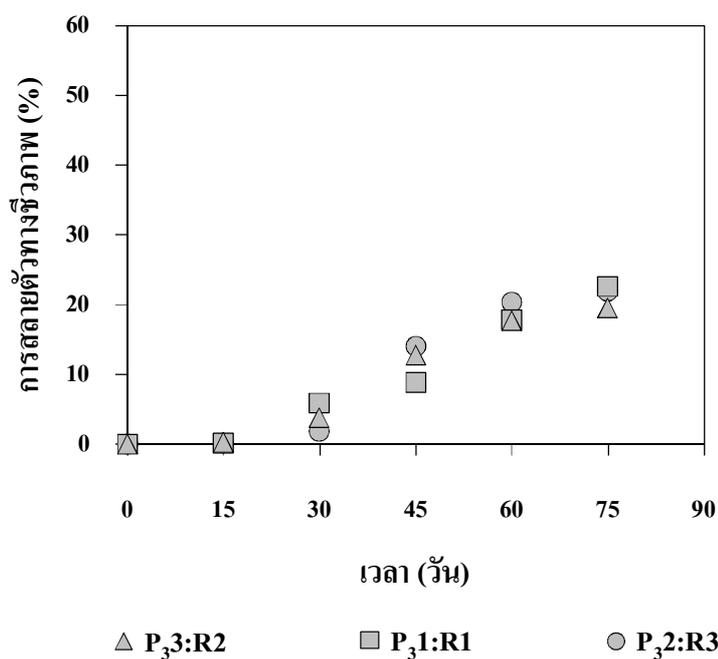
ภาพที่ 4.12 การสลายตัวของชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพในดิน



ภาพที่ 4.13 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 1% PHAs ในดิน



ภาพที่ 4.14 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 2% PHAs ในดิน

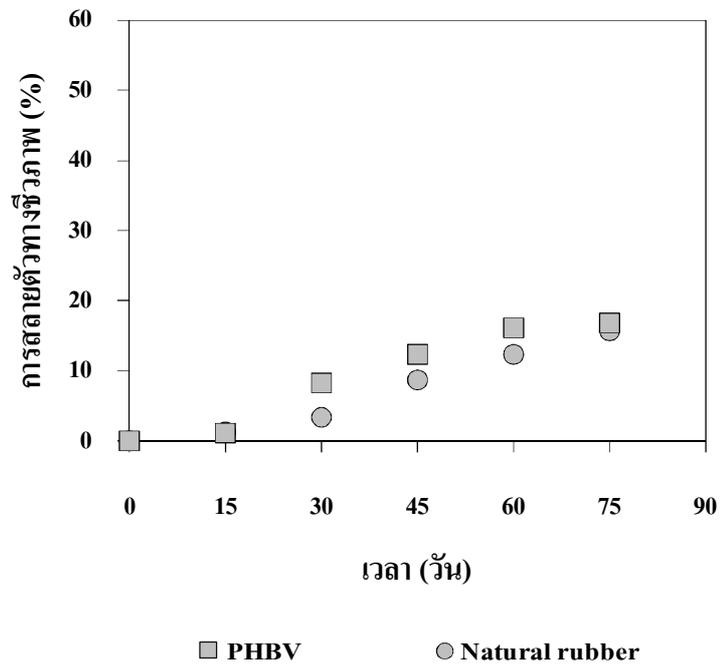


ภาพที่ 4.15 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 3% PHAs ในดิน

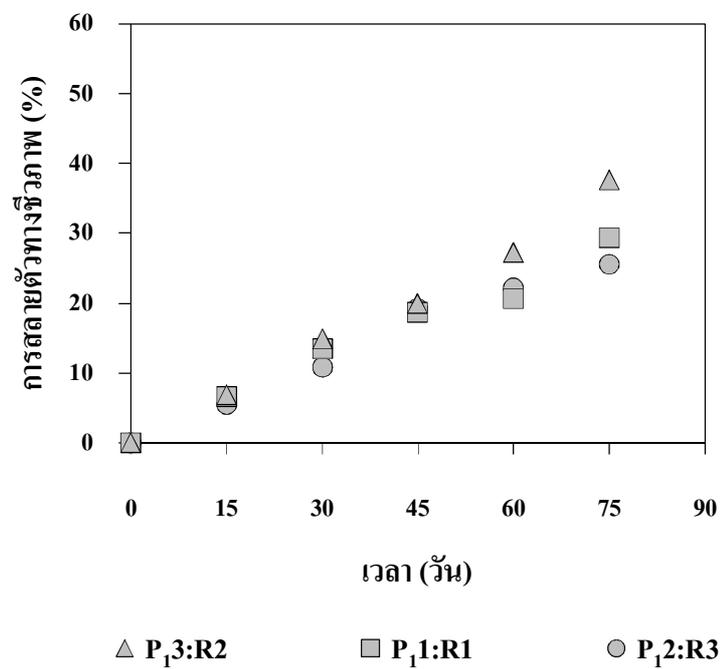
ตารางที่ 4.6 ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทกในดิน

PHAs Concentration (% w/v)	Ratios (v:v) PHAs:Rubber	ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพ ของเม็ดบีทกันกระแทกในดินเมื่อเวลาผ่านไป				
		15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	75 วัน
1	P ₁ 3:R ₂	0.66	4.84	12.77	14.04	18.22
	P ₁ 1:R ₁	0.26	3.13	8.13	18.29	23.23
	P ₁ 2:R ₃	0.46	3.49	10.54	13.90	19.40
2	P ₂ 3:R ₂	3.26	5.22	13.91	19.40	22.85
	P ₂ 1:R ₁	0.55	6.14	9.88	20.20	22.95
	P ₂ 2:R ₃	2.23	7.49	10.61	25.35	26.65
3	P ₃ 3:R ₂	0.12	1.83	14.09	20.35	21.88
	P ₃ 1:R ₁	0.18	5.88	8.86	17.91	22.59
	P ₃ 2:R ₃	0.26	3.80	12.80	17.69	19.46
Control	PHAs	0.00	0.19	1.62	3.95	6.01
Control	Rubber	0.19	1.76	5.95	9.35	12.86

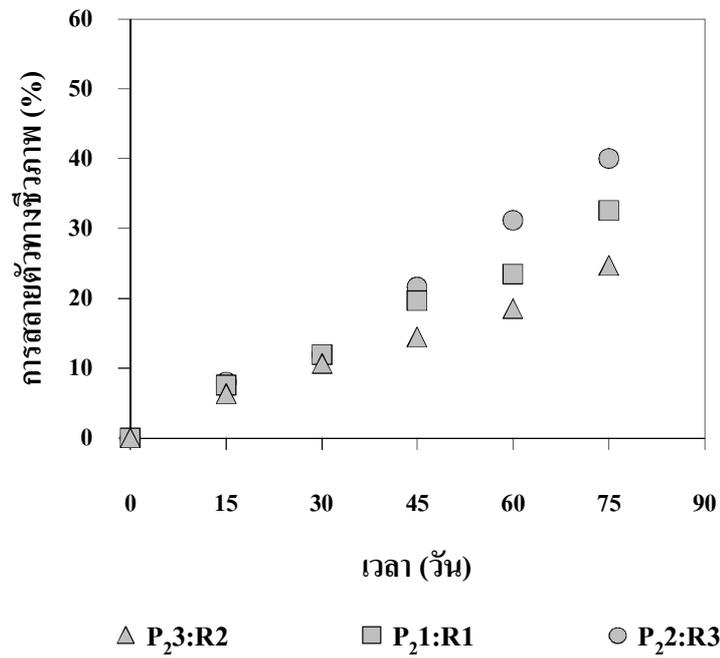
การศึกษาการสลายตัวของชีวภาพของเม็ดบีดักกันกระแทกในดินได้ศึกษาร่วมกับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกชีวภาพ โดยหลังจากผ่านการทดสอบการสลายตัวของชีวภาพเป็นเวลา 75 วัน พบว่าแผ่นพลาสติกชีวภาพ PHAs และยางธรรมชาติมีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพเท่ากับ 16.77 และ 15.72 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.16) ซึ่งตัวอย่างแผ่นพลาสติกชีวภาพมีการสลายตัวของชีวภาพมากกว่าตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพกันกระแทกมีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพเท่ากับ 6.01 และ 12.86 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.12) จากการทดลองนี้บ่งบอกว่าลักษณะรูปร่างของ PHAs ที่แตกต่างกันระหว่างตัวอย่างที่มีลักษณะแผ่นและเป็นเม็ดมีผลต่อการสลายตัวของชีวภาพ ผลการศึกษาการสลายตัวของชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพแสดงดังภาพที่ 4.17-4.19 โดยแผ่นพลาสติกชีวภาพที่ประกอบด้วย 2% PHAs สัดส่วน $P_2:R_3$ มีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพต่ำที่สุดเป็น 24.68 ส่วนแผ่นพลาสติกชีวภาพที่ประกอบด้วย 3% PHAs สัดส่วน $P_1:R_1$ มีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพสูงที่สุด คือ 52.13 ขณะที่เม็ดพลาสติกชีวภาพมีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพสูงที่สุดอยู่ที่ 26.65 เมื่อเปรียบเทียบการสลายตัวของชีวภาพของตัวอย่างทั้ง 2 ลักษณะพบว่าตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นมีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพสูงกว่าตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเม็ดถึง 2 เท่า การสลายตัวของชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพเริ่มแสดงการสลายตัวของชีวภาพเกือบร้อยละ 10 เมื่อเวลาผ่านไป 15 วัน ในตัวอย่างทั้งสามความเข้มข้นและทั้ง 3 สัดส่วน ทั้งนี้เกิดจากผิวสัมผัสของตัวอย่างที่สัมผัสกับดินได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งบรรจุในถุงตาข่ายที่มีพื้นผิวของเม็ดบีดักกันกระแทกอยู่ติดกับบริเวณถุงตาข่ายเพียงบางส่วนที่สัมผัสกับดินเท่านั้น เมื่อเม็ดสัมผัสกับดินได้มาก โอกาสที่จุลินทรีย์ในดินที่จะใช้เป็นแหล่งคาร์บอนก็มีมาก การสลายตัวของชีวภาพจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว



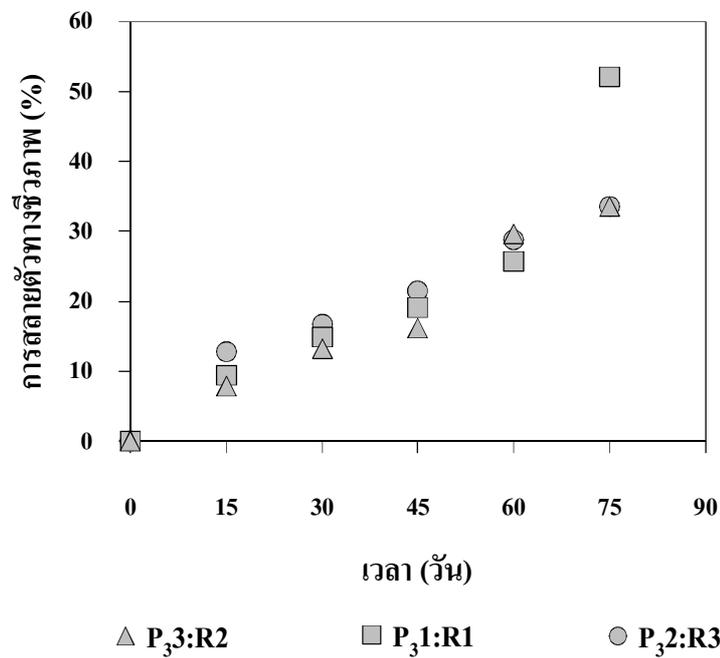
ภาพที่ 4.16 การสลายตัวของชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพในดิน



ภาพที่ 4.17 การสลายตัวของชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 1% PHAs ในดิน



ภาพที่ 4.18 การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 2% PHAs ในดิน



ภาพที่ 4.19 การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 3% PHAs ในดิน

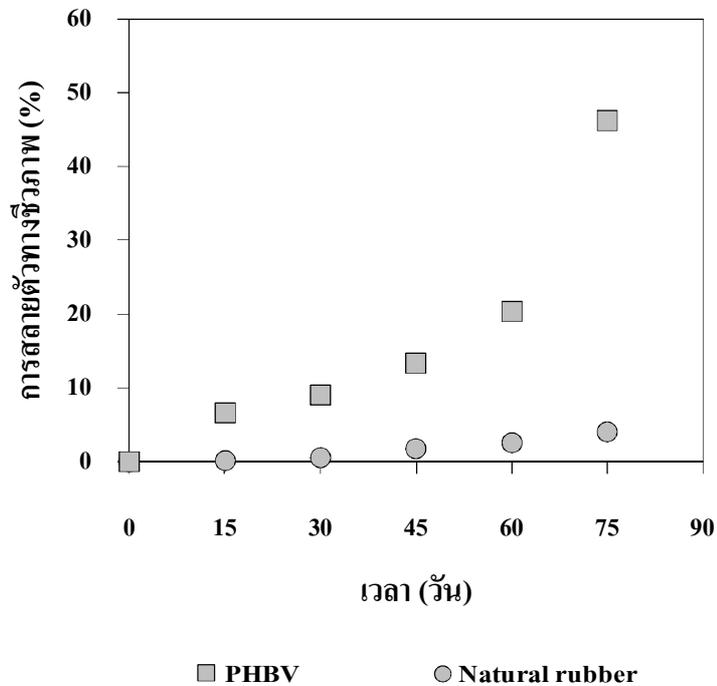
ตารางที่ 4.7 ร้อยละการสลายตัวของชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพในดิน

PHAs Concentration (% w/v)	Ratios (v:v) PHAs:Rubber	ร้อยละการสลายตัวของชีวภาพ ของแผ่นพลาสติกชีวภาพในดินเมื่อเวลาผ่านไป				
		15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	75 วัน
1	P ₃ :R ₂	5.48	10.80	19.23	22.15	25.57
	P ₁ :R ₁	6.69	13.49	18.69	20.63	29.34
	P ₁ :R ₃	6.87	14.83	19.99	27.18	37.64
2	P ₂ :R ₂	8.00	12.02	21.59	31.24	40.05
	P ₂ :R ₁	7.62	11.97	19.65	23.45	32.52
	P ₂ :R ₃	6.29	10.74	14.47	18.60	24.68
3	P ₃ :R ₂	12.74	16.70	21.49	28.75	33.51
	P ₃ :R ₁	9.39	14.90	19.13	25.76	52.13
	P ₃ :R ₃	7.89	13.15	16.16	29.68	33.58
Control	PHAs	1.16	8.30	12.30	16.07	16.77
Control	Rubber	1.32	3.38	8.73	12.30	15.72

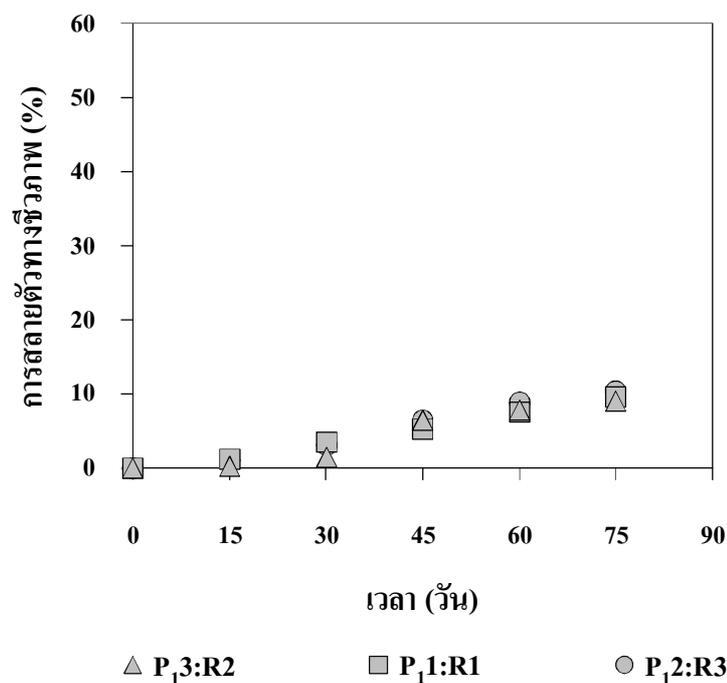
4.3.2 การสลายตัวของชีวภาพในน้ำของกันกระแทก

จากการศึกษาการสลายตัวของชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทกในน้ำ ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบได้บันทึกอุณหภูมิและค่ากรด-ด่างของน้ำ โดยพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในระยะเวลา 75 วัน อยู่ที่ 36 องศาเซลเซียส และมีค่ากรด-ด่างเฉลี่ยประมาณ 9 ทั้ง PHAs และยางธรรมชาติหลังผ่านการทดสอบการสลายตัวของชีวภาพเป็นเวลา 75 วัน พบว่ามีการสลายตัวของชีวภาพร้อยละ 46.24 และ 4.05 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.20) สำหรับตัวอย่างผสมระหว่างสารละลาย PHAs ทั้ง 3 ความเข้มข้นกับน้ำยางธรรมชาติ (ภาพที่ 4.21-4.23) มีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 8-13 ตัวอย่าง 2% PHAs สัดส่วน P₂:R₃ มีร้อยละการสลายตัวของชีวภาพต่ำที่สุดอยู่ที่ 8.37 ตัวอย่าง 3% PHAs สัดส่วน P₃:R₂ มีการสลายตัวของชีวภาพสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 13.13 การสลายตัวของชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำของตัวอย่างผสมทั้ง 3 ความเข้มข้นและทั้ง 3 สัดส่วน มีการสลายตัวของชีวภาพที่ชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน แตกต่างจาก PHAs บริสุทธิ์ที่แสดงร้อยละการสลายตัวของชีวภาพอย่างชัดเจนตั้งแต่การสลายตัวของชีวภาพผ่านไป 15 วัน การเริ่มต้นการสลายตัวของ

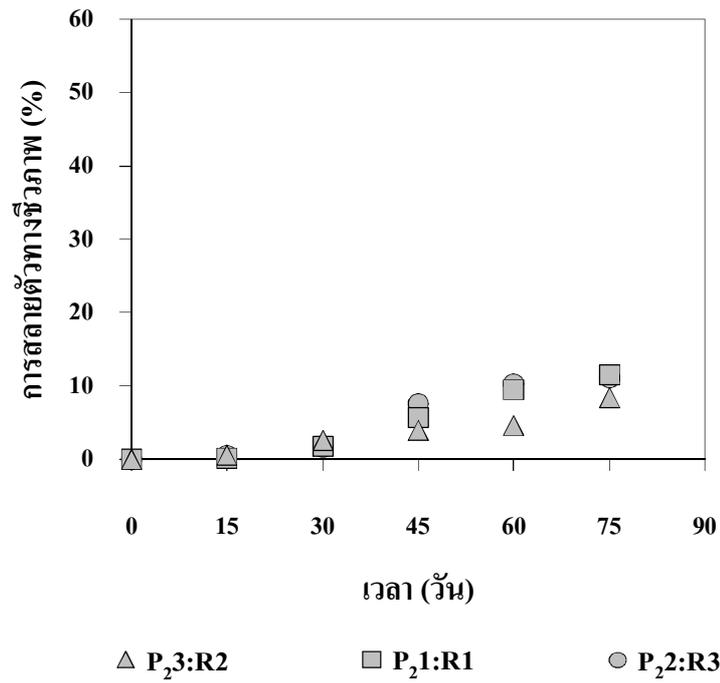
ชีวภาพแตกต่างกัน ความเร็วในการสลายตัวของชีวภาพจึงแตกต่างกัน สำหรับ PHAs บริสุทธิ์ ง่ายต่อการสลายตัวของชีวภาพ เนื่องจากเป็นแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์



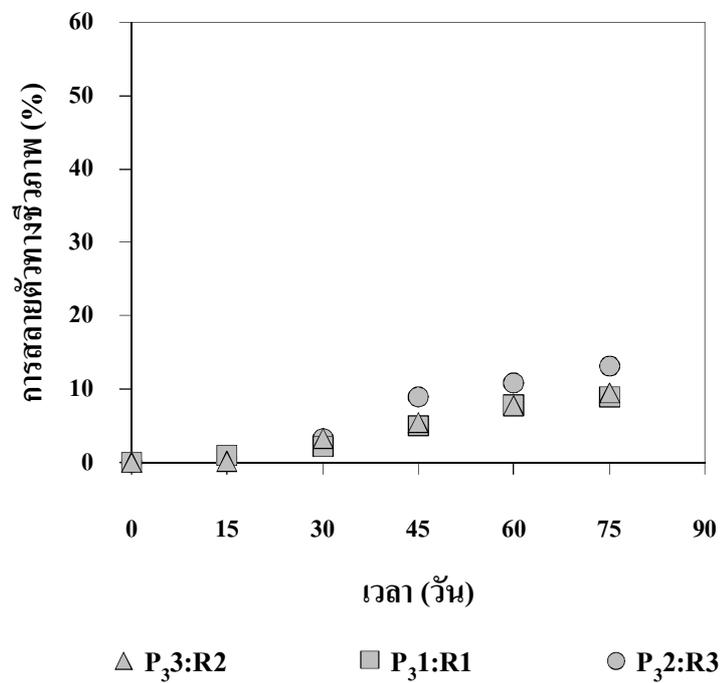
ภาพที่ 4.20 การสลายตัวของชีวภาพของตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำ



ภาพที่ 4.21 การสลายตัวของชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 1% PHAs ในน้ำ



ภาพที่ 4.22 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 2% PHAs ในน้ำ



ภาพที่ 4.23 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 3% PHAs ในน้ำ

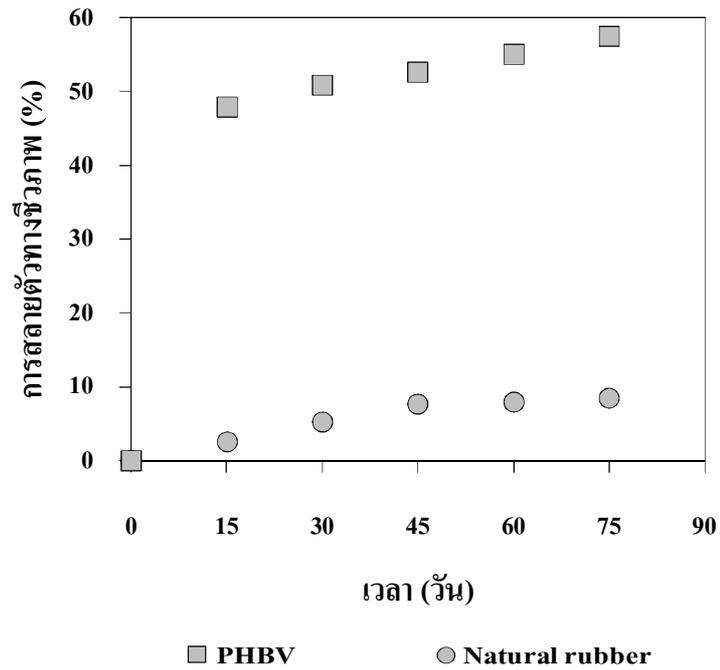
ตารางที่ 4.8 ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทกในน้ำ

PHAs Concentration (% w/v)	Ratios (v:v) PHAs:Rubber	ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพ ของเม็ดบีทกันกระแทกในน้ำเมื่อเวลาผ่านไป				
		15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	75 วัน
1	P ₁ 3:R2	1.05	3.03	6.50	8.94	10.40
	P ₁ 1:R1	1.21	3.44	5.30	7.53	9.54
	P ₁ 2:R3	0.25	1.50	6.49	7.87	9.09
2	P ₂ 3:R2	0.52	1.65	7.56	10.33	11.10
	P ₂ 1:R1	0.06	1.75	5.68	9.45	11.42
	P ₂ 2:R3	0.56	2.49	3.86	4.53	8.37
3	P ₃ 3:R2	0.59	3.20	8.89	10.83	13.13
	P ₃ 1:R1	0.99	2.09	5.01	7.89	8.94
	P ₃ 2:R3	0.10	3.25	5.40	7.73	9.52
Control	PHAs	6.54	9.03	13.27	20.26	46.24
Control	Rubber	0.14	0.53	1.70	2.48	4.05

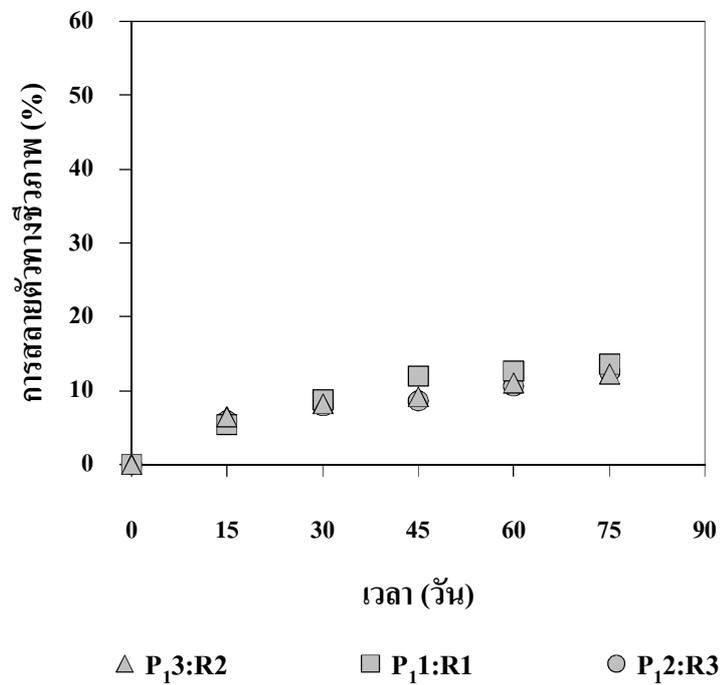
จากการศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างแผ่นพลาสติกชีวภาพในน้ำ ทั้ง PHAs และยางธรรมชาติหลังการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพเป็นเวลา 75 วัน พบว่ามีร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพเท่ากับ 57.51 และ 8.49 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.24) สำหรับตัวอย่างผสม (ภาพที่ 4.25-4.27) มีการสลายตัวทางชีวภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 10-16 ตัวอย่าง 2% PHAs สัดส่วน P₂2:R3 มีร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพต่ำที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 10.36 ตัวอย่าง 2% PHAs สัดส่วน P₂3:R2 มีร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 16.03 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำของตัวอย่างผสมมีร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพที่ชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 15 วัน โดยเฉพาะ PHAs บริสุทธิ์ที่มีการสลายตัวทางชีวภาพที่ร้อยละ 49 เมื่อเวลาผ่านไป 15 วัน จากนั้นการสลายตัวทางชีวภาพช้าลง

จากการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพทั้งในดินและในน้ำของพลาสติกชีวภาพที่มีลักษณะเป็นเม็ดและเป็นแผ่น พบว่าร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเม็ดและเป็นแผ่นมีความแตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่มีลักษณะแผ่นมีร้อยละการ

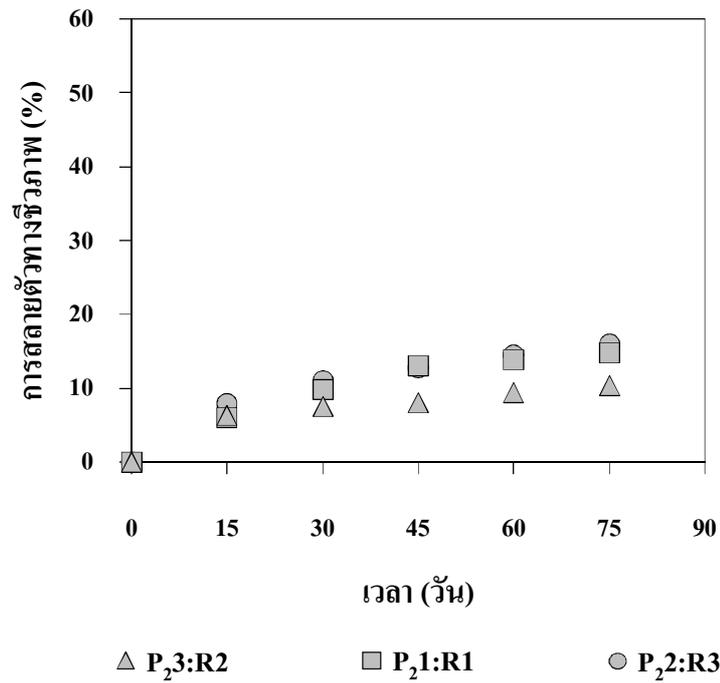
สลายตัวทางชีวภาพสูงกว่าตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเม็ด การสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพในดินมีร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างทั้งสองลักษณะมากกว่าการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพในน้ำ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากความสามารถในการยึดเกาะตัวอย่างของจุลินทรีย์ในดิน โดยจุลินทรีย์สามารถยึดเกาะตัวอย่างได้ง่ายกว่าจุลินทรีย์ในน้ำ เนื่องจากตัวอย่างในดินถูกฝังไว้อยู่กับที่ แตกต่างจากตัวอย่างที่ทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพในน้ำที่ตัวอย่างสามารถขยับหรือเคลื่อนไหวได้บ้าง ทำให้จุลินทรีย์ที่ยึดเกาะอาจหลุดออกไป ส่งผลให้มีการย่อยสลายตัวอย่างลดลง และมีผลต่อการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่าง ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างอีกประการหนึ่งคือความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิ โดยในดินมีปัจจัยทั้ง 2 เอื้อต่อการเจริญของจุลินทรีย์มากกว่าน้ำ โดยดินมีค่ากรด-ด่างเฉลี่ย 7.7 ซึ่งเป็นกลางมากกว่าค่ากรด-ด่างของน้ำที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 8.9 ซึ่งเป็นด่างมากกว่าดิน และน้ำมีอุณหภูมิเฉลี่ย 36 องศาเซลเซียส ในขณะที่ดินมีอุณหภูมิเฉลี่ย 30 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่เอื้อต่อการเจริญของจุลินทรีย์มีผลต่อการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่าง เพราะการเจริญของจุลินทรีย์อาศัยอาหารมีคาร์บอนเป็นแหล่งพลังงาน หากจุลินทรีย์มีปริมาณมากก็ต้องใช้แหล่งคาร์บอนปริมาณมาก การสลายตัวทางชีวภาพจึงเกิดขึ้นมากตาม การเริ่มต้นการสลายตัวทางชีวภาพที่ตัวแตกต่างกันมีแนวโน้มทำให้การสลายตัวทางชีวภาพแตกต่างกันด้วย หาก 15 วันแรกของการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพมีร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพสูงตัวอย่งนั้นจึงมีแนวโน้มการสลายตัวทางชีวภาพสูง และตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นมีการสลายตัวทางชีวภาพสูงกว่าตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเม็ด เนื่องจากลักษณะตัวอย่างเป็นแผ่นมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นดินและน้ำมากกว่าตัวอย่างแบบเม็ด จึงทำให้ตัวอย่างแบบแผ่นมีพื้นที่ที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ธรรมชาติมากกว่าตัวอย่างแบบเม็ด



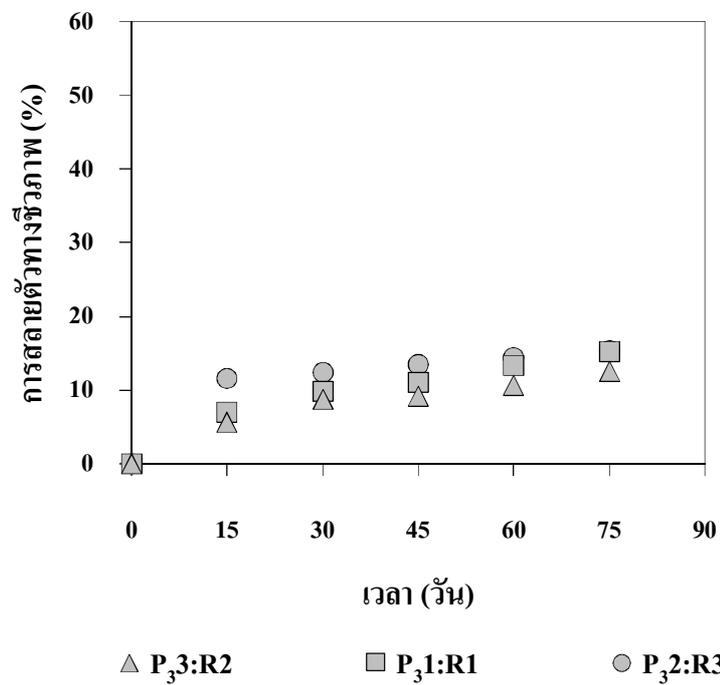
ภาพที่ 4.24 การสลายตัวของชีวภาพของตัวอย่างแผ่นพลาสติกชีวภาพในน้ำ



ภาพที่ 4.25 การสลายตัวของชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 1% PHAs ในน้ำ



ภาพที่ 4.26 การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 2% PHAs ในน้ำ

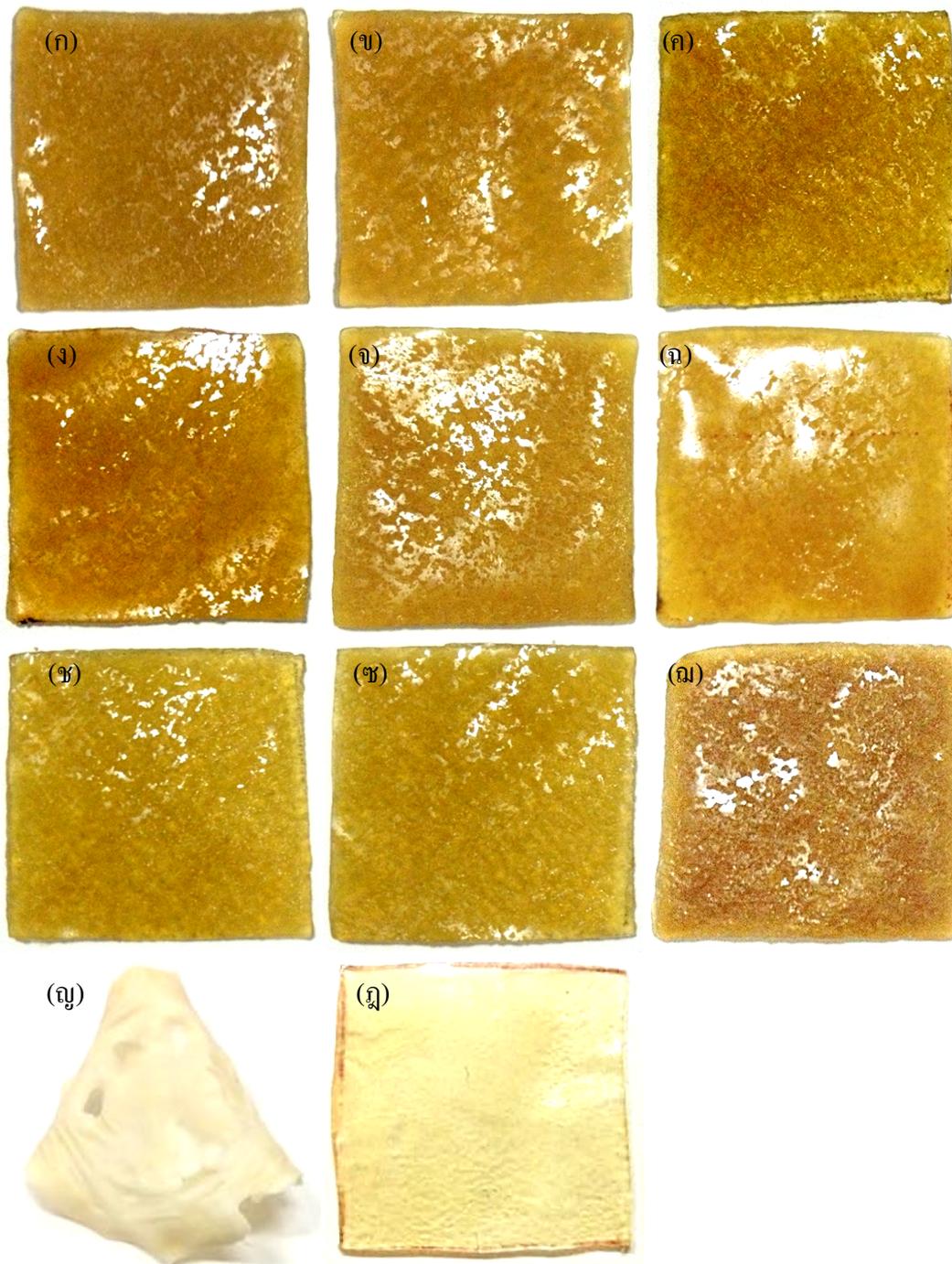


ภาพที่ 4.27 การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 3% PHAs ในน้ำ

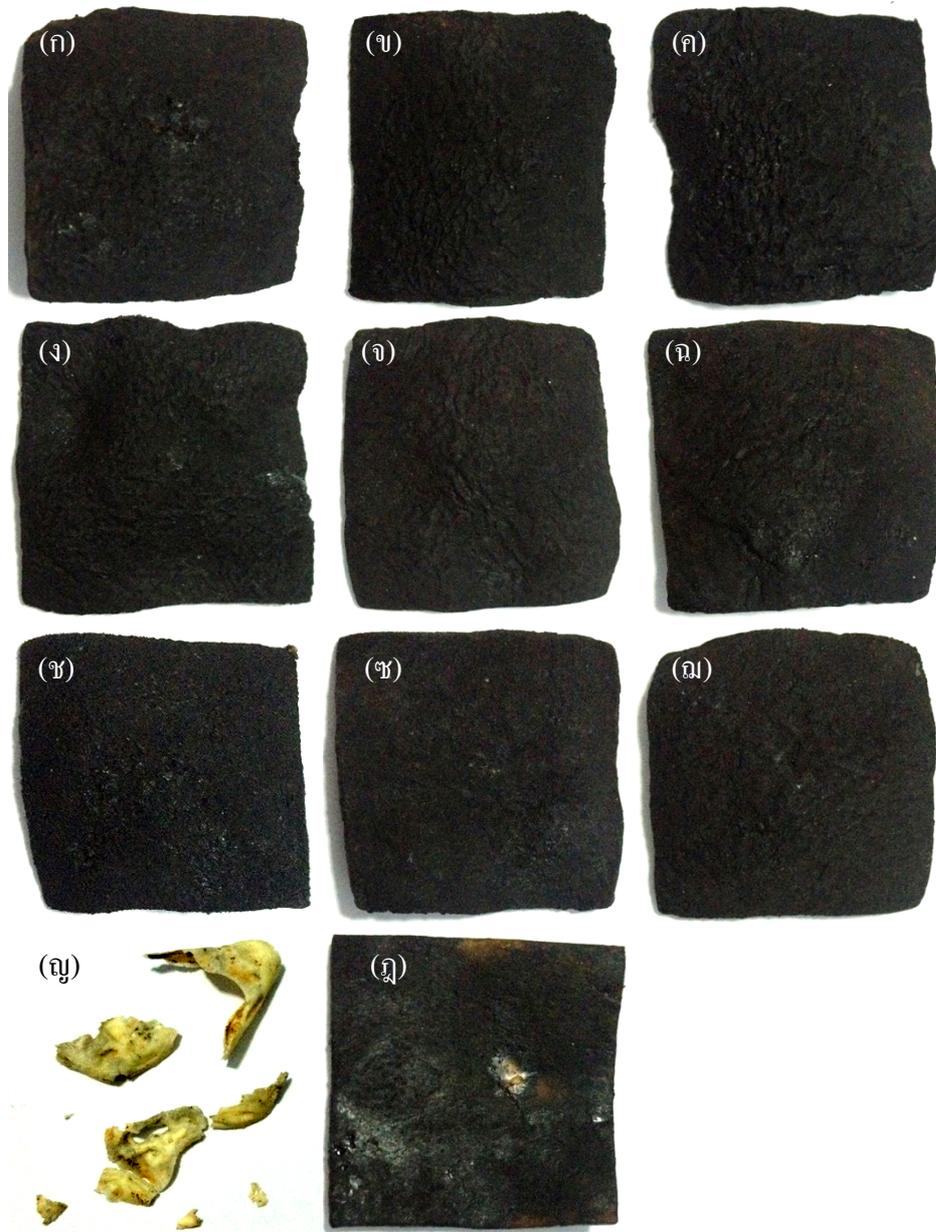
ตารางที่ 4.9 ร้อยละการสลายตัวของชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพในน้ำ

PHAs Concentration (% w/v)	Ratios (v:v) PHAs:Rubber	ร้อยละการสลายตัวของชีวภาพ ของแผ่นพลาสติกชีวภาพในน้ำเมื่อเวลาผ่านไป				
		15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	75 วัน
1	P ₁ 3:R2	5.84	7.83	8.62	10.63	12.51
	P ₁ 1:R1	5.36	8.71	11.90	12.63	13.59
	P ₁ 2:R3	6.38	8.15	9.07	10.98	12.15
2	P ₂ 3:R2	7.96	11.00	12.78	14.56	16.03
	P ₂ 1:R1	5.98	9.82	12.85	13.76	14.74
	P ₂ 2:R3	6.30	7.51	7.97	9.34	10.32
3	P ₃ 3:R2	11.56	12.37	13.50	14.35	15.31
	P ₃ 1:R1	6.94	9.82	11.01	13.29	15.23
	P ₃ 2:R3	5.66	8.71	9.15	10.64	12.48
Control	PHAs	48.21	54.14	54.73	57.05	61.26
Control	Rubber	2.47	5.20	7.58	7.80	8.46

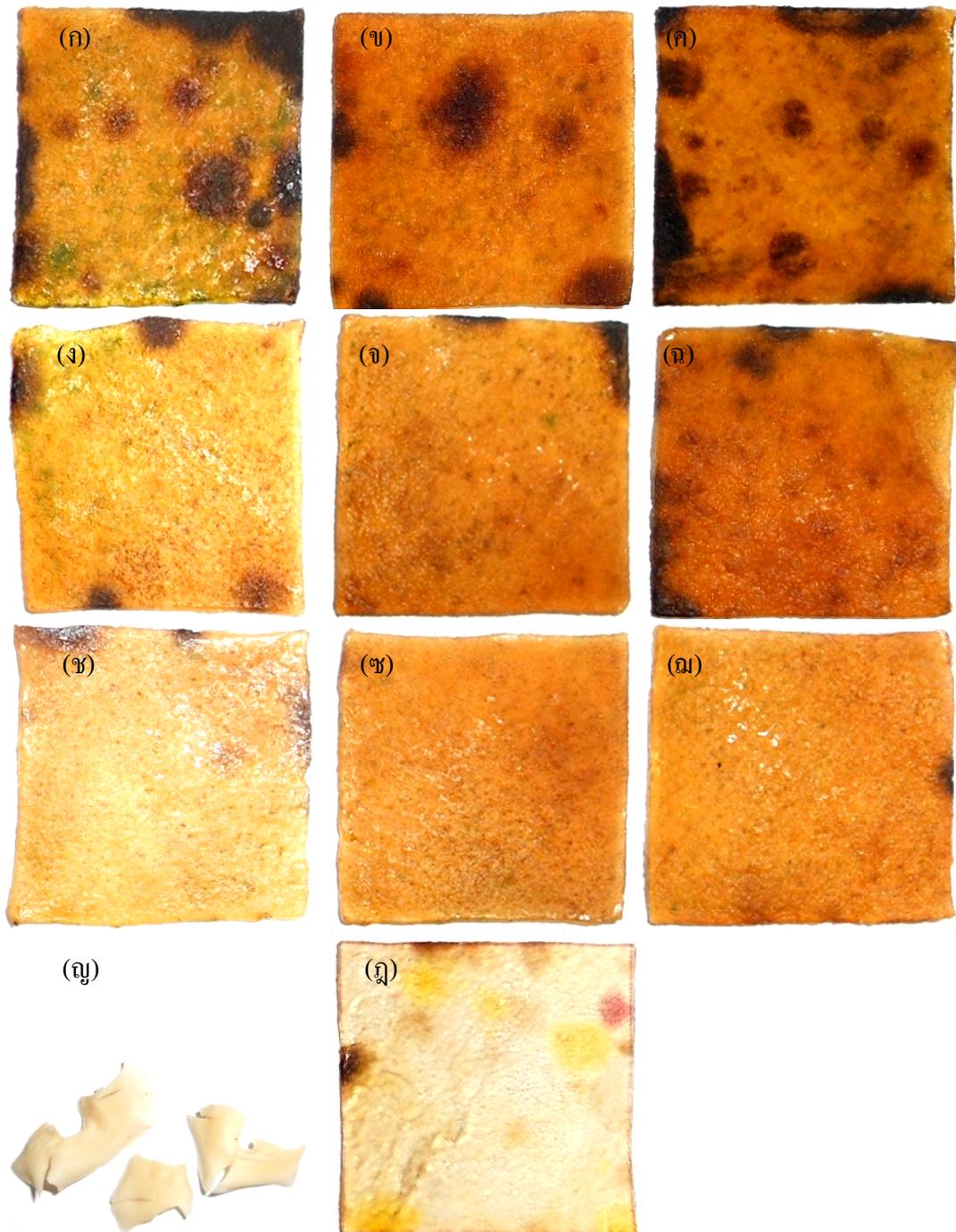
ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างก่อนการสลายตัวของชีวภาพ ตัวอย่างผสมมีสีเหลืองเข้มและมีลักษณะทึบแสงแตกต่างจากตัวอย่างยางธรรมชาติบริสุทธิ์ที่มีสีเหลืองอ่อนและโปร่งแสง (ภาพที่ 4.28) หลังผ่านการศึกษการสลายตัวของชีวภาพในดินเป็นระยะเวลา 45 วัน (ภาพที่ 4.29) ตัวอย่างผสมเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีดำทุกตัวอย่าง ส่วนแผ่น PHAs บริสุทธิ์แตกออกเป็นชิ้น ๆ สำหรับตัวอย่างหลังการสลายตัวของชีวภาพในน้ำเป็นเวลา 45 วัน (ภาพที่ 4.30) พบว่าพื้นผิวของแผ่นพลาสติกชีวภาพมีการเปลี่ยนแปลงของสีผิวโดยเปลี่ยนจากสีเหลืองของแผ่นยางธรรมชาติเป็นสีดำและบางตัวอย่างมีตะไคร่น้ำเกาะที่ผิว สำหรับยางธรรมชาติบริสุทธิ์ก่อนการสลายตัวของชีวภาพยางมีสีเหลืองใส หลังผ่านการทดสอบการสลายตัวของชีวภาพ พบว่ามีสีอื่นปรากฏบนผิวตัวอย่างซึ่งสอดคล้องกับ Boyandin และคณะ (2012) ที่ศึกษการสลายตัวของชีวภาพของ PHAs ในดิน พบสีเหลืองบนผิวของตัวอย่าง และจากการตรวจสอบการบ่งชี้ชนิดของจุลินทรีย์บนพื้นผิวของตัวอย่างพบแบคทีเรียในสกุล *Flavobacterium spp.* ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบคทีเรียในสกุลนี้พบได้ทั่วไปทั้งในดินและในน้ำ (Bernardet et al., 1996)



ภาพที่ 4.28 ลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพจากสารละลาย PHAs 3 ความเข้มข้น คือ 1% PHAs สกัดส่วน (ก) P₃:R2 (ข) P₁:R1 (ค) P₂:R3 2% PHAs สกัดส่วน (ง) P₂:R2 (จ) P₂:R1 (ฉ) P₂:R3 3% PHAs สกัดส่วน (ช) P₃:R2 (ซ) P₃:R1 (ญ) P₃:R3 รวมทั้งสารตัวอย่างบริสุทธิ์ (ฎ) PHAs และ (ฏ) ยางธรรมชาติ (R = Natural rubber, P = PHAs)



ภาพที่ 4.29 ลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์หลังการสลายตัวทางชีวภาพในดินเป็นระยะเวลา 45 วัน จากสารละลาย PHAs 3 ความเข้มข้น คือ 1% PHAs สัดส่วน (ก) P₁:R₂ (ข) P₁:R₁ (ค) P₁:R₃ 2% PHAs สัดส่วน (ง) P₂:R₂ (จ) P₂:R₁ (ฉ) P₂:R₃ 3% PHAs สัดส่วน (ช) P₃:R₂ (ซ) P₃:R₁ (ฅ) P₃:R₃ รวมทั้งสารตัวอย่างบริสุทธิ์ (ญ) PHAs และ (ฎ) ยางธรรมชาติ (R = Natural rubber, P = PHAs)



ภาพที่ 4.30 ลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์หลังการสลายตัวทางชีวภาพในน้ำเป็นระยะเวลา 45 วัน จากสารละลาย PHAs 3 ความเข้มข้น คือ 1% PHAs สัดส่วน (ก) P₁:R₂ (ข) P₁:R₁ (ค) P₂:R₃ 2% PHAs สัดส่วน (ง) P₂:R₂ (จ) P₂:R₁ (ฉ) P₂:R₃ 3% PHAs สัดส่วน (ช) P₃:R₂ (ซ) P₃:R₁ (ฅ) P₃:R₃ รวมทั้งสารตัวอย่างบริสุทธิ์ (ญ) PHAs และ (ฎ) ยางธรรมชาติ (R = Natural rubber, P = PHAs)

4.3.3 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีดักกันกระแทกในห้องปฏิบัติการ

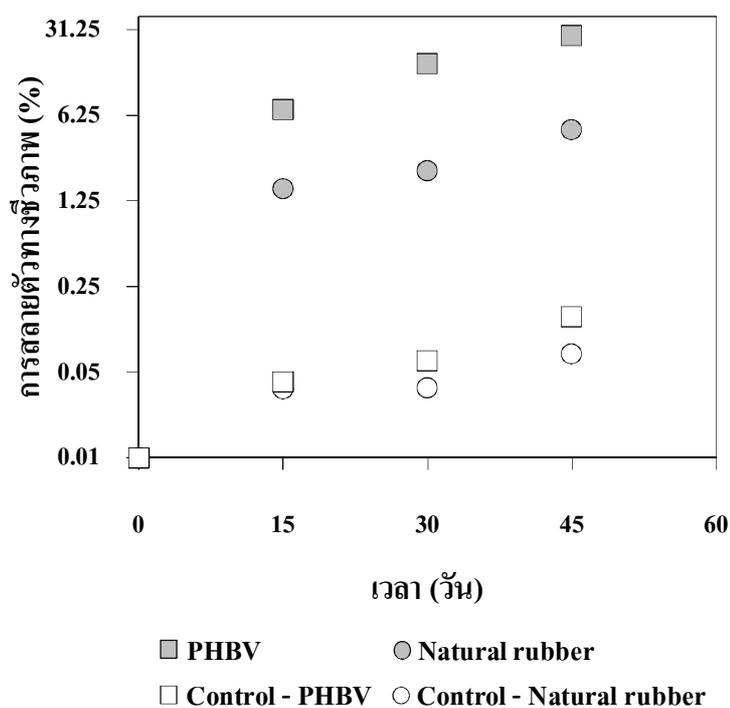
สำหรับการศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพในห้องปฏิบัติการทำให้ทราบได้ชัดเจนขึ้นว่าการสลายตัวทางชีวภาพเกิดจากจุลินทรีย์ในธรรมชาติ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่บ่มด้วยเชื้อจุลินทรีย์จากดินและน้ำในธรรมชาติกับตัวอย่างควบคุมที่เติมเชื้อจุลินทรีย์ในธรรมชาติจากดินและน้ำแล้วนำไปบ่มด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำเพื่อทำให้ตัวอย่างปราศจากเชื้อ โดยศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพในห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 45 วัน ผลการทดสอบพบว่าทุกตัวอย่างที่บ่มด้วยเชื้อจุลินทรีย์ในธรรมชาติจากดินและจากน้ำมีการสลายตัวทางชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เช่นเดียวกับตัวอย่างที่ศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพในดินและน้ำในสภาพแวดล้อมจริง สำหรับตัวอย่างควบคุมที่เติมเชื้อจุลินทรีย์ธรรมชาติจากดินและจากน้ำแล้วนำไปทำการบ่มด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำเพื่อทำให้ตัวอย่างปราศจากเชื้อไม่ปรากฏการสลายตัวทางชีวภาพเพิ่มขึ้นตามเวลา

จากการตรวจนับเชื้อแบคทีเรียที่มีชีวิตจากดินและน้ำด้วยวิธีเกลี่ยเชื้อและวิธีเทเพลท ผลการตรวจนับเชื้อแบคทีเรียที่มีชีวิตจากตัวอย่างที่บ่มด้วยเชื้อจากดินและน้ำเป็นระยะเวลา 45 วัน แสดงดังตารางที่ 4.10 ในขณะที่ตัวอย่างที่เติมเชื้อจากดินและน้ำที่ผ่านการบ่มด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำเพื่อทำให้ปราศจากเชื้อ พบว่าไม่ปรากฏเชื้อแบคทีเรียจากวิธีการตรวจนับเชื้อทั้งด้วยวิธีเกลี่ยเชื้อและวิธีเทเพลท ผลการร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างประกอบกับผลจากการตรวจนับปริมาณเชื้อทำให้ทราบชัดเจนว่า การสลายตัวทางชีวภาพที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากจุลินทรีย์ในสภาพแวดล้อมธรรมชาติทั้งจากดินและน้ำ (ภาพที่ 4.32-4.34, 4.36-4.38) เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างนั้นปราศจากแหล่งคาร์บอนที่จำเป็นสำหรับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในธรรมชาติทั้งจากดินและจากน้ำ เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหลายเหล่านี้จึงใช้แหล่งคาร์บอนจากตัวอย่าง ซึ่งเป็นที่มาของการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่าง ภาพที่ 4.31 แสดงร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของ PHAs และยางธรรมชาติโดยเชื้อจุลินทรีย์จากดิน จากกราฟแสดงให้เห็น PHAs มีร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพสูงถึงร้อยละ 30 โดยมีร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพสูงกว่ายางธรรมชาติ 5 เท่า สำหรับภาพที่ 4.35 แสดงร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของ PHAs และยางธรรมชาติโดยเชื้อจุลินทรีย์จากน้ำ พบว่า PHAs มีร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพสูงถึงร้อยละ 30 โดยมีร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพสูงกว่ายางธรรมชาติถึง 11 เท่า แสดงให้เห็นว่า PHAs ง่ายต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าแบคทีเรียมีความสำคัญต่อกระบวนการสลายตัวทางชีวภาพ โดยแบคทีเรียเหล่านี้จะปลดปล่อย PHA depolymerase เพื่อทำลายพอลิเมอร์ โดยในสภาวะที่มีอากาศจะได้ผลผลิตเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้ำ (H₂O) ชีวมวล (biomass) ในสภาวะที่ไร้อากาศจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น

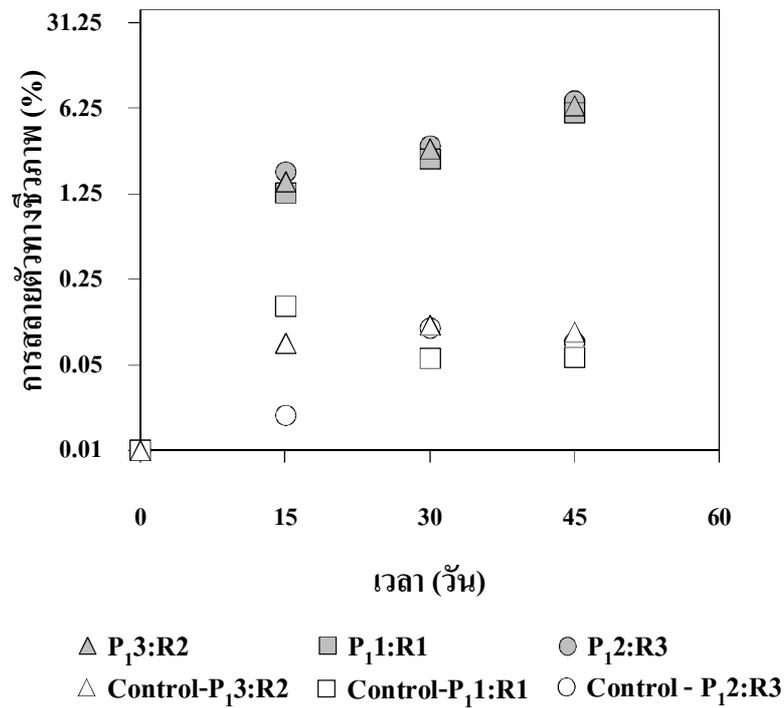
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน (CH₄) น้ำ ชีวมวล และเศษพอลิเมอร์ที่เหลือจากการสลายตัวทางชีวภาพ (Leja and Lewandowicz, 2010)

ตารางที่ 4.10 จำนวนแบคทีเรียที่มีชีวิตจากดินและน้ำที่ใช้ศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างเม็ดบีดักกันกระแทกในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 45 วัน

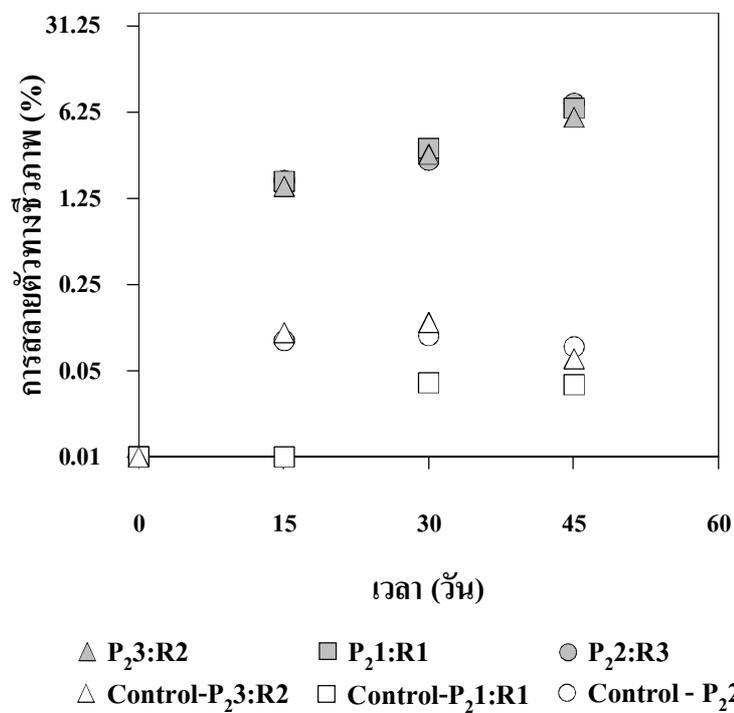
วิธีตรวจนับแบคทีเรียที่มีชีวิต	จำนวนโคโลนี (CFU/ml)	
	แบคทีเรียจากดิน	แบคทีเรียจากน้ำ
วิธีเกลี่ยเชื้อ	3.82×10^7	4.27×10^7
วิธีเทเพลท	3.9×10^6	1.98×10^7



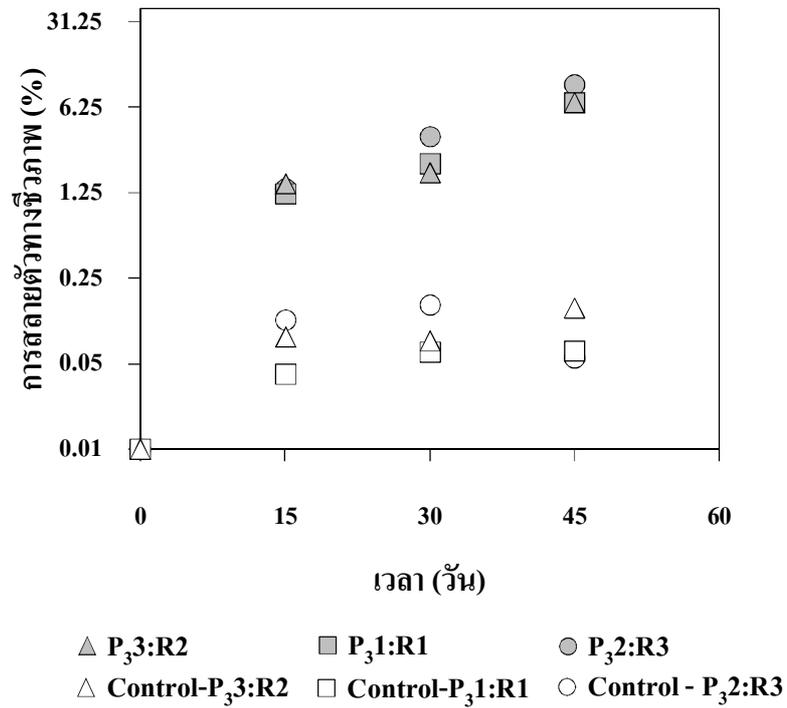
ภาพที่ 4.31 การสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพในห้องปฏิบัติการโดยปมด้วยแบคทีเรียจากดิน



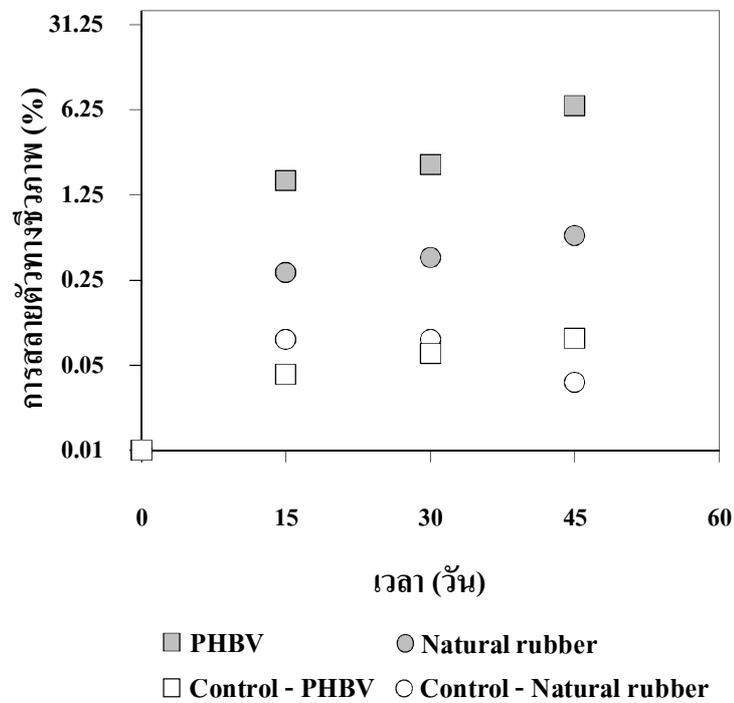
ภาพที่ 4.32 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 1% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากดิน



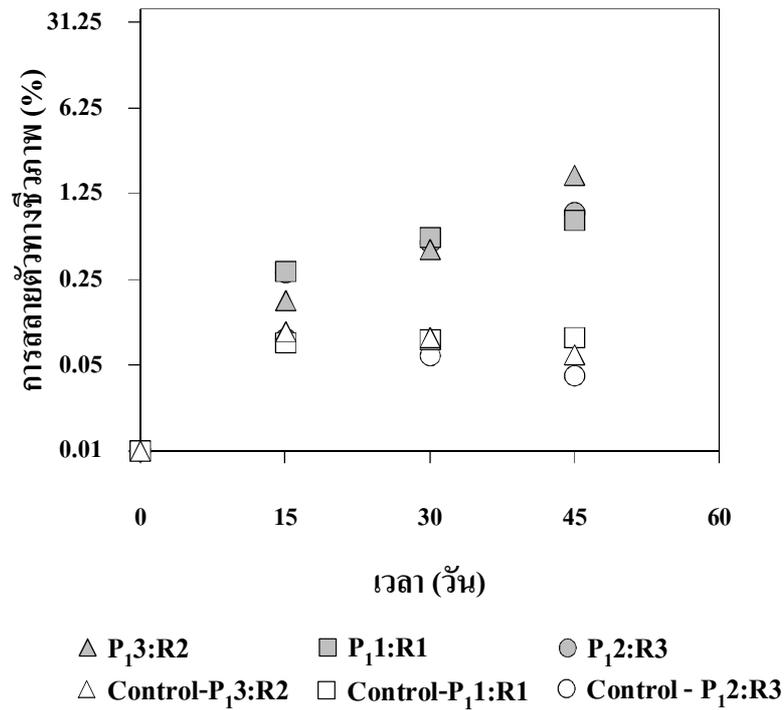
ภาพที่ 4.33 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 2% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากดิน



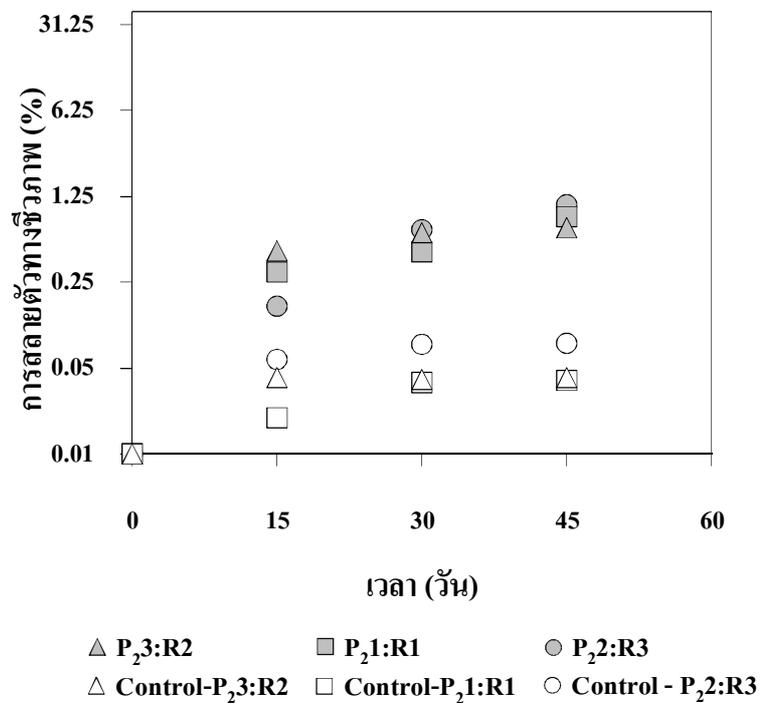
ภาพที่ 4.34 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 3% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากดิน



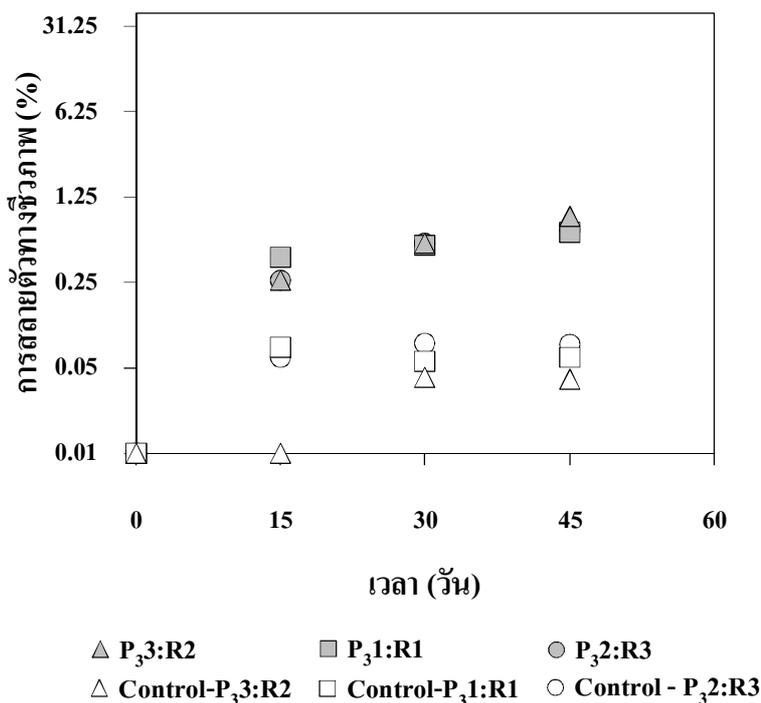
ภาพที่ 4.35 การสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากน้ำ



ภาพที่ 4.36 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 1% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากน้ำ



ภาพที่ 4.37 การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 2% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากน้ำ



ภาพที่ 4.38 การสลายตัวของชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 3% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากน้ำ

4.4 การตรวจสอบชนิดแบคทีเรีย (Bacteria identification)

การตรวจสอบชนิดของแบคทีเรียโดยการนำโคโลนีมาแยกเชื้อให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการเกลี่ยเชื้อเพื่อให้ได้โคโลนีเดี่ยวจากนั้นนำมาเปรียบเทียบสายพันธุ์เชื้อแบคทีเรียที่ได้รับการอนุเคราะห์จากสถาบันบริการการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ สำหรับการตรวจสอบการบ่งชี้ชนิดของแบคทีเรีย ในขั้นตอนนี้ได้เลือกเชื้อแบคทีเรียจากตัวอย่างที่บ่มด้วยเชื้อจากดิน เนื่องจากมีการสลายตัวของชีวภาพสูงกว่าตัวอย่างที่บ่มด้วยเชื้อจากน้ำ แบคทีเรียที่ได้จากการตรวจสอบในครั้งนี้คือแบคทีเรียในสกุล *Flavobacterium columnare* ผลการตรวจสอบชนิดของแบคทีเรียนี้สอดคล้องกับ Boyandin et al. (2012) ที่ทำการศึกษาการสลายตัวของชีวภาพของ PHAs ในดินเมื่อจำแนกแบคทีเรียสกุลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของชีวภาพของ PHAs พบว่ามีแบคทีเรียสกุล *Flavobacterium* sp. อย่างเด่นชัดที่ผิวของ PHAs เมื่อเก็บตัวอย่าง PHAs ที่ศึกษาการสลายตัวของชีวภาพในดิน ซึ่งโดยทั่วแบคทีเรียในสกุล *F. columnare* ว่าเป็นแบคทีเรียที่ก่อโรคในปลาที่มักตรวจพบได้ง่ายในน้ำจืด (Declercq, 2013)



ภาพที่ 4.39 ลักษณะ โคลินีของแบคทีเรีย *Flavobacterium colomnare*