

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ ENR

ในขั้นตอนการเตรียม ENR คอมเปาเวต ทำการผสม ENR และสารเคมีในเครื่องบดสองลูกกลิ้ง และทำการขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง โดยใช้สภาวะในการขึ้นรูปและการวัลคาไนซ์ดังนี้ อุณหภูมิ 170 °C ความดัน 350 kg/cm² และ เวลา 8 นาที โดยสูตร ENR เบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สูตร ENR เบื้องต้น

Ingredient	Loading (phr)
ENR	100
Stearic acid	2
ZnO	5
DCP	2.5
Co-agent	0, 1, 5

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาดของ ENR แสดงในตารางที่ 3.2 เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด DAP จะเห็นว่าเมื่อเติมปริมาณ DAP เท่ากับ 1 phr ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength, σ_b) มีค่าใกล้เคียงกับผลของการไม่เติมสารร่วมการเชื่อมโยง แต่ค่าความเครียด ณ จุดขาด (strain at break, ϵ_b) มีค่าสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ DAP เท่ากับ 5 phr ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและค่าความเครียด ณ จุดขาด มีค่าลดลง เมื่อเปลี่ยนสารร่วมการเชื่อมโยงเป็นชนิด SR350 จะเห็นว่าเมื่อเติม SR350 ปริมาณ 1 phr ค่าความทนต่อแรงดึงมีเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยและค่าการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ SR350 เป็น 5 phr ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและค่าความเครียด ณ จุดขาด มีค่าลดลง และเมื่อเปลี่ยนสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด SR75 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมปริมาณ SR 75 เท่ากับ 1 phr ค่าความทนต่อแรงดึงลดลงและค่าความเครียด ณ จุดขาดมีค่าลดลง จากที่ไม่เติมสารร่วมการเชื่อมโยง แต่เมื่อเติมปริมาณ SR75 เท่ากับ 5 phr ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้น และค่าความเครียด ณ จุดขาดมีค่าลดลง จากผลของการเติมสารร่วมการเชื่อมโยงทั้ง 3 ชนิด พบว่าการเติมสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด SR350 ให้ค่าความทนต่อแรงดึงดีที่สุด

ตารางที่ 3.2 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ ENR เมื่อใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง

Co-agent		σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
Type	Loading (phr)		
-	-	2.58 ± 1.25	610 ± 204
DAP	1	2.56 ± 0.52	634 ± 94
	5	2.99 ± 0.84	464 ± 66
SR350	1	2.69 ± 0.54	531 ± 75
	5	4.60 ± 1.04	276 ± 45
SR75	1	1.62 ± 0.27	497 ± 47
	5	3.16 ± 0.78	297 ± 51

3.2 สมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากไนลอนชนิด Toray™ CM 1017

ด้วยเครื่องผสมแบบปิด

เตรียมเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด ตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สูตรเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์

Ingredient	Loading (phr)
Nylon	50
ENR	50
Stearic acid	2
ZnO	5
Irganox™ B1171	1
Wingstay™ L	1
DCP	2.5
Co-agent	Varied

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากไนลอนชนิด Toray™ CM1017 แสดงในตารางที่ 3.4 เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด SR350 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติม SR350 เท่ากับ 1 phr ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าความเครียด ณ จุดขาด มีค่าเท่ากันกับการไม่เติมสารร่วมการเชื่อมโยง และเมื่อเพิ่มปริมาณ SR350 เป็น 10 phr ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลงและค่าความเครียด ณ จุดขาด มีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด DAP จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด DAP เท่ากับ 1 phr ค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น และค่าความเครียด ณ จุดขาด มีค่าลดลงจากที่ไม่เติมสารร่วมการเชื่อมโยง และเมื่อทดลองทำการเพิ่มปริมาณ DCP เท่ากับ 5 phr ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง แต่ค่าความเครียด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น

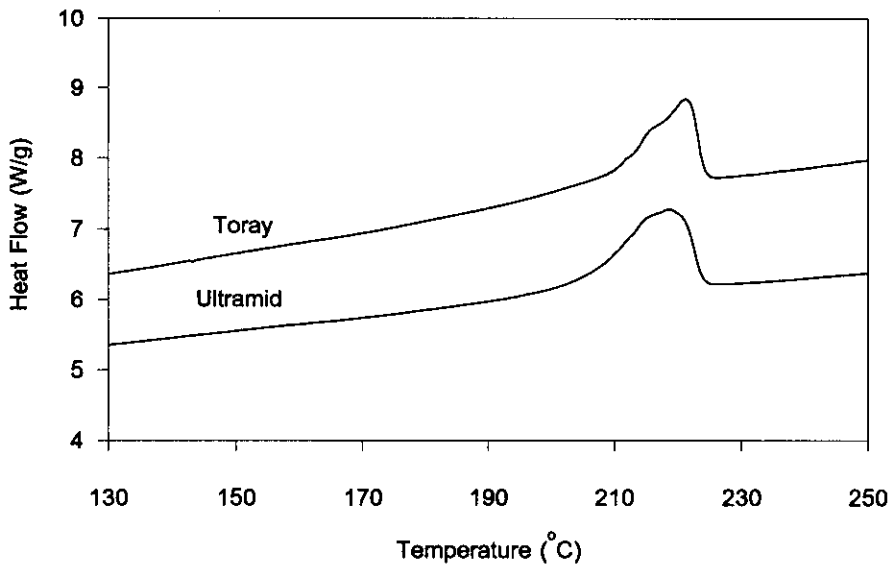
ตารางที่ 3.4 สมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่เตรียมจาก Toray™ CM 1017

Co-agent		σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
Type	Loading (phr)		
-	-	0.63 ± 0.61	21 ± 9
SR350	1	1.37 ± 0.69	21 ± 10
	10	0.34 ± 0.38	46 ± 13
DAP	1	3.97 ± 2.19	13 ± 6
DAP*	1	0.06 ± 0.01	46 ± 8

* ใช้ DCP ปริมาณ 5 phr

สำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากไนลอนชนิดนี้ ได้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ที่มีค่าต่ำ การที่พอลิเมอร์ชนิดนี้แสดงสมบัติเชิงกลดำนนี้ต่ำมาก อาจมีสาเหตุมาจากการเลือกไนลอนที่ไม่เหมาะสม เช่นความหนืดไม่เหมาะสม จากการทดลองที่ผ่านมา การขึ้นรูปด้วยการอัดจะมีปัญหาด้านการไหลออกมาจากเบ้าของไนลอน จึงได้ทำการวัดค่าดัชนีการไหล (Melt flow index, MI) ของไนลอนตามมาตรฐาน ASTM D1238 ที่อุณหภูมิ 235 °C ด้วยค้อนน้ำหนัก 2,160 g จะได้ค่า MI เท่ากับ 35 g/10min จึงได้จัดหา

ไนลอน 6 ที่มีความหนืดสูงขึ้น เพื่อนำมาใช้แทนที่ Toray™ CM1017 จากการตรวจสอบข้อมูลพบว่า Ultramid B36 น่าจะเหมาะสมกว่า จากการวัดค่า MI พบว่ามีความหนืดต่ำกว่าไนลอนชนิดแรกมาก คือ มีค่า MI เท่ากับ 5.024 g/10min ทำการตรวจสอบจุดหลอมเหลวของไนลอนทั้งสองชนิดด้วยเทคนิค differential scanning calorimetry ที่สภาวะการวิเคราะห์ดังนี้ 10 °C/min และ -10 °C – 260 °C ไนลอนทั้งสองชนิดมีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกัน คือ Toray™ CM1017 และ Ultramid™ B36 มีอุณหภูมิการหลอมเหลวเท่ากับ 221 °C และ 219 °C ตามลำดับ แสดงว่าน้ำหนักโมเลกุลไม่ต่างกันมากนัก เทอร์โมแกรมของไนลอนทั้งสองแสดงในรูปที่ 3.2 แต่รูปร่างโมเลกุลและการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลมีความแตกต่างกันจึงทำให้มีความหนืดต่างกัน จากการตรวจสอบข้อมูลที่รายงานโดยบริษัทผู้ผลิต ไนลอนทั้งสองชนิดนี้เป็นเกรดที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ดังนั้น ตั้งแต่ต่อไปจะใช้ไนลอนชนิด Ultramid™ B36 เท่านั้น



รูปที่ 3.1 DSC thermograms ของไนลอน Toray™ CM1017 และ Ultramid™ B36

3.3 สมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากไนลอนชนิด Ultramid™ B36 ด้วยเครื่องผสมแบบปิด

ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์โดยใช้สูตรผสมตามตารางที่ 3.3 ไม่มีการเติมสารร่วมการเชื่อมโยง ทำการทดลอง 3 สูตร คือ ไม่มีการเติม DCP (B50/0) เติม DCP 2.5 phr ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (B50/2.5/t) และด้วยเครื่องผสมแบบปิด (B50/2.5/b) ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด แสดงในตารางที่ 3.5 สูตร B50/2.5/t ให้ค่าทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงสุดและมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากไนลอนชนิด Toray™ CM 1017 ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องเติม DCP และไม่ควรมีการเติมในเครื่องผสมแบบปิด และไนลอนชนิด Ultramid™ B36 ให้สมบัติความทนต่อแรงดึงสูงกว่า Toray™ CM 1017 ดังนั้น การทดลองต่อไปจะใช้ไนลอนชนิด Ultramid™ B36 และทำการเติม DCP กับยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง ก่อนที่จะนำไปผสมกับไนลอน มีข้อสังเกตประการหนึ่ง เมื่อผสม DCP กับไนลอนและยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด จะได้พอลิเมอร์ผสมที่มีลักษณะเหนียวเหนอะ คาดว่าน่าจะมีการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์เกิดขึ้นจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัย (Huang และคณะ., 2002) ได้มีการระบุว่า การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากไนลอนและยาง EPDM เมื่อใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ในเครื่องผสมแบบปิด อาจทำให้เกิดการเสื่อมสลายของไนลอนได้ เพราะฉะนั้นการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในการทดลองต่อไป จะใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ตารางที่ 3.5 สมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์
ที่เตรียมจาก Ultramid™ B36 ด้วยเครื่องผสมแบบปิด

Sample	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
B50/0	0.92 ± 0.16	3 ± 9
B50/2.5/t	4.99 ± 0.62	16 ± 5
B50/2.5/b	0.29 ± 0.06	-*

* มีค่าน้อยมากจนเครื่องไม่สามารถบันทึกได้

3.4 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากไนลอนชนิด Ultramid™ B36 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

3.4.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และไม่มีสารร่วมการเชื่อมโยง

ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์โดยใช้สูตรผสมตามตารางที่ 3.3 และไม่มีสารร่วมการเชื่อมโยง ทำการเตรียมยางคอมปาวด์และผสม DCP (2.5 และ 5 phr) ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งก่อนที่จะนำไปผสมกับไนลอนในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ดังนี้

i) สมบัติความทนต่อแรงดึง

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด แสดงในตารางที่ 3.6 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นี้มีสมบัติดีขึ้น คือ มีความแข็งแรงมากขึ้นและดึงยืดได้มากขึ้น มีค่าสูงกว่าค่าที่รายงานในตารางที่ 3.4 และ 3.5 สูตรที่ไม่ได้ใส่ DCP (E50/0) จะให้ค่าความเค้นและค่าความเครียด ณ จุดขาด ต่ำกว่าสูตรที่ใส่ DCP พิจารณาสูตร E50/2.5/t กับ E50/5/t จะเห็นว่ามีส่วนของยางเท่ากันแต่มีการเพิ่มปริมาณ DCP พบว่า ค่าความเค้นและค่าความเครียด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นเล็กน้อย การเพิ่มปริมาณยางจาก 50 phr เป็น 60 phr จะทำให้สมบัติเชิงกลด้านนี้สูงขึ้น แต่ถ้าเพิ่มยางมากขึ้นเป็น 65 และ 70 phr ค่าเค้นสูงสุดจะลดลงตามปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น สูตรที่ให้สมบัติสูงสุดได้แก่ E50/5/t และ E60/2.5/t ค่าความเค้นสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ใช้ได้ แต่ค่าความเครียด ณ จุดขาด มีค่าค่อนข้างต่ำ ส่วนสูตร E60/5/t ให้ค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงสุด แต่ค่าความเค้นต่ำกว่าสูตรที่มี DCP น้อยกว่า

ตารางที่ 3.6 สมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้ไนลอนชนิด Ultramid™ B36 และ DCP และไม่มีสารร่วมการเชื่อมโยง เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

Sample	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
E50/0	8.36 ± 1.35	25 ± 7
E50/2.5/t	13.13 ± 0.79	38 ± 9
E50/5/t	13.61 ± 0.71	45 ± 9
E60/2.5/t	13.67 ± 0.89	44 ± 11
E60/5/t	8.29 ± 0.59	60 ± 10
E65/2.5/t	6.05 ± 0.55	45 ± 8
E70/2.5/t	3.95 ± 0.31	45 ± 10

ผลการทดลองนี้สนับสนุนสมมติฐานที่ว่า DCP อาจทำให้ในลอนเสื่อมสลายได้เมื่อทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด คาดว่าเป็นเพราะการใช้เครื่องผสมแบบปิดใช้เวลานานกว่าการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ทำให้ในลอนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วอาจเกิดการไฮโดรไลซิส และเมื่อมีความร้อนและเปอร์ออกไซด์อยู่ในระบบในเวลานาน ส่งผลให้เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลได้

ii) สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แสดงในตารางที่ 3.7 ผลการทดลองสอดคล้องกับสมบัติความทนต่อแรงดึง สูตรที่ไม่ได้ใส่ DCP จะมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดต่ำ เมื่อใส่ DCP จะทำให้ได้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น แต่สมบัติจะลดลงเมื่อใส่ DCP มากขึ้น สูตรที่มีการใส่ DCP เท่ากันที่ 2.5 phr และมีการเพิ่มสัดส่วนของยางจาก 50, 60, 65 และ 70% จะมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น สูตรที่ให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงสุดคือ E60/2.5/t แต่เป็นที่น่าสังเกตว่ามีค่าความเบี่ยงเบนสูงเช่นกัน

ตารางที่ 3.7 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และไม่มีสารร่วมการเชื่อมโยง ในเครื่องอัดรีด

Sample	Tear strength (N/mm)
E50/0	36.77 ± 3.60
E50/2.5/t	61.57 ± 11.50
E50/5/t	51.62 ± 9.41
E60/2.5/t	69.16 ± 14.52
E60/5/t	36.07 ± 2.92
E65/2.5/t	29.72 ± 4.88
E70/2.5/t	23.27 ± 1.83

iii) สมบัติการยืดถาวรและความแข็ง

ผลการทดสอบการยืดถาวรแสดงในตารางที่ 3.8 ค่าการยืดถาวรมีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณยางเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.8 สมบัติการยืดถาวรของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และไม่มีสารร่วมการเชื่อมโยง

Sample	Tension set (%)
E50/5/t	5.73 ± 0.41
E60/2.5/t	5.85 ± 0.41
E60/5/t	4.31 ± 0.66
E65/2.5/t	4.88 ± 1.77
E70/2.5/t	4.48 ± 0.21

iv) ความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยงและไม่มีสารร่วมเชื่อมโยง ดังแสดงในตารางที่ 3.9 เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้สารเชื่อมโยงและไม่มีสารร่วมเชื่อมโยงมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3.9 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และไม่มีสารร่วมเชื่อมโยง

Sample	Hardness Shore A
E50/0	85.60
E50/2.5/t	85.90
E50/5/t	88.60
E60/2.5/t	87.20
E60/5/t	89.80
E65/2.5/t	90.40
E70/2.5/t	82.60

3.4.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และมีสารร่วมเชื่อมโยง

ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์โดยใช้สูตรผสมตามตารางที่ 3.3 และมีการเติมสารร่วมเชื่อมโยงสองชนิดคือ SR350 และ SR75 ในตอนนี้จะมีการเตรียมยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องผสมที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารร่วมเชื่อมโยง ยางคอมปาวด์ที่มี SR350 จะถูกเตรียมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง ส่วนยางคอมปาวด์ที่มี SR75 จะถูกเตรียมด้วยเครื่องผสมแบบปิด การผสม DCP (2.5 และ 5 phr) ในยางซึ่งเป็นสารเคมีที่ใสในลำดับสุดท้ายนั้น จะผสมในเครื่องบดสองลูกกลิ้งเหมือนกันทั้งสองประเภท สารร่วมเชื่อมโยงชนิด SR75 มีขนาดใหญ่ การผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งทำให้สารเคมีกระจายได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงจำเป็นต้องผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด ในบางกรณีมีการทดลองเติม DCP ในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่พร้อมกับการผสมในลอน แต่จำเป็นต้องใช้ DCP ในปริมาณค่อนข้างมาก เพราะมีการสูญหายระหว่างการผสม จึงทดลองใช้ปริมาณ 5 phr ได้ทำการทดลองเปลี่ยนเกรดของ DCP จาก 40% DCP เป็น 100% DCP ด้วย และมีการทดลองแปรปริมาณสารร่วมเชื่อมโยง ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลสามารถสรุปได้ดังนี้

i) สมบัติความทนต่อแรงดึง

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีสารร่วมเชื่อมโยงชนิด SR350 แสดงในตารางที่ 3.10 การใส่ DCP ในเครื่องบดสองลูกกลิ้งดีกว่าการใส่ในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (เปรียบเทียบ E50/2.5/350-1t กับ E50/2.5/e/350-1t และ E50/5/350-1t กับ E50/5/e/350-1t) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเวลาในการผสมที่ต่างกันมากระหว่างเครื่องผสมทั้งสองชนิดนี้ เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มีระยะเวลาในการผสมสั้นมาก (นาทีครึ่ง) ในขณะที่การผสม DCP ในยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งจะใช้เวลานานกว่า (4 นาที) พิจารณาสูตร E50/2.5/350-1t กับ E50/2.5/350-2t จะเห็นว่าใส่สารเชื่อมโยงเท่ากันแต่มีการเพิ่มปริมาณสารร่วมเชื่อมโยง ค่าความทนต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย แต่ค่าความเครียด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น พิจารณาสูตร E50/2.5/350-1t กับ E50/5/350-1t จะเห็นว่าใส่สารร่วมเชื่อมโยงเท่ากันแต่ปริมาณสารเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ค่าความทนต่อแรงดึง

และค่าความเครียด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณยางทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงลดลง สูตรที่ดีที่สุดคือ E50/5/ϕ/350-1t ให้ค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับ 15.17 MPa และค่าความเครียด ณ จุดขาด เท่ากับ 85 %

ตารางที่ 3.10 สมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และ SR350

Sample	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
E50/2.5/ϕ/350-1t	14.24 ± 1.11	31 ± 5
E50/2.5/e/350-1t	12.37 ± 0.91	40 ± 8
E50/2.5/ϕ/350-2t	12.53 ± 0.94	41 ± 11
E60/2.5/ϕ/350-2t	7.61 ± 0.75	42 ± 8
E50/5/ϕ/350-1t	15.17 ± 1.29	85 ± 17
E50/5/e/350-1t	13.25 ± 0.44	51 ± 17
E60/5/ϕ/350-1t	9.04 ± 0.33	55 ± 6

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยงและมีสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด SR75 แสดงในตารางที่ 3.11 เมื่อพิจารณาสูตรที่ใส่สารเชื่อมโยง (DCP) และใส่สารร่วมการเชื่อมโยงเท่ากัน การใส่สารร่วมการเชื่อมโยงในเครื่องผสมแบบปิด ให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงกว่าการใส่ในเครื่องบดสองลูกกลิ้ง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารร่วมการเชื่อมโยงมากขึ้นโดยใส่ในเครื่องผสมแบบปิดจะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นเช่นกัน พิจารณาสูตร E50/2.5/ϕ/75-3b กับ E50/5/ϕ/75-3b เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงจะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ลดลง เมื่อพิจารณาสูตร E50/2.5/ϕ/75-3b กับ E50/1/ϕ/75-3b จะเห็นว่าการใช้ DCP ชนิด 40% DCP ปริมาณ 2.5 phr ให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ดีกว่าการใช้ 100% DCP ปริมาณ 1 phr และเมื่อพิจารณาสูตร E50/1/ϕ/75-3b กับ E60/1/ϕ/75-3b เมื่อปริมาณยาง ENR50 เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลงแต่ค่าความเครียด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น สูตรที่ดีที่สุดคือ E50/2.5/ϕ/75-3b

ตารางที่ 3.11 สมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และ SR75

Sample	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
E50/2.5/ϕ/75-1t	13.54 ± 1.68	44 ± 12
E50/2.5/ϕ/75-1b	14.78 ± 1.32	58 ± 15
E50/2.5/ϕ/75-3b	15.23 ± 1.01	61 ± 9
E50/5/ϕ/75-3b	15.08 ± 1.17	52 ± 14
E50/1* /ϕ/75-3b	9.98 ± 0.86	44 ± 9
E60/1* /ϕ/75-3b	7.69 ± 0.48	92 ± 15

* 1 phr of 100% DCP

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารร่วมการเชื่อมโยงแสดงในตารางที่ 3.12 จะเห็นว่าสารร่วมการเชื่อมโยงทั้งสองชนิดช่วยเพิ่มสมบัติความทนต่อแรงดึง

ตารางที่ 3.12 ผลของสารร่วมการเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP

Sample	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
E50/2.5/t	13.13 \pm 0.79	38 \pm 9
E50/2.5/t/350-1t	14.24 \pm 1.11	31 \pm 5
E50/2.5/t/75-1b	14.78 \pm 1.32	58 \pm 15
E50/5/t	13.61 \pm 0.71	45 \pm 9
E50/5/t/350-1t	15.17 \pm 1.29	85 \pm 17

ii) สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และ SR350 แสดงในตารางที่ 3.13 การเติม SR350 ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงตามปริมาณของ SR350 ที่เติมเข้าไปในกรณีที่มี DCP 2.5 phr ถ้าเพิ่มปริมาณ DCP เป็น 5 phr พบว่าการเติม SR350 ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น ความต้านทานการฉีกขาดขึ้นอยู่กับคุณภาพและปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลของยาง ลักษณะการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางอาจมีความแตกต่างกันระหว่างการมีและไม่มี SR350 รวมทั้งยังเกี่ยวข้องกับปริมาณสารเชื่อมโยงด้วย ดังนั้น การเลือกสูตรที่เหมาะสมจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายด้าน โดยเฉพาะสมบัติที่ต้องการ ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และ SR75 แสดงในตารางที่ 3.14 สารร่วมการเชื่อมโยงชนิดนี้ให้ผลตรงข้ามกับ SR350 คือมีแนวโน้มว่าการเติม SR75 ทำให้สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สูงขึ้นและสูงขึ้นตามปริมาณ SR75 ที่เติมเข้าไป การผสม SR75 ด้วยเครื่องผสมแบบปิดให้สมบัติสูงกว่าการผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง และ DCP ชนิด 40% ยังคงแสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าชนิด 100% อย่างไรก็ตามควรตระหนักว่า ผลการทดลองเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่ใช้ DCP สองชนิดนี้ ได้มาจากตัวอย่างที่ผสมในแบบเดียวกัน

ตารางที่ 3.13 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และ SR350 เปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่เติม SR350

Sample	Tear Strength (N/mm)	
	Sample with SR350	Sample without SR350
E50/2.5/t/350-1t	60.71 \pm 9.72	61.57 \pm 11.50
E50/2.5/e/350-1t	48.91 \pm 3.39	
E50/2.5/t/350-2t	49.32 \pm 7.53	
E60/2.5/t/350-2t	33.10 \pm 4.95	69.16 \pm 14.52
E50/5/t/350-1t	61.45 \pm 5.23	51.62 \pm 9.41
E50/5/e/350-1t	51.59 \pm 4.58	
E60/5/t/350-1t	39.38 \pm 3.41	36.07 \pm 2.92

ตารางที่ 3.14 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์
ที่ผสม DCP และ SR75

Sample	Tear Strength (N/mm)
E50/2.5/75-1t	62.10 ± 4.85
E50/2.5/75-1b	58.77 ± 5.57
E50/2.5/75-3b	61.34 ± 10.99
E50/5/75-3b	73.52 ± 6.92
E50/1* /75-3b	52.12 ± 8.70
E60/1* /75-3b	42.92 ± 4.49

* 1 phr of 100% DCP

iii) สมบัติการยืดถาวร

ผลการทดสอบการยืดถาวรของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยงและมีสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด SR350 และ SR75 แสดงดังตารางที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับสูตรที่ไม่มีสารเติมสารร่วมการเชื่อมโยง (4 – 6 %)

ตารางที่ 3.15 สมบัติการยืดถาวรของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และ SR350

Sample	Tension set (%)
E50/2.5/350-1t	5.65 ± 0.23
E50/2.5/e/350-1t	5.46 ± 0.33
E50/2.5/350-2t	5.16 ± 0.27
E60/2.5/350-2t	4.57 ± 0.31
E50/5/350-1t	5.07 ± 0.28
E50/5/e/350-1t	4.87 ± 0.61
E60/5/350-1t	3.80 ± 0.79

ตารางที่ 3.16 สมบัติการยืดถาวรของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และ SR75

Sample	Tension set (%)
E50/2.5/75-1t	5.24 ± 0.45
E50/2.5/75-1b	5.29 ± 0.26
E50/2.5/75-3b	5.41 ± 0.29
E50/5/75-3b	4.85 ± 0.60
E50/1* /75-3b	5.49 ± 0.32
E60/1* /75-3b	4.35 ± 0.26

* 1 phr of 100% DCP

iv) ความแข็ง

ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยงและมีสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด SR350 และ SR75 แสดงดังตารางที่ 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับสูตรที่ไม่มีการเติมสารร่วมการเชื่อมโยงดังแสดงในตารางที่ 3.9 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้อยู่ในช่วง 85 – 95 Shore A

ตารางที่ 3.17 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และ SR350

Sample	Hardness Shore A
E50/2.5/1/350-1t	95.90
E50/2.5/e/350-1t	91.40
E50/2.5/1/350-2t	94.00
E60/2.5/1/350-2t	85.40
E50/5/1/350-1t	92.30
E50/5/b/350-1t	90.20
E60/5/1/350-1t	87.40

ตารางที่ 3.18 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสม DCP และ SR75

Sample	Hardness Shore A
E50/2.5/1/75-1t	92.00
E50/2.5/1/75-1b	91.20
E50/2.5/1/75-3b	90.00
E50/5/1/75-3b	91.40
E50/1 [*] /1/75-3b	91.00
E60/1 [*] /1/75-3b	89.80

* 1 phr of 100% DCP

จากการทดลองที่ผ่านมาได้ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง ได้มีการปรับปรุงกระบวนการผสมและปรับปรุงสูตรเพื่อให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น พบว่าการผสมยางและไนลอนควรกระทำด้วยเครื่องอัดรีด ซึ่งให้ผลดีกว่าการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด เนื่องจากระยะเวลาในการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสั้นกว่า ทำให้โอกาสที่ไนลอนจะเสื่อมสลายมีน้อยลง การผสม DCP ในยางคอมปาวด์ก่อนนำไปผสมกับไนลอน ยังคงทำให้เกิดลักษณะเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ได้ คือ ความเป็นเฟสกระจายและไนลอนเป็นเฟสต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะการผสม DCP ในเครื่องบดสองลูกกลิ้งนั้นยังไม่มีการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการผสมต่ำประมาณ 50°C การปรับปรุงสูตรยางคอมปาวด์ควรมีการเติมสารร่วมการเชื่อมโยงและ SR75 ให้สมบัติเชิงกลดีกว่า SR350 ถึงแม้ว่าจะสามารถปรับปรุงสมบัติความทนต่อแรงดึงให้สูงได้มากคือ $\sigma_m = 15.17 \text{ MPa}$ และ $\epsilon_b = 85 \%$ แต่คิดว่าค่าความเค้น ณ จุดขาด ยังต่ำกว่า 100% น่าจะมีการปรับปรุงค่านี้ให้เพิ่มสูงขึ้นโดยมีการเปลี่ยนชนิดของสารเชื่อมโยง ดังนั้น การทดลองต่อไปจะมีการใช้ฟีนอลริกรีซินเป็นสารเชื่อมโยง

3.4.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผสมฟีนอลิกรีซินและไม่มีสารร่วมการเชื่อมโยง

ยางคอมปาวด์ที่ผสมด้วยฟีนอลิกรีซินนี้ จะเตรียมด้วยเครื่องผสมแบบปิด ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ตามสูตรผสมในตารางที่ 3.3 โดยใช้ฟีนอลิกรีซินแทนที่ DCP

i) สมบัติความทนต่อแรงดึง

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของสูตรที่ใช้ฟีนอลิกรีซินเป็นสารเชื่อมโยงและไม่มีสารร่วมการเชื่อมโยง แสดงในตารางที่ 3.19 จะเห็นว่า การใช้ฟีนอลิกรีซินทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงสูงกว่าการใช้ DCP (เปรียบเทียบกับตารางที่ 3.12) การเพิ่มปริมาณฟีนอลิกรีซินทำให้สมบัติสูงขึ้น การเพิ่มยางทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลงแต่ความเครียด ณ จุดขาด สูงขึ้น สูตรที่ให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดคือ E50/ph-8b และสูตรที่ให้ค่าความทนต่อการดึงยืดมากที่สุดคือ E60/ph-6b การใช้ฟีนอลิกรีซินสามารถเพิ่มค่าความเครียด ณ จุดขาด ได้เกิน 100%

ตารางที่ 3.19 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผสมฟีนอลิกรีซินและไม่มีสารร่วมการเชื่อมโยง

Sample	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear strength (N/mm)	Tension set (%)	Hardness Shore A
E50/ph-6b	17.82 ± 0.84	80 ± 16	99.09 ± 16.08	5.89 ± 0.58	89.70
E50/ph-8b	17.96 ± 0.90	107 ± 16	95.97 ± 9.07	4.63 ± 0.39	95.10
E60/ph-6b	13.41 ± 0.56	150 ± 20	70.19 ± 11.42	4.46 ± 0.41	94.30

ii) สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด การยืดถาวร และความแข็ง

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด การยืดถาวร และความแข็ง แสดงในตารางที่ 3.19 ฟีนอลิกรีซินเพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาดอย่างเห็นได้ชัด ค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้นถึง 99 N/mm ในขณะที่การใช้ DCP จะให้ค่าความต้านทานสูงสุดเท่ากับ 69 N/mm และ 74 N/mm ในตัวอย่างที่ไม่มีและมีสารร่วมการเชื่อมโยงตามลำดับ (ดูตารางที่ 3.13 และ 3.14) การเพิ่มฟีนอลิกรีซินมีแนวโน้มลดค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ส่วนตัวอย่างที่มียางเพิ่มขึ้นยังคงแสดงสมบัติต่ำกว่าตัวอย่างที่มียางน้อยกว่า สมบัติการยืดถาวรและความแข็งยังคงอยู่ในช่วงเดียวกันกับสูตรที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยงทั้งที่มีและไม่มีสารร่วมการเชื่อมโยง

3.4.4 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผสมฟีนอลิกรีซินและมีสารร่วมการเชื่อมโยง

ทำการเตรียมยางคอมปาวด์และเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 3.4.3 และได้เพิ่มการทดลองผสมฟีนอลิกรีซินด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งเพื่อเปรียบเทียบกับการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด สารเชื่อมโยงที่ใช้ได้แก่ SR75 และเติมในปริมาณ 3 phr เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่า SR350

i) สมบัติความทนต่อแรงดึง

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงแสดงในตารางที่ 3.20 การเติม SR75 มีแนวโน้มเพิ่มสมบัติความทนต่อแรงดึง (ดูตารางที่ 3.19 ประกอบ) พิจารณาสูตรที่มียาง 50 phr ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณ SR75 ในขณะที่ค่าความเครียด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย การใช้ฟีนอลิกรีซินและ SR75 ร่วมกันทำให้ค่า σ_b และ ϵ_b สูงขึ้นเป็น 21.66 MPa และ 119 % ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าการใช้ DCP และ SR75 ร่วมกัน ซึ่งให้ค่า σ_b และ ϵ_b สูงสุดเท่ากับ 15.17 MPa และ 85 % ตามลำดับ (จากตารางที่ 3.12) การใช้ยางเพิ่มขึ้นจะทำให้ σ_b ลดลง แต่ค่า ϵ_b เพิ่มขึ้น ความเครียดสูงสุดที่ปรากฏเท่ากับ 150 % จะเห็นว่า การใช้ฟีนอลิกรีซินและ SR75 ช่วยปรับปรุงสมบัติ

ความทนต่อแรงดึงได้มากและแสดงค่าสูงกว่าการใช้ DCP โดยเฉพาะค่าการยืดก่อนขาดจะมีความแตกต่างกันมาก ระหว่างสารเชื่อมโยงสองชนิดนี้ สูตรต่างๆที่แสดงในตารางที่ 3.20 ให้สมบัติความทนต่อแรงดึงดี การผสมพีนอลิครีซินด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งมีแนวโน้มให้ค่าสมบัติความทนต่อแรงดึงสูงกว่าการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด

พิจารณาสมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกโพลีเอทิลีนที่ได้จากงานวิจัยนี้ เช่น สูตร E50/ph-8/75-3b มีค่า σ_b และ ϵ_b สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกโพลีเอทิลีนที่รายงานในเอกสารอื่นๆ เช่น ไนลอน 6/EPDM (50/50 wt%) σ_b เท่ากับ 8 MPa และ ϵ_b เท่ากับ 10% แต่ถ้าผสมไนลอนกับ EPDM-g-MA สมบัติจะสูงขึ้น คือ σ_b เท่ากับ 35 MPa และ ϵ_b เท่ากับ 200% (Oderkerk และ Groeninckx) สมบัติที่ค่อนข้างต่ำนี้ยังพบในการผสม ไนลอน 6 กับ EPR-g-MA (40/60 wt%) โดยที่ σ_b เท่ากับ 6.23 MPa และ ϵ_b เท่ากับ 30% (Okada และคณะ, 1999) การเพิ่มปริมาณไนลอนเป็น 50% ทำให้เทอร์โมพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีสมบัติดีขึ้น คือ σ_b เท่ากับ 22.7 MPa และ ϵ_b เท่ากับ 190% (Okada และคณะ, 2001) ในรายงานชุดนี้ยังระบุว่าการใช้ H-EPR-g-MA (Exxelor™ 1801) แทนที่ EPR-g-MA จะทำให้ได้ค่า σ_b เท่ากับ 31.3 MPa และ ϵ_b เท่ากับ 230% Jha และ Bhowmick ได้รายงานสมบัติความทนต่อแรงดึงของไนลอน 6 ผสมกับยางอะครีเลท (acrylate rubber) โดยมีไนลอน 40 wt% ดังนี้ σ_b เท่ากับ 10.5 MPa และ ϵ_b เท่ากับ 120% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นๆ สามารถสรุปได้ว่าผลการทดลองที่ได้รับอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพึงพอใจระดับหนึ่ง เพราะสามารถให้สมบัติที่ไม่ด้อยกว่างานวิจัยอื่นๆ แต่ควรมีการปรับปรุงให้มีสมบัติดีขึ้น เช่น น่าจะมีการทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างไนลอนและยาง โดยการกราฟ (grafting reaction) ซึ่งอาจจะใช้มาเลอิคแอนไฮไดรด์ร่วมด้วย

ตารางที่ 3.20 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกโพลีเอทิลีนที่ผสมพีนอลิครีซินและ SR75

Sample	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear Strength (N/mm)	Tension set (%)	Hardness Shore A
E50/ph-6b/75-3b	14.68 ± 1.09	107 ± 21	117.33 ± 9.60	5.52 ± 0.95	90.40
E50/ph-6t/75-3b	18.76 ± 1.88	110 ± 33	141.22 ± 7.48	4.64 ± 0.44	91.21
E50/ph-8b/75-3b	21.33 ± 1.16	119 ± 19	109.33 ± 13.84	6.30 ± 0.74	95.00
E50/ph-8t/75-3b	21.66 ± 1.31	119 ± 28	99.53 ± 34.75	4.95 ± 0.56	94.80
E60/ph-6b/75-3b	13.11 ± 0.83	138 ± 32	107.68 ± 5.15	4.08 ± 1.10	94.00
E60/ph-6t/75-3b	14.74 ± 1.01	150 ± 29	117.77 ± 9.47	4.49 ± 0.51	94.40
E60/ph-8b/75-3b	13.22 ± 1.25	108 ± 29	89.20 ± 4.82	5.02 ± 0.40	89.50
E60/ph-8t/75-3b	15.71 ± 1.28	147 ± 36	80.01 ± 14.77	5.03 ± 0.61	88.00

ii) สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด การยืดถาวร และความแข็ง

สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด การยืดถาวร และความแข็งแสดงในตารางที่ 3.20 การเติม SR75 เพิ่มสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดและให้ค่าที่สูงกว่า 100 N/mm ในขณะที่การใช้ DCP และ SR75 จะให้ค่าความต้านทานสูงสุดเท่ากับ 73.52 N/mm จากสูตร E50/5t/75-3b (ดูตารางที่ 3.13 และ 3.14 ประกอบ) ส่วนสมบัติการยืดถาวรและความแข็งยังคงอยู่ในช่วงเดียวกันกับสูตรอื่นๆ

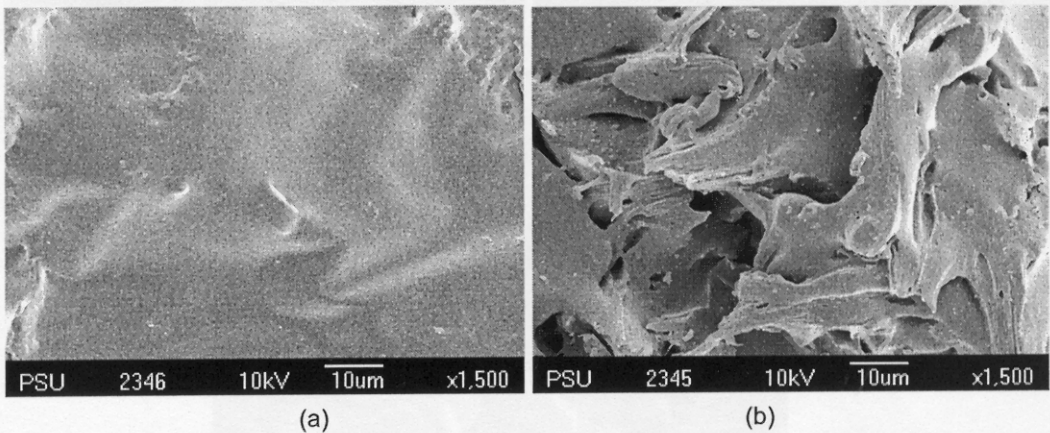
จะเห็นได้ว่าการเตรียมเทอร์โมพลาสติกโพลีเอทิลีนจากไนลอนและยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์นี้ ควรใช้พีนอลิครีซินเป็นสารเชื่อมโยงและสารร่วมการเชื่อมโยง ในกรณีที่ศึกษา Saret™ SR75EPM2M ให้สมบัติเชิงกล

ดีกว่า Saret™ SR350 การเลือกสูตรที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาจากสมบัติเชิงกลและสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ ที่ต้องการ เนื่องจากโครงการวิจัยนี้มีระยะเวลาการทำวิจัยเพียง 6 เดือน ประกอบกับการมีปัญหาเรื่องเครื่องมือชำรุดระหว่างการวิจัย ทำให้ไม่สามารถทดสอบสมบัติอื่น ๆ เพิ่มเติมได้ อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจในแง่ที่สามารถพัฒนาสูตรให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีเท่าเทียมผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นๆ

3.5 ผลการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาศาสตร์ด้วยเครื่อง SEM และ DMTA

3.5.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM เป็นการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ สูตร E50/5/U/350-1t แฉ่ตัวอย่างในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาครึ่งชั่วโมงแล้วทำการหักตัวอย่างอย่างรวดเร็ว และนำตัวอย่างที่ได้ผ่านการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง โดยใช้ส่วนผิวหน้าบริเวณรอยหักของชิ้นทดสอบ มาตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM ไม่ทำการสกัดเฟสของพลาสติกออกไปทั้งสองตัวอย่าง เห็นได้ว่ารูป 3.2a ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ทำการหักด้วยไนโตรเจนเหลว นั้นลักษณะพื้นผิวมีลักษณะเรียบเหมือนเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่สามารถแยกเฟสของยางและไนลอนได้ แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์น่าจะเข้ากันได้ดี เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดต่างก็มีความเป็นขั้ว ทำให้แรงดึงดูดระหว่างเฟสสองเฟสมีค่าต่ำและแรงยึดติดระหว่างเฟสมีค่าสูง (Morton, 1987) ดังนั้นเมื่อผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน พอลิเมอร์ผสมน่าจะมีความเข้ากันได้ดี รูปที่ 3.2b เป็นตัวอย่างผิวหน้าตรงบริเวณรอยหักของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง ซึ่งเห็นได้ว่ามีลักษณะผิวขรุขระ แต่ก็มองดูเป็นเพียงเฟสเดียว เพราะความมีขั้วของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดจึงทำให้มีความเข้ากันได้ และลักษณะที่มีผิวขรุขระเกิดมาจากผลของการดึงชิ้นทดสอบ

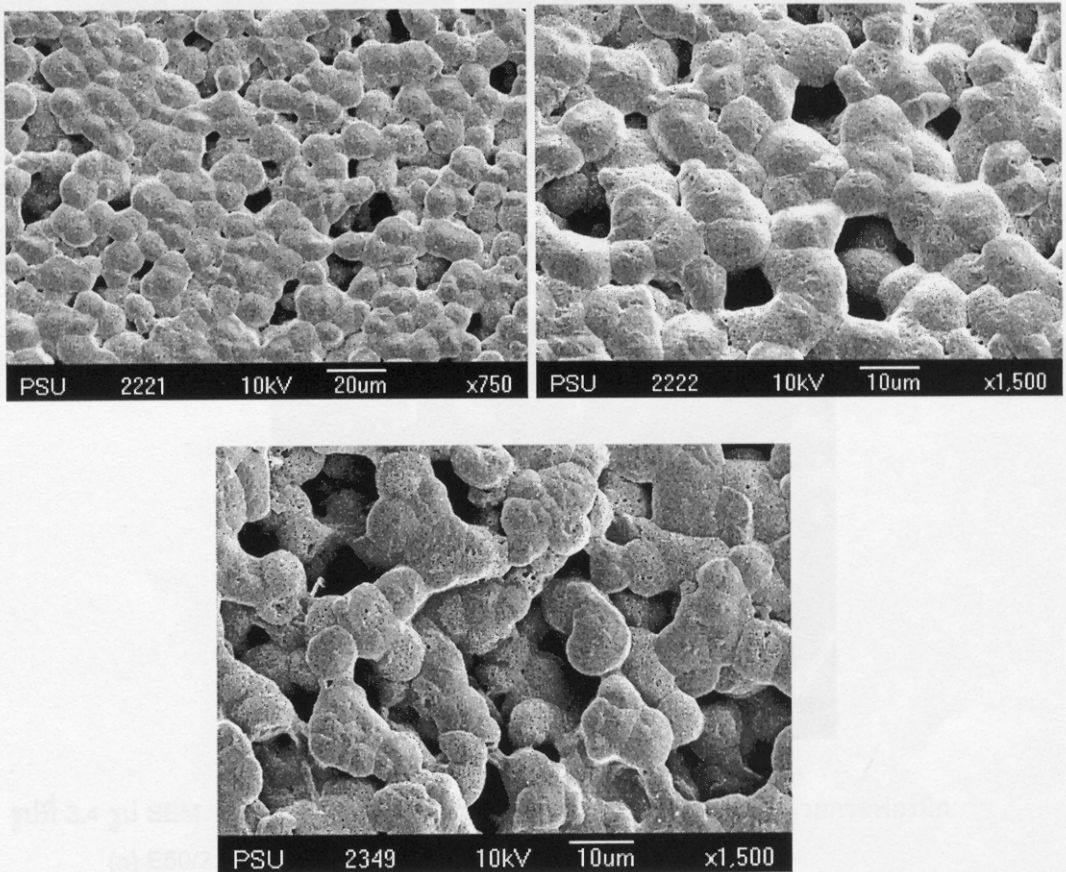


รูปที่ 3.2 รูป SEM ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สูตร E50/5/U/350-1t (a) ผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างที่ถูกหักหลังจากแช่ในไนโตรเจนเหลว (freeze-fractured surface) (b) ผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดึง (tensile tested specimen)

สำหรับตัวอย่างในรูปที่ 3.3 – 3.5 เป็นตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ทำการสกัดเฟสของพลาสติกออกด้วยกรดฟอร์มิก ซึ่งเฟสของยางที่ไม่เกิดการละลายในกรณีนี้ คืออนุภาคของยางที่เกิดไดนามิกวัลคาไนเซชัน (dynamic vulcanization) กลายเป็นเม็ดเล็กๆติดกัน ดังนั้นจะเห็นตำแหน่งชัดเจนของเฟสของไนลอนที่ถูกสกัดออกไป และเกิดลักษณะเป็นโพรง (cavitation) ซึ่งจากการตรวจสอบเอกสาร ลักษณะดังกล่าวได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nakasan และคณะ (2005) โดยทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เซท (thermoplastic

vulcanizates, TPV) ระหว่างยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์และพอลิพรอพิลีน (PP) และไซเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมโยง ได้ทำการสกัดเฟสของ PP ออกด้วยไซลีน ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ได้ จะเห็นอนุภาคของยางที่เกิดไดนามิกวัลคาไนเซชันเป็นเม็ดเล็กๆอยู่ในเฟสของ PP ที่ถูกสกัดออกไปแล้ว ทำให้เฟสของ PP มีลักษณะเป็นโพรง ซึ่งรูปร่างสัณฐานวิทยาดังกล่าวนี้มีความสอดคล้องกับรูปที่ 3.3 – 3.5

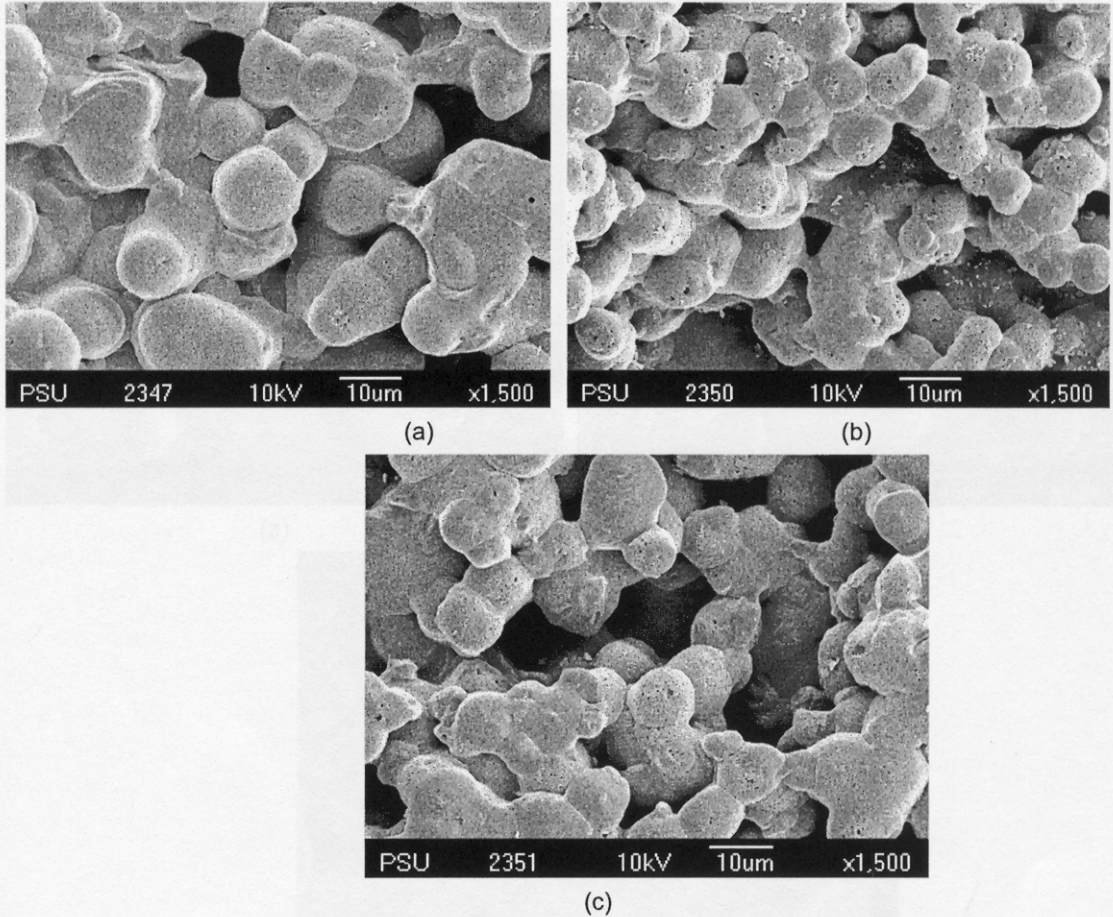
สำหรับรูปที่ 3.3 คือ ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สูตร E50/5/350-1t โดยมีกำลังขยายที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ทำการไดนามิกวัลคาไนเซชันด้วยระบบเปอร์ออกไซด์และมีสารร่วมกรเชื่อมโยงชนิด SR350 อนุภาคของ ENR จะมีลักษณะเป็นเม็ดกระจายอยู่ในส่วนของไนลอนที่เป็นแมทริกซ์ แต่จากรูปร่างทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ขนาดของ ENR ที่ได้ยังมีขนาดใหญ่คือประมาณ 10 μm ซึ่งจากผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สูตรนี้มีค่าความทนต่อแรงดึง 15.17 MPa และการยืด ณ จุดขาด 85 % ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความเครียด ณ จุดขาด ที่ได้ยังมีค่าน้อย ซึ่งอาจมีความสอดคล้องกับขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ของเม็ดยาง



รูปที่ 3.3 รูป SEM ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สูตร E50/5/350-1t ที่สกัดเฟสของไนลอนด้วยกรดฟอริก รูปถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า และ 1500 เท่า

เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารร่วมการเชื่อมโยงจาก SR350 เป็น SR75 แต่ยังใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ก็ยังคงเห็นอนุภาคของ ENR กระจายเป็นเม็ดอยู่ในเฟสของไนลอนที่เป็นแมทริกซ์ดังแสดงดังรูปที่ 3.4 จากรูปที่ 3.4a เมื่อเติมปริมาณ SR75 เท่ากับ 1 phr อนุภาคของยาง ENR จะกระจายอยู่ในเฟสของไนลอนและขนาดอนุภาคยังมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อเติมสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด SR75 ปริมาณ 3 phr ดังแสดงในรูปที่ 3.4b อนุภาคของเม็ดยางมีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติความทนต่อแรงดึง

ซึ่งเมื่อปริมาณสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด SR75 สมบัติความทนต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงชนิด DCP จาก 2.5 phr เป็น 5 phr แต่ปริมาณสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด SR75 คงที่คือ 3 phr ลักษณะสัณฐานวิทยา ดังรูปที่ 3.4c เม็ดยางมีลักษณะใกล้เคียงกันแต่บางส่วนยังมีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง ที่มีค่าความทนต่อแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าความเครียด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ใช้ DCP เท่ากับ 2.5 phr มีค่าที่ต่ำลง ลำดับขนาดอนุภาคเม็ดยางมีทิศทางดังนี้ $E50/2.5/75-3b < E50/5/75-3b < E50/2.5/75-1b$ เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติความทนต่อแรงดึง มีผลไปในทิศทางเดียวกัน คือ ค่า σ_b และ ϵ_b ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ทั้งสามสูตรนี้สามารถเรียงลำดับเหมือนกับลำดับขนาดของอนุภาคยางที่กล่าวมา (ดูตารางที่ 3.11)

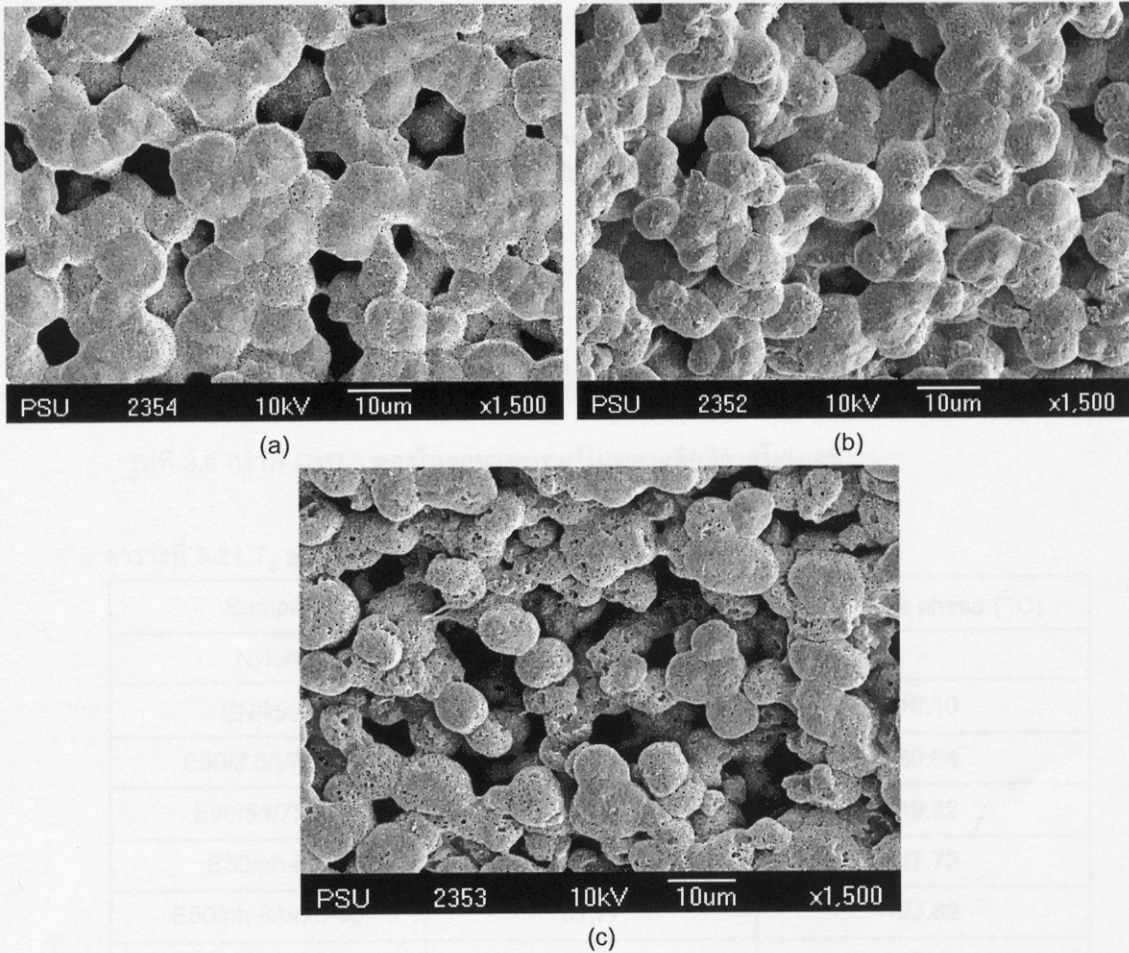


รูปที่ 3.4 รูป SEM ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่สกัดเฟสของไนลอนด้วยกรดฟอร์มิก
(a) E50/2.5/75-1b; (b) E50/2.5/75-3b; (c) E50/5/75-3b

เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารเชื่อมโยงจาก DCP เป็น ฟีนอลิครีซิน ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ใช้ฟีนอลิครีซินเป็นสารเชื่อมโยง แสดงในรูปที่ 3.5 จากรูปจะเห็นว่า เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารเชื่อมโยงโดยใช้ฟีนอลิครีซิน ขนาดของเม็ด ENR ที่กระจายอยู่ในเฟสของไนลอนมีขนาดเล็กลง ซึ่งรูปร่างสัณฐานวิทยาดังกล่าวสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงคือ เมื่อเปลี่ยนชนิดสารเชื่อมโยงจาก DCP เป็นฟีนอลิครีซิน ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ใช้ฟีนอลิครีซินมีค่าที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ใช้ DCP จากรูปที่ 3.5a และ 3.5b เมื่อเติมสารร่วมการเชื่อมโยงชนิด SR75 ปริมาณ 3 phr โดยใช้ฟีนอลิครีซิน ปริมาณ 8 phr เม็ดยางมีขนาดเล็กกว่าการตัวอย่างที่ไม่เติม SR75 สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ใช้สารร่วมการ

เชื่อมโยงชนิด SR75 ที่มีแนวโน้มที่สูงกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณ ENR เป็น 60 phr โดยยังคงปริมาณสารเชื่อมโยง และสารร่วมการเชื่อมโยงเท่ากับ 8 และ 3 phr ตามลำดับ ขนาดของเม็ดยาง ENR50 มีขนาดเล็กและกระจายตัว เป็นเม็ดเล็กๆ อยู่ในเฟสของไนลอนที่เป็นแมทริกซ์

ดังนั้น สารร่วมการเชื่อมโยงมีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาโดยทำให้ขนาดของเม็ด ENR มีขนาดเล็ก เนื่องจากสารร่วมการเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพต่อการทำงานของสารเชื่อมโยง โดยสารร่วมการเชื่อมโยงมีหน้าที่เป็นตัวช่วยให้สารเชื่อมโยงทำงานมีประสิทธิภาพได้ดีขึ้น ภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าการผสมยางและไนลอนด้วย เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ตามที่ได้ทำมานี้ สามารถทำให้เกิดไดนามิกสัณฐานในเซชันได้ทั้งในกรณีที่มียาง 50 และ 60 phr โดยที่มีการเติมสารเชื่อมโยงก่อนการผสมพอลิเมอร์ในเครื่องอัดรีดดังกล่าว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า โครงการวิจัยนี้ ประสบความสำเร็จในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกโพลีเอสเตอร์ โดยมียางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์เป็นเฟสกระจายและ ไนลอนเป็นเฟสต่อเนื่องหรือแมทริกซ์

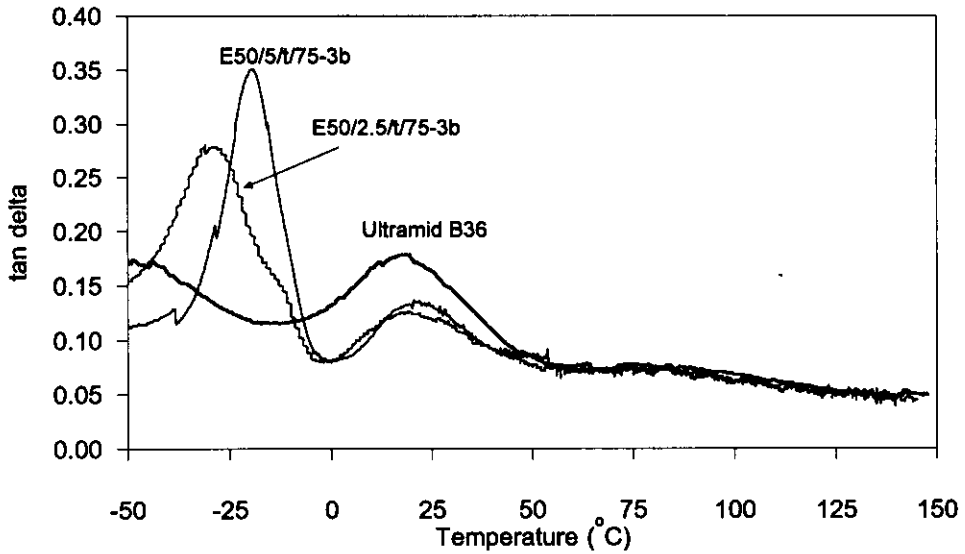


รูปที่ 3.5 รูป SEM ของเทอร์โมพลาสติกโพลีเอสเตอร์ที่สกัดเฟสของไนลอนด้วยกรดฟอร์มิก
(a) E50/Ph-8/b; (b) E50/Ph-8/b/75-3b; (c) E60/Ph-8/b/75-3b

3.5.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA ในเทอร์โมพลาสติกโพลีเอสเตอร์ เป็นการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ 2 ชนิด โดยพิจารณาอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature, T_g) (Szabo และคณะ, 2004) ถ้ามีการแสดงแทรนซิชันสองตำแหน่งของพอลิเมอร์แต่ละชนิด แสดงว่ามีการแยกเฟสระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง กราฟแสดงค่าแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent) หรือ $\tan \delta$ ของไนลอน Ultramide™ B36 และเทอร์โมพลาสติกโ

ลาสโตเมอร์สูตร E50/2.5/75-3b และ E50/5/75-3b แสดงในรูปที่ 3.6 ไนลอนแสดง α transition (T_g) และ β transition (sub-transition, $< 0^\circ\text{C}$) ส่วนเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ทั้งสองแสดงแทรนซิชันของไนลอนและยางธรรมชาติฟ็อกซิโคซ์ สูตรที่มีเปอร์ออกไซด์มากกว่าจะมี T_g ของเฟสยางธรรมชาติฟ็อกซิโคซ์สูงกว่า เนื่องจากมีปริมาณการเชื่อมโยงมากกว่า ส่วน T_g ของเฟสไนลอนอยู่ในช่วงเดียวกันทั้งสองสูตรและมีแนวโน้มสูงกว่าไนลอนบริสุทธิ์เล็กน้อย ค่า T_g ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA แสดงในตารางที่ 3.21 ไนลอน Ultramid™ B36 มี T_g เท่ากับ 17.40°C ค่า T_g ของ ENR50 เท่ากับ -16.1°C (Tanrattanakul และคณะ 2002) เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ทุกตัวที่นำมาทำการวิเคราะห์ แสดงแทรนซิชันสองตำแหน่งและแสดงค่าไว้ในตารางที่ 3.21



รูปที่ 3.6 กราฟ DMTA ของไนลอนและเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

ตารางที่ 3.21 T_g ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

Sample	T_g – nylon phase ($^\circ\text{C}$)	T_g – ENR phase ($^\circ\text{C}$)
Nylon	17.40	-
ENR50*	-	-16.10
E50/2.5/75-3b	19.27	-30.84
E50/5/75-3b	20.42	-19.32
E50/ph-8/b	28.96	-27.73
E50/ph-6/b/75-3b	31.77	-23.62
E50/ph-8/b/75-3b	21.06	-15.54
E50/ph-8/75-3b	24.58	-16.46
E60/ph-6/b/75-3b	28.96	-27.73
E60/ph-8/b/75-3b	31.77	-23.62
E60/ph-8/75-3b	21.06	-15.54

(* Tanrattanakul และคณะ 2002)

เป็นที่น่าสังเกตว่าค่า T_g ของเฟสไนลอนในเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากการเชื่อมโยงโมเลกุลเกิดอันตรกิริยากับไนลอน แต่เป็นที่น่าแปลกใจว่า หากไนลอนเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลแล้ว เหตุใดจึงยังคงสามารถสกัดเอาไนลอนออกได้ด้วยกรดฟอร์มิก หรืออาจเป็นไปได้ว่ามีการเชื่อมโยงเพียงเล็กน้อยที่ไม่มีผลต่อการละลายด้วยกรดฟอร์มิก แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของทรานซิชัน ซึ่งหัวข้อนี้น่าจะมีการศึกษาต่อไปในอนาคต ส่วนค่า T_g ของเฟสยาง ENR50 ในเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีแนวโน้มต่ำลง ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองไม่เกิดอันตรกิริยาด้วยกัน และไม่มีลักษณะที่เรียกว่าเข้ากันได้บางส่วน (partially miscible blends) เนื่องจากค่า T_g ของทั้งสองเฟสแยกห่างจากกันมากขึ้นเมื่อนำมาผสมกัน แต่ผลการทดลองนี้ขัดแย้งกับภาพ SEM ที่ไม่แสดงการแยกเฟสในตัวอย่างที่ไม่มีการสกัดด้วยกรดฟอร์มิก (รูปที่ 3.2)