สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
คำอุทิศ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิเมอร์	4
2.2 พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	4
2.3 พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต หรือ พีเอชเอ	8
2.4 ยาง	22
2.5 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	29
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	29
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	30
3.3 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เม็ดบีทกันกระแทก	37
3.4 การศึกษาการสลายทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทก	42
3.5 การตรวจสอบชนิดแบคทีเรีย	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	47
4.1 การผสมและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบแผ่นเพื่อทดสอบสัดส่วนต่อการขึ้นรูป	47
4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เม็ดบีทกันกระแทก	47
4.3 การศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทก	69
4.4 การตรวจสอบชนิดแบคทีเรีย	90
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลการศึกษา	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	96
เอกสารอ้างอิง	97
ภาคผนวก	104
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	116
ประวัติผู้เขียน	117

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	การจำแนกพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ตามแหล่งที่มารวมถึงข้อดีและข้อจำกัด	6
ตารางที่ 2.2	ประเภทและตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	8
ตารางที่ 2.3	หมู่แทนที่ (R group) ของอนุพันธ์ที่เป็นโฮโมพอลิเมอร์หลักของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต	11
ตารางที่ 2.4	ชื่อย่อแบบสั้นและแบบยาวพร้อมลักษณะโครงสร้างของอนุพันธ์พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต	12
ตารางที่ 2.5	คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางความร้อนของอนุพันธ์พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต	12
ตารางที่ 2.6	คุณสมบัติทางกายภาพของ Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) หรือ Poly(HB-co-HV) ที่มีเปอร์เซ็นต์โมลของอนุพันธ์ hydroxyvalerate หรือ HV ที่ต่างกัน	13
ตารางที่ 2.7	จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลาย PHAs	14
ตารางที่ 2.8	บริษัทและประเทศที่มีการผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตทางการค้า	20
ตารางที่ 2.9	ผู้ผลิตและปริมาณการผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตทางการค้าในปัจจุบัน	21
ตารางที่ 3.1	สัดส่วนที่ใช้ในการผสมระหว่าง PHAs และน้ำยางธรรมชาติโดยมีปริมาตรรวมเป็น 30 มิลลิลิตร	32
ตารางที่ 3.2	สัดส่วนที่ใช้ในการผสมระหว่าง PHAs และน้ำยางธรรมชาติโดยมีปริมาตร รวมเป็น 150 มิลลิลิตร	33
ตารางที่ 4.1	ปริมาณความพรุนก่อนและหลังการศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพ	51
ตารางที่ 4.2	คุณสมบัติทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากเทอร์โมแกรม DSC ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ	56
ตารางที่ 4.3	คุณสมบัติทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากเทอร์โมแกรม DSC หลังการสลายตัวทางชีวภาพ	57
ตารางที่ 4.4	คุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบโดยเครื่อง UTM	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 4.5	ผลการยุบตัวของตัวอย่างเม็ดบีทกันกระแทกชีวภาพจาก PHAs ต่อยางธรรมชาติรวมถึงตัวอย่างจากยางธรรมชาติบริสุทธิ์ ที่เกิดจากการรับแรงกดขนาดต่าง ๆ สี่แบบ	60
ตารางที่ 4.6	ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทกในดิน	70
ตารางที่ 4.7	ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพในดิน	74
ตารางที่ 4.8	ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทกในน้ำ	77
ตารางที่ 4.9	ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพในน้ำ	81
ตารางที่ 4.10	จำนวนแบคทีเรียที่มีชีวิตจากดินและน้ำที่ใช้ศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างเม็ดบีทกันกระแทกในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 45 วัน	86

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	การสะสมตัวของของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตจาก *Achromobacter* sp. PSU-M	9
ภาพที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต	10
ภาพที่ 2.3	โครงสร้างของ Poly(3-hydroxy butyrate-co-3-hydroxyvalerate) หรือ P(3HB-co-3HV)	13
ภาพที่ 2.4	สถานะทางกายภาพของ PHAs	17
ภาพที่ 2.5	รูปแบบการสลายตัวของพอลิเมอร์ในสภาวะที่มีอากาศและไร้อากาศ	18
ภาพที่ 2.6	สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ	23
ภาพที่ 2.7	การยึดเหนี่ยวของกำมะถันให้ยางดิบเกาะตัวแน่น	24
ภาพที่ 3.1	อุปกรณ์สำหรับขึ้นรูปยางผสมที่มีส่วนผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับสารละลาย PHAs เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เม็ดบีทกันกระแทก	34
ภาพที่ 3.2	ขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์เม็ดบีทกันกระแทกจากยางผสมที่ได้จากการผสมระหว่างสารละลาย PHAs กับน้ำยางธรรมชาติ	35
ภาพที่ 3.3	แผ่นยางผสมสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพก่อนผ่านการอบแห้ง	36
ภาพที่ 3.4	ขั้นตอนการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของแผ่นยางผสมเพื่อผลิตเม็ดบีทกันกระแทกก่อนและหลังการย่อยสลาย	37
ภาพที่ 3.5	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ภาพ ImageJ เวอร์ชัน 1.47	38
ภาพที่ 3.6	เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ รุ่น Pyris 6 ที่คณะเทคโนโลยีสาขาเทคโนโลยีอาหารมหาวิทยาลัยขอนแก่น	39
ภาพที่ 3.7	เครื่องมือและตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงดึงและความสามารถในการรับแรงกด	40
ภาพที่ 3.8	การวิเคราะห์ขั้นการเป็นผลึกโดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	41
ภาพที่ 3.9	การตรวจสอบหมู่ทำหน้าที่ของสารตัวอย่างทั้งก่อนและหลังการสลายตัวทางชีวภาพโดยเครื่อง FTIR	42
ภาพที่ 3.10	การศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทกในสภาพแวดล้อมจริง	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 3.11	การศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดบีทกันกระแทกในห้องปฏิบัติการ	46
ภาพที่ 4.1	ผลการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมต่อผสมและการขึ้นรูปตัวอย่าง ระหว่าง PHAs และน้ำยางธรรมชาติ	48
ภาพที่ 4.2	ลักษณะพื้นผิวของแผ่นผลิตภัณฑ์จากเครื่อง SEM ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างจากสารละลาย PHAs ทั้ง 3 ความเข้มข้น	49
ภาพที่ 4.3	ลักษณะพื้นผิวของแผ่นผลิตภัณฑ์จากเครื่อง SEM หลังการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างจากสารละลาย PHAs ทั้ง 3 ความเข้มข้น	50
ภาพที่ 4.4	เทอร์โมแกรม DSC ของ PHBV และยางธรรมชาติ ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ	54
ภาพที่ 4.5	เทอร์โมแกรม DSC ของ PHBV และยางธรรมชาติ หลังการสลายตัวทางชีวภาพ	55
ภาพที่ 4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (yield point) กับค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus)	58
ภาพที่ 4.7	การยุบตัวสูงสุด (load at break) ของตัวอย่างเม็ดบีทกันกระแทกชีวภาพที่เกิดจากการรับแรงกดขนาด 1000 นิวตัน	61
ภาพที่ 4.8	ดิฟแฟรกโทแกรมของรังสีเอกซ์ของ PHBV และยางธรรมชาติ ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ	63
ภาพที่ 4.9	ดิฟแฟรกโทแกรมของรังสีเอกซ์ของ PHBV และยางธรรมชาติ หลังการสลายตัวทางชีวภาพ	64
ภาพที่ 4.10	สเปกตรัมอินฟราเรดของ PHBV และยางธรรมชาติ ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ	66
ภาพที่ 4.11	สเปกตรัมอินฟราเรดของ PHBV และยางธรรมชาติ หลังการสลายตัวทางชีวภาพ	67
ภาพที่ 4.12	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพในดิน	68
ภาพที่ 4.13	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 1% PHAs ในดิน	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.14	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 2% PHAs ในดิน	69
ภาพที่ 4.15	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 3% PHAs ในดิน	70
ภาพที่ 4.16	การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพในดิน	72
ภาพที่ 4.17	การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 1% PHAs ในดิน	72
ภาพที่ 4.18	การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 2% PHAs ในดิน	73
ภาพที่ 4.19	การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 3% PHAsในดิน	73
ภาพที่ 4.20	การสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำ	75
ภาพที่ 4.21	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 1% PHAs ในน้ำ	75
ภาพที่ 4.22	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 2% PHAs ในน้ำ	76
ภาพที่ 4.23	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 3% PHAs ในน้ำ	76
ภาพที่ 4.24	การสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างแผ่นพลาสติกชีวภาพในน้ำ	79
ภาพที่ 4.25	การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 1% PHAs ในน้ำ	79
ภาพที่ 4.26	การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 2% PHAs ในน้ำ	80
ภาพที่ 4.27	การสลายตัวทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพ จากตัวอย่าง 3% PHAs ในน้ำ	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.28	ลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ก่อนการสลายตัวทางชีวภาพ จากสารละลาย PHAs 3 ความเข้มข้น	82
ภาพที่ 4.29	ลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์หลังการสลายตัวทางชีวภาพในดิน เป็นระยะเวลา 45 วัน จากสารละลาย PHAs 3 ความเข้มข้น	83
ภาพที่ 4.30	ลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์หลังการสลายตัวทางชีวภาพในน้ำ เป็นระยะเวลา 45 วัน จากสารละลาย PHAs 3 ความเข้มข้น	84
ภาพที่ 4.31	การสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากดิน	86
ภาพที่ 4.32	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 1% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากดิน	87
ภาพที่ 4.33	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 2% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากดิน	87
ภาพที่ 4.34	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 3% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากดิน	88
ภาพที่ 4.35	การสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากน้ำ	88
ภาพที่ 4.36	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 1% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากน้ำ	89
ภาพที่ 4.37	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 2% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากน้ำ	89
ภาพที่ 4.38	การสลายตัวทางชีวภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากตัวอย่าง 3% PHAs ในห้องปฏิบัติการ โดยบ่มด้วยแบคทีเรียจากน้ำ	90
ภาพที่ 4.39	ลักษณะโคโลนีของแบคทีเรีย *Flavobacterium colomnare*	91