บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.5.1 สัดส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแบบแผ่น

ผลการศึกษาการสัดส่วนระหว่างสารละลาย PHAs ที่ความเข้มข้น 1% PHAs กับน้ำยางธรรมชาติ ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กันกระแทก พบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป คือ ที่สัดส่วนระหว่างสารละลาย PHAs และน้ำยางธรรมชาติ $P_1$2:R3, $P_1$1:R1 และ $P_1$3:R2 โดยตัวอย่างที่ได้รับจากสัดส่วนทั้ง 3 นี้มีลักษณะทางกายภาพที่ดีและคงตัวที่ใกล้เคียงกัน

5.5.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เม็ดกันกระแทก

5.5.2.1 ลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการสลายตัวทางชีวภาพ

จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวผลิตภัณฑ์ของ PHAs ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 กับน้ำยางธรรมชาติ และนำไปศึกษาด้วย SEM ทั้งก่อนและหลังการสลายตัวทางชีวภาพ พบว่าลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพมีความพรุนน้อยกว่าในตัวอย่างหลังการศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพ

5.5.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณความพรุน

ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ PHAs บริสุทธิ์มีปริมาณความพรุนมากที่สุดร้อยละ 12.79 ของพื้นที่ผิว ในขณะที่ยางธรรมชาติมีปริมาณความพรุนน้อยที่สุด ร้อยละ 0.04 สำหรับตัวอย่างผสมมีปริมาณความพรุนอยู่ที่ร้อยละ 0.60 -1.06 หลังการสลายตัวทางชีวภาพ PHAs บริสุทธิ์และยางธรรมชาติมีปริมาณความพรุนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 26.26 และ 0.74 ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างผสมมีปริมาณความพรุนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.32 -5.97 สำหรับสัดส่วนที่เหมาะสำหรับการผลิตเม็ดกันกระแทกคือ 3% PHAs ที่สัดส่วน $P_3$2:R3 เนื่องจากสัดส่วนนี้มีค่าความพรุนสูงสุดร้อยละ 0.86 การที่วัสดุมีความพรุนในปริมาณมากทำให้วัสดุนั้นแสดงคุณสมบัติการรับแรงคล้ายโฟม หากมีแรงกดทับที่วัสดุอากาศภายในจะถูกรีดออก และหากสิ้นสุดแรงกดทับวัสดุนั้นจะมีอากาศเข้าไปแทนที่ในวัสดุทำให้วัสดุนั้นสามารถคืนตัวได้ ตัวอย่างที่มีความพรุนสูงสุดจึงเหมาะกับการผลิตเม็ดกันกระแทก

5.5.2.3 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal property)

จากการตรวจสอบอุณหภูมิหลอมเหลวของ PHAs บริสุทธิ์ พบว่าเป็น PHAs ชนิด PHBV ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพพบว่ามีอุณหภูมิหลอมเหลว 2 ค่าคือ 148.56 และ 173.49 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจาก PHBV เป็นพอลิเมอร์ร่วมที่ประกอบด้วย polyhydroxybutyrate (PHB) และ polyhydroxyvalerate (PHV) ตัวอย่างผสมมีอุณหภูมิหลอมเหลวค่าที่หนึ่งอยู่ในช่วง 150 – 157 องศาเซลเซียส ค่าที่สองอยู่ในช่วง 166 – 176 องศาเซลเซียส ส่วนยางธรรมชาติไม่ปรากฏอุณหภูมิหลอมเหลวเนื่องจากไม่มีบริเวณผลึก โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลอมเหลวนี้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเป็นผลึกสอดคล้องกับผลการทดลองจากการตรวจสอบหมู่ทำหน้าที่ สำหรับหลังการสลายตัวทางชีวภาพ PHBV บริสุทธิ์มีอุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเป็น 149.94 และ 173.12 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ผสมมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ลดลงเช่นกัน โดยอุณหภูมิหลอมเหลวค่าแรกอยู่ในช่วง 151 - 156 องศาเซลเซียส และค่าที่สองอยู่ในช่วง 168 - 170 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลอมเหลวเพียงเล็กน้อย สามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างหลังการสลายตัวทางชีวภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากการตรวจสอบหมู่ทำหน้าที่ พบว่าปริมาณความเป็นผลึกของ PHBV ลดลงหลังการสลายตัวทางชีวภาพ

5.5.2.4 การทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile strength)

การทดสอบความต้านแรงดึงของตัวอย่างผสม แสดงแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึงสอดคล้องกับสัดส่วนของสารละลาย PHAs โดยตัวอย่างจากการผสม 3% PHAs ที่สัดส่วน $P_3$3:R2 มีค่ามอดุลัสสูงที่สุดเท่ากับ 1.511 เมกะปาสคาล ในขณะที่สัดส่วน $P_3$2:R3 มีค่ามอดุลัสน้อยสุดเท่ากับ 0.626 เมกะปาสคาล ตัวอย่างผสม 1% และ 2% PHAs มีแนวโน้วค่าดุลัสที่ไม่ชัดเจน ดังนั้นสัดส่วนที่เหมาะสำหรับการผลิตเม็ดกันกระแทกระหว่าง 3% PHAs ที่สัดส่วน $P_3$2:R3 เนื่องจากมีค่ามอดุลัสน้อยที่สุด

5.5.2.5 การทดสอบแรงกด (Compressive test)

จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างผสม 3% PHAs กับยางธรรมชาติแสดงให้เห็นการยุบตัวของตัวอย่างสอดคล้องกับสัดส่วนของสารละลาย PHAs โดยที่สัดส่วน $P_3$3:R2 มีการยุบตัวสูงสุดร้อยละ 31.20 ในขณะที่สัดส่วน $P_3$2:R3 มีการยุบตัวต่ำสุดร้อยละ 26.56 ดังนั้นสัดส่วนนี้จึงเหมาะสมกับการผลิตเม็ดกันกระแทก เนื่องจากการยุบตัวที่มากอาจทำให้แรงที่กดทับมีผลต่อสิ่งของที่ต้องการป้องกันความเสียหายการการกดทับหรือการกระแทก สำหรับตัวอย่างผสมที่ 1%

และ 2% PHAs กับยางธรรมชาติมีแนวโน้มการยุบตัวที่ไม่ชัดเจนจึงไม่เหมาะต่อการนำมาผลิตเม็ดกันกระแทก

5.5.2.6 การวิเคราะห์ขั้นการเป็นผลึก (Degree of crystallization)

ผลการวิเคราะห์ขั้นการเป็นผลึกของ PHAs ชนิด PHBV ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพพบเอกลักษณ์ความเป็นผลึกที่ 13.30 และ 16.68 องศา ส่วนยางธรรมชาติไม่ปรากฏบริเวณผลึก ตัวอย่างจากการผสมระหว่าง PHBV กับยางธรรมชาติไม่ปรากฏบริเวณผลึกของ PHBV และตัวอย่างจากการผสมมีลักษณะกราฟที่คล้ายยางธรรมชาติ หลังการสลายตัวทางชีวภาพ PHBV บริสุทธิ์มียอดกราฟบริเวณผลึกเพิ่มขึ้น

5.5.2.7 การตรวจสอบหมู่ทำหน้าที่

ผลการตรวจสอบหมู่ทำหน้าที่ของสารก่อนการศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพพบว่า PHAs ชนิด PHBV มีเอกลักษณ์ของสารอยู่ที่เลขคลื่น 1,720 เซนติเมตร$^{-1}$ ตัวอย่างผสมแสดงเอกลักษณ์ของ PHBV ที่เลขคลื่นช่วง 1,723-1,725 เซนติเมตร$^{-1}$ และพบว่ายอดกราฟของตัวอย่างผสมมีความสูงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PHBV บริสุทธิ์ โดยความสูงที่ลดลงแสดงถึงปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหลอมเหลวที่ได้จากเทอร์โมแกรม DSC ยางธรรมชาติแสดงเอกลักษณ์ของสารอยู่ที่ และ 835 เซนติเมตร$^{-1}$ สำหรับตัวอย่างผสมมีการปรากฏยอดกราฟที่บริเวณเลขคลื่น 3,325-3,289 เซนติเมตร$^{-1}$ ซึ่งเป็นบริเวณ O-H stretching ของหมู่ทำหน้าที่ไฮดรอกซิล จึงมีความเป็นไปได้ว่ายางธรรมชาติเข้าไปทำปฏิกิริยากับ PHBV จึงทำให้ปรากฏโอลิโกเมอร์ (oligomer) ของหมู่ทำหน้าที่ไฮดรอกซิล หลังการสลายตัวทางชีวภาพยอดกราฟของ PHBV และยางธรรมชาติบริสุทธิ์ที่ 1,720 และ 835 เซนติเมตร$^{-1}$ มีความสูงลดลง

5.5.3 การศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทก

5.5.3.1 การสลายตัวทางชีวภาพในดินของเม็ดบีทกันกระแทก

ผลการสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทกในดิน PHAs และยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียวมีการสลายตัวทางชีวภาพร้อยละ 6.01 และร้อยละ12.86 ในขณะที่ตัวอย่างผสม 2% PHAs ที่สัดส่วน $P_2$2:R3 มีการสลายตัวทางชีวภาพสูงสุดร้อยละ 26.65 ส่วนผลการสลายตัวทางชีวภาพของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปในลักษณะแผ่น พบว่าแผ่น PHAs และยางธรรมชาติมีการสลายตัวทางชีวภาพร้อยละ16.77 และ 15.72 ตามลำดับ ตัวอย่างผสม 3% PHAs ที่สัดส่วน

$P_3$1:R1 มีการสลายตัวทางชีวภาพสูงสุดร้อยละ 52.13 การสลายตัวทางชีวภาพบ่งบอกว่าเม็ดบีทกันกระแทกที่มีสัดส่วนการผสมที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการสลายตัวทางชีวภาพ

5.5.3.2 การสลายตัวทางชีวภาพในน้ำของเม็ดบีทกันกระแทก

PHAs และยางธรรมชาติมีการสลายตัวทางชีวภาพร้อยละ 46.24 และ 4.05 ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างของเม็ดบีทที่ผสม 3% PHAs ที่สัดส่วน $P_3$3:R2 มีการสลายตัวทางชีวภาพร้อยละ 13.13 ส่วนการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างแบบแผ่นทั้งของ PHAs และยางธรรมชาติมีการสลายตัวทางชีวภาพร้อยละ 57.51 และ 8.49 ในขณะที่ตัวอย่างผสม 2% PHAs ที่สัดส่วน $P_2$3:R2 มีการสลายตัวทางชีวภาพสูงสุดร้อยละ 16.03 ทั้งนี้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแบบแผ่นมีการสลายตัวทางชีวภาพสูงกว่าตัวอย่างแบบเม็ดเช่นเดียวกับการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างในดิน

5.5.3.3 การศึกษาสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทกในห้องปฏิบัติการ

ผลการสลายตัวทางชีวภาพในห้องปฏิบัติการระหว่างตัวอย่างที่บ่มด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติจากดินและน้ำกับตัวอย่างควบคุมที่เติมจุลินทรีย์ในธรรมชาติจากดินและจากน้ำแล้วนำไปทำการนึ่งด้วยหม้อนึ่งความดันไอเพื่อทำให้ตัวอย่างปราศจากเชื้อ พบว่าตัวอย่างที่บ่มด้วยจุลินทรีย์ที่ได้จากดินและน้ำมีการสลายตัวทางชีวภาพเพิ่มขึ้นตามเวลา ในขณะที่ตัวอย่างที่ปลอดเชื้อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป

5.5.4 การตรวจสอบชนิดแบคทีเรีย (Bacteria identification)

การตรวจสอบชนิดของแบคทีเรียจากตัวอย่างเม็ดบีทกันกระแทกที่ทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพโดยแบคทีเรียจากดินในห้องปฏิบัติการจากสถาบันบริการการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าเป็นแบคทีเรียในสกุล *Flavobacterium colomnare* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีเกี่ยวข้องกับการสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติดิบและสารละลาย PHAs เพื่อให้ของผสมทั้งสองชนิดสามารถผสมกันได้ดียิ่งขึ้นก่อนการนำไปขึ้นรูป เช่น การเติมน้ำเพื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย PHAs และน้ำยางธรรมชาติ แล้วผสมโดยเครื่องเครื่องอัดรีด (Extruder) หรือเครื่องนวดผสมร่วม (Co-Kneader)

5.2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยการนำสารอื่นที่มีคุณสมบัติในการเป็น plasticizer เพื่อเชื่อมประสานหรือเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับเม็ดบีทกันกระแทก เพื่อหาปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมของของผสม 3 หรือ 4 หรือ 5 ชนิด ต่อการขึ้นรูปเป็นเม็ดบีทพลาสติกชีวภาพกันกระแทกต่อไป

5.2.3 เม็ดกันกระแทกที่ผลิตได้มีความเหนียวของยางธรรมชาติมากจึงทำให้ติดกันได้ดีเมื่อนำไปใช้งานจริง ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารเคลือบผิวที่จะใช้เพื่อปรับปรุงของเม็ดกันกระแทกเพื่อลดการเกาะติดกันทำให้สะดวกต่อการใช้งาน

5.2.3 ควรมีการศึกษาการคืนตัวของเม็ดบีทกันกระแทกหลังการรับแรงกด ทั้งนี้เพื่อให้เม็ดบีทกันกระแทกมีคุณสมบัติด้านการคืนตัวที่เหมาะสมกับการเป็นเม็ดบีทกันกระแทก

5.2.4 ควรใช้ถุงตาข่ายสีพื้นในขั้นตอนการศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่าง เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสีจากถุงตาข่ายบนพื้นผิวของตัวอย่าง

5.2.5 ควรมีการนำวิธีการทางสถิติที่แสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology, RSM) มาใช้ในการแปรผันปัจจัยเดี่ยวและปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปของเม็ดกันกระแทกดังกล่าว