

ผลของอัตราส่วนผสมต่อการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน  
ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์



นายอุดมศักดิ์ พาลี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

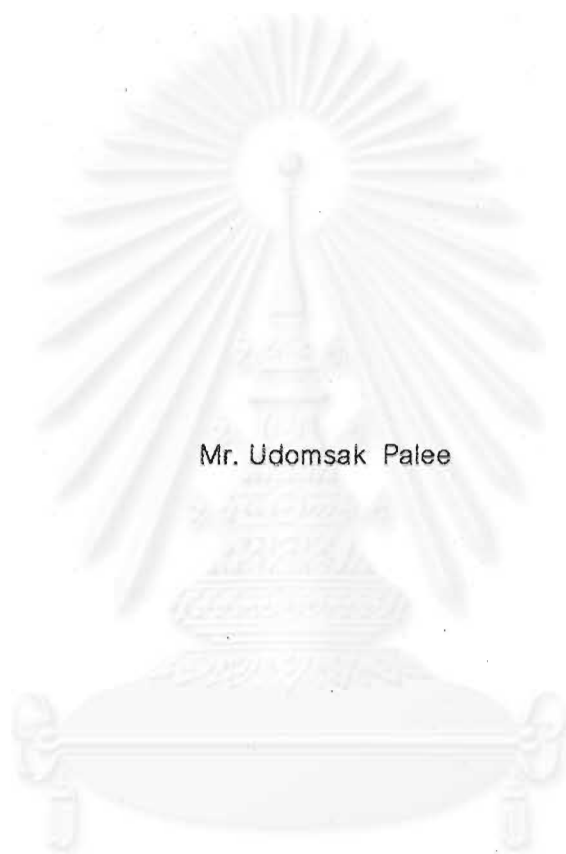
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0434-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPOSITIONAL EFFECTS ON WATER ABSORPTION, MECHANICAL AND THERMAL  
PROPERTIES OF NYLON 6 AND POLYPROPYLENE COPOLYMER BLENDS



Mr. Udomsak Palee

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0434-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของอัตราส่วนผสมต่อการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทาง  
ความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีน  
โคพอลิเมอร์

โดย

นาย อุดมศักดิ์ พาลี

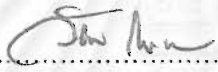
สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ


อาจารย์ที่ปรึกษา


อาจารย์ ดร. ดวงดาว อัจจงค์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

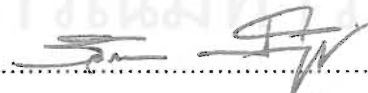
  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ รัชณา ศิริสุข)

อุดมศักดิ์ พาลี : ผลของอัตราส่วนผสมต่อการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ (COMPOSITIONAL EFFECTS ON WATER ABSORPTION, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF NYLON 6 AND POLYPROPYLENE COPOLYMER BLENDS) อ.ที่ปรึกษา : ดร. ดวงดาว อัจจงค์, 116 หน้า. ISBN 974-03-0434-6

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีในการปรับปรุงสมบัติของไนลอน 6 ในด้านความทนแรงกระแทกและเสถียรภาพทางขนาด โดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ และใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิกอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่และนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด จากนั้นจึงทำการตรวจสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

ผลการศึกษาพบว่า ในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม การเพิ่มปริมาณพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์จะเป็นผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง แต่จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านความร้อน ทั้งนี้จะแตกต่างจากในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม นั่นคือพบว่าพอลิเมอร์ผสมจะสามารถเข้ากันได้มากขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากขนาดของดิสเพอร์สเฟสที่มีขนาดเล็กลงซึ่งจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยเฉพาะสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมยังช่วยลดความสามารถในการดูดซึมน้ำและทำให้เสถียรภาพทางขนาดของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้นด้วย ส่วนในด้านสมบัติทางความร้อนพบว่า การเติมสารช่วยผสมจะเป็นผลให้อุณหภูมิในการเกิดผลึก และปริมาณความเป็นผลึกของไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลง และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมทั้งหมดพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 และ 80 ต่อ 20 โดยมีสารช่วยผสมในปริมาณ 5 และ 8 phr ตามลำดับนั้น จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำกว่าไนลอน 6 และมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าอัตราส่วนผสมอื่นๆ โดยเฉพาะที่อัตราส่วน 80% ไนลอน 6 ต่อ 20% พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ และใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 8 phr จะให้สมบัติด้านความทนแรงกระแทกสูงกว่าไนลอน 6

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต ..... อุดมศักดิ์ พาลี .....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
*Dr. D. A. J.*

ปีการศึกษา 2544



## 4272489423 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORD: POLYAMIDE / POLYPROPYLENE COPOLYMER / COMPATIBILITY

UDOMSAK PALEE : THESIS TITLE. (COMPOSITIONAL EFFECTS ON WATER ABSORPTION, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF NYLON 6 AND POLYPROPYLENE COPOLYMER BLENDS) THESIS ADVISOR : Dr. DUANGDAO AHT-ONG, 116 pp. ISBN 974-03-0434-6.

This research aimed to study the method for improving the impact strength and dimensional stability of nylon 6 by blending nylon 6 with polypropylene copolymer at various compositions using maleic anhydride grafted polypropylene as a compatibilizer. The blends were mixed in the twin screw extruder and then injected for further investigating water absorption, mechanical strength and thermal properties.

In non-compatibilizer system, increasing polypropylene copolymer content did not affect thermal properties but resulting in the decreasing of water absorption and mechanical properties. In contrast to the compatibilized blends, the compatibility increased as the amount of compatibilizer increased, as evidenced by the decreasing in size of the dispersed phase. As a result, the mechanical properties, in particular the impact strength, of the blends were improved. Furthermore, the more compatibilizer concentration, the less water absorption, and hence the better the dimensional stability of the blends. For thermal properties, adding the compatibilizer resulted in the decrease in crystallization temperature and degree of crystallinity of the blends. In conclusion, it was found that polymer blends between nylon 6 and polypropylene copolymer at the ratio of 90/10 and 80/20 with 5 and 8 phr of compatibilizer, respectively, exhibited less water absorption than nylon 6 homopolymer, and showed greater mechanical properties than any other blend ratios. Especially for polymer blend of 80% nylon 6 / 20% polypropylene copolymer with 8 phr compatibilizer, its impact strength was significantly higher than nylon 6.

Department Materials Science

Student's signature..Udomsak..Patee

Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature 

Academic year 2001

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ นั้น เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทาง  
ด้านวิชาการ การเอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และวัสดุดิบสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับการ  
ช่วยเหลือและการแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆเป็นอย่างดี

ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณ ดร. ดวงดาว อัจจงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำ  
ปรึกษา และการแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รศ. เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร รศ. ไพพรรณ สันติสุข และ อ. รัชนี ศิริสุข  
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ และแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์  
ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร. พงศ์ศักดิ์ วิวรรณเดช ที่ให้คำแนะนำและสนับสนุนด้านสารเคมีในการ  
ทำวิจัย

นอกจากนี้ขอขอบคุณ บริษัท HMC Polymers Co.,Ltd. และบริษัท UBE Nylon  
(Thailand) Co.,Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติกในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิทยาลัย  
ปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่ใน  
การทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และมีตรสหายทุกท่านที่ให้การ  
สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ผู้ประสิทธิ์  
ประสาทวิชาทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาการ จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผล  
สำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 พลาสติกวิศวกรรม.....	4
2.1.1 พอลิเอไมด์.....	4
2.1.2 พอลิไพโรฟิลีน.....	9
2.1.3 พอลิไพโรฟิลีนโคพอลิเมอร์.....	10
2.1.3.1 พอลิไพโรฟิลีนโคพอลิเมอร์แบบคละ.....	10
2.1.3.2 พอลิไพโรฟิลีนโคพอลิเมอร์แบบบล็อก.....	11
2.1.3.3 ยางเอทิลีน-ไพโรฟิลีน.....	12
2.1.3.4 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	12
2.2 พอลิเมอร์ผสม.....	13
2.2.1 กลไกในการผสมเข้ากันได้.....	15
2.2.2 วิธีในการผสมเพื่อความเข้ากันได้.....	16
2.2.2.1 ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	16
2.2.2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์.....	19
2.2.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่หน่วงฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไว ต่อการทำปฏิกิริยา.....	20
2.2.2.4 การทำให้เกิดปฏิกิริยากากราฟต์โคพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์เซชันในระหว่างการผสม.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

2.3 ความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์ผสม .....	22
2.4 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม .....	24
2.4.1 การเกิดและการควบคุมของสันฐานวิทยา .....	25
2.4.2 การกลับเฟส .....	25
2.4.3 การตรวจสอบสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม .....	26
2.4.3.1 Optical Microscopy (OM) .....	26
2.4.3.2 Scanning Electron Microscopy (SEM) .....	26
2.5 การผสมของพอลิเอไมด์กับเทอร์โมพลาสติกชนิดต่าง ๆ .....	27
2.6. สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) .....	29
2.6.1 Differential Scanning Calorimeter (DSC) .....	32
2.6.2 Dynamic Mechanical Analysis (DMA) .....	32
2.7 สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) .....	33
2.7.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength) .....	34
2.7.2 ความทนแรงกระแทก (Impact Strength) .....	34
2.7.2.1 การทดสอบแบบตุ้มน้ำหนักเหวี่ยงกระแทก .....	35
2.7.2.2 การทดสอบแบบน้ำหนักตกกระแทก .....	35
2.7.3 ความทนแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) .....	36
3. การทดลอง .....	38
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี .....	38
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	39
3.3 วิธีการทดลอง .....	39
3.3.1 ขอบเขตการทดลอง .....	39
3.3.2 การผสมพอลิเมอร์ .....	41
3.3.3 การขึ้นรูปขึ้นตัวอย่าง .....	42
3.3.4 การทดสอบด้วย Molau 's Test .....	44
3.3.5 การตรวจสอบสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม .....	44
3.3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	45

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

3.3.6.1 การทดสอบความทนแรงดึง.....	45
3.3.6.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก .....	46
3.3.6.3 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง.....	47
3.3.7 การตรวจสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	47
3.3.8 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน.....	48
3.3.8.1 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC.....	48
3.3.8.2 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DMA.....	49
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	51
4.1 การทดสอบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมด้วย Molau 's Test.....	51
4.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม .....	52
4.3 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	60
4.3.1 ผลของ PP-Co ต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม.....	60
4.3.2 ผลของสารช่วยผสมต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำ ของพอลิเมอร์ผสม.....	61
4.4 สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties).....	62
4.4.1 พฤติกรรมความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม .....	63
4.4.2 ความทนแรงดึง (Tensile Strength).....	66
4.4.2.1 ผลของ PP-Co ต่อสมบัติความทนแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม.....	66
4.4.2.2 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติความทนแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม.....	70
4.4.3 ความทนแรงกระแทก (Impact Strength).....	77
4.4.3.1 ผลของ PP-Co ต่อความทนแรงกระแทก ของพอลิเมอร์ผสม.....	77
4.4.3.2 ผลของสารช่วยผสมต่อความทนแรงกระแทก ของพอลิเมอร์ผสม.....	78
4.4.4 ความทนแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) .....	81

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

4.4.4.1 ผลของ PP-Co ต่อสมบัติความทนแรงดัดโค้ง ของพอลิเมอร์ผสม .....	82
4.4.4.2 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติความทนแรงดัดโค้ง ของพอลิเมอร์ผสม .....	84
4.5 สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) .....	89
4.5.1 ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ .....	89
4.5.2 ไดนามิกส์ แมคคานิคอล อะนาลิซิส .....	94
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	99
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	100
รายการอ้างอิง .....	101
ภาคผนวก .....	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	116

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย .....	39
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการผสมระหว่าง PA6 PP-Co และ PP-MA .....	40
ตารางที่ 3.3 สภาวะในกระบวนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ .....	42
ตารางที่ 3.4 สภาวะในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด .....	43
ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของดิสเพอร์สเฟสเฉลี่ยโดยจำนวน ( $D_n$ ) ของ PA 6/PP-Co .....	56
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคของดิสเพอร์สเฟสเฉลี่ยโดยจำนวน ( $D_n$ ) ในระบบ ที่ไม่มีสารช่วยผสม .....	59
ตารางที่ 4.3 สมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียก .....	81
ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนผสมที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของ PA6 และ PP-Co .....	91
ตารางที่ 4.5 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติทางความร้อนของ PA6 และ PP-Co .....	94
ตารางที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนผสมที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของ PA6 และ PP-Co .....	95

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไนลอนชนิดต่าง ๆ ..... 6
รูปที่ 2.2	การดูดความชื้นของไนลอน 6,6 (อิมิตวที่ 8.5%) ..... 7
รูปที่ 2.3	การดูดความชื้นของไนลอน 6,10 (อิมิตวที่ 3.5%) ..... 8
รูปที่ 2.4	อิทธิพลของน้ำที่มีต่อเสถียรภาพทางรูปร่างของไนลอน 6,6..... 9
รูปที่ 2.5	กระบวนการผลิตพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์แบบคละ ..... 11
รูปที่ 2.6	กระบวนการผลิตพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์แบบบล็อก..... 11
รูปที่ 2.7	ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ..... 15
รูปที่ 2.8	เฟสไดอะแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง LCST ..... 18
รูปที่ 2.9	เฟสไดอะแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง UCST ..... 18
รูปที่ 2.10	ตำแหน่งของบล็อกและกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างเฟสของ A และ B ..... 19
รูปที่ 2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสม..... 23
รูปที่ 2.12	ลักษณะต่าง ๆ ของดิสเพอร์สเฟสในระบบการผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้..... 24
รูปที่ 2.13	กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมาลิกแอนไฮไดรด์ และพอลิเอไมด์ ..... 29
รูปที่ 2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ A และ B..... 31
รูปที่ 2.15	หลักการทำงานของ DSC..... 32
รูปที่ 2.16	หลักการทำงานของ DMA ..... 33
รูปที่ 2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติก..... 34
รูปที่ 2.18	การทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด..... 36
รูปที่ 2.19	การทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งแบบ 4 จุด..... 37
รูปที่ 2.20	แรงเค้นในชั้นทดสอบขณะทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้ง ..... 37
รูปที่ 3.1	เครื่องอัดรีดสกรูคู่ ..... 41
รูปที่ 3.2	เครื่องฉีดขึ้นรูป ..... 43
รูปที่ 3.3	เครื่องทดสอบความทนแรงดึง..... 45
รูปที่ 3.4	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก ..... 47
รูปที่ 4.1	กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารช่วยผสมกับPA6..... 51
รูปที่ 4.2	ลักษณะการละลายของพอลิเมอร์ผสม PA6/PP-Co/PP-MA..... 52
รูปที่ 4.3	ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6/PP-Co..... 54



รูปที่ 4.4	ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6/PP-Co ที่เตรียมจากการสกัด ดิสเพอร์สเฟสด้วยสารละลายโทลูอีน .....	55
รูปที่ 4.5	ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6/PP-Co ที่อัตราส่วน 90/10 โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณที่แตกต่างกัน .....	57
รูปที่ 4.6	ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6/PP-Co ที่อัตราส่วน 80/20 โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณที่แตกต่างกัน .....	58
รูปที่ 4.7	ผลของ PP-Co ต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง PA6 / PP-Co.....	61
รูปที่ 4.8	ผลของสารช่วยผสมต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 / 10% PP-Co.....	61
รูปที่ 4.9	ผลของสารช่วยผสมต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 / 20% PP-Co.....	62
รูปที่ 4.10	พฤติกรรมความทนแรงดึงในภาวะแห้งของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม ในปริมาณ 2 phr.....	64
รูปที่ 4.11	พฤติกรรมความทนแรงดึงในภาวะเปียกของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม ในปริมาณ 2 phr.....	65
รูปที่ 4.12	ลักษณะขึ้นทดสอบของ PA6 ในภาวะเปียกเมื่อผ่านการยืดดึง .....	66
รูปที่ 4.13	ผลของปริมาณ PP-Co ต่อโมดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง .....	67
รูปที่ 4.14	ผลของปริมาณ PP-Co ต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุด ของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง .....	68
รูปที่ 4.15	ผลของปริมาณ PP-Co ต่อโมดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียก .....	69
รูปที่ 4.16	ผลของปริมาณ PP-Co ต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ ผสมในภาวะเปียก .....	70
รูปที่ 4.17	ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อโมดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วน 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co ในภาวะแห้ง.....	71
รูปที่ 4.18	ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อโมดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วน 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ในภาวะแห้ง.....	72
รูปที่ 4.19	ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุด ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 / 10% PP-Co ในภาวะแห้ง.....	73
รูปที่ 4.20	ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุด ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 / 20% PP-Co ในภาวะแห้ง.....	73

รูปที่ 4.21	ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วน 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co ในภาวะเปียก.....	74
รูปที่ 4.22	ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วน 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ในภาวะเปียก.....	75
รูปที่ 4.23	ปริมาณสารช่วยผสมต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของ พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co ในภาวะเปียก.....	76
รูปที่ 4.24	ปริมาณสารช่วยผสมต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุด ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ในภาวะเปียก.....	76
รูปที่ 4.25	ผลของ PP-Co ต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง .....	78
รูปที่ 4.26	ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ ผสมที่อัตราส่วน 90% PA6 / 10% PP-Co ในภาวะแห้ง .....	79
รูปที่ 4.27	ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ ผสมที่อัตราส่วน 80% PA6 / 20% PP-Co ในภาวะแห้ง .....	79
รูปที่ 4.28	ผลของสารช่วยผสมต่อลักษณะพื้นผิวการแตกหักของพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ที่ปริมาณสารช่วยผสม 0 และ 8 phr .....	80
รูปที่ 4.29	ผลของ PP-Co ต่อมอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง .....	82
รูปที่ 4.30	ผลของ PP-Co ต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง .....	82
รูปที่ 4.31	ผลของ PP-Co ต่อมอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียก .....	83
รูปที่ 4.32	ผลของ PP-Co ต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียก .....	84
รูปที่ 4.33	ผลของสารช่วยผสมต่อมอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 90%PA6 / 10% PP-Co ในภาวะแห้ง .....	85
รูปที่ 4.34	ผลของสารช่วยผสมต่อมอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 80%PA6 / 20% PP-Co ในภาวะแห้ง .....	85
รูปที่ 4.35	ผลของสารช่วยผสมต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม ในอัตราส่วน 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co ในภาวะแห้ง .....	86
รูปที่ 4.36	ผลของสารช่วยผสมต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม ในอัตราส่วน 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ในภาวะแห้ง .....	86
รูปที่ 4.37	ผลของสารช่วยผสมต่อมอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 90%PA6 / 10% PP-Co ในภาวะเปียก .....	87
รูปที่ 4.38	ผลของสารช่วยผสมต่อมอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 80%PA6 / 20% PP-Co ในภาวะเปียก .....	88

รูปที่ 4.39	ผลของสารช่วยผสมต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 90%PA6 / 10% PP-Co ในภาวะเปียก .....	88
รูปที่ 4.40	ผลของสารช่วยผสมต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 80%PA6 / 20% PP-Co ในภาวะเปียก .....	89
รูปที่ 4.41	ผลของ PP-Co ต่อคุณสมบัติในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม.....	90
รูปที่ 4.42	ผลของ PP-Co ต่อคุณสมบัติในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม .....	90
รูปที่ 4.43	ปริมาณสารช่วยผสมต่อคุณสมบัติในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co .....	92
รูปที่ 4.44	ปริมาณสารช่วยผสมต่อคุณสมบัติในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co .....	92
รูปที่ 4.45	ปริมาณสารช่วยผสมต่อคุณสมบัติในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co .....	93
รูปที่ 4.46	ปริมาณสารช่วยผสมต่อคุณสมบัติในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co .....	93
รูปที่ 4.47	ผลของ PP-Co ต่อคุณสมบัติกลศาสตร์านิชั้นของ PA6 ในภาวะแห้ง .....	95
รูปที่ 4.48	ผลของสารช่วยผสมต่อคุณสมบัติกลศาสตร์านิชั้นของ PA6 ในอัตราส่วน 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ในภาวะแห้ง .....	96
รูปที่ 4.49	ผลของน้ำต่อคุณสมบัติกลศาสตร์านิชั้นในระบบที่ไม่มีการเติม สารช่วยผสมใน ภาวะเปียก .....	97
รูปที่ 4.50	ผลของน้ำต่อคุณสมบัติกลศาสตร์านิชั้นในระบบที่มีการเติม สารช่วยผสมในภาวะเปียกที่อัตราส่วนผสม 80%PA6 ต่อ 20%PP-Co.....	98

# บทที่ 1

## บทนำ

พอลิเอไมด์ คือ พอลิเมอร์ที่มีหมู่เอไมด์ (-CO-NH-) อยู่ในสายโซ่โมเลกุลซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น ไนลอน 6 ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,9 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6,12 ไนลอน 11 และ ไนลอน 12 เป็นต้น โดยในระยะแรกถูกผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในงานด้านเส้นใย ต่อมาจึงได้มีการนำไนลอนไปใช้งานในด้านอื่นๆ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติที่พิเศษในด้านต่างๆ เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ไม่เป็นพิษ และมีความทนทานต่อสารเคมีและสารหล่อลื่นทำให้เหมาะในการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ เช่น บูท แบริ่ง เกียร์ สายพาน ใบบัตร พลาสติก เพอร์นิเจอร์ ภาชนะบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น จากสมบัติและการใช้งานดังกล่าวไนลอนจึงจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสำคัญ และมีการใช้งานมากที่สุดในบรรดาพลาสติกวิศวกรรม [1]

แต่อย่างไรก็ตามไนลอนจะมีความสามารถในการดูดซึมความชื้นหรือน้ำ (hydrophilic) ที่สูงทั้งนี้เนื่องจากหมู่เอไมด์และเอมีนในโครงสร้างโมเลกุลของไนลอน สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ เป็นผลให้เสถียรภาพทางขนาด (dimensional stability) รวมทั้งสมบัติเชิงกลของไนลอนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์โดยที่โมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของไนลอนเป็นผลให้การเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลเกิดได้ง่าย ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันและสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวลดลงด้วย [2] โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศในเขตร้อนชื้นมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) สูงประมาณ 60-80% และนอกจากนี้ชิ้นงานไนลอนที่มีรอยบากจะมีสมบัติความทนแรงกระแทกที่ต่ำ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ดังนั้นการศึกษาถึงผลของความชื้นและการลดความไวต่อการดูดความชื้น (moisture sensitivity) ของไนลอน รวมไปถึงการปรับปรุงสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของไนลอนที่มีรอยบาก นับว่ามีความสำคัญมากต่อแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติในด้านอื่น ๆ ของไนลอน ดังนั้นข้อจำกัดที่สำคัญประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบผลิตภัณฑ์และการนำไนลอนไปใช้ในภาวะแวดล้อมต่าง ๆ คือ ความสามารถในการดูดความชื้นหรือน้ำและจุดโค้งงอของผลิตภัณฑ์ของไนลอนนั่นเอง

พอลิโพรพิลีน เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบเชิงเส้นจัดเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ในทางการค้าจะมีอยู่หลายชนิด เช่น ไอโซแทกติกไฮโมพอลิเมอร์ (isotactic homopolymer) โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (block copolymer) และโคพอลิเมอร์แบบคละ (random

copolymer) สมบัติเด่นของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน คือ มีความทนแรงดึงสูง ทนทานต่อความร้อน การซึมผ่านของน้ำต่ำ ขึ้นรูปง่าย และราคาถูก แต่ข้อเสียหลักคือ จะเปราะที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ  $0^{\circ}\text{C}$ ) โดยจะตรงข้ามกับพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ ซึ่งมีสมบัติเด่นด้านความทนแรงกระแทกแม้ที่อุณหภูมิต่ำ จากสมบัติโดยรวมทำให้พอลิโพรพิลีนไฮโมพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์มีการใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ถังน้ำมันในรถยนต์ กันชนรถยนต์ เครื่องมือทางการแพทย์ เครื่องซักผ้า ภาชนะบรรจุภัณฑ์ สินค้าประเภทเฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ [3].

จากสมบัติของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน เทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการพัฒนาปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ คือการเตรียมพอลิเมอร์ผสม (polymer blends) โดยเป็นการผสมของพอลิเมอร์เพื่อรวมข้อดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันในการพัฒนาสมบัติของพอลิเมอร์ เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ เช่น

1. สามารถปรับปรุงสมบัติได้ตามต้องการ โดยเลือกจากสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิด และอัตราส่วนในการผสมที่เหมาะสม
2. ใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่า และเวลาในการผลิตที่สั้นกว่าในการพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่
3. เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดต้นทุนของพอลิเมอร์ที่มีราคาแพง เช่น พลาสติกวิศวกรรม
4. เป็นระบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการนำพลาสติกที่เหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยผ่านกระบวนการผสมและขึ้นรูปใหม่

จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาการพัฒนาสมบัติของไนลอน 6 (PA6) โดยการนำมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะพอลิโพรพิลีน เช่น พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิเอทิลีน (PE) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางขนาด โดยการลดความสามารถในการดูดซึมน้ำและช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของ PA6 [4] นอกจากนี้ยังเป็นการลดต้นทุนอีกทางหนึ่งด้วยเพราะไนลอนจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีราคาสูงประเภทหนึ่ง [5] แต่เนื่องจากความไม่เข้ากัน (incompatibility) ระหว่าง PA6 และ PP การเติมสารช่วยผสม (compatibilizer) จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมในการปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ สารช่วยผสมที่นิยมใช้จะเป็นพวกพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภทมาลิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) [6-10] ไกลซิดีลเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate) หรือบิวทิลอคริเลต (butylacrylate) [11-12] โดยเฉพาะพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ (PP-MA) จัดเป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางซึ่งในระบบการผสมระหว่าง PA6 และ PP นั้น PP-MA จะเกิดพันธะเคมี (chemical linkage) กับ PA6 โดยที่หมู่แอนไฮไดรด์ของ PP-MA จะเข้า

ทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนที่ปลายสายโซ่ของ PA6 เกิดเป็นกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิไพโรฟิซีน และไนลอน (PA6-g-PP) กราฟต์โคพอลิเมอร์ดังกล่าวจะช่วยในการปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างผิวสัมผัส (interfacial compatibility) ของ PA6 และ PP โดยจะไปอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของ PA6 และ PP เพื่อช่วยลดแรงดึงผิวระหว่างผิวสัมผัสทำให้ดิสเพอร์สเฟสมีการกระจายตัวที่ดี และช่วยเพิ่มแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสทำให้พอลิเมอร์ผสมมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนแรงระหว่างเฟสได้ดี [13] นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอีกหลายประการที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม เช่น อัตราส่วนการผสม อัตราส่วนความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม และภาวะในการขึ้นรูป [14-16]

อย่างไรก็ตามจากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีพบว่า สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมโดยเฉพาะสมบัติด้านความทนแรงกระแทกมีค่าสูงกว่า PA6 เล็กน้อย [17-18] ดังนั้นในกรณีที่ต้องการสมบัติด้านความทนแรงกระแทกที่สูงในระบบการผสมของ PP และ PA6 จะนิยมใช้สไตรีน (เอทิลีน-บิวทีน) สไตรีนโคพอลิเมอร์ (SEBS-MA) เป็นสารช่วยผสม ซึ่งจะให้สมบัติด้านความทนแรงกระแทกที่สูง [19-22] แต่อย่างไรก็ดี SEBS-MA เป็นสารช่วยผสมที่มีราคาแพงเมื่อเทียบกับ PP-MA ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co โดยใช้ PP-MA เป็นสารช่วยผสม ทั้งนี้เพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางขนาด ปรับปรุงสมบัติด้านความทนแรงกระแทก และช่วยในการลดต้นทุนของ PA6 เนื่องจากที่ได้กล่าวมาแล้วในเบื้องต้นว่า PP-Co มีความทนแรงกระแทกสูงเมื่อเทียบกับ PP แม้ที่อุณหภูมิต่ำ และ PP-MA ที่ใช้เป็นสารช่วยผสมมีราคาถูกกว่า SEBS-MA นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงผลของสารช่วยผสมที่มีต่อความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม รวมทั้งศึกษาถึงผลของปริมาณสารช่วยผสม และอัตราส่วนการผสมที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และความสามารถในการดูดน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 พลาสติกวิศวกรรม (Engineering Plastics)

พลาสติกวิศวกรรม คือ พลาสติกที่ใช้อยู่ในวงการอุตสาหกรรม สำหรับทำเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ซึ่งนับวันจะได้รับการพัฒนาให้มีสมบัติดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปมีสมบัติดังนี้

1. มีความแข็งแรงเชิงกลสูง
2. ขอบเขตของอุณหภูมิการใช้งานกว้าง
3. มีสมบัติทางด้านไฟฟ้าดีเยี่ยม
4. ทนทานต่อสารเคมีและสภาพดินฟ้าอากาศ
5. น้ำหนักเบา ขึ้นรูปง่ายเช่นเดียวกับพลาสติกธรรมดา

ปริมาณการใช้พลาสติกวิศวกรรมเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็วมาก ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกวิศวกรรมสามารถตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี ซึ่งพลาสติกวิศวกรรมที่ใช้กันมากที่สุดในขณะนี้ คือ ไนลอน รองลงมาคือ พอลิคาร์บอเนต

##### 2.1.1 พอลิเอไมด์ (Polyamides, PA)

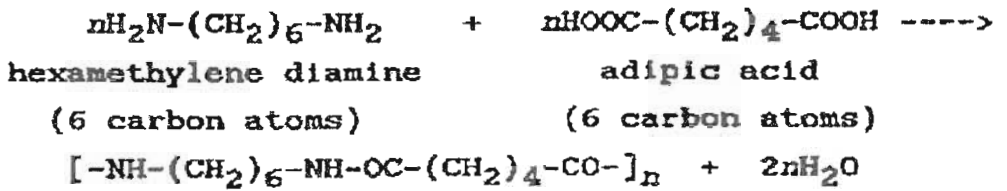
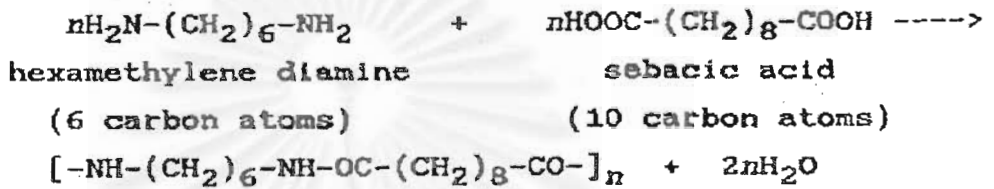
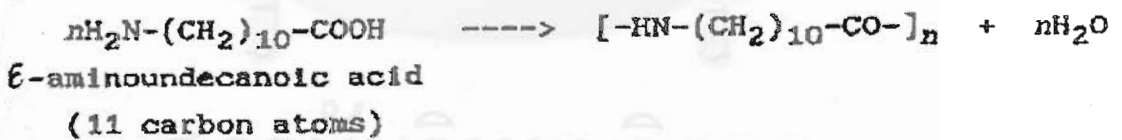
พอลิเอไมด์ คือ พอลิเมอร์ที่มีหมู่เอไมด์ ( $-CO-NH-$ ) อยู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุล ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิด พอลิเมอร์กลุ่มที่สำคัญที่ใช้ในทางการค้าได้แก่ aliphatic polyamides ซึ่งสามารถใช้ทำเส้นใยได้ ถูกผลิตขึ้นเป็นครั้งแรกโดย บริษัท ดูปองต์ ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีชื่อทางการค้าว่า "ไนลอน" (nylon) ไนลอนที่ถูกผลิตออกมามีส่วนใหญ่นำมาใช้ทำเส้นใย แต่ก็ยังมีความสำคัญในการใช้งานอื่น ๆ ที่ไม่ใช่เส้นใยด้วย โดยเฉพาะการทำเป็นพลาสติกวิศวกรรม (ไนลอน 6,6 และไนลอน 6 มีการใช้งานมากที่สุด) โดยนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนในเครื่องจักร อุปกรณ์ และเครื่องมือแทนโลหะ ปัจจุบันไนลอนเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่รู้จักแพร่หลายมากที่สุด โดยไนลอนแต่ละชนิดจะมีสมบัติพิเศษที่แตกต่างกัน เช่น

- ไนลอน 6,6 มีความแข็งดี มีผิวที่แข็ง และความทนทานต่อการขัดถูดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง
- ไนลอน 6 มีความแข็ง และเหนียวที่ดีแม้ที่อุณหภูมิต่ำ
- ไนลอน 6,9 มีความแข็ง เหนียว และมีความทนทานต่อการขัดถูที่ดี และยังมีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำ ดังนั้นจึงมีเสถียรภาพทางขนาดที่ดี
- ไนลอน 6,10 และ 6,12 มีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำ จึงเหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการเสถียรภาพทางขนาดสูง
- ไนลอน 11 มีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำมากทำให้มีเสถียรภาพทางขนาดสูงมาก และมีความทนแรงกระแทกสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับไนลอนชนิดอื่น ๆ (ยกเว้น ไนลอน 12) แต่มีความแข็งแรงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไนลอน 6
- ไนลอน 12 มีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำกว่าไนลอน 11 และมีความทนแรงกระแทกดีกว่าไนลอน 6 แต่ไม่ดีเท่ากับ ไนลอน 11 นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าไนลอนชนิดอื่น ๆ [23]

ไนลอนในทางการค้าสามารถสังเคราะห์ได้ 3 วิธี คือ (1) ปฏิกิริยาระหว่าง diamines กับ dicarboxylic acid (2) ปฏิกิริยา self condensation ของ  $\epsilon$ -amino acid และ (3) ปฏิกิริยา ring opening polymerization ของ lactam ซึ่งปฏิกิริยาการเตรียมไนลอนแต่ละชนิดแสดงในรูปที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



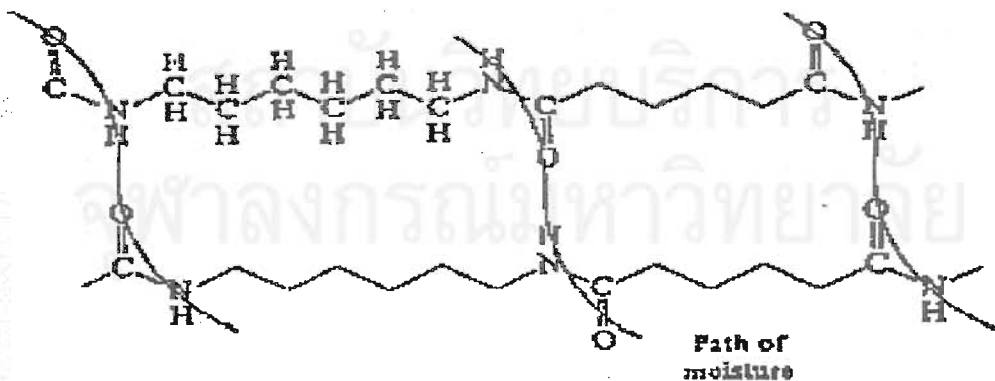
**Nylon 6,6****Nylon 6,10****Nylon 6****Nylon 11****Nylon 12**

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าไนลอน 6,6 และไนลอน 6,10 สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง hexamethylene diamine กับ adipic acid และ sebacic acid ตามลำดับ ในขณะที่ไนลอน 11 นั้นเกิดจากปฏิกิริยา self condensation ของ  $\epsilon$ -amino acid และสำหรับไนลอน 6 และไนลอน 12 จะเกิดจากปฏิกิริยา ring opening polymerization ของ  $\epsilon$ -caprolactam และ dodecyl lactam ตามลำดับ

ไนลอนทุกชนิดจะดูดความชื้นในอากาศเนื่องจากเป็นพลาสติกประเภท hydroscopic โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งเป็นเมืองร้อนมีความชื้นสัมพัทธ์สูง (60-80%) ถ้าให้ไนลอนสัมผัสกับความชื้นในอากาศโดยตรงจะเป็นผลให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าพิกัดสูงสุดที่ยอมรับให้มีได้ คือ 0.1% สามารถทดสอบได้โดยการชั่งน้ำหนักโดยดูจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป หรือถ้าไนลอนที่มีความชื้นนั้นไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดจะพบปัญหาที่ขึ้นงาน เช่น จุดขาว ลายขนแมว หรือฟองอากาศ ไนลอนแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดความชื้นที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัย ดังนี้

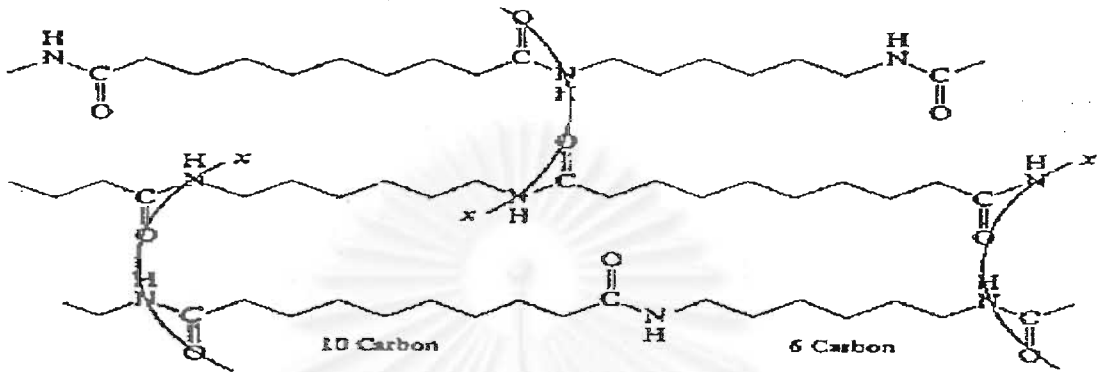
1. ปริมาณไนโตรเจนในโครงสร้างโมเลกุล
2. ความเป็นระเบียบของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์

ไนลอน 6,6 มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบโดยอะตอมของไนโตรเจนจะเรียงเข้าแถวจากสายโซ่หนึ่งไปยังสายโซ่หนึ่ง ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงทางเดินของความชื้น



รูปที่ 2.2 การดูดความชื้นของไนลอน 6,6 (อิมิตัวที่ 8.5%) [24]

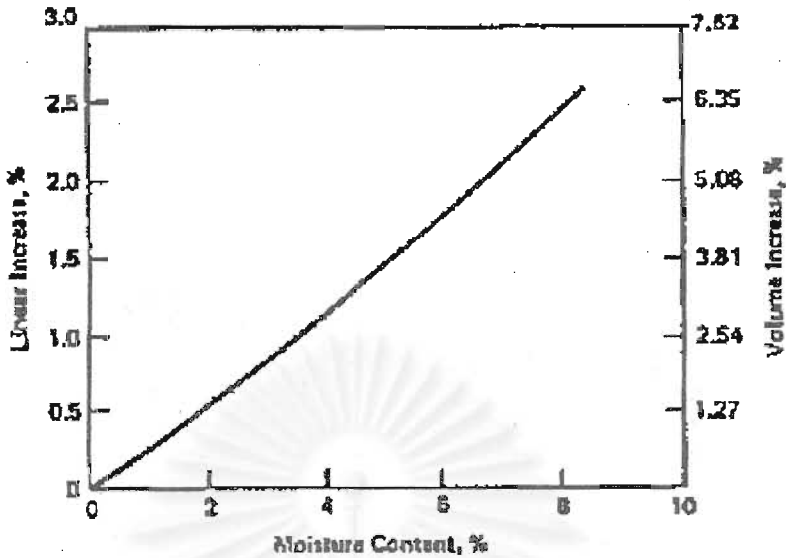
สำหรับไนลอน 6,10 นั้นลักษณะโครงสร้างของอะตอมไนโตรเจนจะไม่เรียงแถวเป็นระเบียบเหมือนกับไนลอน 6,6 ดังนั้นการดูดซึมหรือส่งผ่านความชื้นของไนลอน 6,10 จึงยากกว่าเมื่อเทียบกับไนลอน 6,6 ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การดูดความชื้นของไนลอน 6,10 (อิมิตซ์ที่ 3.5%) [24]

ถ้าให้ไนลอนอยู่ในสภาวะที่อิมิตซ์ด้วยความชื้น ไนลอน 6,6 จะสามารถดูดซึมความชื้นหรือน้ำได้ 1 มิลลิกรัม ต่อกรัมโพลีเมอร์ 2 กรัม แต่ไนลอน 6,10 จะดูดความชื้นได้เพียงครึ่งมิลลิกรัม จากโพลีเมอร์ 2 กรัม เพราะมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าไนลอน 6,6 ผลของการดูดซึมความชื้นจะมีอิทธิพลโดยตรงต่อเสถียรภาพทางขนาดของชิ้นงาน โดยจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางขนาดหรือรูปร่างได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 พลาสติกหลาย ๆ ชนิดจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซึมไว้ การดูดซึมน้ำของเทอร์โมพลาสติกมักทำให้ความแข็งแรง (strength) และความแข็งตึง (stiffness) ลดลง ซึ่งจะพบในพอลิเมอร์ที่มีการดูดซึมน้ำสูง เช่น ไนลอน นอกจากนี้ความชื้นที่ถูกดูดซึมไว้ยังมีอิทธิพลต่อสมบัติทางไฟฟ้าอีกด้วย โดยทำให้ความต้านทาน (resistance) ลดลง และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของน้ำที่มีต่อเสถียรภาพทางรูปร่างของไนลอน 6,6 [24]

นอกจากพลาสติกวิศวกรรมแล้ว พลาสติกเชิงพาณิชย์ (commodity plastic) ยังเป็นพลาสติกอีกชนิดหนึ่งที่มีความนิยมนำไปใช้ในงานต่าง ๆ เนื่องจากมีราคาถูก และสามารถนำไปใช้ในงานต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างพลาสติกชนิดนี้ เช่น โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และชนิดความหนาแน่นสูง โพลีโพรพิลีน โพลีสไตรีน และโพลีไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น

### 2.1.2 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

โพลีโพรพิลีนเป็นพลาสติกเชิงพาณิชย์ที่มีราคาถูกและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง มีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบเชิงเส้น ปรากฏจากกิ่งก้านสาขาแยกจากสายโซ่โมเลกุล เนื่องจากโมเลกุลของโพลีโพรพิลีนมีหมู่เมทิล ( $-CH_3$ ) ต่อกับอะตอมของคาร์บอนตรงพันธะคู่ ดังนั้น เมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจึงอาจเกิดผลิตภัณฑ์ได้ 3 แบบ ดังนี้

1. แบบไอโซแทกติก (isotactic) หมู่เมทิลอยู่ข้างเดียวกันตลอดแนวของสายโซ่โมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ
2. แบบซินดิโอแทกติก (syndiotactic) หมู่เมทิลอยู่สลับข้างกันตลอดแนวของสายโซ่โมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ
3. แบบอะแทกติก (atactic) หมู่เมทิลอยู่ทั้ง 2 ข้างของสายโซ่โมเลกุลอย่างไม่เป็นระเบียบ

การผลิตพอลิโพรพิลีนให้มีโครงสร้างเป็นแบบไอโซแทกติกเป็นสิ่งที่คุณต้องการ เพราะจะทำให้พอลิโพรพิลีนมีสมบัติเชิงกลที่ดี ได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็งตึง และความทนทานต่อความร้อน แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของพอลิโพรพิลีน คือ จะเปราะที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ  $0^{\circ}\text{C}$ ) นอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตและออกซิเจนต่ำกว่าพอลิเอทิลีน จึงไม่เหมาะสำหรับใช้งานกลางแจ้ง เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้เปราะ แตกร้าว สีซีดจางได้ง่าย ดังนั้นก่อนนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องใส่สารแอนติออกซิแดนซ์ (antioxidant) สารเพิ่มเสถียรภาพ UV (UV stabilizer) และสารเพิ่มเสถียรภาพ (stabilizer) อื่น ๆ ข้อดีของพอลิโพรพิลีน คือ มีสมบัติเชิงกลดีมาก เช่น มีความทนแรงดึงสูง จุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเอทิลีนทำให้เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนอุณหภูมิน้ำเดือดได้จึงมีการนำมาใช้เป็นถุงร้อน นอกจากนี้พอลิโพรพิลีนยังทนไขมันและน้ำมันได้ดี ส่วนไอน้ำและออกซิเจนจะซึมผ่านได้ต่ำกว่าพอลิเอทิลีน และยังใ้สกกว่าอีกด้วย

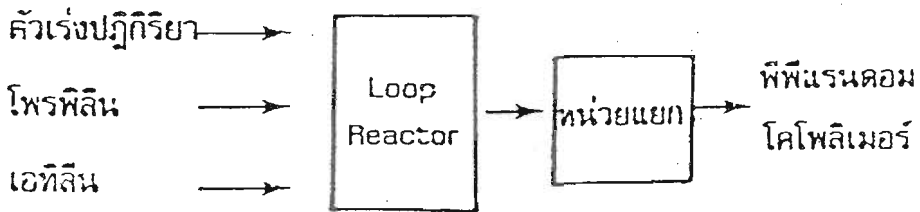
พอลิโพรพิลีนในทางการค้าจะมีทั้ง isotactic homopolymer และ random copolymer ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยเอทิลีน หรือ butene-1 และ multiphase block copolymer [polypropylene-block-poly(ethylene-co-propylene)] [25]

### 2.1.3 พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ (Polypropylene Copolymer)

พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ ที่สำคัญในทางการค้ามีอยู่ 4 ชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีเอทิลีนเป็น โคมโนเมอร์ ซึ่งวิธีการผลิต ปริมาณเอทิลีน และสมบัติของพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป ดังนี้

#### 2.1.3.1 พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์แบบคละ (Polypropylene Random Copolymer)

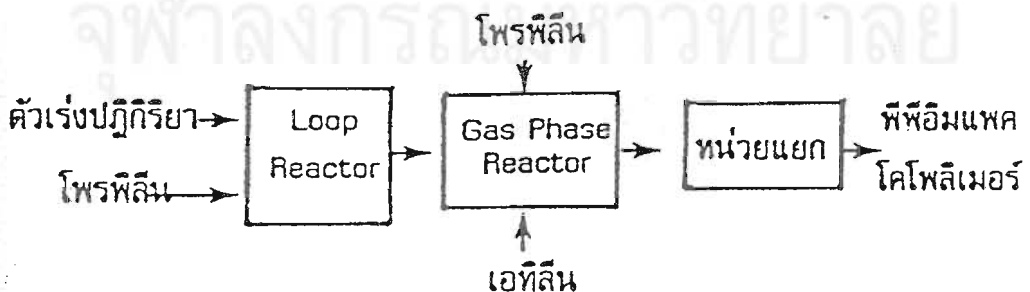
พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์แบบคละ ได้จากการใส่เอทิลีนปริมาณเล็กน้อย (2-5%) เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการพอลิเมอไรเซชัน ผลที่ได้จะเป็นโคพอลิเมอร์แบบคละ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งมีความใสและยังคงสมบัติเด่นของพอลิโพรพิลีนไว้ได้ครบถ้วน โดยสามารถนำไปใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  และสูงสุดไม่เกิน  $120^{\circ}\text{C}$  จุดเด่นของโคพอลิเมอร์ชนิดนี้ คือ ความใส ความมันเงา ความทนแรงกระแทก แต่มีจุดหลอมเหลวต่ำลง การใช้งานจะมีทั้งในรูปของฟิล์ม งานฉีด งานเป่า และงานอัด ดรีด



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตพอลิโพรพิลีนโคโพลิเมอร์แบบคละ [26]

### 2.1.3.2 พอลิโพรพิลีนโคโพลิเมอร์แบบบล็อก (Polypropylene Block Copolymer)

พอลิโพรพิลีนโคโพลิเมอร์แบบบล็อก หรือที่เรียกกันว่า Impact Copolymer โดยพอลิโพรพิลีนจะถูกผสมกับ 25% ของ เอทิลีน-โพรพิลีนโคโพลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์นี้ถูกผลิตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ 2 เครื่อง โดยพอลิโพรพิลีนโฮโมโพลิเมอร์จะถูกผลิตขึ้นภายใน loop reactor แล้วจึงถูกป้อนเข้าสู่ gas phase reactor พร้อม ๆ กับโพรพิลีน และเอทิลีน ซึ่งโพรพิลีนและเอทิลีนจะโคโพลิเมอไรซ์กันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังคงมีอยู่ภายในอนุภาคของพอลิโพรพิลีนโฮโมโพลิเมอร์ จนกลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยางแทรกตัวอยู่ในพอลิโพรพิลีนโฮโมโพลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ และสามารถผสมกับโฮโมโพลิเมอร์ได้เป็นอย่างดีดังแสดงในรูปที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า "Polypropylene Impact Copolymer" โดยจะมีความเป็นผลึกมากกว่าพอลิโพรพิลีนโคโพลิเมอร์แบบคละ ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า แต่จะเหมาะกับการใช้งานในคนละแนว โดย Polypropylene Random Copolymer จะมีความเป็นอสัณฐานมากกว่า จึงใลกว่าทำให้เหมาะสำหรับงานฉีดแบบและงานผลิตฟิล์ม ดังนั้นจึงนิยมนำมาใช้เป็นภาชนะใส่อาหารในตู้เย็น หรือใช้กับเตาไมโครเวฟ



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตพอลิโพรพิลีนโคโพลิเมอร์แบบบล็อก [26]

เอทิลีนใน Polypropylene Block Copolymer จะช่วยให้ใช้งานพอลิเมอร์ผสมได้ที่อุณหภูมิต่ำลงมากกว่าพอลิโพรพิลีนโฮโมพอลิเมอร์ ซึ่งอาจต่ำถึง  $-45^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้เอทิลีนยังช่วยเพิ่มความเหนียว และความทนแรงกระแทก จึงทำให้พอลิโพรพิลีนบล็อกโคพอลิเมอร์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ (กันชนรถยนต์ ชิ้นส่วนมอเตอร์ไซด์ เปลือกเบตเตอรี ฯลฯ) อุตสาหกรรมไฟฟ้า (เครื่องซักผ้า โทรทัศน์ ฯลฯ) และผลิตภัณฑ์สำหรับเด็กที่เน้นด้านความปลอดภัย นอกจากนี้สมบัติดังกล่าวมาแล้วพอลิโพรพิลีนบล็อกโคพอลิเมอร์ ยังไม่มีปัญหาเรื่องการหดตัว การแตกร้าว จึงเหมาะสำหรับงานฉีด และทำแผ่นพลาสติก เป็นต้น

### 2.1.3.3 ยางเอทิลีน-โพรพิลีน (Ethylene-Propylene Rubber, EPR)

ยางเอทิลีน-โพรพิลีน เป็นโคพอลิเมอร์แบบคละของโพรพิลีนและเอทิลีน โดยโอเลฟินส์แต่ละชนิดจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน โดย EPR ในทางการค้าจะประกอบด้วยโพรพิลีนประมาณ 35 mole% โคพอลิเมอร์ที่ผลิตได้เป็น random copolymer และไม่มีบลิคยาว ๆ ของทั้งเอทิลีน และโพรพิลีน ดังนั้นจึงเป็นข้อดีอย่างสมบูรณ์

EPR เป็นโคพอลิเมอร์ที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ดังนั้นการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์จึงไม่สามารถทำได้ ซึ่งอาจแก้ไขได้ด้วยการใส่ส่วนที่ไม่อิ่มตัวเข้าไปในพอลิเมอร์ในกระบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยโมโนเมอร์ตัวที่สามนี้จะมีลักษณะเป็น non-conjugated diene ซึ่งพันธะคู่หนึ่งจะถูกใช้ในกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน ส่วนพันธะคู่ที่เหลือจะอยู่ในหมู่ด้านข้างของโมเลกุล เพื่อทำให้เกิดวัลคาไนเซชันต่อไปได้

### 2.1.3.4 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ คือ วัสดุที่เมื่ออยู่ ณ อุณหภูมิปกติจะมีสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะสามารถไหลได้ ทำให้สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติกทั่วไปได้ เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ จะประกอบด้วย 2 เฟส อยู่ร่วมกัน ได้แก่ soft phase และ hard phase ทั้งนี้เนื่องจากแต่ละเฟสมีจุดอ่อนตัวแตกต่างกัน และที่อุณหภูมิของการใช้งาน ส่วนที่เป็น hard phase จะทำหน้าที่ยึดสายโซ่โมเลกุลของ soft phase เอาไว้ ทำให้วัสดุที่ได้มีสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหนือจุดอ่อนตัวของ hard phase จะทำให้ hard phase หายไปและวัสดุจะกลายเป็นของเหลวหนืด (viscous liquid) และ

เมื่อทำให้เย็นลงส่วนที่เป็น hard phase จะเกิดขึ้นได้อีก ทำให้วัสดุคืนกลับเป็นอิลาสโตเมอร์เช่นเดิม

การนำพอลิโพรพิลีนมาผสมกับ 65% ของยางเอทีลีน-โพรพิลีน จะทำให้เกิดเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ได้เช่นกัน โดยส่วนบดของโพรพิลีนในยางเอทีลีน-โพรพิลีนจะเข้าร่วมในการเกิดผลึกกับสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีน โดยบริเวณที่เป็นผลึกเล็ก ๆ จะทำหน้าที่เชื่อมโยงส่วนที่เป็นยางกับส่วนของโพรพิลีน โดยยางจะมีลักษณะที่เป็นอนุภาคเล็ก ๆ กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน

## 2.2 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blends)

ในปัจจุบันกำลังการผลิตพอลิเมอร์ผสมคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 20% ของกำลังการผลิตพลาสติกทั้งหมด และมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตลอด 10 ปีที่ผ่านมา โดยมีการคาดการณ์ว่าในอนาคตอันใกล้ การผลิตพลาสติกเกือบทั้งหมดจะเป็นระบบการนำพอลิเมอร์หลายชนิดมาผสมกัน (multicomponent polymer system) เนื่องจากระบบดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ เช่น

1. สามารถปรับปรุงสมบัติได้ตามต้องการ โดยเลือกจากสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิดและอัตราส่วนในการผสมที่เหมาะสม
2. ใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่าและเวลาในการผลิตที่สั้นกว่าในการพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่
3. เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดราคาของพอลิเมอร์ที่มีราคาแพง เช่น พลาสติกวิศวกรรม
4. เป็นระบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นการนำพลาสติกที่เหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยผ่านกระบวนการผสมและขึ้นรูปขึ้นมาใหม่ [27]

ดังนั้นการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสมจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาทางด้านการผลิต สมบัติของวัสดุ ตลอดจนการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibility) เป็นสิ่งที่สำคัญมากของระบบพอลิเมอร์ผสมโดยเฉพาะในทางการค้า เทคนิคความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับการพัฒนา โดยรูปแบบของการผสมจะแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ



1. การผสมของพลาสติกวิศวกรรม
2. การผสมของพลาสติกเชิงพาณิชย์
3. การผสมของพอลิเมอร์ไฮเซล

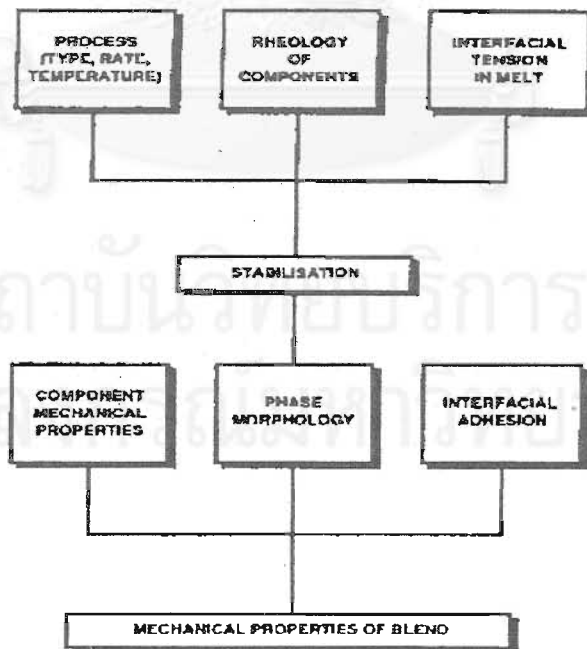
สำหรับใน 2 ระบบแรก คือ การผสมของพลาสติกวิศวกรรมและพลาสติกเชิงพาณิชย์นั้น จะมีวัตถุประสงค์หลักในการผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติเฉพาะอย่าง เช่น ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง ฯลฯ ซึ่งเทคนิคในการผสมจะเน้นถึงต้นทุนและประสิทธิภาพของการปรับปรุงมากกว่าที่จะคิดพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่ โดยต้นทุนการผสมจะต่ำมากถ้าในระบบการผลิตมีอุปกรณ์ในการผสมพร้อมอยู่แล้ว ส่วนใหญ่ในการพัฒนาจะช่วยให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูงขึ้น เพื่อการนำไปใช้งานเฉพาะอย่าง เช่น การใช้งานด้านอวกาศ ตัวอย่างของการผสม โดยเฉพาะการผสมของพลาสติกวิศวกรรมเพื่อการนำไปใช้งานเฉพาะอย่าง เช่น การผสมระหว่าง polyetherimide และ liquid crystal polymer โดยพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีเสถียรภาพทางความร้อน และความทนทานต่อการดัดโค้งที่สูงขึ้น

การปรับปรุงโดยการผสมของพลาสติกเชิงพาณิชย์ สมบัติที่นิยมปรับปรุง เช่น สมบัติเชิงกล (ความเหนียว ความแข็งตึง) สมบัติทางความร้อน (จุดหลอมเหลว จุดอ่อนตัว) และความทนทานต่อสารเคมี โดยจะนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนอุปกรณ์รถยนต์ อุปกรณ์ทางธุรกิจ อุปกรณ์ใช้ในครัวเรือน ฯลฯ ตัวอย่างของการผสมประเภทนี้ได้แก่ การผสมระหว่างพอลิเอไมด์กับพอลิโพรพิลีน หรือพอลิเอทิลีน

ส่วนประเภทสุดท้ายจะเป็นการผสมของพอลิเมอร์ไฮเซล ซึ่งเป็นระบบการผสมที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เพราะกระบวนการนี้จะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเป็นการนำพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ โดยเฉพาะพลาสติกที่ใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ซึ่งบ่อยครั้งจะถูกปล่อยทิ้งเป็นขยะ กระบวนการผสมดังกล่าวเป็นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่โดยการผสมพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ในการผลิตความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจึงเป็นสิ่งที่ทำหายและซับซ้อน เนื่องจากในระบบของพอลิเมอร์ผสมอาจประกอบด้วย พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พีวีซี พอลิสไตรีน พอลิเอไมด์ และพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ดังนั้นการพัฒนาสารช่วยผสมที่มีสมบัติพิเศษจึงเป็นสิ่งที่ต้องการในทางการค้า ตัวอย่าง เช่น Bennett ซึ่งเป็นสารช่วยผสมที่ผลิตโดย Bennett BV และเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปในชื่อของ universal compatibilizer แม้ว่าสูตรโครงสร้างของ Bennett จะยังไม่เปิดเผยแต่พบว่ามันเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ประกอบด้วยช่วงของหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน เพื่อประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

## 2.2.1 กลไกในการผสมเข้ากันได้ (Compatibilization Mechanisms)

การผสมพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและแรงเค้นสะสม (stress concentration) จากดิสเพอร์สในเมทริกซ์ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสมจะนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.7 มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม อาทิเช่น สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมหรืออัลลอยด์จะขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของแต่ละองค์ประกอบ สัณฐานวิทยา ระหว่างผิวสัมผัสของ (phase morphology) และแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) โดยทั้งสัณฐานวิทยาและแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสจะมีความสำคัญมากในการช่วยถ่ายโอนแรงในระหว่างการใช้งาน สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับภาวะที่ได้รับในระหว่างกระบวนการผสม เช่น ชนิดของเครื่องผสม อัตราการผสม อุณหภูมิในการผสม นอกจากนี้ยังขึ้นกับสมบัติการไหลของแต่ละองค์ประกอบในการผสม และแรงดึงผิวขององค์ประกอบในขณะหลอมเหลว (interfacial tension) [28]



รูปที่ 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม [28]

## 2.2.2 วิธีในการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of Compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นการเลือกใช้จะขึ้นกับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้ คือ

1. ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Miscibility)
2. การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of Block or Graft Copolymer)
3. การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาได้ (Addition of Function/Reactive Polymer)
4. การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่าง การผสม (In Situ Grafting/Polymerization)

### 2.2.2.1 ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์

(Thermodynamic Miscibility)

ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นหลักการที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางการค้า เช่น การผสมระหว่างพอลิฟีนิลีนออกไซด์ (polyphenylene oxide) กับพอลิสไตรีน (polystyrene) โดยหลักการดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (free energy of mixing) โดยที่เอนโทรปีเป็นการวัดความไม่เป็นระเบียบ (degree of freedom) ของโมเลกุลเมื่อมีการผสมเกิดขึ้น โดยในการผสมจะทำให้เอนโทรปีมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี ( $\Delta S$ ) มีค่าเป็นบวกเสมอ ( $S_2 > S_1$ ) สำหรับโมเลกุลใหญ่ ๆ เอนโทรปีจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้นการเข้ากันได้จึงขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมจะถูกแสดงดังสมการที่ 2.1

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.1)$$

โดยที่

$\Delta G$  = การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม

$\Delta H$  = การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการผสม

$\Delta S$  = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม

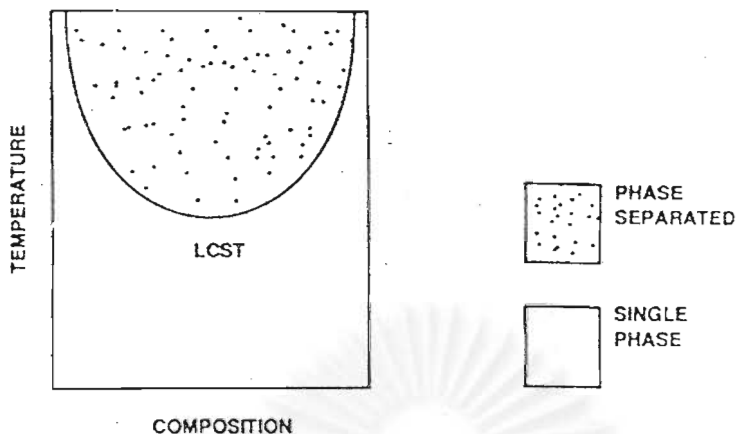
$T$  = อุณหภูมิ (K)

ในการผสมที่สามารถเข้ากันได้  $\Delta G$  ต้องมีค่าเป็นลบ จากสมการที่ 2.1 สามารถเขียนใหม่ได้ ดังสมการที่ 2.2 ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

$$\Delta H - T\Delta S < 0 \quad (2.2)$$

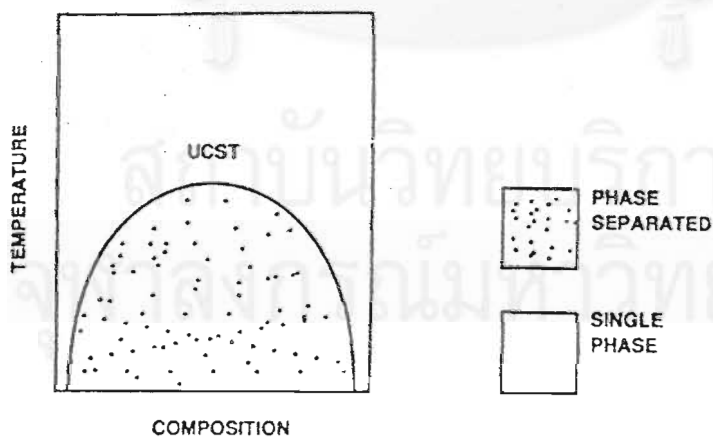
1. การผสมที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic mixture) คือ ภายในระบบ จะมีแรงดึงดูดระหว่างกัน เช่น การที่โมเลกุล A กับ โมเลกุล B ดึงดูดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน จากลักษณะดังกล่าวจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีมีค่าเป็นลบ ( $\Delta H < 0$ ) นั่นคือการผสมสามารถเข้ากันได้ และเมื่อสร้างเป็นแผนภาพเฟส ดังรูปที่ 2.8 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ จะมีผลทำให้ของผสมมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกเฟสขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้โมเลกุลมีการสั่นมากขึ้นทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง จากรูปที่ 2.8 จะแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่พอลิเมอร์ผสมเริ่มเกิดการแยกเฟส หรือที่เรียกกันว่า lower critical solution temperature (LCST)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 เฟสไดอะแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง LCST [28]

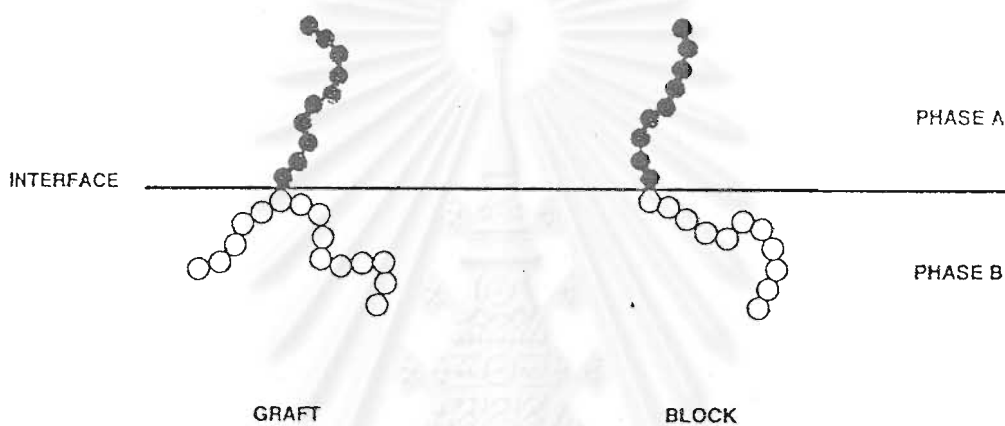
2. การผสมที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic mixture) คือ ภายในระบบ จะไม่มีแรงดึงดูดต่อกันซึ่งจะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีมีค่าเป็นบวก ( $\Delta H > 0$ ) ดังนั้นการผสมจะสามารถเข้ากันได้เมื่อ  $T\Delta S$  มีค่ามากกว่า  $\Delta H$  เพื่อให้  $\Delta G$  มีค่าเป็นลบ นั่นคือ การผสมที่เข้ากันได้จะสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิสูง หรือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ ดังรูปที่ 2.9 จากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิสูงสุดที่พอลิเมอร์ผสมจะเกิดการแยกเฟส หรือที่เรียกกันว่า upper critical solution temperature (UCST)



รูปที่ 2.9 เฟสไดอะแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง UCST [28]

### 2.2.2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of Block or Graft Copolymer)

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งของบล็อกและกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างเฟสของ A และ B [28]

โครงสร้างทางเคมี และน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. บล็อกโคพอลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟโคพอลิเมอร์
2. โดบบล็อกโคพอลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์
3. โดบบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกสั้นสลับยาวจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

หลักในการเลือกใช้โคพอลิเมอร์มาทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม มีอยู่ 3 ประการ คือ

1. สารช่วยผสมต้องมีน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสม โดยแต่ละส่วนของบล็อกโคพอลิเมอร์ต้องมีความยาวเพียงพอที่จะแทรกไปอยู่ในแต่ละเฟสของโฮโมพอลิเมอร์ และต้องสั้นเพียงพอเพื่อเป็นการประหยัดต้นทุน
2. น้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมจะต้องสัมพันธ์กับพอลิเมอร์ที่จะผสม โดยโคพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะใช้เวลาในการผสมนานกว่าเพื่อให้โคพอลิเมอร์เคลื่อนที่ไปอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟส ซึ่งจะตรงกันข้ามกับสารช่วยผสมที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังนั้นในกระบวนการผลิตจะต้องเลือกสภาวะในการผสมให้สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสม
3. บล็อกโคพอลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกับโฮโมพอลิเมอร์จะมีราคาแพง เนื่องจากหาได้ยากในทางการค้าและใช้ได้เฉพาะบางระบบ ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการผลิตโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหลายองค์ประกอบ (multicomponent copolymer) เช่น สไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีนไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ (SEBS) โดยใช้ในการผสมระหว่าง HDPE กับ PET เป็นต้น

โดยในระบบการผสมที่สามารถเข้ากันได้ บ่อยครั้งจะขึ้นกับความสามารถของสารช่วยผสม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารช่วยผสมจะมีหน้าที่ดังนี้ คือ

1. ลดแรงดึงผิวระหว่างผิวสัมผัสในสภาวะหลอมเหลว ทำให้ดีสเปอร์เฟสมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์
2. ช่วยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนแรงระหว่างเฟส
3. เพิ่มเสถียรภาพทางขนาดของดีสเปอร์เฟส ภายใต้สภาวะการอบเหนียว (annealing)

### 2.2.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Addition of Functional / Reactive Polymer)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม บ่อยครั้งจะเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปลงให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไว

ต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน กับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ กระบวนการดัดแปลงพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด ตัวอย่าง เช่น มาลิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิโอฟีน โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาลิกแอนไฮไดรด์จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่เอมีนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลิโอฟีนกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมในทางการค้าและมีราคาไม่แพงมากนัก

#### 2.2.2.4 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอโรเชซันในระหว่างการผสม (In-situ Grafting Polymerization)

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอโรเชซันในระหว่างการผสม หรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยจะต่างจากวิธีอื่น ๆ คือ องค์ประกอบที่จะทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปลงเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่าง เช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอนเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) และ การอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจากดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่า

กลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการผสม อาจมีได้ดังนี้

1. เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมสารกระตุ้นการแตกตัว (initiator) ในระหว่างการผสม
2. เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น
3. เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้สภาวะที่แรงเฉือนสูง
4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

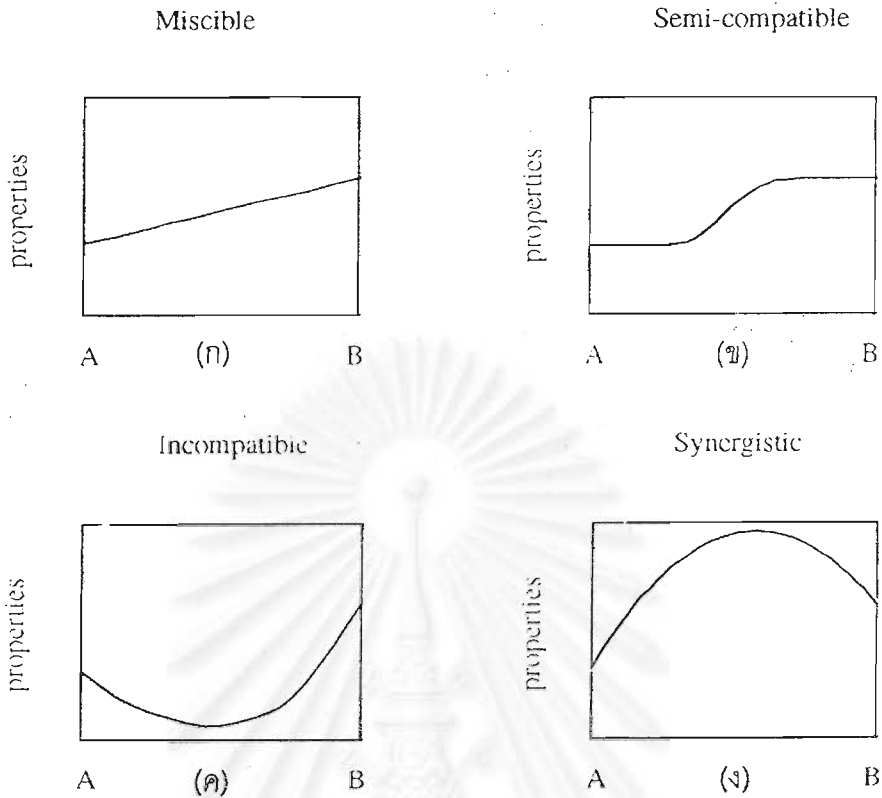


## 2.3 ความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์ผสม (Blending Miscibility and Properties)

โดยทั่วไปแล้วสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบที่นำมาผสม อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนขององค์ประกอบกับสมบัติของพอลิเมอร์ผสมยังขึ้นกับปัจจัยอื่นด้วย เช่น สมบัติของแต่ละองค์ประกอบ ลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละองค์ประกอบ (ลักษณะคล้ายแก้ว หรือยาง หรือลักษณะเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก) สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการผสม (การผสมที่สามารถเข้ากันได้ หรือไม่เข้ากันได้) และการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในทิศทางการทดสอบ

สำหรับระบบการผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกับอัตราส่วนการผสมจะแตกต่างจากที่กล่าวมาแล้ว โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลด้านความเหนียวจะไม่สัมพันธ์กับลักษณะของแต่ละเฟส แต่จะสัมพันธ์กับระดับของแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟสมากกว่า จากความซับซ้อนทั้งหลายเหล่านี้ทำให้ไม่สามารถที่จะใช้กฎการผสมแต่เพียงอย่างเดียวในการอธิบายสมบัติของพอลิเมอร์ผสมแต่ละชนิดได้ ระบบการผสมที่มีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสจะมีแนวโน้มทำให้การผสมสามารถเข้ากันได้ ตัวอย่าง เช่น การผสมระหว่าง poly(phenylene oxide) และ polystyrene หรือการผสมระหว่าง poly(vinyl chloride) กับ poly(butadiene-co-acrylonitrile) การผสมที่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์จะแสดงลักษณะฐานวิทยาเพียงเฟสเดียวซึ่งจะเป็นการง่ายที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกับอัตราส่วนผสม ดังรูปที่ 2.11

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสม [29]

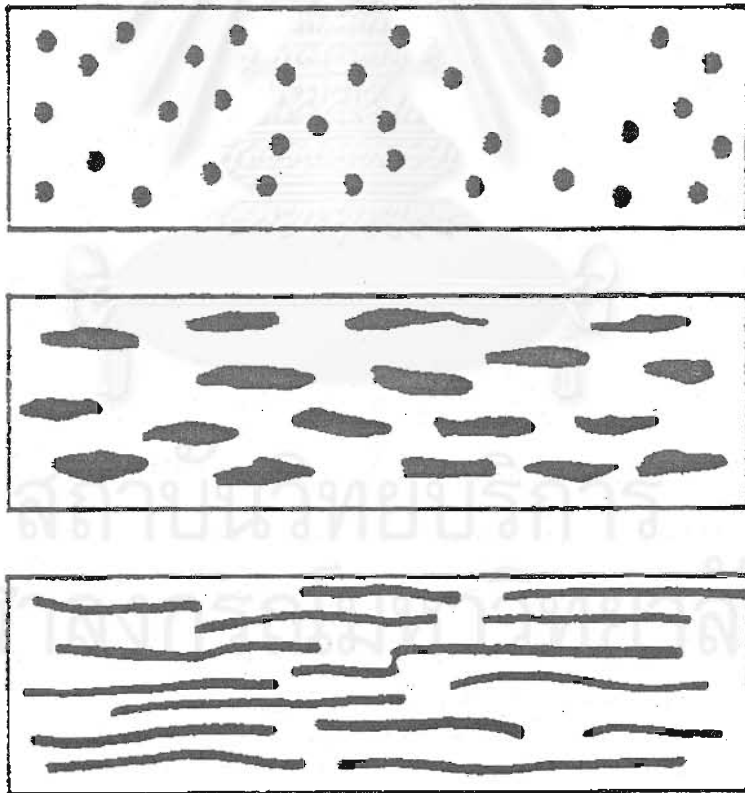
จากรูปที่ 2.11 ในระบบการผสมที่สามารถเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ อัตราส่วนการผสมกับสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จะมีความสัมพันธ์กันเป็นฟังก์ชันเพิ่ม ดังรูปที่ 2.11(ก) แต่ในการผสมส่วนใหญ่จะไม่ต้องการความเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ โดยในการผสมที่มีความเข้ากันได้บางส่วน ระบบจะมีลักษณะเป็นสารละลายของแข็ง โดยอนุภาคของดิสเพอร์สเฟสซึ่งมีขนาดเล็กจะกระจายอยู่ในเฟสหลัก โดยในระหว่างเฟสจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และเมื่อนำไปพล็อตกราฟระหว่างสมบัติกับอัตราส่วนการผสมจะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส ดังรูปที่ 2.11(ข) โดยพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนผสมมากกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเฟสหลัก และควบคุมสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่าง ส่วนบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของกราฟจะมีสาเหตุมาจากการกลับเฟสของของผสม

ในระบบที่มีความเข้ากันได้ได้น้อยมากหรือไม่เข้ากันจะเป็นผลให้การแยกเฟสเกิดขึ้น โดยดิสเพอร์สเฟสจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กระจายอยู่ในเฟสหลัก และระหว่างผิวสัมผัสจะมีแรงดึงดูดกันอย่างอ่อน ๆ หรือไม่มี จากลักษณะดังกล่าวสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทำให้ไม่นิยมนำไปใช้งาน และเมื่อนำไปพล็อตกราฟจะได้กราฟที่มีลักษณะเป็น

รูปตัวยู ดังรูปที่ 2.11(ค) ส่วนในระบบสุดท้ายซึ่งจะพบเห็นได้น้อย โดยในการผสมจะพัฒนาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้มากกว่าระบบอื่น ๆ กล่าวคือ สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมากกว่า หรือเท่ากับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ดังรูปที่ 2.11(ง)

#### 2.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม (Morphology of Blends)

ในทางอุตสาหกรรมการผสมที่เข้ากันได้เป็นสิ่งจำเป็น แต่ในหลายกรณีการผสมที่เข้ากันได้บางส่วนก็เป็นสิ่งจำเป็นเช่นกัน ตามหลักการแล้วสมบัติของของผสมจะอยู่ระหว่างสมบัติของแต่ละองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามการผสมเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ การจัดเรียงตัวหรือลักษณะสัณฐานวิทยาของแต่ละเฟสจะเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมอาจมีลักษณะของดีสเปอร์สเฟสกระจายอยู่ในเฟสหลักของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โดยดีสเปอร์สเฟสอาจมีลักษณะเป็น ทรงกลม แผ่น หรือเส้นใย ดังแสดงในรูป 2.12 ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 ลักษณะต่าง ๆ ของดีสเปอร์สเฟสในระบบการผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้ [30]

### 2.4.1 การเกิดและการควบคุมของสัณฐานวิทยา (Morphology Generation and Control)

การผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดให้เข้ากันได้นั้น อาจเกิดการแยกเฟสได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือ การนำตัวทำละลายออก การผสมในทางการค้าส่วนใหญ่จะใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง เช่น เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) หรือ กระบวนการไม่ต่อเนื่อง เช่น banbury mixer ก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดหรือเป่า

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม จะขึ้นกับอัตราส่วนของการผสม อัตราส่วนความหนืดของแต่ละองค์ประกอบ แรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัส และสภาวะในการผสม โดยในการผสมนั้นองค์ประกอบที่มีอัตราส่วนมากกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเฟสหลัก โดยขนาดของดิสเพอร์สเฟสจะถูกควบคุมจากการแตกตัวของดิสเพอร์สเฟส (drop breakup) และการรวมกลุ่ม (coalescence) ของดิสเพอร์สเฟส โดยที่การเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นกับชนิดของเครื่องผสม แรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัส และลักษณะการไหลของแต่ละองค์ประกอบ นอกจากนี้รูปร่างของดิสเพอร์สเฟสยังสามารถควบคุมได้ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป อาทิเช่น รูปร่างของดิสเพอร์สเฟสอาจถูกเปลี่ยนแปลงจากทรงกลมเป็นเส้นใยจากการไหลแบบยืดดึงในบริเวณหัวดาย หรือจากทรงกลมเปลี่ยนแปลงเป็นแผ่นจากการยืดดึงใน 2 ทิศทาง ในกระบวนการเป่า เป็นต้น [31]

### 2.4.2 การกลับเฟส (Phase Inversion)

ในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้าด้วยกันนั้น โดยส่วนใหญ่แล้วพอลิเมอร์ดังกล่าวจะไม่เข้ากัน โดยจะแยกเป็น 2 เฟสตามหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสม สมบัติการไหลของแต่ละองค์ประกอบ และสภาวะในการผสม กล่าวคือ เมื่อทำการผสมดิสเพอร์สเฟสในอัตราส่วนน้อย ดิสเพอร์สเฟสจะกระจายอยู่ในเฟสหลักโดยอาจมีรูปร่างเป็น ทรงกลม เส้นใย หรือแผ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะในการขึ้นรูป และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมขึ้น ดิสเพอร์สเฟสจะมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอและมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องมาจากการเกิดการรวมกลุ่มกันเองของดิสเพอร์สเฟส และถ้าเพิ่มอัตราส่วนผสมต่อไปดิสเพอร์สเฟสจะเกิดการกลับเฟสเปลี่ยนเป็นเฟสหลัก โดยก่อนถึงจุดนี้สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะมีแนวโน้มเป็นเฟสหลักทั้ง 2 เฟส เรียกการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวว่า co-continuous ตัวอย่างของการกลับเฟสนี้สามารถเห็นได้จากการสังเคราะห์ high impact polystyrene (HIPS) ซึ่งการกลับเฟสจะเกิด

ขึ้นโดยในช่วงแรกเฟสของยางจะเป็นเฟสหลัก แต่เมื่อสิ้นสุดการสังเคราะห์แล้วพอลิสดิรีนจะเป็นเฟสหลัก

### 2.4.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

เพื่อความเข้าใจถึงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างหรือสัณฐานวิทยา และสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น มีหลายเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาและความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม แต่เทคนิคที่นิยมใช้ คือ Optical Microscopy (OM) และ Scanning Electron Microscopy (SEM)

#### 2.4.3.1 Optical Microscopy (OM)

OM เป็นเทคนิคที่สำคัญมากในการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และการเตรียมตัวอย่างที่ไม่ยุ่งยาก แต่อย่างไรก็ดีความสามารถของ OM จะถูกจำกัดด้วยความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็น และประสิทธิภาพของเลนส์วัตถุซึ่งสามารถแยกความแตกต่างได้ดีที่สุดในระดับ 2 ไมโครเมตร ดังนั้นประสิทธิภาพของ OM จึงเพียงพอที่จะใช้ในการศึกษาการผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้ แต่จะไม่เพียงพอที่จะใช้ในการศึกษาเฟสเล็ก ๆ ในระบบการปรับปรุงความเหนียว หรือการผสมที่สามารถเข้ากันได้ หรือเข้ากันได้บางส่วน ปัญหาหลักอีกประการหนึ่งของ OM คือ การเตรียมชิ้นตัวอย่าง โดยเฉพาะในกรณีของพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่อ่อน การตัดหรือบดบ่อยครั้งจะทำให้ชั้นพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมเกิดความเสียหาย ดังนั้นในบางครั้งจำเป็นต้องตัดชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำประมาณ  $-40^{\circ}\text{C}$  หรือน้อยกว่า

#### 2.4.3.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการศึกษาเฟสของพอลิเมอร์ผสมรวมทั้งขนาด และการกระจายตัวของดิสเพอร์สเฟส ตลอดจนแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟส โดยในการตรวจสอบจะจำกัดอยู่ในระดับพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง SEM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า OM และมีวิธีการเตรียมชิ้นงานที่ง่าย ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้วิธีการหักชิ้นตัวอย่างภายใต้ไมโครเจนเหลวเพื่อป้องกันความเสียหายของสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างที่ดีควรจะเรียบและดิสเพอร์สเฟสควรจะถูกสกัดออกไปด้วยการออกซิเดชัน หรือการใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดออกเพื่อประสิทธิภาพในการตรวจสอบ

## 2.5 การผสมของพอลิเอไมด์กับเทอร์โมพลาสติกชนิดต่าง ๆ

พอลิเมอร์ผสมเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาในทางอุตสาหกรรม เพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกเชิงพาณิชย์หรือพลาสติกวิศวกรรมให้มีการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง พอลิเอไมด์เป็นพลาสติกวิศวกรรมที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดหลายประการในการนำไปใช้งาน เช่น มีสมบัติความทนแรงกระแทกต่ำโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) มีเสถียรภาพทางขนาดที่ต่ำ เนื่องจากความสามารถในการดูดความชื้นที่สูง และมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติดังกล่าว โดยการผสมพอลิเอไมด์กับเทอร์โมพลาสติกชนิดต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตามการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดแต่เพียงลำพังนั้น สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้อาจไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นการใช้สารช่วยผสมดังได้กล่าวมาแล้วจึงนับเป็นวิธีการหนึ่งที่สำคัญ และมีความสำคัญในการพัฒนาพอลิเมอร์ผสม ดังในงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา เช่น

Chung - Jen - Wu และคณะ [32] ได้ศึกษาอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของหมู่มาลิกแอนไฮไดรด์ที่อยู่ในสารช่วยผสม และปริมาณของสารช่วยผสมที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยทำการผสมระหว่างไนลอน 6 และสไตรีน(เอทิลีน-บิวตะไดอีน)สไตรีนโคพอลิเมอร์ (SEBS) โดยมี SEBS ที่ถูกกราฟต์ด้วยหมู่แอนไฮไดรด์ (SEBS-MA) เป็นสารช่วยผสม จากการศึกษาพบว่า SEBS-MA เป็นสารช่วยผสมที่มีประสิทธิภาพ โดยช่วยให้ไนลอน 6 และ SEBS สามารถผสมเข้ากันได้ นอกจากนี้ยังพบว่าระดับของเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของหมู่มาลิกแอนไฮไดรด์ในสารช่วยผสม และปริมาณของสารช่วยผสมมีผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกล โดยระดับของหมู่มาลิกแอนไฮไดรด์และปริมาณของสารช่วยผสมที่มากเกินไป จะมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง เช่น 8% และ 10% ของหมู่มาลิกแอนไฮไดรด์ในสารช่วยผสมในปริมาณ 3 wt% จะช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกได้สูงขึ้นถึง 30 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับไนลอน 6 ธรรมดา แต่ถ้าเพิ่มระดับของหมู่มาลิกแอนไฮไดรด์ในสารช่วยผสมให้สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงลดลง

Xiaomin Zhang และคณะ [33] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ผสม สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของการผสมระหว่างพอลิเอไมด์ 1010 (PA1010) และ พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิโพรพิลีนกราฟต์ไกลซิโดลเมทาคริเลต (PP-g-GMA) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง PP-g-GMA กับ PP ในระบบของการผสม จากการศึกษาพบว่า

สมบัติทางความร้อน และสมบัติการไหลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการใช้ PP-g-GMA ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง PA1010 กับ PP-g-GMA เกิดเป็นกราฟต์โคพอลิเมอร์ (PP-g-PA1010) โดยกราฟต์โคพอลิเมอร์ดังกล่าวจะไปแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัส เพื่อช่วยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส และทำให้ระบบการผสมมีความสามารถในการเข้ากันได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดของ PP-g-GMA ในระบบการผสมยังมีขนาดเล็กกว่า PP ในอัตราส่วนผสมที่เท่ากัน และในระบบที่ใช้ PP-g-GMA ยังช่วยให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นด้วยโดยเฉพาะสมบัติด้านความทนแรงกระแทกจะดีขึ้นตามปริมาณของ PP-g-GMA ที่เพิ่มขึ้น

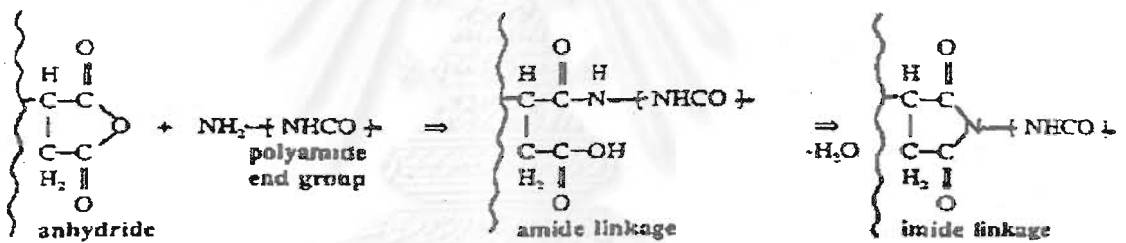
Xiaomin Zhang และคณะ [34] ได้ศึกษาพฤติกรรมการกลับเฟสของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA1010 และ PP โดยใช้ PP-g-GMA ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม พบว่าการกลับเฟสจะเกิดเมื่อ PP มีสัดส่วนประมาณ 0.7-0.75 และยังพบว่าอิทธิพลของสารช่วยผสมจะไม่มีผลต่อพฤติกรรมของการกลับเฟส โดยสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นกับสมบัติพอลิเมอร์ที่เป็นเฟสหลัก

Jae – Dong Lee และคณะ [35] ได้ศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมที่มีผลต่อฐานฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เสถียรภาพทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการทำการผสม โดยทำการผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน ไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีน กราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) โดยทำการศึกษาวีธีการผสมทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ (1) ทำการผสมแบบขั้นตอนเดียว โดยนำพอลิเมอร์แต่ละชนิดมาผสมพร้อมกัน (2) ทำการผสม 2 ขั้นตอนแบบเกิดปฏิกิริยา โดยทำการผสมระหว่าง ไนลอน 6 และ PP-MA ก่อน จากนั้นจึงนำของผสมที่ได้มาผสมกับพอลิโพรพิลีน และ (3) ทำการผสม 2 ขั้นตอนแบบไม่เกิดปฏิกิริยา โดยทำการผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและ PP-MA ก่อน จากนั้นจึงนำของผสมที่ได้มาผสมกับไนลอน 6 จากการทดลองพบว่าการผสมแบบขั้นตอนเดียวจะช่วยในการปรับปรุงฐานฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เสถียรภาพทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมได้ดีกว่าวิธีการผสมอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบที่ใช้สารช่วยผสมจะไม่ทำให้ลักษณะของการหลอมเหลวของระบบเปลี่ยนไป แต่จะทำให้ลักษณะของการเกิดผลึกเปลี่ยนไป

J.Duvall และคณะ [36] ได้ศึกษาพฤติกรรมของสารช่วยผสมที่มีผลต่ออัตราส่วนการผสม และสมบัติของพอลิเมอร์ผสม โดยทำการผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และพอลิเอไมด์ 6,6 ในอัตราส่วน 75 ต่อ 25 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และสารช่วยผสมที่ใช้ คือ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณสูง (high-anhydride compatibilizer, HAC) และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิก



แอนไฮไดรต์ในปริมาณต่ำ (low-anhydride compatibilizer, LAC) จากการศึกษาพบว่า สารช่วยผสมทั้งสองชนิด มีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม โดยสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของระบบการผสมให้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่แอนไฮไดรต์ของสารช่วยผสมกับหมู่เอมีนที่ปลายสายโซ่ของไนลอนเกิดเป็นกราฟต์โคพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งกราฟต์โคพอลิเมอร์ดังกล่าว จะมีส่วนสำคัญในการช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของระบบ นอกจากนี้สารช่วยผสมยังมีอิทธิพลต่ออนุภาคของไนลอน 6,6 โดยอนุภาคของไนลอน 6,6 จะขึ้นอยู่กับระดับของมาลิกแอนไฮไดรต์มากกว่าปริมาณของสารช่วยผสม กล่าวคือ LAC จะใช้ในปริมาณ 11 wt% แต่ HAC จะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า 1 wt% เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเท่ากัน นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่า การเติมสารช่วยผสมจะช่วยเพิ่มความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมจาก 27 MPa เป็น 35-38 MPa โดยในระบบการผสมของ LAC ความทนแรงดึงจะค่อย ๆ ลดลงจาก 38-35 MPa จากการเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสม ส่วนในระบบของ HAC จะมีความทนแรงดึงใกล้เคียงกันประมาณ 35 MPa



รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมาลิกแอนไฮไดรต์ และพอลิเอไมด์ [36]

## 2.6 สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties)

สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะตัวของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เช่น พอลิเมอร์กิ่งผลึก พอลิเมอร์อสัณฐาน และภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม เป็นต้น ตัวอย่างของสมบัติทางความร้อนที่รู้จักกันดี ได้แก่ อุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) อุณหภูมิในการเกิดผลึก ( $T_c$ ) และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ )

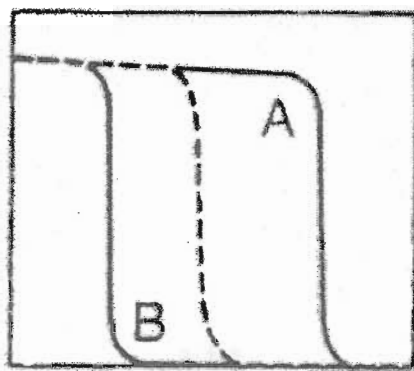
โดยทั่วไปลักษณะการเปลี่ยนแปลง  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์อสัณฐานเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วเป็นวัสดุที่อ่อนนิ่มคล้ายยาง โดยการเปลี่ยนแปลงของ  $T_g$



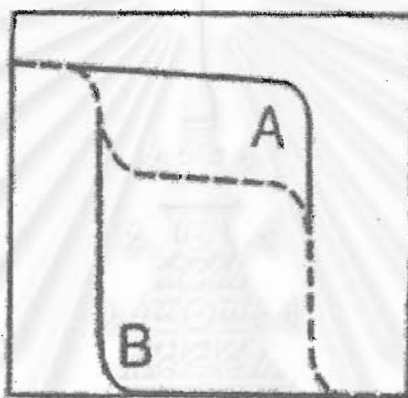
จะถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้หรือทำนายถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จากรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับอุณหภูมิจะเห็นได้ว่า ถ้าการผสมสามารถเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ในระดับโมเลกุล พอลิเมอร์ผสมจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของ  $T_g$  เพียง 1 ตำแหน่งและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แคบ ดังรูป 2.14(ก) แต่ถ้าการผสมไม่สามารถเข้ากันได้ พอลิเมอร์ผสมจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของ  $T_g$  2 ตำแหน่งและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แคบเช่นเดียวกับกรณีแรก ดังรูป 2.14(ข) ส่วนในรูปที่ 2.14(ค) แสดงถึงการผสมที่สามารถเข้ากันได้บางส่วน โดยพอลิเมอร์ผสมจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของ  $T_g$  2 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะแสดงถึง  $T_g$  ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่กว้างซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการเข้ากันได้บางส่วนของพอลิเมอร์ผสมนั่นเอง

การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการให้ความร้อน โดยการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนสามารถเกิดได้หลายแบบ เช่น การหลอมเหลว การเกิดผลึก อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน การสลายตัว และปฏิกิริยาเคมีอื่น ๆ เช่น การกลายเป็นไอ สำหรับพอลิเมอร์ผสมการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และจุดหลอมเหลว จัดเป็นการตรวจสอบที่สำคัญ ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบคือ Differential Scanning Calorimeter (DSC) และ Dynamic Mechanical Analysis (DMA) [38]

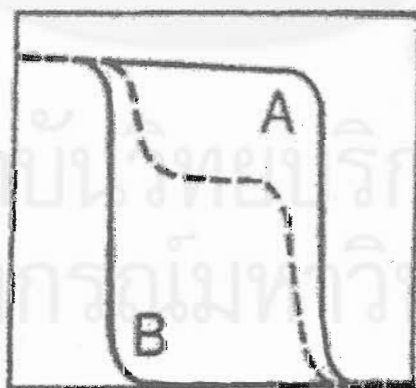
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

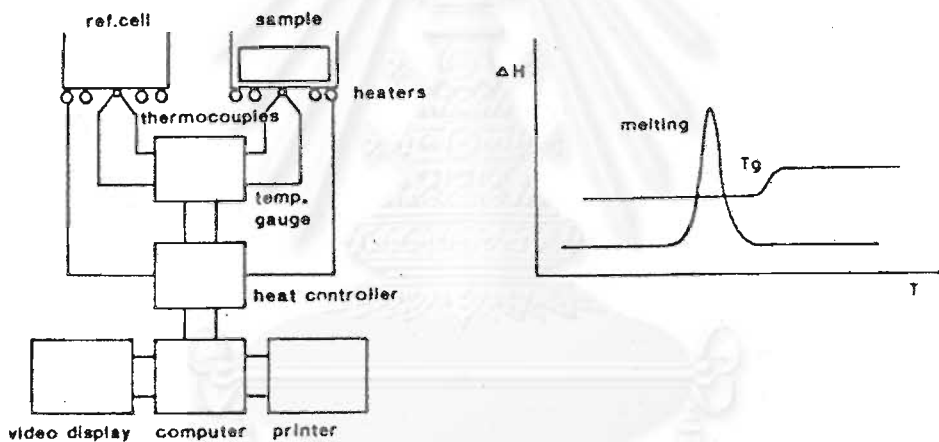


(ค)

รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ A และ B (เส้นทึบ) และที่อัตราส่วนผสม 50:50 ของ A และ B (เส้นประ) [37]

## 2.6.1 ดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจะสัมพันธ์กับการดูดความร้อนหรือคายความร้อนของวัสดุ ซึ่งการดูดหรือคายความร้อนดังกล่าวสามารถวัดได้โดยใช้ calorimetry ซึ่งสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงทั้งที่อัตราการให้ความร้อนคงที่หรือที่อัตราการเย็นตัวที่คงที่ ความแตกต่างของพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงระหว่างวัสดุตัวอย่างกับวัสดุอ้างอิงจะถูกตรวจสอบ เพื่อการให้พลังงานแก่ระบบ เพื่อรักษาให้วัสดุตัวอย่างและวัสดุอ้างอิงมีอุณหภูมิที่เท่ากัน โดยหลักการการทำงานของ DSC จะแสดงในรูปที่ 2.15 โดย DSC สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่างเช่น ใช้ในการตรวจสอบ  $T_g$  หรือ  $T_m$  ระดับการเชื่อมโยงในเทอร์โมเซต เสถียรภาพทางความร้อน ความบริสุทธิ์ และความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม



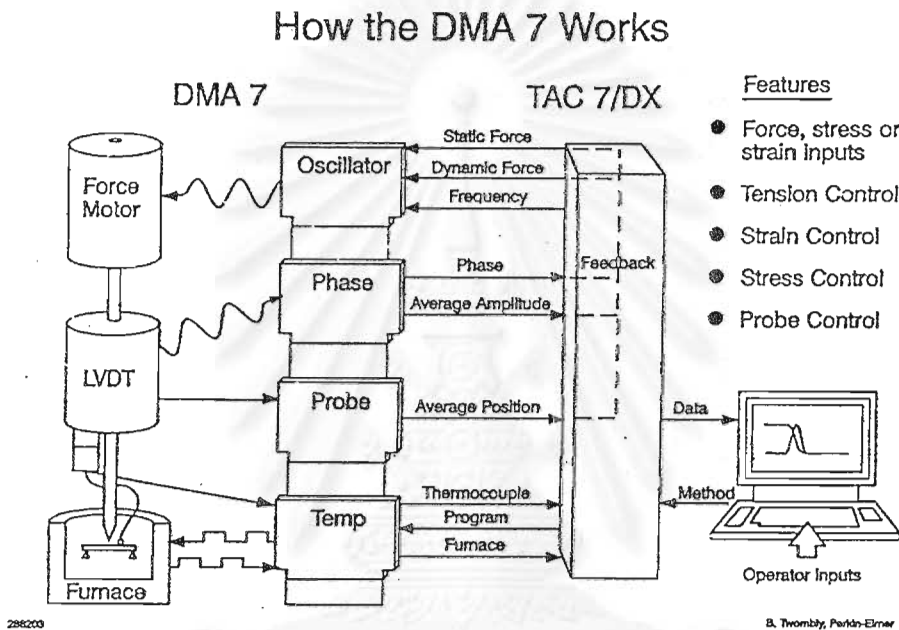
รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของ DSC [38]

## 2.6.2 ไดนามิกส์ แมคคานิคอล อะนาลิซิส (Dynamic Mechanical Analysis, DMA)

DMA เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของขึ้นตัวอย่างภายใต้แรงในรูปของไดนามิกส์ DMA โดยเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิสโคอีลาสติกของวัสดุซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความถี่ และเวลา ในการวัดจะแยกสมบัติของวิสโคอีลาสติกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีลักษณะยืดหยุ่น (การดูดซับพลังงาน) และส่วนที่มีลักษณะไหลหนืด (การกระจายพลังงาน) โดยสองส่วนจะเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ซึ่งจะเป็นลักษณะเด่นของ DMA ที่แตกต่างจากเทคนิคในการตรวจสอบสมบัติเชิงกลอื่น ๆ ลักษณะการทำงานของ DMA จะแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ดังรูปที่ 2.16

คือ (1) ส่วนที่ควบคุมเกี่ยวกับแรงที่จะกระทำต่อชิ้นตัวอย่าง (2) ส่วนที่วัดการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง และ (3) ส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิ

DMA สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้ เช่น ใช้ในการหา  $T_g$  ทำนายสมบัติวัสดุในการนำไปใช้งาน หาความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงกระทำกับสมบัติวิสโคสตี และตรวจสอบความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ฯลฯ



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของ DMA [39]

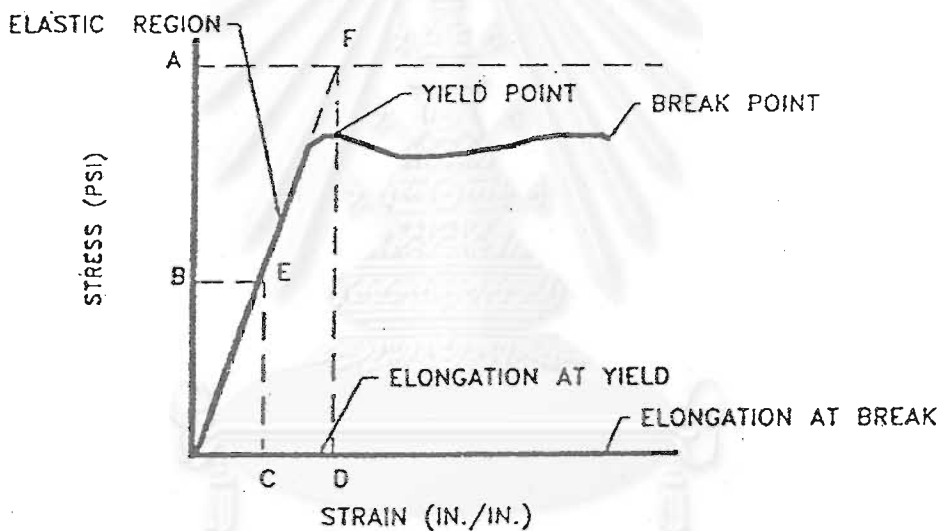
## 2.7 สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

สมบัติเชิงกลของวัสดุเป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากสำหรับงานด้านวิศวกรรม โดยจะเป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุ สมบัติเชิงกลจะเกี่ยวข้องกับความแข็งแรง (strength) ของวัสดุซึ่งต้องแรงกระทำบางอย่าง เมื่อมีแรงมากระทำต่อวัสดุ วัสดุนั้นจะมีความเค้น (stress) และ ความเครียด (strain) เกิดขึ้น การทดสอบสมบัติเชิงกลของพลาสติกมีหลายวิธี แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties) สมบัติความทนแรงกระแทก (impact properties) และสมบัติความทนทานต่อการดัดโค้ง (flexural properties) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลในงานวิจัยนี้

### 2.7.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength)

สมบัติความทนแรงดึงของวัสดุแสดงถึงความต้านทานของวัสดุนั้นต่อการยืด หรือการแตกหักเมื่อมีแรงมากระทำต่อวัสดุ โดยสมบัติความทนแรงดึงมีความสำคัญมากในการแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ ในการทดสอบจะทำการหาแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นทดสอบจนเกิดการแตกหัก และยังเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการยึดดึงของวัสดุก่อนการขาดออกจากกัน

ในการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงนั้นนิยมแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) กับความเครียด (strain) โดยรูปแบบทั่วไปของกราฟความเค้นกับความเครียดสำหรับพลาสติกแสดงดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติก [40]

### 2.7.2 ความทนแรงกระแทก (Impact Strength)

สมบัติความทนแรงกระแทกเป็นการวัดความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุภายใต้แรงกระแทก เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกของวัสดุที่ใช้กันมาก แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบต้อน้ำหนักเหวี่ยงกระแทก ซึ่งอาจใช้การทดสอบแบบอิซอด (izod) หรือแบบชาร์ปี (charpy) และแบบน้ำหนักตกกระทบ

### 2.7.2.1 การทดสอบแบบดุ่มน้ำหนักเหวี่ยงกระแทก

การทดสอบแบบดุ่มน้ำหนักเหวี่ยงกระแทก แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบแบบอิชอด และชาร์ปี ซึ่งทั้ง 2 ประเภทนี้จะใช้ขึ้นทดสอบซึ่งมีลักษณะคล้ายกัน ต่างกันตรงการจัดวางขึ้นทดสอบ โดยขึ้นทดสอบแบบอิชอดจะมีการยึดขึ้นทดสอบที่ด้านหนึ่งของขึ้นทดสอบในแนวตั้ง โดยหันรอยบากเข้าหาทิศทางการกระแทก สำหรับการทดสอบแบบชาร์ปี ขึ้นทดสอบจะถูกวางในแนวนอน และหันรอยบากออกจากทิศทางของการกระแทก

การทดสอบแบบชาร์ปีนั้นเหมาะสำหรับทดสอบที่อุณหภูมิสูงและต่ำกว่าปกติ เนื่องจากการจัดวางขึ้นทดสอบสามารถทำได้ง่ายและสะดวก

### 2.7.2.2 การทดสอบแบบน้ำหนักตกกระแทก

วิธีการนี้ใช้การปล่อยน้ำหนักที่ความสูงต่าง ๆ ลงไปกระแทกขึ้นทดสอบจนเกิดการแตกหัก วิธีนี้เหมาะสำหรับการทดสอบความทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์สำเร็จ เช่น หมวกกันน็อค กระเบื้องพลาสติก เป็นต้น การทดสอบทำได้โดยการปล่อยลูกกลมเหล็กตกกระแทกขึ้นทดสอบ ซึ่งจะเปลี่ยนความสูงหรือมวลของลูกกลมเหล็กไปเรื่อยๆ ค่าความทนแรงกระแทกของวัสดุ คือ ค่าที่น้อยที่สุดของผลคูณของความสูงกับมวลที่ทำให้ขึ้นทดสอบเกิดการแตกหัก

สำหรับวัสดุที่เหนียว การแตกหักอาจมีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ โดยค่าความทนแรงกระแทกไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยตรงสำหรับวัสดุ 2 ชนิดที่มีรูปแบบการแตกหักที่แตกต่างกัน ซึ่งในการรายงานผลจะรายงานแยกจากชิ้นงานที่มีการแตกหักแบบสมบูรณ์ โดยรายงานผลออกมาในรูปแบบการแตกหักแต่ละชนิดดังนี้คือ

Complete break (C) คือ ชิ้นงานที่มีการแตกหักแบบสมบูรณ์ โดยชิ้นงานอาจแตกหักออกเป็น 2 ชิ้น หรือมากกว่า

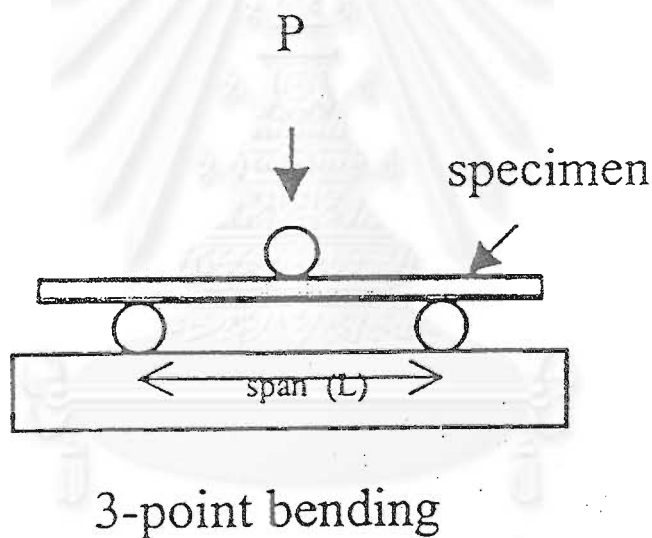
Hinge break (H) คือ ชิ้นงานที่มีลักษณะการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีลักษณะการแตกแบบบานพับ โดยมีมุมภายนอกระหว่างชิ้นงานที่เกิดการแตกหักน้อยกว่า  $90^{\circ}$

Partial break (P) คือ ชิ้นงานที่มีลักษณะการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีปริมาณการแตกหักมากกว่า  $90\%$  ของระยะชิ้นงานระหว่างรอยบากถึงด้านตรงข้าม

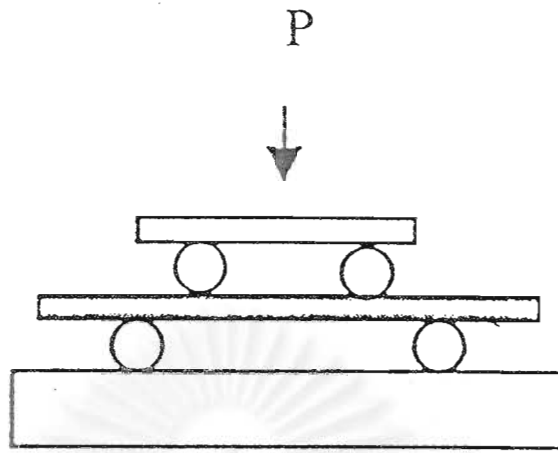
Non-break (NB) คือ ชิ้นงานที่มีลักษณะการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีปริมาณการแตกหักน้อยกว่า 90% ของระยะชิ้นงานระหว่างรอยบากถึงด้านตรงข้าม

### 2.7.3 ความทนแรงดัดโค้ง (Flexural Strength)

สมบัติความทนแรงดัดโค้ง เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความทนต่อแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการดัดโค้ง โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การทดสอบความทนแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด (three point bending) ดังรูปที่ 2.18 และการทดสอบความทนแรงดัดโค้งแบบ 4 จุด (four point bending) ดังรูปที่ 2.19 ในการดัดโค้งขึ้นทดสอบนั้นชิ้นทดสอบจะได้รับทั้งแรงเค้นดึง (tensile stress) และแรงเค้นกด (compressive stress) ดังรูปที่ 2.20

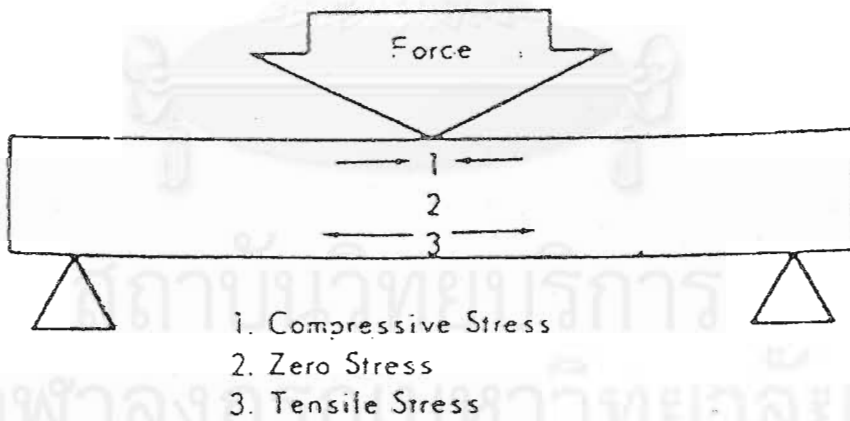


รูปที่ 2.18 การทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด [40]



4-point bending

รูปที่ 2.19 การทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งแบบ 4 จุด [40]



รูปที่ 2.20 แรงเค้นในชั้นทดสอบขณะทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้ง [40]



## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ คือ

1. ไนลอน 6 (PA6) เกรด 1015B ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท UBE NYLON (Thailand) Ltd.,Co มีจุดหลอมเหลว  $215 - 225^{\circ}\text{C}$  และความหนาแน่น  $1.14 \text{ กรัม/ซม.}^3$  โดยในการทดลองนี้ใช้เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์
2. พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ (PP-Co) เกรด Pro-fax 7533 ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เอช เอ็ม ซี โปลิเมอร์ จำกัด โดยมีดัชนีการไหล  $5 \text{ กรัม/10นาที่}$  ความหนาแน่น  $0.9 \text{ กรัม/ซม.}^3$  และมือทิลีน-โพรพิลีน  $8 \%$  เป็นส่วนผสม
3. พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ (PP-MA) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท มิตรชยุ จำกัด โดยมีปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์  $1 \%$  ในโครงสร้าง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้เป็นสารช่วยผสม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างการทดลอง วิเคราะห์ และทดสอบ มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์ / เครื่องมือ	รุ่น	ผู้ผลิต
Co-rotating twin screw extruder	D8017	Collin
Injection moulder	270M 350 – 90	Arburg Allrounder
Universal testing machine	4502	Instron
Impact tester	Ratmana	Itr 2000
Differential scanning calorimeter (DSC)	DSC 7	Perkin Elmer
Dynamic mechanical analyzer (DMA)	DMA 7	Perkin Elmer
Scanning electron microscope (SEM)	JSM 5800 LV	Jeol

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 ขอบเขตการทดลอง

1. ทำการผสมไนลอน 6 (PA 6) พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ (PP-Co) พอลิโพรพิลีนกราฟต์ มาลิกแอโนไฮโดรด์ (PP-MA) ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ด้วยกระบวนการอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder)

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการผสมระหว่าง PA6 PP-Co และ PP-MA

อัตราส่วนผสม (PA6/PP-Co/PP-MA)	ปริมาณ PA6 (wt %)	ปริมาณ PP-MA (phr)
100/0/0 (PA6)	100	0
90/10/0	90	0
80/20/0	80	0
70/30/0	70	0
60/40/0	60	0
50/50/0	50	0
90/10/2	90	2
90/10/5	90	5
90/10/8	90	8
90/10/10	90	10
90/10/12	90	12
90/10/15	90	15
80/20/2	80	2
80/20/5	80	5
80/20/8	80	8
0/100/0 (PP-Co)	0	0

2. นำพอลิเมอร์ผสมมาทดสอบการละลายด้วยวิธี Molau 's Test

3. นำพอลิเมอร์ที่ผสมได้มาขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (injection molding) เพื่อเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติความทนแรงดึง สมบัติความทนแรงกระแทก และสมบัติความทนแรงดัดโค้ง

4. นำชิ้นตัวอย่างมาตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เทคนิค SEM

5. นำชิ้นตัวอย่างที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปมาทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งในภาวะแห้ง และภาวะเปียกเพื่อศึกษาอิทธิพลของภาวะแวดล้อม เช่น น้ำ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

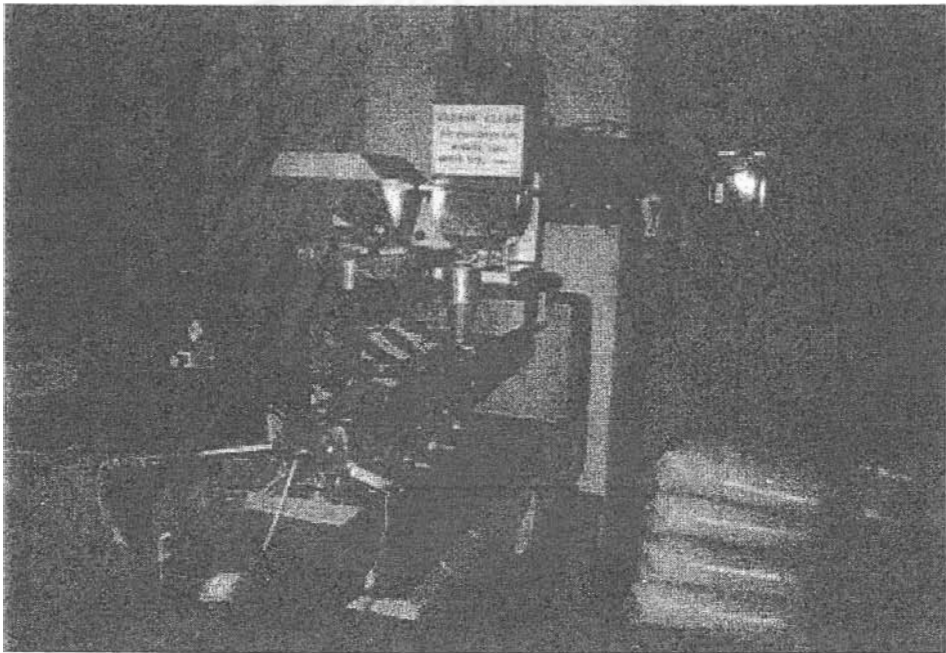
6. นำชิ้นตัวอย่างมาตรวจสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำ

7. นำชิ้นตัวอย่างมาตรวจสอบสมบัติทางความร้อน โดยใช้เทคนิคของ DSC และ DMA

## 8. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 3.3.2 การผสมพอลิเมอร์

อบเม็ด PA6 PP-Co และ PP-MA ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการสลายตัวอันเนื่องมาจากความชื้น (hydrolytic degradation) ในระหว่างกระบวนการผสม จากนั้นจึงนำมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ดังรูปที่ 3.1 ในอัตราส่วนผสม และภาวะในการผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ โดยพอลิเมอร์ผสมหลังจากออกจากหัวดายจะถูกทำให้เย็นทันทีด้วยน้ำแล้วผ่านเข้าเครื่องตัดเม็ดพลาสติก



รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่

ตารางที่ 3.3 ภาวะในกระบวนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่

ภาวะในการผสม	เครื่องอัดรีดสกรูคู่
	PA6/PP-Co/PP-MA
อุณหภูมิในการผสม (°C)	
โซน 1	85
โซน 2	225
โซน 3	225
โซน 4	230
โซน 5	230
โซน 6	235
ความเร็วสกรู (รอบ/นาที)	50

### 3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นตัวอย่าง

อบพอลิเมอร์ผสมแต่ละอัตราส่วนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ดังรูปที่ 3.2 ภายใต้ภาวะที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์แต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 เครื่องฉีดขึ้นรูป

ตารางที่ 3.4 ภาวะในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

ภาวะในการขึ้นรูป	กระบวนการฉีด
	PA6/PP-Co/PP-MA
อุณหภูมิในการขึ้นรูป (°C)	
โซน 1	225
โซน 2	235
โซน 3	240
โซน 4	245
โซน 5	250
อุณหภูมิแม่แบบ (°C)	80
ความดันในการฉีด (บาร์)	600

### 3.3.4 การทดสอบด้วย Molau 's Test

การทดสอบด้วย Molau 's Test เป็นการทดสอบโดยใช้หลักการละลาย กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว ส่วนพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วก็จะละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว โดยในงานวิจัยได้นำได้ทำการศึกษาการละลายพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co และที่อัตราส่วน 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co ซึ่งมีสารช่วยผสมในปริมาณ 15 phr นอกจากนี้ยังทำการละลาย PA6 และ PP-Co เพื่อใช้เป็นสารละลายอ้างอิงในการเปรียบเทียบลักษณะการละลายของพอลิเมอร์ผสม โดยทำการละลายที่อุณหภูมิห้อง ในเวลา 3 ชั่วโมง และใช้กรดฟอร์มิกเป็นตัวทำละลาย

### 3.3.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม สามารถดูได้จากความสามารถในการกระจายตัว หรือความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปคือ Scanning Electron Microscopy (SEM) โดยในการตรวจสอบจะต้องทำการหักชิ้นตัวอย่างซึ่งในที่นี้คือพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co ภายใต้ไมโครเจนเหลว ก่อน หลังจากนั้นจึงทำการสกัดเฟสของ PP-Co ออก โดยใช้สารละลายโทลูอีนที่อุณหภูมิ  $105^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำไปอบให้แห้ง โดยการสกัดเฟสของ PP-Co ออกนั้น จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม หลังจากนั้นในขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการเคลือบทองลงบนพื้นผิวที่จะทำการตรวจสอบ

ภาพที่ได้จากเทคนิคของ SEM สามารถนำมาหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของดิสเพอร์สเฟสโดยใช้โปรแกรมโฟโตชิอป โดยจะวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนของดิสเพอร์สเฟส แล้วนำมาคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวนจากสมการที่ 3.1 [41]

$$D_n = \frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i} \quad (3.1)$$

เมื่อ

$D_n$  = ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวน [41]

$N_i$  = จำนวนอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง  $D_i$

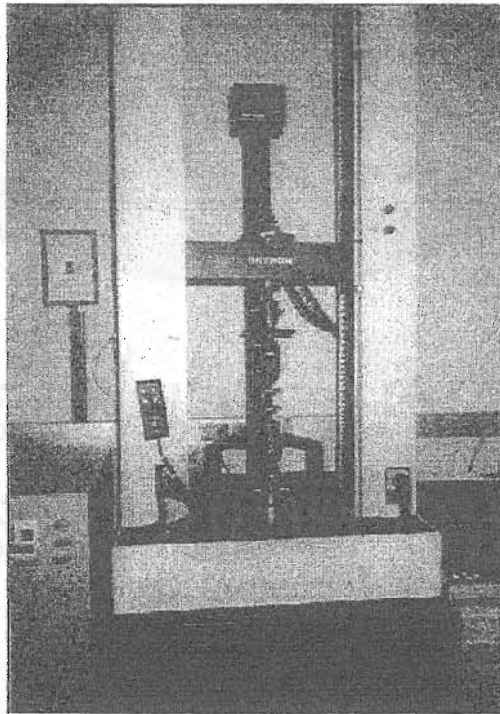
$D_i$  = ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง

### 3.3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 3.3.6.1 การทดสอบความทนแรงดึง

ทดสอบความทนต่อแรงดึง ตามมาตรฐาน ISO 527 (Determination of Tensile Properties) ด้วยเครื่อง universal testing machine ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้ Load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน อัตราเร็วในการดึง 300 มิลลิเมตร/นาที และอุณหภูมิในการทดสอบ 23°C ขึ้นตัวอย่าง จะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลขนาด ยาว 152 มม กว้าง 10.6 มมหนา 3.95 มม ระยะระหว่างตัวจับ ขึ้นงาน (grip distance) 150 มิลลิเมตร และมีความยาว gauge length 50 มิลลิเมตร

ในการทดสอบความทนต่อแรงดึงนี้จะแบ่งภาวะในการทดสอบออกเป็น 2 ภาวะ คือ ภาวะแห้ง และภาวะเปียก โดยในภาวะแห้งนั้นขึ้นตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึงเวลาในการทดสอบ และสำหรับภาวะเปียกขึ้นตัวอย่างจะถูกนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งการดูดซึมน้ำถึงจุดอิ่มตัว แล้วจึงนำมาทดสอบสมบัติความทนแรงดึง



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง



### 3.3.6.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก

การทดสอบความทนแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM 256 (Determination the Pendulum Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics) เพื่อศึกษาถึงความทนของวัสดุว่าจะเกิดการแตกหักหรือไม่ เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุอย่างรวดเร็ว โดยในการทดสอบวัสดุจะถูกยึดอยู่กับที่และจะถูกกระแทกด้วยหัวทดสอบซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งผลที่ได้จะอยู่ในรูปของกราฟระหว่างแรงกับระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เครื่องทดสอบการรับแรงกระแทกของวัสดุนี้ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแรงที่กระทำต่อวัสดุได้ที่พลังงานสูงสุด 500 จูล ความเร็วเคลื่อนที่ของหัวทดสอบสูงสุด 7 เมตร/วินาที ดังรูป 3.4 โดยเครื่องทดสอบนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ระบบนิวมาติกส์ (pneumatic system) แทนการใช้แรงโน้มถ่วงตามธรรมชาติ ในการทดสอบความทนแรงกระแทกนี้จะทำการทดสอบแบบ Izod โดยชิ้นตัวอย่างขนาด  $12.4 \times 63.5 \times 3.5$  มม.<sup>3</sup> จะถูกนำไปทำรอยบากก่อนการทดสอบ สำหรับภาวะในการทดสอบนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ภาวะ เช่นเดียวกับการทดสอบความทนแรงดึง คือ ภาวะแรกจะเป็นภาวะแห้งโดยชิ้นตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในเดซีเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบ ภาวะที่สองจะเป็นภาวะเปียก โดยชิ้นตัวอย่างจะถูกนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งการดูดซึมน้ำถึงจุดอิ่มตัว แล้วจึงนำไปทดสอบความทนแรงกระแทก



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก

### 3.3.6.3 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง แบบ 3 จุด (three point bending) โดยใช้อัตราเร็วหัวกด 20 มิลลิเมตร/นาที และอุณหภูมิในการทดสอบ 23°C ขึ้นตัวอย่างมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด ยาว 63.5 มม กว้าง 12.4 มม หนา 3.5 มม ระยะคานรองรับขึ้นงาน (span length) 50 มิลลิเมตร

ในการทดสอบความทนแรงดัดโค้งนี้จะแบ่งภาวะในการทดสอบออกเป็น 2 ภาวะเช่นกัน คือ ภาวะแห้ง และภาวะเปียก โดยในภาวะแห้งนั้นขึ้นตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึงเวลาในการทดสอบ และสำหรับภาวะเปียกขึ้นตัวอย่างจะถูกนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งการดูดซึมน้ำถึงจุดอิ่มตัว แล้วจึงนำมาทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

### 3.3.7 การตรวจสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ

การตรวจสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของขึ้นตัวอย่างขนาด 12.4x63.5x3.5 มม<sup>3</sup> ตามมาตรฐาน ASTM 570 (Determination of Water Absorption) โดยขึ้นตัวอย่างจะถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ แล้วรอให้เย็นโดยใส่ไว้ในเดซิเคเตอร์จากนั้นนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 23°C แล้วทำการวัดน้ำหนักของขึ้นตัวอย่างเป็นระยะ ๆ จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งความสามารถในการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\% \text{การดูดซึมน้ำ} = \frac{(W_2 - W_1) \times 100}{W_1} \quad (3.2)$$

โดย

$$W_1 = \text{น้ำหนักของขึ้นตัวอย่างภาวะแห้ง}$$

$$W_2 = \text{น้ำหนักของขึ้นตัวอย่างภาวะเปียก}$$

### 3.3.8 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน

#### 3.3.8.1 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC

ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้ Perkin Elmer DSC7 ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้ชิ้นตัวอย่างประมาณ 5 มิลลิกรัม ทดสอบภายใต้ภาวะหลัก 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่หนึ่ง ขึ้นตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนจาก 40°C ถึง 260°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20°C/นาที และคงที่ที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 2 นาที เพื่อเป็นการกำจัดอิทธิพลต่าง ๆ ที่เกิดจากภาวะการขึ้นรูปที่ผ่านมา จากนั้นในขั้นตอนที่สอง ขึ้นตัวอย่างจะถูกทำให้เย็นจาก 260°C ถึง 40°C ด้วยอัตราการเย็นตัว 20°C/นาที และคงที่ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 2 นาที เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดผลึก และในขั้นตอนที่สามซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย ขึ้นตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนจาก 40°C ถึง 260°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20°C/นาที เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิในการหลอมเหลว

นอกจากอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน ( $T_g$ ) อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) แล้ว ผลจาก DSC ยังสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย โดยอาศัยการคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิการหลอมเหลว ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความเป็นผลึก (\%)} &= \frac{H_f^* \times 100}{H_f^\circ} \quad (3.3) \\ \text{(degree of crystallinity, \%)} & \end{aligned}$$

โดย

$H_f^*$  = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนัก (จูล/กรัม)

$H_f^\circ$  = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก 100% สำหรับ PA6 และ PP-Co คือ 163 และ 230 จูล/กรัม ตามลำดับ [42-43]

### 3.3.8.2 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DMA

DMA เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล เช่น มอดุลัส และ  $\tan \delta$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ เวลา ความถี่ ความดัน หรืออิทธิพลร่วมของตัวแปรเหล่านี้ สมบัติเชิงกลที่วัดได้จะเป็นแบบแบบไดนามิกส์ คือ สมบัติเชิงกลของวัสดุขณะที่อยู่ภายใต้แรงที่เป็นช่วง (periodic force) ในการวัดจะแยกสมบัติของวิสโคอิลาสติกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีลักษณะยืดหยุ่น (การดูดซับพลังงาน) และส่วนที่มีลักษณะหนืด (การกระจายพลังงาน) โดยเมื่อให้แรงที่เป็นช่วงกระทำต่อวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ ความเครียดจะเกิดในเฟสเดียวกับความเค้น แต่ถ้าวัสดุมีความหนืดอย่างสมบูรณ์ วัสดุนั้นจะตอบสนองต่อแรงในลักษณะที่ความเครียดเกิดตามหลังเฟสของความเค้นเป็นมุม  $90^\circ$  ในกรณีของวิสโคอิลาสติกความเครียดจะเกิดตามหลังเฟสความเค้นเป็นมุม  $\delta$  โดยที่  $0^\circ < \delta < 90^\circ$  โดยจากสมการที่ 3.4 สามารถใช้ในการคำนวณสมบัติของวัสดุที่เป็นวิสโคอิลาสติกได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค DMA ในการศึกษาความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม และอิทธิพลของน้ำที่มีต่อ  $T_g$  โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงของค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

$$E^* = E' + iE'' \quad (3.4)$$

โดย

Complex modulus ( $E^*$ ) = มอดุลัสของวัสดุที่เป็นวิสโคอิลาสติก

Storage modulus ( $E'$ ) = อัตราส่วนของแอมพลิจูด (amplitude) ของความเค้นต่อความเครียดที่มีเฟสตรงกัน

Loss modulus ( $E''$ ) = อัตราส่วนของแอมพลิจูด (amplitude) ของความเค้นต่อความเครียดที่มีเฟสต่างกัน  $90^\circ$

ค่าที่สำคัญอีกค่าหนึ่ง เรียกว่า ลอส-แทนเจนท์ (loss tangent) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงสัดส่วนของการแสดงสถานะของการเป็นวัสดุไหลหนืดต่อสถานะการยืดหยุ่น หรือ loss modulus ต่อ storage modulus ดังสมการที่ 3.5 นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่า ลอส-แทนเจนท์ ยังใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงจากสถานะแก้วไปสู่สถานะการเป็นยาง หรือสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

เช่น ถ้าชั้นงานมีค่า ลอส-แทนเจนต์สูง แสดงว่าชั้นงานมีลักษณะนิ่มและมีความทนแรงกระแทกสูง  
หรือถ้าชั้นงานมีค่า ลอส-แทนเจนต์ต่ำแสดงว่าชั้นงานมีลักษณะแข็งตึงและมีมอดุลัสสูง

$$\text{loss tangent } (\tan \delta) = E'' / E' \quad (3.5)$$

โดย

$$\text{loss tangent } (\tan \delta) = \text{อัตราส่วนของพลังงานที่สูญเสียไปต่อพลังงานที่เก็บไว้ใน 1 รอบ}$$

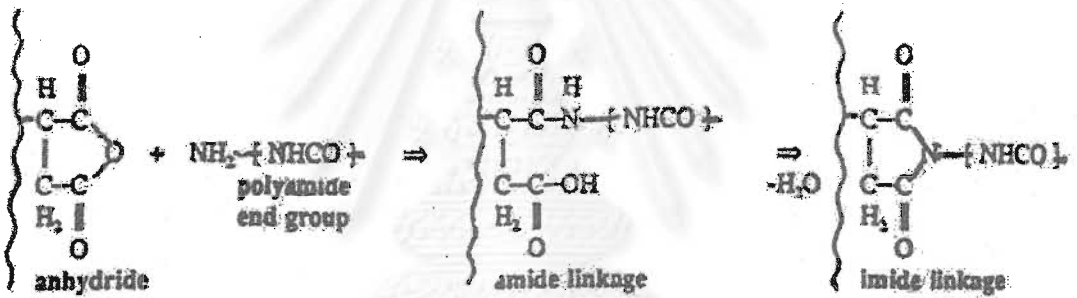


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

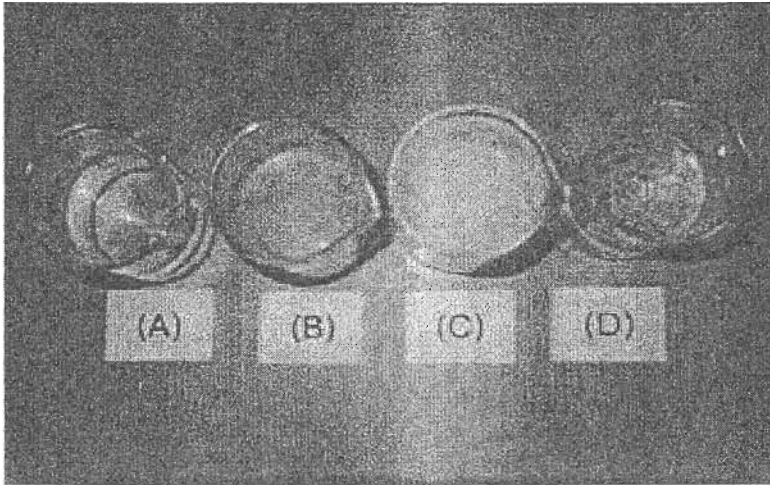
4.1 การทดสอบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมด้วย Molau's Test

PA6 และ PP-Co เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ PP-MA เป็นสารช่วยผสม เมื่อสารช่วยผสมถูกเติมลงไปในการผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co หมู่มาลิกแอนไฮไดรด์ของสารช่วยผสมจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของ PA6 ในระหว่างกระบวนการผสม เกิดเป็นไนลอนกราฟต์พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ (PA6-g-PP) โดยโคพอลิเมอร์ดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมที่แท้จริง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารช่วยผสมกับ PA6 [36]

การเกิดของ PA6-g-PP สามารถตรวจสอบเบื้องต้นได้โดยใช้หลักการละลาย กล่าวคือ สารที่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว ส่วนสารที่ไม่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเช่นกัน ดังรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อเติมกรดฟอร์มิกลงใน PA6 และ PP-Co พบว่า PA6 สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 1-3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.2 (A) ในขณะที่ PP-Co จะไม่ละลายโดยจะลอยอยู่ด้านบนของสารละลาย ดังรูปที่ 4.2 (D) ทั้งนี้เนื่องมาจากสารละลายฟอร์มิกมีพารามิเตอร์การละลายที่ไม่เหมาะสมกับ PP-Co และเมื่อเติมกรดฟอร์มิกลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co พบว่าเฟสของ PA6 สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่เฟสของ PP-Co จะเกิดการแยกเฟสลอยอยู่ด้านบนของสารละลาย ดังรูปที่ 4.2(B) แต่ในทางตรงกันข้ามสำหรับระบบที่มีการเติม PP-MA พบว่าสารละลายมีลักษณะเป็นอิมัลชัน ดังรูปที่ 4.2(C) โดย PA6-g-PP จะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟสทำให้สารละลายที่ได้มีลักษณะเป็นอิมัลชัน



รูปที่ 4.2 ลักษณะการละลายของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม PA6/PP-Co/PP-MA ต่าง ๆ (A) 100/0/0 (B) 90/10/0 (C) 90/10/15 และ (D) 0/100/0

#### 4.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

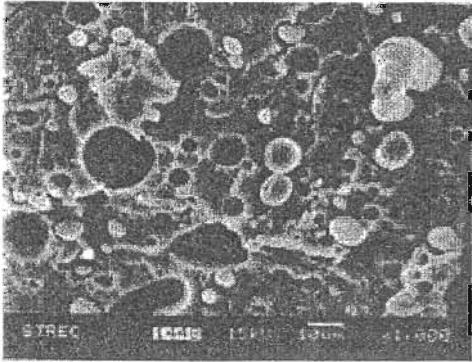
SEM (Scanning Electron Microscopy) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากในการศึกษา สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยทั่วไปสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นกับภาวะของแรง ที่กระทำจากเครื่องผสม ความหนืดของแต่ละองค์ประกอบ และแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัส (interfacial tension) ของเมทริกซ์กับดิสเพอร์สเฟส โดยเฉพาะแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสจะเป็น ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค SEM ในการ ศึกษาความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co และ ความสามารถในการกระจายตัวของดิสเพอร์สเฟส ซึ่งในที่นี้คือ PP-Co โดยในการตรวจสอบจะนำชิ้น งานมาหักภายใต้ไมโครเจนเหลวแล้วนำชิ้นงานดังกล่าวไปเคลือบทอง จากนั้นจึงนำไปตรวจสอบ ด้วยเทคนิค SEM จากภาพ SEM ที่อัตราส่วนผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co ในอัตราส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 (ก-ง) พบว่า สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมี ลักษณะหยาบโดย PP-Co ซึ่งเป็นดิสเพอร์สเฟส (อนุภาคสีขาว) มีลักษณะใหญ่ขึ้นตามปริมาณ ของ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มของขนาด PP-Co เกิดจากการรวมกลุ่มกันของ PP-Co เพื่อลด พื้นที่ระหว่างผิวสัมผัส (interfacial area) ซึ่งจะเป็นการลดแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสด้วย พฤติกรรมดังกล่าวจะเป็นไปตามหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ นอกจากนี้ยังพบว่าระหว่างผิว สัมผัสมีแรงดึงดูดกันที่ต่ำมากโดยอาจดูได้จากการเกิดช่องว่างเล็ก ๆ รอบ ๆ อนุภาคของ PP-Co ซึ่งการมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำเป็นผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า fiber pull out

ลักษณะฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นชัดว่า PA6 และ PP-Co ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ แต่ที่อัตราส่วนผสม 60/40 และ 50/50 ของ PA6 ต่อ PP-Co โดยน้ำหนัก พบว่าการตรวจสอบลักษณะของแต่ละเฟสเป็นไปได้ยาก วิธีหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคดังกล่าวในการแก้ปัญหาสำหรับการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM

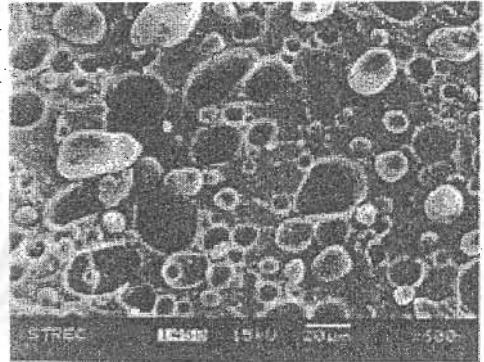
เทคนิคการสกัดดิสเพอร์สเฟสด้วยตัวทำละลาย เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยิยมใช้ในการเพิ่มความแตกต่างของแต่ละเฟสในพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เพื่อประสิทธิภาพในการตรวจสอบฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดขนาดของดิสเพอร์สเฟสได้อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้จะทำการหักชั้นทดสอบภายใต้ไนโตรเจนเหลว แล้วนำชิ้นงานที่หักได้มาสกัดเฟส PP-Co ซึ่งเป็นดิสเพอร์สเฟสออกด้วยสารละลายโทลูอีนที่อุณหภูมิ  $105^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากภาพ SEM ที่อัตราส่วนผสม 90/10 80/20 70/30 60/40 และ 50/50 ของ PA6 ต่อ PP-Co ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4 (ก-จ) โดยช่องว่างซึ่งมีลักษณะสีดำจะแสดงถึงเฟสของ PP-Co ที่ถูกสกัดออกไป โดยพบว่า PP-Co จะมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ และมีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

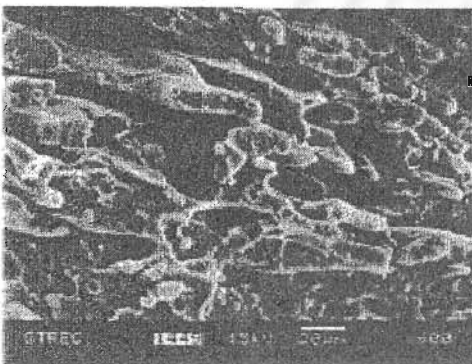




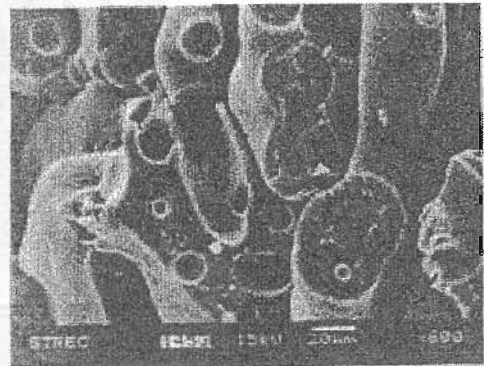
(ก)



(ข)

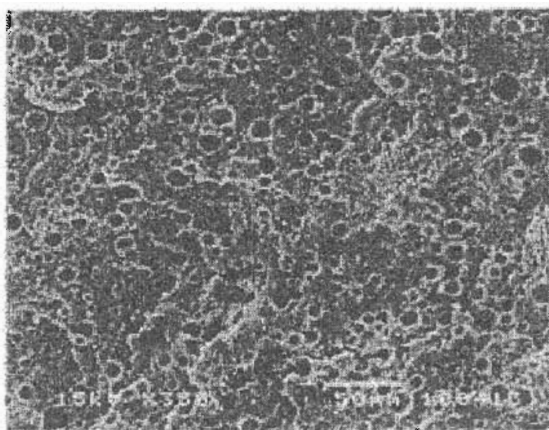


(ค)

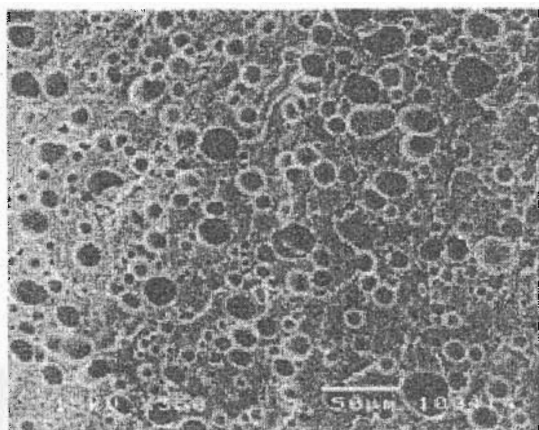


(ง)

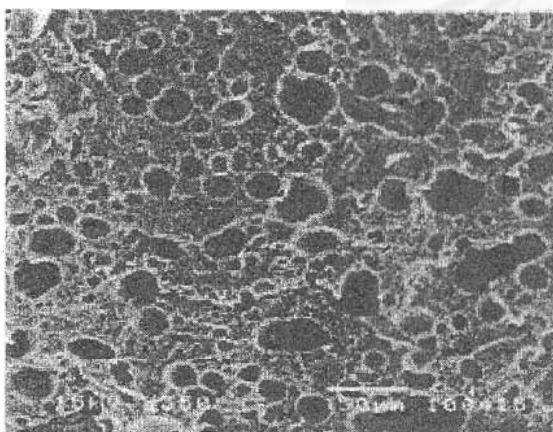
รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6/PP-Co ที่อัตราส่วน (ก) 80/20 (ข) 70/30 (ค) 60/40 และ (ง) 50/50



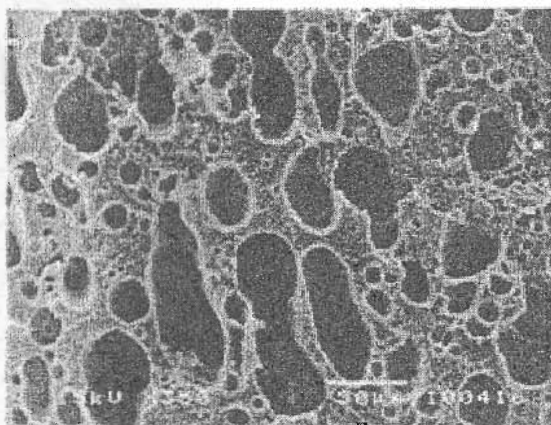
(ก)



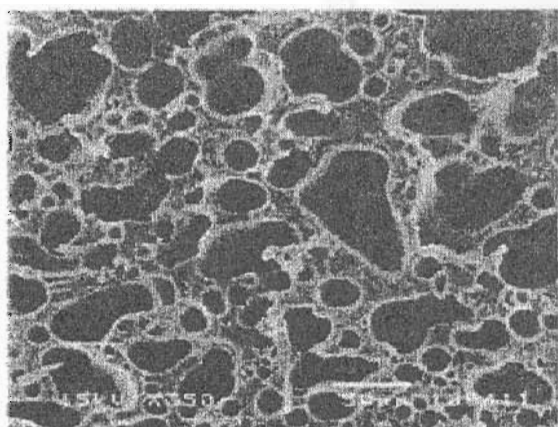
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6/PP-Co ที่อัตราส่วน (ก) 90/10 (ข) 80/20 (ค) 70/30 (ง) 60/40 และ (จ) 50/50 ที่เตรียมจากการสกัดดีสเพอร์สเฟสด้วยสารละลายโทลูอีน

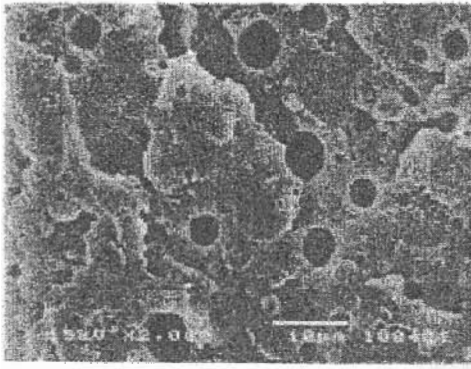
ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของดิสเพอร์สเฟสเฉลี่ยโดยจำนวน ( $D_n$ ) ของ PA6/PP-Co

PA6/PP-Co	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยจำนวน ( $\mu\text{m}$ )
90/10	3.9
80/10	6.64
70/30	9.44
60/40	14.05
50/50	14.89

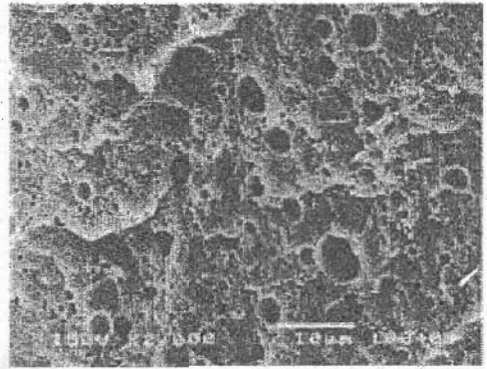
การที่อนุภาคของ PP-Co มีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาค PP-Co เพื่อลดแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัส โดยการลดพื้นที่ในการสัมผัสกันของแต่ละเฟส ลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า PA6 และ PP-Co ไม่สามารถผสมเข้ากันได้

สำหรับในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาที่ 2 อัตราส่วน คือ 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 2, 5, 8, 10, 12 และ 15 phr ดังรูปที่ 4.5 (ก-จ) และที่อัตราส่วนผสม 80% PA 6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก และใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 2, 5 และ 8 phr ดังในรูปที่ 4.6 (ก-ค) การเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสมจะมีผลทำให้อนุภาคของ PP-Co มีขนาดเล็กลงตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.2

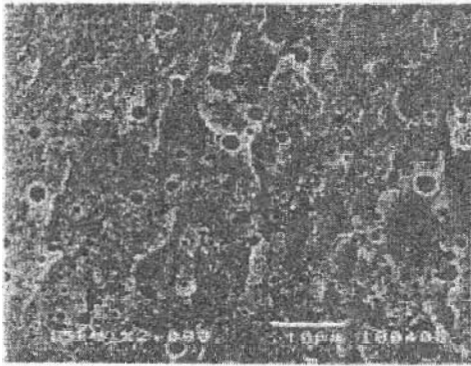
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



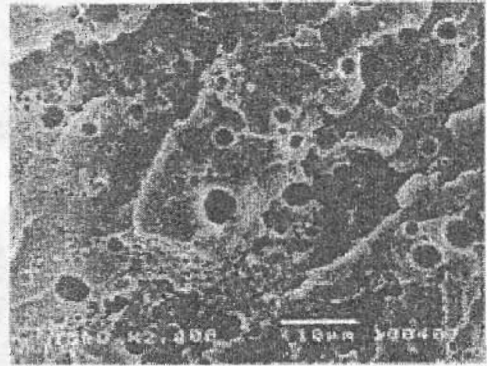
(ก)



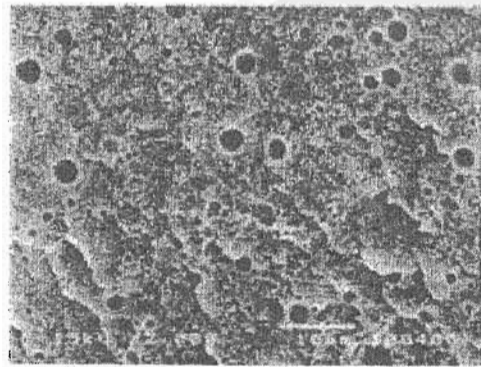
(ข)



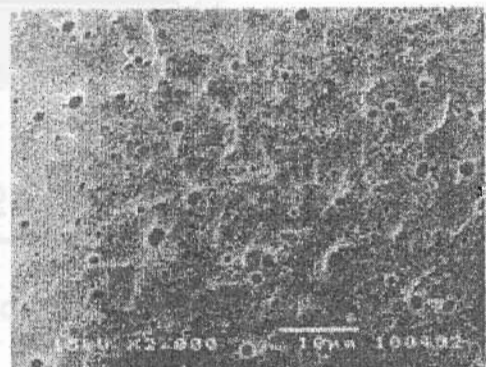
(ค)



(ง)

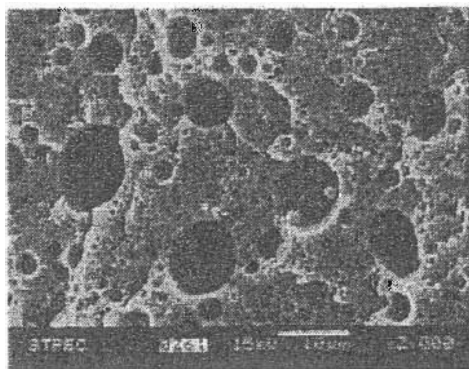


(จ)

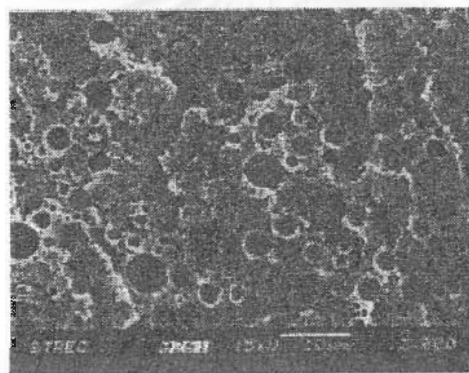


(ฉ)

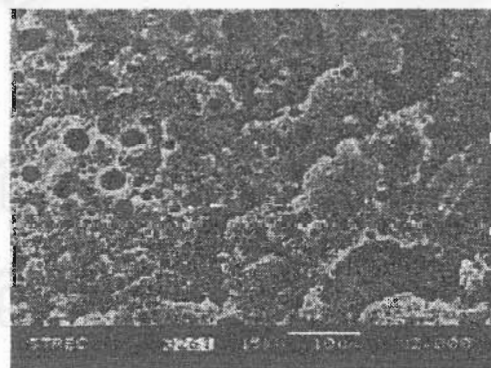
รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6/PP-Co ที่อัตราส่วน 90/10 โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณที่ต่างต่างกัน (ก) 2 (ข) 5 (ค) 8 (ง) 10 (จ) 12 และ (ฉ) 15 phr



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6/PP-Co ที่อัตราส่วน 80/20 โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) 2 (ข) 5 และ (ค) 8 phr

ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคของดิสเพอร์สเฟสเฉลี่ยโดยจำนวน ( $D_n$ ) ในระบบที่มีสารช่วยผสม

PA 6/PP-Co/PP-MA	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยจำนวน ( $\mu\text{m}$ )
90/10/0	3.9
90/10/2	1.37
90/10/5	0.64
90/10/8	0.36
90/10/10	0.4
90/10/12	0.38
90/10/15	0.22
80/20/0	6.64
80/20/2	2.5
80/20/5	1.2
80/20/8	0.75

ขนาดอนุภาค PP-Co มีแนวโน้มลดลงมากในช่วงแรก คือ ที่อัตราผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 2 และ 5 phr ซึ่งการลดลงของขนาดดิสเพอร์สเฟสนี้เป็นการแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) โดยการเพิ่มขึ้นของแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสจะเป็นผลมาจากหมู่มาลิกแออนไฮโดรด์ของสารช่วยผสมไปทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีน หรือหมู่เอไมด์ของ PA6 เกิดเป็นโคพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 4.1 โดยโคพอลิเมอร์ดังกล่าวจะประกอบด้วยทั้งส่วนที่เป็น PA6 และส่วนที่เป็น PP-Co ซึ่งจะทำหน้าที่คล้ายกับเป็นสะพานเชื่อมระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟสที่ไม่สามารถเข้ากันได้ โดยจะไปลดแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสทำให้ดิสเพอร์สเฟสมีขนาดเล็กลง และมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ PP-Co มีการกระจายที่สม่ำเสมอและมีความสามารถในการเข้ากันได้กับ PA6 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมต่อไปในปริมาณ 8-15 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับปริมาณของดิสเพอร์สเฟส พบว่า PP-Co มีอัตราการลดลงของขนาดดิสเพอร์สเฟสที่ลดลง ขณะที่สารช่วยผสมที่เติมลงไปยังคงมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับหมู่เอไมด์ของ PA6 เกิดเป็นโคพอลิเมอร์แต่โคพอลิเมอร์ดังกล่าวมีผลต่อการลดลงของขนาด PP-Co น้อยลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระบบดังกล่าวมีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ใกล้ถึงจุดสูงสุด เป็นผลให้ปริมาณของสารช่วยผสมที่เติมลงไปมีผลต่อการลดลงของขนาด PP-Co น้อยลง ส่วนที่อัตราส่วนผสม

80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก พบว่าการลดลงของขนาด PP-Co เป็นไปตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้นจาก 2-8 phr

#### 4.3 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

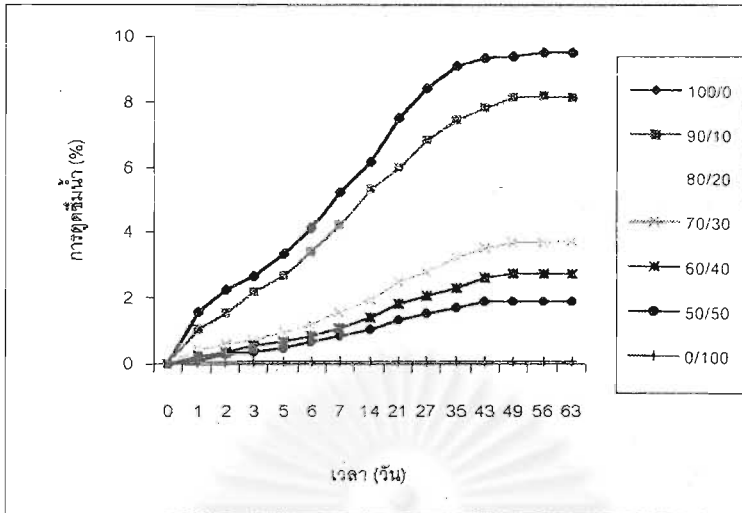
PA6 เป็น hydrophilic polymer ที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำสูง ทั้งนี้เป็นผลมาจาก หมู่เอมีน หรือหมู่เอไมด์ที่อยู่ในโครงสร้างของ PA6 มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้เป็นอย่างดี โดยในการทดสอบจะนำชิ้นทดสอบ ขนาด  $12.4 \times 63.5 \times 3.5$  มม<sup>3</sup> มาอบแห้งที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ  $23^{\circ}\text{C}$  แล้วนำมาหาค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปเป็นระยะ ๆ จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา 2 ปัจจัย ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม คือ ผลของ PP-Co และ PP-MA ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

##### 4.3.1 ผลของ PP-Co ต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาผลของ PP-Co ที่เติมลงไปให้อัตราส่วนต่าง ๆ ต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อปริมาณของ PP-Co เพิ่มขึ้นจาก 0-50 % โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลงจาก 9.51% เป็น 1.92% โดยการลดลงของความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมจะเป็นไปตามปริมาณ PA6 ที่ลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณของหมู่เอมีน หรือหมู่เอไมด์ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำมีปริมาณลดลง เป็นผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

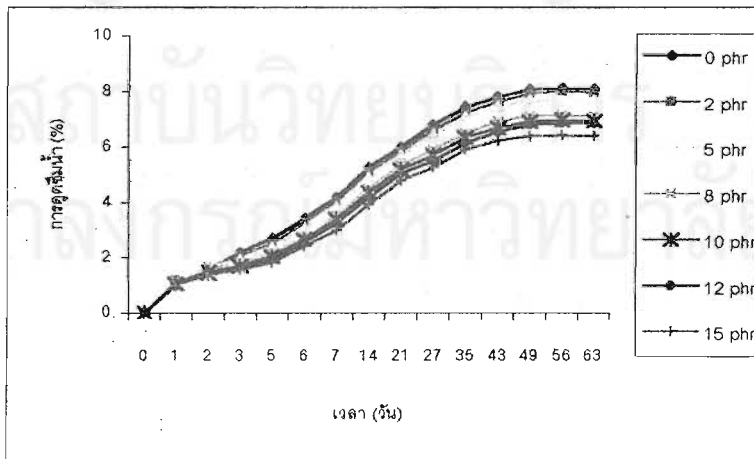




รูปที่ 4.7 ผลของ PP-Co ต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6/PP-Co

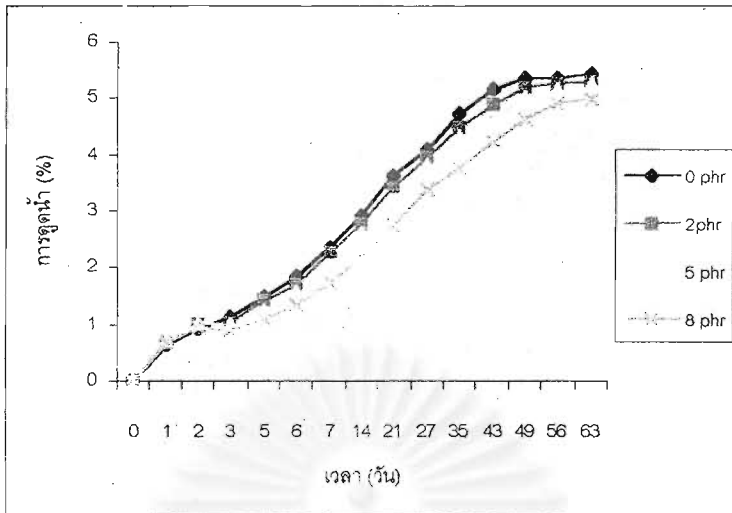
4.3.2 ผลของสารช่วยผสมต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาผลของ PP-MA ที่เติมลงไปในอัตราส่วนผสม 90% ต่อ 10% และ 80% ต่อ 20% ของ PA6 ต่อ PP-Co โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ พบว่า การเติม PP-MA เป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลง โดยเป็นผลมาจากหมู่มาลิกแออนไฮโดรด์ของ PP-MA จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีน หรือหมู่เอไมด์ของ PA6 เป็นผลให้จำนวนหมู่เอไมด์อิสระลดลงทำให้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำลดลง จากปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลง



รูปที่ 4.8 ผลของสารช่วยผสมต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 / 10% PP-Co





รูปที่ 4.9 ผลของสารช่วยผสมต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 / 20% PP-Co

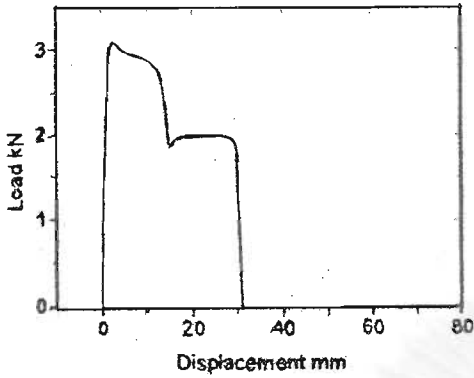
#### 4.4 สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

สมบัติเชิงกลของวัสดุเป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากในการเลือกใช้งานของวัสดุชนิดต่าง ๆ โดยจะเป็นปัจจัยร่วมที่สำคัญในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยทั่วไปมีหลายด้านด้วยกัน เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ความแข็งตึง ความเหนียว และความแข็ง เป็นต้น โดยศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งไม่ว่าแรงนั้นจะอยู่ในรูปแบบใดก็ตามย่อมทำให้เกิดความเค้น (stress) และ/หรือความเครียด (strain) ขึ้นกับวัสดุ ซึ่งเป็นผลมาจากการตอบสนองของวัสดุต่อแรงที่มากระทำ โดยความเค้นจะเป็นแรงต้านทานภายในของวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างซึ่งแรงต้านทานนี้จะกระจายสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่รับแรงนั้น ด้วยเหตุนี้ ความเค้นจึงมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของแรงที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ( $F/A$ ) ส่วนความเครียดจะเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างในทิศทางของแรงที่มากระทำ โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องมาจากการยืดหรือหดต่อความยาวเดิมของวัสดุก่อนถูกแรงกระทำ ( $\Delta L/L$ )

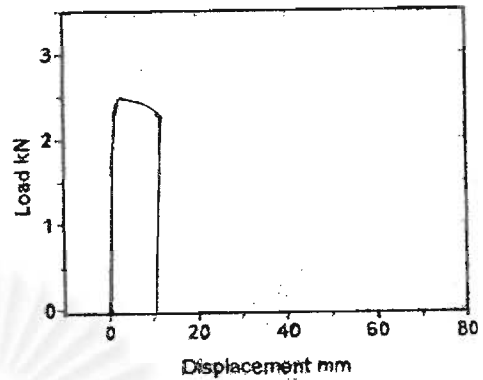
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co โดยมี PP-MA เป็นสารช่วยผสมในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ โดยทำการทดสอบความทนแรงดึง (tensile strength) ความทนแรงกระแทก (impact strength) และความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) เปรียบเทียบระหว่างภาวะเปียกและภาวะแห้งของชิ้นทดสอบ สำหรับในภาวะเปียกนั้น ชิ้นทดสอบถูกนำมาแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งความสามารถในการดูดซึมน้ำถึงจุดอิ่มตัว ส่วนในภาวะแห้งชิ้นทดสอบถูกนำมาอบแห้ง และนำมาเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์จนกระทั่งทดสอบ

#### 4.4.1 พฤติกรรมความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

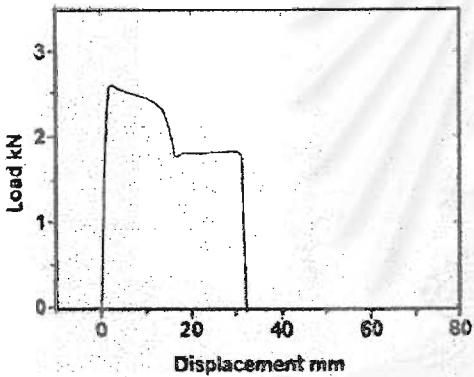
พฤติกรรมความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co โดยใช้ PP-MA เป็นสารช่วยผสม แสดงดังรูปที่ 4.10 (ก-ง) ในรูป 4.10 (ก) ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงพฤติกรรมความทนแรงดึงของ PA6 พบว่ากราฟมีลักษณะค่อนข้างชัน และเป็นเส้นตรงในช่วงแรก โดยเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook 's Law) กล่าวคือ ความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด โดยชิ้นงานจะรับแรงสูงสุดที่จุดคราก (yield point) ซึ่งเป็นจุดที่ความเครียดเพิ่มขึ้นโดยความเค้นไม่เปลี่ยนแปลง จุดดังกล่าวเป็นจุดที่ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (plastic deformation) อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานอย่างถาวร โดยชิ้นงานเริ่มมีการคอดที่บริเวณส่วนกลางของชิ้นงานซึ่งเรียกพฤติกรรมดังกล่าวว่า การคอด (necking) ต่อจากนั้นความเค้นจะลดลงและเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง พฤติกรรมดังกล่าวเรียกว่า การดึงแบบเย็น (cold drawing) จนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกหัก ในรูป 4.10 (ข) เป็นกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง 90% PA6 และ 10% PP-Co ซึ่งมีลักษณะกราฟคล้ายกับรูป 4.10 (ก) แต่ความทนแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานต่ำกว่าในรูปแรก และไม่มีลักษณะการดึงแบบเย็น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการไม่มีแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัส ส่วนในรูป 4.10 (ค) ซึ่งเป็นกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง 90% PA6 และ 10% PP-Co ซึ่งใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 2 phr กราฟมีลักษณะการดึงแบบเย็นเกิดขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากผลสารช่วยผสมที่ช่วยเพิ่มแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟสทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการยืดดึงที่สูงขึ้น ส่วนในรูป 4.10 (ง) เป็นกราฟความทนแรงดึงของ PP-Co โดยกราฟมีลักษณะความชัน และความทนแรงดึงสูงสุดต่ำลง แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีความแข็งแรงและความแข็งดึงลดลง



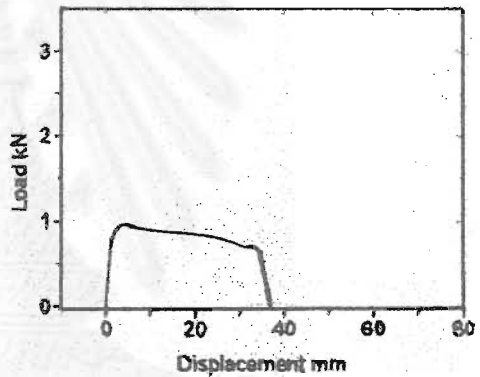
(ก)



(ข)



(ค)

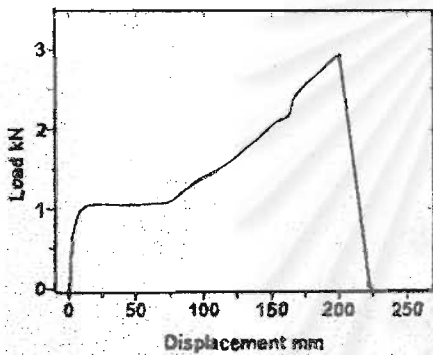


(ง)

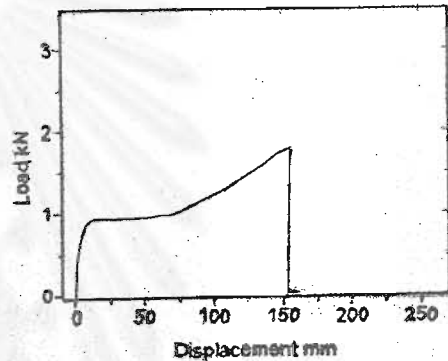
**รูปที่ 4.10** พฤติกรรมความทนแรงดึงในภาวะแห้งของ (ก) PA6 (ข) 90% PA6 และ 10% PP-Co (ค) 90% PA6 และ 10% PP-Co โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 2 phr (ง) PP-Co

ส่วนพฤติกรรมความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียก ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก-ง) นั้นพบว่า ความทนแรงดึงของ PA6 มีลักษณะความชันและความทนแรงดึงที่จุดครากต่ำกว่าในภาวะแห้งมาก และภายในกราฟมีลักษณะของการดึงแบบเย็นในช่วงแรก ต่อจากนั้นกราฟจะมีลักษณะความชันเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง ดังรูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของขั้นทดสอบภายหลังการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวโดยการสูงขึ้นของกราฟในช่วงนี้เป็นผลมาจากการยึดดึงบริเวณส่วนปลายของชิ้นงานทั้งสองข้างซึ่งเป็นบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ทำให้ต้องใช้แรงในการดึงสูงขึ้นเป็นผลให้กราฟมีลักษณะที่สูงขึ้น ในรูปที่ 4.11 (ข-ค) เป็นกราฟความทนแรงดึงของ 90% PA6 /

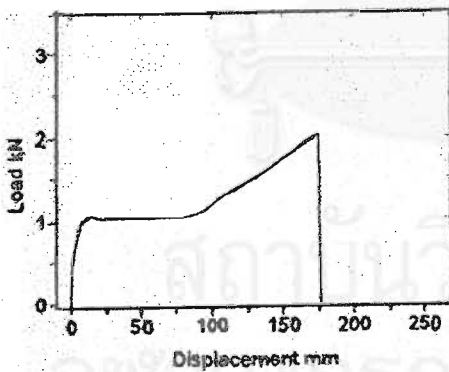
10% PP-Co และ 90% PA6 / 10% PP-Co โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 2 phr ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่ในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสมจะมีความสามารถในการยืดดึงสูงกว่าในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการปรับปรุงแรงดึงจุดระหว่างผิวสัมผัสจากการเติมสารช่วยผสม ส่วนในรูป 4.11 (ง) แสดงพฤติกรรมความทนแรงดึงของ PP-Co พบว่ากราฟมีความทนแรงดึงที่จุดครากใกล้เคียงกับชุดทดสอบอื่น ๆ แต่มีความสามารถในการยืดดึงต่ำกว่าชุดทดสอบอื่น ๆ มาก แสดงให้เห็นว่าน้ำไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติความทนแรงดึงของ PP-Co โดยดูได้จากความทนแรงดึงและความสามารถในการยืดดึงของ PP-Co มีค่าใกล้เคียงกันทั้งในภาวะเปียกและภาวะแห้ง



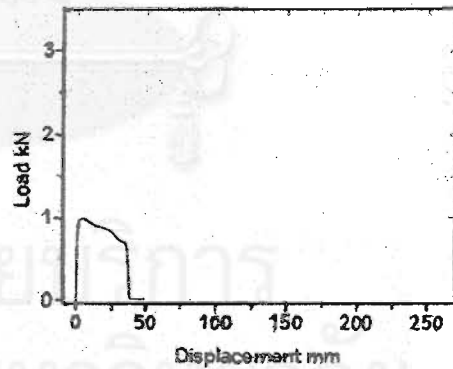
(ก)



(ข)

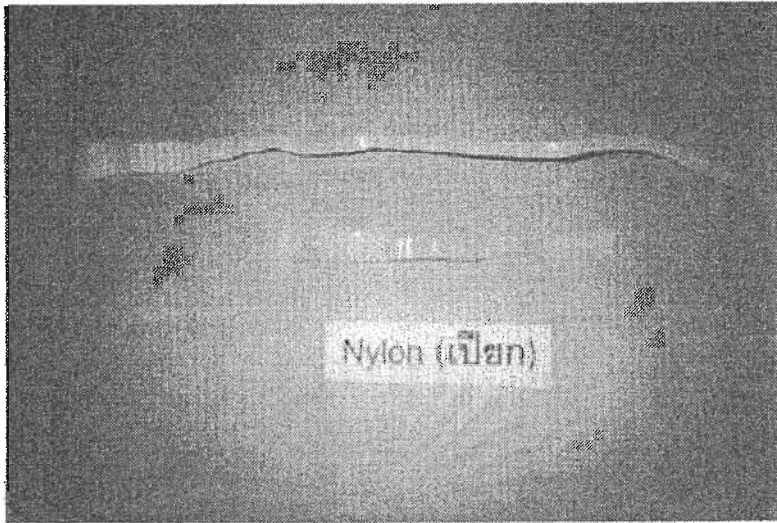


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.11 พฤติกรรมความทนแรงดึงในภาวะเปียกของ (ก) PA6 (ข) 90% PA6 และ 10% PP-Co (ค) 90% PA6 และ 10% PP-Co โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 2 phr (ง) PP-Co



รูปที่ 4.12 ลักษณะขึ้นทดสอบของ PA6 ในภาวะเป็ยกเมื่อผ่านการยืดดึง

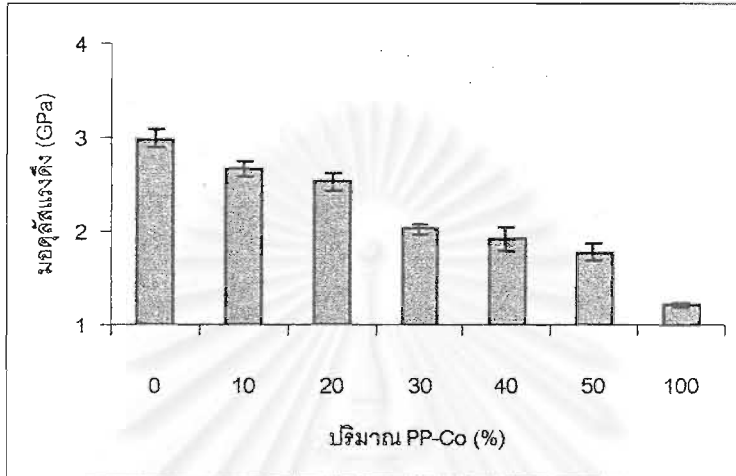
#### 4.4.2 ความทนแรงดึง (Tensile Strength)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณ PP-Co และสารช่วยผสมที่มีต่อมอดุลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และความสามารถในการยืดดึงสูงสุด (strain at break) ของพอลิเมอร์ผสม โดยมอดุลัสของความยืดหยุ่น เป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดอีลาสติก ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า ยังส์มอดุลัส ส่วนความสามารถในการยืดดึงสูงสุด จะเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นทดสอบในทิศทางที่แรงมากกระทำจากจุดเริ่มต้นจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกหัก โดยสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นกับพอลิเมอร์ที่เป็นเมทริกซ์เป็นหลัก

##### 4.4.2.1 ผลของ PP-Co ต่อสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

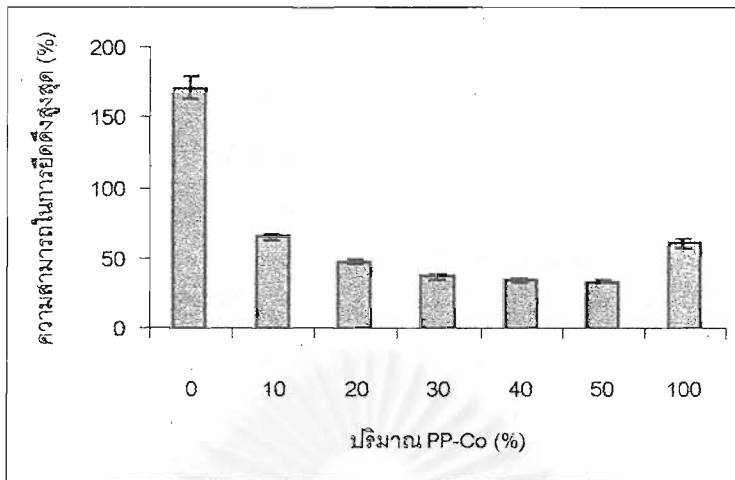
สำหรับในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่าในภาวะแห้งมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมจะลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 50% PP-Co ดังรูปที่ 4.13 ทั้งนี้เนื่องมาจากความสามารถในการเข้ากันได้ที่ดีระหว่าง PA6 และ PP-Co ทำให้มีแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำ และขนาดของดิสเพอร์สซึ่งก็คือ PP-Co มีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงทำให้ฐานวิทยาศาสตร์ของพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะหยาบ มีการกระจายตัวของดิสเพอร์สเฟสที่ไม่สม่ำเสมอ และมีช่องว่างเล็ก ๆ (micro void) รอบ ๆ อนุภาคของดิสเพอร์สเฟส หรืออาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณ PP-Co เท่ากับเป็นการเพิ่มจุดอ่อนแอภายในชิ้นงาน ทำให้มอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง โดยสอดคล้องกับ

กฎการผสม (rule of mixture) เนื่องจากมอดุลัสแรงดึงของ PA6 มีค่าสูงกว่า PP-Co ดังนั้นการเติม PP-Co เข้าไปในระบบการผสมจะเป็นผลให้มอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น



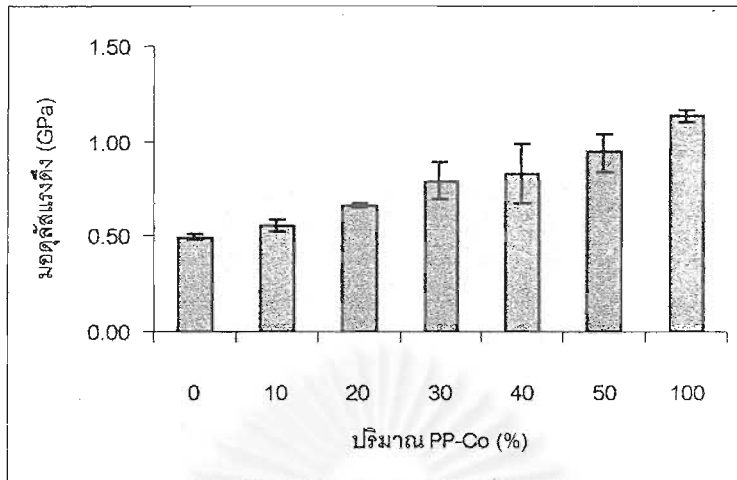
รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณ PP-Co ต่อมอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง

นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะของสันฐานวิทยาดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการยึดดึงของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเป็นสมบัติที่ขึ้นกับขนาดของดิสเพอร์สเฟสและแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟสเป็นสำคัญ ดังรูปที่ 4.14 พบว่าความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมจะลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น จาก 0 ถึง 50% PP-Co เช่นกัน โดยเป็นผลมาจากแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำ และขนาดอนุภาคของ PP-Co ที่ใหญ่ ซึ่งจะไปขัดขวางการเกิดการยึดดึงแบบเย็นในระหว่างการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (plastic deformation) เป็นผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการยึดดึงสูงสุดลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น และในทำนองเดียวกันการลดลงของความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมจะเป็นไปตามกฎการผสม ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการยึดดึงของ PA6 มีค่าสูงกว่า PP-Co ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ PP-Co จะเป็นผลให้ความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง



รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณ PP-Co ต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง

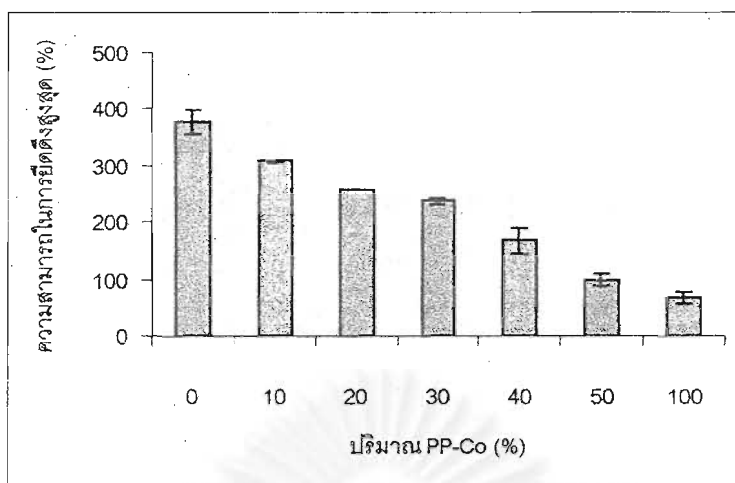
ส่วนในภาวะเปียกน้ำที่ PA6 ดูดเข้าไปภายในขึ้นทดสอบจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยจะไปเพิ่มปริมาตรอิสระ (free volume) ภายในโครงสร้างเป็นผลให้โมเลกุลของ PA6 สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ทำให้อดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียกมีค่าต่ำกว่าอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง และถ้าเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่น ๆ พบว่าอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น จาก 0 ถึง 50% PP-Co ดังรูปที่ 4.15 โดยเป็นผลมาจากอดูลัสแรงดึงในภาวะเปียกของ PP-Co มีค่าสูงกว่า PA6 ค่อนข้างมาก เนื่องจาก PP-Co เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณ 100% ของ PP-Co นั้น ค่าอดูลัสแรงดึงในภาวะเปียกและภาวะแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 1 GPa ในขณะที่ในภาวะเปียกนี้ค่าอดูลัสแรงดึงของ PA6 ลดลงจาก 3 GPa ในภาวะแห้งเหลือเพียง 0.5 GPa ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ PP-Co จะเป็นผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลง ทำให้เหมือนกับว่าเฟสของ PA6 ถูกเสริมแรงด้วยเฟสของ PP-Co เป็นผลให้อดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น โดยเป็นไปตามกฎการผสม กล่าวคือในภาวะเปียก PA6 มีอดูลัสแรงดึงต่ำกว่า PP-Co ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ PP-Co ในระบบการผสมจะเป็นผลให้อดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 ผลของปริมาณ PP-Co ต่อมอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียก

ส่วนสมบัติในด้านความสามารถในการยึดดึงสูงสุด พบว่าความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียก มีค่าสูงกว่าความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง จากที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นน้ำที่ PA6 ดูดเข้าไปจะมีผลทำให้โมเลกุลของ PA6 สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้นและยังช่วยในการเกิดการยึดดึงแบบเย็น ทำให้ในภาวะเปียกพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการยึดดึงสูงสุดที่สูงกว่าในภาวะแห้ง แต่เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมแต่ละอัตราส่วนในภาวะเปียก พบว่าความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมจะลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น คือจาก 0 ถึง 50% PP-Co ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน โดยเป็นผลมาจากความไม่ชอบน้ำของ PP-Co ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ PP-Co จะเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็น hydrophobic หรือมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลงซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น





รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณ PP-Co ต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปื่อย

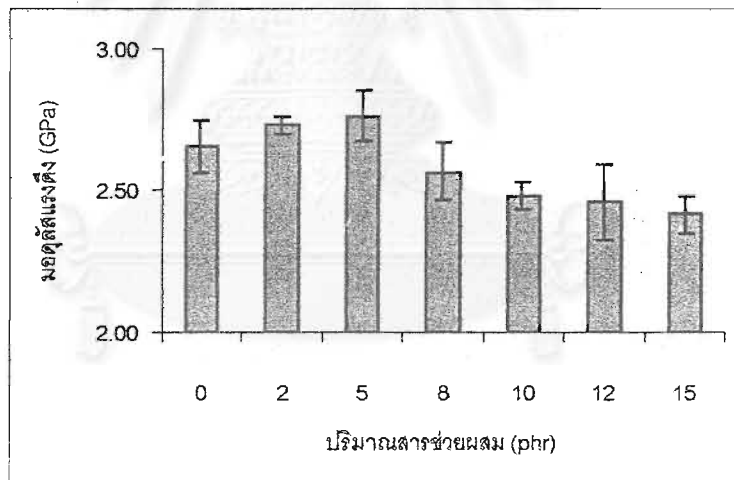
#### 4.4.2.2 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

จากการที่ PA6 และ PP-Co ไม่สามารถผสมเข้ากันได้โดยจะเป็นผลให้เกิดการแยกเฟสขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดต่ำลงนั้น ทำให้ต้องมีการเติมสารช่วยผสมลงไปเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง PA6 และ PP-Co นอกจากนี้ยังเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลอีกด้วย จากรูปที่ 4.17 พบว่าในภาวะแห้ง ปริมาณของสารช่วยผสมที่เหมาะสม คือ 2-5 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก และ 2-8 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งปริมาณสารช่วยผสมดังกล่าวจะช่วยเพิ่มมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมให้มีแนวโน้มสูงขึ้นประมาณ 3.76% เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยผสม 0 phr และ 5 phr ในอัตราส่วน 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก ส่วนที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบที่สารช่วยผสมที่ปริมาณ 0 phr และ 8 phr พบว่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นประมาณ 7.14%

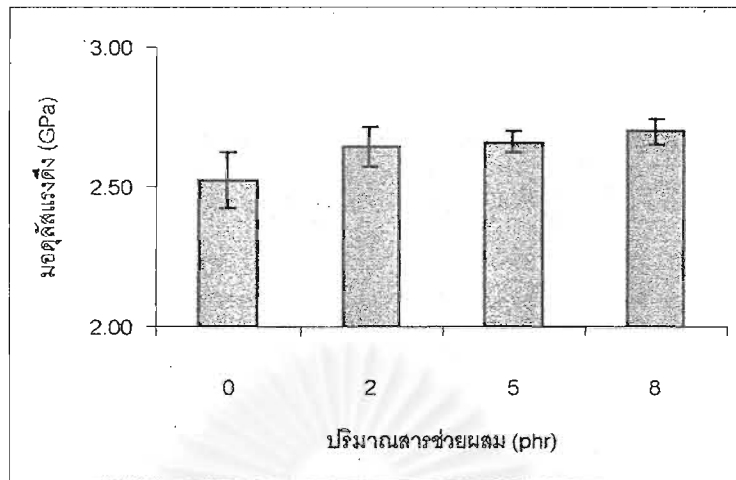
โดยผลดังกล่าวมีสาเหตุมาจากสารช่วยผสมที่เติมลงไป โดยสารช่วยผสมจะช่วยเพิ่มแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co มีความสามารถในการผสมเข้ากันได้เพิ่มขึ้นโดยเกิดจากโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาระหว่างสารช่วยผสมกับ PA6 ซึ่งโคพอลิเมอร์ดังกล่าวจะช่วยลดแรงดึงผิวระหว่างผิวสัมผัส ทำให้สัดส่วนวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะการกระจายตัวของดีสเพอร์ซิฟที่สม่ำเสมอ โดยดีสเพอร์ซิฟจะมีขนาดเล็กลง

ตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น และมีปริมาณช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้น จากลักษณะฐานฐานวิทยาดังกล่าวทำให้มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น จาก 2 phr ไปจนถึง 5 phr สำหรับอัตราส่วนการผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก และ 2 phr ไปจนถึง 8 phr ที่อัตราส่วนการผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก

การเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมในปริมาณที่มากเกินไป คือ 8 phr ถึง 15 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก จะมีผลทำให้มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง 12.68% เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยผสม 5 phr 15 phr ที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co ทั้งนี้อาจเกิดจากปริมาณที่มากเกินไปของสารช่วยผสม และจากการที่ PP-MA มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ในระบบการผสม ทำให้มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง ถึงแม้ว่าภายในระบบดังกล่าวจะมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ดีขึ้นก็ตาม [44-45]



รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 90%PA6 ต่อ 10% PP-Co ในภาวะแห้ง

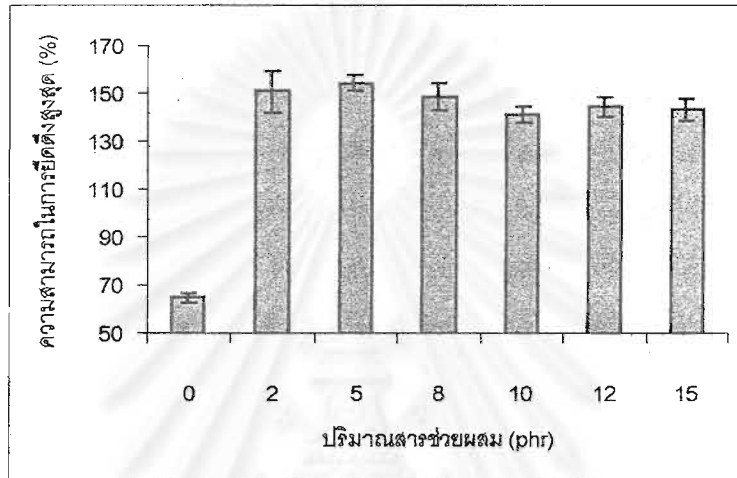


รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อมอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ในภาวะแห้ง

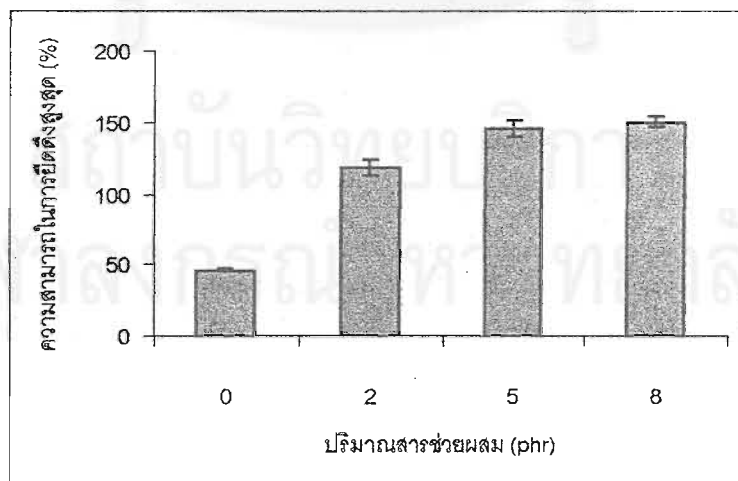
ในด้านสมบัติความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม พบว่าในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสมจะมีความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมสูงกว่าในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ดังรูปที่ 4.19 พบว่าที่ปริมาณสารช่วยผสม 2-5 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก และที่ปริมาณสารช่วยผสม 2-8 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.20 ความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้นประมาณ 138.83% เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยผสม 0 phr และ 5 phr ในอัตราส่วน 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก ส่วนที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบที่สารช่วยผสมที่ปริมาณ 0 phr และ 8 phr พบว่าความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นประมาณ 221.14%

โดยสามารถอธิบายได้จากการเกิดโคพอลิเมอร์ของ PA6-g-PP ในระหว่างการผสมจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารช่วยผสมและ PA6 โดยโคพอลิเมอร์ดังกล่าวจะไปแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของ PA6 และ PP-Co ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมระหว่างผิวสัมผัสทำให้พื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีการกระจายตัวของดิสเพอร์สเฟสที่สม่ำเสมอมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม โดยพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวจะช่วยลดความเค้นสะสม (stress concentration) ที่สูงรอบ ๆ อนุภาคของดิสเพอร์สเฟสในระหว่างการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการเกิดการยืดดึงแบบเย็นได้สูงแต่ผลของสารช่วยผสมที่มากเกินไป คือ ที่ปริมาณ 8-15 phr

สำหรับอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก จะมีผลทำให้ความสามารถในการยึดดึงสูงสุดลดต่ำลงประมาณ 7.17% ในการเปรียบเทียบระหว่างสารช่วยผสม 5 phr และ 15 phr ในอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก โดยการลดลงของความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมมีสาเหตุมาจากสมบัติของ PP-MA ที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น

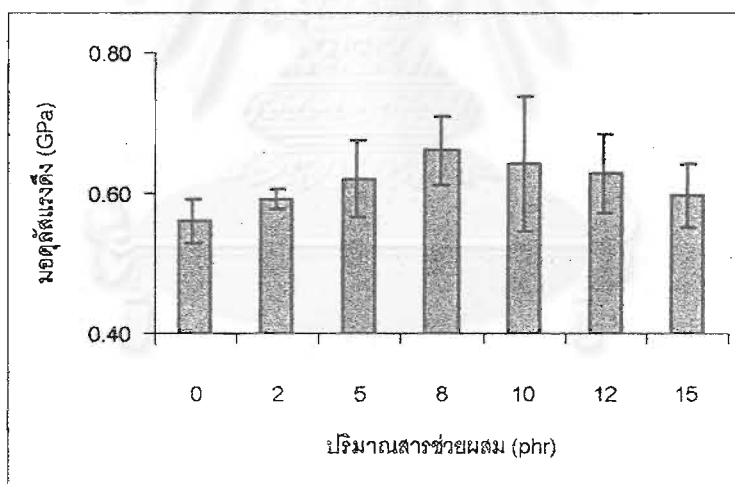


รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 / 10% PP-Co ในภาวะแห้ง

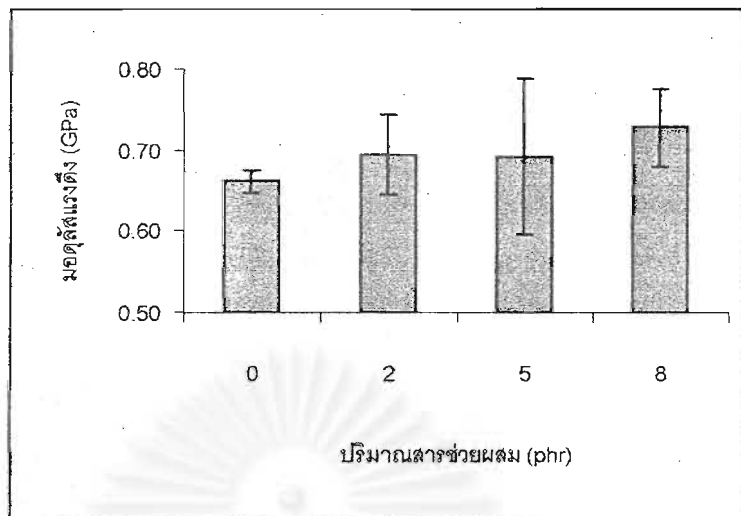


รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 / 20% PP-Co ในภาวะแห้ง

ส่วนในภาวะเปื่อยก การเติมสารช่วยผสมจะทำให้เกิดโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาระหว่าง PA6 และสารช่วยผสม เป็นผลให้ PA6 มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำลดลงด้วย ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมในปริมาณ 2-8 phr ในอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.21 และ 2-8 phr ในอัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.22 จะเป็นผลให้มอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้นประมาณ 17.85% ในการเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยผสม 0 phr และ 8 phr ในอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co และมอดุลัสแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น 10.6% ในการเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยผสม 0 phr และ 8 phr ในอัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co การเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมต่อไปในปริมาณสารช่วยผสม 10-15 phr ในอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดย น้ำหนัก จะมีผลทำให้มอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงประมาณ 9.09% ในการเปรียบเทียบสารช่วยผสมที่ปริมาณ 8 phr และ 15 phr ทั้งอาจเป็นเพราะสมบัติเชิงกลของเฟส PP-MA ที่ต่ำ ถึงแม้ในระบบดังกล่าวจะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลงก็ตาม ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสแรงดึงในภาวะแห้ง



รูปที่ 4.21 ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อมอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co ในภาวะเปื่อยก

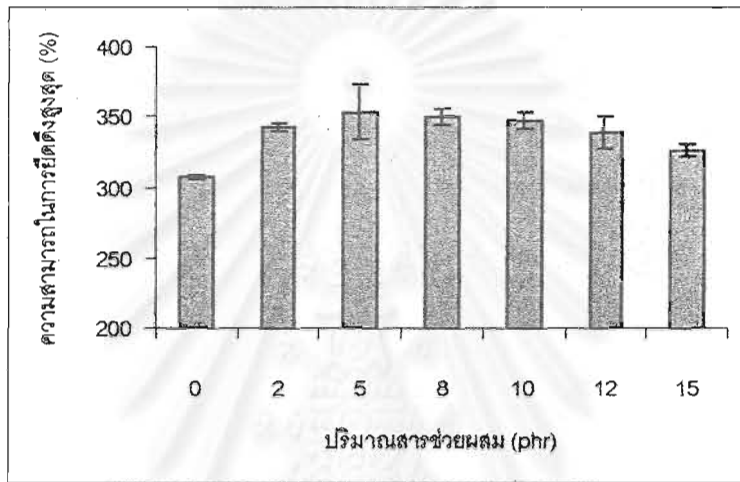


รูปที่ 4.22 ผลของปริมาณสารช่วยผสมต่อมอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ในภาวะเป็ยก

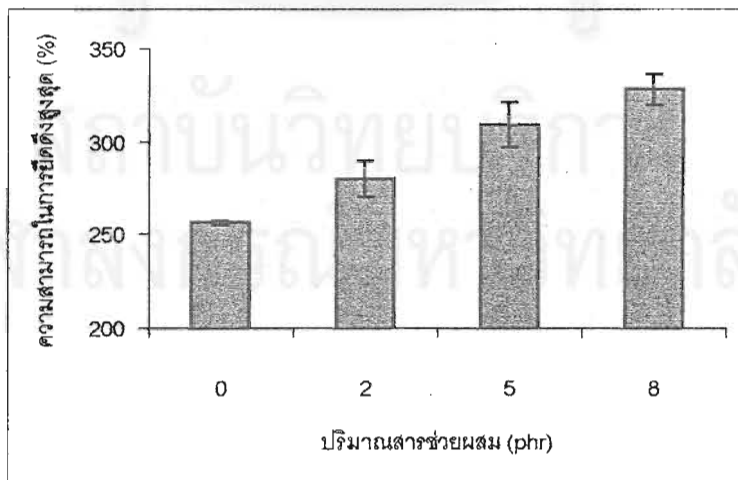
ส่วนความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเป็ยก พบว่า ความสามารถในการยึดดึงของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเป็ยกมีค่าสูงกว่าในภาวะแห้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำที่ PA6 ดูดเข้าไปมีผลทำให้โมเลกุลของ PA6 สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการยึดดึงสูงสุดสูงกว่าในภาวะแห้ง แต่เมื่อดูผลของสารช่วยผสมที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าการเติมสารช่วยผสมในปริมาณเพิ่มขึ้น 2-5 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.23 และ 2-8 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.24 มีผลทำให้ความสามารถในการยึดดึงสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้นประมาณ 14.8% ในการเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยผสม 0 phr และ 5 phr ที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก และ ที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก ความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นประมาณ 27.88% ในการเปรียบเทียบสารช่วยผสมที่ปริมาณ 0 phr และ 8 phr แต่การเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมต่อไปในปริมาณ 8-15 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก จะมีผลทำให้ความสามารถในการยึดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมลดลงประมาณ 7.82% ในการเปรียบเทียบสารช่วยผสมที่ปริมาณ 5 phr และ 15 phr โดยอาจเป็นผลมาจากสมบัติเชิงกลของ PP-MA ที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ในระบบการผสม ดังที่กล่าวไว้แล้วในตอนต้น

นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสารช่วยผสมจะมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้นดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.3.2

ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวควรเป็นสาเหตุให้ความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสมต่ำกว่าระบบที่ไม่มีเติมสารช่วยผสม ทั้งนี้เพราะความสามารถในการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าในระบบที่ไม่มีเติมสารช่วยผสม แต่จากการทดลองพบว่าความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสมมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่มีเติมสารช่วยผสม พฤติกรรมดังกล่าวอาจคาดการณ์ได้ว่าผลของสารช่วยผสมมีผลต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมมากกว่าผลของน้ำ



รูปที่ 4.23 ปริมาณสารช่วยผสมต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co ในภาวะเปียก



รูปที่ 4.24 ปริมาณสารช่วยผสมต่อความสามารถในการยืดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ในภาวะเปียก

#### 4.4.3 ความทนแรงกระแทก (Impact Strength)

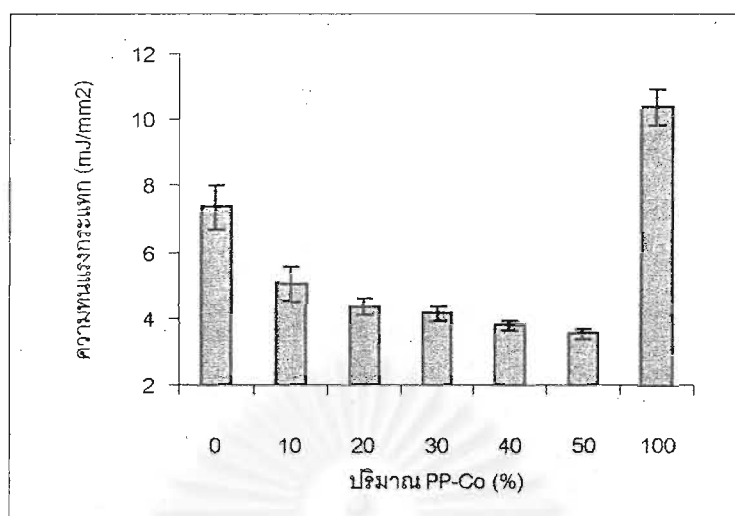
การทดสอบความทนแรงกระแทกในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบแบบอิชอดซึ่งเป็นการทดสอบที่แสดงถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้ชิ้นทดสอบที่มีรอยบากแตกหัก ค่าความทนแรงกระแทกแบบอิชอดนี้เป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบพลาสติกเกรดต่าง ๆ การทดสอบดังกล่าวสามารถบอกให้ทราบถึงความจำเป็นในการหลีกเลี่ยงมุมที่คมในการทำงานที่ทำได้ด้วยวัสดุนั้น ๆ เช่น ไนลอน และอะเซทัลพลาสติก ซึ่งเป็นวัสดุในกลุ่มที่เหนียวที่สุด แต่ถ้าในชิ้นงานมีรอยบากจะทำให้มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ต่ำกว่าปกติ ซึ่งเรื่องนี้สามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาถึงพลังงานทั้งหมดที่ถูกดูดกลืนเพื่อทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก ซึ่งประกอบด้วยพลังงาน 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นพลังงานที่ต้องใช้ในการเริ่มการแตกหัก (crack initiation) และส่วนที่สองเป็นพลังงานที่ทำให้รอยแตกเกิดต่อเนื่อง (crack propagation) จากหลักการดังกล่าว พบว่าไนลอนมีพลังงานที่ทำให้รอยแตกเกิดต่อเนื่องต่ำ เป็นผลให้ไนลอนมีค่าความทนแรงกระแทกต่ำกว่าปกติเมื่อชิ้นงานมีรอยบาก

##### 4.4.3.1 ผลของ PP-Co ต่อความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม

ในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่าในภาวะแห้ง ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น ดังรูป 4.25 โดยมีสาเหตุมาจากขนาดของ PP-Co ที่มีขนาดใหญ่และการมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ PP-Co จะเสมือนกับเป็นการเพิ่มจุดอ่อนแอภายในชิ้นงาน จากสาเหตุดังกล่าวเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติความทนแรงกระแทกลดลง ซึ่งจากกราฟพบว่า การลดลงของสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมไม่เป็นไปตามกฎการผสม ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับ PA6 ซึ่งเป็นเฟสหลักเป็นสำคัญ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



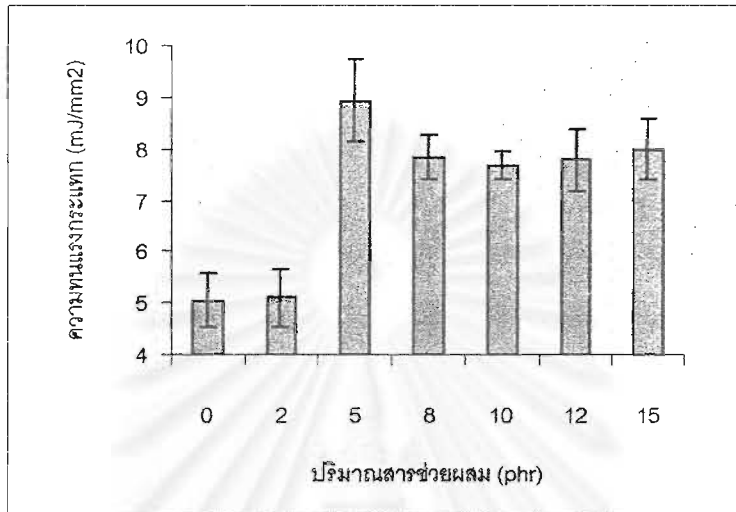


รูปที่ 4.25 ผลของ PP-Co ต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง

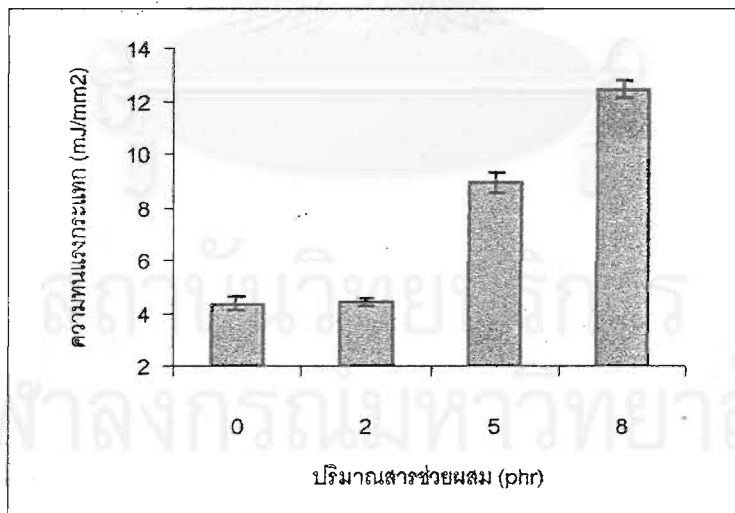
#### 4.4.3.2 ผลของสารช่วยผสมต่อความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม

ในภาวะแห้ง พบว่าที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก การผสมสารช่วยผสมในปริมาณ 2-5 phr ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าสูงขึ้น ตามปริมาณสารช่วยผสม โดยในการเปรียบเทียบสารช่วยผสมที่ปริมาณ 0 phr และ 5 phr พบว่า ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นประมาณ 76.63% แต่การเพิ่มปริมาณ สารช่วยผสมต่อไปในปริมาณ 8-15 phr มีผลทำให้ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม ลดลงประมาณ 10.65% สำหรับการเปรียบเทียบสารช่วยผสมที่ปริมาณ 5 phr และ 15 phr ดังรูปที่ 4.26 โดยเป็นผลมาจากสมบัติความทนแรงกระแทกของสารช่วยผสมที่ต่ำกว่า PP-Co ทำให้การเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสมที่มากเกินไป มีผลทำให้สมบัติความทนแรงกระแทกของ พอลิเมอร์ผสมลดลง แต่อย่างไรก็ดีค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมยังคงมีค่าสูงกว่าใน ระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความทนแรงกระแทกนั้นเป็นผลมาจาก สารช่วยผสม โดยสารช่วยผสมจะช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีขนาดของดิสเพอร์สเฟสที่เล็ก มีการ กระจ่ายตัวที่ดี และยังช่วยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสทำให้มีการถ่ายโอนแรงระหว่างผิวสัมผัส ได้ดี พฤติกรรมดังกล่าวจะเกิดคล้ายกันที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก และสารช่วยผสมในปริมาณ 2-8 phr โดยที่ปริมาณสารช่วยผสม 8 phr จะให้ค่าความทนแรง กระแทกของพอลิเมอร์ผสมสูงที่สุด โดยสูงกว่าในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสมที่อัตราส่วน เดียวกันประมาณ 185.32% ดังรูปที่ 4.27 การเพิ่มขึ้นของค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์

ผสมจะสัมพันธ์กับสัณฐานวิทยา โดยอาจดูได้จากภาพ SEM ดังรูป 4.28 ซึ่งเป็นลักษณะการแตกหักของชิ้นตัวอย่างซึ่งผ่านการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

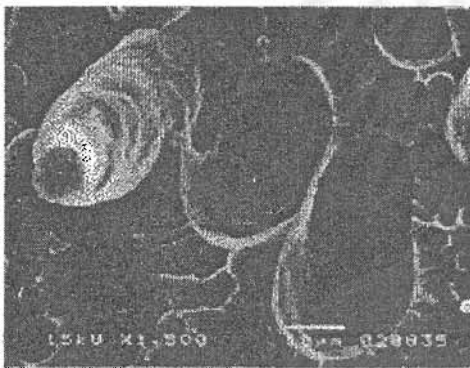


รูปที่ 4.26 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 90% PA6 / 10% PP-Co ในภาวะแห้ง

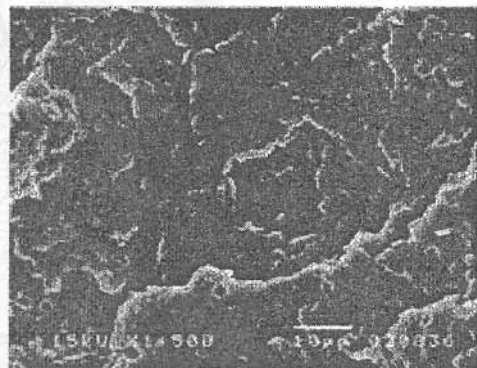


รูปที่ 4.27 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80% PA6 / 20% PP-Co ในภาวะแห้ง

จากรูปที่ 4.28 พบว่าในระบบที่ไม่ได้มีการเติมสารช่วยผสม คือ ที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก ดิสเพอร์สเฟสจะมีขนาดใหญ่ และมีช่องว่างรอบ ๆ อนุภาคของ PP-Co นอกจากนี้ยังเกิด fiber pull out ภายในระบบการผสม ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้แสดงให้เห็นชัดว่า ภายในระบบดังกล่าวไม่มีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ ทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟสที่ต่ำซึ่งแตกต่างจากระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม โดยในอัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co และสารช่วยผสมในปริมาณ 8 phr มีลักษณะของสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่แตกต่างจากระบบการผสมที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม โดยจะไม่พบอนุภาคของดิสเพอร์ส หรือ fiber pull out ที่พื้นผิวของการแตกหัก โดยอนุภาคของดิสเพอร์สเฟสจะถูกปกคลุมด้วยชั้นของเมทริกซ์ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ดี ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ดี จากปัจจัยดังกล่าวเป็นผลให้ค่าความทนแรงกระแทกในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสมมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.28 ผลของสารช่วยผสมต่อลักษณะพื้นผิวการแตกหักของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ที่ปริมาณสารช่วยผสม (ก) 0 และ (ข) 8 phr

สำหรับในภาวะเปื่อย ชีงงานมีการแตกหักไม่สมบูรณ์ ยกเว้น PP-Co ที่มีการแตกหักสมบูรณ์ โดยในการรายงานผลสำหรับชิ้นทดสอบที่มีการแตกหักไม่สมบูรณ์จะรายงานผลในรูปแบบการแตกหักแต่ละชนิด คือ complete break (C) hinge break (H) partial break (P) และ non-break (NB) ดังตารางที่ 4.3 โดยการแตกหักที่ไม่สมบูรณ์ของพอลิเมอร์ผสมเป็นผลมาจากน้ำที่ PA6 ดูดเข้าไป โดยน้ำจะช่วยเพิ่มพลังงานในการทำให้การแตกหักเกิดต่อเนื่องมีค่าสูงขึ้นมา

เป็นผลให้ชั้นทดสอบทั้งที่มีการเติมสารช่วยผสมและไม่มีสารเติมสารช่วยผสม มีการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 4.3 สมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียก

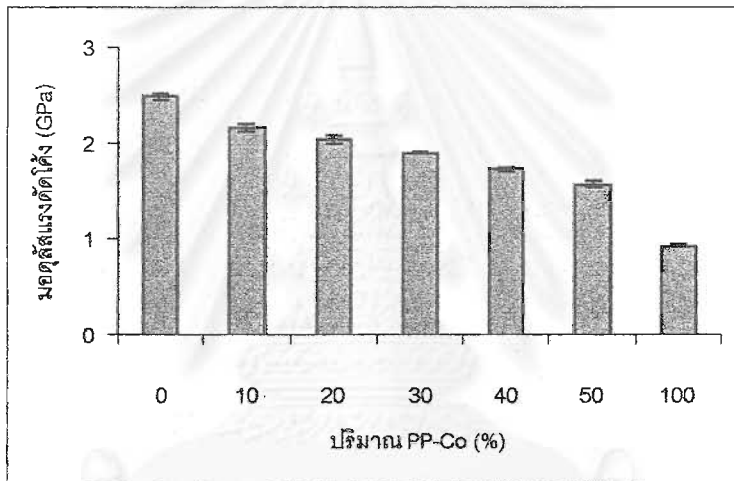
PA6/PP-Co/PP-MA	ลักษณะการแตกหัก
100/0/0	NB
90/10/0	NB
80/20/0	NB
70/30/0	P
60/40/0	P
50/50/0	P
90/10/2	NB
90/10/5	NB
90/10/8	NB
90/10/10	NB
90/10/12	NB
90/10/15	NB
80/20/2	NB
80/20/5	NB
80/20/8	NB
0/100/0	C

#### 4.4.4 ความทนแรงดัดโค้ง (Flexural Strength)

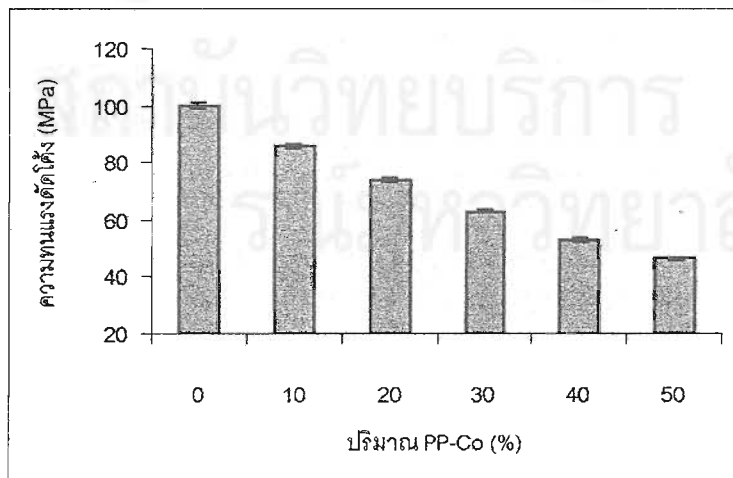
ในการดัดโค้ง ชั้นทดสอบจะได้รับแรงเค้นดึง (tensile stress) ที่ผิวด้านนอกของชั้นทดสอบ และแรงกด (compressive stress) ที่ผิวด้านในของชั้นทดสอบ วิธีที่นิยมใช้ในการวัดความทนแรงดัดโค้ง เรียกว่า การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง แบบ 3 จุด (three point bending) โดยสามารถคำนวณค่ายังส์มอดุลัสได้จากสมการที่ใช้สำหรับคาน โดยความเค้นมากที่สุดจะเกิดที่ตรงกลางชั้นทดสอบ (mid span) ตรงส่วนผิวนอก สำหรับเทอร์โมพลาสติกส่วนมากจะไม่เกิดการแตกหักตามการทดสอบนี้ แม้ว่าจะเกิดการดัดโค้งอย่างมากก็ตาม

#### 4.4.4.1 ผลของ PP-Co ต่อสมบัติความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม

ในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่าในภาวะแห้งมอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมจะลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.29 โดยเป็นผลมาจากขนาดของเฟส PP-Co ที่ใหญ่ และการมีแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำ ทำให้ภายในชิ้นงานไม่มีการถ่ายโอนแรงระหว่างผิวสัมผัสเป็นผลให้เกิดความเค้นสะสมรอบ ๆ ดิสเพอร์สเฟส จากพฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลให้มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น จาก 0 ถึง 50% PP-Co ซึ่งสอดคล้องกับกฎการผสม กล่าวคือ PA6 มีค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งสูงกว่า PP-Co ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ PP-Co จะเป็นผลให้มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น



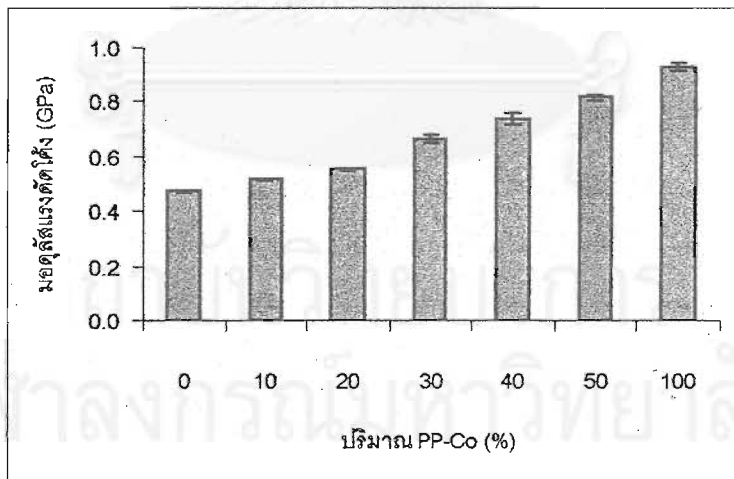
รูปที่ 4.29 ผลของ PP-Co ต่อมอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง



รูปที่ 4.30 ผลของ PP-Co ต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง

ส่วนความทนแรงดัดโค้งสูงสุด ดังรูป 4.30 พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงมอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม คือ มีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากขนาดของ PP-Co ที่ใหญ่และมีการแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำ ซึ่งการลดลงของความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวเป็นไปตามกฎการผสมเช่นเดียวกัน

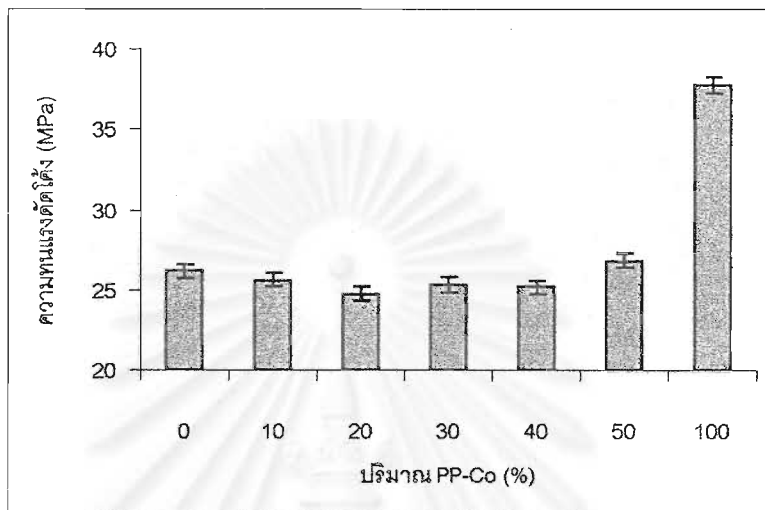
ในภาวะเปื่อย ดังรูปที่ 4.31 มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปื่อยมีค่าต่ำกว่าในภาวะแห้ง โดยเป็นผลมาจากน้ำที่ PA6 ดูดเข้าไปมีผลทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ทำให้ความแข็งตึงของโมเลกุลลดลงเป็นผลให้มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปื่อยมีค่าต่ำกว่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบมอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น จาก 0 ถึง 50% PP-Co โดยน้ำหนัก เนื่องจาก PP-Co ที่เติมลงไปในระบบการผสมเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ PP-Co จะเป็นผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลง นอกจากนี้ในภาวะเปื่อย PP-Co มีค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งสูงกว่า PA6 จากปัจจัยดังกล่าวเป็นผลให้มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้นโดยสอดคล้องกับกฎการผสม



รูปที่ 4.31 ผลของ PP-Co ต่อมอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปื่อย

ในด้านสมบัติความทนแรงดัดโค้ง ดังรูปที่ 4.32 พบว่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสแรงดัดโค้งในภาวะเปื่อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่ลดลง

และสมบัติความทนแรงดัดโค้งของ PP-Co ที่สูงกว่า PA6 จากปัจจัยดังกล่าวเป็นผลให้ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับกฎการผสมเช่นกัน



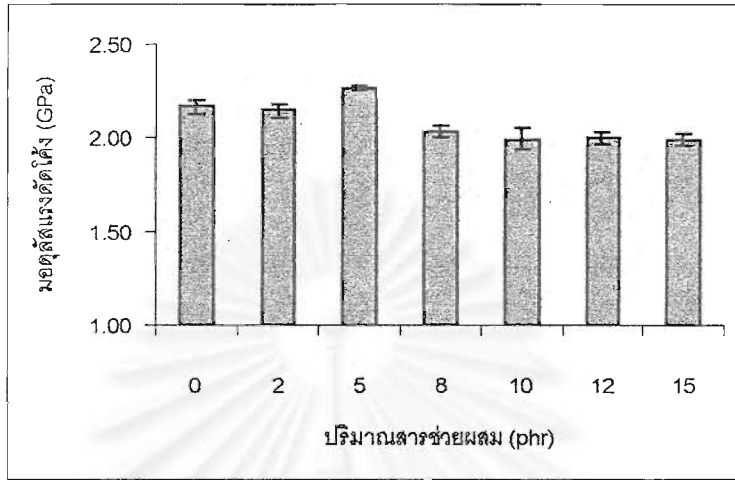
รูปที่ 4.32 ผลของ PP-Co ต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปื่อยก

#### 4.4.4.2 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์

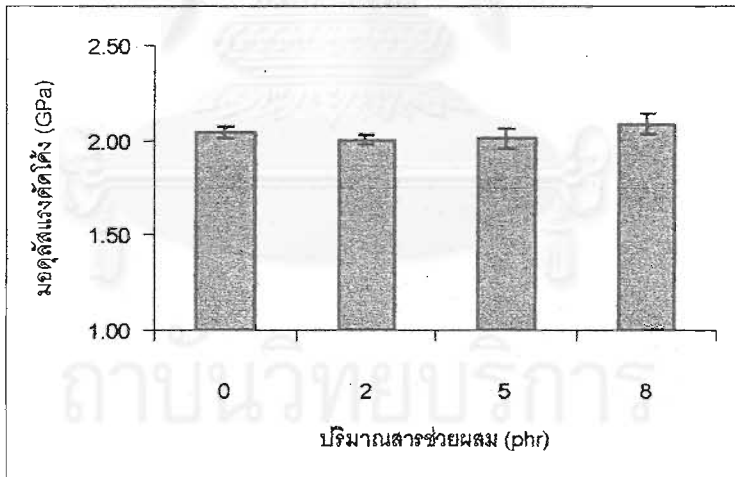
##### ผสม

ในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม ดังรูป 4.33 พบว่า ในภาวะแห้ง การเติมสารช่วยผสมมีผลทำให้มอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.34 ทั้งนี้เพราะขนาดของดิสเพอร์เฟสที่เหมาะสม และแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ดี ทำให้โมเลกุลมีความสามารถในการเคลื่อนไหวที่ลดลง เป็นผลให้ในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสมมีมอดูลัสแรงดัดโค้งสูงขึ้นประมาณ 4.14% ในการเปรียบเทียบระหว่างสารช่วยผสมที่ปริมาณ 0 phr และ 5 phr ในอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co และที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co มอดูลัสแรงดัดโค้งมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1.96% ในการเปรียบเทียบกับสารช่วยผสมที่ปริมาณ 0 phr และ 8 phr หรืออาจกล่าวได้ว่าสารช่วยผสมแทบจะไม่มีผลต่อมอดูลัสแรงดัดโค้งของระบบนี้ แต่การเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมที่มากเกินไป คือ ที่ปริมาณ 8-15 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก จะเป็นผลให้มอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมลดลง โดยในการเปรียบเทียบปริมาณสารช่วยผสมระหว่าง 5 phr และ 15 phr พบว่ามอดูลัสแรงดัดโค้งมีค่าลด

ลงประมาณ 11.94% ทั้งนี้เป็นเพราะสมบัติของ PP-MA ที่ต่ำกว่าสมบัติของพอลิเมอร์ผสมชนิดอื่น ๆ ในระบบการผสม



รูปที่ 4.33 ผลของสารช่วยผสมต่อมอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 / 10% PP-Co ในภาวะแห้ง

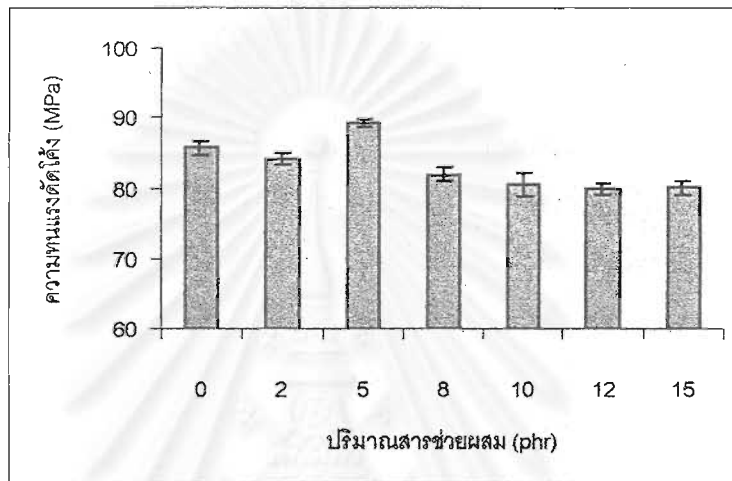


รูปที่ 4.34 ผลของสารช่วยผสมต่อมอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 / 20% PP-Co ในภาวะแห้ง

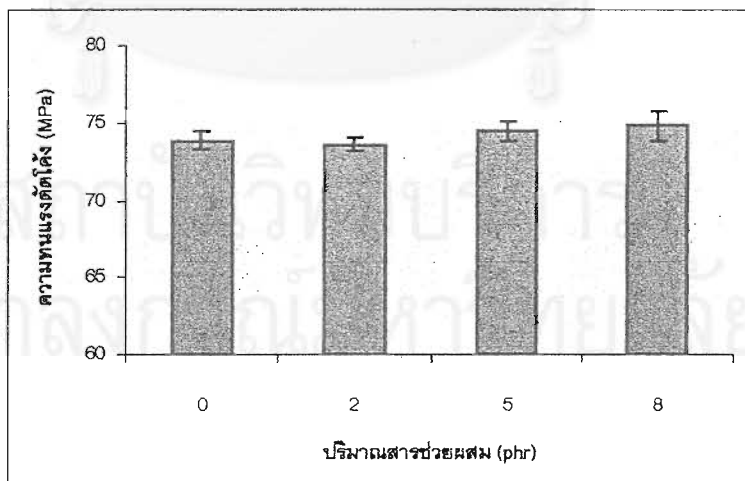
ส่วนความทนแรงดัดโค้ง จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงมอดุลัสแรงดัดโค้งในภาวะแห้ง ดังรูป 4.35 และ 4.36 คือความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นจากการเติมสารช่วยผสมในปริมาณ 5 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ



10% PP-Co โดยน้ำหนัก และสารช่วยผสมในปริมาณ 5-8 phr ในอัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสมบัติความทนแรงดัดโค้งจะเป็นผลมาจากการที่มีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ดี ทำให้ภายในระบบของพอลิเมอร์ผสมมีการถ่ายโอนแรงระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟสได้ดี เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสมมีความทนแรงดัดโค้งสูงขึ้น

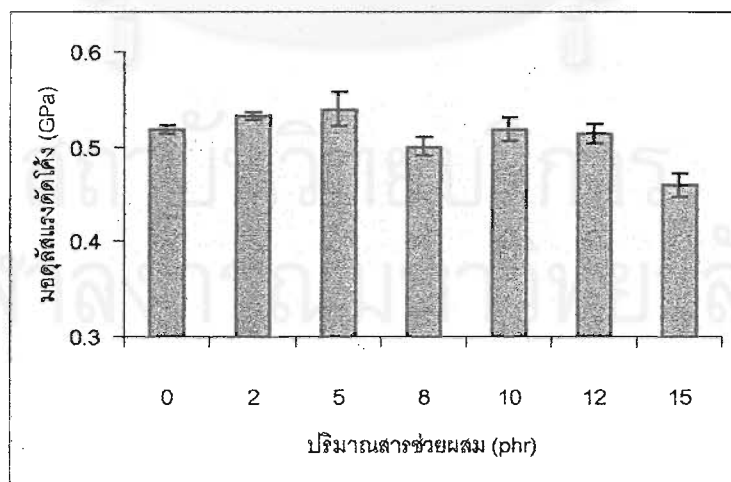


รูปที่ 4.35 ผลของสารช่วยผสมต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co ในภาวะแห้ง

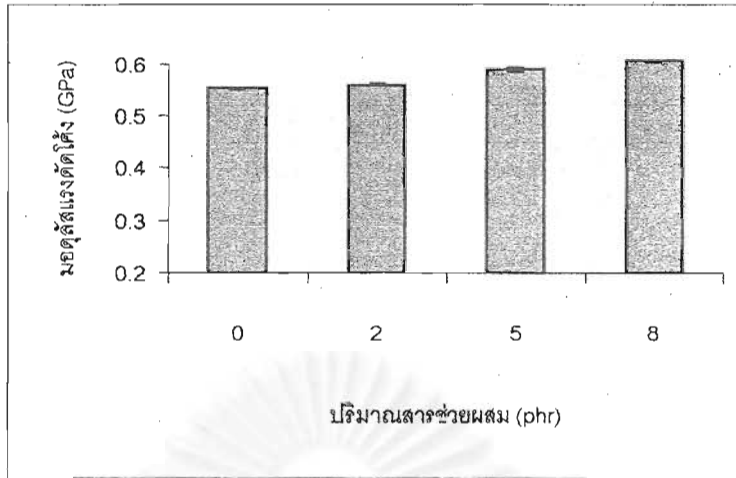


รูปที่ 4.36 ผลของสารช่วยผสมต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ในภาวะแห้ง

ส่วนในภาวะเปียก มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม มีค่าต่ำกว่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้งที่อัตราส่วนเดียวกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากน้ำที่ PA6 ดูดเข้าไป โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น เป็นผลให้มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าในภาวะแห้ง แต่ถ้าเปรียบเทียบมอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.37 และ 4.38 พบว่า มอดุลัสแรงดัดโค้งมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณสารช่วยผสม 2-5 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก โดยมอดุลัสแรงดัดโค้งมีค่าสูงขึ้นประมาณ 3.84% ในการเปรียบเทียบสารช่วยผสมที่ปริมาณ 0 phr และ 5 phr และที่ 2-8 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก พบว่ามอดุลัสแรงดัดโค้งมีค่าสูงขึ้นประมาณ 10.9% สำหรับในการเปรียบเทียบระหว่างสารช่วยผสมที่ปริมาณ 0 phr และ 8 phr ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาระหว่างสารช่วยผสมกับ PA6 ทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลงกว่าในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม เป็นผลให้มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมต่อไปจาก 8-15 phr สำหรับอัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co โดยน้ำหนัก จะเป็นผลให้มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมลดลง ซึ่งในการเปรียบเทียบสารช่วยผสมที่ปริมาณ 5 phr และ 15 phr พบว่า มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงประมาณ 14.81% ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมบัติเชิงกลของ PP-MA ที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ในระบบการผสม

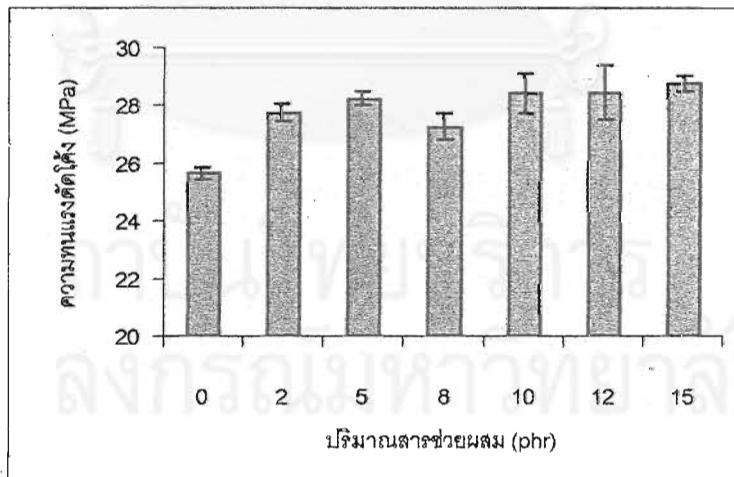


รูปที่ 4.37 ผลของสารช่วยผสมต่อมอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 / 10% PP-Co ในภาวะเปียก

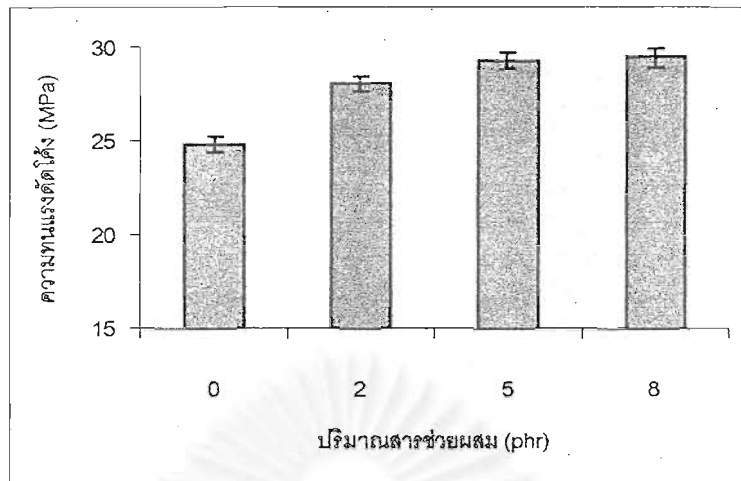


**รูปที่ 4.38** ผลของสารช่วยผสมต่อมอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 / 20% PP-Co ในภาวะเปื่อยก

ส่วนความทนแรงดัดโค้งจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสแรงดัดโค้งในภาวะเปื่อยก กล่าวคือ ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.39 และ 4.40



**รูปที่ 4.39** ผลของสารช่วยผสมต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 90%PA6 / 10% PP-Co ในภาวะเปื่อยก



**รูปที่ 4.40** ผลของสารช่วยผสมต่อความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 80%PA6 / 20% PP-Co ในภาวะเปียก

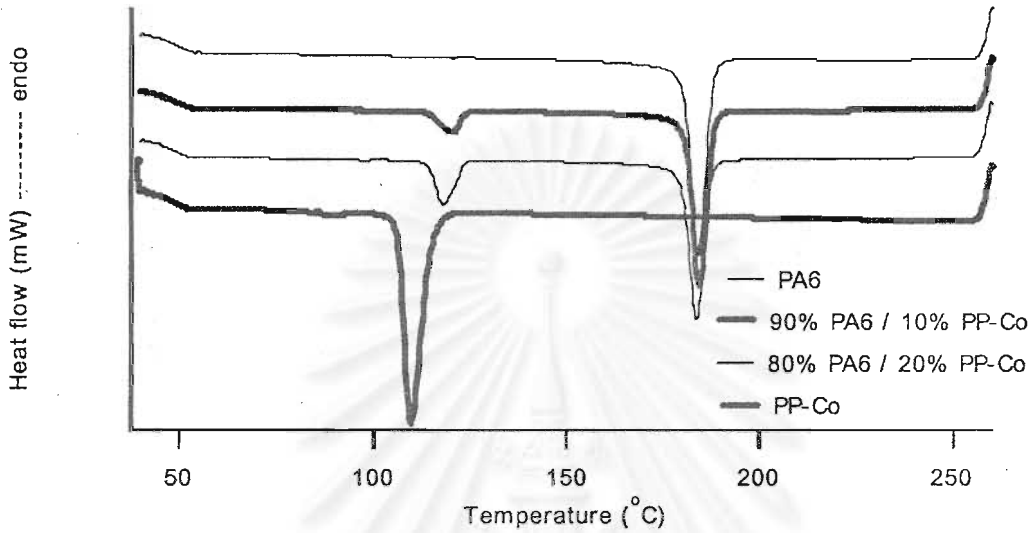
#### 4.5 สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม โดยใช้ 2 เทคนิคในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม คือ ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) และ ไดนามิกส์ แมคคานิคอล อะนาลิซิส (Dynamic Mechanical Analysis, DMA) ทั้งนี้เพื่อความครอบคลุมในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co ซึ่งให้ PP-MA เป็นสารช่วยผสม

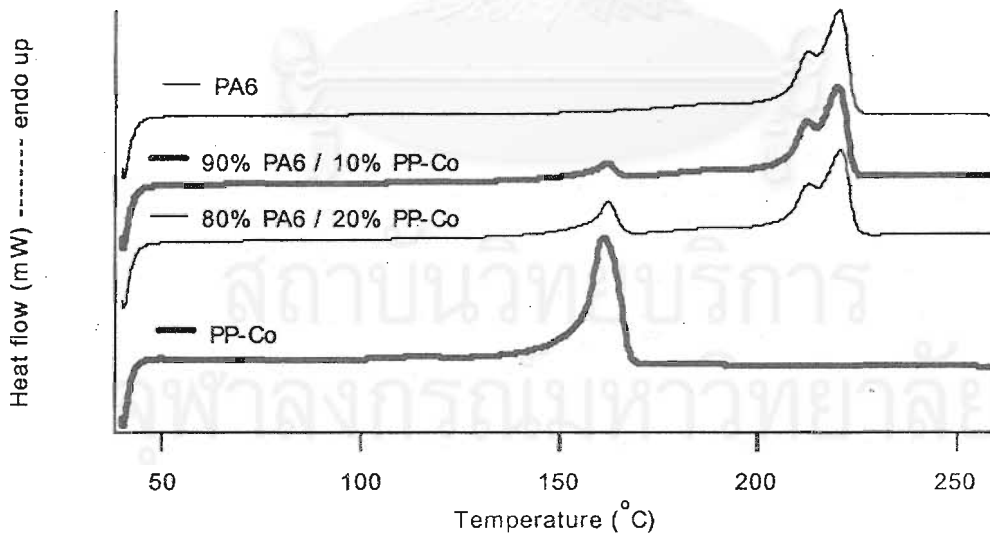
##### 4.5.1 ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter)

พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เพื่อหาปริมาณความเป็นผลึก (degree of crystallinity, %) อุณหภูมิในการเกิดผลึก (crystallization temperature,  $T_c$ ) และอุณหภูมิในการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) โดยทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของ PA6, PP-Co และ PP-MA ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิในการเกิดผลึก อุณหภูมิในการหลอมเหลว และปริมาณความเป็นผลึก

ผลการตรวจสอบพบว่า ในระบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ปริมาณความเป็นผลึก อุณหภูมิในการเกิดผลึก และอุณหภูมิในการหลอมเหลวของ PA6 และ PP-Co มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.41 และ 4.42 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.41 ผลของ PP-Co ต่ออุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม



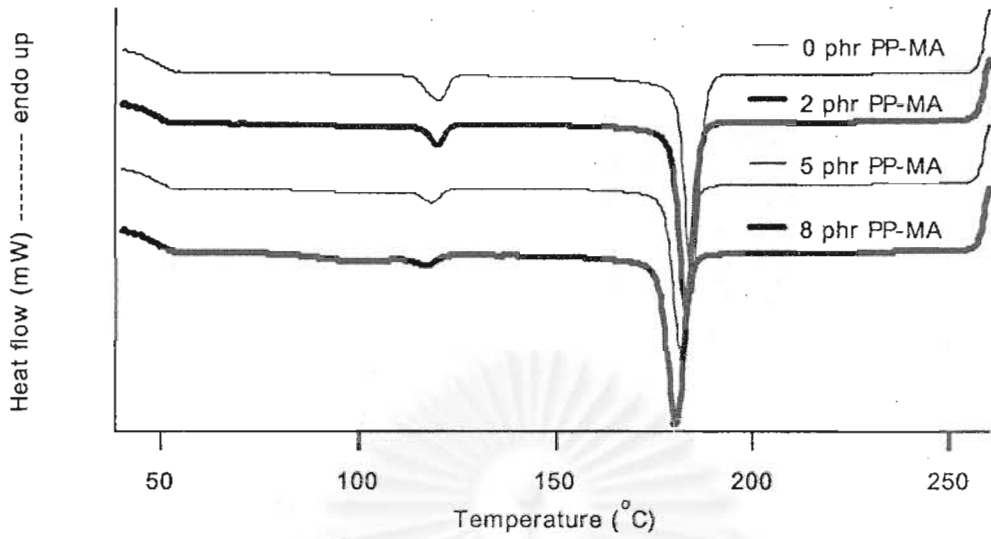
รูปที่ 4.42 ผลของ PP-Co ต่ออุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนผสมที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของ PA6 และ PP-Co

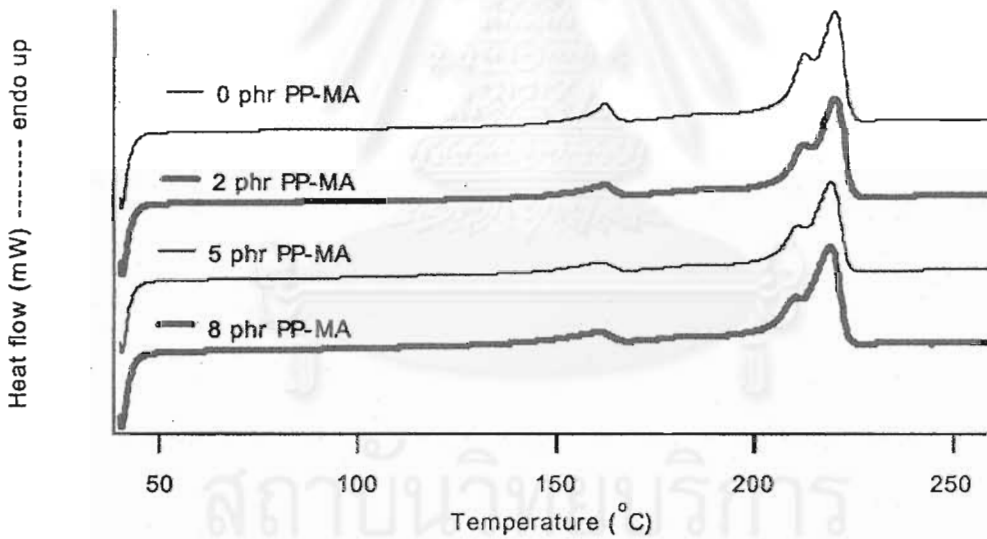
PA6/ PP-Co	PA6			PP-Co		
	ปริมาณผลึก (%)	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	ปริมาณผลึก (%)	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)
100/0/0	33.38	184.04	220.31	-	-	-
90/10/0	33.35	184.72	219.99	25.06	120.36	162.03
80/20/0	34.71	184.04	221	23.7	119.06	162.35
0/100/0	-	-	-	26.51	109.76	161.35

ทั้งนี้ เป็นผลมาจากทั้งสองเฟสของ PA6 และ PP-Co ไม่ได้เกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดจำเพาะระหว่างเฟส ดังนั้นสมบัติทางความร้อนของ PA6 และ PP-Co จึงไม่ขึ้นแก่กัน นอกจากนี้ ยังพบว่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกของ PP-Co ในพอลิเมอร์ผสมจะมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก PA6 ที่เติมลงไป ในอัตราส่วนผสมซึ่งจะประพติดตัวเสมือนเป็นนิวคลีโอ (nuclei) หรือแกนของผลึก ชักนำให้ PP-Co ในพอลิเมอร์ผสมสามารถเกิดผลึกได้เร็วขึ้นกว่า PP-Co บริสุทธิ์

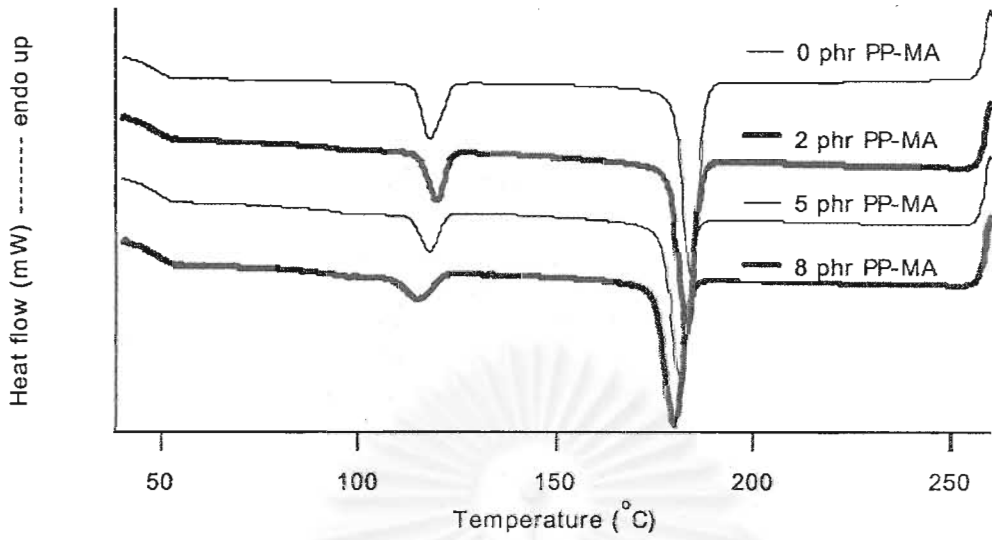
ในระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสม (PP-MA) ดังรูปที่ 4.43 ถึง 4.46 และ ตารางที่ 4.5 พบว่าการเพิ่มปริมาณสารช่วยผสม จะเป็นผลให้ปริมาณความเป็นผลึก และอุณหภูมิในการเกิดผลึกของ PA6 และ PP-Co มีแนวโน้มลดลงทั้งนี้เป็นผลมาจากโคพอลิเมอร์ (PA6-g-PP) ที่เกิดจาก PA6 และ PP-MA ในระหว่างการผสม โดยโคพอลิเมอร์ดังกล่าวจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ทำให้ PA6 และ PP-Co มีปริมาณการเกิดผลึก และอุณหภูมิในการเกิดผลึกที่ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า สารช่วยผสมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม แม้ว่า จะเติมสารช่วยผสมในปริมาณที่สูงก็ตาม



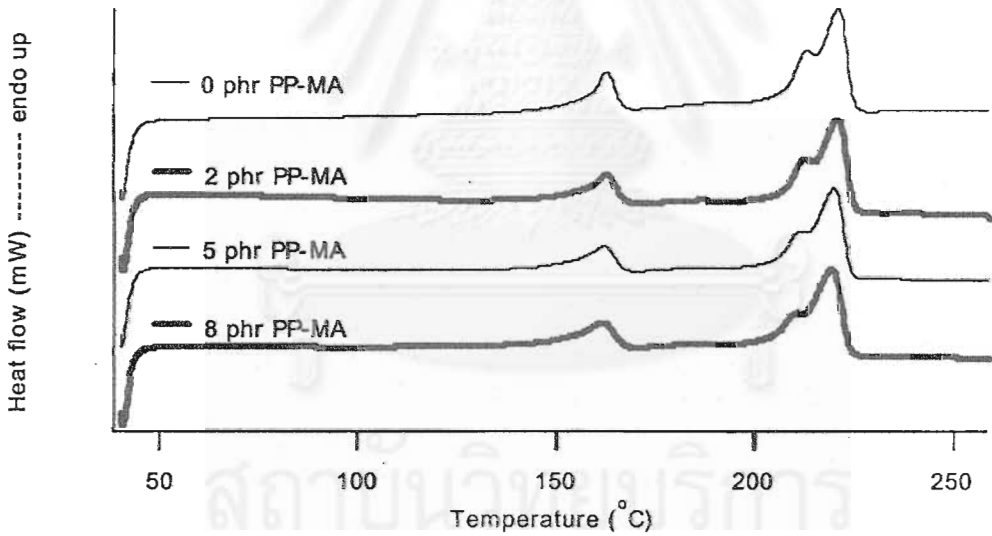
รูปที่ 4.43 ปริมาณสารช่วยผสมต่ออนุหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co



รูปที่ 4.44 ปริมาณสารช่วยผสมต่ออนุหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co



รูปที่ 4.45 ปริมาณสารช่วยผสมต่ออุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co



รูปที่ 4.46 ปริมาณสารช่วยผสมต่ออุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co



ตารางที่ 4.5 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติทางความร้อนของ PA6 และ PP-Co

PA6 / PP-Co / PP-MA	PA6			PP-Co		
	ปริมาณผลึก (%)	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	ปริมาณผลึก (%)	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)
90/10/0	33.35	184.72	219.99	25.06	120.36	162.03
90/10/2	30.49	183.04	219.99	14.06	120.04	162.01
90/10/5	31.41	181.7	219.33	10.44	118.71	161.35
90/10/8	28.75	180.36	218.97	11.41	117.37	160.69
80/20/0	34.71	184.04	221.00	23.70	119.06	162.35
80/20/2	30.24	182.70	220.33	19.24	119.69	162.34
80/20/5	31.06	181.03	219.97	13.78	118.05	162.02
80/20/8	29.82	179.71	218.98	13.26	115.03	161.37

#### 4.5.2 โดนามิกส์ แมคคานิคอล อะนาลิซิส (Dynamic Mechanical Analysis)

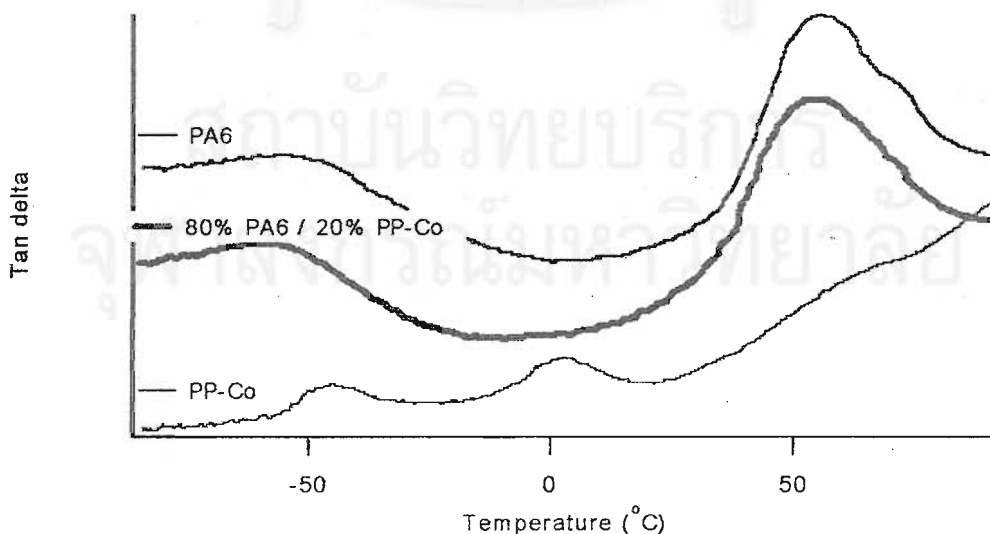
DMA เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล เช่น มอดุลัส และ  $\tan \delta$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ เวลา ความถี่ หรือผลของตัวแปรพร้อมเหล่านี้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค DMA ในการศึกษาถึงผลของน้ำและปริมาณของสารช่วยผสมที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกลาสทรานซิชันดังตารางที่ 4.6

พบว่าในภาวะแห้ง PA6 มีการเปลี่ยนแปลงของ  $\tan \delta$  2 อุณหภูมิ คือ การเปลี่ยนแปลงแบบอัลฟาที่อุณหภูมิ 54.84°C โดยเป็นอุณหภูมิที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลหลักมีการเคลื่อนไหว หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และการเปลี่ยนแปลงของ PA6 อีกอุณหภูมิหนึ่ง คือ การเปลี่ยนแปลงแบบเบต้าที่ -55.15°C โดยเป็นการเคลื่อนไหวของหมู่เอไมด์ที่ไม่ได้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับเอไมด์หมู่อื่น ๆ ส่วนที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก พบว่า PA6 ยังคงมี T<sub>g</sub> เกิดที่อุณหภูมิ 53.38°C ซึ่งไม่แตกต่างจาก PA6 บริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.47 พฤติกรรมดังกล่าวอาจแสดงให้เห็นว่า PA6 และ PP-Co ไม่มีความเข้ากันได้

ตารางที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนผสมที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของ PA6 และ PP-Co

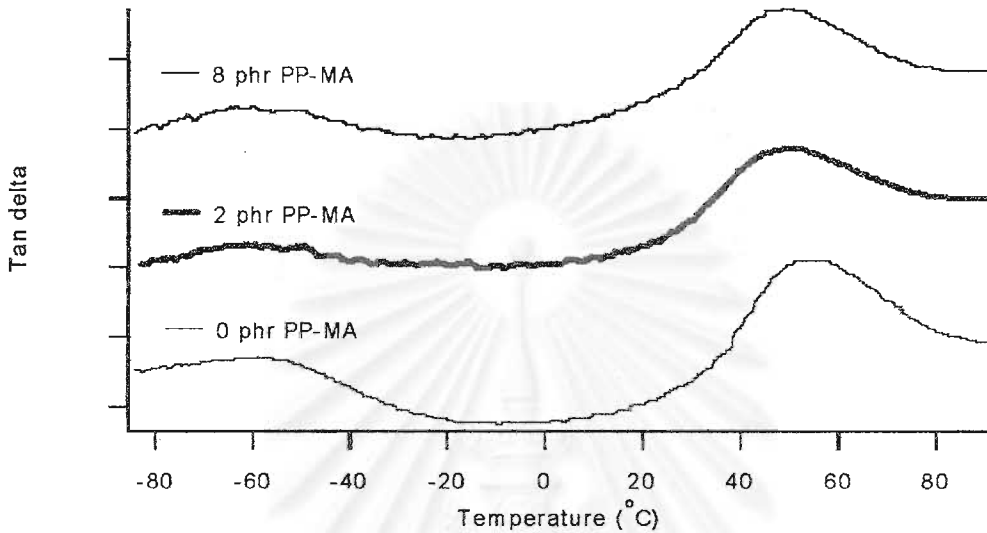
ภาวะในการทดลอง	PA6/PP-Co/PP-MA	อุณหภูมิช่วงที่ 2 (°C)	อุณหภูมิช่วงที่ 1 (°C)
ภาวะแห้ง	100/0/0	-55.15	54.84
	80/20/0	-58.33	53.38
	80/20/2	-55.63	48.78
	80/20/8	-62.93	47.55
	0/100/0	-45.98	1.88
ภาวะเปียก	100/0/0	-	-8.48
	80/20/0	-	-6.29
	80/20/8	-	-2.13
	00/100/0	-49.04	0.18

สำหรับ PP-Co บริสุทธิ์ จะพบการเปลี่ยนแปลง  $\tan \delta$  ของ PP-Co ที่อุณหภูมิ 1.88°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของโพลีโพรพิลีนไฮโมโพลิเมอร์ และ -45.98°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางเอทิลีน-โพรพิลีน แต่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะไม่พบในระบบของโพลีเมอร์ผสม ทั้งนี้เป็นผลมาจากตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง  $\tan \delta$  ของ PP-Co ถูกซ้อนทับด้วยการเปลี่ยนแปลงของ PA 6 ซึ่งเป็นพีคที่มีลักษณะกว้างและมีความเข้มสูง [46]



รูปที่ 4.47 ผลของ PP-Co ต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของ PA6 ในภาวะแห้ง

นอกจากนี้ ในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม คือที่อัตราผสม 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนักของ PA6 ต่อ PP-Co และสารช่วยผสมในปริมาณ 0, 2 และ 8 phr พบว่าการเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสมจะเป็นผลให้  $T_g$  ของ PA6 ในพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.48

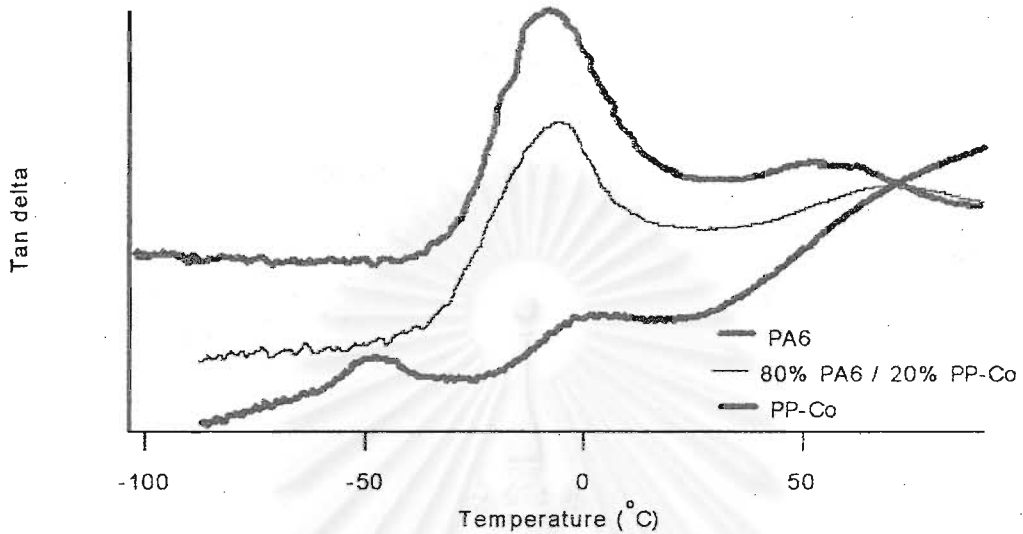


รูปที่ 4.48 ผลของสารช่วยผสมต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของ PA6 ในอัตราส่วน 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co ในภาวะแห้ง

พฤติกรรมดังกล่าว อาจแสดงได้ถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวจะสอดคล้องกับผลของสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม และสมบัติเชิงกลดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

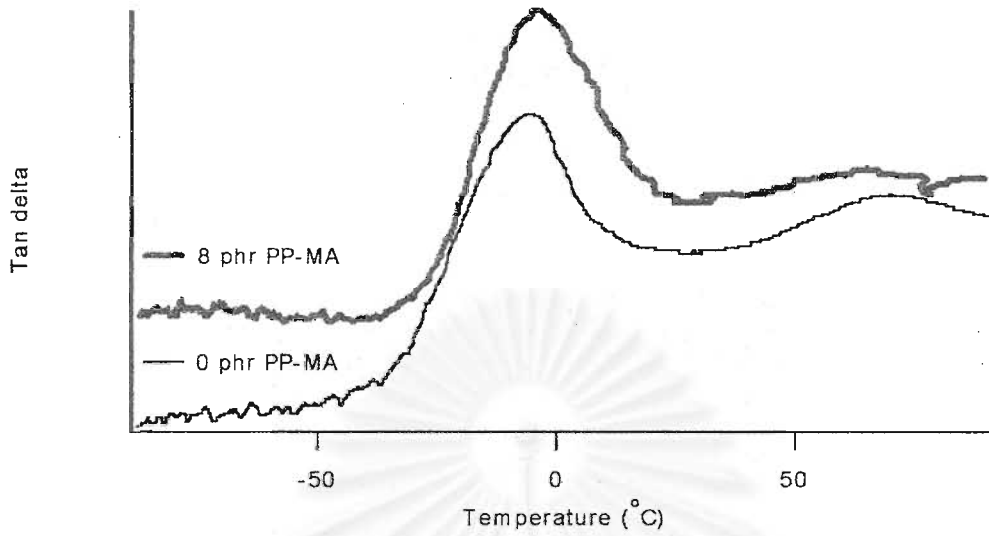
ในภาวะเปียก พบว่าน้ำมีผลทำให้  $T_g$  ของ PA6 ลดลง จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.49 พบการเปลี่ยนแปลง  $T_g$  ของ PA6 ที่  $-8.48^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้เป็นผลมาจากน้ำที่ PA6 ดูดซึมเข้าไป โดยน้ำดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์เป็นผลให้ภายในโมเลกุลของ PA6 มีปริมาตรอิสระระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของปริมาตรอิสระระหว่างโมเลกุลเป็นผลให้โมเลกุลของ PA6 สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ทำให้  $T_g$  ของ PA6 ลดลง สำหรับการผสม PP-Co ที่อัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนักของ PA6 ต่อ PP-Co จะพบการเปลี่ยนแปลง  $T_g$  ของ PA 6 ที่  $-6.29^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ  $T_g$  ของ PA6 บริสุทธิ์ในภาวะเปียก ถึงแม้ว่าการผสม PP-Co จะมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลง แต่ถ้าเปรียบเทียบผลของน้ำที่มีต่อ PA6 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอาจแสดงได้ถึงความสามารถผสมเข้ากันได้ ส่วนการเปลี่ยนแปลง  $\tan \delta$  ของ PP-Co

ในภาวะเปียกจะพบการเปลี่ยนแปลงของ  $T_g$  ที่  $0.185^{\circ}\text{C}$  และ  $-49.04^{\circ}\text{C}$  ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะไม่พบในระบบของพอลิเมอร์ผสมผสมเช่นกันดังที่อธิบายไว้ในข้างต้น



รูปที่ 4.49 ผลของน้ำต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสมในภาวะเปียก

แต่สำหรับในกรณีที่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่าที่อัตราส่วนผสม 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co โดยน้ำหนัก และสารช่วยผสมในปริมาณ 8 phr พบการเปลี่ยนแปลง  $T_g$  ของ PA6 ที่อุณหภูมิ  $-2.13^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสูงกว่าในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ดังรูปที่ 4.50 จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น ในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม โดยสารช่วยผสมดังกล่าวจะไปลดความสามารถของหมู่เอไมด์ในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ เป็นผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง ทำให้ผลของน้ำที่มีต่อ  $T_g$  ของ PA6 ลดลงไปด้วย



รูปที่ 4.50 ผลของน้ำต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสมในภาวะ เบี่ยงที่อัตราส่วนผสม 80%PA6 ต่อ 20%PP-Co

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีในการปรับปรุงสมบัติของ PA6 ในด้านความทนแรงกระแทก และเสถียรภาพทางขนาด โดยลดความสามารถในการดูดซึมน้ำของ PA6 และช่วยในการลดต้นทุน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการนำ PA6 ไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co โดย PP-MA เป็นสารช่วยผสม เพื่อปรับปรุงข้อจำกัดดังกล่าวและช่วยให้ PA6 สามารถนำไปใช้ในงานต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง

จากการทดสอบการละลายของพอลิเมอร์ผสมด้วย Molau 's Test ในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่า สารละลายมีลักษณะเป็น 2 เฟสแยกชั้นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PA6 และ PP-Co ไม่มีความสามารถในการเข้ากันได้ ส่วนในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่าสารละลายมีลักษณะเป็นอิมัลชันซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการเข้ากันได้ ในการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ PP-Co พบว่า ในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม อนุภาคของ PP-Co มีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น ส่วนในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่า อนุภาคของ PP-Co มีขนาดเล็กลงตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น และในการตรวจสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม พบว่า ในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ความสามารถในการดูดซึมน้ำจะลดลงตามปริมาณ PA6 ที่ลดลง ส่วนในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่า ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมจะลดลงตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น ส่วนในการตรวจสอบสมบัติเชิงกล ในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ในภาวะแห้งพบว่า โมดูลัสแรงดึง ความสามารถในการยืดดึงสูงสุด ความทนแรงกระแทก โมดูลัสแรงดัดโค้ง และความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น และในภาวะเปียก โมดูลัสแรงดึง โมดูลัสแรงดัดโค้ง และความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการยืดดึงสูงสุดจะลดลงตามปริมาณ PP-Co ที่เพิ่มขึ้น และในด้านสมบัติความทนแรงกระแทก พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะการแตกหักที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่า โมดูลัสแรงดึง ความสามารถในการยืดดึงสูงสุด ความทนแรงกระแทก โมดูลัสแรงดัดโค้ง และความทนแรงดัดโค้งมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณสารช่วยผสมที่มากเกินไปจะเป็นผลให้สมบัติดังกล่าว

ลดลง ส่วนในสภาวะเปียก พบว่า มอดูลัสแรงดึง ความสามารถในการยึดดึงสูงสุด มอดูลัสแรงดัดโค้ง และความทนแรงดัดโค้งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับในภาวะแห้ง กล่าวคือสมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณสารช่วยผสมที่มากเกินไปจะเป็นผลให้สมบัติดังกล่าวลดลง และในด้านสมบัติความทนแรงกระแทก พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะการแตกหักที่ไม่สมบูรณ์เช่นเดียวกับระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสมในภาวะเปียก และในด้านสมบัติทางความร้อน ในระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่า ปริมาณความเป็นผลึก อุณหภูมิในการเกิดผลึก และอุณหภูมิในการหลอมเหลวของ PA6 และ PP-Co และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของ PA6 มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่า ปริมาณความเป็นผลึก และอุณหภูมิในการเกิดผลึกของ PA6 และ PP-Co และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของ PA6 มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ผลของน้ำมีผลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของ PA6 ลดลง โดยในระบบที่มีการเติมสารช่วยผสมจะช่วยลดผลของน้ำต่อการลดลงของอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของ PA6

สรุปโดยรวมแล้ว ที่อัตราส่วน 90% PA6 ต่อ 10% PP-Co และใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 5 phr และที่อัตราส่วน 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co และใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 8 phr พบว่าที่อัตราส่วนผสมดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำกว่า PA6 และมีสมบัติเชิงกล เช่น สมบัติด้านความทนแรงดึง และสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งสูงกว่าอัตราส่วนผสมอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วน 80% PA6 ต่อ 20% PP-Co และใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 8 phr พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีสมบัติด้านความทนแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนผสมอื่น ๆ และยังคงมีค่าสูงกว่า PA6 ด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. นำพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงได้มาศึกษาเปรียบเทียบกับไนลอนชนิดอื่น ที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงได้ เช่น ไนลอน 6,12 เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพในการปรับปรุง และเป็นแนวทางในการนำไปใช้งานทดแทนต่อไป
2. จากหลักการดังกล่าวควรนำไปพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เช่น พอลิอะซิเตด (POM) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่มีสมบัติความทนแรงกระแทกต่ำเมื่อชิ้นงานมีรอยบาก

## เอกสารอ้างอิง

1. Sauters, K.J. Organic Polymer Chemistry. London: Chapman & Hill, 1988.
2. Sperling, L.H. Introduction to Physical Polymer Science. Singapore: John Wiley & Sons, 1993.
3. Lang, J.Z. and Li, R.Y. Rubber toughening in polypropylene. Journal of Applied Polymer Science 77 (2000): 1489 – 1493.
4. Gadekar et. al. Blend of nylon with polyethylene: effect of compatibilizer on mechanical and dynamic mechanical properties. Journal of Applied Polymer Science 69 (1998): 161 – 168.
5. สถิติราคาเม็ดพลาสติกภายในประเทศ. พลาสติก (มกราคม 2538): 56.
6. Li et. al. Polymer-polymer interface in polypropylene/polyamide blends by reactive processing. Polymer 38 (1997): 3921 – 3925.
7. Kudva-Montiel et. al. Morphology and mechanical properties of compatibilized nylon6/polyethylene blends. Polymer 40 (1999): 6003 – 6021.
8. Grof et. al. Structure-property of relationship of modified polypropylene-polycapraamide fiber. Journal of Applied Polymer Science 44 (1992): 1061 – 1068.
9. Manning, S.C. and Moore, R.B. Reactive compatibilization of polypropylene and polyamide-6,6 with carboxylated and maleated polypropylene. Polymer Engineering and Science 39 (1999): 1921 – 1929.
10. Okada et. al. Nylon6 as a modifier for maleated ethylene-propylene elastomer. Polymer 40 (1999): 2699 – 2709.
11. Lorenzo et. al. Compatibilization criteria and procedures for binary blends. Journal of Polymer Engineering 17 (1997): 429 – 459.
12. Reval, H. and Deri, S. Relationship between morphology and properties of polyamide-6 LDPE blends. Polymer Engineering and Science 32 (1991): 493 – 500.
13. Subzamanian, S. and Lee, S. Polystyrene-graft-acrylic acid as compatibilizer of polystyrene/nylon 6,6 blends. Polymer Engineering and Science 39 (1999): 2274 – 2281.



14. Ohlsson et. al. Effect of the mixing procedure on the morphology and properties of compatibilized polypropylene/polyamide blends. Polymer 39 (1998): 4715 – 4721.
15. Hietaoja et. al. The effect of viscosity ratio on the phase inversion of polyamide 66/polypropylene blends. Journal of Applied Polymer Science 54 (1994): 1613 – 1623.
16. Jurkowski et. al. Influence of chemical and mechanical compatibilization on structure and properties of polypropylene/polyamide blends. Journal of Applied Polymer Science 69 (1998): 719 - 717.
17. Tucker et. al. A study of the effect of PP-g-MA and SEBS-g-MA on the mechanical and morphological properties of polypropylene/nylon6 blends. Polymer Engineering and Science 40 (2000): 2577 – 2589.
18. Sathe et. al. The effect of composition on morphological, thermal and mechanical properties of polypropylene/nylon6/polypropylene-g-butyl acrylate blends. Polymer Engineering and Science 36 (1996): 2443 – 2450.
19. Holsti et. al. Functionalized elastomeric compatibilizer in PA6/PP blends and binary interactions between compatibilizer and polymer. Polymer Engineering and Science. 34 (1994): 395 – 404.
20. Holsti et. al. Effect of compatibilizers on the properties of polyamide/polypropylene blends. Polymer Engineering and Science 32 (1992): 868 – 877.
21. Gonzalez et. al. Impact-modified nylon6/polypropylene blends. Polymer 36 (1995): 4587 – 4603.
22. Mai et. al. Effect of rubber functionality on microstructures and fracture toughness of impact –modified nylon6,6/polypropylene blends. Polymer 41 (2000): 5471 – 5483.
23. Hans, D.H. Plastics for Engineers. Munich: Hanser, 1993.
24. Driver, W.E. Plastics Chemistry and Technology. New York: Van Nostrand Reinhold, 1979.
25. Karger-Kocsis, J. Polypropylene Structure, Blends and Composition Volume 1 Structure and Morphology. London: Chapman & Hall, 1995.

26. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. Special Topic in Polymer Materials. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
27. Kozlowski, M. Structure and mechanical properties of heterogeneous polymer blends. Journal of Applied Polymer Science 55 (1995): 1375 – 1383.
28. Folkes, M.J. and Hope, S. Polymer Blends and Alloys. London: Backie Academic & Professional, 1993.
29. Seymour, R.B. and Mark, H.F. Application of Polymer. New York: Plenum Press, 1991.
30. Kroschwitz, J.I. High Performance Polymers and Composites. New York: John Wiley & Sons, 1991.
31. Serpe et. al. Morphology-processing relationships in polyethylene-polyamide blends. Polymer Engineering and Science 30 (1990): 553 – 565.
32. Wu, J. et. al. Effect of reactive functional group in the compatibilizer on mechanical properties of compatibilized blends. Journal of Applied Polymer Science 52 (1994): 1695 - 1706.
33. Zhang et. al. Morphology, thermal behavior, and mechanical properties of PA1010/PP and PA1010/PP-g-GMA blends. Journal of Applied Polymer Science 64 (1997): 1489 – 1498.
34. Zhang et. al. The phase inversion and morphology of nylon 1010/polypropylene blends. Journal of Applied Polymer Science 62 (1996): 893 – 901.
35. Lee, J. and Yang, S. Effects of the mixing procedure on properties of compatibilized polypropylene/nylon6 blends. Polymer Engineering and Science 35 (1995): 1821 – 1833.
36. Duvall et. al. Effect of compatibilization on the properties of polypropylene/polyamide-66 Blends. Journal of Applied Polymer Science 52 (1994): 195 - 206.
37. Utracki, L.A. Polymer Alloys and Blends. Munich: Hanser, 1990.
38. Hatakeyama, T. Thermal Analysis. New York: Wiley, 1999.
39. Speyer, R.F. Thermal Analysis of Materials. New York: Marcel Dekker, 1994.
40. นิต์สน์ จิระอรุณ. วัสดุพอลิเมอร์. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก

ตารางที่ 1 มอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง

PA6 / PP-Co / PP-MA	มอดุลัสแรงดึง (GPa)						
	X1	X2	X3	X4	X5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 / 0 / 0	3.00	2.88	3.14	2.95	2.97	2.99	0.10
90 / 10 / 0	2.68	2.79	2.54	2.64	2.63	2.66	0.09
80 / 20 / 0	2.46	2.46	2.46	2.53	2.69	2.52	0.10
70 / 30 / 0	2.07	2.05	1.95	2.05	1.97	2.02	0.05
60 / 40 / 0	2.07	1.78	1.82	2.03	1.85	1.91	0.13
50 / 50 / 0	1.88	1.77	1.84	1.76	1.63	1.78	0.10
90 / 10 / 2	2.72	2.78	2.73	2.71	2.70	2.73	0.03
90 / 10 / 5	2.77	2.81	2.62	2.76	2.85	2.76	0.09
90 / 10 / 8	2.51	2.66	2.54	2.67	2.44	2.56	0.10
90 / 10 / 10	2.41	2.53	2.51	2.51	2.44	2.48	0.05
90 / 10 / 12	2.41	2.67	2.33	2.37	2.51	2.46	0.14
90 / 10 / 15	2.48	2.34	2.48	2.36	2.41	2.41	0.07
80 / 20 / 2	2.54	2.70	2.72	2.62	2.64	2.64	0.07
80 / 20 / 5	2.64	2.62	2.64	2.70	2.71	2.66	0.04
80 / 20 / 8	2.75	2.66	2.64	2.72	2.71	2.70	0.05
0 / 100 / 0	1.20	1.22	1.23	1.24	1.20	1.22	0.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 ความสามารถในการยัดตึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง

PA6 / PP-Co / PP-MA	ความสามารถในการยัดตึงสูงสุด (%)						
	X1	X2	X3	X4	X5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 / 0 / 0	179.30	160.42	176.26	167.38	170.50	170.77	7.44
90 / 10 / 0	63.90	63.57	65.79	62.41	67.39	64.61	1.97
80 / 20 / 0	46.59	46.72	46.52	48.23	45.98	46.81	0.84
70 / 30 / 0	35.47	35.88	36.87	39.04	34.56	36.36	1.71
60 / 40 / 0	35.61	33.77	33.59	32.43	33.72	33.82	1.14
50 / 50 / 0	34.08	33.65	32.06	32.21	33.12	33.02	0.88
90 / 10 / 2	153.06	159.56	143.10	139.98	157.50	150.64	8.70
90 / 10 / 5	155.78	154.35	159.12	149.98	152.31	154.31	3.47
90 / 10 / 8	145.49	147.98	152.35	140.74	155.25	148.36	5.70
90 / 10 / 10	144.26	137.50	140.21	137.45	143.54	140.59	3.23
90 / 10 / 12	149.83	143.65	140.97	139.80	145.62	143.97	3.99
90 / 10 / 15	150.00	141.66	141.47	137.85	145.23	143.24	4.59
80 / 20 / 2	110.00	125.70	117.56	119.35	120.20	118.56	5.67
80 / 20 / 5	148.47	150.38	137.65	142.38	147.50	145.28	5.19
80 / 20 / 8	155.70	150.81	147.35	151.37	146.43	150.33	3.68
0 / 100 / 0	64.25	62.38	60.47	59.63	55.45	60.44	3.31

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3 มอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเป็ยก

PA6 / PP-Co / PP-MA	มอดุลัสแรงดึง (GPa)						
	X1	X2	X3	X4	X5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 / 0 / 0	0.49	0.51	0.51	0.47	0.48	0.49	0.02
90 / 10 / 0	0.54	0.52	0.56	0.60	0.58	0.56	0.03
80 / 20 / 0	0.65	0.67	0.65	0.67	0.67	0.66	0.01
70 / 30 / 0	0.76	0.72	0.96	0.78	0.74	0.79	0.10
60 / 40 / 0	0.85	0.71	0.75	1.10	0.76	0.83	0.16
50 / 50 / 0	0.89	0.83	1.09	0.97	0.91	0.94	0.10
90 / 10 / 2	0.58	0.58	0.60	0.58	0.61	0.59	0.01
90 / 10 / 5	0.63	0.60	0.61	0.55	0.71	0.62	0.06
90 / 10 / 8	0.60	0.72	0.70	0.64	0.64	0.66	0.05
90 / 10 / 10	0.53	0.62	0.79	0.66	0.60	0.64	0.10
90 / 10 / 12	0.63	0.59	0.72	0.58	0.61	0.63	0.06
90 / 10 / 15	0.65	0.64	0.58	0.55	0.56	0.60	0.05
80 / 20 / 2	0.68	0.66	0.66	0.78	0.69	0.69	0.05
80 / 20 / 5	0.85	0.67	0.62	0.70	0.62	0.69	0.09
80 / 20 / 8	0.71	0.73	0.81	0.69	0.71	0.73	0.05
0 / 100 / 0	1.17	1.15	1.12	1.12	1.09	1.13	0.03

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4 ความสามารถในการยัดดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียก

PA6 / PP-Co / PP-MA	ความสามารถในการยัดดึงสูงสุด (%)						
	X1	X2	X3	X4	X5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 / 0 / 0	345.01	369.41	385.81	400.41	379.85	376.10	20.68
90 / 10 / 0	307.81	310.01	309.00	307.20	307.00	308.20	1.28
80 / 20 / 0	257.81	257.62	255.40	257.01	256.01	256.77	1.04
70 / 30 / 0	236.60	233.01	236.80	245.40	241.20	238.60	4.78
60 / 40 / 0	163.64	133.62	195.03	174.15	173.83	168.05	22.38
50 / 50 / 0	109.45	90.95	108.29	93.28	85.30	97.45	10.83
90 / 10 / 2	340.20	340.21	344.60	343.41	346.61	343.01	2.80
90 / 10 / 5	367.20	360.40	321.21	363.00	357.40	353.84	18.59
90 / 10 / 8	353.40	357.00	343.20	345.61	349.60	349.76	5.61
90 / 10 / 10	346.41	352.20	342.20	354.00	343.21	347.60	5.29
90 / 10 / 12	320.12	342.00	341.81	346.40	344.61	338.99	10.72
90 / 10 / 15	322.42	329.01	331.60	320.15	327.60	326.16	4.74
80 / 20 / 2	285.45	265.56	283.31	277.21	291.01	280.51	9.71
80 / 20 / 5	300.25	295.10	317.45	322.58	310.79	309.23	11.49
80 / 20 / 8	330.56	325.78	315.39	335.28	334.79	328.36	8.20
0 / 100 / 0	66.58	84.14	55.50	70.32	57.15	66.74	11.55

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอรัผสมในภาวะแห้ง

PA6 / PP-Co / PP-MA	ความทนแรงกระแทก (mJ/mm <sup>2</sup> )							
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 / 0 / 0	6.68	7.63	7.26	7.80	8.26	6.58	7.37	0.66
90 / 10 / 0	4.68	5.42	5.34	4.31	5.71	4.86	5.05	0.52
80 / 20 / 0	4.68	4.27	4.35	4.01	4.24	4.63	4.36	0.25
70 / 30 / 0	3.90	4.24	3.96	4.18	4.09	4.50	4.15	0.22
60 / 40 / 0	3.93	3.86	3.91	3.58	3.89	3.65	3.80	0.15
50 / 50 / 0	3.81	3.65	3.52	3.51	3.44	3.42	3.56	0.15
90 / 10 / 2	5.23	4.74	5.55	5.91	4.60	4.63	5.11	0.54
90 / 10 / 5	9.75	8.19	9.26	8.26	9.84	8.21	8.92	0.79
90 / 10 / 8	7.56	8.28	8.25	7.97	7.78	7.17	7.84	0.43
90 / 10 / 10	7.29	7.62	7.66	7.59	8.16	7.74	7.68	0.28
90 / 10 / 12	8.46	7.33	8.15	8.30	7.39	7.07	7.78	0.59
90 / 10 / 15	7.96	8.53	7.62	7.02	8.16	8.53	7.97	0.58
80 / 20 / 2	4.40	4.50	4.18	4.36	4.50	4.60	4.42	0.15
80 / 20 / 5	9.24	8.37	9.43	9.11	8.64	8.87	8.94	0.39
80 / 20 / 8	12.75	12.57	12.45	12.69	12.38	11.82	12.44	0.34
0 / 100 / 0	9.99	9.96	10.47	10.99	11.04	9.79	10.37	0.55

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 6 มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะแห้ง

PA6 / PP-Co / PP-MA	มอดุลัสแรงดัดโค้ง (GPa)						
	X1	X2	X3	X4	X5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 / 0 / 0	2.46	2.47	2.51	2.50	2.51	2.49	0.02
90 / 10 / 0	2.11	2.17	2.17	2.22	2.16	2.17	0.04
80 / 20 / 0	2.08	2.01	2.00	2.05	2.05	2.04	0.03
70 / 30 / 0	1.91	1.90	1.90	1.93	1.89	1.91	0.02
60 / 40 / 0	1.70	1.73	1.73	1.71	1.75	1.72	0.02
50 / 50 / 0	1.54	1.59	1.59	1.59	1.54	1.57	0.03
90 / 10 / 2	2.20	2.12	2.17	2.13	2.10	2.14	0.04
90 / 10 / 5	2.28	2.26	2.27	2.26	2.26	2.27	0.01
90 / 10 / 8	2.03	2.08	2.00	2.05	2.02	2.04	0.03
90 / 10 / 10	1.94	1.92	2.04	2.05	2.01	1.99	0.06
90 / 10 / 12	1.95	2.03	2.01	2.02	1.98	2.00	0.03
90 / 10 / 15	1.96	1.99	2.03	1.97	2.01	1.99	0.03
80 / 20 / 2	2.03	2.00	2.02	1.97	1.98	2.00	0.03
80 / 20 / 5	2.03	2.08	1.96	1.99	1.98	2.01	0.05
80 / 20 / 8	2.02	2.05	2.08	2.17	2.10	2.08	0.06
0 / 100 / 0	0.92	0.93	0.94	0.91	0.93	0.93	0.01

ตารางที่ 7 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอริผสมในภาวะแห้ง

PA6 / PP-Co / PP-MA	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)						
	X1	X2	X3	X4	X5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 / 0 / 0	99.98	98.83	100.80	99.71	100.90	100.04	0.85
90 / 10 / 0	86.30	84.56	86.81	86.35	84.79	85.76	1.02
80 / 20 / 0	74.84	73.66	73.41	73.57	73.75	73.85	0.57
70 / 30 / 0	62.70	62.87	62.64	63.47	62.58	62.85	0.36
60 / 40 / 0	52.20	52.95	53.11	52.07	53.43	52.75	0.59
50 / 50 / 0	46.07	46.40	46.56	46.95	46.35	46.47	0.32
90 / 10 / 2	83.30	84.10	85.57	84.32	83.46	84.15	0.90
90 / 10 / 5	88.17	89.12	89.30	89.54	89.89	89.20	0.65
90 / 10 / 8	80.65	83.43	81.36	82.78	81.68	81.98	1.12
90 / 10 / 10	78.76	78.45	81.63	81.96	80.95	80.35	1.64
90 / 10 / 12	78.97	80.62	79.96	80.56	79.09	79.84	0.78
90 / 10 / 15	78.45	79.80	80.81	80.16	81.13	80.07	1.05
80 / 20 / 2	74.37	73.02	73.78	73.55	73.32	73.61	0.51
80 / 20 / 5	75.01	74.97	73.97	74.61	73.72	74.46	0.59
80 / 20 / 8	75.89	73.63	74.50	75.76	74.36	74.83	0.97
0 / 100 / 0	37.87	37.55	37.50	37.63	37.92	37.69	0.19

สถาบันวิทยบริการ  
 าลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8 มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมในภาวะเปียก

PA6 / PP-Co / PP-MA	มอดุลัสแรงดัดโค้ง (GPa)						
	X1	X2	X3	X4	X5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 / 0 / 0	0.47	0.48	0.47	0.48	0.47	0.47	0.01
90 / 10 / 0	0.52	0.52	0.51	0.52	0.52	0.52	0.00
80 / 20 / 0	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.00
70 / 30 / 0	0.68	0.67	0.67	0.64	0.67	0.67	0.02
60 / 40 / 0	0.76	0.74	0.74	0.74	0.70	0.74	0.02
50 / 50 / 0	0.81	0.81	0.81	0.82	0.83	0.82	0.01
90 / 10 / 2	0.54	0.53	0.53	0.54	0.53	0.53	0.01
90 / 10 / 5	0.54	0.57	0.54	0.53	0.52	0.54	0.02
90 / 10 / 8	0.51	0.50	0.49	0.50	0.50	0.50	0.01
90 / 10 / 10	0.50	0.52	0.52	0.53	0.52	0.52	0.01
90 / 10 / 12	0.50	0.52	0.52	0.53	0.51	0.52	0.01
90 / 10 / 15	0.44	0.46	0.46	0.47	0.46	0.46	0.01
80 / 20 / 2	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.00
80 / 20 / 5	0.60	0.59	0.58	0.59	0.59	0.59	0.01
80 / 20 / 8	0.61	0.60	0.61	0.61	0.61	0.61	0.00
0 / 100 / 0	0.94	0.90	0.92	0.93	0.92	0.92	0.01

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 9 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอรัผสมในภาวะเปียก

PA6 / PP-Co / PP-MA	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)						
	X1	X2	X3	X4	X5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 / 0 / 0	26.89	26.56	25.34	25.78	26.21	26.16	0.61
90 / 10 / 0	25.85	25.79	25.52	25.35	25.69	25.64	0.20
80 / 20 / 0	24.76	24.21	25.10	25.21	24.52	24.76	0.41
70 / 30 / 0	25.11	25.80	25.69	25.32	24.82	25.35	0.41
60 / 40 / 0	25.69	25.28	25.06	25.04	24.71	25.16	0.36
50 / 50 / 0	26.71	27.12	26.29	27.28	26.95	26.87	0.39
90 / 10 / 2	28.28	27.46	27.62	27.81	27.56	27.75	0.32
90 / 10 / 5	27.96	28.46	28.56	28.21	28.03	28.24	0.26
90 / 10 / 8	27.98	27.39	26.98	27.03	26.87	27.25	0.45
90 / 10 / 10	27.37	28.88	28.08	28.96	28.81	28.42	0.68
90 / 10 / 12	26.85	29.15	28.90	28.77	28.55	28.44	0.92
90 / 10 / 15	28.37	28.61	28.88	29.07	28.89	28.76	0.27
80 / 20 / 2	28.44	27.65	28.25	28.30	27.56	28.04	0.40
80 / 20 / 5	29.56	29.77	28.65	29.35	29.12	29.29	0.43
80 / 20 / 8	29.58	29.45	29.34	30.12	28.79	29.46	0.48
0 / 100 / 0	37.83	37.98	37.13	38.32	37.53	37.76	0.45

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 10 ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม PA6/PP-Co ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (%)						
	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	0/100
1	1.58	1.01	0.64	0.40	0.26	0.15	0.04
2	2.23	1.54	0.92	0.62	0.38	0.31	0.04
3	2.66	2.21	1.14	0.73	0.53	0.38	0.04
5	3.35	2.71	1.49	0.98	0.68	0.50	0.05
6	4.17	3.43	1.83	1.20	0.85	0.66	0.05
7	5.25	4.20	2.38	1.60	1.07	0.87	0.05
14	6.18	5.29	2.94	1.97	1.42	1.05	0.05
21	7.53	6.00	3.64	2.5	1.83	1.36	0.04
27	8.40	6.80	4.10	2.82	2.05	1.53	0.07
35	9.06	7.46	4.72	3.21	2.34	1.73	0.07
43	9.30	7.82	5.17	3.56	2.60	1.92	0.08
49	9.40	8.09	5.35	3.70	2.75	1.90	0.08
56	9.50	8.15	5.36	3.70	2.74	1.90	0.08
63	9.51	8.10	5.37	3.80	2.75	1.92	0.07

ตารางที่ 11 ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม PA6/PP-Co/PP-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (%)								
	90/10/2	90/10/5	90/10/8	90/10/10	90/10/12	90/10/15	80/20/2	80/20/5	80/20/8
1	1.18	1.15	1.11	1.07	1.04	1.01	0.66	0.69	0.66
2	1.64	1.64	1.61	1.46	1.50	1.39	0.98	1.02	0.95
3	2.08	1.94	1.79	1.72	1.66	1.56	1.04	1.00	0.90
5	2.51	2.36	2.14	2.06	1.98	1.83	1.42	1.25	1.11
6	3.30	3.10	2.74	2.66	2.57	2.42	1.70	1.56	1.35
7	4.04	3.89	3.52	3.40	3.25	3.02	2.25	1.97	1.73
14	5.10	4.92	4.50	4.35	4.19	3.92	2.80	2.60	2.18
21	5.86	5.71	5.33	5.19	5.05	4.78	3.43	3.15	2.77
27	6.60	6.46	5.91	5.72	5.53	5.28	3.95	3.80	3.40
35	7.24	7.09	6.48	6.36	6.15	5.92	4.50	4.29	3.78
43	7.65	7.46	6.91	6.69	6.56	6.24	4.88	4.64	4.24
49	7.95	7.69	7.13	6.94	6.80	6.40	5.20	5.00	4.62
56	8.02	7.66	7.17	6.99	6.88	6.43	5.27	5.15	4.91
63	7.97	7.71	7.13	6.95	6.86	6.40	5.30	5.25	4.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อุดมศักดิ์ พาลี เกิดวันที่ 12 พฤศจิกายน 2519 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนสันติราษฎร์วิทยาลัย ในปีการศึกษา 2537 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นปีการศึกษา 2542 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย