

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้



นางสาวพัทธนันท์ จริยะกุลสิทธิ์

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MECHANICAL PROPERTIES OF PLA/PP BLENDED UTILIZING COMPATIBILIZER

Miss Pattanun Jariyakulsith



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความ
เข้ากันได้

โดย

นางสาวพัทธนันท์ จริยะกุลสิทธิ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช)

5870350221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: POLYLACTIC ACID, POLYPROPYLENE BLENDED AND MECHANICAL CHARACTERIZATION

PATTANUN JARIYAKULSITH: MECHANICAL PROPERTIES OF PLA/PP BLENDED UTILIZING COMPATIBILIZER. ADVISOR: ASST. PROF. SOMCHAI PUJINDANETR, Ph.D., 186 pp.

This research aims to study the mechanical properties of PLA/PP blend with and without polypropylene-grafted-maleic anhydride (PP-g-MAH) as a compatibilizer and dicumyl peroxide (DCP) as an initiator. By (1) blending PLA/PP at the ratio of 70/30, 50/50, and 30/70 by weight. Moreover, the amount of PP-g-MAH at 0.3 and 0.7 phr and DCP at 0.03 phr and 0.07 phr are added in each ratio of PLA/PP blend in twin screw extruder at the temperature of 175-195 °C. (2) Compressing the pellets from an extruder to be the specimens by compression moulding for characterizing the mechanical properties which include ultimate tensile strength (UTS), 0.2% offset yield strength (YS), young's modulus (YM), %elongation at break (%EG), hardness (HN) and impact strength (IMS). (3) Studying the effect of the compatibilizer, initiator, and ratio of used polymer to the mechanical properties of the polymer blend.

From this research can conclude as follows; (1) Adding PP into PLA responsible for decreasing of ultimate tensile strength, 0.2% offset yield strength, young's modulus, hardness and impact strength while %elongation at break tends to be increased. (2) Adding the PP-g-MAH and DCP into PLA/PP blend of all ratios lead to obviously increase in any mechanical properties. (3) At the ratio 70/30/0.3/0.03 of PLA/PP/PP-g-MAH/DCP gives the highest UTS, YS, and HN of 26.75 MPa, 22.53 MPa and 81 respectively. (4) At the ratio 70/30/0.7/0.07 of PLA/PP/PP-g-MAH/DCP gives the highest young's modulus and impact strength of 664.38 MPa and 4,051.53 J/m² respectively. (5) At the ratio 70/30/0/0 of PLA/PP/PP-g-MAH/DCP gives the highest %elongation at break of 3.74. (6) PP, PP-g-MAH, and DCP are significantly related to the mechanical properties with

R² (adj) between 0.7 – 0.98

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ซึ่งเป็นผู้ที่กรุณาให้คำปรึกษาตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าทำการวิจัย ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดเห็นในการทำวิจัย ตลอดจน แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของเนื้อหาการวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษาในที่แห่งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องและให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับ วิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมไปถึงเพื่อนๆ สำหรับความห่วงใย กำลังใจและการให้ความสนับสนุนตลอด ระยะเวลาที่ได้ศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ในระดับบัณฑิตศึกษา สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ตลอดจนกระทั่งข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา ด้วยดี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเมอร์.....	5
2.1.1 ความหมายของพอลิเมอร์.....	5
2.1.2 ประเภทของพอลิเมอร์.....	5
2.1.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์.....	12
2.1.4 การสลายตัวของพอลิเมอร์.....	17
2.1.5 สารเติมแต่งพอลิเมอร์.....	17
2.1.6 พอลิเมอร์ผสม.....	19

2.1.7 การเตรียมพอลิเมอร์ในการขึ้นรูป	24
2.1.8 เทคนิคการขึ้นรูปของพอลิเมอร์	30
2.1.9 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์	32
2.2 ผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์	40
2.3 พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	40
2.3.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP).....	40
2.3.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA)	42
2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of experiments; DOE).....	45
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	61
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	61
3.2 แผนการทดลอง	61
3.2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA และ PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	61
3.2.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA และ PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	63
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	65
3.4 วิธีการทดสอบชิ้นงาน.....	67
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์	68
4.1 ผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA และ PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	68
4.1.1 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength; UTS).....	68
4.1.2 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก (0.2% offset yield strength; YS)	69
4.1.3 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus; YM).....	70

4.1.4 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation @break; %EG)	71
4.1.5 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความแข็ง (Hardness; HN)	72
4.1.6 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก (Impact strength; IMS)..	73
4.2 ผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA และ PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	77
4.2.1 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength; UTS).....	78
4.2.2 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก (0.2% offset yield strength; YS).....	88
4.2.3 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง (Young’s modulus; YM).....	97
4.2.4 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation @break; %EG).....	106
4.2.5 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความแข็ง (Hardness; HN)	117
4.2.6 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก (Impact strength; IMS)	126
4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ .	140
4.3.1 ผลการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลต่างๆของพอลิเมอร์ผสม.....	140
4.3.2 ผลการเปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ของค่าสมบัติเชิงกลที่ได้ของพอลิเมอร์ผสม	152
4.4 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	153
4.4.1 กรณีที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	155
4.4.2 กรณีที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	156
บทที่ 5 อภิปรายผลการศึกษา	159
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง	159
5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของยัง	159
5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งและลักษณะการแตกหัก.....	162

5.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงกระแทกและสัญญาณวิทยา	165
5.2 การนำไปประยุกต์ใช้ในการใช้งานด้านต่างๆ	168
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	178
6.1 สรุปผลการศึกษา	178
6.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะงานวิจัย	179
รายการอ้างอิง	182
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	186



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมบัติของการจัดเรียงตัวมอนอเมอร์ในโมเลกุลที่ต่างกันของพอลิเอทิลีน.....	9
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการนำไปใช้งานของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์	10
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการนำไปใช้งานของเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์	11
ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์และเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์	11
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว	14
ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบขั้นหรือแบบควบแน่น	15
ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันทั้ง 2 ประเภท	16
ตารางที่ 2.8 ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม	22
ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมและสารเพิ่มความเข้ากันได้ในทางการค้า	23
ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างการใช้งานของพอลิไพโรฟิลีน.....	41
ตารางที่ 2.11 ชนิดของแลกไทด์และอนุกรมการเปลี่ยนสถานะ.....	43
ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานของพอลิแลกติกแอซิด	43
ตารางที่ 2.13 สมบัติทางความร้อนของPP, PLA และ PP/PLA blend.....	51
ตารางที่ 2.14 การออกแบบการทดลองและผลการทดลอง	58
ตารางที่ 2.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) สำหรับค่าความทนแรงกระแทก (J/m).....	59
ตารางที่ 2.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) สำหรับค่าความทนแรงดึง (MPa).....	59
ตารางที่ 2.17 สมการถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับตัวแปรตอบสนอง	60
ตารางที่ 2.18 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดและค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้	60
ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกรณีที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	62
ตารางที่ 3.2 ตารางแผนการทดลองในกรณีที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	62
ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกรณีที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	63
ตารางที่ 3.4 ตารางแผนการทดลองในกรณีที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	64

ตารางที่ 4.1 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	68
ตารางที่ 4.2 ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	70
ตารางที่ 4.3 ค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	71
ตารางที่ 4.4 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	72
ตารางที่ 4.5 ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	73
ตารางที่ 4.6 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	74
ตารางที่ 4.7 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณ ต่าง ๆ กัน	78
ตารางที่ 4.8 ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณ ต่าง ๆ กัน	88
ตารางที่ 4.9 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณต่าง ๆ กัน ...	97
ตารางที่ 4.10 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณ ต่าง ๆ กัน	107
ตารางที่ 4.11 ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณต่าง ๆ กัน ...	117
ตารางที่ 4.12 ค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณ ต่าง ๆ กัน	127
ตารางที่ 4.13 อันดับของสมบัติเชิงกลที่มีค่าสูงที่สุดไปยังต่ำสุดของอัตราส่วนผสมต่าง ๆ กัน	146
ตารางที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบของสมบัติเชิงกลใน PLA/PP ที่ไม่มีและที่มี 0.3PP-g-MAH/0.03DCP ..	147
ตารางที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบของสมบัติเชิงกลใน PLA/PP ที่ไม่มีและที่มี 0.3PP-g-MAH/0.07DCP ..	148
ตารางที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบของสมบัติเชิงกลใน PLA/PP ที่ไม่มีและที่มี 0.7PP-g-MAH/0.03DCP ..	149
ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบของสมบัติเชิงกลใน PLA/PP ที่ไม่มีและที่มี 0.7PP-g-MAH/0.07DCP ..	150
ตารางที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบของสมบัติเชิงกลในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีและที่มี PP-g-MAH/DCP151	
ตารางที่ 4.19 สมการความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่ได้ของพอลิเมอร์ผสม	152
ตารางที่ 4.20 ค่า p-value ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลต่างๆของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ	153
ตารางที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้	155

ตารางที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	157
ตารางที่ 5.1 ปริมาณพื้นที่ได้กราฟระหว่างความเค้น-ความเครียดของแต่ละอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม	165
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและสมบัติเชิงกลที่ได้ของพอลิเมอร์ผสม.....	169
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลต่อบาทของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ	170
ตารางที่ 5.4 ค่าสมบัติเชิงกลที่ต้องการในการนำไปใช้งานรูปแบบต่างๆ.....	176



สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ.....	3
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโฮโมพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน.....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบสลับ.....	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบบล็อก.....	7
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบกราฟท์.....	7
รูปที่ 2.6 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้น.....	8
รูปที่ 2.7 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบกิ่ง.....	8
รูปที่ 2.8 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแห.....	8
รูปที่ 2.9 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบขั้นบันได.....	9
รูปที่ 2.10 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว.....	12
รูปที่ 2.11 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ในขั้นเริ่มต้น.....	12
รูปที่ 2.12 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ในขั้นแผ่ขยาย.....	13
รูปที่ 2.13 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ในขั้นยุติ.....	13
รูปที่ 2.14 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบขั้นหรือแบบควบแน่น.....	14
รูปที่ 2.15 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้ดี.....	21
รูปที่ 2.16 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีแรงยึดเหนี่ยวแต่ไม่รวมเป็นวัฏภาคเดียวกัน.....	21
รูปที่ 2.17 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีบางส่วน.....	21
รูปที่ 2.18 การปรับปรุงการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส.....	23
รูปที่ 2.19 ลักษณะการกระจายตัวและการแตกตัวของสารเติมแต่งในเนื้อพอลิเมอร์.....	25
รูปที่ 2.20 การแบ่งช่วงความร้อนที่มีความแตกต่างกันของอุณหภูมิตลอดความยาวของบารเรล.....	27
รูปที่ 2.21 เครื่องผสมแบบอัดรีดสองสกรู (Twin screw extruder).....	27

รูปที่ 2.22 ชื่อเรียกของตำแหน่งและอุปกรณ์ต่างๆในสกรู	28
รูปที่ 2.23 สกรูที่แบ่งตามช่วงต่างๆทั้งหมด 3 ช่วง.....	28
รูปที่ 2.24 ขั้นตอนการขึ้นรูปพอลิเมออร์โดยการอัด.....	30
รูปที่ 2.25 ขนาดชิ้นงานทดสอบที่กำหนดตามมาตรฐาน ISO 527.....	33
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด(stress-strain curve).....	36
รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุเหนียว	37
รูปที่ 2.28 วิธีการทดสอบความทนแรงกระแทก	38
รูปที่ 2.29 องค์ประกอบสำคัญที่จะนำไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค.....	40
รูปที่ 2.30 วัฏจักรของพอลิแลกติกแอซิด	42
รูปที่ 2.31 โครงสร้างทางเคมี(สเตอริโอไอโซเมอร์)ของกรดแลกติกทั้ง 3 แบบ	43
รูปที่ 2.32 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ต่างๆในท้องตลาดที่ใช้พอลิแลกติกแอซิด	44
รูปที่ 2.33 ความทนแรงดึงของPP, PLA และ PP/PLA blend	52
รูปที่ 2.34 สมบัติขวางกั้นของPP, PLA และ PP/PLA blend.....	53
รูปที่ 2.35 แนวโน้มค่ามอดูลัสของยังและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดใน PP กับ PLA ที่อัตราส่วน ต่างๆ.....	55
รูปที่ 2.36 แนวโน้มค่าความทนแรงกระแทกในPPกับPLA ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	55
รูปที่ 2.37 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังในการผสมPPกับPLAเมื่อมีการใส่สารเพิ่มความเข้ากัน ได้.....	56
รูปที่ 2.38 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดในการผสมPPกับPLAเมื่อมีการใส่สารเพิ่มความเข้ากัน ได้.....	56
รูปที่ 2.39 เปรียบเทียบค่าความทนแรงกระแทกในการผสมPPกับPLAเมื่อมีการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้....	57
รูปที่ 3.1 ช่วงอุณหภูมิที่สลิปช่วงของเครื่องผสมแบบอัดรีดชนิดสองสกรู.....	65
รูปที่ 3.2 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความทนแรงดึง.....	65
รูปที่ 3.3 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความทนแรงกระแทก	66
รูปที่ 3.4 เครื่องมือทดสอบสมบัติเชิงกล	66

รูปที่ 4.1 แนวโน้มค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	69
รูปที่ 4.2 แนวโน้มค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	70
รูปที่ 4.3 แนวโน้มค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	71
รูปที่ 4.4 แนวโน้มร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	72
รูปที่ 4.5 แนวโน้มความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	73
รูปที่ 4.6 แนวโน้มความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้..	74
รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ในอัตราส่วนต่างๆที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	75
รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP 50/50 ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	75
รูปที่ 4.9 แผนภาพสรุปผลสัมฤทธิ์งานวิทยาจากกล้อง SEM ของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	77
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr.....	79
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr.....	79
รูปที่ 4.12 Normal Probability plot of residuals (UTS).....	81
รูปที่ 4.13 Versus Order Plot (UTS).....	81
รูปที่ 4.14 Versus Fits Plot (UTS).....	82
รูปที่ 4.15 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab.....	83
รูปที่ 4.16 Interaction Plot for Ultimate tensile strength.....	84
รูปที่ 4.17 Main Effects Plot for Ultimate tensile strength.....	85
รูปที่ 4.18 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30.....	86
รูปที่ 4.19 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50.....	87
รูปที่ 4.20 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70.....	87

รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr	89
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr	90
รูปที่ 4.23 Normal Probability plot of residuals (YS)	91
รูปที่ 4.24 Versus Order Plot (YS)	92
รูปที่ 4.25 Versus Fits Plot (YS).....	92
รูปที่ 4.26 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab.....	93
รูปที่ 4.27 Interaction Plot for 0.2% offset yield strength.....	94
รูปที่ 4.28 Main Effects Plot for 0.2% offset yield strength.....	95
รูปที่ 4.29 ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30..	95
รูปที่ 4.30 ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50..	96
รูปที่ 4.31 ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70..	96
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr.....	98
รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr.....	99
รูปที่ 4.34 Normal Probability plot of residuals (YM).....	100
รูปที่ 4.35 Versus Order Plot (YM)	101
รูปที่ 4.36 Versus Fits Plot (YM)	101
รูปที่ 4.37 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab.....	102
รูปที่ 4.38 Interaction Plot for Young's modulus.....	103
รูปที่ 4.39 Main Effects Plot for Young's modulus.....	104
รูปที่ 4.40 ค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30	104
รูปที่ 4.41 ค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50	105

รูปที่ 4.42 ค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70	105
รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr	108
รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr..	108
รูปที่ 4.45 Normal Probability plot of residuals (%EG)	110
รูปที่ 4.46 Versus Order Plot (%EG).....	110
รูปที่ 4.47 Versus Fits Plot (%EG).....	111
รูปที่ 4.48 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab.....	112
รูปที่ 4.49 Interaction Plot for %Elongation @break.....	113
รูปที่ 4.50 Main Effects Plot for %Elongation @break.....	114
รูปที่ 4.51 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30	115
รูปที่ 4.52 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50	115
รูปที่ 4.53 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70	116
รูปที่ 4.54 เปรียบเทียบค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr	118
รูปที่ 4.55 เปรียบเทียบค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr	118
รูปที่ 4.56 Normal Probability plot of residuals (HN)	120
รูปที่ 4.57 Versus Order Plot (HN).....	120
รูปที่ 4.58 Versus Fits Plot (HN).....	121
รูปที่ 4.59 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab.....	122
รูปที่ 4.60 Interaction Plot for Hardness	123
รูปที่ 4.61 Main Effects Plot for Hardness	124
รูปที่ 4.62 ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30.....	125
รูปที่ 4.63 ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50.....	125
รูปที่ 4.64 ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70.....	126

รูปที่ 4.65 เปรียบเทียบค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr.....	128
รูปที่ 4.66 เปรียบเทียบค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr.....	128
รูปที่ 4.67 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ในอัตราส่วนต่างๆที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	129
รูปที่ 4.68 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ในอัตราส่วนต่างๆที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	130
รูปที่ 4.69 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP 70/30 ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	130
รูปที่ 4.70 แผนภาพสรุปผลสัมฤทธิ์จากกล้อง SEM ของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	132
รูปที่ 4.71 Normal Probability plot of residuals (IMS).....	134
รูปที่ 4.72 Versus Order Plot (IMS).....	134
รูปที่ 4.73 Versus Fits Plot (IMS).....	135
รูปที่ 4.74 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab.....	136
รูปที่ 4.75 Interaction Plot for Impact strength.....	137
รูปที่ 4.76 Main Effects Plot for Impact strength.....	138
รูปที่ 4.77 ค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30	138
รูปที่ 4.78 ค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50	139
รูปที่ 4.79 ค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70	139
รูปที่ 4.80 เปรียบเทียบความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	141
รูปที่ 4.81 เปรียบเทียบความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	142
รูปที่ 4.82 เปรียบเทียบมอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	143
รูปที่ 4.83 เปรียบเทียบร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม ที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	143
รูปที่ 4.84 เปรียบเทียบความแข็งของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	144

รูปที่ 4.85 เปรียบเทียบความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและมีส่วนผสมเพิ่มความเข้ากันได้.....	145
รูปที่ 4.86 กลไกการย่อยสลายของ PLA ในดิน.....	154
รูปที่ 4.87 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ทั้งที่ไม่มีและที่มีส่วนผสมเพิ่มความเข้ากันได้ก่อนนำไปฝังดิน.....	154
รูปที่ 4.88 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ทั้งที่ไม่มีและที่มีส่วนผสมเพิ่มความเข้ากันได้เตรียมนำไปฝังดิน.....	155
รูปที่ 4.89 แนวโน้มร้อยละการเพิ่มน้ำหนักของชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมเพิ่มความเข้ากันได้หลังนำไปฝังดิน ..	156
รูปที่ 4.90 แนวโน้มร้อยละการเพิ่มน้ำหนักของชิ้นงานที่มีส่วนผสมเพิ่มความเข้ากันได้หลังนำไปฝังดิน .	158
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของยังที่ PP-g-MAH/DCP 0.3/0.03.....	160
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของยังที่ PP-g-MAH/DCP 0.3/0.07.....	160
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของยังที่ PP-g-MAH/DCP 0.7/0.03.....	161
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของยังที่ PP-g-MAH/DCP 0.7/0.07.....	161
รูปที่ 5.5 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน.....	162
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของ PLA/PP 70/30 ที่ไม่มีและที่มีส่วนผสมเพิ่มความเข้ากันได้	163
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของ PLA/PP 50/50 ที่ไม่มีและที่มีส่วนผสมเพิ่มความเข้ากันได้	163
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของ PLA/PP 30/70 ที่ไม่มีและที่มีส่วนผสมเพิ่มความเข้ากันได้	164
รูปที่ 5.9 แนวโน้มค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม.....	166
รูปที่ 5.10 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆที่ไม่มีส่วนผสมเพิ่มความเข้ากันได้.....	166

รูปที่ 5.11 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ PP-g-MAH/DCP 0.3/0.03 167

รูปที่ 5.12 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ PP-g-MAH/DCP 0.7/0.07 167

รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลต่อบาทระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ 171

รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบระหว่างสมบัติเชิงกลต่อบาทและสมบัติเชิงกลที่ได้ของ PLA/PP 70/30 172

รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบระหว่างสมบัติเชิงกลต่อบาทและสมบัติเชิงกลที่ได้ของ PLA/PP 50/50 173

รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบระหว่างสมบัติเชิงกลต่อบาทและสมบัติเชิงกลที่ได้ของ PLA/PP 30/70 174



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

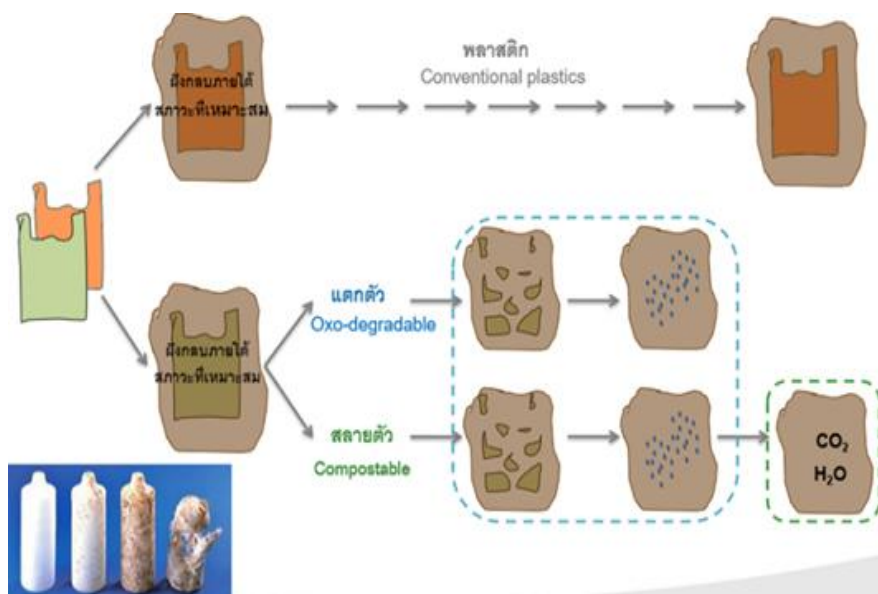
ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้เกิดปัญหาขยะรวมของโลกมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่ของขยะที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นนั้นจัดอยู่ในประเภทขยะพลาสติกที่ผลิตมาจากอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม ด้วยเหตุนี้จึงอาจก่อให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำมันตามมาในอนาคต นอกจากนี้พลาสติกที่ผลิตขึ้นจากอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียมยังไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติอีกด้วย ซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในหลายๆประเทศจึงหันมาให้ความสนใจและตระหนักถึงผลเสียที่จะกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบันขยะมูลฝอยที่กทม.จัดเก็บกว่า 10,000 ตันต่อวัน ส่วนใหญ่คือขยะประเภทถุงพลาสติก นั้นจึงสะท้อนถึงปริมาณการใช้ถุงพลาสติกจำนวนมาก และอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะในระยะยาว เนื่องจากการกำจัดขยะพลาสติกทำได้ยาก จากข้อมูลปี 2557 พบว่าการจัดเก็บขยะมูลฝอยชุมชนในพื้นที่กทม. มีไม่ต่ำกว่า 9,600 ตันต่อวัน ในจำนวนนี้พบสัดส่วนขยะจากถุงพลาสติกมากเป็นอันดับ 2 หรือร้อยละ 21 รองจากขยะเศษอาหารที่มีมากถึงร้อยละ 46.87 เนื่องจากถุงพลาสติกเป็นขยะที่หาวิธีกำจัดยากที่สุดหากเทียบกับขยะประเภทอื่นๆ ซึ่งการฝังกลบเป็นวิธีส่วนใหญ่ที่กทม.ใช้ในการกำจัดขยะพลาสติกโดยต้องใช้เวลาย่อยสลายไม่ต่ำกว่า 400 ปี จึงทำให้เกิดข้อจำกัดด้านพื้นที่ฝังกลบและกลายเป็นมลภาวะในระยะยาว นอกจากนี้พลาสติกไม่สามารถนำไปทำปุ๋ยหมักได้เหมือนขยะจากของสด เศษอาหาร ใบไม้ กิ่งไม้ และข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษพบว่าแต่ละปีมีขยะพลาสติกและโฟม 2.7 ล้านตัน ในจำนวนนี้เป็นถุงพลาสติกถึงร้อยละ 80 หรือ 5,300 ตันต่อวัน [1] จึงเป็นสาเหตุให้ทางวิจัยนี้มุ่งความสนใจไปยังการใช้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ โดยมีกระบวนการย่อยสลาย ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งพอลิเมอร์ที่งานวิจัยนี้สนใจคือพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่สังเคราะห์ได้จากทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable resource) เพื่อนำมาช่วยทดแทนการใช้พลาสติกที่ผลิตจากอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียมให้มีการใช้งานลดลง

นอกจากนี้พอลิแลคติกแอซิดยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เชิงพาณิชย์ทั่วไป (Commodity plastic) ดังนั้นพอลิแลคติกแอซิดจึงนิยมใช้งานในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ แต่พอลิแลคติกแอซิดมีข้อจำกัดด้านการใช้งานคือ มีความเปราะ ไม่ทนแรงกระแทกและมีราคาสูง โดยในการปรับปรุงสมบัติหรือข้อจำกัดของพอลิเมอร์ต่างๆไปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำพลาสติกไซเซชัน (Plasticization) การตัดแปรรโครงสร้างเคมี (Chemical modification) และการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น (Blending) เป็นต้น ซึ่งวิธีที่นิยมคือการทำพอลิ

เมอร์ผสม เนื่องจากมีข้อดีคือทำให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติตามต้องการด้วยค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีอื่น สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นเพื่อต้องการทั้งอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและเพื่อลดต้นทุนของการใช้ PLA ที่มีราคาสูง จึงต้องนำพอลิเมอร์เชิงพาณิชย์ทั่วไปมาผสม ซึ่งพอลิโพรพิลีน (PP) เป็นพอลิเมอร์เชิงพาณิชย์ทั่วไปที่มีสมบัติเด่นคือ เป็นพลาสติกที่เบาที่สุด มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความเหนียว ไม่เปราะ ทนต่อแรงกระแทก ไม่เป็นพิษ สามารถนำมาใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้และที่สำคัญคือมีราคาถูก ดังนั้นจึงสนใจที่จะนำ PP มาผสมกับ PLA แต่เนื่องจาก PLA เป็นสารที่มีขั้วและ PP เป็นสารที่ไม่มีขั้ว จึงเกิดความไม่เข้ากัน และจะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ได้มีสมบัติเชิงกลแย่ง โดยความเข้ากันได้ (Compatibility) นี้จะขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial tension) สัณฐานวิทยา (Morphology) และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (Adhesion between phase) จะเห็นได้ว่าการทำพอลิเมอร์ผสมจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันด้วย ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PP ให้มีมากขึ้นเพื่อที่จะได้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ดีขึ้น จึงจะต้องใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) และสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ดังนั้นจึงเกิดการพิจารณาระหว่างค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มความเข้ากันได้และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ (Trade-off)

ในงานวิจัยนี้จึง (1) ทำการผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนดังนี้ 70/30, 50/50, และ 30/70 โดยน้ำหนัก ซึ่งในแต่ละอัตราส่วนจะมีการเติมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MAH) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ที่ปริมาณ 0.3 และ 0.7 phr พร้อมกับการเติมไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ปริมาณ 0.03 และ 0.07 phr (ซึ่งที่เลือกใช้ปริมาณเท่านี้เนื่องจากในการทำพอลิเมอร์ผสมนั้น โดยปกติจะมีการเติมสารเติมแต่งที่ปริมาณไม่เกิน 1 phr) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสองสกรู (Twin screw extruder) ที่อุณหภูมิ 175-195 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้เป็นเม็ดพอลิเมอร์ผสม PLA/PP (2) นำเม็ดพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกดอัด (Compression moulding) เพื่อจะนำไปทำการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่ ความทนแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength), ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (0.2% offset yield strength), โมดูลัสของยัง (Young's modulus), ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation @break), ความแข็ง (Hardness) และความทนแรงกระแทก (Impact strength) (3) ศึกษาอิทธิพลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ (PP-g-MAH), สารริเริ่มปฏิกิริยา (DCP) และอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP



รูปที่ 1.1 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบและความสัมพันธ์ของสารเพิ่มความเข้ากันได้ สารริเริ่มปฏิกิริยาและอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PP โดยมีพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MAH) ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้และมีไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา
2. ศึกษาพอลิเมอร์ผสมโดยการผสม (Blending) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรู (Twin screw extruder) จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลซึ่งประกอบด้วยสมบัติความทนแรงดึงและสมบัติความทนแรงกระแทก
3. ทำการทดสอบสมบัติเชิงความทนแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ISO527
4. ทำการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก (Impact test) ตามมาตรฐาน ISO180

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. อิทธิพลของสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยาต่อสมบัติเชิงกลต่างๆของพอลิเมอร์ผสม
2. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ PLA และ PP ในกระบวนการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ
3. สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลต่างๆของพอลิเมอร์ผสม
4. แนวทางในการศึกษาและพัฒนาสมบัติของพอลิเมอร์ชีวภาพเพื่อขยายขอบเขตการใช้งานในอนาคตต่อไป

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ขั้นตอนการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ขั้นตอนรวบรวมข้อมูลและสรุปผลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อกำหนดหัวข้อและขอบเขตงานวิจัย
3. ขั้นตอนการทดลอง โดยแบ่งเป็น การทำพอลิเมอร์ผสม, การขึ้นรูปเพื่อนำไปทดสอบ โดยนำหลักการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ร่วมด้วย และการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ตามมาตรฐานสากล
4. เก็บค่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติต่อไป
5. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ได้เพื่อหาความสัมพันธ์และอิทธิพลของสารเพิ่มความเข้ากันได้, สารริเริ่มปฏิกิริยา และอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ต่อสมบัติเชิงกลที่ได้
6. สรุปผลการทดลองและความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ด้วยการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา
2. สามารถผลิตพอลิเมอร์ผสมที่มีแนวโน้มในการย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ
3. สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผสม (PLA, PP), สารเพิ่มความเข้ากันได้ (PP-g-MAH) และสารริเริ่มปฏิกิริยา (DCP) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม
4. สามารถเลือกอัตราส่วนผสมที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลตามที่ต้องการได้

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นฐานข้อมูลประกอบงานวิจัย
2. กำหนดหัวข้อและขอบเขตให้กับงานวิจัยของตนเอง
3. ทำการผสมและขึ้นรูปพอลิเมอร์ตามการออกแบบการทดลองที่วางแผนไว้
5. ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปได้
6. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
7. สรุปผลจากการทดลองและความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์
8. ทำการศึกษาขั้นพื้นฐานเพิ่มเติมและดำเนินการทดสอบทางพื้นฐานวิทยา
9. วิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการทดลองทั้งหมด
10. ศึกษาและทดลองการย่อยสลายทางชีวภาพ
11. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์และนำเสนอผลงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย ความหมายของพอลิเมอร์ ประเภทของพอลิเมอร์ การสังเคราะห์พอลิเมอร์ การสลายตัวของพอลิเมอร์ สารเติมแต่งพอลิเมอร์ ความรู้พื้นฐานพอลิเมอร์ผสม การเตรียมพอลิเมอร์ในการขึ้นรูป เทคนิคการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังมีกล่าวถึงผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์เล็กน้อย โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือพอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิโพรพิลีน (PP) โดยในส่วนของ การทดลองนั้นจะนำการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ และหัวข้อสุดท้ายของบทนี้คืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไป

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเมอร์

โดยความรู้ทั่วไปของพอลิเมอร์จะแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

2.1.1 ความหมายของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ (Polymer) เป็นคำที่มาจากภาษากรีก คำว่า “poly” แปลว่าหลาย ส่วนคำว่า “meres” แปลว่าส่วน รวมกันจึงมีความหมายว่า สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีมวลโมเลกุลสูง ซึ่งเกิดจากโมเลกุลพื้นฐานที่เรียกว่ามอนอเมอร์ (Monomer) จำนวนมากมาต่อกันเป็นหน่วยซ้ำๆ (Repeating unit) เชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยพอลิเมอร์บางชนิดอาจเกิดจากมอนอเมอร์ที่เป็นชนิดเดียวกันทั้งหมดมาเชื่อมต่อกันหรือเกิดขึ้นจากมอนอเมอร์ที่ต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อกันก็ได้

ในปัจจุบันพอลิเมอร์ได้เข้ามามีบทบาทต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์และกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆเป็นอย่างมาก โดยตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางและมีการใช้ประโยชน์กันมาก เช่น พลาสติก เส้นใยสังเคราะห์และยางพารา เป็นต้น

2.1.2 ประเภทของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์สามารถแบ่งได้หลายแบบ โดยขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา ดังต่อไปนี้

(1) พิจารณาตามแหล่งกำเนิด

เป็นวิธีการพิจารณาโดยดูจากแหล่งกำเนิดของพอลิเมอร์ชนิดนั้น สามารถจำแนกได้ ดังนี้

(ก) พอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ สามารถพบได้ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยพอลิเมอร์ธรรมชาติเหล่านี้เป็นสิ่งที่สิ่งมีชีวิตผลิตขึ้นโดยอาศัยกระบวนการทางเคมีต่างๆที่เกิดขึ้นภายในเซลล์และมีการเก็บสะสมไว้ใช้ประโยชน์ตามส่วนต่างๆ

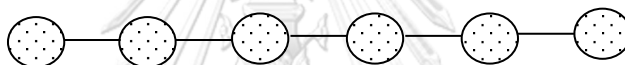
ดังนั้นพอลิเมอร์ธรรมชาติจึงแตกต่างกันไปตามชนิดของสิ่งมีชีวิตและตำแหน่งที่พบในสิ่งมีชีวิต เช่น โปรตีน แป้ง ยางธรรมชาติ เส้นใยพืช เซลลูโลส ไคติน เป็นต้น

(ข) พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์โดยมนุษย์ด้วยวิธีการนำมอนอเมอร์จำนวนมากมาทำปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างมอนอเมอร์และกลายเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์ โดยสารมอนอเมอร์ที่มักใช้ในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันดิบและการแยกแก๊สธรรมชาติ เช่น เอทิลีน สไตรีน โพรพิลีน ไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น

(2) พิจารณาตามมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ

เป็นวิธีการพิจารณาโดยดูจากชนิดของมอนอเมอร์ที่มีพันธะร่วมกัน สามารถจำแนกได้ ดังนี้

(ก) โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมดมาเกิดพันธะร่วมกัน (Repeating unit = 1) เกิดเป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ตัวอย่างโฮโมพอลิเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีน, พอลิไวนิลคลอไรด์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโฮโมพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน

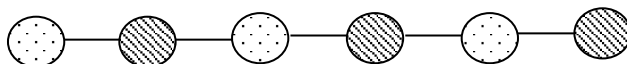
(ข) โคพอลิเมอร์ (Copolymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์มากกว่า 1 ชนิดขึ้นไปเกิดพันธะร่วมกัน (> 1 repeating unit) เช่น โปรตีน ซึ่งเกิดจากกรดอะมิโนที่มีลักษณะต่างๆมาเชื่อมต่อกัน เป็นต้น โดยลักษณะการเรียงตัวของหน่วยซ้ำกันในโคพอลิเมอร์ (Repeating unit) มีดังนี้

- โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (Random copolymers) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์มากกว่า 1 ชนิดขึ้นไปจัดเรียงตัวสลับกันอย่างสุ่ม ไม่เป็นระเบียบและไม่มีแบบแผนที่แน่นอน เกิดเป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.2



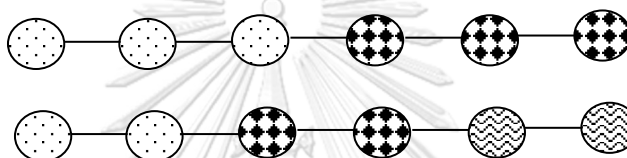
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม

- โคพอลิเมอร์แบบสลับ (Alternating copolymers) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์มากกว่า 1 ชนิดขึ้นไปจัดเรียงตัวสลับกันอย่างเป็นระเบียบและมีแบบแผนที่แน่นอน เกิดเป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.3



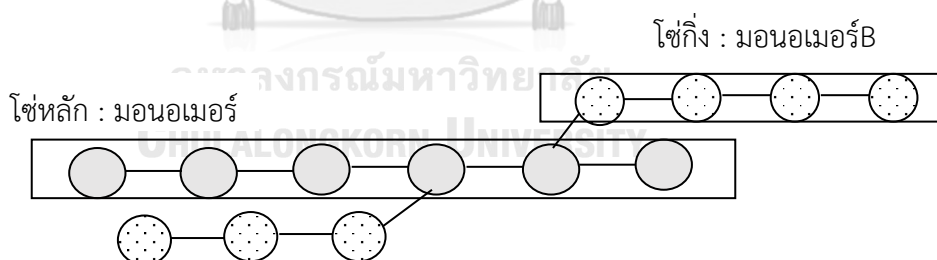
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบสลับ

- โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block copolymers) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์มากกว่า 1 ชนิดขึ้นไปจัดเรียงตัวเป็นแบบกลุ่มๆสลับกันไปอย่างเป็นระเบียบ เกิดเป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบบล็อก

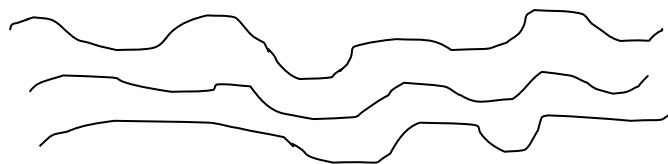
- โคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ (Graft copolymers) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์มากกว่า 1 ชนิดขึ้นไปจัดเรียงตัวโดยมีมอนอเมอร์ 1 ชนิดเป็นสายโซ่หลัก และมอนอเมอร์อื่นๆ จะเป็นสายโซ่กิ่งแตกออกไปจากโซ่หลัก เกิดเป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบกราฟท์

(3) พิจารณาตามโครงสร้างของพอลิเมอร์ สามารถจำแนกได้ ดังนี้

(ก) พอลิเมอร์แบบเส้น (Chain length polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์สร้างพันธะต่อกันเป็นสายยาว ดังรูปที่ 2.6 ทำให้โซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ จึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะแข็ง ชุ่มเหนียวกว่าโครงสร้างอื่นๆ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์, พอลิสไตรีน



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้น

(ข) พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์สร้างพันธะต่อกันแบบมีกิ่งก้านสาขา ทำให้โซ่พอลิเมอร์มีทั้งโซ่สั้น(กิ่ง)และโซ่ยาว(โซ่หลัก) ซึ่งกิ่งที่แตกออกจากโซ่หลักนั้นส่งผลให้โครงสร้างของพอลิเมอร์จัดเรียงกันไม่เป็นระเบียบ ไม่สามารถจัดเรียงตัวชิดกันได้ พอลิเมอร์ชนิดนี้จึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ มีความยืดหยุ่น โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.7 ตัวอย่างพอลิเมอร์แบบกิ่ง เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบกิ่ง

(ค) พอลิเมอร์แบบร่างแห (Crosslinking-polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ต่อเชื่อมกันเป็นร่างแห โดยมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรงแต่เปราะหักง่าย เช่น เบกาไลต์, เมลามีน



รูปที่ 2.8 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแห

(ง) พอลิเมอร์แบบขั้นบันได (Ladder polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ต่อเชื่อมกันเป็นวงปิดในสายโซ่หลัก โดยมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบขั้นบันได

ดังนั้นเมื่อโครงสร้างโมเลกุลต่างกัน การจัดเรียงของมอนอเมอร์ในโมเลกุลที่ต่างกัน จะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ให้แตกต่างกันแม้จะเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene; PE) ดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าสมบัติของพอลิเมอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ในโมเลกุลที่ต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมบัติของการจัดเรียงตัวมอนอเมอร์ในโมเลกุลที่ต่างกันของพอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนแบบเส้นตรง(PE)	พอลิเอทิลีนแบบกิ่ง(LDPE)
โมเลกุลจัดเรียงตัวชิดกัน	โมเลกุลจัดเรียงตัวห่างกัน
ความหนาแน่นสูง	ความหนาแน่นต่ำ
ความเป็นผลึกสูง	ความเป็นผลึกต่ำ
จุดหลอมเหลวสูง	จุดหลอมเหลวต่ำ

(4) พิจารณาตามการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อน สามารถจำแนกได้ ดังนี้

(ก) เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (Thermoplastic polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวได้เมื่อทำให้เย็นลง (สามารถเปลี่ยนรูปกลับไปกลับมาได้ระหว่างของแข็งและของเหลว) โดยสามารถให้ความร้อนซ้ำได้หลายครั้ง จึงเป็นที่นิยมในการนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกต่างๆ เช่น การฉีดยา, การอัดรีด แต่ยังมีข้อควรระวังในการใช้งานคือ พอลิเมอร์ที่นำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนหลายครั้งสามารถเสื่อมสภาพได้ จึงไม่ควรให้ความร้อนซ้ำเกินอุณหภูมิเสื่อมสภาพ (Degradation temperature) ของพอลิเมอร์นั้น โดยพลาสติกส่วนใหญ่จะจัดอยู่ในประเภทนี้ ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติก เช่น

- อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (acrylonitrile butadiene styrene; ABS)
- พอลิอะคริเลต (polyacrylates; acrylic)
- พอลิเอไมด์ (polyamide; PA or nylon)
- พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (polybutylene terephthalate; PBT)

- พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate; PET)
- พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate; PC)
- พอลิเอสเทอร์ (polyester)
- พอลิเอทิลีน (polyethylene; PE)
- พอลิโพรพิลีน (polypropylene; PP)
- พอลิสไตรีน (polystyrene; PS)
- พอลิยูรีเทน (polyurethane; PU)
- พอลิไวนิลแอสีเตต (polyvinyl acetate; PVA)
- พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride; PVC)
- พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (polyvinylidene chloride; PVDC)
- สไตรีน-อะครีโลไนไตรล์ (styrene-acrylonitrile; SAN)

โดยเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์เหล่านี้ มีการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างการนำไปใช้งานของเทอร์โมพลาสติกชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการนำไปใช้งานของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์

ชนิดของพอลิเมอร์	การใช้งาน
พอลิเอทิลีน (PE)	ถุง, ภาชนะ, फिल्मถ่ายภาพ, ของเล่นเด็ก
พอลิโพรพิลีน (PP)	โต๊ะ, แก้ว, เชือก, พรหม, บรรจุภัณฑ์อาหาร, ชิ้นส่วนรถยนต์
พอลิสไตรีน (PS)	โฟม, อุปกรณ์ไฟฟ้า, เลนส์, อุปกรณ์กีฬา, เครื่องมือสื่อสาร
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	กระดาษติดผนัง, ภาชนะบรรจุสารเคมี, รองเท้า, กระเป๋าหนังเทียม, กระเป๋าปุ้พุ่น, ฉนวนหุ้มสายไฟ, ท่อพีวีซี
ไนลอน (nylon)	เครื่องนุ่งห่ม, ถังน่องสตรี, พรหม, อวน, แห
พอลิเอสเทอร์ (polyester)	เส้นใยผ้า

(ข) เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (Thermosetting polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถคืนสภาพเดิมได้หลังจากนำไปขึ้นรูปทางความร้อนและปฏิกิริยาเคมีต่างๆเพียงครั้งเดียว (โดยทั่วไปที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส) ไม่อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ เมื่อเย็นตัวลงจะแข็งมาก ดังนั้นพอลิเมอร์ชนิดนี้จะสามารถขึ้นรูปได้เพียงครั้งเดียว การขึ้นรูปเทอร์โมเซตติงพลาสติกจึงมักใช้การขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์/แม่แบบ (Mould) หรือสารยึดเกาะ (Adhesive) โดยพอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างจับกันแน่นเป็นร่างแหและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก

ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมเซตติง เช่น

- พอลิเอไมด์ (Polyamides)
- เบกาไลต์ (Bakelite, a phenol-formaldehyde resin)
- ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์โฟม (Urea-formaldehyde foam)
- เมลามีน (Melamine resin)
- อีพอกซี (Epoxy resin)

โดยเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์เหล่านี้ มีการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งเป็นตัวอย่างการนำไปใช้งานของเทอร์โมพลาสติกชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการนำไปใช้งานของเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์

ชนิดของพอลิเมอร์	การใช้งาน
พอลิยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (poly urea-formaldehyde)	เต้าเสียบไฟฟ้า, วัสดุเชิงวิศวกรรม
อีพอกซี (epoxy)	กาว, สี, สารเคลือบผิวหน้าวัสดุ
พอลิเอสเทอร์ (polyester)	ตัวถังรถยนต์, ตัวถังเรือ, ใ้บุภายในเครื่องบิน
พอลิเอไมด์ (polyamides)	แผงวงจรไฟฟ้า, ตัวเครื่องบินสมัยใหม่

โดยพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้จะมีข้อแตกต่างกันบางประการ ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 2.4

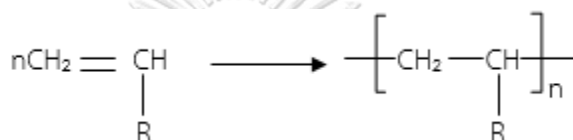
ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์และเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์

เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์	เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์
มอนอเมอร์มีตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ต่อ 1 โมเลกุล (functionality) เท่ากับ 2 ตำแหน่ง	มอนอเมอร์มีตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ต่อ 1 โมเลกุล (functionality) มากกว่า 2 ตำแหน่ง และมีมอนอเมอร์อย่างน้อย 2 ชนิด
เป็นพอลิเมอร์แบบเส้น หรือแบบกิ่งสั้นๆ	เป็นพอลิเมอร์แบบร่างแห
เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมเหลวและแข็งตัวได้เมื่อทำให้เย็นลง (เปลี่ยนสภาพกลับไปกลับมาได้)	เมื่อได้รับความร้อนจะแข็งตัวและแข็งตัวมากเมื่อทำให้เย็นลง (เปลี่ยนสภาพกลับไปกลับมาไม่ได้)
ต้องทำให้เย็นก่อนนำออกจากแม่แบบ	ไม่ต้องรอให้เย็นก่อนนำออกจากแม่แบบ
นำกลับมารีไซเคิลได้	นำกลับมารีไซเคิลด้วยการหลอมเหลวไม่ได้

2.1.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์

พอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) คือ กระบวนการเกิดสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จากสารที่มีโมเลกุลเล็ก(มอนอเมอร์) โดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมี 2 ประเภท ดังนี้

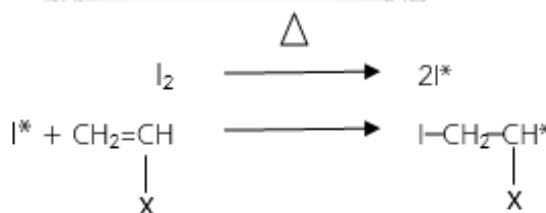
1. พอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว (Chain/addition polymerization) คือ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดจากมอนอเมอร์ชนิดเดียวที่ผูกพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอนมารวมตัวกันจนเกิดเป็นพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวเท่านั้น เช่น เอทิลีน โพรพิลีน ไวนิลคลอไรด์ และสไตรีน โดยมีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาแบบฟรีแรดดิคัล (free radical) หรือแบบไอออนิก (ionic) ก็ได้ ซึ่งจะต้องมีการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา(initiator) เพื่อให้พันธะคู่ของมอนอเมอร์เกิดเป็นแรดดิคัลและเข้าทำปฏิกิริยาต่อไปซึ่งปฏิกิริยาจะเป็นไปตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว

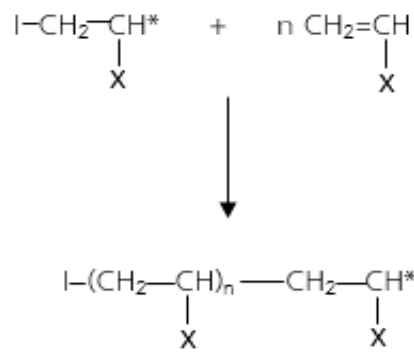
โดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่จะประกอบด้วยปฏิกิริยาทั้งหมด 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้ [3]

(I) Initiation (ขั้นเริ่มต้น) คือขั้นตอนที่สารริเริ่มปฏิกิริยาแตกตัวให้หมู่ว่องไวต่อปฏิกิริยา(radicals) จากนั้นหมู่ว่องไวต่อปฏิกิริยาจะเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะคู่ของมอนอเมอร์ เพื่อเกิดเป็นมอนอเมอร์แรดดิคัลซึ่งปฏิกิริยาเคมีจะเป็นไปตามรูปที่ 2.11



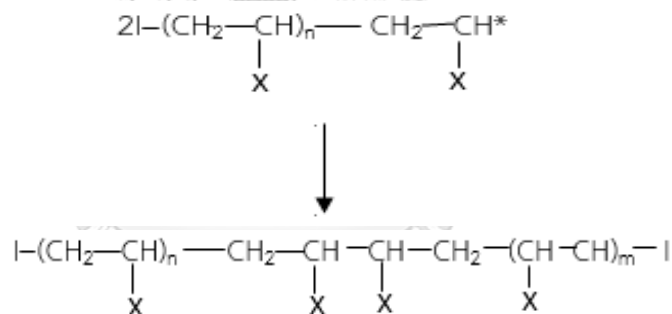
รูปที่ 2.11 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ในขั้นเริ่มต้น

(II) Propagation (ขั้นแผ่ขยาย) คือขั้นตอนที่มอนอเมอร์เรดิคัลเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์เกิดเป็นพอลิเมอร์เรดิคัล ซึ่งปฏิกิริยาจะเป็นไปตามรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ในขั้นแผ่ขยาย

(III) Termination (ขั้นยุติ) คือขั้นตอนที่พอลิเมอร์เรดิคัลเข้าทำปฏิกิริยารวมตัวกัน (Combination) ซึ่งปฏิกิริยาจะเป็นไปตามรูปที่ 2.13



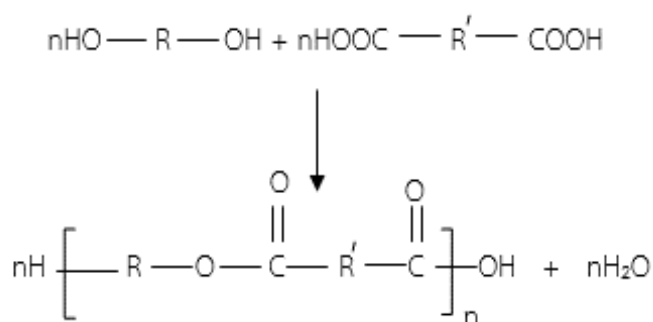
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.13 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ในขั้นยุติ

ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัวนั้นมีหลากหลาย ดังตารางที่ 2.5 ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว

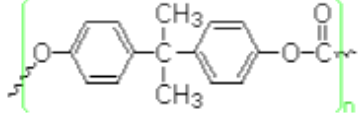
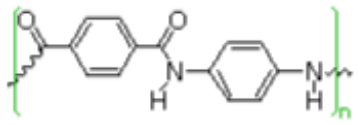
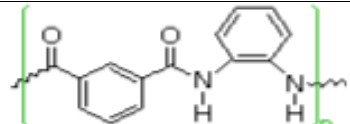
ชนิดพอลิเมอร์	มอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ	โครงสร้าง
พอลิเอทิลีน(PE)	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$ (เอทิลีน)	$-\text{[CH}_2-\text{CH}_2\text{]}_n-$
พอลิโพรพิลีน(PP)	$\text{CH}_2=\text{CHCH}_3$ (โพรพิลีน)	$-\text{[CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)\text{]}_n-$
พอลิไวนิลคลอไรด์(PVC)	$\text{CH}_2=\text{CHCl}$ (ไวนิลคลอไรด์)	$-\text{[CH}_2-\text{CHCl}\text{]}_n-$
พอลิสไตรีน(PS)	$\text{CH}_2=\text{CHC}_6\text{H}_5$ (สไตรีน)	$-\text{[CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)\text{]}_n-$
พอลิอะคริโลไนไตรล์(PAN)	$\text{CH}_2=\text{CHCN}$ (อะคริโลไนไตรล์)	$-\text{[CH}_2-\text{CHCN}\text{]}_n-$
พอลิเตตระฟลูออไรด์เอทิลีน (PTFE)	$\text{CF}_2=\text{CF}_2$ (เตตระฟลูออไรด์เอทิลีน)	$-\text{[CF}_2-\text{CF}_2\text{]}_n-$
พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CO}_2\text{CH}_3$ (เมทิลเมทาคริเลต)	$-\text{[CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)\text{CO}_2\text{CH}_3\text{]}_n-$

2. พอลิเมอร์ไรเซชันแบบขั้นหรือแบบควบแน่น (Step/condensation polymerization) คือปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดจากมอนอเมอร์ 2 ชนิดขึ้นไปที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ในโมเลกุลตัวเองมารวมตัวกันจนเกิดเป็นพอลิเมอร์และสารโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำ ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ เมทานอล เกิดขึ้นเป็นผลพลอยได้ของปฏิกิริยา โดยมอนอเมอร์ที่สำคัญในการทำปฏิกิริยา เช่น กลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก, กลุ่มอะมีนและกลุ่มอะซิดแอนไฮไดรด์ เป็นต้น แต่ถ้ามอนอเมอร์ที่ใช้ในปฏิกิริยามีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 2 หมู่โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ได้จะเป็นพอลิเมอร์แบบกิ่งและกิ่งก้านสาขานั้นอาจเกิดการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลหรือกับโมเลกุลอื่น ทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์เชื่อมโยง (Crosslinked polymer) หรืออาจเกิดเป็นพอลิเมอร์แบบร่างแห (Network polymer) ซึ่งปฏิกิริยาจะเป็นไปตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบขั้นหรือแบบควบแน่น

ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบขั้นหรือแบบควบแน่นนั้นมีหลากหลาย ดังตารางที่ 2.6
 ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบขั้นหรือแบบควบแน่น

ชนิดพอลิเมอร์	มอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ	โครงสร้าง
พอลิเอสเตอร์ (polyester)	$\text{HO}_2\text{C}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}_2\text{H}$ (diacid) และ $\text{HO}-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{OH}$ (diol)	$\sim[\text{CO}(\text{CH}_2)_4\text{CO}-\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{O}]_n\sim$
พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate)	$(\text{HO}-\text{C}_6\text{H}_4)_2\text{C}(\text{CH}_3)_2$ (Bisphenol A) และ $\text{X}_2\text{C}=\text{O}$ (โดย X = OCH_3 หรือ Cl)	
พอลิเอไมด์ (polyamide; Nylon 6,6)	$\text{HO}_2\text{C}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}_2\text{H}$ (diacid) และ $\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_2$ (diamine)	$\sim[\text{CO}(\text{CH}_2)_4\text{CO}-\text{NH}(\text{CH}_2)_6\text{NH}]_n\sim$
พอลิเอไมด์ (polyamide; Kevlar)	para $\text{HO}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2\text{H}$ (diacid) และ para $\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}_2$ (diamine)	
พอลิเอไมด์ (polyamide; Nomex)	meta $\text{HO}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2\text{H}$ และ meta $\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}_2$	

โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาและพอลิเมอร์ที่ได้จะมีความแตกต่างกันตามปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันทั้ง 2 ประเภท

แบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว (chain/addition polymerization)	แบบขั้นหรือแบบควบแน่น (step/condensation polymerization)
การเติบโตของสายโซ่เกิดจากการเติมอย่างรวดเร็วของมอนอเมอร์ที่เข้าทำที่ตำแหน่งว่องไวต่อปฏิกิริยา(reactive sites)เท่านั้น	การเติบโตของสายโซ่เกิดจากการรวมตัวกันระหว่างโมเลกุลใดๆก็ได้ในระบบ(มอนอเมอร์, โอลิโกเมอร์)
การเติบโตจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว	การเติบโตจะเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปช้าๆ
ความเข้มข้นของมอนอเมอร์จะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ	ความเข้มข้นของมอนอเมอร์จะลดลงอย่างรวดเร็ว
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย(\bar{M}_n) อยู่ระหว่าง 10^5 - 10^6	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย(\bar{M}_n) อยู่ระหว่าง 40,000-50,000
ไม่เกิดสารโมเลกุลเล็กเป็นผลพลอยได้ของปฏิกิริยา	เกิดสารโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำ ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ เมทานอล เกิดขึ้นเป็นผลพลอยได้ของปฏิกิริยา
เกิดปฏิกิริยาที่พันธะคู่ของมอนอเมอร์	เกิดปฏิกิริยาที่ปลายสายที่มีหมู่ฟังก์ชัน

นอกจากนี้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดจากของผสมระหว่างมอนอเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป จะเรียกว่า Copolymerization โดยสมบัติของโคพอลิเมอร์ที่ได้จะขึ้นกับ (1) ธรรมชาติและปริมาณของมอนอเมอร์ (2) การกระจายตัวของหน่วยมอนอเมอร์แต่ละหน่วยตลอดความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ และสามารถจำแนกได้ 4 ประเภท คือ (1) Random copolymer (2) Alternating copolymer (3) Block copolymer (4) Graft copolymer อย่างที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.1.2.2 การพิจารณาประเภทของพอลิเมอร์ตามมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบนั่นเอง

2.1.4 การสลายตัวของพอลิเมอร์

การสลายตัวของพอลิเมอร์ เกิดจากการที่น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งอาจถูกกระตุ้นด้วยความร้อน รังสียูวี ออกซิเจน โอโซน หรือสารอื่นๆ โดยสำหรับพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งๆอาจเกิดการสลายตัวได้ทั้ง 2 แบบหรือเกิดแค่เพียงแบบใดแบบหนึ่งก็ได้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

(1) Random degradation เป็นการสลายตัวที่เกิดจากการตัดสายโซ่ (Scission) แบบสุ่ม เกิดที่ตำแหน่งใดก็ได้ในโมเลกุล จึงทำให้ได้หน่วยย่อยที่หลากหลายทั้งโมเลกุลเล็กและใหญ่ โดยหน่วยย่อยหลังจากที่เกิดจากการสลายตัวจะมีทั้งมอนอเมอร์ ไดเมอร์ ไตรเมอร์หรือโอลิเมอร์ และกลไกการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นเหมือนปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบขั้น ซึ่งพอลิเมอร์ส่วนใหญ่นิยมเกิดการสลายตัวประเภทนี้ เช่น การสลายตัวโดยการเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ด้วยกรด (Acid-catalyzed homogeneous degradation) ของเซลลูโลส, การแยกสลายด้วยโอโซน (Ozonolysis) ของยาง

(2) Chain depolymerization เป็นการสลายตัวที่เกิดจากการหลุดออกทีละตัวของมอนอเมอร์ที่เริ่มเกิดจากปลายสายโซ่ หรืออาจเรียกว่า unzipping โดยหน่วยย่อยหลังจากที่เกิดจากการสลายตัวจะมีเพียงมอนอเมอร์อย่างเดียว และกลไกการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นเหมือนปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว ซึ่งพอลิเมอร์ส่วนน้อยที่จะเกิดการสลายตัวประเภทนี้ เช่น การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

2.1.5 สารเติมแต่งพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่ปราศจากสารเติมแต่ง เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูป มักจะประสบปัญหาจากการเสื่อมสภาพหรือการเกิดสี ดังนั้นการใส่สารเติมแต่งลงไปจะช่วยลดปัญหาดังกล่าว โดยการเติมสารเติมแต่งจะช่วยในเรื่องต่างๆ ดังนี้

- (1) เพื่อปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์ให้ดีขึ้นและคงทนต่อการใช้งาน เนื่องจากพอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติที่ไม่เพียงพต่อการใช้งาน
- (2) เพื่อเป็นตัวช่วยในกระบวนการขึ้นรูปให้มีประสิทธิภาพขึ้นหรือง่ายขึ้น เช่น เพิ่มความสามารถในการไหลให้แก่พอลิเมอร์ หรือ เพิ่มความทนความร้อนให้แก่พอลิเมอร์ เพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้
- (3) เพื่อลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากสารเติมแต่งบางชนิดสามารถทำหน้าที่เป็นเนื้อสารแทนตัวพอลิเมอร์ได้ จึงทำให้ไม่ต้องใช้เนื้อพอลิเมอร์ในปริมาณมากเพื่อการผลิต
- (4) เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้สารเติมแต่งอีกชนิดหนึ่ง

โดยสารเติมแต่งในพลาสติกควรมีสมบัติ ดังนี้

- (1) ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- (2) มีความเสถียรในสถานะขึ้นรูป โดยสามารถทนความร้อนในระหว่างการขึ้นรูปได้
- (3) มีความเสถียรในสถานะการใช้งาน โดยไม่ระเหยหรือเสียรูปเมื่อนำไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์
- (4) ไม่มีความเป็นพิษ และไม่เกิดรสชาติหรือกลิ่น
- (5) ไม่เกิดการคายสี (Bleeding) และไม่เกิดการเป็นฝ้า (Blooming)
- (6) ไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียไป

หมายเหตุ: การคายสี (Bleeding) คือการที่สารเติมแต่งสามารถละลายได้ทั้งในพอลิเมอร์และวัสดุข้างเคียงที่สัมผัสกัน(และมีสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้) จึงทำให้วัสดุข้างเคียงนั้นเกิดรอยสีหรือรอยเปื้อน ซึ่งเกิดจากการที่สารเติมแต่งในพอลิเมอร์สามารถละลายในตัววัสดุนี้ได้ด้วย และการเป็นฝ้า (Blooming) คือการที่สารเติมแต่งบางส่วนเกิดการแยกตัวออกจากพอลิเมอร์และเคลื่อนไปสะสมที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ เนื่องจากความสามารถในการเข้ากันของสารเติมแต่งนั้นลดลงหลังจากที่ทิ้งให้เย็นตัวหลังการขึ้นรูป ทั้งนี้ในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเมอร์นั้นจะมีการใช้สารเติมแต่งพอลิเมอร์แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับว่าต้องการปรับปรุงสมบัติในด้านใด โดยสารเติมแต่งพอลิเมอร์สามารถจำแนกได้ ดังนี้

- (1) สารดัดแปรสมบัติเชิงกล เช่น สารเสริมแรง (Fillers) สารเพิ่มความทนแรงกระแทก (Impact modifiers) สารก่อผลึก (Nucleating agents) พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) และเส้นใยเสริมแรง (Reinforcing fibers) เป็นต้น
- (2) สารดัดแปรสมบัติที่พื้นผิว เช่น สารกันติด (Anti-blocking agents) สารกันไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic agents) สารประสาน (Coupling agents) เป็นต้น
- (3) สารดัดแปรสมบัติทางเคมี เช่น สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidants) สารป้องกันจุลินทรีย์ (Antimicrobial agents) สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants) สารคงสภาพทางความร้อน (Heat stabilizers) และสารคงสภาพทางยูวี (UV stabilizers) เป็นต้น
- (4) สารช่วยในกระบวนการขึ้นรูป เช่น สารพู่ (Blowing agent) สารเชื่อมขวาง (Crosslinking agents) สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilizer) และสารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นต้น

2.1.6 พอลิเมอร์ผสม

การทำพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) [4] เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ โดยนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่านั้นมาทำการผสมกันในสถานะของไหล เช่น สารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) ให้รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเป็นการปรับปรุงที่ไม่สามารถใช้สารเติมแต่ง (Additives) ช่วยได้เพียงอย่างเดียว จึงต้องใช้พอลิเมอร์ผสมกันและมีสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizers) เป็นตัวช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น ดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการทำพอลิเมอร์ผสมที่ดี คือ วิธีการผสม เครื่องมือและเทคนิคในการผสมพอลิเมอร์ ให้ผสมเข้ากันได้ดี ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมสมบัติของพอลิเมอร์ผสม โดยการนำพอลิเมอร์ผสมเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นการนำสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ ซึ่งวัตถุประสงค์ในการทำพอลิเมอร์ผสม มีดังนี้

- เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นแต่มีราคาที่ถูกลง
- เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ
- เพื่อทำให้สมบัติเด่นของพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น
- เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบของการผสมตามที่ลูกค้าต้องการ
- เพื่อสามารถนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ได้ในกระบวนการอุตสาหกรรม
- เพื่อเป็นการชดเชยข้อเสียของพอลิเมอร์หนึ่ง ด้วยข้อดีของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

2.1.6.1 คำจำกัดความเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม คือการนำพอลิเมอร์อย่างน้อยสองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นหรือเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ โดยพอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้ดีมีเพียงวัฏภาคเดียวนั้นคือ miscible polymer blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันไปจนถึงระดับโมเลกุลซึ่งมีพลังงานอิสระของการผสม (Free energy of mixing, ΔG_m) มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้จะมีหลายวัฏภาคนั้นคือ immiscible polymer blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีพลังงานอิสระของการผสม (ΔG_m) มีค่ามากกว่าศูนย์ และพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้บางส่วน แต่ยังไม่ถือว่าเป็นวัฏภาคเดียวกันแต่มีการยึดติดกันระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial adhesion) ที่ดีโดยไม่คำนึงถึงพลังงานอิสระของการผสม (ΔG_m)

ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นวัฏภาคเดียวกันจึงต้องมีการดัดแปรผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ โดยการเติมพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) หรือ (1) สารดัดแปรพื้นผิว (Coupling agents) หรือ (2) สารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizers) เพื่อให้เกิดการยึดติดกันระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมที่ดีขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงดังลำดับต่อไปนี้

(1) สารดัดแปรพื้นผิวหรือสารประสาน (Coupling agents) จะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างวัฏภาคโดยการสร้างพันธะที่แข็งแรง ซึ่งทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคที่ดีขึ้น ดังนั้นโครงสร้างของสารที่นำมาเป็นสารดัดแปรพื้นผิวนี้จะต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยาได้ทั้งกับพอลิเมอร์และพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์และสารเสริมแรง/เส้นใยเสริมแรงเพื่อให้เกิดการกระจายตัวและยึดเกาะได้ดีกับพอลิเมอร์ เนื่องจากสารเสริมแรง/เส้นใยเสริมแรงส่วนใหญ่จะมีขั้ว (Hydrophilic) ในขณะที่พอลิเมอร์จะไม่มีขั้ว (hydrophobic) ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำ ต้องมีการเติม Coupling agents

(2) สารเพิ่มความเข้ากันได้หรือสารช่วยผสม (Compatibilizers) คือพอลิเมอร์หรือสารที่มีพอลิเมอร์ร่วมซึ่งใช้ในการเติมลงไปพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นวัฏภาคเดียว เพื่อดัดแปรพื้นผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ เพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกตัวได้ ทำให้สมบัติความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

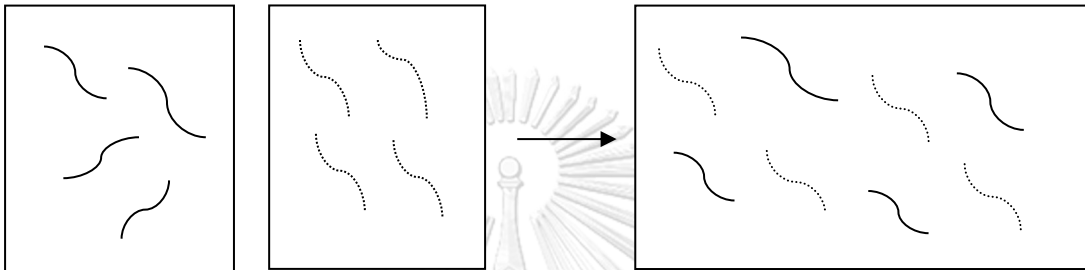
2.1.6.2 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (Miscibility) ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการผสมกันแล้วเกิดระบบวัฏภาคเดี่ยวเนื้อเดียว (Homogeneous single-phase system) โดยจะมีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ซึ่งจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ องค์ประกอบที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (Molecular miscibility) ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความเป็นผลึกซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ ความมีขั้วคล้ายกัน และพันธะไฮโดรเจนร่วมกัน โดยความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดที่เข้ากันได้ในระดับโมเลกุลและมีประโยชน์ต่อทางการค้า อย่างไรก็ตามในระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ที่พบในทางการค้าจะเป็นระบบที่เข้ากันไม่ได้ถึงในระดับโมเลกุล (Immiscible) คือเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันแต่ไม่เป็นวัฏภาคเดียวกัน จึงทำให้เกิดการแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (Multi-phase system) จึงเป็นเหตุให้เกิดการปรับปรุงระบบการผสมเพื่อให้แต่ละวัฏภาคเกิดการยึดเกาะกันดีขึ้นซึ่งเป็นการรวมสมบัติที่ดีของแต่ละวัฏภาคและเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว

2.1.6.3 สัมพันธวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

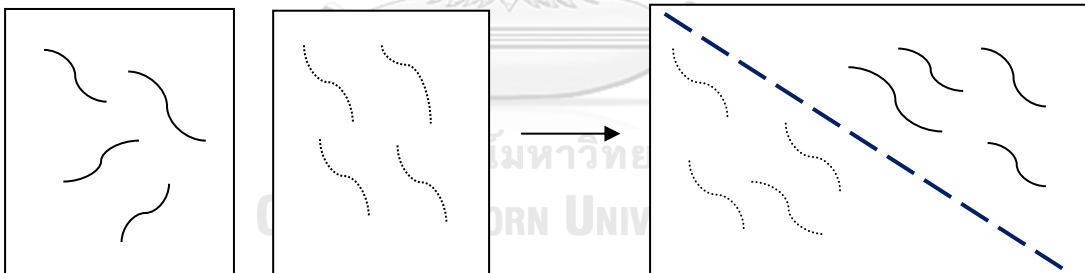
โดยทั่วไปสัมพันธวิทยาของพอลิเมอร์ผสมสามารถจำแนกออกตามความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ดังนี้

(1) Miscible คือพอลิเมอร์ผสมที่มีความสามารถในการเข้ากันได้ดี มีวัฏภาคเดียวไปจนถึงระดับโมเลกุล โดยลักษณะของสัมพันธวิทยาจะคล้ายกับโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (random copolymer) การที่พอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดี เนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่นำมาผสม



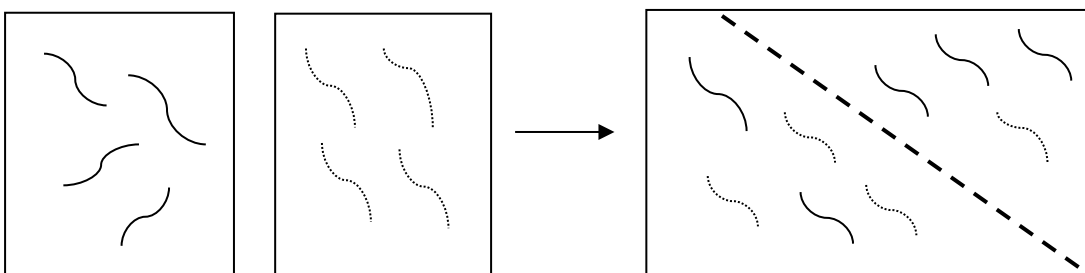
รูปที่ 2.15 สัมพันธวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้ดี

(2) Immiscible คือพอลิเมอร์ผสมที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคแต่ไม่รวมเป็นวัฏภาคเดียว ซึ่งเป็นสัมพันธวิทยาที่พบได้มากในพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยพื้นฐานต่างๆ เช่น ความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด สมบัติความมีขี้้ว สมบัติการละลาย เป็นต้น



รูปที่ 2.16 สัมพันธวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีแรงยึดเหนี่ยวแต่ไม่รวมเป็นวัฏภาคเดียวกัน

(3) Partially miscible คือพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีบางส่วนและแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.17 สัมพันธวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีบางส่วน

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมนั้นจะมีอิทธิพลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกล จากสัณฐานวิทยาแบบ Miscible และ Partially miscible จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวและการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์ผสมนั้นไม่ดี ทำให้เกิดรอยแยกหรือรอยตำหนิระหว่างวัฏภาค ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นในการผสมพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องทราบความสามารถในการเข้ากันของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาทำการผสม ตัวอย่างความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 2.8 ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม

1=ดีมาก 2=ดี 3=อาจเข้ากันได้แต่ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและ 4=ไม่ดี

	HDPE	PP	PS	PVC	PMMA	PET
HDPE		4	4	4	4	4
PP	4		4	4	4	4
PS	4	4		4	4	4
PVC	4	4	4		2	4
PMMA	4	4	4	2		4
PET	4	4	4	4	4	

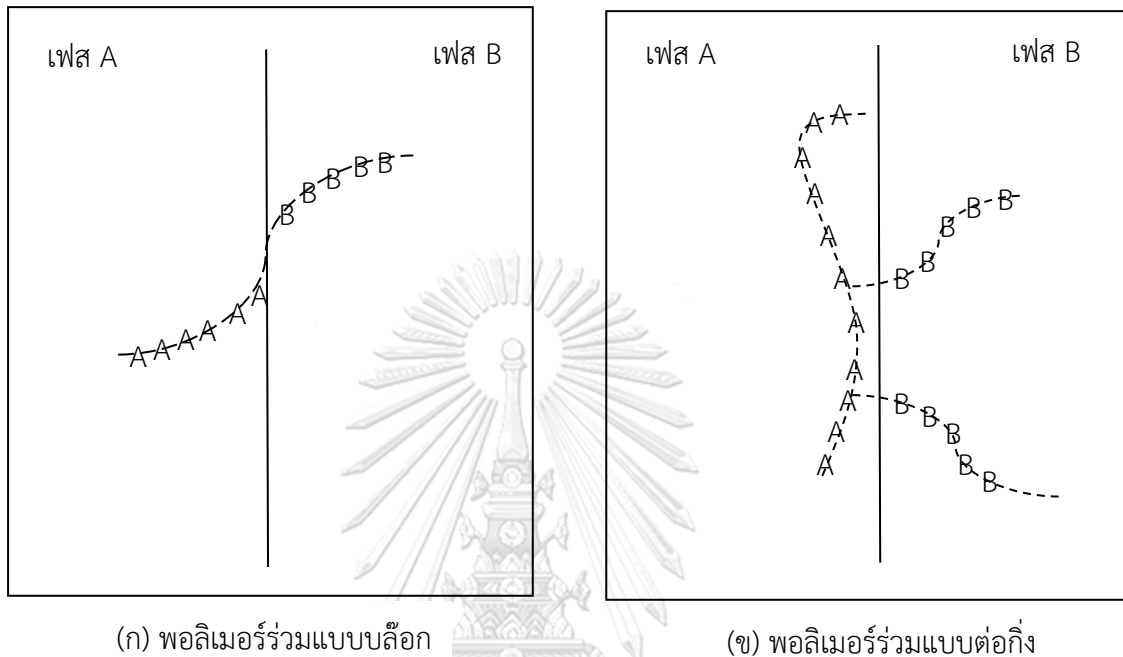
จากตารางที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะเข้ากันได้ไม่ดี ดังนั้นจำเป็นต้องมีวิธีในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน (ซึ่งมีหลายวัฏภาค) ให้มีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสที่ดีขึ้น

2.1.6.4 กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมให้เข้ากันได้

การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizers) เป็นตัวอย่างวิธีการในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้เข้ากันได้มากขึ้น ซึ่งการใส่สารนี้จะส่งผลต่อ

- แรงตึงผิว (Interfacial tension) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวให้มีค่าลดลง ทำให้เกิดการกระจายตัวในวัฏภาคได้ดีขึ้น
- การยึดติด (Adhesion) ระหว่างผิวสัมผัสทำให้เกิดการถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) ได้ดีขึ้น โดยสารเพิ่มความเข้ากันได้จะต้องสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมได้ ซึ่งอาจเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อก (Block copolymers) หรือตอกกิ่ง (Graft copolymers) โดยพอลิเมอร์ร่วมทั้ง 2 แบบนี้จะมีโครงสร้างบางส่วนที่เหมือนกับพอลิเมอร์ผสมเพื่อทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งส่วนโครงสร้างที่เหมือนนั้นจะแทรกซึมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมได้ เช่น เมื่อนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดมาผสมกันคือพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B ส่วนที่เหมือน A จะแทรกซึมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมตรง

ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ A และส่วนที่เหมือน B จะแทรกซึมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมตรงส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ B ดังนั้นวิธีการนี้เป็นการปรับปรุงการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ซึ่งโครงสร้างจะเป็นไปตามรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การปรับปรุงการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส

โดยทั่วไปตามท้องตลาดจะนิยมใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.9 กับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเข้ากันได้ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นได้

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมและสารเพิ่มความเข้ากันได้ในทางการค้า

พอลิเมอร์ผสม	สารเพิ่มความเข้ากันได้
PA6/PE	PE-g-MAH, E-MAA (Zn)
PA6/PP	PP-g-MAH
PBT/PP	E-BA-GMA
PBT/PA	E-BA-GMA
PET/Polyolefin	E-BA-GMA
PC/ABS	E-Acrylate
PC/PBT	E-Acrylate

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้พอลิเมอร์แบบต่อกิ่งมาเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ จึงจะกล่าวถึงวิธีนี้คือการทำให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมโรเรเซชันในระหว่างการผสม (In-situ grafting polymerization)

โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (Graft polymers) [4] หรือพอลิเมโรเรเซชันในระหว่างการผสมที่เรียกว่า Reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยนำองค์ประกอบที่จะใช้ทำการผสมมาตัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดได้ ทั้งนี้ยังสามารถใช้ได้กับกระบวนการผสมแบบต่อเนื่องและกระบวนการผสมแบบต่อเนื่องอีกด้วย เช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ซึ่งจะนิยมใช้ในการผสมแบบต่อเนื่องมากกว่าเพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจากดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่ากลไกที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาในการผสม มีดังนี้

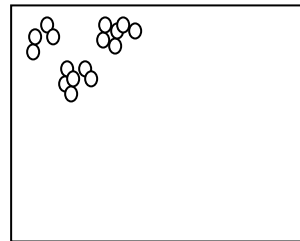
1. เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจถูกกระตุ้นด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ในระหว่างการผสมจึงทำให้เกิดการกราฟต์ของพอลิเมอร์ร่วม
2. เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (Interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน จึงทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก
3. เกิดในกระบวนการที่มีสถานะแรงเฉือนสูง ส่งผลให้แต่ละโมเลกุลเกิดการขาดและรวมกันใหม่เพื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกหรือกราฟต์
4. เกิดปฏิกิริยาได้โดยการเติมสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ลงไปช่วย

2.1.7 การเตรียมพอลิเมอร์ในการขึ้นรูป

โดยทั่วไปแล้วการเตรียมพอลิเมอร์ในการขึ้นรูปนั้นนิยมเตรียมในรูปแบบเม็ด (Pellets) และมีการเติมสารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือเพื่อให้สะดวกและง่ายในการขึ้นรูป เช่น สารเติมแต่ง, สารเสริมแรง, สารหล่อลื่นที่ช่วยในกระบวนการขึ้นรูป โดยพอลิเมอร์ที่มีสารเติมแต่งผสมอยู่จะเรียกว่า คอมปาวด์ ส่วนกรรมวิธีในการผสมสารเติมแต่งให้เข้ากับพอลิเมอร์นั้นเรียกว่า การคอมปาวด์ (Compounding)

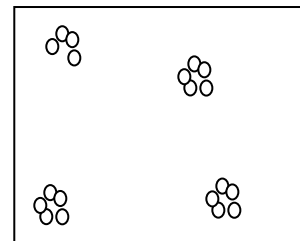
เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีแต่เรซินหรือเม็ดพลาสติกเพียงอย่างเดียวอาจมีสมบัติไม่เหมาะสมหรือไม่เพียงพอต่อการใช้งานหรือความต้องการของผู้บริโภค ดังนั้นจึงใส่ส่วนผสมอื่นที่นอกเหนือจากเม็ดพลาสติกลงไปผสมด้วย คือ สารเติมแต่ง (Additives) ซึ่งการใส่สารเติมแต่งลงไปในนั้นจะต้องมีความเข้ากันได้และกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอในพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สมบัติที่สม่ำเสมอเช่นกัน การกระจายตัวของสารเติมแต่ง (หรือวัสดุอื่นๆ) ที่เป็นส่วนประกอบในเนื้อพอลิเมอร์ จะดูจาก (1) การกระจายตัว (Distributive)

(2) การแตกตัว (Dispersive) เพื่อพัฒนาพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์เชิงประกอบเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมออีกด้วย



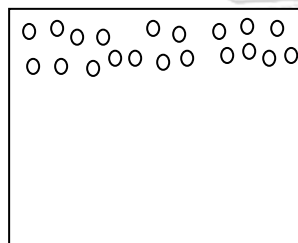
กระจายตัวแย่งและจับเป็นก้อน

Distributive แย่ง และ Dispersive แย่ง



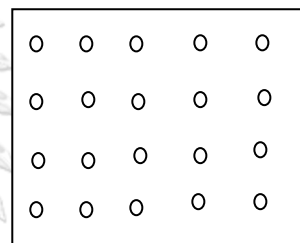
กระจายตัวสม่ำเสมอแต่ยังจับตัวกันเป็นก้อน

Distributive ดี แต่ Dispersive แย่ง



กระจายไม่ตัวสม่ำเสมอแต่ไม่จับตัวกันเป็นก้อน

Distributive แย่ง แต่ Dispersive ดี



กระจายตัวที่สม่ำเสมอและไม่จับตัวกันเป็นก้อน

Distributive ดี และ Dispersive ดี

รูปที่ 2.19 ลักษณะการกระจายตัวและการแตกตัวของสารเติมแต่งในเนื้อพอลิเมอร์

จากรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของสารเติมแต่งในรูปแบบต่างๆที่อาจเกิดขึ้นได้ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับการเลือกใช้กระบวนการหรือเครื่องมือผสมให้เหมาะสมกับลักษณะการกระจายของสารเติมแต่ง เพื่อทำให้เกิดการผสมที่ดีขึ้น ซึ่งอุตสาหกรรมพลาสติกจะคุ้นเคยกับกระบวนการที่เรียกว่า การผสม (Mixing) และการคอมปาวด์ (Compounding) ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

1. การผสม (Mixing) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ช่วยลดความไม่สม่ำเสมอของความเข้มข้นและขนาดของเฟสหรือวัฏภาคการแตกตัว (Dispersed phase) โดยกลไกจะเป็นการคนหรือกวนให้เข้ากัน ซึ่งจะเรียกกลไกแบบนี้ว่า Distributive mixing

2. การคอมปาวด์ (Compounding) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุองค์ประกอบ มักทำการผสมพอลิเมอร์ในสถานะหลอม โดยกลไกจะเป็นการใช้แรงเฉือนที่สูง เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุองค์ประกอบ ซึ่งจะเรียกกลไกแบบนี้ว่า Dispersive mixing และประสิทธิภาพของการผสมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักคือ เครื่องมือ สมบัติทางกายภาพของสารที่

ใช้ในการผสม และสถานะที่ใช้ในกระบวนการผสม โดยเครื่องมือสำหรับการผสมแบบ Mixing และ เครื่องมือสำหรับการผสมแบบ Compounding มีดังต่อไปนี้

(1) เครื่องมือสำหรับการผสมแบบ Mixing

- เครื่องผสมแบบถังหมุน (Drum tumbler)
- เครื่องผสมแบบริบบอน (Ribbon blender)
- เครื่องผสมแบบความเร็วสูง (High speed mixer)
- เครื่องผสมแบบใบผสมรูปซิกมา (Sigma blade mixer)
- เครื่องผสมแบบใบพาย (Paddle mixer)
- เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill)

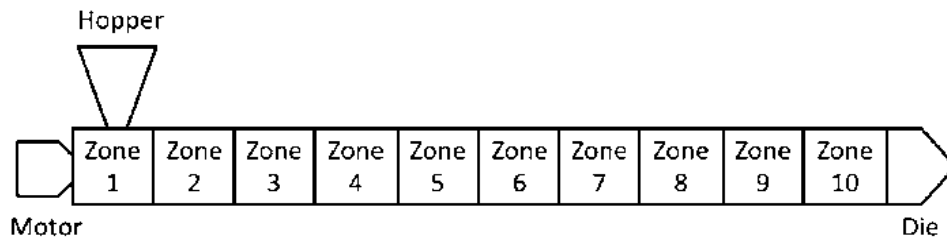
(2) เครื่องมือสำหรับการผสมแบบ Compounding

- เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)
- เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer)
- เครื่องผสมแบบอัดรีดชนิดสองสกรู (Twin screw extruder) [5]

กระบวนการอัดรีด (Extrusion) เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุที่อยู่ภายในอุปกรณ์รูปทรงกระบอก หรือที่เรียกว่า บาร์เรล (Barrel) ทำให้พอลิเมอร์หลอม และเกิดแรงอัดเพื่อให้วัสดุสามารถไหลผ่านทางช่อง ออก (Die) ซึ่งเป็นช่องทางที่กำหนดรูปร่างของวัสดุที่ไหลออกมา (Extrudate) ให้มีหน้าตัดตามต้องการ ซึ่ง อาจเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก ยางที่ยังไม่คงตัว ตะกั่ว อะลูมิเนียมหรือโลหะอื่นๆ โดยความร้อน ที่ให้แก่วัสดุนั้นเกิดจาก 2 ส่วน ดังนี้ (1) ความร้อนภายในบาร์เรล (Viscous friction) ที่เกิดจากการหมุนของ สกรูเพื่อสร้างแรงดันให้แก่ระบบ ดังนั้นวัสดุจึงไหลออกมาทางช่องทางออก (Die) ได้ (2) ความร้อนภายนอก บาร์เรล (External heat) ที่เกิดจากเครื่องทำความร้อน (Heater) ภายนอกบาร์เรล

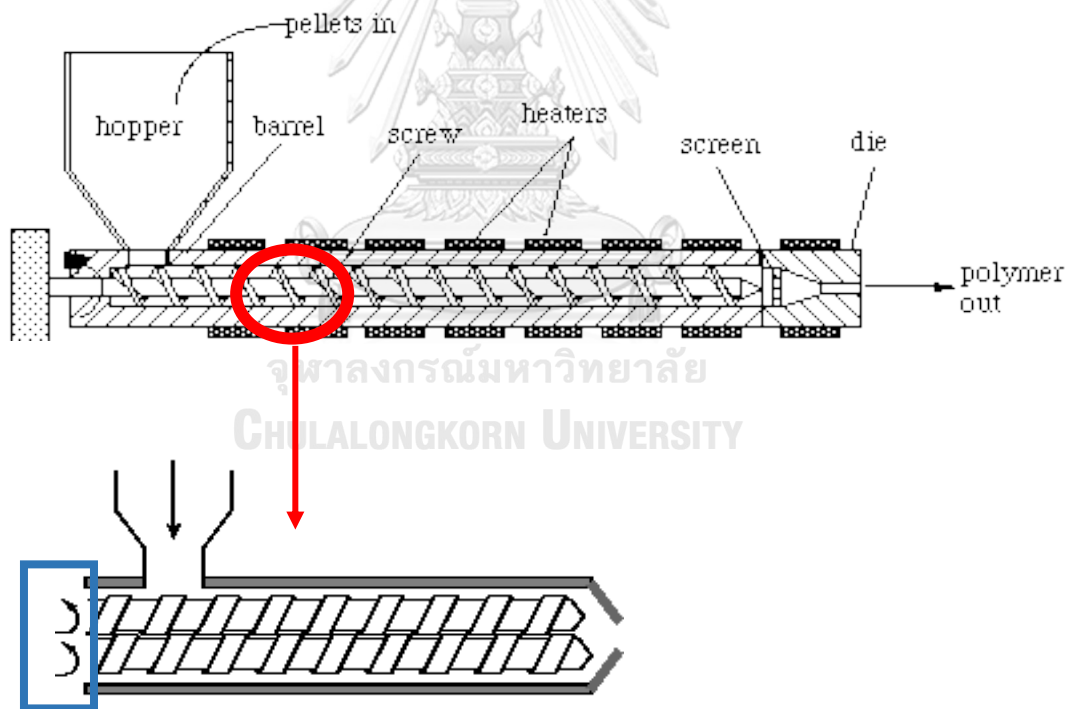
โดยส่วนประกอบในเครื่องผสมแบบอัดรีด มีดังนี้

1. ส่วนป้อน (Hopper/feedstock) เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ช่วงต้นของเครื่อง เป็นส่วนที่ป้อนเม็ด พลาสติกลงไป และบางครั้งอาจมีเครื่องให้ความร้อนเพื่อช่วยยอบไล่ความชื้น
2. บาร์เรล (Barrel) เป็นอุปกรณ์ที่ห่อหุ้มสกรูซึ่งทำมาจากโลหะ เพื่อให้ทนต่อความดันที่เกิดขึ้น ระหว่างการผลิตและเคลือบด้วยอัลลอยด์ของโลหะเพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน โดยการให้ความร้อนสู่ บาร์เรลจะมี 2 คือจากฮีทเตอร์รอบๆบาร์เรลหรือใช้การไหลเวียนของของไหล ซึ่งความร้อนจะ แบ่งเป็นช่วงๆ ดังรูปที่ 2.20 เพื่อความแตกต่างกันของอุณหภูมิตลอดความยาวของบาร์เรล

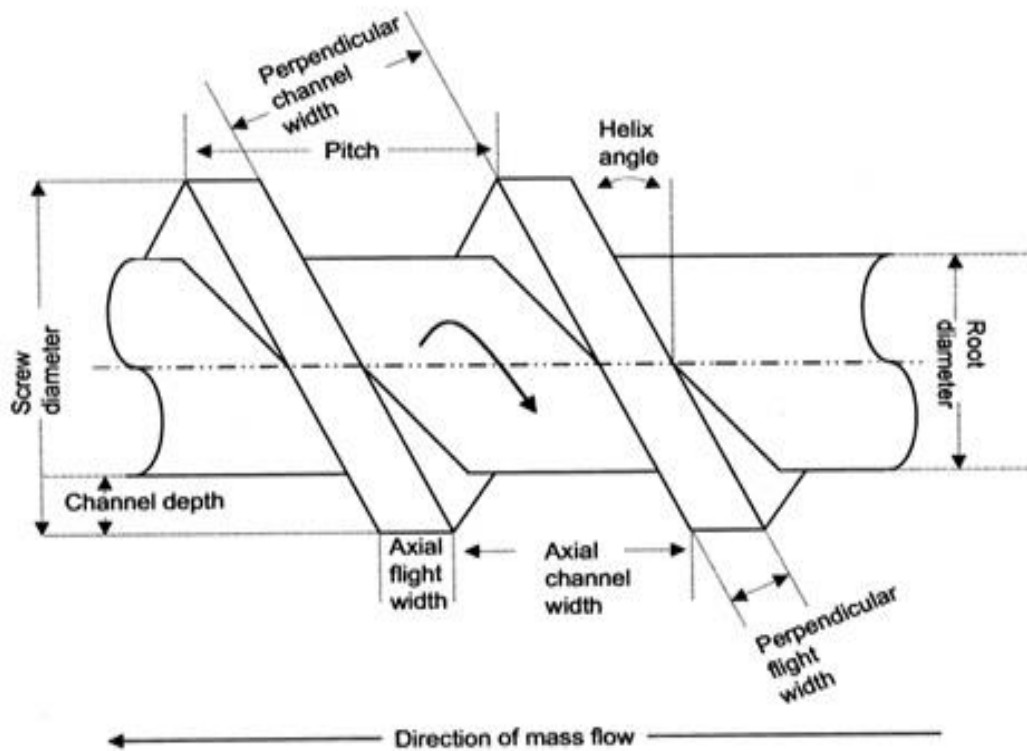


รูปที่ 2.20 การแบ่งช่วงความร้อนที่มีความแตกต่างกันของอุณหภูมิตลอดความยาวของบาเรล

3. สกรู (Screw) เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในบาเรล ซึ่งประกอบด้วยสกรู 2 อันและมีระยะห่างจากบาเรลเล็กน้อย โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูจะคงที่ แต่เส้นผ่านศูนย์กลางของแกน (Root) จะเพิ่มขึ้นตั้งแต่ส่วนป้อนไปจนถึงช่องทางออก (Die) ทำให้ระยะลึกของร่อง (Channel depth) ลดลง จึงมีความดันเพิ่มขึ้น ผิวของสกรูมักถูกเคลือบเพื่อให้มีความทนทานต่อการสึกกร่อน และการหมุนของสกรูถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าและเฟือง โดยส่วนประกอบต่างๆทั้งหมดในเครื่องผสมแบบอัดรีดสองสกรูจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.21 และชื่อเรียกของตำแหน่งต่างๆของสกรูในเครื่องผสมแบบอัดรีดสองสกรูจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.22

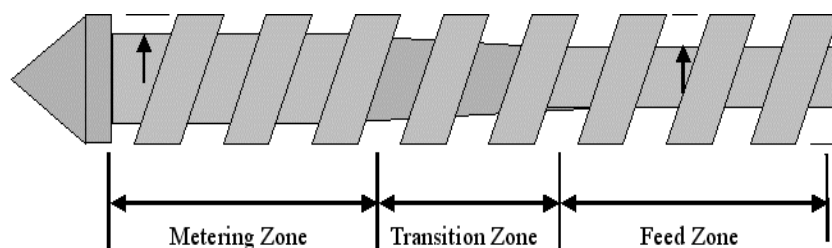


รูปที่ 2.21 เครื่องผสมแบบอัดรีดสองสกรู (Twin screw extruder)



รูปที่ 2.22 ชื่อเรียกของตำแหน่งและอุปกรณ์ต่างๆในสกรู

ซึ่งตัวสกรูนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวรับเม็ดพลาสติกและส่วนผสมต่างๆ เช่น สารเติมแต่ง สารเสริมแรง สารสี ทั้งในสภาพที่เป็นเม็ดหรือเป็นผงจากhopper เพื่อทำการผสมของแข็งเหล่านี้ให้เข้ากันอย่างทั่วถึงและทำให้เกิดการหลอมอย่างสมบูรณ์ อีกทั้งยังสร้างแรงดันให้เพียงพอที่จะเอาชนะความต้านทานต่อแรงเสียดทานของช่องทางออกต่อของผสมเหล่านี้และผลักดันให้ของผสมเหล่านี้ให้ไหลผ่านช่องทางออก(die)ด้วยความดันและอุณหภูมิที่คงที่ โดยจะแบ่งสกรูเป็น 3 ช่วงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 สกรูที่แบ่งตามช่วงต่างๆทั้งหมด 3 ช่วง

จากรูปที่ 2.23 ทั้ง 3 ช่วงของสกรูที่แบ่งนั้นจะมีความสัมพันธ์กับระยะลึกของร่อง (Channel depth) เพื่อให้ทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ดังนี้

(1) Feed zone เป็นช่วงแรกของสกรู มีหน้าที่ลำเลียงวัสดุจาก Hopper ด้วยอัตราคงที่ ดังนั้นสกรูในช่วงนี้จะลึกลงและคงที่ และวัสดุจะได้รับแรงดันที่เพียงพอเพื่อไล่อากาศที่อยู่ระหว่างเม็ดพลาสติกให้ย้อนกลับไปออกที่ Hopper ได้ เป็นการป้องกันไม่ให้อากาศตกค้างในระบบ

(2) Transition zone หรือ Compression zone เป็นช่วงถัดจาก Feed zone ช่วงนี้จะมีการหลอมเกิดขึ้น ดังนั้นสกรูจะมี channel depth ที่ค่อยๆลดลงอย่างสม่ำเสมอ (Taper) ซึ่งทำให้มีความดันสูงขึ้น พอลิเมอร์จึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากทั้งความร้อนจากภายใน (Viscous heat) และความร้อนจากภายนอก (External heat) ที่มาจาก Heater bands ทำให้การหลอมเกิดได้ดีขึ้นและสมบูรณ์

(3) Metering zone หรือ melt pumping zone เป็นสกรูในช่วงสุดท้าย มีหน้าที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenised) และผลักดันให้พอลิเมอร์เหลวไหลผ่านช่องทางออก ในส่วนนี้พอลิเมอร์มีความดันสูงเนื่องจากระยะลึกของร่อง (Channel depth) มีน้อยมาก

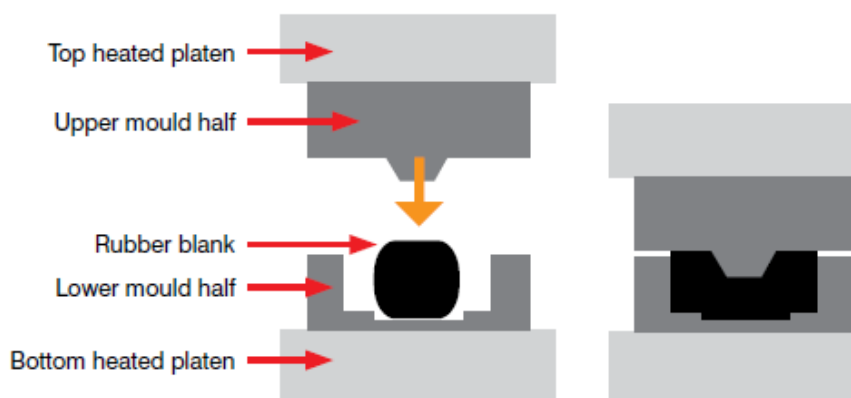
(4) ช่องทางออก (Die) เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ตำแหน่งท้ายสุดของเครื่องอัดรีดแบบสกรู ทำหน้าที่กำหนดรูปร่างให้กับพอลิเมอร์หลอมที่ถูกผลักดันออกมา ซึ่งอาจจะยังไม่ใช้รูปร่างของผลิตภัณฑ์สุดท้าย เนื่องจากยังมีลักษณะอ่อนตัวอยู่ ดังนั้นรูปร่างสุดท้ายจึงขึ้นกับปัจจัยอื่นๆอีก เช่น การหดตัวของพอลิเมอร์ในขณะที่เย็นตัวลง และระดับการพองตัว (die swell) ที่เกิดจากการคืนตัวของพอลิเมอร์ในส่วนที่ยืดหยุ่นได้ รวมไปถึงกระบวนการผลิตหลังการอัดรีด เช่น การดึง (Drawdown) การตัด (Cutting) การทำให้เป็นเม็ด (Pelletising) การซ้อนทับ (Stacking) และการม้วนเก็บ (Reeling)

โดยข้อดีของกระบวนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสองสกรู คือ มีพื้นที่ให้ความร้อนเกิดการถ่ายเทมากกว่าเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิจะดีกว่า และการผลักดันของพอลิเมอร์หลอมเกิดขึ้นได้ดีกว่า จึงทำให้พอลิเมอร์หลอมไม่ต้องค้างอยู่ในเครื่องที่มีความร้อนเป็นเวลานานๆ ซึ่งอาจจะทำให้พอลิเมอร์สลายตัวทางความร้อนหรือเสียสภาพได้ ดังนั้นเครื่องอัดรีดชนิดสองสกรูจึงเหมาะกับพอลิเมอร์ที่ไม่เสถียรทางความร้อน เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) หรือวัสดุอื่นที่ป้อนและเคลื่อนที่ยาก เช่น ผง หรือคอมพาวด์ที่ใส่สารตัวเติมในปริมาณมาก และการทำการผสมพอลิเมอร์ต่างๆ

2.1.8 เทคนิคการขึ้นรูปของพอลิเมอร์

การขึ้นรูปโดยการอัด (Compression moulding) [5] เป็นวิธีการขึ้นรูปที่นิยมใช้ทั้งในวัสดุพอลิเมอร์ เซรามิก โลหะ และวัสดุเชิงประกอบ โดยวัสดุเริ่มต้นจะอยู่ในรูปของผง เม็ด หรือของไหลบรรจุในแม่พิมพ์ จากนั้นวัสดุเริ่มต้นที่อยู่ในแม่พิมพ์จะถูกอัดด้วยแรงอัด ซึ่งทำให้วัสดุได้รับแรงอัดโดยตรง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามช่องว่างในแม่พิมพ์อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีขนาดเล็กจะไม่เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้ วัสดุชนิดพอลิเมอร์ที่นิยมใช้การอัด เช่น เทอร์โมเซตเรซิน ได้แก่ เรซินฐานฟอร์มัลดีไฮด์ อีพอกซี อัลคิดีส์ และพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว หรือคอมปาวด์ของพอลิเมอร์และสารตัวเติม และรวมไปถึงเทอร์โมพลาสติกและวัสดุเชิงประกอบ โดยขั้นตอนการขึ้นรูปมีดังนี้

1. การเติมวัสดุเริ่มต้น (ในรูปของผงหรือเม็ด) ลงในช่องว่างของแม่พิมพ์ร้อน
2. เคลื่อนแท่นอัดเพื่อปิดแม่พิมพ์ โดยจะเริ่มจากแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) จะอยู่ในตำแหน่งแยกจากกันกว้างที่สุดเพื่อสามารถเติมพลาสติกได้ง่ายและตำแหน่งนี้ก็ยังเป็นระยะสูงสุดในจังหวะที่นำชิ้นงานออก
3. เพิ่มแรงดันเพื่อให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าไปในหลุมช่องว่างของแม่พิมพ์ที่เป็นรูปทรงของชิ้นงาน
4. เมื่อชิ้นงานในแม่พิมพ์คงรูปดีแล้วจึงเปิดแม่พิมพ์เพื่อปลดชิ้นงาน ซึ่งในการทำให้ชิ้นงานคงรูปร่างก่อนปลดนั้นจะใช้เวลาหล่อเย็นแม่พิมพ์ในกรณีของเทอร์โมพลาสติกและการบ่มในกรณีของเทอร์โมเซต



รูปที่ 2.24 ขั้นตอนการขึ้นรูปพอลิเมอร์โดยการอัด

จากรูปที่ 2.24 จะแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนในการขึ้นรูปพอลิเมอร์โดยการอัด ซึ่งเริ่มจากการใส่เม็ดพอลิเมอร์ลงไป จากนั้นแม่พิมพ์จะเคลื่อนที่ลงมาปิด เพิ่มความดันและความร้อนให้พอลิเมอร์หลอมและเกิดการอัดให้เข้าช่องว่างในแม่พิมพ์ จึงเกิดเป็นรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องอัด มีดังนี้

1. แท่นอัด (Press) ซึ่งมีทั้งแบบที่คนคอยควบคุมและแบบอัตโนมัติ โดยส่วนประกอบหลักดังนี้
 - (1) แผ่นเหล็กอัด (Platens) จะเป็นแผ่นเหล็กที่มีลักษณะกว้างเพื่อให้ง่ายต่อการรับการติดตั้งแม่พิมพ์ และสามารถทำงานได้สะดวก และมีช่องว่างให้ทำความเรียบร้อยขึ้นงาน จะมีขนาดระหว่าง 8 ตารางนิ้วถึง 5 ตารางฟุต
 - (2) ระบบขับเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดเพื่อปิดแม่พิมพ์และให้แรงอัดแก่วัสดุในแม่พิมพ์ จะเป็นระบบไฮดรอลิกสำหรับเครื่องขนาดเล็กระดับห้องปฏิบัติการ แรงดันมีค่าในช่วง 5-100 ตัน สำหรับระดับอุตสาหกรรมจะอยู่ระหว่าง 10-4,000 ตัน สำหรับแท่นอัดอัตโนมัติจะประกอบด้วยส่วนการทำงานของกระเปาะปริมาณพลาสติกเข้าอัด การให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนอัดและมีอุปกรณ์ช่วยถอดประกอบแม่พิมพ์
2. แม่พิมพ์ (Mould) จำแนกได้เป็น 4 แบบ ดังนี้
 - (1) Flash mould เป็นแม่พิมพ์ที่มีช่องระบายเพื่อไว้รองรับพอลิเมอร์ที่เอ่อล้นออกจากแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ชนิดนี้จะไม่ซับซ้อนและราคาถูกกว่าแบบอื่นๆ
 - (2) Semi-positive mould เป็นแม่พิมพ์ที่มีการเจาะร่องของแม่พิมพ์ตัวเมียเพื่อเป็นแนวบังคับให้แม่พิมพ์ตัวผู้เคลื่อนที่ได้ถึงระยะที่กำหนด และยังมีร่องให้พอลิเมอร์ที่มากพอไหลออกได้ จึงจำเป็นต้องกะปริมาณของพอลิเมอร์ที่ใช้ให้เต็มพอดีกับแม่พิมพ์หรือเกิดเป็นส่วนเกิน (Flash) ไม่มากนัก แม่พิมพ์ชนิดนี้จะนิยมใช้กันมากที่สุดเพราะการผลิตขึ้นงานในแต่ละครั้งสามารถให้ขึ้นงานที่ใกล้เคียงกันได้
 - (3) Positive mould (หรือ sealed mould) เป็นแม่พิมพ์ที่มีการออกแบบให้ไม่มีร่องสำหรับพอลิเมอร์ไหลออกจากแม่พิมพ์ได้ ดังนั้นแรงดันทั้งหมดจะรับโดยพอลิเมอร์ที่ใช้ เมื่อกะปริมาณพอลิเมอร์ในแต่ละครั้งต่างกัน จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาและความหนาแน่นที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นจึงยากต่อการควบคุมคุณภาพของขึ้นงานให้สม่ำเสมอ แม่พิมพ์ชนิดนี้จึงไม่ค่อยนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความละเอียด
 - (4) Split mould เป็นแม่พิมพ์ที่มีการออกแบบเพื่อใช้กับขึ้นงานที่ไม่สามารถปลดออกในแนวตั้งได้ เช่น ขึ้นงานที่มีครีบบนออกมาข้างๆ หรือมีรูอยู่ด้านข้าง แม่พิมพ์ชนิดนี้จึงมีลักษณะเป็นฝาประกบที่สามารถแยกปลดขึ้นงานทางด้านข้างและสำหรับอัดขึ้นงานที่ต้องมีชิ้นส่วนโลหะประกอบอยู่ด้วย

2.1.9 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

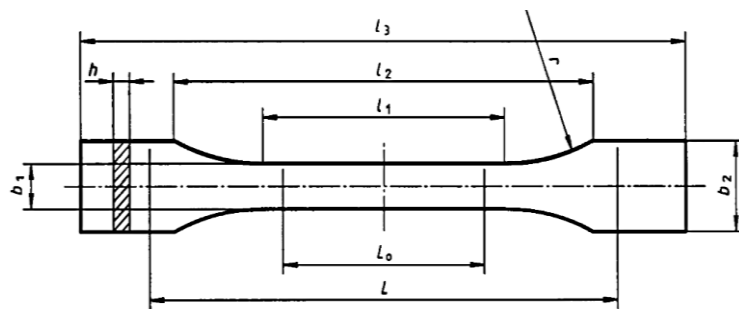
ซึ่งในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย การทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งหมด ดังนี้

1. การทดสอบความทนแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึงจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 527 เป็นมาตรฐานตามสหภาพยุโรป เพื่อให้การทดสอบเป็นไปในทางเดียวกัน โดย ISO 527 มีขอบเขตและข้อจำกัดดังนี้

- (1) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุจำพวกพลาสติกและคอมโพสิตของพลาสติกภายใต้เงื่อนไขตามขนาดรูปร่างที่กำหนดตามมาตรฐาน ดังรูปที่ 2.25 โดยชิ้นงานทดสอบต่างชนิดกันก็จะทำการทดสอบที่เงื่อนไขต่างกัน
- (2) เป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมความทนแรงดึงของชิ้นงานทดสอบและกำหนดค่าความทนแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัสของยัง (Tensile modulus) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่กำหนด
- (3) ชนิดของชิ้นงานทดสอบที่เหมาะสมกับการทดสอบความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 527 มีดังนี้
 - (ก) ชิ้นงานทดสอบประเภทพลาสติกแข็งและกึ่งแข็งชนิดเทอร์โมพลาสติก (Rigid and semirigid thermoplastic) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดรีดทั้งที่มีการใส่สารเติมแต่งหรือสารเสริมแรงลงไป รวมไปถึงในกรณีที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นแผ่นชีทหรือแผ่นฟิล์มที่ไม่มีการใส่สารเสริมแรงลงไป
 - (ข) ชิ้นงานทดสอบประเภทพลาสติกแข็งและกึ่งแข็งชนิดเทอร์โมเซตติง (Rigid and semirigid thermosetting) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด (Moulding) ทั้งที่มีการใส่สารเติมแต่งหรือสารเสริมแรงลงไป ในกรณีที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นแผ่นชีทหรือแผ่นลามิเนต (Laminate: การซ้อนทับกันหลายๆชั้น)
 - (ค) ชิ้นงานทดสอบประเภทเทอร์โมเซตติงและเทอร์โมพลาสติกเชิงประกอบประเภทที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน และที่ไม่เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน เช่น เสื่อ ผ้าทอ (Woven fabric) และวัสดุผสม (Hybrid reinforcement) โดยแต่ละชิ้นงานทดสอบจะมีการกำหนดขนาดและรูปร่าง (dimension) แตกต่างกันไปตามชนิด รวมไปถึงเงื่อนไขสภาวะที่ใช้ในการทดสอบก็จะแตกต่างกันอีกด้วย ดังนั้นจะนำมาเทียบค่ากันไม่ได้ถ้าชิ้นงานเป็นคนละชนิดและคนละรูปร่างกัน แต่ถ้ามีความจำเป็นที่ต้องนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ก็จะต้องควบคุมและบันทึกค่าของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง (เช่น ความเร็วรอบในการทดสอบ เงื่อนไขของชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นกับขนาด) อย่างระมัดระวัง

(ง) ชิ้นงานจะถูกดึงยืดในแนวตามยาว (Longitudinal axis) ด้วยแรงที่มีความเร็วคงที่จนชิ้นงานฉีกขาดหรือถึงค่าความเครียด/ความเค้นที่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง ซึ่งในระหว่างกระบวนการทดสอบที่ให้แรงกระทำต่อวัสดุชิ้นนั้น เครื่องจะทำการวัดค่าการยืดตัว (Elongation) ไปเรื่อยๆ



Dimensions in millimetres

Specimen type	1A	1B
Overall length	≥ 150 ¹⁾	
Length of narrow parallel-sided portion	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
Radius	20 to 25	≥ 60 ²⁾
Distance between broad parallel-sided portions	104 to 113 ³⁾	106 to 120 ³⁾
Width at ends	$20,0 \pm 0,2$	
Width of narrow portion	$10,0 \pm 0,2$	
Preferred thickness	$4,0 \pm 0,2$	
Gauge length	$50,0 \pm 0,5$	
Initial distance between grips	115 ± 1	l_0 ⁵⁾

รูปที่ 2.25 ขนาดชิ้นงานทดสอบที่กำหนดตามมาตรฐาน ISO 527

หมายเหตุ: จากรูปที่ 2.25 ชิ้นงานทดสอบชนิด 1A คือชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการอัดรีด (Extrusion) หรือการกดอัด (Compression) ด้วยแม่พิมพ์ และชิ้นงานทดสอบชนิด 1B คือชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วนำมาตัดเป็นแผ่นหรือตัดเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยตัวเอง

โดยในการทดสอบแรงดึงจะมีค่าเฉพาะที่เกี่ยวข้องในการทดสอบ ดังนี้

- Gauge length; L_0 คือระยะความยาวตรงกลางของชิ้นงานทดสอบในตอนเริ่มต้น(เปรียบเสมือนระยะระหว่างตัวจับตัวจับชิ้นงานเมื่อนำเข้าไปวางในเครื่องทดสอบ) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร(mm)

- Speed of testing; v คือค่าความเร็วทดสอบของตัวจับ(grips)ที่ใช้ในการดึง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร ต่อนาที(mm/min)
- Tensile stress; σ คือแรงดึงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเพื่อให้เกิดการฉีกขาดออกจากกัน หรือเรียกว่า ความเค้นแรงดึง มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล(MPa)
- Tensile stress at yield(yield stress); σ_y คือค่าความเค้นแรงดึงที่กระทำต่อชิ้นงานก่อนถึงจุดที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร(plastic deformation) ซึ่งอาจจะมีค่าน้อยกว่าความเค้นแรงดึงสูงสุด มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล(MPa)
- Tensile stress at break; σ_B คือค่าความเค้นแรงดึงที่กระทำต่อวัสดุ ณ จุดที่ชิ้นงานขาดออกจากกัน มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล(MPa)
- Tensile strength; σ_M คือค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นงานในระหว่างทำการทดสอบแรงดึง มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล(MPa)
- Tensile stress at x% strain; σ_x คือค่าความเค้นแรงดึงที่กระทำต่อชิ้นงาน ณ จุดที่กำหนดค่ายึดตัวไว้ค่าหนึ่ง(x) โดยค่าที่กำหนดนี้จะแสดงในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ และค่าความเค้นแรงดึง ณ จุดนี้มีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล(MPa) ซึ่งค่า tensile stress at x% strain จะทำการวัดในกรณีที่กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุไม่ปรากฏจุดศรียก(yield point) อย่างไรก็ตามค่า x นั้นจะมีค่าน้อยกว่าค่ายึดตัวที่จุด σ_M
- Tensile strain; ϵ คืออัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวเดิมของชิ้นงานหลังได้รับแรงดึง (เนื่องจากการเทียบอัตราส่วนจึงไม่มีหน่วย จะนิยมคิดหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์แทน)
- Tensile strain at yield; ϵ_y คืออัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนแปลงต่อความยาวเดิมของชิ้นงานที่มีความเค้นแรงดึงมาก่อนถึงจุดที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร
- Tensile strain at break; ϵ_B คืออัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนแปลงต่อความยาวเดิมของชิ้นงาน ณ จุดที่ชิ้นงานฉีกขาด
- Tensile strain at tensile strength; ϵ_M คืออัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนแปลงต่อความยาวเดิมของชิ้นงาน ณ จุดที่ชิ้นงานได้รับความเค้นสูงสุด
- Young's modulus; E_t หรือ Y คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียด เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความยืดหยุ่นของวัสดุชนิดต่างๆเมื่อมีความเค้นว่าชิ้นงานนั้นสามารถยึดได้เท่าไร มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล (MPa) หรือ นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)

นอกจากนี้ในการคำนวณค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบเพื่อบ่งบอกถึงความสามารถในการทนแรงดึงของวัสดุหรือชิ้นงานที่นำมาทดสอบ สามารถคำนวณได้ตามหลักการ ดังต่อไปนี้

- ความเค้น (stress)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

โดย σ คือ ค่าความเค้นแรงดึง มีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa)

F คือ แรงดึงที่กระทำตั้งฉากกับชิ้นงาน มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร (mm²)

- ความเครียด (strain)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

$$\varepsilon(\%) = 100 \times \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

โดย ε คือค่าความเครียด มีหน่วยอยู่ในรูปของอัตราส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ (%)

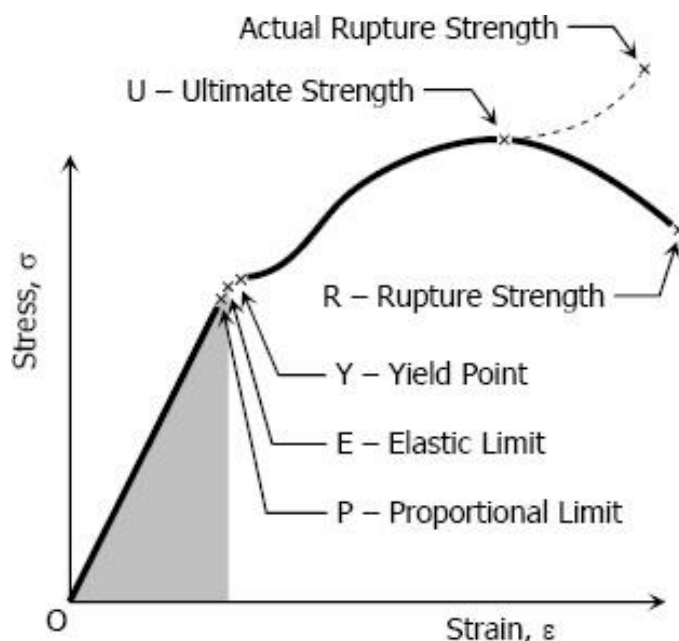
L คือความยาวของชิ้นงานก่อนทำการดึง (Gauge length) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ΔL คือความต่างของความยาวก่อนและหลังทำการดึงชิ้นงาน มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

- มอดูลัสของยัง (Young's modulus)

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (4)$$

โดย Y คือค่ามอดูลัสของยัง มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล(MPa)หรือนิวตันต่อตารางเมตร (N/m²)

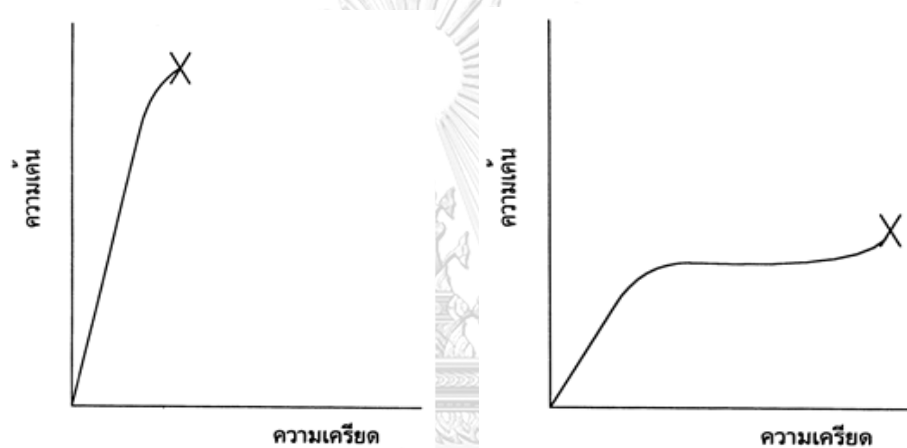


รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด(stress-strain curve)

จากรูปที่ 2.26 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดสอบซึ่งถูกนำมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าที่เกิดขึ้นไว้ จากนั้นนำมาพลอตเป็นเส้นโค้ง โดยขนาดของชิ้นงานและความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้และเป็นใช้บรรทัดฐานเดียวกัน

จากการทดสอบพบว่าเมื่อเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออกจนถึงจุดจุดหนึ่ง นั่นคือจุด P (Proportional limit) เป็นช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นสัดส่วนคงที่ กราฟจึงเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปกลับไปมีขนาดเท่าเดิมเมื่อปล่อยแรงกระทำ เรียกว่า การคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) และเมื่อเพิ่มแรงขึ้นเรื่อยๆ กราฟที่ได้จะโค้งออกไปจากเส้นตรง วัสดุจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปเดิมได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด E (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะมีค่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ถ้าให้แรงเกินไปกว่าจุดนี้ วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) นั่นเอง ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เกิดที่จุด Y (Yield point) คือจะเห็นการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่าความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่นำวัสดุไปใช้งานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย หลังจากเลยจุดครากไปแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรโดยที่ความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หรืออาจจะคงที่ไปจนถึงจุดสูงสุด นั่นคือจุด U ซึ่งค่าความเค้นที่จุดนี้จะเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนจะ

ขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เรียกว่า Ultimate strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) โดยทั่วไปค่านี้จะใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ ซึ่งจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง และจุดสุดท้ายของกราฟคือจุดR เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน โดยค่าความเค้นที่ได้จากจุดนี้ (Rupture Strength) จะมีค่าต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุดU ไป พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบจะลดลงจึงส่งผลให้พื้นที่ต้านทานแรงดึงนั้นลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะแตกต่างกันตามลักษณะพฤติกรรมการยืดตัวของวัสดุหรือชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุเหนียว

2. การทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact test) วิทยาลัย

การทดสอบแรงกระแทกจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 180 เป็นมาตรฐานตามสหภาพยุโรปเพื่อให้การทดสอบเป็นไปในทางเดียวกัน โดย ISO 180 มีขอบเขตและข้อจำกัดดังนี้

(1) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติความเหนียวด้วยการทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod test) ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดต่าง ๆ กันตามวัสดุที่นำมาทำการทดสอบ ชนิดของการทดสอบ และชนิดของรอยบาก

(2) เป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเปราะหรือความเหนียวของชิ้นงานทดสอบแต่ละชนิดภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่กำหนดตามมาตรฐาน

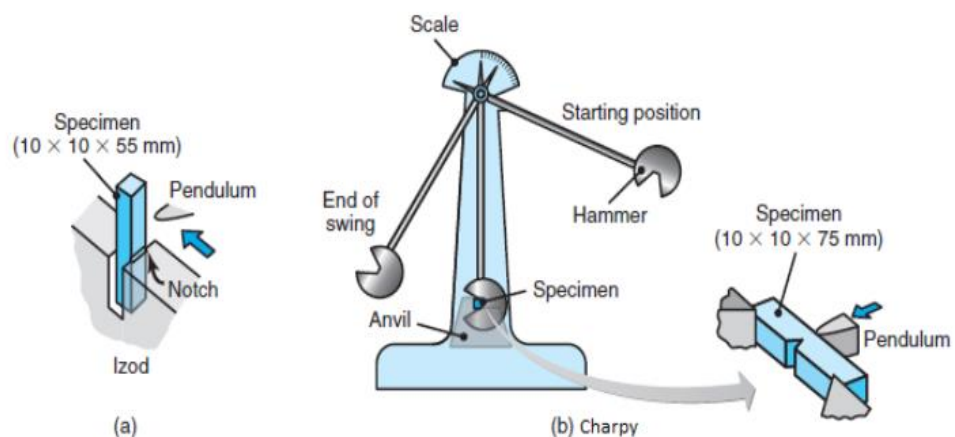
(3) ชนิดของชิ้นงานทดสอบที่เหมาะสมกับการทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ISO 180 มีดังนี้

(ก) ชิ้นงานทดสอบประเภทพลาสติกแข็งชนิดเทอร์โมพลาสติก (Rigid thermoplastic) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดรีด (Extrusion) ทั้งที่มีการใส่สารเติมแต่งหรือสารเสริมแรงลงไป รวมไปถึงในกรณีที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นแผ่นซีทที่ไม่มีสารเสริมแรงลงไป

(ข) ชิ้นงานทดสอบประเภทเทอร์โมเซตติ้งและเทอร์โมพลาสติกเชิงประกอบประเภทที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน และไม่เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน เช่น เสื้อผ้าทอ (Woven fabric) และวัสดุผสม (Hybrid reinforcement)

(ค) เป็นการทดสอบเพื่อทำการวัดพลังงานที่วัสดุจะดูดซับไว้เมื่อได้รับแรงกระแทกจนเกิดการแตกหัก โดยอาศัยการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่มีน้ำหนักค่าหนึ่ง (ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่เลือกใช้) เมื่อลูกตุ้มกระทบชิ้นงานทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานส่วนหนึ่งเพื่อนำไปใช้ในการทำให้ชิ้นงานแตกหัก ซึ่งเรียกว่า ค่าพลังงานกระแทก (Impact energy) โดยมี 2 แบบแบ่งตามลักษณะการวางชิ้นงาน ดังนี้

- Charpy test จะวางชิ้นงานทดสอบในแนวระดับแล้วปล่อยลูกตุ้มลงมาให้กระแทกกับชิ้นงาน (โดยชิ้นงานบางชนิดอาจจะมีการทำรอยบากไว้ ในกรณีนี้จะต้องปล่อยให้ลูกตุ้มลงมากะแทกกับชิ้นงานในด้านที่ตรงข้ามกับรอยบาก) ดังรูปที่ 2.28
- Izod test จะวางชิ้นงานทดสอบในแนวตั้งแล้วปล่อยให้ลูกตุ้มลงมากะแทกกับชิ้นงาน (โดยชิ้นงานบางชนิดอาจจะมีการทำรอยบากไว้ ในกรณีนี้จะต้องปล่อยให้ลูกตุ้มลงมากะแทกกับชิ้นงานในด้านที่มีรอยบาก) ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 วิธีการทดสอบความทนแรงกระแทก

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 180 โดยทำการทดสอบด้วยวิธี Izod test ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

- Izod unnotched วัดค่าพลังงานกระแทกที่ถูกดูดซับด้วยชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการบาก มีหน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร (kJ/m²)
- Izod notched วัดค่าพลังงานกระแทกที่ถูกดูดซับด้วยชิ้นงานที่ทำการบาก มีหน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร (kJ/m²)

นอกจากนี้ในการคำนวณค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบเพื่อบ่งบอกถึงความสามารถในการทนแรงกระแทกของวัสดุหรือชิ้นงานที่นำมาทดสอบ สามารถคำนวณได้ตามหลักการ ดังต่อไปนี้

- ค่าพลังงานกระแทก (Impact energy)

$$\frac{E_c}{h \times b} \times 10^3 \quad (5)$$

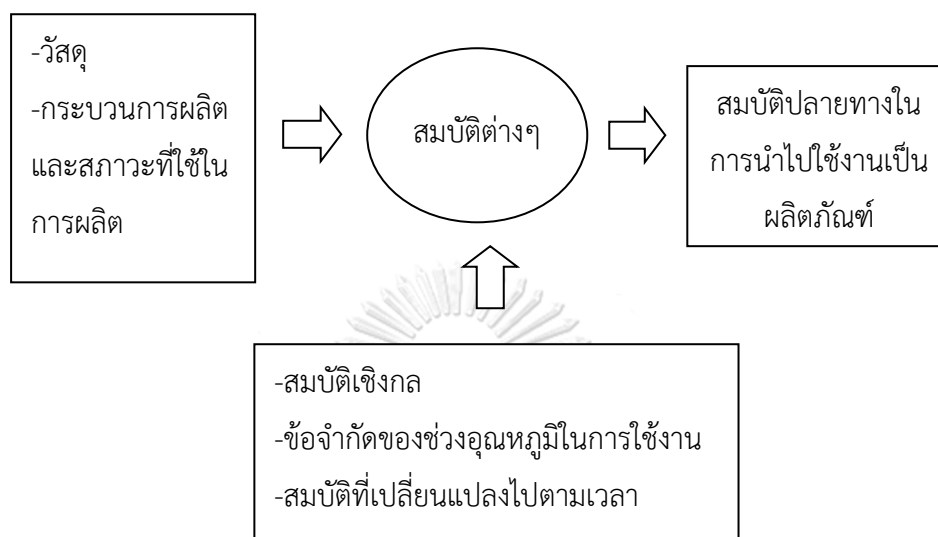
โดย E_c คือค่าพลังงานกระแทกที่ถูกดูดซับไปใช้ในการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น kJ/m²

h คือความหนาของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร(mm)

b คือความกว้างของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร(mm)

2.2 ผลิตรภัณฑ์จากพอลิเมอร์

พลาสติก คือ พอลิเมอร์ที่นำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ถ้วย จาน ชาม แก้ว รองเท้าผ้าปักปากกาถุงใส่ของ ภาชนะ เรียกรวมว่า ผลิตภัณฑ์พลาสติก



รูปที่ 2.29 องค์ประกอบสำคัญที่จะนำไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค

2.3 พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.3.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP)

พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกแบบแข็งเส้นที่ปราศจากกิ่งก้านสาขา โดยสังเคราะห์ได้จากแก๊สโพรพิลีน (C_3H_6) มีได้ 3 รูปแบบคือ

- ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene) คือลักษณะสายโซ่ที่มีกิ่ง (หมู่เมทิล) เรียงตัวอยู่ด้านเดียวกันหมดตลอดทั้งสายโซ่โมเลกุล
- ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (syndiotactic polypropylene) คือลักษณะสายโซ่ที่มีกิ่ง (หมู่เมทิล) เรียงตัวสลับด้านกันอย่างเป็นระเบียบตลอดทั้งสายโซ่โมเลกุล
- อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (atactic polypropylene) คือลักษณะสายโซ่ที่มีกิ่ง (หมู่เมทิล) เรียงตัวสลับกันทั้งสองด้านของสายโซ่โมเลกุลอย่างไม่เป็นระเบียบ

โดยพอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำอยู่ที่ 0.90-0.91 และมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 160-170 องศาเซลเซียส มีสมบัติเด่น ดังนี้

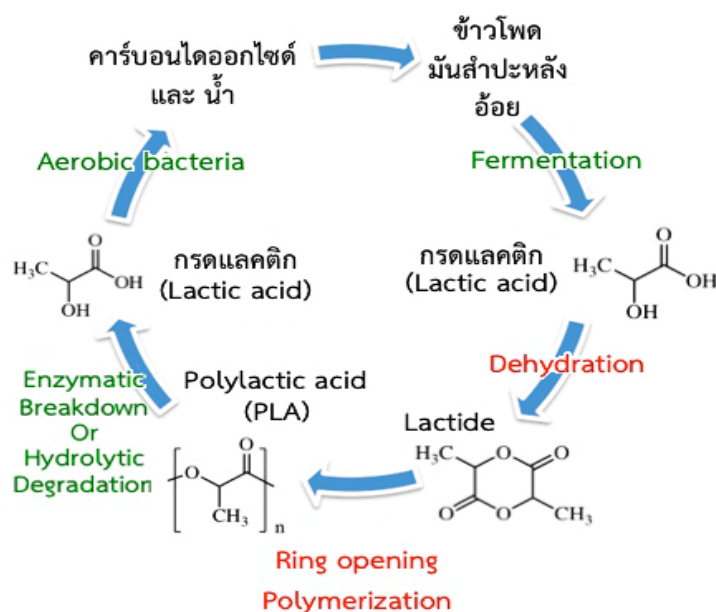
- มีความแข็งและเหนียว คงรูปดี
- ทนต่อความร้อนและสารเคมี
- ป้องกันการผ่านของความชื้นได้ดี
- ป้องกันการผ่านของอากาศได้ดี
- ใส ผิวเป็นมันวาว
- มีน้ำหนักเบา
- ไม่ทนต่อความเย็น

นอกจากนี้ ยังมีการใช้งานของพอลิโพรพิลีนในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.10 ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างการใช้งานของพอลิโพรพิลีน

เกรดฟิล์ม	เกรดงานอัดรีด, เส้นใยและแผ่นพลาสติก	เกรดงานฉีดแบบ
งานบรรจุภัณฑ์ ของขนม เทปกาว ธนบัตร ถุงบรรจุอาหาร เสื้อผ้าและอื่นๆ	เส้นเทปสำหรับท่ออุตสาหกรรม เชือกฟาง เส้นใยสำหรับทำเชือก แผ่นพลาสติกทำแพ้ม แผ่นพลาสติกเรียบ/ลูกฟูก แผ่นพลาสติกผ้าใบ	เครื่องใช้ในบ้าน อุปกรณ์สำนักงาน อุปกรณ์ทางการแพทย์ เครื่องใช้เด็กอ่อน, ของเล่นเด็ก ภาชนะที่มีผนังบาง เช่น ถ้วยเครื่องดื่มหรือถ้วยบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ภาชนะที่ต้องการความใส เช่น แก้วน้ำหรือกล่องบรรจุของ/กล่องเก็บอาหาร พวงมาลัยรถยนต์, โครงเบาจักรยานมอเตอร์ไซค์, ชิ้นส่วนอะไหล่รถยนต์, กล่องแบตเตอรี่รถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า

2.3.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA)

พอลิแลคติกแอซิด เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งสังเคราะห์มาจากกรดแลคติกด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้หลากหลายวิธี โดยกรดแลคติกแอซิดเป็นสารที่ได้จากการหมักคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง ดังรูปที่ 2.30

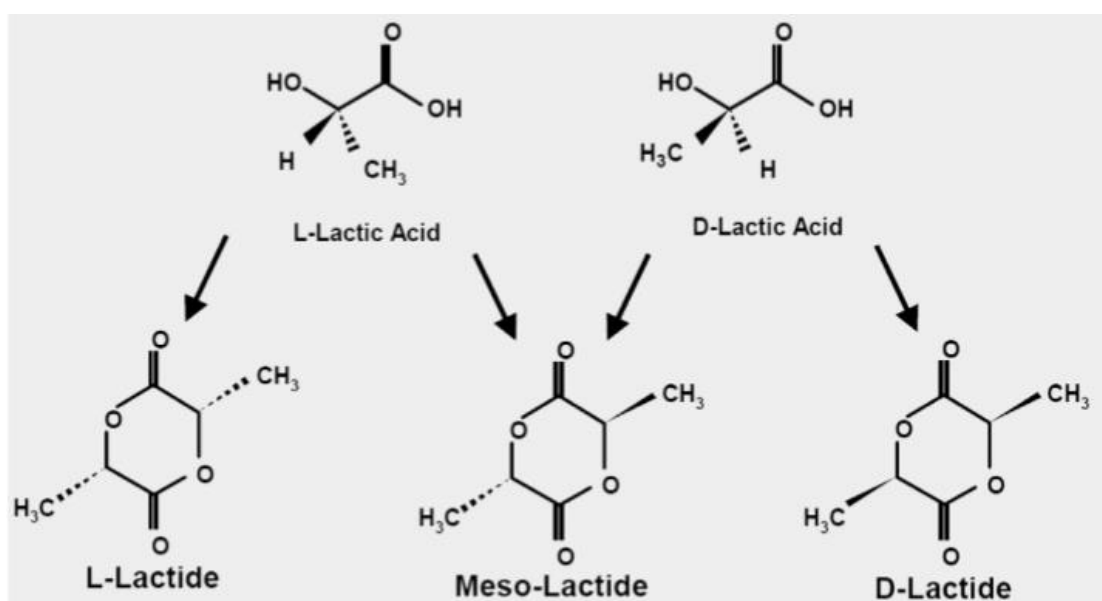


รูปที่ 2.30 วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิด

ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆของ PLA ที่สังเคราะห์ได้ เช่น สมบัติเชิงกล ความเหนียว ความแข็งแรงขณะหลอม สมบัติด้านการไหล และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจะต่างกัน ดังตารางที่ 2.11 เช่น PLA ที่มีปริมาณ D-lactide เท่ากัน จะมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายยาง (T_g) และค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว (T_m) สูงขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ประมาณ 10,000–30,000 กรัมต่อโมล นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของโครงสร้างภายในโมเลกุล(หรือที่เรียกว่าชนิดของแลกไทด์)ด้วย ซึ่งโครงสร้างในโมเลกุลต่างกันก็จะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้ต่างกัน ซึ่งโครงสร้างจะแบ่งได้ 3 ชนิดดังรูปที่ 2.31

ตารางที่ 2.11 ชนิดของแลกไทด์และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ

ชนิดของแลกไทด์	อุณหภูมิจุดหลอมเหลว; T_m (°C)
L-lactide	95-98
D-lactide	95-98
meso-lactide	53-54
rac-lactide(L:D=50:50)	122-126



รูปที่ 2.31 โครงสร้างทางเคมี(สเตอริโอไอโซเมอร์)ของกรดแลกติกทั้ง 3 แบบ

โดยในช่วงเริ่มต้น พอลิแลกติกแอซิดจะนิยมนำมาใช้ในงานในผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้งหรือไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.12 และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ต่างๆในท้องตลาดที่ใช้พอลิแลกติกแอซิด ดังแสดงในรูปที่ 2.32

ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานของพอลิแลกติกแอซิด

เกรดฟิล์ม	เกรดงานอัดรีด, เส้นใยและแผ่นพลาสติก
บรรจุภัณฑ์อาหาร เช่น แก้วน้ำที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง ถุงหิ้ว ถุงใส่กล่อง ถุงพลาสติก	เส้นใยและสิ่งทอนำมาใช้ในงานด้านการผลิตเป็นเสื้อผ้าและ ผ้าเบาะรถยนต์
ขวดบรรจุภัณฑ์สารเคมี เช่น ขวดแชมพู	แผ่นอนามัยอเนกประสงค์
ขวดน้ำพลาสติก	พรมปูพื้น
ฟิล์มสำหรับหุ้มอาหารสด เช่น ผัก ผลไม้	อุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น หน้ากากอนามัย เข็มฉีดยา
ถุงขนมขบเคี้ยว	บัตรเครดิต



รูปที่ 2.32 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ต่างๆในท้องตลาดที่ใช้พอลิเอทิลีนทereฟทาเลต

แม้ว่าพอลิเอทิลีนทereฟทาเลตจะมีข้อดีหลายประการ เช่น สัมผัสเหนียวจากข้าวโพด มันสำปะหลัง ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่สูงพอสมควร แต่พอลิเอทิลีนทereฟทาเลตยังมีสมบัติบางประการที่เป็นข้อเสีย จึงก่อให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งาน ซึ่งต้องมีการปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน เช่น

1. พอลิเอทิลีนทereฟทาเลตมีราคาค่อนข้างแพง เมื่อเทียบกับพลาสติกเชิงพาณิชย์ทั่วไป (Commodity plastics) โดยในปัจจุบันเม็ดพอลิเอทิลีนทereฟทาเลตอยู่ที่กิโลกรัมละ 110 บาท ซึ่งมีราคาสูงกว่าเม็ดพลาสติกธรรมดาถึงกว่าเกือบ 2 เท่า ซึ่งมีผลต่อการแข่งขันและการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์
2. พอลิเอทิลีนทereฟทาเลตค่อนข้างเปราะจึงทำให้ความแข็งแรงขณะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอม (melt strength) มีค่าต่ำ ทำให้เกิดปัญหาเมื่อนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการที่ต้องใช้แรงดันสูง เช่น กระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (Extrusion blown film process) เนื่องจากฟิล์มที่เป่าขึ้นต่อจากพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากรูทางออกจะไม่เสถียร จึงมีการคิดค้นพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ฟิล์มจากพอลิเอทิลีนทereฟทาเลต
3. พอลิเอทิลีนทereฟทาเลตมีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ โดยเมื่อพิจารณาค่าของยังมอดูลัสพบว่า มีค่าต่ำ(ในระดับที่ใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน) ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดข้อจำกัดในการนำพอลิเอทิลีนทereฟทาเลตไปใช้งานในบางด้าน เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยืดตัว ดังนั้นจึงนิยมนำพลาสติกไฮสโตนในการทำคอมพาวด์เพื่อให้ได้พอลิเอทิลีนทereฟทาเลตที่มีความยืดหยุ่นหรือผสมพอลิเอทิลีนทereฟทาเลตกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวและการยืดตัวที่ดีกว่า เช่น พอลิคาโพรแลน

4. โพลีแลกติกแอซิดไม่ทนความร้อน ดังนั้นถ้าไม่ทำการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปขึ้นรูป อาจเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างกระบวนการผลิต ขึ้นรูปผ่านกลไกแบบไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ดังนั้นก่อนนำไปใช้งานจึงต้องทำการอบเม็ดโพลีแลกติกแอซิดให้แห้ง ปราศจากความชื้นก่อน โดยทั่วไปแล้วปริมาณความชื้น (Water content) ที่อยู่ในโพลีแลกติกแอซิดควรอยู่ในระดับที่น้อยกว่า 500 ppm เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อน

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of experiments; DOE)

การออกแบบการทดลอง คือ เทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการดำเนินการทดลองอย่างเป็นระบบและมีการควบคุม เพื่อศึกษาว่าปัจจัยนำเข้าที่ใส่เข้าไปในกระบวนการผลิต (Input) มีความสัมพันธ์หรือส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตหรือเรียกอีกอย่างว่าตัวแปรตอบสนอง (Response) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ รวมไปถึงศึกษาอิทธิพลระหว่างปัจจัยนำเข้า (Interaction) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้อีกด้วย ซึ่งข้อดีของ DOE ที่แตกต่างไปจากวิธีการทั่วไป คือช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย เนื่องจากวิธีการทั่วไปจะเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูก จึงทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์และจะทำให้ได้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการได้ช้า รวมถึงเก็บข้อมูลมาก ถึงแม้ว่าการออกแบบการทดลอง (DOE) จะเป็นวิธีที่เก็บข้อมูลน้อยกว่า แต่ก็ยังคงมีความน่าเชื่อถือสูงและสามารถนำไปใช้ในการปรับตั้งค่าปัจจัยนำเข้าต่างๆของกระบวนการเพื่อให้กระบวนการสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4.1 หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลอง มีดังนี้

(1) การทำซ้ำ (Replication) คือการทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง มีจุดประสงค์คือ

- เพื่อให้สามารถประเมินค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้ และนำค่าไปวิเคราะห์เพื่อประเมินว่าปัจจัยนำเข้าตัวใดที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองบ้าง
- เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

(2) การสุ่ม (Randomization) คือการทำการทดลองที่ลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเกิดขึ้นแบบสุ่ม มีจุดประสงค์คือ

- เพื่อให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจเกิดขึ้นในการทดลองได้
- เพื่อขจัดอคติหรือความเอนเอียงของผู้ทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าในทุกๆการทดลองจะไม่ได้เปรียบหรือเสียเปรียบในเรื่องของการทดลอง
- เพื่อนำไปวิเคราะห์และทดสอบทางสถิติ ซึ่งมีข้อกำหนดว่าค่าความคลาดเคลื่อน (Error) จะต้อง

เกิดขึ้นอย่างสุ่มเป็นอิสระต่อกัน การสุ่มจึงเป็นการทำให้ข้อมูลตรงตามข้อกำหนดเหล่านี้ การสุ่มจะช่วยให้การจัดหรือเฉลี่ยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ให้มีโอกาสเกิดขึ้นเท่าๆกัน

(3) การบล็อก (Blocking) คือเทคนิคการเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง ซึ่งจะเห็นความแตกต่างโดยการเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆภายในแต่ละบล็อก โดยในบล็อกเดียวกันจะมีความใกล้เคียงกันหรือเหมือนกันเองมากกว่ากลุ่มการทดลองทั้งหมด

2.4.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง โดยการออกแบบการทดลองนี้จะนำหลักการทางสถิติเข้ามาช่วยออกแบบมีขั้นตอน ดังนี้

1. นิยามปัญหา (Statement of the problem) เป็นการระบุความต้องการในการผลิต ซึ่งจะสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดลอง

2. เลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย (Factors and levels) เป็นการระบุปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อการทดลอง และช่วงการทดลองในแต่ละปัจจัย โดยใช้หลักการทางทฤษฎีหรือข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆ รวมถึงประสบการณ์จริงที่เคยเกิดขึ้น ซึ่งการกำหนดระดับปัจจัยแบ่งได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

2.1 แบบกำหนด (Fixed effect) คือ ระดับของปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าได้แน่นอนจากผู้ทำการทดลองเอง

2.2 แบบสุ่ม (Random effect) คือ ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน จึงทำให้ผลที่ได้จากการทดลองเป็นตัวแทนของปัจจัย ไม่ใช่เป็นเพียงตัวแทนของระดับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง

2.3 แบบผสม (Mixed effect) คือ ระดับของปัจจัยทั้งแบบกำหนดเองและแบบสุ่ม

3. เลือกตัวแปรตอบสนอง (Response variable) คือ การเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่การทดลองที่ใช้ในการศึกษา และข้อมูลที่ได้จากตัวแปรนี้จะต้องมีการวัดค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ นั่นคือรวมไปถึงเครื่องมือวัดนั้นก็จะต้องมีความถูกต้องและแม่นยำด้วย

4. เลือกแบบการทดลอง (Experimental design) คือการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดการทดลอง จำนวนซ้ำของการทดลอง (Replicate) ลำดับการทดลองที่เหมาะสม(Randomization) และการบล็อกที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

5. ดำเนินการทดลอง คือ ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นก่อนหน้า ซึ่งผู้ทดลองจะต้องศึกษาและดูแลอย่างใกล้ชิดเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยคำนึงถึงความถูกต้องและความสม่ำเสมอในการทดลอง

6. วิเคราะห์ข้อมูล คือ การนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสรุปผล รวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูล โดยวิธีการทางสถิติเป็นเพียงแนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ช่วงของความเชื่อมั่นในการสรุปผล

(7) สรุปผลและข้อเสนอแนะ คือ การสรุปผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งอาจจะแสดงเป็นรูปภาพ แผนภูมิเพื่อเป็นข้อเสนอแนะในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น และเพื่อเป็นการยืนยันว่าสิ่งที่ได้สรุปนั้นถูกต้องก็ควรจะมีการทดสอบอีกครั้งหนึ่ง

2.4.3 ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง มีดังนี้

- (1) วิธีปฏิบัติหรือทรีทเมนต์ (Treatment) คือ วิธีที่ผู้ดำเนินการทดลองปฏิบัติต่อการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลตามวัตถุประสงค์
- (2) ปัจจัย (Factor) คือ สิ่ง que คิดว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองและนำมาทำการทดลอง ซึ่งปัจจัยจะมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพหรือเชิงปริมาณก็ได้ โดยแบ่งเป็น
 - ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factors) เป็นปัจจัยที่ผู้ทดลองสามารถกำหนดค่าของปัจจัยในการทดลองได้
 - ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable factors) เป็นปัจจัยที่ผู้ทดลองไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนี้ได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุน
- (3) ตัวแปรตอบสนอง (Response variable) คือ ตัวแปรในการทดลองที่ผู้ทดลองต้องทำการวัดค่าหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวแปรตาม ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ โดยสามารถมีตัวแปรได้มากกว่า 1 ตัวในหนึ่งการทดลอง และการเลือกตัวแปรที่เหมาะสมนั้นจะพิจารณาจากความไว ความเชื่อถือได้ การแจกแจงของตัวแปรนั้น และความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

2.4.4 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลจะนิยมใช้ในการทดลองที่มีหลายปัจจัยที่ต้องการศึกษาผลรวมที่มีผลต่อผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น โดยถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดใน การตรวจสอบอิทธิพลของหลายปัจจัยที่เกิดขึ้นพร้อมกัน เนื่องจากเป็นการทดลองที่สมบูรณ์ในแต่ละ ครั้งหรือในแต่ละซ้ำของการทดลองนั้น ซึ่งรูปแบบการทดลองแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

1. อิทธิพลหลัก (Main effect) คือ อิทธิพลของตัวปัจจัยเองที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น
2. อิทธิพลร่วม (Interaction effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน

ตัวอย่างการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

1. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือการออกแบบการทดลองชนิดง่ายที่สุด โดยประกอบไปด้วย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับ ดังนั้นในแต่ละชุดของการทำการทดลอง จะประกอบด้วย การทดลองปัจจัยร่วมทั้งหมด $a \times b$ การทดลองและมีจำนวนการทำซ้ำ (replicate) n ครั้ง
2. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k คือการออกแบบที่ใช้ในกรณีที่มี k ปัจจัย และในแต่ละปัจจัย ประกอบด้วย 2 ระดับ และข้อมูลนั้นเป็นได้ทั้งข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมดในหนึ่งชุดการทดลองจะเท่ากับ 2^k ซึ่งการออกแบบเช่นนี้จะทำให้เป็นประโยชน์มากๆ ในช่วงแรกของการทดลองที่มีปัจจัยจำนวนมากในการนำมาตรวจสอบ โดยทั่วไปในการออกแบบจะแทนเครื่องหมาย “+” ในระดับการทดลองสูง และแทนเครื่องหมาย “-” ในระดับการทดลองต่ำ
3. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับหรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k คือการออกแบบที่ใช้ในกรณีที่มี k ปัจจัย และในแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมีระดับสูง กลาง ต่ำ คือ +1, 0, -1 ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นมาเป็น 3 ระดับนั้นจะทำให้สามารถเห็นความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่สนใจและปัจจัยที่สนใจ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมีข้อดีที่เป็นเอกลักษณ์โดดเด่นหลายประการ เช่น ผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ (Renewable resource), สามารถย่อยสลายได้และสามารถรีไซเคิลได้, มีความโปร่งใสและสมบัติเชิงกลที่ดี แม้ว่าจะมีข้อดีมากมายแต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานคือเปราะและไม่ทนแรงกระแทก ที่นำไปสู่งานวิจัยค้นคว้าและพัฒนาเพื่อปรับปรุงข้อจำกัดของพอลิแลคติกแอซิด โดยการผสมกับพอลิเมอร์อื่นๆ เพื่อลดความเปราะลง โดยพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นอาจจะมีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้หรือย่อยสลายไม่ได้ นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยจำนวนมากที่พยายามจะปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับพอลิเมอร์ ดังนั้นการหาจุดเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปจึงมีความจำเป็นและมีความน่าสนใจเพิ่มขึ้น

Yuyue Qin และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาผลของการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ทำมาจากแผ่นฟิล์มทั้ง 3 ชนิดดังนี้ 1.แผ่นฟิล์มประกอบพอลิแลคติกแอซิด(PLA)/poly(ϵ -caprolactone)(PCL)/thymol(TH) 2.แผ่นฟิล์มPLA/PCL และ 3.แผ่นฟิล์มpolyethylene(PE) ต่อคุณภาพอาหารทางจุลชีววิทยาและคุณภาพทางเคมีกายภาพของพริกชี้หนูซึ่งเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 °C เป็นเวลา 28 วัน โดยที่มาของปัญหานี้คือพริกชี้หนูมีอายุหลังการเก็บเกี่ยวที่สั้นโดยประมาณ 15 วัน ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่มาจากการสูญเสียน้ำและการย่อยสลายตัวเองของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงทำการพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อยืด

ระยะเวลาเก็บของพริกชี้หนู ซึ่งผลการทดลองที่ได้ ยืนยันว่าแผ่นฟิล์มประกอบ polylactic acid(PLA)/ poly(ϵ -caprolactone)(PCL)/ thymol (TH) สามารถชะลอความสูญเสียที่เกิดจากจุลินทรีย์, การสูญเสียน้ำหนัก, การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน, ความแน่นเนื้อ, วิตามินซี, ปริมาณความเข้มข้นของฟีนอลิก, และคุณภาพทางประสาทสัมผัสตลอดช่วงการเก็บรักษาได้ แต่ในเรื่องสีของพริกชี้หนูนั้นไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าแผ่นฟิล์มประกอบ polylactic acid(PLA)/ poly (ϵ -caprolactone)(PCL)/ thymol(TH)สามารถนำมาใช้เพื่อรักษาคุณภาพความสดของพริกชี้หนูและยืดอายุหลังการเก็บเกี่ยวของพริกชี้หนูได้ แต่อย่างไรก็ตามสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (thymol)นี้อาจจะมีการระเหยไปสู่ผลิตภัณฑ์ได้ จึงจะต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

Sung Wook Hwang และคณะ [7] ได้ทำการกราฟต์มาเลอิกแอนดไฮไดรด์ (maleic anhydride; MAH) ลงบน Poly(L-lactic acid) (PLLA) โดยมีไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ทำหน้าที่เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาชนิดเรดิคัล เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณมาเลอิกแอนดไฮไดรด์และไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อการกราฟต์, สมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PLLA โดยการวิเคราะห์นั้นจะกำหนดปริมาณของสารเคมีไว้ที่สภาวะต่างๆดังนี้ 1. ปริมาณDCPที่ 0.1 และ0.2 phr 2. ปริมาณMAHที่ 0, 0.5, 1, 2, 3 phr ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติมมาเลอิกแอนดไฮไดรด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แผ่นฟิล์มPLLA มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) และมีความเป็นผลึกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าการสลายตัวทางความร้อน(thermal decomposition)หรือเสถียรภาพทางความร้อนนั้นก็มีค่าลดลงเช่นกัน ในขณะที่สมบัติเชิงกลแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ยิ่งไปกว่านั้นยังพบการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของน้ำหนักโมเลกุลซึ่งอาจจะเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาของมาเลอิกแอนดไฮไดรด์ที่ก่อให้เกิดกิ่งก้านหรือเกิดปฏิกิริยาร่างแหระหว่างสายโซ่ของPLLA ส่งผลให้เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ (Chain entanglements) ในโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น

K.I. Ku Marsilla และ C.J.R. Verbeek [8] ได้ทำการดัดแปรพื้นผิว (Modification) ของ PLA เนื่องจากPLA มีโซ่เคียงข้าง (Side chain) ที่เฉื่อย ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องทำการดัดแปรพื้นผิวก่อน เพื่อที่จะสามารถปรับปรุงสมบัติของPLAต่อไปได้ โดยทำการกราฟต์กรดอิทาโคนิก (Itaconic anhydride; IA) ลงบน PLA และมีไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ทำหน้าที่เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาชนิดเรดิคัล ซึ่งจะกำหนดปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการทดลองต่างๆกันดังนี้ 1. ปริมาณความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่ 2-6 wt.% และ 2. ปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ 0.5-0.75 wt.% และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 180°C และ 200°C เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ผลจากการทดลองพบว่าการกราฟต์ของกรดอิทาโคนิกเกิดขึ้นลงบนPLA ซึ่งตรวจสอบได้จากผลของการไทเทรต ร้อยละการเกิดการกราฟต์สูงสุดอยู่ที่ 0.75 และการกราฟต์จะค่อยๆเกิดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดอิทาโคนิก

และความเข้มข้นของไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) เกิดขึ้นต่ำที่สุด ในส่วนของอุณหภูมินี้มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (Initial rate) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.024 และ 0.03 (L/mol s)^{1/2} หลังจากทำการกราฟต์กรดอิกทาโคนิคลงบนPLAแล้วพบว่า ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Enthalpy of fusion), ความร้อนแฝงในการเกิดเป็นผลึก (enthalpy of crystallization)เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับPLAที่ไม่ได้ทำการกราฟต์ นอกจากนี้ทั้งความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และร้อยละการยืด (Elongation) ที่จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกราฟต์ทำให้สายโซ่มีความแข็งตึง (Stiffness) ลดลง

นอกจากนี้พอลิแลกติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ เพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกันและเป็นที่ยอมรับ จึงมีการทดสอบการย่อยสลายโดยการนำพลาสติกไปฝังดิน จากนั้นจะนำมาชั่งน้ำหนักที่หายไป แต่ไม่ได้รับการยอมรับจากสากลประกอบกับถ้าหากมีการดูดซับน้ำได้ของพลาสติกนั้นก็ทำให้ค่าที่ได้จากการชั่งน้ำหนักนั้นผิดพลาดไปจากความจริงและสภาพดินหรือภูมิประเทศของแต่ละประเทศไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงเกิดมาตรฐานสากลระดับนานาชาติขึ้น โดยมีข้อกำหนดไว้ว่าผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพต้องผ่านการทดสอบ 4 ข้อจึงจะได้รับการยืนยันและรับรอง มีดังนี้ [9]

- (1) การประเมินการย่อยสลายได้เบื้องต้นจากการศึกษาโครงสร้างทางเคมี
- (2) อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability)
- (3) อัตราการแตกละเอียดระหว่างกระบวนการหมักทางชีวภาพ (Disintegration during biological treatment)
- (4) การวิเคราะห์คุณภาพ และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ (Ecotoxicity)

โดยการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกในสภาวะแวดล้อมต่างๆ จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 5338-03 และ ISO 14855-04 นอกจากนี้ยังมีการดัดแปลงสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 14851-04 และ ISO 14852-04 ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่ได้รับการยอมรับ

จากเหตุผลที่พอลิแลกติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ อีกทั้งยังสามารถผลิตได้จากทรัพยากรหมุนเวียน จึงสนใจได้รับความสนใจในปัจจุบันและบางบริษัทก็มีการนำพลาสติกชีวภาพนี้มาใช้จริงในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น บริษัท Stonyfield farm [10] ได้นำพอลิแลกติกแอซิดมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ้วยบรรจุโยเกิร์ตร้อยละ 93 แทนการใช้พอลิโพรพิลีนชนิดทนแรงกระแทก (High impact polystyrene;HIPS) ซึ่งช่วยลดภาวะโลกร้อนได้ถึงร้อยละ 48

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับพลาสติกชนิดนี้ ซึ่งสิ่งที่น่าสนใจคือสมบัติที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ อีกทั้งพอลิแล็กติกแอซิดยังมีสมบัติการขวางกั้น (Barrier property) ที่ดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์สำหรับใส่อาหารหรือผลไม้ได้ แต่เนื่องจาก PLA มีความเปราะ จึงต้องทำการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น จากงานวิจัยของ Nalin และคณะ [11] ได้ทำการผสม PLA กับพอลิโพรพิลีน(PP) โดยใช้ PP-g-MAH เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ที่มีความเข้ากันได้กับทั้งพอลิเมอร์สองชนิด โดยส่วนที่เป็น PP จะเข้าทำปฏิกิริยากับ PP และส่วนแอนไฮไดรด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่มีขั้วของ PLA

ในส่วนของสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดนั้นส่งผลให้อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงและนอกจากนี้การผสม PLA ลงใน PP ส่งผลให้อุณหภูมิสลายตัว (Degradation temperature; T_d) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/PLA มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 330-476 °C ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการทำการผสมระหว่าง PP และ PLA เป็นการปรับปรุงสมบัติทางเสถียรภาพทางความร้อนให้ดีขึ้นได้ โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 สมบัติทางความร้อนของPP, PLA และ PP/PLA blend

Sample	T_g (°C)	T_m (°C)	T_c (°C)
PP	-	159.96	117.69
PLA	56	154.98	-
PP/PLA(60:40)	52.48	157.96	118.28
PP/PLA(50:50)	53.56	156.77	118.34
PP/PLA(40:60)	53.07	154.01	118.56

หมายเหตุ:

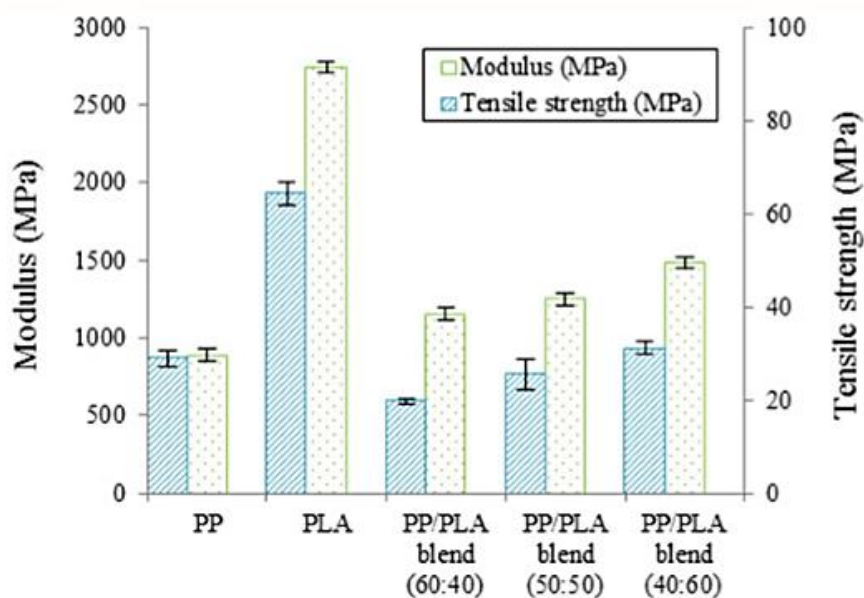
T_g คืออุณหภูมิที่พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งกลายเป็นสถานะคล้ายยาง โดยสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้และมีความยืดหยุ่น

T_m คืออุณหภูมิการหลอมละลายของพอลิเมอร์จากของแข็งกลายเป็นของเหลว ซึ่งสามารถนำค่าตรงนี้ไปใช้ในการตัดสินใจว่าจะนำพอลิเมอร์นี้ไปผ่านกระบวนการใดในการขึ้นรูป

T_c คืออุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์จากสถานะของเหลวหรือสถานะคล้ายยาง ไปเป็นสถานะของแข็ง

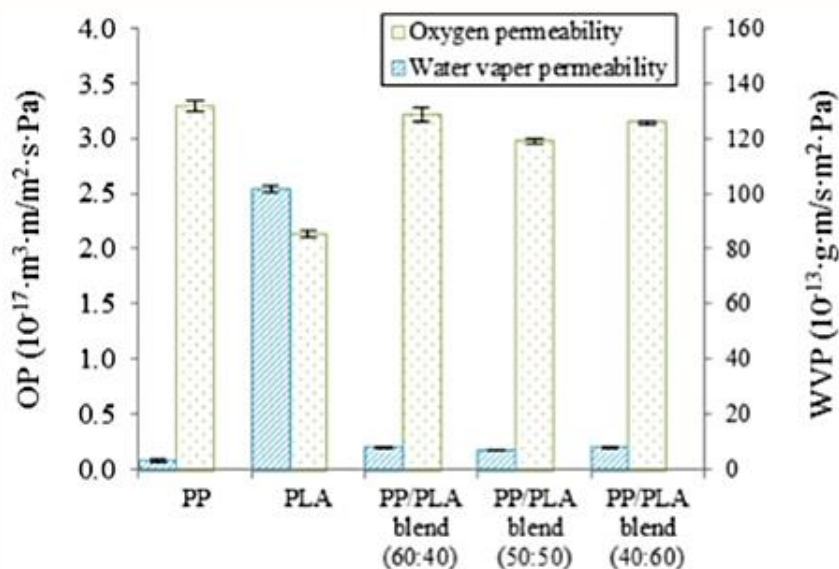
จากผลการทดสอบความทนแรงดึง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ PLA ส่งผลให้มอดูลัสของยัง (Young's modulus) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติความทนแรงดึง (Tensile strength) มีค่า

ลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ก่อนที่จะทำการผสมดังรูปที่ 2.33 นั้นเป็นเพราะว่ามีความไม่เข้ากันระหว่างความไม่มีขั้วของ PP และความมีขั้วของ PLA จึงจัดได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ผสมแบบแยกวัฏภาค ไม่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible polymer blend) ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่สามารถพบได้ทั่วไปในพอลิเมอร์ผสมชนิดนี้



รูปที่ 2.33 ความทนแรงดึงของPP, PLA และ PP/PLA blend

ในส่วนของการซึมผ่าน (Barrier properties) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/PLA พบว่าที่อัตราส่วน 50:50 นั้นมีค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำต่ำกว่าวัสดุอื่นและต่ำที่สุดดังรูปที่ 2.34 นั้นเป็นเพราะว่าเกิดการกระจายตัวได้ดีในโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้การที่พอลิเมอร์ผสมเกิดการซึมผ่านของไอน้ำที่ต่ำขึ้น ยังเป็นการบ่งบอกว่ามีแนวโน้มที่พอลิโพรพิลีนจะมีความสามารถในการย่อยสลายได้ขึ้นเมื่อนำมาผสมกับ PLA



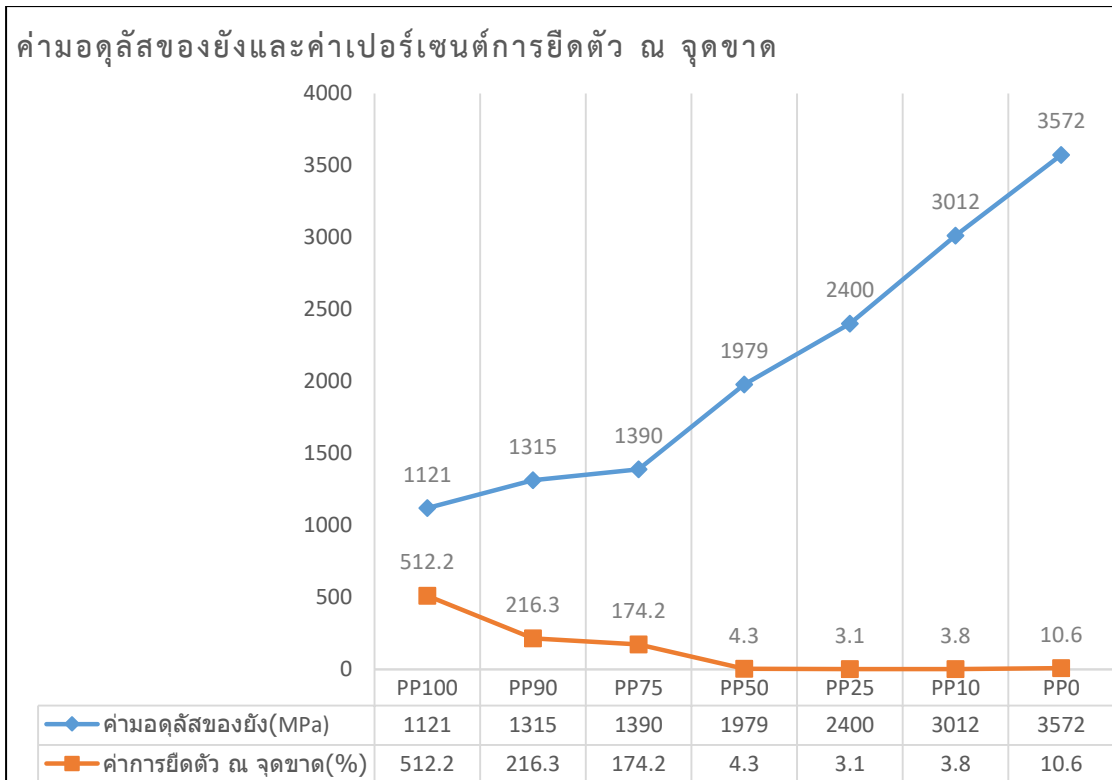
รูปที่ 2.34 สมบัติขวางกันของPP, PLA และ PP/PLA blend

ในการแก้ไขปัญหาเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์นั้น มีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่ทำได้ง่าย ใช้ปริมาณสารในระดับห้องทดลองและมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีอื่นๆ คือ การทำพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ด้วยวิธีนี้จะต้องดูความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมที่นำมาทำการผสมกันด้วย เช่น Dean Shi และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรไลต์บนพอลิโพรพิลีนด้วยกระบวนการผสมโดยการอัดรีดแบบเกิดปฏิกิริยา (Reactive extrusion) โดยการปรับปรุงพอลิโพรพิลีนมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในกระบวนการเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilization) ของพอลิเมอร์ผสมแบบแยกวัฏภาค (Immiscible blend) พอลิโพรพิลีน-พอลิเอไมด์ และพอลิโพรพิลีน-พอลิเอสเทอร์เพื่อปรับปรุงแรงยึดของรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ไดคิมิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณมาเลอิกแอนไฮโดรไลต์จะทำให้เกิดการกราฟต์มากขึ้น แต่ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณของ DCP ด้วย โดยยังมี DCP ปริมาณมาก ค่าสูงสุดของการเกิดการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮโดรไลต์บนพอลิโพรพิลีนก็จะเกิดมากขึ้นด้วย

Sukeewan Detyothin และคณะ [13] ได้นำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface methodology; RSM) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการทดลองทางเคมีเพื่อวิเคราะห์ผลของปริมาณมาเลอิกแอนไฮโดรไลต์, 2,5-bis(tert-butylperoxy)-2,5-dimethyl hexane (L101) และความเร็วของสกรูที่มีต่อระดับการเกิดการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮโดรไลต์บนพอลิแลกติกแอซิด เนื่องจากปฏิสัมพันธ์และการเสริมกันระหว่างปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีผลกับการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรไลต์และปฏิกิริยาข้างเคียงของ PLA ดังนั้นจึงนำรูปแบบการคำนวณทางสถิติและคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยบ่งชี้และเพื่อหาสมการทำนายระดับการกราฟต์ ซึ่งวิธี RSM นั้นเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้กันอย่าง

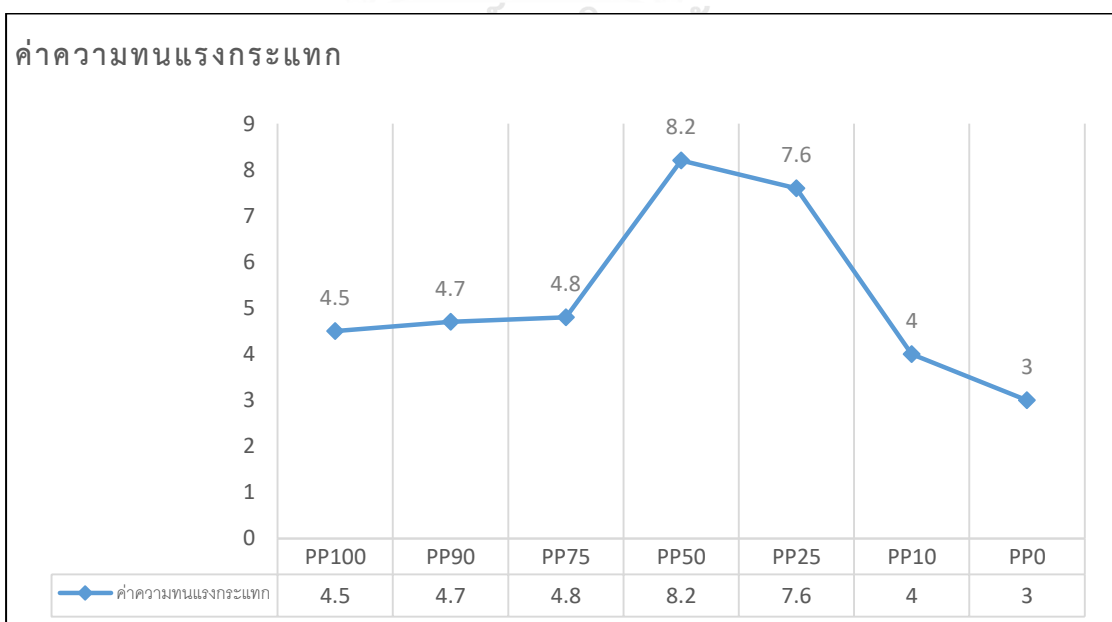
แพร่หลายในการกำหนดจุดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิต จากการทดลองพบว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดการกราฟต์ลงบนสายโซ่โพลีเอทิลีน (Backbone) ของ PLA และการกราฟต์จะเกิดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์และเพิ่มปริมาณของ L101 นอกจากนี้จุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal condition) ในการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงบน PLA คือที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์เท่ากับ 4.5 wt%, 2,5-bis(tert-butylperoxy)-2,5-dimethyl hexane ที่ปริมาณระหว่าง 0.45-0.65 wt% และความเร็วสกรูเท่ากับ 20 rpm

Somma Pivsa-Art และคณะ [14] ทำการผสม PLA กับ PP ขึ้นเพื่อใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูป โดยใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MAH) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ เพราะ PLA และ PP นั้นมีวิวัฒนาการที่แยกออกจากกันจึงต้องมีตัวเชื่อมวิวัฒนาการ ซึ่งอัตราส่วนในการทดลองของ PLA และ PP นั้นเท่ากับ 80:20 และ 20:80 ปริมาณการเติมของ PP-g-MAH เท่ากับร้อยละ 1,3 และ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณ PLA เพิ่มขึ้นส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างสังเกตได้จากการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา นอกจากนี้ยังพบว่า PP-g-MAH มีส่วนช่วยในการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้อีกด้วย ในการทำการผสมของ PLA และ PP นอกจากจะใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้แล้ว ยังสามารถใช้วิธีที่เรียกว่า Multicomponent nanocomposite systems ซึ่งเป็นวิธีที่เมื่อไม่กี่ปีมานี้ให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากเมื่อทำการปรับปรุงแล้วจะทำให้ได้สมบัติเชิงกล, สมบัติเชิงกายภาพ, สมบัติเชิงแสง และสมบัติการไหลที่โดดเด่นของพอลิเมอร์ผสม โดยการเติมสารเสริมแรงอนินทรีย์ระดับนาโนเมตรลงไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากงานวิจัยของ Hassan Ebadi-Dehaghani และคณะ [15] ทำการเติมอนุภาคระดับนาโนของดิน (Clay nanoparticles) ลงไปในการผสม PP และ PLA จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของส่วนผสมต่อสมบัติเชิงกล เพื่อเพิ่มพูนความรู้ในด้านของความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมโพสิต เพื่อนำไปใช้ในการทำนายสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตและแสดงให้เห็นหนทางใหม่ในการบรรลุเป้าหมายที่จะทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมและดีขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลระหว่างก่อนใส่และหลังใส่อนุภาคระดับนาโนของดิน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.35 โดยในกรณีที่ผสม PP/PLA เพียงอย่างเดียว โดยค่ามอดูลัสของยังจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PP ลดลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ PP ที่ลดลง



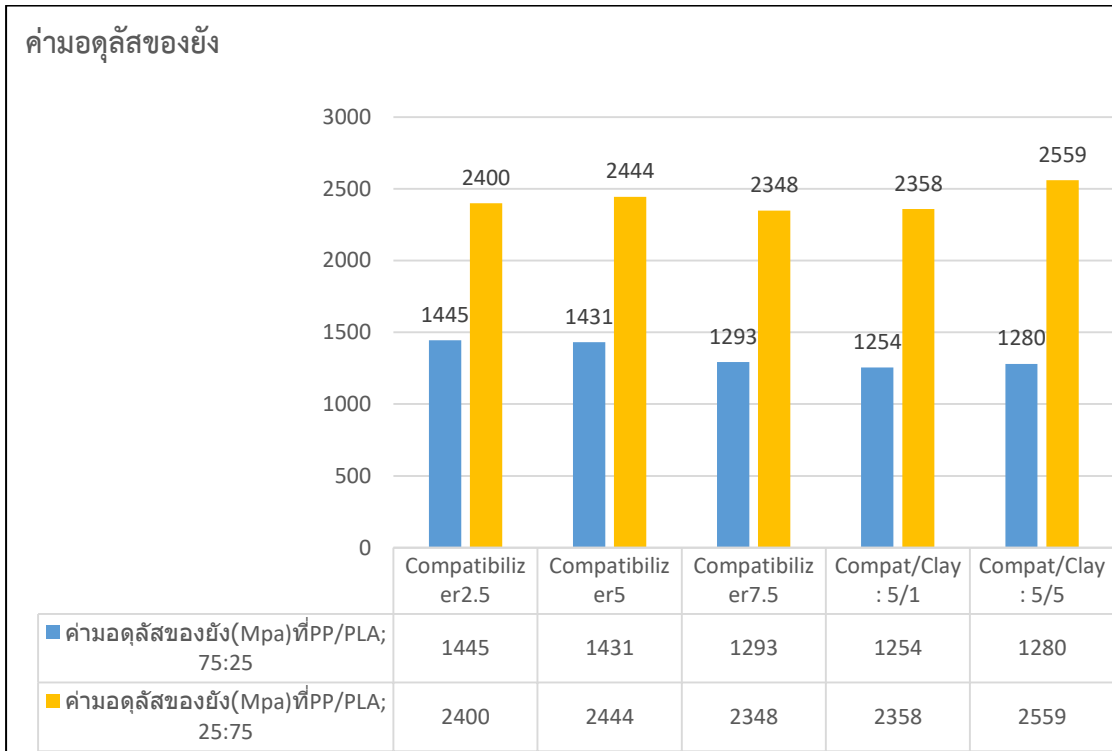
รูปที่ 2.35 แนวโน้มค่ามอดุลัสของยังและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดใน PP กับ PLA ที่อัตราส่วนต่างๆ

ส่วนค่าความทนแรงกระแทก สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.36 โดยค่าความทนแรงกระแทก ไม่ปรากฏแนวโน้มอย่างชัดเจน นั่นอาจเป็นเพราะผลของความเข้ากันได้ของ PP/PLA อย่างจำกัด จึงทำให้เกิดการแยกเฟส ส่งผลให้การส่งผ่านแรงเกิดได้ไม่ดี ค่าความทนแรงกระแทกจึงลดลง

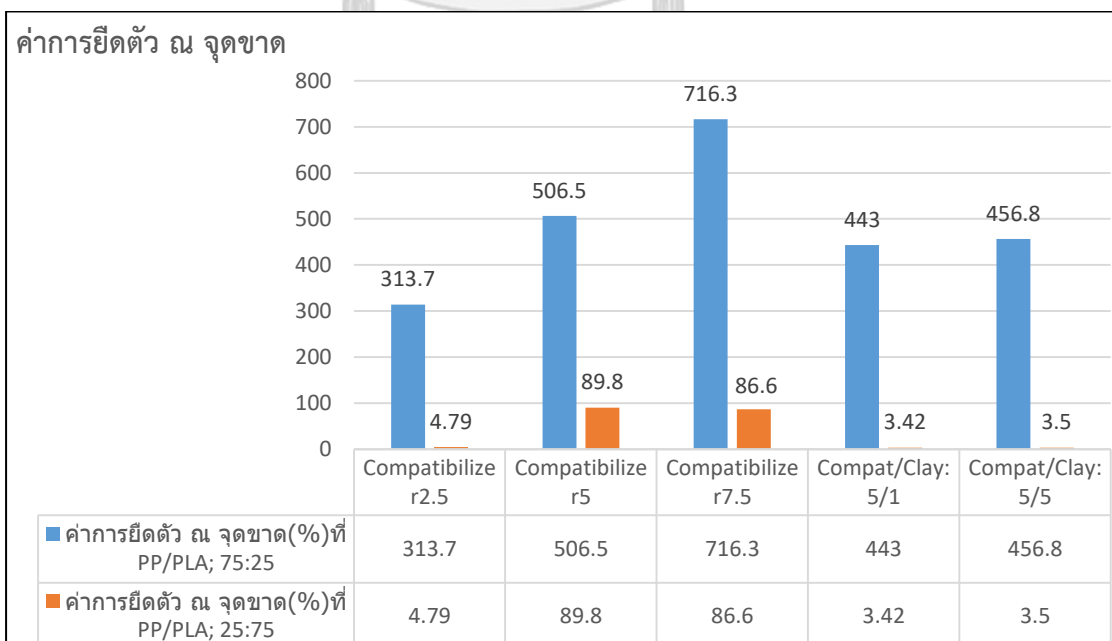


รูปที่ 2.36 แนวโน้มค่าความทนแรงกระแทกในPPกับPLA ที่อัตราส่วนต่างๆ

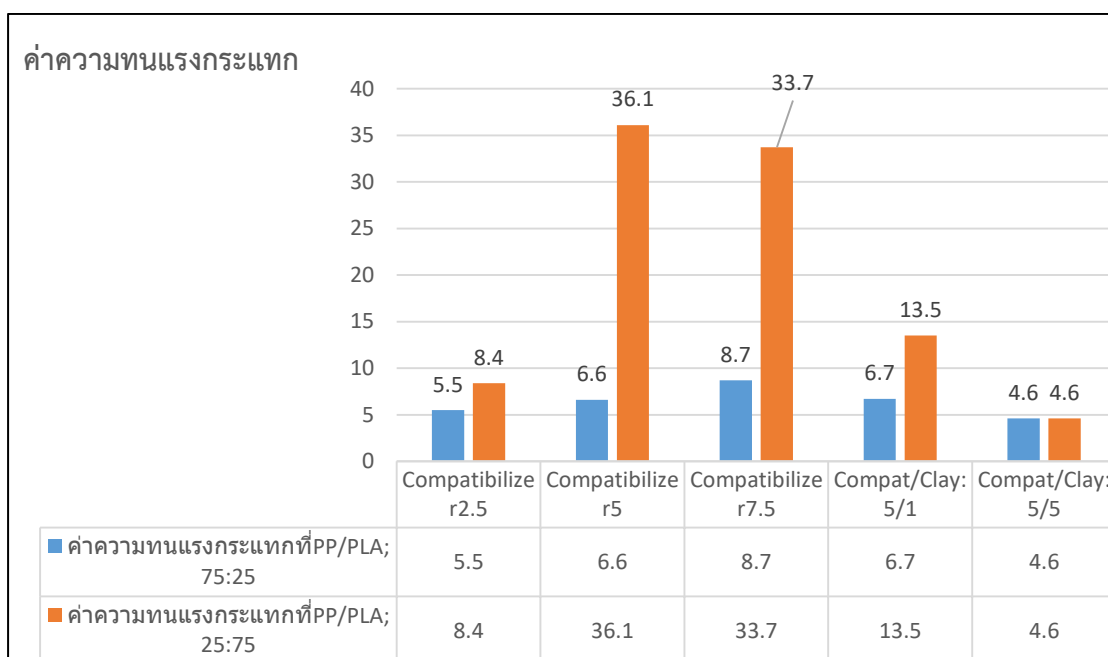
หลังจากนั้นจึงทำการเลือกสูตรผสมPP/PLA ที่อัตราส่วน 75:25 และ 25:75 นำมาใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ และอนุภาคระดับนาโนของดินที่ปริมาณต่างๆ นำไปทดสอบเพื่อหาค่ามอดูลัสของยังได้ผลดังรูปที่ 2.37 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดดังรูปที่ 2.38 และค่าความทนแรงกระแทกดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.37 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังในการผสมPPกับPLAเมื่อมีการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 2.38 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดในการผสมPPกับPLAเมื่อมีการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 2.39 เปรียบเทียบค่าความทนแรงกระแทกในการผสมPPกับPLAเมื่อมีการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้

จากการทดสอบพบว่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้นาโนคอมโพสิตมีสมบัติดีขึ้นคือขอบเขตอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาคระดับนาโนของดิน นอกจากนี้ยังมีการนำการออกแบบการทดลองเข้ามาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำพอลิเมอร์ผสมหรือหาอิทธิพลของสารเคมี ปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม เช่น จากงานวิจัยของ V. Nagarajan [16] ได้ทำการผสมพอลิไตรเมทิลเอทิลีนเทเรพทาเลต (PTT) และ PLA โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมพอลิเมอร์ร่วม สารขยายโซ่ (Chain extender) และความเร็วสกรูของเครื่องจักร เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PPT/PLA ที่ได้โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Mixed level full factorial design เก็บข้อมูลนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อนำไปสร้างสมการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple linear regression models) และหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการด้วยวิธีการหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุด (Response optimization) ด้วยโปรแกรม Minitab โดยมีการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง ดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 การออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

ลำดับ ที่	พอลิเมอร์รวม (phr)	สารขยายโซ่ (phr)	ความเร็วสกรู (rpm)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)	ค่าความทนแรงดึง (MPa)
1	10	0	100	34.3	50.8
2	10	0	200	51.1	50.4
3	10	0.25	100	40.2	50.5
4	10	0.25	200	69.4	49.1
5	10	0.50	100	50.4	50.3
6	10	0.50	200	69.9	50.4
7	15	0	100	49.8	43.9
8	15	0	200	67.8	44.9
9	15	0.25	100	91.4	44.9
10	15	0.25	200	108.2	43.7
11	15	0.50	100	91.4	46.3
12	15	0.50	200	122.9	44.2
13	20	0	100	57.2	37.8
14	20	0	200	150.9	36.5
15	20	0.25	100	130.2	38.5
16	20	0.25	200	169.2	38.2
17	20	0.50	100	120.2	38.8
18	20	0.50	200	205.1	37.5

จากนั้นทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้และนำค่าสมบัติที่ทดสอบมาวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) โดยแบ่งเป็นค่าความทนแรงกระแทกดังตารางที่ 2.15 และค่าความทนแรงดึงดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) สำหรับค่าความทนแรงกระแทก (J/m)

Source	df	Sum of squares (SS)	Mean squares (MS)	F-value	P-value
พอลิเมอร์ร่วม	2	21,616.5	10,808.2	84.32	0.001
สารขยายไซ้(CE)	2	5596.7	2798.3	21.83	0.007
ความเร็วสกรู(SP)	1	7171.6	7171.6	55.95	0.002
พอลิเมอร์ร่วม*CE	4	1040.6	260.2	2.03	0.255
พอลิเมอร์ร่วม*SP	2	2907.8	1453.9	11.34	0.022
CE*SP	2	158.1	79.1	0.62	0.584
Error	4	512.7	128.2		
Total	17	39,004.0			

ตารางที่ 2.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) สำหรับค่าความทนแรงดึง (MPa)

Source	df	Sum of squares (SS)	Mean squares (MS)	F-value	P-value
พอลิเมอร์ร่วม	2	456.94	228.47	358.78	0.000
สารขยายไซ้(CE)	2	0.88	0.44	0.70	0.551
ความเร็วสกรู(SP)	1	2.84	2.84	4.46	0.102
พอลิเมอร์ร่วม*CE	4	2.87	0.71	1.13	0.455
พอลิเมอร์ร่วม*SP	2	0.20	0.10	0.16	0.858
CE*SP	2	0.75	0.37	0.59	0.596
Error	4	2.54	0.63		
Total	17	467.04			

นอกจากนี้ยังนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อได้เป็นสมการถดถอยเชิงพหุคูณอีกด้วย ซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 2.17 โดยมีตัวแปรตอบสนอง 2 ตัว คือ ค่าความทนแรงกระแทกและค่าความทนแรงดึง

ตารางที่ 2.17 สมการถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนอง	สมการถดถอย	R ² (%)	R ² _{adj} (%)
ค่าความทนแรง กระแทก (J/m)	$Y = 92.79 - 40.22A_1 - 4.14A_2 + 44.36A_3 -$ $24.23B_1 + 7B_2 + 17.22B_3 - 19.96C_1 + 19.96C_2 + 9.04A_1 * C_1 -$ $9.04A_1 * C_2 + 8.93A_2 * C_1 - 8.93A_2 * C_2 -$ $17.97A_3 * C_1 + 17.97A_3 * C_2$	95.61	92.54
ค่าความทนแรงดึง (MPa)	$Y = 44.281 + 5.978A_1 + 0.369A_2 - 6.347A_3$	97.84	97.55

โดย A_i คือพอลิเมอร์ร่วม B_i คือสารขยายโซ่ และ C_i คือความเร็วสกรู

จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อสมบัติความทนแรงดึงคือพอลิเมอร์ร่วม ในขณะที่สมบัติความทนแรงกระแทกนั้น ทุกปัจจัยทั้ง 3 ตัวล้วนแล้วแต่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงกระแทกและรวมไปถึงอิทธิพลร่วมระหว่างพอลิเมอร์ร่วมและความเร็วสกรู และสถานะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการเป็นไปตามตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 สถานะที่เหมาะสมที่สุดและค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้

สารเคมีที่ใช้ในพอลิเมอร์ผสม	ปริมาณ	ค่าความทนแรง กระแทก	ค่าความทนแรงดึง
PTT70-PLA30	85 phr	122 J/m	44 MPa
พอลิเมอร์ร่วม	15 phr		
สารขยายโซ่	0.5 phr		
ความเร็วสกรู	200 rpm		

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย นอกจากนี้ยังมีหัวข้อแผนการทดลองและขั้นตอนการขึ้นรูปและการทดสอบเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP โดยจะทำการผสมพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดทั้งที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้, สารริเริ่มปฏิกิริยาและทั้งที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา ตามหัวข้อต่างๆ ต่อไปนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย มีดังนี้

- (1) พอลิแลคติกแอซิด (PLA)
- (2) พอลิโพรพิลีน (PP)
- (3) ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP)
- (4) พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MAH)

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย มีดังนี้

- (1) เครื่องผสมแบบอัดรีดชนิดสองสกรู (Twin screw extruder)
- (2) เครื่องกดอัด (Compression moulding)
- (3) เครื่องมือทดสอบความทนแรงดึง (Tensile testing machine)
- (4) เครื่องมือทดสอบความแข็ง (Hardness tester)
- (5) เครื่องมือทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact tester)
- (6) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

3.2 แผนการทดลอง

3.2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA และ PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

เนื่องจากการทดลองในส่วนนี้ จะเป็นการทดลองที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ จึงทำให้เหลือเพียงปัจจัยเดียวคือปริมาณของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการผสม ดังตารางที่ 3.1 และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังแสดงในตารางแผนการทดลองที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกรณีที่ไม่มีการเพิ่มความเข้มข้นได้

ปัจจัย (Factors)	ระดับ (Levels)		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)
A: ปริมาณ PLA/PP (%)	70/30	50/50	30/70
B: ปริมาณ PP-g-MAH (phr)	0.	0	0
C: ปริมาณ DCP (phr)	0	0	0

ตารางที่ 3.2 ตารางแผนการทดลองในกรณีที่ไม่มีการเพิ่มความเข้มข้นได้

ที่	ปัจจัย	การตรวจสอบชิ้นงาน
	A: ปริมาณ PLA/PP (%)	
1	70/30	1.ทดสอบความทนแรงดึง 2.ทดสอบความทนแรงกระแทก 3. ทดสอบความแข็ง 4. ทดสอบสัณฐานวิทยา
2	70/30	
3	70/30	
4	50/50	
5	50/50	
6	50/50	
7	30/70	
8	30/70	
9	30/70	

3.2.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA และ PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

ในงานวิจัยนี้จะนำการออกแบบการทดลองแบบ Multilevel Factorial Design เข้ามาประยุกต์ใช้ ซึ่งจะประกอบด้วย 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีระดับที่ต่างกัน ดังตารางที่ 3.3 และตารางการออกแบบการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกรณีที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

ปัจจัย (Factors)	ระดับ (Levels)		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)
A: ปริมาณ PLA/PP (%)	70/30	50/50	30/70
B: ปริมาณ PP-g-MAH (phr)	0.3	-	0.7
C: ปริมาณ DCP (phr)	0.03	-	0.07

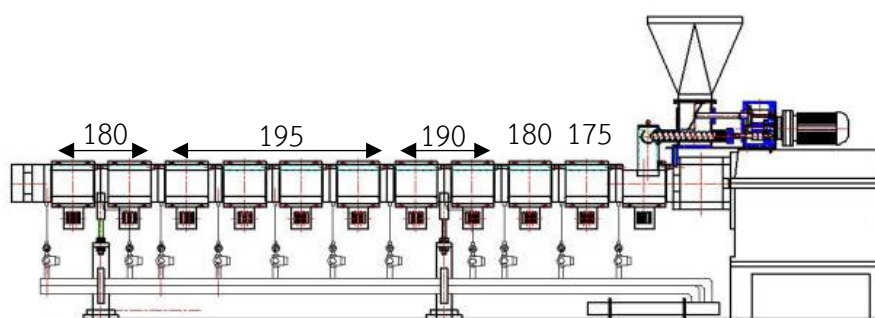
ตารางที่ 3.4 ตารางแผนการทดลองในกรณีที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

ที่	ปัจจัย			การตรวจสอบชิ้นงาน
	A: ปริมาณ PLA/PP (%)	B: ปริมาณ PP-g-MAH (phr)	C: ปริมาณ DCP (phr)	
1	70/30	0.3	0.03	1.ทดสอบความทนแรงดึง 2.ทดสอบความทนแรง กระแทก 3. ทดสอบความแข็ง 4. ทดสอบสัณฐานวิทยา
2	70/30	0.3	0.07	
3	70/30	0.7	0.03	
4	70/30	0.7	0.07	
5	50/50	0.3	0.03	
6	50/50	0.3	0.07	
7	50/50	0.7	0.03	
8	50/50	0.7	0.07	
9	30/70	0.3	0.03	
10	30/70	0.3	0.07	
11	30/70	0.7	0.03	
12	30/70	0.7	0.07	
13	70/30	0.3	0.03	
14	70/30	0.3	0.07	
15	70/30	0.7	0.03	
16	70/30	0.7	0.07	
17	50/50	0.3	0.03	
18	50/50	0.3	0.07	
19	50/50	0.7	0.03	
20	50/50	0.7	0.07	
21	30/70	0.3	0.03	
22	30/70	0.3	0.07	
23	30/70	0.7	0.03	
24	30/70	0.7	0.07	
25	70/30	0.3	0.03	
26	70/30	0.3	0.07	
27	70/30	0.7	0.03	
28	70/30	0.7	0.07	
29	50/50	0.3	0.03	
30	50/50	0.3	0.07	
31	50/50	0.7	0.03	
32	50/50	0.7	0.07	
33	30/70	0.3	0.03	
34	30/70	0.3	0.07	
35	30/70	0.7	0.03	
36	30/70	0.7	0.07	

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทำพอลิเมอร์ผสมจะใช้เครื่องผสมแบบอัดรีดชนิดสองสกรู ซึ่งขั้นตอนมีดังนี้

1. อบเม็ดพอลิเมอร์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55°C ไว้ 1 คืนก่อนทำการผสมเพื่อไล่ความชื้น
2. นำพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดคือพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) และพอลิโพรพิลีน (PP) มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบอัดรีดชนิดสองสกรู (twin screw extruder) ที่อัตราส่วนของ PLA/PP เท่ากับ 100/0 70/30 50/50 และ 30/70 โดยใช้ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 35 rpm และอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องผสมจะมีทั้งหมด 10 ช่วง ดังนี้ 175, 180, 190, 190, 195, 195, 195, 195, 180 และ 180 °C ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ช่วงอุณหภูมิทั้งสิบช่วงของเครื่องผสมแบบอัดรีดชนิดสองสกรู

3. หลังจากการผสมแล้วจึงนำเม็ดพลาสติกที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding machine) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และใช้แรงดัน 1.96 เมกะปาสกาล (MPa) เพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด โดยสำหรับการขึ้นรูปชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบความทนแรงดึงจะเป็นไปตามรูปที่ 3.2 และสำหรับการขึ้นรูปชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบความทนแรงกระแทกจะเป็นไปตามรูปที่ 3.3



(ก) เม็ดพอลิเมอร์ในแม่แบบก่อนการขึ้นรูป



(ข) ชิ้นทดสอบพอลิเมอร์หลังการขึ้นรูป

รูปที่ 3.2 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความทนแรงดึง



(ก) เม็ดพอลิเมอร์ในแม่แบบก่อนการขึ้นรูป



(ข) ชิ้นทดสอบพอลิเมอร์หลังการขึ้นรูป

รูปที่ 3.3 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความทนแรงกระแทก

4. นำชิ้นทดสอบไปทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ISO ด้วยเครื่องมือมาตรฐานตามรูปที่ 3.4



(ก) เครื่องมือทดสอบความทนแรงดิ่ง



(ข) เครื่องมือทดสอบความทนแรงกระแทก



(ค) เครื่องมือทดสอบความแข็ง

รูปที่ 3.4 เครื่องมือทดสอบสมบัติเชิงกล

5. เก็บค่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติต่อไป

3.4 วิธีการทดสอบชิ้นงาน

โดยในงานวิจัยมีการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมทั้งที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ และสารริเริ่มปฏิกิริยา ดังนี้

1. การทดสอบความทนแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ISO527 โดยสมบัติที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย

- ความทนแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength; UTS)
- ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (0.2% offset yield strength; YS)
- โมดูลัสของยัง (Young's modulus; YM)
- ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation @break; %EG)

2. การทดสอบความแข็ง (Hardness test) โดยใช้สเกล shore D ตามมาตรฐานที่กำหนดและสมบัติที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์คือความแข็งที่พื้นผิว (Hardness; HN)

3. การทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact test) ตามมาตรฐาน ISO180 โดยสมบัติที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์คือความทนแรงกระแทก (Impact strength; IMS)

4. การทดสอบทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

5. การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบไปด้วยผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา (PP-g-MAH และ DCP) โดยสมบัติเชิงกลจะประกอบไปด้วย ความทนแรงดึงสูงสุด, ความทนแรงดึง ณ จุดคราก, ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด, โมดูลัสของยัง, ความแข็งและความทนแรงกระแทก รวมไปถึงสัญญาณวิทยาและการย่อยสลายทางชีวภาพ อีกทั้งมีการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ว่าแตกต่างกันหรือไม่ตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ และหลังจากทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ จะนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนผสมต่างๆที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ขึ้นรูปได้

4.1 ผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA และ PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

เนื่องจากสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะขึ้นอยู่กับสัญญาณวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม อีกทั้งยังรวมไปถึงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ที่นำมาผสมอีกด้วย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

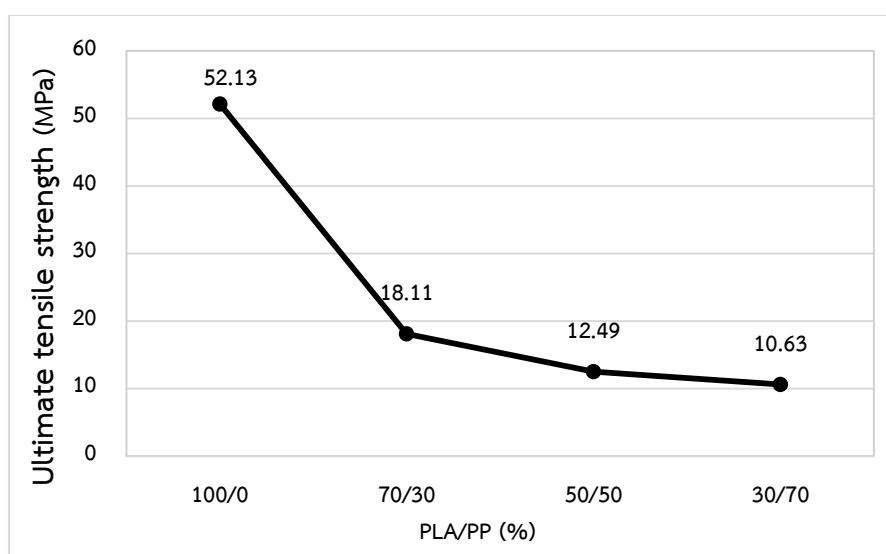
4.1.1 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength; UTS)

ผลจากการนำพอลิเมอร์มาผสมกันระหว่าง PLA และ PP โดยที่ไม่มีสารใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ เมื่อนำไปทดสอบความทนแรงดึง พบว่าค่าความทนแรงดึงสูงสุดที่ทดสอบได้เป็นไปตามตารางที่ 4.1 โดยค่าความทนแรงดึงที่จุดนี้จะเป็นจุดที่พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) โดยพอลิเมอร์จะไม่สามารถคืนรูปร่างกลับไปอยู่ในสภาพเดิม (ก่อนการได้รับแรงกระทำ) ได้ แม้จะหยุดการให้แรงกระทำแล้วก็ตาม จึงทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียรูปร่างก่อนที่จะเกิดการฉีกขาดหรือแตกหัก

ตารางที่ 4.1 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	Ultimate tensile strength; UTS (MPa)				
	ขั้นที่ 1	ขั้นที่ 2	ขั้นที่ 3	\bar{X}	SD
PLA/PP (100/0)	52.53	51.08	52.78	52.13	0.92
PLA/PP (70/30)	17.25	17.13	19.95	18.11	1.59
PLA/PP (50/50)	12.37	13.32	11.78	12.49	0.78
PLA/PP (30/70)	11.72	9.93	10.23	10.63	0.96

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อปริมาณสัดส่วนของ PP เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีความไม่เข้ากัน เนื่องจาก PLA เป็นสารที่มีขี้้วและ PP เป็นสารที่ไม่มีขี้้ว จึงทำให้เกิดการแยกวัฏภาค ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดที่ได้มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ PLA 100% ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แนวโน้มค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

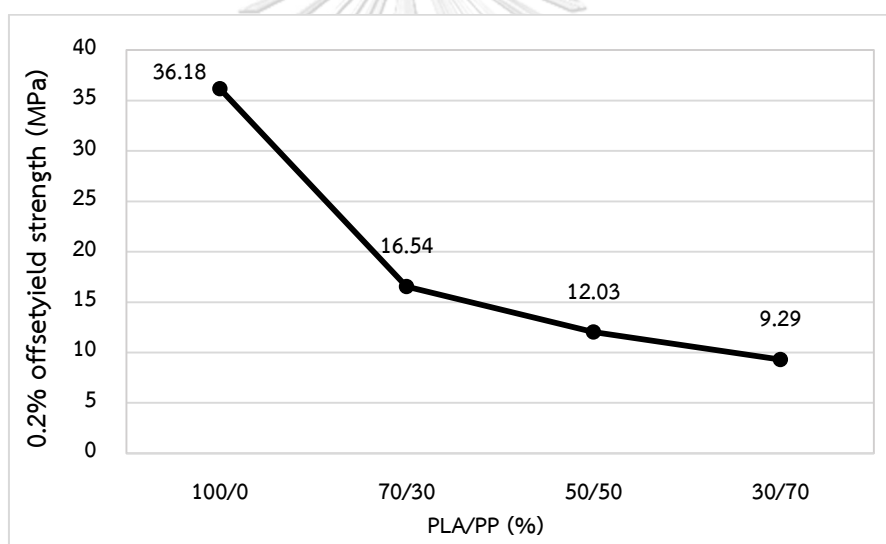
4.1.2 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก (0.2% offset yield strength; YS)

ผลจากการนำพอลิเมอร์มาผสมกันระหว่าง PLA และ PP โดยที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ เมื่อนำไปทดสอบความทนแรงดึง พบว่าค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก ที่ทดสอบได้เป็นไปตามตารางที่ 4.2 โดยค่าความทนแรงดึงที่จุดนี้จะเป็นจุดที่พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) โดยพอลิเมอร์จะยังสามารถคืนรูปร่างกลับไปอยู่ในสภาพเดิม (ก่อนการได้รับแรงกระทำ) ได้ เมื่อหยุดการให้แรงกระทำ ซึ่งพอลิเมอร์สามารถรับแรงที่มากกระทำได้โดยที่สามารถยืดหยุ่นได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรนั่นเอง

ตารางที่ 4.2 ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	0.2% offset yield strength; YS (MPa)				
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	\bar{X}	SD
PLA/PP (100/0)	35.15	37.29	36.09	36.18	1.07
PLA/PP (70/30)	15.67	16.95	16.99	16.54	0.75
PLA/PP (50/50)	11.24	13.15	11.69	12.03	1.00
PLA/PP (30/70)	9.70	9.20	8.96	9.29	0.38

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากมีความสอดคล้องกันกับค่าความทนแรงดึงสูงสุด โดยเมื่อปริมาณสัดส่วนของ PP เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แนวโน้มค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

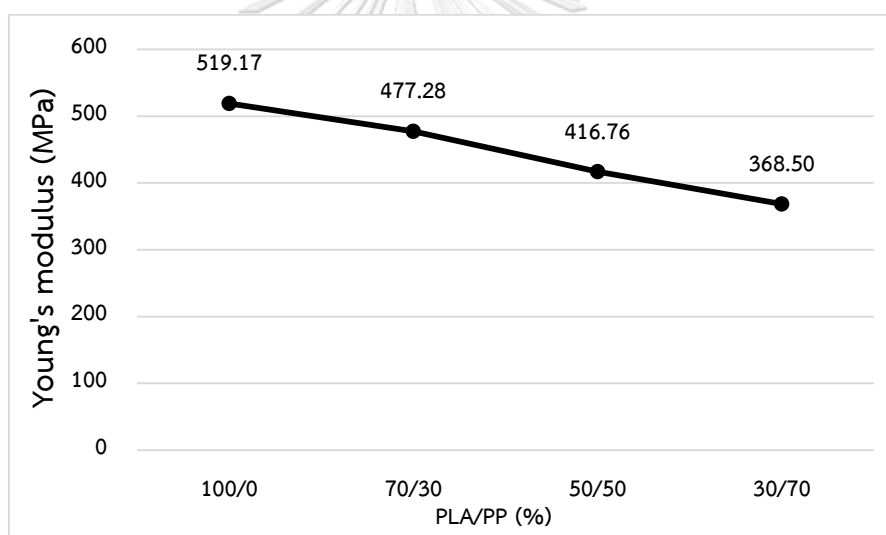
4.1.3 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus; YM)

ผลจากการนำพอลิเมอร์มาผสมกันระหว่าง PLA และ PP โดยที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ และนำไปทดสอบความทนแรงดึง ซึ่งนอกจากค่าความทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบนี้แล้ว ยังมีค่ามอดูลัสของยังที่ได้จากการทดสอบความทนแรงดึงนี้เช่นกัน ซึ่งค่ามอดูลัสของยังเป็นค่าที่บ่งบอกความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุ โดยวัสดุที่มีค่ามอดูลัสของยังสูง จะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสามารถต้านทานต่อแรงภายนอกได้มาก เปลี่ยนรูปร่างได้ยาก และไม่มีความยืดหยุ่น ซึ่งค่าทดสอบที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีการเพิ่มความเข้ากันได้

อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	Young's modulus; YM (MPa)				
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	\bar{X}	SD
PLA/PP (100/0)	522.93	520.50	514.07	519.17	4.58
PLA/PP (70/30)	474.27	482.02	475.56	477.28	4.15
PLA/PP (50/50)	416.06	410.57	423.66	416.76	6.57
PLA/PP (30/70)	385.00	362.50	358.00	368.50	14.47

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณสัดส่วนของ PP เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งเกร็งลดลง มีความเปราะลดลง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ PP นั้นมีแนวโน้มให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ไม่แข็งเปราะดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แนวโน้มค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีการเพิ่มความเข้ากันได้

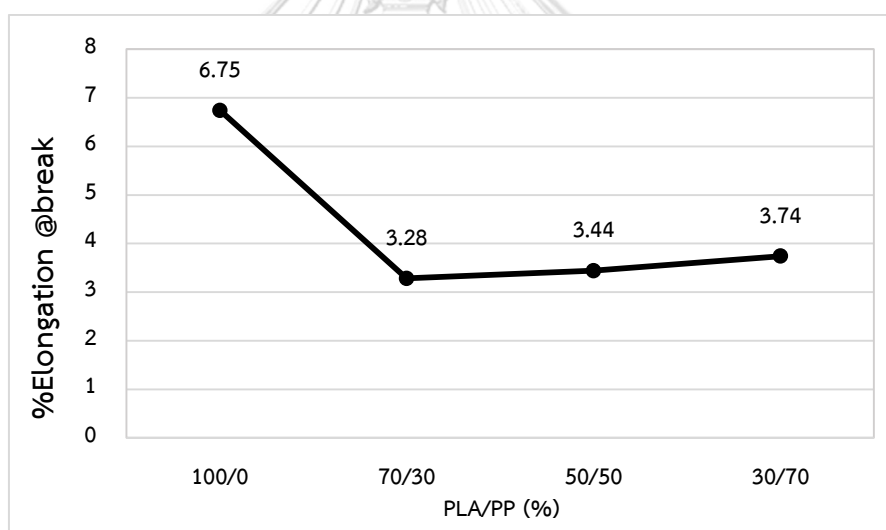
4.1.4 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation @break; %EG)

ผลจากการนำพอลิเมอร์มาผสมกันระหว่าง PLA และ PP โดยที่ไม่มีการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ และนำไปทดสอบความทนแรงดึง พบว่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ทดสอบได้เป็นไปตามตารางที่ 4.4 ซึ่งค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดนี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการยืดตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงดึงกล่าวคือเป็นการเปรียบเทียบความยาวที่เปลี่ยนไปกับความยาวเดิมก่อนทำการทดสอบ โดยพอลิเมอร์ที่มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมาก จะเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวสูง

ตารางที่ 4.4 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	%Elongation @break; %EG (%)				
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	\bar{X}	SD
PLA/PP (100/0)	6.80	6.51	6.93	6.75	0.22
PLA/PP (70/30)	3.22	3.32	3.31	3.28	0.06
PLA/PP (50/50)	3.45	3.34	3.53	3.44	0.10
PLA/PP (30/70)	3.78	3.67	3.77	3.74	0.06

จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณสัดส่วนของ PP เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนการผสม ส่งผลให้ร้อยละการยืดตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงวัสดุมีความเหนียวเพิ่มขึ้น มีความแข็งแรงลดลงนั่นเอง แต่เนื่องจากมีผลของความไม่เข้ากันระหว่าง PLA และ PP จึงทำให้ร้อยละการยืดตัวที่ทุกอัตราส่วนการผสมมีค่าน้อยกว่าที่ PLA 100% ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แนวโน้มร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

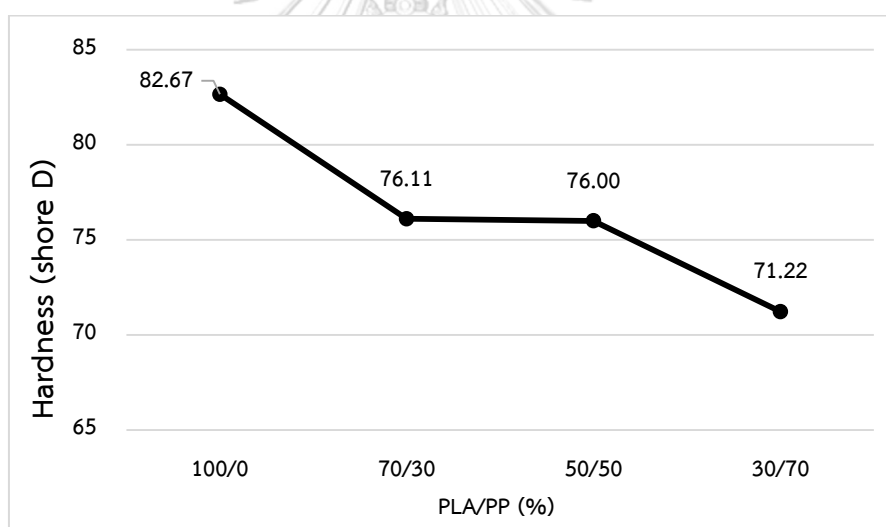
4.1.5 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความแข็ง (Hardness; HN)

ผลจากการนำพอลิเมอร์มาผสมกันระหว่าง PLA และ PP โดยที่ไม่มีการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ และนำไปทดสอบความแข็ง ซึ่งการทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นการทดสอบความแข็งบนพื้นผิวของวัสดุเท่านั้น โดยค่าทดสอบที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	Hardness; HN (shore D)				
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	\bar{X}	SD
PLA/PP (100/0)	83.00	83.67	81.33	82.67	1.20
PLA/PP (70/30)	73.67	78.67	76.00	76.11	2.50
PLA/PP (50/50)	76.33	76.33	75.33	76.00	0.58
PLA/PP (30/70)	71.00	71.00	71.67	71.22	0.38

นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของความแข็งในพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณสัดส่วนของ PP ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งที่พื้นผิวลดลง แต่สังเกตได้ว่าค่าทดสอบที่ได้จะไม่แตกต่างกันมากนักในอัตราส่วน PLA/PP 50/50 และ PLA/PP 70/30 ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ดี จึงทำให้ค่าที่ได้เป็นค่าที่เกิดจากเนื้อชนิดเดียวของพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แนวโน้มความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

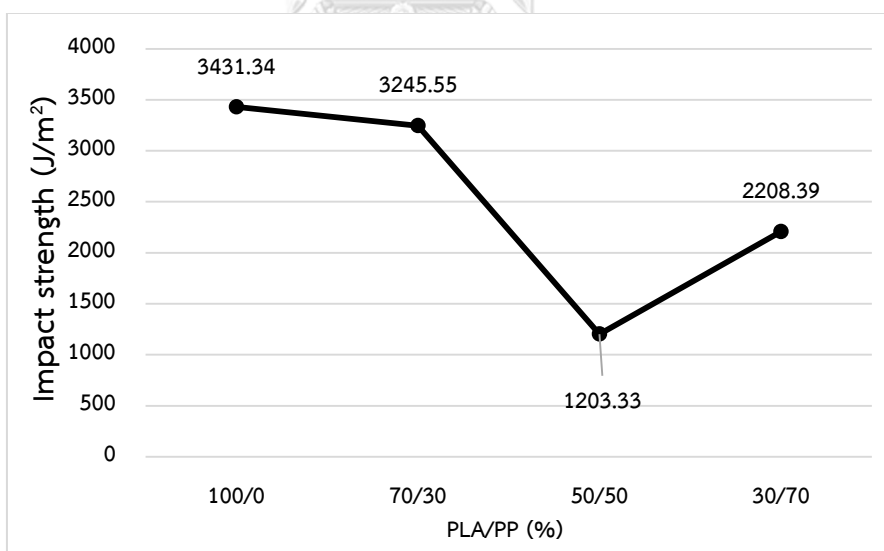
4.1.6 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก (Impact strength; IMS)

ผลจากการนำพอลิเมอร์มาผสมกันระหว่าง PLA และ PP โดยที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ และนำไปทดสอบความทนแรงกระแทก ซึ่งค่าความทนแรงกระแทกนี้จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานที่พอลิเมอร์สามารถดูดซับไว้ก่อนเกิดการแตกหักโดยแรงฉับพลัน ซึ่งพอลิเมอร์ที่มีค่าพลังงานนี้สูง จะสามารถดูดซับพลังงานได้สูงและทนรับแรงกระแทกได้มาก เพราะต้องใช้พลังงานสูงในการทำให้พอลิเมอร์นั้นเกิดการแตกหัก ซึ่งค่าทดสอบที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	Impact strength; IMS (J/m^2)				
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	\bar{X}	SD
PLA/PP (100/0)	3,550.42	3,435.93	3,307.66	3,431.34	121.45
PLA/PP (70/30)	3,256.66	3,283.33	3,196.66	3,245.55	44.39
PLA/PP (50/50)	1,023.33	1,563.33	1,023.33	1,203.33	311.77
PLA/PP (30/70)	2,220.23	2,134.45	2,270.50	2,208.39	68.79

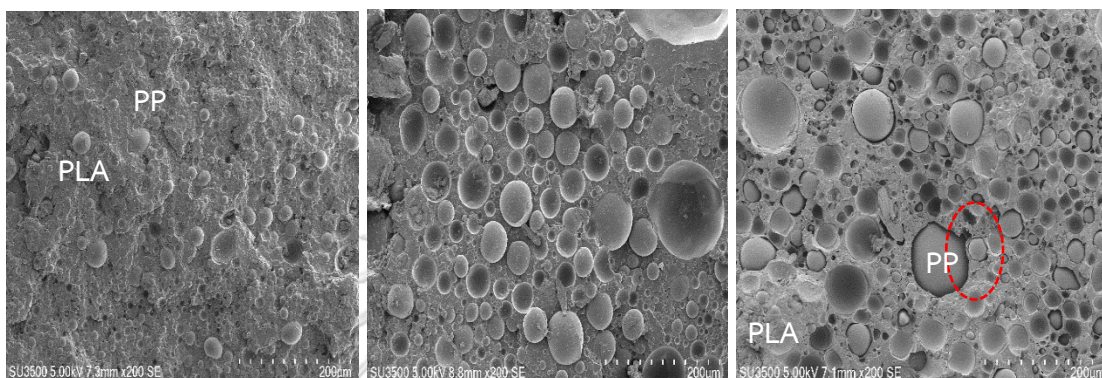
จากตารางที่ 4.6 พบว่าการเพิ่ม PP ลงไปใน PLA ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกลดลงเมื่อเทียบกับ PLA 100% ก่อนทำการผสม ทั้งนี้เนื่องจากการผสมของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่มีขั้วแตกต่างกัน จะส่งผลให้การผสมพอลิเมอร์นั้นเกิดการแยกวัฏภาค จึงส่งผลให้ไม่สามารถส่งผ่านแรงที่มากระหว่างวัฏภาคได้ และสังเกตได้ว่าค่าความทนแรงกระแทกจะลดลงมากที่สุดที่อัตราส่วน PLA/PP 50/50 ดังรูปที่ 4.6 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโครงสร้างทางสัณฐานวิทยามีผลอย่างมากต่อสมบัติความทนแรงกระแทกนี้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องวิเคราะห์โครงสร้างเชิงลึกไปถึงสัณฐานวิทยาว่าวัฏภาคที่ได้หลังจากการผสมพอลิเมอร์นั้นเป็นอย่างไร ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.6 แนวโน้มความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

นอกจากสมบัติเชิงกลที่ต้องคำนึงถึงในการทำพอลิเมอร์ผสมแล้ว ยังมีการจัดเรียงตัวทางสัณฐานวิทยาที่ควรคำนึงถึงอีกด้วย เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสัณฐานวิทยาจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญ ถ้าการผสมของพอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันได้หรือสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อม

ติดกันระหว่างวัสดุภาค จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่ดีและมีสัญญาณวิยาที่ดี และส่งผลให้โมเลกุลในพอลิเมอร์ผสมสามารถส่งผ่านพลังงานได้ เมื่อมีแรงมากระทำ แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมมีการจัดเรียงตัวที่ไม่ดี ทำให้โมเลกุลในโครงสร้างจะเกิดช่องว่างหรือเกิดรอยแยก ส่งผลให้พอลิเมอร์ไม่สามารถส่งผ่านพลังงานได้เมื่อมีแรงมากระทำ จึงทำให้เกิดการฉีกขาดหรือแตกหักได้ง่าย จึงนำชิ้นงานหลังจากทดสอบความทนแรงกระแทก มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อจะศึกษาการเรียงตัวทางสัญญาณวิยาของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ โดยในกรณีนี้จะไม่มีการเพิ่มความเข้ากันได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 - 4.8

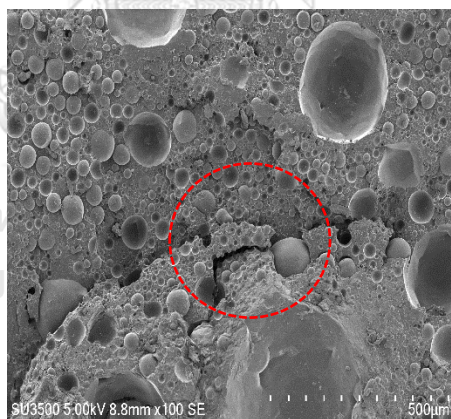


(ก) PLA/PP 30/70

(ข) PLA/PP 50/50

(ค) PLA/PP 70/30

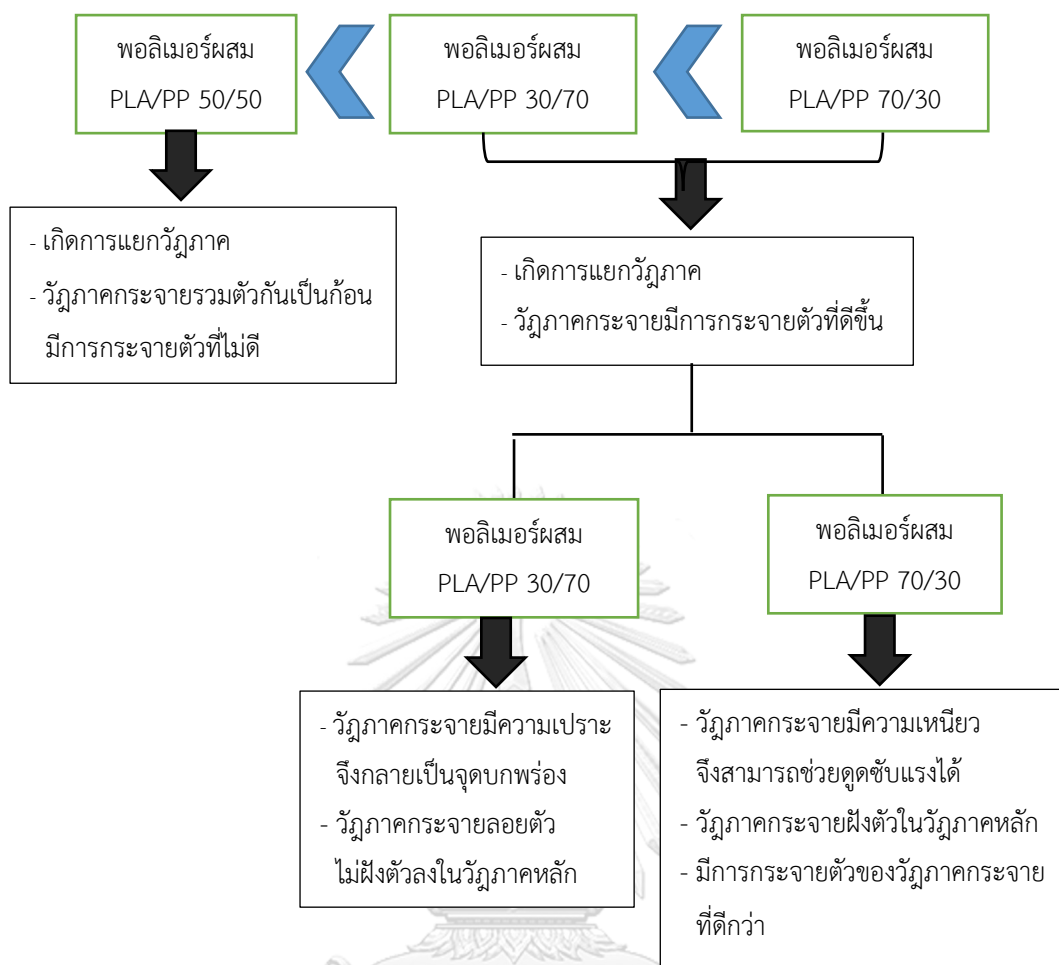
รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ในอัตราส่วนต่างๆที่กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP 50/50 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.7 (ก) PLA/PP เท่ากับ 30/70 สามารถอธิบายได้ว่าในอัตราส่วนนี้มี PP ทำหน้าที่เป็นวัสดุภาคหลักและมี PLA ทำหน้าที่เป็นวัสดุภาคกระจาย โดยจะสังเกตเห็นว่าอนุภาคของ PLA นั้นกระจายลอยตัวอยู่ในวัสดุภาคของ PP ซึ่งไม่ได้ฝังลงไปใวัสดุภาค จึงแสดงให้เห็นว่าระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองนี้ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาระหว่างกัน นอกจากนี้ระหว่างวัสดุภาคนั้นจะไม่เห็นรอยเชื่อมที่พื้นผิว เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีความไม่เข้ากัน และเมื่อเพิ่มปริมาณ PLA ขึ้น ดังรูปที่ 4.7 (ข) ที่มีอัตราส่วน PLA/PP เท่ากับ 50/50 สังเกตได้ว่าอนุภาคที่กระจายอยู่นั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความแตกต่างของขนาดที่หลากหลาย นอกจากนี้

ยังมีการรวมตัวและจับตัวกันเป็นก้อน เนื่องจากในอัตราส่วนนี้มีปริมาณของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดเท่ากัน จึงทำให้เกิดการกระจายได้แย่ง และยังพบรอยแยกระหว่างภูมิภาคที่กำลังขยายเท่ากับ 100 เท่าดังรูปที่ 4.8 จึงส่งผลให้ความทนแรงกระแทกที่อัตราส่วนนี้มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ และในอัตราส่วน PLA/PP 70/30 สามารถอธิบายได้ว่าในอัตราส่วนนี้ PLA ทำหน้าที่เป็นภูมิภาคหลักและ PP ทำหน้าที่เป็นภูมิภาคกระจาย และจะเห็นได้ว่าอนุภาคกระจาย (PP) ฝังตัวเข้าไปในภูมิภาค (PLA) แต่บริเวณรอบๆ อนุภาคของภูมิภาคกระจายนั้นยังสังเกตเห็นช่องว่าง (Boundary) ระหว่างภูมิภาคดังรูปที่ 4.7 (ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระหว่าง 2 ภูมิภาคนี้ยังคงต้องการสารที่เข้ามาช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันเพื่อพัฒนาสมบัติเชิงกลต่อไป ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าที่อัตราส่วน PLA/PP เท่ากับ 50/50 มีการจัดเรียงตัวทางสัณฐานวิทยาที่แย่งที่สุดคือมีการกระจายของอนุภาคที่ไม่ดี จับตัวกันเป็นก้อน และเกิดรอยแยกระหว่างภูมิภาคชัดเจน จึงส่งผลให้ที่อัตราส่วนนี้มีความทนแรงกระแทกต่ำที่สุด รองลงมาคือที่อัตราส่วน PLA/PP เท่ากับ 30/70 มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น จึงส่งผลให้มีความทนแรงกระแทกดีขึ้น และที่อัตราส่วน PLA/PP เท่ากับ 70/30 มีการจัดเรียงตัวตามสัณฐานวิทยาที่ดีที่สุด จึงมีความทนแรงกระแทกสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี และพบว่าภูมิภาคกระจายมีการฝังตัวเข้าไปในภูมิภาคหลัก จึงส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงได้เมื่อเกิดแรงกระแทก และจากเดิมที่ภูมิภาคหลัก (PLA) มีสมบัติที่เปราะ ดังนั้นการเติม PP ที่มีความเหนียวลงไปซึ่งทำหน้าที่เป็นภูมิภาคกระจาย จึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกได้มากขึ้น แต่ในทางกลับกันที่อัตราส่วน PLA/PP เท่ากับ 30/70 จากเดิมที่ภูมิภาคหลัก (PP) มีสมบัติเหนียว หลังจากการเติม PLA ที่มีสมบัติเปราะลงไปซึ่งทำหน้าที่เป็นภูมิภาคกระจายจึงอาจส่งผลให้เป็นจุดบกพร่อง (Defects) จึงมีค่าความทนแรงกระแทกน้อยกว่าที่อัตราส่วน PLA/PP 70/30 ดังนั้นจึงสามารถสรุปสัณฐานวิทยาได้โดยเรียงจากการจัดเรียงที่แย่งที่สุดไปดีที่สุดดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภาพสรุปผลสัณฐานวิทยาจากกล้อง SEM ของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่ไม่มีการเพิ่มความเข้ากันได้

จากผลการทดสอบทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยสมบัติเชิงกล (ตัวแปรตอบสนอง) ทั้งหมด 6 ตัวซึ่งได้แก่ ความทนแรงดึงสูงสุด, ความทนแรงดึง ณ จุดคราก, โมดูลัสของยัง, ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด, ความแข็งและความทนแรงกระแทก พบว่าการผสมเพียงพอลิเมอร์อย่างเดียวโดยปราศจากสารที่เป็นตัวช่วยเชื่อมระหว่างความต่างขั้วของพอลิเมอร์นั้น จะส่งผลให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติแยะและยิ่งไปกว่านั้นอาจจะให้สมบัติเชิงกลที่แย่กว่าเดิมเมื่อเทียบกับก่อนทำการผสม (ซึ่งเป็นเพียงพอลิเมอร์บริสุทธิ์) ดังนั้นการทำพอลิเมอร์ผสมจึงควรมีสารที่เป็นตัวช่วยเชื่อม เช่น สารเพิ่มความเข้ากันได้ เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ให้ดีขึ้น

4.2 ผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA และ PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

เนื่องจากการทำพอลิเมอร์ผสมโดยที่พอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมนั้นมีความเป็นขั้วต่างกัน จะส่งผลให้เกิดการแยกวิภูภาคกันระหว่างกระบวนการผสม และส่งผลให้ได้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่แยะลง

ดังนั้นจึงต้องใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และเพื่อเพิ่มแรงยึดติดระหว่างภูมิภาคในพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการเชื่อมกันและสามารถทำปฏิกิริยาระหว่างภูมิภาคกันได้ จะส่งผลให้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่างๆให้ดีขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงมีการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ สารริเริ่มปฏิกิริยาลงไปในพอลิเมอร์ผสม เพื่อศึกษาผลและแนวโน้มของสารต่างๆที่เติมลงไปต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ ดังนี้

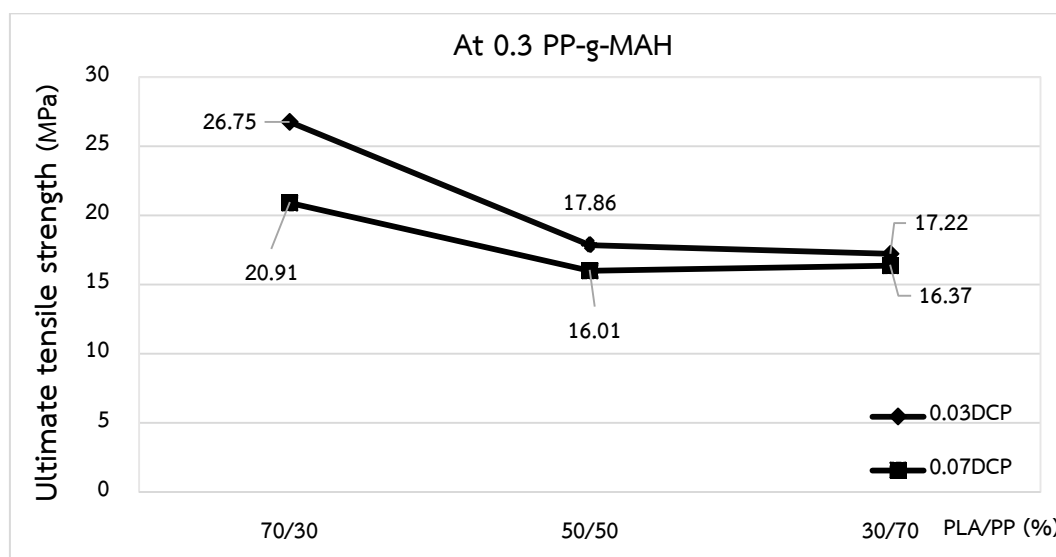
4.2.1 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength; UTS)

หลังจากการนำพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด สารริเริ่มปฏิกิริยา (DCP) และสารเพิ่มความเข้ากันได้ (PP-g-MAH) ไปผสมตามกระบวนการและการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบเพื่อนำมาทดสอบความทนแรงดึง โดยทำตามการออกแบบการทดลองแบบ Multilevel Factorial Design ซึ่งแต่ละสถานะของการขึ้นรูปจะทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำและค่าที่ทดสอบได้เป็นไปตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ในปริมาณต่างๆกัน

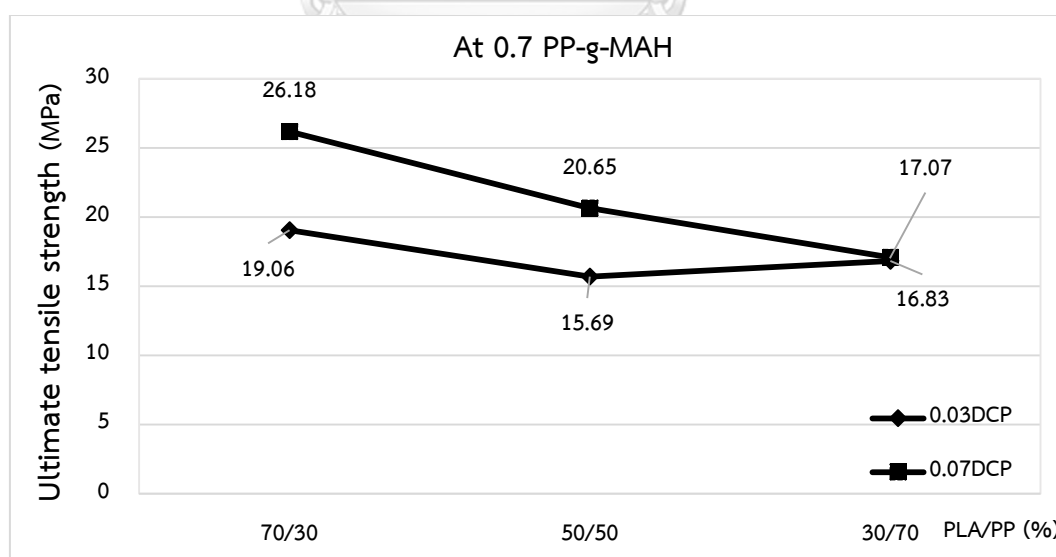
อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	Ultimate tensile strength; UTS (MPa)				
	ไม้ใส่ PP-g-MAH และ DCP	PP-g-MAH 0.3 phr		PP-g-MAH 0.7 phr	
		DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr	DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr
PLA/PP (70/30)	17.25	27.42	21.38	20.06	26.16
	17.13	27.20	20.13	20.80	26.01
	19.95	25.64	21.22	19.82	26.37
\bar{X}	18.11	26.75	20.91	20.23	26.18
SD	1.59	0.97	0.68	0.51	0.18
PLA/PP (50/50)	12.37	17.87	16.20	18.67	19.21
	13.32	16.89	15.66	16.15	20.07
	11.78	18.81	16.16	15.17	22.67
\bar{X}	12.49	17.86	16.01	16.66	20.65
SD	0.78	0.96	0.30	1.80	1.80
PLA/PP (30/70)	11.72	17.00	15.42	16.21	18.17
	9.93	17.43	16.97	17.32	16.99
	10.23	17.22	16.73	17.25	16.06
\bar{X}	10.63	17.22	16.37	16.93	17.07
SD	0.96	0.22	0.84	0.62	1.06

และเมื่อนำค่าจากผลการทดสอบไปสร้างกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลของ สารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในปริมาณต่างกันในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม พบว่าการใช้ DCP ปริมาณ 0.03 phr จะให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดที่สูงกว่า



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr

ในทางกลับกัน จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม ที่มีการใช้ปริมาณ DCP เท่ากับ 0.07 phr จะให้ค่าความทนแรงดึงที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr

ซึ่งสมมติฐานของการทดลอง คือ 1. สมมติฐานสำหรับปัจจัยเดียวมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$1.1 H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \mu_i \neq 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดต่างกัน)

$$1.2 H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$$

(ปริมาณ PP-g-MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \beta_j \neq 0$$

(ปริมาณ PP-g-MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดต่างกัน)

$$1.3 H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \gamma_k \neq 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดต่างกัน)

2. สมมติฐานสำหรับปัจจัยร่วมมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$2.1 H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } i, j$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP-g-MAH ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP-g-MAH มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด)

$$2.2 H_0 : (\tau\gamma)_{ik} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } i, k$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\gamma)_{ik} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด)

$$2.3 H_0 : (\beta\gamma)_{jk} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } j, k$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP-g-MAH และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด)

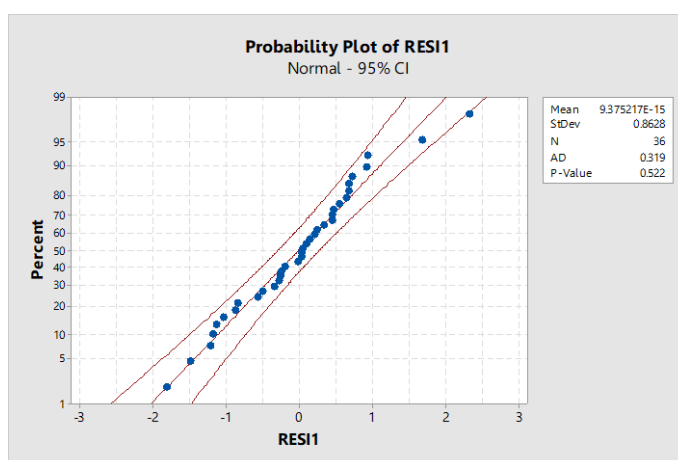
$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP-g-MAH และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุด)

จากนั้นจึงทำการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ เนื่องจากการที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab นั้น จะต้องตรวจสอบความสามารถของข้อมูลก่อนว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติได้หรือไม่ จึงต้องทำการตรวจสอบตามสมมติฐาน ดังนี้

1. การทดสอบการกระจายของข้อมูล (Normality assumption)

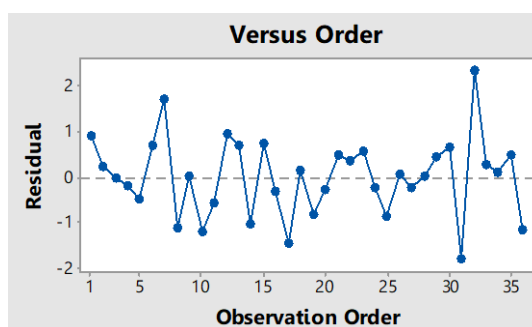
จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่ารูปแบบกราฟ Normal Probability plot of residuals (ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบค่าส่วนตกค้างของข้อมูล) ของค่าความทนแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มใกล้เคียงกันและมีค่าที่เข้าใกล้เส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.12 Normal Probability plot of residuals (UTS)

2. การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of residual)

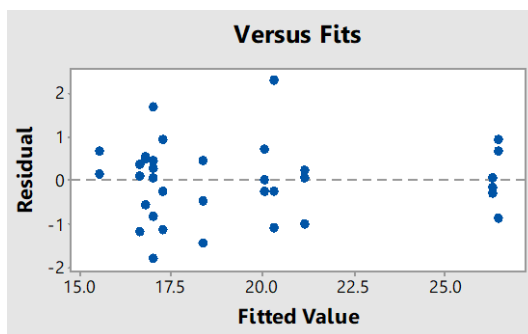
จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus order ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและลำดับของการเก็บข้อมูล พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีรูปแบบแนวโน้มที่แน่นอน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.13 Versus Order Plot (UTS)

3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (Variance Stability)

จาก รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus fitt ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและค่าที่ถูกฟิต พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีแนวโน้มที่จะมีลักษณะคล้ายกรวยปากเปิด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.14 Versus Fits Plot (UTS)

หลังจากตรวจสอบสมมติฐานครบแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) โดยผลจากการใช้โปรแกรม Minitab ด้วยวิธี Backward Elimination ดังแสดงในรูปที่ 4.15

Regression Analysis: Ultimate Tensile Strength versus PP, PP-g-MAH, DCP

Backward Elimination of Terms
 α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	9	450.985	50.1095	50.00	0.000
PP	1	52.679	52.6787	52.56	0.000
PP-g-MAH	1	54.295	54.2949	54.17	0.000
DCP	1	68.253	68.2528	68.10	0.000
PP*PP	1	25.762	25.7620	25.70	0.000
PP*PP-g-MAH	1	20.699	20.6987	20.65	0.000
PP*DCP	1	35.521	35.5213	35.44	0.000
PP-g-MAH*DCP	1	84.305	84.3054	84.12	0.000
PP*PP*PP-g-MAH	1	7.488	7.4878	7.47	0.011
PP*PP-g-MAH*DCP	1	43.786	43.7859	43.69	0.000
Error	26	26.058	1.0022		
Lack-of-Fit	2	3.115	1.5577	1.63	0.217
Pure Error	24	22.943	0.9559		
Total	35	477.043			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.00111	94.54%	92.65%	90.18%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	85.27	6.60	12.93	0.000	
PP	-1.809	0.250	-7.25	0.000	596.31
PP-g-MAH	-90.1	12.2	-7.36	0.000	215.50
DCP	-597.1	72.4	-8.25	0.000	75.22
PP*PP	0.01208	0.00238	5.07	0.000	551.00
PP*PP-g-MAH	2.106	0.463	4.54	0.000	1367.41
PP*DCP	8.19	1.38	5.95	0.000	120.53
PP-g-MAH*DCP	1232	134	9.17	0.000	140.06
PP*PP*PP-g-MAH	-0.01209	0.00442	-2.73	0.011	766.28
PP*PP-g-MAH*DCP	-16.88	2.55	-6.61	0.000	179.12

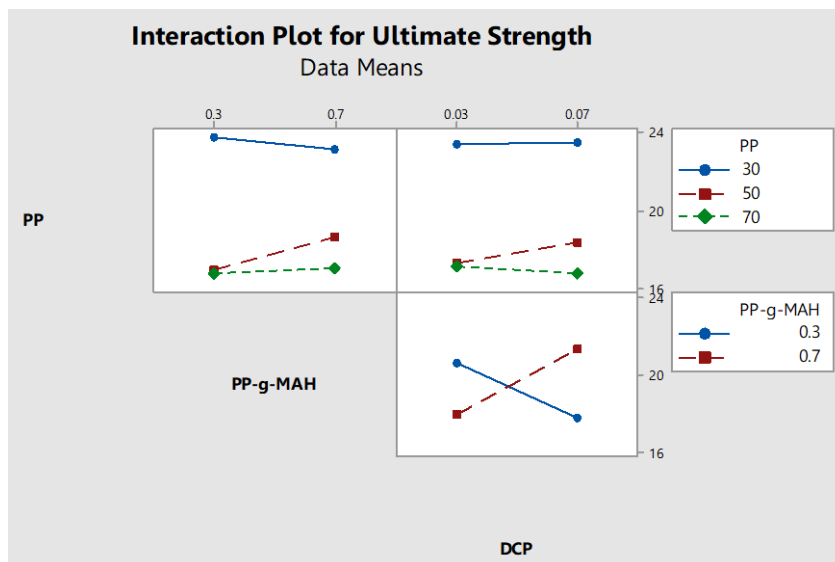
Regression Equation

Ultimate Strength = 85.27 - 1.809PP - 90.1PP-g-MAH - 597.1DCP
 + 0.01208PP*PP + 2.106PP*PP-g-MAH + 8.19PP*DCP
 + 1232PP-g-MAH*DCP - 0.01209PP*PP*PP-g-MAH
 - 16.88PP*PP-g-MAH*DCP

รูปที่ 4.15 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากตาราง ANOVA ในรูปที่ 4.15 พบว่าผลของปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ (p -value < 0.05) คือ ปริมาณของ PP, ปริมาณของ DCP, และปริมาณของ PP-g-MAH รวมไปถึงผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของ PP และ PP-g-MAH ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของ PP และ DCP และผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของ PP-g-MAH และ DCP

จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยร่วมและผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก ดังแสดงในรูปที่ 4.16 – 4.17



รูปที่ 4.16 Interaction Plot for Ultimate tensile strength

จากรูปที่ 4.16 แสดงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อความทนแรงดึงสูงสุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้
(1) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP และ PP-g-MAH

จาก Interaction effect plot พบว่าการเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH ในสถานะที่มีปริมาณ PP แตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุดแตกต่างกัน โดยการเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH ในสถานะที่มีปริมาณ PP 30% จะส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณ PP-g-MAH ที่มาก จะมีความเป็นขั้วมาก ดังนั้นเมื่ออยู่ในสถานะที่มีปริมาณ PLA มากจะส่งผลให้ลดความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง PP-g-MAH และ PLA ลดลง [14] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH ในสถานะที่มี PP 50% และ 70% จะส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยสองชนิดนี้ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนแรงดึงที่ได้ ซึ่งเป็นไปตามผลการวิเคราะห์ ANOVA

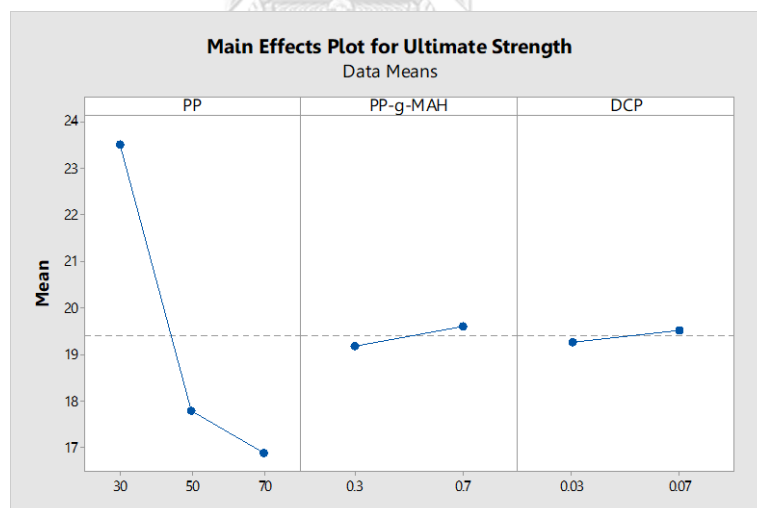
(2) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP และ DCP

จาก Interaction effect plot จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณ DCP ในขณะที่ปริมาณ PP 30% และ 50% จะส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ DCP ส่งผลให้มีปริมาณแรติคัลเพิ่มมากขึ้น จึงก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง PLA และ PP แต่ในทางกลับกัน หากเพิ่มปริมาณ DCP ในขณะที่ PP 70% จะส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณแรติคัลที่เพิ่มขึ้นจากการที่ปริมาณ DCP เพิ่มขึ้นจะเหนี่ยวนำให้สายโซ่ของ PP เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงจึงเกิดการเสื่อมสภาพ (Side reaction of degradation) ด้วยปริมาณ PP

ที่มีสัดส่วนมากจึงทำให้เกิดปฏิกิริยานี้มากกว่าในสภาวะที่ปริมาณ PP น้อย ประกอบกับสมบัติความทนแรงดึงของ PP ที่ต่ำกว่า PLA จึงส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระหว่างปัจจัยทั้งสองนี้มีผลต่อความทนแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญตามการวิเคราะห์ของ ANOVA

(3) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP-g-MAH และ DCP

จาก Interaction effect plot พบว่า ที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr การเพิ่มปริมาณของ DCP จาก 0.03 phr ไปเป็น 0.07 phr จะส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณ DCP ที่มากขึ้น จะทำให้มีปริมาณของอนุมูลอิสระ (radical) ที่เหลือมีมากเกินไป เนื่องจากไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยา จากนั้นอนุมูลอิสระที่มีปริมาณมากเกินไปจะเหนี่ยวนำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาด (Chain scission) จึงส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดลดลง แต่ในทางกลับกัน ที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr การเพิ่มปริมาณของ DCP จะส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น นั่นเป็นเพราะอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นของ DCP สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ PP-g-MAH ได้อย่างเพียงพอ (เนื่องจากมีปริมาณของ PP-g-MAH มาก) จึงไม่เหลืออนุมูลอิสระที่ไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยามากพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการขาดของสายโซ่ ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มโอกาสให้ PP-g-MAH ได้เข้าทำปฏิกิริยากับทั้ง PLA และ PP ซึ่งถือเป็นโอกาสในการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

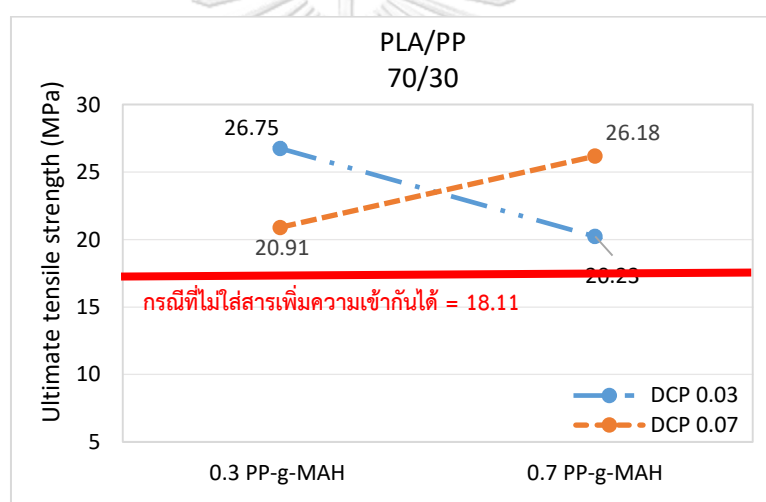


รูปที่ 4.17 Main Effects Plot for Ultimate tensile strength

จากรูปที่ 4.17 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลัก พบว่าค่าความทนแรงดึงสูงสุดจะลดลงตามปริมาณ PP ที่เพิ่มขึ้น โดยการเติมปริมาณ PP ในช่วง 30%-50% จะส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดลดลงอย่างมาก และเมื่อเพิ่มปริมาณ PP จนถึง 70% จะเห็นได้ว่าค่าความทนแรงดึงสูงสุดลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับช่วงแรก เนื่องจากโดยปกติแล้วสมบัติของ PP บริสุทธิ์นั้นมีค่าความทนแรงดึงสูงสุดน้อยกว่าของ PLA บริสุทธิ์ ดังนั้นเมื่อนำ PP มาผสมลงใน PLA จึงส่งผลให้ค่าความทนแรงดึง

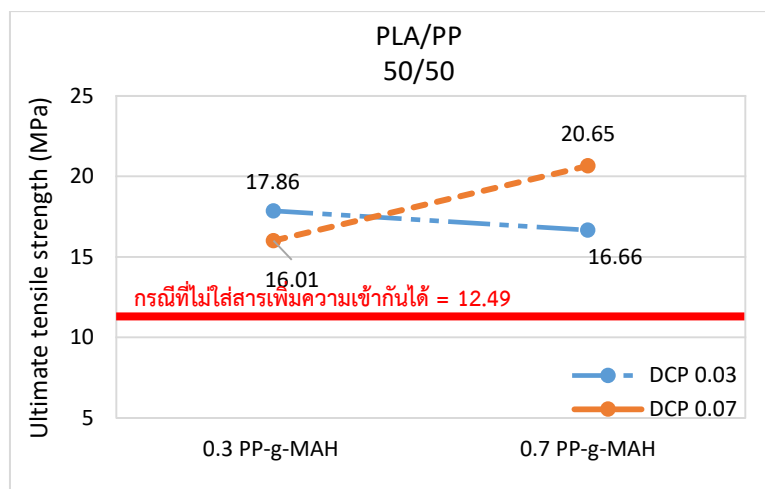
สูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ลดลง ส่วนปัจจัยปริมาณของ PP-g-MAH และปริมาณของ DCP มีผลทำให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็นเพราะการเพิ่มปริมาณของ PP-g-MAH เป็นการเพิ่มโอกาสให้ PLA และ PP สามารถเข้ากันได้เพิ่มขึ้น และการเพิ่มปริมาณ DCP นั้นเป็นการเพิ่มโอกาสให้ PLA และ PP สามารถเข้าทำปฏิกิริยากันได้เพิ่มขึ้น และเนื่องจากสารเคมีทั้งสองตัวนี้จะต้องทำปฏิกิริยาร่วมกันในปฏิกิริยาการผสม ดังนั้นผลกระทบระหว่างสองปัจจัยนี้จึงส่งผลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุดเช่นกัน โดยจะเห็นได้ว่าผลของปัจจัยร่วมมาบดบังจึงเห็นการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยหลักเพียงเล็กน้อย

เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction effect) ที่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุดที่ได้ จึงนำข้อมูลมาสร้างกราฟ ซึ่งอธิบายตามอัตราส่วนต่างๆของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผสม ตามรูปที่ 4.18 - 4.20

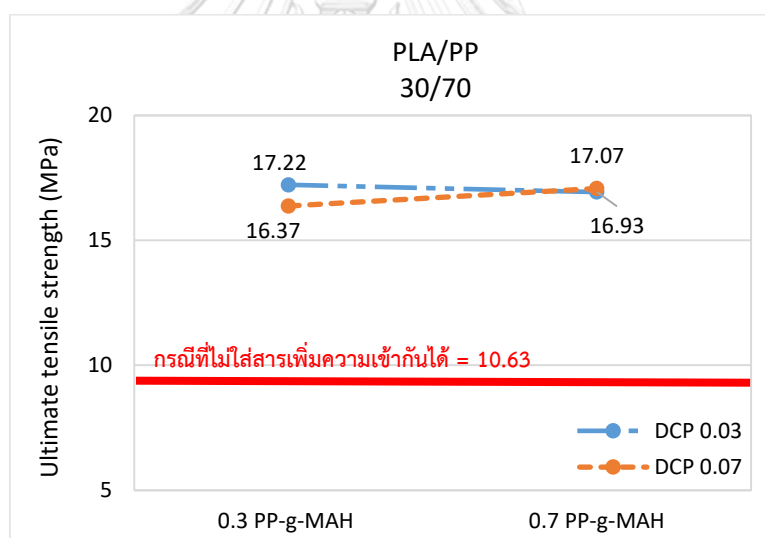


รูปที่ 4.18 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30

ในอัตราส่วนผสมระหว่าง PLA/PP เท่ากับ 70/30 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr การใช้ DCP เท่ากับ 0.03 phr จะให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดที่มากกว่าการใช้ DCP 0.07 phr และที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr การใช้ DCP เท่ากับ 0.07 phr จะให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดมากกว่าการใช้ DCP ที่ 0.03 phr นั้นแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระหว่างปัจจัยสองปัจจัยนี้มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ ต่อมาในรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ที่อัตราส่วนของ PLA/PP เท่ากับ 50/50 สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนนี้จะมีค่าความทนแรงดึงสูงสุดลดลงเล็กน้อย และพบว่ามีแนวโน้มที่เป็นไปในทางเดียวกันกับที่อัตราส่วน PLA/PP 70/30



รูปที่ 4.19 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50 และที่อัตราส่วนของ PLA/PP เท่ากับ 30/70 จะมีแนวโน้มเหมือนกันกับอัตราส่วนอื่นๆที่กล่าวไปข้างต้น แต่แตกต่างกันที่เมื่อปริมาณของ DCP และ PP-g-MAH เปลี่ยนไป จะไม่ค่อยเห็นความแตกต่างของค่าความทนแรงดึงสูงสุดที่ได้มากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.20 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70

จากรูปที่ 4.18 - 4.20 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา มีผลต่อค่าความทนแรงดึงสูงสุดต่างกันตามปริมาณของสัดส่วนพอลิเมอร์ที่ใช้ ดังนั้นในแต่ละอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมจึงมีปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้แตกต่างกัน โดยผลของ DCP และ PP-g-MAH มีผลให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มสรุปได้ ดังนี้

1. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 70/30 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.03 phr และ 0.3 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่ามากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 26.75 MPa

2. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 50/50 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.07 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.65 MPa

3. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 30/70 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.03 phr และ 0.3 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.22 MPa

4.2.2 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก (0.2% offset yield strength; YS)

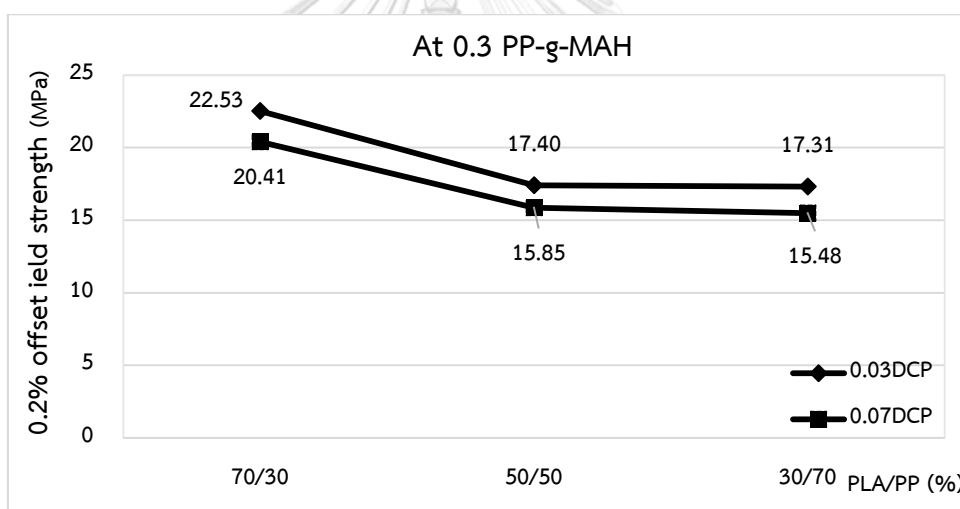
หลังจากการนำพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด สารริเริ่มปฏิกิริยา (DCP) และสารเพิ่มความเข้ากันได้ (PP-g-MAH) ไปผสมตามกระบวนการและการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบเพื่อนำมาทดสอบความทนแรงดึง ซึ่งพบว่าค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากในทุกอัตราส่วนของ PLA/PP มีแนวโน้มเดียวกันกับค่าความทนแรงดึงสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4.8 แต่แตกต่างกันที่ค่าความทนแรงดึงสูงสุดนั้นเป็นค่าที่พอลิเมอร์สามารถรับแรงได้ก่อนการฉีกขาดโดยที่พอลิเมอร์นั้นเสียรูปร่างอย่างถาวรไปแล้ว ส่วนค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากนั้นเป็นค่าที่พอลิเมอร์สามารถรับแรงได้ก่อนการฉีกขาดโดยยังไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร สามารถกลับสู่สภาพเดิมได้

ตารางที่ 4.8 ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณต่างๆกัน

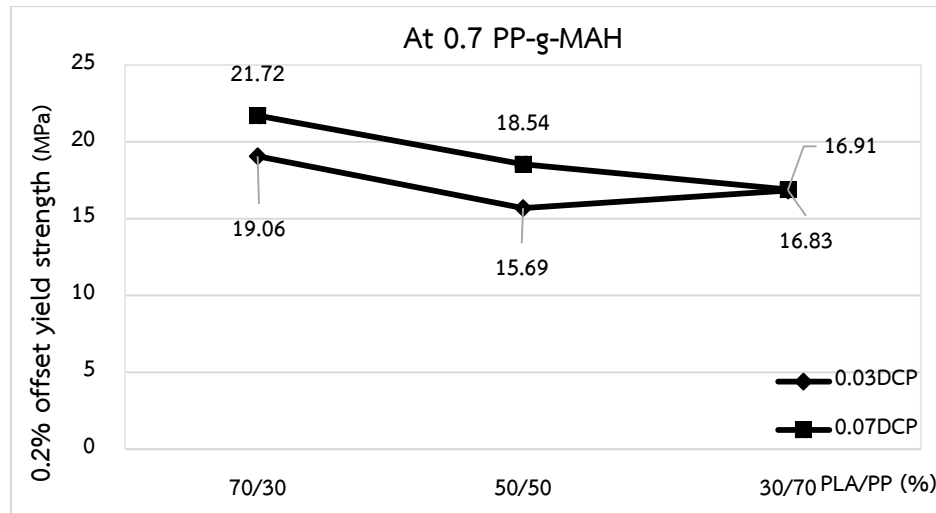
อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	0.2% offset yield strength; YS (MPa)				
	ไม่ใส่ PP-g-MAH และ DCP	PP-g-MAH 0.3 phr		PP-g-MAH 0.7 phr	
		DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr	DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr
PLA/PP (70/30)	15.67	22.04	20.65	19.14	22.38
	16.95	22.67	20.09	18.53	19.40
	16.99	22.88	20.49	19.51	23.37
\bar{X}	16.54	22.53	20.41	19.06	21.72
SD	0.75	0.44	0.28	0.50	2.07
PLA/PP (50/50)	11.24	17.27	15.08	15.00	17.47
	13.15	17.62	15.96	16.03	18.98
	11.69	17.30	16.51	16.04	19.17
\bar{X}	12.03	17.40	15.85	15.69	18.54
SD	1.00	0.19	0.72	0.60	0.93

PLA/PP	9.70	17.12	14.57	16.70	16.87
(30/70)	9.20	17.56	15.06	17.73	17.62
	8.96	17.26	16.81	16.07	16.23
\bar{X}	9.29	17.31	15.48	16.83	16.91
SD	0.38	0.23	1.18	0.84	0.69

และเมื่อนำค่าจากผลการทดสอบไปสร้างกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลของสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในปริมาณต่างกันในส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม พบว่าการใช้ DCP ปริมาณ 0.03 phr จะให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากที่มากกว่าการใช้ DCP ปริมาณ 0.07 phr



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr ในทางกลับกัน จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใช้ปริมาณ DCP เท่ากับ 0.07 phr จะให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากที่มากกว่าการใช้ DCP เท่ากับ 0.03 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr ซึ่งสมมติฐานของการทดลอง คือ 1. สมมติฐานสำหรับปัจจัยเดียวมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$1.1 H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \mu_i \neq 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากต่างกัน)

$$1.2 H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$$

(ปริมาณ PP-g-MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \beta_j \neq 0$$

(ปริมาณ PP-g-MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากต่างกัน)

$$1.3 H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \gamma_k \neq 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากต่างกัน)

2. สมมติฐานสำหรับปัจจัยร่วมมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$2.1 H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } i, j$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP-g-MAH ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP-g-MAH มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก)

2.2 $H_0: (\tau\gamma)_{ik} = 0$ สำหรับทุกค่า i, k

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก)

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\tau\gamma)_{ik} \neq 0$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก)

2.3 $H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0$ สำหรับทุกค่า j, k

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP-g-MAH และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก)

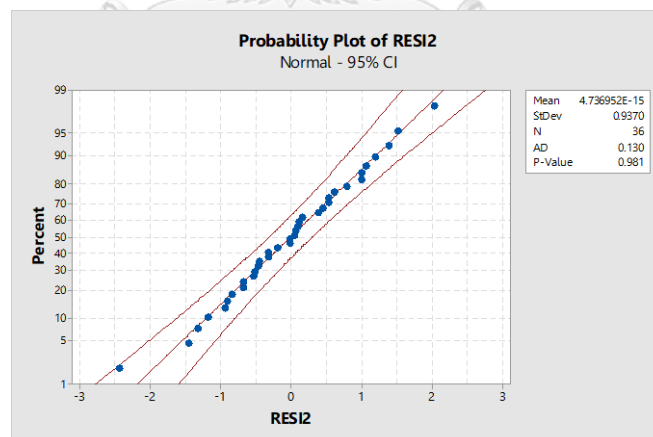
H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\beta\gamma)_{jk} \neq 0$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP-g-MAH และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก)

จากนั้นจึงทำการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ เนื่องจากการที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab นั้น จะต้องตรวจสอบความสามารถของข้อมูลก่อนว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติได้หรือไม่ จึงต้องทำการตรวจสอบตามสมมติฐาน ดังนี้

1. การทดสอบการกระจายของข้อมูล (Normality assumption)

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่ารูปแบบกราฟ Normal Probability plot of residuals (ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบค่าส่วนตกค้างของข้อมูล) ของค่าความทนแรงดึง มีแนวโน้มใกล้เคียงกันและมีค่าที่เข้าใกล้เส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้

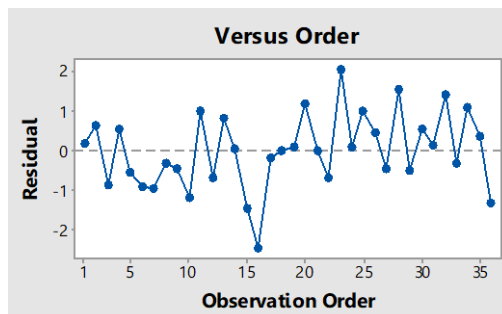


รูปที่ 4.23 Normal Probability plot of residuals (YS)

2. การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of residual)

จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus order ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและลำดับของการเก็บข้อมูล พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีรูปแบบ

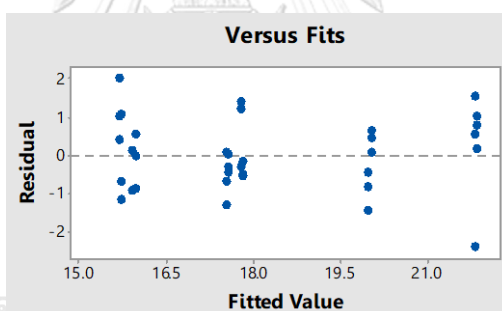
แนวโน้มที่แน่นอน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.24 Versus Order Plot (YS)

3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (Variance Stability)

จาก รูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus fits ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและค่าที่ถูกฟิต พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีแนวโน้มที่จะมีลักษณะคล้ายกรวยปากเปิด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.25 Versus Fits Plot (YS)

หลังจากตรวจสอบสมมติฐานครบแล้ว จึงนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) โดยใช้โปรแกรม Minitab ด้วยวิธี Backward Elimination ดังแสดงในรูปที่ 4.26

Regression Analysis: 0.2% offset yield Strength versus PP, PP-g-MAH, DCP

Backward Elimination of Terms
 α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	170.60	34.1202	33.31	0.000
PP	1	43.25	43.2457	42.22	0.000
PP-g-MAH	1	26.87	26.8719	26.23	0.000
DCP	1	26.29	26.2898	25.67	0.000
PP*PP	1	29.21	29.2128	28.52	0.000
PP-g-MAH*DCP	1	30.67	30.6658	29.94	0.000
Error	30	30.73	1.0243		
Lack-of-Fit	6	12.34	2.0569	2.68	0.039
Pure Error	24	18.39	0.7661		
Total	35	201.33			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.01207	84.74%	82.19%	78.02%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	39.98	2.40	16.67	0.000	
PP	-0.5851	0.0900	-6.50	0.000	76.00
PP-g-MAH	-11.63	2.27	-5.12	0.000	7.25
DCP	-115.0	22.7	-5.07	0.000	7.25
PP*PP	0.004777	0.000895	5.34	0.000	76.00
PP-g-MAH*DCP	230.7	42.2	5.47	0.000	13.50

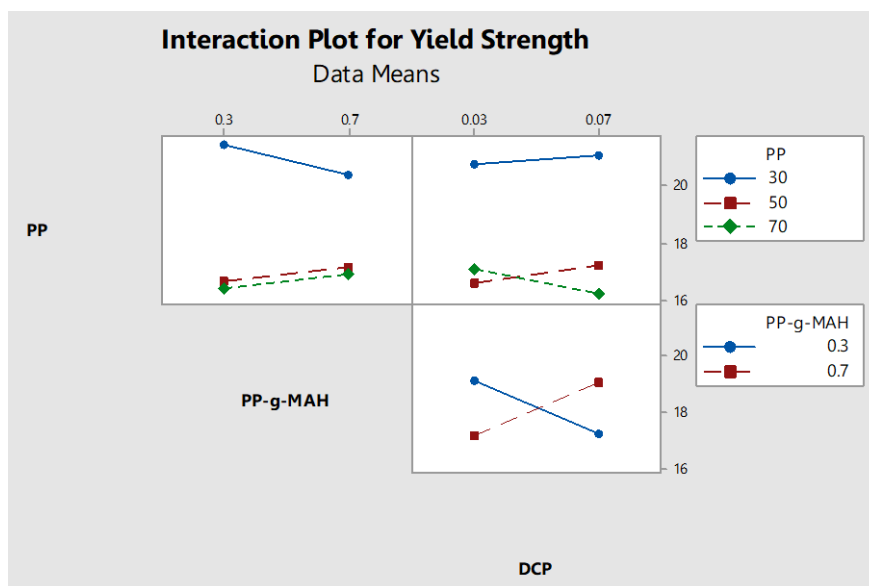
Regression Equation

Yield Strength = 39.98 - 0.5851PP - 11.63PP-g-MAH - 115.0DCP
 + 0.004777PP*PP + 230.7PP-g-MAH*DCP

รูปที่ 4.26 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากตาราง ANOVA ในรูปที่ 4.26 พบว่าผลของปัจจัยหลักที่กระทบต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ (p-value < 0.05) คือ ปริมาณของ PP, ปริมาณของ PP-g-MAH และปริมาณของ DCP ส่วนผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อความทนแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ คือ ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของ PP-g-MAH และปริมาณ DCP

จากนั้นทำการศึกษผลกระทบระหว่างปัจจัยร่วมและผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก ดังแสดงในรูปที่ 4.27 - 4.28

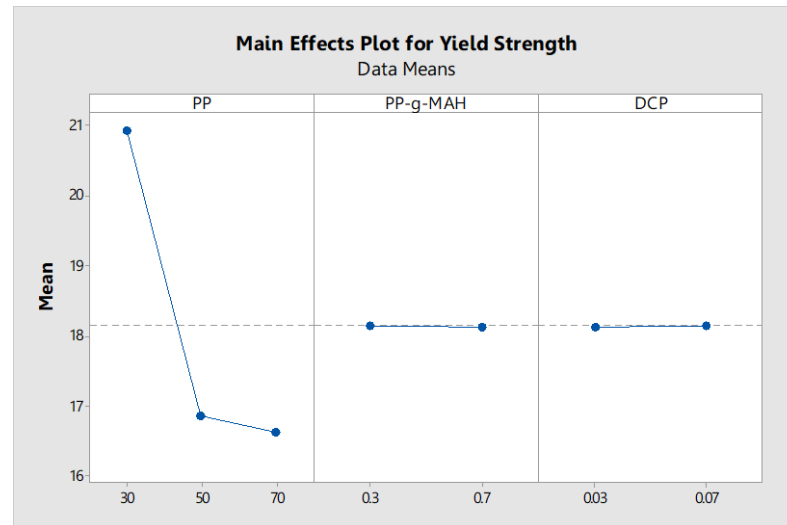


รูปที่ 4.27 Interaction Plot for 0.2% offset yield strength

จากรูปที่ 4.27 แสดงผลกระทบระหว่างปัจจัยร่วม ซึ่งสามารถอธิบาย ได้ดังนี้

(1) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP-g-MAH และ DCP

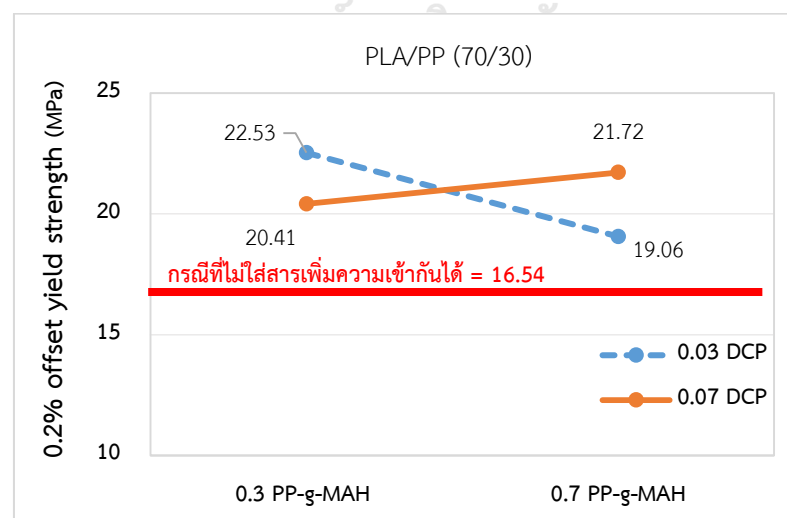
จาก Interaction effect plot ในรูปที่ 4.49 จะเห็นได้ว่าการผสมที่มีปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr การเพิ่มปริมาณของ DCP จาก 0.03 phr ไปเป็น 0.07 phr จะส่งผลให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณ DCP ที่มากขึ้น จะทำให้มีปริมาณของอนุมูลอิสระ (radical) ที่เหลือมีมากเกินไป เนื่องจากไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยา จากนั้นอนุมูลอิสระที่มีปริมาณมากเกินไปจะเหนี่ยวนำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาด (Chain scission) แต่ในทางกลับกันที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr การเพิ่มปริมาณของ DCP จะส่งผลให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากเพิ่มขึ้นเป็นเพราะอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นของ DCP สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ PP-g-MAH ได้อย่างเพียงพอ (เนื่องจากมีปริมาณของ PP-g-MAH มาก) จึงไม่เหลืออนุมูลอิสระที่ไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยามากพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการขาดของสายโซ่ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มโอกาสให้ PP-g-MAH ได้เข้าทำปฏิกิริยากับทั้ง PLA และ PP ซึ่งถือเป็นโอกาสในการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระหว่างปัจจัยทั้งสองนี้มีผลต่อความทนแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญตามการวิเคราะห์ของ ANOVA



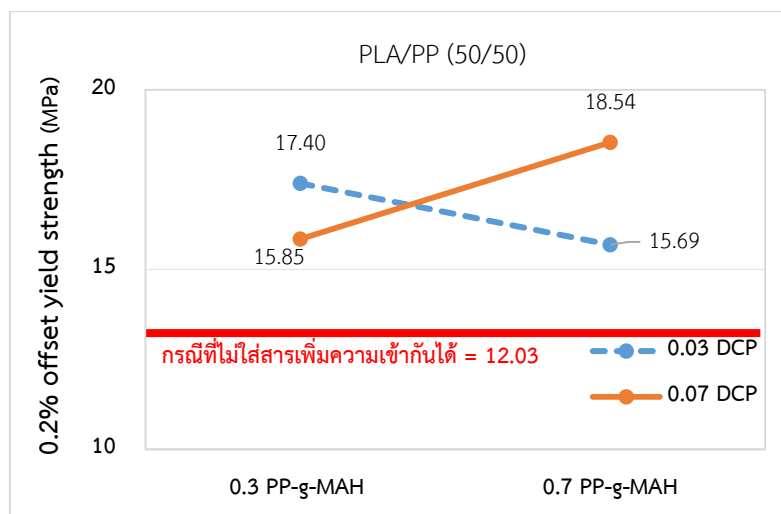
รูปที่ 4.28 Main Effects Plot for 0.2% offset yield strength

จากรูปที่ 4.28 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลัก พบว่าค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากจะลดลงตามปริมาณ PP ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของ PP จาก 30% ไปเป็น 50% จะส่งผลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากให้ลดลงอย่างมาก แต่จะมีผลต่างกันเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณ PP จาก 50% ไปเป็น 70% ซึ่งแนวโน้มจะเป็นไปในทางเดียวกันกับความทนแรงดึงสูงสุด ส่วนปัจจัยหลักของปริมาณ PP-g-MAH และ DCP มีผลไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากมีผลกระทบระหว่างปัจจัยร่วมมาดบัง

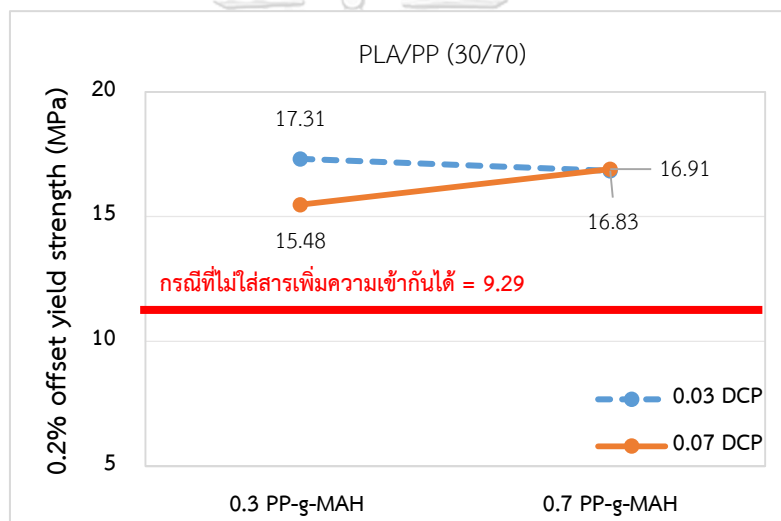
เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction effect) ที่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากที่ได้ จึงนำมาสร้างกราฟ ซึ่งจะอธิบายตามอัตราส่วนต่างๆของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผสม ตามรูปที่ 4.29 - 4.31



รูปที่ 4.29 ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30



รูปที่ 4.30 ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50



รูปที่ 4.31 ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70

โดยจากกราฟในรูปที่ 4.29 - 4.31 พบว่าในอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมที่แตกต่างกันจะมีปริมาณความเหมาะสมในการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปแนวโน้มได้ดังนี้

1. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 70/30 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ระดับปริมาณน้อยที่สุด คือ 0.03 phr และ 0.3 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ความทนแรงดึง ณ จุดครากมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 22.53 MPa
2. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 50/50 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ระดับปริมาณมากที่สุด คือ 0.07 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ความทนแรงดึง ณ จุดครากมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.54 MPa
3. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 30/70 พบว่าการใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ระดับปริมาณ 0.03 phr และ 0.3 phr ตามลำดับ จะให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.31 MPa

4.2.3 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus; YM)

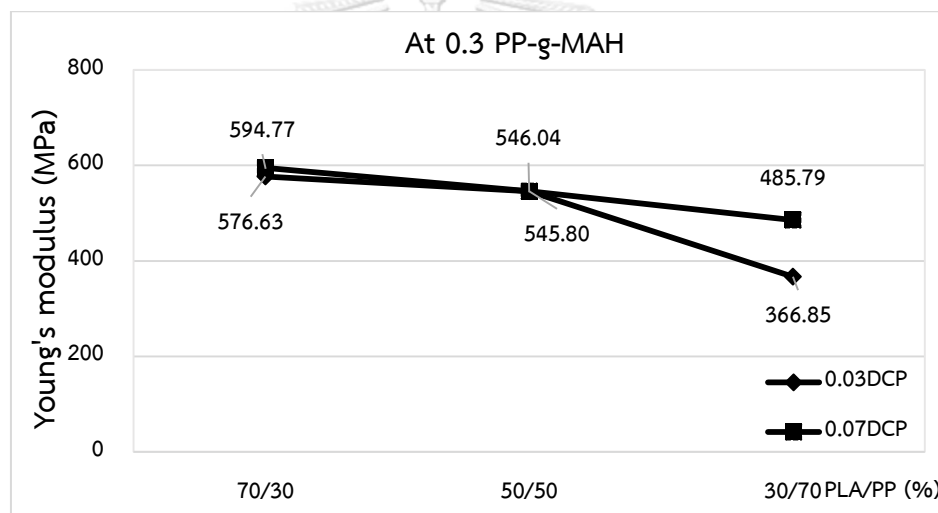
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม ซึ่งค่า Young's modulus เป็นพฤติกรรมในการรับแรงของพอลิเมอร์ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่พบในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) โดยวัสดุที่มีค่ามอดูลัสของยังสูง จะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง สามารถต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำได้มาก เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยากและไม่มีความยืดหยุ่น ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณต่างกัน

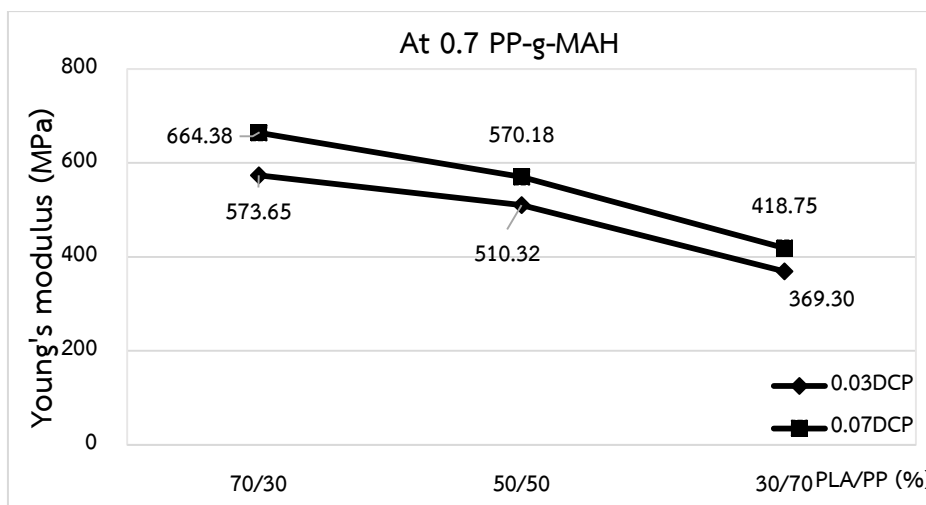
อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	Young's modulus; YM (MPa)				
	ไม้ใส่ PP-g-MAH และ DCP	PP-g-MAH 0.3 phr		PP-g-MAH 0.7 phr	
		DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr	DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr
PLA/PP (70/30)	474.27	563.53	591.58	580.55	642.32
	482.02	582.65	593.62	570.39	671.04
	475.56	583.70	599.09	570.01	679.77
\bar{X}	477.28	576.63	594.77	573.65	664.38
SD	4.15	11.36	3.88	5.98	19.60
PLA/PP (50/50)	416.06	547.02	528.09	512.66	575.15
	410.57	544.47	543.11	507.42	574.04
	423.66	545.91	566.93	510.90	561.34
\bar{X}	416.76	545.80	546.04	510.32	570.18
SD	6.57	1.28	19.58	2.67	7.67
PLA/PP (30/70)	385.00	370.06	469.75	362.61	410.50
	362.50	370.43	480.18	377.48	420.24
	358.00	360.07	507.42	367.80	425.51
\bar{X}	368.50	366.85	485.79	369.30	418.75
SD	14.47	5.88	19.45	7.55	7.61

จากตารางที่ 4.9 พบว่าในทุกอัตราส่วนการผสมที่มีปริมาณการใช้ PP-g-MAH (ไม่ว่าจะที่ปริมาณ 0.3 หรือ 0.7 phr) เมื่อเพิ่มปริมาณของ DCP จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก DCP ที่ทำหน้าที่เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาจะเหนี่ยวนำให้ระบบเกิดอนุมูลอิสระขึ้น และอนุมูลอิสระนี้จะทำให้เกิดสายโซ่ระหว่างโมเลกุล (Crosslink) ซึ่งส่งผลให้สายพอลิเมอร์นั้นเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น เนื่องจากโดนขังไว้ด้วยสายโซ่ระหว่างโมเลกุลนี้ จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสของยังจึงเพิ่มขึ้น

เมื่อนำค่าจากผลการทดสอบไปสร้างกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลของสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในปริมาณต่างกันในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมต่างกัน ดังรูปที่ 4.32 พบว่าที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใช้ DCP ปริมาณ 0.03 phr จะให้ค่ามอดูลัสของยังที่ต่ำกว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr ทั้งนี้ค่ามอดูลัสของยังเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงของพอลิเมอร์ ดังนั้นพอลิเมอร์ที่ต้องการมีสมบัติความเหนียวหรือความยืดหยุ่นที่ดีขึ้นนั้นควรจะมีค่ามอดูลัสของยังที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr และจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใช้ปริมาณ DCP เท่ากับ 0.03 phr จะให้ค่าของยังมอดูลัสที่ต่ำกว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr

ซึ่งสมมติฐานของการทดลอง คือ 1. สมมติฐานสำหรับปัจจัยเดียวมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$1.1 H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่ามอดูลัสของยังไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \mu_i \neq 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่ามอดูลัสของยังต่างกัน)

$$1.2 H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$$

(ปริมาณ PP-g-MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่ามอดูลัสของยังไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \beta_j \neq 0$$

(ปริมาณ PP-g-MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่ามอดูลัสของยังต่างกัน)

$$1.3 H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่ามอดูลัสของยังไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \gamma_k \neq 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่ามอดูลัสของยังต่างกัน)

2. สมมติฐานสำหรับปัจจัยร่วมมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$2.1 H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } i, j$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP-g-MAH ไม่มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสของยัง)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP-g-MAH มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสของยัง)

2.2 $H_0: (\tau\gamma)_{ik} = 0$ สำหรับทุกค่า i, k

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสของยัง)

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\tau\gamma)_{ik} \neq 0$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสของยัง)

2.3 $H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0$ สำหรับทุกค่า j, k

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP- σ -MAH และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสของยัง)

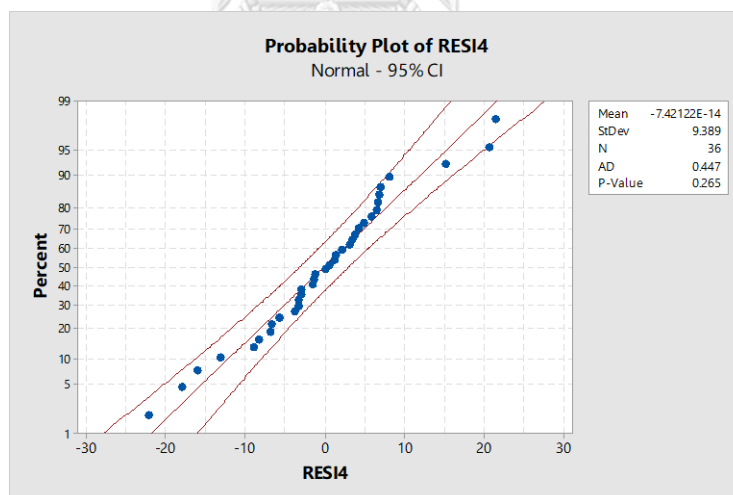
H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\beta\gamma)_{jk} \neq 0$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP- σ -MAH และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสของยัง)

เนื่องจากการที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab นั้น จะต้องตรวจสอบความสามารถของข้อมูลก่อนว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติได้หรือไม่ จึงต้องทำการตรวจสอบตามสมมติฐาน ดังนี้

1. การทดสอบการกระจายของข้อมูล (Normal)

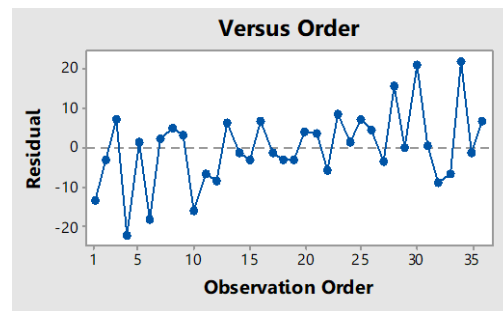
จาก รูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่ารูปแบบกราฟ Normal Probability plot of residuals (ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบค่าส่วนตกค้างของข้อมูล) ของค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและมีค่าที่เข้าใกล้เส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.34 Normal Probability plot of residuals (YM)

2. การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)

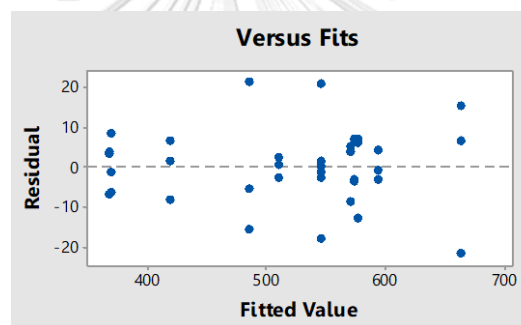
จาก รูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus order ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและลำดับของการเก็บข้อมูล พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีรูปแบบแนวโน้มที่แน่นอน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.35 Versus Order Plot (YM)

3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (Variance Stability)

จาก รูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus fitt ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและค่าที่ถูกฟิต พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีแนวโน้มที่จะมีลักษณะคล้ายกรวยปากเปิด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.36 Versus Fits Plot (YM)

หลังจากตรวจสอบสมมติฐานครบแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) โดยผลจากการใช้โปรแกรม Minitab ด้วยวิธี Backward Elimination ดังแสดงในรูปที่ 4.37

Regression Analysis: Youngs modulus versus PP, PP-g-MAH, DCP

Backward Elimination of Terms (α to remove = 0.05)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	11	282110	25646.4	199.50	0.000
PP	1	3263	3263.3	25.38	0.000
PP-g-MAH	1	610	609.7	4.74	0.039
DCP	1	1287	1287.5	10.01	0.004
PP*PP	1	5172	5171.6	40.23	0.000
PP*PP-g-MAH	1	1242	1242.2	9.66	0.005
PP*DCP	1	2259	2259.0	17.57	0.000
PP-g-MAH*DCP	1	236	235.7	1.83	0.188
PP*PP*PP-g-MAH	1	1711	1710.6	13.31	0.001
PP*PP*DCP	1	3450	3449.8	26.84	0.000
PP*PP-g-MAH*DCP	1	949	948.6	7.38	0.012
PP*PP*PP-g-MAH*DCP	1	1685	1685.1	13.11	0.001
Error	24	3085	128.6		
Total	35	285196			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
11.3382	98.92%	98.42%	97.57%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-85	168	-0.50	0.619	
PP	36.85	7.31	5.04	0.000	3994.75
PP-g-MAH	680	312	2.18	0.039	1092.26
DCP	9882	3123	3.16	0.004	1092.26
PP*PP	-0.4608	0.0727	-6.34	0.000	3994.75
PP*PP-g-MAH	-42.2	13.6	-3.11	0.005	9160.38
PP*DCP	-569	136	-4.19	0.000	9160.38
PP-g-MAH*DCP	-7852	5799	-1.35	0.188	2033.86
PP*PP*PP-g-MAH	0.492	0.135	3.65	0.001	5555.54
PP*PP*DCP	6.99	1.35	5.18	0.000	5555.54
PP*PP-g-MAH*DCP	685	252	2.72	0.012	13613.50
PP*PP*PP-g-MAH*DCP	-9.07	2.51	-3.62	0.001	6901.05

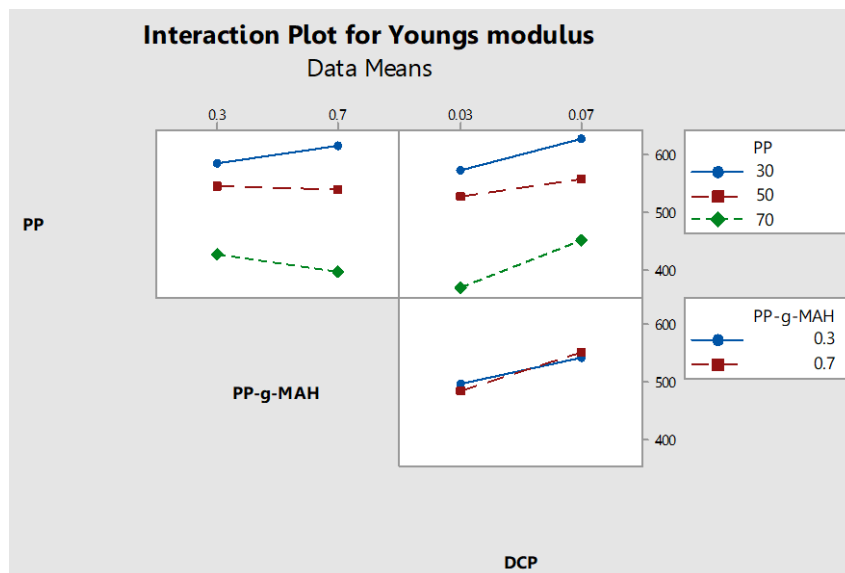
Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{Youngs modulus} = & -85 + 36.85\text{PP} + 680\text{PP-g-MAH} + 9882\text{DCP} - 0.4608\text{PP*PP} \\ & - 42.2 \text{PP*PP-g-MAH} - 569\text{PP*DCP} - 7852\text{PP-g-MAH*DCP} \\ & + 0.492 \text{PP*PP*PP-g-MAH} + 6.99 \text{PP*PP*DCP} \\ & + 685\text{PP*PP-g-MAH*DCP} - 9.07\text{PP*PP*PP-g-MAH*DCP} \end{aligned}$$

รูปที่ 4.37 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากตาราง ANOVA ในรูปที่ 4.37 พบว่าผลของปัจจัยหลักที่กระทบต่อค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) คือ ปริมาณของ PP, ปริมาณของ PP-g-MAH, ปริมาณของ DCP, ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของ PP และ PP-g-MAH, ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของ PP และ DCP

จากนั้นทำการศึกษาค่าผลกระทบรวมระหว่างปัจจัยและผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสของยัง ดังแสดงในรูปที่ 4.38 – 4.39



รูปที่ 4.38 Interaction Plot for Young's modulus

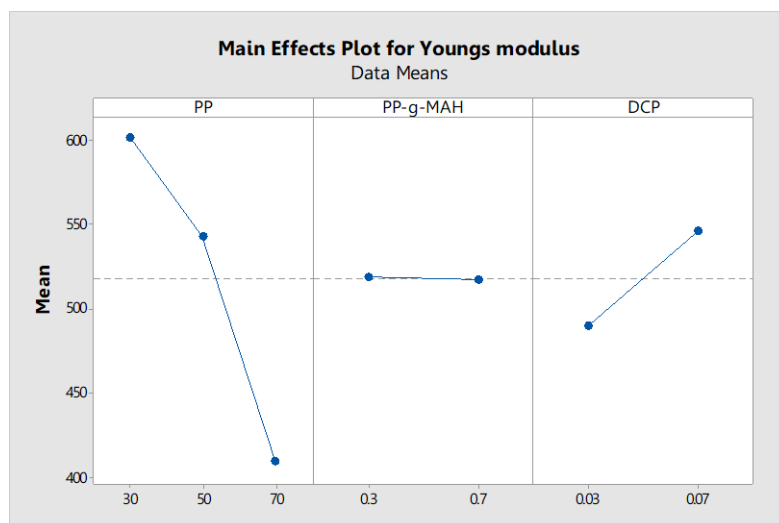
ซึ่งสามารถอธิบายผลกระทบของปัจจัยร่วมจากรูปที่ 4.38 ได้ดังนี้

(1) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP และ PP-g-MAH

จาก Interaction effect plot ระหว่าง PP และ PP-g-MAH จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ PP ต่างกัน ผลของการเติม PP-g-MAH ก็จะแตกต่างกัน โดยที่ปริมาณ PP 30% การเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันที่ปริมาณ PP เท่ากับ 50% และ 70% การเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง เนื่องจาก PP-g-MAH ที่เพิ่มขึ้นจะประพฤติตัวเสมือนเป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ส่งผลให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งแรงลดลง จึงทำให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงระหว่างสองปัจจัยนี้ยังมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสมตามผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก ANOVA

(2) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP และ DCP

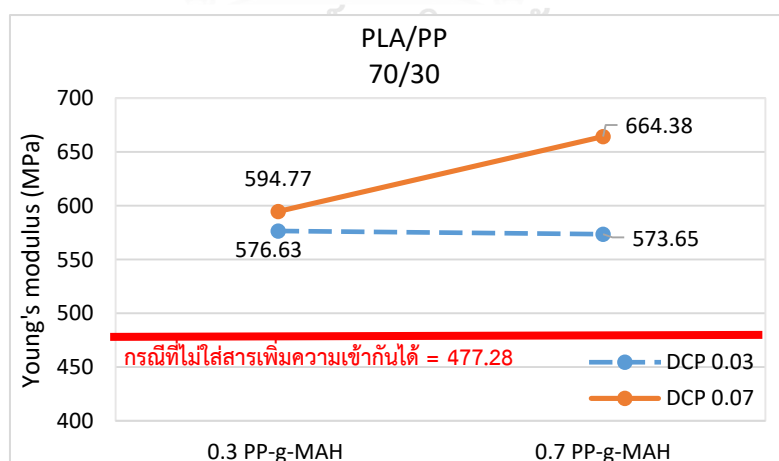
จาก Interaction effect plot ระหว่าง PP และ DCP พบว่าการเพิ่มปริมาณ DCP ในขณะที่ปริมาณของ PP คงที่ ไม่ว่าจะคงที่ที่ 30%, 50% หรือที่ 70% การเพิ่มปริมาณของ DCP นั้นจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นในทุกกรณีเนื่องจาก DCP ที่ทำหน้าที่เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาจะเหนี่ยวนำให้ระบบเกิดอนุมูลอิสระขึ้น และอนุมูลอิสระนี้จะทำให้เกิดสายโซ่ระหว่างโมเลกุล (Crosslink) ซึ่งส่งผลให้สายพอลิเมอร์นั้นเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น เนื่องจากโดนขังไว้ด้วยสายโซ่ระหว่างโมเลกุลนี้ จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสของยังจึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงระหว่างสองปัจจัยนี้จึงส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามอดูลัสของยังโดยเป็นไปตามการวิเคราะห์ด้วย ANOVA



รูปที่ 4.39 Main Effects Plot for Young's modulus

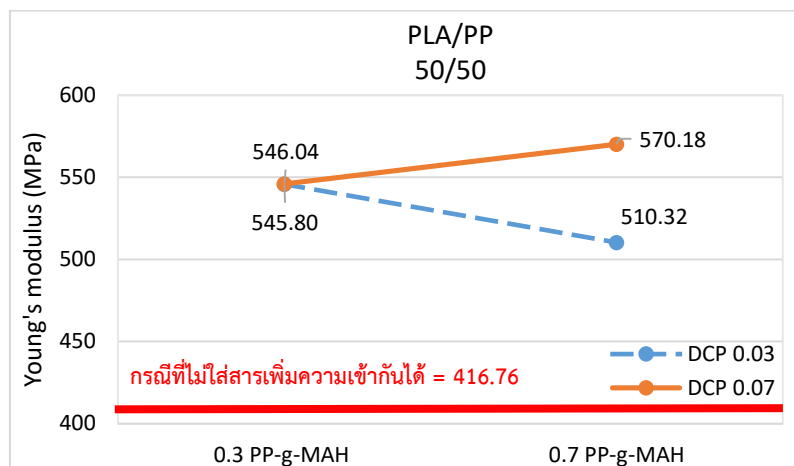
จากรูปที่ 4.39 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลัก พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ คือปริมาณของ PP ปริมาณ PP-g-MAH และปริมาณของ DCP โดยค่ามอดูลัสของยังจะลดลงตามปริมาณ PP ที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อปริมาณ DCP ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนปัจจัยหลักของ PP-g-MAH จะเห็นผลไม่ชัดเจนเนื่องจากมีผลกระทบระหว่างปัจจัยร่วมระหว่าง PP และ PP-g-MAH มาดบังผลของปัจจัยหลัก

นอกจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสของยังที่ได้แล้ว อัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่ใช้ก็มีผลต่อค่ามอดูลัสของยังเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.40 - 4.42 ซึ่งจะอธิบายตามอัตราส่วนต่างๆของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผสม



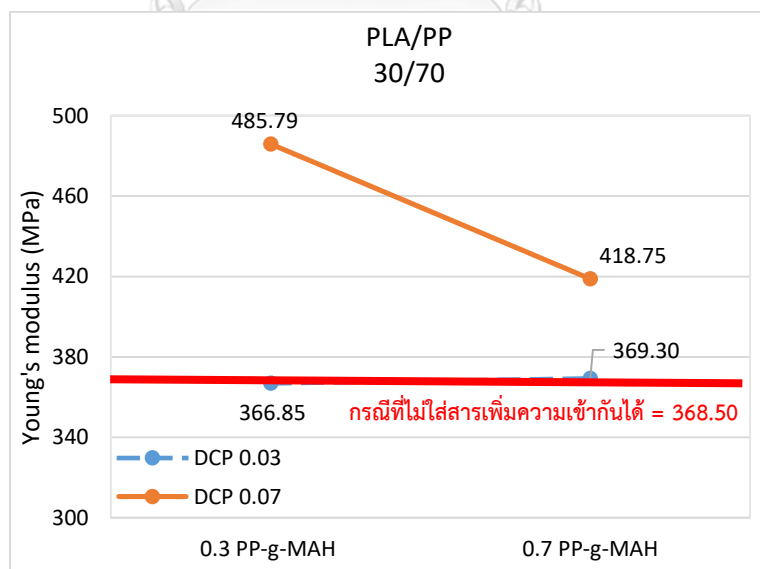
รูปที่ 4.40 ค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30

โดยรูปที่ 4.40 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่าง PLA/PP เท่ากับ 70/30 จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าจะใช้ปริมาณ PP-g-MAH ที่เท่าใดก็ตาม (0.3 หรือ 0.7 phr) หากใช้ DCP ที่ปริมาณ 0.03 phr จะให้ค่ามอดูลัสของยังต่ำกว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr



รูปที่ 4.41 ค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50

ต่อมาในรูปที่ 4.41 แสดงอัตราส่วนผสมของ PLA/PP เท่ากับ 50/50 พบว่า การใช้ DCP ปริมาณ 0.03 phr จะให้ค่ามอดูลัสของยังมากกว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr ในทุกสภาวะการใช้ของ PP-g-MAH และจะเห็นได้ว่า การเพิ่มปริมาณ DCP ในสภาวะที่มีปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr แทบจะไม่เห็นความแตกต่างของค่ามอดูลัสของยัง



รูปที่ 4.42 ค่ามอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70

และในอัตราส่วนผสมของ PLA/PP ที่ 30/70 ดังแสดงในรูปที่ 4.42 พบว่าการใช้ DCP ปริมาณ 0.03 phr ทั้งที่ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 และ 0.7 phr จะให้ค่ามอดูลัสของยังต่ำกว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr แต่ในอัตราส่วนนี้พบว่าค่ามอดูลัสของยังมียังมีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมอื่นๆ เนื่องจากมีปริมาณของ PP มากที่สุดนั่นเอง จากกราฟในรูปที่ 4.40 - 4.42 พบว่าไม่ว่าจะใช้ปริมาณ PP-g-MAH ที่เท่าใดก็ตาม (0.3 หรือ 0.7 phr) หากใช้ DCP ที่ปริมาณ 0.03 phr จะให้ค่ามอดูลัสของยังต่ำกว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr ในทุกอัตราส่วนผสมของ PLA/PP ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงระหว่างสองปัจจัยนี้มีผลกระทบต่อค่ามอดูลัสของยังตามการวิเคราะห์ ANOVA และสังเกตได้ว่าในแต่ละอัตราส่วนมีปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้แตกต่างกันออกไป ซึ่งมีแนวโน้มสรุปได้ ดังนี้

1. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 70/30 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.03 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่ามอดูลัสของยังต่ำที่สุดคือ 573.65 MPa
2. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 50/50 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.03 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่ามอดูลัสของยังต่ำที่สุดคือ 510.32 MPa
3. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 30/70 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.03 phr และ 0.3 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่ามอดูลัสของยังต่ำที่สุดคือ 366.85 MPa

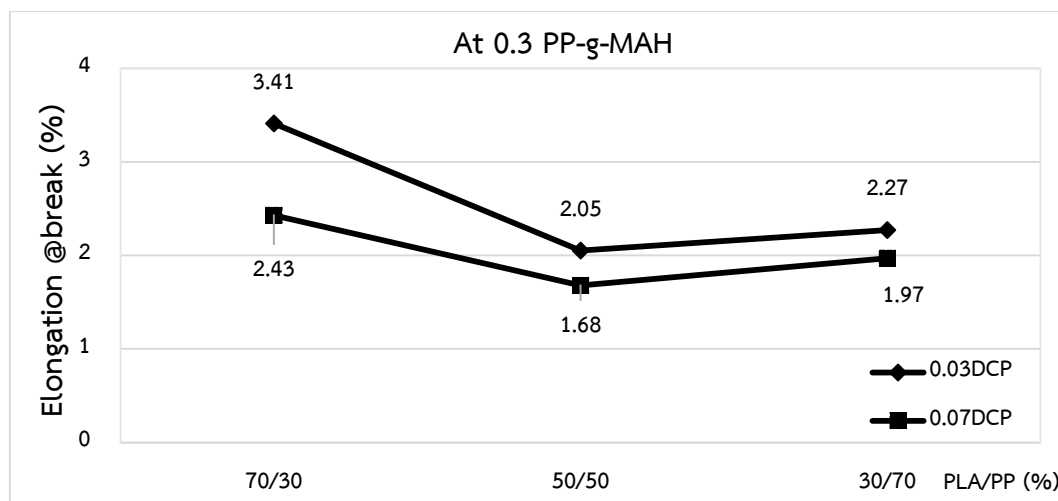
4.2.4 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation @break; %EG)

โดยทั่วไปค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด จะบอกถึงค่าความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับความยาวเดิมก่อนทำการทดสอบแรงดึง ซึ่งนับว่าเป็นการบอกความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ได้ กล่าวคือ ถ้าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่ามาก แสดงว่าพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปได้มาก ดังนั้นพอลิเมอร์ชิ้นนี้จะมีความเหนียวมากหรือมีความเปราะน้อยนั่นเอง จากผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณต่างกัน

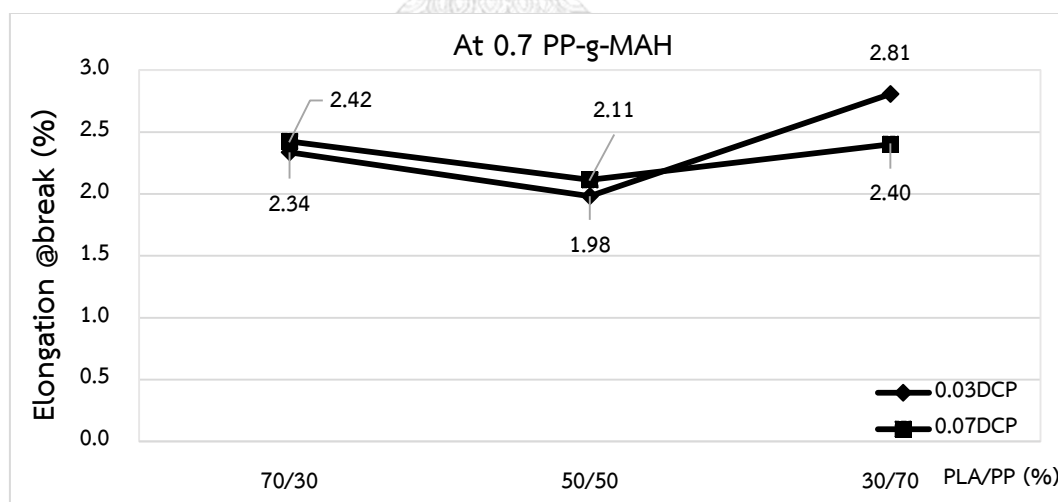
อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	%Elongation @break; %EG (%)				
	ไม้ใส่ PP-g-MAH และ DCP	PP-g-MAH 0.3 phr		PP-g-MAH 0.7 phr	
		DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr	DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr
PLA/PP (70/30)	3.22	3.44	2.55	2.36	2.59
	3.32	3.29	2.51	2.40	1.99
	3.31	3.50	2.23	2.25	2.70
\bar{x}	3.28	3.41	2.43	2.34	2.42
SD	0.06	0.11	0.17	0.08	0.38
PLA/PP (50/50)	3.45	1.90	1.47	2.08	2.12
	3.34	2.19	1.80	1.93	2.13
	3.53	2.08	1.77	1.93	2.09
\bar{x}	3.44	2.05	1.68	1.98	2.11
SD	0.10	0.15	0.18	0.09	0.02
PLA/PP (30/70)	3.78	2.25	1.77	2.98	2.43
	3.67	2.31	2.19	2.77	2.43
	3.77	2.25	1.95	2.67	2.34
\bar{x}	3.74	2.27	1.97	2.81	2.40
SD	0.06	0.03	0.21	0.16	0.05

และเมื่อนำค่าจากผลการทดสอบไปสร้างกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลของสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในปริมาณต่างกันในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมต่างกัน ดังรูปที่ 4.43 พบว่าที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม การใช้ DCP ที่ปริมาณ 0.03 phr จะให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มากกว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr เพราะ DCP เหนียวน้ำให้เกิดสายโซ่ระหว่างโมเลกุล การเพิ่มปริมาณ DCP จึงทำให้พอลิเมอร์แข็งเกร็งและส่งผลให้มีความยืดหยุ่นลดลง ดังนั้นที่ปริมาณ PP-g-MAH 0.3 phr ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม ควรใช้ DCP ปริมาณ 0.03 phr เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr

แต่ในกรณีที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr ผลที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 4.44 พบว่าการใช้ปริมาณ DCP เท่ากับ 0.07 phr จะให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่มากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ DCP ปริมาณ 0.03 phr ยกเว้นในกรณีที่ PP เท่ากับ 70% ที่การใช้ DCP 0.03 phr จะให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมากกว่า ดังนั้นที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH 0.7 phr ในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP เท่ากับ 50/50 และ 70/30 ควรใช้ DCP ปริมาณ 0.07 phr และที่อัตราส่วน 30/70 ควรใช้ DCP ปริมาณ 0.03 phr เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น



รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr

ซึ่งสมมติฐานของการทดลอง คือ 1. สมมติฐานสำหรับปัจจัยเดียวมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$1.1 H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \mu_i \neq 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดต่างกัน)

$$1.2 H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$$

(ปริมาณ PP-g-MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \beta_j \neq 0$$

(ปริมาณ PP-g-MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดต่างกัน)

$$1.3 H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \gamma_k \neq 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดต่างกัน)

2. สมมติฐานสำหรับปัจจัยร่วมมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$2.1 H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } i, j$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP-g-MAH ไม่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP-g-MAH มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด)

$$2.2 H_0 : (\tau\gamma)_{ik} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } i, k$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\gamma)_{ik} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด)

$$2.3 H_0 : (\beta\gamma)_{jk} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } j, k$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP-g-MAH และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด)

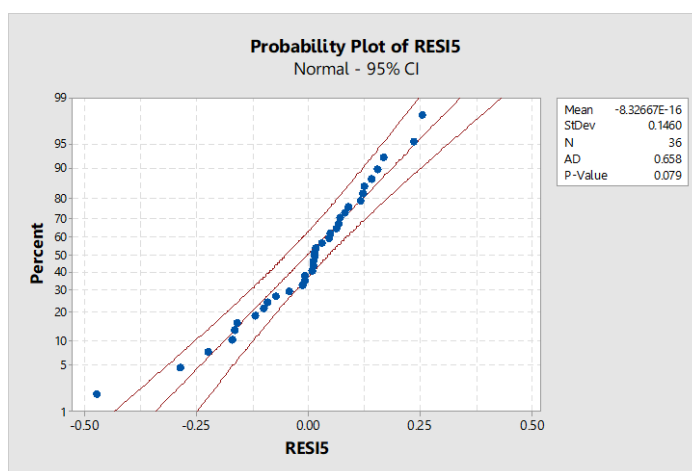
$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP-g-MAH และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด)

เนื่องจากการที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab นั้น จะต้องตรวจสอบความสามารถของข้อมูลก่อนว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติได้หรือไม่ จึงต้องทำการตรวจสอบตามสมมติฐาน ดังนี้

1. การทดสอบการกระจายของข้อมูล (Normal)

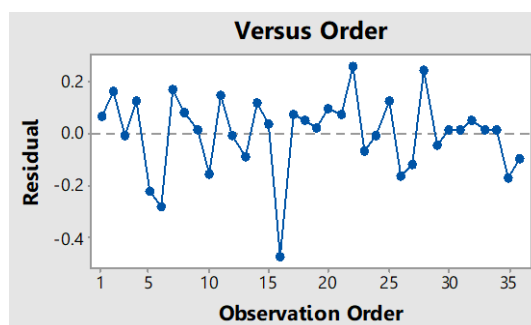
จาก รูปที่ 4.45 จะเห็นได้ว่ารูปแบบกราฟ Normal Probability plot of residuals (ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบค่าส่วนตกค้างของข้อมูล) ของร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มใกล้เคียงกันและมีค่าที่เข้าใกล้เส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.45 Normal Probability plot of residuals (%EG)

2. การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)

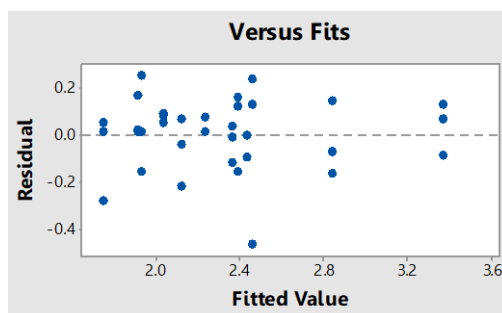
จาก รูปที่ 4.46 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus order ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและลำดับของการเก็บข้อมูล พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีรูปแบบแนวโน้มที่แน่นอน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.46 Versus Order Plot (%EG)

3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (Variance Stability)

จาก รูปที่ 4.47 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus fitt ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและค่าที่ถูกฟิต พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีแนวโน้มที่จะมีลักษณะคล้ายกรวยปากเปิด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.47 Versus Fits Plot (%EG)

หลังจากตรวจสอบสมมติฐานครบแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) โดยผลจากการใช้โปรแกรม Minitab ด้วยวิธี Backward Elimination ดังแสดงในรูปที่ 4.48

Regression Analysis: %Elongation versus PP, PP-g-MAH, DCP

Backward Elimination of Terms (α to remove = 0.05)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	9	6.57024	0.73003	25.44	0.000
PP	1	1.56712	1.56712	54.61	0.000
PP-g-MAH	1	1.62160	1.62160	56.51	0.000
DCP	1	0.81578	0.81578	28.43	0.000
PP*PP	1	0.88710	0.88710	30.91	0.000
PP*PP-g-MAH	1	1.28055	1.28055	44.63	0.000
PP*DCP	1	0.34322	0.34322	11.96	0.002
PP-g-MAH*DCP	1	0.82930	0.82930	28.90	0.000
PP*PP*DCP	1	0.15475	0.15475	5.39	0.028
PP*PP-g-MAH*DCP	1	0.51451	0.51451	17.93	0.000
Error	26	0.74608	0.02870		
Lack-of-Fit	2	0.08781	0.04391	1.60	0.223
Pure Error	24	0.65826	0.02743		
Total	35	7.31632			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.169397	89.80%	86.27%	79.92%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	12.82	1.12	11.49	0.000	
PP	-0.3120	0.0422	-7.39	0.000	596.31
PP-g-MAH	-9.20	1.22	-7.52	0.000	75.22
DCP	-110.5	20.7	-5.33	0.000	215.50
PP*PP	0.002242	0.000403	5.56	0.000	551.00
PP*PP-g-MAH	0.1555	0.0233	6.68	0.000	120.53
PP*DCP	2.711	0.784	3.46	0.002	1367.41
PP-g-MAH*DCP	122.2	22.7	5.38	0.000	140.06
PP*PP*DCP	-0.01739	0.00749	-2.32	0.028	766.28
PP*PP-g-MAH*DCP	-1.830	0.432	-4.23	0.000	179.13

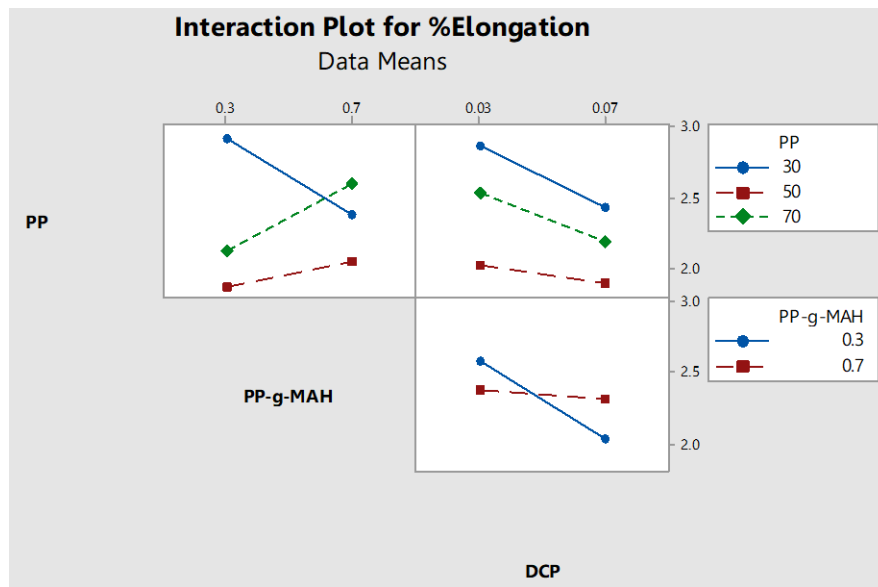
Regression Equation

$$\begin{aligned} \%Elongation = & 12.82 - 0.3120PP - 9.20PP-g-MAH - 110.5DCP \\ & + 0.002242PP*PP + 0.1555PP*PP-g-MAH + 2.711PP*DCP \\ & + 122.2PP-g-MAH*DCP - 0.01739PP*PP*DCP \\ & - 1.830PP*PP-g-MAH*DCP \end{aligned}$$

รูปที่ 4.48 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากตาราง ANOVA ในรูปที่ 4.48 พบว่าผลของปัจจัยหลักที่กระทบต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) คือ ปริมาณของ PP, ปริมาณของ PP-g-MAH, ปริมาณของ DCP และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยคือปริมาณการใช้ระหว่าง PP และ PP-g-MAH, ปริมาณการใช้ระหว่าง PP และ DCP และปริมาณการใช้ระหว่าง PP-g-MAH และ DCP

จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยและผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ดังแสดงในรูปที่ 4.49 -4.50



รูปที่ 4.49 Interaction Plot for %Elongation @break

จากรูปที่ 4.49 แสดงผลกระทบบรรวมระหว่างปัจจัยซึ่งสามารถอธิบาย ได้ดังนี้

(1) ผลกระทบบรรวมระหว่าง PP และ PP-g-MAH

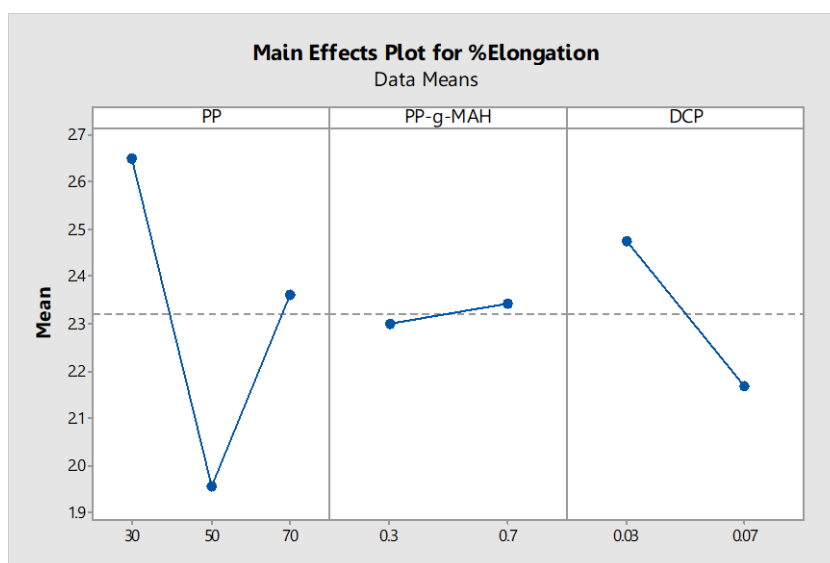
จาก Interaction effect plot จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณการใช้ของ PP เปลี่ยนไป การเพิ่มปริมาณของ PP-g-MAH จะส่งผลต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดต่างกัน โดยที่ปริมาณ PP 30% การเพิ่มปริมาณของ PP-g-MAH จะส่งผลให้ร้อยละการยืดตัวมีค่าลดลง แต่ในทางกลับกันเมื่ออยู่ในสถานะที่ PP มีปริมาณเท่ากับ 50% และ 70% การเพิ่มปริมาณของ PP-g-MAH จะส่งผลให้ร้อยละการยืดตัวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลง ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงระหว่างสองปัจจัยนี้ยังมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมตามผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก ANOVA

(2) ผลกระทบบรรวมระหว่าง PP และ DCP

จาก Interaction effect plot จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณการใช้ DCP ในทุกอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมจะส่งผลให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง เพราะ DCP เหนียวทำให้เกิดสายโซ่ระหว่างโมเลกุล การเพิ่มปริมาณ DCP จึงทำให้พอลิเมอร์แข็งแรงและส่งผลให้มีความยืดหยุ่นลดลง โดยที่ปริมาณการใช้ PP 30% และ 70% จะลดลงอย่างมาก แต่ในกรณีที่ PP 50% จะลดลงเล็กน้อยทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงระหว่างสองปัจจัยนี้ยังมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมตามผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก ANOVA

(3) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP-g-MAH และ DCP

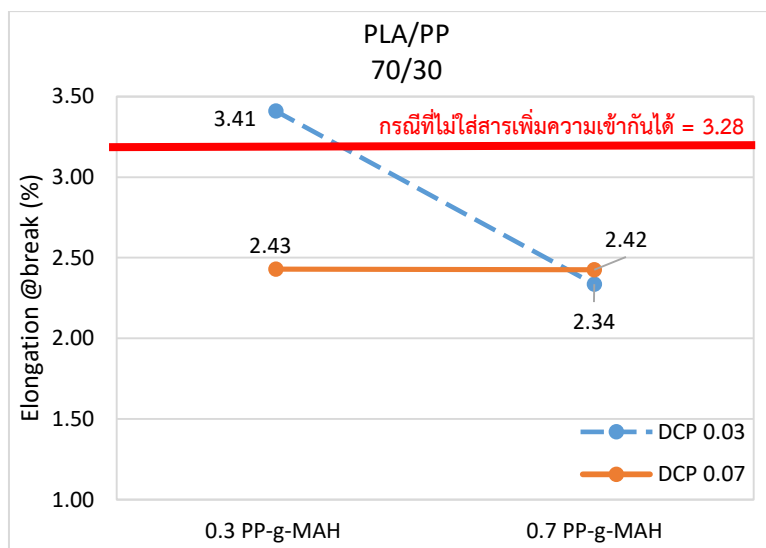
จาก Interaction effect plot จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณ DCP ในขณะที่ปริมาณ PP-g-MAH ทั้งที่ 0.3 phr และ 0.7 phr ก็จะส่งผลให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณ DCP ส่งผลให้เกิดสายโซ่ระหว่างโมเลกุล (Crosslink) ในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ จึงทำให้ PP-g-MAH ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำหน้าที่ในการเพิ่มความเข้ากันได้เต็มที่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระหว่างปัจจัยทั้งสองนี้มีผลต่อค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญตามการวิเคราะห์ด้วย ANOVA



รูปที่ 4.50 Main Effects Plot for %Elongation @break

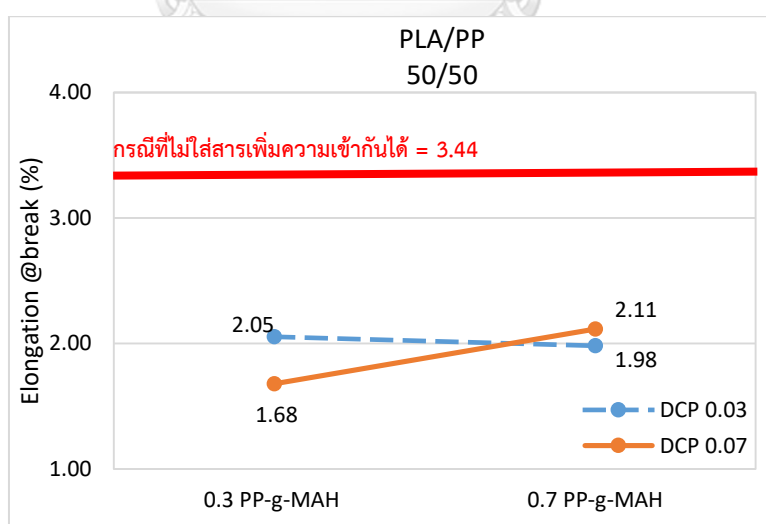
จากรูปที่ 4.50 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PP จะส่งผลให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ในส่วนของปริมาณ PP-g-MAH พบว่าค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PP-g-MAH ที่เพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันการเพิ่มปริมาณ DCP จะส่งผลให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง

นอกจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดแล้วนั้น ยังมีอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่มีผลต่อค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.51 - 4.53 ซึ่งจะอธิบายตามอัตราส่วนต่างๆของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผสม



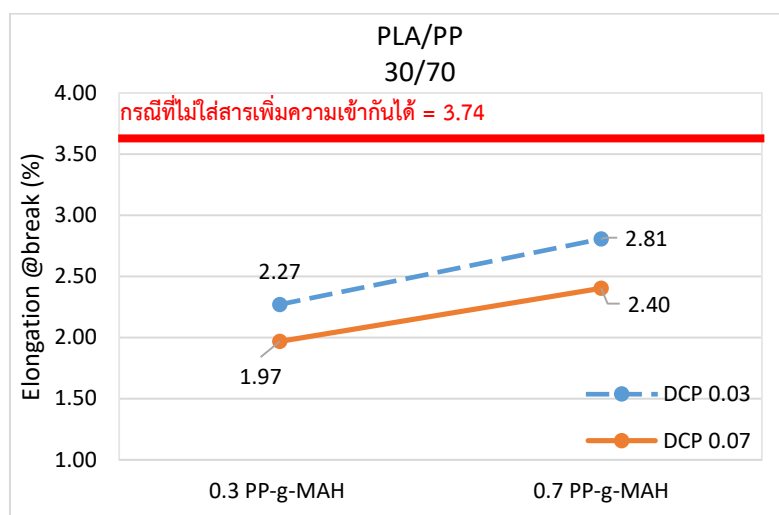
รูปที่ 4.51 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30

โดยรูปที่ 4.51 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่าง PLA/PP เท่ากับ 70/30 จะเห็นได้ว่า ที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr จะให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อปริมาณ DCP แต่เมื่อใช้ปริมาณ PP-g-MAH ที่ 0.3 phr จะพบว่าค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดจะแตกต่างกัน เมื่อใช้ปริมาณ DCP ต่างกัน โดยที่ DCP เท่ากับ 0.03 phr จะให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่มากกว่า นั่นคือมีความเหนียวมากกว่านั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr ทั้งในสถานะที่ PP-g-MAH 0.3 หรือ 0.7 phr จะส่งผลให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด แทบไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.52 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50

ต่อมาในรูปแบบที่ 4.52 ที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP เท่ากับ 50/50 พบว่าที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr การเพิ่ม DCP จะส่งผลต่อค่าร้อยละการยืดตัวไม่แตกต่างกันมากนัก และที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr พบว่าการใช้ DCP 0.03 phr จะให้ค่าร้อยละการยืดตัวมากกว่าการใช้ DCP 0.07 phr



รูปที่ 4.53 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70

จากรูปที่ 4.53 แสดงค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่อัตราส่วนผสมของ PLA/PP เท่ากับ 30/70 จะพบว่าทั้งที่ปริมาณของ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 และ 0.7 phr เมื่อใช้ DCP ที่ปริมาณ 0.03 phr จะให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมากกว่าการใช้ DCP 0.07 phr

จากกราฟข้างต้นสังเกตได้ว่าในแต่ละอัตราส่วน จะมีปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้แตกต่างกันออกไป โดยผลของ DCP และ PP-g-MAH ส่งผลให้ได้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดแตกต่างกันตามอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ ซึ่งมีแนวโน้มสรุปได้ดังนี้

1. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 70/30 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.03 phr และ 0.3 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.41%
2. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 50/50 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.07 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.11%
3. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 30/70 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.03 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.81%

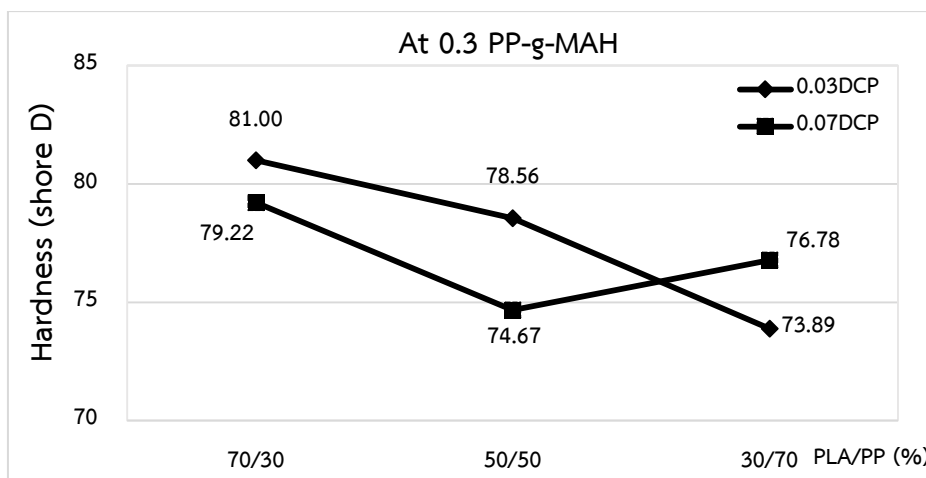
4.2.5 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความแข็ง (Hardness; HN)

ความแข็งคือ ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรโดยเฉพาะที่ผิวของวัสดุ เช่น การเกิดรอยบวมที่ผิว จากการทดสอบความแข็งหลังการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่าความแข็งในทุกอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ PP ที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณต่างๆกัน

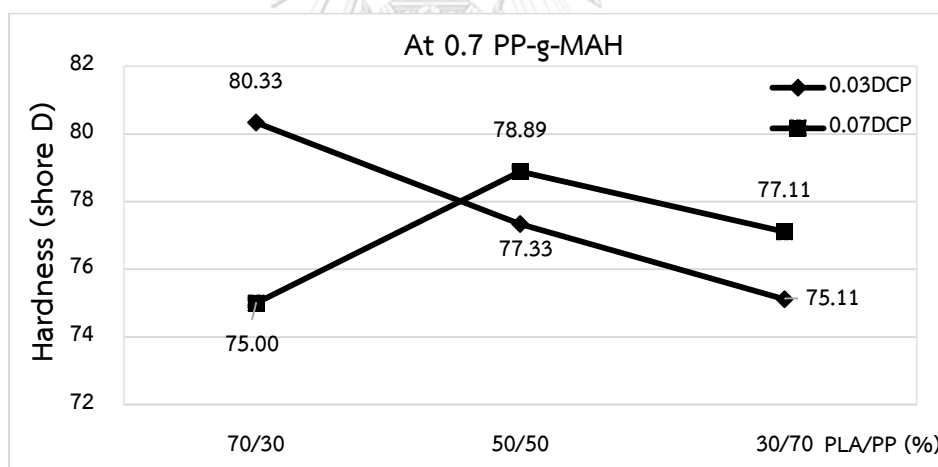
อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	Hardness; HN (shore D)				
	ไม้ใส่ PP-g-MAH และ DCP	PP-g-MAH 0.3 phr		PP-g-MAH 0.7 phr	
		DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr	DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr
PLA/PP (70/30)	73.67	80.67	79.33	80.67	75.00
	78.67	80.33	78.33	79.67	74.33
	76.00	82.00	80.00	80.67	75.67
\bar{X}	76.11	81.00	79.22	80.33	75.00
SD	2.50	0.88	0.84	0.58	0.67
PLA/PP (50/50)	76.33	77.33	73.67	75.67	77.67
	76.33	78.67	74.67	78.33	79.00
	75.33	79.67	75.67	78.00	80.00
\bar{X}	76.00	78.56	74.67	77.33	78.89
SD	0.58	1.17	1.00	1.45	1.17
PLA/PP (30/70)	71.00	75.67	77.00	73.33	75.33
	71.00	75.00	75.00	75.00	77.67
	71.67	71.00	78.33	77.00	78.33
\bar{X}	71.22	73.89	76.78	75.11	77.11
SD	0.38	2.52	1.68	1.84	1.58

และเมื่อนำค่าจากการทดสอบไปสร้างกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลของสารริเริ่มปฏิกิริยา, สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ใช้ในปริมาณต่างๆกันในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมต่างๆกัน ดังรูปที่ 4.54 - 4.55



รูปที่ 4.54 เปรียบเทียบค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr

จากรูปที่ 4.54 พบว่าที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr ในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PP 30% และ 50% การใช้ DCP ปริมาณที่ 0.03 phr จะให้ค่าความแข็งที่มากกว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr แต่ที่อัตราส่วน PP 70 จะเห็นได้ว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr จะให้ค่าความแข็งที่มากกว่าการใช้ DCP ที่ 0.03 phr



รูปที่ 4.55 เปรียบเทียบค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr

แต่ในกรณีที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr จะเห็นได้ว่าในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PP 50 และ 70 การใช้ DCP ปริมาณที่ 0.07 phr จะให้ค่าความแข็งที่มากกว่าการใช้ DCP ที่ 0.03 phr แต่ที่อัตราส่วน PP 30 จะเห็นได้ว่าการใช้ DCP ที่ 0.03 phr จะให้ค่าความแข็งที่มากกว่าการใช้ DCP ที่ 0.07 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.55

ซึ่งสมมติฐานของการทดลอง คือ 1. สมมติฐานสำหรับปัจจัยเดียวมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$1.1 H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \mu_i \neq 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่าความแข็งต่างกัน)

$$1.2 H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$$

(ปริมาณ PP-g-MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \beta_j \neq 0$$

(ปริมาณ PP-g-MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความแข็งต่างกัน)

$$1.3 H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \gamma_k \neq 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความแข็งต่างกัน)

2. สมมติฐานสำหรับปัจจัยร่วมมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$2.1 H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } i, j$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP-g-MAH ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP-g-MAH มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง)

$$2.2 H_0 : (\tau\gamma)_{ik} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } i, k$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\gamma)_{ik} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง)

$$2.3 H_0 : (\beta\gamma)_{jk} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } j, k$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP-g-MAH และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$$

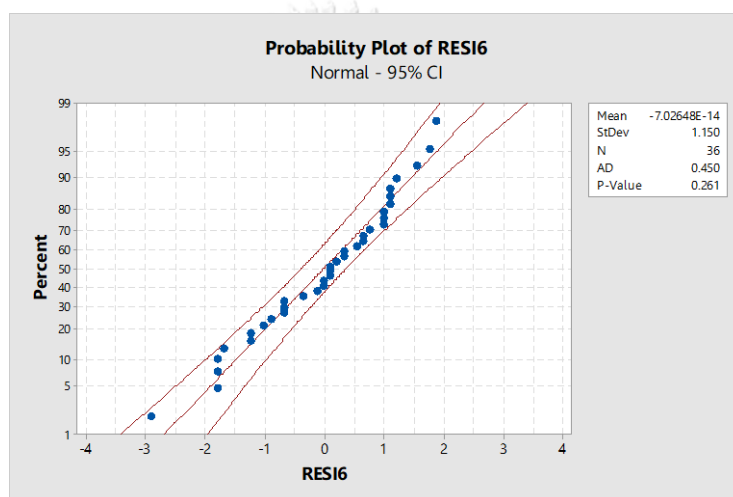
(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP-g-MAH และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง)

การตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ

เนื่องจากการที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab นั้น จะต้องตรวจสอบความสามารถของข้อมูลก่อนว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติได้หรือไม่ จึงต้องทำการตรวจสอบตามสมมติฐาน ดังนี้

1. การทดสอบการกระจายของข้อมูล (Normal)

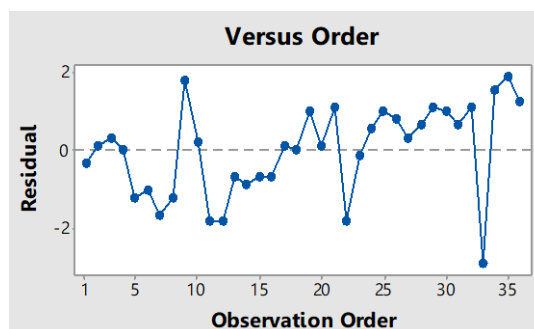
จาก รูปที่ 4.56 จะเห็นได้ว่ารูปแบบกราฟ Normal Probability plot of residuals (ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบค่าส่วนตกค้างของข้อมูล) ของค่าความแข็ง มีแนวโน้มใกล้เคียงกันและมีค่าที่เข้าใกล้เส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.56 Normal Probability plot of residuals (HN)

2. การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)

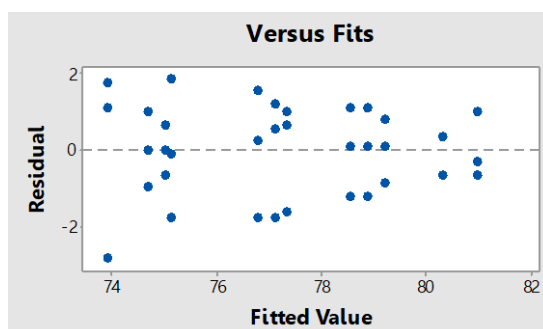
จาก รูปที่ 4.57 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus order ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและลำดับของการเก็บข้อมูล พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีรูปแบบแนวโน้มที่แน่นอน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.57 Versus Order Plot (HN)

3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (Variance Stability)

จาก รูปที่ 4.58 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus fitt ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและค่าที่ถูกฟิต พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีแนวโน้มที่จะมีลักษณะคล้ายกรวยปากเปิด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.58 Versus Fits Plot (HN)

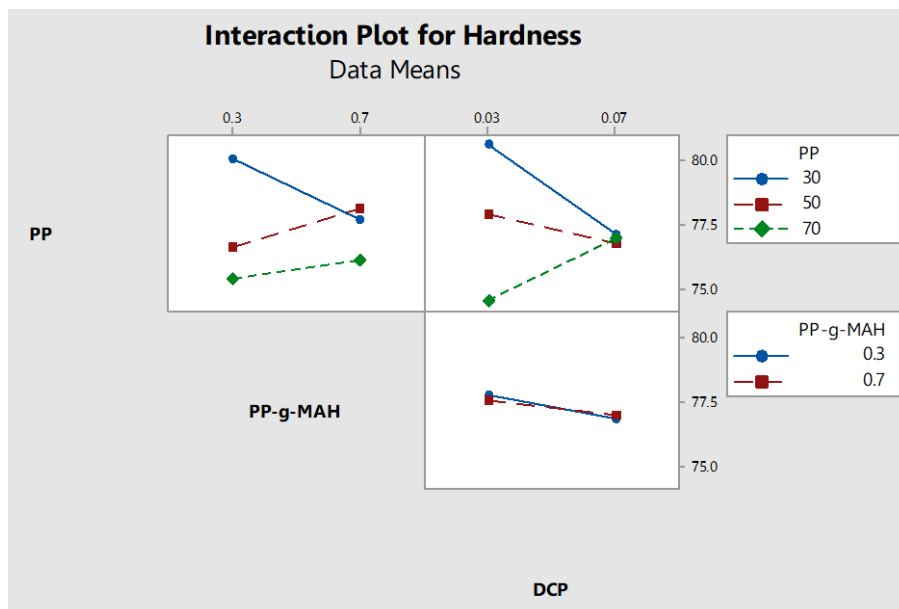
หลังจากตรวจสอบสมมติฐานครบแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) โดยผลจากการใช้โปรแกรม Minitab ด้วยวิธี Backward Elimination ดังแสดงในรูปที่ 4.59

Regression Analysis: Hardness versus PP, PP-g-MAH, DCP						
Backward Elimination of Terms (α to remove = 0.05)						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	11	178.92	16.266	8.43	0.000	
PP	1	11.71	11.708	6.07	0.021	
PP-g-MAH	1	13.28	13.280	6.88	0.015	
DCP	1	22.63	22.633	11.73	0.002	
PP*PP	1	14.86	14.863	7.70	0.011	
PP*PP-g-MAH	1	14.35	14.353	7.44	0.012	
PP*DCP	1	26.83	26.831	13.91	0.001	
PP-g-MAH*DCP	1	31.34	31.335	16.24	0.000	
PP*PP*PP-g-MAH	1	14.50	14.500	7.52	0.011	
PP*PP*DCP	1	28.67	28.669	14.86	0.001	
PP*PP-g-MAH*DCP	1	31.05	31.055	16.10	0.001	
PP*PP*PP-g-MAH*DCP	1	29.39	29.389	15.24	0.001	
Error	24	46.30	1.929			
Total	35	225.22				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	1.38889	79.44%	70.02%	53.75%		
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	36.8	20.6	1.79	0.086		
PP	2.207	0.896	2.46	0.021	3994.75	
PP-g-MAH	100.4	38.3	2.62	0.015	1092.26	
DCP	1310	383	3.43	0.002	1092.26	
PP*PP	-0.02470	0.00890	-2.78	0.011	3994.75	
PP*PP-g-MAH	-4.54	1.66	-2.73	0.012	9160.38	
PP*DCP	-62.0	16.6	-3.73	0.001	9160.38	
PP-g-MAH*DCP	-2863	710	-4.03	0.000	2033.86	
PP*PP*PP-g-MAH	0.0453	0.0165	2.74	0.011	5555.54	
PP*PP*DCP	0.637	0.165	3.86	0.001	5555.54	
PP*PP-g-MAH*DCP	124.0	30.9	4.01	0.001	13613.50	
PP*PP*PP-g-MAH*DCP	-1.198	0.307	-3.90	0.001	6901.05	
Regression Equation						
Hardness = 36.8 + 2.207PP + 100.4PP-g-MAH + 1310DCP - 0.02470PP*PP - 4.54PP*PP-g-MAH - 62.0PP*DCP - 2863PP-g-MAH*DCP + 0.0453PP*PP*PP-g-MAH + 0.637PP*PP*DCP + 124.0PP*PP-g-MAH*DCP - 1.198PP*PP*PP-g-MAH*DCP						

รูปที่ 4.59 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากตาราง ANOVA ในรูปที่ 4.59 พบว่าผลของปัจจัยหลักที่กระทบต่อค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ (p -value < 0.05) คือ ปริมาณของ PP, ปริมาณ DCP, ปริมาณของ PP-g-MAH, ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของ PP และปริมาณ PP-g-MAH, ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของปริมาณ PP และ DCP และผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของ PP-g-MAH และปริมาณ DCP

จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยและผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง ดังรูปที่ 4.60 – 4.61



รูปที่ 4.60 Interaction Plot for Hardness

จากรูปที่ 4.60 แสดงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย ซึ่งสามารถอธิบาย ได้ดังนี้

(1) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP และ PP-g-MAH

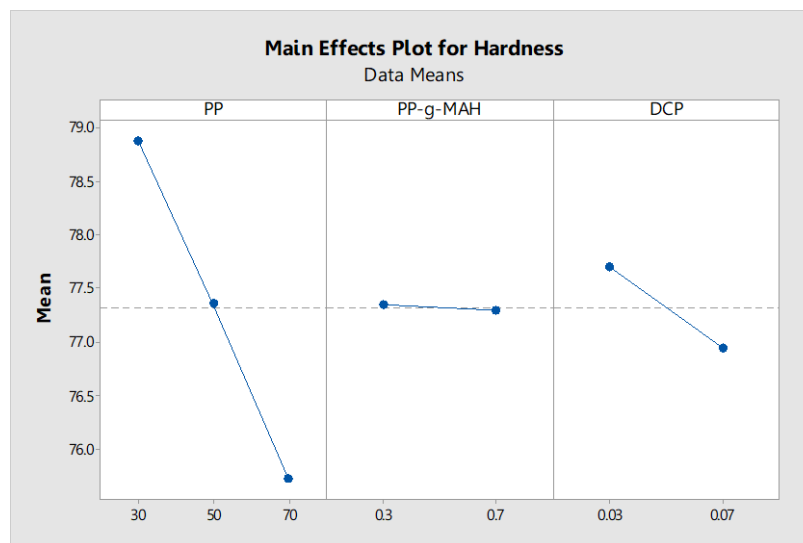
จาก Interaction effect plot จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ PP-g-MAH ในขณะที่ ปริมาณของ PP ต่างกัน จะส่งผลค่าความแข็งต่างกัน โดยการเพิ่มปริมาณของ PP-g-MAH ในขณะที่ PP 30% จะส่งผลให้ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง แต่ถ้าเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH ในขณะที่ PP มี ปริมาณ 50% และ 70% จะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงระหว่างสองปัจจัยนี้ยังมีผล อย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งของพอลิเมอร์ผสมตามผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก ANOVA

(2) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP และ DCP

จาก Interaction effect plot จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณ DCP ในขณะที่ปริมาณ PP 70% จะ ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันที่ปริมาณ PP 30% และ 50% พบว่าค่าความแข็งลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ DCP ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระหว่างปัจจัยทั้งสองนี้มีผลต่อความแข็งของพอลิเมอร์ผสม อย่างมีนัยสำคัญตามการวิเคราะห์ด้วย ANOVA

(3) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP-g-MAH และ DCP

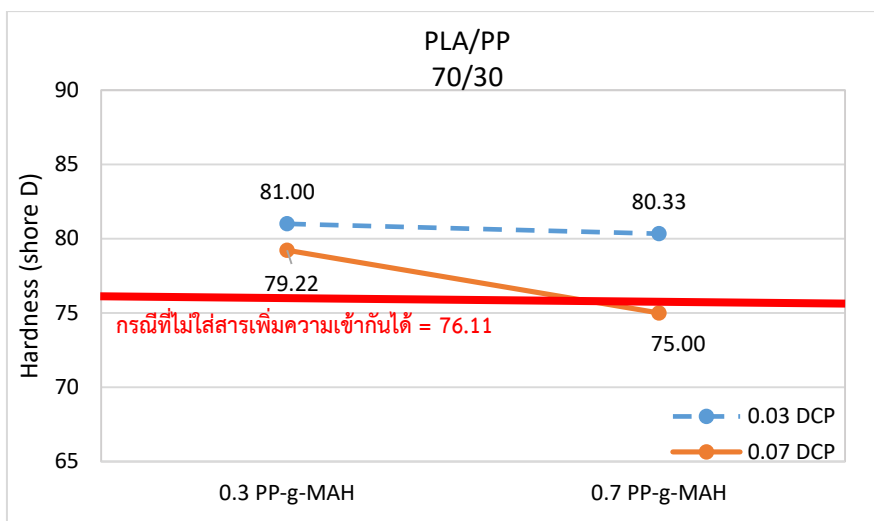
จาก Interaction effect plot จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณ DCP ในขณะที่ PP-g-MAH คงที่ โดยทั้งที่ 0.3 และ 0.7 phr จะส่งผลให้ความแข็งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระหว่างปัจจัยทั้งสองนี้มีผลต่อความแข็งของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญตามการวิเคราะห์ด้วย ANOVA



รูปที่ 4.61 Main Effects Plot for Hardness

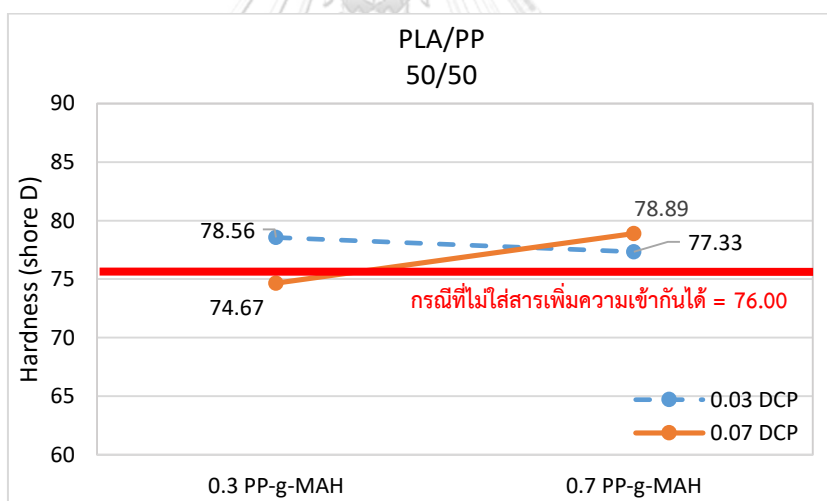
จากรูปที่ 4.61 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PP จะส่งผลให้ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมลดลง เนื่องจากสมบัติความแข็งของ PP บริสุทธิ์มีค่าต่ำกว่าของ PLA บริสุทธิ์ ดังนั้นเมื่อนำ PP มาผสมใน PLA จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสม PLA/PP มีแนวโน้มของค่าความแข็งลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณ DCP ก็ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงเช่นกัน

นอกจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแล้ว ยังมีอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่มีผลต่อค่าความแข็งเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.62 - 4.64 ซึ่งจะอธิบายตามอัตราส่วนต่างๆของพอลิเมอร์ผสม



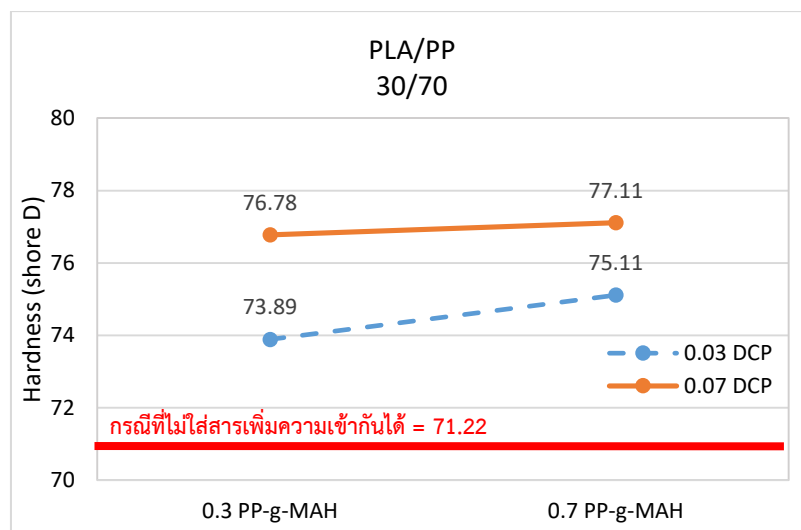
รูปที่ 4.62 ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30

โดยรูปที่ 4.62 แสดงการใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง PLA/PP เท่ากับ 70/30 จะเห็นได้ว่าการใช้ปริมาณ DCP เท่ากับ 0.03 phr จะให้ค่าความแข็งที่มากกว่าการใช้ DCP ที่ปริมาณ 0.07 phr ในทุกสภาวะการใช้งานของ PP-g-MAH



รูปที่ 4.63 ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50

ต่อมาในรูปที่ 4.63 ที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP เท่ากับ 50/50 พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PP-g-MAH เพิ่มขึ้นในสภาวะที่ใช้ DCP ปริมาณ 0.07 phr แต่ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH ในสภาวะที่มีปริมาณ DCP 0.03 phr นั้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง



รูปที่ 4.64 ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70

จากรูปที่ 4.64 แสดงค่าความแข็งที่อัตราส่วนผสมของ PLA/PP เท่ากับ 30/70 จะพบว่าทั้งที่ปริมาณการใช้ของ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 และ 0.7 phr เมื่อใช้ DCP ปริมาณ 0.07 phr จะให้ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมมากกว่าการใช้ DCP ปริมาณ 0.03 phr

จากกราฟข้างต้นสังเกตได้ว่าในแต่ละอัตราส่วน จะมีปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้แตกต่างกันออกไป โดยผลของ DCP และ PP-g-MAH ส่งผลให้ได้ค่าความแข็งแตกต่างกันตามอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ ซึ่งมีแนวโน้มสรุปได้ดังนี้

1. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 70/30 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.03 phr และ 0.3 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าความแข็งมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 81
2. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 50/50 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.07 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าความแข็งมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 78.89
3. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 30/70 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ 0.07 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าความแข็งมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 77.11

4.2.6 สัดส่วน PLA และ PP ที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก (Impact strength; IMS)

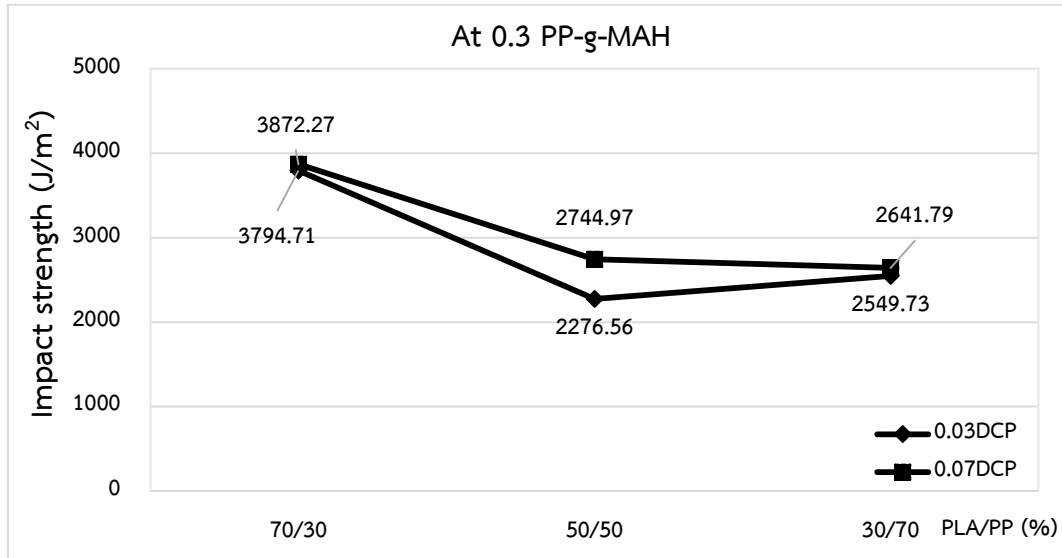
โดยปกติแล้วความสามารถในการทนแรงกระแทกจะรายงานด้วยค่าพลังงานกระแทก โดยค่าพลังงานกระแทกมีค่ามาก แสดงถึงพลังงานที่พอลิเมอร์สามารถดูดซับไว้ได้ก่อนเกิดการฉีกขาดหรือแตกหัก ซึ่งถ้าค่าพลังงานนี้มีค่ามากแสดงว่าความทนแรงกระแทกมีมากหรือมีความสามารถในการทนรับแรงกระแทกได้มาก ซึ่งค่าทดสอบความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณต่าง ๆ กัน

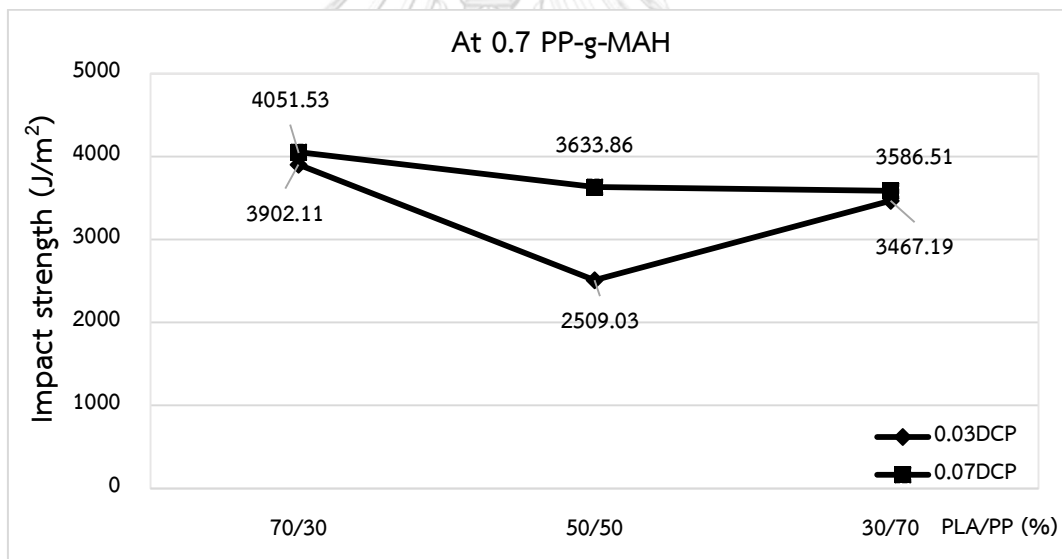
อัตราส่วนผสม (PLA/PP)	Impact energy (J/m ²)				
	ไมใส่ PP-g-MAH และ DCP	PP-g-MAH 0.3 phr		PP-g-MAH 0.7 phr	
		DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr	DCP 0.03 phr	DCP 0.07 phr
PLA/PP (70/30)	3256.66	3390.47	3890.47	3617.46	4117.46
	3283.33	3876.19	3537.46	3907.93	3614.92
	3196.66	4117.46	4188.88	4180.95	4422.22
\bar{X}	3245.55	3794.71	3872.27	3902.11	4051.53
SD	44.39	370.28	326.10	281.79	407.67
PLA/PP (50/50)	1023.33	2180.95	2663.49	2907.93	3876.19
	1563.33	2422.22	3390.47	2180.95	3634.92
	1023.33	2226.50	2180.95	2438.22	3390.47
\bar{X}	1203.33	2276.56	2744.97	2509.03	3633.86
SD	311.77	128.19	608.86	368.63	242.86
PLA/PP (30/70)	2220.23	2422.22	2222.22	3390.47	3149.20
	2134.45	2663.49	2553.96	3534.92	3734.12
	2270.50	2563.49	3149.20	3476.19	3876.19
\bar{X}	2208.39	2549.73	2641.79	3467.19	3586.51
SD	68.79	121.22	469.69	72.64	385.32

จากตารางที่ 4.12 พบว่าการเติม DCP และ PP-g-MAH นั้นทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้ มีค่าพลังงานกระแทกที่สูงขึ้น นั่นคือพอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกมากขึ้น เนื่องจากการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ (PP-g-MAH) จะไปช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาค (Adhesion) ระหว่าง PLA และ PP นอกจากนี้ยังพบว่าที่ปริมาณ DCP คงที่ (ที่ 0.03 และ 0.07 phr) การเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม

เมื่อนำค่าจากผลการทดสอบไปสร้างกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลของสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในปริมาณต่างกัน ในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมต่างกัน ดังรูปที่ 4.65 - 4.66



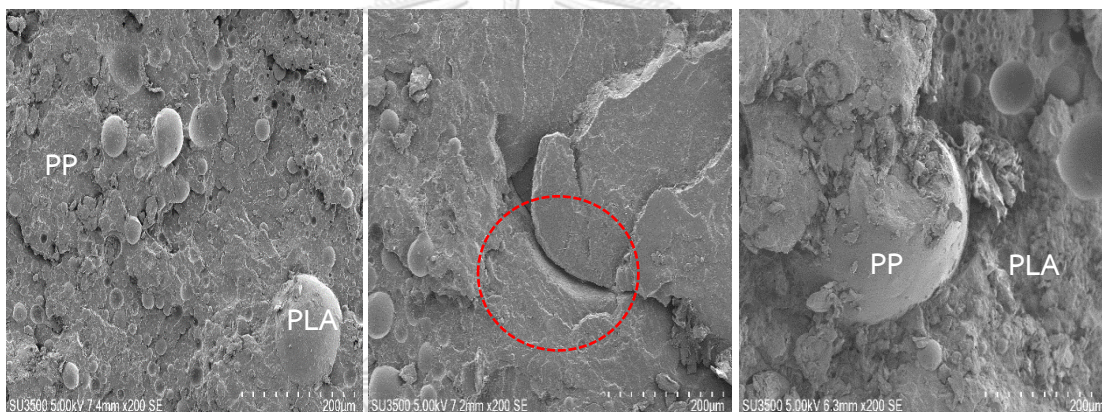
รูปที่ 4.65 เปรียบเทียบค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr



รูปที่ 4.66 เปรียบเทียบค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 phr

จากรูปที่ 4.65 - 4.66 พบว่าที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 phr ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม เมื่อใช้ DCP ที่ปริมาณ 0.07 phr จะให้ค่าพลังงานกระแทกมากกว่าการใช้ DCP ที่ 0.03 phr เพราะ DCP เหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง PLA, PP และ PP-g-MAH ซึ่งเป็นการเชื่อมแรงยึดติดระหว่างวัสดุให้เกิดได้มากขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์จึงสามารถรับแรงกระแทกได้ดีมากขึ้น เนื่องจากสามารถแพร่กระจายแรงและส่งผ่านแรงระหว่างวัสดุได้ดีขึ้นเพราะมีการเชื่อมกันระหว่างวัสดุด้วยสารเพิ่มความเข้ากันได้ และจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน PLA/PP 50/50 จะมีค่าความทนแรงกระแทกต่ำสุด

เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสัณฐานวิทยาจะส่งผลต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยการผสมของพอลิเมอร์ทั้งสองที่มีความเข้ากันได้หรือสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมติดกันระหว่างวัฏภาค จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่ดีและมีสัณฐานวิทยาที่ดี และส่งผลให้โมเลกุลในพอลิเมอร์ผสมสามารถส่งผ่านพลังงานได้เมื่อมีแรงมากระทำ แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมมีการจัดเรียงตัวทางสัณฐานวิทยาที่ไม่ดี ทำให้โมเลกุลในโครงสร้างพอลิเมอร์ผสมเกิดช่องว่างหรือเกิดรอยแยก ส่งผลให้พอลิเมอร์ไม่สามารถส่งผ่านพลังงานได้เมื่อมีแรงมากระทำ จึงทำให้เกิดการฉีกขาดหรือแตกหักได้ง่าย จึงต้องวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยการจัดเรียงตัวทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยในแต่ละอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมจะเลือกเฉพาะสภาวะที่มีค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุดและต่ำที่สุดของอัตราส่วนนั้นๆ ดังนี้ 1. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีปริมาณการใช้สารเพิ่มเข้ากันได้ระดับต่ำสุด โดยมี PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 และ DCP เท่ากับ 0.03 phr



(ก) PLA/PP 30/70

(ข) PLA/PP 50/50

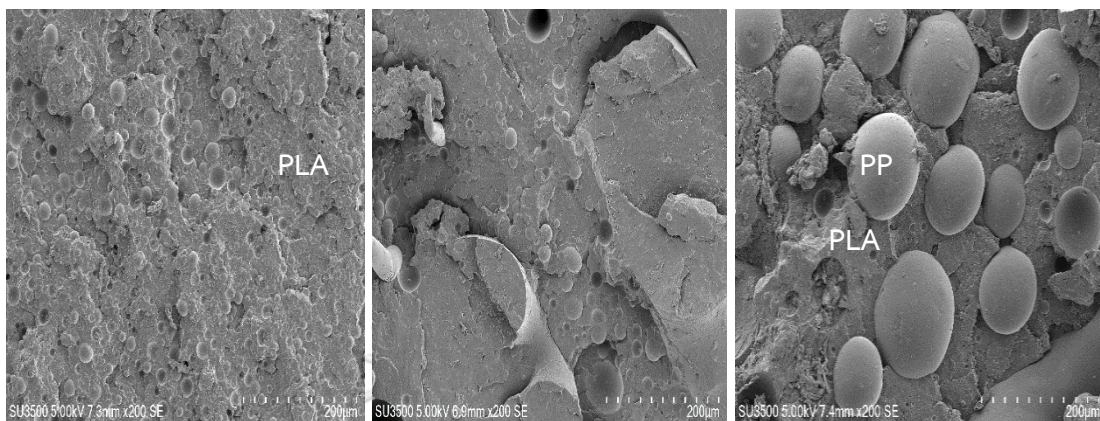
(ค) PLA/PP 70/30

รูปที่ 4.67 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ในอัตราส่วนต่างๆที่กำลังขยาย 200 เท่า

จากรูปที่ 4.67(ก) ที่อัตราส่วน PLA/PP เท่ากับ 30/70 สามารถอธิบายได้ว่าในอัตราส่วนนี้มี PP ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคหลักและมี PLA ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจาย โดยจะสังเกตเห็นการเชื่อมกันระหว่างวัฏภาคมามากขึ้นเมื่อเทียบกับตอนที่ยังไม่ได้ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ แต่ยังคงพบการรวมตัวกันเป็นก้อนของวัฏภาคกระจาย และที่อัตราส่วน PLA/PP เท่ากับ 50/50 ยังคงสังเกตเห็นการแยกกันของวัฏภาคอย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.67(ข) จึงส่งผลให้ที่อัตราส่วนนี้มีค่าความทนแรงกระแทกต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมอื่นๆ และในอัตราส่วน PLA/PP 70/30 จะสังเกตเห็นว่าบริเวณรอบๆอนุภาคของวัฏภาคกระจายจะไม่พบช่องว่างระหว่างวัฏภาคเมื่อเทียบกับตอนที่ยังไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า หลังจากการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้แล้วส่งผลให้วัฏภาคทั้งสองมีความสามารถในความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความเชื่อมติดกันได้ดี ไม่มีช่องว่างระหว่าง

กัน ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทำ จึงสามารถส่งผ่านแรงระหว่างวัฏภาคได้และสามารถรับแรงได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.67(ค) จึงส่งผลให้มีความทนแรงกระแทกดีขึ้น

2. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีปริมาณการใช้สารเพิ่มเข้ากันได้ระดับต่ำสุด โดยมี PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 และ DCP เท่ากับ 0.07 phr

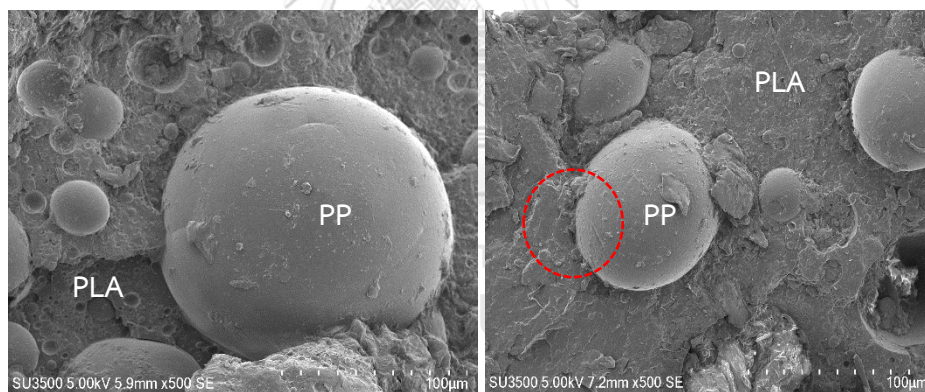


(ก) PLA/PP 30/70

(ข) PLA/PP 50/50

(ค) PLA/PP 70/30

รูปที่ 4.68 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ในอัตราส่วนต่างๆที่กำลังขยาย 200 เท่า



(ก) PP-g-MAH/DCP 0.3/0.03 phr

(ข) PP-g-MAH/DCP 0.7/0.07 phr

รูปที่ 4.69 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP 70/30 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.68(ก) PLA/PP เท่ากับ 30/70 สามารถอธิบายได้ว่าในอัตราส่วนนี้มี PP ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคหลักและมี PLA ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจาย โดยจะสังเกตเห็นการเชื่อมกันระหว่างวัฏภาคมากขึ้นเมื่อเทียบกับตอนที่ยังไม่ได้ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ และไม่พบการรวมตัวกันป็นก้อนของวัฏภาคกระจายจึงส่งผลให้ที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.7 และ DCP เท่ากับ 0.07 phr มีค่าความทนแรงกระแทกมากกว่าที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH เท่ากับ 0.3 และ DCP เท่ากับ 0.03 phr และที่อัตราส่วน PLA/PP เท่ากับ 50/50 ยังคงสังเกตเห็นการแยกกันของวัฏภาคอย่างชัดเจนดัง

รูปที่ 4.68(ข) จึงส่งผลให้ที่อัตราส่วนนี้มีค่าความทนแรงกระแทกต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมอื่นๆ นอกจากนี้จะสังเกตเห็นการเชื่อมกันของวัฏภาคมากขึ้นกว่าการใช้ปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณต่ำ (PP-g-MAH 0.3, DCP 0.03 phr) และในอัตราส่วน PLA/PP 70/30 ดังรูปที่ 4.68(ค) จะสังเกตได้ว่าบริเวณรอบๆอนุภาคของวัฏภาคกระจายจะไม่พบช่องว่างระหว่างวัฏภาคและอนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคของวัฏภาคกระจายมีขนาดเล็กกว่าที่การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณต่ำ (PP-g-MAH/DCP 0.3/0.03 phr) ซึ่งเปรียบเทียบกับที่กำลังขยายเท่ากับ 500 เท่าดังรูปที่ 4.69(ก) และ(ข) โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่า ดังนั้นจึงมีพื้นที่สัมผัสต่อระหว่างวัฏภาคมากกว่า ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานหรือส่งผ่านแรงได้มากกว่า จึงทำให้ที่ปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณสูง มีความทนแรงกระแทกมากกว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณต่ำนั่นเอง ดังนั้นจากการศึกษาการจัดเรียงสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จึงสามารถเรียงลำดับพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆที่มีปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ระดับสูงสุดและต่ำสุด โดยเรียงจากที่มีความทนแรงกระแทกน้อยที่สุดไปมากที่สุดได้ดังนี้

1. PLA/PP 50/50 ที่ปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ต่ำสุด (PP-g-MAH/DCP 0.3/0.03 phr)
 2. PLA/PP 30/70 ที่ปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ต่ำสุด (PP-g-MAH/DCP 0.3/0.03 phr)
 3. PLA/PP 30/70 ที่ปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้สูงสุด (PP-g-MAH/DCP 0.7/0.07 phr)
 4. PLA/PP 50/50 ที่ปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้สูงสุด (PP-g-MAH/DCP 0.7/0.07 phr)
 5. PLA/PP 70/30 ที่ปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ต่ำสุด (PP-g-MAH/DCP 0.3/0.03 phr)
 6. PLA/PP 70/30 ที่ปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้สูงสุด (PP-g-MAH/DCP 0.7/0.07 phr)
- และสามารถสรุปคำอธิบายได้ดังแผนภาพในรูปที่ 4.70

ซึ่งสมมติฐานของการทดลอง คือ 1. สมมติฐานสำหรับปัจจัยเดียวมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$1.1 H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่าความทนแรงกระแทกไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \mu_i \neq 0$$

(ปริมาณ PP ที่ระดับสูง กลางและ ต่ำ ให้ค่าความทนแรงกระแทกต่างกัน)

$$1.2 H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$$

(ปริมาณ PP- μ -MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงกระแทกไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \beta_j \neq 0$$

(ปริมาณ PP- μ -MAH ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงกระแทกต่างกัน)

$$1.3 H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงกระแทกไม่แตกต่างกัน)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \gamma_k \neq 0$$

(ปริมาณ DCP ที่ระดับสูงและต่ำ ให้ค่าความทนแรงกระแทกต่างกัน)

2. สมมติฐานสำหรับปัจจัยร่วมมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

$$2.1 H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } i, j$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP- μ -MAH ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงกระแทก)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ PP- μ -MAH มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงกระแทก)

$$2.2 H_0 : (\tau\gamma)_{ik} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } i, k$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงกระแทก)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\gamma)_{ik} \neq 0$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงกระแทก)

$$2.3 H_0 : (\beta\gamma)_{jk} = 0 \text{ สำหรับทุกค่า } j, k$$

(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP- μ -MAH และ ปริมาณ DCP ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงกระแทก)

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$$

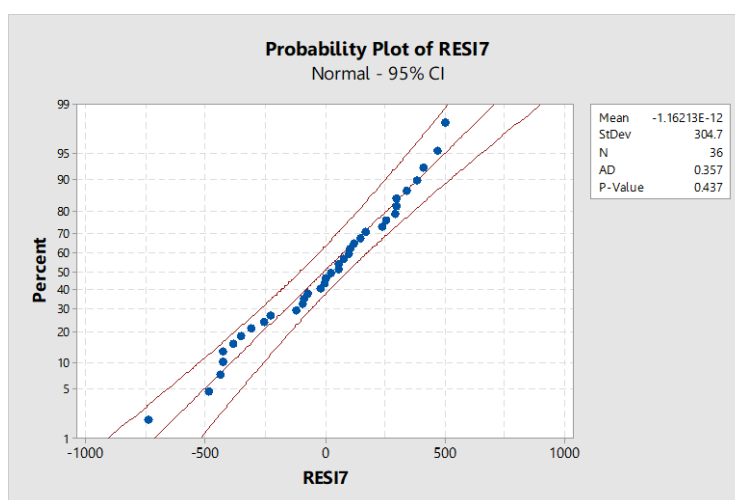
(ผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP- μ -MAH และ ปริมาณ DCP มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงกระแทก)

การตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ

เนื่องจากการที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab นั้น จะต้องตรวจสอบความสามารถของข้อมูลก่อนว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติได้หรือไม่ จึงต้องทำการตรวจสอบตามสมมติฐาน ดังนี้

1. การทดสอบการกระจายของข้อมูล (Normal)

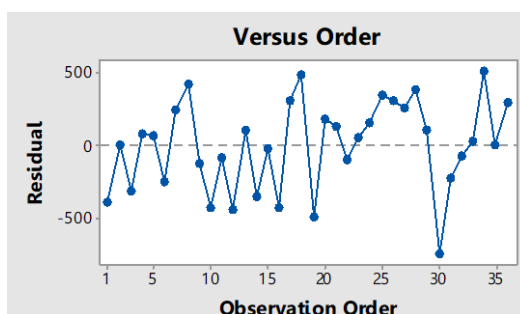
จาก รูปที่ 4.71 จะเห็นได้ว่ารูปแบบกราฟ Normal Probability plot of residuals (ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบค่าส่วนตกค้างของข้อมูล) ของค่าความทนแรงกระแทก มีแนวโน้มใกล้เคียงกันและมีค่าที่เข้าใกล้เส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.71 Normal Probability plot of residuals (IMS)

2. การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)

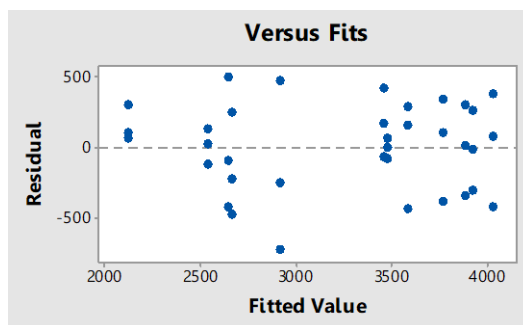
จาก รูปที่ 4.72 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus order ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและลำดับของการเก็บข้อมูล พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีรูปแบบแนวโน้มที่แน่นอน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.72 Versus Order Plot (IMS)

3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (Variance Stability)

จาก รูปที่ 4.73 แสดงให้เห็นถึงกราฟ versus fitt ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างของข้อมูลและค่าที่ถูกฟิต พบว่าแผนภูมิการกระจายไม่มีแนวโน้มที่จะมีลักษณะคล้ายกรวยปากเปิด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) ได้



รูปที่ 4.73 Versus Fits Plot (IMS)

หลังจากตรวจสอบสมมติฐานครบแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์ต่อทางสถิติ (ANOVA) โดยผลจากการใช้โปรแกรม Minitab ด้วยวิธี Backward Elimination ดังแสดงในรูปที่ 4.74 พบว่าผลของปัจจัยหลักที่กระทบต่อค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) คือ ปริมาณของ PP, ปริมาณของ DCP, ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของ PP และ PP-g-MAH และผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณของ PP และ DCP

Regression Analysis: Impact Strength versus PP, PP-g-MAH, DCP

Backward Elimination of Terms (α to remove = 0.05)
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	7	13685148	1955021	16.85	0.000
PP	1	3232919	3232919	27.86	0.000
PP-g-MAH	1	167678	167678	1.45	0.239
DCP	1	726609	726609	6.26	0.018
PP*PP	1	2654167	2654167	22.87	0.000
PP*PP-g-MAH	1	930824	930824	8.02	0.008
PP*DCP	1	929487	929487	8.01	0.009
PP*PP*DCP	1	944024	944024	8.14	0.008
Error	28	3248925	116033		
Lack-of-Fit	4	328695	82174	0.68	0.616
Pure Error	24	2920230	121676		
Total	35	16934073			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
340.636	80.81%	76.02%	68.64%

Coefficients

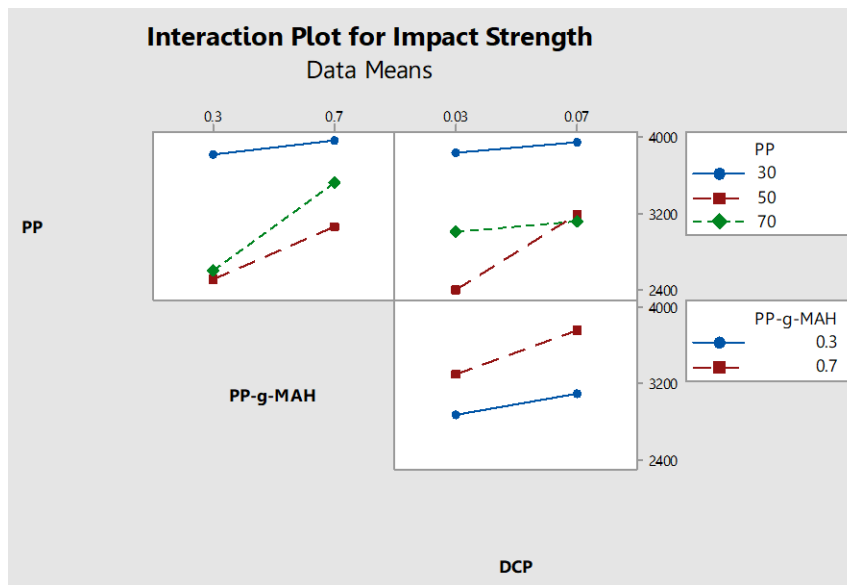
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	13081	1931	6.77	0.000	
PP	-433.2	82.1	-5.28	0.000	557.25
PP-g-MAH	-1099	914	-1.20	0.239	10.38
DCP	-87189	34842	-2.50	0.018	150.66
PP*PP	3.877	0.811	4.78	0.000	551.00
PP*PP-g-MAH	49.2	17.4	2.83	0.008	16.63
PP*DCP	4289	1515	2.83	0.009	1263.50
PP*PP*DCP	-42.9	15.1	-2.85	0.008	766.28

Regression Equation

$$\text{Impact Strength} = 13081 - 433.2\text{PP} - 1099\text{PP-g-MAH} - 87189\text{DCP} + 3.877\text{PP*PP} + 49.2\text{PP*PP-g-MAH} + 4289\text{PP*DCP} - 42.9\text{PP*PP*DCP}$$

รูปที่ 4.74 ผล ANOVA จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากนั้นทำการศึกษาค่าผลกระทบของปัจจัยหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อความทนแรงกระแทก ดังรูปที่ 4.75 – 4.76



รูปที่ 4.75 Interaction Plot for Impact strength

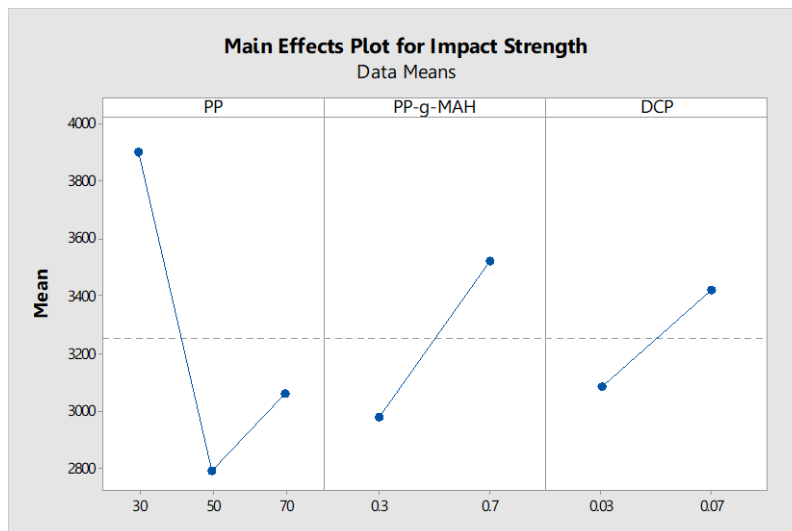
จากรูปที่ 4.75 แสดงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย ซึ่งสามารถอธิบาย ได้ดังนี้

(1) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP และ PP-g-MAH

จาก Interaction effect plot จะเห็นได้ว่าทุกอัตราส่วนผสม การเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากทั้งผลของ PP ที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีความทนแรงกระแทกที่มากกว่า PLA และ PP-g-MAH ที่ทำหน้าที่เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PP .ให้มีความสามารถในการเข้ากันได้เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ PP ปริมาณ 50% และ 70% จะเห็นการเพิ่มขึ้นของค่าความทนแรงกระแทกขึ้นและมากที่สุดที่ PP 70% ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงระหว่างสองปัจจัยนี้ยังมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมตามผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก ANOVA

(2) ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP และ DCP

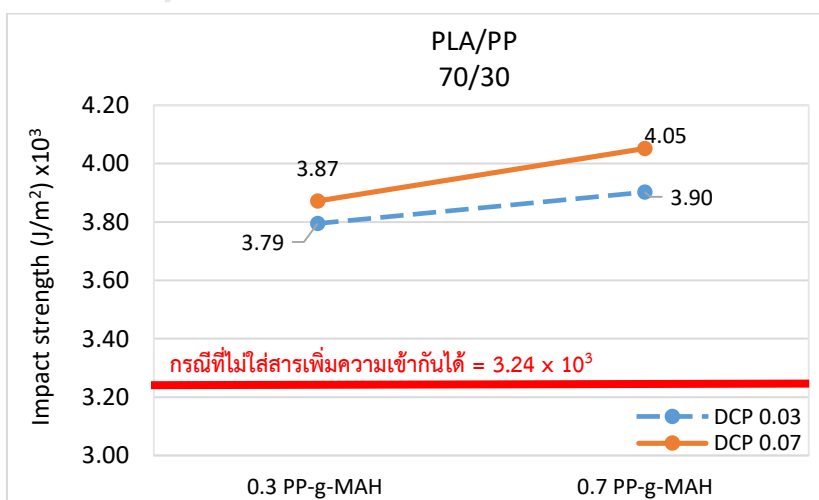
จาก Interaction effect plot พบว่าในทุกอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสม เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DCP จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เนื่องจาก DCP ทำหน้าที่เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา จึงเป็นการเพิ่มความสามารถให้ PLA และ PP เกิดปฏิกิริยาระหว่างกันมากขึ้น ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงระหว่างสองปัจจัยนี้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนแรงกระแทกตามการวิเคราะห์ด้วย ANOVA



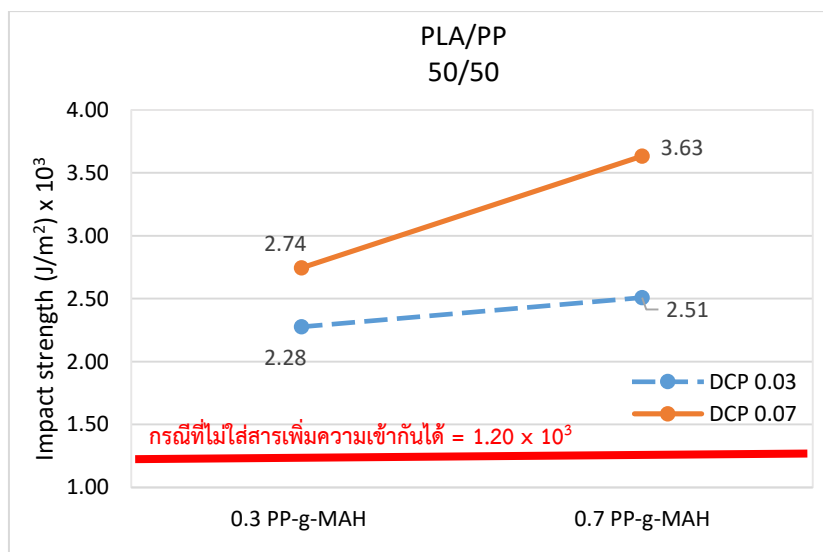
รูปที่ 4.76 Main Effects Plot for Impact strength

จากรูปที่ 4.76 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลัก พบว่าเมื่อที่ปริมาณ PP 50 จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกตกลงที่ต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการพิจารณาความสามารถในการรับแรงกระแทก แต่ต่อจากนั้นการเพิ่มปริมาณ PP จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น และในส่วนของ การเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ DCP ที่เมื่อปริมาณเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกัน

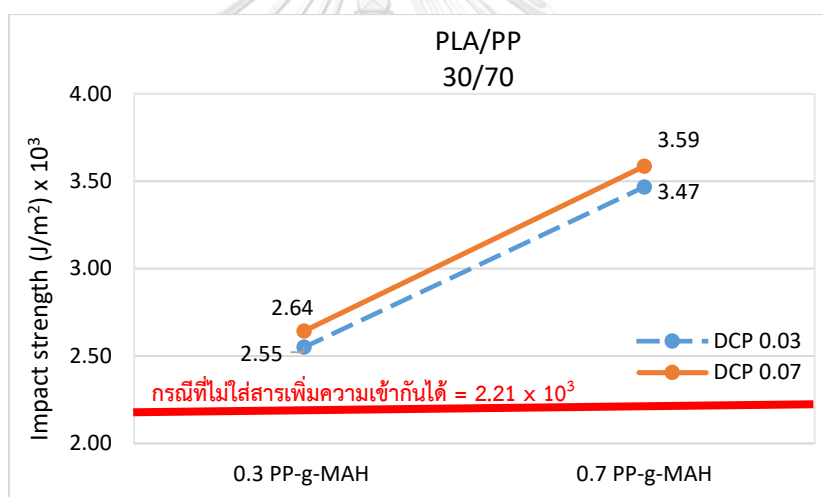
นอกจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงกระแทกแล้ว ยังมีอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทกอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.77 - 4.79 ซึ่งจะอธิบายตามอัตราส่วนต่างๆของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผสม



รูปที่ 4.77 ค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70/30



รูปที่ 4.78 ค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50/50



รูปที่ 4.79 ค่าพลังงานกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30/70

จากรูปที่ 4.77 - 4.79 สังเกตได้ว่า ไม่ว่าจะที่ปริมาณการใช้ PP-g-MAH จะเท่ากับ 0.3 หรือ 0.7 phr ถ้าหากใช้ DCP ที่ปริมาณ 0.07 phr แล้วค่าความทนแรงกระแทกที่ได้จะมากกว่าการใช้ DCP ที่ปริมาณ 0.03 phr และมีแนวโน้มเป็นเช่นนี้ในทุกอัตราส่วนผสม และจากกราฟข้างต้นพบว่าปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารก็จะแตกต่างกันออกไป โดยผลของ DCP และ PP-g-MAH มีผลให้ได้ค่าความทนแรงกระแทกแตกต่างกันตามอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ มีแนวโน้มสรุปได้ ดังนี้

1. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 70/30 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ระดับปริมาณมากที่สุด คือ 0.07 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าความทนแรงกระแทกสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4051.53 J/m²

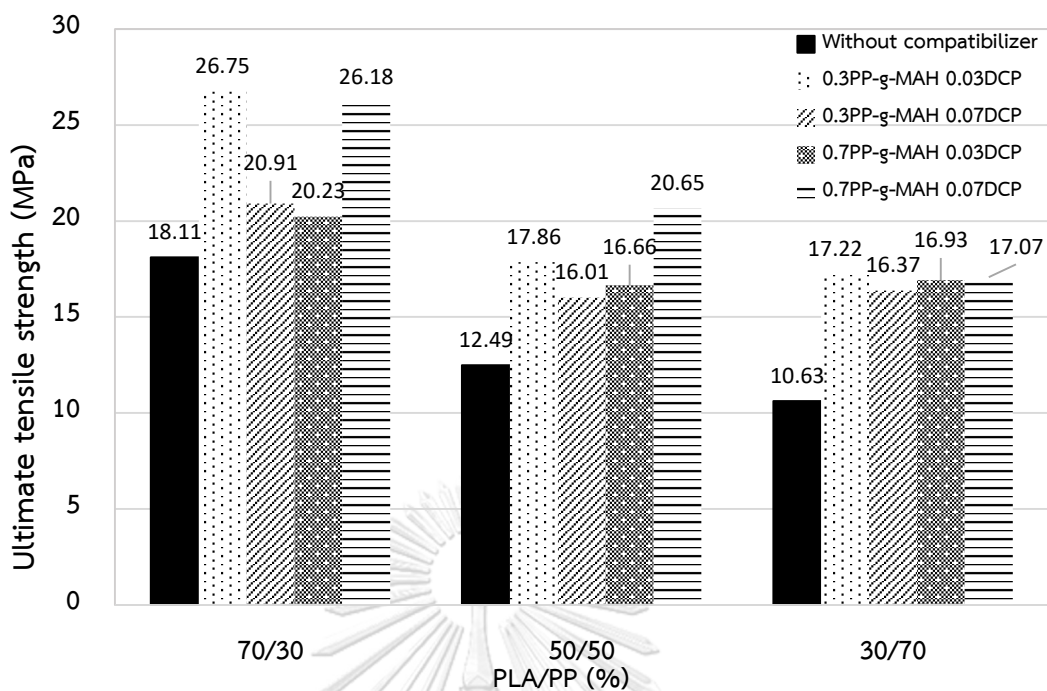
2. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 50/50 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ระดับปริมาณมากที่สุด คือ 0.07 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าความทนแรงกระแทกสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $3,633.86 \text{ J/m}^2$
3. ที่อัตราส่วนของ PLA/PP ที่ 30/70 ควรใช้ DCP และ PP-g-MAH ที่ระดับปริมาณมากที่สุด คือ 0.07 phr และ 0.7 phr ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าความทนแรงกระแทกสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $3,586.51 \text{ J/m}^2$

จึงสามารถสรุปได้ว่าการจัดเรียงตัวของสัณฐานวิทยาจะส่งผลต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยการผสมของพอลิเมอร์ทั้งสองที่มีความเข้ากันได้ หรือสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมติดกันระหว่างวัฏภาค จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่ดีและมีสัณฐานวิทยาที่ดี และส่งผลให้โมเลกุลในพอลิเมอร์ผสมสามารถส่งผ่านพลังงานได้เมื่อมีแรงมากระทำ จึงมีค่าความทนแรงกระแทกสูง แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมมีการจัดเรียงตัวทางสัณฐานวิทยาที่ไม่ดี ทำให้โมเลกุลในโครงสร้างพอลิเมอร์ผสมเกิดช่องว่างหรือเกิดรอยแยก ส่งผลให้พอลิเมอร์ไม่สามารถส่งผ่านพลังงานได้เมื่อมีแรงมากระทำ จึงทำให้เกิดการฉีกขาดหรือแตกหักได้ง่าย ค่าความทนแรงกระแทกที่ได้จึงต่ำ

4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

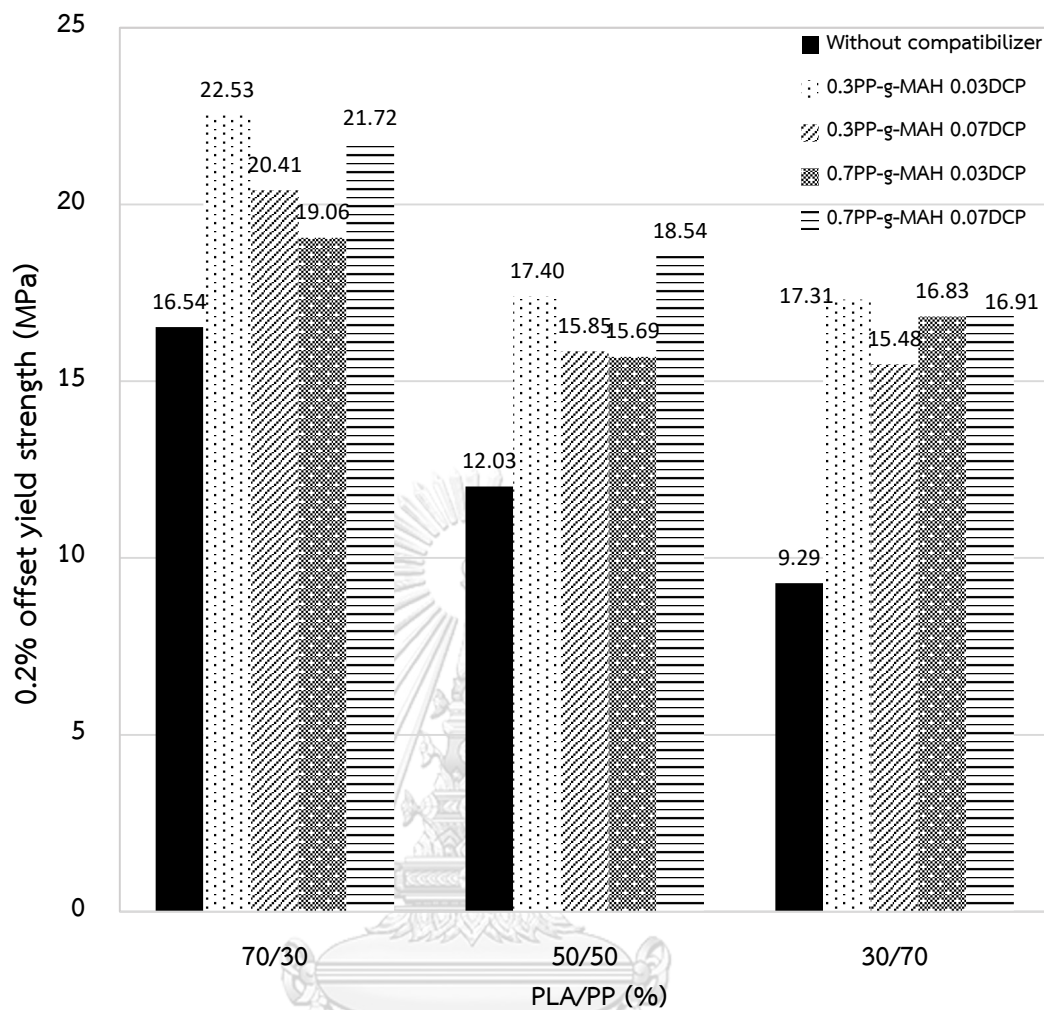
4.3.1 ผลการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลต่างๆของพอลิเมอร์ผสม

จากการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ โดยจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ (PP-g-MAH) และสารริเริ่มปฏิกิริยา (DCP) มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารที่เติมลงไปนั้นสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PP ส่งผลให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคกัน ดังนั้นสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมจึงดีขึ้นเมื่อเทียบกับในกรณีที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา โดยจะเห็นได้ว่าค่าความทนแรงดึงสูงสุด, ค่าความทนแรงดึง, ค่ามอดูลัสของยัง, ค่าความแข็ง และค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากการปรับปรุงด้วยการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.80 - 4.85 โดยจะมีเพียงแค่ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเท่านั้นที่มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงมากขึ้น จึงอาจส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์ผสมลดลงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.83 บคความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้



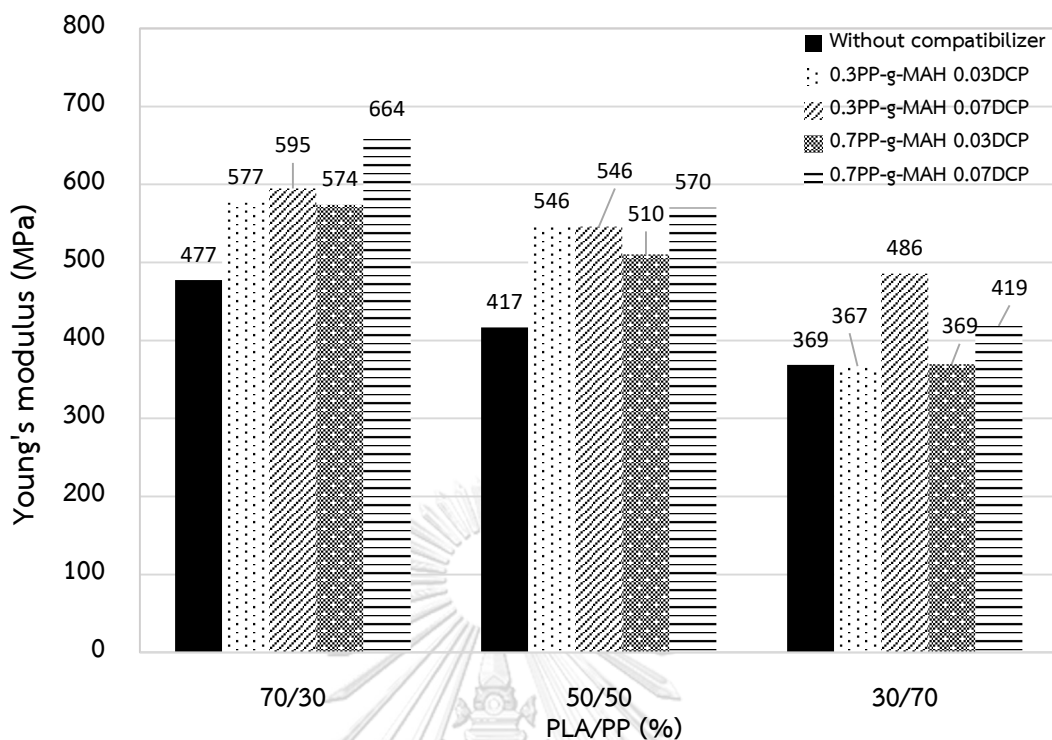
รูปที่ 4.80 เปรียบเทียบความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 4.80 พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของค่าความทนแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นจากเดิม 18.11, 12.49 และ 10.63 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 23.52 ± 0.33 , 17.79 ± 0.73 และ 16.90 ± 0.36 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 29.85, 42.47 และ 59.03 ตามลำดับ



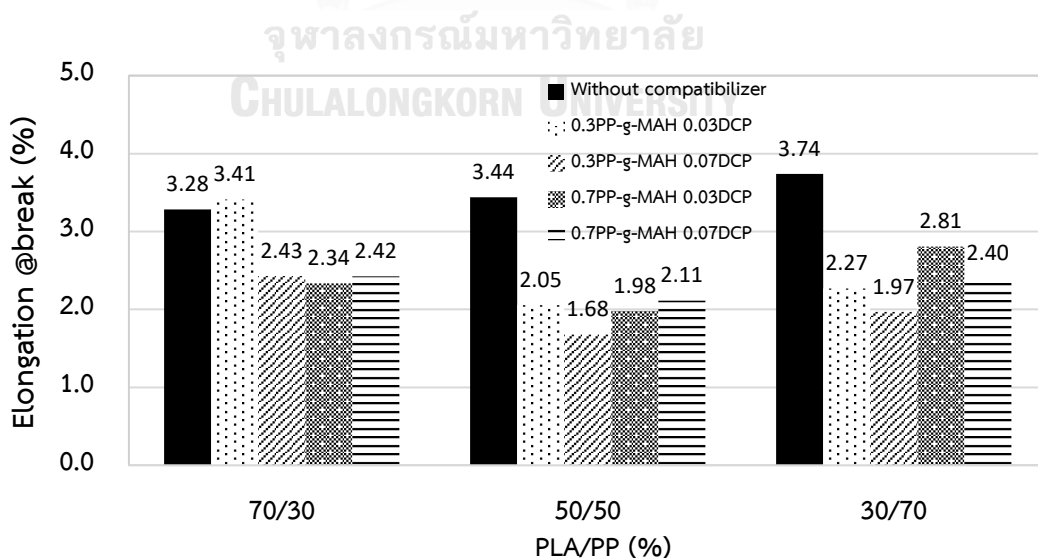
รูปที่ 4.81 เปรียบเทียบความทนแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 4.81 พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากเพิ่มขึ้น จากเดิม 16.54, 12.03 และ 9.29 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 20.93 ± 0.83 , 16.87 ± 0.31 และ 16.63 ± 0.39 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 26.56, 40.27 และ 79.10 ตามลำดับ



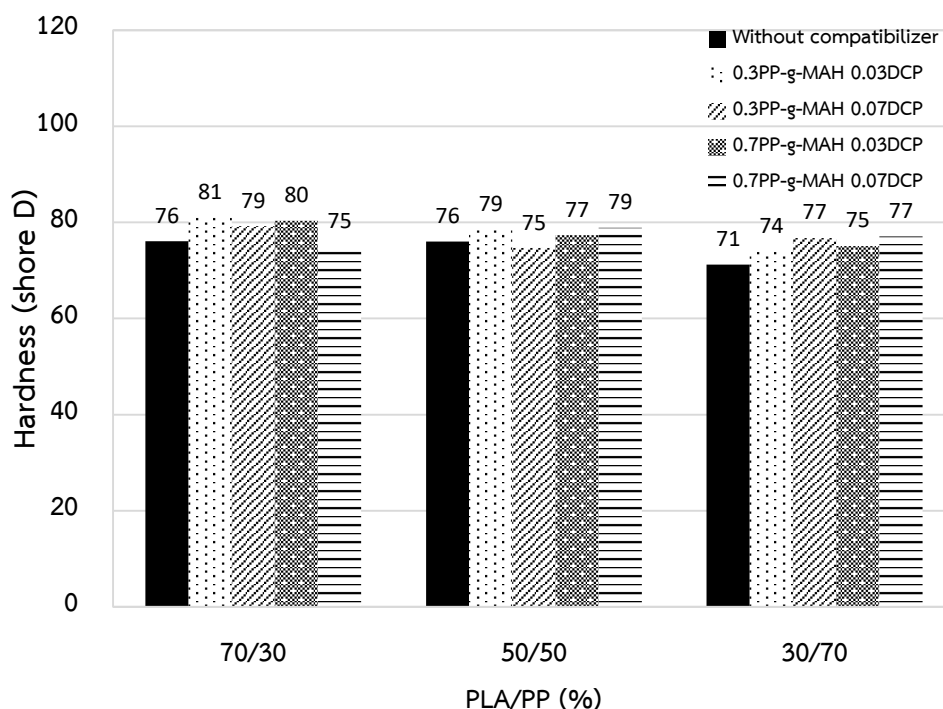
รูปที่ 4.82 เปรียบเทียบมอดูลัสของยังในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 4.82 พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นจากเดิม 447, 417 และ 369 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 602.36 ± 7.01 , 543.09 ± 8.32 และ 410.17 ± 6.27 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 26.20, 30.31 และ 11.31 ตามลำดับ



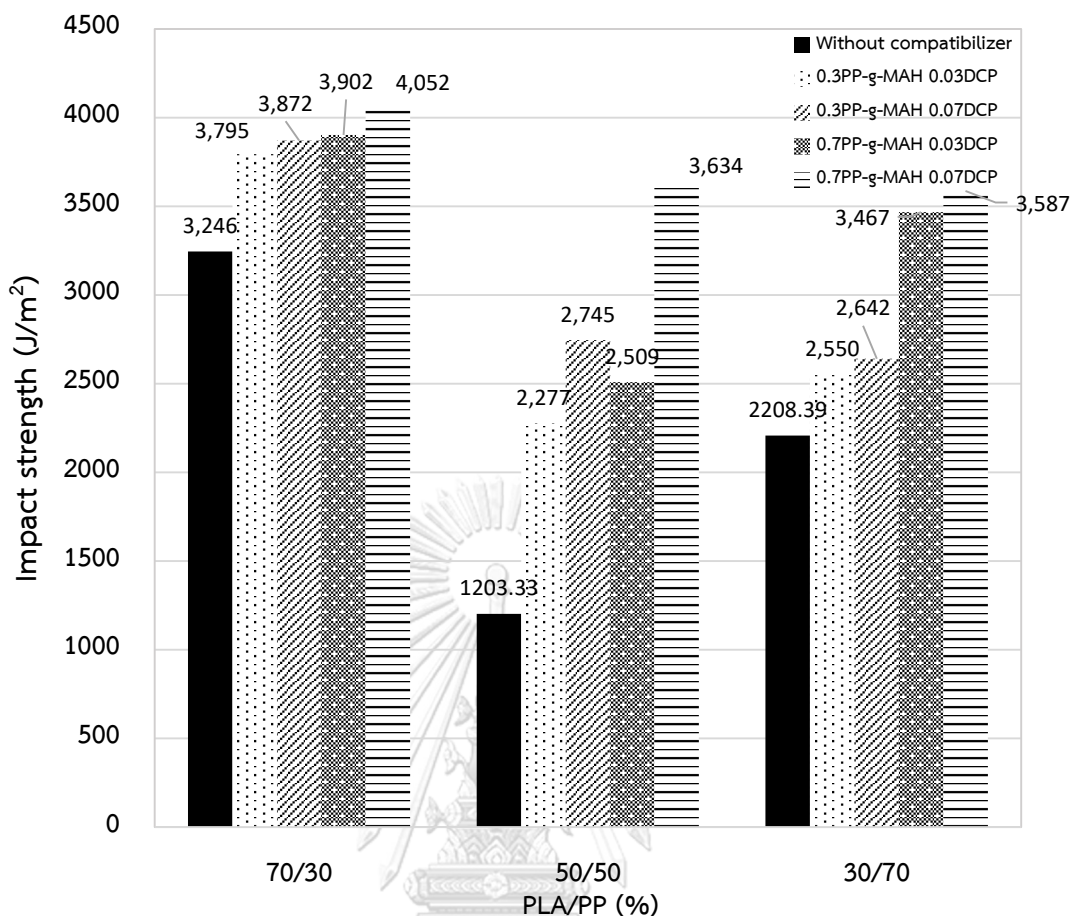
รูปที่ 4.83 เปรียบเทียบร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 4.83 พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดลดลงจากเดิม 3.28, 3.44 และ 3.74 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 2.65 ± 0.14 , 1.96 ± 0.07 และ 2.36 ± 0.08 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 19.29, 43.12 และ 36.86 ตามลำดับ



รูปที่ 4.84 เปรียบเทียบความแข็งของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและมีส่วนเติมความเข้ากันได้

จากรูปที่ 4.84 พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิม 76, 76 และ 71 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 78.89 ± 0.14 , 77.36 ± 0.19 และ 75.72 ± 0.43 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 3.65, 1.79 และ 6.32 ตามลำดับ



รูปที่ 4.85 เปรียบเทียบความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและมีส่วนผสมเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 4.85 พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจากเดิม 3,246 1,203 และ 2,208 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น $3,905 \pm 54$, $2,791 \pm 206$ และ $3,061 \pm 195$ ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 20.32, 131.95 และ 38.62 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังสามารถสรุปผลจากการทดลองได้ว่าในการทำพอลิเมอร์ผสมทั้งที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แตกต่างกัน โดยสามารถเรียงอันดับจากอัตราส่วนผสมที่ให้สมบัติเชิงกลที่มีค่าสูงที่สุดไปยังต่ำที่สุด ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 อันดับของสมบัติเชิงกลที่มีค่าสูงที่สุดไปยังต่ำสุดของอัตราส่วนผสมต่างๆกัน

อัตราส่วนผสม (PLA/PP/PP-g-MAH/DCP)	เรียงตามอันดับ จากสูงที่สุด (1) ไปต่ำที่สุด (15)					
	UTS	YS	YM	%EG	HN	IMS
70/30/0/0	6	10	10	4	9	8
70/30/0.3/0.03	1	1	3	3	1	4
70/30/0.3/0.07	3	3	2	6	3	3
70/30/0.7/0.03	5	4	4	9	2	2
70/30/0.7/0.07	2	2	1	7	12	1
50/50/0/0	14	14	12	2	10	15
50/50/0.3/0.03	7	6	7	12	5	13
50/50/0.3/0.07	13	11	6	15	13	9
50/50/0.7/0.03	11	12	8	13	6	12
50/50/0.7/0.07	4	5	5	11	4	5
30/70/0/0	15	15	14	1	15	14
30/70/0.3/0.03	8	7	15	10	14	11
30/70/0.3/0.07	12	13	9	14	8	10
30/70/0.7/0.03	10	9	13	5	11	7
30/70/0.7/0.07	9	8	11	8	7	6

และเปรียบเทียบค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมก่อนและหลังใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยาตามปริมาณที่ใช้ต่างๆกันในอัตราส่วน PLA/PP ดังตารางที่ 4.14 - 4.17

ตารางที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบของสมบัติเชิงกลใน PLA/PP ที่ไม่มีและที่มี 0.3PP-g-MAH/0.03DCP

อัตราส่วน PLA/PP	สมบัติเชิงกล	ปริมาณ PP-g-MAH/DCP		คิดเป็นร้อยละ [(2) - (1)/(1)]*100
		0/0	0.3/0.03	
70/30	UTS	18.11	26.75	47.73
	YS	16.54	22.53	36.22
	YM	477.28	576.63	20.81
	%EG	3.28	3.41	3.84
	HN	76.11	81.00	6.42
	IMS	3245.55	3794.71	16.92
50/50	UTS	12.49	17.86	42.98
	YS	12.03	17.40	44.66
	YM	416.76	545.80	30.96
	%EG	3.44	2.05	-40.31
	HN	76.00	78.56	3.36
	IMS	1203.33	2276.56	89.19
30/70	UTS	10.63	17.22	62.05
	YS	9.29	17.31	86.43
	YM	368.50	366.85	-0.45
	%EG	3.74	2.27	-39.30
	HN	71.22	73.89	3.74
	IMS	2208.39	2549.73	15.46

ตารางที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบของสมบัติเชิงกลใน PLA/PP ที่ไม่มีและที่มี 0.3PP-g-MAH/0.07DCP

อัตราส่วน PLA/PP	สมบัติเชิงกล	ปริมาณ PP-g-MAH/DCP		คิดเป็นร้อยละ [(2) - (1)/(1)]*100
		0/0	0.3/0.07	
70/30	UTS	18.11	20.91	15.44
	YS	16.54	20.41	23.42
	YM	477.28	594.77	24.61
	%EG	3.28	2.43	-26.01
	HN	76.11	79.22	4.09
	IMS	3245.55	3872.27	19.31
50/50	UTS	12.49	16.01	28.16
	YS	12.03	15.85	31.79
	YM	416.76	546.04	31.02
	%EG	3.44	1.68	-51.22
	HN	76.00	74.67	-1.75
	IMS	1203.33	2744.97	128.11
30/70	UTS	10.63	16.37	54.07
	YS	9.29	15.48	66.68
	YM	368.50	485.79	31.83
	%EG	3.74	1.97	-47.38
	HN	71.22	76.78	7.80
	IMS	2208.39	2641.79	19.63

ตารางที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบของสมบัติเชิงกลใน PLA/PP ที่ไม่มีและที่มี 0.7PP-g-MAH/0.03DCP

อัตราส่วน PLA/PP	สมบัติเชิงกล	ปริมาณ PP-g-MAH/DCP		คิดเป็นร้อยละ [(2) - (1)/(1)]*100
		0/0	0.7/0.03	
70/30	UTS	18.11	20.23	11.69
	YS	16.54	19.06	15.27
	YM	477.28	573.65	20.19
	%EG	3.28	2.34	-28.85
	HN	76.11	80.33	5.55
	IMS	3245.55	3902.11	20.23
50/50	UTS	12.49	16.66	33.41
	YS	12.03	15.69	30.47
	YM	416.76	510.32	22.45
	%EG	3.44	1.98	-42.40
	HN	76.00	77.33	1.75
	IMS	1203.33	2509.03	108.51
30/70	UTS	10.63	16.93	59.31
	YS	9.29	16.83	81.27
	YM	368.50	369.30	0.22
	%EG	3.74	2.81	-24.97
	HN	71.22	75.11	5.46
	IMS	2208.39	3467.19	57.00

ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบของสมบัติเชิงกลใน PLA/PP ที่ไม่มีและที่มี 0.7PP-g-MAH/0.07DCP

อัตราส่วน PLA/PP	สมบัติเชิงกล	ปริมาณ PP-g-MAH/DCP		คิดเป็นร้อยละ [(2) - (1)/(1)]*100
		0/0	0.7/0.07	
70/30	UTS	18.11	26.18	44.56
	YS	16.54	21.72	31.32
	YM	477.28	664.38	39.20
	%EG	3.28	2.42	-26.15
	HN	76.11	75.00	-1.46
	IMS	3245.55	4051.53	24.83
50/50	UTS	12.49	20.65	65.34
	YS	12.03	18.54	54.16
	YM	416.76	570.18	36.81
	%EG	3.44	2.11	-38.55
	HN	76.00	78.89	3.80
	IMS	1203.33	3633.86	201.98
30/70	UTS	10.63	17.07	60.67
	YS	9.29	16.91	82.04
	YM	368.50	418.75	13.64
	%EG	3.74	2.40	-35.79
	HN	71.22	77.11	8.27
	IMS	2208.39	3586.51	62.40

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 4.14 – 4.17 จะเห็นได้ว่าแต่ละอัตราส่วนผสม PLA/PP ที่มีการเพิ่ม PP-g-MAH และ DCP ลงไป จะมีส่งผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นทุกสมบัติ ยกเว้นร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่มีแนวโน้มลดลง และในแต่ละอัตราส่วนจะมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดแตกต่างกันดังตารางที่ 4.18 โดยเปรียบเทียบจากค่าของสมบัติที่ไม่มี PP-g-MAH/DCP และที่มี PP-g-MAH/DCP ที่ให้ค่าของสมบัติเชิงกลสูงสุด

ตารางที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบของสมบัติเชิงกลในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีและที่มี PP-g-MAH/DCP

อัตราส่วน PLA/PP	สมบัติเชิงกล	ที่ไม่มี PP-g-MAH/DCP (1)	ที่มี PP-g-MAH/DCP (2)	คิดเป็นร้อยละ [(2) - (1)/(1)]*100
70/30	UTS	18.11	26.75	47.73
	YS	16.54	22.53	36.22
	YM	477.28	664.38	39.20
	%EG	3.28	3.41	3.84
	HN	76.11	81.00	6.42
	IMS	3245.55	4051.53	24.83
50/50	UTS	12.49	20.65	65.34
	YS	12.03	18.54	54.16
	YM	416.76	570.18	36.81
	%EG	3.44	2.11	-38.55
	HN	76.00	78.89	3.80
	IMS	1203.33	3633.86	201.98
30/70	UTS	10.63	17.22	62.05
	YS	9.29	17.31	86.43
	YM	368.50	485.79	31.83
	%EG	3.74	2.81	-24.97
	HN	71.22	77.11	8.27
	IMS	2208.39	3586.51	62.40

จากตารางที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าในอัตราส่วน PLA/PP เท่ากับ 70/30 สมบัติที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดเมื่อใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยาคือความทนแรงดึงสูงสุดโดยคิดเป็นร้อยละ 47.73 และในอัตราส่วน PLA/PP เท่ากับ 50/50 พบว่าการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยาช่วยปรับปรุงสมบัติในด้านความทนแรงกระแทกมากที่สุด และในอัตราส่วน PLA/PP 30/70 พบว่าความทนแรงดึง ณ จุดครากเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 86.43%

4.3.2 ผลการเปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ของค่าสมบัติเชิงกลที่ได้ของพอลิเมอร์ผสม

จากการทดลองตามการออกแบบการทดลอง (Multilevel full factorial design) จะได้สมการถดถอย (Regression model) ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 สมการความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกลต่างๆที่ได้ของพอลิเมอร์ผสม

สมบัติเชิงกล	สมการความสัมพันธ์	R-Sq	R-Sq (adj)
UTS (Y ₁)	$Y_1 = 85.27 - 1.809A - 90.1B - 597.1C + 0.01208A^2 + 2.106A*B + 8.19A*C + 1232B*C - 0.01209A^2*B - 16.88A*B*C$	94.54%	92.65%
YS (Y ₂)	$Y_2 = 39.98 - 0.5851A - 11.63B - 115.0C + 0.004777 A^2 + 230.7 B*C$	84.74%	82.19%
YM (Y ₃)	$Y_3 = -85 + 36.85A + 680B + 9882C - 0.4608A^2 - 42.2A*B - 569A*C - 7852B*C + 0.492A^2*B + 6.99A^2*C + 685A*B*C - 9.07A^2*B*C$	98.92%	98.42%
%EG (Y ₄)	$Y_4 = 12.82 - 0.3120A - 9.20B - 110.5C + 0.002242A^2 + 0.1555A*B + 2.711A*C + 122.2B*C - 0.01739A^2*C - 1.830A*B*C$	89.80%	86.27%
HN (Y ₅)	$Y_5 = 36.8 + 2.207A + 100.4B + 1310C - 0.02470A^2 - 4.54A*B - 62.0A*C - 2863B*C + 0.0453A^2*B + 0.637A^2*C + 124.0A*B*C - 1.198A^2*B*C$	79.44%	70.02%
IMS (Y ₆)	$Y_6 = 13081 - 433.2A - 1099B - 87189C + 3.877A^2 + 49.2A*B + 4289A*C - 42.9A^2*DCP$	80.81%	76.02%

หมายเหตุ A=ปริมาณPP, B=ปริมาณPP-g-MAH และ C=ปริมาณDCP

จากตารางที่ 4.19 ปัจจัย PP, PP-g-MAH และ DCP มีความสัมพันธ์ต่อผลสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่ UTS, YS, YM, %EG, HN และ IMS อย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติด้วยค่า R² (adj) เท่ากับ 92.65%, 82.19%, 98.42%, 86.27%, 70.02%, และ 76.02% ตามลำดับ ดังนั้นสมการจึงมีความแม่นยำและสามารถนำความสัมพันธ์ที่อธิบายได้โดยสมการนี้ไปใช้ทำนายสมบัติเชิงกลต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยทั้งหมด 6 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติสามารถสรุปผลกระทบจากปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลต่างๆของพอลิเมอร์ผสมได้ดังตารางที่ 4.20 ทั้งนี้สมการที่ได้จากการทดลองเป็นสมการที่ยังไม่มีการพิสูจน์ความแม่นยำ สมการที่ได้ข้างต้นนี้จะสามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน PLA/PP อยู่ที่ 70/30 50/50 และ 30/70 ดังนั้นหากจะนำไปใช้ต่อควรจะทำการศึกษาตรวจสอบความแม่นยำของสมการก่อน โดยการทดลองเพิ่มเติมนอกอัตราส่วนที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.20 ค่า p-value ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลต่างๆของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ

ปัจจัย		p-value					
		UTS	YS	YM	%EG	HN	IMS
ปัจจัยหลัก (Main effect)	PP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000
	PP-g-MAH	0.000	0.000	0.039	0.000	0.015	0.239
	DCP	0.000	0.000	0.004	0.000	0.002	0.018
ปัจจัยร่วม (Interaction effect)	PP*PP-g-MAH	0.000	-	0.005	0.000	0.012	0.008
	PP*DCP	0.000	-	0.000	0.002	0.001	0.009
	PP-g-MAH*DCP	0.000	0.000	0.188	0.000	0.000	-

หมายเหตุ เครื่องหมาย ‘-’ หมายถึง ไม่ปรากฏค่า

จากตารางที่ 4.20 แสดงค่า p-value ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งค่า p-value สามารถบอกได้ว่าปัจจัยใดมีผลกระทบเล็กน้อยเพียงใดต่อสมบัติเชิงกลที่สนใจ โดยปัจจัยใดที่มีค่า p-value ยิ่งน้อยจะยิ่งมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลมาก เช่น ในกรณีค่ามอดูลัสของยัง (YM) พบว่า ปริมาณ DCP มีผลกระทบต่อค่ามอดูลัสมากกว่าปริมาณ PP-g-MAH และปริมาณ PP มีผลกระทบต่อค่ามอดูลัสมากที่สุดในปัจจัยหลัก ในส่วนของปัจจัยร่วมนั้นพบว่าผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ DCP มีผลกระทบต่อค่ามอดูลัสมากกว่าผลของปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณ PP และ PP-g-MAH ในขณะที่ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง PP-g-MAH และ DCP ไม่มีผลกระทบต่อค่ามอดูลัสอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} > 0.05$)

4.4 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพ

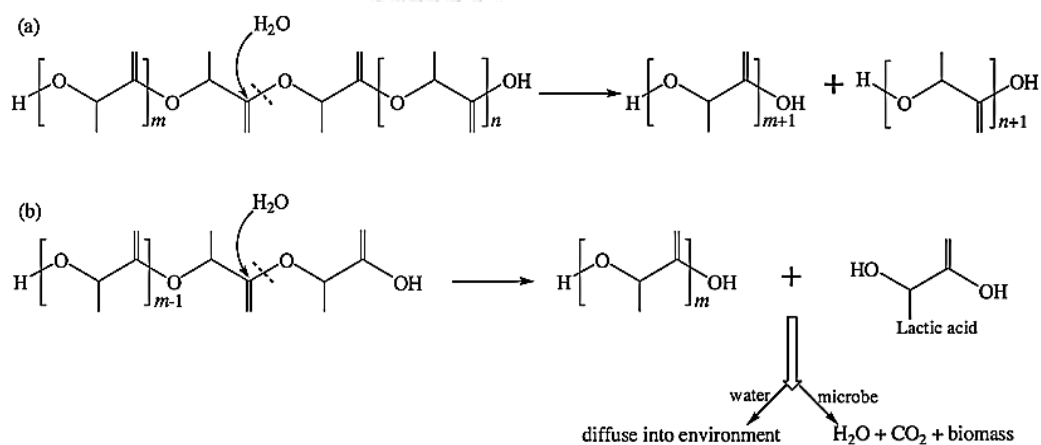
เนื่องจาก PLA มีความสามารถในการย่อยสลายได้ ดังนั้นในอนาคตอุตสาหกรรมต่างๆจึงหันมาสนใจ PLA และเพื่อที่จะใช้แทนพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ แต่เนื่องด้วยสมบัติเชิงกลบางอย่างของ PLA ยังไม่เหมาะแก่การนำไปใช้งาน เช่น ไม่ทนแรงกระแทกและเปราะ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยมากมายที่สนใจจะปรับปรุงสมบัติของ PLA ทั้งนี้การทำพอลิเมอร์ผสมถือเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดในการพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่ จึงเกิดเป็นที่มาที่จะนำ PLA มาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ โดยหวังว่านอกจากจะปรับปรุงสมบัติของ PLA แล้วจะยังช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมได้อีกด้วย โดยปกติ PLA จะใช้เวลาในการย่อยสลายอย่างน้อยที่สุดประมาณ 3 เดือนไปจนถึง 3 ปี โดยจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการฝัง, อุณหภูมิ, ความเป็นกรดเบสของดิน, ชนิดของจุลินทรีย์ และรวมไปถึงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ด้วย เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีจะมีผลต่อความยากง่ายในการเข้าถึงของจุลินทรีย์ใน

กระบวนการย่อยสลาย เช่น ถ้าโครงสร้างมีความเป็นผลึกมาก จุลินทรีย์ก็จะเข้ามาย่อยสลายได้ยาก ส่วนพอลิเมอร์ทั่วไปที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียมนั้นจะใช้เวลาย่อยสลายประมาณ 400 ถึง 500 ปี

โดยกระบวนการย่อยสลายของ PLA นั้นจะมีอยู่ 2 ขั้นตอนโดยเริ่มจาก

1. Abiotic process คือการที่น้ำเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ของ PLA ในส่วนโครงสร้างที่เป็นการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ โดยจะเข้าทำปฏิกิริยาแบบส้อมที่พันธะเอสเทอร์ (Hydrolytic scission) จึงทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์จากโมเลกุลใหญ่กลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลง

2. Biotic assimilation คือการที่จุลินทรีย์เข้ามาทำปฏิกิริยาย่อยโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กลงจากการที่น้ำเข้ามาทำปฏิกิริยา ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำกลับคืนสู่ธรรมชาติ ดังรูปที่ 4.86



รูปที่ 4.86 กลไกการย่อยสลายของ PLA ในดิน

ในงานวิจัยนี้ศึกษาพอลิเมอร์ผสมของ PLA (พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้) และ PP (พอลิเมอร์ทางการค้าทั่วไป) ในอัตราส่วนที่ต่างกัน เพื่อศึกษาแนวโน้มความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ โดยชิ้นงานก่อนและหลังจากการนำไปฝังดินมีความแตกต่างกันเล็กน้อยที่พื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.87-4.88



รูปที่ 4.87 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ทั้งที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ก่อนนำไปฝังดิน



รูปที่ 4.88 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ทั้งที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้เตรียมนำฝังดิน

จากการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการนำชิ้นงานทั้งที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ไปฝังในดินเป็นเวลา 3 เดือน (16 กุมภาพันธ์ ถึง 15 พฤษภาคม 2561) เพื่อดูแนวโน้มความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ โดยการอธิบายผลจะเป็นกรณีที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้และกรณีที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ ดังนี้

4.4.1 กรณีที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

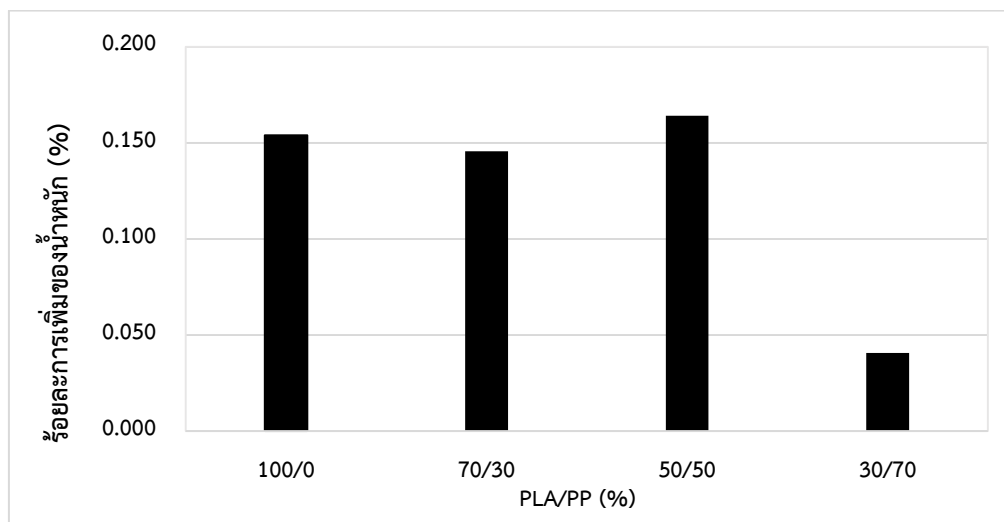
จากการนำชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ไปฝังในดิน และทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังฝังดิน พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานนั้นเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.21 ซึ่งเป็นผลมาจากพอลิเมอร์ที่นำไปฝังนั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแรกที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ อีกทั้งยังสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของชิ้นงานซึ่งเป็นผลมาจากชิ้นงานเริ่มเกิดการย่อยสลายขึ้นต้นและรอเวลาที่จะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายที่สมบูรณ์ต่อไป

ตารางที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

อัตราส่วน (PLA/PP)	น้ำหนักชิ้นงาน ก่อนนำไปฝังดิน (กรัม)	น้ำหนักชิ้นงาน หลังจากฝังดิน (กรัม)	ร้อยละการเพิ่มของน้ำหนัก (%)	ลักษณะชิ้นงานที่สังเกตเห็น
100/0	1.2996	1.3016	0.154	ลักษณะใส
70/30	1.1676	1.1693	0.146	เกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิว
50/50	0.9746	0.9762	0.164	พบว่าชิ้นงานมีรูพรุน
30/70	0.9826	0.9830	0.041	ไม่ค่อยเห็นการเปลี่ยนแปลง

จากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.21 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตามปริมาณของ PLA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PLA มีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้เองจึงสามารถเหนี่ยวนำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความสามารถในการย่อยสลายได้เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน PLA 50/50 มีการ

เปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากที่สุดเพราะมีความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดจึงทำให้มีรอยต่อระหว่างภูมิภาค ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้ง่ายขึ้น และอัตราส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้อยที่สุดคือ PLA/PP 30/70 ดังแนวโน้มที่แสดงในรูปที่ 4.89



รูปที่ 4.89 แนวโน้มร้อยละการเพิ่มน้ำหนักของชิ้นงานที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้หลังนำไปฝังดิน

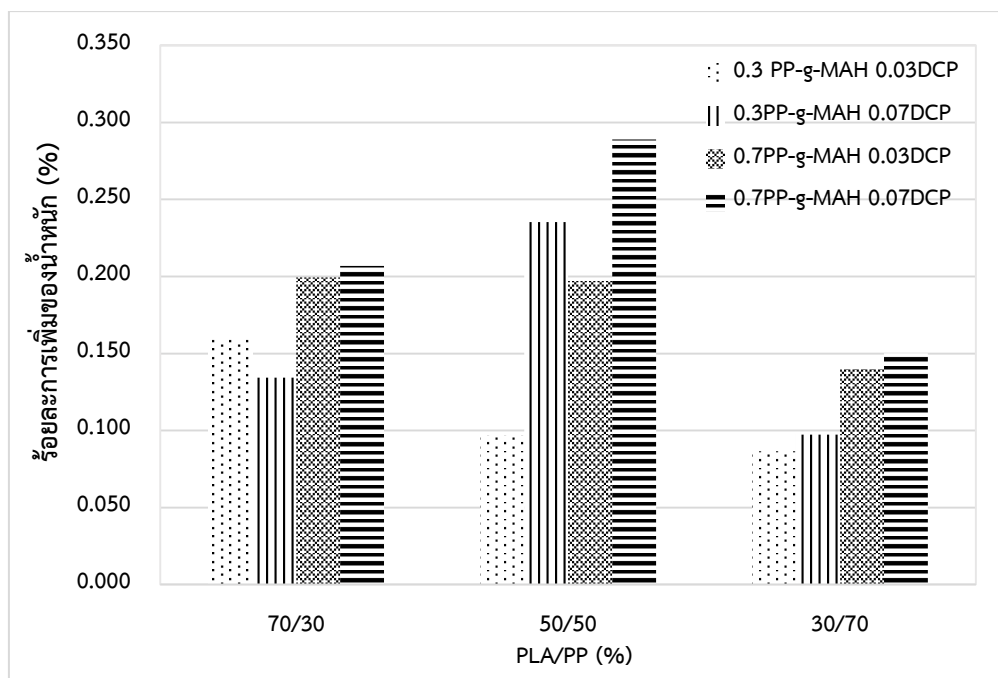
4.4.2 กรณีที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากการนำชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ไปฝังในดิน และทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังฝังดิน พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานนั้นเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.22 ซึ่งเป็นผลมาจากพอลิเมอร์ที่นำไปฝังนั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแรกที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ อีกทั้งยังสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของชิ้นงานซึ่งเป็นผลมาจากชิ้นงานเริ่มเกิดการย่อยสลายขึ้นต้นและรอเวลาที่จะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายที่สมบูรณ์ต่อไป

ตารางที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

อัตราส่วน (PLA/PP/PP-g-MAH/DCP)	น้ำหนักชิ้นงาน ก่อนนำไปฝังดิน (กรัม)	น้ำหนักชิ้นงาน หลังจากฝังดิน (กรัม)	ร้อยละการเพิ่ม ของน้ำหนัก (%)	ลักษณะชิ้นงาน ที่สังเกตได้
70/30/0.3/0.03	0.9403	0.9418	0.160	ผิวชิ้นงานมีความขรุขระ เล็กน้อย
70/30/0.3/0.07	1.2649	1.2666	0.134	ผิวชิ้นงานมีความขรุขระ เล็กน้อย
70/30/0.7/0.03	1.0537	1.0558	0.199	ขอบชิ้นงานมีการ เปลี่ยนแปลงเกิดสีขาวขุ่น
70/30/0.7/0.07	1.1601	1.1625	0.207	ในผิวของชิ้นงานมีสี น้ำตาลและที่ขอบเกิดสี ขาวขุ่น
50/50/0.3/0.03	1.2409	1.2421	0.097	ขอบชิ้นงานเกิดสีน้ำตาล มากขึ้น
50/50/0.3/0.07	1.0627	1.0652	0.235	ขอบชิ้นงานมีการ เปลี่ยนแปลงเกิดสีขาวขุ่น
50/50/0.7/0.03	1.0144	1.0164	0.197	ภายในชิ้นงานเกิดรอย แยก
50/50/0.7/0.07	1.0036	1.0065	0.289	ภายในชิ้นงานเกิดรอย แยก
30/70/0.3/0.03	1.0395	1.0404	0.087	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ของชิ้นงานมากนัก
30/70/0.3/0.07	1.0270	1.0280	0.097	
30/70/0.7/0.03	1.0001	1.0015	0.140	
30/70/0.7/0.07	1.0660	1.0676	0.150	

นอกจากนี้ยังพบว่าในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม จะมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อใส่ PP-g-MAH และ DCP ที่ปริมาณ 0.7 และ 0.07 phr และพบว่าอัตราส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมากที่สุดคือ PLA/PP 50/50 ดังแสดงในรูปที่ 4.90



รูปที่ 4.90 แนวโน้มร้อยละการเพิ่มน้ำหนักของชิ้นงานที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้หลังนำไปฝังดิน

บทที่ 5

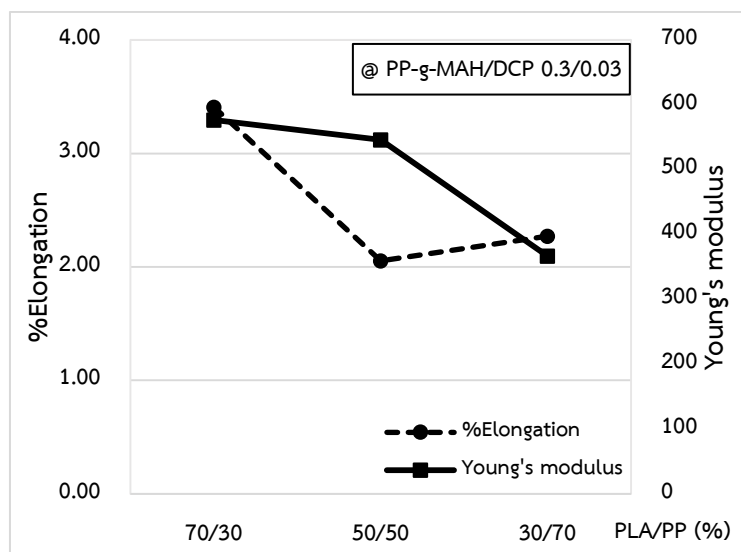
อภิปรายผลการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการอภิปรายผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้ โดยสืบเนื่องมาจากการทำการผสม PLA/PP ถึงแม้จะเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมก็จริง แต่การผสมของพอลิเมอร์สองชนิดนี้นั้นเกิดความไม่เข้ากันจึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่แย่ง ดังนั้นจึงต้องมีการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ (PP-g-MAH) และสารริเริ่มปฏิกิริยา (DCP) จึงก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากเดิม เพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่แย่งนั้นให้ดีขึ้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้และอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล เพื่อที่จะได้นำไปวิเคราะห์ต่อว่าอัตราส่วนการใช้ใดเหมาะสมหรือควรค่าแก่การนำไปใช้งานในด้านใด จากการศึกษาพบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่ได้ จะมีบางสมบัติที่มีความสัมพันธ์กันทั้งในแง่ที่ไปในทางเดียวกัน และในแง่ที่ไปในทางตรงข้ามกัน จะรวบรวมและอธิบายไว้ในบทนี้ รวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้งาน จะมีตัวอย่างของการนำไปใช้งานด้านอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ซึ่งเป็นกรณีศึกษาจากโรงงาน เนื่องจากบางอัตราส่วนผสมจะให้สมบัติเชิงกลที่เท่ากันหรือแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นแนวทางในการตัดสินใจนำไปใช้นั้นก็จะขึ้นอยู่กับความคุ้มค่าซึ่งจะเลือกจากค่าสมบัติเชิงกลต่อบาท เพื่อให้เกิดการนำไปใช้ประโยชน์สูงสุด

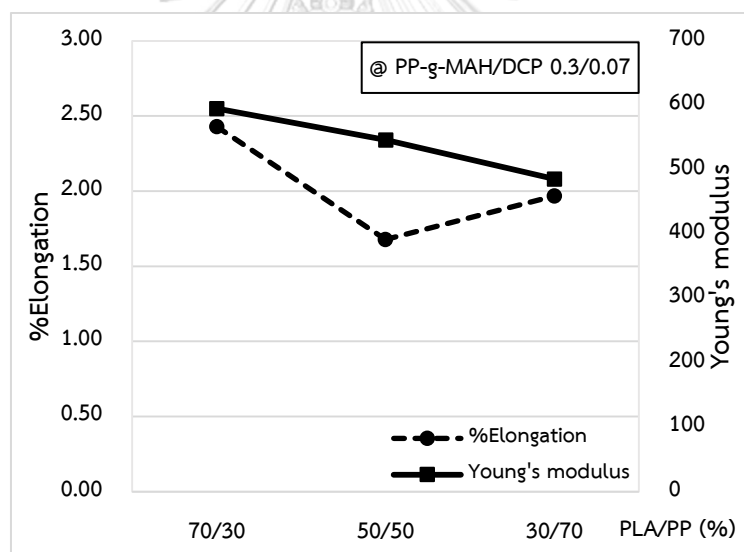
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง

5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของยัง

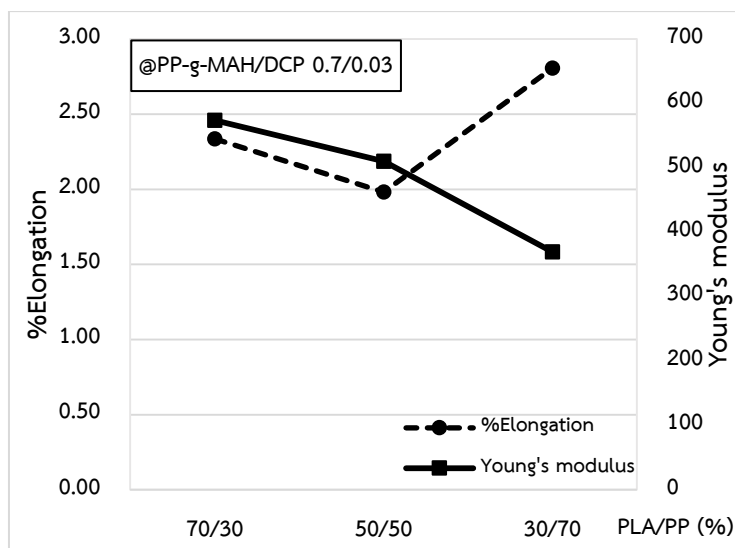
โดยปกติร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation @break) จะบ่งบอกถึงความเหนียว (Ductility) ของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถวัดได้จากความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการทดสอบความทนแรงดึงเทียบกับความยาวเดิมของพอลิเมอร์ ส่วนค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) จะบ่งบอกถึงความแข็งตึง (Stiffness) ของพอลิเมอร์ที่สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงกระทำ โดยจะเป็นพฤติกรรมของพอลิเมอร์ในช่วงก่อนจะเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) จากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดและค่ามอดูลัสของยังเป็นไปในทางตรงกันข้าม ซึ่งสังเกตได้จากที่ปริมาณ PP-g-MAH คงที่ เมื่อปริมาณ DCP เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1-5.4 และนอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลง ในขณะที่มอดูลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ ดังนั้นการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ให้แก่พอลิเมอร์ผสมส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งตึงเพิ่มขึ้น และสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากขึ้น แต่จะมีความยืดหยุ่นลดลงเล็กน้อย



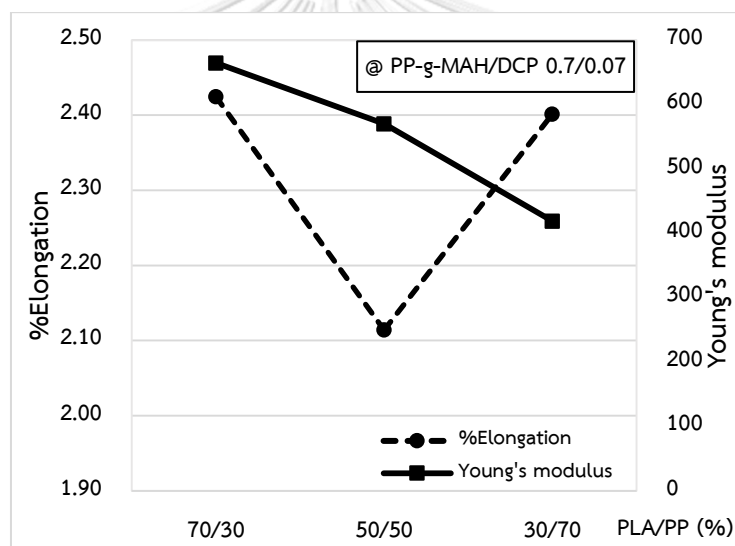
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของยังที่ PP-g-MAH/DCP 0.3/0.03



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของยังที่ PP-g-MAH/DCP 0.3/0.07



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของยังที่ PP-g-MAH/DCP 0.7/0.03



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของยังที่ PP-g-MAH/DCP 0.7/0.07

5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งและลักษณะการแตกหัก

ความแกร่ง (Toughness) คือความสามารถของพอลิเมอร์ที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก ซึ่งค่าความแกร่งนี้จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรที่ต้องใช้ในการทำให้พอลิเมอร์เกิดการแตกหักเสียหาย ดังนั้นพอลิเมอร์ที่มีความแกร่งสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรที่สูงกว่าในการทำให้พอลิเมอร์เกิดการแตกหักเสียหาย ความแกร่งจะบ่งบอกถึงความแข็งแรงและความสามารถในการยึดตัวของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปมักจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง โดยพอลิเมอร์ที่มีความแกร่งมากก็จะใช้พลังงานมากในการทำให้พอลิเมอร์แตกหักหักจึงมีพื้นที่ใต้กราฟมาก ซึ่งหมายถึงสามารถทนทานต่อการเสียรูปหรือแตกหักได้มาก ดังนั้นพื้นที่ผิวของชิ้นงานทดสอบจะขรุขระ ซึ่งลักษณะนี้จะเป็นลักษณะการแตกหักแบบเหนียว (Ductile failure) แต่ในทางกลับกัน ถ้าพอลิเมอร์มีความแกร่งน้อย เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงเพียงชนิดเดียวก็จะเกิดการแตกหักเลยทันที ดังนั้นพื้นที่ผิวของชิ้นงานที่ทดสอบจะเรียบ ซึ่งลักษณะนี้จะเป็นลักษณะการแตกหักแบบเปราะ (Brittle failure) ดังแสดงในรูปที่ 5.5

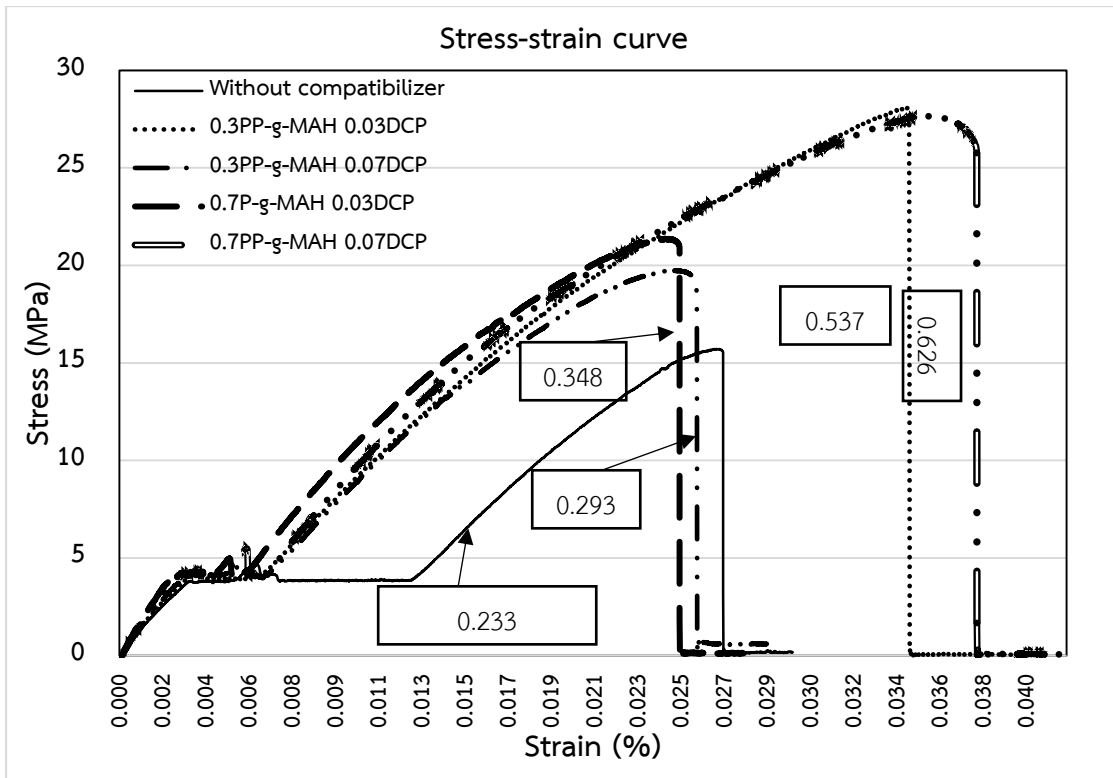


(ก) ลักษณะการแตกหักแบบเปราะ

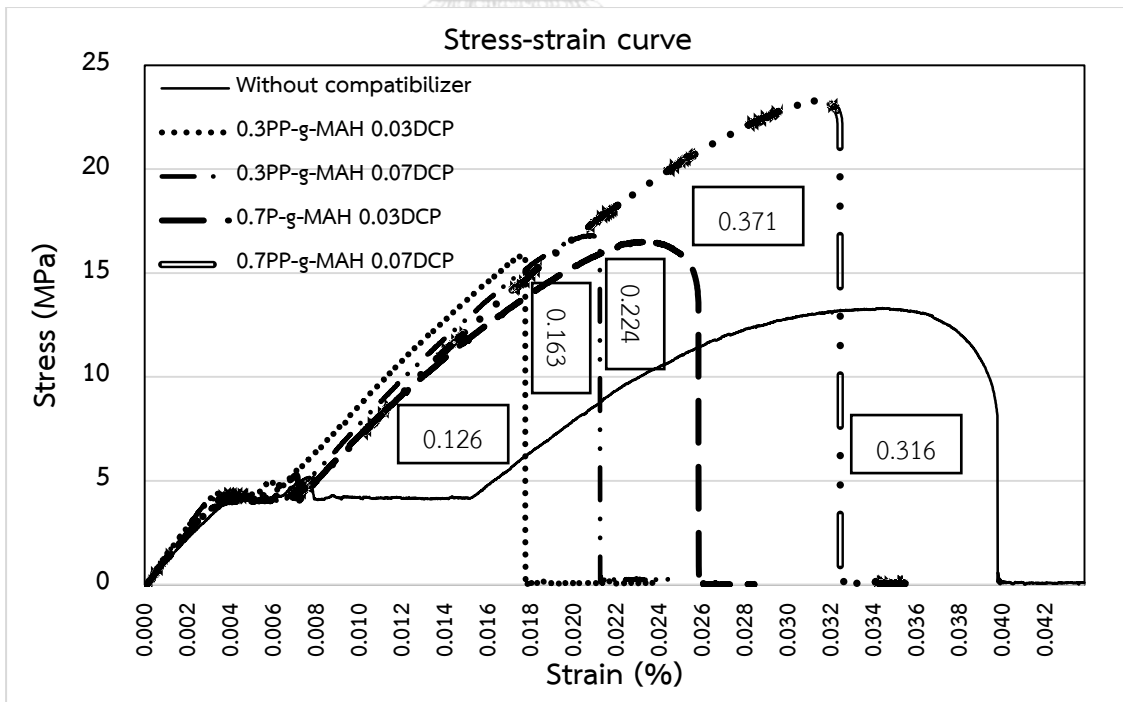
(ข) ลักษณะการแตกแบบเหนียว

รูปที่ 5.5 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน

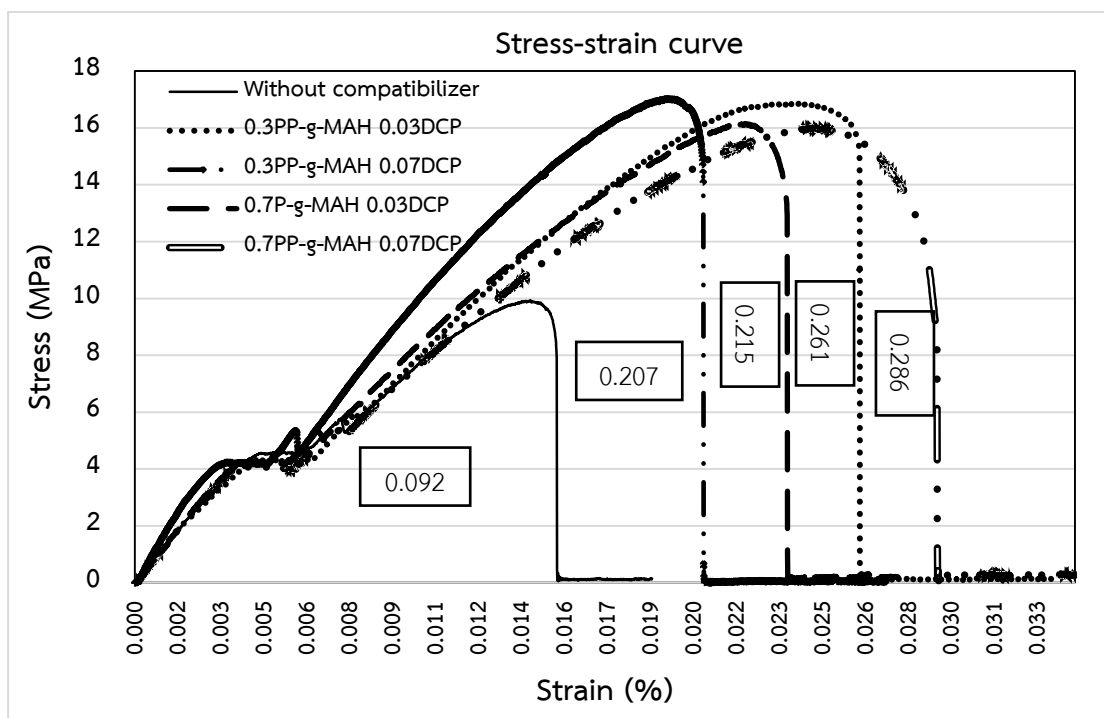
จากผลการทดลองพบว่าความแกร่งและลักษณะการแตกของชิ้นงานทดสอบมีความสัมพันธ์เป็นเหตุเป็นผลไปในทางเดียวกัน คือชิ้นงานทดสอบของพอลิเมอร์ผสมที่มีความแกร่งสูงจะมีพื้นที่ใต้กราฟพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.6 -5.8 และพื้นที่ผิวของชิ้นงานทดสอบจะมีลักษณะขรุขระ ซึ่งเป็นลักษณะของการแตกหักแบบเหนียว



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของ PLA/PP 70/30 ที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของ PLA/PP 50/50 ที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของ PLA/PP 30/70 ที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 5.6 – 5.8 พบว่าพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดเพิ่มขึ้นหลังการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ในทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้จะมีความแกร่งมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ และสามารถสรุปค่าพื้นที่ใต้กราฟในแต่ละอัตราส่วนผสมและจัดเรียงตามอันดับได้ตามตารางที่ 5.1

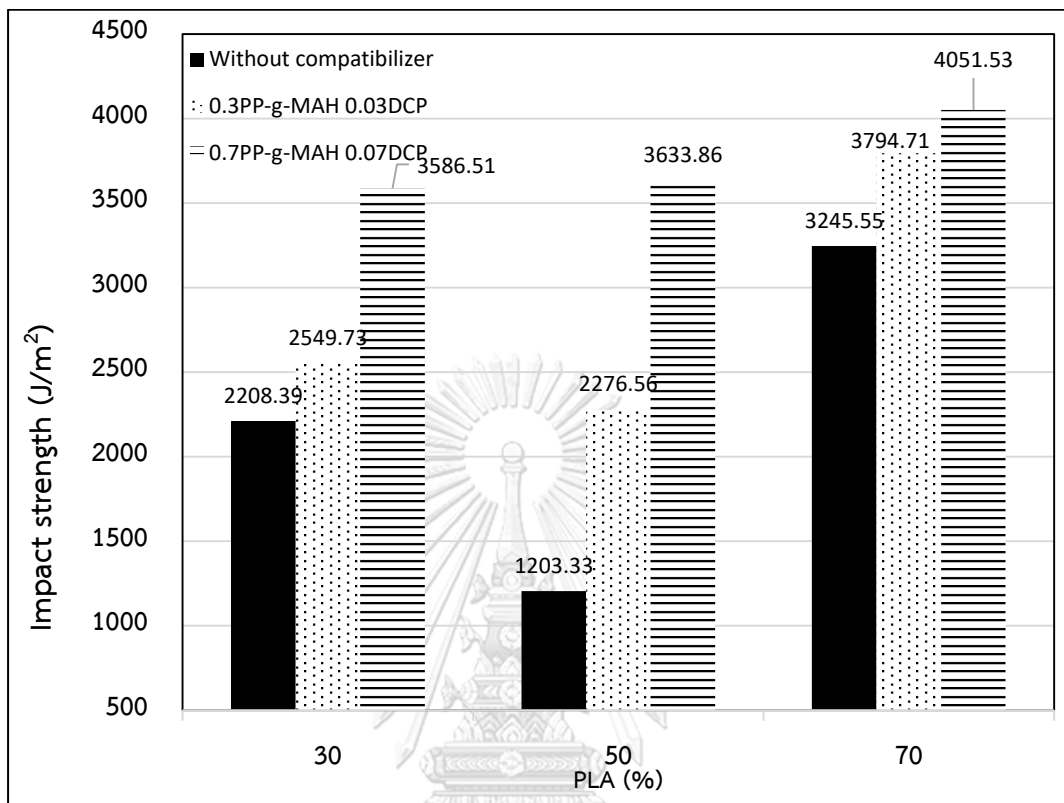
ตารางที่ 5.1 ปริมาณพื้นที่ได้กราฟระหว่างความเค้น-ความเครียดของแต่ละอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม

อัตราส่วนผสม (PLA/PP/PP-g-MAH/DCP)	พื้นที่ได้กราฟ	จัดเรียงตามอันดับความแกร่ง จากมากที่สุด (1) ไปน้อยสุด (15)
70/30	0.233	9
70/30/0.3/0.03	0.537	2
70/30/0.3/0.07	0.293	6
70/30/0.7/0.03	0.348	4
70/30/0.7/0.07	0.626	1
50/50	0.316	5
50/50/0.3/0.03	0.126	14
50/50/0.3/0.07	0.163	13
50/50/0.7/0.03	0.224	10
50/50/0.7/0.07	0.371	3
30/70	0.092	15
30/70/0.3/0.03	0.261	8
30/70/0.3/0.07	0.208	12
30/70/0.7/0.03	0.215	11
30/70/0.7/0.07	0.286	7

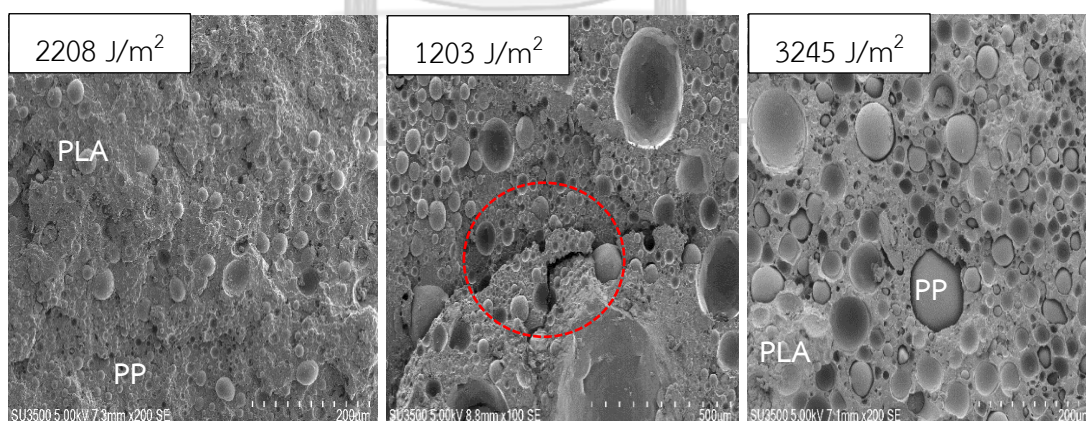
5.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงกระแทกและสัญญาณวิทยา

นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมนั้นมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างการจัดเรียงของพอลิเมอร์ผสมด้วย เนื่องจากการจัดเรียงตัวทางสัญญาณวิทยาจะส่งผลต่อพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ได้รับแรงกระทำ โดยถ้าพอลิเมอร์ผสมมีการเชื่อมติดระหว่างกัน เมื่อมีแรงมากระทำ พอลิเมอร์จะสามารถส่งผ่านแรงได้ แต่ถ้าไม่มีการเชื่อมติดระหว่างกัน เมื่อมีแรงมากระทำจะส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการแตกหักหรือฉีกขาดทันที เพราะไม่มีแนวทางในการส่งต่อแรงผ่านระหว่างภูมิภาค และนอกจากการจัดเรียงตัวแล้ว ยังขึ้นอยู่กับสมบัติพื้นฐานของแต่ละพอลิเมอร์ที่นำมาทำการผสมอีกด้วย จากการศึกษาทดสอบจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณอัตราส่วน PLA 50 จะมีความทนแรงกระแทกต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการจัดเรียงตัวทางสัญญาณวิทยาที่แย่มากที่สุดเช่นกัน และมีแนวโน้มเป็นเช่นนี้ทุกปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม และนอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วน PLA/PP 70/30 จะเห็นว่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นหลังจากการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณวิทยาที่ดีขึ้น แต่ปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่แตกต่างกันนั้นจะส่งผลต่อค่าความทนแรงกระแทกไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก

ตั้งแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบในรูปที่ 5.9 และสอดคล้องกับการจัดเรียงตัวทางสัณฐานวิทยาที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังรูปที่ 5.10 - 5.12



รูปที่ 5.9 แนวโน้มค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม

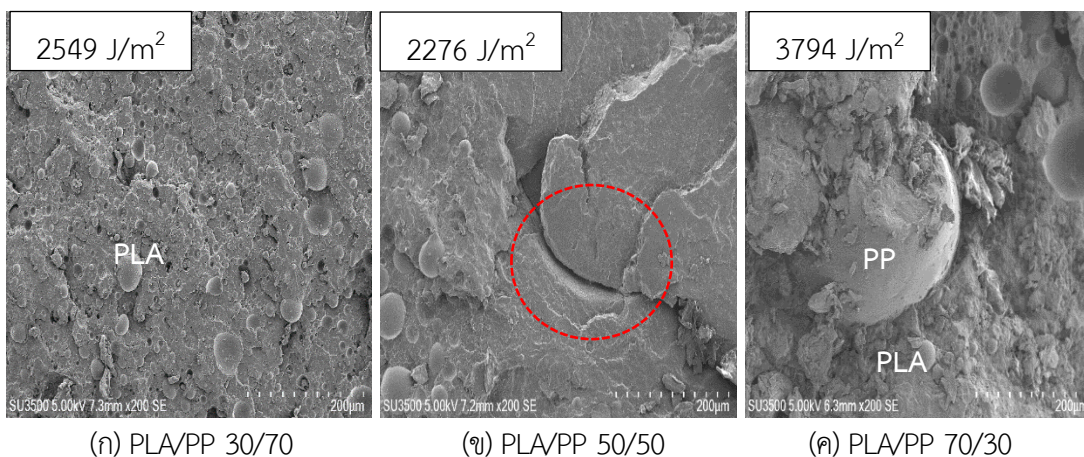


(ก) PLA/PP 30/70

(ข) PLA/PP 50/50

(ค) PLA/PP 70/30

รูปที่ 5.10 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้

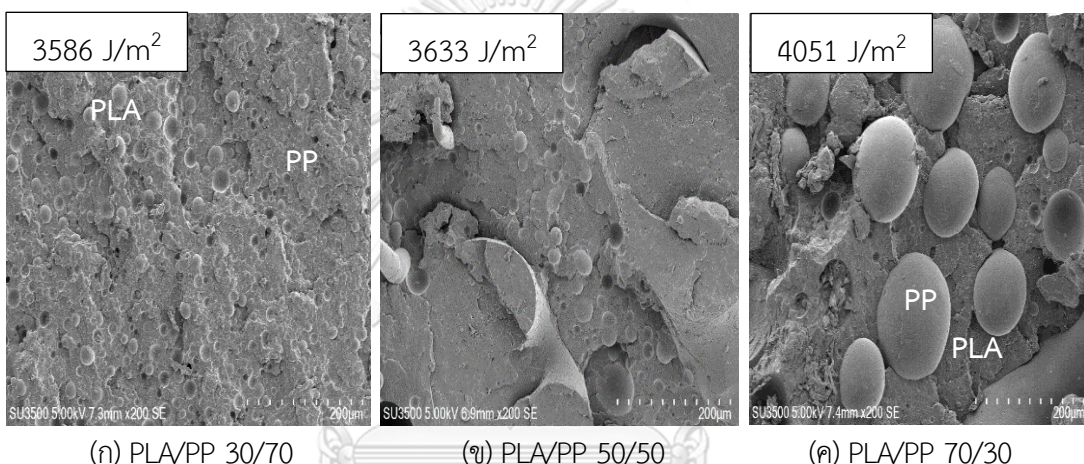


(ก) PLA/PP 30/70

(ข) PLA/PP 50/50

(ค) PLA/PP 70/30

รูปที่ 5.11 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ PP-g-MAH/DCP 0.3/0.03



(ก) PLA/PP 30/70

(ข) PLA/PP 50/50

(ค) PLA/PP 70/30

รูปที่ 5.12 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ PP-g-MAH/DCP 0.7/0.07

จากการจัดเรียงสัณฐานวิทยาที่ดี กล่าวคือ ไม่มีช่องว่างระหว่างวัฏภาคซึ่งเกิดจากพื้นที่ว่างระหว่างผิวสัมผัสของวัฏภาคกระจายและวัฏภาคหลักและไม่แยกวัฏภาคกันชัดเจน จะส่งผลให้มีความทนแรงกระแทกสูง และนอกจากนี้สมบัติของวัฏภาคที่ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคหลักและวัฏภาคกระจายก็มีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระแทกเช่นกัน โดยวัฏภาคหลักที่มีความเปราะและวัฏภาคกระจายมีความนุ่ม จะช่วยดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าในกรณีที่วัฏภาคหลักที่มีความนุ่มและวัฏภาคกระจายมีความเปราะ เนื่องจากความเปราะของวัฏภาคกระจายจะไปเป็นจุดบกพร่องในการรับแรง ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ PLA/PP 70/30 มีความทนแรงกระแทกมากกว่าที่ PLA/PP 30/70

5.2 การนำไปประยุกต์ใช้ในการใช้งานด้านต่างๆ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้มีความตระหนักถึงภาวะโลกร้อนกันมากขึ้น ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมจึงหันมาให้ความสนใจในพอลิเมอร์ชีวภาพที่สังเคราะห์มาจากทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วเกิดขึ้นทดแทนได้ (Renewable resource) และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติเมื่อนำไปฝังดิน แต่เนื่องจากพอลิเมอร์ชีวภาพมีข้อด้อยคือมีราคาแพงและมีความเปราะ นอกจากนี้ความแข็งแรงจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาการใช้งานอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ชีวภาพด้วยการนำพอลิเมอร์เชิงการค้าทั่วไปมาผสม เพื่อลดต้นทุนและยังคงสมบัติบางประการให้คงอยู่ต่อไป ทั้งนี้การผสมพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้ยังต้องอาศัยสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา มาช่วยในกระบวนการผสมเพื่อให้เกิดความเข้ากันได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งถือเป็นการส่วนหนึ่งในการควบคุมสมบัติให้ดีขึ้นตามต้องการ โดยผลการทดลองจากงานวิจัยนี้สามารถสรุปค่าใช้จ่ายและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ ดังตารางที่ 5.2 โดยจะเห็นว่าอัตราส่วนผสมที่ปริมาณต่างๆกัน ทั้งปริมาณของพอลิเมอร์ที่ใช้ และสารเคมีที่ใช้จะให้สมบัติเชิงกลและค่าใช้จ่ายที่ไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจเลือกอัตราส่วนในการผลิตพอลิเมอร์เพื่อนำไปใช้งานต่างๆในอุตสาหกรรมพลาสติกต่อไป

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและสมบัติเชิงกลที่ได้ของพอลิเมอร์ผสม

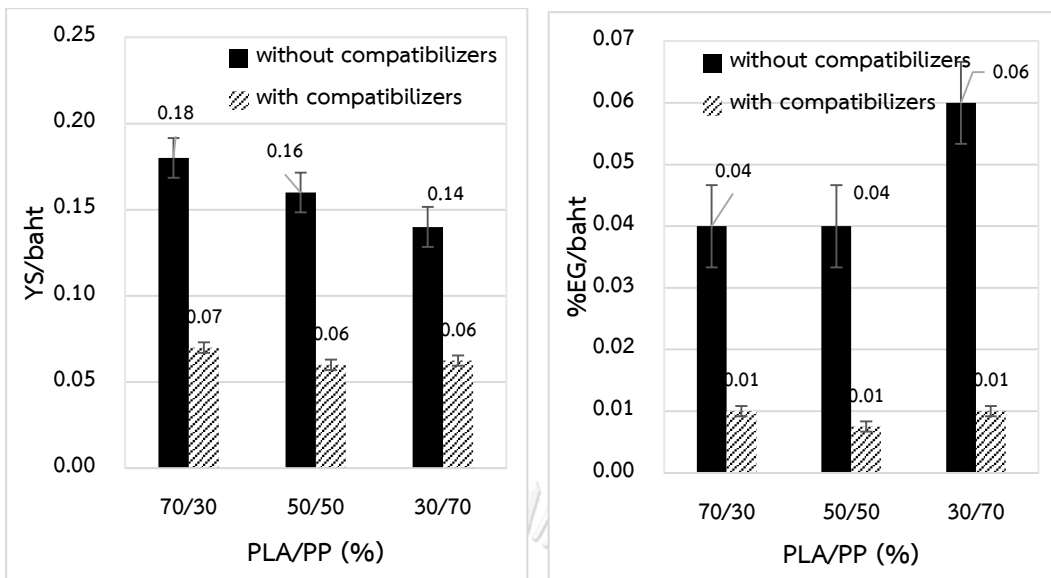
อัตราส่วนผสม (PLA/PP/PP-g-MAH /DCP)	ราคา (บาท/กก)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความทนแรงดึงสูงสุด (MPa)	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดูลัสของยัง (MPa)	ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ความแข็ง (Shore D)	ความทนแรงกระแทก (J/m ²)
PLA 100	110	1.24	52.13	36.18	519.17	6.75	82.67	3,431
70/30	91	1.14	18.11	16.54	477.28	3.28	76.11	3,246
70/30/0.3/0.03	237	1.14	26.75	22.53	576.63	3.41	81.00	3,795
70/30/0.3/0.07	387	1.14	20.91	20.41	594.77	2.43	79.22	3,872
70/30/0.7/0.03	249	1.14	20.23	19.06	573.65	2.34	80.33	3,902
70/30/0.7/0.07	409	1.14	26.18	21.72	664.38	2.42	75.00	4,051
50/50	78	1.07	12.49	12.03	416.76	3.44	76.00	1,203
50/50/0.3/0.03	214	1.07	17.86	17.40	545.80	2.05	78.56	2,277
50/50/0.3/0.07	374	1.07	16.01	15.85	546.04	1.68	74.67	2,745
50/50/0.7/0.03	236	1.07	16.66	15.69	510.32	1.98	77.33	2,509
50/50/0.7/0.07	396	1.07	20.65	18.54	570.18	2.11	78.89	3,634
30/70	65	1.00	10.63	9.29	368.50	3.74	71.22	2,208
30/70/0.3/0.03	201	1.00	17.22	17.31	366.85	2.27	73.89	2,550
30/70/0.3/0.07	361	1.00	16.37	15.48	485.79	1.97	76.78	2,642
30/70/0.7/0.03	223	1.00	16.93	16.83	369.30	2.81	75.11	3,467
30/70/0.7/0.07	383	1.00	17.07	16.91	418.75	2.40	77.11	3,586

นอกจากนี้สามารถนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ในเรื่องของสมบัติเชิงกลต่อบาท เพื่อเปรียบเทียบว่าอัตราส่วนใดมีค่าสมบัติเชิงกลต่อบาทมากที่สุด โดยค่าสมบัติเชิงกลต่อบาทยิ่งมีค่ามากจะยิ่งคุ้มค่าในเชิงของการปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลต่อบาทของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

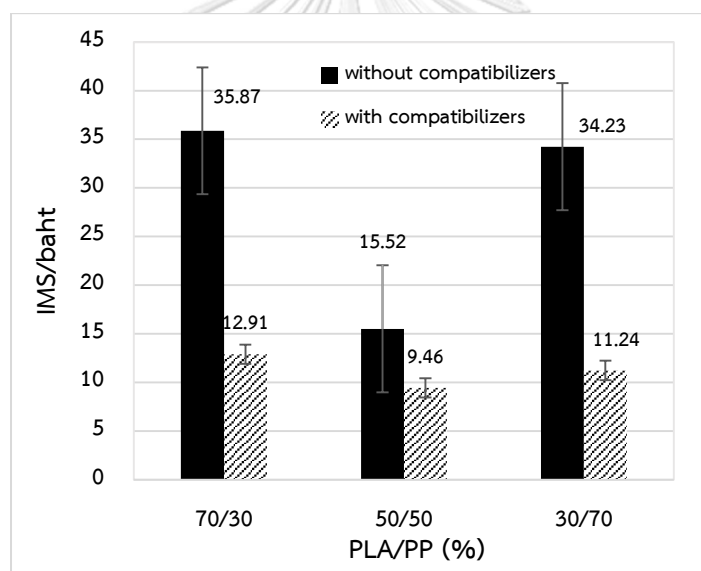
อัตราส่วนผสม (PLA /PP /PP-g-MAH/DCP)	สมบัติเชิงกลต่อบาท (Property/Baht ; P/B)											
	ความทนแรงดึง สูงสุด (UTS/baht)		ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (YS/baht)		มอดูลัสของยัง (YM/baht)		ร้อยละการยืด ตัว ณ จุดขาด (%EG/baht)		ความแข็ง (scale/baht)		ความทนแรง กระแทก (IMS /baht)	
	MPa	P/B	MPa	P/B	MPa	P/B	%	P/B	scale	P/B	J/m ²	P/B
PLA 100	52.13	0.47	36.18	0.33	519	4.72	6.75	0.06	82	0.75	3,431	31.19
70/30	18.11	0.20	16.54	0.18	477	5.27	3.28	0.04	76	0.84	3,245	35.87
70/30/0.3/0.03	26.75	0.11	22.53	0.10	577	2.43	3.41	0.01	81	0.34	3,795	16.02
70/30/0.3/0.07	20.91	0.05	20.41	0.05	595	1.54	2.43	0.01	79	0.20	3,872	10.01
70/30/0.7/0.03	20.23	0.08	19.06	0.08	574	2.31	2.34	0.01	80	0.32	3,902	15.69
70/30/0.7/0.07	26.18	0.06	21.72	0.05	664	1.63	2.42	0.01	75	0.18	4,051	9.91
50/50	12.49	0.16	12.03	0.16	417	5.38	3.44	0.04	76	0.98	1,203	15.52
50/50/0.3/0.03	17.86	0.08	17.40	0.08	545	2.55	2.05	0.01	79	0.37	2,277	10.65
50/50/0.3/0.07	16.01	0.04	15.85	0.04	546	1.46	1.68	0.00	75	0.20	2,745	7.34
50/50/0.7/0.03	16.66	0.07	15.69	0.07	510	2.17	1.98	0.01	77	0.33	2,509	10.65
50/50/0.7/0.07	20.65	0.05	18.54	0.05	570	1.44	2.11	0.01	79	0.20	3,634	9.18
30/70	10.63	0.16	9.29	0.14	368	5.71	3.74	0.06	71	1.10	2,208	34.23
30/70/0.3/0.03	17.22	0.09	17.31	0.09	367	1.83	2.27	0.01	74	0.37	2,550	12.70
30/70/0.3/0.07	16.37	0.05	15.48	0.04	486	1.35	1.97	0.01	76	0.21	2,642	7.32
30/70/0.7/0.03	16.93	0.08	16.83	0.08	369	1.66	2.81	0.01	75	0.34	3,467	15.57
30/70/0.7/0.07	17.07	0.04	16.91	0.04	419	1.09	2.40	0.01	77	0.20	3,586	9.37

จากข้อมูลในตารางที่ 5.3 พบว่าอัตราส่วนผสมที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยาจะมีค่าสมบัติเชิงกลต่อบาทมากกว่าอัตราส่วนที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา ดังแสดงเป็นแผนภูมิเปรียบเทียบในรูปที่ 5.13 โดยจะยกตัวอย่างมาทั้งหมด 3 สมบัติเชิงกลหลักๆ ซึ่งประกอบด้วยความทนแรงดึง ณ จุดคราก, ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดและความทนแรงกระแทก ทั้งนี้เนื่องจากสารเคมีที่ใช้นั้นมีราคาแพง จึงส่งผลให้มีความลดลงในด้านมูลค่า แต่ในทางกลับกันถือเป็น การเพิ่มคุณค่าในเชิงการอนุรักษ์ธรรมชาติ ดังนั้นอัตราส่วนผสมที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยาจึงเหมาะกับการใช้งานไม่ได้จนถึงสมบัติเชิงกลหรือความแข็งแรงมากนัก



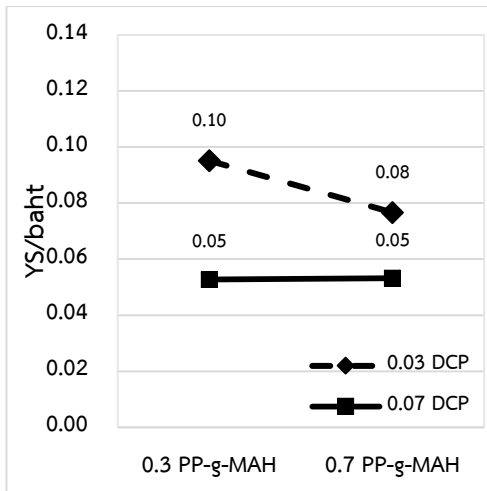
(ก) ความทนแรงดึง ณ จุดครากต่อบาท

(ข) ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดต่อบาท

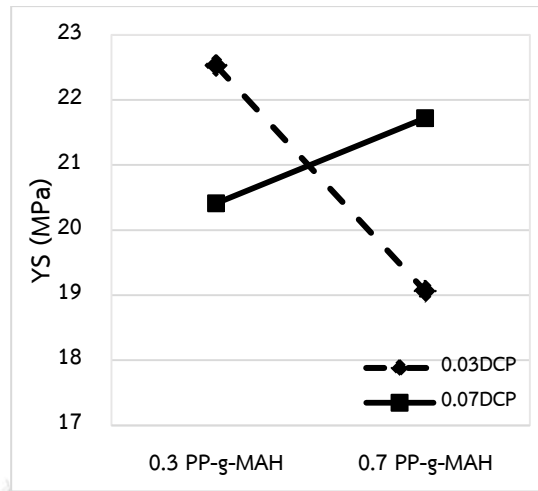


(ค) ความทนแรงกระแทกต่อบาท

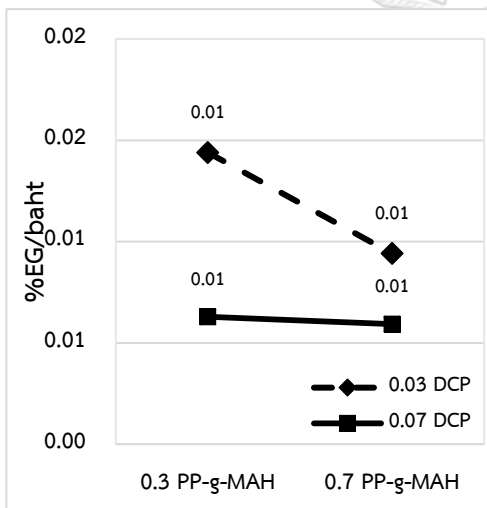
รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลต่อบาทระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ แต่เมื่อต้องคำนึงถึงสมบัติเชิงกลในการใช้งาน ดังนั้นการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยาจึงจำเป็นในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม เพื่อที่จะเปรียบเทียบระหว่างค่าสมบัติที่ได้และค่าสมบัติเชิงกลต่อบาทหลังจากปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยาในปริมาณต่างๆกันจึงสร้างกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.14 – 5.16 โดยสมบัติเชิงกลที่นำมาพิจารณาในการเปรียบเทียบจะประกอบด้วย ความทนแรงดึง ณ จุดคราก, ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดและความทนแรงกระแทกที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมต่างๆตามลำดับ



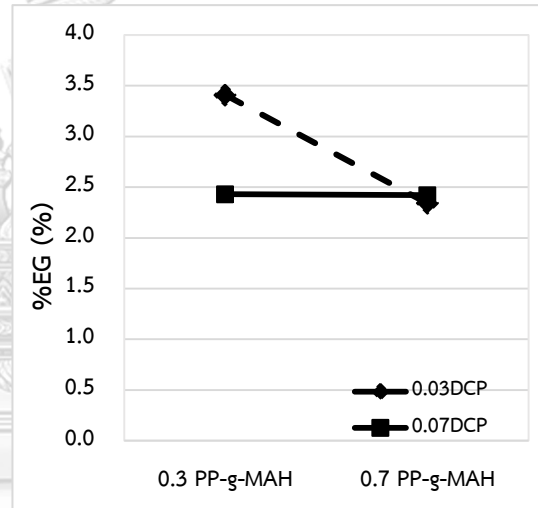
(ก) ความทนแรงดึง ณ จุดครากต่อบาท



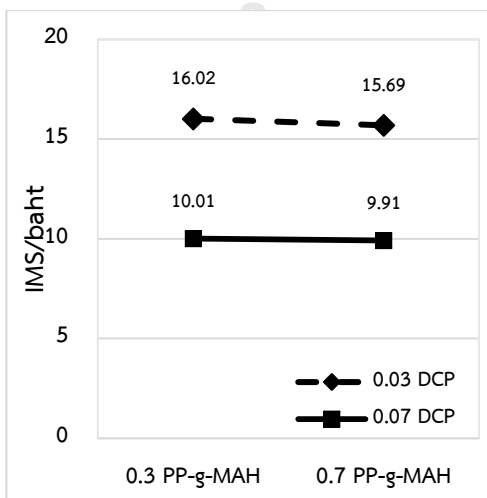
(ข) ค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก



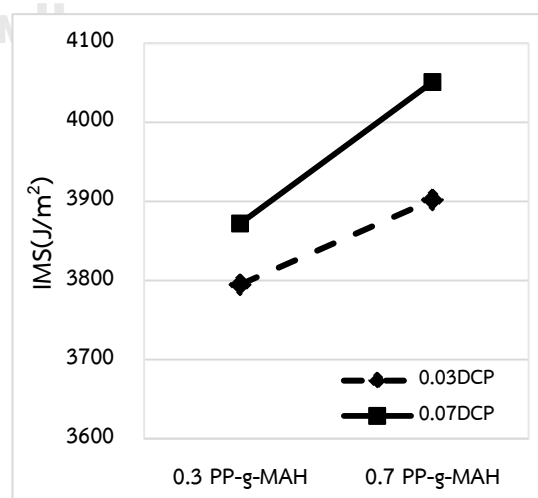
(ค) ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดต่อบาท



(ง) ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด

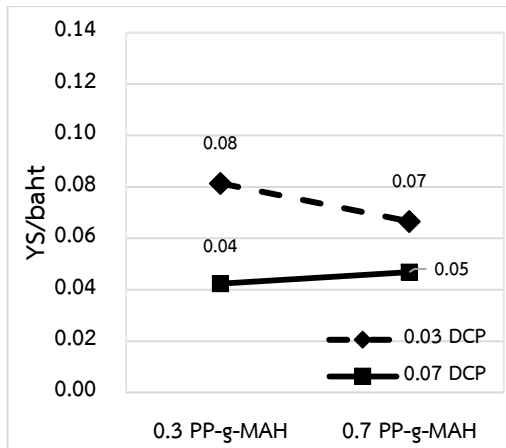


(จ) ความทนแรงกระแทกต่อบาท

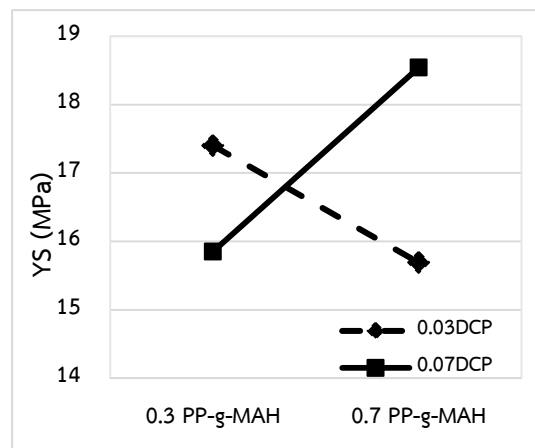


(ฉ) ค่าความทนแรงกระแทก

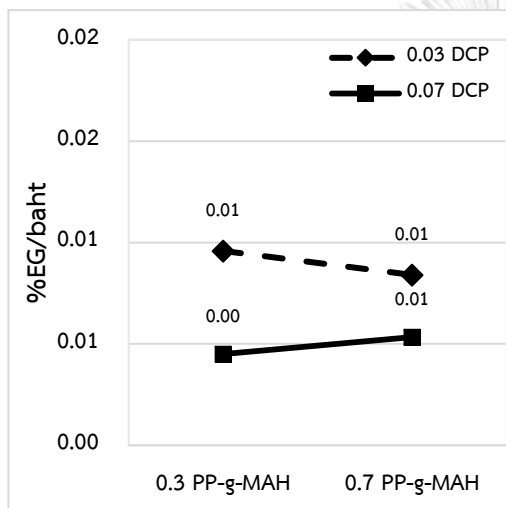
รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบระหว่างสมบัติเชิงกลต่อบาทและสมบัติเชิงกลที่ได้ของ PLA/PP 70/30



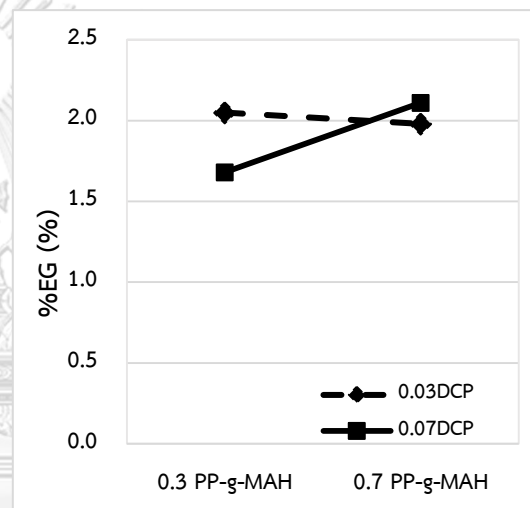
(ก) ความทนแรงดึง ณ จุดครากต่อบาท



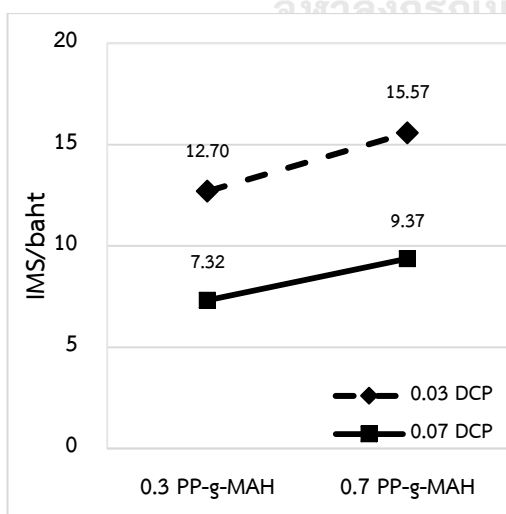
(ข) ค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก



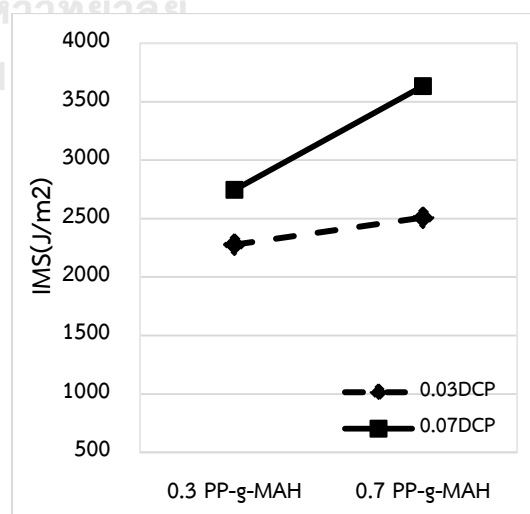
(ค) ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดต่อบาท



(ง) ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด

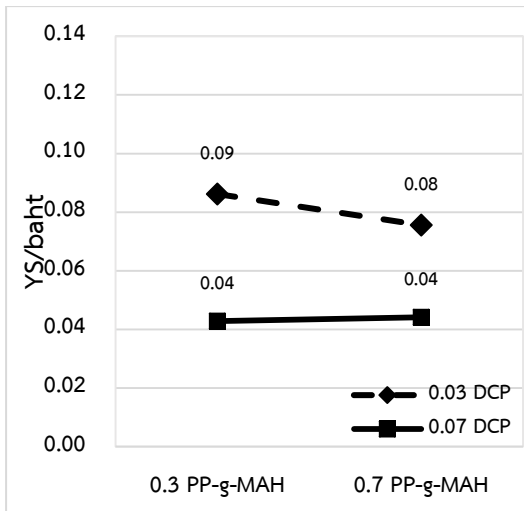


(จ) ความทนแรงกระแทกต่อบาท

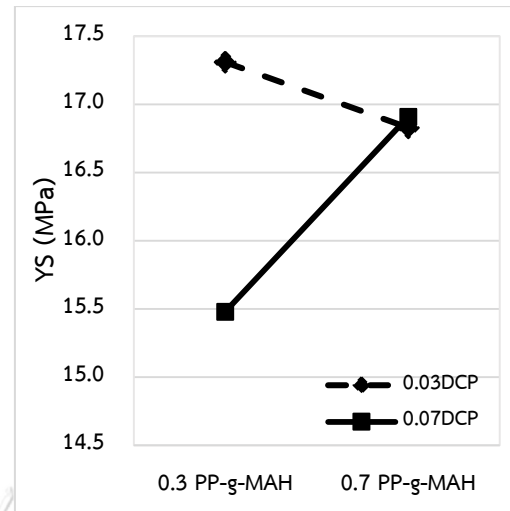


(ฉ) ค่าความทนแรงกระแทก

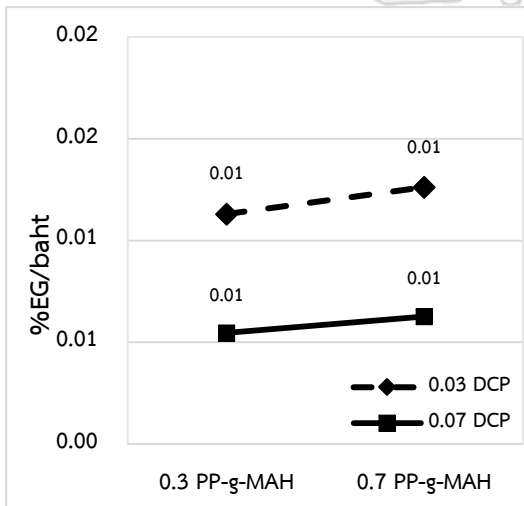
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบระหว่างสมบัติเชิงกลต่อบาทและสมบัติเชิงกลที่ได้ของ PLA/PP 50/50



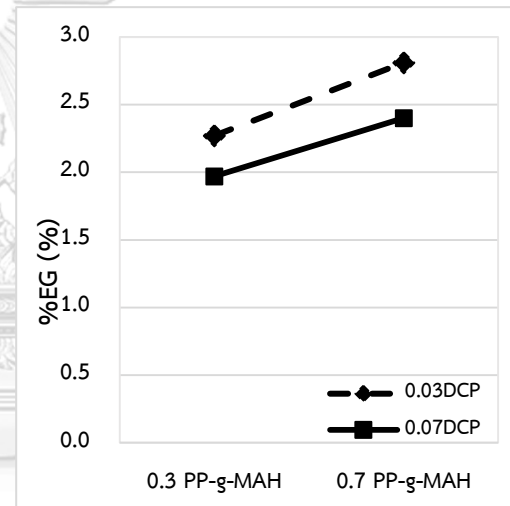
(ก) ความทนแรงดึง ณ จุดครากต่อบาท



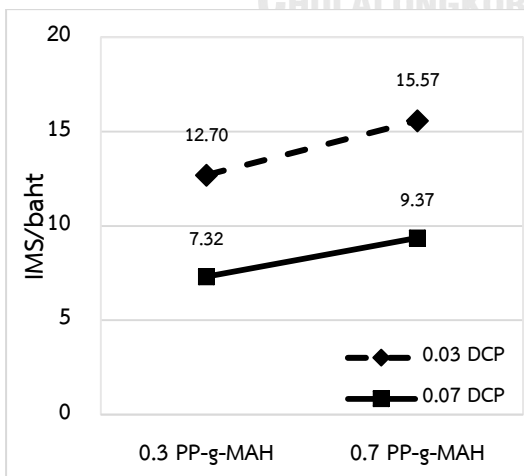
(ข) ค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก



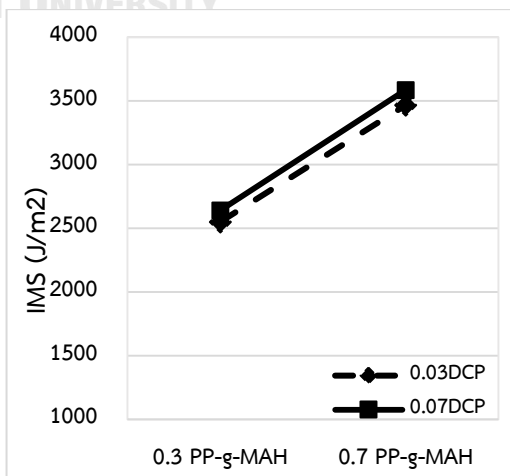
(ค) ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดต่อบาท



(ง) ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด



(จ) ความทนแรงกระแทกต่อบาท



(ฉ) ค่าความทนแรงกระแทก

รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบระหว่างสมบัติเชิงกลต่อบาทและสมบัติเชิงกลที่ได้ของ PLA/PP 30/70

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่พอลิเมอร์ผสมมีสารเพิ่มความเข้ากันได้โดยแตกต่างกันที่ ปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ PLA/PP 50/50 ดังรูปที่ 5.15 จะพบว่ามี การปรับปรุงสมบัติที่ค้ำค่าในเชิงมูลค่าโดยพบว่าการเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH ในขณะที่ DCP คงที่ที่ 0.07 phr ทั้งในสมบัติความทนแรงดึง ณ จุดคราก, ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด จะพบว่าค่าสมบัติ เชิงกลต่อบาทเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH ทุกปริมาณการใช้ DCP พบว่าค่าความทนแรง กระแทกต่อบาทเพิ่มขึ้นเช่นกัน และในกรณีที่ PLA/PP 30/70 ดังรูปที่ 5.16(จ) และ(ฉ) จะเห็นได้ว่ามี การปรับปรุงสมบัติที่ค้ำค่าในเชิงมูลค่าในสมบัติความทนแรงกระแทกโดยเมื่อเพิ่มปริมาณ PP-g-MAH ในขณะที่ปริมาณการใช้ DCP คงที่จะพบว่ามีค่าความทนแรงกระแทกต่อบาทที่เพิ่มขึ้น

เนื่องจากการนำไปใช้งานที่หลากหลาย จึงทำให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ต้องการของพอลิเมอร์ที่จะ นำไปใช้งานมีความแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกอัตราส่วนผสมในการผลิตเพื่อตอบสนองทั้งราคาและ สมบัติเชิงกลที่ได้จึงเป็นทางเลือกที่ดี เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด โดยตัวอย่างค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์ในท้องตลาดจากกรณีศึกษาโรงงานแห่งหนึ่งซึ่งเป็นผู้ผลิตและจัดจำหน่ายบรรจุภัณฑ์ สำหรับเครื่องดื่มและอาหาร ดังตารางที่ 5.4 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าสมบัติเชิงกลที่ทาง โรงงานกำหนดและอัตราส่วนผสมที่แนะนำในการนำไปใช้งานต่างๆ ซึ่งค่าสมบัติเชิงกลของอัตรา ส่วนผสมที่แนะนำนั้นเป็นค่าที่ได้มาจากงานวิจัยนี้

ตารางที่ 5.4 ค่าสมบัติเชิงกลที่ต้องการในการนำไปใช้งานรูปแบบต่างๆ

การใช้งาน	ค่าสมบัติเชิงกลที่ต้องการ			อัตราส่วนที่แนะนำ (PLA/PP/ PP-g-MAH/DCP)	ค่าสมบัติเชิงกลจากอัตราส่วนที่แนะนำ		
	ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (MPa)	ร้อยละการยืด ตัว ณ จุดขาด (96)	ความทนแรง กระแทก (J/m ²)		ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (MPa)	ร้อยละการยืด ตัว ณ จุดขาด (96)	ความทนแรง กระแทก (J/m ²)
บรรจุภัณฑ์ สำหรับ เครื่องสำอาง	แก้วพลาสติก	4.31 – 5.70	1.70 – 1.85	2,100 – 2,300	9.29	3.74	2,208
	แก้วกาแฟ พลาสติก	14.20 – 15.30	1.90 – 2.10	2,300 – 2,500	16.54	3.28	3,245
	ถ้วยช้อน	4.78 – 6.12	5.93 – 8.16	1,800 – 2,000	12.03	3.44	1,203
บรรจุภัณฑ์ สำหรับใส่ อาหาร	จานกระดาษ	10.26 – 11.09	7.64 – 9.72	2,500 – 2,700	15.48	1.97	2,642
	กล่องเบเกอร์รี่ สี่เหลี่ยม	15.47 – 16.33	2.06 – 2.22	2,500 – 2,700	15.85	1.68	2,745
	กล่องเบเกอร์รี่ สามเหลี่ยม	15.47 – 16.33	2.06 – 2.22	2,500 – 2,700	15.85	1.68	2,745
	กล่องผลไม้ สี่เหลี่ยม	16.18 – 17.42	4.24 – 4.52	2,900 – 3,100	16.83	2.81	3,467
	กล่องอาหาร	25.01 – 27.06	7.75 – 9.65	3,500 – 4,000	22.53	3.41	3,795

จากตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าบรรจุภัณฑ์ที่นำไปใช้งานนั้นมีหลากหลาย ซึ่งแต่ละการใช้งานจะมีค่าสมบัติเชิงกลต่างกัน เช่น ในกรณีที่น่าไปผลิตเป็นกล่องผลไม้ จะเลือกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติความทนแรงดึง ณ จุดครากตามที่กำหนดคือ PLA/PP 50/50 หรือ PLA/PP 30/70 ก็ได้ แต่ทั้งนี้ต้องดูสมบัติความทนแรงกระแทกด้วย ซึ่งอัตราส่วนที่มีค่าความทนแรงกระแทกอยู่ในช่วง 2,900-3,100 J/m² จะประกอบไปด้วยอัตราส่วนผสมที่ PLA/PP/PP-g-MAH/DCP 50/50/0.7/0.07, 30/70/0.7/0.03 และ 30/70/0.7/0.07 จึงมาดูด้านเชิงมูลค่าโดยเปรียบเทียบค่าความทนแรงกระแทกต่อบาท พบว่าที่ PLA/PP/PP-g-MAH/DCP 30/70/0.7/0.03 มีค่าความทนแรงกระแทกต่อบาทมากที่สุด ใน 3 อัตราส่วนนี้ ซึ่งเท่ากับ 15.57 ดังนั้นอัตราส่วนผสมนี้จึงเหมาะสำหรับการผลิตกล่องใส่ผลไม้สีเหลี่ยม และนอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่าในสมบัติเชิงกลที่มีความแข็งแรงไม่สูงมาก เช่น ถ้วยวุ้น หรือแก้วพลาสติกที่บรรจุน้ำตามร้านขายน้ำทั่วไป ก็ควรเลือกผลิตที่อัตราส่วนผสมที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายลง แต่ยังคงสามารถตอบสนองความต้องการของการนำไปใช้งานได้

จากงานวิจัยนี้จะให้พอลิเมอร์ผสมที่สามารถนำไปใช้งานบรรจุภัณฑ์ประเภทรูปทรงกึ่งแข็งตัว (Semi Rigid Forms) เช่น กล่องอาหาร ขวดน้ำดื่ม แก้ว ขวดใส่เครื่องดื่ม ถาด และตะกร้า เป็นต้น

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

1. การเพิ่ม PP ลงใน PLA มีผลทำให้ค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่ ความทนแรงดึงสูงสุด, ความทนแรงดึง ณ จุดคราก, มอดูลัสของยัง, ความแข็งและความทนแรงกระแทกลดลง ในขณะที่ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

2. การเพิ่ม PP-g-MAH และ DCP ลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ในทุกสัดส่วนมีผลให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่ ความทนแรงดึงสูงสุด, ความทนแรงดึง ณ จุดคราก, มอดูลัสของยัง, ความแข็งและความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดให้ผลลดลง

3. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของค่าความทนแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นจากเดิม 18.11, 12.49 และ 10.63 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 23.52 ± 0.33 , 17.79 ± 0.73 และ 16.90 ± 0.36 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 29.85, 42.47 และ 59.03 ตามลำดับ

4. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากเพิ่มขึ้นจากเดิม 16.54, 12.03 และ 9.29 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 20.93 ± 0.83 , 16.87 ± 0.31 และ 16.63 ± 0.39 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 26.56, 40.27 และ 79.10 ตามลำดับ

5. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นจากเดิม 447, 417 และ 369 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 602.36 ± 7.01 , 543.09 ± 8.32 และ 410.17 ± 6.27 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 26.20, 30.31 และ 11.31 ตามลำดับ

6. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงจากเดิม 3.28, 3.44 และ 3.74 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 2.65 ± 0.14 , 1.96 ± 0.07 และ 2.36 ± 0.08 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 19.29, 43.12 และ 36.86 ตามลำดับ

7. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิม 76, 76 และ 71 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 78.89 ± 0.14 , 77.36 ± 0.19 และ 75.72 ± 0.43 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 3.65, 1.79 และ 6.32 ตามลำดับ

8. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP ที่มีการเติม PP-g-MAH ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 phr และ DCP ระหว่าง 0.03 ถึง 0.07 phr จะให้ค่าเฉลี่ยของความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจากเดิม 3,246 1,203 และ 2,208 ที่ PLA/PP เท่ากับ 70/30, 50/50 และ 30/70 เป็น 3,905+54, 2,791+206 และ 3,061+195 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 20.32, 131.95 และ 38.62 ตามลำดับ

9. อัตราส่วนผสม PLA/PP/PP-g-MAH/DCP เท่ากับ 70/30/0.3/0.03 ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุด, ความทนแรงดึง ณ จุดครากและความแข็งสูงสุด เท่ากับ 26.75 MPa, 22.53 MPa, และ 81 ตามลำดับ

10. อัตราส่วนผสม PLA/PP/PP-g-MAH/DCP เท่ากับ 70/30/0.7/0.07 ให้ค่ามอดูลัสของยังและความทนแรงกระแทกสูงสุด เท่ากับ 664 MPa และ 4,051 J/m² ตามลำดับ

11. อัตราส่วนผสม PLA/PP/PP-g-MAH/DCP เท่ากับ 30/70/0/0 ให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด เท่ากับ 3.74

12. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP เท่ากับ 70/30 พบว่าสมบัติความทนแรงดึงสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดเมื่อใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 47.73

13. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP เท่ากับ 50/50 พบว่าสมบัติความทนแรงกระแทกมีการเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดเมื่อใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 201.98

14. พอลิเมอร์ผสม PLA/PP เท่ากับ 30/70 พบว่าสมบัติความทนแรงดึง ณ จุดครากมีการเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดเมื่อใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และสารริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 86.43

15. ปัจจัย PP, PP-g-MAH และ DCP มีความสัมพันธ์กับผลของสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติด้วยค่า R² (adj) ระหว่าง 0.7 – 0.98

16. สมการที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปทำนายสมบัติเชิงกลพอลิเมอร์ผสม PLA/PP ทั้งนี้สมการที่ได้ยังไม่ มีการพิสูจน์ความแม่นยำ ดังนั้นหากจะนำไปใช้ต่อควรจะทำการศึกษาตรวจสอบความแม่นยำของสมการก่อน โดยการทดลองเพิ่มเติมนอกอัตราส่วนที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้

6.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการผสมพอลิเมอร์ด้วยวิธีการอัดรีดแบบสองสกรู (Twin screw extruder) และทุกสภาวะที่ทำการผสมจะควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากันที่อุณหภูมิ 175-190 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีที่ใส่เพิ่มเติมลงไปเพียงเท่านั้น ดังนั้นในบางสภาวะที่พอลิเมอร์มีความหนืดมากเกินไป อุณหภูมิที่ใช้นี้อาจไม่เพียงพอในการทำให้พอลิเมอร์แตกตัวและสามารถเข้ารวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ จึงเป็นข้อจำกัดในการศึกษา ดังนั้นข้อเสนอแนะงานวิจัยจึงมีดังนี้

1. ทำการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PP

2. ทำการทดลองด้วยเทคนิควิธีขึ้นรูปแบบอื่นเพื่อศึกษาความแตกต่างของแต่ละวิธีว่าวิธีใดเหมาะสมแก่การทำพอลิเมอร์ผสม รวมไปถึงความเหมาะสมในการขึ้นรูปต่อการนำพอลิเมอร์ไปใช้งาน
3. ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมในสมบัติด้านอื่นๆ เช่น สมบัติการซึมผ่าน, สมบัติทางความร้อน, ความสามารถในการย่อยสลายหลังจากนำมาผสมกับพอลิเมอร์ชีวภาพ เป็นต้น





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

1. ไทยพีบีเอส. กรมควบคุมมลพิษเผยไทยผลิตขยะพลาสติก-โฟม 2.7 ล้านตันต่อปี เป็นถุงพลาสติก ร้อยละ 80 หรือ 5,300 ล้านต่อวัน. 2558 26 พฤศจิกายน 2559]; Available from: <http://news.thaipbs.or.th/content/5647>.
2. TCDC. พลาสติกชีวภาพ: ทางเลือกที่ยั่งยืน. 2558 27 พฤศจิกายน 2559]; Available from: <http://news.thaipbs.or.th/content/5647>.
3. รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. ปฏิกริยาพอลิเมอร์โรเซชัน. 2558 8 กุมภาพันธ์ 2560]; Available from: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/Slide%20FREE%20RADICAL%20POLYMERIZATION.pdf>.
4. เสาวรจน ช่วยจตุจติร, เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์1. 2541, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. รจนา พรประเสริฐสุข, เอกสารประกอบการสอนวิชาการขึ้นรูปพอลิเมอร์. 2556, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. Qin, Y., et al., *Quality evaluation of hot peppers stored in biodegradable poly(lactic acid)-based active packaging*. Scientia Horticulturae, 2016. 202: p. 1-8.
7. Hwang, S.W., et al., *Grafting of maleic anhydride on poly(L-lactic acid). Effects on physical and mechanical properties*. Polymer Testing, 2012. 31(2): p. 333-344.
8. Ku Marsilla, K.I. and C.J.R. Verbeek, *Modification of poly(lactic acid) using itaconic anhydride by reactive extrusion*. European Polymer Journal, 2015. 67: p. 213-223.
9. บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์. สารน่ารู้: ความรู้และงานวิจัยไบโอพลาสติกของเอ็มเทค. 2559 12 ธันวาคม 2559]; Available from: <http://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/1314->.
10. สถาบันพลาสติก. บรรจุภัณฑ์พลาสติกกับทิศทางในอุตสาหกรรมอาหาร. 2555 12 ธันวาคม 2559]; Available from:

http://www.thaiplastics.org/content_attachment/attach/plasticsforesightvol.3_.pdf.

11. Ploypetchara, N., et al., *Blend of Polypropylene/Poly(lactic acid) for Medical Packaging Application: Physicochemical, Thermal, Mechanical, and Barrier Properties*. Energy Procedia, 2014. 56: p. 201-210.
12. Shi, D., et al., *Functionalization of isotactic polypropylene with maleic anhydride by reactive extrusion: mechanism of melt grafting*. Polymer, 2001. 42(13): p. 5549-5557.
13. Detyothin, S., et al., *Reactive functionalization of poly(lactic acid), PLA: Effects of the reactive modifier, initiator and processing conditions on the final grafted maleic anhydride content and molecular weight of PLA*. Polymer Degradation and Stability, 2013. 98(12): p. 2697-2708.
14. Pivsa-Art, S., et al., *Effect of Compatibilizer on PLA/PP Blend for Injection Molding*. Energy Procedia, 2016. 89: p. 353-360.
15. Ebadi-Dehaghani, H., et al., *Experimental and theoretical analyses of mechanical properties of PP/PLA/clay nanocomposites*. Composites Part B: Engineering, 2015. 69: p. 133-144.
16. Nagarajan, V., A.K. Mohanty, and M. Misra, *Reactive compatibilization of poly trimethylene terephthalate (PTT) and polylactic acid (PLA) using terpolymer: Factorial design optimization of mechanical properties*. Materials & Design, 2016. 110: p. 581-591.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัทธนันท์ จริยะกุลสิทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 5 มกราคม พ.ศ.2536 จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า และเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ที่คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากนั้นสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท ในปี การศึกษา 2557 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม อุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2558

