



การปรับสมบัติเชิงกลของโพลีเอไมด์โดยโพลีสไตรีน  
ชนิดทนแรงกระแทกสูง

โดย

สิริจุฑารัตน์ ไคววิสารัช

โครงการวิจัยเลขที่ 47GCHEM-2540

ทุนงบประมาณแผ่นดิน

ปี 2540

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

พฤศจิกายน 2541

จท  
วศ 15  
007243



สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ไม่รับผิดชอบ  
ต่อผลเสียใดๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสาร  
ฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็น  
ของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบันฯ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การปรับสมบัติเชิงกลของโพลีเอไมด์โดยโพลีสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง



โดย

สิริจตุรรัตน์ โควาวินิจฉัย

วุฒิ Ph.D. (Materials and Metallurgical Engineering)

โครงการวิจัยเลขที่ 50 G-CHEM-2540

ทุนงบประมาณแผ่นดิน

ปี 2540

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I18223540

21 ก.ค. 2542

## บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลีเอไมด์ 6 (PA6) และโพลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS) โดยศึกษาทั้งระบบที่ไม่มีและที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (Compatibilizer) พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ถูกเตรียมโดยการหลอมผสม PA6 และ HIPS ที่อัตราส่วน 20/80 40/60 60/40 และ 80/20 ตามลำดับ สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ที่ใช้ได้แก่ โคอพอลิเมอร์ของ สไตรีน-เอททิลีน/บิวทิลีน-สไตรีนชนิดต่อแขนงกับ Maleic anhydride (SEBS-g-MA) พอลิเมอร์ผสมระบบ PA6/HIPS เป็นระบบผสมที่ไม่เข้ากัน เมื่อมี SEBS-g-MA สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวในรูปของความเค้น ณ จุดขาดและงานที่ดึงเพื่อให้พอลิเมอร์ผสมขาดมีระดับสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ผสมในสัดส่วน 80/20 ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่ขึ้นระหว่าง SEBS-g-MA กับพอลิเมอร์พื้นฐานทั้งสอง กล่าวคือ บล๊อคของสไตรีนใน SEBS-g-MA สามารถรวมกับโพลิสไตรีนใน HIPS ระหว่างการหลอม ในขณะที่ MA ก็สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มเอไมด์ (-CONH-) ใน PA6 งานวิจัยนี้ยังพบว่าสมบัติความทนต่อการกระแทกของระบบ PA6/HIPS ที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้มีระดับสูงกว่าระบบที่ไม่มีสารดังกล่าว แต่แรงกระแทกและพลังงานกระแทกของทั้งสองระบบผสมต่างน้อยกว่าของพอลิเมอร์แต่ละตัวที่ใช้ผสม อุณหภูมิการโค้งงอ (HDT) ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเมื่อใช้สาร SEBS-g-MA มากขึ้น พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของ PA6 มากแสดงค่า HDT ต่ำ สาร SEBS-g-MA ที่เติมมีประสิทธิภาพลดความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS เนื่องจากสารดังกล่าวมีโครงสร้างเป็นรูพรุน พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มี SEBS-g-MA จัดเป็นระบบพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้บางส่วน การที่พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีจุดแปรสภาพแก้วสองค่าโดยค่าหนึ่งเป็นของโพลิสไตรีนใน HIPS และอีกค่าหนึ่งเป็นของ PA6 ประกอบกับการแปรเปลี่ยนเล็กน้อยของค่าเหล่านี้ ทำให้เชื่อว่าระบบพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมิใช่พอลิเมอร์ผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน การวิเคราะห์พอลิเมอร์ผสมในระดับจุลภาคยืนยันว่าพอลิเมอร์ผสมที่มี SEBS-g-MA เป็นพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้บางส่วน

## Abstract

This research endeavour investigated polymer blends between Polyamide 6 (PA6) and High Impact Polystyrene (HIPS) without and with a compatibilizer. The PA6/HIPS blends were prepared by melt mixing at the blend ratio of 20/80, 40/60, 60/40 and 80/20 respectively. Maleated styrene-ethylene/butylene-styrene block copolymer (SEBS-g-MA) was used as the compatibilizer. The PA6/HIPS are immiscible blends. With the SEBS-g-MA added, their mechanical properties in terms of the strain at break and the work required to fracture the blends under tension, especially at the 80/20 blend ratio, were enhanced effectively. This is believed to be due to the reaction between the SEBS-g-MA and the parent polymers. While the styrene blocks on both ends of the SEBS-g-MA blend with the polystyrene in HIPS during melt mixing, the maleic anhydride (MA) can react with the amide group (-CONH-) in the PA6. Impact properties were found to be slightly greater in the compatibilized systems though their impact strength and impact energy were lower than those of their parent polymers. The heat deflection temperatures (HDT) of the blends tend to be lower for those with higher concentration of the SEBS-g-MA. The blends with greater amount of PA6 exhibit a lower HDT. SEBS-g-MA compatibilizer can effectively decrease the density of the PA6/HIPS blends due to its porous structure. The PA6/HIPS blends with SEBS-g-MA are partially compatible blends. The existence of the two glass transition temperatures, one of the polystyrene in HIPS and the other of the PA6, and their slight variation imply that the blends were not miscible. Microscopic observation of the blends also confirms that the SEBS-g-MA compatibilized PA6/HIPS blend are only partially miscible.

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทบางกอกโพลีเอททิลีน (มหาชน) จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ พร้อมทั้งเจ้าหน้าที่ของฝ่ายๆ ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกแก่คณะผู้วิจัยตลอดโครงการ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	i
Abstract.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	vi
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญรูป.....	viii
1. บทนำ	
1.1 คำนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
2. ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์	
2.1 พอลิเมอร์ผสม.....	4
2.2 สารช่วยให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากัน (Compatibilizer) .....	7
2.3 วิธีการผสมพอลิเมอร์.....	8
2.3.1 การหลอมผสม (Melt Mixing).....	9
2.3.1.1 การหลอมผสมเชิงกล (Mechanical Mixing).....	9
2.3.1.2 การหลอมผสมเชิงกล-เคมี (Mechano-chemical Mixing)...	9
2.3.2 การผสมโดยขบวนการพอลิโมไรเซชัน (In-situ Polymerization)....	10
2.3.3 การผสมโดยทำเป็นสารละลาย (Solution Blending).....	10
2.4 การประเมินความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม.....	11
2.4.1 การตรวจวัดจุดแปรสภาพแก้ว.....	12
2.4.2 การตรวจการกระเจิง.....	13
2.4.3 การศึกษาพอลิเมอร์ผสมในระดับจุลภาค.....	15
2.5 วารสารปริทัศน์.....	17

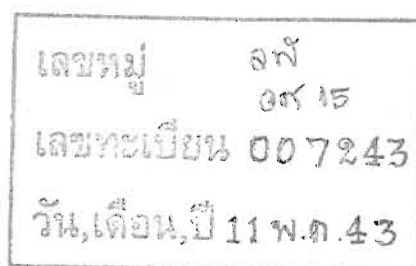
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>3. การทดลองงานวิจัย</b>	
3.1 วัสดุดิบ.....	21
3.1.1 โพลีแอมได์ 6 (PA6) .....	21
3.1.2 โพลีสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS) .....	21
3.1.3 โคพอลิเมอร์แบบบล็อกของ Maleated Styrene-Ethylene/ Butylene -Styrene (SEBS-g-MA).....	22
3.2 การผสมและการเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	24
3.2.1 การทดลองผสม.....	24
3.2.2 การผสมพลาสติกแบบเชิงกล.....	24
3.3.3 การขึ้นรูปและการเตรียมชิ้นงาน.....	26
3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	26
3.3.1 การทดสอบแรงดึง.....	26
3.3.2 การทดสอบด้วยแรงกระแทก.....	27
3.3.2.1 การทดสอบ Izod.....	27
3.3.2.2 การทดสอบด้วยตุ้มน้ำหนัก.....	28
3.3.3 การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอภายใต้ภาระแรงกด.....	28
3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ.....	29
3.4.1 การวัดความหนาแน่น.....	29
3.4.2 การวัดสมบัติเชิงความร้อน.....	29
3.5 การศึกษาพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในระดับจุลภาค.....	29



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. ผลการวิจัยและการวิจารณ์	
4.1 การผสม.....	30
4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์แต่ละชนิดกับ SEBS-g-MA.....	33
4.2.1 ผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ต่อพอลิเมอร์ที่ใช้ผสม.....	33
4.2.1.1 สมบัติภายใต้แรงดึง.....	33
4.2.1.2 สมบัติภายใต้แรงกระแทก Izod.....	40
4.2.1.3 สมบัติภายใต้แรงกระแทกตุ้มน้ำหนัก.....	41
4.2.1.4 อุณหภูมิการโค้งงอภายใต้ภาระแรงกด (HDT).....	43
4.3 สมบัติเชิงกลของระบบผสมพอลิเมอร์ PA6/HIPS.....	44
4.3.1 สมบัติภายใต้แรงดึง.....	44
4.3.2 สมบัติภายใต้แรงกระแทก Izod.....	58
4.3.3 สมบัติภายใต้แรงกระแทกตุ้มน้ำหนัก.....	61
4.3.4 อุณหภูมิการโค้งงอภายใต้ภาระแรงกด (HDT).....	62
4.4 สมบัติเชิงกายภาพและความร้อน.....	64
4.4.1 ความหนาแน่น.....	64
4.4.2 จุดแปรสภาพแก้ว-จุดหลอมเหลว.....	65
4.5 การศึกษาพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในระดับจุลภาค.....	67
5. บทสรุป.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	75



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนและปริมาณส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS.....	24
ตารางที่ 3.2 สูตรผสมของ PA6/HIPS ที่เตรียมโดยใช้เครื่องอัดระบบสกรูคู่.....	25
ตารางที่ 4.1 แรงบิดและความหนืดสัมพัทธ์ของ PA6 และ HIPS ณ สภาวะผสมต่างๆ.....	30



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ผังแสดงระบบพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆ.....	5
รูปที่ 2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการผสมแบบ หลอมผสม (* แสดงส่วนที่มีผลกระทบโดยตรงจากสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ ของพอลิเมอร์).....	6
รูปที่ 2.3 การแทรกอยู่ที่ผิวระหว่างวัฏภาคและการสร้างพันธะระดับ โมเลกุลของสาร ช่วยให้ผสมเข้ากันได้.....	7
รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ออุณหภูมิเมื่อ พอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยพอลิเมอร์ออสฐาน A และพอลิเมอร์ออสฐาน B ผสมในอัตราส่วนต่างๆกัน โดยภาพ (ก) แสดงผลของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ และภาพ (ข) แสดงผลของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน.....	12
รูปที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบความโปร่งใสของพอลิเมอร์ผสม AB ที่ผสม เข้ากันได้เป็นหนึ่งวัฏภาค และพอลิเมอร์ผสม AC ที่มีสองวัฏภาคและไม่โปร่งใส	14
รูปที่ 2.6 สัณฐานของพอลิเมอร์ผสม โดยมีพอลิเมอร์ A (เส้นทึบ) และ พอลิเมอร์ B (เส้นประ) ผสมกันเป็น (ก) เนื้อเดียวกัน (ข) ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน แล ผสมเป็นเนื้อเดียวกันบางส่วน.....	16
รูปที่ 3.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโพลีเอไมด์ 6.....	21
รูปที่ 3.2 ลักษณะสัณฐานในระดับจุลภาคของ HIPS ประกอบด้วยส่วนที่เป็น styrene และอนุภาควาง.....	22
รูปที่ 3.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโคพอลิเมอร์แบบบล็อกของ SEBS.....	23
รูปที่ 3.4 ปฏิกิริยาของ Maleic anhydride กับสารไฮโดรคาร์บอน.....	23
รูปที่ 3.5 ขนาดและรูปทรงชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638...	26
รูปที่ 3.6 ขนาดและรูปทรงชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod.....	27
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์สำหรับทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอภายใต้แรงกด.....	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการแยกกระจายของหยดพอลิเมอร์หลอมภายใต้แรงเฉือน.....	31
รูปที่ 4.2 ระดับแรงบิด-เวลาของการผสมระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS.....	32
รูปที่ 4.3 แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงของ PA6 และ HIPS.....	34
รูปที่ 4.4 แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อความเครียด ณ จุดคราก 0.2% Offset.....	35
รูปที่ 4.5 แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อความเค้น ณ จุดคราก 0.2% Offset.....	36
รูปที่ 4.6 แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อความเครียด ณ จุดขาด.....	37
รูปที่ 4.7 แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อความเค้น ณ จุดขาด.....	38
รูปที่ 4.8 แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่องานเพื่อที่ดึงให้พลาสติกขาด.....	39
รูปที่ 4.9 แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อแรงกระแทก Izod ของ PA6 และ HIPS.....	41
รูปที่ 4.10 แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพลังงานกระแทกโดยดุ่มน้ำหนัก.....	42
รูปที่ 4.11 แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่ออุณหภูมิการโค้งงอ (HDT).....	43
รูปที่ 4.12 ภาพ Load-deformation ภายใต้แรงดึงของ PA6/HIPS และ พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสมต่างๆ โดยมีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้.....	44
รูปที่ 4.13 ภาพ Load-Deformation ภายใต้แรงดึงของ PA6/HIPS และ พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสมต่างๆ พร้อมใส่สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA).....	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 แสดงโมดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr).....	46
รูปที่ 4.15 แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80.....	48
รูปที่ 4.16 แสดงความเครียด ณ จุดคราก 0.2% Offset ภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr).....	49
รูปที่ 4.17 แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80.....	50
รูปที่ 4.18 แสดงความเค้น ณ จุดคราก 0.2% Offset ภายใต้แรงดึงของ พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-M (COM 7.5 phr).....	51
รูปที่ 4.19 แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80.....	52
รูปที่ 4.20 แสดงความเครียด ณ จุดขาดภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr).....	53
รูปที่ 4.21 แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80.....	54
รูปที่ 4.22 แสดงความเค้น ณ จุดขาดภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr).....	55
รูปที่ 4.23 แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80 สำหรับ ความเค้น ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม.....	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.24 แสดงงานที่ดึงจนขาดของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr).....	57
รูปที่ 4.25 แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80 สำหรับงานที่ใช้ในการดึงพอลิเมอร์ผสมจนขาด.....	58
รูปที่ 4.26 แสดงแรงกระแทก Izod ของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr).....	59
รูปที่ 4.27 แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80 สำหรับความทนต่อแรงกระแทก.....	60
รูปที่ 4.28 แสดงพลังงานกระทบจนขาดของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr).....	62
รูปที่ 4.29 แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80.....	63
รูปที่ 4.30 แสดงความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr).....	64
รูปที่ 4.31 จุดแปรสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature) ของแต่ละพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ซึ่งมีมีและไม่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของ PA6 ในพอลิเมอร์ผสม.....	66
รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายระดับจุลภาคแสดงสัญญาณของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ซึ่งมีได้ใส่สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ที่สัดส่วนการผสม (ก) 20/80 (ข) 40/60 (ค) 60/40 และ (ง) 80/20.....	68
รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายระดับจุลภาคแสดงสัญญาณของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ซึ่งมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันคือ (SEBS-g-MA) จำนวน 2.5 phr ที่สัดส่วนการผสม (ก) 20/80 (ข) 40/60 (ค) 60/40 และ (ง) 80/20 ตามลำดับ	70
รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายระดับจุลภาคแสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันต่อสัญญาณของภูมิภาคที่กระจายในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่สัดส่วนการผสม 80/20 โดยมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) เป็นปริมาณ (ก) 2.5 phr (ข) 5.0 phr และ (ค) 7.5 phr.....	72



## 1. บทนำ

### 1.1 คำนำ

ปัจจุบัน พลาสติกมีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น และมีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ทำให้มีความต้องการใช้พลาสติกที่มีสมบัติเหมาะสมแก่การใช้งานด้านต่าง ๆ มากขึ้น จนทำให้พลาสติกที่มีอยู่ในขณะนี้บางชนิด แม้จะมีราคาต้นทุนที่เหมาะสมแต่อาจมีสมบัติไม่ครอบคลุมบางช่วงที่ต้องการใช้งาน

การให้ได้มาซึ่งพลาสติกที่มีสมบัติเหมาะสมแก่ช่วงที่ต้องการใช้งานทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การพัฒนาพลาสติกชนิดใหม่ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เอกพันธ์ (Homopolymer) หรือพอลิเมอร์สหพันธ์ (Copolymer) และการใส่สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติที่ต้องการให้กับพลาสติก การพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่อาจทำได้โดย

- ก) การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่โดยวิธีการทางเคมี ดังเช่น
- การทำพอลิเมอไรเซชันจากมอนอเมอร์ (Monomer) ชนิดใหม่
  - การทำพอลิเมอร์สหพันธ์แบบต่อแขนง (Graft Copolymerization)
  - การทำพอลิเมอร์สหพันธ์แบบบล็อก (Block Copolymerization)
  - การทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหแทรกประสานกัน (Interpenetration network, IPN)

แม้การสังเคราะห์พลาสติกโดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะมีอยู่หลายปฏิกิริยา แต่บางครั้งพลาสติกที่ได้ไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรง เนื่องจากสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของพลาสติกนั้น ๆ ยังมีข้อด้อยอยู่หลายประการ จึงเป็นการยากที่จะสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติครบถ้วนทุกประการตามความต้องการของตลาดผู้ใช้เม็ดพลาสติก ซึ่งได้แก่ผู้ประกอบการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก

- ข) การนำพลาสติกที่มีการผลิตอยู่แล้วมาผสมกันเป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งกระทำได้โดยการผสมทางกล (Mechanical Blending)

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นที่นิยมมากขึ้นในขณะที่การผลิตพอลิเมอร์เอกพันธ์ชนิดใหม่ ๆ ในระดับพาณิชย์กลับลดน้อยลงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการพัฒนาพอลิเมอร์ผสมใช้ระยะเวลาและต้นทุนการผลิต รวมทั้งอุปกรณ์น้อยกว่าการพัฒนาพอลิเมอร์เอกพันธ์ชนิดใหม่ ๆ การทำพอลิเมอร์ผสมสามารถเป็นอุตสาหกรรมขนาดค้อยกว่าการทำพอลิเมอร์เอกพันธ์ นอกจากนี้ เครื่องมือขึ้นรูปบางชนิดในปัจจุบันยังสามารถปรับปรุงเพื่อใช้งานในการผสมพอลิเมอร์ได้ ตัวอย่างเช่น เครื่องอัดแบบสกรูคู่ซึ่งสามารถปรับปรุงหรือตัดแปลงให้เหมาะแก่การผสมพอลิเมอร์ผสมระบบต่าง ๆ ได้

พอลิเมอร์ผสมชนิดแรกได้แก่ โพลีสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS) ซึ่งได้จากการพัฒนาโพลีสไตรีน (PS) โครงสร้างของโพลีสไตรีนเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดอสัณฐาน ณ อุณหภูมิห้อง โพลีสไตรีนเป็นพลาสติกใสและเปราะ การเติมยางลงในโพลีสไตรีนช่วยเพิ่มความทนต่อการกระแทกให้สูงขึ้น แต่ HIPS สูญเสียความใสของ PS เนื่องจากอนุภาคยางมีลักษณะทึบแสง

การทำพอลิเมอร์ผสมมักมีเหตุผลหรือเหตุผลใจหลายประการต่าง ๆ กัน บ่อยครั้งที่เหตุผลใจการผสมพอลิเมอร์คือเพื่อการประหยัดต้นทุน โดยอาจปรับปรุงสมบัติของพลาสติกที่มีราคาแพงด้วยการผสมกับพลาสติกที่มีราคาถูกกว่า หรืออาจพัฒนาพอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามความต้องการแต่ราคาต่ำกว่าการทำพอลิเมอร์เอกพันธ์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน ผู้ผสมสามารถผสมพอลิเมอร์ในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อปรับให้ได้สมบัติตามที่ผู้ใช้งานต้องการ หรืออาจผสมพอลิเมอร์ในรูปของเศษขยะพลาสติกจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial waste) หรือจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Post-consumer waste) โดยนำกลับมาใช้งานใหม่ในรูปของพอลิเมอร์ผสม

เทคโนโลยีการทำพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์อัลลอยยังเป็นศาสตร์ที่ค่อนข้างใหม่สำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกในช่วงปีค.ศ. 1980 แม้จะมีการศึกษาในระดับงานวิจัยบ้าง แต่ไม่ปรากฏว่ามีการผลิตพอลิเมอร์ผสมในเชิงพาณิชย์เลยในช่วงนั้น แต่ในปัจจุบัน ประมาณ 20% ของพอลิเมอร์เรซินในตลาดโลกเป็นพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์อัลลอย



## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาการปรับสมบัติเชิงกลของพลาสติกเอกพันธ์ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ในประเทศไทย โดยการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองให้เป็นพอลิเมอร์ผสม ระบบผสมที่เลือกศึกษาคือการผสมโพลีเอไมด์ 6 (Polyamide, PA6) และโพลีสไตรีนชนิดทนการกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS) โดยพลาสติกผสมดังกล่าวมีสมบัติเชิงกลต่างจากพอลิเมอร์พื้นฐานทั้งสองคือ PA6 และ HIPS งานวิจัยนี้จะศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติทางกายภาพของระบบพอลิเมอร์ผสม PA6 และ HIPS ที่ผสมในอัตราส่วนการผสมต่าง ๆ กัน ตลอดงานจะศึกษาวิฤภาคของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ในระดับจุลภาค เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็นระบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน จากโครงสร้างทางเคมีของ PA6 และ HIPS ก็เชื่อว่าไม่มีส่วนใดทำปฏิกิริยาต่อกัน งานวิจัยนี้จึงมีการใส่สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS เพื่อศึกษาผลกระทบของสารช่วยดังกล่าวต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติทางกายภาพต่อระบบผสม สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ที่ศึกษาได้แก่ พอลิเมอร์สหพันธ์ของสไตรีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีนที่ต่อแขนงกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride)

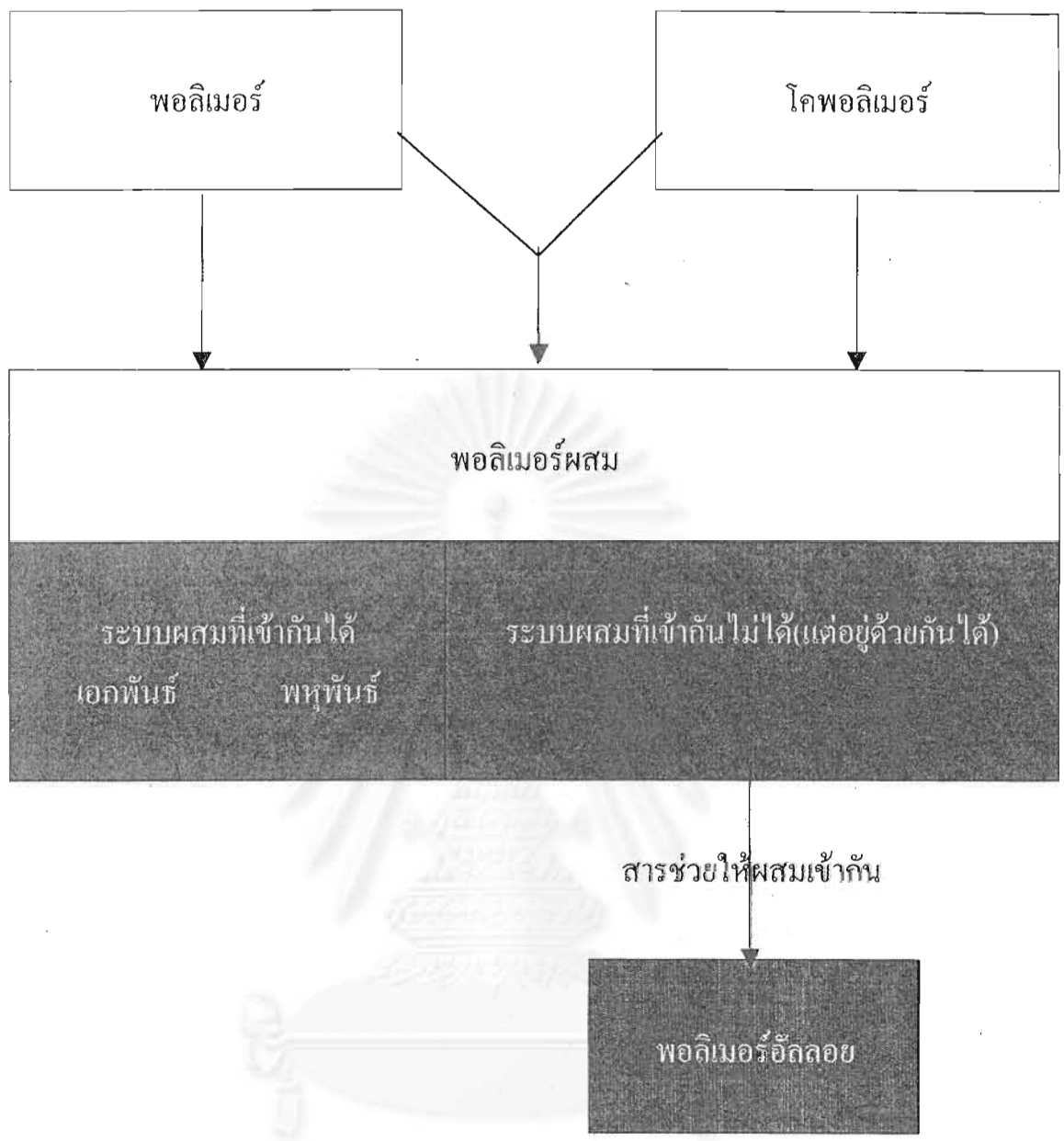
## 2. ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์

### 2.1 พอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม หมายถึง ของผสมของพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์กับโคพอลิเมอร์ หรือโคพอลิเมอร์กับโคพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยของผสมดังกล่าวอาจเป็นของผสมเอกพันธ์ (Homogeneous) หรือพหุพันธ์ (Heterogeneous) เมื่อวิเคราะห์ในระดับจุลภาค แต่ถ้ามองในระดับมหภาคจะไม่เห็นความแตกแยกระหว่างการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันแบบเอกพันธ์ ความสามารถในการผสมขึ้นอยู่กับ การเข้ากันหรือไม่ของพอลิเมอร์ที่เลือกผสม

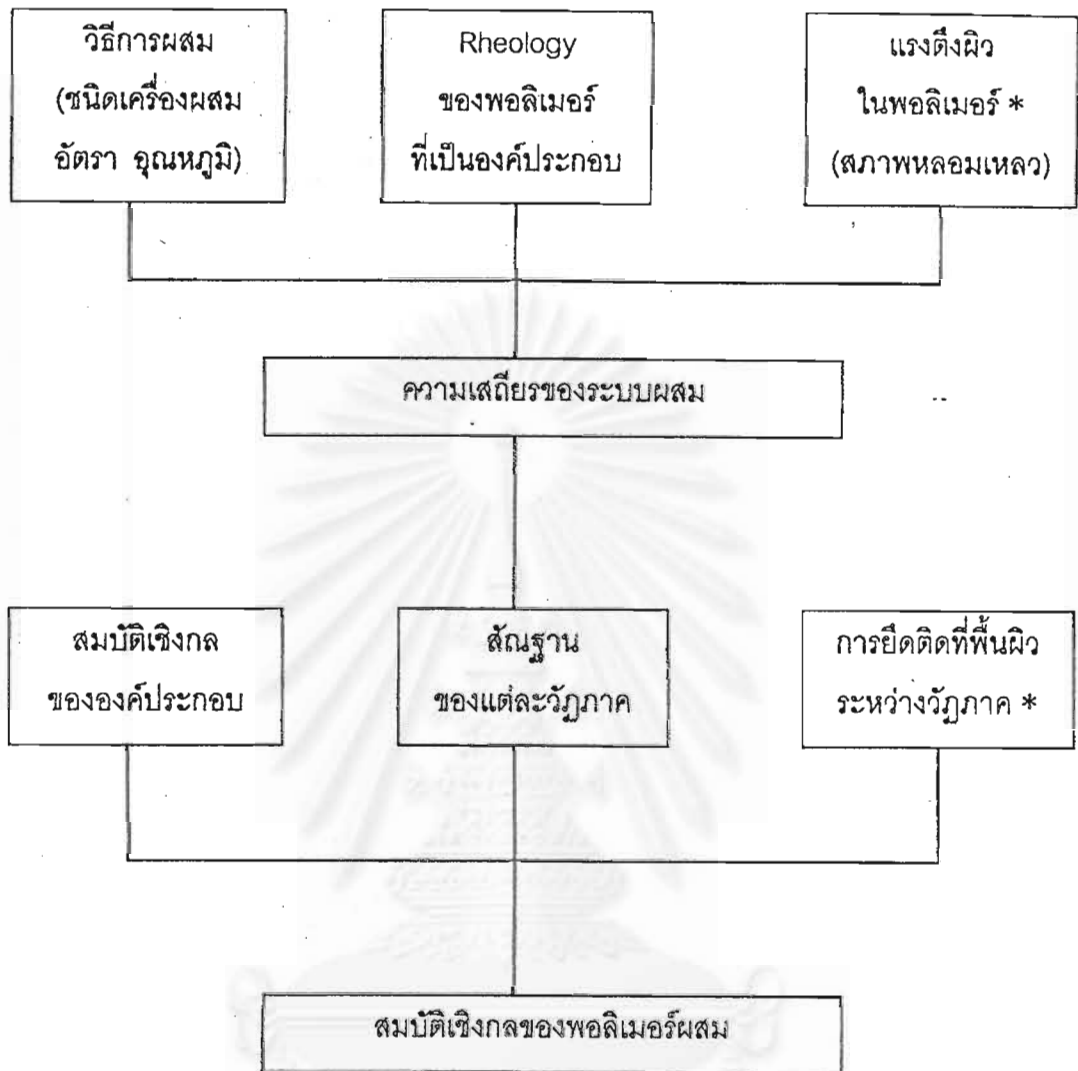
โดยทั่วไป พอลิเมอร์ผสมแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) คือระบบพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ (Miscible blend) และระบบพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันไม่ได้ (Immiscible blend) แต่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยกันได้ (Compatible) เพราะไม่มีผลเสียต่อกัน เช่น ไม่ทำให้พอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งเสื่อมสภาพ ระบบพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้สมบูรณ์เป็นพอลิเมอร์ผสมเอกพันธ์เนื้อเดียวกันภายใต้ทุกสภาวะสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ พอลิเมอร์ผสมในกรณีนี้มีน้อยมาก สมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของพอลิเมอร์พื้นฐานที่เป็นองค์ประกอบ

ส่วนพอลิเมอร์ผสมอีกประเภทหนึ่งคือ พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้บ้างเพียงบางส่วนภายใต้สภาวะที่จำกัด เช่น อุณหภูมิการผสมและสัดส่วนการผสมเฉพาะ โครงสร้างระดับจุลภาคจะมีวิฤภาคของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบปรากฏร่วมกัน ส่วนระบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเลยภายใต้สภาวะใดๆ จะปรากฏวิฤภาคของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบเมื่อวิเคราะห์ในระดับจุลภาค แต่วิฤภาคของแต่ละพอลิเมอร์แยกตัวออกจากกันอย่างชัดเจน ในทางปฏิบัติสามารถพัฒนาระบบพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันไม่ได้นี้โดยการเติม “สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (Compatibilizer)” ลงในพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 2.1 : แสดงระบบพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆ

สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมหรือของชิ้นงานที่ผลิตจากพอลิเมอร์ผสม ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ หลายขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.2

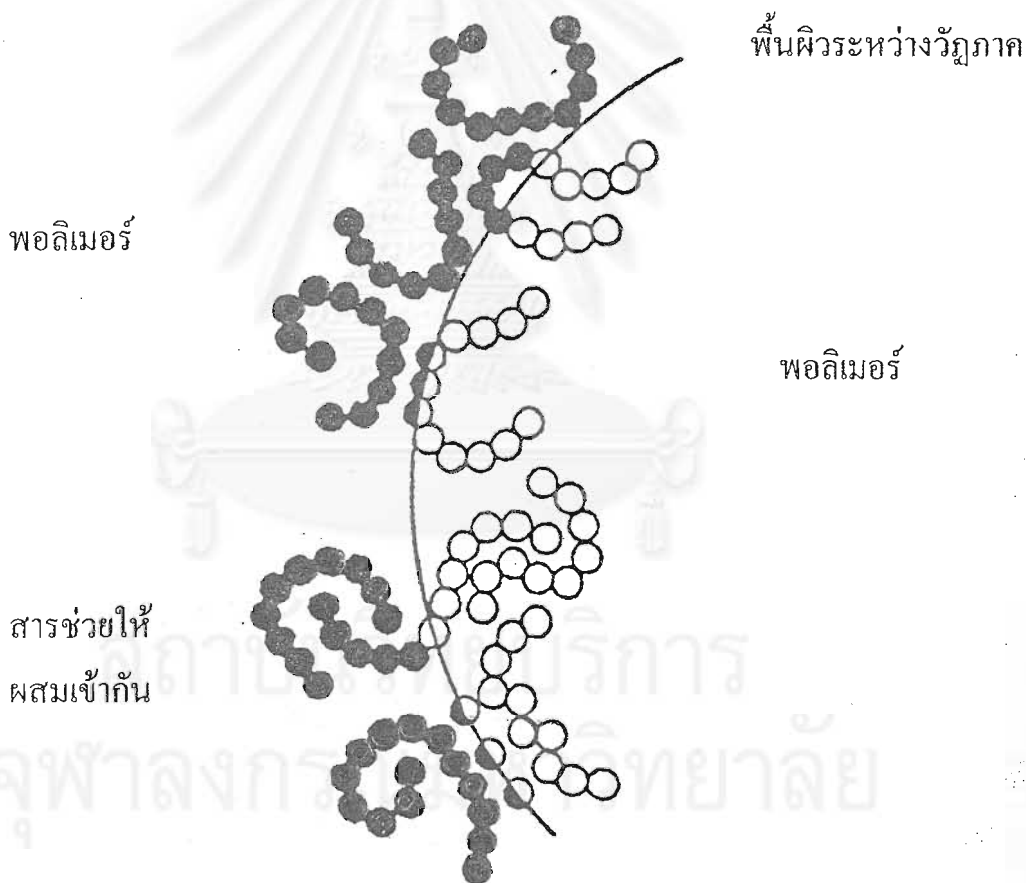


รูปที่ 2.2 : ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการผสมแบบหลอมผสม (\* แสดงส่วนที่มีผลกระทบโดยตรงจากสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์)

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมิได้ขึ้นอยู่กับสมบัติของพอลิเมอร์องค์ประกอบแต่ละชนิดในพอลิเมอร์ผสมเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับลักษณะพื้นฐาน ขนาด และการกระจายตัวของวัฏภาค ตลอดจนการยึดติดและพันธะระหว่างวัฏภาค

## 2.2 สารช่วยให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากัน (Compatibilizer)

สมบัติประจำตัวของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นสารน้ำหนักโมเลกุลสูง คือการไม่เข้ากับสารอื่นๆ หลายชนิด ดังนั้น การผสมพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ จึงได้พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันหรือเข้ากันเพียงบางส่วน ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องมีตัวกลางที่อยู่ระหว่างผิวของพอลิเมอร์ทั้งสองซึ่งสามารถสร้างพันธะทางเคมีกับพอลิเมอร์ทั้งสอง และทำให้สัณฐานของพอลิเมอร์ผสมมีเสถียร ตลอดจนเพิ่มพันธะยึดติดระหว่างผิวของพอลิเมอร์ สารดังกล่าวช่วยให้พอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเข้ากันสามารถเข้ากันได้



รูปที่ 2.3 : การแทรกอยู่ที่ผิวระหว่างวัฏภาคและการสร้างพันธะระดับโมเลกุลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้

สารช่วยให้ผสมเข้ากันสามารถช่วยให้เกิดการเข้ากันได้โดยสร้างพันธะระดับโมเลกุลบนผิวของวัสดุที่สัมผัสกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 โมเลกุลของสารช่วยให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันสามารถแทรกซึมเข้าไปอยู่ที่พื้นผิวระหว่างพอลิเมอร์สองชนิดที่ผสมกัน ดังแสดงเป็นโมเลกุลสายโซ่สองชนิดในรูปที่ 2.3 การทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวระหว่างวัสดุของพอลิเมอร์ทั้งสองถูกเพิ่มสูงขึ้น โดยสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ซึ่งอยู่ตามพื้นผิวระหว่างวัสดุ

สารช่วยให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้มีหลายชนิด ที่นิยมใช้เป็น โคพอลิเมอร์แบบบล็อก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โคพอลิเมอร์แบบบล็อกที่มีบล็อกซึ่งเป็นองค์ประกอบเหมือนกับพอลิเมอร์ผสม แม้กลไกการเข้าทำปฏิกิริยาหรือไม่ทำปฏิกิริยาโดยตรงของสารช่วยให้ผสมเข้ากันจะซับซ้อนและบางครั้งยังไม่กระจ่างชัด แต่โดยทั่วไปสารดังกล่าวมักทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้บางส่วนหรือมากขึ้น โดยการเข้าไปทำหน้าที่ดังนี้

- (ก) ลดแรงตึงผิวระหว่างพอลิเมอร์เหลว
- (ข) เพิ่มการยึดติดระหว่างวัสดุของพอลิเมอร์ที่ผสมทั้งสอง ณ พื้นผิวระหว่างวัสดุ
- (ค) ทำให้วัสดุที่กระจายเป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพมากขึ้น

## 2.3 วิธีการผสมพอลิเมอร์ (Methods of Blending)

การผสมพอลิเมอร์เป็นกระบวนการที่ช่วยเสริมให้เกิดการถ่ายเทของโมเลกุลของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่พื้นผิวระหว่างพอลิเมอร์เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด หรือมีการกระจายของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งในเนื้อของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ โดยอาจมีการใช้ความร้อน แรงเฉือน หรือตัวทำละลายเข้าช่วยในกระบวนการผสม กรรมวิธีการผสมพอลิเมอร์มีหลายวิธี ได้แก่

### 2.3.1 การหลอมผสม (Melt Mixing)

การหลอมผสมมีข้อดี คือ สภาวะและเครื่องมือการผสมใกล้เคียงกับสภาวะและเครื่องมือการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป ปฏิกริยาเคมีสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการหลอมผสม แต่ข้อจำกัด คือ ความหนืดของระบบพอลิเมอร์ผสมจะค่อนข้างสูง ทำให้ประสิทธิภาพการผสมในระดับโมเลกุลค่อนข้างต่ำ เพราะโมเลกุลขาดอิสระในการเคลื่อนหรือขยับ

#### 2.3.1.1 การหลอมผสมเชิงกล (Mechanical Mixing)

การหลอมผสมเป็นวิธีการผสมพอลิเมอร์ที่ใช้กันมากที่สุด เป็นการผสมโดยใช้ความร้อนช่วยหลอมพอลิเมอร์ทั้งสองที่จะผสม โดยอาจกระทำในคูลูกกรีดร้อนซึ่งเป็นเครื่องระบบเปิด หรือในเครื่องผสมระบบปิด ที่นิยมคือการผสมในเครื่องอัดรีด ซึ่งอาจเป็นระบบสกรูคู่หรือระบบสกรูเดี่ยว ความเค้นเฉือน (Shear stress) จากสกรูและการไหลของพอลิเมอร์หลอมแบบปั่นป่วน จะช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีระดับการผสมที่ดีขึ้น นอกจากสัดส่วนของพอลิเมอร์ที่ใช้ผสมแล้ว สภาวะที่ต้องควบคุมคืออุณหภูมิในโซนต่างๆ ของสกรูที่ใช้ผสม ความดัน ความเร็วรอบของสกรู และระยะเวลาการผสม พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมโดยวิธีนี้ มีข้อดีคือ ไม่มีสารอื่นๆ เช่น สารตัวทำละลายเจือปน แต่มีข้อเสียคือ สภาวะที่รุนแรงเช่นแรงเฉือนที่บริเวณร่องระหว่างขอบสกรูกับกระบอกอัดประกอบกับความเร็วที่ใช้ในการหลอมและการผสม อาจทำให้พอลิเมอร์ผสมหรือองค์ประกอบบางส่วนของพอลิเมอร์ผสมเกิดการเสื่อมสภาพ

#### 2.3.1.2 การหลอมผสมเชิงกล-เคมี (Mechano-chemical mixing)

การหลอมผสมแบบเชิงกล-เคมีนี้ เป็นการหลอมผสมคล้ายการหลอมผสมเชิงกลแต่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นด้วยระหว่างการผสม การหลอมผสมวิธีนี้อาจนำไปสู่การต่อแขนงหรือการเรียงตัวแบบเป็นบล็อกของโคพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ที่ผสม

เครื่องที่ใช้สำหรับหลอมผสมพอลิเมอร์มีหลายชนิด เช่น เครื่องอัดรีดระบบสกรูคู่ ซึ่งมีข้อดีคือ แรงเฉือนระหว่างขอบสกรูกับกระบอกอัดจะสม่ำเสมอและมีระดับความเครียดเฉือนสูง ระยะเวลาที่ใช้ผสมค่อนข้างสั้น แต่มีข้อเสียในด้าน

ราคาต้นทุนของเครื่องอัดรีดระบบสกรูคู่จะสูงมาก เครื่องอัดรีดระบบสกรูเดี่ยวจะมีราคาต้นทุนของเครื่องต่ำกว่า ความนิยมใช้สูงกว่าและการปรับเปลี่ยนสกรูทำได้ง่ายกว่า แต่ระดับแรงเฉือนจะสูงสู้ระบบสกรูคู่มิได้ นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการผสมสูงกว่าระบบสกรูคู่ ทำให้พอลิเมอร์ผสมต้องอยู่ในสภาวะหลอมและร้อนเป็นเวลานาน ส่วนเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) มีข้อดีในด้านมีความเครียดสม่ำเสมอ แต่มีข้อจำกัดคือเป็นการผสมระบบแบทช์ (Batch) จึงเป็นวิธีการผสมที่ไม่ต่อเนื่อง

### 2.3.2 การผสมโดยขบวนการพอลิเมอไรเซชัน (In-situ Polymerization)

การผสมพอลิเมอร์โดยขบวนการพอลิเมอไรเซชันกระทำโดยการพอลิเมอไรซ์มอนอเมอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายในสารละลายของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ผลที่ได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างร่างแหแทรกประสานกัน วิธีนี้จึงมีชื่อเรียกอย่างแพร่หลายอีกชื่อหนึ่งว่า การผสมพอลิเมอร์ทางเคมี (Chemical polymer blend) แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ การพอลิเมอไรซ์ใช้เวลานานเพราะความหนืดของสารเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในระหว่างขบวนการผสม

### 2.3.3 การผสมโดยทำเป็นสารละลาย (Solution Blending)

วิธีนี้เป็นการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่จะผสมในสารละลายซึ่งเป็นตัวทำละลายร่วมสำหรับพอลิเมอร์ทั้งสอง จากนั้นจึงนำสารละลายพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวไปหล่อเป็นแผ่นฟิล์ม หรือแช่ให้เย็นแข็งและขจัดตัวทำละลายออกโดยการระเหิด หรือตกผลึก/ตกตะกอนร่วมกัน

ข้อดีของการผสมโดยทำเป็นสารละลายคือ โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ผสมมีอิสระในการเคลื่อนตัว ทำให้การผสมกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพถึงในระดับโมเลกุล นอกจากนี้ ยังเหมาะสำหรับพอลิเมอร์ที่ผสมโดยกระบวนการหลอมผสมไม่ได้ เช่น พอลิเมอร์ที่เสื่อมสลายง่ายด้านความร้อน (Thermal degradation) หรือพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิการเสื่อมสภาพอยู่ใกล้กับจุดหลอมเหลว ข้อเสียของการผสมโดยทำเป็นสารละลายคือ พอลิเมอร์ที่ผสมอาจไม่บริสุทธิ์ อาจมีผลกระทบจากตัวทำละลายร่วมที่ใช้



## 2.4 การประเมินความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม

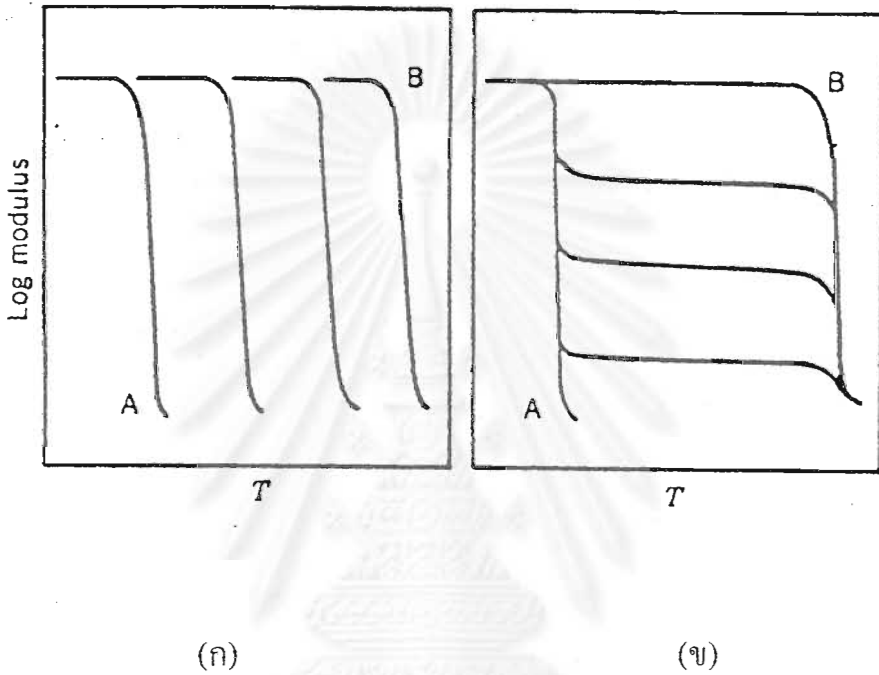
การตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดต่างๆ กัน การจะเลือกวิธีประเมินความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมมักต้องคำนึงถึงสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติด้านความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบ วิธีที่นิยมได้แก่

### 2.4.1 การตรวจวัดจุดแปรสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature)

จุดแปรสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) เป็นอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงมหภาคจากสภาพพอลิเมอร์ที่นุ่มและโค้งงอได้เมื่อพอลิเมอร์อยู่ที่อุณหภูมิเหนือจุด  $T_g$  กลายมาเป็นพอลิเมอร์ที่แข็งเปราะ คล้ายแก้ว เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุด  $T_g$  ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนขยับของโมเลกุลของพอลิเมอร์เมื่ออุณหภูมิเหนือจุดแปรสภาพแก้วถูกหยุดไปขณะที่พอลิเมอร์เย็นลงจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดแปรสภาพแก้ว การตรวจวัดค่าจุดแปรสภาพแก้วเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมมากในการประเมินความเข้ากันได้หรือไม่ของพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เพราะวิธีนี้นับว่าเป็นวิธีที่ง่ายและให้ผลการทดสอบที่เชื่อถือได้ การตรวจวัดค่า  $T_g$  สามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใช้วิธีการตรวจวัดเชิงความร้อน วิธีการตรวจวัดเชิงกล

ในเชิงความร้อน จุดแปรสภาพแก้วหมายถึง อุณหภูมิที่โครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีพลังงานความร้อนเพียงพอที่จะเอาชนะพันธะยึดติดระหว่างโมเลกุล ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนขยับหรือสั่นสะเทือนได้ ค่าและตำแหน่งของจุดแปรสภาพแก้วสามารถนำไปสู่ข้อมูลเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ผสมเอกพันธ์หรือพอลิเมอร์ที่มีวิฎภาคเดียวจะมีค่าจุดแปรสภาพแก้วเพียงจุดเดียว จุดแปรสภาพแก้วดังกล่าวเป็นค่าที่ขึ้นกับอัตราส่วนการผสม และเป็นค่าที่สะท้อนสภาวะการผสมพอลิเมอร์ผสมที่มีสองวิฎภาคจะปรากฏมีจุดแปรสภาพแก้วสองค่าแตกต่างกัน โดยค่าที่ปรากฏแต่ละค่าจะเป็นจุดแปรสภาพแก้วของแต่ละวิฎภาค รูปที่ 2.4 แสดงความเปลี่ยนแปลงของของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) กับอุณหภูมิสำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ผสมจากพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B จนเป็นพอลิเมอร์ผสม

ที่เข้ากันได้และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน โดยพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B ต่างเป็นพอลิเมอร์ออสัญฐาน



รูปที่ 2.4 : แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ออุณหภูมิเมื่อพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยพอลิเมอร์ออสัญฐาน A และพอลิเมอร์ออสัญฐาน B ผสมในอัตราส่วนต่างๆกัน โดยภาพ (ก) แสดงผลของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ และภาพ (ข) แสดงผลของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน

วิธีการประเมินความเข้ากันได้หรือความเข้ากันไม่ได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยการตรวจวัดจุดแปรสภาพแก้วมีข้อจำกัด หากพอลิเมอร์ที่ผสมทั้งสองมีจุดแปรสภาพแก้วใกล้เคียงกันมาก และไม่สามารถแยกความแตกต่างของจุดทั้งสองได้ นอกจากนี้ การกลายสภาพเป็นผลึก (Crystallization) ของพอลิเมอร์หนึ่งในระหว่างการตรวจวัดจุดแปรสภาพแก้วของพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่งในพอลิเมอร์ผสมก็สามารถทำให้การ

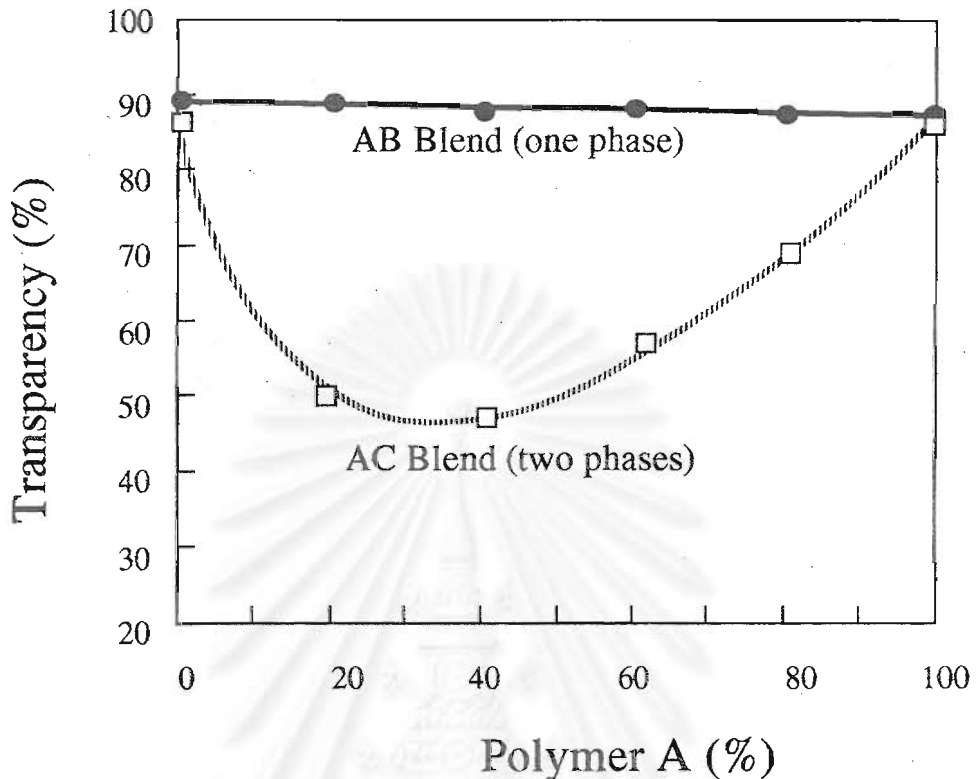
ตรวจวัดค่า  $T_g$  เบี่ยงเบนจากความเป็นจริงได้ พอลิเมอร์ผสมซึ่งผสมจากพอลิเมอร์สองชนิด อาจมีจุดแปรสภาพแก้วเพียงจุดเดียว แต่การวิเคราะห์พื้นฐานในระดับจุลภาคอาจพบว่ามีสองวัฏภาค แม้ว่าในความเป็นจริงอาจมีค่าจุดแปรสภาพแก้วสองค่าแต่อาจมีการบดบังซึ่งมีผลทำให้การตรวจสอบค่าจุดแปรสภาพแก้วทำได้ยาก

วิธีการที่นิยมใช้ในการตรวจวัดจุดแปรสภาพแก้วคือ การเปรียบเทียบความร้อนจำเพาะที่แตกต่างโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) หรืออาจใช้วิธีอื่นๆ เช่น การตรวจความเปลี่ยนแปลงของปริมาตรจำเพาะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง หรือการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

#### 2.4.2 การตรวจวัดการกระเจิง (Scattering)

การตรวจวัดการกระเจิงเป็นวิธีการตรวจสอบว่าพอลิเมอร์ผสมมีวัฏภาคเดียวหรือวัฏภาคทวิคูณโดยตรวจดูความโปร่งใส วิธีการกระเจิงเป็นวิธีที่เร็วกว่าแต่ให้ผลที่เชื่อถือได้น้อยกว่าการประเมินพอลิเมอร์ผสมโดยจุดแปรสภาพแก้ว วัฏภาคที่แยกตัวกระจายอยู่ในพอลิเมอร์ผสมมักมีขนาดใหญ่พอที่จะหักเหแสงได้ ทำให้เกิดพอลิเมอร์ผสมที่โปร่งแสง หรือทึบแสงเมื่อนำพอลิเมอร์ที่โปร่งแสงมาผสมกัน

สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้และมีวัฏภาคเดียว (ซึ่งเตรียมขึ้นโดยการผสมพอลิเมอร์ออสัญฐานและเป็นพอลิเมอร์ที่โปร่งใส) จะไม่มีอนุภาคหรือวัฏภาคกระจายซึ่งจะหักเหแสง ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวนี้จึงใส รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างความใสของพอลิเมอร์ผสมซึ่งผสมจากพอลิเมอร์ออสัญฐาน A และ B ทั้งพอลิเมอร์ A และ พอลิเมอร์ B เป็นพอลิเมอร์โปร่งใส ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความใสและมีวัฏภาคเดียว ปริมาณความใสประมาณ 89% ตลอดทุกอัตราส่วนการผสมของพอลิเมอร์ A ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ C ซึ่งต่างเป็นพอลิเมอร์ออสัญฐานและใส แต่ให้พอลิเมอร์ผสมซึ่งมี 2 วัฏภาค ทำให้ความโปร่งใสของพอลิเมอร์ผสม AC ต่ำกว่าความโปร่งใสของพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B



รูปที่ 2.5 : แสดงการเปรียบเทียบความโปร่งใสของพอลิเมอร์ผสม AB ที่ผสมเข้ากันได้ เป็นหนึ่งวัฏภาค และพอลิเมอร์ผสม AC ที่มีสองวัฏภาค และไม่โปร่งใส

อย่างไรก็ดี วิธีการตรวจพอลิเมอร์ผสมโดยการกระเจิงอาจให้ผลที่คลาดเคลื่อนได้ ถ้า

- (ก) ค่าดัชนีการหักเหแสงของพอลิเมอร์ทั้งสองที่ผสมกันมีค่า ใกล้เคียงกันมากหรือเหมือนกัน
- (ข) ถ้าอนุภาคหรือวัฏภาคที่กระจายมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของแสง แสงไม่มีการกระเจิง และพอลิเมอร์ผสมที่มีสองวัฏภาคก็อาจแลดูโปร่งใส
- (ค) พอลิเมอร์ตัวใดตัวหนึ่งของพอลิเมอร์ผสมซึ่งเข้ากันได้และแต่เดิมโปร่งใส แต่ต่อมามีการตกผลึกโครงสร้างเรียงตัวเป็นระเบียบ พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวอาจกลายเป็นทึบแสง

### 2.4.3 การศึกษาพอลิเมอร์ผสมในระดับจุลภาค

การดูว่าระบบพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถเข้ากันได้หรือไม่ ดูได้จาก ระดับชั้นของการผสมกันเป็นเนื้อเดียว ในทางปฏิบัติการเข้ากันได้ของส่วนผสมพอลิเมอร์ดูได้จากการที่พอลิเมอร์แต่ละชนิดไม่แยกตัวให้เห็น พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันในระดับมหภาคถือเป็นพอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันไม่ได้ พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้จะสังเกตได้ง่ายๆ คือ ไม่แยกชั้นและสามารถนำไปใช้งานได้ทันที แต่ในทางทฤษฎีจำเป็นต้องศึกษาลักษณะการเข้ากันได้หรือไม่ และต้องศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมนั้น พร้อมศึกษาพื้นฐานของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวจะประกอบด้วยวัฏภาคเดียวในระดับโมเลกุล เช่น หากโมเลกุลของพอลิเมอร์ A ผสมกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ B อย่างเข้าเป็นเนื้อเดียวกันก็จะปรากฏมีวัฏภาคเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) ซึ่งมีสมบัติคล้ายกับพอลิเมอร์สหพันธ์แบบสุ่ม การเข้าเป็นเนื้อเดียวกันจำเป็นต้องทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองเพื่อเอาชนะแรงดึงยึดภายในระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์เดียวกัน การดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองสามารถเกิดจากปฏิกิริยาของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ทั้งสอง แต่เงื่อนไขนี้เกิดขึ้นได้ยาก พอลิเมอร์เพียงบางชนิดเท่านั้นที่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด

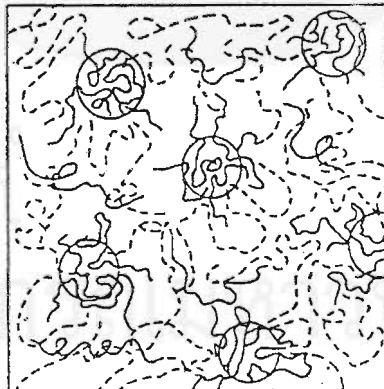
สัณฐานอีกแบบหนึ่งของพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) คือ สัณฐานพอลิเมอร์ที่ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้เกิดจากพอลิเมอร์ A ก่อตัวแยกออกจากพอลิเมอร์ B พอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นต่ำจะก่อตัวเป็นสัณฐานไม่ต่อเนื่อง ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูงจะวางตัวเป็นสัณฐานต่อเนื่อง นอกจากนี้ ความหนืดและวิธีการในการเตรียมของผสมยังสามารถมีผลต่อสัณฐานของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เช่นกัน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.6 : สันฐานของพอลิเมอร์ผสม โดยมีพอลิเมอร์ A (เส้นทึบ) และพอลิเมอร์ B (เส้นประ) ผสมกันเป็น (ก) เนื้อเดียวกัน (ข) ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และ (ค) ผสมเป็นเนื้อเดียวกันบางส่วน

โดยทั่วไป พอลิเมอร์ผสมสองชนิดอาจเข้ากันได้เพียงบางส่วนเท่านั้น พอลิเมอร์ที่เข้ากันได้เพียงบางส่วนอาจเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ถ้าผสมในอัตราส่วนผสมที่น้อย แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมจะทำให้เกิดการแยกของวัฏภาคได้ ในพอลิเมอร์ผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันจะมีเพียงบางส่วนที่อาจมีสองวัฏภาค ซึ่งอาจไม่สามารถกำหนดขอบเขตที่ชัดเจนได้ เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ A สามารถฝังตัวในพอลิเมอร์ B อย่างชัดเจน หรือในทางกลับกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) โมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองที่ผสมกันตรงผิวสัมผัสจะทำให้วัฏภาคไม่ต่อเนื่อง มีเสถียรภาพและไม่เปลี่ยนแปลงง่าย และมีการปรับปรุงพันธะยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัส ซึ่งเป็นเหตุผลที่พอลิเมอร์ผสมแบบสองวัฏภาคมีสมบัติโดยรวมที่ดี ซึ่งข้อดีนี้ทำให้พลาสติกผสมส่วนใหญ่มุ่งศึกษาเพื่อให้ได้ซึ่งโครงสร้างแบบนี้

## 2.5 วารสารปริทรรศน์

วารสารปริทรรศน์แสดงให้เห็นว่ามีบทความจำนวนเล็กน้อยเท่านั้นที่เกี่ยวกับการเข้ากันได้ระหว่างโพลีเอไมด์กับพอลิเมอร์ที่มีกลุ่ม Styrene โดยการผสมแบบหลอมผสมเชิงกล

M.J. Sullivan และ R.A. Weiss ได้ศึกษาการทำให้พอลิเมอร์เข้ากันได้ดีขึ้นสำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลีสไตรีนและโพลีเอไมด์ชนิดโครงสร้างอสัณฐาน โดยการใช้โพลีสไตรีนที่ทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์เล็กน้อย คณะผู้วิจัยดังกล่าวพบว่าพันธะทุติยภูมิไฮโดรเจนระหว่างกลุ่มเอไมด์และกรดซัลโฟนิคหรือกลุ่มโลหะฟอสโฟเนตสามารถทำให้แรงดึงผิวระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองนั้นลดลง ผลที่คณะผู้วิจัยสังเกตเห็น วัฏภาคที่กระจายมีขนาดเล็กลงในพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีโพลีสไตรีนที่ทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์

A. Molnar และ A. Eisenberg ศึกษาความเข้ากันได้ของ PA6 กับ ionomer ของโพลีสไตรีนที่มีลิเทียมหรือโซเดียมซัลโฟเนต คณะผู้วิจัยได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 50/50 โดยนำหนักของ PA6 กับ ionomer ของโพลีสไตรีนที่มีซัลเฟอร์และมีกลุ่มฟังก์ชันนัล 9.8 mol% คณะผู้วิจัยพบว่าสำหรับอัตราส่วนการผสมบางอัตราส่วน ปรากฏว่ามีจุดแปรสภาพแก้ว ( $T_g$ ) เพียงจุดเดียว ฉะนั้นพอลิเมอร์ผสมดัง

กล่าวจึงเข้ากันได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการเข้ากันได้สูงขึ้นมากในบางสัดส่วนของการผสมเมื่อมี  $\text{Li}^+$  แต่ระบบผสมจะไม่เข้ากันถ้ามี  $\text{Na}^+$

Cheng Chung Cheng ศึกษาความไม่เสถียรของสัณฐานในแต่ละภูมิภาคในพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลีเอไมด์กับโพลีเอททิลีนและโพลีสไตรีน และผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันต่อระบบผสม คณะผู้วิจัยพบว่าโคพอลิเมอร์ของสไตรีน-มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นสารช่วยให้ผสมเข้ากันที่มีประสิทธิภาพดีกว่าโคพอลิเมอร์ของสไตรีนอคริโลไนไตรล์

Triacca และคณะศึกษาการหลอมผสมระหว่าง PA6 กับ Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) หลายชนิด คณะผู้วิจัยได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างสไตรีนกับอคริโลไนไตรล์ และปริมาณของสไตรีนอคริโลไนไตรล์ ในเมตริกส์อคริโลไนไตรล์ต่อพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ สมบัติเชิงกลและวัฏภาคพบว่า พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงมากหากมิได้ปรับให้เข้ากันได้ คณะผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงโดยการใส่สไตรีนอคริโลไนไตรล์ลงในพอลิเมอร์ซึ่งเข้ากันได้กับสไตรีนอคริโลไนไตรล์ แต่จะต้องมีกลุ่มฟังก์ชันนัลที่สามารถทำปฏิกิริยากับ PA6 เพื่อทำให้เกิดโคพอลิเมอร์แบบต่อแขนง ณ พื้นผิวระหว่างพอลิเมอร์-พอลิเมอร์ โมเลกุลสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้เหล่านี้จะมีหน่วยที่ขาดน้ำหรือหน่วย Oxazoline สำหรับทำปฏิกิริยา

Yuji Aoki และคณะพบว่าจุดหลอมเหลวของผลึกโพลีเอไมด์และจุดแปรสภาพแก้วของโพลี (อคริโลไนไตรล์-โค-สไตรีน) ภูมิภาคที่เป็นยางในอคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีนและวัฏภาคอสัณฐานในโพลีเอไมด์ และพบว่าอุณหภูมิดังกล่าวแล้วเกือบจะเป็นอิสระจากปริมาณองค์ประกอบ การค้นพบของคณะผู้วิจัยนี้ทำให้เชื่อว่าโพลีเอไมด์และอคริโลไนไตรล์ที่ปรับปรุงแล้วนั้นมิได้ผสมกันในระดับโมเลกุล ถึงแม้ว่าจะมีพันธะระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองก็ตาม

B. Majumdar และคณะได้ศึกษาระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/ABS ซึ่งใส่สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ที่เป็นพอลิเมอร์อิมิดโซอคริลิก นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้



ศึกษาการผสมพอลิเมอร์ที่ทำปฏิกิริยาซึ่งมี SEBS-g-MA EPR-g-MA (ซึ่งเป็นยางมาลิเอทเททเอทิลีน/โพรไพลีน) และอคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน คณะผู้วิจัยรายงานว่าการผสมของโพลีเอไมด์ 6 ที่มีกลุ่มที่ทำปฏิกิริยาได้กลุ่มเดียวกับ SEBS-g-MA ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีขนาดอนุภาคยางซึ่งเล็กเกินกว่าที่จะได้ความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อผสมภายในเครื่องอัดรีดระบบสกรูเดี่ยวหรือระบบสกรูคู่แบบหมุนในทิศเดียวกัน

M.J. Modic และ L.A. Pottick ได้ศึกษาโคพอลิเมอร์ที่เป็นบล็อกของสไตรีน (สไตรีน-เอทิลีน/บิวทาไดอีน-สไตรีน) ซึ่งทำปฏิกิริยากับมาลิคแอนไฮไดรด์ คณะผู้วิจัยพบว่าสารโคพอลิเมอร์ดังกล่าวเป็นสารปรับสมบัติการกระแทกที่เป็นประโยชน์ และเป็นสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้สำหรับเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรม บทความวิจัยดังกล่าวมุ่งเน้นไปที่การใช้สารยึดหยุ่นเหล่านี้ซึ่งได้ทำปฏิกิริยาแล้วเพื่อปรับปรุงสมบัติของ PA6 คณะผู้วิจัยรายงานว่า ณ อัตราส่วนการผสมบางอัตราส่วน อาจทำให้ได้โพลีเอไมด์ที่มีสมบัติเชิงกลเฉพาะตัวโดยการใช้สารยึดหยุ่นที่ได้ทำปฏิกิริยามาแล้วอย่างเดียว หรือจะใช้ร่วมกับโคพอลิเมอร์ของสไตรีนที่ยังมิได้ทำปฏิกิริยา

A.J. Oshinski และคณะผู้วิจัย ได้ศึกษาการใส่สารยึดหยุ่น SEBS และ SEBS-g-MA กับ PA6 และพบว่าสามารถทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นได้มากกว่าการใช้สารยึดหยุ่นที่ทำปฏิกิริยาแล้วเพียงอย่างเดียว อนุภาคของ SEBS บริสุทธิ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 ไมครอน ขนาดดังกล่าวนี้ของอนุภาค SEBS ใหญ่เกินกว่าที่จะทำให้ PA6 เหนียวขึ้น สาร SEBS-g-MA โดดย สามารถให้อนุภาคขนาดประมาณ 0.05 ไมครอน ซึ่งขนาดดังกล่าวนี้เล็กเกินกว่าจะได้ความเหนียวที่ดี การใช้สารยึดหยุ่นทั้งสองร่วมกันทำให้ได้อนุภาคซึ่งมีขนาดแปรระหว่างขนาดทั้งสองที่ได้กล่าวมาแล้ว

S. Covavisaruch ได้ศึกษาการนำเศษขยะ PA6 จากอุตสาหกรรมการขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ ผู้วิจัยพบว่า เมื่อนำเศษ PA6 กลับมาใช้ใหม่หลายๆ รอบสมบัติเชิงกลของเศษ PA6 จะค่อยลงเรื่อยๆ และมีปัญหาด้านการขึ้นรูป ผู้วิจัยจึงได้ปรับสมบัติของเศษ PA6 และการขึ้นรูปโดยผสมเศษ PA6 กับโพลีเอทิลีน ผู้วิจัยพบว่า การขึ้นรูปดีขึ้นและสมบัติการไหลดีขึ้น แต่การแยกวัฏภาคของโพลีเอทิลีนและ PA6

การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของระบบผสมและหลักฐานจากภาพถ่ายของวัฏภาคในระดับจุลภาคพบว่า พื้นผิวที่ขีดระหว่างวัฏภาคยังมีการยึดติดไม่สม่ำเสมอเนื่องจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ โพลีเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

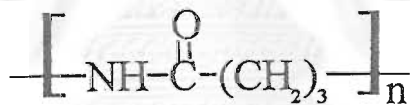
### 3. การทดลองงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุดิบ

วัสดุดิบที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ได้แก่

##### 3.1.1 โพลีเอไมด์ 6 (Polyamide 6, PA6)

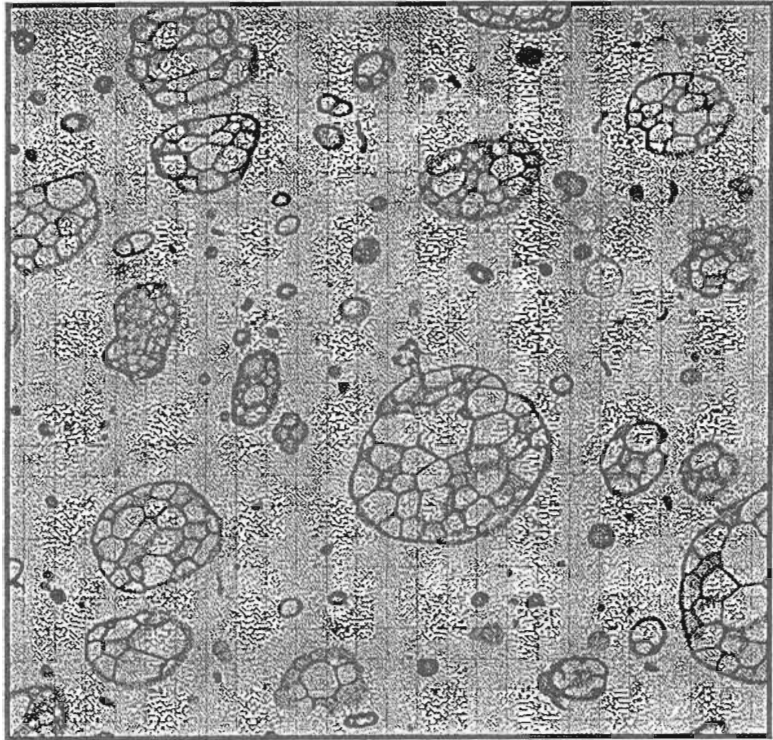
การวิจัยนี้ใช้โพลีเอไมด์ 6 (PA6) ประเภทไนลอน 6 ชนิดชนิด PA6 นี้ผลิตโดยบริษัท UBE Industries ประเทศญี่ปุ่น โดยการสังเคราะห์แบบเปิดโครงสร้างวงแหวนของ Caprolactam สูตรโครงสร้างของ Repeating Unit ของ PA6 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 PA6 ที่ใช้เป็นเม็ดสีขาว และมีความหนาแน่น 1.14 กรัม/ลบ.ซม.



รูปที่ 3.1: สูตรโครงสร้างทางเคมีของโพลีเอไมด์ 6

##### 3.1.2 โพลีสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS)

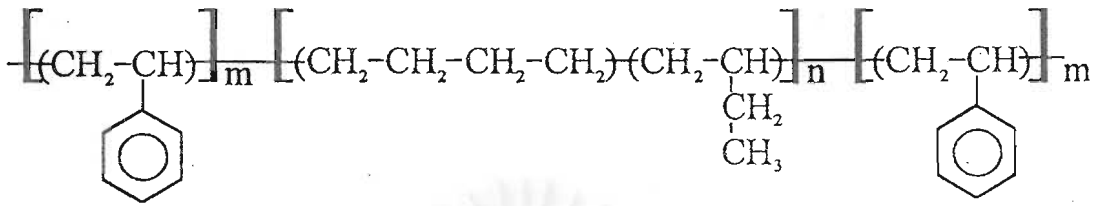
โพลีสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS) ที่ใช้เป็นชนิดชนิด ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical (ประเทศไทย) จำกัด โดยการโพลีเมอไรเซชันระหว่างสารละลายของยางโพลีบิวทาไดอีน (Polybutadiene, PB) กับสไตรีน (Styrene) ในถังปฏิกรณ์ลักษณะสันฐานในระดับจุลภาคของ HIPS ดังแสดงในรูปที่ 3.2 HIPS เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย styrene เป็นอนุภาคต่อเนื่องหรือเมตริกส์และอนุภาคยางบิวทาไดอีน HIPS ที่ใช้เป็นเม็ดสีขาว และมีความหนาแน่น 1.05 กรัม/ลบ.ซม.



รูปที่ 3.2: ลักษณะสัณฐานในระดับจุลภาคของ HIPS ประกอบด้วยส่วนที่เป็น styrene และอนุภาคยาง

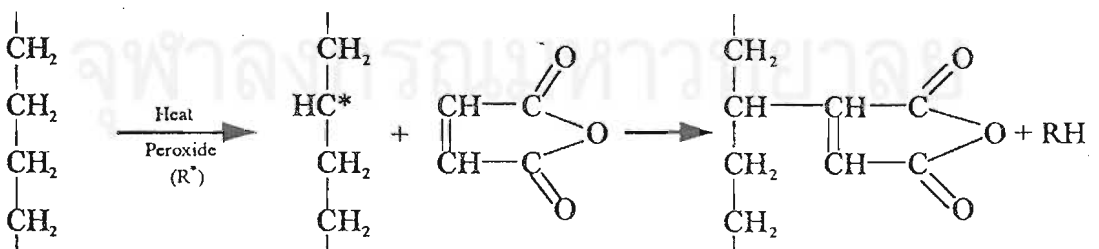
### 3.1.3 โคอพอลิเมอร์แบบบล็อกของ Maleated Styrene-Ethylene / Butylene-Styrene

สารช่วยให้ผสมเข้ากัน (Compatibilizer) ได้ที่เลือกใช้คือ โคอพอลิเมอร์แบบบล็อกของ Maleated styrene-ethylene / butylene-styrene (SEBS-g-MA) ซึ่งเป็นโคอพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก สาเหตุที่เลือกใช้โคอพอลิเมอร์แบบบล็อกของ Maleated styrene-ethylene / butylene-styrene เพราะปลายที่เป็นบล็อกของสไตรีนในโคอพอลิเมอร์ดังกล่าวจะช่วยให้โคอพอลิเมอร์ดังกล่าวเข้าได้อย่างดียิ่ง กับ HIPS ในขณะที่ Maleic anhydride ที่ต่อแขนงโคอพอลิเมอร์ดังกล่าว สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่ม Amine ของ PA6 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ SEBS-g-MA ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3: สูตรโครงสร้างทางเคมีของโคพอลิเมอร์แบบบล็อกของ SEBS

SEBS-g-MA เป็นโคพอลิเมอร์แบบบล็อกที่ปรับปรุงจากโคพอลิเมอร์แบบบล็อกของสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Styrene Butadiene Styrene, SBS) ซึ่งสังเคราะห์โดยการโพลิเมอไรเซชันแบบ Anionic ชนิดอนุพันธ์ในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนเพื่อให้เกิดเป็นโคพอลิเมอร์แบบบล็อกของสไตรีน-เอทิลีน/บิวทาไดอีน-สไตรีน (SEBS) จากนั้นนำโคพอลิเมอร์แบบบล็อกของ SEBS มาทำปฏิกิริยากับ Maleic anhydride ในรูปสารละลาย ณ อุณหภูมิ 81°C โดยมีสารเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา โครงสร้างของ Maleic anhydride และปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4: ปฏิกิริยาของ Maleic anhydride กับสารไฮโดรคาร์บอน

## 3.2 การผสมและการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

### 3.2.1 การทดลองผสม

เตรียมเม็ด PA6 เพื่อการผสมโดยทำเม็ด PA6 ให้แห้งด้วยการอบในเตาอบสูญญากาศ ณ อุณหภูมิ 80 °ซ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อขจัดความชื้นที่ PA6 ดูดซับจากอากาศ นำ PA6 ดังกล่าวมาผสมกับ HIPS โดยการปั่นผสมแห้งตามอัตราส่วนสูตรผสมที่แสดงในตารางที่ 3.1 แต่ละสูตรได้รับการออกแบบสัดส่วนและน้ำหนักของ PA6 และ HIPS เพื่อว่าปริมาตรรวมของพอลิเมอร์ผสมในแต่ละสูตรคือประมาณ 40 ลบ.ซม. ซึ่งเป็นปริมาตรที่เหมาะสมกับความจุของเครื่อง Internal mixer ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากนั้นจึงนำเม็ดผสมแห้งของแต่ละสูตรมาหลอมผสมในเครื่องผสมระบบปิด Internal mixer อุณหภูมิของ Internal mixer คือ 215, 235 และ 255 °ซ ความเร็วของใบพัดผสมคงที่ ณ 50 รอบ/นาที ระยะเวลาผสมคือ 10 นาที

ตารางที่ 3.1: อัตราส่วนและปริมาณส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสม PA6 / HIPS

สัดส่วนโดยน้ำหนักของ PA6 ( $x_p$ )	น้ำหนักของ PA6 (กรัม)	น้ำหนักของ HIPS (กรัม)
0.0	0.00	42.00
0.2	8.53	34.14
0.4	17.35	26.02
0.6	26.45	17.64
0.8	35.86	8.97
1.0	45.60	0.00

### 3.2.2 การผสมพลาสติกแบบเชิงกล (Mechanical blending)

เตรียมเม็ด PA6 ที่ผ่านการอบแห้งแล้วตามข้อ 3.2.1 เพื่อผสมกับ HIPS โดยผสมแบบปั่นผสมแห้ง แล้วจึงหลอมผสมภายในเครื่องอัดระบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) แบบหมุนสวนทาง โดยอัตราเร็วของสกรูคือ 50 รอบ/นาที อุณหภูมิของกระบอกอัดและหัวแม่พิมพ์ (die) คือ 235 °ซ อัตราการป้อนเม็ดผสมของ PA6 และ HIPS ที่สกรูป้อนคือ 20 กรัม/นาที ตารางที่ 3.2 แสดงสูตรต่าง ๆ ของการผสม PA6 / HIPS ในงานวิจัยนี้ ทั้งระบบที่มีการใส่สาร SEBS-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยให้ระบบผสมเข้ากันได้และระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีได้มีการใส่สารดังกล่าว หลอมผสมแล้วจึงอัด หล่อเป็น และตัดเป็นเม็ดพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS

ตารางที่ 3.2: สูตรผสมของ PA6 / HIPS ที่เตรียม โดยใช้เครื่องอัดระบบสกรูคู่

สูตรพอลิเมอร์ผสม	ปริมาณสารโดยน้ำหนัก (กรัม)		
	PA6	HIPS	SEBS-g-MA
<u>ระบบผสมที่ไม่มี SEBS-g-MA</u>			
HIPS	0	100	0
PA6 / HIPS 20/80	20	80	0
PA6 / HIPS 40/60	40	60	0
PA6 / HIPS 60/40	60	40	0
PA6 / HIPS 80/20	80	20	0
PA6	100	0	0
<u>ระบบผสมที่มี SEBS-g-MA 2.5 phr</u>			
HIPS	0	100	2.5
PA6 / HIPS 20/80	20	80	2.5
PA6 / HIPS 40/60	40	60	2.5
PA6 / HIPS 60/40	60	40	2.5
PA6 / HIPS 80/20	80	20	2.5
PA6	100	0	2.5
<u>ระบบผสมที่มี SEBS-g-MA 5.0 phr</u>			
HIPS	0	100	5.0
PA6 / HIPS 20/80	20	80	5.0
PA6 / HIPS 40/60	40	60	5.0
PA6 / HIPS 60/40	60	40	5.0
PA6 / HIPS 80/20	80	20	5.0
PA6	100	0	5.0
<u>ระบบผสมที่มี SEBS-g-MA 7.5 phr</u>			
HIPS	0	100	7.5
PA6 / HIPS 20/80	20	80	7.5
PA6 / HIPS 40/60	40	60	7.5
PA6 / HIPS 60/40	60	40	7.5
PA6 / HIPS 80/20	80	20	7.5
PA6	100	0	7.5
<u>ระบบผสมที่มี SEBS-g-MA 10 phr</u>			
HIPS	0	100	10.0
PA6 / HIPS 20/80	20	80	10.0
PA6 / HIPS 40/60	40	60	10.0
PA6 / HIPS 60/40	60	40	10.0
PA6 / HIPS 80/20	80	20	10.0
PA6	100	0	10.0

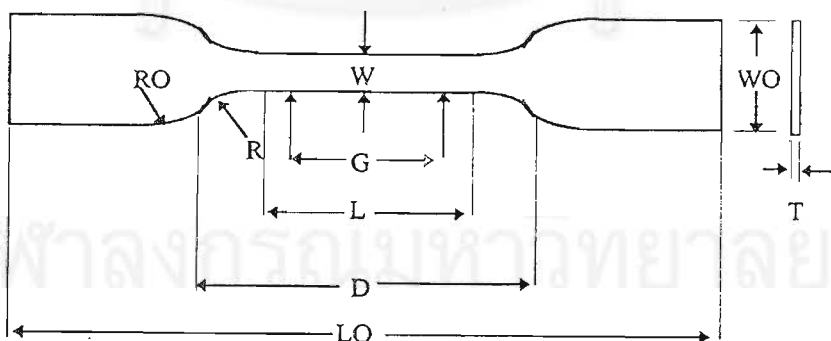
### 3.2.3 การขึ้นรูปและการเตรียมชิ้นงาน

นำเม็ดผสม PA6 / HIPS ของแต่ละสูตรมาอบแห้ง แล้วขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์กด (Compression Moulding) ขนาดของแผ่นพิมพ์เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความยาวด้านละ 150 มม. ความหนา 2 และ 3 มม. ความดันขณะขึ้นรูป  $4.9 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  และอุณหภูมิ  $265^\circ\text{C}$  แผ่นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 / HIPS ทุกสูตรที่ออกแบบถูกนำมาตัดเพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยใช้อุปกรณ์ตัดเลเซอร์ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตัดเป็นชิ้นงานที่เหมาะสมแก่การทดสอบ

### 3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 3.3.1 การทดสอบแรงดึง

เตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลภายใต้แรงดึงโดยการตัดแผ่นพอลิเมอร์ผสมให้มีขนาดและรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 3.5 ชิ้นงานทุกชิ้นถูกเก็บไว้ในตู้ความชื้นเพื่อขจัดความชื้นและป้องกันการดูดความชื้นจากบรรยากาศก่อนการทดสอบแรงดึง อัตราเร็วของการดึงคือ  $5 \text{ มม./นาที}$  แต่ละระบบผสมของ PA6 / HIPS ถูกทดสอบภายใต้แรงดึงอย่างน้อย 5 ตัวอย่าง ผลที่รายงานเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้ง 5 ครั้ง



W	=	6	มม.	G	=	25	มม.
L	=	33	มม.	D	=	64	มม.
WO	=	19	มม.	R	=	14	มม.
LO	=	115	มม.	RO	=	25	มม.

รูปที่ 3.5: ขนาดและรูปทรงชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638



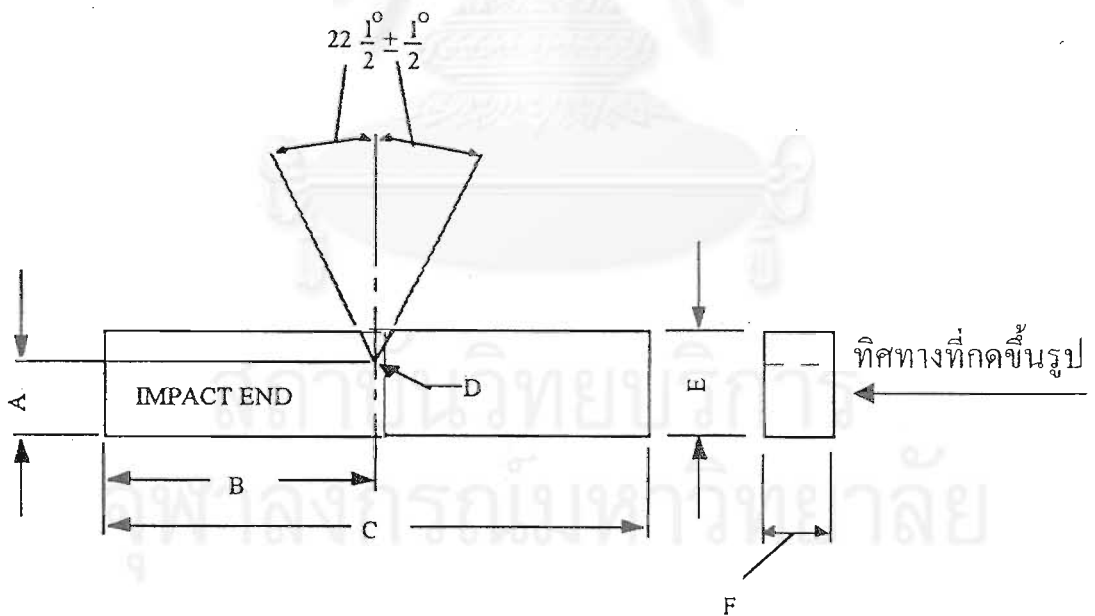
### 3.3.2 การทดสอบแรงกระแทก

ความเหนียวเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับงานที่ทำงานกระแทกชิ้นงานแตกหรือหัก ในทางปฏิบัติ ความสนใจส่วนใหญ่จะมุ่งไปที่ความเหนียวภายใต้ภาวะเมื่อมีความเค้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นคือ ความต้านทานต่อแรงกระแทกหรือแรงกระแทกจึงเป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญ

การทดสอบแรงกระแทกของพลาสติกแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การทดสอบแรงกระแทกโดยใช้ตุ้มกระแทก เช่น Izod test Charpy test และการทดสอบแรงกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนัก

#### 3.3.2.1 การทดสอบ Izod

เตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod โดยตัดแผ่นพอลิเมอร์ผสม PA6 / HIPS ในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามที่ออกแบบและเตรียมแผ่นไว้เป็นชิ้นงานตามรูปทรงและขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.6 บางชิ้นงานทดสอบเป็นรอยบากกว้าง 3 มม. บนผิวของชิ้นงานทุกชิ้น แต่ละระบบผสมของ PA6 / HIPS ถูกทดสอบ Izod ภายใต้ตุ้มกระแทกอย่างน้อย 5 ตัวอย่าง ผลที่รายงานเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้ง 5 ครั้ง



A	=	$10.16 \pm 0.05$	มม.	D	=	$0.25R \pm 0.05$	มม.
B	=	$31.50 - 32.00$	มม.	E	=	$12.70 \pm 0.15$	มม.
C	=	$60.30 \pm 63.50$	มม.	F	=	3	มม.

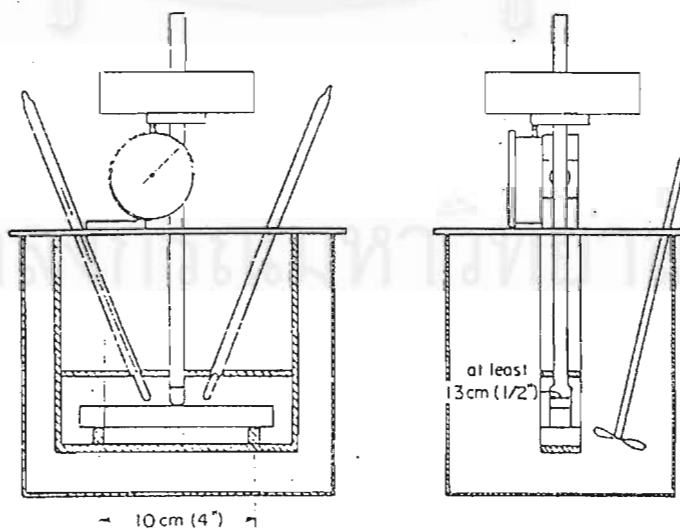
รูปที่ 3.6: ขนาดและรูปทรงชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod

### 3.3.3.2 การทดสอบด้วยค้อนน้ำหนัก

ในการทดสอบแรงกระแทกแบบน้ำหนักกระทบ มีค้อนน้ำหนักซึ่งมักเป็นรูปทรงกลมหรือครึ่งทรงกลม ปล่อยค้อนน้ำหนักลงตามแนวตั้งเพื่อกระทบบนผิวของระบบผสม PA6 / HIPS ที่เตรียมแผ่นไว้แล้ว โดยแผ่นพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 15 มม. และหนา 2 มม. การทดสอบดังกล่าวทำให้ได้ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระแทกจนแตก ณ อุณหภูมิห้อง แต่ระบบผสมของ PA6 / HIPS ถูกทดสอบภายใต้ค้อนน้ำหนักกระแทกอย่างน้อย 5 ตัวอย่าง ผลที่รายงานเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้ง 5 ครั้ง

### 3.3.3 การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอภายใต้ภาระแรงกด (Heat Distortion Temperature, HDT)

อุณหภูมิการโค้งงอภายใต้แรงกด (HDT) เป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์โค้งงอภายใต้ภาระแรงกด 1,820 kPa โดยภาระแรงกระทำที่ตอนกลางของชิ้นงานทดสอบซึ่งเป็นระบบผสม PA6 / HIPS ที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 13 มม. ยาว 127 มม. และหนา 3 มม. โดยภาระแรงดังกล่าวมีผลให้ชิ้นงานโค้งงอ 0.25 มม. อุณหภูมิที่พอลิเมอร์ผสมถูกกดให้โค้งงอเป็นปริมาณดังกล่าว ภายใต้แรงกดที่กำหนดนี้เรียกว่า HDT รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์สำหรับทดสอบ HDT



รูปที่ 3.7: อุปกรณ์สำหรับทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอภายใต้แรงกด

### 3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ

#### 3.4.1 การวัดความหนาแน่น

การวัดความหนาแน่นของระบบผสม PA6 / HIPS กระทำโดยใช้หลอดวัดความหนาแน่นที่มีความลาด (Density gradient column) ซึ่งเตรียมขึ้นโดยใช้ Carbon tetrachloride และ Toluene ของผสมของสารละลายทั้งสองนี้สามารถครอบคลุมความหนาแน่นช่วงพิกัด 0.87 ถึง 1.59 กรัม/ลบ.ซม. เตรียมหลอดวัดความหนาแน่นโดยใช้ Carbon tetrachloride บริสุทธิ์อยู่ตอนล่างสุดของหลอด ของผสมของสารละลายในสัดส่วนต่าง ๆ อยู่ตอนกลางหลอด และ Toluene อยู่ตอนบนสุดของหลอด จัดวางของผสมในหลอดและหลอดให้อยู่หนึ่งเป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นจึง Calibrate ระยะเวลาสูงของหลอดและความหนาแน่นที่สัมพันธ์กัน โดยใช้เม็ดตรวจสอบความหนาแน่นมาตรฐาน หรือหยดสารละลายที่ตรวจสอบความหนาแน่นด้วย Pycnometer แล้วลงในหลอดทดสอบความหนาแน่น

#### 3.4.2 การวัดสมบัติเชิงความร้อน

สมบัติเชิงความร้อนของระบบผสม PA6 / HIPS ทุกระบบ เช่น Heat of Fusion จุดแปรสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) จุดหลอมเหลว (Melting Temperature,  $T_m$ ) กระทำได้โดยใช้ Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยตัดพอลิเมอร์ผสม PA6 / HIPS จากแผ่นที่ได้จากการอัดกด น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่ศึกษาอยู่ในพิกัด  $10 \pm 0.5$  มิลลิกรัม โดยวางพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวในภาชนะบรรจุตัวอย่างที่ทำจากอลูมิเนียม ให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวด้วยอัตรา  $5^\circ\text{C}/\text{นาที}$  ช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาคือ  $35 - 285^\circ\text{C}$

### 3.5 การศึกษาพอลิเมอร์ผสม PA6 / HIPS ในระดับจุลภาค

ศึกษาและวิเคราะห์ระบบผสม PA6 / HIPS แต่ละสูตรโดยนำชิ้นงาน PA6 / HIPS มาเคลือบด้วย ทอง/พาลาเดียม (Au/Palladium) โดยการใส่ไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ ระยะเวลาเคลือบ 4 นาที การศึกษาระบบผสมด้วยภาพถ่ายขนาดจุลภาค กระทำในกล้องจุลทรรศน์แบบกราดลำแสง (Scanning Electron Microscope, SEM)

## 4. ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

### 4.1 การผสม

การทดลองผสม PA6/HIPS ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยเครื่องผสมระบบปิด Internal mixer ทำให้ทราบค่าแรงบิดที่ต้องใช้ในการหลอมผสมพลาสติกทั้งสอง คือ PA6 และ HIPS นอกจากนี้ยังสามารถวัดค่าความหนืดสัมพัทธ์ (Relative melt viscosity) ของ PA6 และ HIPS ณ สภาวะ (อุณหภูมิและความเร็วรอบ) ที่ผสม ดังผลที่แสดงในตารางที่ 4.1

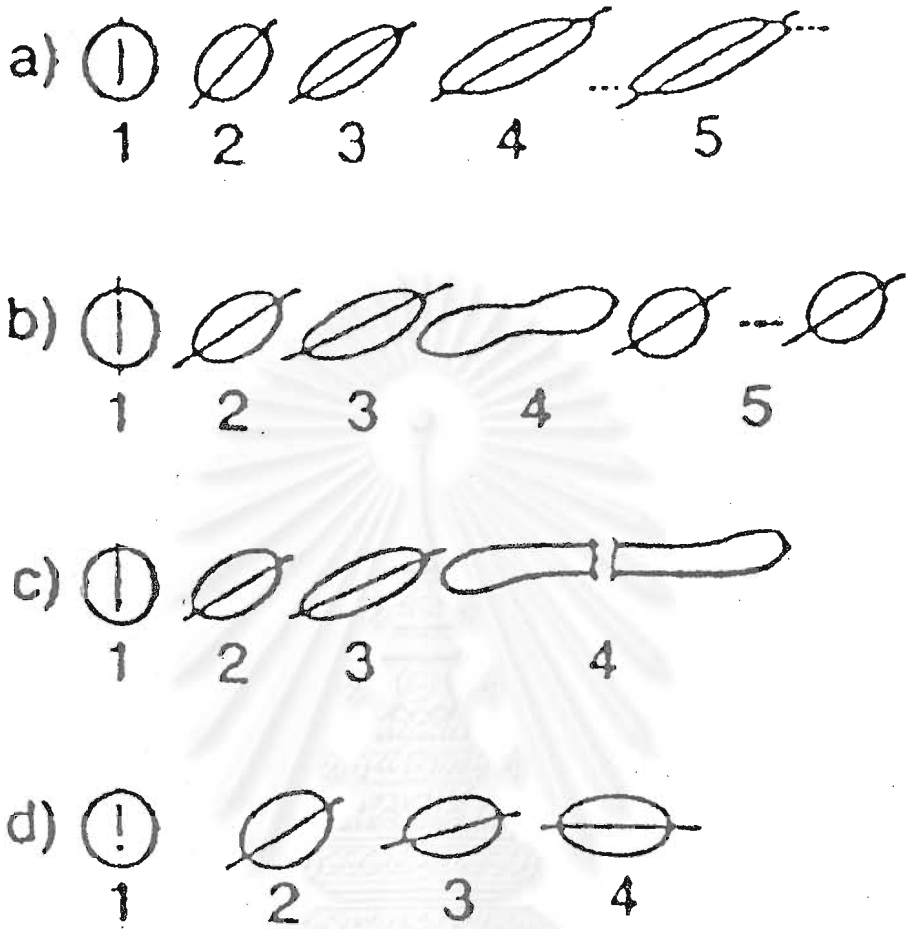
ตารางที่ 4.1: แรงบิดและความหนืดสัมพัทธ์ของ PA6 และ HIPS ณ สภาวะผสมต่าง ๆ

สภาวะการผสม		แรงบิด (10 นาที, นิวตัน-เมตร)		ความหนืดสัมพัทธ์	
อุณหภูมิ (°ซ)	ความเร็ว (รอบ/นาที)	PA6	HIPS	PA6	HIPS
215	50	1.9	5.3	1	2.79
235	50	2.0	5.2	1	2.60
255	50	1.7	4.4	1	2.40

การกระจายตัวและระดับการแยกกระจายของพอลิเมอร์หลอมผสมขึ้นกับอัตราส่วนความหนืด (P) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไร้หน่วย ขั้นตอนการแยกกระจายของหยดพอลิเมอร์หลอมภายใต้แรงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 4.1

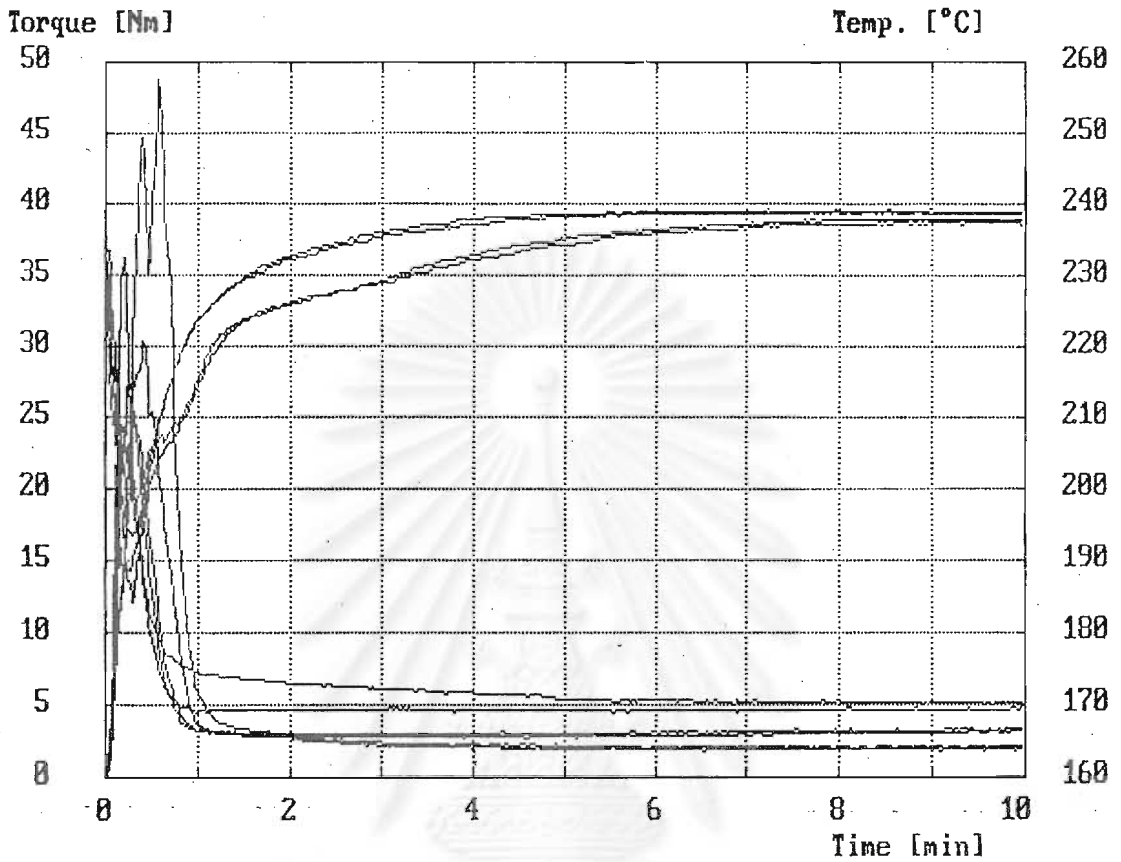
ผลการทดสอบการผสม PA6 และ HIPS ที่แสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดสัมพัทธ์ของ PA6 และ HIPS ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ณ แต่ละสภาวะการผสม สภาวะที่ให้ค่าความหนืดสูงพร้อมทั้งแรงบิดเฉือนสูงจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมแก่การผสม อย่างไรก็ดี หากการผสมดังกล่าวกระทำ ณ อุณหภูมิสูง ก็มีความเป็นไปได้ที่พอลิเมอร์ผสมจะเสื่อมสภาพหากผสม ณ อุณหภูมิสูงมาก ฉะนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกจะผสม PA6 และ HIPS ณ สภาวะปานกลาง คือ อุณหภูมิผสม 235 °ซ และอัตราเร็วการผสม 50 รอบ/นาที โดยจะผสมหลอมในเครื่องอัดระบบสกรูคู่

ทิศทางการเพิ่มของอัตราส่วนความหนืด



รูปที่ 4.1: ขั้นตอนการแยกกระจายของหยดพอลิเมอร์หลอมภายใต้แรงเฉือน

เนื่องจาก PA6 และ HIPS ไม่ทำปฏิกิริยาต่อกันหรือเกิดการเชื่อมโยงแบบข้าม (Crosslinks) ฉะนั้น แรงบิดที่คงที่ในระหว่างการผสมจึงเป็นตัวบ่งชี้ว่าการผสมดังกล่าวเข้ากันได้ดี ระยะเวลาที่ใช้ในการผสมจนแรงบิดคงที่จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมแก่การหลอมผสมพอลิเมอร์ดังกล่าว รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงบิด ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของการผสม และเวลาการผสมที่สัมพันธ์กัน จากผลการทดสอบผสม PA6 / HIPS ณ อุณหภูมิ 235 °ซ ความเร็ว 50 รอบ/นาที คือ พอลิเมอร์ทั้งสองหลอมเข้ากันได้ดีใช้เวลาประมาณ 4 นาที



รูปที่ 4.2: ระดับแรงบิด-เวลาของการผสมระบบพอลิเมอร์ผสม PA6 / HIPS

ในทางทฤษฎีระยะเวลาในการผสมภายในเครื่องอัดแบบสกรูคู่สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.1) ดังนี้

$$T = 3/2 * t_{\text{homogeneous}} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $T$  คือระยะเวลาภายในเครื่องอัดแบบสกรูคู่

$t_{\text{homogeneous}}$  คือระยะเวลาการหลอมผสมจนเข้ากันได้ดี (ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเร็วรอบ)

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทดลองวัดระยะเวลาการหลอมผสมภายในเครื่องอัดระบบสกรูคู่ เมื่อป้อนเม็ดผสมแห้ง PA6/HIPS ด้วยอัตรา 20 กรัม/นาที อุณหภูมิผสม 235 °ซ และความเร็วสกรู 50 รอบ/นาที พบว่า ระยะเวลาการหลอมผสมภายในสกรูคู่ของเครื่องอัด ณ สภาวะการผสมดังกล่าวแล้วคือ 5 ถึง 7 นาที

## 4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์แต่ละชนิดกับ SEBS-g-MA

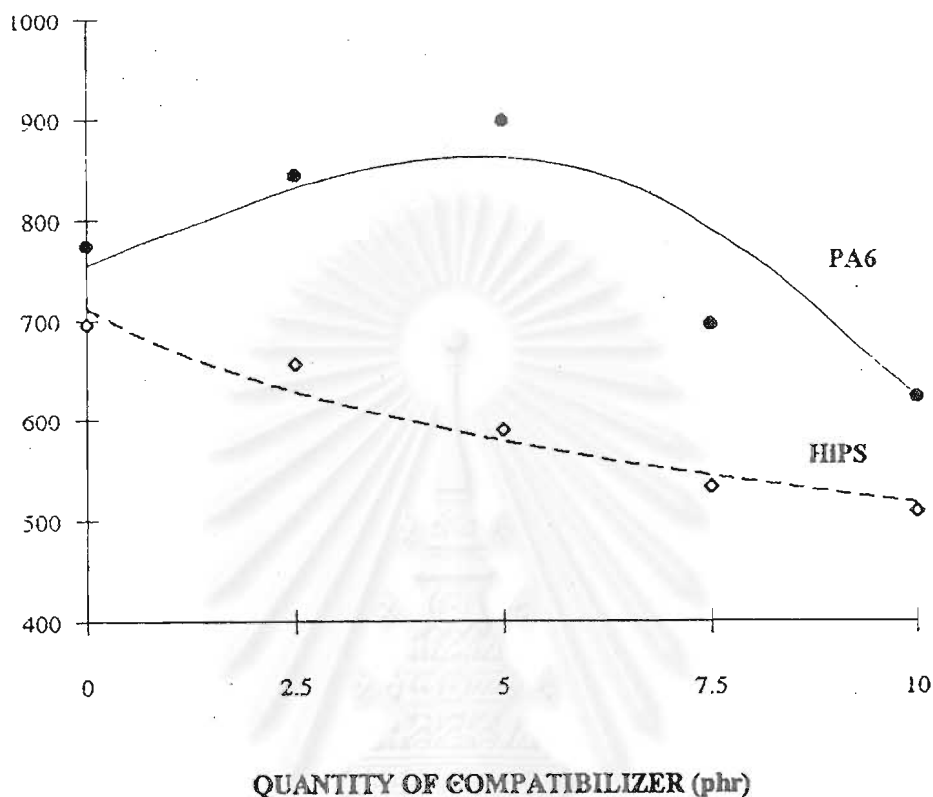
### 4.2.1 ผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ต่อพอลิเมอร์ที่ใช้ผสม

สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ในงานวิจัยนี้คือ โคพอลิเมอร์แบบบล็อกของ Meleated styrene / butylene-styrenen (SEBS-g-MA) รูปที่ 4.3 ถึง 4. แสดงให้เห็นถึงผลของสารช่วยผสมดังกล่าวต่อพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้ในระบบผสม คือ PA6 และ HIPS

#### 4.2.1.1 สมบัติภายใต้แรงดึง

ผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้และปริมาณสารดังกล่าวต่อ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) สมบัติ ณ จุดคราก ณ 0.2% Offset (0.2% Offset yield stress และ strain) ความเค้น ณ จุดขาด และงานที่ใช้จนถึงจุดขาด PA6 และ HIPS ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.8 ตามลำดับ

รูปที่ 4.3 แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้คือ SEBS-g-MA ณ ปริมาณต่าง ๆ กันต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึง สำหรับ HIPS ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 5.6% ถึง 26.8% เมื่อปริมาณของ SEBS-g-MA สูงขึ้นจาก 2.5 ถึง 10 phr (Parts per hundred parts of resin) สำหรับ PA6 นั้น SEBS-g-MA มีผลให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของ PA6 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ประมาณ 9 - 16%) เมื่อปริมาณ SEBS-g-MA ที่ใส่อยู่ที่ 2.5 และ 5 phr เกินกว่าปริมาณนี้ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของ PA6 กลับลดลง 10 และ 19.5%

**TENSILE ELASTIC MODULUS (N/mm<sup>2</sup>)**


**รูปที่ 4.3 :** แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงของ PA6 และ HIPS

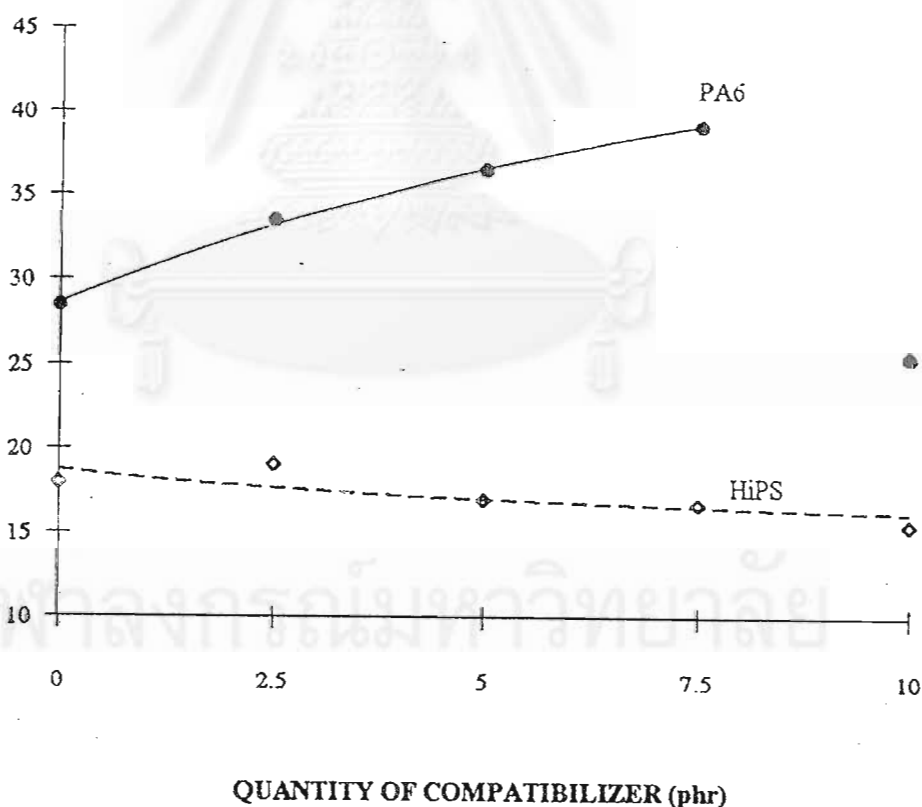
สาเหตุที่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงของ HIPS ลดลงเมื่อใส่สาร SEBS-g-MA เพราะ SEBS เป็นยางสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer, TPE) ที่นุ่มอันเนื่องจากการไม่มีการวัลคาไนซ์ (Vulcanize) ให้เกิดโครงสร้างการเชื่อมโยงร่างแห (Crosslinks) เช่นยางทั่วไป ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมในระบบที่มีมากกว่าหนึ่งวัฏภาคจึงต่ำกว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัฏภาคที่ต่อเนื่อง เป็นเมตริกซ์ของพอลิเมอร์ถ้าพอลิเมอร์ที่สองที่ผสมด้วยมีวัฏภาคเป็นสารที่นุ่มหรือมีสภาพคล้ายยาง



สำหรับ PA6 พบว่า ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงของ PA6 สูงขึ้น ณ ปริมาณ SEBS-g-MA 2.5 และ 5.0 phr ทั้งนี้ อาจเกิดจากกลุ่ม Maleic anhydride (MA) ใน SEBS-g-MA ทำปฏิกิริยากับกลุ่ม -CONH- ในโครงสร้าง PA6 และจำกัดการเคลื่อนของสายโซ่โพลีเมอร์ PA6 แต่สำหรับ PA6 ที่มี SEBS-g-MA เป็นปริมาณสูงขึ้น คือตั้งแต่ 7.5 phr ค่าโมดูลัสของ PA6 กลับลดลงด้วยเหตุผลที่คาดว่าเนื่องจากปริมาณ SEBS ซึ่งเป็นยางเทอร์โมพลาสติกมีปริมาณมากเพียงพอที่จะแสดงผลของสารวัลทิภาคที่สองที่นุ่มกว่า ผลจากวัลทิภาคที่สองนี้มากกว่าผลจากการที่ MA ทำปฏิกิริยากับ -CONH- ใน PA6

ผลของการใส่ SEBS-g-MA ต่อความเครียดและความเค้น ณ จุดครากที่ 0.2% Offset ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5

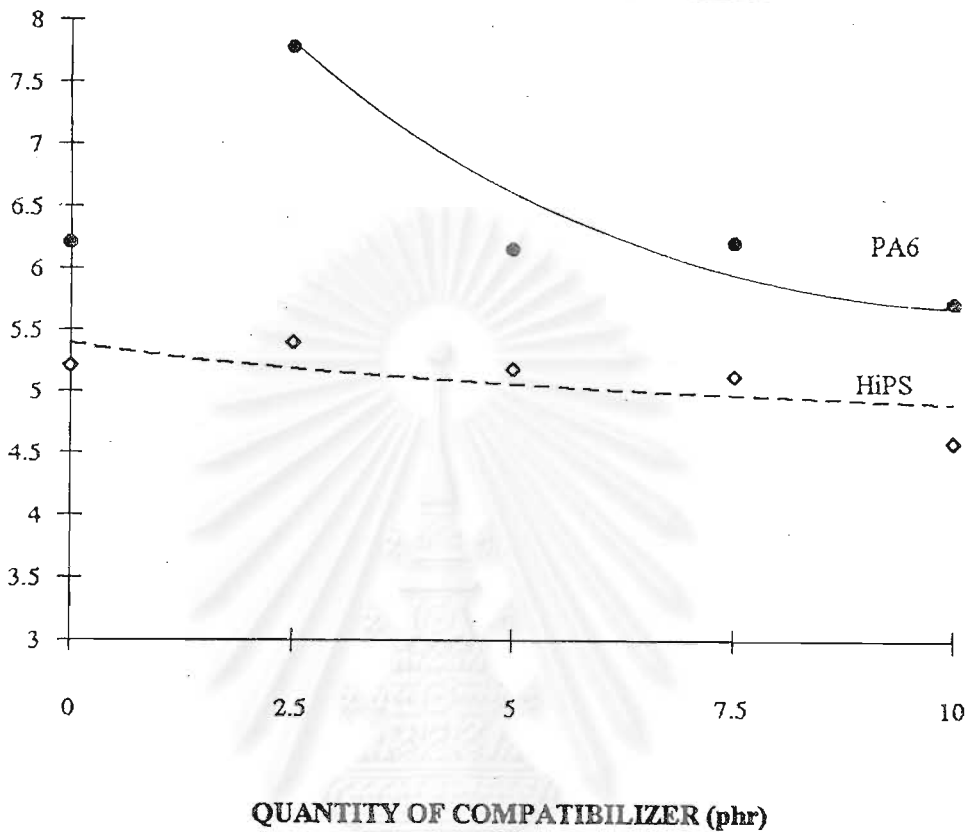
0.2% OFFSET YIELD STRESS (N/mm<sup>2</sup>)



รูปที่ 4.4 : แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อความเครียด ณ จุดคราก 0.2% Offset



### 0.2% OFFSET YIELD TENSILE STRAIN (%)

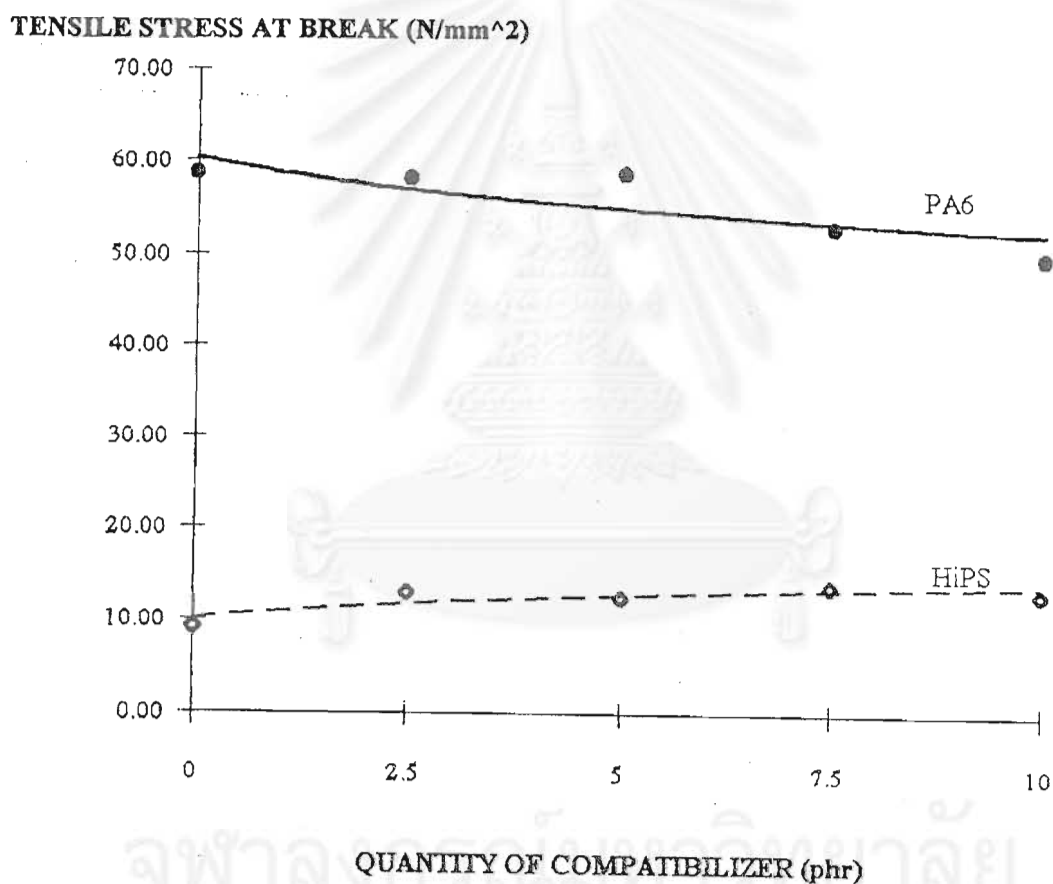


รูปที่ 4.5: แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อความเค้น ณ จุดคราก 0.2% Offset

สมบัติของ HIPS ที่มี SEBS-g-MA ลดลงทั้งความเค้นและความเครียด ณ จุดคราก 0.2% Offset ทั้งนี้เพราะสาร SEBS มีปลายทั้งสองเป็นสไตรีน แม้ว่ามีส่วนหนึ่งของ SEBS จะถูกต่อแขนง (graft) ด้วย MA แต่ปลายทั้งสองของ SEBS ที่มี styrene ยังมีโอกาสรวมตัวกับ styrene ของ HIPS ได้ดี ดังนั้น HIPS ที่มี SEBS-g-MA จึงเป็นโครงสร้างที่มี SEBS เข้าอยู่ด้วย และมียาง Ethylene/Butylene ยึดติดกับโมเลกุลของ HIPS แต่มี MA ซึ่งเป็นโมเลกุลที่เล็กกว่าต่อแขนงอยู่ การเคลื่อนของโมเลกุล HIPS เพื่อให้ chain mobility ณ จุดครากจึงเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าและมากกว่าเพราะมีการยึดของยาง Butadiene เข้ามาเสริม ส่วนโมเลกุลของ PA6 นั้นทำปฏิกิริยากับ MA ได้ จึงทำให้มี

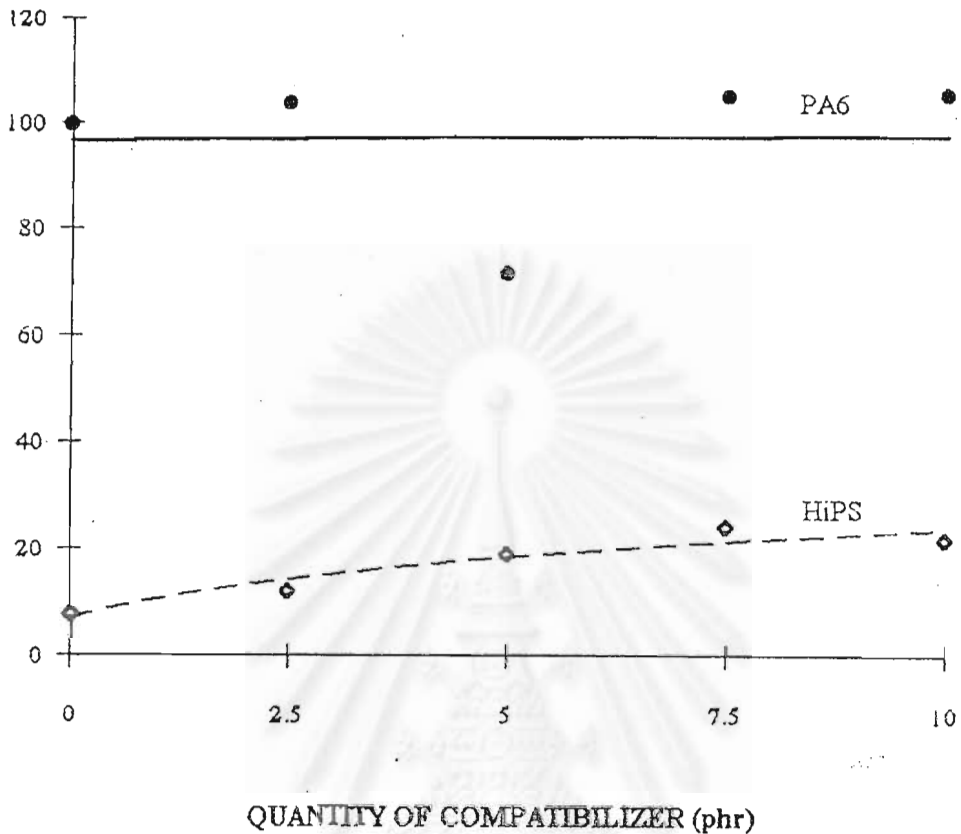
SEBS ที่ต่อแขนงกับ MA กลายเป็นส่วนต่อแขนงกับกลุ่ม Amine ในสายโซ่โมเลกุลของ PA6 ทำให้ chain mobility และ bond stretching ของ PA6 ที่มี SEBS-g-MA เกิดขึ้นได้น้อยและยากขึ้นและ ณ ระดับความเครียดสูงขึ้นเมื่อมี SEBS-g-MA ใน PA6 มากขึ้น

ผลของ SEBS-g-MA ต่อสมบัติของ HIPS และ PA6 ณ จุดขาดภายใต้แรงดึงดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6: แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อความเครียด ณ จุดขาด

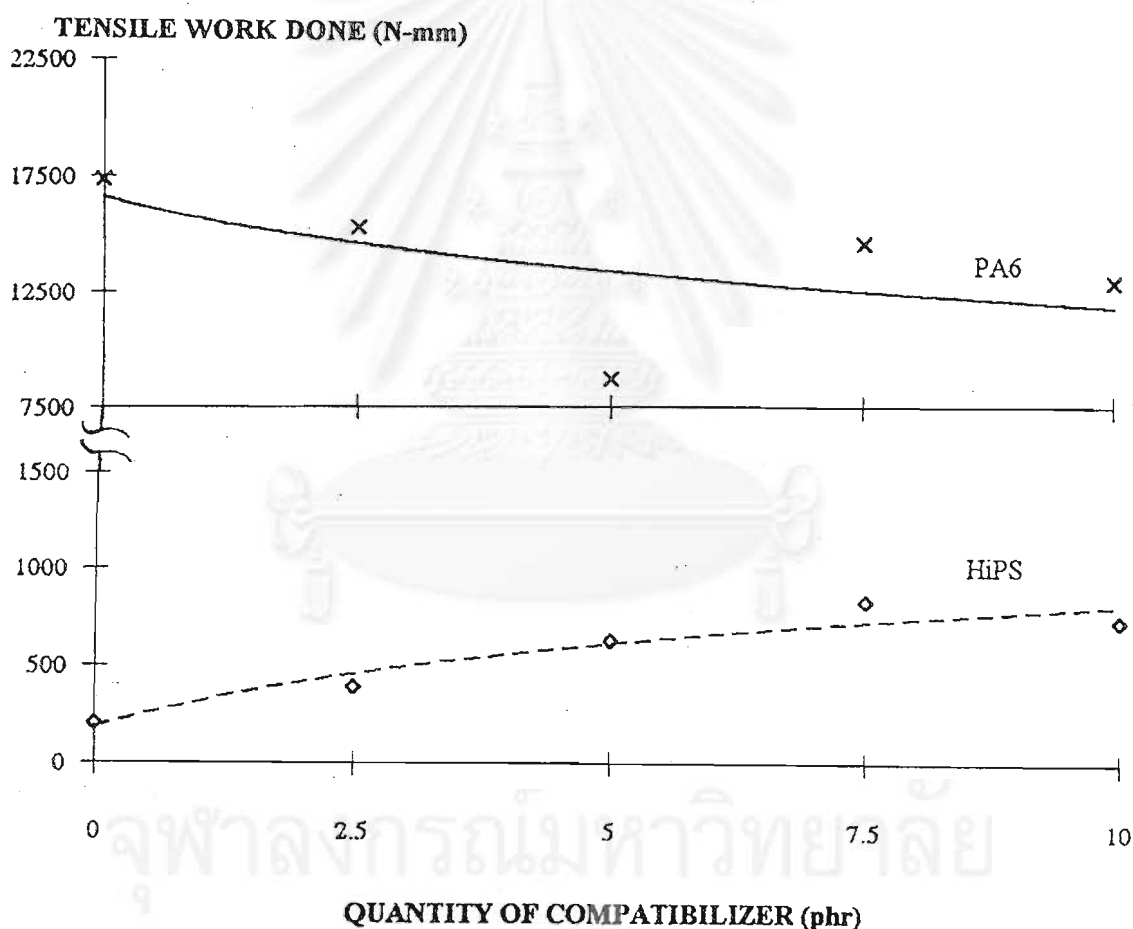
## TENSILE STRAIN AT BREAK (%)



รูปที่ 4.7: แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อความเค้น ณ จุดขาด

SEBS-g-MA มีผลทำให้ HIPS เหนียวขึ้นเพราะยาง Butadiene ใน SEBS ซึ่งเข้ากับ HIPS ได้ และมีการยึดติดระหว่างเฟสที่ดี ดังจะยืนยันโดยหลักฐานจากภาพถ่ายระดับจุลภาค มีผลทำให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงในขณะที่ HIPS เหนียวขึ้นโดยมีระดับความเครียด ณ จุดขาดสูงขึ้นและ HIPS ที่มี SEBS นี้ยึดตัวได้มากขึ้นเมื่อขาด เนื่องจากผลของอนุภาคยาง Butadiene ใน HIPS ที่มี SEBS ช่วยให้ HIPS มีโอกาสเกิด Deformation และ Craze ในกรณีของ PA6 นั้น SEBS มีได้ต่ออยู่กับสายโซ่โมเลกุลหลักของ PA6 จึงไม่มีผลของอนุภาคยาง Butadiene ออกมาปรากฏให้เห็นชัดในสมบัติของ PA6 PA6 นี้จึงมีระดับความเครียด ณ จุดขาดลดลงในขณะที่ความเค้น ณ จุดขาดไม่เปลี่ยนแปลง

ผลของสาร SEBS-g-MA ต่องานโดยรวมในการดึง PA6 และ HIPS ให้ขาดดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานที่กระทำเมื่อดึง HIPS ให้ขาดเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของ SEBS-g-MA ทั้งนี้เพราะ SEBS-g-MA ที่มี styrene รวมกับ styrene ของ HIPS ทำให้อนุภาคยาง Butadiene ใน SEBS ยึดติดได้ดีกับ HIPS พันธะระหว่างวัฏภาคของ HIPS และวัฏภาคของยางใน SEBS-g-MA ทำให้งานที่ต้องกระทำในการดึง HIPS ส่วนหนึ่งถูกใช้ไปในการดึงเฟสยาง จึงทำให้งานการยึดตัว ณ จุดขาดของ HIPS สูงขึ้น และมีผลให้งานที่กระทำในการดึง HIPS ให้ขาดสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.8: แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่องานเพื่อที่ดึงให้พลาสติกขาด

สำหรับ PA6 ซึ่งเป็นพลาสติกที่เหนียว งานที่ดึงให้ PA6 ขาดค่อนข้างสูง คือ 17,500 N-m การใส่ SEBS-g-MA มีผลให้งานเพื่อดึงให้ PA6 ขาดลดลง สืบเนื่อง จากความเครียด ณ จุดขาดของ PA6 ที่มี SEBS-g-MA ลดลงอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงใน รูปที่ 4.6 ด้วยเหตุผลที่ได้บรรยายแล้ว งานเพื่อดึงให้ขาดซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับระดับ ความเครียดภายใต้แรงดึง ณ จุดขาดจึงลดลงตามไปด้วย แม้ว่าระดับความเค้น ณ จุดขาด จะมีได้แปรเปลี่ยนมากนัก

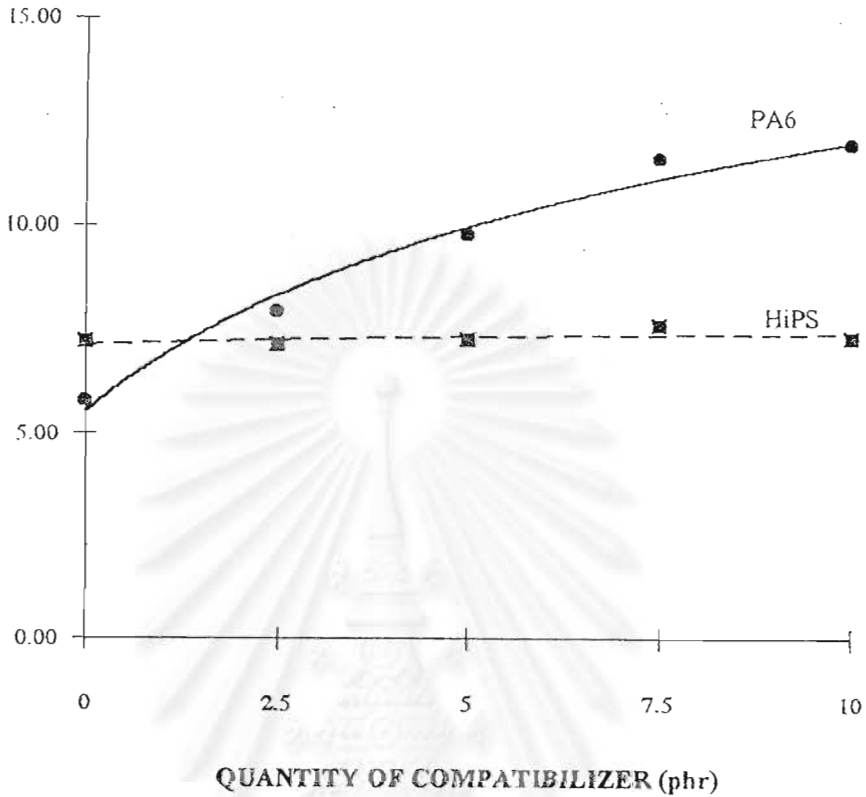
ดังนั้น จากผลในรูปที่ 4.3 ถึง 4.8 ยืนยันว่าสาร SEBS-g-MA ที่เติมใน พอลิเมอร์แต่ละตัวที่จะใช้ในระบบผสมคือ PA6 และ HIPS ต่างมีผลทำให้สมบัติเชิงกล ภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์แต่ละตัวเปลี่ยนแปลงได้

#### 4.2.1.2 สมบัติภายใต้แรงกระแทก Izod

การทดสอบ Izod เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการประเมินแรง กระแทกที่ทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์แตกหัก ค่าแรงกระแทก Izod ที่สูงเป็นตัวบ่งชี้ว่าวัสดุ ที่ทดสอบมีความต้านทานต่อการกระแทกดีกว่าค่าแรงกระแทก Izod ที่ต่ำ

รูปที่ 4.11 แสดงผลของสารช่วยให้เข้ากันได้คือ SEBS-g-MA ต่อ PA6 และ HIPS การเติม SEBS-g-MA ไม่มีผลต่อแรงกระแทก Izod ของ HIPS ในทาง ตรงข้าม SEBS-g-MA กลับมีผลอย่างชัดเจนใน PA6 โดยทำให้การทนต่อแรงกระแทก ของ PA6 ดีขึ้นมาก โดยเฉพาะหากเติม SEBS-g-MA ถึง 7.5 phr และ 10 phr มีผลทำ ให้แรงกระแทก Izod ของ PA6 เพิ่มขึ้นถึง 101 และ 108% ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่อง มาจากอนุภาคยาง Butadiene ใน SEBS ซึ่งแม้จะมีได้รวมเข้าเป็นส่วนหนึ่งของสายโซ่ หลัก PA6 แต่อนุภาคยางก็มีผลทำให้ยอดของรอยแตกที่เกิดขึ้นลดความแหลมลงได้ เกิด รอยแตกทุ้ง (Crack blunting) เนื่องจาก Deformation ในอนุภาคยางที่อยู่ตอนหน้า ของรอยแตกที่กำลังขยายตัว (Propagating crack) ทำให้รอยแตกทุ้ง การจะทำให้ PA6 ดังกล่าวแตกหักจึงต้องใช้แรงหรือพลังงานมากขึ้น

### IZOD IMPACT STRENGTH (kg-cm/cm)



รูปที่ 4.9: แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อแรงกระแทก Izod ของ PA6 และ HiPS

#### 4.2.1.3 สมบัติภายใต้แรงกระแทกค้อนน้ำหนัก

ผลการทดสอบแรงกระแทกโดยวิธี Izod ยังได้รับการยืนยันโดยผลจากการทดสอบแรงกระแทกด้วยค้อนน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งใช้หลักการกระแทกด้วยค้อนน้ำหนักซึ่งจะต้อง “ผลัดทะลุ” แผ่นพลาสติก ฉะนั้น การทดสอบแรงกระแทกชนิดนี้จึงมีการรวมแรงซึ่งจะต้องด้านความฝืดในแผ่นพลาสติกเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

รูปที่ 4.10 แสดงผลของสารช่วยให้เข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพลังงานที่ทำให้แผ่นพลาสติกแตกทะลุภายใต้การกระแทกด้วยค้อนน้ำหนัก ผลการทดสอบยืนยันว่าสาร SEBS-g-MA ไม่มีผลต่อพลังงานกระแทกให้แตกทะลุของ HiPS แต่มีผลอย่างชัดเจนที่ทำให้พลังงานกระแทกของ PA6 โดยที่ SEBS-g-MA 7 phr พลังงานกระแทกเพิ่มขึ้นถึง 175% แต่ที่ 10 phr กลับพบว่าพลังงานกระแทกลดลงอย่างเฉียบพลัน ผลดังกล่าวนี้ต่ำ

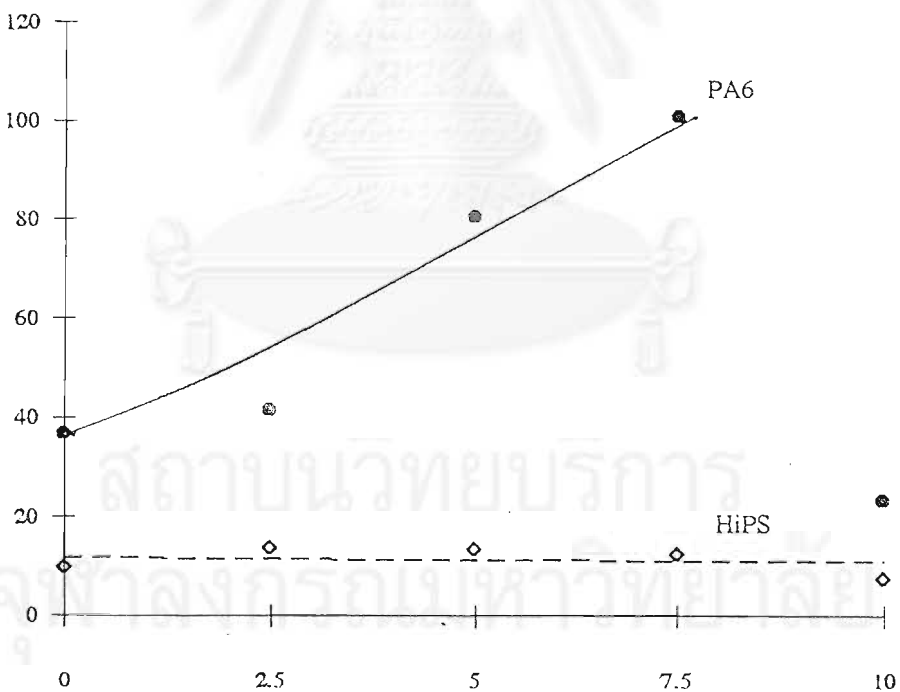
เกินคาด อาจเกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการเตรียมแผ่นทดสอบหรือแผ่นทดสอบอาจมีตำหนิภายในชิ้นงานทดสอบหรือที่ผิวงาน ส่วนผลการทดสอบ ณ 2.5, 5 และ 7.5 phr เป็นไปในแนวเดียวกับผลของการทดสอบ Izod อย่างไรก็ดี สัดส่วนการเพิ่มของแรงกระแทก Izod กับพลังงานการทำให้แตกทั้งสองกรณีได้เพิ่มด้วยสัดส่วนที่เท่ากัน เพราะ

ก) หลักการทดสอบของ Izod และตุ้มน้ำหนักต่างกันเพราะการทดสอบโดยตุ้มน้ำหนักมีการนำความฝืดของชิ้นงานพลาสติกมาเกี่ยวข้อง

ข) อุณหภูมิการทดสอบต่างกัน การทดสอบ Izod กระทำ ณ อุณหภูมิมาตรฐาน คือ  $23 \pm 2$  °ซ ส่วนการทดสอบแบบตุ้มกระแทกกระทำ ณ อุณหภูมิห้อง (33 °ซ)

ค) ลักษณะชิ้นงานทดสอบต่างกัน ชิ้นงานทดสอบ Izod มีรอยบากตามมาตรฐานการทดสอบที่ผิวงาน ขณะนี้ชิ้นงานทดสอบตุ้มน้ำหนักเป็นแผ่นเรียบ

#### ENERGY TO BREAK (Joule)



#### QUANTITY OF COMPATIBILIZER (phr)

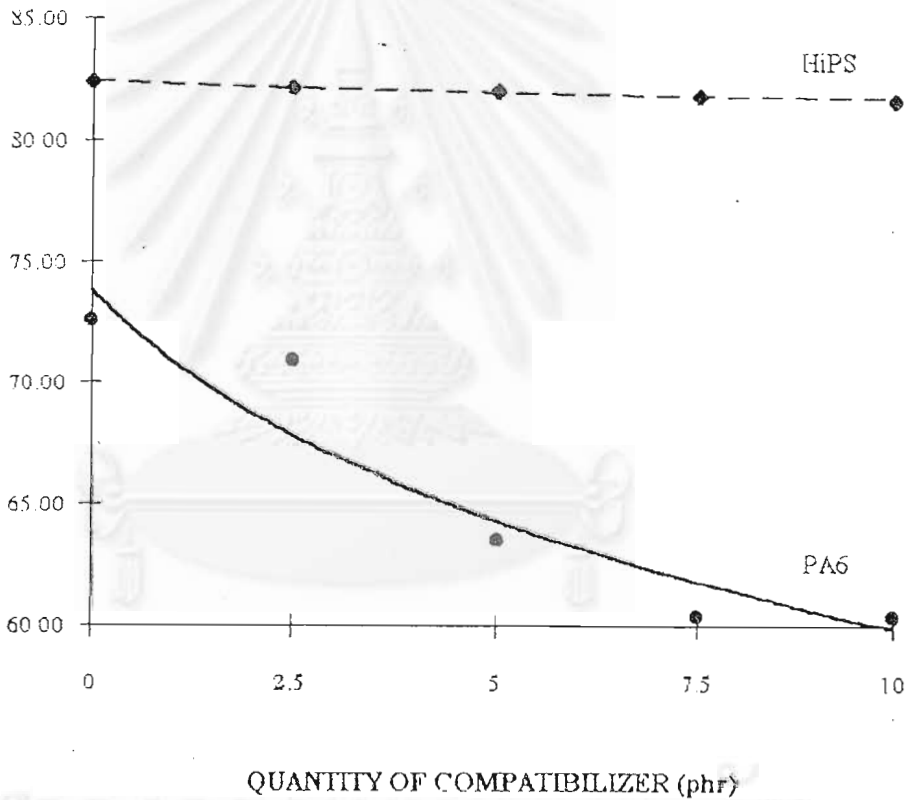
รูปที่ 4.10: แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพลังงานกระแทกโดยตุ้มน้ำหนัก



#### 4.2.1.4 อุณหภูมิการโค้งงอภายใต้ภาระแรงกด (HDT)

ผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่ออุณหภูมิการโค้งงอภายใต้แรงกด (HDT) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นชัดเจนว่า HDT ของ HIPS ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับ HDT ของ PA6 และ HDT ของ HIPS มีค่าเกือบคงที่ตลอดทุกปริมาณ SEBS-g-MA ที่ศึกษา ฉะนั้น SEBS-g-MA จึงไม่มีผลต่อ HDT ของ HIPS แต่กลับมีผลอย่างมากต่อ HDT ของ PA6 ซึ่งลดลงเมื่อปริมาณของ SEBS-g-MA สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเติม SEBS-g-MA มีผลให้จุดแปรสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ลดลง

HEAT-DISTORTION TEMPERATURE (°C)

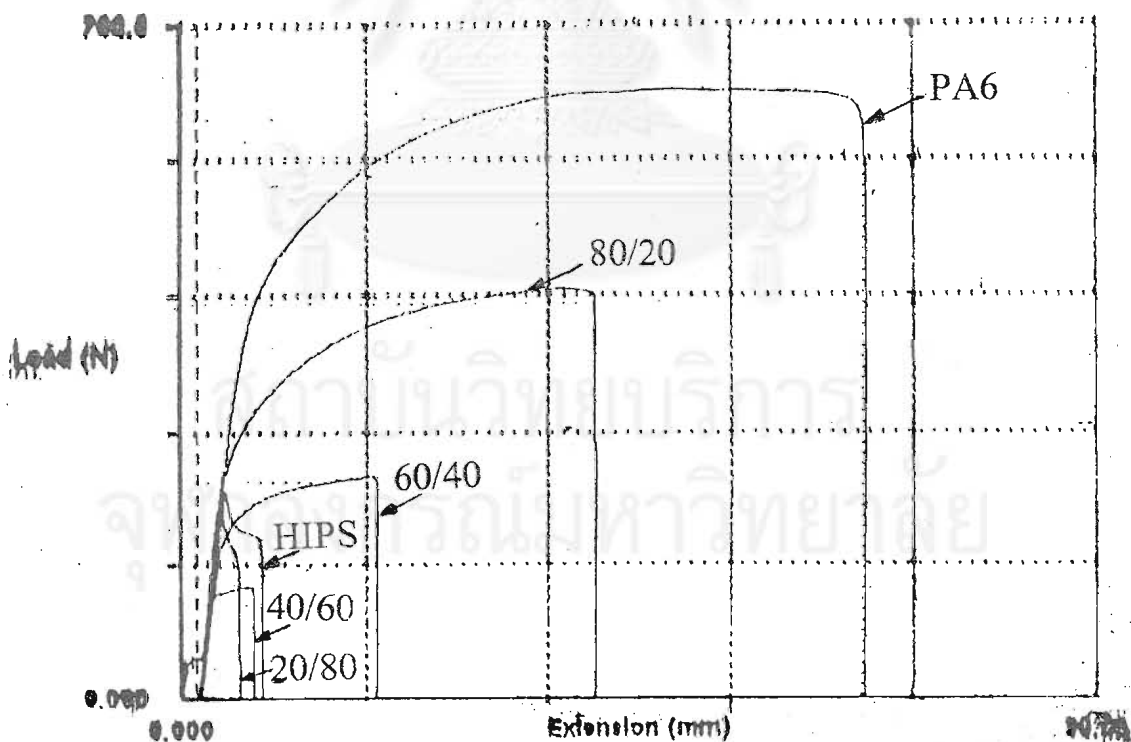


รูปที่ 4.11: แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่ออุณหภูมิการโค้งงอ (HDT)

### 4.3 สมบัติเชิงกลของระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS

#### 4.3.1 สมบัติภายใต้แรงดึง

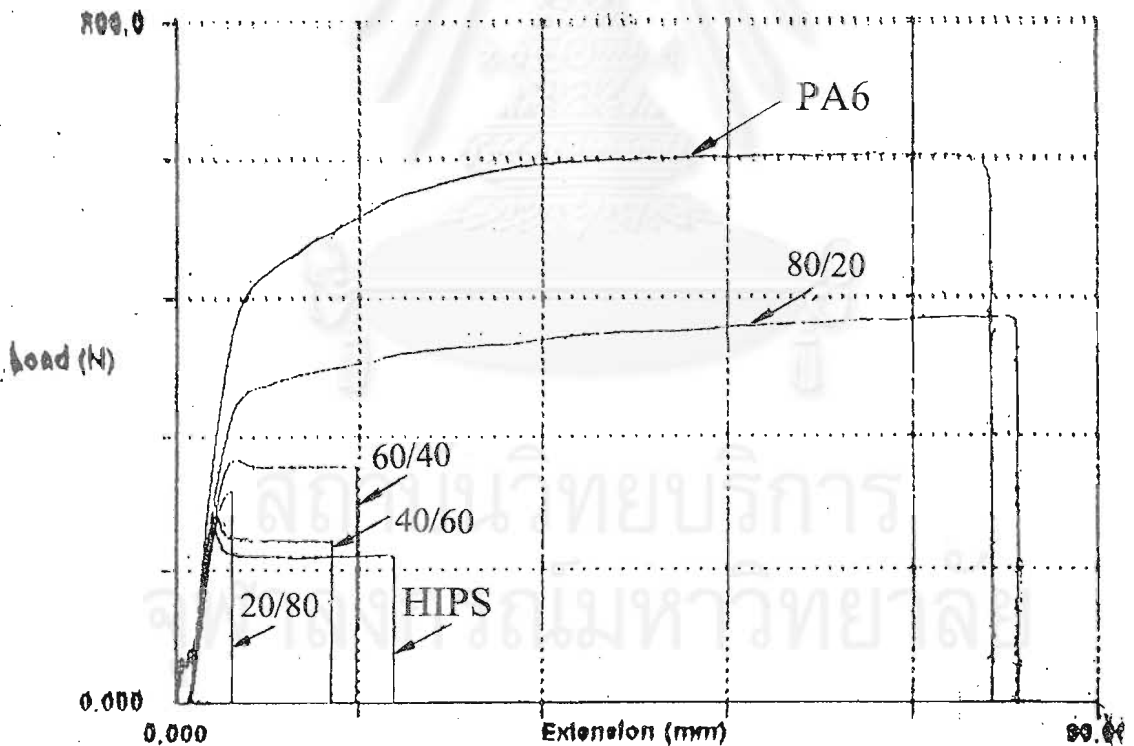
สมบัติเชิงกลภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ซึ่งมีสัดส่วนผสม 0/100, 20/80, 40/60, 60/40, 80/20 และ 100/0 ในกรณีที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปแบบ Load-Deformation ในรูปที่ 4.12 พฤติกรรมเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีสัดส่วนผสม 80/20, 60/40 และ 40/60 มีลักษณะ Load-deformation แบบเดียวกับ PA6 กล่าวคือไม่ปรากฏจุดครากที่ชัดเจน และมีการยืดตัวถาวร (Plastic deformation) มากกว่า HIPS และพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีสัดส่วนผสม 20/80 แต่ Load และ Deformation ของระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีสัดส่วนผสม 80/20, 60/40 และ 40/60 มีระดับต่ำกว่าของ PA6 มาก พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่สัดส่วนผสม 20/80 มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับ HIPS กล่าวคือมีจุดคราก (Extrinsic yield point) ปรากฏอย่างชัดเจน นอกจากนี้ พฤติกรรมที่เปรียบเทียบในรูปที่ 4.12 ยังแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.12 : ผังภาพ Load-deformation ภายใต้แรงดึงของ PA6/HIPS และพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสมต่าง ๆ โดยมีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้

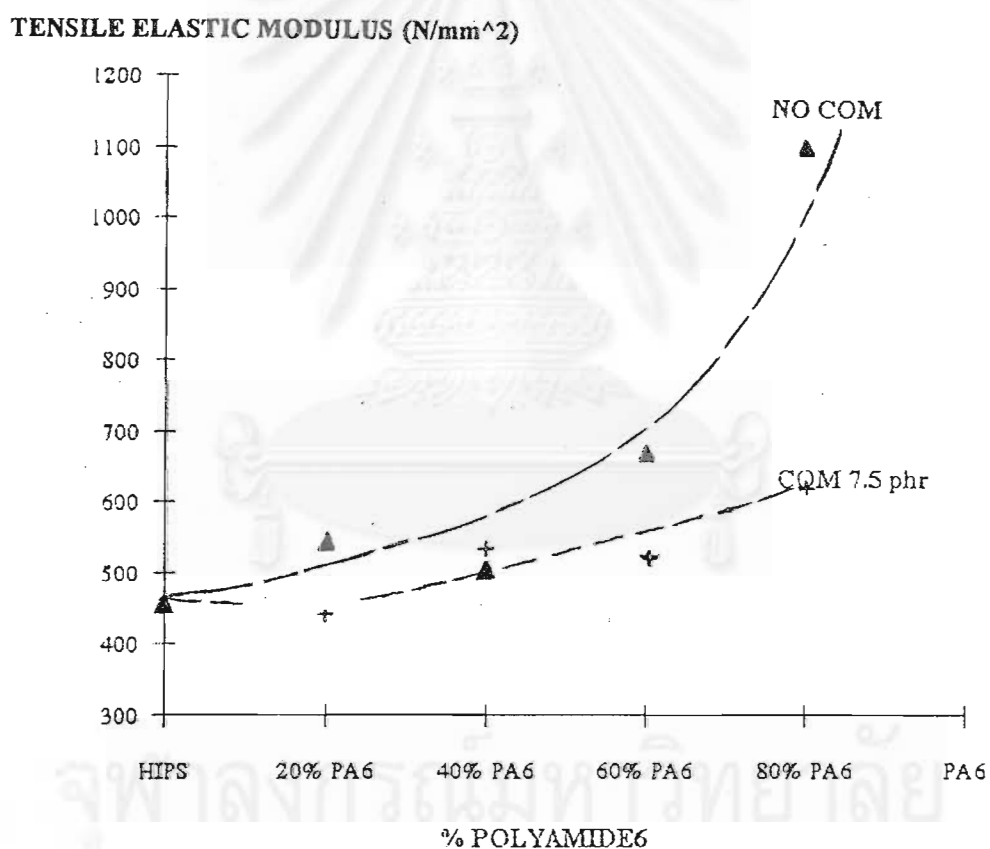
PA6/HIPS ขอดภายใต้แรงดึง ยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของ PA6 ในพอลิเมอร์ผสม นั้นน้อยลงด้วย

เมื่อใส่สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS สมบัติเชิงกลภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ระบบดังกล่าวซึ่งแสดงในรูป ที่ 4.13 มีพฤติกรรมทั่วไปคล้ายระบบผสมที่มี SEBS-g-MA แต่ระดับ Load ที่ใช้โดยทั่วไปลดลงต่ำกว่าระบบที่มี SEBS-g-MA ในขณะที่ Deformation เพิ่มขึ้นกว่า ระบบที่มี SEBS-g-MA ทำให้พลังงานที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มี SEBS-g-MA ขาดภายใต้แรงดึงมีระดับสูงกว่าระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มี SEBS-g-MA อย่างไรก็ดี พลังงานดังกล่าวยังคงมีแนวโน้มลดลงเมื่อ ปริมาณ PA6 ในพอลิเมอร์ผสมนั้นน้อยลงดังเช่นที่พบในระบบที่มี SEBS-g-MA



รูปที่ 4.13: พังภาพ Load-Deformation ภายใต้แรงดึงของ PA6/HIPS และพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสมต่าง ๆ พร้อมใส่สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA)

สมบัติภายใต้แรงดึงในรูปของ โมดูลัสความยืดหยุ่นถูกเปรียบเทียบกับ ปริมาณ PA6 ในพอลิเมอร์ผสมที่มี SEBS-g-MA จำนวน 7.5 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (No compatibilizer) มีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PA6 โมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวเริ่มขึ้นอย่างมากและรวดเร็วในช่วงที่มี PA6 เป็นปริมาณ 60% ถึง 80% โดยน้ำหนัก สำหรับระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มี SEBS-g-MA ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PA6 มากขึ้นเช่นกัน แต่เป็นการเพิ่มในอัตราที่น้อยกว่าระบบผสมที่มี SEBS-g-MA

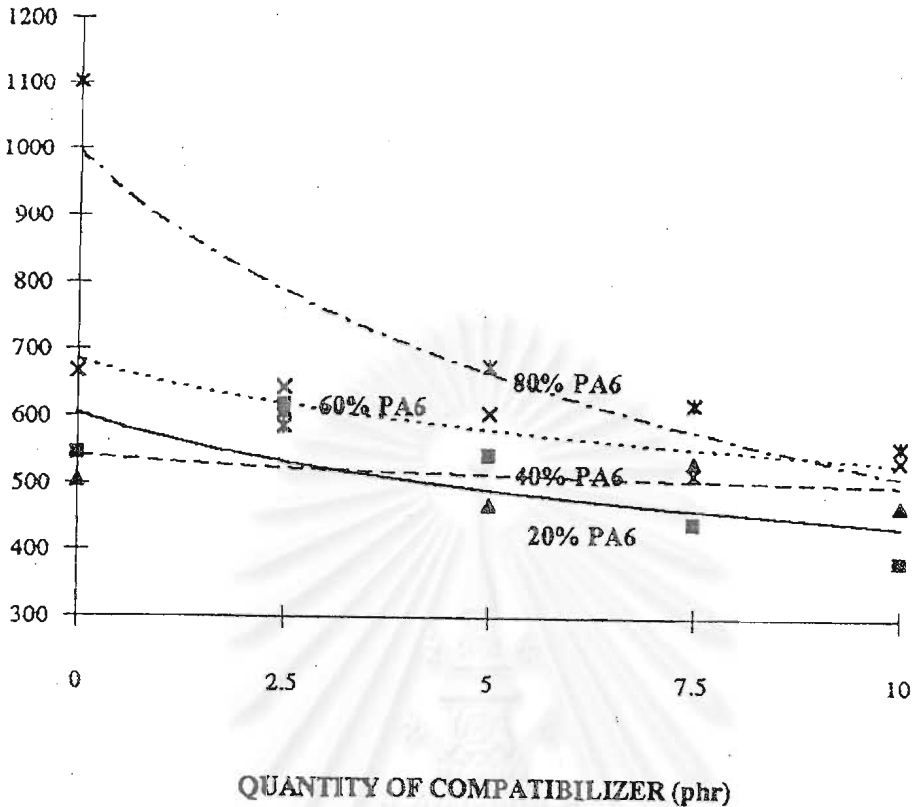


รูปที่ 4.14: แสดงโมดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr)

การผสม PA6 กับ HIPS ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีทั้งวัฏภาคของ PA6 และของ HIPS อยู่ร่วมกันแต่ไม่ได้มีปฏิกิริยาหรือพันธะใด ๆ ต่อกันพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS จึงจัดเป็นพอลิเมอร์ผสมชนิดไม่เข้ากัน (Incompatible blend) ดังยืนยันโดยหลักฐานทางภาพถ่ายในระดับจุลภาคในรายงานวิจัยนี้ส่วนที่ 4.5 ซึ่งจะแสดงให้เห็นวัฏภาคของ PA6 และวัฏภาคของ HIPS แยกออกจากกันอย่างชัดเจน ทำให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมระบบดังกล่าวสูงขึ้น การที่ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PA6 ในระบบพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวสูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือเมื่อปริมาณ HIPS ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคยาง Isoprene ซึ่งได้โคโพลิเมอไรซ์ ในโครงสร้าง HIPS มีอิทธิพลน้อยลงและมีปริมาณน้อยลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ทั้งหมดในระบบผสม

การลดลงของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเมื่อมี SEBS-g-MA ในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS เป็นผลจาก SEBS-g-MA ทำหน้าที่เป็นสารช่วยให้ระบบพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวเปลี่ยนจาก Incompatible blend มาเป็น compatible blend ความเข้ากันได้เกิดขึ้นเนื่องจากบล็อกของ styrene ใน SEBS-g-MA ทำปฏิกิริยาหลอมรวมกับ Styrene ใน HIPS ในขณะที่ MA ใน SEBS-g-MN ก็สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มแอมไนด์ (-CONH-) ใน PA6 ดังนั้น SEBS-g-MA จึงเป็นตัวเชื่อมให้ PA6 และ HIPS เข้ากันได้เป็น Compatible blend ที่มีพอลิเมอร์ที่ผสมคือ PA6 และ HIPS ต่างก็ทำปฏิกิริยามีพันธะกับสารช่วยให้ผสมกันได้

ผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ในระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ดังแสดงในรูปที่ 4.15 การมี SEBS/g-MA ทำให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงอย่างชัดเจนโดยเฉพาะสำหรับ PA6/HIPS 80/20 ซึ่งค่าโมดูลัสในกรณีที่ไม่ได้มี SEBS-g-MA กับกรณีที่มี SEBS-g-MA 2.5 phr มีความแตกต่างกันมาก แต่เมื่อมี SEBS-g-MA เกินกว่า 2.5 phr ส่วนพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีสัดส่วนผสม 60/40 และ 20/80 มีการลดลงของค่าโมดูลัสเช่นกันแต่เป็นการลดลงด้วยอัตราช้า ๆ SEBS-g-MA มีผลน้อยมากต่อระบบผสม PA6/HIPS ที่มีสัดส่วนการผสม 40/60

TENSILE ELASTIC MODULUS (N/mm<sup>2</sup>)

รูปที่ 4.15: แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80

การลดลงของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเมื่อปริมาณสาร SEBS-g-MA เพิ่มขึ้น เพราะอิทธิพลของยาง Butadiene ที่มากขึ้นและเข้ากันอยู่กับพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่ได้ปรับให้เข้ากันได้โดย SEBS และ MA อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมที่มี PA6 เป็นสัดส่วนที่สูงกว่ายังคงมีค่าโมดูลัสสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มี HIPS เพราะสมบัติโดยพื้นฐานเดิมของ PA6 มีค่าโมดูลัสสูงกว่า HIPS ที่มียาง Isoprene อยู่ในโครงสร้างอยู่ก่อนแล้ว

สมบัติเชิงกลภายใต้แรงดึงในรูปต่าง ๆ จะถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับปริมาณ PA6 ในพอลิเมอร์ผสมที่มี SEBS-g-MA จำนวน 7.5 phr พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลดังกล่าวในเชิงทฤษฎีโดยใช้สมการ Voigt's Model ในกรณีที่สมบัติเชิงกลแปรโดยตรงกับปริมาณพอลิเมอร์แต่ละตัวที่ผสมหากพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวเป็นไปตามกฎการผสม (Rule of Mixture) ดังสมการที่ (4.2) และในกรณีที่สมบัติเชิงกล ดังกล่าวไม่แปรโดยตรงกับปริมาณพอลิเมอร์แต่ละตัวที่ผสม ดังสมการของ Reuss's ในสมการที่ (4.3)

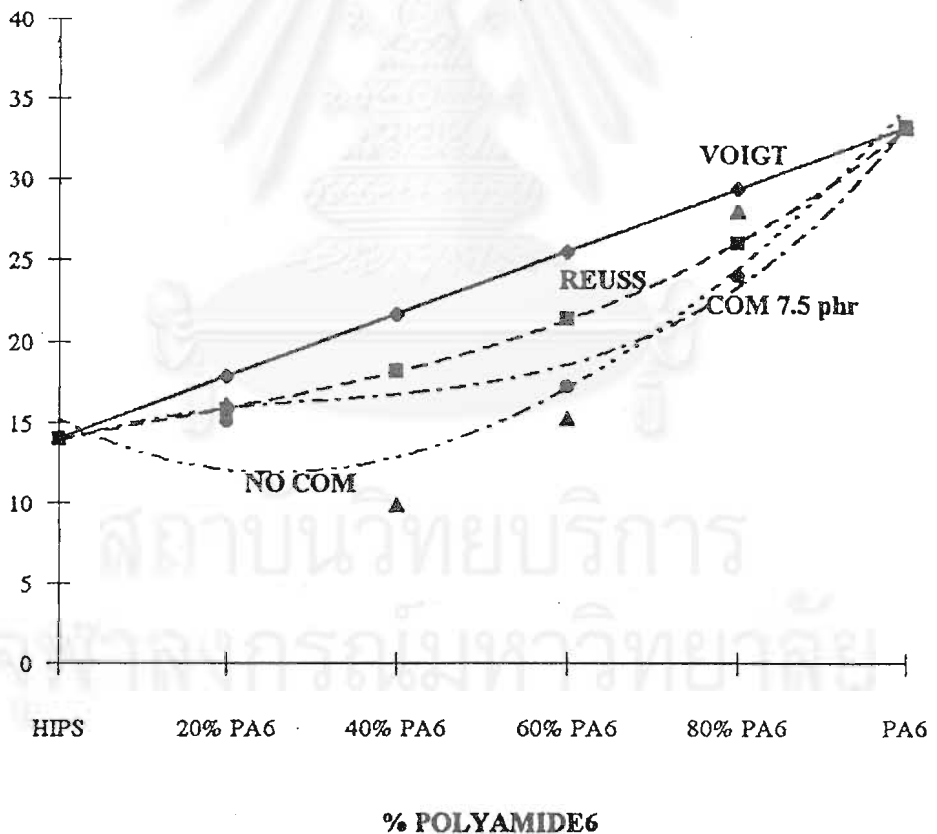
- เมื่อ Z คือ สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม 1 และ 2  
 $X_1$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ 1  
 $X_2$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ 2

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลในด้านความเครียด ณ 0.2 % Offset ของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีและไม่มีสาร SEBS-g-MA 7.5 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17

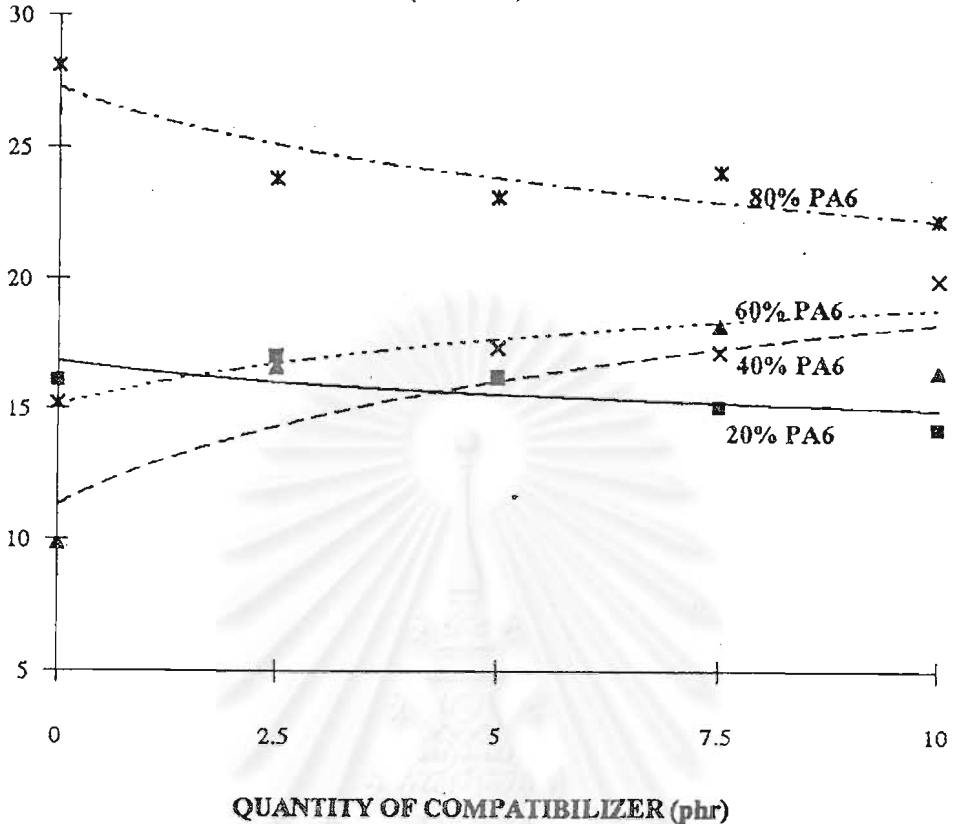
$$\text{Voigt : } Z = X_1 Z_1 + X_2 Z_2 \quad (4.2)$$

$$\text{Reuss : } \frac{1}{Z} = \frac{X_1}{Z_1} + \frac{X_2}{Z_2} \quad (4.3)$$

0.2% OFFSET TENSILE YIELD STRESS (N/mm<sup>2</sup>)



รูปที่ 4.16: แสดงความเครียด ณ จุดคราก 0.2 % Offset ภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr)

0.2% OFFSET YIELD TENSILE STRESS (N/mm<sup>2</sup>)

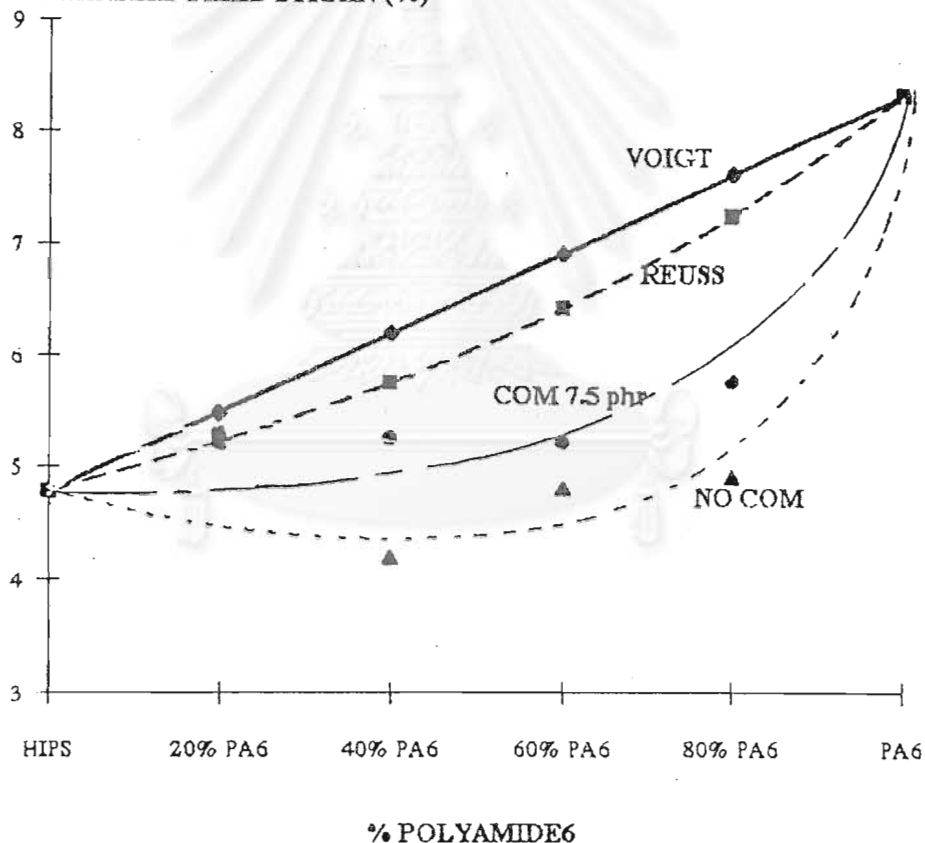
รูปที่ 4.17 : แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80

ความเครียด ณ จุดคราก 0.2% Offset ของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ทั้งระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17) ต่างมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณโดยสมการของ Voigt และ Reuss พอลิเมอร์ผสมที่มีสาร SEBS-g-MA มีค่าความเครียด ณ จุดคราก 0.2% Offset โดยเฉลี่ยสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่ไม่มีสาร SEBS-g-MA ค่าความเครียด ณ จุดคราก 0.2% Offset ในพอลิเมอร์ผสมที่มี PA6 เป็นสัดส่วนมากกว่า เช่น 80/20 มีระดับสูงกว่า 60/40, 40/60 และ 20/80 ณ ทุกปริมาณของ SEBS-g-MA ที่ศึกษา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ SEBS-g-MA ที่เติมมี MA เข้าทำปฏิกิริยากับ PA6 ที่มีอยู่มากกว่าในพอลิเมอร์ผสม ในขณะที่บล็อก SEBS ที่ทำปฏิกิริยารวมกับ Styrene ใน HIPS ที่มีอยู่น้อยกว่าแล้วยังคงเหลือ SEBS ที่มีได้ต่อกับ Styrene ใน HIPS อีก จึงกลับกลายเป็นส่วนที่ทำให้การเคลื่อนขยับ (Chain mobility) ของสายโซ่โมเลกุล PA6 เกิดขึ้นได้ยากขึ้นและเกิดขึ้น ณ ระดับความเครียดที่สูงกว่าในกรณีที่มี PA6 ในพอลิเมอร์ผสมน้อย

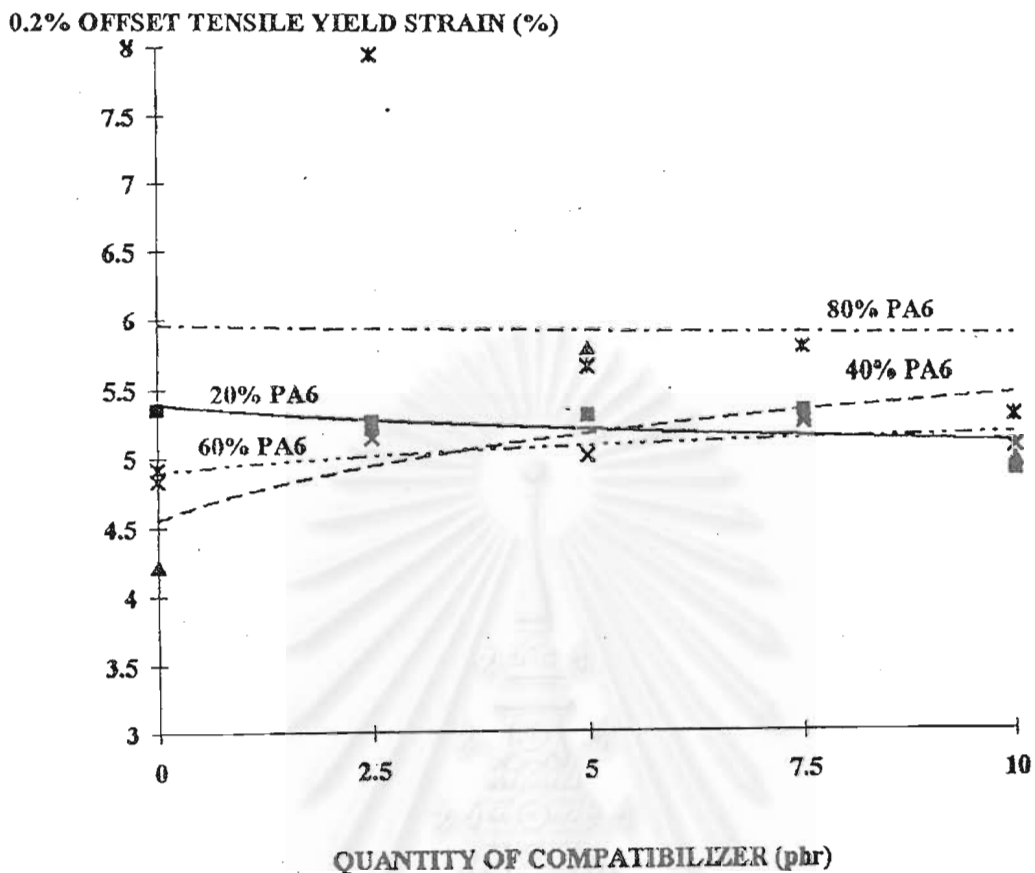


ผลการศึกษาคงทน ณ จุดคราก 0.2% Offset ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.18 ความคงทน ณ จุดคราก 0.2% Offset ของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ทั้งระบบ พอลิเมอร์ผสมที่มีมีและมีการช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่างมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณโดยสมการของ Voigt และ Reuss อย่างชัดเจน ระดับความคงทนของพอลิเมอร์ผสมที่มี SEBS-g-MA สูงกว่าระบบผสมที่มีมี SEBS-g-MA เพราะอนุภาคยาง Styrene ใน SEBS ที่ทำปฏิกิริยารวมกับ HIPS ในพอลิเมอร์ผสมช่วยให้พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมี Deformation ได้มากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณ SEBS-g-MA ที่มากขึ้นยังมีผลให้ระดับความคงทนของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ณ จุดคราก 0.2% Offset สูงขึ้นด้วย

0.2% OFFSET TENSILE YIELD STRAIN (%)



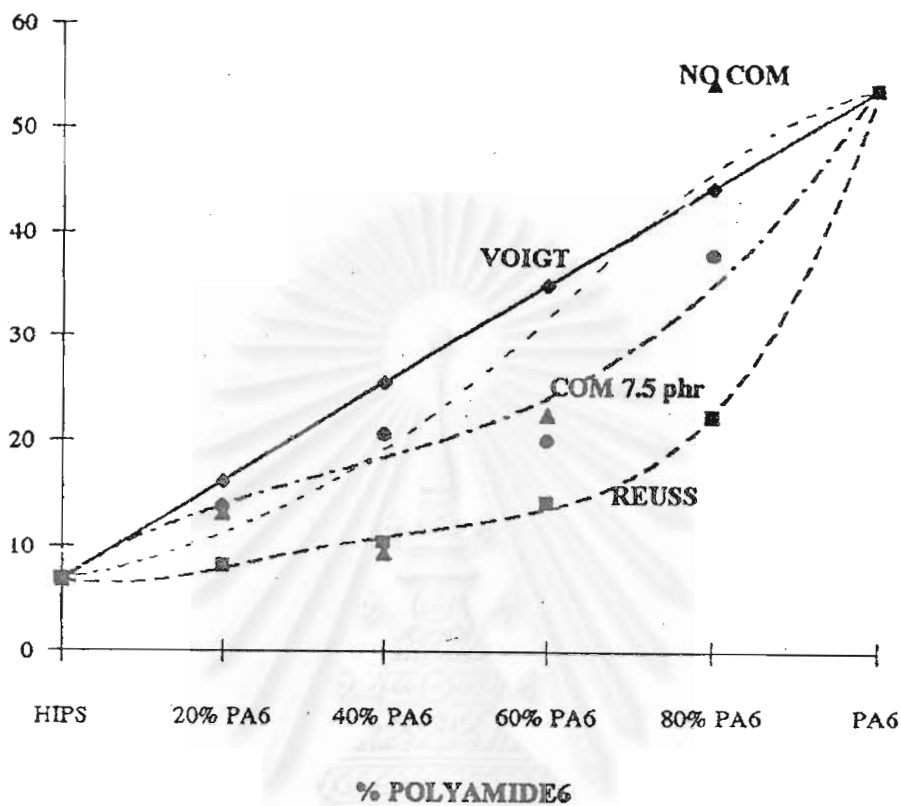
รูปที่ 4.18: แสดงความคงทน ณ จุดคราก 0.2% Offset ภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr)



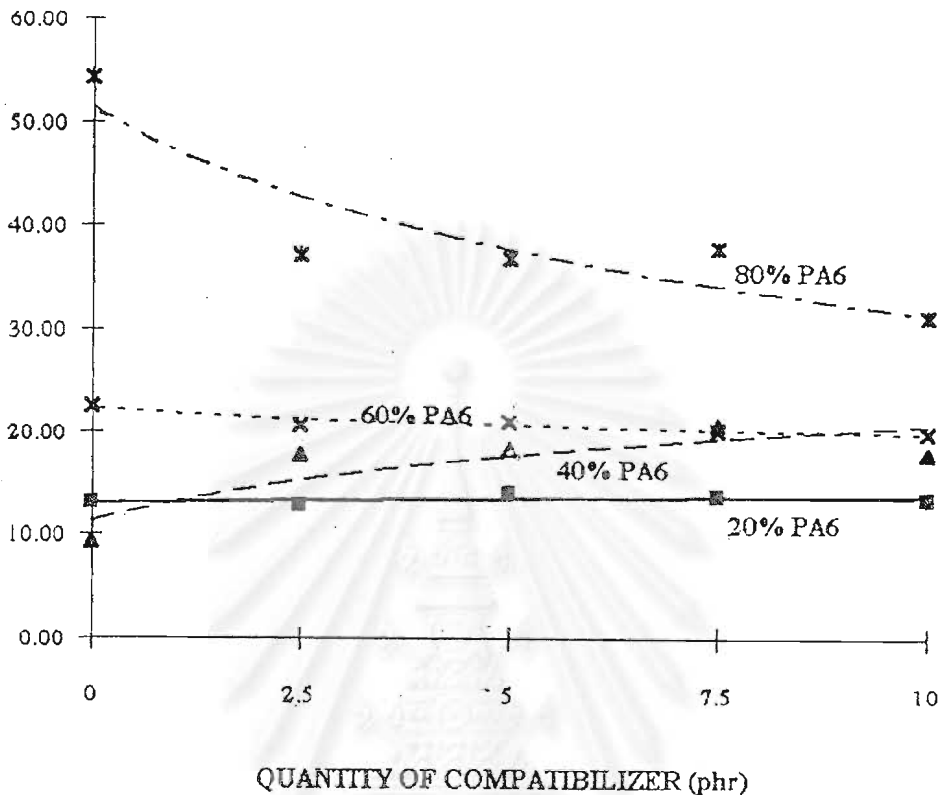
รูปที่ 4.19: แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80

สมบัติของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ณ จุดขาดภายใต้แรงดึงดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ความเครียด ณ จุดขาดของระบบพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวที่มีและไม่มี SEBS-g-MA มีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่างค่าที่คำนวณโดยสมการของ Voigt และ Reuss ระบบผสมที่ไม่มีสาร SEBS-g-MA มีระดับความเครียด ณ จุดขาดสูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของระบบนี้ที่สูงกว่าระบบผสมที่มี SEBS-g-MA ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มี SEBS-g-MA เป็น Incompatible blend จึงมักแข็งและเปราะขึ้น ระดับความเครียด ณ จุดขาดจึงสูงขึ้นแต่จะมีความเค้น ณ จุดขาดลดลงต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มี SEBS-g-MA ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ปริมาณ SEBS-g-MA ที่สูงขึ้นมีผลให้ระดับความเครียด ณ จุดขาดของระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ลดลงโดยระบบ PA6/HIPS 80/20 ยังคงมีระดับความเครียด ณ จุดขาดสูงกว่า 60/40, 40/60 และ 20/80 ด้วยเหตุผลดังได้บรรยายไว้ในกรณีระดับความเครียด ณ จุดคราก 0.2% Offset

TENSILE STRESS AT BREAK ( $N/mm^2$ )



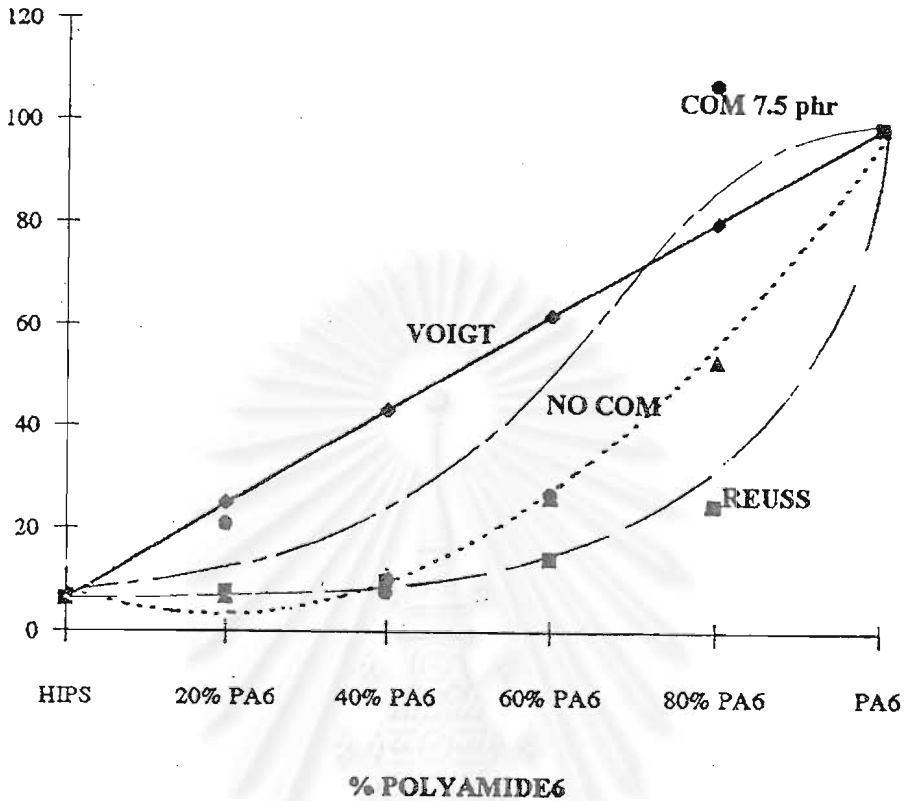
รูปที่ 4.20: แสดงความเครียด ณ จุดขาดภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr)

TENSILE STRESS AT BREAK (N/mm<sup>2</sup>)

รูปที่ 4.21 : แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนผสม 80/20, 60/40 และ 20/80

ความเค้น ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ระดับความเค้น ณ จุดขาดภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีและไม่มี SEBS-g-MA ต่างเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PA6 ในพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น ค่าโดยเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ระหว่างค่าความเค้น ณ จุดขาดที่คำนวณโดยสมการของ Voigt และ Reuss โดยพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มี SEBS-g-MA มีค่าความเค้นโดยเฉลี่ยสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มี SEBS-g-MA ด้วยเหตุผลดังได้บรรยายไว้ในกรณีระดับความเครียด ณ จุดคราก 0.2% Offset

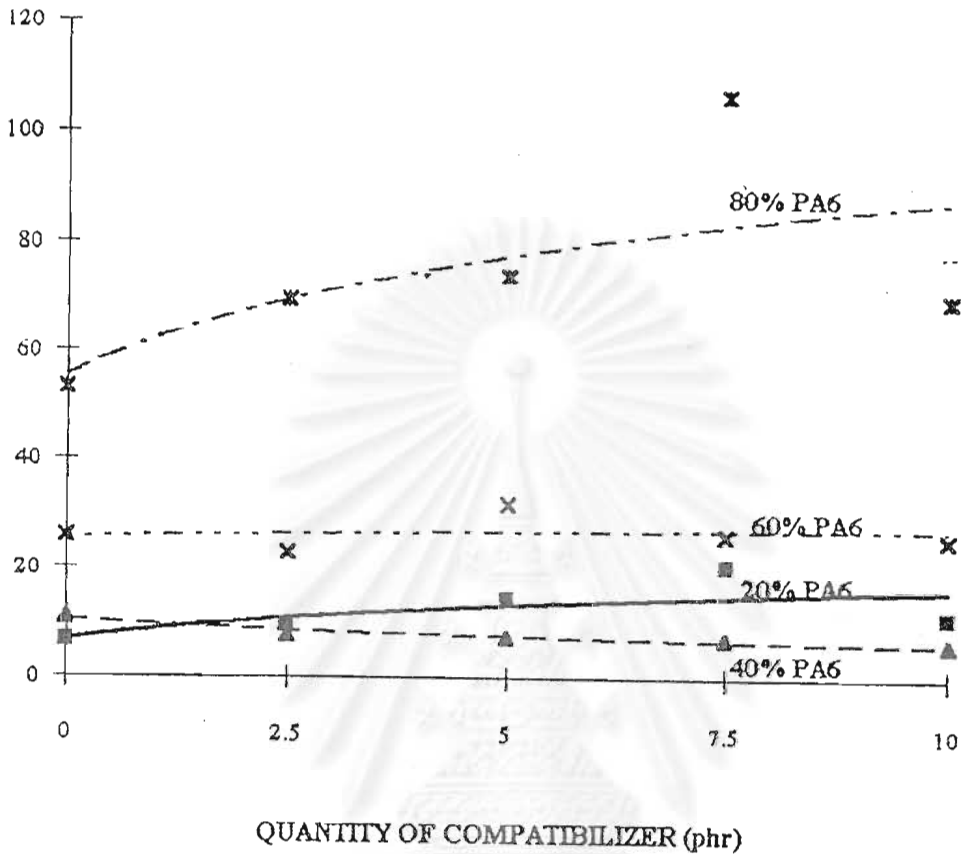
## TENSILE STRAIN AT BREAK (%)



รูปที่ 4.22 : แสดงความเค้น ณ จุดขาดภายใต้แรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr)

ฉะนั้น การใส่สารช่วยผสมให้เข้ากันได้จึงมีประสิทธิภาพช่วยให้พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS มีความเหนียวและยืดตัวได้มากขึ้นก่อนการขาด จากพฤติกรรมดังกล่าวทำให้คาดคะเนได้ว่างานที่ดึงเพื่อให้พลาสติกขาดสำหรับระบบพอลิเมอร์ผสมที่มี SEBS-g-MA จะต้องสูงกว่างานที่ดึงให้พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่ไม่มีสารดังกล่าวขาดแม้ว่าความเครียด ณ จุดขาดจะต่ำกว่า ด้วยยืนยันผลการทดสอบในรูปที่ 4.24

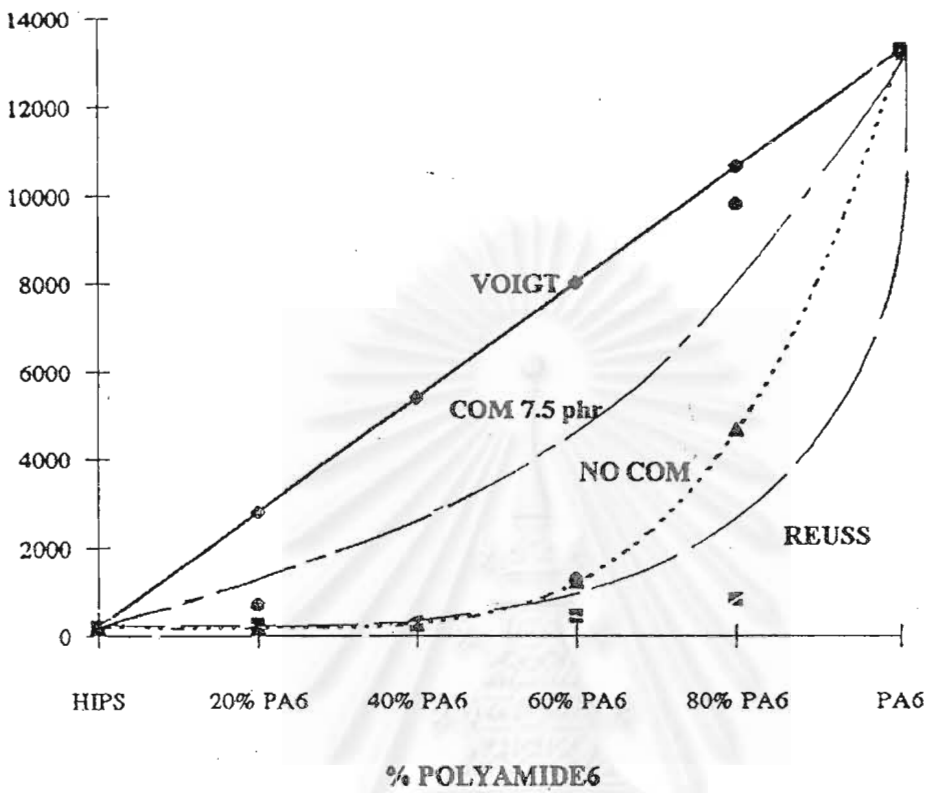
## TENSILE STRAIN AT BREAK (%)



รูปที่ 4.23 : แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อ พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนการผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80 สำหรับความเค้น ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม

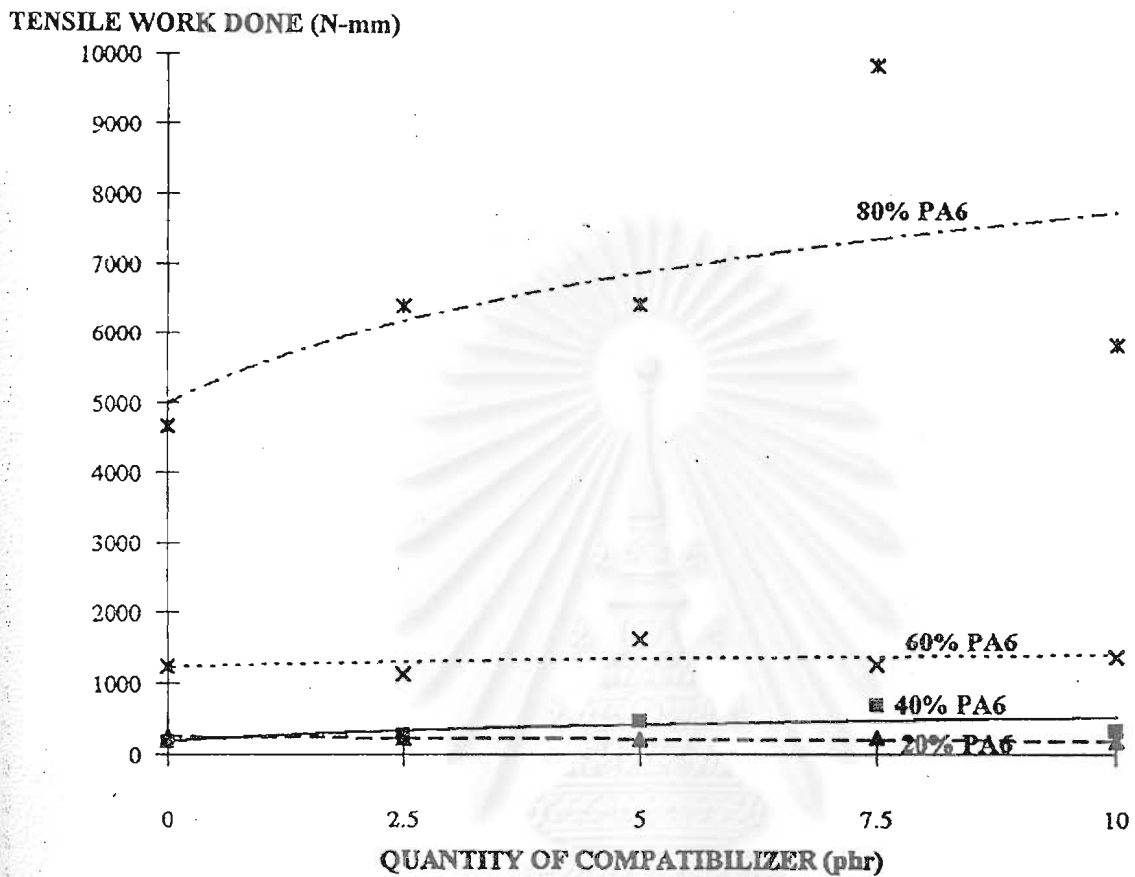
ความเค้น ณ จุดขาดภายใต้แรงดึงมีระดับสูงสุดที่อัตราการผลิต PA6/HIPS 80/20 ดังปรากฏในรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าระบบผสมดังกล่าวมีความเหนียวและยืดตัวได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนอื่น ๆ อย่างชัดเจน ความเหนียวของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ยังปรากฏเด่นชัดในรูปของงานที่ดึงเพื่อให้พอลิเมอร์ขาด ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.25

## TENSILE WORK DONE (N-mm)



รูปที่ 4.24 : แสดงงานที่ดึงขนาดของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

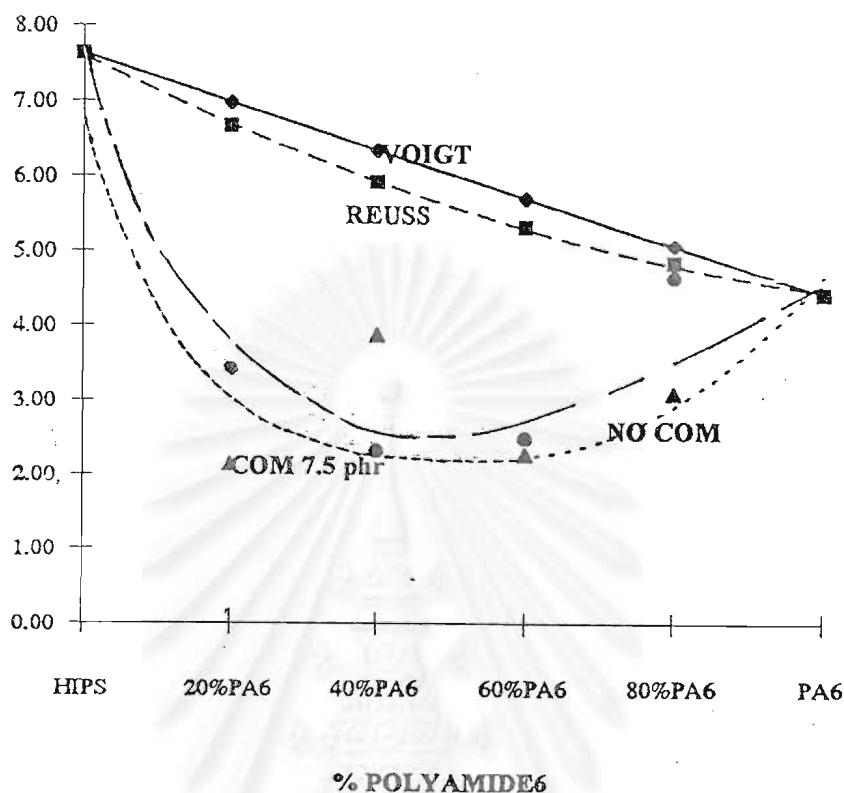


รูปที่ 4.25 : แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนการผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80 สำหรับงานที่ใช้ในการดึงพอลิเมอร์ผสมจนขาด

#### 4.3.2 สมบัติภายใต้แรงกระแทก Izod

พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ทนต่อแรงกระแทกได้ต่ำกว่าระบบที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ และต่ำกว่าค่าที่คำนวณโดยสมการของ Voigt ของ Reuss แม้ว่าวิธภาคที่กระจาย (เช่น HIPS ใน PA6/HIPS 80/20, 60/40 หรือ PA6 ใน PA6/HIPS 40/60 และ 20/80) จะสามารถทำหน้าที่ช่วยหยุดรอยแตกหรือทำให้รอยแตกทุ่ลงและขยายได้ช้าลง

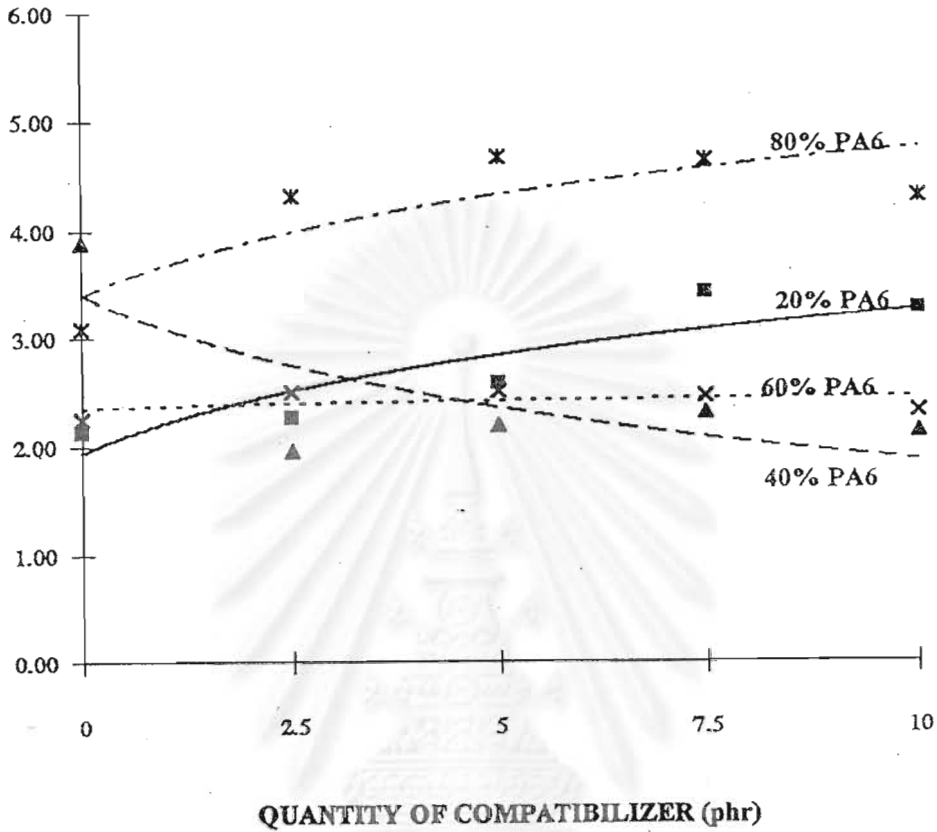


**IZOD IMPACT STRENGTH (kg-cm/cm)**


รูปที่ 4.26 : แสดงแรงกระแทก Izod ของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr)

สมบัติของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีและมีส่วนช่วยให้เข้ากันได้ SEBS-g-MA ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 สำหรับพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมี SEBS-g-MA ภูมิภาคที่กระจายไม่มีพันธะใด ๆ กับภูมิภาคที่ต่อเนื่องเป็นเมตริกส์ ทั้งนี้ เพราะ PA6 และ HIPS เป็นระบบผสมที่ไม่เข้ากัน พันผิวระหว่างภูมิภาคที่ไร้พันธะจึงเป็นส่วนที่อ่อนแอในระบบผสม แม้ว่าหน้าที่โดยทั่วไปของภูมิภาคที่กระจายคือการหยุดหรือการขวางรอยแตกมิให้ขยาย แต่ในกรณีที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ พันผิวระหว่างภูมิภาคที่ไม่เข้ากันกลับกลายเป็นจุดอ่อนแอและรอยแตกจะวิ่งเข้าหาพื้นผิวระหว่างภูมิภาค แทนการวิ่งเข้าหาภูมิภาคที่กระจาย

**IZOD IMPACT STRENGTH (kg-cm/cm)**



รูปที่ 4.27 : แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนการผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80 สำหรับความทนต่อแรงกระแทก

เมื่อมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ SEBS-g-MA 7.5 phr แรงกระแทกของระบบผสม PA6/HIPS ทั้งที่มี SEBS-g-MA และมี SEBS-g-MA มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ PA6/HIPS ในอัตราส่วนประมาณ 40/60 ถึง 60/40 แต่ค่าแรงกระแทกต่ำสุดในระบบพอลิเมอร์ผสมที่มี SEBS-g-MA ยังสูงกว่าแรงกระแทกของระบบที่ไม่มี SEBS-g-MA เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากผลของสารช่วยให้เข้ากันได้ ซึ่งมีส่วนปลายของโคพอลิเมอร์แบบบล็อกซึ่งเป็น Styrene บล็อกปลายทั้งสองสามารถรวมกับ Styrene ใน HIPS ส่วนแยกของโคพอลิเมอร์แบบบล็อกดังกล่าว คือ Maleic anhydride (MA) ซึ่งต่อแขนงกับ

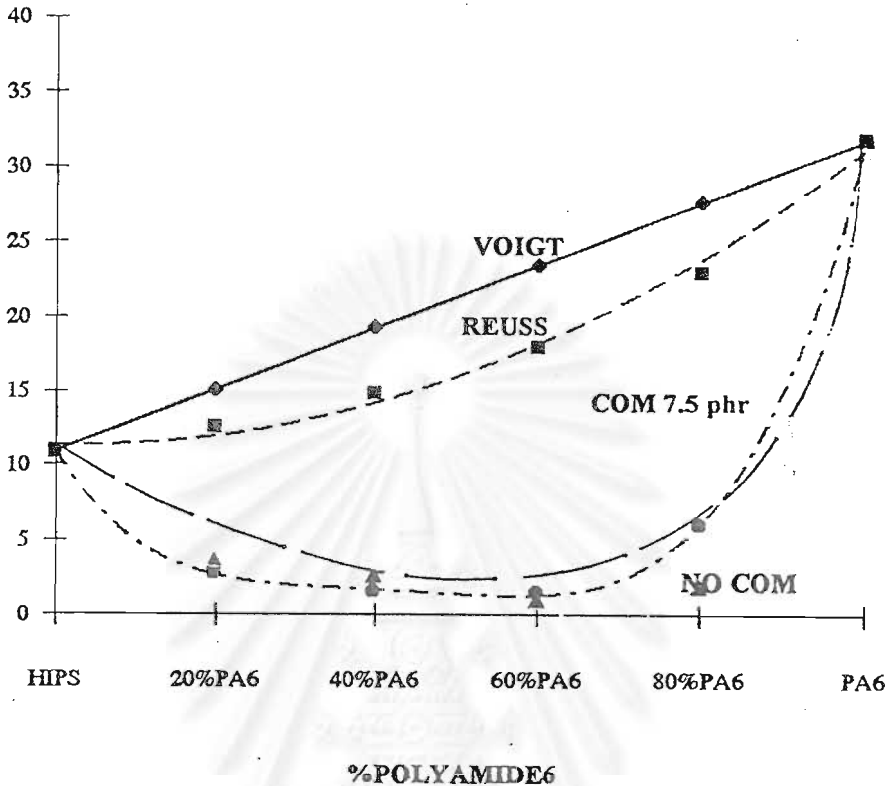
แถบของสไตรีน MA สามารถทำปฏิกิริยากับไนลอน ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ดังกล่าว มีความเข้ากันได้บ้าง นั่นคือมีความเข้ากันได้บางส่วนที่กระจายบางส่วนจึงมีส่วนทำหน้าที่ขบวนการขยายของรอยแตก ซึ่งแม้จะยังมีโอกาสแตกผ่านพื้นผิวดังกล่าวอาจน้อยลงหรือไม่สะดวกเท่ากรณีไม่มีสาย SEBS พันธะบางส่วนที่ผิวระหว่างวัฏภาคจะทำให้รอยแตกขยายได้ลำบากหรือช้าลงหรืออาจทำให้รอยแตกมีการเปลี่ยนทิศทางยังวัฏภาคที่กระจายนอกจากนี้การกระจายตัวที่ดีขึ้นของวัฏภาคที่ไม่ต่อเนื่องยังช่วยให้มีวัฏภาคดังกล่าวในส่วนต่าง ๆ เพื่อหยุดหรือเบี่ยงรอยแตก การเพิ่มของแรงกระแทก Izod ยังไม่เพิ่มในระดับมากหรือชัดเจนทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณสาร SEBS-g-MA ที่ใช้น้อยเกินไปหรืออุณหภูมิในการผสม ( $235\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ซึ่งเหมาะแก่การผสม PA6/HIPS ที่มีมีการเติมสารช่วยให้เข้ากันได้ อาจมีใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่ระบบพอลิเมอร์ผสมที่มี SEBS-g-MA หรือเหมาะสมแก่การทำปฏิกิริยาระหว่าง PA6 กับ MA จึงนับเป็นส่วนหนึ่งซึ่งเปิดให้วิจัยต่อไปได้เพื่อหาสภาวะการผสมที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Blending Condition)

รูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่าแรงกระแทก Izod ของระบบผสม PA6/HIPS 80/20, 60/40 และ 20/80 มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ SEBS-g-MA ยกเว้นระบบ 40/60 ซึ่งคาดว่ามีสมบัติการกระแทกต่างจากระบบผสมอื่น ๆ เพราะลักษณะวัฏภาคที่ไม่ต่อเนื่อง กระจายอยู่ในลักษณะคล้าย Fibril ในขณะที่ระบบผสมที่สัดส่วนอื่น ๆ มีวัฏภาคที่ไม่ต่อเนื่องเป็นอนุภาคหรือก้อน

#### 4.3.3 สมบัติภายใต้แรงกระแทกตัมน้ำหนัก

รูปที่ 4.28 และ 4.29 แสดงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ภายใต้แรงกระแทกด้วยตัมน้ำหนัก ค่าพลังงานกระแทกที่ได้จากการทดสอบต่างต่ำกว่าค่าที่คำนวณโดย สมการของ Voigt และ Reuss แนวโน้มของพลังงานกระแทกใกล้เคียงกับแรงกระแทก Izod กล่าวคือระบบผสมที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้มีค่าพลังงานกระแทกให้แตกทะลุต่ำกว่าระบบผสมที่มี SEBS-g-MA เล็กน้อยด้วยเหตุผลดังที่ได้บรรยายใน 4.3.2

## ENERGY TO BREAK (Joule)

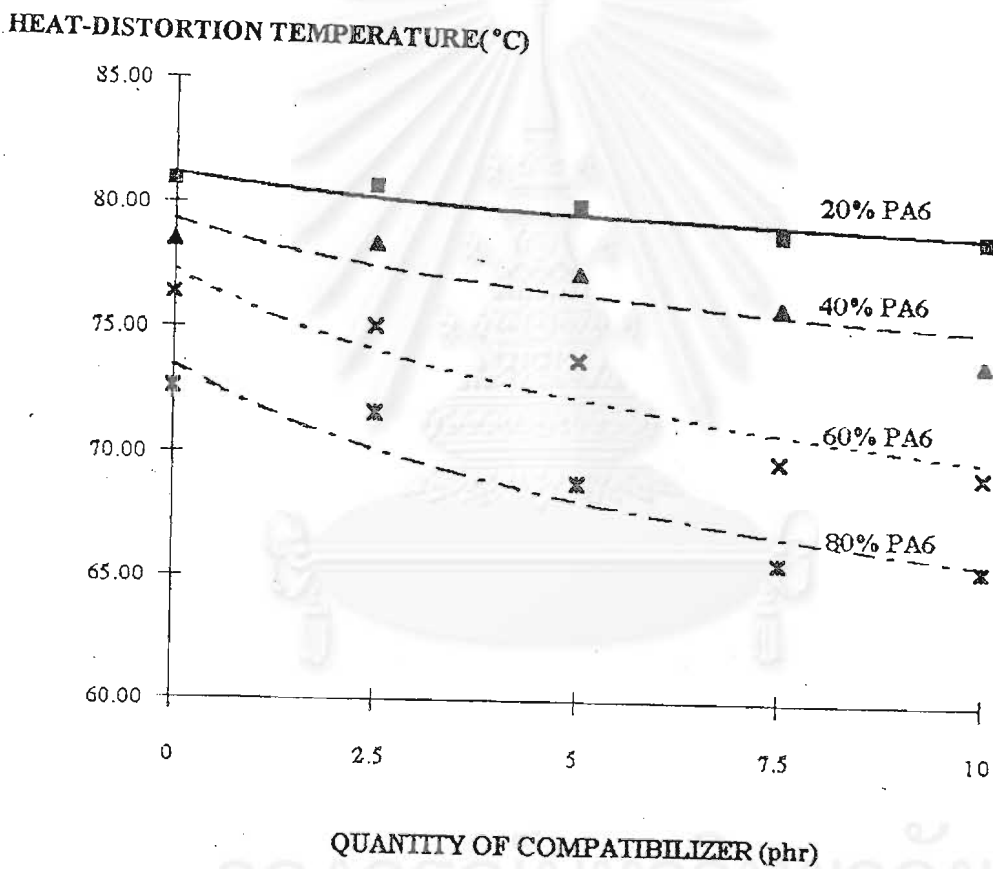


รูปที่ 4.28 : แสดงพลังงานกระทบจนขาดของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr)

#### 4.3.4 อุณหภูมิการโค้งงอภายใต้ภาระแรงกด (HDT)

อุณหภูมิการโค้งงอภายใต้ภาระแรงกด (HDT) เป็นสมบัติของพลาสติกที่สำคัญเพื่อผู้ใช้พลาสติกจะได้ทราบว่าสามารถนำพลาสติกไปใช้งานได้ถึงอุณหภูมิเท่าใดก่อนเกิดการโค้งงอเปลี่ยนสภาพ อุณหภูมิดังกล่าวนี้เกี่ยวข้องกับจุดแปรสภาพแก้วและแปรเปลี่ยนได้เมื่อมีการใส่สารเติมแต่ง (Additives) ลงในพลาสติก จากรูปที่ 4.29 ซึ่งแสดงผลการทดสอบ HDT ของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS พบว่า อุณหภูมิการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS สำหรับระบบที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสาร SEBS-g-MA เพิ่มขึ้น โดยการลดของ HDT ในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS 20/80 เกิดขึ้นในอัตราที่ช้ากว่า 80/20 ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิ HDT ที่

ตรวจวัดได้เป็นค่าอุณหภูมิที่อยู่ใกล้กับจุดแปรสภาพแก้วของ PA6/HIPS ทุกอัตราส่วน การผสมคือ PA6 ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของ PA6 มากกว่าจึงเกิดการโค้งงอได้ง่ายกว่าและสามารถโค้งงอที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าด้วย เมื่อมีการใส่สารเติมแต่ง หรือในกรณีนี้คือเมื่อมีการใส่ SEBS-g-MA สารเติมแต่งที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นจะมีผลให้จุดแปรสภาพแก้วและอุณหภูมิการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมลดลงได้

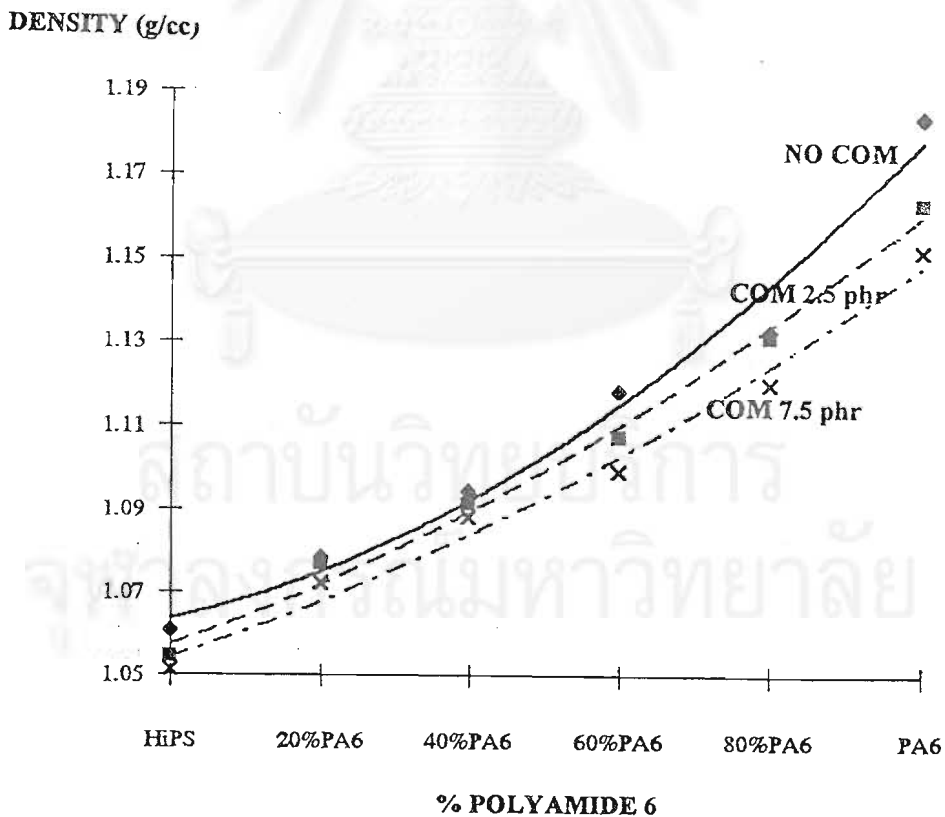


รูปที่ 4.29 : แสดงผลของสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ต่อพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนการผสม 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80

## 4.4 สมบัติเชิงกายภาพและความร้อน

### 4.4.1 ความหนาแน่น

ระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า PA6 บริสุทธิ์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นสูงในพอลิเมอร์ผสมคือ 1.185 กรัม/ลบ.ซม. แต่พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวจะมีค่าความหนาแน่นสูงกว่า HIPS บริสุทธิ์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นต่ำในพอลิเมอร์ผสมคือ ประมาณ 1.06 กรัม/ลบ.ซม. ผลการทดสอบความหนาแน่นดังแสดงในรูปที่ 4.30 กล่าวคือ พอลิเมอร์ผสมที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้มีค่าความหนาแน่นโดยเฉลี่ยสูงกว่าระบบที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ SEBS-g-MA ทั้งนี้เพราะ SEBS-g-MA เป็นโคพอลิเมอร์อย่างสังเคราะห์ชนิด Thermoplastic elastomer ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายโฟม จึงมีน้ำหนักเบาและมีค่าความหนาแน่นเพียง 0.91 กรัม/ลบ.ซม. ระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ SEBS-g-MA เป็นปริมาณมากจึงมีค่าความหนาแน่นของระบบลดลง

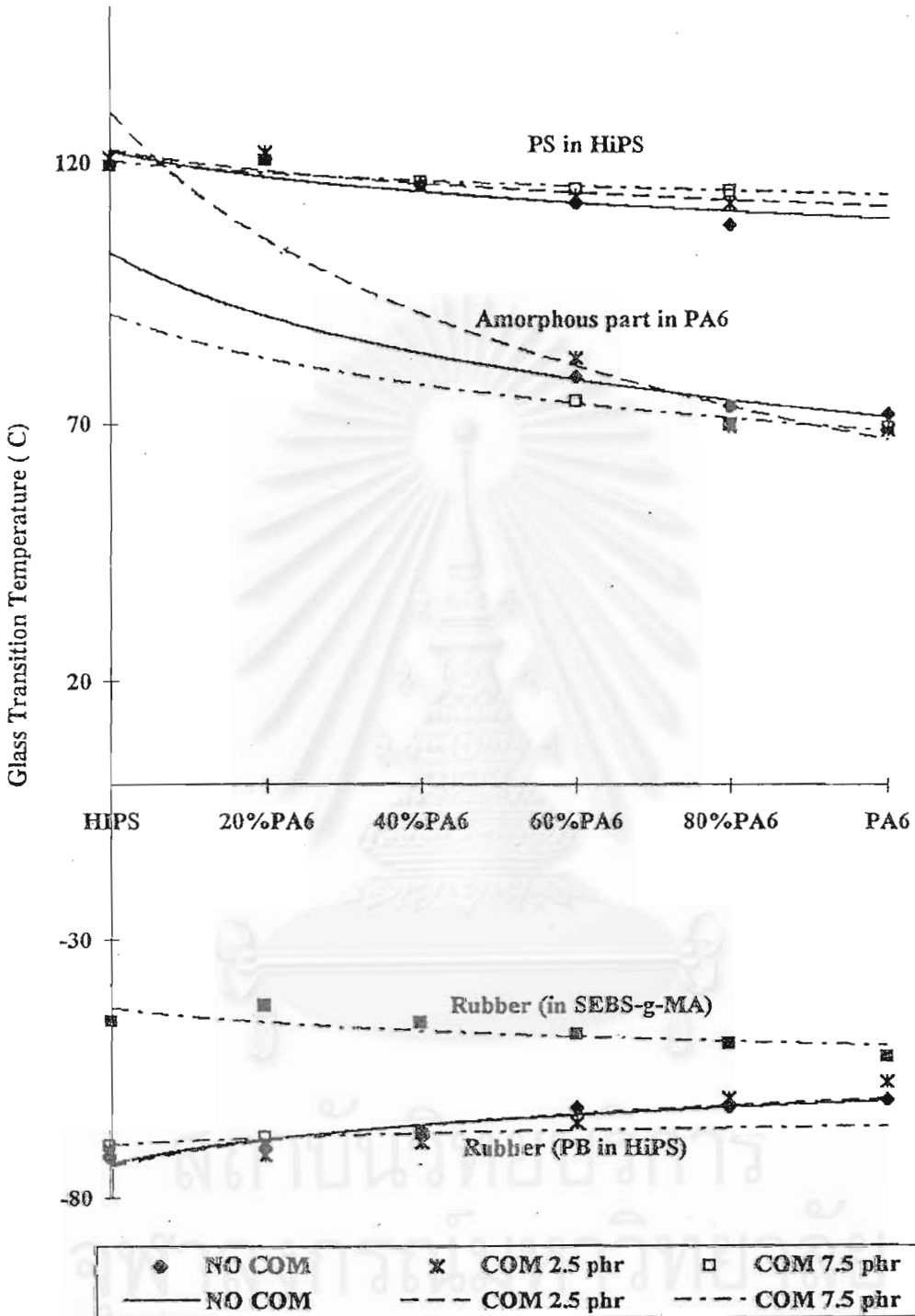


รูปที่ 4.30: แสดงความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (NO COM) และมีสาร SEBS-g-MA (COM 7.5 phr)

#### 4.4.2 จุดแปรสภาพแก้ว-จุดหลอมเหลว

จุดแปรสภาพแก้วของ HIPS มีสองอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของ HIPS เองก็เป็นโครงสร้างที่มีสองวัฏภาคในหนึ่งพลาสติก กล่าวคือ HIPS มีวัฏภาคไม่ต่อเนื่องคือ ยางบิวทาไดอินเป็นอนุภาคกระจายอยู่ในวัฏภาคที่ต่อเนื่องคือโพลีสไตรีนเป็นเมตริกส์ ดังภาพถ่ายในระดับจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 3.2 เนื่องจากแต่ละวัฏภาคของ HIPS กล่าวคือสไตรีนและบิวทาไดอิน ต่างเป็นวัสดุออสถฐาน ทำให้การตรวจวัดจุดแปรสภาพแก้วของ HIPS มีสองอุณหภูมิโดยอุณหภูมิแรกที่  $-72.6^{\circ}\text{C}$  เป็นจุดแปรสภาพแก้วของวัฏภาคยางบิวทาไดอิน ในขณะที่อุณหภูมิที่สองคือ  $120^{\circ}\text{C}$  เป็นจุดแปรสภาพแก้วของ PS ใน HIPS ส่วนจุดแปรสภาพแก้วของ PA6 คือประมาณ  $70.8^{\circ}\text{C}$  ส่วนจุด  $T_g$  ของสารช่วยให้ผสมเข้ากัน SEBS-g-MA คือประมาณ  $-45^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 4.30 แสดงความเปลี่ยนแปลงของจุดแปรสภาพแก้วเมื่อเทียบกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ทั้งระบบที่ไม่มีและที่มีสารช่วยให้เข้ากัน จุดแปรสภาพแก้วของยางโพลีบิวทิลีน (PB) ใน HIPS เพิ่มขึ้นเมื่อระบบพอลิเมอร์ผสมมี PA6 เข้มข้นขึ้น ในขณะที่เดียวกันจุดแปรสภาพแก้วของยาง Ethylene/Butylene ใน SEBS-g-MA ก็ลดลงเมื่อพอลิเมอร์ผสมมีสัดส่วนของ PA6 สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสไตรีนในส่วนของ SEBS-g-MA สามารถหลอมผสมรวมกับสไตรีนใน HIPS ได้ในระดับโมเลกุลเนื่องจากเป็นสารชนิดเดียวกัน สไตรีนที่ปลายทั้งสองของ SEBS-g-MA จึงเป็นส่วนพาให้ยาง Ethylene/Butylene เข้ามายึดอยู่กับ HIPS ทำให้มีความเข้ากันได้บ้าง จุดแปรสภาพแก้วของยางบิวทิลีนใน HIPS และยาง Ethylene/Butylene ปรับเข้าหากันในขณะที่เดียวกัน จุดแปรสภาพแก้วของสไตรีนใน HIPS ก็มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยแม้ในระบบที่ไม่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ การลดลงเล็กน้อยของจุดแปรสภาพแก้วเมื่อมีการใส่สารอื่น (เช่น PA6) เป็นผลซึ่งมักปรากฏในพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารอื่น ๆ ปะปนไปด้วยอยู่แล้ว แต่การเติม SEBS-g-MA เป็นปริมาณมากขึ้น (จาก 2.5 เป็น 7.5 phr) กลับมีผลให้จุดแปรสภาพแก้วของส่วน PS ใน HIPS สูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสไตรีนบางส่วนจาก SEBS-g-MA เข้าร่วมกับ PS ใน HIPS ทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสไตรีนใน HIPS สูงขึ้นเมื่อปริมาณ SEBS-g-MA ที่เติมนั้นเข้มข้นขึ้น ส่วนจุดแปรสภาพแก้วของ PA6 ลดลงเมื่อปริมาณ PA6 สูงขึ้นเพราะ PA6 เข้ากันได้กับส่วนมาเลอิกแอนไฮไดรด์ใน



รูปที่ 4.31: จุดแปรสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature) ของแต่ละพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ซึ่งมีมีและมีการช่วยให้ผสมเข้ากันได้เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของ PA6 ในพอลิเมอร์ผสม



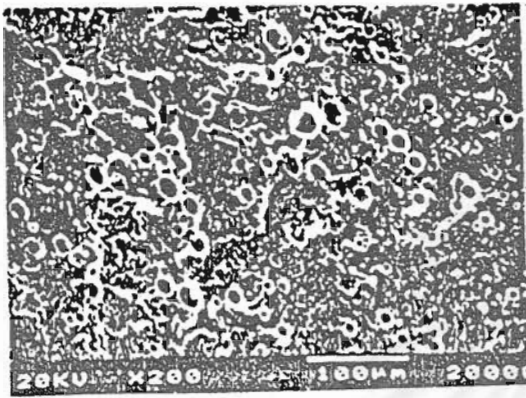
SEBS-g-MA และในทำนองเดียวกับ HIPS กล่าวคือ จุดแปรสภาพแก้วของ PA6 มีแนวโน้มลดลงอยู่แล้วเมื่อมีการเติมสารอื่น (เช่น HIPS) ลงใน PA6 แต่ที่ปริมาณ PA6 ต่ำในระบบผสม PA6/HIPS 20/80 และ 40/60 ยอดของ  $\tan \delta$  ของสไตรีนใน HIPS ทำให้ตรวจวัดจุดแปรสภาพแก้วของ PA6 ในพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวกระทำได้ยากและผลอาจคลาดเคลื่อนได้

การที่จุดแปรสภาพแก้วของพอลิเมอร์ PA6, PS ใน HIPS และ PB ใน SEBS-g-MA เป็นค่าที่แปรไปในแนวโน้มที่แน่นอนตามสัดส่วนการผสมพอลิเมอร์ เป็นการยืนยันว่าระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีสารช่วยให้ผสมเข้ากันมีความเข้ากันได้บางส่วน ดังจะยืนยันได้จากการศึกษาวิฤภาคของพอลิเมอร์ผสมในระดับจุลภาคใน ส่วนที่ 4.5

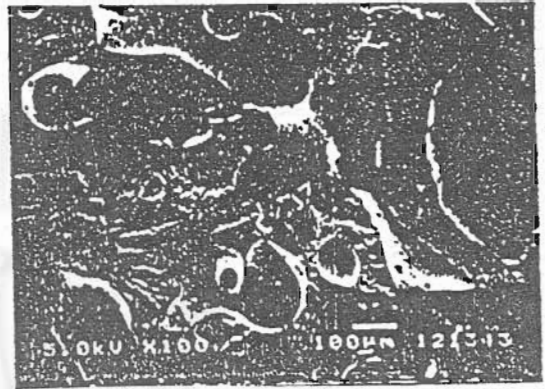
#### 4.5 การศึกษาพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในระดับจุลภาค

การวิเคราะห์พื้นฐานของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ในสัดส่วนการผสมต่าง ๆ กระทำได้โดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวในระดับจุลภาค การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกราดลำแสงเป็นเทคนิคหนึ่งซึ่งนิยมใช้ในการวิเคราะห์วิฤภาคของพอลิเมอร์ผสม

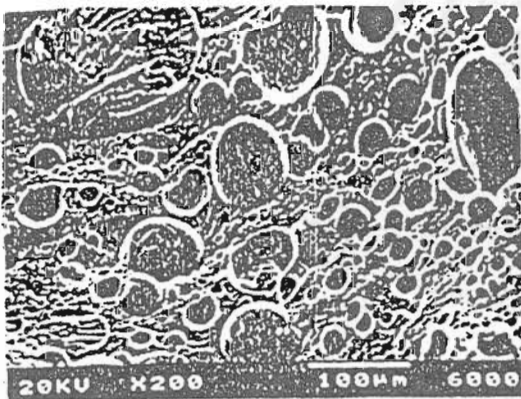
รูปที่ 4.32 แสดงพื้นฐานของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีการใส่สารช่วยให้ผสมเข้ากัน ในอัตราส่วน PA6/HIPS ดังนี้ (ก) 20/80 (ข) 40/60 (ค) 60/40 และ (ง) 80/20 ระบบผสมทั้งหมดในรูปที่ 4.32 เป็นระบบผสมแบบแต่ละวิฤภาคไม่เข้ากัน และมีการแยกกันอยู่อย่างชัดเจนโดย รูปที่ 4.32 (ก) แสดงอนุภาคของ PA6 แยกตัวจาก HIPS ซึ่งเป็นเมตริกซ์ อนุภาค PA6 มีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 30 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาควงมวิทาไดอินประมาณ 6 เท่า การยึดติดระหว่างวิฤภาคยังไม่ดีเพราะมี Void ระหว่างวิฤภาค



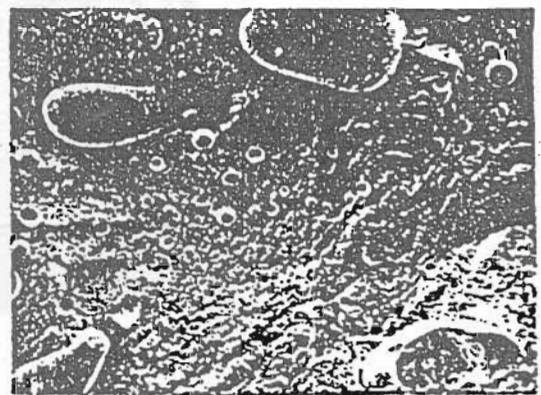
(ก)



(ข)



(ค)

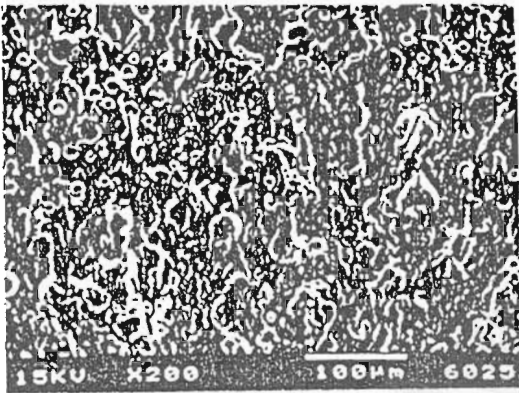


(ง)

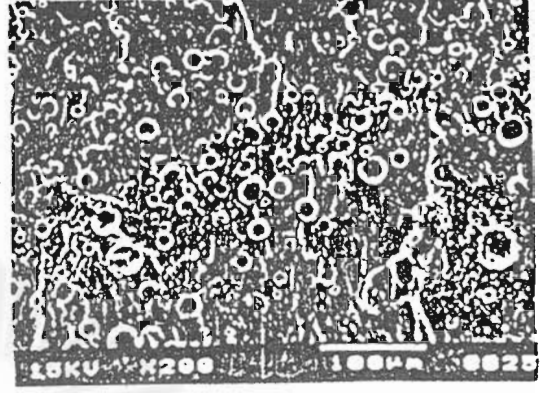
รูปที่ 4.32: ภาพถ่ายระดับจุลภาคแสดงสัณฐานของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ซึ่งมีได้ใส่สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ (SEBS-g-MA) ที่สัดส่วนการผสม (ก) 20/80 (ข) 40/60 (ค) 60/40 และ (ง) 80/20

รูปที่ 4.32 (ข) แสดง PA6 ใน HIPS ที่ทำหน้าที่เป็นเมตริกส์ PA6 ซึ่งมีปริมาณ 40% โดยน้ำหนักเริ่มเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนและบางส่วนมีลักษณะเป็น Fibril ขนาดต่าง ๆ ตลอดจนการเกาะกันของ PA6 เป็นกลุ่มก้อน การยึดติดระหว่าง Fibril ของ PA6 กับ เมตริกส์ HIPS ยังไม่ดี บนพื้นผิวยังมี Void Fibril บางอันหลุดออกจากเมตริกส์ HIPS รูปที่ 4.32 (ค) และ 4.32 (ง) แสดงสัญญาณที่ต่างจากรูปที่ 4.32 (ก) และ 4.32 (ข) อย่างชัดเจนโดย (ค) และ (ง) มี PA6 กลายเป็นวัฏภาคเมตริกส์ ขณะที่ HIPS แยกตัวออกจาก PA6 อนุภาค HIPS เกาะเป็นกลุ่มก้อนกลมและรีมีขนาดตั้งแต่ประมาณ 20-120 ไมครอน รูปที่ 4.32 (ง) แสดงวัฏภาคของ PA6 เป็นเมตริกส์อย่างชัดเจนพร้อมอนุภาคและกลุ่ม HIPS ขนาดต่าง ๆ กันกระจายตัวอยู่ พอลิเมอร์ผสมของ PA6/HIPS ไม่ปรากฏ HIPS ในรูปของ Fibril

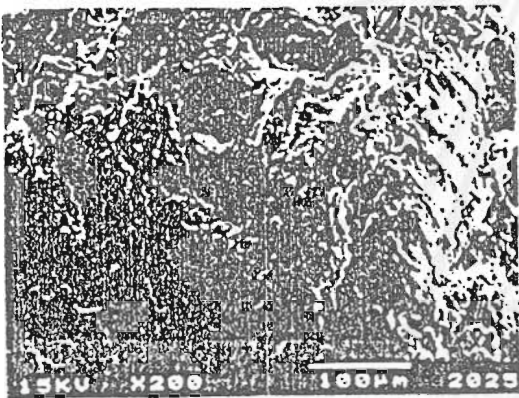
รูปที่ 4.33 แสดงสัญญาณของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีการใส่สารช่วยให้ผสมเข้ากัน SEBS-g-MA เป็นปริมาณ 2.5 phr สำหรับพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่สัดส่วนการผสม (ก) 20/80 (ข) 40/60 (ค) 60/40 และ (ง) 80/20 ตามลำดับ สัญญาณของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีสาร SEBS-g-MA มีลักษณะต่างจากระบบผสม PA6/HIPS ที่มีการใส่สารช่วยให้ผสมเข้ากันได้อย่างชัดเจน หลักฐานจากภาพถ่ายระดับจุลภาคในรูปที่ 4.33 แสดงสัญญาณที่มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น อนุภาคของวัฏภาคที่กระจายมีขนาดโดยเฉลี่ยเล็กลงและประสานกับวัฏภาคที่เป็นเมตริกส์ได้ดีขึ้น รูปที่ 4.33 (ก) แสดงอนุภาค PA6 ในเมตริกส์ HIPS โดย PA6 มีขนาดเฉลี่ยลดลงและปรากฏมีร่องรอยของ Local plastic deformation บนเมตริกส์ HIPS ที่อยู่รอบ PA6 รูปที่ 4.33 (ข) แสดงอนุภาคของ PA6 มีขนาดเล็กกว่า Fibril และกลุ่มก้อนของ PA6 ใน 4.32 (ข) ซึ่งไม่มีสาร SEBS-g-MA นอกจากนี้ยังไม่ปรากฏโครงสร้างในรูปแบบ Fibril ของ PA6 ลักษณะสัญญาณและขนาดอนุภาคโดยทั่วไปของ PA6/HIPS ในรูป 4.33 (ข) ซึ่งมี PA6 แยกกระจายอยู่ 40% โดยน้ำหนักคล้ายคลึงกับรูปที่ 4.32 (ก) ซึ่งมี PA6 แยกกระจายอยู่ 20% โดยน้ำหนัก



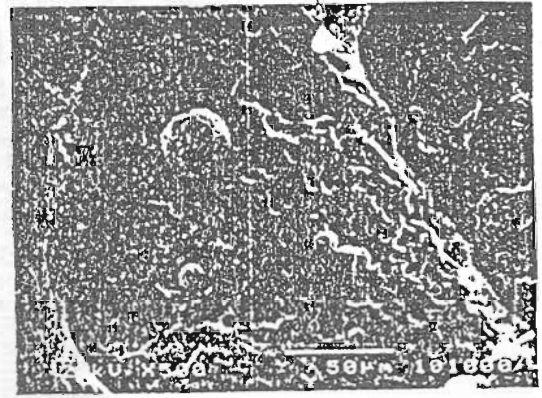
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

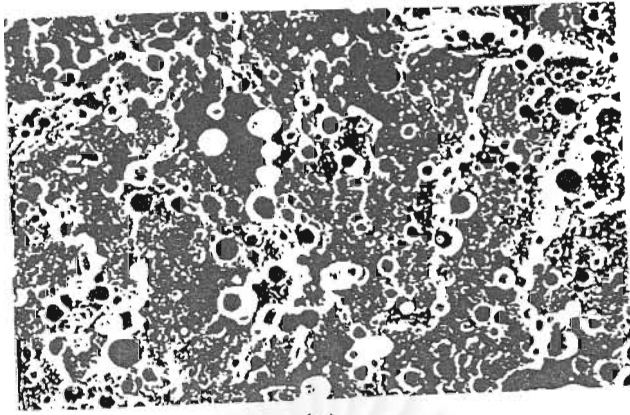
**รูปที่ 4.33:** ภาพถ่ายระดับจุลภาคแสดงสัณฐานของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ซึ่งมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันคือ (SEBS-g-MA) จำนวน 2.5 phr ที่สัดส่วนการผสม (ก) 20/80 (ข) 40/60 (ค) 60/40 และ (ง) 80/20 ตามลำดับ

HIPS ซึ่งเคยแยกจาก PA6 และเกาะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ในรูปที่ 4.32 (ก) เมื่อมีมีสาร SEBS-g-MA ถูกชักนำให้เข้ากับเมตริกส์ PA6 โดยสาร SEBS-g-MA จนมีความเข้ากันได้ดีขึ้น ไม่ปรากฏกลุ่ม HIPS ขนาดใหญ่แยกตัวจากเมตริกส์ PA6 อีกดังแสดงในรูปที่ 4.33 (ก) แต่ยังคงมีอนุภาคขนาดเล็กของ HIPS และยางบิวทาไดอีนกระจายตัวอยู่บ้าง รูปที่ 4.33 (ง) มีสัณฐานคล้ายกับรูปที่ 4.33 (ค) เพราะต่างมีเมตริกส์เป็น PA6 และมีอนุภาคของ HIPS ฝังในเนื้อของเมตริกส์ PA6 แต่ก็ยังปรากฏอนุภาค HIPS

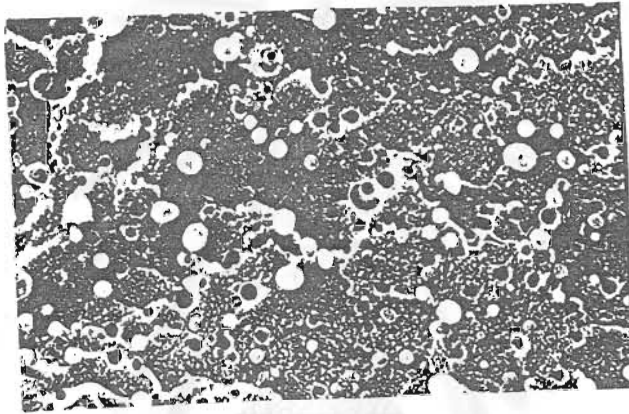
ขนาดต่าง ๆ แยกตัวจากเมตริกซ์ PA6 อยู่บ้าง แสดงว่าระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ๓ สัดส่วนการผสมที่วิเคราะห์และมีสาร SEBS-g-MA เป็นปริมาณ 2.5 phr เป็นสารช่วยให้ผสมเข้ากัน ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้บางส่วน

การเข้ากันได้บางส่วนนี้นอกจากจะเกิดขึ้นเนื่องจากกลุ่มบล็อกสไตรีนที่ปลายทั้งสองของ SEBS-G-MA จะทำปฏิกิริยารวมกับกลุ่ม Styrene ของ HIPS และ Maleic anhydride ทำปฏิกิริยากับกลุ่ม -CONH- แล้วทำให้พันธะหรือการยึดติดของแต่ละวัฏภาคคือ PA6 และ HIPS ดีขึ้นการเข้ากันได้ยังสะท้อนให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงผิวโดย SEBS-g-MA ซึ่งเป็นสารยึดหยุ่นเทอร์โมพลาสติกยังมีผลไปทำให้แรงดึงผิวของ PA6 และ HIPS ขณะหลอมผสมลดลง เมื่อพอลิเมอร์ที่หลอมผสมนั้นแข็ง การลดลงของแรงดึงผิวมีผลให้อนุภาควัฏภาคที่กระจายมีขนาดเล็กลงด้วย ดังปรากฏในรูปที่ 4.33 (ก) - (ง)

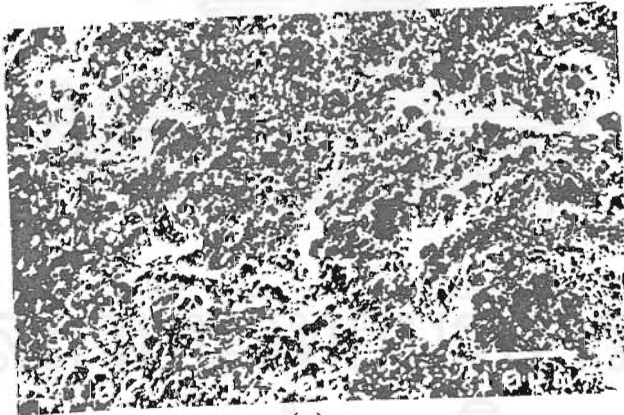
รูปที่ 4.34 (ก)-(ค) แสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันต่อสัณฐานของวัฏภาคที่กระจายในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่สัดส่วนการผสม 80/20 โดย (ก) แสดงวัฏภาคของ HIPS เป็นอนุภาคกระจายอยู่ในเมตริกซ์ PA6 เมื่อปริมาณ SEBS-g-MA คือ 2.5 phr ส่วน (ข) เมื่อใช้ SEBS-g-MA เพิ่มขึ้นเป็น 5.0 phr และ (ค) เมื่อใช้ปริมาณ SEBS-g-MA เพิ่มขึ้นอีกเป็น 7.5 phr สังเกตได้ว่า วัฏภาค HIPS มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงเล็กน้อยตามลำดับเมื่อปริมาณของสารช่วยผสมให้เข้ากันเพิ่มขึ้นซึ่งน่าจะเป็นผลเนื่องจากความเข้ากันบางส่วนของ PA6/HIPS มีสูงขึ้นเมื่อใช้ SEBS-g-MA มากขึ้น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.34: ภาพถ่ายระดับจุลภาคแสดงผลของปริมาณสารช่วยให้ผสมเข้ากันต่อสัดส่วนของวัฏภาคที่กระจายในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่สัดส่วนการผสม 80/20 โดยมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันได้ SEBS-g-MA เป็นปริมาณ (ก) 2.5 phr (ข) 5.0 phr และ (ค) 7.5 phr



## 5. บทสรุป

งานวิจัยนี้มีข้อสรุปต่างๆ ดังนี้

- 5.1 สมบัติเชิงกลของระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มีมีสารช่วยให้ผสมเข้ากันจะมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่าสมบัติเชิงกลเดิมของพอลิเมอร์พื้นฐาน เนื่องจากระบบพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS เป็นพอลิเมอร์ผสมชนิดไม่เข้ากัน (Immiscible blend) แต่ละวัฏภาคแยกกระจายไม่มีพันธะต่อกัน และเป็นการกระจายที่แต่ละวัฏภาคสามารถจับเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ค้างยั้งยั้งได้จากภาพถ่ายพอลิเมอร์ผสมในระดับจุลภาค
- 5.2 การเติมสาร โคพอลิเมอร์แบบบล็อกของสไตรีน-เอทิลีน/บิวทาไดอีน-สไตรีน ต่อแขนงด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (SEBS-g-MA) ลงในพอลิเมอร์แต่ละชนิดคือ PA6 และ HIPS ช่วยให้พอลิเมอร์แต่ละชนิดมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ยึดตัวได้มากขึ้น เมื่อขาดภายใต้แรงดึง
- 5.3 การเติมสาร โคพอลิเมอร์แบบบล็อกของสไตรีน-เอทิลีน/บิวทาไดอีน-สไตรีน ต่อแขนงด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (SEBS-g-MA) ลงในพอลิเมอร์แต่ละชนิดคือ PA6 และ HIPS ช่วยให้พอลิเมอร์แต่ละชนิดมีความต้านทานการกระแทกมากขึ้น ตามปริมาณ SEBS-g-MA ทั้งในรูปของแรงกระทบและพลังงานกระแทกโดยเฉพาะในกรณี PA6 การเพิ่มของแรงกระแทกช่วยยืนยันว่า SEBS-g-MA เป็นสารที่เข้ากันได้กับ PA6 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์องค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม
- 5.4 การเติม SEBS-g-MA ในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ทำให้มีการเกิดพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้บางส่วน (Partially miscible blend) ยังคงมีการแยกวัฏภาค แต่การกระจายของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบดีขึ้น ค้างยั้งยั้งได้จากภาพถ่ายวัฏภาคพอลิเมอร์ผสมในระดับจุลภาค นอกจากนี้ยังมีผลให้สมบัติเชิงกลของระบบพอลิเมอร์ผสมที่มี SEBS-g-MA ดีขึ้นด้วย บล็อกของสไตรีนใน SEBS-g-MA สามารถรวมกับสไตรีนใน SEBS-g-MA ในขณะที่ Maleic anhydride (MA) ทำปฏิกิริยากับกลุ่มแอไมด์ (-CONH-) ใน PA6

- 5.5 การเติม SEBS-g-MA ช่วยเพิ่มสมบัติในแง่ความเหนียวแก่พอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ให้ดีกว่าระบบที่ไม่มี SEBS-g-MA
- 5.6 การเติมสารโคพอลิเมอร์แบบบล็อกของสไตรีน-เอทธิลีน/บิวทาไดอีน-สไตรีน ต่อแขนงด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (SEBS-g-MA) ลงในพอลิเมอร์แต่ละชนิดคือ PA6 และ HIPS ทำให้อุณหภูมิการโค้งงอของ PA6 ลดลงเมื่อปริมาณ SEBS-g-MA มากขึ้น แต่อุณหภูมิการโค้งงอของ HIPS ไม่เปลี่ยนแปลง อุณหภูมิการโค้งงอในพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PA6 มากขึ้น
- 5.7 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มี SEBS-g-MA มีค่าน้อยกว่าระบบพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวที่ไม่มี SEBS-g-MA เนื่องจาก SEBS-g-MA มีโครงสร้างพรุนและความหนาแน่นต่ำ
- 5.8 จุดแปรสภาพแก้วของพอลิเมอร์ผสม PA6/HIPS ที่มี SEBS-g-MA 2.5 phr คือ  $82^{\circ}\text{C}$  สำหรับ PA6 และ  $112^{\circ}\text{C}$  สำหรับ Styrene ใน HIPS จุดแปรสภาพแก้วที่แยกกันนี้ยืนยันว่าระบบผสมดังกล่าวเข้ากันได้เพียงบางส่วน ซึ่งสอดคล้องกับวิฤภาคพอลิเมอร์ผสมที่พบในระดับจุลภาค



## เอกสารอ้างอิง

1. Wigotsky Victor, "Alloys and Blends Home in on Demanding Design Specs" .  
Plastics Engineering 1988; Nov. : 25.
2. Utracki, Lerzek A. "Polymer Alloys and Blends: Thermodynamics and Rheology".  
New York : Hanser, 1990
3. Fired Joel R. "Polymer Science and Technology" New Jersey : Prentice-Hall, Inc.,  
1995 : 160.
4. Covavisaruch, S. "Engineering Plastic-Polymer Composites and Blends" Technical  
Seminar, Petrochemical Training and Research Center, Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University, 12-13 Sept. 1994.
5. Raab M., Sova M. and Slizova M., "Importance of Polymer Morphology in  
Understanding Technological Processes. Part 2. Applications" International  
Polymer Science and Technology 1994 ; Vol.21 No.4 : 81-881.
6. Xanthos M. and Dagli S.S., "Compatibilization of Polymer Blends by Reactive  
Processing" Polymer Emgineering and Science 1991; Vol. 31 No.13 : 929-934.
7. M.J. Sullivan and R.A. Weiss, "Characterization of Blends of an Amorphous  
Polyamide with Lightly Sulfonated Polystyrene Ionomers", Polymer Engineering  
and Science 1992, Vol. 32, No. 8, 517-523.
8. Attila Molnar & Adi Eisenberg, "Miscibility of Polyamide 6 with Lithium or  
Sodium Sulfonated Polystyrene Ionomers", Macromolecules 1992, Vol. 25, No.  
21, 5574-5781.
9. Cheng Chung Cheng, Eusebio Fontan, Kyonsuku Min, and James L. White, "An  
Investigation of Instability of Phase Morphology of Blends of Nylons with  
Polyethylene and Polystyrene and Effects of Compatibilizing Agents", Polymer  
Engineering and Science 1988; Vol. 28, No. 2: 69-80.
10. Triacca V.J., Ziacca S., Barlow J.W., Keskkula H., Paul D.R., "Reactive  
Compatibilization of Blends of Nylon 6 and ABS Materials", Polymer 1991, Vol.  
32, No. 8, 1401-1413.

11. Aoki Yuji and Watanabe Makoto, "Morphological, Thermal, and Rheological Properties of Nylon/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Alloys", Polymer Engineering and Science 1992; Vol. 32, No.13: 878-885.
12. B. Majumdar, H. Keskkula and D. R. Paul, "Effect of Extruder Type on the Properties and Morphology of Reactive Blends Based on Polyamides", Journal of Applied Polymer Science 1994; Vol. 54: 339-354
13. Oshinski A. J., Keskkula H. and Paul D.R., "Rubber Toughening of Polyamides with Functionalized Block Copolymers: 1. Nylon-6", Polymer 1992; Vol. 33, No. 2, 268-283.
14. Covavisaruch S., "Recycling of Nylon 6 Scrap", Proceedings of the Third IUMRS-ICAM International Conference on Advanced Materials, Tokyo, Japan, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands (1993).
15. Morand Lambla nd Manus Seadan, "Interfacial Grafting and Crosslinking by Free Radical Reaction in Polymer Blends", Polymer Engineering and Science 1992, Vol. 32, No. 22 : 1687-1694.
16. Muratoglu O.K., Argon A. S. and Cohen R. E. and Weinberg M., "Toughening Mechanism of Rubber-Modified Polyamides", Polymer 1995; Vol. 36, No. 5, pp. 921-930.
17. J. Harry DuBots and Wayne I. Pribble "Plastics Mold Engineering Handbook". 4<sup>th</sup>. Ed. Van Nostrand Reinhold Company : New York, 1987.
18. Chang Dae Han. "Multiphase Flow in Polymer Pocessing". Academic Press. : New York, 1981.
19. Fired Joel R. "Polymer Science and Technology". New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1995.
20. Raab M, Sova M and Slizova M, "Importance of Polymer Morphology in Understanding Technological Processes, Part 1: Applications" Intenational Polymer Science and Technology ; Vol. 21, No. 4, 66-73
21. Majumdar B, Keskkula H. and Paul D.R., "Effect of the Nature of the Polyamide on The Properties an Morphology of Compatibilized Nylon/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Blends" Polymer 1994; Vol.35, No.25 : 5468-5479.

22. Chee K.K., "Thermodynamic Study of Glass Transitions in Miscible Polymer Blends" Polymer 1995; Vol.36 No. 4,: 809-813.
23. Narisawa Ikuo, "Unstable Fracture of Rubber-Toughened Polymers", Polymer Engineering and Science 1988; Vol. 28 : 1462-1468.
24. Borggreve R. J. M., Gaymans R. J. and Schuijjer J. "Impact Behaviour of Nylon-Rubber Blends: 5 Influence of the Mechanical Properties of the Elastomer" Polymer 1989, Vol.30 : 71-76.
25. Borggreve R. J. M., Gaymans R. J. and Schuijjer J." Impact Behaviour or Nylon Rubber Blends 5 Influence of the Structure on Voiding Process; Toughening Mechanism", Polymer 1989 Vol.30 : 78-83.
26. Majumdar B., Keskkula H. and Paul D.R." Mechanical Properties and Morphology of Nylon-6/Acrylonitrile-Butadiene-Syrene Blends Compatibilized with Imidized Acrylic Polymers" Polymer 1994; Vol. 35, No.25 : 5453-5467.
27. Modic M.J., Gilmore D. W. and Kirkpatrick J. P., "Proc. Find. Int. Cong. On Compatibilization and Reactive Polymer Alloying" (Compalloy'89), New Orleans, LA, 1989, p. 197.
28. Ijichi Yasuhito, Kojima Toshiro, Suzuki Yasuro, Nishio Taichi, Kakugo Masahiro and Amemiya Yoshiyuki, "Synchrotron Radiation Small-Angle X - Ray Scattering Study on the Deformation Mechanisms of a toughened Nylon-6/Poly (Phenylene Ether) Blend and High-Impact Polystyrene", Macromolecules 1993, 26 : 829-835.
29. H. S. Makowski, R.D. Lundberg, and G. H. Singhal, U.S. Pat. 3,870,841, (1975).

