

อิทธิพลของการผสมพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใหม่ต่อคุณสมบัติเชิงกลและดัชนีการหลอมไหล



นายจิระเชษฐ บัญแก้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF RECYCLED POLYPROPYLENE BLENDS ON MECHANICAL PROPERTIES AND MELT
FLOW INDEX

Mr. Chirachet Boonkeaw

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลของการผสมพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใหม่ต่อ
คุณสมบัติเชิงกลและดัชนีการหลอมไหล

โดย

นายจิระเชษฐ บัญแก้ว

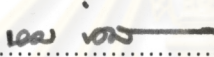
สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

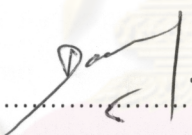
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

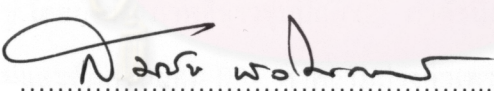
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

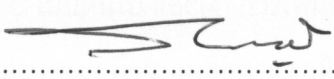

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพ็งศึก)

จิระเชษฐ บัญแก้ว : อิทธิพลของการผสมพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใหม่ต่อคุณสมบัติเชิงกลและ
ดัชนีการหลอมไหล (EFFECT OF RECYCLED POLYPROPYLENE BLENDS ON MECHANICAL
PROPERTIES AND MELT FLOW INDEX) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดา
เนตร, 186 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสม และอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิ
โพรไพลีนใหม่ (Virgin Polypropylene; PP) กับพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่ (Recycled
Polypropylene; PR) ที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าอยู่ระหว่าง
170-270 °C สัดส่วนในการผสมที่ 33, 100, 300 และ 900 ส่วนต่อ 100 ส่วนของพอลิโพรไพลีนใหม่ (Part per
hundred PP resin; phr) ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธีกดอัดด้วยความร้อน (Hot press) ที่ความดัน 50 กิโลกรัม/ตาราง
เซนติเมตร นาน 15 นาที การวิจัยได้แบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ (1) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการหลอมและ
สัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 และ (2) ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนการผสมและจำนวน
ครั้งของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 นำชิ้นงานที่ได้ทดสอบ ดัชนีการหลอมไหล
โครงสร้างระดับจุลภาค ความถ่วงจำเพาะ ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น เปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุด
ขาด ความแข็ง และความทนต่อแรงกระแทก

จากการทดลอง พบว่า (1) พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมไม่เกิน 3 ครั้ง สามารถนำกลับมาผสมกับพอลิ
โพรไพลีนใหม่ได้ถึง 900 phr โดยยังคงสภาพสีขาวขุ่นปกติ (2) ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ
จำนวนครั้งของการหลอมใหม่และสัดส่วนผสม (3) ค่าความถ่วงจำเพาะ ความแข็ง และความทนต่อแรง
กระแทก ไม่เปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 และอุณหภูมิการหลอม
ขึ้นรูประหว่าง 190-240 °C ที่ระดับความชื้น 95% โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.901 ± 0.002 73.6 ± 0.1 (shore
D) และ 4.47 ± 0.03 กิโลจูล/ตารางเมตร ตามลำดับ ขณะที่ค่าความทนต่อแรงดึง และโมดูลัสความยืดหยุ่น มี
ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 34.2 ± 0.1 MPa และ 753 ± 0.2 MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าความทนต่อแรงดึงและโมดูลัสมี
ค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 245 °C เป็นต้นไป และ(4) การเพิ่มปริมาณการผสมและจำนวนครั้งของพอลิ
โพรไพลีนที่ผ่านการหลอม มีผลให้ Patchwork มีขนาดเล็กลงและมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้ค่า
ความทนต่อแรงกระแทกและอัตราการยืดตัวของชิ้นงานลดลง ขณะที่ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น
และความแข็งมีค่าสูงขึ้น

ภาควิชา..... วิศวกรรมอุตสาหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา..... วิศวกรรมอุตสาหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2552

4970757921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORDS : RECYCLED / POLYPROPYLENE / RE-PROCESS

CHIRACHET BOONKEAW : EFFECT OF RECYCLED POLYPROPYLENE BLENDS ON MECHANICAL PROPERTIES AND MELT FLOW INDEX. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D., 186 pp.

The research aimed to study on effect of blending ratio and forming temperature of virgin polypropylene (PP) blended with recycled polypropylene (PR) on physical and mechanical properties. Forming temperatures of the polymer blends which between 170 to 270 °C were studied. The blending ratios of the polymers were that of 33, 100, 300 and 900 part per hundred PP resin (phr). The dry blends were molten using hot press at 50 kg/cm² for 15 minutes. There were two steps of the experiments that (1) studying the effect of forming temperatures and blending ratio of the 1st time recycled polypropylene, and (2) studying the effect of blending ratios and numbers of re-process polypropylene from 1 to 6 times. The physical and mechanical properties of the specimens obtained were performed such as melt flow index, microstructure, specific gravity, tensile strength, modulus of elasticity, hardness and impact strength.

The experimental results were found that (1) the PP reproduced with less than 3 times could be blended with the virgin PP up to 900 phr having still the stability, (2) melt flow index increased with increasing of temperature and the numbers of re-process, (3) the specific gravity, hardness and impact strength of the polymers blended with the first time recycled, which were not changed with the compositions being less than 900 phr and the temperature during 190-240°C with the statistical confidential interval of 95%, had the averages of 0.901±0.002, 73.6±0.1 (shore D), and 4.47±0.03 kJ/m² respectively, whereas the tensile strength and modulus of elasticity were 34.2 ±0.1 MPa ,and 753 ± 0.2 MPa respectively. However, the tensile strength and modulus of elasticity were decreased when the temperatures were higher than 245 °C, and (4) the increasing of the compositions and number of reprocesses of the polymer led the small patchworks and more semicrystallized which provided the impact strength and elongation at break decreased while the tensile strength, modulus, and hardness of elastic and hardness increased.

Department : Industrial Engineering Student's Signature..... 

Field of study : ... Industrial Engineering Advisor's Signature..... 

Academic year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและเสนอแนวทางในการทำวิจัย และได้อบรมสั่งสอนการใช้ชีวิตและการปฏิบัติตนในสังคม

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.สมชาย พวงเพ็งศึก และ รศ. จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ข้อคิดเห็นในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบ รวมถึงบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนสมาชิกชมรมวิศวกรรมเคมี มหาลัยสงขลานครินทร์ (Neer'36) และศิษย์เก่าหาดใหญ่วิทยาลัยห้อง 10 ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจมาตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ นายสมกิจ – นางเอื้ออารีย์ บุญแก้ว บิดา-มารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิจัย ครั้งนี้ ทำให้งานนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎี.....	5
2.1.1 พอลิโพรไพลีน.....	5
2.1.2 การบดพลาสติก.....	5
2.1.3 การเชื่อมของพอลิเมอร์.....	6
2.1.4 ความสำคัญของการหลอมไหล.....	8
2.1.5 ความถ่วงจำเพาะ.....	10
2.1.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์.....	10
2.1.7 การทดสอบแรงดึง.....	10
2.1.8 การทดสอบความแข็ง.....	12
2.1.9 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทก.....	15
2.1.10 การวิเคราะห์การถดถอย.....	17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1 การเตรียมส่วนผสมและการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	25

	หน้า
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	25
3.1.2 การเตรียมพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่.....	25
3.1.3 การเตรียมส่วนผสม.....	26
3.1.4 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบเพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติ.....	26
3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ.....	29
3.2.1 ดัชนีการหลอมไหล.....	29
3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม.....	30
3.2.3 ความถ่วงจำเพาะ.....	30
3.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล.....	31
3.3.1 คุณสมบัติภายใต้แรงดึง.....	31
3.3.2 ความแข็ง.....	33
3.3.3 ความทนต่อแรงกระแทก.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	38
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ.....	39
4.1.1 ผลการทดสอบดัชนีการหลอมไหล.....	39
4.1.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม.....	60
4.1.3 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ.....	67
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล.....	71
4.2.1 ความทนต่อแรงดึง.....	71
4.2.2 โมดูลัสของความยืดหยุ่น.....	75
4.2.3 เปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด.....	79
4.2.4 ความแข็ง.....	83
4.2.5 ความทนต่อแรงกระแทก.....	87
4.3 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ.....	91
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล.....	91
4.3.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล.....	107
4.4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสม.....	127
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ.....	127

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล.....	127
4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล.....	129
4.5 สรุปสมการความสัมพันธ์.....	143
บทที่ 5 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	146
5.1 คุณสมบัติทางกายภาพ.....	146
5.1.1 ดัชนีการหลอมไหล.....	147
5.1.2 โครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม.....	148
5.1.3 ความถ่วงจำเพาะ.....	149
5.2 คุณสมบัติทางเชิงกล.....	150
5.2.1 ความทนต่อแรงดึง.....	150
5.2.2 โมดูลัสความยืดหยุ่น.....	151
5.2.3 เปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด.....	152
5.2.4 ความแข็ง.....	153
5.2.5 ความทนต่อแรงกระแทก.....	154
5.3 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล.....	155
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	156
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	156
6.2 อุปสรรคและปัญหาในการวิจัย.....	157
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	157
รายการอ้างอิง.....	158
ภาคผนวก.....	161
ภาคผนวก ก.....	162
ภาคผนวก ข.....	164
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	186

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพอลิโพรไพลีน.....	6
ตารางที่ 2.2 การแบ่งกลุ่มของการทดสอบแบบรีอคเวสต์ หัวกดและแรงที่ใช้.....	16
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม C-1 และ C-2.....	20
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติเชิงกลของพอลิโพรไพลีนใหม่กับพอลิโพรไพลีนหลอมใหม่.....	21
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของการผสมระหว่าง PP และ PR ₁ กับอุณหภูมิสำหรับการทดสอบ คุณสมบัติต่างๆ.....	27
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมระหว่าง PP และ PR _n (n=1,2,...,6) และสัญลักษณ์ที่ใช้.....	28
ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราการหลอมไหลกับสัดส่วนผสม PR ₁ และอุณหภูมิการหลอม..	40
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราการหลอมไหลกับสัดส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n}	41
ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิการหลอม 190 °C.....	45
ตารางที่ 4.4 ค่าอัตราการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิการหลอม 210 °C.....	46
ตารางที่ 4.5 ค่าอัตราการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิการหลอม 230 °C.....	47
ตารางที่ 4.6 ค่าอัตราการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 33PR _{1->n} อุณหภูมิการหลอม 210 °C.....	48
ตารางที่ 4.7 ค่าอัตราการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 100PR _{1->n} อุณหภูมิการหลอม 210 °C.....	49
ตารางที่ 4.8 ค่าอัตราการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 300PR _{1->n} อุณหภูมิการหลอม 210 °C.....	50
ตารางที่ 4.9 ค่าอัตราการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 900PR _{1->n} อุณหภูมิการหลอม 210 °C.....	51
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับอุณหภูมิการ หลอม.....	57
ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม PR _{1-n} กับอุณหภูมิการ หลอม 210 °C.....	57

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับอุณหภูมิการ หลอม 190-230 °C และระยะเวลาการให้ความร้อน.....	58
ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} และระยะเวลา การให้ความร้อน อุณหภูมิการหลอม 210 °C.....	59
ตารางที่ 4.14 ค่าความถ่วงจำเพาะกับสัดส่วนผสม PR ₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C...	68
ตารางที่ 4.15 ค่าความถ่วงจำเพาะกับสัดส่วนผสมของ PR _{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C..	69
ตารางที่ 4.16 ค่าความทนต่อแรงดึงสัดส่วนผสม PR ₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C.....	72
ตารางที่ 4.17 ค่าความทนต่อแรงดึงกับสัดส่วนผสมของ PR _{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C	73
ตารางที่ 4.18 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสัดส่วนผสม PR ₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C.....	76
ตารางที่ 4.19 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับสัดส่วนผสมของ PR _{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C	77
ตารางที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด กับสัดส่วนผสม PR ₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C.....	80
ตารางที่ 4.21 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด กับสัดส่วนผสมของ PR _{1->n} อุณหภูมิการ ขึ้นรูป 210 °C.....	81
ตารางที่ 4.22 ค่าความแข็ง กับสัดส่วนผสม PR ₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C.....	84
ตารางที่ 4.23 ค่าความแข็ง กับสัดส่วนผสมของ PR _{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C.....	85
ตารางที่ 4.24 ค่าความทนต่อแรงกระแทกกับสัดส่วนผสม PR ₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C.....	88
ตารางที่ 4.25 ค่าความทนต่อแรงกระแทก กับสัดส่วนผสมของ PR _{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C.....	89
ตารางที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ ผสม PR ₁ กับอุณหภูมิการหลอม (T).....	93
ตารางที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ ผสม PR _{1->n} กับสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม 210 °C.....	93
ตารางที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ ผสม PR ₁ กับ อุณหภูมิการหลอม (T) และระยะเวลาในการให้ความร้อน (t)..	94
ตารางที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ PR _{1->n} กับสัดส่วนผสม และระยะเวลาให้ความร้อน (t).....	95

ตารางที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ ของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับอุณหภูมิกว๊นรูป (T).....	96
ตารางที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ ของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} กับสัดส่วนผสม.....	97
ตารางที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับอุณหภูมิกว๊นรูป (T).....	98
ตารางที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} กับ สัดส่วนผสม.....	98
ตารางที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับอุณหภูมิกว๊นรูป (T).....	100
ตารางที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} กับสัดส่วนผสม.....	100
ตารางที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับอุณหภูมิกว๊นรูป (T).....	102
ตารางที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} กับสัดส่วนผสม	102
ตารางที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความแข็ง (shore:D) ของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับอุณหภูมิกว๊นรูป (T).....	104
ตารางที่ 4.39 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความแข็ง (shore:D) ของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} กับสัดส่วนผสม.....	104
ตารางที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับอุณหภูมิกว๊นรูป (T).....	106
ตารางที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} กับสัดส่วนผสม.....	106
ตารางที่ 4.42 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลอัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับ อุณหภูมิกว๊นรูป (T).....	109
ตารางที่ 4.43 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลอัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n}	109

ตารางที่ 4.44 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลอัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับ อุณหภูมิการหลอม (T) และระยะเวลาในการให้ความร้อน (t).....	112
ตารางที่ 4.45 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลอัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} กับระยะเวลาในการให้ความร้อน (t).....	112
ตารางที่ 4.46 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความถ่วงจำเพาะของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n}	114
ตารางที่ 4.47 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูป 240-270 °C.....	117
ตารางที่ 4.48 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n}	117
ตารางที่ 4.49 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูป 240-270 °C.....	120
ตารางที่ 4.50 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n}	120
ตารางที่ 4.51 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PR ₁ กับ อุณหภูมิการขึ้นรูป (T).....	122
ตารางที่ 4.52 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n}	122
ตารางที่ 4.53 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n}	124
ตารางที่ 4.54 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n}	126
ตารางที่ 4.55 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกับสัดส่วนผสม PR ₁ และ อุณหภูมิ.....	143
ตารางที่ 4.56 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกับสัดส่วนผสมและจำนวนครั้งของพอลิไพโรไฟไลนที่นำกลับมาหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6.....	144
ตารางที่ 4.57 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกับคุณสมบัติ.....	145
ตารางที่ 5.1 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล.....	155

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องวัดอัตราการไหล.....	9
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียด.....	12
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงกระบวนการเตรียมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่.....	27
รูปที่ 3.2 เครื่องอัดร้อน (Hot Press) สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน.....	34
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดอัตราการไหล Kayeness Series 4000.....	35
รูปที่ 3.4 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	35
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบคุณสมบัติภายใต้แรงดึง Shimadzu.....	36
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง Shore scale D น้ำหนักกด 5 กิโลกรัม.....	36
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงกระแทก Yasuda.....	37
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับอุณหภูมิการหลอม จำแนกตาม สัดส่วนผสมของ PR ₁	42
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับสัดส่วนผสม PR ₁ จำแนกตาม อุณหภูมิการหลอม.....	42
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่าน การหลอมใหม่จำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6.....	43
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระยะเวลาการให้ความร้อน จำแนก ตามสัดส่วนผสม PR ₁ อุณหภูมิการหลอม 190 °C.....	52
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระยะเวลาการให้ความร้อน จำแนก ตามสัดส่วนผสม PR ₁ อุณหภูมิการหลอม 210 °C.....	52
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระยะเวลาการให้ความร้อน จำแนก ตามสัดส่วนผสม PR ₁ อุณหภูมิการหลอม 230 °C.....	53
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระยะเวลาให้ความร้อนสัดส่วนผสม 33 phr จำแนกตามการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 อุณหภูมิการ หลอม 210 °C.....	53
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระยะเวลาให้ความร้อน สัดส่วนผสม 100 phr จำแนกตามการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 อุณหภูมิการ หลอม 210 °C.....	54

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหลอมไหลกับระยะเวลาให้ความร้อน สัดส่วนผสม 300 phr จำแนกตามการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 อุณหภูมิการหลอม 210 °C.....	54
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหลอมไหลกับระยะเวลาให้ความร้อน สัดส่วนผสม 900 phr จำแนกตามการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 อุณหภูมิการหลอม 210 °C.....	55
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PP (b) PR ₁ 100 phr และ (c) PR ₁ 900 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 190 °C กำลังขยาย 100 เท่า.....	61
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PP (b) PR ₁ 100 phr และ (c) PR ₁ 900 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 230°C กำลังขยาย 100 เท่า.....	62
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PP (b) PR ₁ 100 phr และ (c) PR ₁ 900 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 270°C กำลังขยาย 100 เท่า.....	63
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PR ₁ 33 phr (b) PR ₁₋₃ 33 phr และ (c) PR ₁₋₆ 33 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 210°C กำลังขยาย 100 เท่า.....	64
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PR ₁ 100 phr (b) PR ₁₋₃ 100 phr และ (c) PR ₁₋₆ 100 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 210°C กำลังขยาย 100 เท่า.....	65
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PR ₁ 900 phr (b) PR ₁₋₃ 900 phr และ (c) PR ₁₋₆ 900 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 210°C กำลังขยาย 100 เท่า.....	66
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR ₁ กับ อุณหภูมิการขึ้นรูป	70
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะ กับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6.....	70
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR ₁ กับ อุณหภูมิการขึ้นรูป.....	74
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6.....	74
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR ₁ กับ อุณหภูมิการขึ้นรูป.....	78

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6.....	78
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR _{1->n} กับอุณหภูมิการขึ้นรูป.....	82
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6.....	82
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR ₁ กับอุณหภูมิการขึ้นรูป.....	86
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6.....	86
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR ₁ กับอุณหภูมิการขึ้นรูป.....	90
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงกระแทกกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6.....	90
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหลอมไหลกับความถ่วงจำเพาะของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C.....	132
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหลอมไหลกับความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C.....	132
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหลอมไหลกับโมดูลัสของความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C.....	133
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหลอมไหลกับเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C.....	133
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหลอมไหลกับความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C.....	134
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหลอมไหลกับความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C.....	134
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PR _{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C.....	135

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พลาสติก ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ทุกคนมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกเป็นสารสังเคราะห์ สามารถนำไปแปรรูปเป็นสิ่งของต่างๆ ได้หลายลักษณะทั้งขนาดเล็ก ขนาดใหญ่ รวมทั้งยังมีความโดดเด่นในหลายๆ ด้าน มีความทนทานแข็งแรง ทนทานต่อสภาวะอากาศและสิ่งแวดล้อมปกติได้เป็นอย่างดี จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง

ที่ผ่านมามีการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกผสม มีจุดประสงค์ 2 ประการ (Bertin S. and Robin J. , 2002) คือ

- ประการแรกเพื่อพัฒนาวัสดุชนิดใหม่และประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุ
- ประการที่สองเป็นการผสมพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว เพื่อประโยชน์สำหรับการประหยัด รักษาสิ่งแวดล้อม และเพิ่มผลกำไร

ดังนั้นแล้วในสถานการณ์ปัจจุบัน ขณะที่ประเทศไทยกำลังประสบปัญหาด้านเศรษฐกิจอยู่นี้ การใช้ทรัพยากรอย่างประหยัดและคุ้มค่าเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดนั้นมีความจำเป็นมากขึ้น เช่น การนำวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือชิ้นงานที่คุณภาพต่ำกว่ามาตรฐาน ผ่านกระบวนการหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในระดับอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งจำเป็น อย่างไรก็ตาม การนำพลาสติกหลอมกลับมาใช้ใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (Small and Medium Enterprises ; SMEs) มักจะทดลองผสมวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตโดยไม่มีฐานข้อมูลและความสามารถในการพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชิ้นงานที่เกิดขึ้นใหม่ได้ ดังนั้นการทำฐานข้อมูลสำหรับการนำพลาสติกหลอมเพื่อนำกลับมาแปรรูปใหม่ จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการที่จะทำนายคุณสมบัติและคุณภาพของชิ้นงานที่เกิดขึ้นใหม่

สำหรับพอลิโพรไพลีนนั้น เป็นพอลิเมอร์ที่มีปริมาณการใช้งานเป็นอันดับสองของโลก สามารถลดหย่อนน้ำหนักต่อการดูดซึบได้ดี ยืดหยุ่น แข็งแกร่ง ไขมันซึมผ่านได้ (ทานตะวัน และคณะ , 2544) มีราคาไม่แพง คุณภาพเหมาะสมกับราคา และยังสามารถที่จะปรับปรุงคุณสมบัติด้านเชิงกลและความร้อนโดยการผสมสารตัวเติม (Additives) (Brachet P. et al, 2007)

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอมพอสิตโพลีโพรไพลีนห่อหุ้มที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled polypropylene) กับโพลีโพรไพลีนใหม่ (Virgin polypropylene)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง โพลีโพรไพลีนใหม่ (Polypropylene:PP) กับ โพลีโพรไพลีนห่อหุ้มใช้ใหม่(Recycled Polypropylene:PR)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้มีการจำกัดขอบเขตของการศึกษาไว้ดังนี้

3.1 การผสมระหว่างโพลีโพรไพลีนใหม่ (PP) กับ โพลีโพรไพลีนห่อหุ้มใหม่ครั้งที่ n (PR_n ; n คือ จำนวนครั้งของการห่อหุ้มใหม่ ตั้งแต่ 1,2,...,6) โดยลักษณะการผสม จะเป็นการผสมแบบ ส่วนต่อร้อยส่วนโพลีโพรไพลีนใหม่ (Part per Hundred PP resin : phr) มีสัดส่วนของการผสม คือ 0, 33, 100, 300 และ 900 phr

3.2 โพลีโพรไพลีนที่นำกลับมาห่อหุ้มใช้ใหม่ ไม่ได้กำหนดขนาดของพลาสติกที่ผ่านการบดที่แน่นอน

3.3 คุณสมบัติทางกายภาพ จะทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพดังนี้

- 1) ดัชนีการหลอมไหลตัว (Melt flow index)
- 2) การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (Scanning electron microscope)
- 3) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

3.4 สมบัติเชิงกลที่จะทำการศึกษาที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานหลักๆ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

- 1) ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)
- 2) โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)
- 3) เปอร์เซ็นต์ของความยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break)
- 4) ความแข็ง (Hardness)
- 5) ความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

3.5 การทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM (The American Society for Testing and Material) ดังนี้

1) ดัชนีการหลอมไหลทดสอบตามมาตรฐาน D-1238

ความถ่วงจำเพาะทดสอบตามมาตรฐาน D-792

ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสของความยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุด

ขาด ทดสอบตามมาตรฐาน D-638

ความแข็ง ทดสอบตามมาตรฐาน D-2240

ความทนต่อแรงกระแทก ทดสอบตามมาตรฐาน D-256

2) ทำการทดลองซ้ำ 2 การทดลอง ตัวอย่าง 5 ชิ้นงานต่อ 1 การทดลอง ในการทดสอบคุณสมบัติในข้อ 3.3 และ 3.4

3) ความเร็วของเครื่องทดสอบแรงดึง (cross head speed) ที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนต่อแรงดึง โมดูลัสของความยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์ของความยืด ณ จุดขาด กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาทีทุกชิ้นงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษางานวิจัยมีดังนี้

1 ผลการศึกษาทำให้ทราบถึงผลกระทบของสัดส่วนการผสมของ PR_n และระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่มีผลต่อดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม

2 ผลการศึกษาทำให้ทราบถึงผลกระทบของสัดส่วนการผสมของ PR_n และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

3 ผลการศึกษาสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำนายคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

การศึกษางานวิจัยนี้ได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1 สํารวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2 กำหนดการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

2.1 ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและสัดส่วนผสมที่มีผลต่อดัชนีการหลอมไหล ดังนี้

1) กำหนดปัจจัยของสัดส่วนผสม PR_1 คือ 0, 33, 100, 300 และ 900 phr ปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบดัชนีการหลอมไหล คือ 170, 190, 210, 230, 250 และ 270 °C และปัจจัยของระยะเวลาในการให้ความร้อน คือ 6,30, 90, 180, 360 และ 720 นาที

2) กำหนดปัจจัยของการผสม PR_n โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 6 และสัดส่วนการผสมตั้งแต่ 33, 100, 300 และ 900 phr และปัจจัยของระยะเวลาการให้ความร้อนตั้งแต่ 6,30, 90, 180, 360 และ 720 นาที

3) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบพิจารณาจากข้อ 2.1(1)

4) ทดสอบหาดัชนีการหลอมไหล

5) เก็บรวบรวมข้อมูล

6) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปโดยใช้ ดัชนีการหลอมไหล และการเสื่อมของพอลิเมอร์เป็นเงื่อนไข

2.2 ออกแบบการทดลองเพื่อหาผลกระทบของสัดส่วนการผสม PR_1 กับอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์ และผลกระทบของสัดส่วนผสม PR_n ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์ ดังนี้

1) ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีสัดส่วนการผสมของ PR_1 และอุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปตามหัวข้อ 5.2.1 (1)

2) ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีสัดส่วนผสมของ PR_n โดยใช้อุณหภูมิและสัดส่วนการผสมเช่นเดียวกับหัวข้อ 2.1(2) ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์

3) ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล

4) เก็บรวบรวมข้อมูล

5) นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลกระทบของสัดส่วน PR_1 กับ อุณหภูมิ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์ และผลกระทบของสัดส่วนการผสม PR_n ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล

3 สรุปผลวิจัย

4 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene , PP)

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP) จัดเป็นพอลิโอเลฟินอีกชนิดหนึ่งที่สำคัญจัดอยู่ในพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่มีคุณสมบัติหลายอย่างทั้ง chemical resistance ที่ดีเยี่ยม ความหนาแน่นต่ำ และมีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดในเทอร์โมพลาสติก รวมทั้งราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับคุณสมบัติ

พอลิโพรพิลีนแตกต่างจากพอลิเอทิลีนที่มีกลุ่มเมทิลยึดติดกับอะตอมของคาร์บอนรวม ทั้งยังมีจุดหลอมเหลวและความแข็งแรงของวัสดุภายใต้แรงดึง (tensile strength) สูงกว่า แต่มีความเป็นผลึกน้อยกว่าพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีนสามารถจัดได้ 3 กลุ่ม คือ

1. PP Homopolymer เป็นพอลิเมอร์พื้นฐานของพอลิโพรพิลีน ไม่สามารถเติมแต่ง
2. PP impact copolymer เป็นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารเติมแต่ง (Modifier) ด้านการกันกระแทกเพิ่มเข้าไป โดยทั่วไปจะใช้อีลาสโตเมอร์ เช่น ethylene/propylene rubber (EPR) การเพิ่ม impact modifier ด้วยการทำให้ blending
3. PP random copolymer เป็นพอลิโพรพิลีน ที่ถูกเติมแต่งด้วยโมโนเมอร์ที่ต่างกัน เอทิลีนเป็นโคโมโนเมอร์ที่ใช้เติมมากที่สุด ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพคือ optimal property และ impact resistance ที่ดีขึ้น Flexibility ที่สูงขึ้น และลดจุดหลอมเหลวลดลง พอลิโพรพิลีนชนิดนี้ใช้ใน blow molding, injection molding และ extrusion

2.1.2 การบดพลาสติก

การบดพลาสติกทำให้ชิ้นขนาดใหญ่มีขนาดเล็กลง และมีขนาดรูปร่างที่เหมาะสม ซึ่งสามารถนำไปแปรรูปต่อได้ หรือนำพลาสติกที่ใช้แล้วไปคอมปาวด์ เพื่อนำกลับมาแปรรูปใหม่ ดังนั้น เครื่องบดจึงมีความสำคัญกับการนำพลาสติกมาใช้ใหม่ (recycling) ในปัจจุบันการทำโดยการใช้เครื่องบด (cutting mill)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพอลิโพรไพลีน

Property	Unit	Polypropylene(Homopolymer)
Density	g/cm ³	0.90
Crystalline melting point	°C	176
Tensile strength	MPa	28
	lb _f /in ²	4000
Elongation at break	%	200
Hardness	Shore D	75

(ที่มา : หนังสือ Organics Polymer Chemistry)

2.1.3 การเสื่อมของพอลิเมอร์ (Polymer Degradation)

การเสื่อมของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของการนำไปใช้ โดยอาจแบ่งแยกลักษณะของการเสื่อมของพอลิเมอร์ได้ดังนี้

1. Thermal เกิดขึ้นขณะอยู่ในกระบวนการผลิต หรือที่อุณหภูมิสูง
2. Mechanical เกิดขึ้นขณะให้แรงหรือเกิดการแตกหักทางด้านกายภาพทำให้สายโซ่ขาดจากกัน
3. Ultrasonic เกิดจากเสียงที่มีความถี่พอดีที่จะทำให้สายโซ่สั้นสะเทือนและขาดจากกัน
4. Hydrolytic เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ที่มี Functional Group ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ (Esterification) ได้กรดและไกลคอล (Glycol) เป็นผลิตภัณฑ์
5. Chemical เกิดจากการกัดกร่อนทางเคมีหรือจากก๊าซ เช่น โอโซนเข้าไปทำลายโครงสร้างของพอลิเมอร์ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ขาด
6. Biological เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์เพียง 2-3 ชนิดเท่านั้นที่มี functional groups ที่จุลินทรีย์สามารถเข้าไปทำลายได้
7. Radiation เกิดจากการแผ่รังสี (Exposure) กับแสงอาทิตย์หรือการแผ่รังสีของพลังงานสูง พอลิเมอร์หรือสารปนเปื้อนจะดูดรังสีเหล่านี้เข้าไป ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์แยกออกจากกัน

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ขณะเกิดการเสื่อม ปรากฏได้หลายรูปแบบ ขึ้นกับชนิดกระบวนการเสื่อม คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

1. การเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ เกิดการลดลงของน้ำหนักโมเลกุล ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงกระแทก ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด การสูญเสียความแวววาว และการกัดกร่อนที่ผิว

2. การเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมี เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี คือ เกิดการฟอร์มตัวของ Functional Group เช่น การไม่อิ่มตัว การเกิดคาบอนิล ไฮดรอกซิล และไฮโดรเพอรอกไซด์

เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาการเสื่อมและการมีเสถียรภาพของพอลิเมอร์

1. กระบวนการทดสอบทางด้านเทคนิค การทดสอบทางด้านเทคนิค จะใช้ความทนทานของระยะเวลาของการใช้งานเป็นเกณฑ์ ตัวอย่างการทดสอบ เช่น Accelerated Aging, Air Oven Test นอกจากนี้อาจใช้เกณฑ์การเสื่อมลง (Deterioration) ของพอลิเมอร์มากกว่าพฤติกรรมทางกล โดยพอลิเมอร์หลายๆชนิด อาจสังเกตการณ์เสื่อมได้จากการเปลี่ยนสีของพอลิเมอร์ (Discoloration) ซึ่งเกิดขึ้นขณะสลายโซ่ถูกตัดขาดจากกัน

2. กระบวนการทดสอบทางด้านวิทยาศาสตร์ วิธีการแบ่งออกเป็น

วิธีการทดสอบทางกายภาพ (Physical Method) การศึกษาวิธีนี้ แบ่งออกเป็น

- 1) เทคนิคการวิเคราะห์ทางด้านน้ำหนักโมเลกุล
- 2) เทคนิคการวิเคราะห์ทางด้านความร้อน
- 3) การวิเคราะห์โดยสเปกโตรสโคปี (Spectroscopy)
- 4) การวิเคราะห์โดยวิธีโครมาโตกราฟี (Chromatography)

วิธีการวัดการดูดซับของ ออกซิเจนภายในเวลาที่ใช้งานและการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนเมื่อมี functional group

2.1.4 ความสำคัญของการหลอมไหล

ความหมายของ rheology สามารถให้คำจำกัดความว่าเป็นวิทยาศาสตร์การหลอมไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปของวัสดุ อย่างไรก็ตามความหมายของ rheology โดยทั่วไปกำหนดว่าเป็น fluid rheology สำหรับของเหลวทั่วไปการศึกษา rheology จะเกี่ยวข้องกับการวัดความหนืด ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันไฮดรอลิก rheology ของพอลิเมอร์มีความซับซ้อนมากกว่า เพราะของเหลวทางพอลิเมอร์จะแสดงพฤติกรรมที่ไม่มีรูปแบบ อีกทั้งยังความหนืดด้านแรงเฉือนที่ซับซ้อนคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น ปฏิกิริยาการผันผวนความเค้นปกติ และความหนืดด้านแรงดึง คุณสมบัติเกี่ยวกับ rheology ขึ้นอยู่กับดัชนีของแรงเฉือน น้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างของพอลิเมอร์ สัดส่วนผสมของสารเติมแต่งต่างๆ รวมทั้งอุณหภูมิด้วย

การศึกษา rheology เป็นสิ่งสำคัญที่สุดสำหรับพอลิเมอร์ โดยทั่วไปคุณสมบัติเชิงกลจะเป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตามพฤติกรรมเชิงกลยังเป็นที่น่าสนใจเพียงเล็กน้อยถ้ายังไม่สามารถผลิตได้อย่างรวดเร็ว และมีราคาถูก การหลอมไหลจะเกี่ยวข้องข้องกับกระบวนการผลิตและประกอบของวัสดุที่จะใช้เพื่อทำสิ่งใดสิ่งหนึ่งขึ้นมา พฤติกรรมการหลอมไหลเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการ injection molding compression molding blow molding cold-forming และ spinning of fibers ดังนั้น rheology จะเป็นสิ่งสำคัญสำหรับกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์

การวัดสมบัติการหลอมไหลที่มีความสำคัญต่อการแปรรูปพลาสติก (เจริญ นาคะสวรรค์ , 2545) นิยมวัดดัชนีการหลอมไหลและสมบัติกาลไหลแบบเฉือนและแบบยืด ดังนี้

1) การวัดดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index, MFI)

เป็นการวัดสมบัติการหลอมไหลโดยการใส่สภาวะทดสอบมาตรฐาน โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิและแรงกดที่กำหนด โดยมาตรฐาน ASTM D-1238 ตัวอย่างการทดสอบพอลิโพรไพลีน อุณหภูมิ 230 °C ภายใต้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ตัวอย่างแผนภาพแสดงเครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล แสดงตามรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยกระบอกลูกสูบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.57 มิลลิเมตร มีหัวตายคาปิลลารีที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.096 มิลลิเมตร ความยาว 8 มิลลิเมตร วางอยู่ในกระบอกลูโหะ

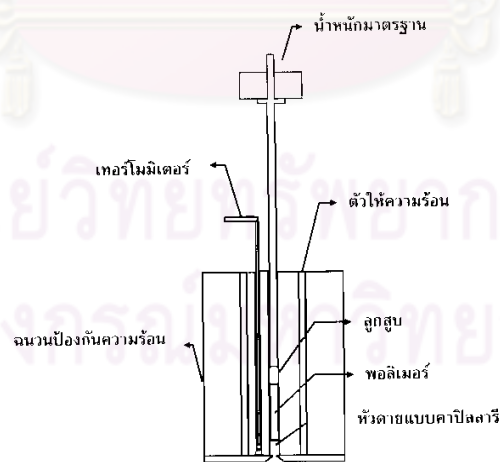
วิธีการทดสอบทำได้โดยการตั้งอุณหภูมิตามที่กำหนดในมาตรฐาน แล้วอัดพลาสติกลงในกระบอกลูกสูบให้ความร้อนจนพลาสติกหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน วางลูกสูบลงในกระบอกลูกสูบ เพิ่มน้ำหนักกดตามมาตรฐานของพลาสติกแต่ละชนิด ปลอมให้พอลิเมอร์หลอมที่มีฟองอากาศที่แผ่อยู่ไหลออกจากกระบอกลูกสูบจนหมด โดยการกดให้พลาสติกหลอมไหลระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นซึ่ง

น้ำหนักของพลาสติกหลอม ที่ไหลออกมาในช่วงเวลา 10 นาที ค่าที่ได้คือ ดัชนีการหลอมไหล ซึ่งมีหน่วยเป็นกรัมต่อ 10 นาที

ค่าดัชนีการหลอมไหลสามารถใช้ประเมินความหนืดเฉือนอย่างหยาบได้ แต่เป็นค่าดัชนีการหลอมไหลที่เกิดจากดัชนีเฉือนค่าต่ำเพียงค่าเดียว จึงมักนิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพ และเปรียบเทียบความเหมือนหรือความแตกต่างของพฤติกรรมของพลาสติกหลอมที่ดัชนีเฉือนต่ำ

2) การวัดรีโอโลยีโดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารีและแบบสลิต

การวัดสมบัติการหลอมไหลโดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบที่มีหัวตายเป็นท่อกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย (คาปิลลารี) และหัวตายที่เป็นช่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก (สลิต) เป็นการวิเคราะห์สมบัติการหลอมไหลเนื่องจากความดัน (pressure-driven flow) เทคนิคนี้เป็นที่นิยมมาก เพราะค่าสมบัติการหลอมไหลที่ได้ เช่น ดัชนีการเฉือน ความเค้นเฉือน และความเค้นยืด อยู่ในย่านเดียวกับค่าสมบัติการหลอมไหลในเครื่องแปรรูปชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.1 เครื่องวัดดัชนีการหลอมไหล

2.1.5 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นของของแข็งจะเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะชี้เฉพาะวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปของคุณสมบัติทางกายภาพ และบอกถึงระดับความเหมือนกันของตัวอย่างที่ทดสอบหรือจะเป็นตัวบอกความหนาแน่นเฉลี่ยของทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอาจมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก การสูญเสียความเป็นพลาสติก การดูดซับตัวละลาย ความเป็นรูพรุน ส่วนประกอบ หรือสาเหตุอื่นๆ

วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) จะทำตามมาตรฐาน ASTM D-792 วิธีการทดสอบแบบ A (Test Method A) การหาความถ่วงจำเพาะโดยการแทนที่น้ำ ซึ่งใช้ขวด Pyrometer ขนาด 10 ซีซี และนำมาคำนวณหาความถ่วงจำเพาะตามสมการต่อไปนี้

$$SG = \frac{a}{(a + w - b)} \quad (2.1)$$

- เมื่อ SG. = ความถ่วงจำเพาะ
- a = น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ชั่งในอากาศ (กรัม)
- w = น้ำหนักรวมของน้ำและภาชนะบรรจุ (กรัม)
- b = น้ำหนักรวมของน้ำ ชิ้นทดสอบและภาชนะบรรจุ (กรัม)

2.1.6 การตรวจสอบโครงสร้างของจุลภาคพอลิเมอร์

การตรวจสอบโครงสร้างของจุลภาคพอลิเมอร์นี้เป็นการศึกษาลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วว่ามีกระจายตัวของพอลิเมอร์เป็นอย่างไรโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

2.1.7 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึง (tensile test) เป็นการวัดความต้านทานของวัสดุโดยการให้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (static load) จนกระทั่งวัสดุขาดจากกัน ชิ้นงานทดสอบมีได้หลายลักษณะ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องทดสอบ หัวจับชิ้นทดสอบและขนาดแรงดึงที่ใช้

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะมีการกำหนดขนาดต่างๆ ไว้เป็นมาตรฐาน ไม่ว่าจะเป็ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวของชิ้นทดสอบ และรัศมีความโค้งของบริเวณปาล็อคเพื่อจับดึง

เมื่อมีการติดตั้งชิ้นทดสอบบนเครื่องทดสอบแล้ว จะมีการให้แรงดึง (F) ซึ่งเรียกว่า ภาระ (load) หรือแรงกระทำและมีเครื่องมือวัดการยืดตัว (strain gauge หรือ extensometer) ติดอยู่บนชิ้นทดสอบ เพื่อวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป ในช่วงความยาวเกจ จากนั้นทำการบันทึกค่าของแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอและความยาวของชิ้นทดสอบที่ยืดออกในช่วงของแรงต่างๆจนกระทั่งชิ้นงานขาด

กราฟความเค้นความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain Curve) ค่าของแรงและความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกนำมาเปลี่ยนเป็นค่าของความเค้นทางวิศวกรรม (engineering stress) และความเครียดทางวิศวกรรม (engineering strain) กราฟความเค้นความ-เครียด แสดงได้ตามรูปที่ 2.2

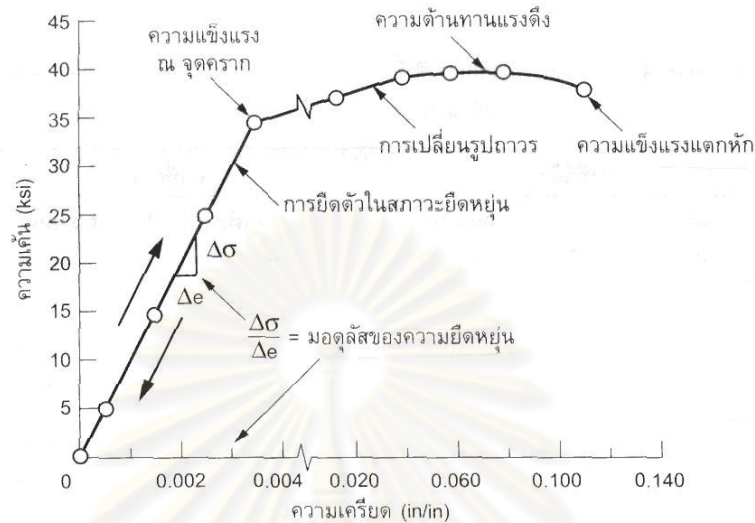
สมบัติต่างๆที่ได้จากการทดสอบแรงดึงนั้นประกอบไปด้วยสิ่งสำคัญ ได้แก่ ความแข็งแรง ณ จุดคราก (yield strength) ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) สมบัติในสภาวะยืดหยุ่น (elastic properties) และความเหนียว (ductility) (ณรงค์ศักดิ์ , 2549)

1) ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength ; YS หรือ σ_y) หมายถึง จุดที่วัสดุมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร โดยหากให้แรงกระทำกับวัสดุเกินจุดครากนี้ไป วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปไป และไม่กลับสู่สภาพเดิม 100%

2) ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength ; TS หรือ UTS หรือ σ_u) คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้หากดูจากความเค้นความเครียดในจุดที่มีความเค้นสูงสุด ของกราฟ ณ จุดนี้ชิ้นทดสอบจะเริ่มเกิด คอคคอด (necking) ขึ้นที่บริเวณความยาวเกจ และเมื่อผ่านจุดนี้ไป วัสดุจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลงเรื่อยๆ จนเกิดการแตกหัก บางครั้งเรียกความเค้นแรงดึงนี้ว่า ความเค้นต้านทานแรงดึง (ultimate tensile strength ; UTS)

3) สมบัติในสภาวะยืดหยุ่น การเปลี่ยนรูปของวัสดุในสภาวะนี้จะเป็นการเปลี่ยนรูปที่ไม่ถาวร โดยมีค่าที่สำคัญอยู่ค่าหนึ่งเรียกว่า โมดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือ โมดูลัสยัง (Young's modulus) ซึ่งเป็นค่าความชันของกราฟความเค้นกับความเครียด

สำหรับการทดสอบแรงดึง จะเป็ไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 638 ซึ่งชิ้นทดสอบจะเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbell) หรือรูปกระดูก (Bone) ชิ้นทดสอบควรมีความกว้างไม่ต่ำกว่า 5 มม. จำนวนที่จะทำการทดสอบ ถ้าตัวอย่างเป็ Isotropic ควรใช้ตัวอย่างอย่างน้อย 5 ตัวอย่าง



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียด

2.1.8 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็ง (hardness test) เป็นการวัดความต้านทานของวัสดุต่อการกดให้เป็นรอยบุ๋ม (indentation) การขีดหรือการขีดให้เป็นรอย (scratching) การหาค่าความแข็งของวัสดุอาศัยหลักการ 3 อย่าง (ณรงค์ศักดิ์, 2549) คือ

1) หาคความต้านทานต่อพลังงานการยืดหยุ่น (Elastic Hardness) โดยการให้วัสดุชนิดหนึ่งตกลงมากระทบกับวัสดุอีกชนิดหนึ่ง แล้วปล่อยให้กระดอนขึ้น สังเกตการณ์กระดอนของวัสดุนั้น วัสดุที่มีความแข็งมากก็จะกระดอนได้สูง ส่วนวัสดุที่มีความแข็งต่ำก็จะกระดอนได้ต่ำ

2) หาคความต้านทานต่อการตัดหรือขีดข่วน (Resistance to Cutting or Abrasion) เป็นการนำเอาวัสดุต่างชนิดกันมาขีดหรือถูกัน วัสดุใดที่มีความแข็งสูงก็จะขีดหรือถูวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่าให้เป็นรอยได้

3) หาคความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอยบุ๋ม (Resistance to Indentation) เป็นการนำเอาวัสดุชนิดหนึ่งมากดลงบนผิวของวัสดุอีกชนิดหนึ่ง วัสดุใดที่สามารถทำให้เกิดรอยบุ๋มได้โตหรือลึก แสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งต่ำ แต่ถ้าวรอยกดเล็กหรือตื้นก็แสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งสูง

การวัดความแข็งซึ่งแบ่งซึ่งแบ่งตามลักษณะของหลักการ 3 ประการข้างต้น การวัดแต่ละวิธีนั้นเรียกชื่อตามเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้วัด ดังนี้

1) การวัดความแข็งแบบชอร์สเกลโรสโคป (Shor Scleroscope Hardness Test) เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้ค้อนหัวเพชรซึ่งมีน้ำหนัก $\frac{1}{2}$ ออนซ์ ปล่อยจากที่สูงห่างจากชิ้นงานทดสอบ 10 นิ้ว ให้ตกลงมากระทบกับผิวชิ้นงาน ให้สังเกตดูการกระดอนกลับของค้อนหัวเพชรว่าสูงหรือต่ำจากสเกลที่หน้าปัด วัสดุที่แข็ง ค้อนหัวเพชรจะกระดอนกลับได้สูงกว่าวัสดุอ่อน

2) การวัดความแข็งแบบสเกลของโมส์ (Mohs' Scale) เป็นการทดสอบความแข็งอย่างง่าย ๆ ซึ่งนายเฟรเดริ โมส์เป็นผู้คิดขึ้นโดยอาศัยหลักการแบ่งความแข็งออกเป็น 10 ชั้น ตามชนิดของสินแร่ คือสินแร่ชนิดใดที่มีความแข็งต่ำที่สุด กำหนดชั้นความแข็ง 1 และสินแร่ชนิดใดมีความแข็งสูงสุด กำหนดความแข็งเป็น 10 ตามลำดับ ในการทดสอบความแข็งด้วยวิธีนี้จะทำโดยการนำเอาสินแร่มาตรฐานทั้ง 10 ชนิด ไปขีดวัสดุที่ต้องการทราบความแข็ง สังเกตดูว่าสินแร่มาตรฐานใดที่ขีดวัสดุเป็นรอย ก็แสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งอยู่ในขั้นนั้น

3) การวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test ; HB หรือ BHN) เป็นการวัดโดยใช้น้ำหนักมาตรฐานกดผ่านหัวกด (indenter) ทำด้วยลูกบอลเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งหรือลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ ให้หัวกดกดลงบนชิ้นงานเป็นเวลา 10-30 วินาที จากนั้นปลดน้ำหนักมาตรฐานออก จากนั้นนำวัสดุไปวัดขนาดความโตของรอยกดด้วยกล้องขยาย แล้วนำค่าที่วัดได้ไปหาความแข็งเรียกว่า BHN (Brinell Hardness Number) ตามความสัมพันธ์

$$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

เมื่อ BHN = ค่าความแข็งโดยการทดสอบแบบบริเนลล์

P = น้ำหนักที่ใช้กดหัวกด

D = ความโตของหัวกด

d = ความโตของรอยกด

4) การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test ; HR) การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม เพราะทดสอบได้ง่าย รวดเร็ว และสามารถทราบค่าความแข็งได้โดยตรงจากเครื่อง โดยการอ่านค่าที่หน้าปัดของเครื่อง

หัวกด (indenter) และน้ำหนักกด (load) จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มทดสอบแบบธรรมดาและแบบพิเศษ ทั้ง 2 กลุ่ม จะแบ่งการวัดออกแตกต่างกัน การแบ่งสเกลหัวกดและแรงกดแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์กระทำได้ 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นแรก ใช้แรงกดนำ (minor load) คือ 10 kg สำหรับการทดสอบแบบธรรมดา และ 3 kg สำหรับการทดสอบแบบพิเศษ โดยการหมุนให้แท่นวางชิ้นงานเลื่อนขึ้นจนกระทั่งเข็มสั้นที่หน้าปัดตรงกับเลข 0 เพื่อให้หัวกดสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานทดสอบ

ขั้นที่สอง เพิ่มแรงกดหลัก (major load) คือ 60 100 และ 150 kg สำหรับการทดสอบแบบธรรมดา และ 15 30 และ 45 kg สำหรับการทดสอบแบบพิเศษ เพื่อให้น้ำหนักกดลงไปบนเนื้อชิ้นทดสอบเป็นเวลา 10-30 วินาที จากนั้นก็ปลดน้ำหนักส่วนใหญ่ออก สังเกตดูเข็มยาวที่หน้าปัดเครื่องหยุดตรงกับตัวเลขใดหรือขีดใด ก็อ่านค่าความแข็งได้จากตัวเลขและสเกลของการทดสอบบนหน้าปัดเครื่อง

การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์มีข้อควรพิจารณาดังนี้

- ก่อนทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบ จะต้องตรวจสอบความเที่ยงตรงของเครื่องทดสอบ หรือเทียบค่ามาตรฐานจากแผ่นความแข็งมาตรฐาน (test block)
- ผิวชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะต้องเรียบ สะอาด และขนานกัน
- การทดสอบความแข็งแบบธรรมดา ระยะห่างระหว่างรอยกดและระยะห่างจากขอบชิ้นงานควรมีระยะห่างอย่างน้อย 3 มิลลิเมตร
- ชิ้นงานที่ทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 10 เท่าของรอยกด

5) การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker Hardness Test; HV) การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ กระทำโดยใช้แรงกดอยู่ระหว่าง 1-200 kg กดผ่านหัวกดที่ทำด้วยเพชรรูปพีระมิด มีฐานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มุมรวมที่ปลายแหลมเท่ากับ 136 องศา กดลงไปบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบเป็นเวลา 10-30 วินาที จากนั้นปลดแรงออก นำชิ้นงานไปวัดขนาดของรอยกด ด้วยกล้องจุลทรรศน์ นำค่าที่ได้หาความแข็งจากความสัมพันธ์

$$HV = \frac{1.854P}{D^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ P = แรงหรือน้ำหนักกด

D = ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมรอยกด

6) การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vicker Hardness Test; HMV) การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ เหมาะสำหรับการทดสอบชิ้นงานขนาดเล็กบาง ชิ้นงานที่ผ่านการชุบผิวแข็ง ชิ้นงานชุบเคลือบผิวเป็นต้น

- 7) การทดสอบความแข็งแบบนूप (Knoop Hardness Test ; HK หรือ KHN) การทดสอบความแข็งแบบนूपเหมาะสำหรับการทดสอบชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและแผ่นบางเหมือนไมโครวิกเกอร์ สำหรับงานวิจัยนี้จะนำชิ้นงานมาทดสอบหาความแข็งแบบร็อคเวลล์ โดยเครื่องทดสอบความแข็ง (hardness tester) แบบชอร์สเกล D โดยใช้มาตรฐานในการทดสอบ ASTM D-2240 ดังนี้
1. ปรับเข็มบนหน้าปัดให้ชี้เลขศูนย์ วางชิ้นทดสอบในแนวตั้งตรงบนฐานรองรับชิ้นงาน
 2. หมุนสกรูด้านข้างยกชิ้นงานไปชนปลายหัวกดด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอ จนทำให้ตุ่มนำหนักยกขึ้นจากจุดเริ่มต้นเป็นเวลา 1 วินาที อ่านค่าที่ได้ ทำการวัด 5 จุดบนชิ้นทดสอบ ทำ 3 ครั้ง

2.1.9 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทก

การทดสอบแรงกระแทก (impact test) ของวัสดุ เป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการรับแรงที่มากกระทำกับวัสดุด้วยความเร็ว (dynamic load) ความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุหมายถึง การที่วัสดุสามารถดูดกลืนหรือเก็บพลังงานกระแทกไว้ได้มากน้อยเพียงใด ถ้าวัสดุสามารถเก็บพลังงานสะสมต่อหน่วยปริมาตรตั้งแต่เริ่มต้นได้รับแรงกระแทกจนกระทั่งแตกหักไว้ได้สูงก็หมายความว่าวัสดุนั้นมีทัพเนสส์ (toughness) สูง หรือมีความทนทานต่อการกระแทกนั้นสูง

หลักการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ค้อนเหวี่ยง (hammer) กระแทกชิ้นทดสอบที่ทำเป็นรอยบากมาตรฐานไว้ ซึ่งลักษณะการเหวี่ยงจะคล้ายลูกตุ้มนาฬิกา จากนั้นก็นำผลต่างของระดับสูงต่ำของลูกตุ้มเมื่อเริ่มแกว่งและหลังจากที่แกว่งไปกระแทกชิ้นทดสอบให้หัก ไปคำนวณ (ณรงค์ศักดิ์ , 2549)

โดยการบากชิ้นงานเป็นการป้องกันการสูญเสียพลังงาน โดยรอยบากบนชิ้นงานเป็นที่ทำหน้าที่เป็นจุดที่แรงกระทำมาสะสมกัน ทำให้การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานเกิดขึ้นได้ยาก เพราะการแตกขาดจะเกิดขึ้นบริเวณรอยบากเท่านั้น การทดสอบการทนแรงกระแทกชิ้นงานที่มีรอยบากมี 2 วิธี คือ Charpy Impact Test และ Izod Impact Test ทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันในทางปฏิบัติ คือ วิธี Charpy Impact Test นั้นรอยบากจะอยู่ด้านตรงข้ามกับทางเดินของค้อนตีและตัวอย่างจะวางในแนวแกนนอน ส่วนวิธี Izod Impact Test รอยบากจะอยู่ด้านเดียวกับทางเดินของค้อนตีและตัวอย่างจะวางในแนวแกนตั้ง

ตารางที่ 2.2 การแบ่งกลุ่มของการทดสอบแบบรีดคเวลด์หัวกดและแรงที่ใช้

สเกลความแข็งรีดคเวลด์		
สัญลักษณ์สเกล	หัวกด	แรงกดหลัก (kg)
A	หัวเพชร	60
B	1/16 in หัวบอล	100
C	หัวเพชร	150
D	หัวเพชร	100
E	1/8 in หัวบอล	100
F	1/16 in หัวบอล	60
G	1/16 in หัวบอล	150
H	1/8 in หัวบอล	60
K	1/8 in หัวบอล	150
15N	หัวเพชร	15
30N	หัวเพชร	30
45N	หัวเพชร	45
15T	1/16 in หัวบอล	15
30T	1/16 in หัวบอล	30
45T	1/16 in หัวบอล	45
15W	1/8 in หัวบอล	15
30W	1/8 in หัวบอล	30
45W	1/8 in หัวบอล	45

(ที่มา: หนังสือ วัสดุวิศวกรรม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.10 การวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการหาสมการเส้นตรงหรือเส้นโค้ง สมการเหล่านี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองประเภท คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable) หนึ่งตัวและตัวแปรอิสระ (Independent Variable) อีกตัวหนึ่งหรือมากกว่า สมการที่ได้จากเทคนิคดังกล่าวจะแสดงว่าตัวแปรตาม จะมีการผันแปรตามตัวอิสระอย่างไร

ประเภทการวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ คือ

1. การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression)

การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระหนึ่งตัว โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง โดยให้ x เป็นตัวแปรอิสระ และ y เป็นตัวแปรตาม ซึ่งอาจเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้เป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + e \quad (2.5)$$

β_0 คือ ค่าที่เท่ากับจุดตัดบนแกน y เมื่อกำหนดให้ $x = 0$

β_1 คือ ความชันของเส้นตรง

e คือ ค่าความแตกต่างของ y ที่เกิดขึ้นจริงกับ y บนเส้นถดถอย

2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน (Multiple Regression Analysis)

ในหลายๆกรณี ตัวแปรตามอาจมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไป ซึ่งสามารถ เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + e \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

β_0 คือ ค่าที่เท่ากับค่าของ y เมื่อกำหนดให้ $x_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$

β_i คือ ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง y กับ x_i และดัชนีการ

เปลี่ยนแปลงใน y เมื่อ x_i เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย

e คือ ค่าความแตกต่างของ y ที่เกิดขึ้นจริงกับ y บนเส้นถดถอย

i คือ ลำดับที่ของตัวแปรอิสระในสมการ

3. การถดถอยสำหรับสองตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ เป็นเส้นโค้ง

การพยากรณ์โดยใช้เทคนิคถดถอยนั้น ปกติใช้ในกรณีที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระเป็นเส้นตรง โดยที่ลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรมักจะอยู่ในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง ในกรณีที่สงสัยว่าลักษณะของความสัมพันธ์จะมีรูปแบบที่แน่นอน เช่น เป็นเส้นโค้งแบบ Exponential ก็อาจนำเอาวิธีการถดถอยมาใช้ในการวิเคราะห์หาสมการถดถอยได้โดยการแปลงลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรให้อยู่ในรูปเส้นตรงก่อน หลังจากวิเคราะห์หาสมการถดถอยในเชิงเส้นตรงได้แล้วจึงเปลี่ยนรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรกลับไปสู่รูปเดิม อย่างเช่น ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นโค้ง แบบ Exponential ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$y = e^{a+bx} \quad (2.7)$$

a = ค่าที่เท่ากับจุดตัดแกน y เมื่อกำหนดให้ x = 0

b = คือความชันของเส้นตรง

จากสมการข้างบนใส่ ln ทั้งสองข้าง ได้เป็น

$$\ln(y) = a + bx$$

$$\ln(y) = Y$$

ดังนั้น จึงแปลงสมการให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้ดังนี้

$$Y = a + bx \quad (2.8)$$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Aurrekoetxea J. *et al.* (2001) ได้ศึกษาผลกระทบของโครงสร้างระดับจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ โดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่เกิดขึ้น ความเหนียวพอลิเมอร์หลอม พฤติกรรมของผลึก และคุณสมบัติภายใต้แรงดึง การนำกลับมาหลอมใช้ใหม่เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ความเหนียวของพอลิเมอร์ลดลง เนื่องมาจากการลดลงของมวลโมเลกุล นอกจากนั้นการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่จะเพิ่มระดับการเกิดผลึก ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นและความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากขนาดของ spherulite เล็กลง โครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่ซ้อนทับได้สนิทมากขึ้น กว่าพอลิโพรไพลีนใหม่ แต่อย่างไรก็ตามค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดลดลงตามจำนวนครั้งของการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่

Hamskog M. *et al.* (2005) ได้ศึกษาการผสมพอลิโพรไพลีนใหม่กับพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่ครั้งที่ 1 และการเติมสารคงสภาพ (Stabilizer) ระหว่างกระบวนการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด การเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาออกซิชั่นที่อุณหภูมิ 130 °C ระยะเวลาการอบ 100, 250 และ 500 ชั่วโมง พบว่า ผลของสัดส่วนผสมระหว่างพอลิโพรไพลีนใหม่กับพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่ครั้งที่ 1 ไม่ทำให้คุณสมบัติของวัสดุมีความแตกต่าง แต่สำหรับการเติมสารคงสภาพ จะช่วยเพิ่มระยะเวลาการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและคงสภาพเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด จาก 100 ชั่วโมงสำหรับไม่มีตัวเติมเป็น 500 ชั่วโมงสำหรับที่มีตัวเติม

Brachet P. *et al.* (2007) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยการเติม ethylene-octene rubber (EOR) และ calcium carbonate (CaCO₃) โดยจะศึกษาคุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความร้อน (Differential Scanning calorimeter ; DSC) พบว่าการเติม EOR ทำให้ลด Young's modulus อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การเติม CaCO₃ จะเป็นการเพิ่ม Young's modulus สำหรับการทนแรงดึงนั้นการเติม EOR และ CaCO₃ ไม่ได้ส่งผลต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ virgin PP ผลของการเติมสาร EOR และ CaCO₃ ต่อการทนต่อแรงกระแทกพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละการผสม สำหรับคุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อน DSC มีช่วงสูงสุดของกราฟ (Peak) อยู่สองช่วงคือ ช่วงที่อุณหภูมิ 160 °C ซึ่งตรงกับอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิโพรไพลีน และช่วงที่อุณหภูมิ 126 °C ซึ่งตรงกับอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน

Feller J. F. and Bourmaud A. (2003) ศึกษาเชิงกลของพอลิคาร์บอเนต (polycarbonate: PC) รีไซเคิล เพื่อประโยชน์ในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำการวิเคราะห์ PC ที่ถูกรีไซเคิลครั้งเดียวจนถึง 8 ครั้ง โดยศึกษา คุณสมบัติ Rheology และ Calorimetric พบว่าการรีไซเคิล PC ครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 5 พบว่ามีการสะสมของโมดูลัส (storage modulus) รวมทั้งจำนวนครั้งของการรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดลดลง ($T=240\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $\dot{\gamma}=0.1\text{ s}^{-1}$) สำหรับผลของการศึกษาเกี่ยวกับความร้อน (Differential Scanning Calorimeter :DSC) พบว่าจำนวนครั้งที่เพิ่มขึ้นของการรีไซเคิลทำให้อุณหภูมิแก้ว ลดลง (Glass temperature , T_g) อันเนื่องมาจากการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลอันเนื่องมาจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่สั้นลงแต่ในขณะเดียวกันจะมีจำนวนโซ่พอลิเมอร์มากขึ้น

Fung K. L. and Li R. K. Y. (2006) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำ poly (ethylene terephthalate ; r-PET) ซึ่งถูกผสมด้วยยาง (MA-g-SEBS) และ short glass fiber (SGF) โดยในการศึกษานั้นจะแยกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก ใช้ r-PET ซึ่งเป็นพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 (C-1) ผสม และในขั้นตอนที่สอง ใช้ r-PET ซึ่งเป็นพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 (C-2) ผสม พบว่า การทนต่อแรงดึงของ ส่วนผสมที่มี r-PET C-1 ทนต่อแรงดึงได้มากกว่าเป็นสองเท่าของ r-PET C-2 ผสม ในขณะที่การทนต่อแรงกระแทกของวัสดุผสมทั้งสองแบบนี้ พบว่าค่าที่ได้ไม่แตกต่างกัน แสดงได้ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม C-1 และ C-2

	Tensile strength (Mpa)	Charpy impact strength (kJ/m ²)
C-1	34.1 (1.0)	6.9 (0.2)
C-2	17.3 (2.0)	7.4 (0.2)

Loultcheva K. M. *et al.* (1997) ได้นำภาชนะต่างๆที่ผลิตจาก HDPE กลับมาใช้ใหม่โดยทำการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Single-screw extruder (SSE) และ Twin-screw extruder (TSE) แล้วจึงมาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์พบว่า ความหนืดในเครื่อง TSE จะลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับเครื่อง SSE เนื่องจากในเครื่อง TSE มีแรงเฉือนในการตัดสายโซ่ของพอลิเมอร์มากกว่า ส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง คณะวิจัยยังพบอีกว่าค่า Residence time มีผลต่อสมบัติเชิงกล กล่าวคือเครื่องมือ

ที่มี Residence time สูงจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง โดยเฉพาะ Elongation at break และ Tensile strength ในรอบการนำกลับมาใช้ใหม่รอบที่ 2 และเครื่องมือที่มี Residence time ต่ำจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการหลอมไหล (Rheological property) น้อยมาก

Meran C. *et al.* (2008) ได้ศึกษาได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ใหม่ผสมกับพอลิเมอร์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ของ low-density polyethylene (LDPE) high-density polyethylene (HDPE) และ polypropylene (PP) พบว่าพลาสติกทั้งสามจะทนต่อแรงดึงลดลงตามปริมาณของพอลิเมอร์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดย tensile strength ของ LDPE ที่นำกลับมาใช้ใหม่ลดลง 36% และ %Elongation ลดลง 28% เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกใหม่ tensile strength ของ HDPE ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ลดลง 24% และ %Elongation ลดลง 40% เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกใหม่ และสำหรับโดย tensile strength ของ PP ที่นำกลับมาใช้ใหม่ลดลง 35% และ %Elongation ลดลง 15% เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกใหม่

Najafi S.K. *et al.* (2009) ได้ศึกษาอิทธิพลของการผสมพอลิโพรไพลีนที่เสื่อมสภาพกับผงไม้ที่มีต่อ คุณสมบัติเชิงกล พบว่าในกรณีที่ไม่มีการเติมผงไม้ ค่าโมดูลัสของการดัดโค้งและค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ แต่ค่าความทนต่อแรงกระแทกลดลง แสงตามตารางที่ 2.4 สำหรับกรณีที่มีส่วนผสมของผงไม้ก็จะเป็นการเสริมค่าของโมดูลัสของการดัดโค้งและค่าความแข็ง แต่ก็จะเป็นการลดลงของค่าความทนต่อแรงกระแทกเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติเชิงกลของพอลิโพรไพลีนใหม่กับพอลิโพรไพลีนหลอมใหม่

Properties	Polypropylene		
	VPP	R1PP	R2PP
Flexural modulus(MPa)	1229(32)	1518(57)	1763(86)
Impact strength(kJ/m ²)	Nonbroken	17.7(1.6)	5.9(0.47)
Hardness (shore D)	61.7(0.94)	64.9(0.93)	68.4(0.92)

*หมายเหตุ ในวงเล็บ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน V: Virgin, R1: นำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1; R2 : นำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2

Pawlak A. *et al.* (2000) ได้ศึกษางานวิจัยที่มีจุดประสงค์ที่จะแสดงให้เห็นวิธีการรีไซเคิลพอลิเมอร์ คุณสมบัติและส่วนประกอบของพอลิเมอร์รีไซเคิลที่ได้มาจากหลากหลายที่ โดยจะศึกษา TGA DSC FTIR และคุณสมบัติการทนต่อแรงดึง และความเหนียว จากการศึกษพบว่า พอลิเมอร์ที่นำมารีไซเคิลนั้นประกอบไปด้วยสารผสมของพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น PVC ประมาณ 50 ppm ผุนขาว ซึ่งส่วนประกอบดังกล่าวที่แทรกเข้ามานั้นจะทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพไปขึ้นรูปใหม่ ดังนั้นจึงต้องมีการนำพอลิเมอร์รีไซเคิลมาผ่านกระบวนการเพื่อที่จะทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ดังกล่าวทำได้โดยการอบ (annealing) ที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาสั้นๆ สำหรับคุณสมบัติเชิงกลนั้นลดลงทุกตัวอย่างเนื่องมาจากสารที่เติมไปตอนต้นของการผลิต

Pedroso A. G. and Rosa D. S. (2005) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการผสมแข็งตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low-density polyethylene (LDPE) ที่นำกลับมาใช้ใหม่) กับ การผสมแข็งตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ใหม่ โดยสัดส่วน 30 40 และ 50% ของแข็งตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำโดยเปรียบเทียบ ดัชนีการหลอมไหล (melt flow index, MFI) การทดสอบแรงดึง (tensile strength) Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) และ Scanning electron microscopy (SEM) พบว่า MFI ของ LDPE ที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีค่าไม่แตกต่างกับ LDPE เม็ดใหม่เมื่อไม่มีการผสมแข็งตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หากเพิ่มสัดส่วนของแข็งตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จะทำให้ MFI tensile strength และ elongation ลดลงที่สัดส่วน 40 และ 50% แต่ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบ tensile strength ของ LDPE ที่นำกลับมาใช้ใหม่ และ LDPE เม็ดใหม่ที่สัดส่วน 40 และ 50% นั้นไม่มีความแตกต่าง โดยปัจจัยที่ส่งผลก็คือการผสมของแข็งตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

Sylvic B. and Robin J. (2002) ได้ศึกษาการผสมของพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ของ low-density polyethylene (LDPE) และ polypropylene (PP) โดยใช้เครื่องอัดรีด (extruder) แบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) และแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลกับการผสมพลาสติกใหม่ระหว่าง LDPE กับ PP โดยงานวิจัยได้แบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก ศึกษาผลที่เกิดจากปัจจัยของกระบวนการผสม โดยพิจารณาความเข้ากันได้ของวัสดุ งานวิจัยส่วนที่สอง ศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งที่มีความสามารถทำให้เกิดการเข้ากันได้ของวัสดุ จากการศึกษพบว่า การอัดรีดด้วยเครื่องแบบสกรูคู่ จะทำให้เนื้อของวัสดุเข้ากันได้ดีกว่า และมีคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ดีกว่าการอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว สำหรับการทนต่อแรงดึงระหว่างการผสมพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่กับการผสมระหว่างเม็ดพลาสติกใหม่มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการใช้ PP เป็นตัวเสริมแรงให้กับ LDPE ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น สำหรับการเติม

สารเติมแต่ง ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) ethylene-propylene monomer (EPM) หรือ PE-g-(2-methyl-1,3-butadiene) ทำให้เพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของวัสดุ และสำหรับการเติม PE-g-(2-methyl-1,3-butadiene) จะทำให้ทนแรงกระแทกได้ดีที่สุด

Yarahmadi N. *et al.* (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติที่เหลื่ออยู่และความทนทานและพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะนำคุณสมบัติที่เหลื่ออยู่ดังกล่าวของพลาสติกรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างเหมาะสม งานวิจัยได้ศึกษา คุณสมบัติของพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็ง (rigid polyvinyl chloride : PVC) โดยการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด (extrusion) เป็นจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 5 ครั้ง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและความทนทานของวัสดุ โดยคุณสมบัติที่จะศึกษานั้นคือ สี ระดับการเกิดเจล (degree of gelation) stress-strain และ UV-Vis –NIR spectroscopy ส่วนความทนทานจะประเมินจากอายุการใช้งานโดยให้ความร้อนขึ้นงานในเตาอบที่มีอากาศไหลผ่านพบว่าพลาสติกเริ่มมีการเสื่อมสภาพหลังจากกระบวนการอัดรีดครั้งที่ 2 โดยวัสดุจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และผลจากการประเมินอายุการใช้งานพบว่ายิ่งมีการนำวัสดุไปอัดรีดใหม่จะทำให้อายุการใช้งานของวัสดุสั้นลง และเมื่อพิจารณาผลของการใช้ UV-Vis –NIR spectroscopy พบว่าช่วงของความยาวคลื่นแสดงให้เห็นว่าพบ polyene เพิ่มมากขึ้นตามจำนวนครั้งของการอัดรีด ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้พอลิเมอร์มีสีเหลือง

ศุภชัย งามศิลปเสถียร (2543) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดขยะพลาสติกที่เกิดจากถังพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) สำหรับส่งขวดน้ำอัดลมที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว กลับมาใช้ใหม่ โดยใช้ถังพลาสติกที่ผลิตภายใต้กระบวนการเดียวกันแต่มีอายุการใช้งานแตกต่างกัน คือ 8 ปี และ 3ปี และถังที่ไม่ผ่านการใช้งาน จากการศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ ความสามารถในการขึ้นรูป และการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์อย่างเป็นระบบ พบว่าดัชนีการหลอมไหล เปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดแตกหัก การทนต่อแรงกด และการทนต่อแรงกระแทกของถัง HDPE มีค่าลดลง เมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากการเสื่อมสภาพจากแสงที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพอลิเมอร์สมบัติด้อยของถัง HDPE ที่หมดอายุการใช้งานแล้วสามารถถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการผสมสารเพิ่มความเสถียร Recyclossorb 550 (R550) และเอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคโพลิเมอร์ (EVA) โดยพบว่าการเติม EVA (ที่ดัชนีส่วนการผสมโดยน้ำหนักเท่ากับ 5% และ 15%) มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติของถังที่หมดอายุการใช้งานได้ดีกว่า R550 (ที่ดัชนีส่วนการผสมโดยน้ำหนักเท่ากับ 0.2% และ 0.4%) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติม EVA จะช่วยในการปรับปรุงเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุด

แตกหัก และการทนแรงกระแทกได้ดียิ่ง นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมของสัง HDPE ที่หมอดอายุการใช้งานแล้วกับสารปรับสภาพ (R550 และ EVA) สามารถนำมาทำการขึ้นรูปเป็นฝาครอบถังเปียร์โดยกระบวนการฉีด ฝาครอบที่ผลิตได้ผ่านการตรวจสอบพบมีมาตรฐานตามความต้องการของลูกค้า

สุมาลี ทิพย์พรกุล และคณะ (2536) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างขะยะพลาสติกชนิด PP และ PE พบว่าเมื่อ % PP เพิ่มขึ้นทำให้ความทนต่อแรงกระแทกลดลง ความเครียดลดลง แต่ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของทุกพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนดัชนีการหลอมไหลตัวแปรตามชนิดของพลาสติกชนิดที่มีอยู่มากกว่า

อภินันทนา อุดมศักดิ์ (2541) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) กับพอลิโพรไพลีน (Polypropylene : PP) โดยมีเอทิลีนโพรไพลีน ไดอีน เทอร์โพลิเมอร์ (Ethylene Propylene Diene Terpolymer : EPDM) เป็นตัวที่ทำให้เข้ากัน คุณสมบัติทางกายภาพที่ศึกษาได้แก่แรงดึง ความแข็ง และความทนต่อแรงกระแทก การทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือส่วนแรก ศึกษาดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม และอุณหภูมิในการขึ้นรูป ส่วนที่สองศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม ผลการทดลองพบว่า ในขั้นตอนแรกพบว่า ควรฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม HDPE/PP/EPDM ที่อุณหภูมิ 210 °C คุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะแปรไปตามพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่า แต่เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม HDPE/PP (75/25) จะมีค่ามากที่สุดคือ 428.37% เมื่อเติม EPDM เข้าไปจะทำให้ดัชนีการหลอมไหล ความถ่วงจำเพาะ ความทนต่อแรงดึง 100% โมดูลัสของความยืดหยุ่นลดลง แต่จะ
 ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมส่วนผสมและการขึ้นรูปชั้นทดสอบ

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมส่วนผสมและขึ้นรูปชั้นทดสอบ

- 1) พอลิโพรไพลีน (PP) มีความหนาแน่น 0.91 กรัม/ตารางเซนติเมตร ดัชนีการหลอมไหล 3.5 กรัม/10นาที (230 °C/2.16 กิโลกรัม)
- 2) เครื่องอัดขึ้นรูป (Hot Press)
- 3) แม่พิมพ์รูสี่เหลี่ยมขนาด 63x120x5 มิลลิเมตร สำหรับขึ้นงานทดสอบแรงกระแทก
- 4) แม่พิมพ์รูสี่เหลี่ยมขนาด 140x140x2 มิลลิเมตร. สำหรับขึ้นงานทดสอบแรงดึง
- 5) แม่พิมพ์ตัด (Dumbbell Cutter) ตามมาตรฐาน ASTM D-256 Type IV

3.1.2 การเตรียมพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ (PR_n)

- 1). นำเม็ดพอลิโพรไพลีนใหม่ (PP) มาอบที่อุณหภูมิ 80 °C นาน 24 ชั่วโมง และอัดร้อนในแม่พิมพ์ควบคุมอุณหภูมิที่ 200 °C ความดัน 50 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เวลาในการให้ความร้อนขั้นต้น 10 นาที เวลาในการให้ความร้อนนาน 15 นาที จนเม็ดพลาสติกหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2). หล่อเย็นด้วยน้ำเป็นเวลา 5 นาที และนำมาบดได้พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 (PR₁)
- 3). นำพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 บางส่วนจากข้อ (2) มาอบ อัดร้อน และบดด้วยอุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาเดียวกันเหมือนข้อ (1) ได้พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 2 (PR₂)
- 4). ทำนองเดียวกัน พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 3, 4, 5 และ 6 ดำเนินการเหมือนข้อที่ (3)

รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการเตรียมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่ครั้งที่ n ใดๆ เมื่อ PR คือ พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมแล้ว R คือ การนำ PR บางส่วนกลับมาหลอมใหม่ และ n คือ จำนวนครั้งที่ผ่านการหลอมใหม่ ($n = 1, 2, \dots, 6$)

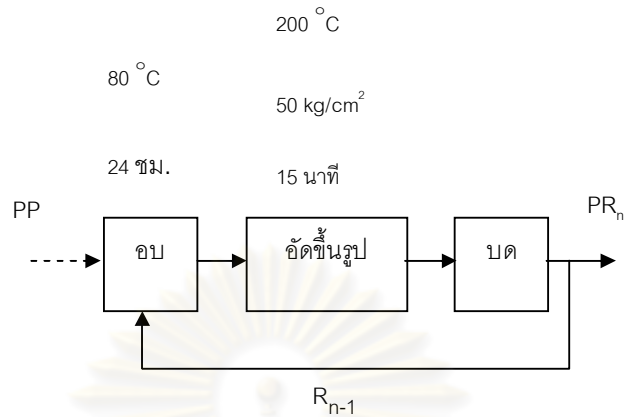
3.1.3 การเตรียมส่วนผสม

1). ชั่งน้ำหนัก PP และ PR_n และผสมตามสัดส่วนผสมที่ได้ออกแบบการทดลอง ซึ่งแสดงตามตารางที่ 3.1 และ 3.2 โดยตารางที่ 3.1 แสดงการผสมระหว่าง PP กับ PR_1 เพื่อการทดสอบปัจจัยของอุณหภูมิและสัดส่วนผสมของ PR_1 และตารางที่ 3.2 แสดงการผสมระหว่าง PP กับ PR_n เพื่อการทดสอบปัจจัยของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ ต่อคุณสมบัติต่างๆ

2) จากพอลิเมอร์ผสมในข้อ (1) นำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบดัชนีการหลอมไหลและขึ้นรูปเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ

3.1.4 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบเพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติ

การขึ้นรูปขึ้นงานจะขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อน (Hot Press) ยี่ห้อ Lab tech แสดงตามรูปที่ 3.2 ใช้ความดันในการอัด 50 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เวลาให้ความร้อนขึ้นต้น 10 นาที และเวลาในการให้ความดัน 15 นาที หลังจากนั้นหล่อเย็นด้วยน้ำเป็นเวลา 5 นาที สำหรับการขึ้นรูปเพื่อทดสอบแรงกระแทก (Impact Strength) จะขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สี่เหลี่ยมที่มีขนาด $63 \times 120 \times 5$ มิลลิเมตร ตัดขึ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกระแทกด้วยเครื่องตัดขึ้นงานตัวอย่าง สำหรับการขึ้นรูปเพื่อทดสอบแรงดึง (Tensile Test) จะขึ้นรูปด้วยพิมพ์ที่มีขนาด $140 \times 140 \times 2$ มิลลิเมตร ตัดขึ้นงานเป็นรูปร่างคิมเบลล์ด้วยแม่พิมพ์ตัด ตามมาตรฐาน ASTM D-638 Type (IV)



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงกระบวนการเตรียมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของการผสมระหว่าง PP และ PR₁ กับอุณหภูมิสำหรับการทดสอบคุณสมบัติ

ต่างๆ

No	สัญลักษณ์	PP	PR ₁	อุณหภูมิ (°C)					
				170	190	210	230	250	270
1	PP	100	0						
2	33PR ₁	100	33						
3	100PR ₁	100	100						
4	300PR ₁	100	300						
5	900PR ₁	100	900						

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

3.2.1 ดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Rate)

นำพอลิเมอร์ที่ผสมไว้มาทำการทดสอบหาดัชนีการหลอมไหลตัว โดยใช้เครื่องทดสอบ Kayeness Series 4000 ของบริษัท A dynisco Instrument Company ดังรูปที่ 3.3 โดยเลือกวิธีการทดสอบแบบ A (Method A) ทำการทดสอบดัชนีการหลอมไหลตัวที่อุณหภูมิ 170, 190, 210, 230, 250 และ 270 °C โดยปฏิบัติตามวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1238 ดังนี้

เลือกอุณหภูมิและน้ำหนักกดที่ทำการทดสอบ เวลาในการให้ความร้อน เวลาที่จะตัดพอลิเมอร์แต่ละครั้ง ในการทดสอบนี้สำหรับพอลิโพรไพลีนใช้ตม้มน้ำหนักขนาด 2.16 กิโลกรัม เวลาในการให้ความร้อน 6 นาที เวลาในการตัดพอลิเมอร์แต่ละครั้ง 45 วินาที จำนวนครั้งที่ตัด 5 ครั้ง ในแต่ละการทดสอบ

ปรับกระบอกทดสอบให้อยู่ในแนวตั้งตรงโดยใช้ที่วัดระดับน้ำ ทำความสะอาดเครื่องมือ

สำหรับการทดสอบครั้งแรก ให้ความร้อนกับกระบอกสูบจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ ใส่หัวฉีดและแท่งลูกสูบ (Piston) ลงไปจนสุดความลึกของกระบอกทดสอบ ให้ความร้อนเป็นเวลา 15 นาที จึงทดสอบ ในการทดสอบครั้งต่อไปไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนอีก

นำพอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ประมาณ 5-8 กรัมเติมลงในกระบอกทดสอบโดยเทผ่านกรวย (Funnel) เพื่อป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์เปื้อนหรือไหลออกนอกกระบอกทดสอบ

ใช้แท่งกด (Charging Tool) กดให้แน่นเพื่อไม่ให้มีฟองอากาศ จากนั้นใส่แท่งลูกสูบ และน้ำหนักกด ให้ความร้อน 6 นาที

หลังจากเวลาในการให้ความร้อนครบแล้ว ใช้เกรียง (Sample Cut of Tool) ตัดพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาทิ้งพร้อมกับกดปุ่มเริ่มต้น พอลิเมอร์จะเริ่มไหลออกมา เมื่อมีสัญญาณเตือนครบ 45 วินาที ให้ตัดพอลิเมอร์พร้อมกดปุ่มเริ่มใหม่ จนครบ 5 ครั้ง นำพอลิเมอร์ที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก ถ้าพอลิเมอร์ที่ไหลออกมามีฟองอากาศต้องทำการทดลองใหม่

นำข้อมูลน้ำหนักป้อนลงในเครื่องทดสอบ เครื่องทดสอบจะทำการคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.1 ดังนี้

$$\text{ดัชนีการหลอมไหลตัว} = \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ต่อการตัด 1 ครั้ง} \times 600}{\text{เวลาในการตัด 1 ครั้ง}} \quad (\text{กรัม/10 นาที}) \quad (3.1)$$

1) สำหรับอิทธิพลของระยะเวลาในการให้ความร้อนที่มีผลต่อดัชนีการหลอมไหลให้ตัดพอลิเมอร์ที่ระยะเวลา 6, 30, 90, 180, 360 และ 720 นาที โดยใช้น้ำหนักกดก่อนการตัดพอลิเมอร์ 6 นาที

หลังจากการทดสอบ กดน้ำหนักไล่พอลิเมอร์ที่เหลือออกให้หมด เอน้ำหนักแบ่งลูกสูบ และหัวฉีดออก ทำความสะอาดกระบอทดสอบ

3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จะเป็นการศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการอัดขึ้นรูป เพื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของบริษัท Jeol Co.,Ltd. รุ่น ISM-6400LV ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามรูปที่ 3.4 โดยวิธีการเตรียมชิ้นทดสอบและการตรวจสอบดังนี้

- 1) หักชิ้นทดสอบด้วยการนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว 5 นาที จากนั้นใช้คีมจับปลายทั้ง 2 ข้างแล้วหัก
- 2) นำชิ้นทดสอบไปติดกับแท่งทองเหลืองสำหรับติดชิ้นงาน (stub) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการฉาบทองเพื่อให้ชิ้นทดสอบมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า
- 3) นำชิ้นทดสอบไปส่องดูโครงสร้างระดับจุลภาคโดยเครื่อง SEM เลือกความต่างศักย์และกำลังขยายที่เหมาะสม

3.2.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ จะทำตามมาตรฐาน ASTM D-792 วิธีการทดสอบแบบ A (Test Method A) การหาความถ่วงจำเพาะโดยการแทนที่น้ำ ซึ่งใช้ขวด Pycnometer ขนาด 50 มิลลิลิตร และนำมาคำนวณหาความถ่วงจำเพาะตามสมการต่อไปนี้

$$SG = \frac{a}{(a + w - b)} \quad (3.2)$$

เมื่อ SG = ความถ่วงจำเพาะ

a = น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ชั่งในอากาศ (กรัม)

w = น้ำหนักรวมของน้ำและภาชนะบรรจุ (กรัม)

b = น้ำหนักรวมของน้ำ ชิ้นทดสอบและภาชนะบรรจุ (กรัม)

3.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

คุณสมบัติเชิงกลที่ศึกษาในงานวิจัยคือ

1) คุณสมบัติภายใต้แรงดึง (Tensile Properties)

1.1 ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)

1.2 โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elastic)

1.3 เปรอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด (Elongation at Break)

2) ความแข็ง (Hardness)

3) ความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

3.3.1 คุณสมบัติภายใต้แรงดึง

สำหรับชิ้นทดสอบจะเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D-638 (IV) ซึ่งได้จากการตัดชิ้นงานด้วยใบมีดตัดรูปดัมเบล การทดสอบคุณสมบัติภายใต้แรงดึงใช้เครื่อง SHIMADSU SEREVOPULSER Model EHF-EM 100 kN-20L ตามรูปที่ 3.5 ความเร็วในการดึงชิ้นงาน (cross head speed) 50 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งจะให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุด และค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น เปรอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ทำการทดสอบขึ้นตัวอย่าง 5 ชิ้นในแต่ละตัวอย่าง

สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณความทนต่อแรงดึงสูงสุด (สมการ 3.3) โมดูลัสของความยืดหยุ่น (3.4) เปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด (สมการ 3.5) แสดงตามสมการดังต่อไปนี้

สมการแสดงค่าความทนแรงดึงสูงสุด

$$S = \frac{F_{\max}}{w \times t} \quad (3.3)$$

เมื่อ S = แรงดึงที่มากที่สุด (MPa)

F_{\max} = ขนาดของแรงดึงที่มากที่สุด (kN)

w = ความกว้างของชิ้นทดสอบบริเวณส่วนแคบ ที่รับแรงดึง (mm)

t = ความหนาของชิ้นทดสอบบริเวณส่วนแคบ ที่รับแรงดึง (mm)

สมการแสดงค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น

$$M = \frac{(F \times l_0)}{w \times t \times (l - l_0)} \quad (3.4)$$

เมื่อ M = โมดูลัสของความยืดหยุ่น (MPa)

F = ขนาดของแรงดึงที่ทำให้ความยาวของชิ้นทดสอบเปลี่ยนแปลงไปเป็นความยาวที่ขณะใด ๆ (kN)

l_0 = ความยาวของชิ้นทดสอบที่ใช้เป็นเกณฑ์ (Gage Length: mm)

l = ความยาวของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปที่ขณะใด ๆ (mm)

w = ความกว้างของชิ้นทดสอบบริเวณส่วนแคบที่รับแรงดึง (mm)

t = ความหนาของชิ้นทดสอบบริเวณส่วนแคบที่รับแรงดึง (mm)

สมการแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด

$$E = \frac{l_{\max} - l_0}{l_0} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ E = เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (%)

l_{\max} = ความยาวของชิ้นงานสูงสุดที่อ่านได้ก่อนขาด (mm)

l_0 = ความยาวของชิ้นทดสอบที่ใช้เป็นเกณฑ์ (Gage Length)

3.3.2 ความแข็ง

นำชิ้นงานมาทดสอบหาความแข็ง โดยเครื่องทดสอบความแข็ง (hardness tester) แบบชอร์สเกล D รุ่น 473 ของบริษัท Pacific Transducer Corp. แสดงตามรูปที่ 3.6 ใช้ตุ้มน้ำหนัก ขนาด 5 กิโลกรัมโดยใช้มาตรฐานในการทดสอบ ASTM D-2240 ดังนี้

1. ปรับเข็มบนหน้าปัดให้ชี้เลขศูนย์ วางชิ้นทดสอบในแนวตั้งตรงบนฐานรองรับชิ้นงาน
2. หมุนสกรูด้านข้างยกชิ้นงานไปชนปลายหัวกดด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอ จนทำให้ตุ้มน้ำหนักยกขึ้นจากจุดเริ่มต้นเป็นเวลา 1 วินาที อ่านค่าที่ได้ ทำการวัด 5 จุดบนชิ้นทดสอบ

3.3.3 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทก

โดยในการทดสอบจะทดสอบแบบ Izod Impact Test นำมาทดสอบหาความทนต่อแรงกระแทกโดยใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Tester) ขนาดตุ้มน้ำหนัก 60 kg*f แสดงตามรูปที่ 3.7 โดยวิธีการทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D – 256 ดังนี้

1. นำชิ้นงานวางบนแท่นจับ ปรับเข็มบนหน้าปัดให้ชี้ที่เลขศูนย์
2. จากนั้นปล่อยตุ้มน้ำหนักตกลงบนชิ้นงาน เครื่องทดสอบจะบอกค่าพลังงานที่สูญเสียในการตีออกมาหน่วยเป็นจูล คำนวณความทนต่อแรงกระแทกด้วยสมการ 3.6

$$\text{ความทนต่อแรงกระแทก (kJ/m}^2\text{)} = \frac{\text{พลังงานที่สูญเสียขณะตีขึ้นทดสอบ (J)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดรับแรง (mm}^2\text{)}} \times 1000 \quad \dots(3.6)$$



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดร้อน (Hot Press) สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดดัชนีการไหล Kayeness Series 4000



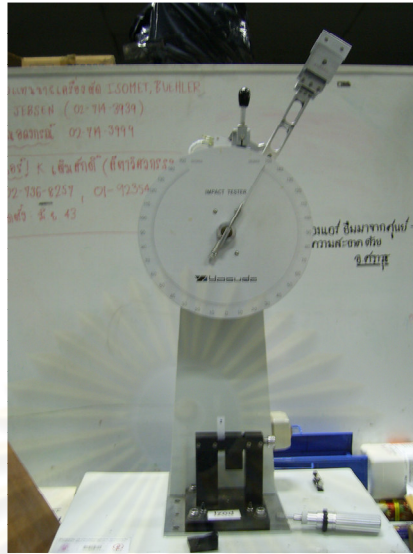
รูปที่ 3.4 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบคุณสมบัติภายใต้แรงดึง Shimadzu



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง Shore scale D น้ำหนักกด 5 กิโลกรัม



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงกระแทก Yasuda

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การดำเนินการวิจัยได้ถูกกำหนดการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณการผสม PR_1 กับอุณหภูมิการขึ้นรูปที่มีผลต่อทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล จากนั้นทดลองในขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณการผสมและจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ในขั้นตอนนี้จะศึกษาภายใต้อุณหภูมิ $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ไม่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนสีจากเดิมขาวขุ่น และขึ้นงานขึ้นรูปหลอมกันเป็นเนื้อเดียว ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พิจารณาจากการทดลองในขั้นตอนที่ 1

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ได้ลำดับไว้ดังนี้

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ
2. ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
3. ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ
4. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ
5. สรุปสมการความสัมพันธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1 ผลการทดสอบดัชนีการหลอมไหล

ผลการทดสอบดัชนีการหลอมไหล จะแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน คือ (1). ผลของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม ต่อดัชนีการหลอมไหล (2) ผลของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม และระยะเวลาการให้ความร้อนต่อดัชนีการหลอมไหล และ (3) ผลของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอมและระยะเวลาการให้ความร้อนต่อดัชนีการหลอมไหล โดยผลการทดสอบและกราฟความสัมพันธ์แสดงดังต่อไปนี้

1) ผลของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม ต่อดัชนีการหลอมไหล

จากการทดสอบดัชนีการหลอมไหลตัวของพอลิเมอร์ผสม PR_1 ที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ 0,33,100,300 และ 900 phr และอุณหภูมิการหลอมไหลตั้งแต่ 170, 190, 210, 230, 250 และ 270 °C ได้ผลปรากฏดังตารางที่ 4.1 โดยสัญลักษณ์ \pm แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับอุณหภูมิการหลอม จำแนกตามสัดส่วนผสมของ PR_1 โดยที่แต่ละจุดในกราฟแสดงค่าเฉลี่ย แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิการหลอม 170 °C ค่าดัชนีการหลอมไหลในทุกสัดส่วนผสมมีค่าต่ำมาก และเมื่ออุณหภูมิการหลอมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และหากพิจารณากราฟรูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสมของ PR_1 จำแนกตามอุณหภูมิการหลอม แสดงให้เห็นว่าเมื่อสัดส่วนผสมของ PR_1 เพิ่มขึ้นค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย แต่หากเปรียบเทียบระหว่างกราฟรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่าดัชนีการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีการหลอมไหลเนื่องจากปัจจัยอุณหภูมิการหลอมมากกว่าปัจจัยของสัดส่วนผสมของ PR_1

จากตารางที่ 4.2 และกราฟรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสมและจำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 อุณหภูมิการหลอม 210 °C แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนผสมและจำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มตามไปด้วย

ตารางที่ 4.1 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสม PR₁ และอุณหภูมิอุณหภูมิการหลอม

หน่วย : กรัม/10นาที

PR ₁ (phr)	การ ทดลองที่	อุณหภูมิ (°C)					
		170	190	210	230	250	270
0	1	0.21	1.67	2.54	3.93	5.54	7.91
	2	0.23	1.70	2.55	3.93	5.61	8.00
	เฉลี่ย	0.22±0.01	1.69±0.02	2.55±0.01	3.93±0.01	5.57±0.05	7.96±0.07
33	1	0.38	1.76	3.03	3.98	5.72	8.20
	2	0.37	1.76	2.93	4.01	5.82	8.06
	เฉลี่ย	0.37±0.01	1.76±0.00	2.98±0.07	4.00±0.02	5.77±0.07	8.13±0.10
100	1	0.53	1.77	3.13	4.47	5.99	8.60
	2	0.61	1.87	3.15	4.47	6.22	8.33
	เฉลี่ย	0.57±0.05	1.82±0.07	3.14±0.02	4.47±0.00	6.11±0.17	8.46±0.19
300	1	0.64	1.73	3.56	4.49	5.93	9.09
	2	0.70	1.92	3.43	4.63	6.51	9.16
	เฉลี่ย	0.67±0.04	1.82±0.13	3.49±0.09	4.56±0.10	6.22±0.41	9.13±0.05
900	1	0.69	1.91	3.90	4.77	6.56	10.12
	2	0.79	1.93	3.82	4.82	6.90	10.91
	เฉลี่ย	0.74±0.07	1.92±0.01	3.86±0.06	4.79±0.04	6.73±0.24	10.51±0.55

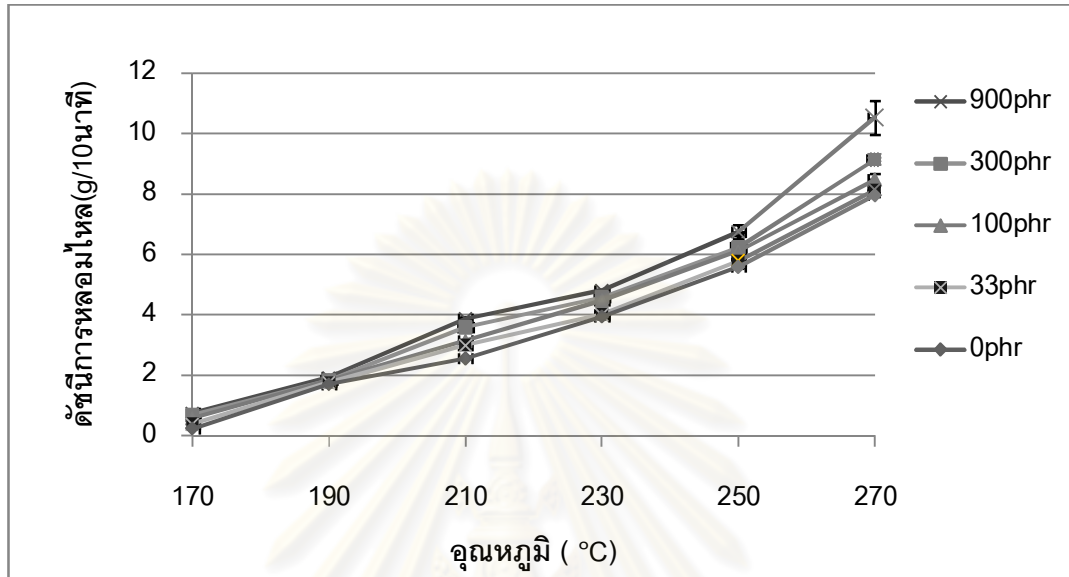
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$

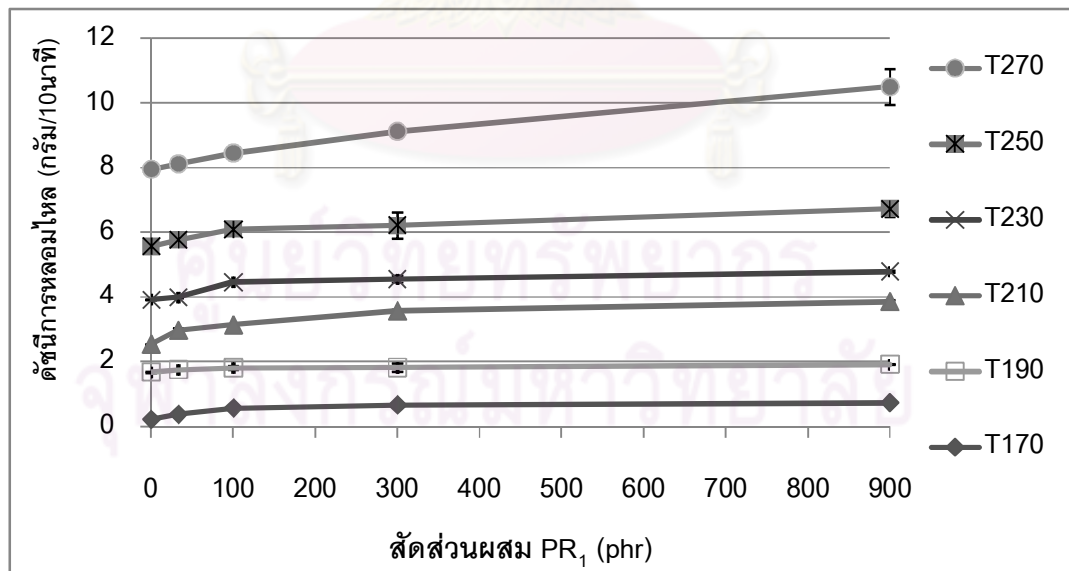
หน่วย : กรัม/10นาทีก

สัดส่วนผสม (phr)	การทดลองที่	$PR_{1 \rightarrow n}$					
		PR_1	$PR_{1 \rightarrow 2}$	$PR_{1 \rightarrow 3}$	$PR_{1 \rightarrow 4}$	$PR_{1 \rightarrow 5}$	$PR_{1 \rightarrow 6}$
33	1	3.03	5.05	6.18	7.26	9.06	10.6
	2	2.93	5.11	6.21	7.24	9.15	11.1
	เฉลี่ย	2.98 ± 0.07	5.08 ± 0.04	6.20 ± 0.02	7.25 ± 0.01	9.11 ± 0.06	10.85 ± 0.35
100	1	3.13	5.81	8.41	9.57	11.12	13.62
	2	3.15	6.09	8.3	9.66	11.18	13.71
	เฉลี่ย	3.14 ± 0.01	5.95 ± 0.20	8.36 ± 0.08	9.62 ± 0.06	11.15 ± 0.04	13.67 ± 0.06
300	1	3.61	9.18	10.59	12.33	14.56	16.05
	2	3.55	9.44	10.61	12.44	15.01	16.63
	เฉลี่ย	3.58 ± 0.04	9.31 ± 0.18	10.60 ± 0.01	12.39 ± 0.08	14.79 ± 0.32	16.34 ± 0.41
900	1	3.9	10.27	13.55	15.07	16.69	18.3
	2	3.82	10.46	13.73	15.3	16.51	18.43
	เฉลี่ย	3.86 ± 0.06	10.37 ± 0.13	13.64 ± 0.13	15.19 ± 0.16	16.60 ± 0.13	18.37 ± 0.09

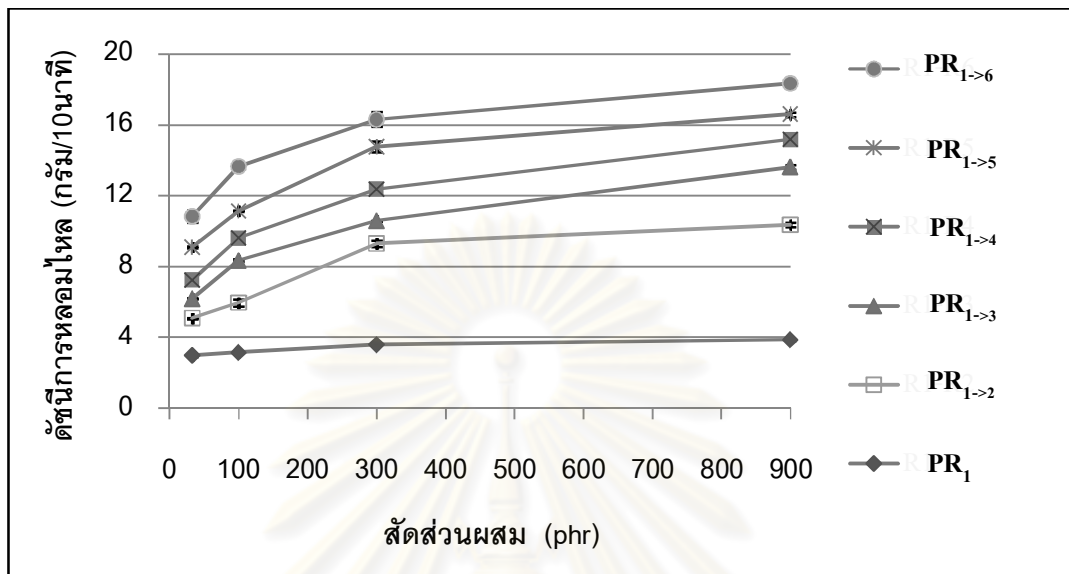
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับอุณหภูมิการหลอม จำแนกตามสัดส่วนผสมของ PR₁



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสม PR₁ จำแนกตามอุณหภูมิการหลอม



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมใหม่กับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่จำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6

2) ผลของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอมและระยะเวลาการให้ความร้อนต่อดัชนีการหลอมไหล

1) สำหรับการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการให้ความร้อน ที่มีผลต่อดัชนีการหลอมไหล โดยระยะเวลาในการให้ความร้อนจะเริ่มตั้งแต่ 6, 30, 90, 180, 360 และ 720 นาที อุณหภูมิการหลอม จะทำการทดสอบที่ 190-230 °C เนื่องจากที่อุณหภูมิ 170 °C พอลิเมอร์มีค่าดัชนีการหลอมไหลที่ต่ำมาก และที่อุณหภูมิ 250-270 °C พอลิเมอร์ผสมเริ่มมีการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองจากเดิมสีขาวขุ่นใส โดยผลการทดสอบแสดงตามตารางที่ 4.3 ถึง 4.5 และกราฟความสัมพันธ์ แสดงตามรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาการให้ความร้อน อุณหภูมิการหลอมตั้งแต่ 190-230 °C ตามลำดับ จำแนกตามสัดส่วนผสม PR₁ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนต่อพอลิเมอร์ผสม จะทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลการทดสอบที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 6 นาที

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่มีผลต่อดัชนีการหลอมไหล สัดส่วนผสมและจำนวนครั้งของการนำพอลิโพรไพลีนกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 โดยผลการทดสอบแสดงตามตารางที่ 4.6 ถึง 4.9 และกราฟความสัมพันธ์ดัง รูปที่ 4.7 ถึง 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาการให้ความร้อน และจำนวนครั้งของการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ จำแนกตามสัดส่วนผสมตั้งแต่ 33, 100, 300 และ 900 phr ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนต่อพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าดัชนีการหลอมไหลที่ระยะเวลาให้ความร้อน 6 นาที

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิการหลอม 190 °C

หน่วย : กรัม/10 นาที

อุณหภูมิ 190 °C		ระยะเวลาในการให้ความร้อน(นาที)					
PR ₁ (phr)	การ ทดลองที่	6	30	90	180	360	720
0	1	1.67	1.67	1.68	1.68	1.73	1.75
	2	1.70	1.70	1.84	1.77	1.78	1.85
	เฉลี่ย	1.69±0.02	1.69±0.02	1.76±0.11	1.73±0.06	1.76±0.03	1.80±0.07
33	1	1.73	1.73	1.73	1.74	1.75	1.77
	2	1.76	1.74	1.81	1.85	1.86	1.96
	เฉลี่ย	1.74±0.02	1.74±0.01	1.77±0.05	1.80±0.07	1.80±0.08	1.87±0.13
100	1	1.76	1.76	1.76	1.76	1.77	1.79
	2	1.87	1.86	1.93	1.98	2.00	2.06
	เฉลี่ย	1.81±0.08	1.81±0.07	1.84±0.11	1.87±0.15	1.88±0.16	1.93±0.19
300	1	1.77	1.77	1.77	1.77	1.79	1.81
	2	1.92	1.97	2.09	2.08	2.13	2.21
	เฉลี่ย	1.84±0.10	1.87±0.14	1.93±0.22	1.93±0.22	1.96±0.24	2.01±0.28
900	1	1.91	1.92	1.92	2.00	2.04	2.12
	2	1.93	1.97	2.02	2.15	2.21	2.25
	เฉลี่ย	1.92±0.01	1.94±0.04	1.97±0.04	2.08±0.11	2.13±0.12	2.18±0.09

ตารางที่ 4.4 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิการหลอม 210 °C

หน่วย : กรัม/10 นาที

อุณหภูมิ 210 °C		ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
PR ₁ (phr)	การ ทดลองที่	6	30	90	180	360	720
0	1	2.54	2.55	2.76	2.75	2.76	2.77
	2	2.55	2.60	2.78	2.85	2.87	2.88
	เฉลี่ย	2.55±0.01	2.58±0.04	2.77±0.02	2.80±0.07	2.82±0.08	2.82±0.07
33	1	3.03	3.25	3.33	3.32	3.33	3.33
	2	2.93	3.09	3.32	3.35	3.35	3.44
	เฉลี่ย	2.98±0.07	3.17±0.11	3.32±0.01	3.33±0.02	3.34±0.01	3.39±0.08
100	1	3.13	3.20	3.42	3.41	3.41	3.46
	2	3.15	3.17	3.39	3.45	3.51	3.58
	เฉลี่ย	3.14±0.02	3.19±0.02	3.41±0.02	3.43±0.03	3.46±0.07	3.52±0.09
300	1	3.56	3.67	3.79	3.79	3.79	3.80
	2	3.43	3.68	3.91	3.89	4.06	4.16
	เฉลี่ย	3.49±0.09	3.67±0.01	3.85±0.09	3.84±0.07	3.92±0.19	3.98±0.26
900	1	3.90	3.91	3.93	3.95	4.08	4.13
	2	3.82	3.88	3.98	4.08	4.17	4.28
	เฉลี่ย	3.86±0.06	3.90±0.02	3.96±0.04	4.02±0.09	4.13±0.06	4.20±0.11

ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิการหลอม 230 °C

หน่วย : กรัม/10 นาที

อุณหภูมิ 230 °C		ระยะเวลาในการให้ความร้อน(นาที)					
PR ₁ (phr)	การ ทดลองที่	6	30	90	180	360	720
0	1	3.93	3.95	3.99	3.99	4.09	4.12
	2	3.93	4.03	4.13	4.19	4.25	4.24
	เฉลี่ย	3.93±0.01	3.99±0.06	4.06±0.10	4.09±0.14	4.17±0.11	4.18±0.09
33	1	3.98	4.11	4.26	4.27	4.28	4.29
	2	4.01	4.14	4.31	4.34	4.39	4.38
	เฉลี่ย	4.00±0.02	4.13±0.02	4.29±0.03	4.31±0.05	4.34±0.08	4.34±0.06
100	1	4.48	4.54	4.67	4.68	4.68	4.68
	2	4.47	4.54	4.76	4.85	4.94	4.99
	เฉลี่ย	4.47±0.01	4.54±0.01	4.71±0.06	4.76±0.12	4.81±0.19	4.84±0.21
300	1	4.51	4.69	5.06	5.04	5.15	5.34
	2	4.63	4.71	5.03	5.12	5.24	5.35
	เฉลี่ย	4.57±0.09	4.70±0.02	5.05±0.02	5.08±0.06	5.20±0.07	5.34±0.01
900	1	4.77	4.95	5.27	5.25	5.31	5.48
	2	4.82	4.96	5.29	5.36	5.40	5.52
	เฉลี่ย	4.79±0.04	4.96±0.01	5.28±0.02	5.31±0.08	5.36±0.06	5.50±0.03

ตารางที่ 4.6 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 33PR_{1->n}

อุณหภูมิการหลอม 210 °C

หน่วย : กรัม/10 นาที

สัดส่วนผสม (phr)	PR _{1->n}	การทดลอง	ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
			6	30	90	180	360	720
33	PR ₁	1	3.03	3.25	3.33	3.32	3.33	3.33
		2	2.93	3.09	3.32	3.35	3.35	3.44
		เฉลี่ย	2.98±0.07	3.17±0.11	3.32±0.01	3.33±0.02	3.34±0.01	3.32±0.08
	PR _{1>2}	1	5.05	5.16	5.20	5.35	5.81	6.11
		2	5.11	5.35	5.50	5.56	5.90	6.18
		เฉลี่ย	5.08±0.04	5.26±0.14	5.35±0.21	5.46±0.15	5.85±0.07	6.14±0.05
	PR _{1>3}	1	6.18	6.28	6.36	6.37	6.48	7.06
		2	6.21	6.38	6.51	6.68	6.94	7.20
		เฉลี่ย	6.20±0.02	6.33±0.07	6.44±0.10	6.53±0.22	6.71±0.32	7.13±0.10
	PR _{1>4}	1	7.26	7.28	7.57	7.77	7.86	8.07
		2	7.24	7.39	7.64	7.84	7.93	8.14
		เฉลี่ย	7.25±0.01	7.33±0.08	7.60±0.05	7.80±0.05	7.89±0.05	8.11±0.05
	PR _{1>5}	1	9.06	9.18	9.26	9.42	9.56	9.82
		2	9.15	9.21	9.46	9.62	9.92	10.55
		เฉลี่ย	9.10±0.06	9.19±0.02	9.36±0.14	9.52±0.14	9.74±0.25	10.18±0.52
	PR _{1>6}	1	10.60	10.68	10.71	10.80	10.89	11.06
		2	11.10	11.10	11.13	11.28	11.37	11.43
		เฉลี่ย	10.85±0.35	10.89±0.30	10.92±0.30	11.04±0.34	11.13±0.34	11.06±0.26

ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 100PR_{1->n}

อุณหภูมิการหลอม 210 °C

หน่วย : กรัม/10 นาที

สัดส่วนผสม (phr)	PR _{1->n}	การทดลอง	ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
			6	30	90	180	360	720
100	PR ₁	1	3.13	3.20	3.42	3.41	3.41	3.46
		2	3.15	3.17	3.39	3.45	3.51	3.58
		เฉลี่ย	3.14±0.02	3.19±0.02	3.41±0.02	3.43±0.03	3.46±0.07	3.52±0.09
	PR _{1>2}	1	5.81	5.77	5.77	5.96	6.44	6.70
		2	6.09	6.19	6.32	6.46	6.69	6.96
		เฉลี่ย	5.95±0.20	5.98±0.29	6.05±0.39	6.21±0.36	6.57±0.18	6.83±0.18
	PR _{1>3}	1	8.41	8.41	8.55	8.75	8.92	9.03
		2	8.30	8.53	8.65	8.87	9.05	9.25
		เฉลี่ย	8.36±0.08	8.47±0.09	8.60±0.06	8.81±0.09	8.98±0.10	9.14±0.16
	PR _{1>4}	1	9.57	9.59	9.69	9.81	10.16	10.20
		2	9.66	9.68	9.74	9.83	10.12	10.88
		เฉลี่ย	9.61±0.07	9.63±0.07	9.72±0.04	9.82±0.01	10.14±0.03	1.54±0.48
	PR _{1>5}	1	11.11	11.20	11.21	11.27	11.33	11.31
		2	11.18	11.22	11.31	11.34	11.28	11.37
		เฉลี่ย	11.14±0.05	11.21±0.01	11.26±0.07	11.31±0.05	11.30±0.04	11.31±0.04
	PR _{1>6}	1	13.62	13.59	13.57	13.73	13.80	13.80
		2	13.71	13.67	13.70	13.76	13.84	13.89
		เฉลี่ย	13.67±0.07	13.63±0.06	13.63±0.10	13.74±0.02	13.82±0.03	13.80±0.06

ตารางที่ 4.8 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม

300PR_{1->n} อุณหภูมิการหลอม 210 °C

หน่วย : กรัม/10 นาที

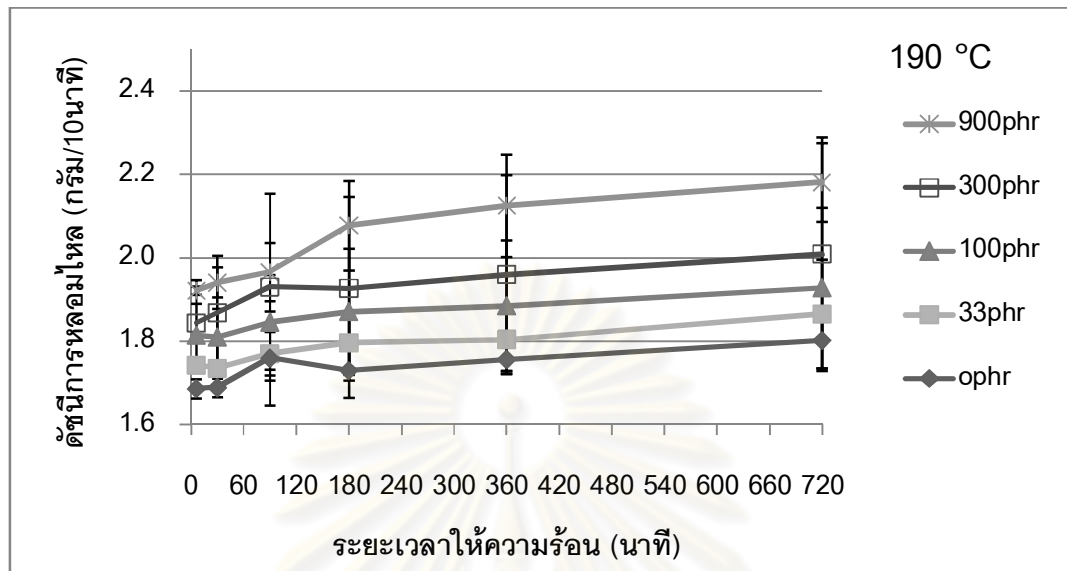
สัดส่วนผสม (phr)	PR _{1->n}	การทดลอง	ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
			6	30	90	180	360	720
300	PR ₁	1	3.56	3.67	3.79	3.79	3.79	3.80
		2	3.43	3.68	3.91	3.89	4.06	4.17
		เฉลี่ย	3.49±0.09	3.67±0.01	3.85±0.07	3.84±0.07	3.92±0.19	3.98±0.27
	PR _{1>2}	1	9.18	9.22	9.30	9.37	9.42	9.55
		2	9.44	9.55	9.63	9.66	9.75	10.24
		เฉลี่ย	9.31±0.19	9.39±0.23	9.46±0.23	9.51±0.20	9.59±0.23	9.89±0.49
	PR _{1>3}	1	10.59	10.77	11.06	11.19	11.26	11.39
		2	10.61	10.87	11.31	11.36	11.41	11.49
		เฉลี่ย	10.60±0.02	10.82±0.07	11.19±0.18	11.28±0.12	11.33±0.10	11.39±0.08
	PR _{1>4}	1	12.33	12.35	12.37	12.43	12.52	12.57
		2	12.44	12.51	12.49	12.59	12.61	12.71
		เฉลี่ย	12.38±0.08	12.43±0.11	12.43±0.08	12.51±0.11	12.56±0.06	12.57±0.10
	PR _{1>5}	1	14.56	14.60	14.60	14.68	14.69	14.69
		2	15.01	14.78	14.73	14.82	14.85	14.89
		เฉลี่ย	14.79±0.31	14.69±0.12	14.67±0.09	14.75±0.10	14.77±0.11	14.69±0.14
	PR _{1>6}	1	16.05	16.45	16.07	16.50	16.65	16.99
		2	16.63	16.57	16.69	16.72	16.73	17.01
		เฉลี่ย	16.34±0.41	16.51±0.08	16.38±0.44	16.61±0.16	16.69±0.06	16.99±0.01

ตารางที่ 4.9 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 900PR_{1->n}

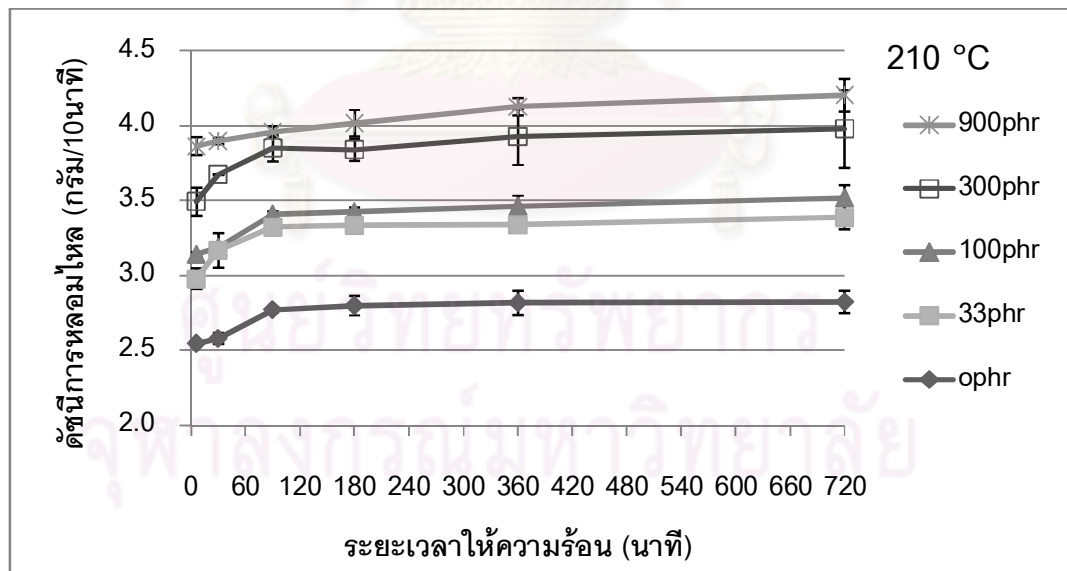
อุณหภูมิการหลอม 210 °C

หน่วย : กรัม/10 นาที

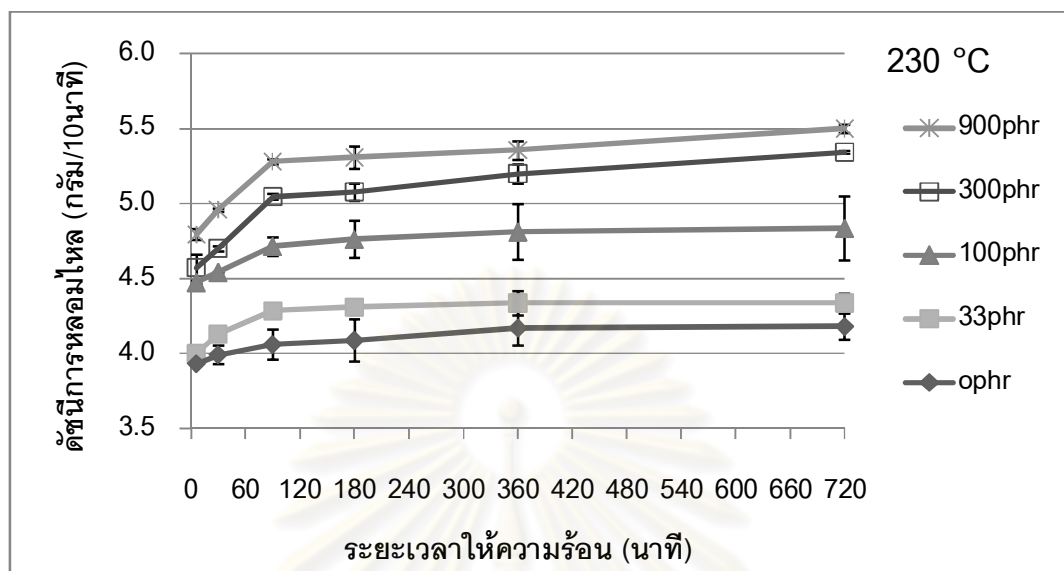
สัดส่วนผสม (phr)	PR _{1->n}	การทดลอง	ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
			6	30	90	180	360	720
900	PR ₁	1	3.90	3.91	3.93	3.95	4.08	4.13
		2	3.82	3.88	3.98	4.08	4.17	4.28
		เฉลี่ย	3.86±0.06	3.90±0.02	3.96±0.04	4.02±0.09	4.13±0.06	4.20±0.11
	PR _{1>2}	1	10.27	10.28	10.43	10.76	10.85	10.85
		2	10.46	10.44	10.61	10.76	10.90	11.13
		เฉลี่ย	10.37±0.13	10.36±0.11	10.52±0.12	10.76±0.00	10.88±0.03	10.99±0.20
	PR _{1>3}	1	13.55	13.67	13.78	13.78	13.94	14.07
		2	13.73	13.63	13.83	13.78	13.94	14.07
		เฉลี่ย	13.64±0.12	13.65±0.03	13.80±0.04	13.78±0.01	13.94±0.01	14.07±0.01
	PR _{1>4}	1	15.07	14.88	15.18	15.37	15.18	15.29
		2	15.30	15.24	15.32	15.42	15.48	15.59
		เฉลี่ย	15.19±0.16	15.06±0.26	15.25±0.10	15.39±0.04	15.33±0.21	15.29±0.21
	PR _{1>5}	1	16.69	16.67	16.77	16.84	16.93	16.99
		2	16.51	16.45	16.49	16.56	16.59	17.11
		เฉลี่ย	16.60±0.12	16.56±0.16	16.63±0.20	16.70±0.20	16.76±0.24	16.99±0.08
	PR _{1>6}	1	18.30	18.37	18.47	18.64	18.72	18.90
		2	18.43	18.47	18.56	18.73	18.85	18.91
		เฉลี่ย	18.37±0.09	18.42±0.07	18.51±0.07	18.68±0.06	18.79±0.09	18.90±0.01



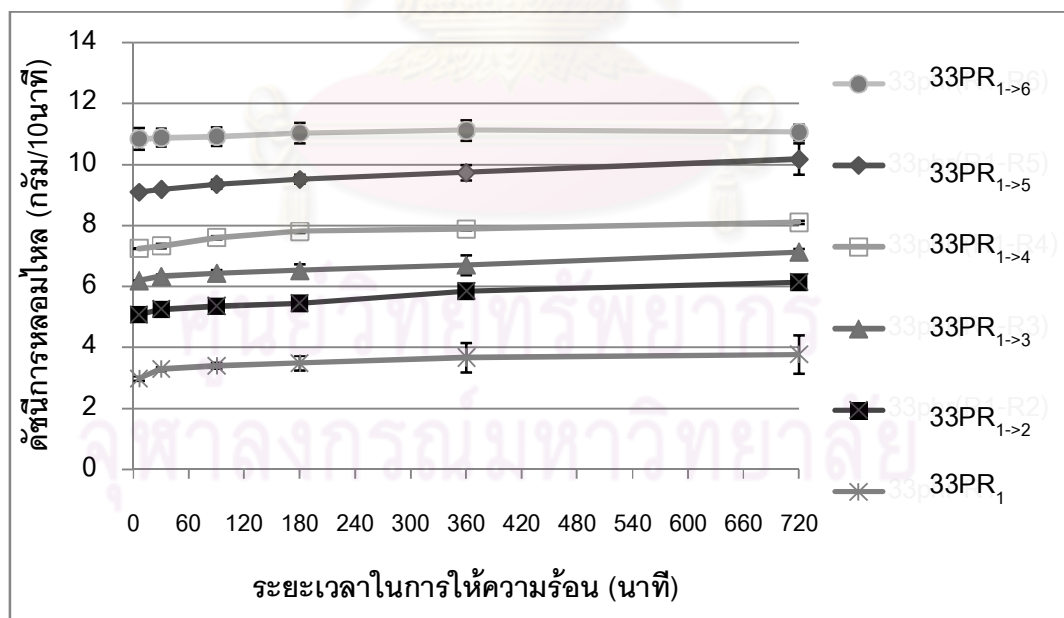
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหมกับระยะเวลาการให้ความร้อน จำแนกตามสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการหลอม 190 °C



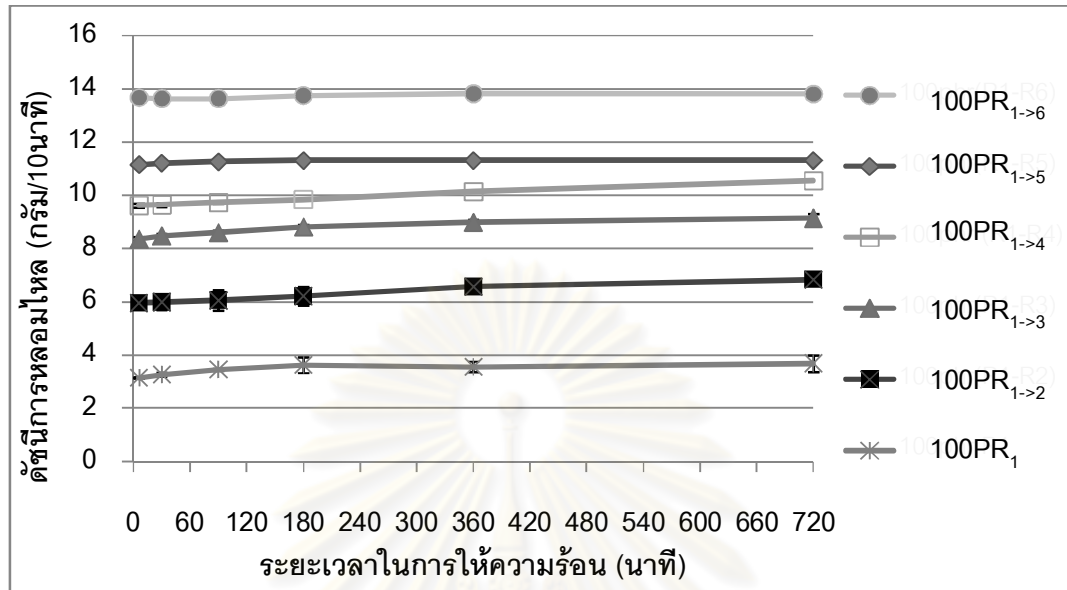
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหมกับระยะเวลาการให้ความร้อน จำแนกตามสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการหลอม 210 °C



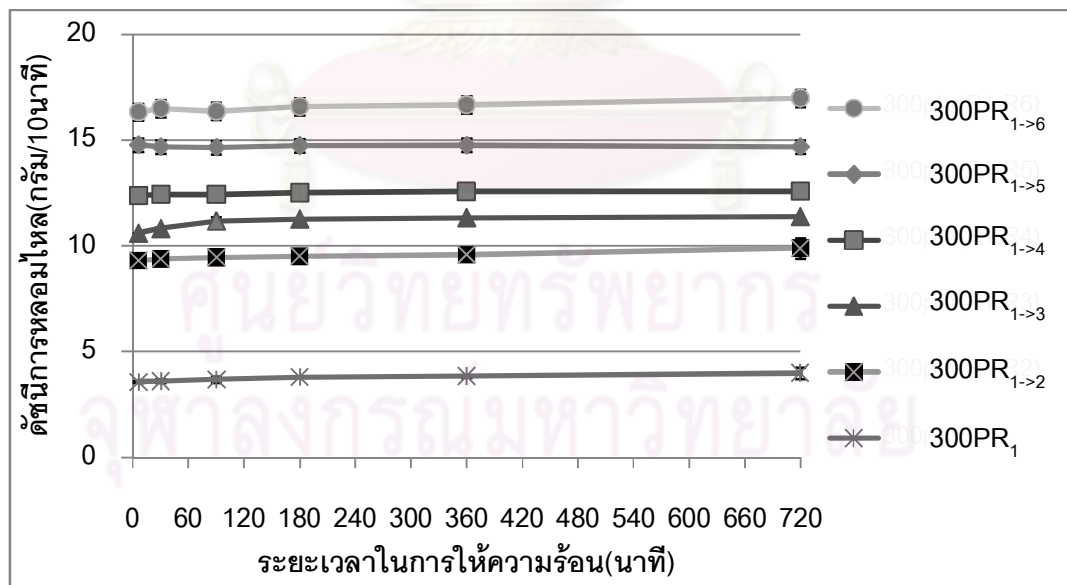
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหมกับระยะเวลาการให้ความร้อน จำแนกตามสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการหลอม 230 °C



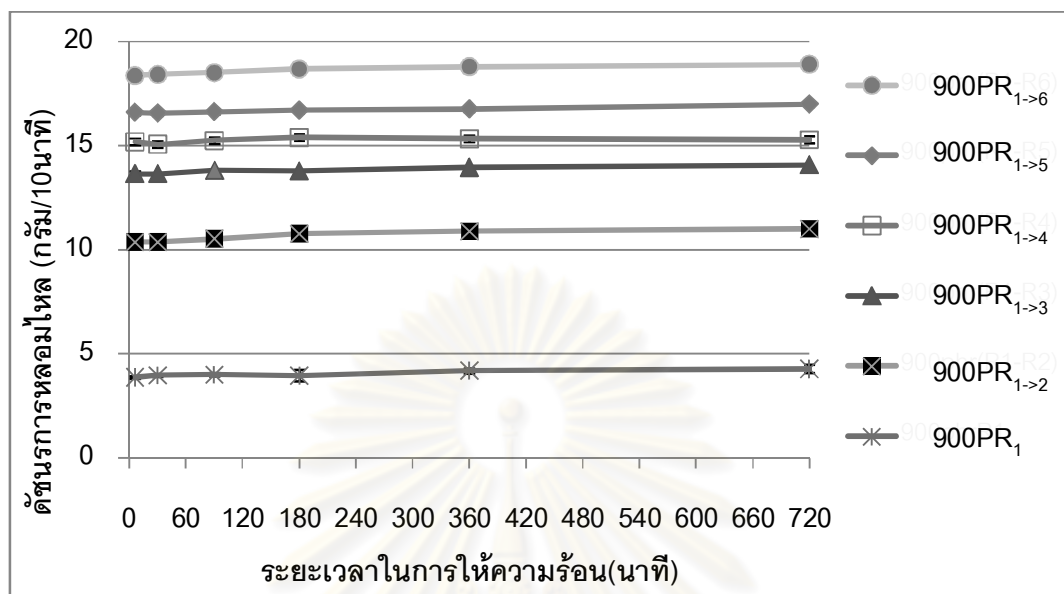
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหมกับระยะเวลาให้ความร้อนสัดส่วนผสม 33 phr จำแนกตามการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 อุณหภูมิการหลอม 210 °C



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาให้ความร้อน สัดส่วนผสม 100 phr จำแนกตามการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 อุณหภูมิการหลอม 210 °C



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาให้ความร้อน สัดส่วนผสม 300 phr จำแนกตามการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 อุณหภูมิการหลอม 210 °C



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหมกับระยะเวลาให้ความร้อน สัดส่วนผสม 900 phr จำแนกตามการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 อุณหภูมิหลอม 210 °C

3) ผลของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอมและระยะเวลาการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม

การทดลองนี้จะสังเกตการณ์สีของพอลิเมอร์ผสมโดยวิธีการดูสีที่เปลี่ยนไปของพอลิเมอร์ (Discoloration) ขณะที่ทดสอบดัชนีการหลอมไหล ซึ่งผลการทดสอบดัง ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสีของพอลิเมอร์ผสม PR₁ กับอุณหภูมิการหลอม โดยพบว่า พอลิเมอร์ผสมเริ่มมีการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนจากสีเดิมขาวขุ่น หรือเกิดการเสื่อมที่อุณหภูมิ 250 °C ส่วนผสม PR₁ 300 phr เป็นต้นไป

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสีของพอลิเมอร์ผสม PR_{1-3n} ตามสัดส่วนผสมต่างที่อุณหภูมิการหลอม 210 °C โดยพบว่า พอลิเมอร์ผสมเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีเหลืองอ่อนอ่อนจากสีเดิมขาวขุ่น หรือเกิดการเสื่อม ที่ส่วนผสมที่มี PR₄ ผสมในปริมาณ 300 phr เป็นต้นไป

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบการเปลี่ยนสีของพอลิเมอร์ผสม PR₁ กับระยะเวลาการให้ความร้อนและอุณหภูมิการหลอมตั้งแต่ 190-230 °C แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมเริ่มมีการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนจากสีเดิมสีขาวขุ่น หรือเกิดการเสื่อมที่อุณหภูมิ 230 °C สัดส่วนผสม PR₁ 100 phr ระยะเวลาให้ความร้อน 6 ชั่วโมง เป็นต้นไป และ สัดส่วนผสม PR₁ 300 และ 900 phr ระยะเวลาให้ความร้อนตั้งแต่ 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบการเปลี่ยนสีของพอลิเมอร์ผสม PR_{1-3n} กับสัดส่วนผสมและระยะเวลาการให้ความร้อนและอุณหภูมิการหลอมตั้งแต่ 210 °C แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมเริ่มมีการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนจากสีเดิมสีขาวขุ่น หรือเกิดการเสื่อมดังต่อไปนี้

- (1) สัดส่วนผสม 33 phr เมื่อมี PR₅ ผสมอยู่และระยะเวลาให้ความร้อน 6 ชั่วโมง เป็นต้นไป
- (2) สัดส่วนผสม 100 phr เมื่อมี PR₃ ผสมอยู่และระยะเวลาให้ความร้อน 3 ชั่วโมง เป็นต้นไป
- (3) สัดส่วนผสม 300 phr เมื่อมี PR₃ ผสมอยู่และระยะเวลาให้ความร้อน 1.5 ชั่วโมง เป็นต้นไป
- (4) สัดส่วนผสม 900 phr เมื่อมี PR₃ ผสมอยู่และระยะเวลาให้ความร้อน 1.5 ชั่วโมง เป็นต้นไป

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม PR₁ กับอุณหภูมิการหลอม

PR ₁ (phr)	อุณหภูมิ (°C)					
	170	190	210	230	250	270
0	○	○	○	○	○	●
33	○	○	○	○	○	●
100	○	○	○	○	●	●
300	○	○	○	○	●	●
900	○	○	○	○	●	●

phr = สัดส่วนผสม ส่วนต่อร้อยส่วนเรซิน (part per hundred PP resin) ,

○ คือ ไม่เสื่อมหรือสีขาวขุ่น (สีปกติ); ● คือ เปลี่ยนเป็นสีเหลือง

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม PR_{1-n} กับอุณหภูมิการหลอม

210 °C

phr	PR ₁	PR _{1->2}	PR _{1->3}	PR _{1->4}	PR _{1->5}	PR _{1->6}
33	○	○	○	○	○	●
100	○	○	○	○	●	●
300	○	○	○	●	●	●
900	○	○	○	●	●	●

phr = สัดส่วนผสม ส่วนต่อร้อยส่วนเรซิน (part per hundred PP resin) ,

○ คือ ไม่เสื่อมหรือสีขาวขุ่น (สีปกติ); ● คือ เปลี่ยนเป็นสีเหลือง

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม PR₁ กับอุณหภูมิการหลอม 190-230 °C และระยะเวลาการให้ความร้อน

อุณหภูมิ (°C)	PR ₁ (phr)	ระยะเวลาการให้ความร้อน (นาที)					
		6	30	90	180	360	720
190	0	○	○	○	○	○	○
	33	○	○	○	○	○	○
	100	○	○	○	○	○	○
	300	○	○	○	○	○	○
	900	○	○	○	○	○	○
210	0	○	○	○	○	○	○
	33	○	○	○	○	○	○
	100	○	○	○	○	○	○
	300	○	○	○	○	○	○
	900	○	○	○	○	○	○
230	0	○	○	○	○	○	○
	33	○	○	○	○	○	○
	100	○	○	○	○	○	●
	300	○	○	○	○	●	●
	900	○	○	○	○	●	●

phr = สัดส่วนผสม ส่วนต่อร้อยส่วนเรซิน (part per hundred PP resin) ,

○ คือ ไม่เสื่อมหรือสีขาวขุ่น (สีปกติ); ● คือ เปลี่ยนเป็นสีเหลือง

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} และระยะเวลาการให้ความร้อน อุณหภูมิการหลอม 210 °C

T210 °C		ระยะเวลาการให้ความร้อน (นาที)					
ส่วนผสม		6	30	90	180	360	720
33 phr	PR ₁	○	○	○	○	○	○
	PR _{1->2}	○	○	○	○	○	○
	PR _{1->3}	○	○	○	○	○	○
	PR _{1->4}	○	○	○	○	○	○
	PR _{1->5}	○	○	○	○	○	●
	PR _{1->6}	●	●	●	●	●	●
100 phr	PR ₁	○	○	○	○	○	○
	PR _{1->2}	○	○	○	○	○	○
	PR _{1->3}	○	○	○	○	●	●
	PR _{1->4}	○	○	○	○	●	●
	PR _{1->5}	●	●	●	●	●	●
	PR _{1->6}	●	●	●	●	●	●
300 phr	PR ₁	○	○	○	○	○	○
	PR _{1->2}	○	○	○	○	○	○
	PR _{1->3}	○	○	○	●	●	●
	PR _{1->4}	●	●	●	●	●	●
	PR _{1->5}	●	●	●	●	●	●
	PR _{1->6}	●	●	●	●	●	●
900 phr	PR ₁	○	○	○	○	○	○
	PR _{1->2}	○	○	○	○	○	○
	PR _{1->3}	○	○	○	●	●	●
	PR _{1->4}	●	●	●	●	●	●
	PR _{1->5}	●	●	●	●	●	●
	PR _{1->6}	●	●	●	●	●	●

phr = สัดส่วนผสม ส่วนต่อร้อยส่วนเรซิน (part per hundred PP resin) , ○ คือ ไม่เสื่อมหรือสีขาวขึ้น (สีปกติ); ● คือ เปลี่ยนเป็นสีเหลือง

4.1.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม

จากการนำผิวหน้าของชิ้นทดสอบที่ถูกนำไปหักที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว โดยรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 จะพิจารณาสัดส่วนผสม PR₁ กับอุณหภูมิการหลอมขึ้นรูป 190, 230 และ 270 °C สำหรับรูปที่ 4.14 ถึง 4.16 จะพิจารณาสัดส่วนผสมและจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ผสมอยู่ ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และอุณหภูมิขึ้นรูป 210 °C แสดงตามรูปดังต่อไปนี้

1) ผลของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม

รูปที่ 4.11 ถึง 4.13 แสดงภาพจุลภาคของผิวหน้ารอยหักของ พอลิเมอร์ผสม PR₁ ตามสัดส่วนผสมและอุณหภูมิการขึ้นรูป 190, 230 และ 270 °C ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า พบว่า ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 190 °C ลายของโครงสร้างที่เกิดจากการหักชิ้นงาน (Patchwork) ของชิ้นทดสอบมีลักษณะใหญ่และขนาดใกล้เคียงกันของชิ้นงานทุกสัดส่วนผสม สำหรับที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 230 °C และ 270 °C Patchwork ของพอลิโพรพิลีนใหม่ (PP) และที่สัดส่วนผสม PR₁ 100 phr จะมีขนาดใหญ่กว่าที่สัดส่วนผสม PR₁ 900 phr เล็กน้อย

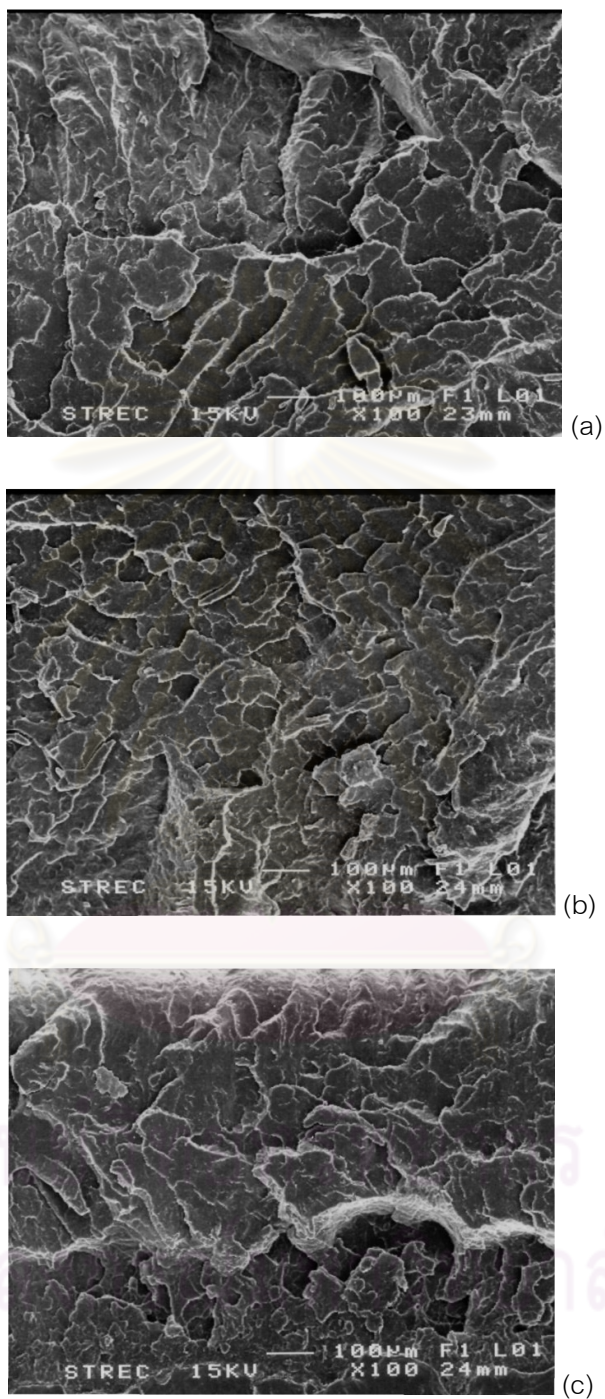
2) ผลของสัดส่วนผสม PR_{1->n} ต่อโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิการขึ้นรูป

210 °C

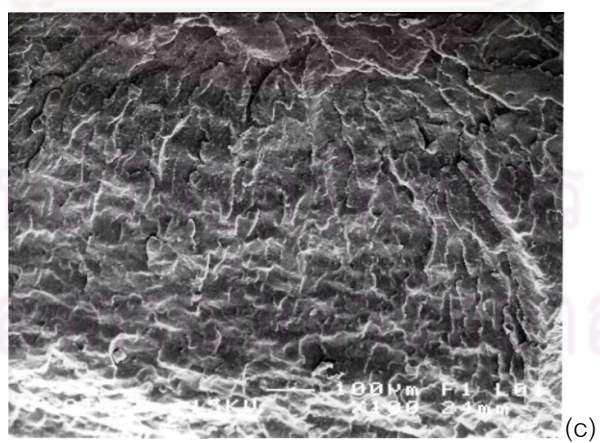
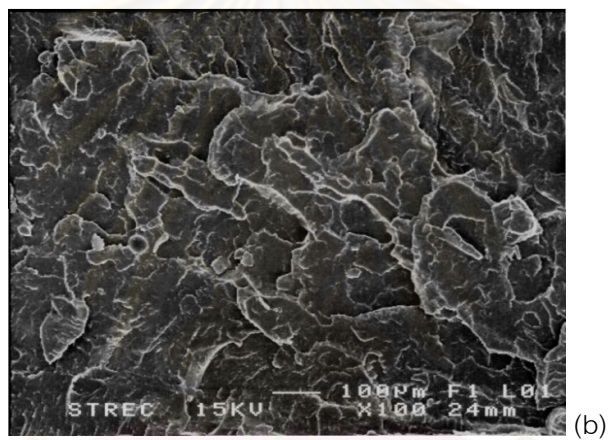
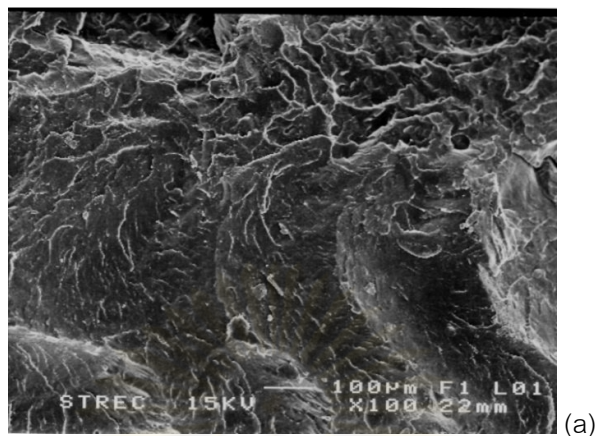
รูปที่ 4.14 แสดงภาพจุลภาคของผิวหน้ารอยหักของ พอลิเมอร์สัดส่วนผสม 33 phr ของ PR₁, PR_{1->3} และ PR_{1->6} ตามลำดับ ที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 210 °C แสดงให้เห็นว่า PR₁, PR_{1->3} จะมี Patchwork ที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับ PR_{1->6}

รูปที่ 4.15 แสดงภาพจุลภาคของผิวหน้ารอยหักของ พอลิเมอร์สัดส่วนผสม 100 phr ของ PR₁, PR_{1->3} และ PR_{1->6} ตามลำดับ ที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 210 °C แสดงให้เห็นว่า PR₁, PR_{1->3} จะมี Patchwork ที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับ PR_{1->6}

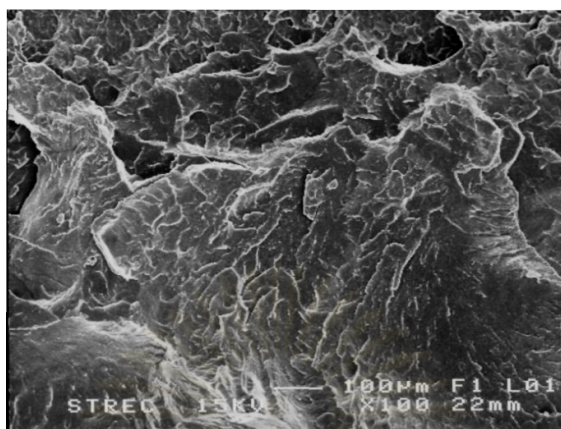
รูปที่ 4.16 แสดงภาพจุลภาคของผิวหน้ารอยหักของ พอลิเมอร์สัดส่วนผสม 900 phr ของ PR₁, PR_{1->3} และ PR_{1->6} ตามลำดับ ที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 210 °C แสดงให้เห็นว่า PR₁ จะมี Patchwork ที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับ PR_{1->3} และ PR_{1->6}



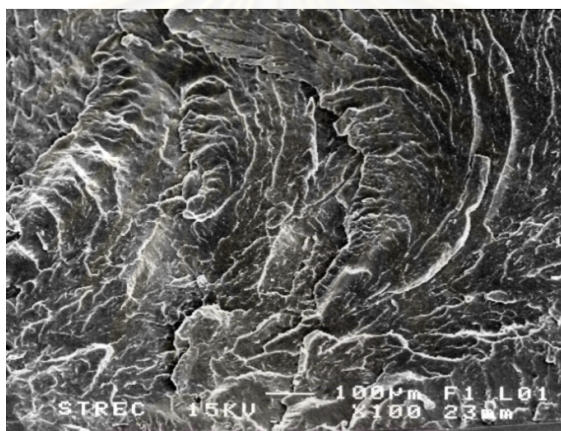
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PP (b) PR₁ 100 phr และ (c) PR₁ 900 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 190 °C กำลังขยาย 100 เท่า



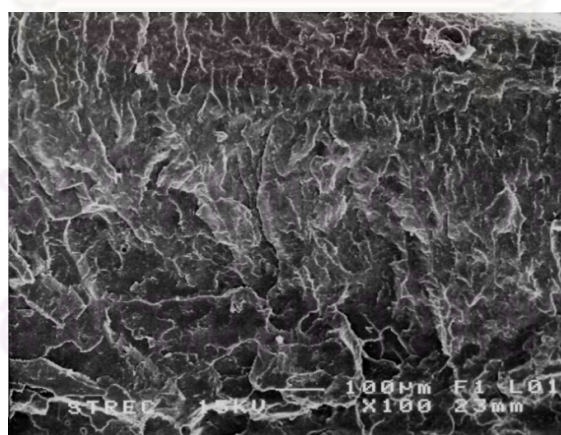
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PP (b) PR₁ 100 phr และ (c) PR₁ 900 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 230°C กำลังขยาย 100 เท่า



(a)

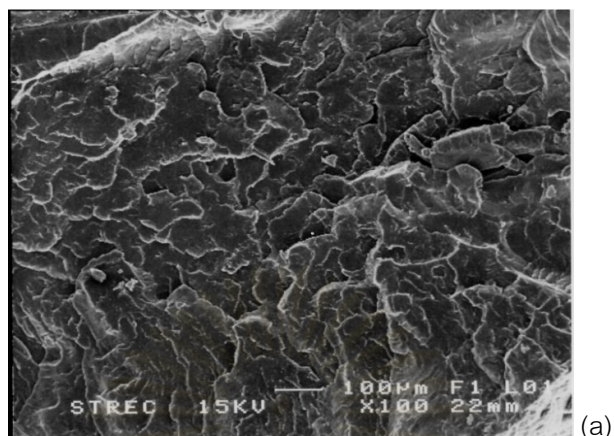


(b)

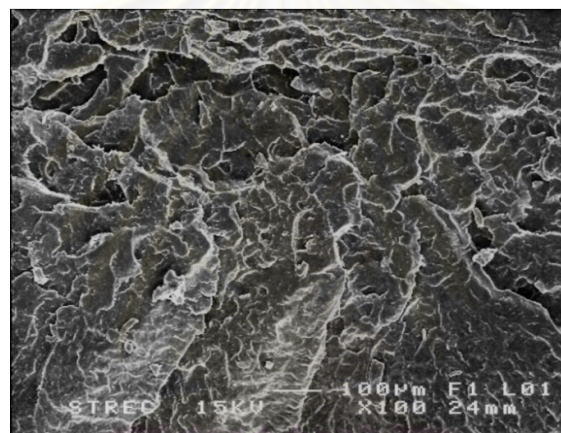


(c)

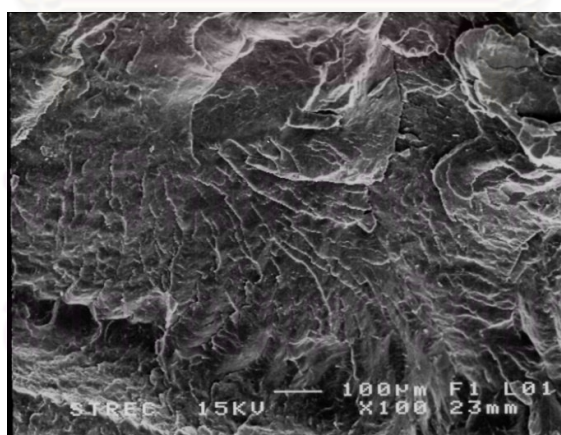
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PP (b) PR₁ 100 phr และ (c) PR₁ 900 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 270°C กำลังขยาย 100 เท่า



(a)

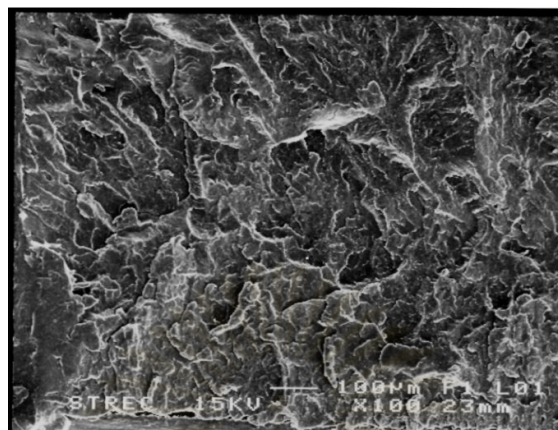


(b)

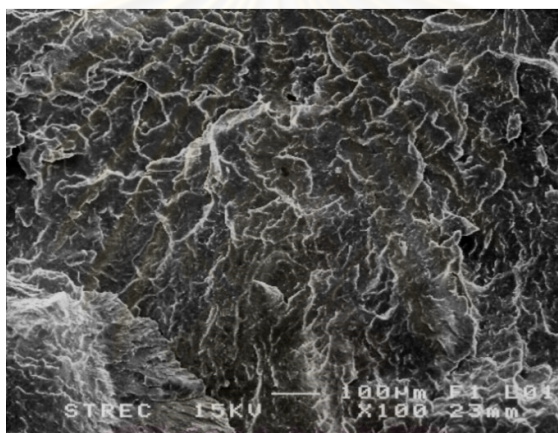


(c)

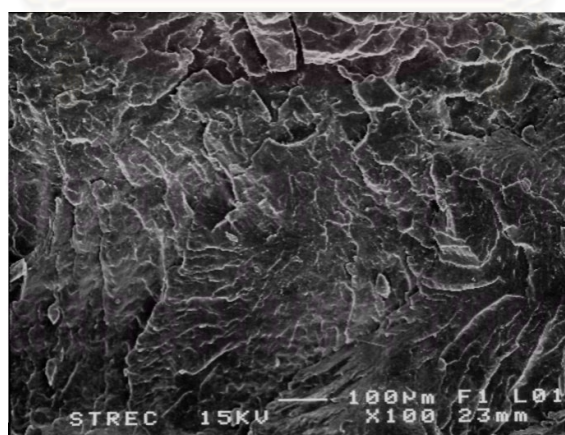
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PR_{1-33} phr (b) $PR_{1 \rightarrow 3-33}$ phr และ (c) PR_{1-6-33} phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ $210^{\circ}C$ กำลังขยาย 100 เท่า



(a)

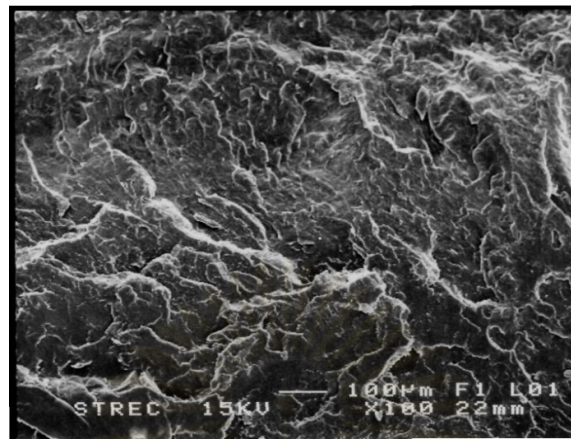


(b)

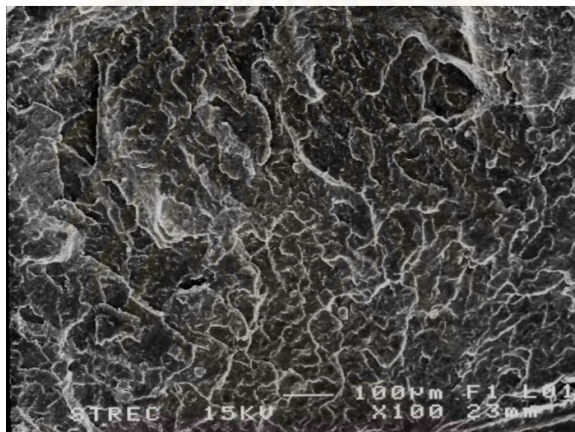


(c)

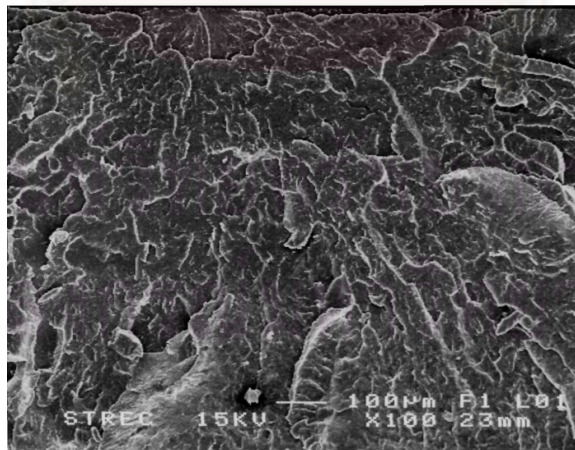
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PR₁, 100 phr (b) PR₁₋₃, 100 phr และ (c) PR₁₋₆, 100 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 210°C กำลังขยาย 100 เท่า



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้ารอยหักของ (a) PR₁ 900 phr (b) PR₁₋₃ 900 phr และ (c) PR₁₋₆ 900 phr ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 210°C กำลังขยาย 100 เท่า

4.1.3 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ

1). ผลของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าความถ่วงจำเพาะ

จากการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.14 และกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR_1 กับอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงให้เห็นว่าค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้จะเพิ่มสัดส่วนผสมของ PR_1 หรือ อุณหภูมิการขึ้นรูปก็ตาม โดยมีค่าเฉลี่ย 0.901 ± 0.002

2) ผลของสัดส่วนผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ ต่อค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^\circ C$

จากการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.15 และกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะ กับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 แสดงให้เห็นว่าค่าความถ่วงจำเพาะจะเริ่มมีค่าลดลงตั้งแต่การผสม PR_2 เป็นต้นไป และลดลงตามปริมาณสัดส่วนการผสมที่เพิ่มขึ้น

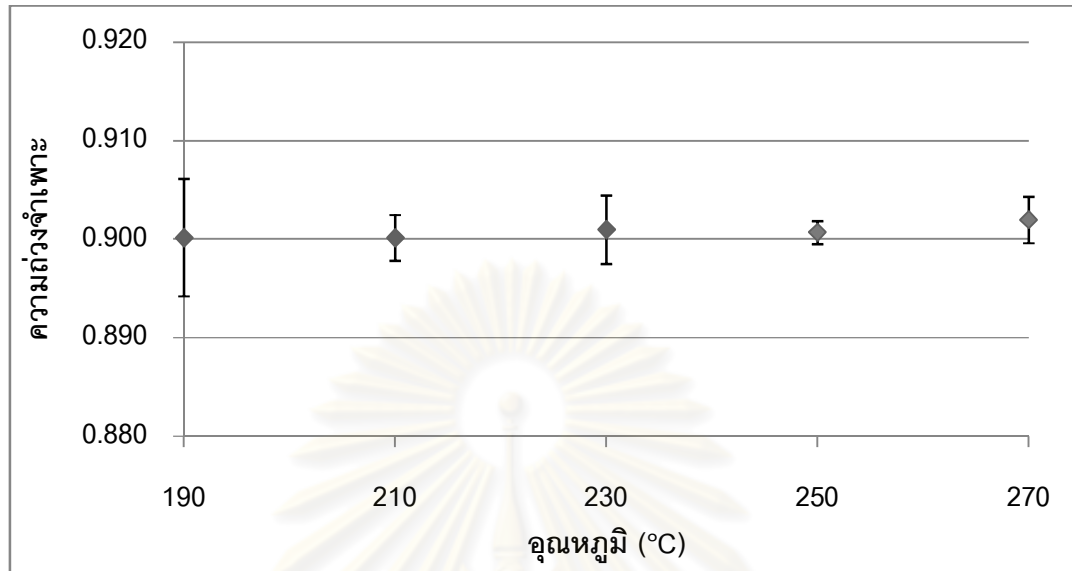
ตารางที่ 4.14 ค่าความถ่วงจำเพาะกับสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

PR ₁ (phr)	การ ทดลองที่	อุณหภูมิ(°C)				
		190	210	230	250	270
0	1	0.899	0.905	0.899	0.903	0.899
	2	0.900	0.899	0.897	0.899	0.905
	ค่าเฉลี่ย	0.899±0.001	0.902±0.004	0.898±0.001	0.901±0.003	0.902±0.004
33	1	0.900	0.901	0.896	0.902	0.904
	2	0.899	0.903	0.897	0.899	0.900
	ค่าเฉลี่ย	0.899±0.001	0.902±0.001	0.896±0.001	0.900±0.002	0.902±0.003
100	1	0.900	0.899	0.902	0.899	0.902
	2	0.900	0.896	0.903	0.902	0.902
	ค่าเฉลี่ย	0.900±0.001	0.898±0.002	0.902±0.001	0.901±0.003	0.902±0.001
300	1	0.898	0.898	0.907	0.902	0.897
	2	0.888	0.897	0.902	0.897	0.900
	ค่าเฉลี่ย	0.893±0.007	0.898±0.001	0.905±0.003	0.899±0.004	0.899±0.002
900	1	0.902	0.903	0.905	0.905	0.906
	2	0.917	0.900	0.901	0.901	0.905
	ค่าเฉลี่ย	0.910±0.011	0.901±0.002	0.903±0.002	0.903±0.003	0.905±0.001

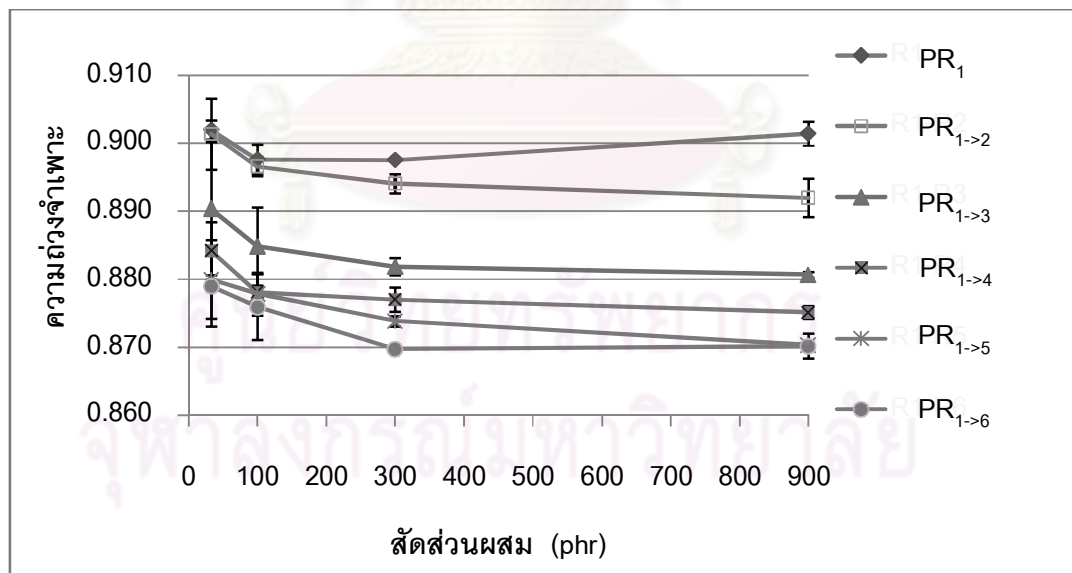
ตารางที่ 4.15 ค่าความถ่วงจำเพาะกับสัดส่วนผสมของ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

สัดส่วนผสม (phr)	การทดลองที่	PR _{1->n}					
		PR ₁	PR _{1->2}	PR _{1->3}	PR _{1->4}	PR _{1->5}	PR _{1->6}
33	1	0.901	0.898	0.884	0.881	0.876	0.875
	2	0.903	0.905	0.897	0.887	0.884	0.883
	เฉลี่ย	0.902±0.001	0.901±0.005	0.890±0.010	0.884±0.004	0.880±0.006	0.879±0.006
100	1	0.899	0.896	0.881	0.880	0.876	0.873
	2	0.896	0.898	0.889	0.876	0.880	0.879
	เฉลี่ย	0.898±0.002	0.897±0.001	0.885±0.006	0.878±0.003	0.878±0.003	0.876±0.005
300	1	0.898	0.893	0.881	0.876	0.873	0.870
	2	0.897	0.895	0.883	0.878	0.874	0.870
	เฉลี่ย	0.898±0.001	0.894±0.001	0.882±0.001	0.877±0.002	0.874±0.001	0.870±0.001
900	1	0.903	0.890	0.880	0.875	0.870	0.869
	2	0.900	0.894	0.881	0.876	0.871	0.872
	เฉลี่ย	0.902±0.001	0.892±0.003	0.881±0.001	0.875±0.001	0.870±0.001	0.870±0.001

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่จำเพาะเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR_1 กับอุณหภูมิการขึ้นรูป



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่จำเพาะ กับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่จะกล่าวต่อไป ประกอบไปด้วย คุณสมบัติภายใต้แรงดึง ความแข็ง และความทนต่อแรงกระแทก การทดสอบแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นผลการทดสอบของสัดส่วนผสม PR₁ ตั้งแต่ 0, 33, 100, 300 และ 900 phr และอุณหภูมิการขึ้นรูปตั้งแต่ 190, 210, 230, 250 และ 270 °C โดยที่คุณสมบัติภายใต้แรงดึงจะเพิ่มการทดสอบในช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูป 235, 240 และ 245 °C เพื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เริ่มส่งผลให้ค่าคุณสมบัติภายใต้แรงดึงมีค่าลดลง สำหรับส่วนที่สอง เป็นผลการทดสอบของสัดส่วนผสม PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C ได้ผลการทดสอบคุณสมบัติดังต่อไปนี้

4.2.1 ความทนต่อแรงดึง

1). ผลของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าความทนต่อแรงดึง

จากการทดสอบค่าความทนต่อแรงดึงของขึ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.16 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของสัดส่วนผสม PR₁ พบว่าให้ค่าความทนต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR₁ กับอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงตามรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงอุณหภูมิขึ้นรูปตั้งแต่ 190-240 °C โดยมีค่าเฉลี่ย 34.2±0.1 เมกะปาสคาล แต่มีแนวโน้มจะลดลงเล็กน้อยตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิ 245 °C เป็นต้นไป

2) ผลของสัดส่วนผสม PR_{1->n} ต่อค่าความทนต่อแรงดึงที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

จากการทดสอบค่าความทนต่อแรงดึงของขึ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.17 และกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อแรงดึงจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่การผสม PR₂ เป็นต้นไป และเพิ่มตามปริมาณสัดส่วนการผสมที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.16 ค่าความทนต่อแรงดึงสี่ส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

หน่วย : เมกะปาสคาล

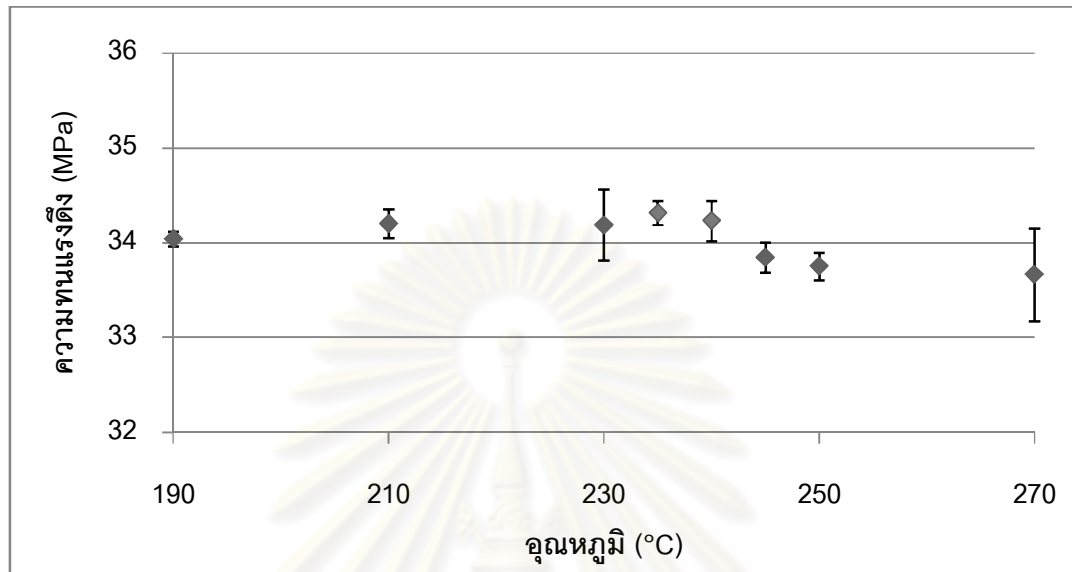
PR ₁ (phr)	การ ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)							
		190	210	230	235	240	245	250	270
0	1	34.2	34.7	34.3	34.6	33.9	33.5	33.6	33.4
	2	33.9	33.9	34.4	34.4	34.0	33.7	33.7	34.0
	เฉลี่ย	34.0±0.2	34.3±0.5	34.3±0.1	34.5±0.1	33.9±0.1	33.6±0.2	33.6±0.1	33.2±0.3
33	1	34.0	34.2	33.6	34.2	34.1	34.1	33.8	34.0
	2	34.1	34.2	33.6	34.4	34.3	34.0	34.1	34.2
	เฉลี่ย	34.0±0.1	34.2±0.1	33.6±0.1	34.3±0.2	34.2±0.2	34.1±0.1	33.9±0.2	33.9±0.1
100	1	33.6	34.1	33.8	34.3	34.0	33.7	33.7	33.9
	2	34.7	34.1	34.8	34.3	34.2	34.1	33.7	33.9
	เฉลี่ย	34.2±0.8	34.1±0.1	34.3±0.7	34.3±0.1	34.1±0.1	33.9±0.2	33.7±0.1	33.4±0.7
300	1	34.5	34.3	34.1	34.4	34.5	33.6	33.9	33.6
	2	33.5	34.5	34.3	34.1	34.6	34.2	33.9	33.9
	เฉลี่ย	34.0±0.7	34.4±0.1	34.2±0.1	34.3±0.2	34.5±0.1	33.9±0.4	33.9±0.1	33.8±0.3
900	1	33.6	34.2	34.9	33.9	33.9	33.6	34.2	31.6
	2	34.3	33.9	34.3	34.5	34.6	33.9	33.1	34.0
	เฉลี่ย	33.9±0.4	34.1±0.2	34.6±0.5	34.2±0.4	34.3±0.5	33.8±0.2	33.6±0.7	32.3±1.0

ตารางที่ 4.17 ค่าความทนต่อแรงดึงกับสัดส่วนผสมของ $PR_{1 \rightarrow n}$ คุณหมุมิการขึ้นรูป 210 °C

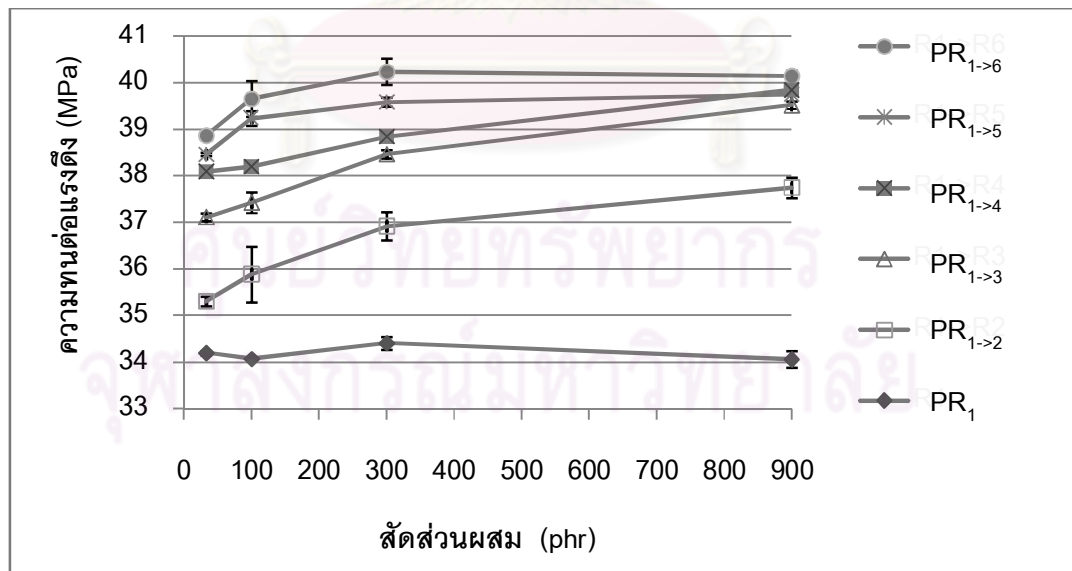
หน่วย : เมกะปาสคาล

สัดส่วนผสม (phr)	การ ทดลอง	$PR_{1 \rightarrow n}$					
		PR_1	$PR_{1 \rightarrow 2}$	$PR_{1 \rightarrow 3}$	$PR_{1 \rightarrow 4}$	$PR_{1 \rightarrow 5}$	$PR_{1 \rightarrow 6}$
33	1	34.2	35.4	37.1	38.1	38.5	38.9
	2	34.2	35.2	37.2	38.1	38.4	38.8
	เฉลี่ย	34.2 ± 0.1	35.3 ± 0.1	37.1 ± 0.1	38.1 ± 0.1	38.5 ± 0.1	38.9 ± 0.1
100	1	34.1	35.5	37.6	38.3	39.1	39.4
	2	34.1	36.3	37.3	38.1	39.4	39.9
	เฉลี่ย	34.1 ± 0.1	35.9 ± 0.6	37.4 ± 0.2	38.2 ± 0.1	39.2 ± 0.2	39.7 ± 0.9
300	1	34.3	37.1	38.5	38.8	39.7	40.0
	2	34.5	36.7	38.4	38.9	39.5	40.4
	เฉลี่ย	34.4 ± 0.1	36.9 ± 0.3	38.5 ± 0.1	38.8 ± 0.1	39.6 ± 0.1	40.2 ± 0.3
900	1	34.2	37.6	39.5	39.9	39.8	40.1
	2	33.9	37.9	39.6	39.8	39.8	40.2
	เฉลี่ย	34.1 ± 0.2	37.8 ± 0.2	39.5 ± 0.1	39.8 ± 0.1	39.8 ± 0.1	40.2 ± 0.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR₁ กับอุณหภูมิการขึ้นรูป



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6

4.2.2 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

1). ผลของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

จากการทดสอบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.18 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของสัดส่วนผสม PR_1 พบว่าให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสร้างกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR_1 กับอุณหภูมิการขึ้นรูป ตามรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปตั้งแต่ 190-240 °C โดยมีค่าเฉลี่ย 735±0.2 เมกะปาสคาล แต่มีแนวโน้มจะลดลงเล็กน้อยตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิ 245 °C เป็นต้นไป

2) ผลของสัดส่วนผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ ต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

จากการทดสอบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.19 และกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 แสดงให้เห็นว่าค่าความยืดหยุ่นจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่การผสม PR_2 เป็นต้นไป และเพิ่มตามปริมาณสัดส่วนการผสมที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.18 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

หน่วย : เมกะปาสคาล

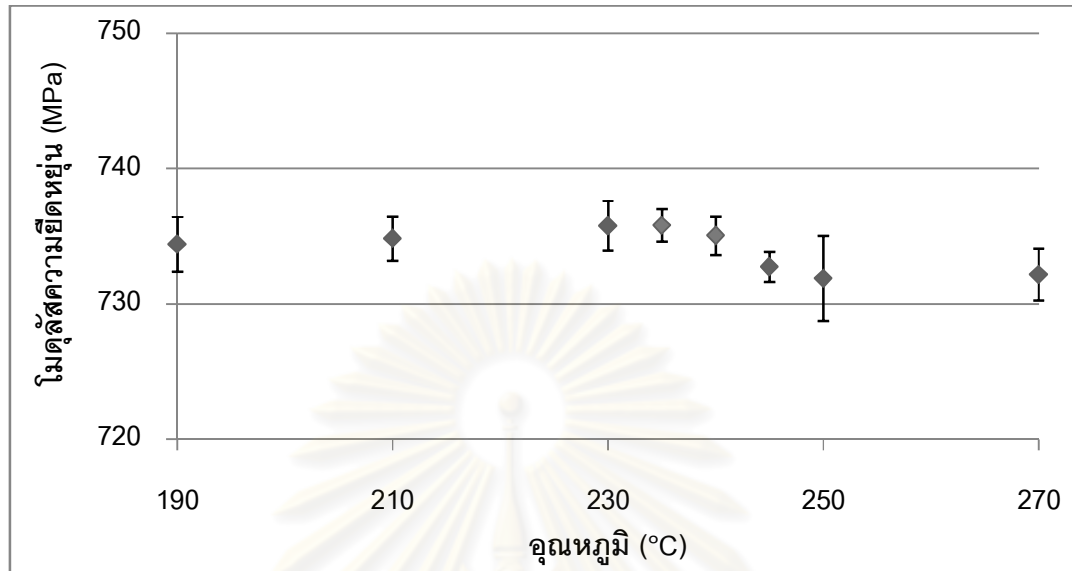
PR ₁ (phr)	การ ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)							
		190	210	230	235	240	245	250	270
0	1	729.9	730.5	735.8	737.7	736.0	734.0	733.8	731.7
	2	735.9	737.8	736.0	737.6	736.8	734.1	737.6	737.3
	เฉลี่ย	732.9±4.2	734.1±5.1	735.9±0.2	737.7±0.1	736.4±0.6	734.0±0.1	735.7±2.7	734.5±4.0
33	1	730.3	733.7	738.6	735.5	735.0	732.7	730.5	731.5
	2	738.8	739.7	738.3	736.5	736.9	733.9	737.5	729.9
	เฉลี่ย	734.6±5.9	736.7±4.3	738.4±0.2	736.0±0.7	735.9±1.4	733.3±0.8	733.9±5.0	730.7±1.1
100	1	728.1	736.3	733.0	734.6	734.9	732.2	727.3	733.1
	2	738.8	735.7	735.2	736.3	736.7	733.7	727.6	729.8
	เฉลี่ย	733.5±7.6	736.0±0.4	734.1±1.5	735.5±1.2	735.8±1.3	732.9±1.1	727.5±0.2	731.4±2.3
300	1	729.3	732.7	736.9	735.7	733.5	731.8	731.7	730.1
	2	737.2	732.4	736.0	735.6	734.3	733.0	731.3	730.5
	เฉลี่ย	733.3±5.6	732.5±0.3	736.4±0.6	735.6±0.1	733.9±0.6	732.4±0.8	731.5±0.3	730.3±0.3
900	1	736.6	734.4	733.3	734.0	732.5	732.1	732.0	728.6
	2	739.1	735.2	734.7	734.7	733.7	730.1	729.6	739.2
	เฉลี่ย	737.9±1.8	734.8±0.6	734.0±1.1	734.4±0.5	733.1±0.8	731.1±1.4	730.8±1.7	733.9±7.5

ตารางที่ 4.19 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับสัดส่วนผสมของ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

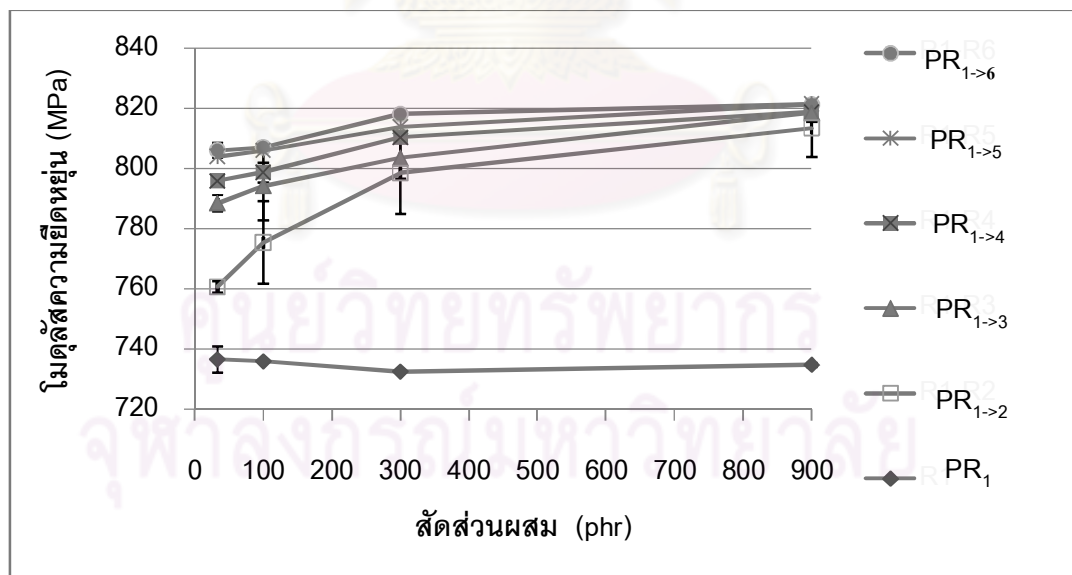
หน่วย : เมกะปาสคาล

สัดส่วนผสม (phr)	การทดลอง	PR _{1->n}					
		PR ₁	PR _{1->2}	PR _{1->3}	PR _{1->4}	PR _{1->5}	PR _{1->6}
33	1	733.6	762.2	790.5	796.5	802.9	804.4
	2	739.7	759.5	786.6	795.5	805.4	807.9
	เฉลี่ย	736.6±4.3	760.8±1.9	788.5±2.8	796.0±0.7	804.2±1.8	806.2±2.5
100	1	736.3	785.2	802.4	802.3	808.5	808
	2	735.7	765.8	786.2	795.2	803.8	806.2
	เฉลี่ย	736.0±0.4	775.5±13.7	794.3±11.5	798.7±5.0	806.2±3.3	807.1±1.3
300	1	732.6	808.2	808.4	811.4	814	818.6
	2	732.4	789	798.8	809.3	813.8	817.8
	เฉลี่ย	732.5±0.1	798.6±13.6	803.6±6.8	810.3±1.5	813.9±0.1	818.2±0.6
900	1	734.4	820.2	819.7	819.8	823.8	821.6
	2	735.2	806.8	817.6	817.9	819.2	821.3
	เฉลี่ย	734.8±0.6	813.5±9.5	818.6±1.5	818.8±1.3	821.5±3.2	821.4±0.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR₁ กับอุณหภูมิ การขึ้นรูป



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการ หลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6

4.2.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด

1). ผลของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด

จากการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ของขึ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.20 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของสัดส่วนผสม PR_1 พบว่าให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR_1 กับอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงตามรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 190-240 °C แต่จะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิการขึ้นรูปตั้งแต่ 245 °C เป็นต้นไป

2) ผลของสัดส่วนผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

จากการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดของขึ้นทดสอบ ได้ผลตามตารางที่ 4.21 และกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 แสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดจะเริ่มมีค่าลดลงตั้งแต่การผสม PR_2 เป็นต้นไป และลดลงตามปริมาณสัดส่วนการผสมที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด กับสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป

190-270 °C

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

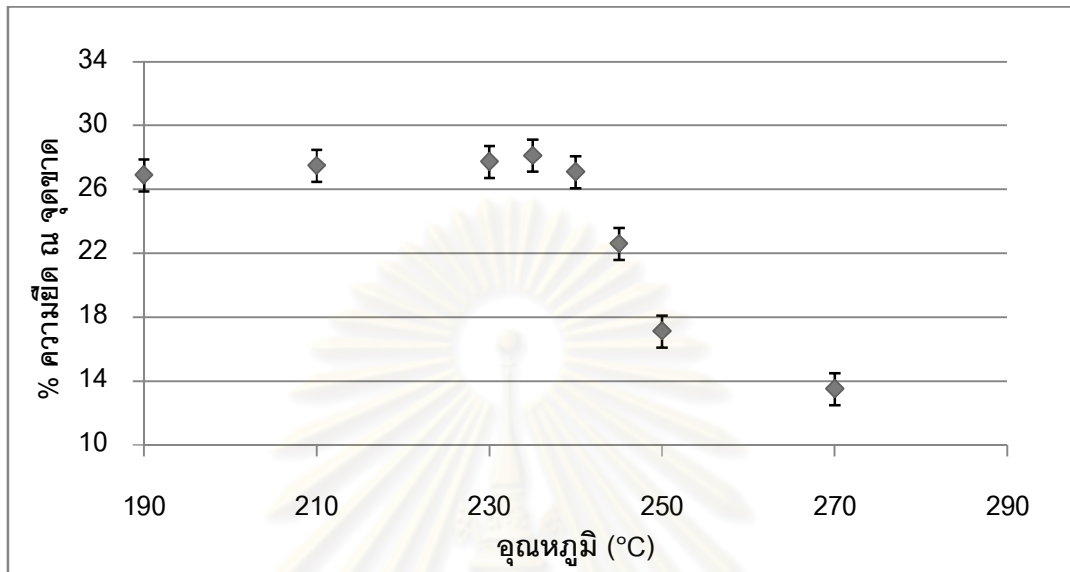
PR ₁ (phr)	การ ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)							
		190	210	230	235	240	245	250	270
0	1	25.3	28.1	28.8	28.1	27.4	23.9	17.4	13.1
	2	25.7	28.3	28.8	27.6	27.4	23.1	17.4	12.7
	เฉลี่ย	25.5±0.3	28.2±0.1	28.8±0.1	27.8±0.4	27.4±0.1	23.5±0.6	17.4±0.1	12.9±0.3
33	1	27.7	27.4	27.8	28.8	27.4	23.4	17.2	13.8
	2	27.7	27.6	27.2	28.3	27.9	23.1	22.2	12.4
	เฉลี่ย	27.7±0.1	27.5±0.2	27.5±0.4	28.6±0.3	27.6±0.4	23.2±0.2	19.7±3.5	13.1±1.0
100	1	28.2	27.6	27.9	28.6	26.7	22.5	14.8	15.0
	2	28.0	26.4	26.6	28.4	27.9	22.5	15.5	12.9
	เฉลี่ย	28.1±0.1	27.0±0.8	27.3±0.9	28.5±0.1	27.3±0.8	22.5±0.1	15.1±0.5	13.9±1.5
300	1	26.5	27.4	27.8	27.9	26.7	22.4	15.1	14.8
	2	25.2	27.5	27.8	28.1	27.1	22.6	16.1	15.1
	เฉลี่ย	25.9±0.9	27.5±0.1	27.8±0.1	27.9±0.1	26.9±0.3	22.5±0.1	15.6±0.7	14.9±0.2
900	1	27.4	27.0	27.7	27.8	26.1	21.8	17.5	14.0
	2	27.3	27.6	27.1	27.7	26.6	20.8	18.3	11.4
	เฉลี่ย	27.3±0.1	27.3±0.4	27.4±0.4	27.8±0.1	26.3±0.4	21.3±0.7	17.9±0.6	12.7±1.8

ตารางที่ 4.21 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด กับสัดส่วนผสมของ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป

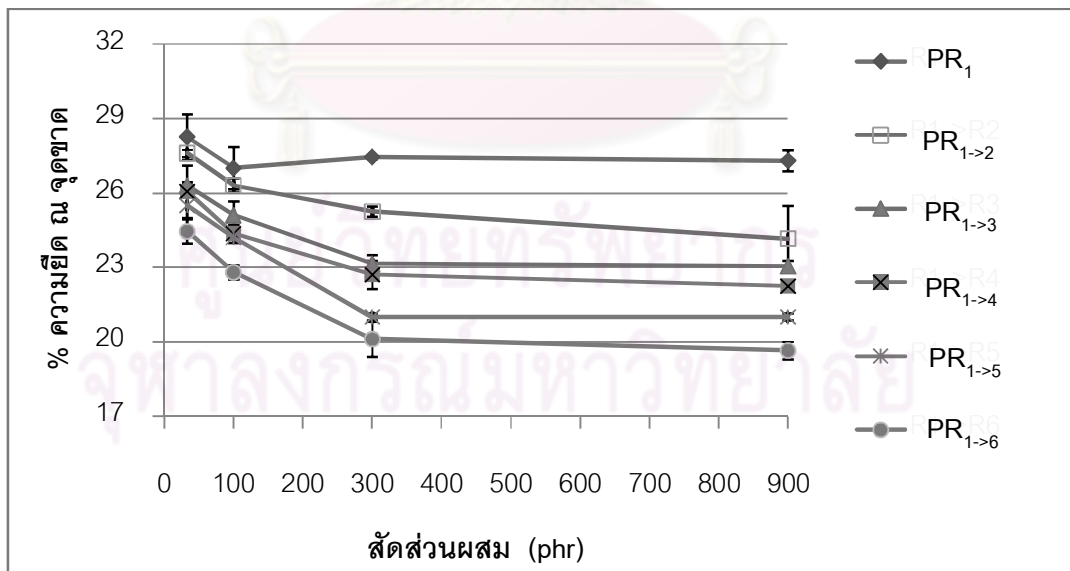
210 °C

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

สัดส่วนผสม(phr)	การทดลอง	$PR_{1 \rightarrow n}$					
		PR_1	$PR_{1 \rightarrow 2}$	$PR_{1 \rightarrow 3}$	$PR_{1 \rightarrow 4}$	$PR_{1 \rightarrow 5}$	$PR_{1 \rightarrow 6}$
33	1	28.9	27.5	26.2	26.8	26.1	24.1
	2	27.6	27.7	26.4	25.3	24.9	24.8
	เฉลี่ย	28.2 ± 0.9	27.6 ± 0.1	26.3 ± 0.1	26.1 ± 1.1	25.5 ± 0.9	24.4 ± 0.5
100	1	27.6	26.1	24.7	24.1	24.2	22.6
	2	26.4	26.5	25.5	24.6	24.2	23.0
	เฉลี่ย	27.0 ± 0.8	26.3 ± 0.3	25.1 ± 0.6	24.4 ± 0.4	24.2 ± 0.1	22.8 ± 0.3
300	1	27.4	25.4	22.9	22.3	21.1	20.6
	2	27.5	25.1	23.4	23.1	20.9	19.6
	เฉลี่ย	27.4 ± 0.1	25.3 ± 0.2	23.2 ± 0.4	22.7 ± 0.6	21.0 ± 0.1	20.1 ± 0.7
900	1	27	25.1	23.2	22.4	20.9	19.9
	2	27.6	23.2	22.9	22.1	21.1	19.4
	เฉลี่ย	27.3 ± 0.4	23.2 ± 0.1	23.1 ± 0.2	22.3 ± 0.2	21.0 ± 0.1	19.6 ± 0.4



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยี่ด ณ จุดขาดเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR₁ กับ อุณหภูมิการขึ้นรูป



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความยี่ด ณ จุดขาดกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6

4.2.4 ค่าความแข็ง

1). ผลของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าความแข็ง

จากการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.22 และกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR₁ กับอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันกัน ถึงแม้จะเพิ่มสัดส่วนผสมของ PR₁ หรืออุณหภูมิการขึ้นรูปก็ตาม โดยมีค่าเฉลี่ย 73.6 ± 0.1 (shore D)

2) ผลของสัดส่วนผสม PR_{1-2n} ต่อค่าความแข็งที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

จากผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ ได้ผลตามตารางที่ 4.23 และกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่การผสม PR₂ เป็นต้นไป และเพิ่มตามปริมาณสัดส่วนการผสมที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.22 ค่าความแข็ง กับสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

หน่วย : shore D

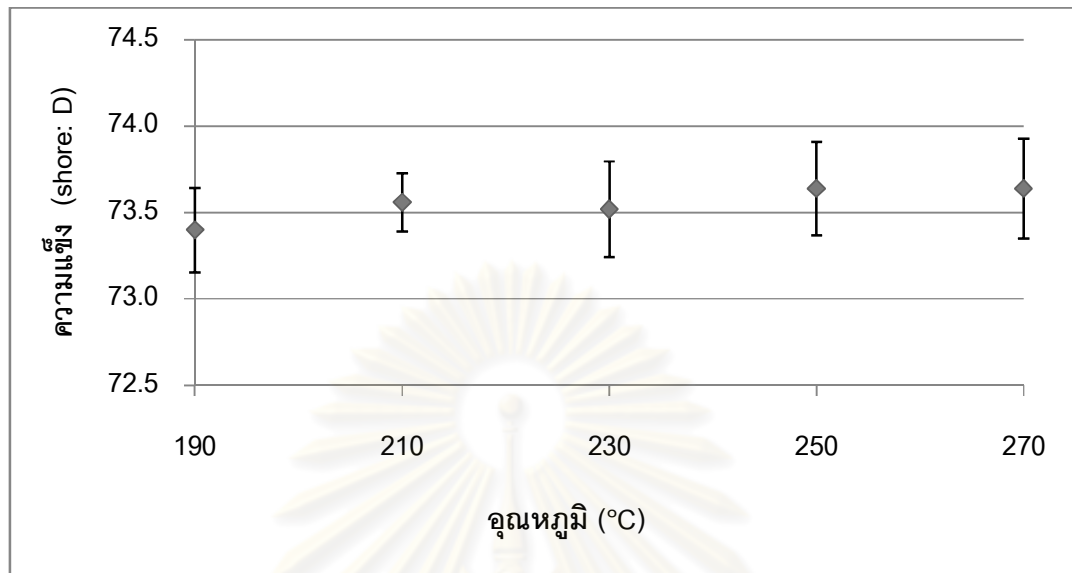
PR ₁ (phr)	การ ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)				
		190	210	230	250	270
0	1	72.6	73.6	73.2	73.4	73.4
	2	73.4	73.6	73.4	73.8	73.2
	เฉลี่ย	73.0±0.6	73.6±0.0	73.3±0.1	73.6±0.3	73.3±0.1
33	1	73.4	73.6	73.2	73.4	73.6
	2	73.8	73.8	73.2	73.4	74.6
	เฉลี่ย	73.6±0.3	73.7±0.1	73.2±0.0	73.4±0.0	74.1±0.7
100	1	73.4	73.6	73.2	73.6	73.8
	2	73.4	73.8	74.4	73.4	73.4
	เฉลี่ย	73.4±0.0	73.7±0.1	73.8±0.8	73.5±0.1	73.6±0.3
300	1	72.8	73.6	73.4	73.6	73.8
	2	74.0	73.4	73.6	73.6	73.4
	เฉลี่ย	73.4±0.8	73.5±0.1	73.5±0.1	73.6±0.0	73.6±0.3
900	1	73.2	73.2	74.0	73.8	73.6
	2	74.0	73.4	73.6	74.4	73.6
	เฉลี่ย	73.6±0.6	73.3±0.1	73.8±0.3	74.1±0.4	73.6±0.0

ตารางที่ 4.23 ค่าความแข็ง กับสัดส่วนผสมของ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

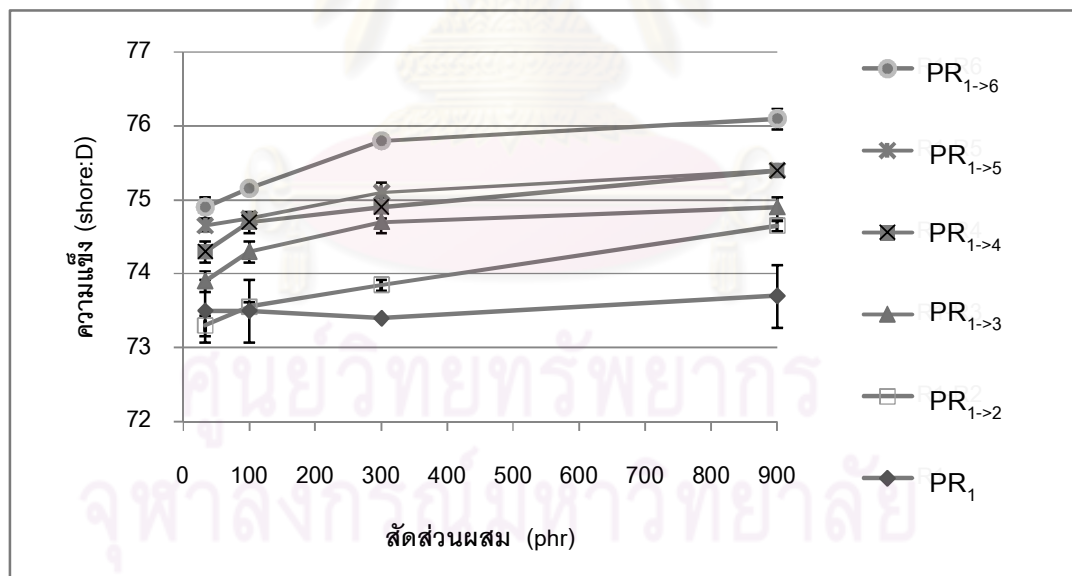
หน่วย : shore D

สัดส่วนผสม (phr)	การ ทดลอง	PR _{1->n}					
		PR ₁	PR _{1->2}	PR _{1->3}	PR _{1->4}	PR _{1->5}	PR _{1->6}
33	1	73.2	73.2	74.0	74.4	74.6	74.8
	2	73.8	73.4	73.8	74.2	74.7	75.0
	เฉลี่ย	73.5±0.4	73.3±0.1	73.9±0.1	74.3±0.1	74.6±0.1	74.9±0.1
100	1	73.2	73.5	74.4	74.6	74.7	75.1
	2	73.8	73.6	74.2	74.8	74.8	75.2
	เฉลี่ย	73.5±0.4	73.5±0.1	74.3±0.1	74.7±0.1	74.7±0.1	75.2±0.1
300	1	73.4	73.9	74.6	74.8	75.2	75.8
	2	73.4	73.8	74.8	75.0	75.0	75.8
	เฉลี่ย	73.4±0.0	73.8±0.1	74.7±0.1	74.9±0.1	75.1±0.1	75.8±0.0
900	1	74.0	74.7	75.0	75.4	75.4	76.0
	2	73.4	74.6	74.8	75.4	75.4	76.2
	เฉลี่ย	73.7±0.4	74.6±0.1	74.9±0.1	75.4±0.0	75.4±0.0	76.1±0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR₁ กับอุณหภูมิการขึ้นรูป



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6

4.2.5 ค่าความทนต่อแรงกระแทก

1) ผลของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าความทนต่อแรงกระแทก

จากการทดสอบค่าความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.24 และกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR_1 กับอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อแรงกระแทกมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้จะเพิ่มสัดส่วนผสมของ PR_1 หรือ อุณหภูมิการขึ้นรูปก็ตาม โดยมีค่าเฉลี่ย 4.47 ± 0.03 กิโลจูล/ตารางเมตร

2) ผลของสัดส่วนผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ ต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210°C

จากการทดสอบค่าความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.25 และกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงกระแทกกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 แสดงให้เห็นค่าความทนต่อแรงกระแทกจะเริ่มมีค่าลดลงตั้งแต่การผสม PR_2 เป็นต้นไป และลดลงตามปริมาณสัดส่วนการผสมที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.24 ค่าความทนต่อแรงกระแทกกับสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

หน่วย : กิโลจูล/ตารางเมตร

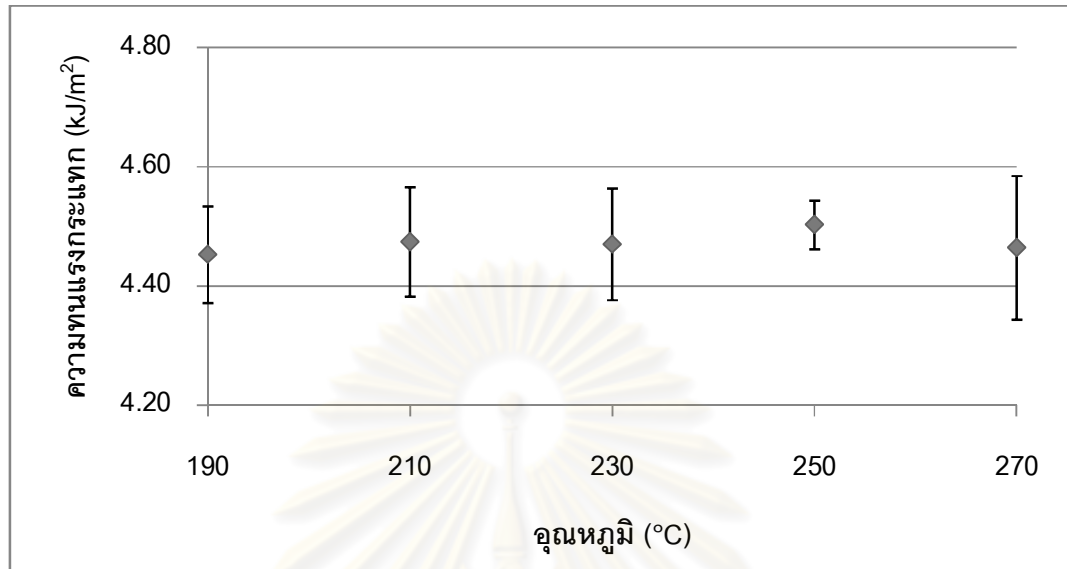
PR ₁ (phr)	การ ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)				
		190	210	230	250	270
0	1	4.47	4.34	4.51	4.48	4.64
	2	4.59	4.45	4.44	4.43	4.41
	เฉลี่ย	4.53±0.09	4.40±0.07	4.48±0.05	4.45±0.04	4.53±0.16
33	1	4.56	4.59	4.51	4.66	4.50
	2	4.35	4.56	4.59	4.43	4.40
	เฉลี่ย	4.45±0.15	4.58±0.03	4.55±0.06	4.55±0.16	4.45±0.07
100	1	4.49	4.37	4.47	4.48	4.59
	2	4.56	4.77	4.67	4.46	4.65
	เฉลี่ย	4.53±0.05	4.57±0.28	4.57±0.15	4.47±0.01	4.62±0.04
300	1	4.37	4.42	4.47	4.58	4.44
	2	4.30	4.37	4.32	4.49	4.39
	เฉลี่ย	4.34±0.05	4.39±0.04	4.39±0.10	4.54±0.06	4.42±0.03
900	1	4.41	4.47	4.44	4.65	4.27
	2	4.42	4.40	4.28	4.37	4.34
	เฉลี่ย	4.42±0.01	4.43±0.05	4.36±0.11	4.51±0.20	4.30±0.05

ตารางที่ 4.25 ค่าความทนต่อแรงกระแทก กับสัดส่วนผสมของ $PR_{1 \rightarrow n}$ คุณหมึกการขึ้นรูป 210 °C

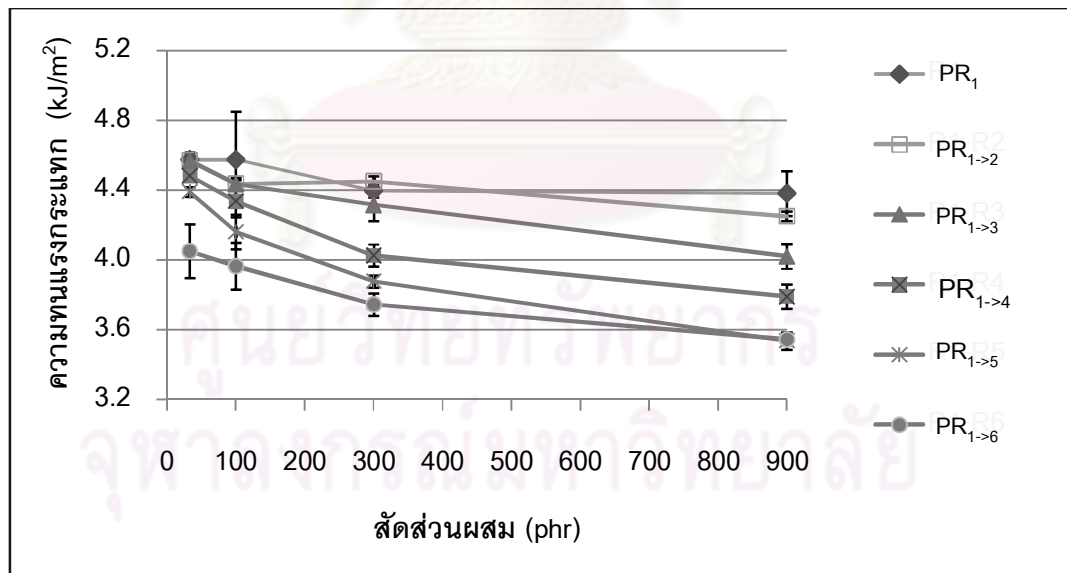
หน่วย : shore D

สัดส่วนผสม(phr)	การทดลอง	$PR_{1 \rightarrow n}$					
		PR_1	$PR_{1 \rightarrow 2}$	$PR_{1 \rightarrow 3}$	$PR_{1 \rightarrow 4}$	$PR_{1 \rightarrow 5}$	$PR_{1 \rightarrow 6}$
33	1	4.59	4.56	4.53	4.46	4.37	3.94
	2	4.56	4.58	4.6	4.5	4.41	4.16
	เฉลี่ย	4.58 ± 0.02	4.57 ± 0.01	4.57 ± 0.05	4.48 ± 0.03	4.39 ± 0.03	4.05 ± 0.16
100	1	4.38	4.41	4.45	4.27	4.09	3.87
	2	4.77	4.46	4.42	4.4	4.23	4.06
	เฉลี่ย	4.58 ± 0.28	4.44 ± 0.04	4.44 ± 0.02	4.34 ± 0.09	4.16 ± 0.10	3.97 ± 0.13
300	1	4.42	4.47	4.25	3.98	3.85	3.7
	2	4.37	4.43	4.38	4.07	3.9	3.79
	เฉลี่ย	4.40 ± 0.04	4.45 ± 0.03	4.32 ± 0.09	4.03 ± 0.06	3.88 ± 0.04	3.75 ± 0.06
900	1	4.47	4.23	3.97	3.74	3.5	3.52
	2	4.29	4.27	4.07	3.84	3.57	3.57
	เฉลี่ย	4.38 ± 0.13	4.25 ± 0.03	4.02 ± 0.07	3.79 ± 0.07	3.54 ± 0.05	3.55 ± 0.04

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR_i กับ อุณหภูมิการขึ้นรูป



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงกระแทกกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6

4.3 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ

จากข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ นำมาทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลและการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab Version 14 มาช่วยในการคำนวณ ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ช่วงของการทดลอง คือ ช่วงแรกจะเป็นการวิเคราะห์ผลของสัดส่วนผสมและอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ ช่วงที่สองจะเป็นการวิเคราะห์ผลจำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และสัดส่วนผสมที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆที่อุณหภูมิ 210 °C โดยผลการวิเคราะห์เป็นดังต่อไปนี้

4.3.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล

1) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม และจำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการหลอมของพอลิเมอรัผสม แสดงตามตารางที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนผสมของ PR_1 อุณหภูมิการหลอม ส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอรั อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสม PR_1 กับอุณหภูมิการหลอม ส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอรั อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการหลอมในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาถึงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.25 สามารถอธิบายถึงลักษณะของผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อดัชนีการหลอมไหลได้ว่า เมื่ออุณหภูมิการหลอมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อสัดส่วนผสมของ PR_1 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ หากพิจารณาร่วมกับค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of Square : SS) ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ค่าผลรวมกำลังสองของปัจจัยอุณหภูมิมีค่ามากกว่าปัจจัยของสัดส่วนผสม PR_1 แสดงให้เห็นว่า ถ้าปัจจัยของสัดส่วนผสม PR_1 คงที่ แต่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอม จะส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลมากกว่าเมื่อปัจจัยของอุณหภูมิกำลังที่เปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมของ PR_1

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 อุณหภูมิการหลอม 210°C แสดงตามตารางที่ 4.27 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ที่ผสมอยู่ ส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสมและจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ผสมอยู่อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสมจำแนกตามจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ถูกนำกลับมาหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 แสดงตามรูปที่ 4.3 และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงตามตารางที่ 4.27 สามารถอธิบายผลกระทบของสัดส่วนผสมและ PR_n ที่มีต่อดัชนีการหลอมไหล ได้ว่า เมื่อปริมาณสัดส่วนผสมสูงขึ้น และจำนวนครั้งของการหลอมใหม่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้น หากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัย สัดส่วนผสม มีค่ามากกว่าปัจจัย $PR_{1 \rightarrow n}$ แสดงให้เห็นว่า ถ้าสัดส่วนผสมคงที่ แต่เปลี่ยนแปลง PR_n จะส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่อให้ PR_n คงที่แล้วเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสม

2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม จำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และระยะเวลาการให้ความร้อน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม PR_1 กับอุณหภูมิการหลอม $190-230^{\circ}\text{C}$ และระยะเวลาการให้ความร้อน แสดงตามตารางที่ 4.28 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการหลอมและระยะเวลาการให้ความร้อน ส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการหลอมและระยะเวลาการให้ความร้อน ส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นกัน หากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัยอุณหภูมิ (T) มีค่ามากกว่าปัจจัยของสัดส่วนผสม PR_1 และระยะเวลาการให้ความร้อน (t) แสดงให้เห็นว่า ถ้าสัดส่วนผสม PR_1 และระยะเวลาการให้ความร้อนคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมจะส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่อให้อุณหภูมิกว่าแล้วเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมหรือระยะเวลาการให้ความร้อน

ผลการวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม จำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และระยะเวลาการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิการหลอม 210°C แสดงตามตารางที่ 4.29 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนผสม และ PR_n ที่

ผสมอยู่ ส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสมและจำนวนครั้งของพอลิเมอริกซ์ที่ผ่านการหลอมใหม่ผสมอยู่อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นกัน หากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัยของจำนวนครั้งของการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ (PR_n) มีค่ามากกว่าปัจจัยของสัดส่วนผสมและระยะเวลาการให้ความร้อน (t) แสดงให้เห็นว่า ถ้าสัดส่วนผสมและระยะเวลาการให้ความร้อนคงที่ แต่เปลี่ยนแปลง PR_n จะส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า เมื่อให้ PR_n คงที่แล้วเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมหรือระยะเวลาการให้ความร้อน

ตารางที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอริกซ์ผสม PR_1 กับอุณหภูมิการหลอม (T)

Source	DF	SS	MS	F	P
PR_1	4	9.04	2.26	99.72	0.00
T	5	453.30	90.66	3997.37	0.00
Interaction	20	4.83	0.24	10.66	0.00
Error	30	0.68	0.02		
Total	59	467.86			

ตารางที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอริกซ์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม 210 °C

Source	DF	SS	MS	F	P
สัดส่วนผสม	3	260.86	86.95	3527.04	0.00
$PR_{1 \rightarrow n}$	5	655.52	131.10	5317.76	0.00
Interaction	15	44.28	2.95	119.76	0.00
Error	24	0.59	0.02		
Total	47	961.27			

ตารางที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PR₁ กับ อุณหภูมิการหลอม (T) และระยะเวลาในการให้ความร้อน (t)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
T	2	231.03	231.03	115.51	11776.21	0.00
PR ₁	4	18.93	18.93	4.73	482.56	0.00
t	5	2.53	2.533	0.50	51.64	0.00
T* PR ₁	8	4.95	4.95	0.61	63.11	0.00
T*t	10	0.47	0.47	0.04	4.83	0.00
PR ₁ *t	20	0.213	0.21	0.01	1.09	0.37
T* PR ₁ *t	40	0.238	0.23	0.01	0.61	0.96
Error	90	0.883	0.88	0.01		
Total	179	259.264				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ $PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม และระยะเวลาให้ความร้อน (t)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
สัดส่วน	3	1474.6	1474.6	491.5	14372.3	0.000
$PR_{1 \rightarrow n}$	5	3837.7	3837.7	767.5	22442.2	0.000
t	5	11.6	11.6	2.3	67.7	0.000
สัดส่วน* $PR_{1 \rightarrow n}$	15	270.6	270.6	18.0	527.5	0.000
สัดส่วน*t	15	0.8	0.8	0.1	1.6	0.072
$PR_{1 \rightarrow n}$ *t	25	0.9	0.9	0.0	1.0	0.463
สัดส่วน* $PR_{1 \rightarrow n}$ *t	75	1.9	1.9	0.0	0.8	0.921
Error	144	4.9	4.9	0.0		
Total	287	5603.1				

4.3.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ

1) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม แสดงตามตารางที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนผสมของ PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูปไม่มีผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสม PR_1 กับ อุณหภูมิการขึ้นรูปไม่มีผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ (PR_n) ผสมอยู่ แสดงตามตารางที่ 4.31 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสม และ

PR_n ที่ผสมอยู่ มีผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่มีผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับค่าความถ่วงจำเพาะแสดงตามรูปที่ 4.18 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะตามตารางที่ 4.31 สามารถอธิบายผลกระทบของสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ ที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะได้ว่า เมื่อสัดส่วนผสมสูงขึ้นและ PR_n โดยที่ n เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลง เมื่อพิจารณาค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัย $PR_{1 \rightarrow n}$ ที่ผสมอยู่ มีค่ามากกว่าสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าถ้าสัดส่วนผสมคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งของพอลิเมอร์หลอมใหม่ จะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่อให้ PR_n คงที่แล้วเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสม

ตารางที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ ของพอลิเมอร์ผสม PR_1 กับอุณหภูมิการขึ้นรูป (T)

Source	DF	SS	MS	F	P
PR_1	4	0.000182	0.000045	4.01	0.07
T	4	0.000006	0.000006	0.50	0.73
Interaction	16	0.000298	0.000019	1.64	0.12
Error	25	0.000284	0.000011		
Total	49	0.000786			

ตารางที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ ของพอลิเมอร์ผสม

$PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม

Source	DF	SS	MS	F	P
สัดส่วน	3	0.000457	0.000152	11.58	0.00
$PR_{1 \rightarrow n}$	5	0.004752	0.000950	72.32	0.00
Interaction	15	0.000112	0.000008	0.57	0.87
Error	24	0.000315	0.000013		
Total	47	0.005636			

4.3.1.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดสอบความทนต่อแรงดึง

1) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม แสดงตามตารางที่ 4.32 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยสัดส่วนผสมของ PR_1 ไม่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ปัจจัยอุณหภูมิการขึ้นรูปส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสม PR_1 กับ อุณหภูมิการขึ้นรูปไม่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ (PR_n) ผสมอยู่ แสดงตามตารางที่ 4.33 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับค่าความทนต่อแรงดึงแสดงตามรูปที่ 4.20 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงดึง แสดงตามตารางที่ 4.33 สามารถอธิบายผลกระทบของสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ ที่มีต่อค่าความทนต่อแรงดึงได้ว่า เมื่อสัดส่วนผสมสูงขึ้นและ PR_n โดยที่ n เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อ

พิจารณาค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัย $PR_{1 \rightarrow n}$ ที่ผสมอยู่มีค่ามากกว่าสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าถ้าสัดส่วนผสมคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งของพอลิเมอร์หลอมใหม่ จะส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่อให้ PR_n คงที่แล้วเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสม

ตารางที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PR_1 กับอุณหภูมิการขึ้นรูป (T)

Source	DF	SS	MS	F	P
PR_1	4	0.40	0.10	0.56	0.70
T	7	4.24	0.61	3.38	0.01
Interaction	28	3.81	0.14	0.76	0.77
Error	40	7.16	0.18		
Total	79	15.61			

ตารางที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ กับ สัดส่วนผสม

Source	DF	SS	MS	F	P
สัดส่วน	3	16.25	5.42	137.45	0.00
$PR_{1 \rightarrow n}$	5	173.94	34.78	882.29	0.00
Interaction	15	6.36	0.42	10.76	0.00
Error	24	0.94	0.03		
Total	47	197.50			

4.3.1.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดสอบโมดูลัสของความยืดหยุ่น

1) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม PR₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม แสดงตามตารางที่ 4.34 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนผสมของ PR₁ ไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ปัจจัยของอุณหภูมิการขึ้นรูปมีผลต่อค่าความโมดูลัสของความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญ ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสม PR₁ กับอุณหภูมิการขึ้นรูปไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ (PR_n) ผสมอยู่ แสดงตามตารางที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ มีผลต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่มีผลต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นแสดงตามรูปที่ 4.22 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสของความยืดหยุ่น แสดงตามตารางที่ 4.35 สามารถอธิบายผลกระทบของสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ ที่มีต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นได้ว่า เมื่อสัดส่วนผสมสูงขึ้นและ PR_n โดยที่ n เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัย PR_{1->n} ที่ผสมอยู่ มีค่ามากกว่าสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าถ้าสัดส่วนผสมคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งของพอลิเมอร์หลอมใหม่ จะส่งผลให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่อให้ PR_n คงที่แล้วเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสม

ตารางที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม PR_1 กับอุณหภูมิการขึ้นรูป (T)

Source	DF	SS	MS	F	P
PR_1	4	52.68	13.17	1.65	0.18
T	7	176.86	25.27	3.16	0.01
Interaction	28	175.38	6.26	0.78	0.75
Error	40	319.71	7.99		
Total	79	724.64			

ตารางที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม

Source	DF	SS	MS	F	P
สัดส่วน	3	3745	1248.29	40.77	0.00
$PR_{1 \rightarrow n}$	5	35065	7013.00	229.07	0.00
Interaction	15	2027	135.10	4.31	0.00
Error	24	735	30.61		
Total	47	41571			

4.3.1.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด

1) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม แสดงตามตารางที่ 4.36 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนผสมของ PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูปไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสม PR_1 กับ อุณหภูมิการขึ้นรูปไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ผสมอยู่

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ (PR_n) ผสมอยู่ แสดงตามตารางที่ 4.37 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด แสดงตามรูปที่ 4.24 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด แสดงตามตารางที่ 4.37 สามารถอธิบายผลกระทบของสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ได้ว่า เมื่อสัดส่วนผสมสูงขึ้นและ PR_n โดยที่ n เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดลดลง เมื่อพิจารณาค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัย $PR_{1 \rightarrow n}$ ที่ผสมอยู่ มีค่ามากกว่าสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าถ้าสัดส่วนผสมคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งของพอลิเมอร์หลอมใหม่ จะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่อให้ PR_n คงที่แล้วเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสม

ตารางที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม
PR₁ กับอุณหภูมิการขึ้นรูป (T)

Source	DF	SS	MS	F	P
PR ₁	4	7.36	1.84	2.88	0.04
T	7	2199.08	314.15	491.15	0.00
Interaction	28	51.02	1.82	2.85	0.00
Error	40	25.58	0.64		
Total	79	2283.04			

ตารางที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม
PR_{1->n} กับสัดส่วนผสม

Source	DF	SS	MS	F	P
สัดส่วน	3	98.05	32.68	136.78	0.00
PR _{1->n}	5	163.81	32.76	137.11	0.00
Interaction	15	20.17	1.34	5.63	0.00
Error	24	5.73	0.23		
Total	47	287.78			

4.3.1.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดสอบความแข็ง

1) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม แสดงตามตารางที่ 4.38 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนผสมของ PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูปไม่มีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสม PR_1 กับ อุณหภูมิการขึ้นรูปไม่มีผลต่อความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ (PR_n) ผสมอยู่ แสดงตามตารางที่ 4.39 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ มีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่มีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับค่าความแข็งแสดงตามรูปที่ 4.26 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความแข็ง แสดงตามตารางที่ 4.39 สามารถอธิบายผลกระทบของสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ ที่มีต่อค่าความแข็ง ได้ว่า เมื่อสัดส่วนผสมสูงขึ้นและ PR_n โดยที่ n เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัย $PR_{1 \rightarrow n}$ ที่ผสมอยู่มีค่ามากกว่าสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าถ้าสัดส่วนผสมคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งของพอลิเมอร์หลอมใหม่ จะส่งผลให้ค่าความแข็ง มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่อให้ PR_n คงที่ แล้วเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสม

ตารางที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความแข็ง (shore:D) ของพอลิเมอร์ผสม PR_1 กับอุณหภูมิการขึ้นรูป (T)

Source	DF	SS	MS	F	P
PR_1	4	0.58	0.14	1.11	0.37
T	4	0.39	0.09	0.75	0.56
Interaction	16	1.97	0.12	0.93	0.54
Error	25	3.32	0.13		
Total	49	6.28			

ตารางที่ 4.39 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความแข็ง (shore:D) ของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม

Source	DF	SS	MS	F	P
สัดส่วน	3	5.85	1.95	59.24	0.00
$PR_{1 \rightarrow n}$	5	21.57	4.31	131.08	0.00
Interaction	15	1.31	0.08	2.66	0.02
Error	24	0.79	0.03		
Total	47	29.52			

4.3.1.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดสอบความทนต่อแรง กระแทก

1) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม แสดงตามตารางที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนผสมของ PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูปไม่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสม PR_1 กับ อุณหภูมิการขึ้นรูปไม่มีผลต่อความทนต่อแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ ที่ผ่านการหลอมใหม่ผสมอยู่

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ (PR_n) ผสมอยู่ แสดงตามตารางที่ 4.41 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ มีผลต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับค่าความทนต่อแรงกระแทกแสดงตามรูปที่ 4.28 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงกระแทก แสดงตามตารางที่ 4.31 สามารถอธิบายผลกระทบของสัดส่วนผสม และ PR_n ที่ผสมอยู่ ที่มีต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกได้ว่า เมื่อสัดส่วนผสมสูงขึ้นและ PR_n โดยที่ n เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกลดลง เมื่อพิจารณาค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัย $PR_{1->n}$ ที่ผสมอยู่ มีค่ามากกว่า สัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าถ้าสัดส่วนผสมคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งของพอลิเมอร์หลอมใหม่ จะส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงกระแทก มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่อให้ PR_n คงที่แล้วเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสม

ตารางที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PR₁ กับอุณหภูมิการขึ้นรูป (T)

Source	DF	SS	MS	F	P
PR ₁	4	0.22	0.05	4.18	0.09
T	4	0.02	0.01	0.46	0.76
Interaction	16	0.15	0.01	0.72	0.74
Error	25	0.33	0.01		
Total	49	0.74			

ตารางที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} กับสัดส่วนผสม

Source	DF	SS	MS	F	P
สัดส่วน	3	1.84	0.61	76.06	0.00
PR _{1->n}	5	2.67	0.53	66.23	0.00
Interaction	15	0.36	0.02	3.02	0.01
Error	24	0.19	0.00		
Total	47	5.06			

4.3.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล

ได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab version 14 มาช่วยในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface method) โดยการเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการถดถอย โดยใช้แอลฟาเข้า (Alpha to enter) 0.15 และแอลฟาออก (Alpha to removal) 0.15 สมการที่ได้สามารถนำไปใช้ทำนายคุณสมบัติภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1) สำหรับการทำนายคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล จากสัดส่วนผสม PR_1 และ อุณหภูมิ

สัดส่วนผสม มีค่าอยู่ระหว่าง 0-900 phr

อุณหภูมิการหลอมสำหรับค่าดัชนีการหลอมไหล มีค่าอยู่ระหว่าง 170-270 °C

2) สำหรับการทำนายคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล จากสัดส่วนผสม และ จำนวนครั้งของการหลอมใหม่

จำนวนครั้งของการหลอมใหม่ของพอลิโพรไพลีน ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6

สัดส่วนผสมของ $PR_{1 \rightarrow n}$ มีค่าอยู่ระหว่างช่วง 0-900 phr

จากการวิเคราะห์ได้ผลการถดถอย ดังต่อไปนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2.1 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลดัชนีการหลอมไหล

1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม และจำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6

เมื่อนำข้อมูลดัชนีการไหลในตารางที่ 4.1 ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PR_1 กับอุณหภูมิการหลอม มาทำการวิเคราะห์จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.42 สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหล สัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการหลอมได้ดังนี้

$$Y = 4.33 + 0.49T + 4.15 PR_1 + 0.44T * PR_1 \quad (4.1)$$

$$R^2 = 96.5\%$$

Y = ค่าดัชนีการหลอมไหล (กรัม/10นาที)

T = อุณหภูมิการหลอม ($^{\circ}C$)

PR_1 = พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 (phr)

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ

เมื่อนำข้อมูลดัชนีการไหลในตารางที่ 4.2 ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม $210^{\circ}C$ มาทำการวิเคราะห์จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.43 สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหล สัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่ได้ดังนี้

$$Y = 1943.82 - 1.24PR_1 + 1.99PR_{1 \rightarrow 2} + 3.59PR_{1 \rightarrow 3} + 4.35PR_{1 \rightarrow 4} + 5.04PR_{1 \rightarrow 5} + 5.88PR_{1 \rightarrow 6} + 3.62PR_1^2 - 3.75PR_{1 \rightarrow 4}^2 - 6.37PR_{1 \rightarrow 5}^2 - 8.48PR_{1 \rightarrow 6}^2 \quad (4.2)$$

$$R^2 = 90\%$$

Y = ค่าดัชนีการหลอมไหล (กรัม/10นาที)

$PR_{1 \rightarrow n}$ = พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 ถึง n ($n=1,2,\dots,6$) หน่วย phr

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ

ตารางที่ 4.42 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PR_1 กับ อุณหภูมิการหลอม (T)

Term	Coefficient	SE Coef	T	P
Constant	4.33	0.07	55.86	0.00
T	0.49	0.09	5.36	0.00
PR_1	4.15	0.11	36.55	0.00
$T*PR_1$	0.44	0.13	3.33	0.00

ตารางที่ 4.43 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	43.82	4.66	9.41	0.00
PR_1	-1.24	0.57	-2.19	0.04
$PR_{1 \rightarrow 2}$	1.99	0.57	3.49	0.00
$PR_{1 \rightarrow 3}$	3.59	0.57	6.31	0.00
$PR_{1 \rightarrow 4}$	4.35	0.57	7.65	0.00
$PR_{1 \rightarrow 5}$	5.04	0.57	8.86	0.00
$PR_{1 \rightarrow 6}$	5.88	0.57	10.34	0.00
$PR_1 * PR_1$	3.62	1.24	2.92	0.00
$PR_{1 \rightarrow 4} * PR_{1 \rightarrow 4}$	-3.75	1.24	-3.02	0.005
$PR_{1 \rightarrow 5} * PR_{1 \rightarrow 5}$	-6.36	1.24	-5.13	0.000
$PR_{1 \rightarrow 6} * PR_{1 \rightarrow 6}$	-8.47	1.24	-6.83	0.000

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม จำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และระยะเวลาการให้ความร้อน

เมื่อนำข้อมูลดัชนีการหลอมไหลตารางที่ 4.3 ถึง 4.5 ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PR_1 กับ อุณหภูมิการหลอม (T) และระยะเวลาในการให้ความร้อน (t) มาทำการวิเคราะห์ จะได้ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.44 สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหล สัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอมและระยะเวลาให้ความร้อนได้ดังนี้

$$Y = 3.52 + 1.38PR_1 - 0.38T - 0.14t \quad (4.3)$$

$$R^2 = 94.6\%$$

Y = ค่าดัชนีการหลอมไหล (กรัม/10นาที)

T = อุณหภูมิการหลอม ($^{\circ}C$)

PR_1 = พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 (phr)

t = ระยะเวลาการให้ความร้อน (นาที)

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำข้อมูลดัชนีการหลอมไหลตารางที่ 4.6 ถึง 4.9 ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ $PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม และระยะเวลาให้ความร้อน (t) มาทำการวิเคราะห์ จะได้ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.45 สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหล สัดส่วนผสม PR_n อุณหภูมิและระยะเวลาให้ความร้อนได้ดังนี้

$$Y = 43 - 1.34PR_1 + 1.95PR_{1 \rightarrow 2} + 3.45PR_{1 \rightarrow 3} + 4.21PR_{1 \rightarrow 4} + 4.92PR_{1 \rightarrow 5} + 5.83PR_{1 \rightarrow 6} + 0.28t + 3.74PR_1^2 - 0.68PR_{1 \rightarrow 2}^2 - 2.18PR_{1 \rightarrow 3}^2 - 3.59PR_{1 \rightarrow 4}^2 - 5.98PR_{1 \rightarrow 5}^2 - 8.25PR_{1 \rightarrow 6}^2 \quad (4.4)$$

$$R^2 = 92\%$$

Y = ค่าดัชนีการหลอมไหล (กรัม/10นาที)

$PR_{1 \rightarrow n}$ = พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 ถึง n ($n=1,2,\dots,6$) หน่วย phr

t = ระยะเวลาการให้ความร้อน (นาที)

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.44 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PR_1 กับ อุณหภูมิการหลอม (T) และระยะเวลาในการให้ความร้อน (t)

Term	Coefficient	SE Coef	T	P
Constant	3.52	0.03	133.78	0.00
PR_1	1.38	0.03	54.14	0.00
T	0.38	0.03	13.32	0.00
t	0.14	0.03	4.73	0.00

ตารางที่ 4.45 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ กับระยะเวลาในการให้ความร้อน (t)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	43.00	1.61	26.65	0.00
PR_1	-1.34	0.20	-6.83	0.00
$PR_{1 \rightarrow 2}$	1.95	0.20	9.91	0.00
$PR_{1 \rightarrow 3}$	3.50	0.20	17.80	0.00
$PR_{1 \rightarrow 4}$	4.21	0.20	21.44	0.00
$PR_{1 \rightarrow 5}$	4.92	0.20	25.02	0.00
$PR_{1 \rightarrow 6}$	5.83	0.20	29.67	0.00
t	0.28	0.11	2.59	0.01
$PR_1 * PR_1$	3.74	0.43	8.73	0.00
$PR_{1 \rightarrow 2} * PR_{1 \rightarrow 2}$	-0.68	0.43	-1.58	0.12
$PR_{1 \rightarrow 3} * PR_{1 \rightarrow 3}$	-2.18	0.43	-5.09	0.00
$PR_{1 \rightarrow 4} * PR_{1 \rightarrow 4}$	-3.59	0.43	-8.37	0.00
$PR_{1 \rightarrow 5} * PR_{1 \rightarrow 5}$	-5.98	0.43	-13.94	0.00
$PR_{1 \rightarrow 6} * PR_{1 \rightarrow 6}$	-8.25	0.43	-19.23	0.00

4.3.2.2 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ

1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป

จากผลทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะในตารางที่ 4.14 และผลวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ แสดงให้เห็นว่าไม่มีความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญของความถ่วงจำเพาะจากปัจจัยของสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูป โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 0.901 ± 0.002

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่

เมื่อนำข้อมูลค่าความถ่วงจำเพาะในตารางที่ 4.15 ความถ่วงจำเพาะของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม 210°C มาทำการวิเคราะห์จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.46 สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ สัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่ได้ดังนี้

$$Y = 0.831 + 0.006 PR_1 + 0.001 PR_{1 \rightarrow 2} - 0.004 PR_{1 \rightarrow 3} - 0.007 PR_{1 \rightarrow 4} - 0.009 PR_{1 \rightarrow 5} - 0.009 PR_{1 \rightarrow 6} + 0.014 PR_{1 \rightarrow 5}^2 + 0.019 PR_{1 \rightarrow 6}^2 \quad (4.5)$$

$$R^2 = 70 \%$$

Y = ค่าความถ่วงจำเพาะ

$PR_{1 \rightarrow n}$ = พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 ถึง n ($n=1, 2, \dots, 6$) หน่วย phr

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ

ตารางที่ 4.46 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความถี่จำเพาะของพอลิเมอร์ผสม

$PR_{1 \rightarrow n}$

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.83	0.02	44.09	0.00
PR_1	0.01	0.00	2.49	0.02
$PR_{1 \rightarrow 2}$	0.00	0.00	0.44	0.66
$PR_{1 \rightarrow 3}$	0.00	0.00	-1.94	0.06
$PR_{1 \rightarrow 4}$	-0.01	0.00	-3.10	0.00
$PR_{1 \rightarrow 5}$	-0.01	0.00	-4.14	0.00
$PR_{1 \rightarrow 6}$	-0.01	0.00	-4.17	0.00
$PR_{1 \rightarrow 5} * PR_{1 \rightarrow 5}$	0.01399	0.00503	2.783	0.009
$PR_{1 \rightarrow 6} * PR_{1 \rightarrow 6}$	0.01863	0.00503	3.707	0.001

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2.3 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงดึง

1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม PR, อุณหภูมิการขึ้นรูป

จากผลทดสอบค่าความทนต่อแรงดึงในตารางที่ 4.16 และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของสัดส่วนผสม ไม่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นเมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสมกับอุณหภูมิการขึ้นรูปตามรูปที่ 4.19 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความทนต่อแรงดึงตั้งแต่อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-240 °C แสดงตามตารางที่ 1 ในภาคผนวก ก. แสดงให้เห็นว่า ช่วงของอุณหภูมิการขึ้นรูป 190-240 °C ปัจจัยของอุณหภูมิการขึ้นรูปและสัดส่วนผสม ไม่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงดึง ช่วงของอุณหภูมิการขึ้นรูป 240-270 °C แสดงตามตารางที่ 2 ในภาคผนวก ก. แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยของสัดส่วนผสมไม่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงแต่สำหรับปัจจัยของอุณหภูมิการขึ้นรูป ช่วง 240-270 °C ส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นเมื่อสร้างการถดถอยของความทนต่อแรงดึงในช่วงอุณหภูมิ 240-270 °C ได้ผลการวิเคราะห์แสดงตามตารางที่ 4.47 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสมกับอุณหภูมิการขึ้นรูป ช่วง 240-270 °C ได้ดังนี้

$$Y = 0.35T^2 - 0.26T + 33.59 \quad (4.6)$$

$$R^2 = 87.4\%$$

Y = ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)

T = อุณหภูมิการขึ้นรูป ช่วงอุณหภูมิ 240-270 °C

R² = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอริที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่

เมื่อนำข้อมูลค่าทนต่อแรงดึงในตารางที่ 4.17 ความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอริซึม $PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม 210°C มาทำการวิเคราะห์ห้จะได้ผลการวิเคราะห์ดัง ตารางที่ 4.48 สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึง สัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่ได้ดังนี้

$$Y = 46.34 - 1.37 PR_1 + 0.46 PR_{1 \rightarrow 2} + 1.32 PR_{1 \rightarrow 3} + 1.47 PR_{1 \rightarrow 4} + 1.41 PR_{1 \rightarrow 5} + 1.60 PR_{1 \rightarrow 6} - 2.68 PR_{1 \rightarrow 5}^2 - 3.38 PR_{1 \rightarrow 6}^2 \quad (4.7)$$

$$R^2 = 75\%$$

Y = ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)

$PR_{1 \rightarrow n}$ = พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 ถึง n (n=1, 2, ..., 6) หน่วย phr

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.47 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์
ผสม PR₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูป 240-270 °C

Term	Coefficient	SE Coef	T	P
Constant	33.59	0.09	362.67	0.00
T	-0.26	0.06	-4.41	0.14
T*T	0.35	0.12	2.90	0.21

ตารางที่ 4.48 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์
ผสม PR_{1->n}

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	46.34	3.20	14.47	0.00
PR ₁	-1.37	0.39	-3.50	0.00
PR _{1->2}	0.46	0.39	1.17	0.25
PR _{1->3}	1.32	0.39	3.39	0.00
PR _{1->4}	1.47	0.39	3.76	0.00
PR _{1->5}	1.41	0.39	3.61	0.00
PR _{1->6}	1.60	0.39	4.10	0.00
PR _{1->5} *PR _{1->5}	-2.68	0.85	-3.14	0.00
PR _{1->6} *PR _{1->6}	-3.38	0.85	-3.95	0.00

4.3.2.4 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่น

1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป

จากผลทดสอบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นในตารางที่ 4.18 และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของสัดส่วนผสม ไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นเมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสมกับอุณหภูมิการขึ้นรูปตามรูปที่ 4.21 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของโมดูลัสความยืดหยุ่น ตั้งแต่อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-240 °C แสดงตามตารางที่ 3 ในภาคผนวก ก. แสดงให้เห็นว่า ช่วงของอุณหภูมิการขึ้นรูป 190-240 °C ปัจจัยของอุณหภูมิการขึ้นรูปและสัดส่วนผสม ไม่มีผลต่อค่าความโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่น ช่วงของอุณหภูมิการขึ้นรูป 240-270 °C แสดงตามตารางที่ 4 ในภาคผนวก ก. แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยของสัดส่วนผสมไม่มีผลต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นแต่สำหรับปัจจัยของอุณหภูมิการขึ้นรูปช่วง 240-270 °C ส่งผลต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นเมื่อสร้างการถดถอยของโมดูลัสความยืดหยุ่นในช่วงอุณหภูมิ 240-270 °C ได้ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.49 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสมกับอุณหภูมิการขึ้นรูป ช่วง 240-270 °C ได้ดังนี้

$$Y = 2.58T^2 - 1.37T + 730.97 \quad (4.8)$$

$$R^2 = 93.7\%$$

Y = ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)

T = อุณหภูมิการขึ้นรูป ช่วงอุณหภูมิ 240-270 °C

R² = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอริที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่

เมื่อนำข้อมูลค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ในตารางที่ 4.19 โมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ มาทำการวิเคราะห์จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.50 สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น สัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่ได้ดังนี้

$$Y = 908.6 - 21.9 PR_1 + 17.1 PR_{1 \rightarrow 2} + 19.2 PR_{1 \rightarrow 3} + 19.3 PR_{1 \rightarrow 4} + 20.5 PR_{1 \rightarrow 5} + 20.4 PR_{1 \rightarrow 6} + 52.2 PR_1^2 - 35.6 PR_{1 \rightarrow 6}^2 \quad (4.9)$$

$$R^2 = 75\%$$

Y = ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)

$PR_{1 \rightarrow n}$ = พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 ถึง n ($n=1, 2, \dots, 6$) หน่วย phr

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.49 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม PR₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูป 240-270 °C

Term	Coefficient	SE Coef	T	P
Constant	730.97	0.38	1918.37	0.00
T	-1.37	0.25	-5.56	0.11
T*T	2.58	0.49	5.26	0.12

ตารางที่ 4.50 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n}

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	908.57	46.05	19.73	0.00
PR ₁	-21.94	5.63	-3.90	0.00
PR _{1->2}	17.11	5.63	3.04	0.00
PR _{1->3}	19.25	5.63	3.42	0.00
PR _{1->4}	19.28	5.63	3.43	0.00
PR _{1->5}	20.47	5.63	3.64	0.00
PR _{1->6}	20.45	5.63	3.64	0.00
PR ₁ *PR ₁	52.23	12.28	4.25	0.00
PR _{1->6} *PR _{1->6}	-35.55	12.27	-2.89	0.01

4.3.2.5 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด

1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป

จากผลทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดในตารางที่ 4.20 และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงให้เห็นว่าค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัยของสัดส่วนผสมมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปัจจัยของอุณหภูมิ ดังนั้นจึงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสมกับอุณหภูมิการขึ้นรูป ตามรูปที่ 4.23 ดังนั้นเมื่อสร้างการถดถอยของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ได้ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.51 และสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดเฉลี่ยแต่ละสัดส่วนผสม PR₁ ตลอดช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C กับอุณหภูมิการขึ้นรูป ได้ดังนี้

$$Y = 27.07 - 7.19T - 7.54T^2 \quad (4.10)$$

$$R^2 = 81.2\%$$

Y = ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด (%)

T = อุณหภูมิการขึ้นรูป

R² = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่

เมื่อนำข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ในตารางที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} กับสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม 210 °C มาทำการวิเคราะห์จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.52 สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด สัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่ได้ดังนี้

$$Y = 0.31 + 0.31 PR_{1->2} - 1.76 PR_{1->3} - 1.80 PR_{1->4} - 2.19 PR_{1->5} - 2.82 PR_{1->6} - 3.47 PR_{1->6}^2 + 2.61 PR_{1->3}^2 + 3.09 PR_{1->4}^2 + 4.35 PR_{1->5}^2 + 5.43 PR_{1->6}^2 \quad (4.11)$$

$$R^2 = 91\%$$

Y = ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด (%)

$PR_{1 \rightarrow n}$ = พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 ถึง n ($n=1, 2, \dots, 6$) หน่วย phr

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ

ตารางที่ 4.51 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PR_1 กับ อุณหภูมิการขึ้นรูป (T)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	27.07	0.35	77.02	0.00
T	-7.19	0.46	-15.79	0.00
T*T	-7.54	0.67	-11.25	0.00

ตารางที่ 4.52 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.31	2.29	0.14	0.89
PR_1	0.32	0.28	1.13	0.27
$PR_{1 \rightarrow 2}$	-1.76	0.28	-6.28	0.00
$PR_{1 \rightarrow 3}$	-1.80	0.28	-6.42	0.00
$PR_{1 \rightarrow 4}$	-2.19	0.28	-7.81	0.00
$PR_{1 \rightarrow 5}$	-2.82	0.28	-10.07	0.00
$PR_{1 \rightarrow 6}$	-3.47	0.28	-12.40	0.00
$PR_{1 \rightarrow 3} * PR_{1 \rightarrow 3}$	2.61	0.61	4.28	0.00
$PR_{1 \rightarrow 4} * PR_{1 \rightarrow 4}$	3.09	0.61	5.06	0.00
$PR_{1 \rightarrow 5} * PR_{1 \rightarrow 5}$	4.35	0.61	7.12	0.00
$PR_{1 \rightarrow 6} * PR_{1 \rightarrow 6}$	5.43	0.61	8.90	0.00

4.3.2.6 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความแข็ง

1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป

จากผลทดสอบค่าความแข็งในตารางที่ 4.22 และผลวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.38 แสดงให้เห็นว่าไม่มีความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญของความแข็ง จากปัจจัยของสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูป โดยมีค่าความความแข็งเฉลี่ย 73.6 ± 0.1 (shore D)

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่

เมื่อนำข้อมูลค่าความแข็งในตารางที่ 4.23 ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ กับสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม 210°C มาทำการวิเคราะห์จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.53 สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง สัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่ได้ดังนี้

$$Y = 78.8 - 0.2 PR_1 + 0.3 PR_{1 \rightarrow 2} + 0.4 PR_{1 \rightarrow 3} + 0.7 PR_{1 \rightarrow 4} + 0.7 PR_{1 \rightarrow 5} + PR_{1 \rightarrow 6} + 0.8 PR_1^2 - 0.9 PR_{1 \rightarrow 5}^2 - 1.5 PR_{1 \rightarrow 6}^2 \quad (4.12)$$

$$R^2 = 81\%$$

Y = ค่าความแข็ง (shore D)

$PR_{1 \rightarrow n}$ = พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 ถึง n (n=1, 2, ..., 6) หน่วย phr

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.53 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความแข็งของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	78.79	1.08	72.79	0.00
PR_1	-0.17	0.13	-1.26	0.22
$PR_{1 \rightarrow 2}$	0.31	0.13	2.36	0.02
$PR_{1 \rightarrow 3}$	0.43	0.13	3.24	0.00
$PR_{1 \rightarrow 4}$	0.67	0.13	5.07	0.00
$PR_{1 \rightarrow 5}$	0.67	0.13	5.06	0.00
$PR_{1 \rightarrow 6}$	1.02	0.13	7.68	0.00
$PR_1 * PR_1$	0.78	0.29	2.71	0.01
$PR_{1 \rightarrow 5} * PR_{1 \rightarrow 5}$	-0.87	0.29	-3.00	0.01
$PR_{1 \rightarrow 6} * PR_{1 \rightarrow 6}$	-1.46	0.29	-5.07	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2.7 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงกระแทก

1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป

จากผลทดสอบค่าความทนต่อแรงกระแทกในตารางที่ 4.24 และผลวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าไม่มีความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญของความทนต่อแรงกระแทก จากปัจจัยของสัดส่วนผสม PR₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูป โดยมีค่าความความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย 4.47 ± 0.03 กิโลจูล/ตารางเมตร

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนผสม และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่

เมื่อนำข้อมูลค่าความทนต่อแรงกระแทกใน ตารางที่ 4.25 ความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} กับสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม 210 °C มาทำการวิเคราะห์จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.54 สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงกระแทกของ สัดส่วนผสมและ PR_n ที่ผสมอยู่ได้ดังนี้

$$Y = 1.75 - 0.05 PR_1 - 0.11 PR_{1 \rightarrow 2} - 0.23 PR_{1 \rightarrow 3} - 0.34 PR_{1 \rightarrow 4} - 0.47 PR_{1 \rightarrow 5} - 0.46 PR_{1 \rightarrow 6} + 0.35 PR_{1 \rightarrow 5}^2 + 0.61 PR_{1 \rightarrow 6}^2 \quad (4.13)$$

$$R^2 = 85\%$$

Y = ค่าความทนต่อแรงกระแทก (kJ/m²)

PR_{1->n} = พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 ถึง n (n=1, 2,...,6) หน่วย phr

R² = ค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.54 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงกระแทกของพอลิ

เมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.75	0.40	4.35	0.00
PR_1	-0.05	0.05	-0.97	0.34
$PR_{1 \rightarrow 2}$	-0.11	0.05	-2.25	0.03
$PR_{1 \rightarrow 3}$	-0.23	0.05	-4.60	0.00
$PR_{1 \rightarrow 4}$	-0.34	0.05	-6.95	0.00
$PR_{1 \rightarrow 5}$	-0.47	0.05	-9.51	0.00
$PR_{1 \rightarrow 6}$	-0.46	0.05	-9.32	0.00
$PR_{1 \rightarrow 5} * PR_{1 \rightarrow 5}$	0.35	0.11	3.29	0.00
$PR_{1 \rightarrow 6} * PR_{1 \rightarrow 6}$	0.61	0.11	5.68	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

จากการข้อมูลและการวิเคราะห์ความแปรปรวนในหัวข้อที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยของสัดส่วนผสมและอุณหภูมิการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมมีผลต่อคุณสมบัติของ ความถ่วงจำเพาะ คุณสมบัติภายใต้แรงดึง ความแข็งและความทนต่อแรงกระแทก ค่อนข้างน้อย เพราะฉะนั้น การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติจึงไม่มีแนวโน้มเกิดขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จึงได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยของสัดส่วนผสมและจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ที่อุณหภูมิ 210 °C ได้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดังต่อไปนี้

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับค่าความถ่วงจำเพาะของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C แสดงตามรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบของความสัมพันธ์แบบเส้นตรง หรือโพลีโนเมียลดีกรี 2

จากกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มความสัมพันธ์ในเชิงลบต่อกันโดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อดัชนีการไหลเพิ่มขึ้น ความถ่วงจำเพาะมีแนวโน้มที่จะลดลง

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพกับเชิงกล

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C โดยการประมาณรูปแบบของความสัมพันธ์แบบเส้นตรงหรือโพลีโนเมียลดีกรี 2 ได้ดังต่อไปนี้

4.4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหลกับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ
ดังนี้

1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหลกับค่าความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C แสดงตามรูปที่ 4.30 แสดงให้

เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นความทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหลกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกันมีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 กล่าวคือเมื่อค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

3) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหลกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มที่จะลดลง

4) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหลกับค่าความแข็ง ของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นความแข็งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหลกับค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่จะลดลง

4.4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ

1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับค่าความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นความทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มที่จะลดลง

2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.36

แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นความโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีแนวโน้มที่จะลดลง

3) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.37 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มที่จะลดลง

4) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นความแข็งมีแนวโน้มที่จะลดลง

5) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.39 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกันมีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 กล่าวคือเมื่อค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ โดยการประมาณรูปแบบของความสัมพันธ์แบบเส้นตรงหรือโพลีโนเมียลดีกรี 2 ได้ดังต่อไปนี้

4.4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงกับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ

1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่

4.41 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มที่จะลดลง

3) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงกับค่าความแข็ง ของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.42 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกันมีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 กล่าวคือเมื่อค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นความแข็งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มตามไปด้วย

4) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงกับค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.43 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 กล่าวคือเมื่อค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่จะลดลง

4.4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ

1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.44 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 กล่าวคือเมื่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มที่จะลดลง

2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.45 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกันมีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 กล่าวคือเมื่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นความแข็งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

3) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.46 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 กล่าวคือเมื่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่จะลดลง

4.4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดกับคุณสมบัติเชิงกล
ด้านต่างๆ

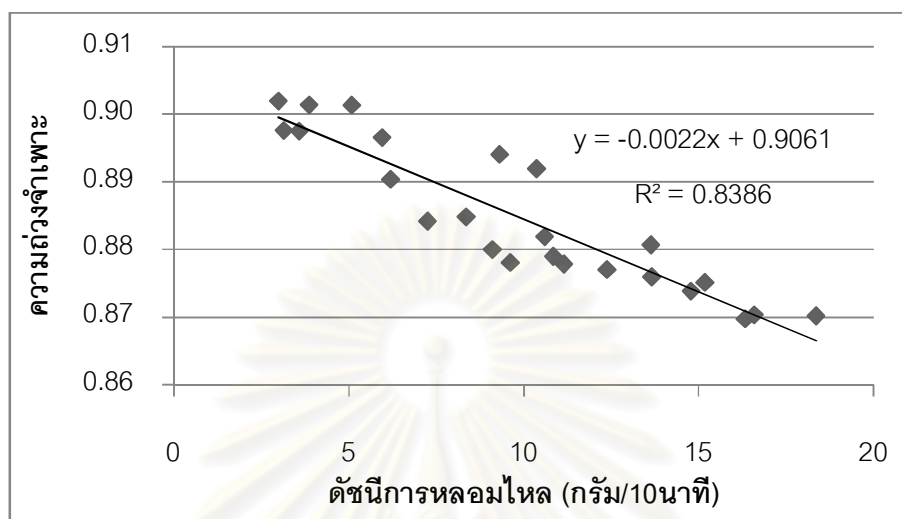
1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด กับค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.47 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นความแข็งมีแนวโน้มที่จะลดลง

2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด กับค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.48 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

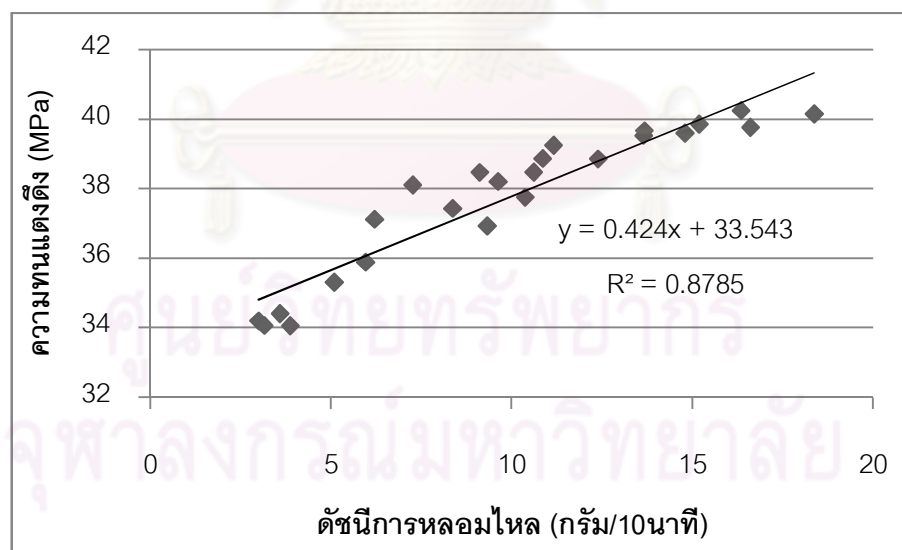
4.4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าความทนต่อแรงกระแทก

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนผสมตั้งแต่ $PR_{1 \rightarrow n}$ อุณหภูมิการขึ้นรูป $210^{\circ}C$ แสดงตามรูปที่ 4.49 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือเมื่อค่าความแข็งเพิ่มขึ้นความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่จะลดลง

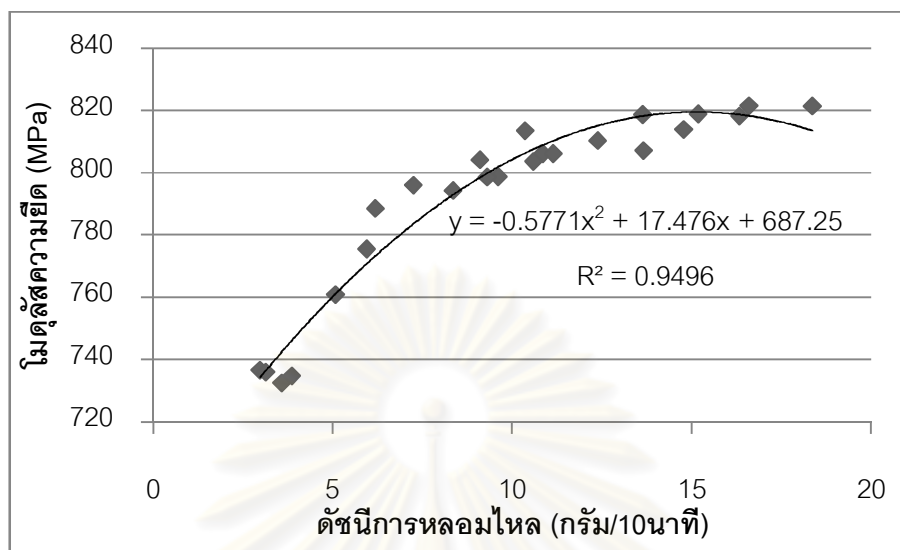
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



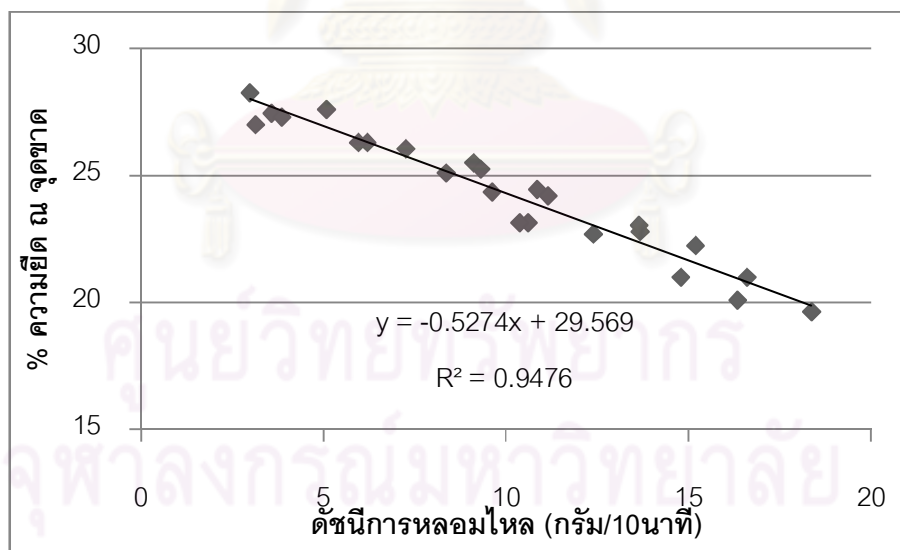
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับความถ่วงจำเพาะของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



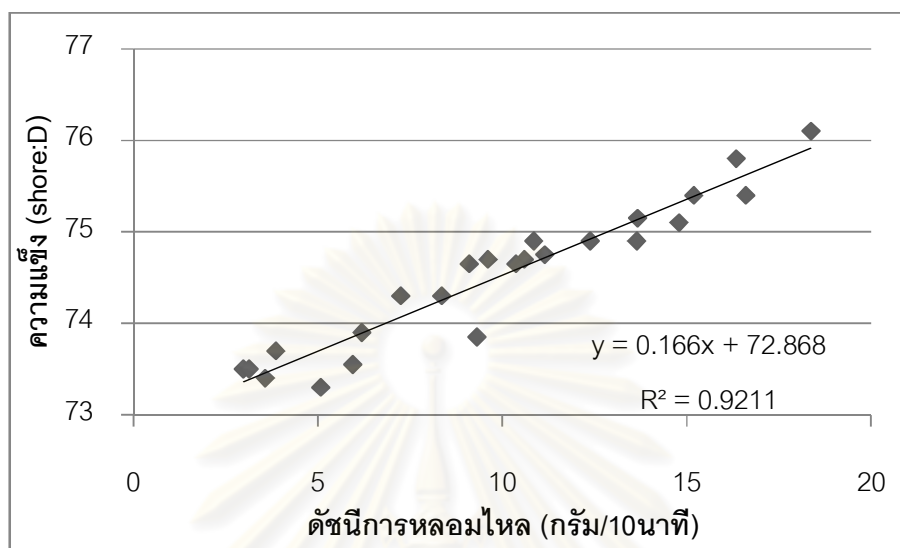
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



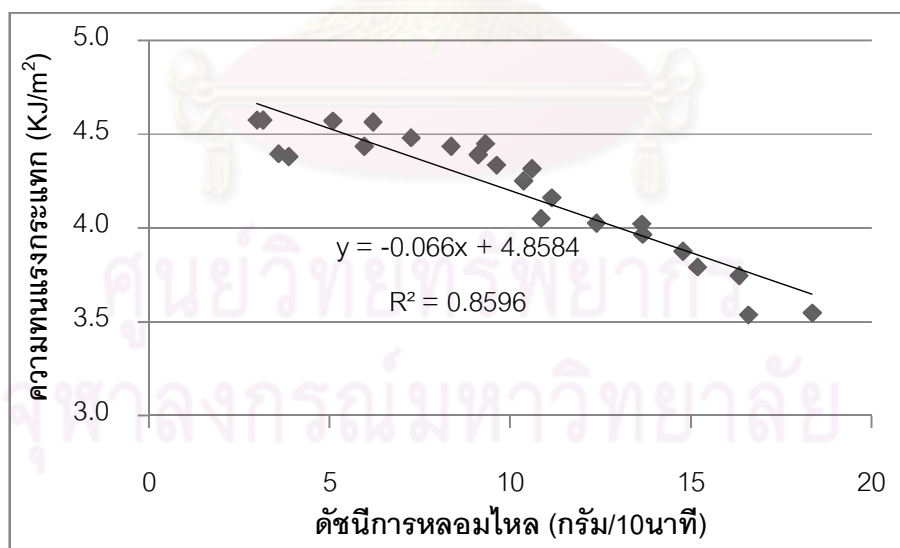
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับโมดูลัสของความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ชั้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



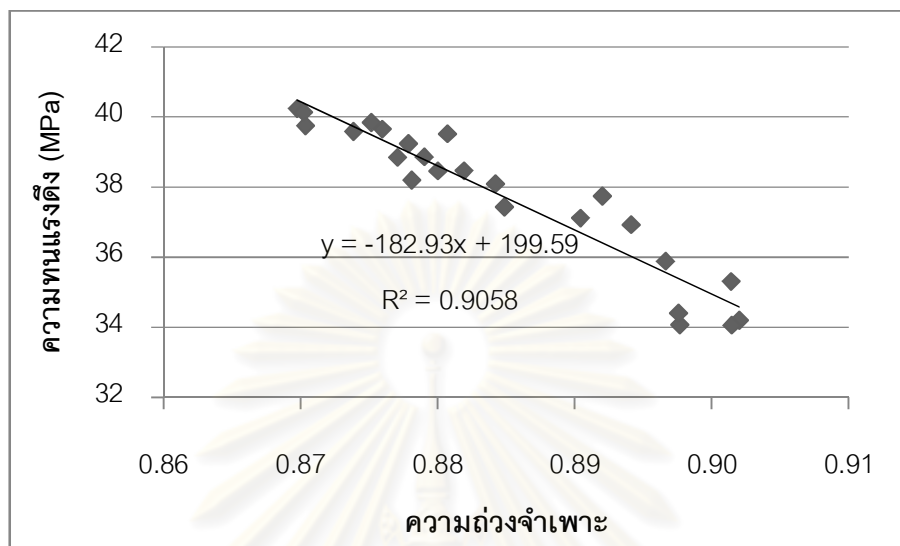
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ชั้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



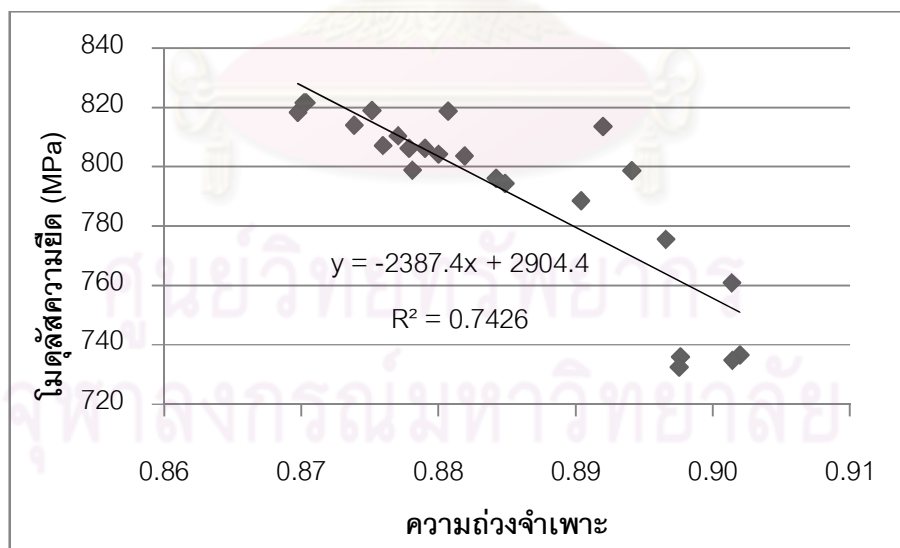
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ชั้น รูปที่ อุณหภูมิ 210 °C



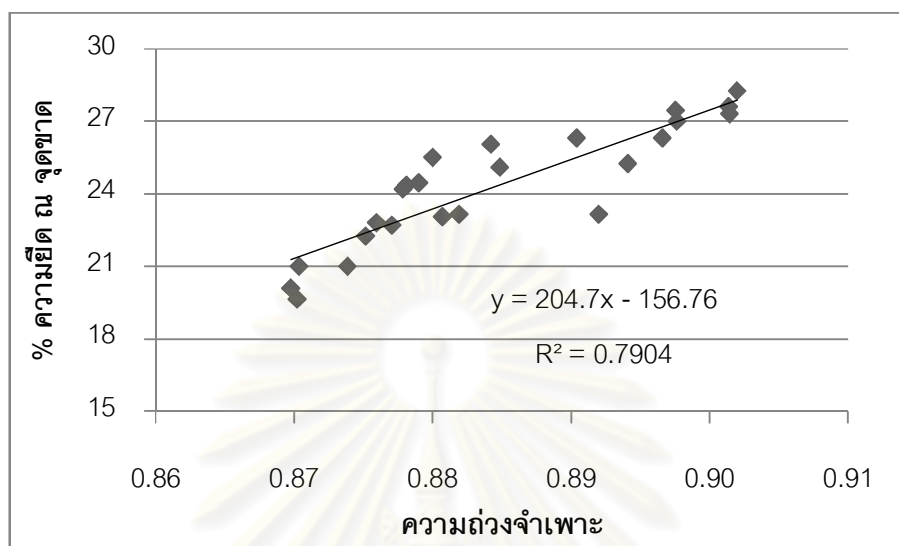
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการหลอมไหลกับความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ชั้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



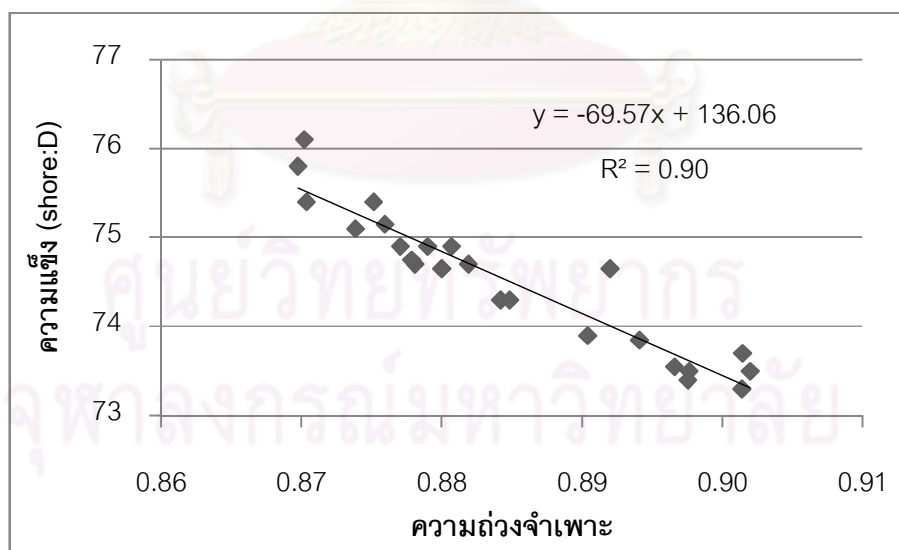
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



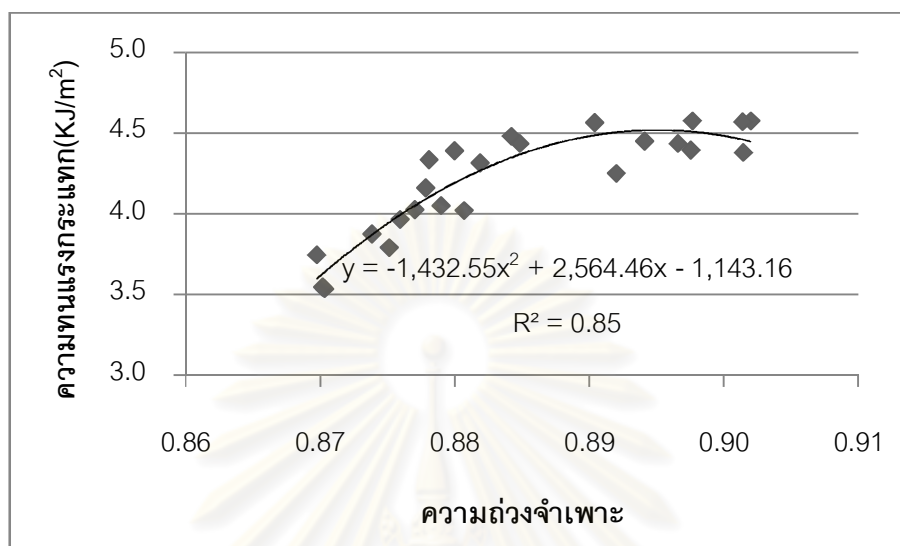
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับโมดูลัสของความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C

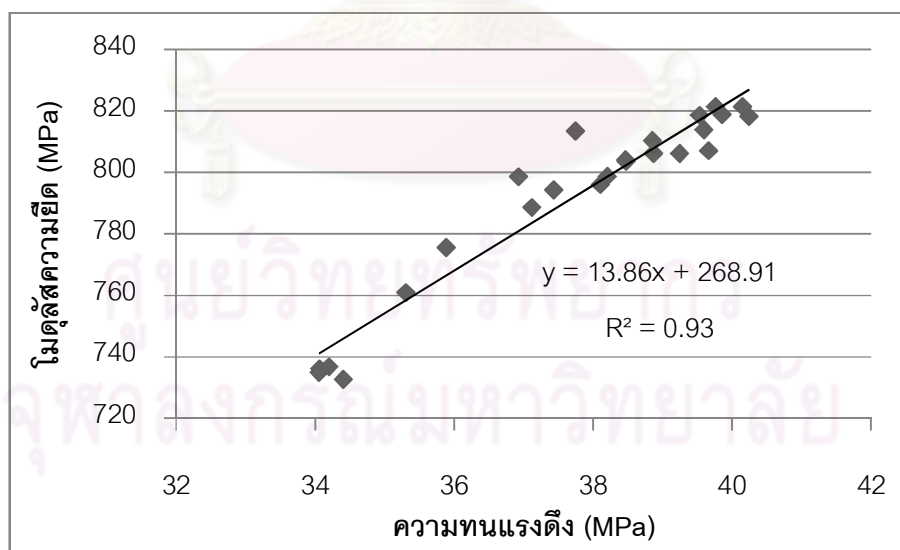


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับความแข็งของพอลิเมอร์ผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



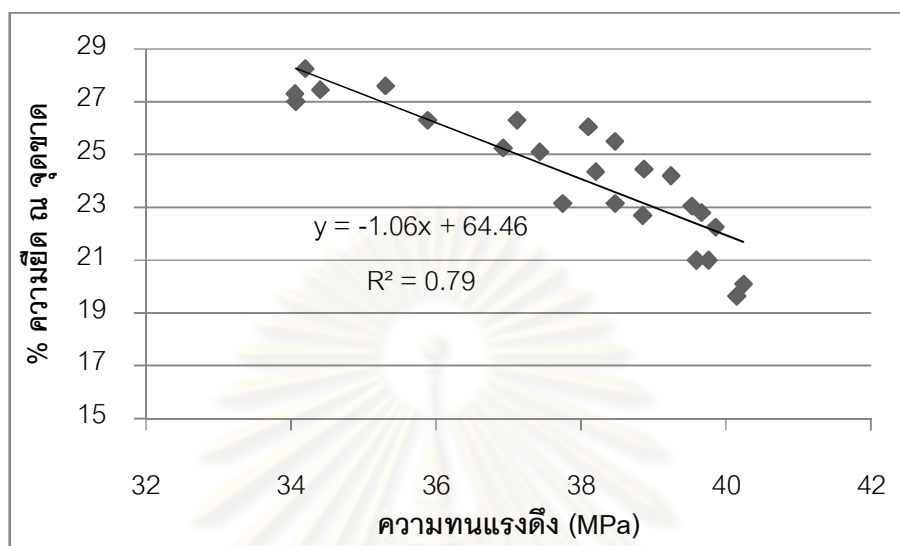
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม

PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C

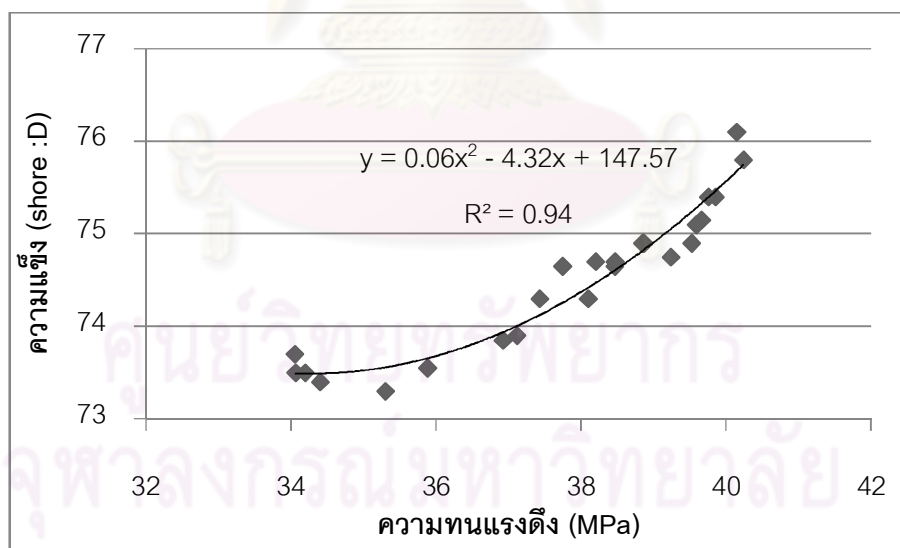


รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับโมดูลัสของความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม

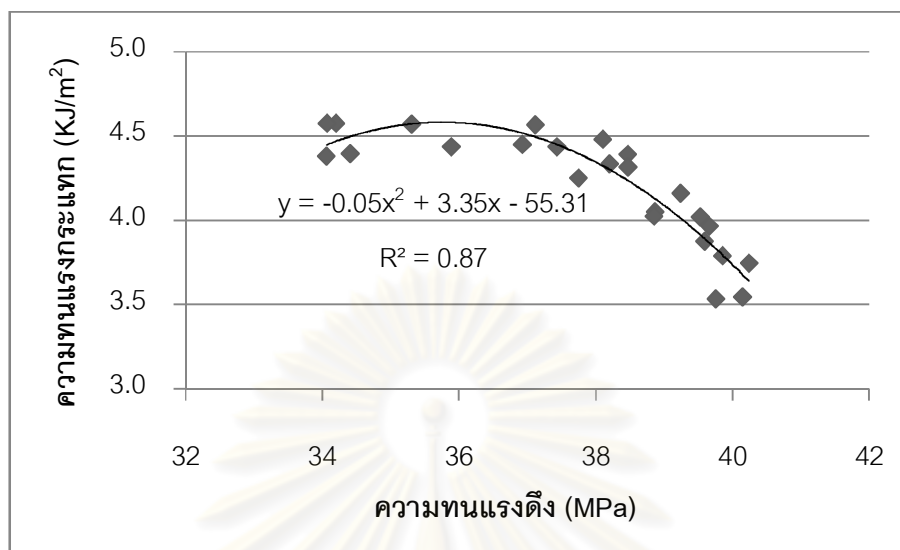
PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



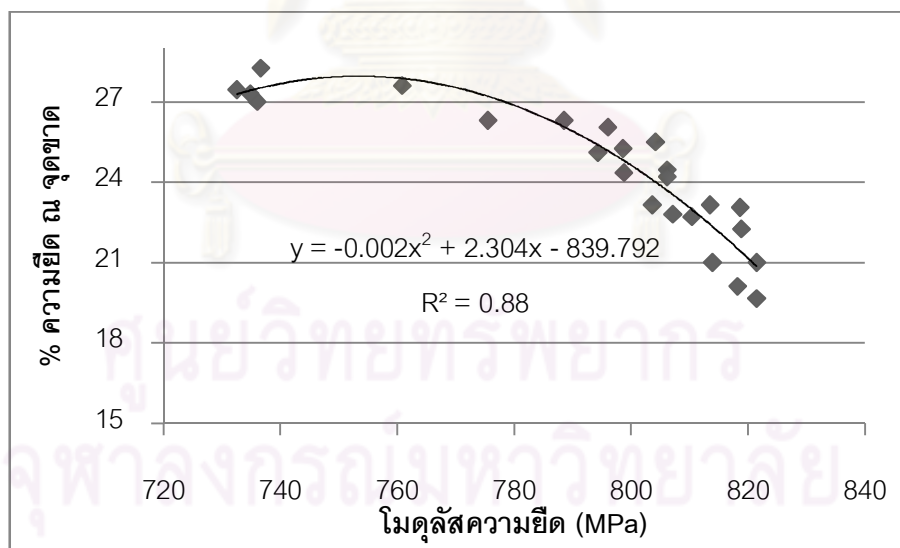
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงกับเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



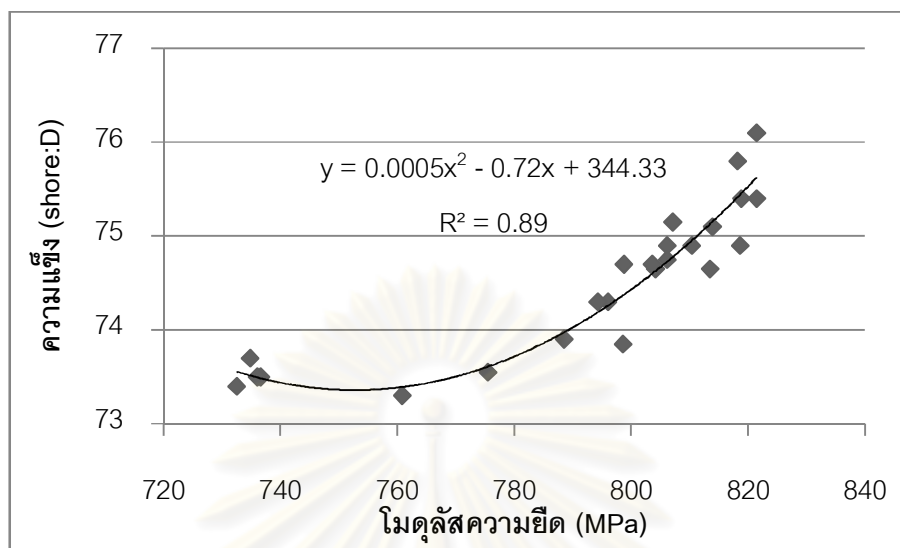
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงกับความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



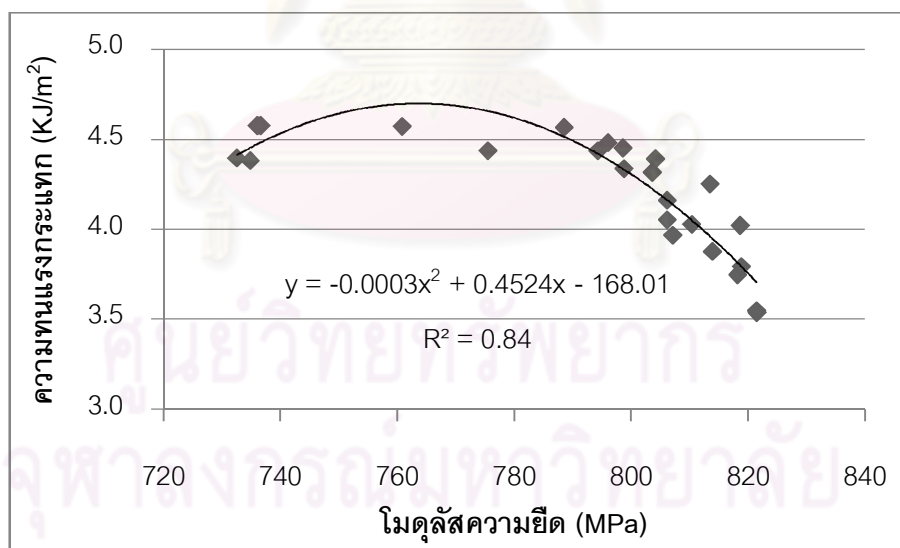
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงกับความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



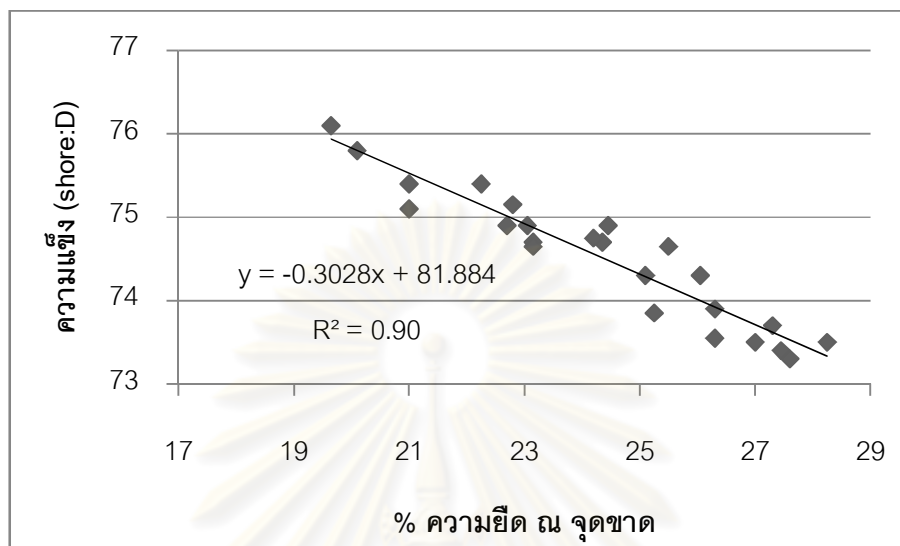
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับความแข็งของพอลิเมอร์ผสม PR_{1-n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C

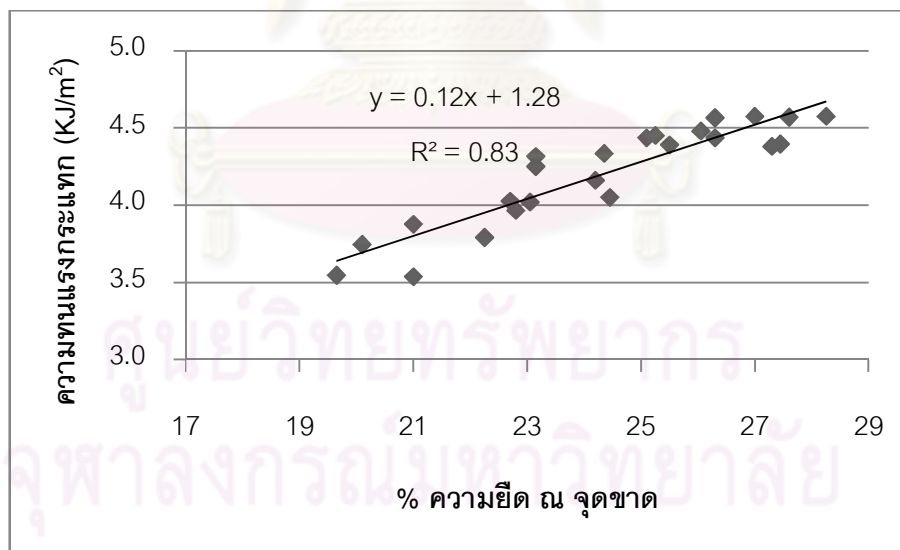


รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PR_{1-n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



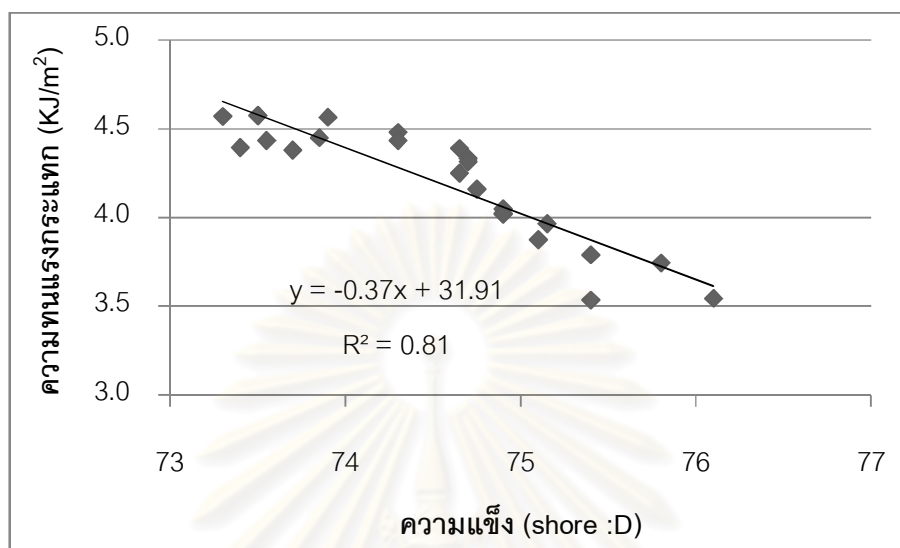
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความยี่ด ณ จุดขาดกับความแข็งของพอลิเมอร์ผสม

PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความยี่ด ณ จุดขาดกับความทนต่อแรงกระแทกของพอลิ

เมอร์ผสม PR_{1->n} ขึ้น รูปที่อุณหภูมิ 210 °C



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเอทิลีน PR_{1-n}
 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 210 °C

4.5 สรุปสมการความสัมพันธ์

จากผลการวิเคราะห์การถดถอยทั้งหมดในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

4.5.1 ผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการขึ้นรูปและสัดส่วนผสม PR_n ที่มีต่อค่าดัชนีการหลอมไหลและคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล

หลังจากการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างปัจจัยของการทดลองกับคุณสมบัติที่ทำการศึกษา สามารถนำมาสรุปได้ตามตารางที่ 4.55 ถึง 4.56

4.5.2 ผลสรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ

เมื่อนำผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล มาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือโพลีโนเมียล ดีกรี 2 จะได้ผลสรุปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทั้งหมด ตามตารางที่ 4.57

ตารางที่ 4.55 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกับสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิ

คุณสมบัติ (Y)	สมการความสัมพันธ์	R ² (%)
ดัชนีการหลอมไหล ¹	$Y = 4.33 + 0.49T + 4.15 PR_1 + 0.44T * PR_1$	95
ดัชนีการหลอมไหล ²	$Y = 3.52 + 1.38PR_1 - 0.38T - 0.14t$	95
ความทนต่อแรงดึง [*]	$Y = 0.0016T^2 - 0.82T + 140.4$	96
โมดูลัสความยืดหยุ่น [*]	$Y = 0.0115T^2 - 5.9573T + 1502.2$	98
%ความยืดหยุ่นจุดขาด [*]	$Y = 27.07 - 7.19T - 7.54T^2$	81

หมายเหตุ ดัชนีการหลอมไหล¹ คือ ศึกษาที่ระยะเวลาการหลอม 6 นาที

ดัชนีการหลอมไหล² คือ ศึกษาระยะเวลาการหลอมตั้งแต่ 6 นาที ถึง 720 นาที

^{*} คือ ช่วงอุณหภูมิ 240-270 °C

ตารางที่ 4.56 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกับสัดส่วนผสมและจำนวนครั้งของพอลิ
โพรไฟไฟลีนที่นำกลับมาหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6

คุณสมบัติ (Y)	สมการความสัมพันธ์	R ² (%)
ดัชนีการหลอมไหล ¹	$Y = 1943.82 - 1.24PR_1 + 1.99PR_{1 \rightarrow 2} + 3.59PR_{1 \rightarrow 3} + 4.35PR_{1 \rightarrow 4} + 5.04PR_{1 \rightarrow 5} + 5.88PR_{1 \rightarrow 6} + 3.62PR_1^2 - 3.75PR_{1 \rightarrow 4}^2 - 6.37PR_{1 \rightarrow 5}^2 - 8.48PR_{1 \rightarrow 6}^2$	90
ดัชนีการหลอมไหล ²	$Y = 43 - 1.34PR_1 + 1.95PR_{1 \rightarrow 2} + 3.45PR_{1 \rightarrow 3} + 4.21PR_{1 \rightarrow 4} + 4.92PR_{1 \rightarrow 5} + 5.83PR_{1 \rightarrow 6} + 0.28t + 3.74PR_1^2 - 0.68PR_{1 \rightarrow 2}^2 - 2.18PR_{1 \rightarrow 3}^2 - 3.59PR_{1 \rightarrow 4}^2 - 5.98PR_{1 \rightarrow 5}^2 - 8.25PR_{1 \rightarrow 6}^2$	92
ความถ่วงจำเพาะ	$Y = 0.831 + 0.006PR_1 + 0.001PR_{1 \rightarrow 2} - 0.004PR_{1 \rightarrow 3} - 0.007PR_{1 \rightarrow 4} - 0.009PR_{1 \rightarrow 5} - 0.009PR_{1 \rightarrow 6} + 0.014PR_{1 \rightarrow 5}^2 + 0.019PR_{1 \rightarrow 6}^2$	70
ความทนต่อแรงดึง	$Y = 46.34 - 1.37PR_1 + 0.46PR_{1 \rightarrow 2} + 1.32PR_{1 \rightarrow 3} + 1.47PR_{1 \rightarrow 4} + 1.41PR_{1 \rightarrow 5} + 1.60PR_{1 \rightarrow 6} - 2.68PR_{1 \rightarrow 5}^2 - 3.38PR_{1 \rightarrow 6}^2$	75
โมดูลัสความยืดหยุ่น	$Y = 908.6 - 21.9PR_1 + 17.1PR_{1 \rightarrow 2} + 19.2PR_{1 \rightarrow 3} + 19.3PR_{1 \rightarrow 4} + 20.5PR_{1 \rightarrow 5} + 20.4PR_{1 \rightarrow 6} + 52.2PR_1^2 - 35.6PR_{1 \rightarrow 6}^2$	75
%ความยืดหยุ่น ขาด	$Y = 0.31 + 0.31PR_1 - 1.76PR_{1 \rightarrow 2} - 1.80PR_{1 \rightarrow 3} - 2.19PR_{1 \rightarrow 4} - 2.82PR_{1 \rightarrow 5} - 3.47PR_{1 \rightarrow 6} + 2.61PR_{1 \rightarrow 3}^2 + 3.09PR_{1 \rightarrow 4}^2 + 4.35PR_{1 \rightarrow 5}^2 + 5.43PR_{1 \rightarrow 6}^2$	91
ความแข็ง	$Y = 78.8 - 0.2PR_1 + 0.3PR_{1 \rightarrow 2} + 0.4PR_{1 \rightarrow 3} + 0.7PR_{1 \rightarrow 4} + 0.7PR_{1 \rightarrow 5} + PR_{1 \rightarrow 6} + 0.8PR_1^2 - 0.9PR_{1 \rightarrow 5}^2 - 1.5PR_{1 \rightarrow 6}^2$	81
ความทนแรงกระแทก	$Y = 1.75 - 0.05PR_1 - 0.11PR_{1 \rightarrow 2} - 0.23PR_{1 \rightarrow 3} - 0.34PR_{1 \rightarrow 4} - 0.47PR_{1 \rightarrow 5} - 0.46PR_{1 \rightarrow 6} + 0.35PR_{1 \rightarrow 5}^2 + 0.61PR_{1 \rightarrow 6}^2$	85

หมายเหตุ ดัชนีการหลอมไหล¹ คือ ศึกษาที่ระยะเวลาการหลอม 6 นาที

ดัชนีการหลอมไหล² คือ ศึกษาระยะเวลาการหลอมตั้งแต่ 6 นาที ถึง 720 นาที

ตารางที่ 4.57 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกับคุณสมบัติ

คุณสมบัติตัวแปรต้น(X)	คุณสมบัติตัวแปรตาม (Y)	สมการความสัมพันธ์	R ² (%)
ดัชนีการหลอมไหล	ความถ่วงจำเพาะ	$Y = -0.0022x + 0.90$	83
	ความทนต่อแรงดึง	$Y = 0.42x + 33.54$	87
	โมดูลัสความยืดหยุ่น	$Y = -0.57x^2 + 17.47x + 687.25$	94
	%ความยืด ณ จุดขาด	$Y = -0.52x + 29.56$	94
	ความแข็ง	$Y = 0.16x + 72.86$	92
	ความทนแรงกระแทก	$Y = -0.06x + 4.85$	85
ความถ่วงจำเพาะ	ความทนต่อแรงดึง	$Y = -182.93x + 199.59$	90
	โมดูลัสความยืดหยุ่น	$Y = -2387.4x + 2904.4$	74
	%ความยืด ณ จุดขาด	$Y = 204.7x - 156.76$	79
	ความแข็ง	$Y = -69.56x + 136.06$	89
	ความทนแรงกระแทก	$Y = -1432.6x^2 + 2564.5x - 1143.2$	84
ความทนต่อแรงดึง	โมดูลัสความยืดหยุ่น	$Y = 13.86x + 268.91$	92
	%ความยืด ณ จุดขาด	$Y = -1.06x + 64.46$	78
	ความแข็ง	$Y = 0.063x^2 - 4.32x + 147.57$	93
	ความทนแรงกระแทก	$Y = -0.05x^2 + 3.35x - 55.31$	86
โมดูลัสความยืดหยุ่น	%ความยืด ณ จุดขาด	$Y = -0.0015x^2 + 2.3036x - 839.79$	88
	ความแข็ง	$Y = 0.0005x^2 - 0.72x + 344.33$	88
	ความทนแรงกระแทก	$Y = -0.0003x^2 + 0.45x - 168.01$	83
% ความยืด ณ จุดขาด	ความแข็ง	$Y = -0.30x + 81.88$	89
	ความทนแรงกระแทก	$Y = 0.12x + 1.28$	83
ความแข็ง	ความทนแรงกระแทก	$Y = -0.37x + 31.91$	81

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

5.1.1 ดัชนีการหลอมไหล

1) ผลของสัดส่วนผสม อุณหภูมิการหลอม ต่อดัชนีการหลอมไหล

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการหลอม ตามรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า อุณหภูมิการหลอม $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดัชนีการหลอมไหลมีค่าต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิดังกล่าว พอลิเมอร์ผสมยังเกิดการหลอมไม่ดี ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความหนืดสูง ทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลมีค่าต่ำมาก และเมื่อสัดส่วนผสมของ PR_1 และอุณหภูมิการหลอมเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และหากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีการหลอมไหลกับปัจจัยของสัดส่วนผสม PR_1 และอุณหภูมิการหลอมตามตารางที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสอง มีผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และหากพิจารณาค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of Squar ; SS) แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของอุณหภูมิการหลอมส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลมากกว่าสัดส่วนผสมของ PR_1

จากผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 ตามรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณสัดส่วนผสมเพิ่มขึ้นและจำนวนครั้งที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ผสมอยู่ ส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มสูงตามไปด้วย หากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีการหลอมไหลกับปัจจัยของสัดส่วนผสมและจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ผสมอยู่ ตามตารางที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสองมีผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และหากพิจารณาค่าของผลรวมกำลังสอง แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่มีผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลมากกว่า

สัดส่วนของการผสม

สำหรับปัจจัยของทั้ง อุณหภูมิการหลอม สัดส่วนผสมของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ และจำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ ที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหล เนื่องจากอุณหภูมิของการหลอมที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมลดลง ทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มสูงขึ้น สำหรับสัดส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมแล้วและการเพิ่มขึ้นของจำนวนครั้งการนำกลับมาใช้ใหม่ที่ส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจาก กระบวนการของการนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ลูกโซ่ของพอลิเมอร์ถูกตัดขาด (Chain scission) จากความร้อนและการบดอัด จึงทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง ส่งผลให้มีความหนืดลดลงตามไปด้วย จึงส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้น

2) ระยะเวลาการให้ความร้อนต่อดัชนีการหลอมไหล

จากผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหลโดยเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อน ตั้งแต่ 6 นาที จนถึง 12 ชั่วโมง ในแต่ละปัจจัยสัดส่วนผสม จำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใช้ใหม่และอุณหภูมิการหลอมซึ่งแสดงตามรูปที่ 4.4 ถึง 4.10 และพิจารณาร่วมกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีการหลอมไหลที่แสดงตามตารางที่ 4.28 ถึง 4.29 แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการให้ความร้อนมีผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นจากค่าเดิมที่ระยะเวลาให้ความร้อน 6 นาที โดยเฉลี่ยประมาณ 3.2%

3) การเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม

จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสีของพอลิเมอร์ผสมที่จากเดิมสีขาวขุ่น เปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน (พอลิเมอร์เสื่อม) ที่ผ่านเครื่องดัชนีการหลอมไหลพบว่า

การเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนของพอลิเมอร์ทั้งจากสัดส่วนผสมของ PR₁ และตามอุณหภูมิการหลอม ตั้งแต่ 170-270 °C ที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.1(3) แสดงตามตารางที่ 4.10 หรือจากผลของจำนวนครั้งของการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ที่ผสมอยู่ ที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.1(3) และแสดงตามตารางที่ 4.11 โดยที่ Cramez *et. al.* (2001) ได้อธิบายถึงสาเหตุของการเปลี่ยนจากสีขาวขุ่นเป็นสีเหลืองอ่อนว่า พอลิเมอร์ที่นำกลับมาหลอมใหม่ถูกกระทำด้วยความร้อนและแรงกลจากการบดอัด จึงทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ คือ คาร์บอนิล และการเกิดขึ้นของพันธะ

คู่ (C=O) ในหมู่คาร์บอนิล ซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงของสีจากสีขาวขุ่นเป็นสีเหลืองอ่อนและเกิดการเสื่อมคุณสมบัติ

5.1.2 โครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม

1) โครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูป

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม ตามแนวรอยหักด้วยไนโตรเจนเหลว พบว่าโครงสร้างของ PP ที่มีผ่านการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิต่างๆ แสดงให้เห็นว่าแผ่นของโครงสร้าง (Patchwork) จะมีขนาดใหญ่ และผลจากการหักขึ้นทดสอบด้วยไนโตรเจนเหลว Patchwork จะมีลักษณะของการซ้อนทับกันไม่สนิท และเมื่อพิจารณาจากผลของการเพิ่มปริมาณผสมของ PR_1 โดยเฉพาะ 900 phr จากรูปที่ 4.12(c) และ 4.13(c) Patchwork ของพอลิเมอร์ผสมจะมีขนาดเล็กลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างของ PP ซึ่งเกิดจากความร้อนและการบิดเพื่อนำมาขึ้นรูปใหม่ของ PR_1 ทำให้โซ่ของพอลิเมอร์เกิดการตัดขาด และทำให้ชิ้นงานที่เกิดขึ้นใหม่มี Patchwork ขนาดเล็กลงเล็กน้อย

2) โครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม PR_{1-n} และสัดส่วนผสมอุณหภูมิขึ้นรูป 210°C

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างตามแนวรอยหักด้วยไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์ผสม PR_{1-n} ที่สัดส่วนผสมต่างๆ ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210°C พบว่าหากพิจารณาตามสัดส่วนผสมพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใหม่ตั้งแต่ 33, 100 และ 900 phr ซึ่งแสดงตามรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการผสมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่มากขึ้น ขนาดของ Patchwork จะมีขนาดเล็กลง และหากพิจารณาจากจำนวนครั้งที่เพิ่มขึ้นของการนำกลับมาหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 ที่ผสมอยู่ซึ่งแสดงตามหัวข้อย่อย (a), (b) และ (c) ของรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งของการนำพอลิโพรไพลีนกลับมาใช้ใหม่ขนาดของ Patchwork จะยังมีขนาดเล็กและมีการซ้อนทับกันได้ดีขึ้น เนื่องมาจากกระบวนการของการนำกลับมาใช้ใหม่จะผ่านขั้นตอนของความร้อน แรงดัน และการบดอัด ทั้งหมดส่งผลให้เกิดการตัดขาดของ ลูกโซ่พอลิเมอร์ (Chain scission) เมื่อนำพอลิเมอร์ดังกล่าวมาขึ้นรูปใหม่ การซ้อนทับกันของโครงสร้างจะทำได้ดีขึ้นส่งผลให้ Patchwork มีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Aurrekoetxea *et.al.* (2001) ซึ่งได้อธิบายเพิ่มเติมว่า การที่น้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงจากกระบวนการ

นำกลับมาใช้ใหม่ ส่งผลให้นิวเคลียสมีขนาดเล็กลง และยังเพิ่มความสามารถในการเกิดผลึก (High degree of crystallization) ซึ่งจะส่งผลให้การซ้อนทับกันของ Patchwork ที่เกิดขึ้น ซ้อนกันได้แบบ สนิทมากขึ้น

5.1.3 ค่าความถ่วงจำเพาะ

1) ผลของสัดส่วนผสม PR_1 อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าความถ่วงจำเพาะ

จากผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของสัดส่วนผสมของ PR_1 และอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงให้เห็นว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถ่วงจำเพาะอย่าง มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าเฉลี่ย 0.901 ± 0.002 แสดงให้เห็นว่าการผสมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมแล้วครั้งที่ 1 ยังมีค่าความถ่วงจำเพาะไม่แตกต่างกับพอลิโพรไพลีนใหม่ (PP)

2) ผลของสัดส่วนผสม $PR_{1 \rightarrow n}$ ต่อค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210°C

จากผลการทดสอบและความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 ตามรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าที่ส่วนผสมของ PR_1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถ่วงจำเพาะ โดยมีค่าเฉลี่ย 0.900 ± 0.002 แต่เมื่อผสมพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 2 และเมื่อปริมาณสัดส่วนผสมเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลง หากพิจารณาค่าของความถ่วงจำเพาะที่สัดส่วนผสม $300PR_{1 \rightarrow 4}$ และ $100PR_{1 \rightarrow 5}$ ซึ่งเป็นบริเวณก่อนที่พอลิเมอร์จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และลดลงจากค่าเฉลี่ยของส่วนผสม PR_1 2.5% โดยประมาณ แต่หากพิจารณาค่าความถ่วงจำเพาะที่สัดส่วนผสม $900PR_{1 \rightarrow 6}$ พบว่าลดลงจากค่าเฉลี่ยของส่วนผสม PR_1 4% โดยประมาณ

หากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะระหว่างปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่มีผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าปัจจัยของสัดส่วนผสม

สำหรับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดลงของมวลโมเลกุลที่เกิดจากการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ ทำให้ลูกโซ่ด้านข้างของพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง (Side-group chain) โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะไม่ทำให้ความแข็งแรงของลูกโซ่ลดลง แต่จะทำให้ลดความสามารถของการเข้ากันได้ ทำให้เกิดช่องว่าง (Void) ระหว่างผลึก ส่งผลให้ลดความหนาแน่นของผลึก ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของพอลิเมอร์ผสมลดลง

5.2 คุณสมบัติเชิงกล

5.2.1 ความทนต่อแรงดึง

1) ผลของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าความทนต่อแรงดึง

จากผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสมของ PR₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการผสม PR₁ ไม่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง แต่อุณหภูมิการขึ้นรูปจะส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และจากความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงเฉลี่ยของสัดส่วนผสมตามอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงตามรูปที่ เมื่อแยกการวิเคราะห์ความแปรปรวนออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงอุณหภูมิ 190-240 °C และช่วง 240-270 °C พบว่า ช่วงอุณหภูมิ 190-240 °C ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทั้งจากปัจจัยของสัดส่วนผสมและอุณหภูมิการขึ้นรูป โดยมีค่าเฉลี่ย 34.2±0.1 เมกะปาสคาล แต่จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงที่เกิดจากปัจจัยของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิการวิเคราะห์ 240-270 °C แสดงให้เห็นว่า ความทนต่อแรงดึงเริ่มมีค่าลดลงตั้งแต่อุณหภูมิ 245 °C เป็นต้นไป

สำหรับการลดลงของค่าความทนต่อแรงดึงที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้นใหม่ ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อ 5.2.1(1) เรื่องการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสม และนอกจากนั้นยังเกิดการเชื่อมขวาง ซึ่งปกติการเชื่อมขวางจะทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่สำหรับกรณีนี้ เกิดกับพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่และที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ จึงลดความสามารถในการทนต่อแรงดึง

2) ผลของสัดส่วนผสม PR_{1->n} ต่อค่าความทนต่อแรงดึงที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

จากผลการทดสอบและความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงกับสัดส่วนผสมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 ตามรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าที่ส่วนผสมของ PR₁ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความทนต่อแรงดึง โดยมีค่าเฉลี่ย 34.2±0.2 เมกะปาสคาล แต่เมื่อผสมพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 2 และเมื่อปริมาณสัดส่วนผสมเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย หากพิจารณาที่สัดส่วนผสม 300PR_{1->4} และ 100PR_{1->5} ซึ่งเป็นบริเวณก่อนที่พอลิเมอร์ผสมจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน พบว่าค่าความทนต่อแรงดึง มีค่าใกล้เคียงกัน และเพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ยของส่วนผสม PR₁ 15% แต่หากพิจารณาค่าความทนต่อแรงดึงที่สัดส่วนผสม 900PR_{1->6} พบว่า ค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ยของส่วนผสม PR₁ 18.5% โดยประมาณ

หากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงดึงระหว่างปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่าปัจจัยของสัดส่วนผสม

สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่าความทนต่อแรงดึง เนื่องจากลูกโซ่โมเลกุลที่สั้นลงจากความร้อน และการบดอัด ทำให้ขนาดของ Patchwork เล็กลงส่งผลให้สามารถทนต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ AurrekoetxeaJ. (2001)

5.2.2 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น

1) ผลของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

จากผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสัดส่วนผสมของ PR₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการผสม PR₁ ไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น แต่อุณหภูมิการขึ้นรูปจะส่งผลต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกับความทนต่อแรงดึงที่ได้อธิบายในหัวข้อ 5.2.3(1) และยังสามารถแบ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิ 190-240 °C และช่วง 240-270 °C พบว่า ช่วงอุณหภูมิ 190-240 °C ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทั้งจากปัจจัยของสัดส่วนผสมและอุณหภูมิการขึ้นรูป โดยมีค่าเฉลี่ย 735±0.2 เมกะปาสคาล แต่จะพบว่ามีเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นที่เกิดจากปัจจัยของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิการวิเคราะห์ 240-270 °C แสดงให้เห็นว่า โมดูลัสของความยืดหยุ่นเริ่มมีค่าลดลงตั้งแต่อุณหภูมิ 245 °C เป็นต้นไป สำหรับสาเหตุของการลดลงของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นนั้น สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับ ความทนต่อแรงดึงที่ได้อธิบายในหัวข้อ 5.2.1(1)

2) ผลของสัดส่วนผสม PR_{1->n} ต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

จากผลการทดสอบและความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับสัดส่วนผสมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 ตามรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าที่สัดส่วนผสมของ PR₁ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น โดยมีค่าเฉลี่ย 735±2 เมกะปาสคาล แต่เมื่อผสมพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 2 และเมื่อปริมาณสัดส่วนผสมเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย หากพิจารณาที่สัดส่วนผสม 300PR_{1->4} และ 100PR_{1->5} ซึ่งเป็นบริเวณก่อนที่พอลิเมอร์ผสมจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน พบว่าค่า

โมดูลัสของความยืดหยุ่น มีค่าใกล้เคียงกัน และเพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ยของส่วนผสม 11.5% ตามลำดับ แต่หากพิจารณาค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นที่สัดส่วนผสม 900PR₁₋₆ พบว่า ค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ยของส่วนผสม PR₁ 12% โดยประมาณ

หากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่น ระหว่างปัจจัยของจำนวนครั้งของการหลอมที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของจำนวนครั้งของการหลอมที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่มีผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมากกว่าปัจจัยของสัดส่วนผสม

สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นนั้น มีสาเหตุเช่นเดียวกับกับความทนต่อแรงดึง ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อที่ 5.2.1(2) ซึ่งค่าที่เพิ่มขึ้นของโมดูลัสของความยืดหยุ่น บอกรับความสามารถของการยึดของวัสดุได้น้อยลง

5.2.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด

1) ผลของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด

จากผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยส่วนผสม PR₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสม PR₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูป ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่จากค่าผลรวมกำลังสอง (SS) แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนผสมของ PR₁ ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด น้อยกว่าอุณหภูมิการขึ้นรูป และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด เฉลี่ยตามสัดส่วนผสมกับอุณหภูมิการขึ้นรูปที่แสดงตามรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิการหลอมขึ้นรูปที่ 245 °C เป็นต้นไป จะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ลดลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับสาเหตุของการลดลงของค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดนั้น สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับ ความทนต่อแรงดึงที่ได้อธิบายในหัวข้อ 5.2.3(1)

2) ผลของสัดส่วนผสม PR₁₋₆ ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

จากผลการทดสอบและความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาดกับสัดส่วนผสมพอลิโพรไพลีนผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 ตามรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่า ที่ส่วนผสมของ PR₁ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด โดยมีค่าเฉลี่ย 27.5±0.5 (%) แต่เมื่อผสมพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 2 และเมื่อปริมาณสัดส่วนผสม

เพิ่มขึ้นทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ๓ จุดขาดลดลง หากพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ๓ จุดขาดที่สัดส่วนผสม 300PR_{1->4} ซึ่งให้ค่าต่ำสุดก่อนที่พอลิเมอร์จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน พบว่าค่าลดลงจากค่าเฉลี่ยของสัดส่วนผสม PR₁ 20% โดยประมาณ แต่หากพิจารณาที่สัดส่วนผสม 900PR_{1->6} พบว่า ค่าลดลงจากค่าเฉลี่ยของสัดส่วนผสม PR₁ 31% โดยประมาณ

หากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ๓ จุดขาดระหว่างปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ๓ จุดขาดมากกว่าปัจจัยของสัดส่วนผสม

การลดลงของค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ๓ จุดขาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของไซโมเลกุลที่สั้นลงจากการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ ทำให้พันธะคาร์บอน (C-C) ของพอลิเมอร์ยืดได้น้อยลง

5.2.4 ค่าความแข็ง

1). ผลของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าความแข็ง

จากผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของสัดส่วนผสมของ PR₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูปแสดงให้เห็นว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าเฉลี่ย 73.6±0.1 (shore D) แสดงให้เห็นว่าการผสมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมแล้วครั้งที่ 1 ยังมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกับพอลิโพรไพลีนใหม่ (PP)

2). ผลของสัดส่วนผสม R1-Rn ต่อค่าความแข็งที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

จากผลการทดสอบและความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับสัดส่วนผสมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 ตามรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าที่ส่วนผสมของ PR₁ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็ง โดยมีค่าเฉลี่ย 73.5±0.1 (shore D) แต่เมื่อผสมพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 2 และเมื่อปริมาณสัดส่วนผสมเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย หากพิจารณาที่สัดส่วนผสม 300PR_{1->4} และ 100PR_{1->5} ซึ่งเป็นบริเวณก่อนที่พอลิเมอร์ผสมจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และเพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ยของส่วนผสม PR₁ 2% โดยประมาณ แต่หากพิจารณาค่าความแข็งที่สัดส่วนผสม 900PR_{1->6} พบว่า ค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ยของส่วนผสม PR₁ 3.5% โดยประมาณ

หากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าความแข็งระหว่างปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่มีผลต่อค่า

ความแข็งแรงมากกว่าปัจจัยของสัดส่วนผสม

การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรง เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ที่มีการเชื่อมขวางบริเวณผิวของชิ้นงาน ซึ่งปกติการเชื่อมขวางจะมีผลดีในการช่วยให้วัสดุที่เหนียวสามารถคงรูปร่างได้ที่อุณหภูมิสูง แต่การเชื่อมขวางหลังจากพอลิเมอไรต์ได้ผ่านการใช้งานมาแล้วจะทำให้พอลิเมอไรต์มีลักษณะแข็งแต่เปราะ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Najafi *et al* (2009)

5.2.5 ค่าความทนต่อแรงกระแทก

1) ผลของสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป ต่อค่าความทนต่อแรงกระแทก

จากผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของสัดส่วนผสมของ PR₁ และอุณหภูมิการขึ้นรูป แสดงให้เห็นว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความทนต่อแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าเฉลี่ย 4.47±0.03 กิโลจูล/ตารางเมตร แสดงให้เห็นว่าการผสมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมแล้วครั้งที่ 1 ยังมีค่าความทนต่อแรงกระแทกไม่แตกต่างกับพอลิโพรไพลีนใหม่ (PP)

2) ผลของสัดส่วนผสม PR₁₋₆ ต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

จากผลการทดสอบและความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงกระแทกกับสัดส่วนผสมพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมจำนวนครั้งตั้งแต่ 1 ถึง 6 ตามรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าที่สัดส่วนผสมของ PR₁ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความทนต่อแรงกระแทก โดยมีค่าเฉลี่ย 4.50±0.10 กิโลจูล/ตารางเมตร แต่เมื่อผสมพอลิเมอไรต์ที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 2 และเมื่อปริมาณสัดส่วนผสมเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกลดลง หากพิจารณาที่สัดส่วนผสม 300PR₁₋₄ ซึ่งให้ค่าต่ำสุดก่อนที่พอลิเมอไรต์จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน พบว่า ค่าลดลงจากค่าเฉลี่ยของสัดส่วนผสม PR₁ 8% โดยประมาณ แต่หากพิจารณาที่สัดส่วนผสม 900PR₁₋₆ พบว่าลดลงจากค่าเฉลี่ยของสัดส่วนผสม PR₁ 19.5% โดยประมาณ

หากพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าความทนต่อแรงกระแทกระหว่างปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 และสัดส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ มีผลต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกมากกว่าปัจจัยของสัดส่วนผสม

การลดลงของค่าความทนต่อแรงกระแทกที่เกิดขึ้น เนื่องจากการนำพอลิเมอไรต์กลับมาใช้ใหม่จะเพิ่มความสามารถของระดับการเกิดผลึกได้มากกว่า (High Degree of Crystallization)

เมื่อโครงสร้างพอลิเมอร์มีความเป็นผลึก จะเกิดรอยร้าวจากการบากร่องชิ้นงาน (Notch) ได้ง่ายกว่า จึงสูญเสียความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีความเหนียวมากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Aurrekoetxea *et al* (2001) และ Najafi *et al* (2009)

5.3 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลในหัวข้อที่ 4.5 สามารถที่จะสรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ ได้ดังนี้

ตารางที่ 5.1 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล

	ความถ่วงจำเพาะ	ความทนแรงดึง	โมดูลัสความยืด	%ความยืด ณ จุดขาด	ความแข็ง	ความทนแรงกระแทก
ดัชนีการไหล	-	+	+	-	+	-
ความถ่วงจำเพาะ	-	-	-	+	-	+
ความทนต่อแรงดึง		+	+	-	+	-
โมดูลัสความยืด			+	-	+	-
%ความยืด ณ จุดขาด				+	-	+
ความแข็ง					+	-

หมายเหตุ + คือ ความสัมพันธ์แบบแปรตาม ; - คือ ความสัมพันธ์แบบผกผัน

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรไพลีนใหม่กับพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใช้ใหม่ ได้ผลสรุปดังนี้

1. ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ จำนวนครั้งของพอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอมใหม่มากกว่าปริมาณของสัดส่วนผสม

2. พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมไม่เกิน 3 ครั้ง สามารถนำกลับมาผสมกับพอลิโพรไพลีนใหม่ได้ โดยยังคงสภาพสีขาวขุ่นปกติ ขณะที่พอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 4 และ 5 ครอบคลุมนำกลับมาใช้ใหม่ให้น้อยลง โดยควรน้อยกว่า 100 และ 33 phr ตามลำดับ

3. การเพิ่มปริมาณการผสมและจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอม มีผลให้ Patchwork มีขนาดเล็กและมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้ความทนต่อแรงกระแทกและอัตราการยืดตัวของชิ้นงานลดลง ขณะที่ความทนต่อแรงดึงและโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้น

4. ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความแข็ง และค่าความทนต่อแรงกระแทก จะไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิการขึ้นรูปและสัดส่วนผสมของ PR₁ ที่ระดับความชื้น 95%

5. ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความทนต่อแรงกระแทก มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการผสมและจำนวนครั้งของการหลอมใหม่ ขณะที่ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณการผสม 900 phr จำนวนการหลอมไม่เกิน 3 ครั้ง มีผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลงจากเดิม 0.90 เหลือ 0.88 หรือลดลง 2.1% และค่าความทนต่อแรงกระแทกลดลงจากเดิม 4.5 เหลือ 4.0 กิโลจูล/ตารางเมตร หรือลดลง 11%

6. ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนผสม PR₁ และอุณหภูมิการหลอมขึ้นรูปในช่วงอุณหภูมิ 190-240 °C แต่จะลดลงตั้งแต่อุณหภูมิ

245 °C เป็นต้นไป ขณะที่ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งของการหลอมใช้ใหม่ โดยที่ปริมาณการผสม 900 phr และจำนวนการหลอมไม่เกิน 3 ครั้ง มีผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.4 เป็น 3.9 เมกะปาสคาล หรือเพิ่มขึ้น 15% และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 735 เป็น 810 เมกะปาสคาล หรือเพิ่มขึ้น 10%

7. อัตราการยืดตัวจะมีค่าลดลงเล็กน้อยตามสัดส่วนผสม PR_1 ที่เพิ่มขึ้นสำหรับปัจจัยของอุณหภูมิการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการยืดตัวลดลง โดยเฉพาะตั้งแต่ 245 °C เป็นต้นไป และอัตราการยืดตัว จะลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งของการหลอมใช้ใหม่ โดยที่ปริมาณการผสม 900 phr และจำนวนการหลอมไม่เกิน 3 ครั้ง อัตราการยืดตัวลดลงจากเดิม 27% เหลือ 23% หรือลดลง 15%

6.2 อุปสรรคและปัญหาในการวิจัย

1. ในการทดลองมีการประยุกต์ใช้เครื่องกลึงสำหรับการบดเม็ดพลาสติกเพื่อนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่อาจเกิดอันตรายจากใบมีดได้ จึงต้องมีความระมัดระวังอย่างสูงในขณะที่ใช้เครื่องมือ

2. เนื่องจากเป็นการประยุกต์ใช้เครื่องมือในการบดพลาสติก จึงทำให้อัตราการบดพลาสติกทำได้น้อย จึงต้องใช้เวลามากสำหรับขั้นตอนการบด เพื่อให้ได้พลาสติกตามปริมาณที่ต้องการ

6.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรไพลีนใหม่กับพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใช้ใหม่ ได้ผลสรุปดังนี้

1. งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใหม่ที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล งานวิจัยต่อไป ควรศึกษาในเรื่องของการทำนายอายุการใช้งานของพอลิเมอร์ผสมที่ได้

2. งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมของพอลิโพรไพลีนที่เกิดขึ้น (Degradation) จากการนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ งานวิจัยต่อไป ควรศึกษาเรื่องของการใส่ตัวเติม (Additives) เพื่อรักษาหรือปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เจริญ นาคะสรรค์. เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : วิ.เจ.พรินติ้ง , 2545
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น 2549.
- ทานตะวัน เต็กชี่น, นิรันดร จันรัมย์ และ อติศักดิ์ แก้วใส. พลาสติก 1. กรุงเทพฯ : สกายบุ๊กส์ 2544.
- ศุภชัย งามศิลปเสถียร. สมบัติและความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของลึงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงสำหรับขนส่งขวดน้ำอัดลมที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2543.
- สุมาลี ทิพย์พรกุล, ศุภรัตน์ นวลสุวรรณ และ สัญญา จินดาประเสริฐ. การนำขยะพลาสติกชนิด PP และ PE มาดัดแปลงเป็นผลิตภัณฑ์โดยการขึ้นรูปแบบขั้วตัน. วิทยานิพนธ์ ภาควิชา วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2534.
- อภิเนันทนา อุดมศักดิ์. คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมออร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับพอลิโพรไพลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต . ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2541.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- Aurrekoetxea J., Sarrionandia M.A. and Urrutibeascoa I. Effect of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene. Journal of materials science 36 (2001) : 2607-2613
- Aurrekoetxea J., Sarrionandia M.A. and Urrutibeascoa I. Fracture behavior of virgin and recycled isotactic polypropylene . Journal of materials science 36 (2001) : 5073-5078
- Bertin S and Robin J. Study and characterization of virgin and recycled LDPE/PP blends. European Polymer Journal 38 (2002) : 2255-2264
- Brache P , Hoydal L.T, Hinrichsen E.L. and Melum F. Modification of mechanical properties of recycled polypropylene from post-consumer containers. Waste Management (2008)
- Cramez M.C. and Oliveira M.J. Effect of nucleating agent and cooling rate on the microstructure and properties of a rotational moulding grade of polypropylene . Journal of materials science 36 (2001) : 2151-2161
- Feller J.F and Bourmaud A. Rheological and calorimetric properties of recycled bisphenol A poly(carbonate). Polymer Degradation and Stability 82 (2003) : 99-104
- Fung K.L. and Li R.K.Y. Effect of blending sequence on the mechanical properties of ternary blends prepared from recycled poly(ethylene terephthalate). J Master Sci 41(2006) : 6123-6125.
- Hamskog M., Klugel M., Forsstrom D., Terselius B. and Gijnsman P. The effect of adding virgin material or extra stabilizer on the recyclability of polypropylene as studied by multi-cell imaging chemiluminescence and microcalorimetric . Polymer Degradation and Stability 91 (2005) : 429-436
- Krause A., Lange A. and Ezrin M. Plastic Analysis Guide . Part I. New York : Macmillan Publishing, 1983.
- Kostadinova Loultcheva M, Proietto M., Jilovb N. & La Mantis F.P. Recycling of high density polyethylene containers. Polymer Degradation and stability 57 (1997) : 77-81.

- Meran C, Ozturk O, and Yuksel M. Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene. Material and Design 29(2008): 701-705.
- Najafi S.K., Mostafazadeh-Marznaki M. and Chaharmahali M. Effect of thermomechanical degradation of polypropylene on mechanical properties of wood-polypropylene composites . Journal of Composite Material 43 (2009) : 2543-2554
- Pawlak A, Pluta M, Morawiec J., Galeski A. and Pracella M. Characterization of scrap poly(ethylene terephthalate). European Polymer Journal 36(2002): 1875-1884.
- Pedroso A.G. and Rosa D.S. Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends. Carbohydrate Polymer 59 (2005) : 1-9.
- Yarahmadi N, Jakubowicz I and Gevert T. Effect of repeated extrusion on the properties and durability of rigid PVC scrap. Polymer Degradation and Stability 73 (2001): 93-99.



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงดึงกับสัดส่วนผสม PR₁ และ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-240 °C

Source	DF	SS	MS	F	P
PR ₁	4	0.24	0.06	0.50	0.74
T	4	0.38	0.09	0.78	0.55
Interaction	16	1.57	0.10	0.80	0.67
Error	25	3.05	0.12		
Total	49	5.24			

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนต่อแรงดึงกับสัดส่วนผสม PR₁ และ อุณหภูมิการขึ้นรูป 240-270 °C

Source	DF	SS	MS	F	P
R1	4	1.23	0.31	1.40	0.27
T	3	1.75	0.58	2.65	0.08
Interaction	12	1.56	0.13	0.59	0.83
Error	20	4.41	0.22		
Total	39	8.95			

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่นกับสัดส่วนผสม PR₁ และ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-240 °C

Source	DF	SS	MS	F	P
PR ₁	4	22.21	5.55	0.69	0.61
T	4	15.16	3.79	0.47	0.76
Interaction	16	86.86	5.43	0.67	0.79
Error	25	201.75	8.07		
Total	49	325.98			

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่นกับสัดส่วนผสม PR₁ และ อุณหภูมิการขึ้นรูป 240-270 °C

Source	DF	SS	MS	F	P
PR ₁	4	61.13	15.28	2.49	0.18
T	3	60.94	20.31	3.31	0.04
Interaction	12	74.50	6.21	1.01	0.47
Error	20	122.75	6.14		
Total	39	319.31			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสม PR₁ และอุณหภูมิการหลอม

PR ₁ (phr)	การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)					
		170	190	210	230	250	270
0	1	0.21±0.04	1.67±0.09	2.54±0.07	3.93±0.17	5.54±0.07	7.91±0.23
	2	0.23±0.02	1.70±0.07	2.55±0.08	3.93±0.18	5.61±0.12	8.00±0.08
33	1	0.38±0.10	1.76±0.05	3.03±0.14	3.98±0.10	5.72±0.35	8.20±0.67
	2	0.37±0.03	1.76±0.02	2.93±0.06	4.01±0.06	5.82±0.07	8.06±0.09
100	1	0.53±0.06	1.77±0.03	3.13±0.02	4.47±0.10	5.99±0.23	8.60±0.37
	2	0.61±0.01	1.87±0.02	3.15±0.03	4.47±0.10	6.22±0.16	8.33±0.25
300	1	0.64±0.05	1.73±0.05	3.61±0.16	4.49±0.19	5.93±0.23	9.09±0.29
	2	0.10±0.07	1.92±0.06	3.55±0.26	4.63±0.09	6.51±0.11	9.16±0.00
900	1	0.69±0.05	1.92±0.02	3.90±0.18	4.77±0.18	6.56±0.20	10.12±0.72
	2	0.79±0.04	1.93±0.02	3.82±0.18	4.82±0.15	6.90±0.05	10.91±0.26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสมของ $PR_{1 \rightarrow n}$

สัดส่วน (phr)	การทดลอง	$PR_{1 \rightarrow n}$					
		PR_1	$PR_{1 \rightarrow 2}$	$PR_{1 \rightarrow 3}$	$PR_{1 \rightarrow 4}$	$PR_{1 \rightarrow 5}$	$PR_{1 \rightarrow 6}$
33	1	3.03±0.14	5.05±0.09	6.18±0.05	7.26±0.33	9.06±0.14	10.60±0.06
	2	2.93±0.06	5.11±0.11	6.21±0.06	7.24±0.01	9.15±0.016	11.10±0.12
100	1	3.13±0.02	5.81±0.29	8.41±0.07	9.57±0.11	11.12±0.11	13.62±0.08
	2	3.51±0.03	6.09±0.15	8.30±0.08	9.66±0.08	11.18±0.10	13.71±0.08
300	1	3.61±0.16	9.18±0.54	10.59±0.08	12.33±0.05	14.56±0.09	16.05±0.85
	2	3.55±0.26	9.44±0.12	10.61±0.26	12.44±0.21	15.01±0.49	16.63±0.24
900	1	3.90±0.17	10.27±0.67	13.55±0.08	15.07±0.08	16.69±0.05	18.30±0.27
	2	3.82±0.18	10.46±0.15	13.78±0.20	15.30±0.20	16.51±0.20	18.43±0.65

ตารางที่ 3 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสม PR₁ และระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิการหลอม 190 °C

อุณหภูมิ 190 °C		ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
PR ₁ (phr)	การทดลอง	6	30	90	180	360	720
0	1	1.67±0.09	1.67±0.12	1.68±0.12	1.68±0.01	1.73±0.05	1.76±0.04
	2	1.70±0.07	1.70±0.08	1.84±0.04	1.77±0.04	1.78±0.04	1.85±0.02
33	1	1.73±0.05	1.73±0.05	1.73±0.05	1.74±0.01	1.75±0.01	1.77±0.01
	2	1.76±0.02	1.74±0.05	1.81±0.01	1.85±0.07	1.86±0.05	1.96±0.05
100	1	1.76±0.05	1.76±0.06	1.76±0.06	1.76±0.01	1.77±0.01	1.79±0.01
	2	1.87±0.02	1.86±0.04	1.93±0.04	1.98±0.03	2.00±0.06	2.06±0.11
300	1	1.77±0.03	1.77±0.04	1.77±0.03	1.77±0.02	1.79±0.01	1.81±0.03
	2	1.92±0.06	1.97±0.00	2.09±0.09	2.08±0.11	2.13±0.06	2.21±0.05
900	1	1.92±0.02	1.92±0.02	1.92±0.03	2.00±0.09	2.04±0.09	2.12±0.07
	2	1.93±0.02	1.97±0.02	2.02±0.10	2.15±0.10	2.21±0.04	2.25±0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสม PR_1 และระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิการหลอม 210 °C

อุณหภูมิ 210 °C		ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
PR_1 (phr)	การทดลอง	6	30	90	180	360	720
0	1	2.54±0.07	2.55±0.07	2.76±0.06	2.75±0.01	2.76±0.01	2.77±0.01
	2	2.55±0.08	2.60±0.05	2.78±0.06	2.85±0.02	2.87±0.03	2.88±0.08
33	1	3.03±0.14	3.25±0.11	3.33±0.14	3.32±0.01	3.33±0.01	3.33±0.01
	2	2.93±0.06	3.09±0.04	3.32±0.11	3.35±0.02	3.35±0.03	3.44±0.04
100	1	3.13±0.02	3.20±0.02	3.42±0.07	3.41±0.01	3.41±0.01	3.46±0.01
	2	3.15±0.03	3.17±0.05	3.39±0.04	3.45±0.06	3.51±0.05	3.58±0.09
300	1	3.56±0.17	3.67±0.17	3.79±0.16	3.79±0.01	3.79±0.01	3.80±0.01
	2	3.43±0.13	3.68±0.10	3.91±0.07	3.89±0.11	4.06±0.08	4.16±0.03
900	1	3.90±0.18	3.91±0.18	3.93±0.18	3.95±0.05	4.08±0.04	4.13±0.01
	2	3.82±0.18	3.88±0.13	3.98±0.11	4.08±0.06	4.17±0.07	4.28±0.07

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับสัดส่วนผสม PR_1 และระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิการหลอม 230 °C

อุณหภูมิ 230 °C		ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
PR_1 (phr)	การทดลอง	6	30	90	180	360	720
0	1	3.93±0.17	3.95±0.19	3.99±0.14	3.99±0.01	4.09±0.04	4.12±0.01
	2	3.93±0.18	4.03±0.09	4.13±0.12	4.19±0.08	4.25±0.09	4.24±0.08
33	1	3.98±0.10	4.11±0.11	4.26±0.10	4.27±0.01	4.28±0.01	4.29±0.04
	2	4.01±0.06	4.14±0.06	4.31±0.04	4.34±0.07	4.39±0.02	4.38±0.01
100	1	4.47±0.11	4.54±0.10	4.67±0.10	4.68±0.01	4.68±0.01	4.68±0.01
	2	4.47±0.10	4.54±0.11	4.76±0.03	4.85±0.10	4.94±0.04	4.99±0.12
300	1	4.51±0.19	4.69±0.18	5.06±0.19	5.04±0.01	5.15±0.01	5.34±0.01
	2	4.63±0.09	4.71±0.09	5.03±0.07	5.12±0.09	5.24±0.01	5.35±0.02
900	1	4.77±0.18	4.95±0.16	5.27±0.16	5.25±0.01	5.31±0.01	5.48±0.01
	2	4.82±0.15	4.96±0.08	5.29±0.06	5.36±0.03	5.40±0.03	5.52±0.04

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 33PR_{1-n} อุณหภูมิการหลอม 210 °C

สัดส่วน (phr)	PR _{1-n}	การ ทดลอง	ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
			6	30	90	180	360	720
33	PR ₁	1	3.03±0.14	3.25±0.11	3.33±0.14	3.32±0.01	3.33±0.01	3.33±0.01
		2	2.93±0.06	3.34±0.09	3.47±0.22	3.65±0.22	4.02±0.20	4.21±0.13
	PR _{1->2}	1	5.06±0.10	5.16±0.02	5.20±0.01	5.35±0.17	5.81±0.11	6.11±0.11
		2	5.11±0.11	5.35±0.07	5.50±0.24	5.56±0.24	5.90±0.10	6.18±0.08
	PR _{1->3}	1	6.18±0.05	6.28±0.02	6.36±0.04	6.37±0.02	6.48±0.01	7.06±0.07
		2	6.21±0.06	6.38±0.08	6.51±0.04	6.68±0.13	6.94±0.06	7.20±0.07
	PR _{1->4}	1	7.26±0.33	7.28±0.06	7.57±0.04	7.77±0.04	7.86±0.09	8.07±0.10
		2	7.24±0.13	7.39±0.08	7.64±0.11	7.84±0.09	7.93±0.07	8.14±0.09
	PR _{1->5}	1	9.06±0.14	9.18±0.01	9.26±0.49	9.42±0.04	9.56±0.05	9.82±0.07
		2	9.15±0.16	9.21±0.05	9.46±0.05	9.62±0.05	9.92±0.05	10.55±0.22
	PR _{1->6}	1	10.60 ±0.06	10.69 ±0.01	10.71 ±0.02	10.80 ±0.02	10.89 ±0.02	10.06 ±0.05
		2	11.10±0.12	10.10 ±0.01	10.13 ±0.13	11.28±0.04	11.37 ±0.03	11.43±0.09

ตารางที่ 7 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 100PR_{1->n} อุณหภูมิการหลอม 210 °C

สัดส่วน (phr)	PR _{1->n}	การ ทดลอง	ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
			6	30	90	180	360	720
100	PR ₁	1	3.13±0.02	3.20±0.02	3.42±0.07	3.41±0.01	3.41±0.01	3.46±0.01
		2	3.15±0.03	3.32±0.10	3.47±0.08	3.82±0.49	3.69±0.08	3.90±0.10
	PR _{1->2}	1	5.81±0.29	5.77±0.12	5.77±0.06	5.96±0.03	6.44±0.13	6.70±0.21
		2	6.09±0.15	6.19±0.10	6.32±0.08	6.46±0.09	6.69±0.12	6.96±0.07
	PR _{1->3}	1	8.41±0.07	8.41±0.08	8.55±0.05	8.75±0.03	8.92±0.05	9.03±0.11
		2	8.30±0.08	8.53±0.21	8.65±0.17	8.87±0.14	9.05±0.08	9.25±0.06
	PR _{1->4}	1	9.56±0.11	9.59±0.04	9.69±0.09	9.81±0.09	10.16±0.08	10.20±0.10
		2	9.66±0.08	9.68±0.07	9.74±0.07	9.83±0.08	10.12±0.12	10.88±0.49
	PR _{1->5}	1	11.12±0.11	11.14±0.05	11.19±0.01	11.27±0.01	11.31±0.02	11.32±0.01
		2	11.18±0.10	11.22±0.07	11.31±0.05	11.34±0.05	11.28±0.09	11.37±0.02
	PR _{1->6}	1	13.62±0.08	13.59±0.05	13.57±0.07	13.73±0.02	13.80±0.02	13.80±0.01
		2	13.71±0.08	13.67±0.09	13.70±0.06	13.76±0.05	13.84±0.04	13.89±0.03

ตารางที่ 8 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 300PR_{1->n} อุณหภูมิการหลอม 210 °C

สัดส่วน (phr)	PR _{1->n}	การ ทดลอง	ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
			6	30	90	180	360	720
300	PR ₁	1	3.61±0.16	3.67±0.17	3.79±0.16	3.79±0.01	3.79±0.01	3.80±0.01
		2	3.55±0.26	3.55±0.12	3.58±0.08	3.80±0.06	3.87±0.09	4.17±0.12
	PR _{1->2}	1	9.18±0.54	9.22±0.05	9.30±0.01	9.37±0.02	9.42±0.07	9.54±0.09
		2	9.44±0.12	9.55±0.07	9.63±0.07	9.66±0.07	9.75±0.12	10.24±0.43
	PR _{1->3}	1	10.58±0.08	10.77±0.04	11.06±0.20	11.06±0.20	11.26±0.04	11.39±0.02
		2	10.61±0.26	10.87±0.11	11.31±0.35	11.36±0.05	11.41±0.02	11.49±0.02
	PR _{1->4}	1	12.33±0.05	12.35±0.01	12.37±0.02	12.43±0.01	12.52±0.04	12.57±0.01
		2	12.44±0.21	12.51±0.09	12.49±0.10	12.59±0.05	12.61±0.03	12.71±0.16
	PR _{1->5}	1	14.56±0.09	14.60±0.05	14.60±0.05	14.68±0.01	14.69±0.04	14.69±0.02'
		2	15.01±0.49	14.78±0.08	14.73±0.09	14.82±0.05	14.85±0.05	14.89±0.07
	PR _{1->6}	1	16.05 ±0.85	16.45 ±0.02	16.07 ±0.90	16.50 ±0.02	16.65 ±0.01	16.99±0.18
		2	16.63±0.24	16.57 ±0.11	16.69 ±0.07	16.72 ±0.04	16.73 ±0.02	17.01 ±0.13

ตารางที่ 9 ค่าดัชนีการหลอมไหลกับระยะเวลาในการให้ความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม 900PR_{1->n} อุณหภูมิการหลอม 210 °C

สัดส่วน (phr)	PR _{1->n}	การ ทดลอง	ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
			6	30	90	180	360	720
900	PR ₁	1	3.90±0.18	3.91±0.18	3.93±0.18	3.75±0.32	4.08±0.04	4.13±0.01
		2	3.82±0.18	4.01±0.12	4.06±0.09	4.15±0.16	4.27±0.12	4.41±0.11
	PR _{1->2}	1	10.27±0.67	10.28±0.05	10.43±0.10	10.76±0.07	10.85±0.01	10.86±0.02
		2	10.46±0.15	10.44±0.07	10.61±0.15	10.76±0.07	10.90±0.08	11.13±0.10
	PR _{1->3}	1	13.55±0.08	13.67±0.17	13.78±0.11	13.78±0.14	13.94±0.06	14.07±0.06
		2	13.73±0.20	13.63±0.09	13.83±0.13	13.78±0.14	13.94±0.06	14.07±0.06
	PR _{1->4}	1	15.07 ±0.08	14.88 ±0.22	15.18±0.17	15.37 ±0.04	15.18 ±0.24	15.29 ±0.13
		2	15.30±0.20	15.24 ±0.09	15.32 ±0.07	15.42 ±0.04	15.48 ±0.04	15.60 ±0.05
	PR _{1->5}	1	16.69 ±0.05	16.67 ±0.04	16.77±0.07	16.84±0.05	16.93±0.06	16.99±0.09
		2	16.51±0.20	16.45 ±0.12	16.49±0.11	16.56 ±0.06	16.59 ±0.08	17.11 ±0.57
	PR _{1->6}	1	18.30±0.27	18.37±0.27	18.47±0.10	18.64±0.11	18.72±0.13	18.90±0.03
		2	18.43±0.65	18.47±0.64	18.56±0.12	18.73±0.08	18.85±0.07	18.92±0.07

ตารางที่ 10 ค่าความถ่วงจำเพาะกับสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

PR ₁ (phr)	การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)				
		190	210	230	250	270
0	1	0.899±0.008	0.905±0.010	0.899±0.006	0.903±0.005	0.899±0.009
	2	0.900±0.006	0.899±0.014	0.897±0.004	0.899±0.009	0.905±0.013
33	1	0.900±0.006	0.901±0.010	0.8957±0.008	0.9020±0.006	0.9038±0.027
	2	0.899±0.007	0.903±0.010	0.897±0.010	0.899±0.011	0.900±0.009
100	1	0.900±0.008	0.8992±0.006	0.9020±0.009	0.8988±0.008	0.9024±0.008
	2	0.900±0.008	0.896±0.007	0.903±0.011	0.902±0.007	0.902±0.010
300	1	0.898±0.008	0.898±0.004	0.907±0.006	0.902±0.005	0.899±0.014
	2	0.888±0.017	0.897±0.008	0.902±0.007	0.897±0.005	0.900±0.008
900	1	0.902 ±0.002	0.903±0.009	0.904±0.003	0.904±0.003	0.906±0.013
	2	0.917 ±0.035	0.900±0.007	0.901±0.005	0.901±0.007	0.905±0.005

ตารางที่ 11 ค่าความถ่วงจำเพาะกับสัดส่วนผสมของ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

phr	การ ทดลอง	PR _{1->n}					
		PR ₁	PR _{1->2}	PR _{1->3}	PR _{1->4}	PR _{1->5}	PR _{1->6}
33	1	0.901±0.010	0.898±0.009	0.884±0.006	0.881±0.008	0.876±0.006	0.875±0.003
	2	0.903±0.010	0.905±0.004	0.897±0.007	0.887±0.003	0.884±0.003	0.883±0.001
100	1	0.899±0.006	0.896±0.002	0.881±0.004	0.880±0.008	0.876±0.008	0.872±0.010
	2	0.896±0.007	0.898±0.005	0.889±0.005	0.876±0.008	0.880±0.004	0.879±0.006
300	1	0.898±0.004	0.893±0.007	0.881±0.005	0.876±0.009	0.873±0.003	0.870±0.009
	2	0.897±0.008	0.895±0.009	0.883±0.006	0.878±0.003	0.874±0.003	0.870±0.005
900	1	0.903±0.009	0.890±0.009	0.880±0.009	0.874±0.009	0.870±0.007	0.869±0.006
	2	0.900±0.007	0.894±0.003	0.881±0.006	0.876±0.009	0.871±0.005	0.872±0.007

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 12 ค่าความทนต่อแรงดึงสี่ส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

PR ₁ (phr)	การ ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)							
		190	210	230	235	240	245	250	270
0	1	34.2±2.1	34.6±0.8	34.2±0.7	34.6±0.4	33.9±0.6	33.5±0.5	33.6±0.3	33.4±0.6
	2	33.9±0.5	33.9±0.2	34.4±0.5	34.4±0.2	34.1±0.6	33.7±0.6	33.7±1.2	33.0±0.8
33	1	34.0±1.5	34.2±0.6	33.6±0.7	34.2±0.4	34.1±0.5	34.1±0.5	33.8±1.7	34.0±0.9
	2	34.1±1.4	34.2±0.4	33.6±0.9	34.4±0.2	34.3±0.3	34.0±0.6	34.1±1.1	33.8±0.6
100	1	33.6±2.2	34.1±0.6	33.8±0.9	34.3±0.6	34.0±0.7	33.8±0.5	33.6±1.2	33.9±1.2
	2	34.7±0.7	34.1±0.7	34.8±0.7	34.3±0.5	34.2±0.8	34.1±0.8	33.7±0.7	32.9±1.3
300	1	34.5±0.3	34.3±0.5	34.1±0.4	34.4±0.5	34.5±0.5	33.6±0.5	33.9±0.4	33.6±1.6
	2	33.5±0.5	34.5±0.4	34.3±0.8	34.1±0.5	34.6±0.6	34.2±0.6	33.9±1.1	33.1±0.8
900	1	33.6±1.4	34.2±0.9	34.9±0.8	33.9±0.6	33.9±0.5	33.6±0.7	34.2±0.6	31.6±1.5
	2	34.3±0.4	33.9±0.9	34.3±0.5	34.5±0.7	34.6±0.7	33.9±0.6	33.1±0.8	33.0±1.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 13 ค่าความทนต่อแรงดึงกับสัดส่วนผสมของ PR_{1->n} คุณหมุมิการขึ้นรูป 210 °C

phr	การทดลอง	PR _{1->n}					
		PR ₁	PR _{1->2}	PR _{1->3}	PR _{1->4}	PR _{1->5}	PR _{1->6}
33	1	34.2±0.6	35.4±0.8	37.1±0.6	38.1±0.7	38.5±0.2	38.9±0.6
	2	34.2±0.4	35.2±0.3	37.2±0.1	38.1±0.3	38.4±0.2	38.8±0.4
100	1	34.1±0.6	35.5±0.8	37.6±0.3	38.3±0.4	39.1±0.3	39.4±0.3
	2	34.1±0.7	36.3±0.2	37.3±0.3	38.1±0.2	39.4±0.2	39.9±0.5
300	1	34.3±0.5	37.1±0.8	38.5±0.2	38.8±0.8	39.7±0.4	40.0±0.4
	2	34.5±0.4	36.7±0.2	38.4±0.2	38.9±0.1	39.5±0.4	40.4±0.3
900	1	34.2±0.9	37.6±0.4	39.5±0.2	39.2±0.4	39.8±0.2	40.1±0.5
	2	33.9±0.9	37.9±0.5	39.6±0.1	39.8±0.3	39.8±0.3	40.2±0.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 14 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

PR ₁ (phr)	การ ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)							
		190	210	230	235	240	245	250	270
0	1	729.9±15.7	730.5±13.4	735.8±5.4	737.7±1.4	736.0±1.2	734.0±0.8	733.8±2.6	731.6±3.0
	2	735.9±3.1	737.8±4.7	736.0±3.7	737.6±2.8	736.8±2.1	734.1±0.6	737.6±3.6	737.3±1.8
33	1	730.3±15.2	733.6±14.1	738.6±15.9	735.5±0.8	750.0±1.4	732.7±1.2	730.4±4.2	731.5±4.6
	2	738.8±2.3	739.7±2.2	738.3±6.9	736.5±1.5	737.0±1.5	733.9±0.5	737.5±3.8	729.9±11.0
100	1	728.1±4.6	736.3±8.4	733.0±17.6	734.6±1.0	734.9±0.9	732.2±0.8	727.3±4.6	733.1±4.2
	2	738.8±1.4	735.7±8.8	735.2±5.3	736.3±1.9	736.7±1.6	733.7±1.2	727.6±6.4	729.8±12.9
300	1	729.3±2.1	732.7±3.6	736.9±5.2	735.7±1.1	733.5±1.1	731.8±1.4	731.7±3.9	730.1±4.2
	2	737.2±2.1	732.4±10.5	736.0±2.9	735.6±0.8	734.3±1.6	733.0±0.8	731.3±7.7	730.5±1.1
900	1	736.6±2.7	734.4±11.8	733.2±3.9	734.0±0.5	732.5±0.6	732.1±0.7	732.0±2.9	728.6±3.4
	2	739.1±1.2	735.2±7.8	734.7±4.1	734.7±1.7	733.7±1.3	730.1±1.7	729.6±9.4	739.2±1.6

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 15 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับสัดส่วนผสมของ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

phr	การทดลอง	PR _{1->n}					
		PR ₁	PR _{1->2}	PR _{1->3}	PR _{1->4}	PR _{1->5}	PR _{1->6}
33	1	733.6±14.1	762.2±16.5	790.5±20.2	796.5±4.8	802.9±7.8	804.4±11.1
	2	739.7±2.2	759.5±6.4	786.6±5.4	795.5±6.9	805.4±5.8	807.9±3.2
100	1	736.3±8.4	785.2±10.2	802.4±12.4	802.3±9.0	808.5±7.3	808.0±5.1
	2	735.7±8.8	765.8±11.3	786.2±4.6	795.2±3.7	803.8±3.9	806.2±3.3
300	1	732.6±3.6	808.2±12.7	808.4±6.3	811.4±6.6	814.0±9.3	818.6±8.6
	2	732.4±10.5	789.0±4.8	798.8±7.0	809.3±6.2	813.8±2.9	817.8±4.0
900	1	734.4±11.8	820.2±14.8	819.7±13.0	819.8±2.0	823.8±12.1	821.6±6.1
	2	735.2±7.8	806.8±6.3	817.6±2.2	817.9±3.2	819.2±2.5	821.3±3.8

ตารางที่ 16 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด กับสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

PR ₁ (phr)	การ ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)							
		190	210	230	235	240	245	250	270
0	1	25.3 ±1.1	28.1 ±5.9	28.8 ±1.8	28.1±0.5	27.4±0.6	23.9±1.0	17.4±3.7	13.3±1.1
	2	25.7 ±0.9	28.3 ±6.0	28.8 ±1.8	27.6±0.6	27.4±1.0	23.1±0.8	17.4±3.7	12.7±1.2
33	1	27.7±0.4	27.43±0.7	27.8±0.9	28.8±1.3	27.4±1.4	23.4±0.9	17.2±7.4	13.8±3.2
	2	27.6±0.4	27.6±0.5	27.2±1.0	28.3±0.7	27.9±0.6	23.1±1.1	22.23±1.7	12.4±2.2
100	1	28.2±0.8	27.6±0.8	27.9±1.4	28.6±1.2	26.7±1.3	22.5±0.1	14.8±1.3	15.0±3.4
	2	28.0±0.7	26.4±0.7	26.6±2.5	28.4±0.8	27.9±0.5\	22.5±0.6	15.5±1.1	12.8±1.0
300	1	26.5±2.2	27.4±1.3	27.8±0.8	27.9±0.8	26.7±1.8	22.4±0.5	15.1±3.8	14.8±6.4
	2	25.2±1.7	27.5±0.8	27.8±0.9	28.17±1.6	27.1±0.5	22.6±0.8	16.1±2.1	15.1±4.3
900	1	27.4±3.2	26.9±0.9	27.6±0.8	27.8±0.7	26.7±1.8	22.4±0.5	17.5±0.8	14.0±7.6
	2	27.3±0.4	27.65±0.1	27.1±1.5	27.7±0.5	26.6±0.4	20.8±1.0	18.3±0.9	11.4±3.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด ณ จุดขาด กับสัดส่วนผสมของ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

phr	การทดลอง	PR _{1->n}					
		PR ₁	PR _{1->2}	PR _{1->3}	PR _{1->4}	PR _{1->5}	PR _{1->6}
33	1	28.9±5.4	27.5±0.7	26.2±1.2	26.8±1.2	26.1±1.1	24.1±1.1
	2	27.6±0.5	27.7±0.5	26.4±0.6	25.3±1.0	24.9±1.0	24.8±1.1
100	1	27.6±0.8	26.1±2.2	24.7±1.4	24.1±0.6	24.2±0.7	22.6±0.8
	2	26.4±0.7	26.5±0.7	25.5±0.5	24.6±0.7	24.2±0.5	23.0±0.7
300	1	27.4±1.3	25.4±1.0	22.9±1.8	22.3±1.4	21.1±1.2	20.6±1.7
	2	27.5±0.8	25.1±0.5	23.4±0.8	23.1±0.6	20.9±0.6	19.6±0.9
900	1	27.0±0.9	23.1±1.6	23.2±1.7	22.4±1.1	20.9±2.2	19.9±1.7
	2	27.6±0.1	23.2±0.5	22.9±0.7	22.1±0.4	21.1±0.8	19.4±1.5

ตารางที่ 18 ค่าความแข็ง กับสัดส่วนผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

PR ₁ (phr)	การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)				
		190	210	230	250	270
0	1	73.6±0.9	73.2±0.5	73.4±0.5	73.4±0.5	73.6±0.5
	2	73.4±0.5	73.6±0.5	73.4±0.5	73.8±0.8	73.2±0.5
33	1	73.6±0.9	73.2±0.4	73.4±0.5	73.6±0.5	73.6±0.5
	2	73.8±0.4	73.8±0.4	73.2±0.4	73.4±0.6	74.6±0.9
100	1	73.6±0.9	73.2±0.4	73.6±0.5	73.8±0.4	73.4±0.5
	2	73.4±0.9	73.8±0.4	74.4±0.6	73.4±0.5	73.4±0.5
300	1	73.6±0.5	73.4±0.5	73.6±0.5	73.8±0.4	73.6±0.5
	2	74.0±0.7	73.4±0.5	73.6±0.5	73.6±0.5	73.4±0.5
900	1	73.2±0.4	74.0±0.7	73.8±0.4	73.6±0.5	73.8±0.4
	2	74.0±0.7	73.4±0.5	73.6±0.5	74.4±0.5	73.6±0.5

ตารางที่ 19 ค่าความแข็ง กับสัดส่วนผสมของ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

phr	การทดลอง	PR _{1->n}					
		PR ₁	PR _{1->2}	PR _{1->3}	PR _{1->4}	PR _{1->5}	PR _{1->6}
33	1	73.2±0.4	73.2±0.7	74.0±0.7	74.4±0.5	74.6±0.5	74.8±0.4
	2	73.8±0.4	73.4±0.7	73.8±0.4	74.2±0.4	74.7±0.4	75.0±0.0
100	1	73.2±0.4	73.5±0.5	74.4±0.5	74.6±0.5	74.7±0.4	75.1±0.5
	2	73.8±0.4	73.6±0.5	74.2±0.4	74.8±0.4	74.8±0.4	75.2±0.4
300	1	73.4±0.5	73.9±0.2	74.6±0.5	74.8±0.4	75.2±0.4	75.8±0.4
	2	73.4±0.5	73.8±0.3	74.8±0.4	75.0±0.0	75.0±0.0	75.8±0.4
900	1	74.0±0.7	74.7±1.0	75.0±0.7	75.4±0.5	75.4±0.5	76.0±0.0
	2	73.4±0.5	74.6±0.7	74.8±0.4	75.4±0.5	75.4±0.5	76.2±0.3

ตารางที่ 20 ค่าความทนต่อแรงกระแทกกับสัปดาห์ผสม PR₁ อุณหภูมิการขึ้นรูป 190-270 °C

PR ₁ (phr)	การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)				
		190	210	230	250	270
0	1	4.5±0.1	4.3±0.1	4.5±0.1	4.5±0.1	4.6±0.2
	2	4.6±0.2	4.4±0.1	4.4±0.2	4.4±0.1	4.4±0.1
33	1	4.6±0.2	4.6±0.1	4.5±0.2	4.7±0.3	4.5±0.2
	2	4.4±0.3	4.6±0.2	4.6±0.2	4.4±0.2	4.4±0.4
100	1	4.5±0.1	4.4±0.1	4.5±0.2	4.5±0.3	4.6±0.2
	2	4.6±0.3	4.8±0.2	4.7±0.3	4.5±0.1	4.6±0.2
300	1	4.4±0.2	4.4±0.1	4.5±0.2	4.6±0.2	4.4±0.2
	2	4.3±0.1	4.4±0.2	4.3±0.1	4.5±0.1	4.4±0.1
900	1	4.4±0.3	4.5±0.2	4.4±0.1	4.6±0.1	4.3±0.0
	2	4.2±0.2	4.3±0.2	4.2±0.1	4.4±0.1	4.3±0.1

ตารางที่ 21 ค่าความทนต่อแรงกระแทก กับสัดส่วนผสมของ PR_{1->n} อุณหภูมิการขึ้นรูป 210 °C

phr	การทดลอง	PR _{1->n}					
		PR ₁	PR _{1->2}	PR _{1->3}	PR _{1->4}	PR _{1->5}	PR _{1->6}
33	1	4.6±0.1	4.6±0.1	4.5±0.1	4.5±0.1	4.4±0.1	3.9±0.1
	2	4.6±0.2	4.6±0.0	4.6±0.1	4.5±0.1	4.4±0.0	4.2±0.1
100	1	4.4±0.1	4.4±0.1	4.4±0.11	4.3±0.0	4.1±0.1	3.9±0.1
	2	4.8±0.2	4.5±0.1	4.4±0.1	4.4±0.1	4.2±0.1	4.1±0.1
300	1	4.4±0.1	4.5±0.2	4.3±0.1	4.0±0.1	3.8±0.1	3.7±0.1
	2	4.4±0.2	4.4±0.1	4.4±0.1	4.1±0.1	3.9±0.1	3.8±0.1
900	1	4.5±0.2	4.2±0.1	4.0±0.2	3.7±0.1	3.5±0.1	3.5±0.1
	2	4.3±0.2	4.3±0.1	4.1±0.1	3.8±0.0	3.8±0.1	3.6±0.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิระเชษฐ บุญแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม 2526 ที่จังหวัด สงขลา จบการศึกษา
ระดับประถมศึกษาที่ โรงเรียนจุลสมัย จังหวัดสงขลา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น
โรงเรียน จุฬารัตนราชวิทยาลัย จังหวัดนครศรีธรรมราช จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม
เคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2549 และเข้ารับ
การศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมอุต
สาหกรรม ในปีการศึกษา 2549

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย