

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาสมบัติของยางรีเคลม

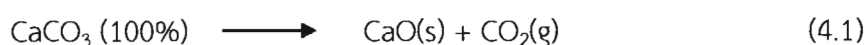
ยางรีเคลม คือ ยางที่ได้จากการนำยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์มาผ่านกระบวนการรีเคลม (Reclamation) เพื่อให้สามารถนำยางวัลคาไนซ์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ กล่าวคือการทำให้โมเลกุลยางสามารถวัลคาไนซ์ได้อีกครั้ง โดยยางรีเคลมที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นแผ่นสีดำไม่ทราบสมบัติ ฉะนั้นจึงต้องทดสอบและวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของยางรีเคลม ได้แก่ สมบัติเชิงความร้อน การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี การวิเคราะห์ปริมาณส่วนที่ละลายและไม่ละลาย การหาปริมาณพันธะเชื่อมขวาง และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

4.1.1 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของยางรีเคลมด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA)

การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA ตามวิธีในหัวข้อ 3.3.1.2 เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณองค์ประกอบในยางรีเคลม ได้ผลเทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไป (Weight loss (%)) และอัตราการหายไปของน้ำหนัก (Derivative weight (%/min)) กับ อุณหภูมิ (Temperature (°C)) ดังรูปที่ 4.1(A) และ (B) และ ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของยางรีเคลมจากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA

จากรูปที่ 4.1(A) เป็นการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จะพบการสลายตัวของยางรีเคลม 4 ช่วง แบ่งเป็นช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 49-300°C มีปริมาณการสลายตัว 9.5% ซึ่งเป็นการสลายตัวของ น้ำมัน พลาสติกไซเซอร์ และสารเคมีบางชนิดในยางรีเคลมที่สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ (Chen and Qian, 2003) จากนั้นการสลายตัวในช่วงที่ 2 และ ช่วงที่ 3 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 300-490°C และ 490-585°C ตามลำดับ ในช่วงนี้จะเป็นการสลายตัวขององค์ประกอบหลักของสายโซ่โมเลกุลยางซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะเห็นว่าการสลายตัวเป็น 2 ช่วง แสดงให้เห็นว่ายางรีเคลมมียางเป็นองค์ประกอบเท่ากับหรือมากกว่า 2 ชนิด ซึ่งมีปริมาณการสลายตัวรวมกันเท่ากับ 55% โดยจากการสลายตัวทั้งสองช่วงนั้นคาดว่า ในช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 355°C เป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติ (Gisbert *et al.*, 2007) และช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิประมาณ 422°C เป็นการสลายตัวของยางสังเคราะห์คือ ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber) และ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene-Butadiene rubber) (Chen and Qian, 2003; Berrueco *et al.*, 2004; Gisbert *et al.*, 2007) รวมถึงอาจจะเป็นการสลายตัวของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน

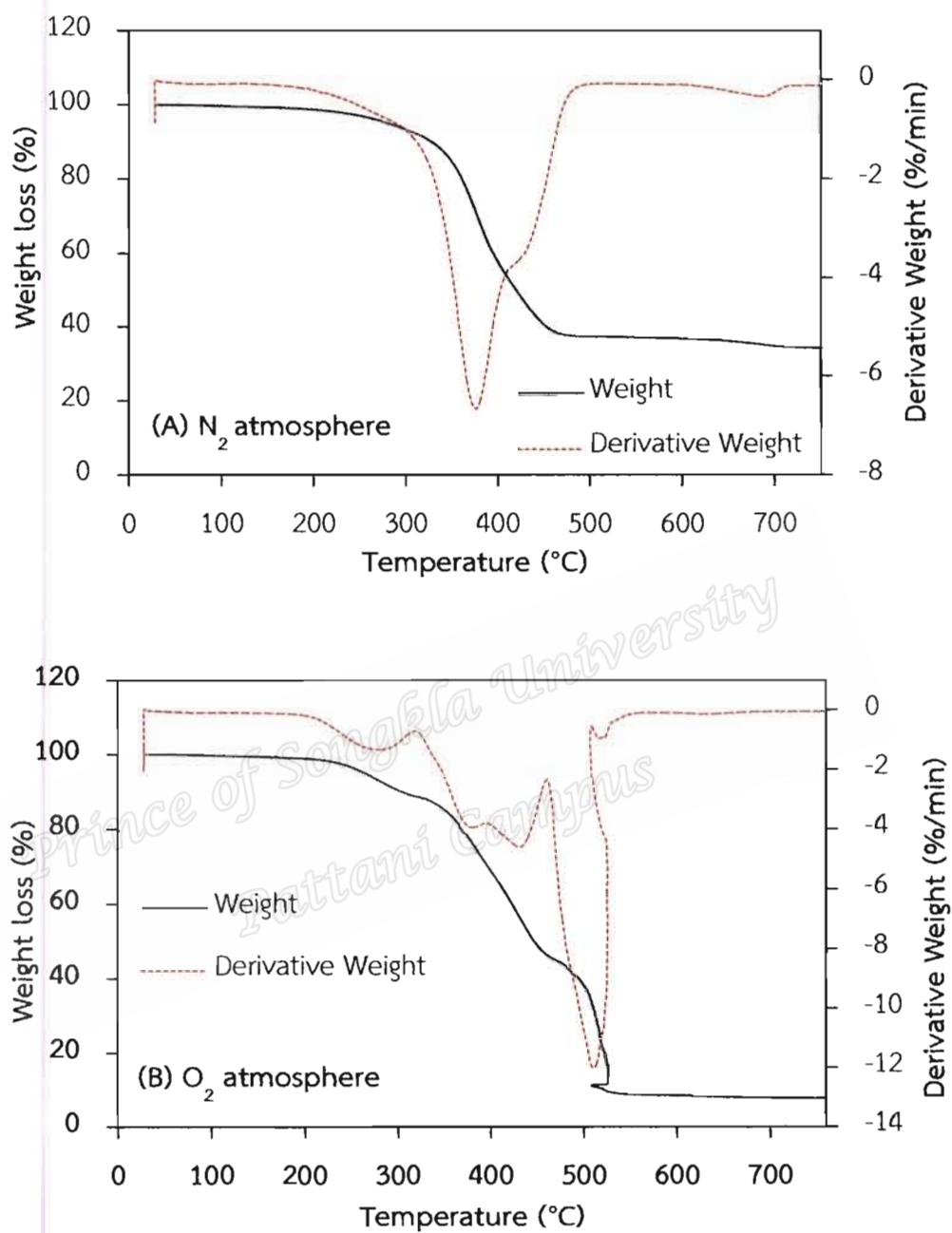
(Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM) เนื่องจากสามารถสลายตัวได้ในช่วงอุณหภูมิ 410 - 440°C (Gamlin *et al.*, 2003) และในการสลายตัวของยางรีเคลมในช่วงที่ 4 ซึ่งเกิดในช่วงอุณหภูมิ 615-750°C พบการสลายตัวขององค์ประกอบในยางรีเคลมประมาณ 2% ซึ่งคาดว่าจะเป็นการสลายตัวของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Huang and Wang, 2009) ดังสมการที่ 4.1 และมีขี้เถ้าหลงเหลืออยู่ 33.5%



จากนั้นเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของสารตัวเติมเขม่าดำในยางรีเคลมเพิ่มเติม จึงได้นำยางรีเคลมไปวิเคราะห์การสลายตัวภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ดังรูปที่ 4.1(B) พบว่าเขม่าดำมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 460-510°C และมีปริมาณ 33% ขณะที่ขี้เถ้าเหลืออยู่ 8.0% ซึ่งเป็นสารที่ไม่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 620°C เช่น สารอนินทรีย์ ซิงค์ออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์จากแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของยางรีเคลมแบบแผ่นที่ทดสอบด้วยเทคนิค TGA ที่อุณหภูมิห้อง ถึง 750°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน

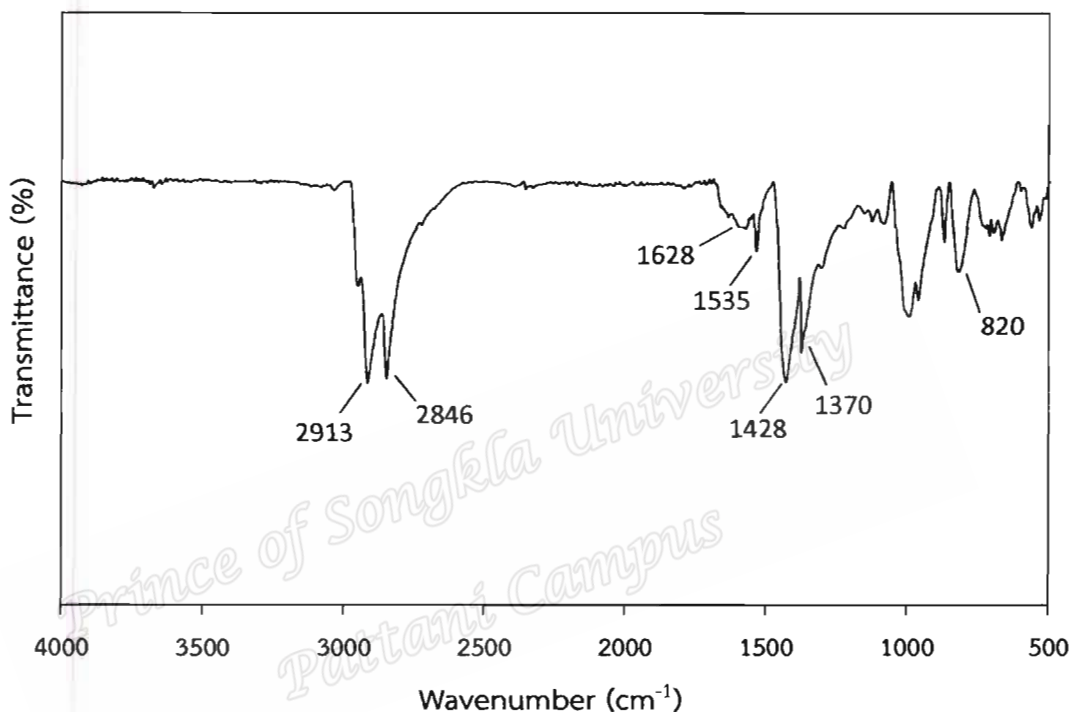
Number	Atmosphere	T _d onset (°C)	T _d (°C)	Component (%)	Type of component
1	N ₂	59	49-300	9.5	Water, Oil
2	N ₂	349	300-490	36.5	Rubber
3	N ₂	410	490-585	18.5	Rubber
4	N ₂	623	685-750	2.0	CO ₂ in CaCO ₃
5	N ₂	-	>750	33.5	Ash
6	O ₂	485	460 – 510	33.0	Carbon black
7	O ₂	618	510 – 620	4.0	CO ₂ in CaCO ₃
8	O ₂	-	>620	8.0	Ash



รูปที่ 4.1 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไป และอัตราการหายไปของน้ำหนัก กับอุณหภูมิของยางรีเคลม เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิห้องถึง 750°C ภายใต้สภาวะ (A) บรรยากาศไนโตรเจน (B) บรรยากาศออกซิเจน

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางรีเคลมด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR)

วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางรีเคลมด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) ได้สเปกตรัมของยางรีเคลม ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สเปกตรัม FTIR ของยางรีเคลมชนิดแผ่น

รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัม FTIR ของยางรีเคลม ซึ่งพบเห็นว่า FTIR ของยางรีเคลม ปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 2913 และ 2846 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของ C-H ใน $-\text{CH}_3$ และ $-\text{CH}_2$ ขณะที่ 1432 และ 1370 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ $-\text{CH}_2$ และ $-\text{CH}_3$ ในโครงสร้างของยาง (Zanchet *et al.*, 2012; Imyim *et al.*, 2016) และพบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1628 cm^{-1} แสดงถึงส่วนที่ไม่อิ่มตัวในไอโซพรีนซึ่งแสดงถึงพันธะ C=C (Hassan *et al.*, 2013) สำหรับตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1535 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของ Zinc carboxylates (Zanchet *et al.*, 2012) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ที่ได้จากการสลายตัวภายใต้ความร้อนของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 820 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบงอของพันธะ C-H ในโมเลกุลยางธรรมชาติ และในวงเบนซีน

เป็นสารวัลคาไนซ์ และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 820 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบงอของพันธะ C-H ในโมเลกุลยางธรรมชาติ และในวงเบนซีน

4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณส่วนที่ละลายและไม่ละลาย (Sol-gel fraction) ในยางรีเคลม

ทำการวิเคราะห์หาส่วนที่ละลายได้ในยางรีเคลมด้วยวิธี Soxhlet extraction ตามวิธีในหัวข้อ 3.3.1.3 โดยเป็นการทดสอบหาส่วนที่ละลายได้ (Sol fraction) ของยางด้วยตัวทำละลายอะซิโตน และเตตระไฮโดรฟูแรน เช่น น้ำมัน ยางที่ไม่วัลคาไนซ์ สารวัลคาไนซ์ เป็นต้น และส่วนที่ไม่สามารถละลายได้ (Gel fraction) เช่น ยางส่วนที่วัลคาไนซ์ สารตัวเติม เป็นต้น ผลการวิเคราะห์หาปริมาณส่วนที่ละลายได้ในยางรีเคลมแสดงผลดังตารางที่ 4.2

ส่วนที่ละลายได้ของยางรีเคลม เป็นการทดสอบเพื่อทราบถึงประสิทธิภาพในการรีเคลม โดยปกติปริมาณส่วนที่ละลายได้ของยางวัลคาไนซ์โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 5-20% ขึ้นอยู่กับชนิดยาง ความยาวสายโซ่โมเลกุลยาง ระบบการวัลคาไนซ์ และความสมบูรณ์ในโครงสร้างแบบร่างแหของโมเลกุลยาง (Saiwari, 2013) ในขณะที่ยางรีเคลมชนิดแผ่น พบว่ามีส่วนที่สามารถละลายได้ประมาณ 24.64% ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงกว่ายางวัลคาไนซ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำรีเคลม

ตารางที่ 4.2 ปริมาณส่วนที่ละลายได้ ปริมาณส่วนที่ไม่ละลาย และความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวาง

Number	Initial weight (g)	weight after test (g)	Weight loss (g)	Sol (%)	Gel (%)	Crosslink density ($\times 10^{-4}\text{ mol/cm}^3$)
1	0.1864	0.1408	0.0456	24.46	75.54	2.24
2	0.1857	0.1395	0.0462	24.88	75.12	2.28
3	0.2623	0.1975	0.0648	24.70	75.30	2.40
4	0.2700	0.2037	0.0663	24.56	75.44	2.30
5	0.1727	0.1302	0.0425	24.61	75.39	2.18
เฉลี่ย				24.64	75.36	2.28

4.1.4 การหาความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลมด้วยวิธีการบวมพอง (Swelling)

ทำการทดสอบหาปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลมด้วยวิธีการตามหัวข้อที่ 3.3.1.4 โดยใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย จากนั้นจึงคำนวณหาปริมาณพันธะเชื่อมขวางโดยใช้สมการ Flory-Rehner ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

เติมเขม่าดำผสมอยู่ จึงจะหักลบปัจจัยของสารตัวเติมออกไป กล่าวคือความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลมเป็นพันธะเชื่อมขวางที่เกิดจากยางซึ่งมีปริมาณ $2.28 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$

4.1.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของยางรีเคลม

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของยางรีเคลมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1000 เท่า ดังรูปที่ 4.3 พบว่าสัณฐานวิทยาของยางรีเคลมมีลักษณะเป็นผิวต่อเนื่องของยาง โดยที่ผิวหน้าของยางมีทั้งที่เป็นเรียบและขรุขระ และพบว่ามีกลุ่มของสารเคมีกระจายตัวอยู่



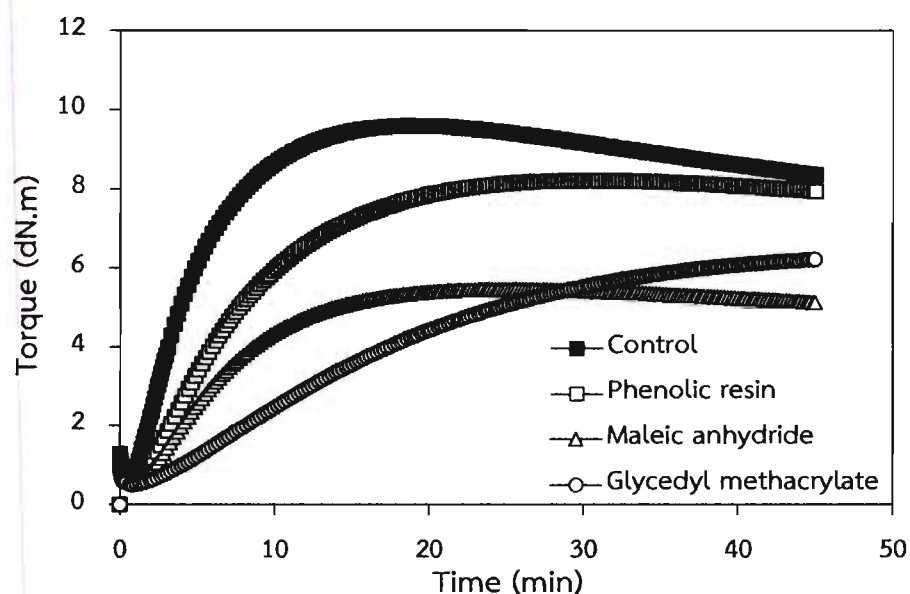
รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางรีเคลมแบบแผ่นที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1,000 เท่า

4.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม (NR/RR blend)

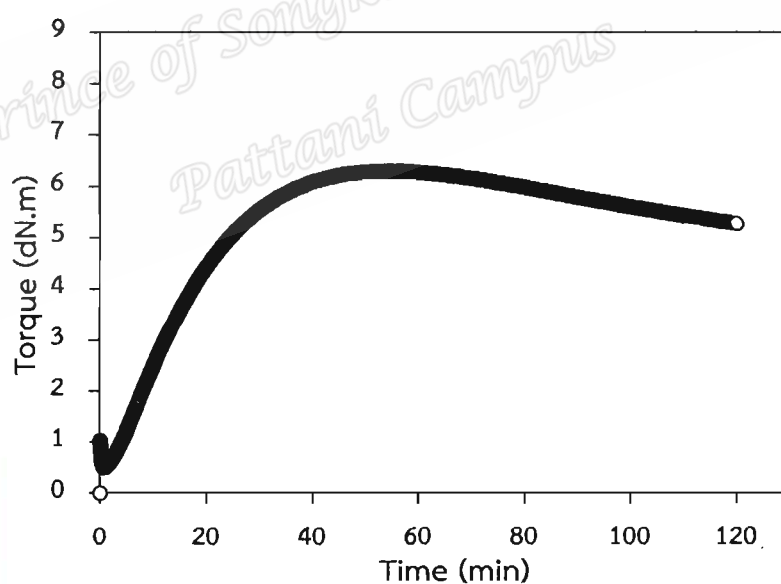
ทำการศึกษาผลของชนิดสารดัดแปรต่อพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่างยางธรรมชาติ และยางรีเคลม โดยแปรชนิดของสารดัดแปร 3 ชนิด ได้แก่ ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin, Ph) มาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) และ ไกลซิไดลเมทาคริเลต (Glycidyl methacrylate, GM) เตรียมยางคอมพาวนด์จากการเบลนดระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.2

4.2.1 พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางเบลนดระหว่าง NR/RR เมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

นำยางเบลนดระหว่าง NR/RR โดยแปรชนิดสารดัดแปรตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.2.1 มาทดสอบหาพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง mini-MDR ที่อุณหภูมิ 150°C ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/RR เมื่อแปรรูปสารดัดแปร ที่อุณหภูมิ 150°C



รูปที่ 4.5 พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/RR เมื่อแปรรูปสารดัดแปรชนิดไกลซิดิลเมทาคริเลต ที่อุณหภูมิ 150°C

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเบลนด์ยางรีเคลม เมื่อมีการใช้สารดัดแปร 3 ชนิด ได้แก่ ฟีนอลิกเรซิน มาลิกแอนไฮไดรด์ และไกลซิดิลเมทาคริเลต จะเห็นว่าการใช้สารดัดแปรแต่ละชนิดจะให้ลักษณะกราฟการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่มีอัตราเร็วและ

ประสิทธิภาพการวัลคาไนซ์แตกต่างกัน ยกเว้นพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ในช่วงหลัง Optimum cure time (ระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่ทำให้ยางมีสมบัติที่ดีที่สุด) ที่ปรากฏเหมือนกัน คือมีพฤติกรรมเป็นแบบ Reversion โดยยางจะเกิดการเสื่อมเมื่อวัลคาไนซ์มากเกินไป (Over cure) สังเกตได้จากยางจะมีความแข็งหรือมอดูลัสลดลง โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากการใช้ยางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบในการเบลนด์ร่วมกับการใช้ระบบกำมะถันแบบปกติเป็นระบบวัลคาไนซ์ ซึ่งจะเกิด Reversion เนื่องจากโมเลกุลยางธรรมชาติถูกตัดขาดสายโซ่จากผลของความร้อน และพันธะเชื่อมขวางมีการเปลี่ยนรูปแบบจากพอลิซัลฟิดิกเป็นได-หรือโมโนซัลฟิดิกได้

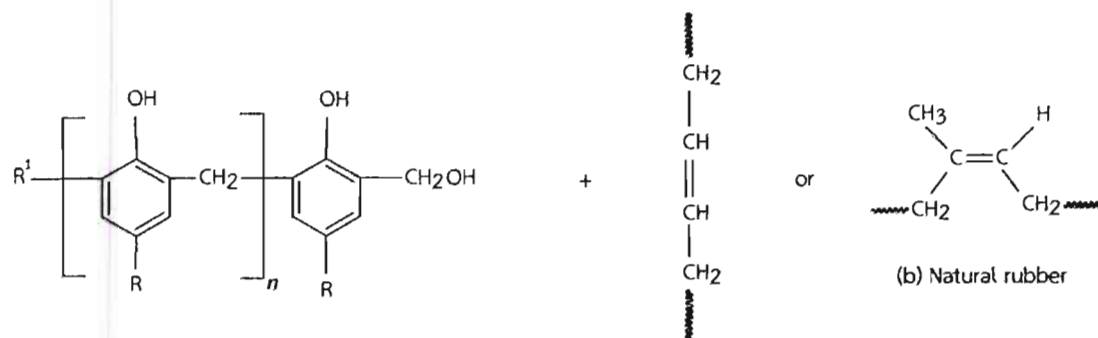
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในรูปที่ 4.4 สามารถหาค่าทอร์กต่ำสุด (Minimum torque, M_L) ค่าทอร์กสูงสุด (Maximum torque, M_H) ผลต่างของค่าทอร์ก ($M_H - M_L$) เวลาที่ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ (Scorch time, t_{s1}) เวลาการวัลคาไนซ์ (Cure time, t_{c90}) และดัชนีการวัลคาไนซ์ (Cure rate index, CRI) ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม เมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

Types of modifier	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	Scorch Time (min)	Cure Time (min)	CRI (min^{-1})
Control	0.61	9.59	8.98	1.57	10.10	11.72
Ph	0.64	8.22	7.58	2.81	16.43	7.34
MA	0.66	5.47	4.81	3.45	13.73	9.73
GM	0.49	6.31	5.82	6.11	32.61	3.77

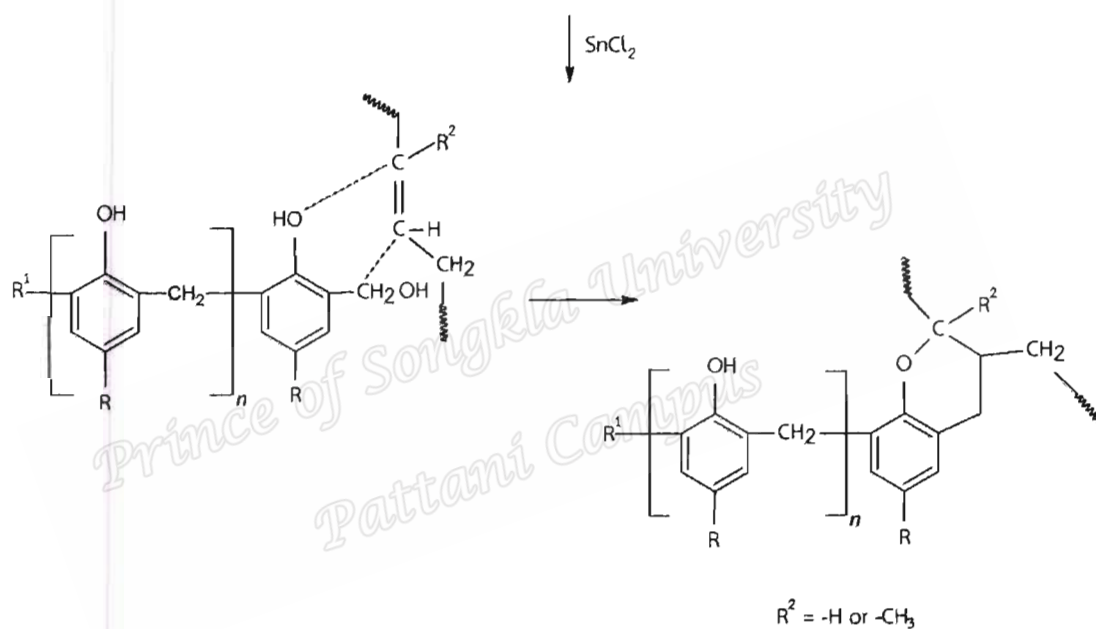
จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 จะพบว่าค่าทอร์กต่ำสุดของยางเบลนด์มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสูตรที่ไม่ใช้และสูตรที่ใช้สารดัดแปร ยกเว้นยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดไกลซีดิลเมทาคริเลต จะให้ค่าทอร์กต่ำสุดมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากสารดัดแปรชนิดไกลซีดิลเมทาคริเลตมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งแสดงถึงโมเลกุลจะยิ่งเคลื่อนไหวได้ง่ายเมื่อเจอความร้อนขณะทดสอบ ส่งผลให้ยางมีความนิ่มลง ในขณะที่ค่าทอร์กสูงสุดของยางเบลนด์จะให้ค่าที่แตกต่างกัน คือ สูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรจะมีค่าทอร์กสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคือ ยางเบลนด์ที่ใช้สารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซิน ไกลซีดิลเมทาคริเลต และมาลิกแอนไฮไดรด์ ตามลำดับ โดยที่ค่าทอร์กสูงสุดจะขึ้นอยู่กับมอดูลัสของยางที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อโมเลกุลยางเกิดพันธะเชื่อมขวาง โดยระดับพันธะเชื่อมขวางหรือความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางสามารถพิจารณาได้จากผลต่างของค่าทอร์กสูงสุดและค่าทอร์กต่ำสุด ($M_H - M_L$) ข้อมูลในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่ายางเบลนด์สูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรจะมีปริมาณพันธะ

เชื่อมขวางมากที่สุด รองลงมาคือ ยางเบลนด์ที่ใช้สารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซินเรซิน โกลซิดิลเมทาคริเลต และมาลิกแอนไฮไดรต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าระยะเวลาการสกอร์ช ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ และดัชนีการวัลคาไนซ์ พบว่ายางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรจะทำให้ระยะเวลาการสกอร์ช และระยะเวลาการวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ดัชนีการวัลคาไนซ์ และปริมาณพันธะเชื่อมขวางมีค่าลดลง ซึ่งลักษณะที่พบสามารถอธิบายได้จาก ความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาแข่งขันระหว่างสารวัลคาไนซ์และสารดัดแปร โดยปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางและสารดัดแปรชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.6 - 4.8 ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจมีผลทำให้ปริมาณหมู่วงไวในยางธรรมชาติลดลง และเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์กับกำมะถันได้น้อยลง นอกจากนี้สภาพความเป็นกรด-ด่างของสารดัดแปรทั้ง 3 ชนิดที่มีค่าดังนี้ มาลิกแอนไฮไดรต์ โกลซิดิลเมทาคริเลต และฟีนอลิกเรซิน มีค่าความเป็นกรด (pH) เท่ากับ 0.5, 4.5, และ 5.5 ตามลำดับ โดยสภาพความเป็นกรดจะไปรบกวนระบบการทำงานของสารตัวเร่งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน ให้มีประสิทธิภาพน้อยลง นอกจากนี้การที่ยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดมาลิกแอนไฮไดรต์มีพฤติกรรมการวัลคาไนซ์แย่ที่สุดเป็นผลมาจากสารดัดแปรชนิดมาลิกแอนไฮไดรต์ จะแตกตัวได้ง่ายได้สารที่มีฤทธิ์เป็นกรด ทำให้มาลิกแอนไฮไดรต์ทำหน้าที่เป็นเหมือนสารหน่วง (Cure retarders) ส่งผลให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เกิดได้ช้าลง (Nelson and Kutty, 2004; Pasbakhsh *et al.*, 2009; วรากรณ์, 2552) ในขณะที่สารดัดแปรชนิดโกลซิดิลเมทาคริเลต ซึ่งมีหมู่ฟอกไซด์อยู่ในโครงสร้าง โดยที่หมู่ฟอกไซด์มีโอกาสเกิดอันตรกิริยากับสารตัวเร่ง ทำให้สารตัวเร่งจำนวนหนึ่งไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้ (ภูริพงศ์, 2548) ทำให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์นานขึ้น และเช่นเดียวกันในกรณีของการใช้สารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซินที่ซึ่งในขั้นแรกของการเกิดปฏิกิริยาจะมีการกำจัดน้ำจาก o-methylol phenol ได้เป็น Methylene quinone ก่อนจะเกิดปฏิกิริยากับพันธะคู่ในยางธรรมชาติ (Brydson, 1978) ส่งผลให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์นานขึ้น



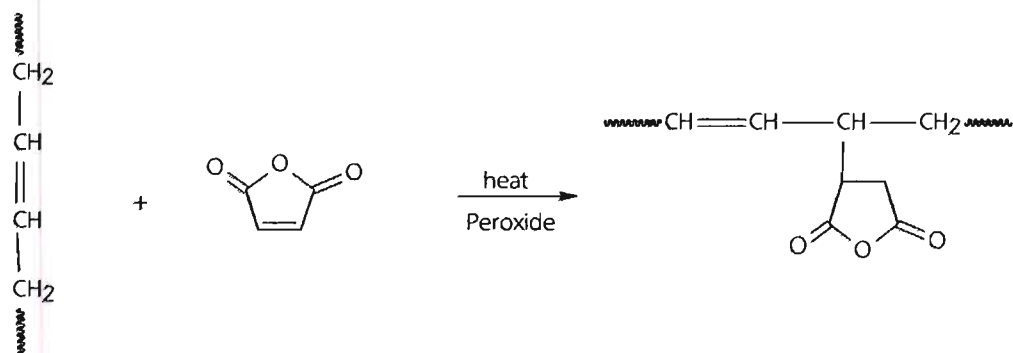
$R^1 = -H \text{ or } -CH_2OH$

$R = -C(CH_3)_2CH_2C(CH_3)_3$

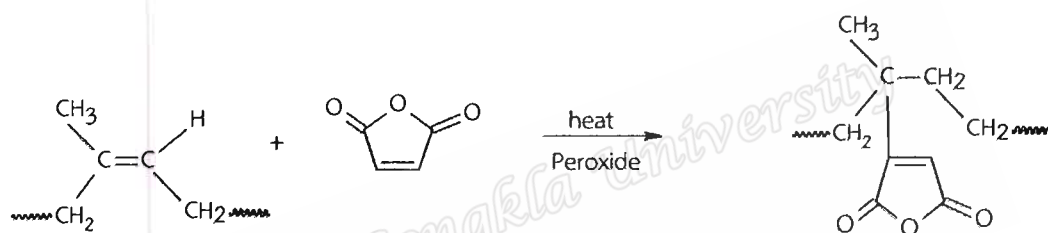


Chroman ring structure form reaction of phenolic resin with unsaturation sites in rubber

รูปที่ 4.6 ปฏิกริยาที่เป็นไปได้ระหว่างฟีนอลิกเรซินกับสายโซ่โมเลกุลของยางไม้เชื่อมตัวในยางรีเคลม
(a) และยางธรรมชาติ (b) (ดัดแปลงจาก Coran, 2005 และ Nakason *et al.*, 2006b)

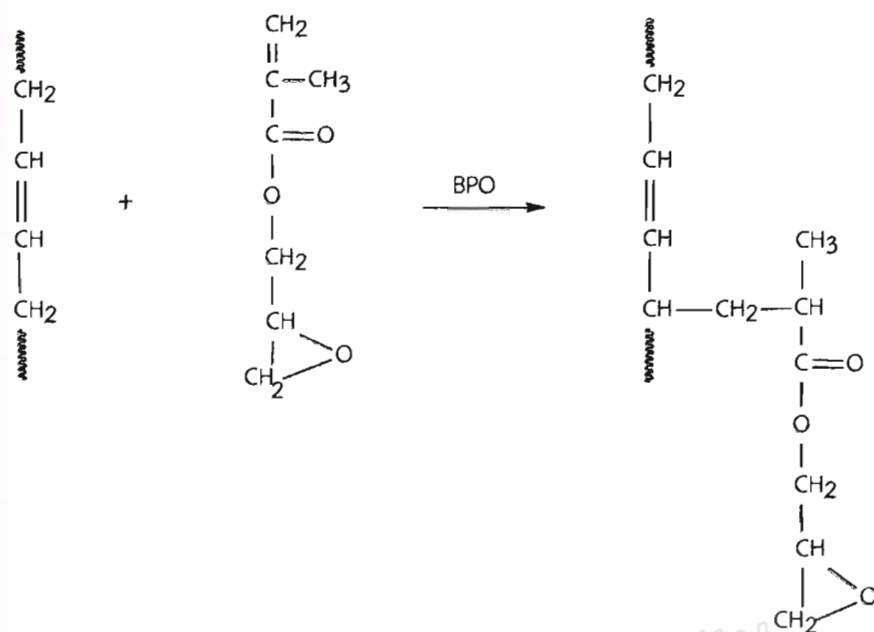


(a) Reaction of maleic anhydride with unsaturated backbone in reclaim rubber

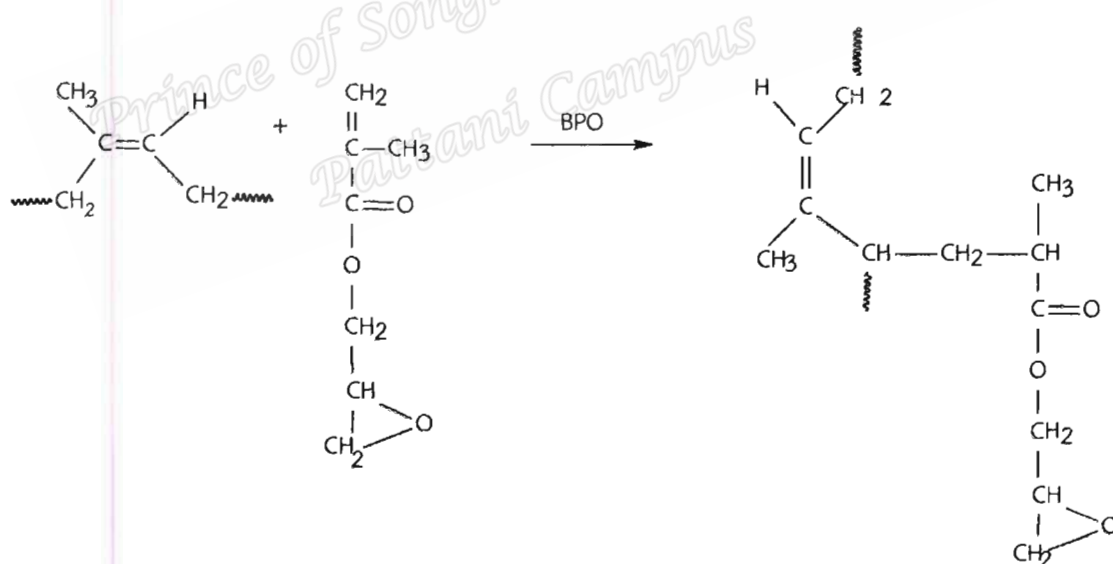


(b) Reaction of maleic anhydride with natural rubber

รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างมาลิกแอนไฮไดรด์กับสายโซ่โมเลกุลของยางไม่อิมตัวในยางรีเคลม (a) และยางธรรมชาติ (b) (Nelson, 2003 และ Nakason *et al.*, 2006a)



(a) Reaction of glycidyl methacrylate with unsaturated backbone in reclaim rubber

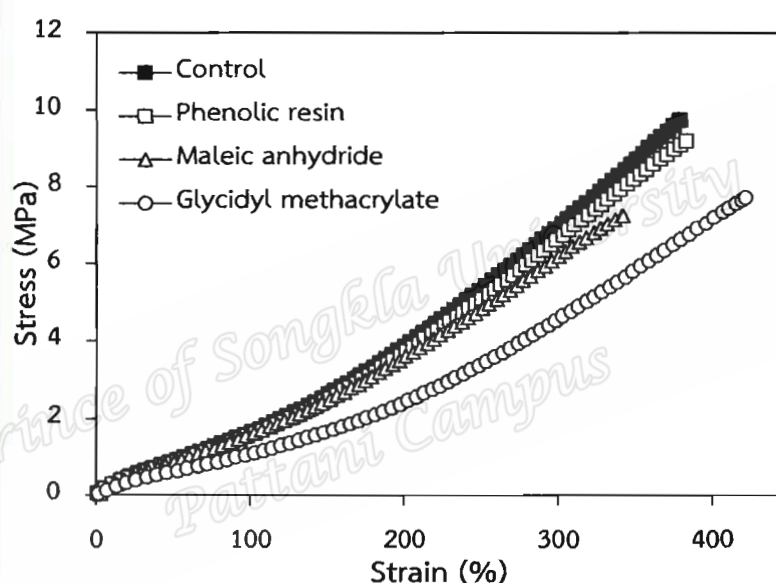


(b) Reaction of glycidyl methacrylate with natural rubber

รูปที่ 4.8 ปฏิกริยาที่เป็นไปได้ระหว่างไกลซิديلเมทาคริเลตกับสายโซ่โมเลกุลของยางไม้เชื่อมตัวใน
 ยางรีเคลม (a) และยางธรรมชาติ (b) (ดัดแปลงจาก Nelson, 2003 และ Juntuek *et al.*, 2011)

4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR

นำยางคอมพาวนด์จากการเบลนดระหว่างยางธรรมชาติ และยางรีเคลมมาศึกษาสมบัติเชิงกล โดยการนำยางคอมพาวนด์ไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเบ้า ที่อุณหภูมิ 150°C หลังจากนั้นนำยางที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็ง ตามวิธีการทดสอบในหัวข้อ 3.4.2, 3.4.3 และ 3.4.5 ตามลำดับ ผลทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนดยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อใช้สารดัดแปรชนิดต่างๆ พบว่ายางเบลนดระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมมีการผิดรูปแบบฮิสเทติก และเมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์การผิดรูปต่างๆ จะสังเกตได้ว่าความแข็งตึง (Stiffness) ของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรจะมีค่าน้อยกว่าสูตรที่ไม่ใส่สารดัดแปรมากนักตามชนิดสารดัดแปร

จากกราฟในรูปที่ 4.9 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ ยังแสดงผลการทดสอบสมบัติความสามารถในการคืนรูปและความแข็งด้วย

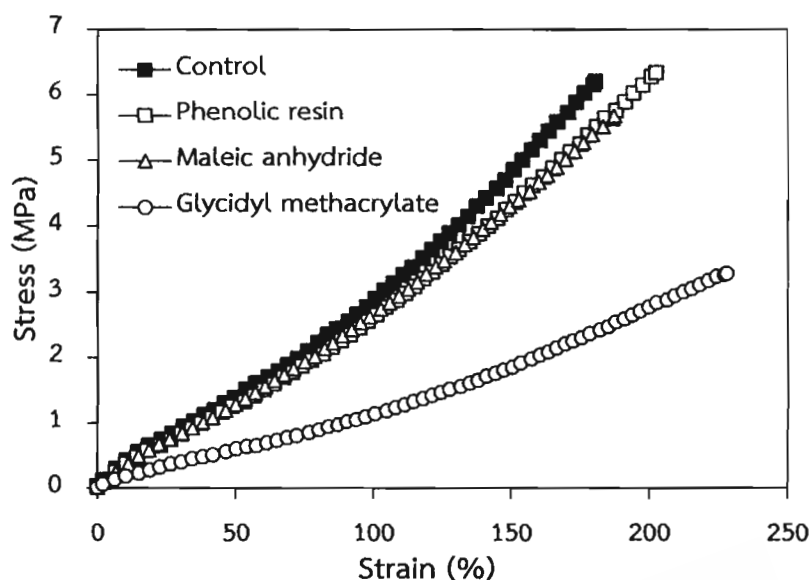
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีไซเคิลเมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

Type of modifier	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)
Control	9.85±0.12	383±19.05	51	2.07±0.12
Ph	9.25±0.09	384±12.07	51	2.22±0.07
MA	7.75±0.12	328±15.42	49	2.20±0.35
GM	7.91±0.19	427±13.35	43	2.23±0.06

จากตารางที่ 4.4 พบว่ายางเบลนด์สูตรที่ไม่ใส่สารดัดแปร และยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซิน มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความแข็งใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยางเบลนด์ที่ใช้สารดัดแปรชนิดมาลิกแอนไฮไดรด์ และไกลซิดิลเมทาคริเลต จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางที่ได้จากผลต่างของค่าทอร์กสูงสุด และค่าทอร์กต่ำสุด ($M_H - M_L$) ในตารางที่ 4.3 กล่าวคือ สารดัดแปรชนิดมาลิกแอนไฮไดรด์ และไกลซิดิลเมทาคริเลตจะไปรบกวนการทำงานของสารวัลคาไนซ์ส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางน้อยลง ยางเบลนด์จึงแสดงสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่ากรณียางเบลนด์ที่มีพันธะเชื่อมขวางสูง อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสนใจว่ายางเบลนด์ทุกสูตรที่ใช้สารดัดแปรต่างชนิดกันมีความสามารถในการคืนรูปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.3 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR

ศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มแรง โดยนำยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR ไปบ่มแรงด้วยการนำไปอบในตู้อบสำหรับบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.5



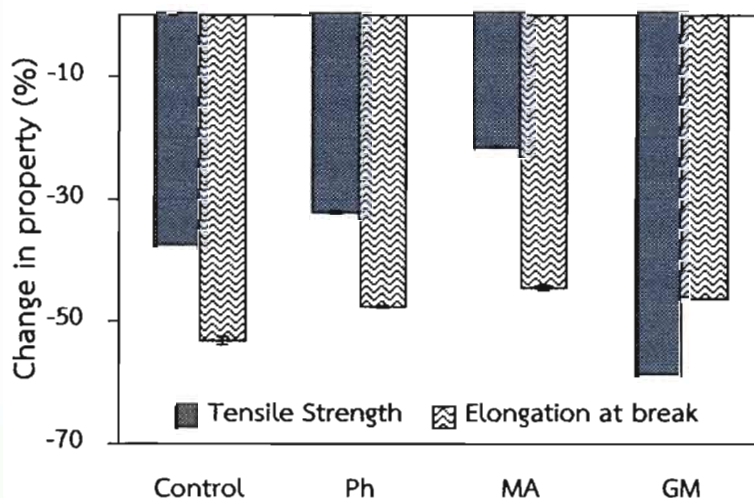
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์ภายหลังบ่มเร่งจากการเบลนด้วยธรรมชาติกับยางรีไซเคิลเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดหลังการบ่มเร่งเมื่อใช้สารดัดแปรชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะเช่นเดียวกับก่อนบ่มเร่ง กล่าวคือยางเบลนด์ยังคงแสดงลักษณะการผิดรูปแบบออสติค แต่มีสมบัติเชิงกลด้อยลง จากกราฟในรูปที่ 4.10 สามารถนำมาคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่ง ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.5 นอกจากนี้ ยังแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังบ่มเร่ง (% Change in property) และสามารถนำเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังบ่มเร่ง มาเขียนกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลภายหลังการบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด้วยธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

Type of modifier	Tensile strength (MPa)		Change in property of T.S. (%)	Elongation at break (%)		Change in property of E.B. (%)
	Unaged	Aged		Unaged	Aged	
Control	9.85±0.12	6.19±0.14	-37.73	383±19.05	182±5.57	-53.21
Ph	9.25±0.09	6.27±0.07	-32.36	384±12.07	201±8.49	-47.66
MA	7.75±0.12	5.67±0.18	-21.79	328±15.42	182±11.74	-44.51
GM	7.91±0.19	3.25±0.07	-58.91	427±13.35	229±6.69	-46.37

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 แสดงสมบัติเชิงกลและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางเบลนด์ NR/RR หลังบ่มแรง จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงมีค่าลดลงสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติที่มีค่าติดลบ ซึ่งผลดังกล่าวเป็นไปในแนวเดียวกันกับพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ที่เป็นแบบ Reversion กล่าวคือยางจะเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อระยะเวลาการวัลคาไนซ์มากเกินไป โดยจะทำให้มีความแข็งหรือมอดุลัสลดลง เนื่องจากผลของการตัดขาดสายโซ่ยางธรรมชาติและการเปลี่ยนรูปแบบพันธะเชื่อมขวางด้วยกำมะถันในโครงสร้างยาง ซึ่งในการทดลองใช้กำมะถัน 4 phr จะให้พันธะเชื่อมขวางในโมเลกุลยางแบบพอลิซัลฟิดิกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมักจะเกิดการแตกออกของพันธะเมื่อได้รับความร้อน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์เปลี่ยนแปลงไป



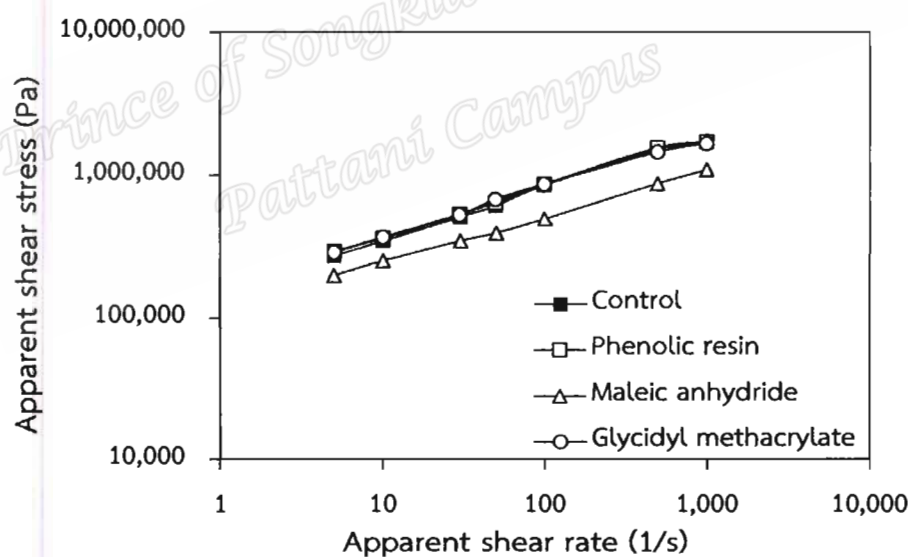
รูปที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด้วยธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารตัดแปรร

4.2.4 สมบัติการไหลของยางเบลนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารตัดแปรร

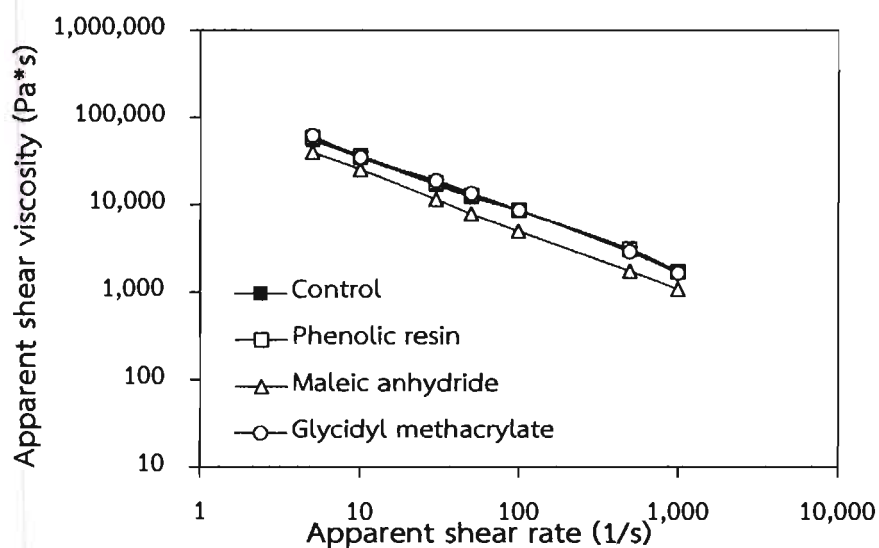
นำยางเบลนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมที่แปรสารตัดแปรรชนิดต่างๆ มาวิเคราะห์สมบัติการไหลตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.5 โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าความเค้นเฉือนปรากฏมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายใต้ความร้อนพอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุประเภท non-newtonian ชนิด shear thinning fluid ซึ่งวัสดุประเภทนี้มีความหนืดลดลงเมื่อได้รับแรงกระทำหรืออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏของยางเบลนที่ใช้สารตัดแปรรชนิดต่างๆ พบว่าเมื่อพิจารณาที่อัตราเฉือนเดียวกัน ยางเบลนแต่ละสูตรมีค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นยางเบลนที่ใช้สารตัดแปรรชนิดมาลิกแอนไฮไดรด์พบว่าให้ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏต่ำที่สุดอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจาก มาลิกแอนไฮไดรด์มีสภาพความเป็นกรดสูงที่สุด (pH 0.5) เมื่อเทียบกับสารตัดแปรรชนิดอื่นๆ ประกอบกับมาลิกแอนไฮไดรด์สามารถเกิดการปลดปล่อยกรดได้เมื่อได้รับความร้อน (Nelson and Kutty,

2004, Pasbakhsh *et al.*, 2009 และ วราภรณ์, 2552) จึงเป็นผลให้ยางมีระดับการวัลคาไนซ์ที่ต่ำ ยางเบลนด์ในสูตรนี้จึงมีความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนปรากฏต่ำที่สุด

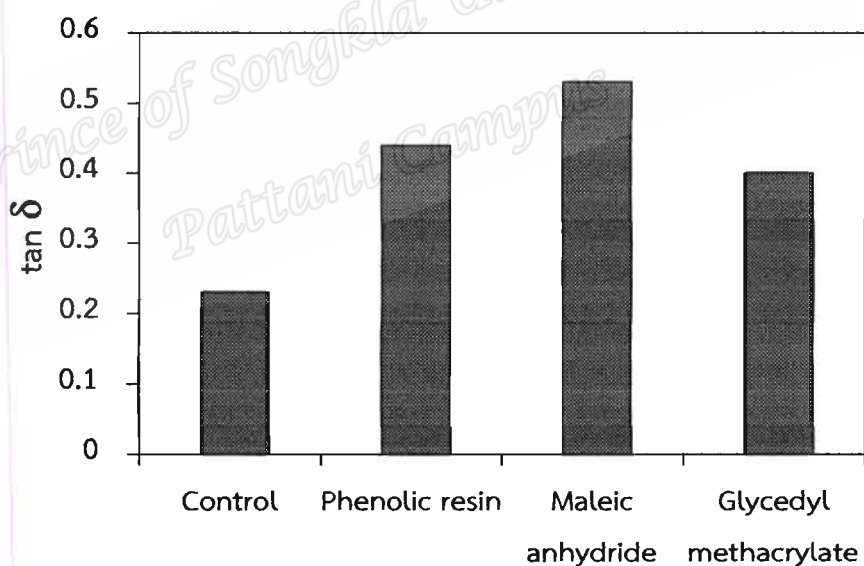
อย่างไรก็ตามจากผลของการทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี จะเห็นว่าไม่พบความแตกต่างของค่าสมบัติการไหล (ค่าความเค้นเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏ) เมื่อใช้สารดัดแปรต่างชนิดกัน จึงทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อดูค่า $\tan \delta$ ด้วยเทคนิค MDPT ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าการใช้สารดัดแปรต่างชนิดกัน จะไปรบกวนการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ และทำให้ค่า $\tan \delta$ ของวัสดุเปลี่ยนไป โดยพบว่ายางเบลนด์สูตรที่ไม่ใส่สารดัดแปรจะมีค่า $\tan \delta$ ต่ำที่สุด แสดงให้เห็นถึงระดับความเป็นอีลาสติกเมื่อยางได้รับการวัลคาไนซ์ปกติ ในขณะที่ยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรจะมีค่า $\tan \delta$ เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากยางเบลนด์เกิดการวัลคาไนซ์ที่ไม่สมบูรณ์จากผลการรบกวนของสารดัดแปรที่มีสภาพเป็นกรด โดยที่มอลิกแอนไฮไดรด์จะมีสภาพเป็นกรดแก่ที่สุด ($\text{pH} = 0.5$) จึงมีค่า $\tan \delta$ ของยางเบลนด์สูงที่สุด รองลงมาคือยางเบลนด์ที่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน และไกลซิديلเมทาคริเลต ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร

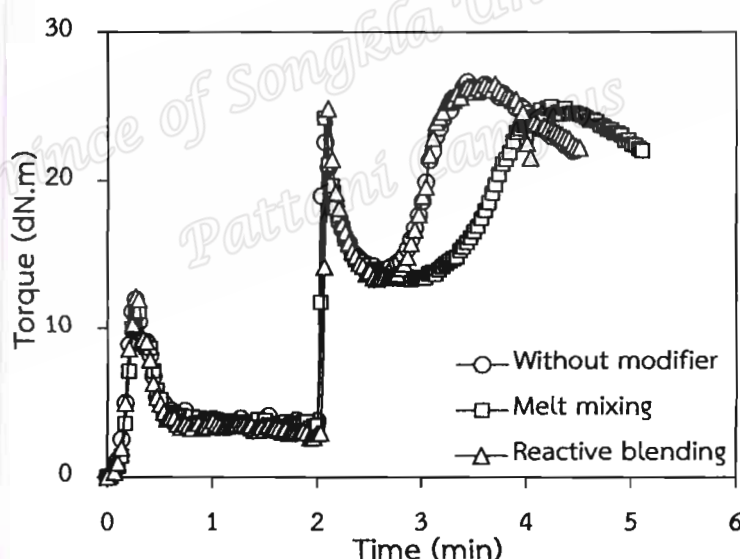


รูปที่ 4.14 $\tan \delta$ ที่ความถี่ 10 Hz ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร

4.3 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารตัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (NR/RR/PEC TPVs)

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 30/30/40 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยศึกษาผลของวิธีการผสมสารตัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซิน 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1. วิธีการตัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลมในสภาวะหลอม (Melt mixing method) โดยนำยางรีเคลมมาผสมกับสารตัดแปรก่อนนำไปเตรียมคอมพาวนด์และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ตามลำดับ และ วิธีที่ 2 วิธีการเบลนดแบบรีแอคทีฟ (Reactive blending method) โดยผสมสารตัดแปรในขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3

4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารตัดแปรต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด NR/RR/PEC



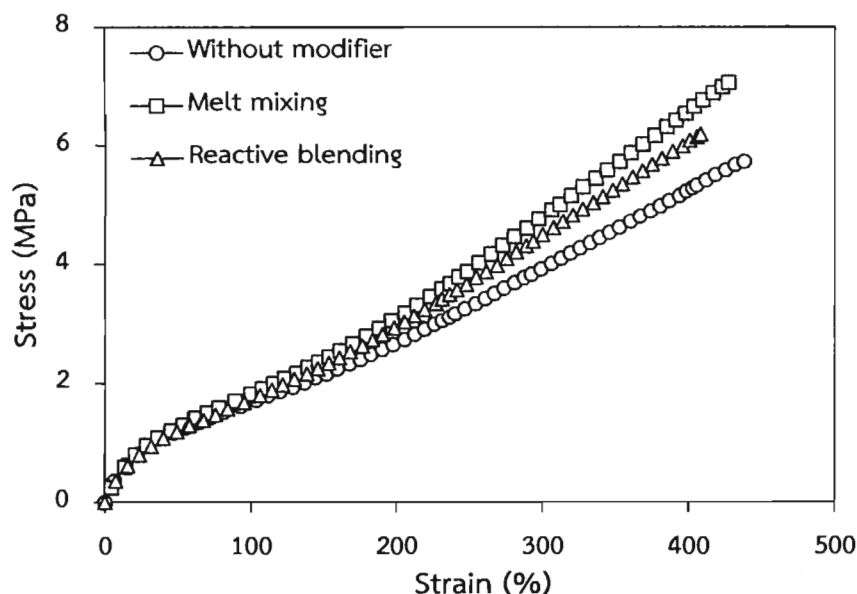
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารตัดแปร

จากค่าทอร์กการผสมพบว่าในช่วงเริ่มต้นการผสมค่าทอร์กการผสมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการใส่เม็ดพลาสติก PEC ลงไปในห้องผสม ซึ่ง PEC ที่ยังไม่หลอมจะต้านการหมุนโรเตอร์สูง ทำให้ทอร์กมีค่าสูง และค่าทอร์กจะลดลงเมื่อ PEC เกิดการหลอมเนื่องจากความร้อนและแรงเฉือนที่ได้รับ จากนั้นทอร์กจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่นาทีที่ 2 เนื่องจากการใส่ยางคอมพาวนด์ซึ่งมี

ความหนืดสูงลงไปในห้องผสม หลังจากนั้นเมื่ออย่างได้รับแรงเฉือนและความร้อนซึ่งจะส่งผลให้ยางนิ่มลงทำให้ค่าทอร์กจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งที่เวลาประมาณ 2.70 นาที สูตรที่ไม่ใส่สารดัดแปร (Without modifier) และวิธีดัดแปรผิวแบบ Reactive blending ค่าทอร์กจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่สูตรที่ใช้วิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing จะมีค่าทอร์กเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่เวลาประมาณ 3 นาที ซึ่งค่าทอร์กที่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้แสดงให้เห็นถึงการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซีในโมเลกุลยาง ทำให้มีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น หลังจากเฟสยางเกิดการวัลคาไนซ์สมบูรณ์หรือเมื่อถึงจุดที่ทอร์กสูงที่สุด จะบดผสมต่อเนื่องไปอีก 1 นาที เพื่อให้เฟสยางที่เกิดการวัลคาไนซ์เกิดการแตกออกและกระจายตัวไปในเฟสพลาสติกภายใต้การผสมที่มีแรงเฉือนสูง โดยจะสังเกตได้จากค่าทอร์กการผสมที่มีแนวโน้มลดลง และจากค่าทอร์กการผสมพบว่าการใช้วิธีผสมสารดัดแปรที่แตกต่างกันจะปรากฏลักษณะของทอร์กการผสมที่ต่างกัน กล่าวคือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมแบบไม่ใส่สารดัดแปร (Without modifier) และที่เตรียมโดยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Reactive blending จะมีลักษณะทอร์กการผสมเหมือนกัน ขณะที่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing จะมีทอร์กการผสมที่ตำแหน่งการเกิดไดนามิกสวัลคาไนซ์ชันช้ากว่า ทั้งนี้อาจเป็นผลจากวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing ทำการผสมสารดัดแปรกับยางรีเคลมในขั้นตอนแรกของการเตรียมยางรีเคลม ก่อนนำมาเตรียมเป็นยางคอมพาวนด์ และเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เป็นขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งการมีฟีนอลิกเรซินอยู่ในยางคอมพาวด์ ทำให้ฟีนอลิกเรซินมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาดัดแปรผิวประจักษ์กับโมเลกุลยางรีเคลมและยางธรรมชาติได้ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้จำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนเช่นกัน ทำให้รบกวนพลังงานความร้อนโดยรวมที่วัสดุได้รับในขณะผสม และพลังงานที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมันต์ ส่งผลให้การเกิดไดนามิกสวัลคาไนซ์ชันในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธี Melt mixing ช้าลงกว่าเดิม ซึ่งแตกต่างจากวิธีการเตรียมแบบ Reactive blending ที่ใส่สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินเข้าไปในขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยปกติฟีนอลิกเรซินจะเป็นสารวัลคาไนซ์ที่เกิดปฏิกิริยาได้ช้า จึงทำให้ ณ เวลาสิ้นสุดการผสมจึงยังไม่เห็นผลของการรบกวนการวัลคาไนซ์ในเฟสยางของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC โดยแปรวิธีการผสมสารดัดแปร 2 วิธีคือ Melt mixing method และ Reactive blending method มาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบด้วยวิธีการอัดแก้ว จากนั้นจึงนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังแสดงในรูปที่ 4.16



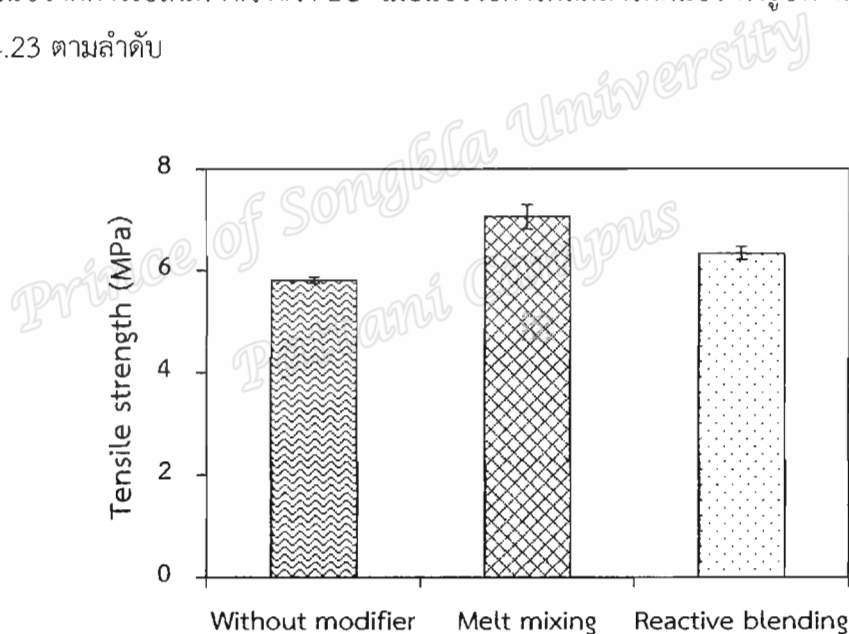
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.16 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์อย่างธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ แสดงลักษณะการผิดรูปแบบอิลาสติก โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่า ช่วงเริ่มต้นจนถึงที่มอดุลัสที่ 100% มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อใช้วิธีการผสมสารดัดแปรที่แตกต่างกัน เนื่องจากในช่วงแรกของการยืดเฟสพลาสติกเป็นเฟสที่ทำหน้าที่รับแรงเค้น แต่เมื่อพิจารณาโมดูลัสและระยะยืดช่วงสุดท้าย พบว่า NR/RR/PEC TPVs ที่ใส่สารดัดแปรคือ Melt mixing และ Reactive blending จะให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าไม่ใส่สารดัดแปร แสดงให้เห็นถึงผลของการใส่สารดัดแปรส่งผลต่อความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบผลของการใส่สารดัดแปรด้วยวิธีการผสมที่แตกต่างกันทั้ง 2 วิธี พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing ให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Reactive blending เล็กน้อย จากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในรูปที่ 4.16 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.6 รวมถึงยังแสดงผลการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงและการผิดรูปถาวรแบบดิ่งด้วย

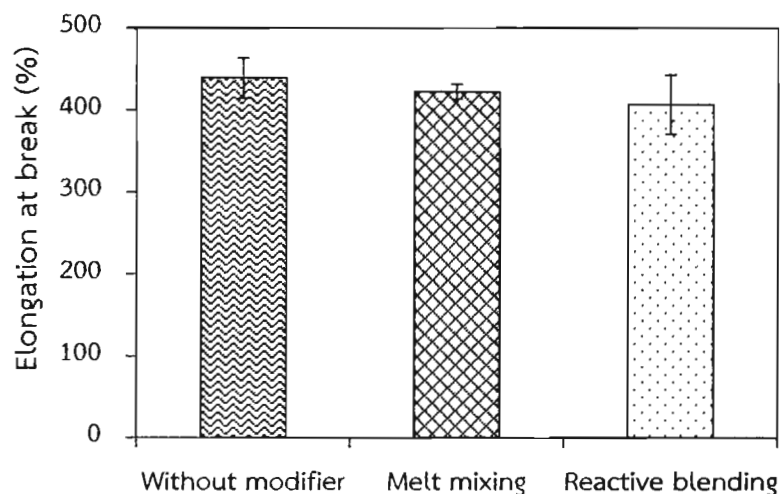
ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

Blend methods	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tension set (%)	Hardness (shore A)
Without modifier	5.81±0.06	439±24.64	6.28±0.58	52
Melt mixing	7.06±0.24	422±8.87	5.13±0.44	55
Reactive blending	6.34±0.14	406±35.96	5.17±0.86	55

จากตารางที่ 4.6 สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืดจนขาด ค่าการผิดรูปถาวรแบบตั้ง และค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร ดังรูปที่ 4.17, 4.18, 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ

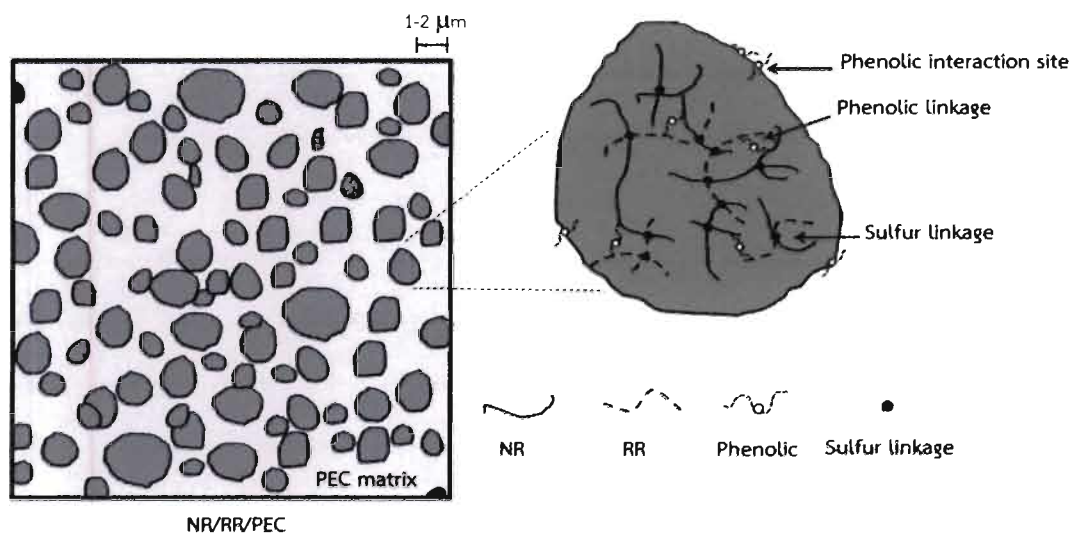


รูปที่ 4.17 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร



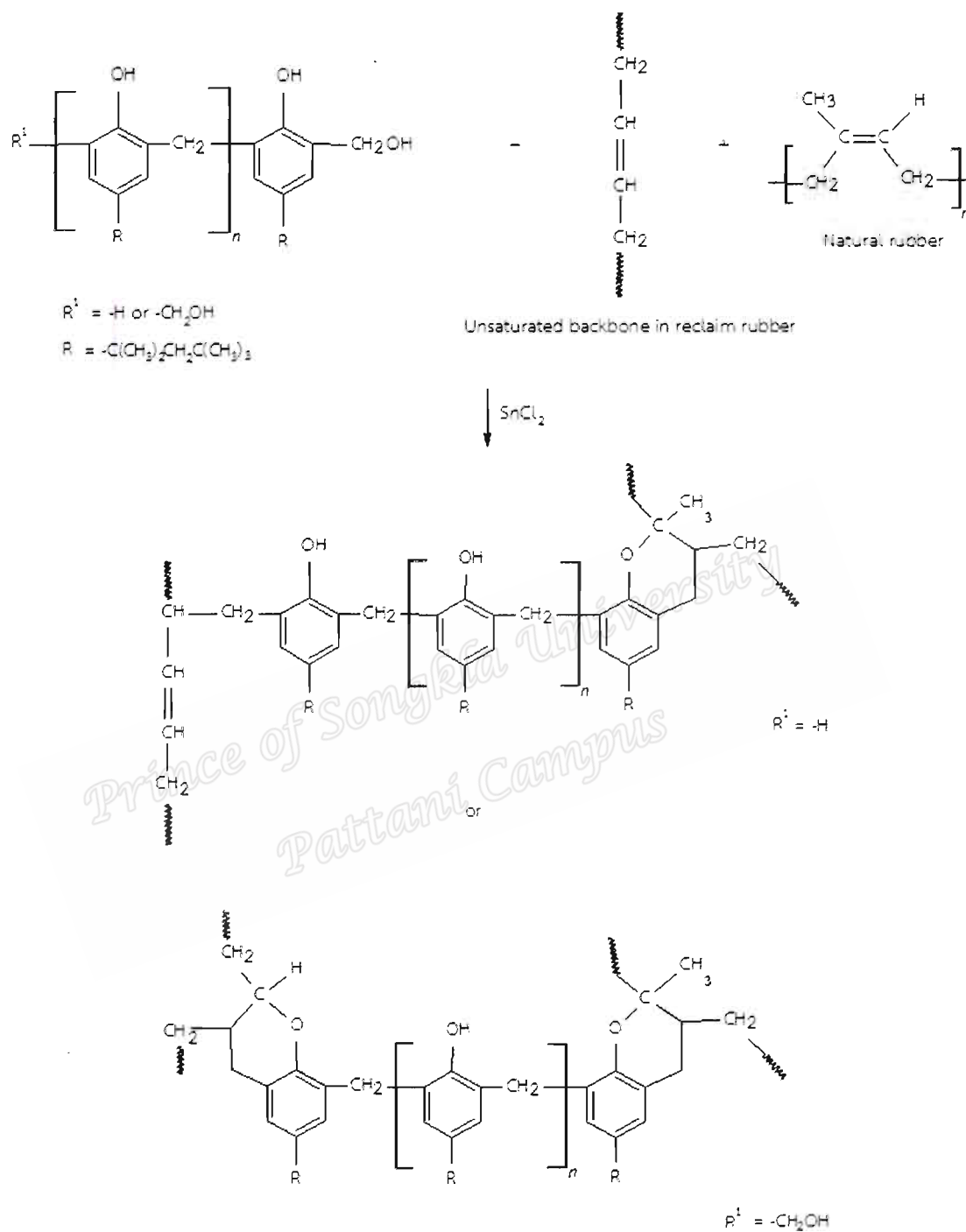
รูปที่ 4.18 ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารตัดแปรร

จากที่รูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อใช้สารตัดแปรรเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าไม่ใส่สารตัดแปรร เนื่องจากสารตัดแปรรเข้าไปช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางรีเคลมกับยางธรรมชาติทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวประจัญสูงขึ้น ส่งผลให้การส่งผ่านแรงเค้นระหว่างรอยต่อของโมเลกุลยางดีขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น รวมถึงเมื่อมีฟีนอลิกเรซินจะมีโอกาสเกิดพันธะเชื่อมขวางแบบ C-C และ C-O ซึ่งมีพลังงานพันธะ 346 kJ/mol และ 358 kJ/mol ตามลำดับ ทำให้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากเดิมที่มีการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวซึ่งจะให้พันธะเชื่อมขวางส่วนใหญ่แบบพอลิซัลไฟด์ (C-S_x-C) ซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำกว่า (270 kJ/mol) (Brydson, 1978) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนการผสมที่แตกต่างระหว่างวิธีการผสมสารตัดแปรรทั้ง 2 วิธี คือ Melt mixing และ Reactive blending พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยการใช้วิธีผสมสารตัดแปรรแบบ Melt mixing ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่าวิธีการผสมสารตัดแปรรแบบ Reactive blending เนื่องจากการใช้วิธี Melt mixing จะเตรียมยางรีเคลมบดผสมกับฟีนอลิกเรซินในขั้นตอนแรกก่อนที่จะนำยางรีเคลมผสมฟีนอลิกเรซินที่ได้ไปเตรียมเป็นยางคอมพาวนด์ และนำไปเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ในลำดับสุดท้าย (วิธีการเตรียมแบบ Melt mixing method แสดงในรูปที่ 3.2) ทำให้ฟีนอลิกเรซินที่อยู่ในยางรีเคลมมีโอกาสเกิดอันตรกิริยาได้กับทั้งเฟสยางและเฟสพลาสติก ซึ่งความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟสแสดงในรูปที่ 4.19

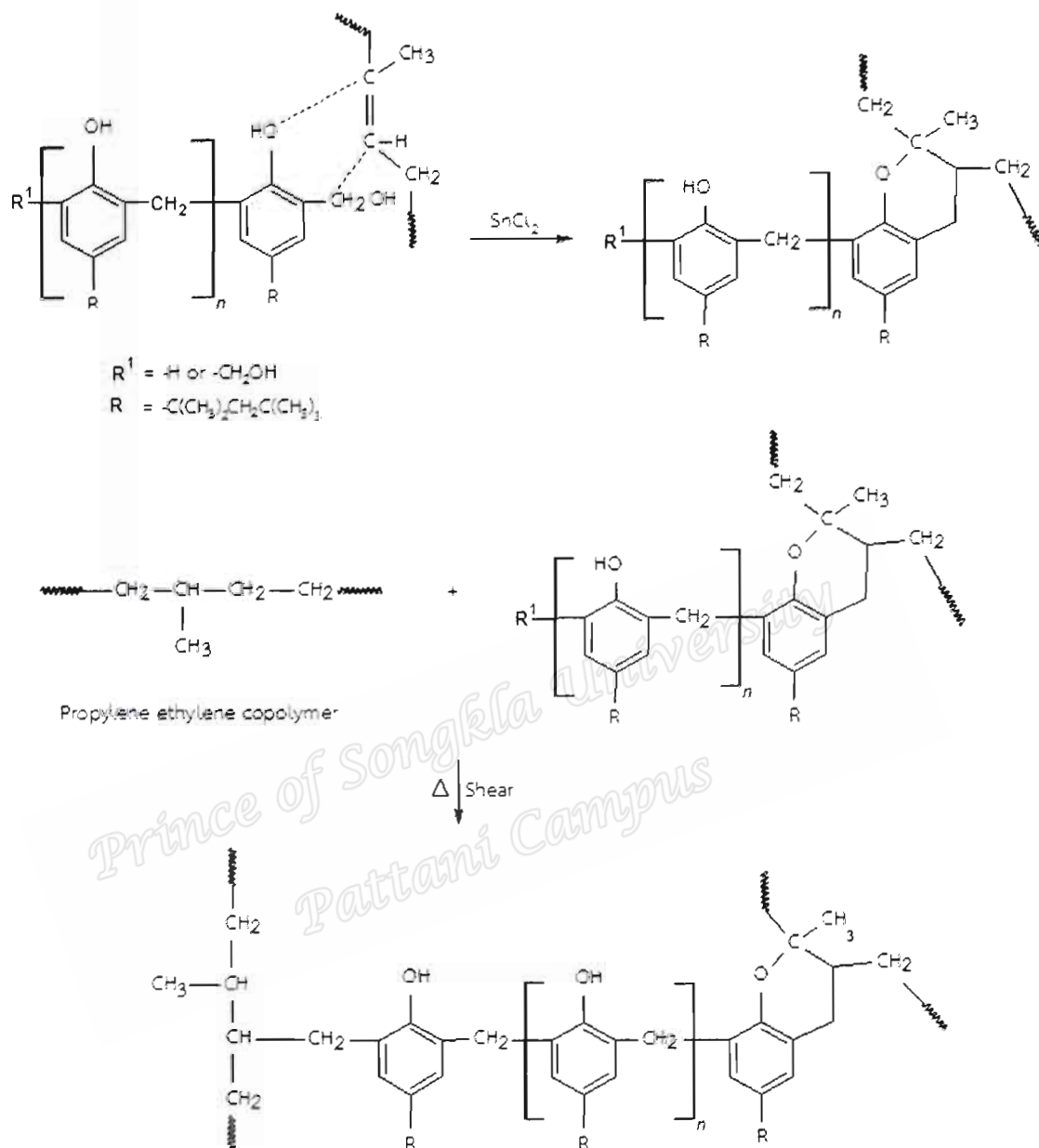


รูปที่ 4.19 โอกาสเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางรีเคลม ยางธรรมชาติ และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ กับฟีนอลิกเรซินเมื่อใช้วิธีการผสมแบบ Melt mixing method

โดยที่หมู่เมทิลลอล (Methylol groups, $-\text{CH}_2\text{OH}$) ในโมเลกุลของฟีนอลิกเรซินสามารถเกิดปฏิกิริยากับพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลของยางได้ (Nakason *et al.*, 2006b) ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.20 รวมถึงมีโอกาที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟสยางและเฟสโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ได้ ดังปฏิกิริยาที่แสดงดังรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ด้วยวิธีผสมสารตัดแปรรูปแบบ Melt mixing ซึ่งผสมสารตัดแปรรูปฟีนอลิกเรซินกับยางรีเคลมก่อนในขั้นตอนแรก ก่อนนำไปเบลนด์กับยางธรรมชาติเพื่อเตรียมคอมพาวนด์ ทำให้ช่วยเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเฟสยาง รวมถึงช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางรีเคลมและยางธรรมชาติก่อนที่จะนำไปเบลนด์กับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์เพื่อเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ในขั้นตอนสุดท้าย นอกจากนี้การใส่ฟีนอลิกเรซินในขั้นตอนแรกของการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะทำให้ฟีนอลิกเรซินมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับเฟสต่างๆ เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้มากกว่าวิธีการเตรียมแบบ Reactive blending ซึ่งจะใส่ฟีนอลิกเรซินในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ซึ่งวิธีการนี้มีระยะเวลาในการกระจายตัวและเกิดปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบเบลนด์ (เกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟส) ที่สั้นกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธีการผสมแบบ Melt mixing มากจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธีการผสมแบบ Reactive blending มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าการใช้วิธีการผสมสารตัดแปรรูปแบบ Melt mixing method

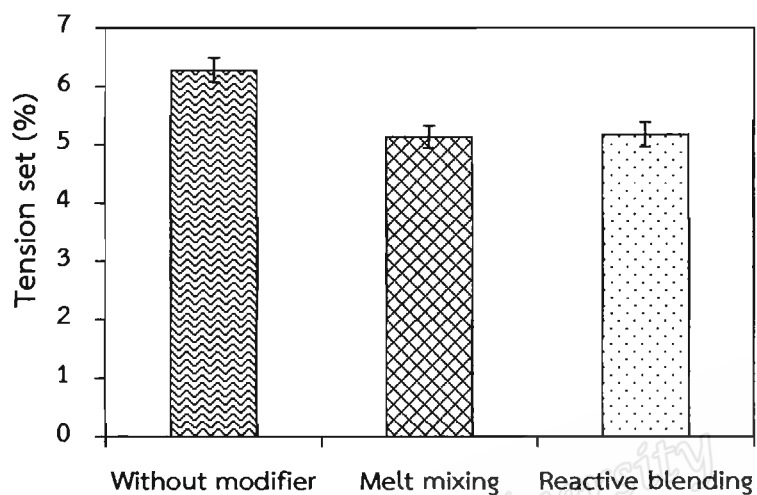


รูปที่ 4.20 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางรีคอม และยางธรรมชาติ กับฟีนอลิกเรซิน (ดัดแปลงจาก Nakason *et al.*, 2006b; Nelson, 2003; Brydson, 1978)

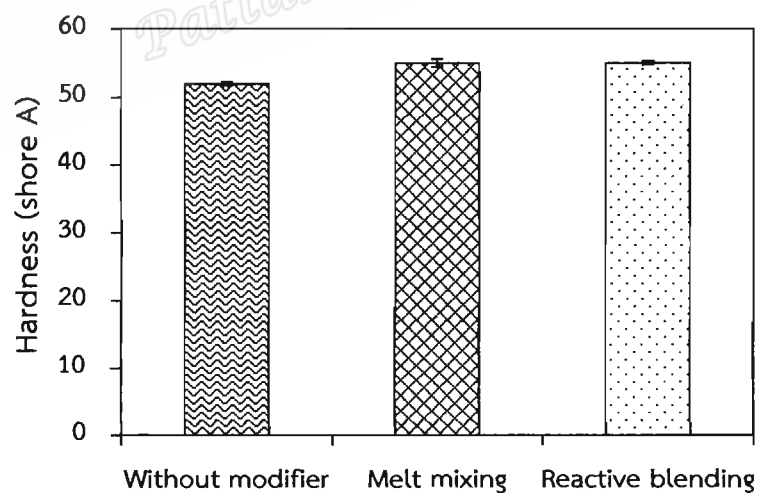


รูปที่ 4.21 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างเฟสยาง กับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เมื่อใช้สารดัดแปร ฟีนอลิกเรซิน (ดัดแปลงจาก Nakason *et al.*, 2006b; George *et al.*, 1999; Brydson, 1978)

การผิดรูปถาวรแบบดึงและความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรรูปวิธีการผสมสารตัดแปรรูป แสดงดังรูปที่ 4.22 และ 4.23



รูปที่ 4.22 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรรูปวิธีการผสมสารตัดแปรรูป

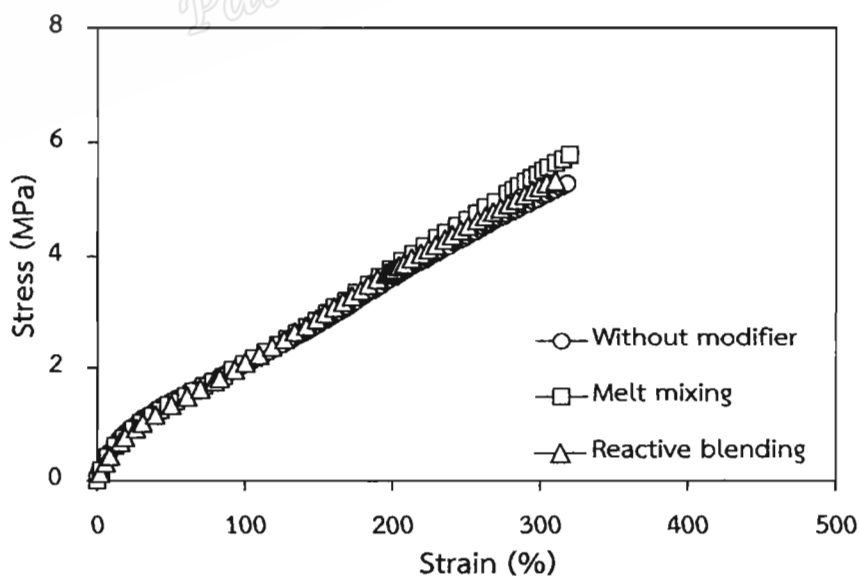


รูปที่ 4.23 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรรูปวิธีการผสมสารตัดแปรรูป

จากรูปที่ 4.22 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรมีความสามารถคืนรูปได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปร ขณะที่เมื่อใช้วิธีการผสมที่แตกต่างกันความสามารถในการคืนรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ไม่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงซึ่งแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปรเล็กน้อย แต่ให้ค่าไม่แตกต่างกันเมื่อใช้วิธีการผสมสารดัดแปรที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารดัดแปรที่เติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของเฟสยาง และเฟสพลาสติกในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีผลต่อการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวประจัญดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้

4.3.3 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC โดยแปรวิธีการผสมสารดัดแปรวิธีต่างๆ ตามวิธีการในหัวข้อ 3.3.3 จากนั้นนำมาทดสอบความต้านทานต่อการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำตัวอย่างออกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรวิธีการผสมที่ต่างกัน จากรูปพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีลักษณะการผิดรูปแบบอิลาสติกเช่นเดียวกับก่อนบ่มแรง แต่พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้วิธีการผสมที่ต่างกันภายหลังบ่มแรงจะให้ความอดุลัสใกล้เคียงกัน และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในรูปที่ 4.24 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 รวมถึงแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้วย

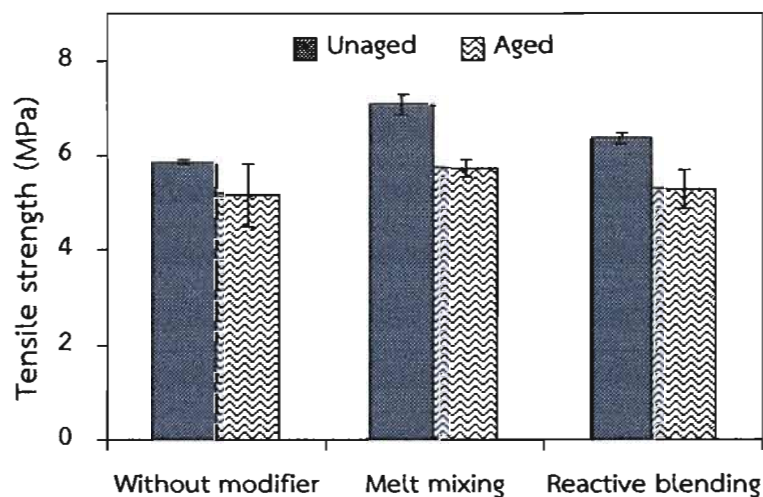
ตารางที่ 4.7 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารตัดแปร

Blend method	Tensile strength (MPa)		Change in property of tensile strength (%)
	Unaged	Aged	
Without modifier	5.81±0.06	5.16±0.67	-11.19
Melt mixing	7.06±0.24	5.72±0.19	-18.98
Reactive blending	6.34±0.14	5.28±0.41	-16.72

ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารตัดแปร

Blend method	Elongation at break (%)		Change in property of elongation at break (%)
	Unaged	Aged	
Without modifier	439±24.64	328±24.08	-25.28
Melt mixing	422±8.87	320±9.58	-24.17
Reactive blending	406±35.96	302±17.54	-25.62

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารตัดแปร แสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 รวมถึงแสดงกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงหลังบ่มแรงในรูปที่ 4.27



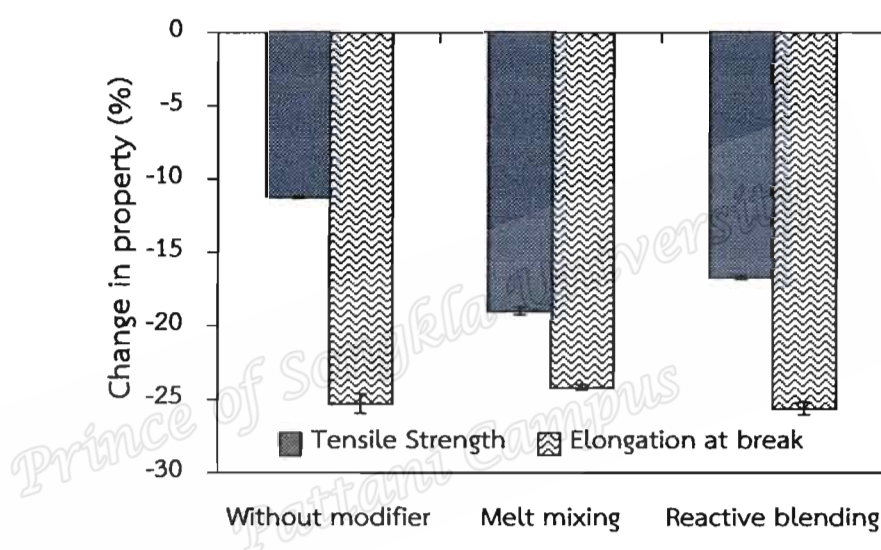
รูปที่ 4.25 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร



รูปที่ 4.26 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปร และที่ใส่สารดัดแปรด้วยวิธีการผสมทั้ง 2 วิธี ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงต่ำกว่าก่อนบ่มแรง เนื่องจากยางสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้ ทำให้เกิดการตัดสายโซ่ (Chain

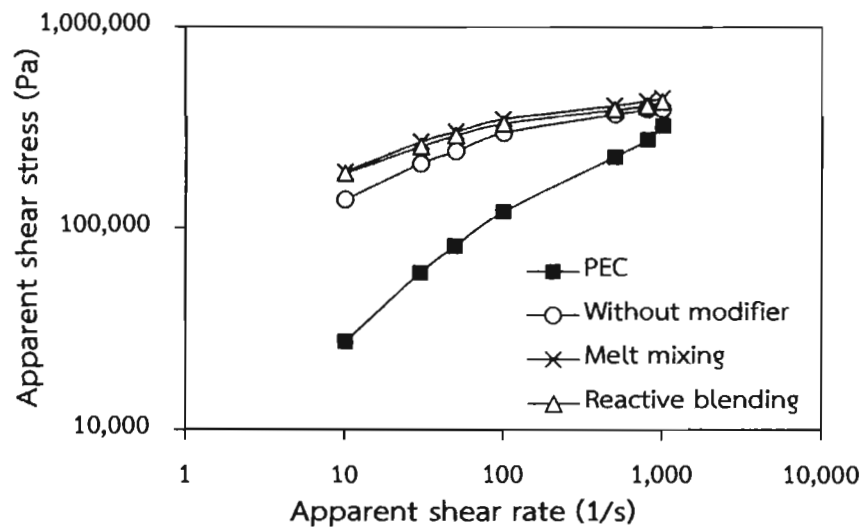
scission) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ลดลง ก่อปรกับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบปกติซึ่งมีพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลไฟด์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะแตกออกได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติซึ่งแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดให้ค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติที่ลดลงหลังการบ่มเร่ง และพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทั้ง 3 สูตรทั้งที่ไม่ใช้สารดัดแปรและแปรวิธีการผสม 2 วิธี มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดไม่แตกต่างกัน



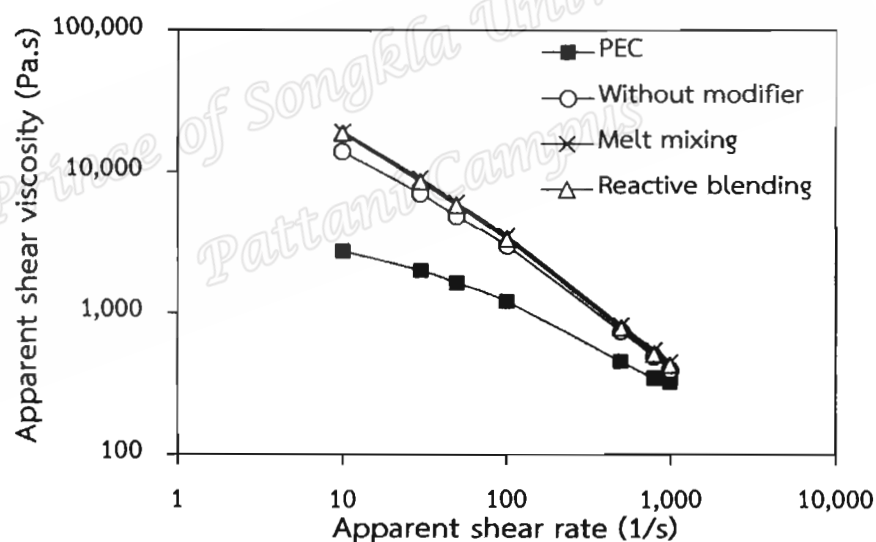
รูปที่ 4.27 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

4.3.4 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่แปรวิธีการผสมสารดัดแปรวิธีต่างๆ มาวิเคราะห์สมบัติการไหลตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.5 โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ได้รับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29



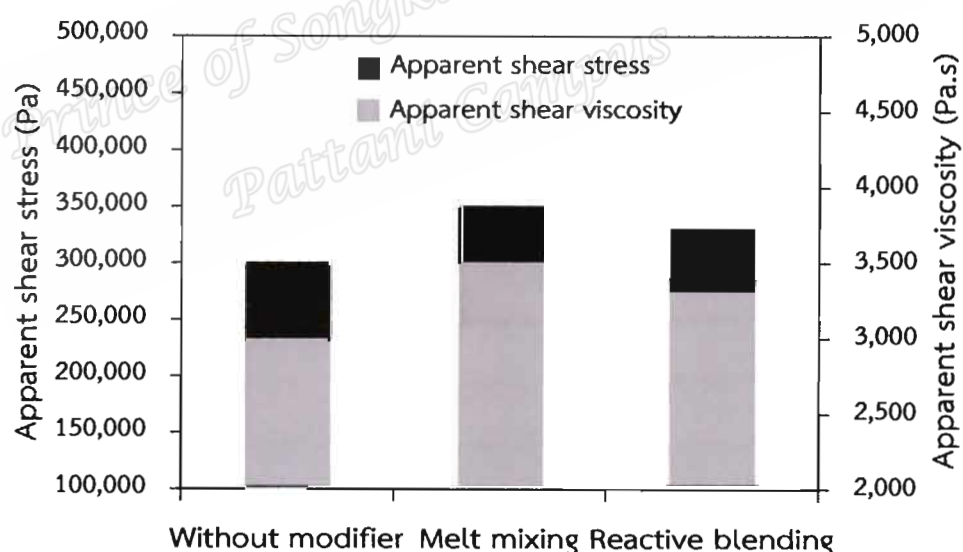
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 พบว่าค่าความเค้นเฉือนปรากฏมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉือนปรากฏที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า NR/RR/PEC TPVs เป็นของไหลประเภทนอนนิวโตเนียน (non-Newtonian fluid) มีพฤติกรรมการไหลแบบลดความหนืด (Shear thinning behavior) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) กล่าวคือขณะที่อัตราเฉือนเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์เกิดการหลอมและเกิดการ

จัดเรียงตัวใหม่ เพื่อให้โมเลกุลของยางผ่านง่ายขึ้น ทำให้ค่าความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลง โดยพบว่าค่าความเค้นเฉือนปรากฏ และค่าความหนืดเฉือนปรากฏของเม็ดพลาสติก PEC และมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ NR/RR/PEC TPVs เนื่องจาก PEC เป็นพลาสติกในกลุ่มพลาสติกโพลีเอทิลีน คือ มีความเป็นพลาสติก และอีลาสติกโมเลกุล มีความอ่อนตัว สามารถเกิดการหลอมและไหลได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน การนำยางมาใส่ในพลาสติกเพื่อเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เป็นการเพิ่มความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ทำให้เกิดการหลอมและไหลได้ยากขึ้น ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง NR/RR/PEC TPVs ทั้ง 3 สูตร พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรมีความเค้นเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารดัดแปร ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมสารดัดแปรทั้ง 2 วิธี พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการผสมสารดัดแปรโดยใช้วิธี Melt mixing จะให้ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและค่าความหนืดเฉือนปรากฏสูงกว่าการผสมสารดัดแปรโดยใช้วิธี Reactive blending เล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าความเค้นเฉือนปรากฏและค่าความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือนคงที่ค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.30



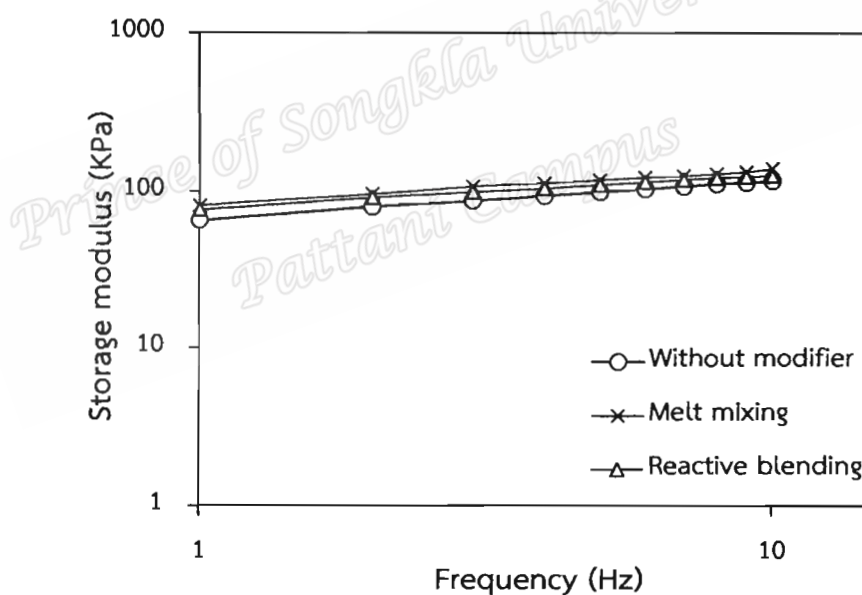
รูปที่ 4.30 ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่าการผสมสารดัดแปรโดยใช้วิธี Melt mixing จะทำให้พอลิเมอร์มีความเค้นเฉือนสูงและไหลได้ยากที่สุด ซึ่งเป็นผลจากวิธีการผสมพอลิเมอร์ด้วยวิธี Melt mixing ที่จะเตรียมยางรีเคลมผสมกับพอลิเมอร์ก่อน ทำให้พอลิเมอร์มีโอกาสเพิ่มความเข้ากัน

ได้ระหว่างเฟสยางรีเคลมกับยางธรรมชาติ รวมถึงเฟสยางกับเฟสพลาสติก โดยแสดงปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางรีเคลม ยางธรรมชาติ และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ กับฟีนอลิกเรซิน ในรูปที่ 4.19 ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) มากกว่าการใช้วิธี Reactive blending ซึ่งใส่ฟีนอลิกเรซินในขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย

4.3.5 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารตัดแปรต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

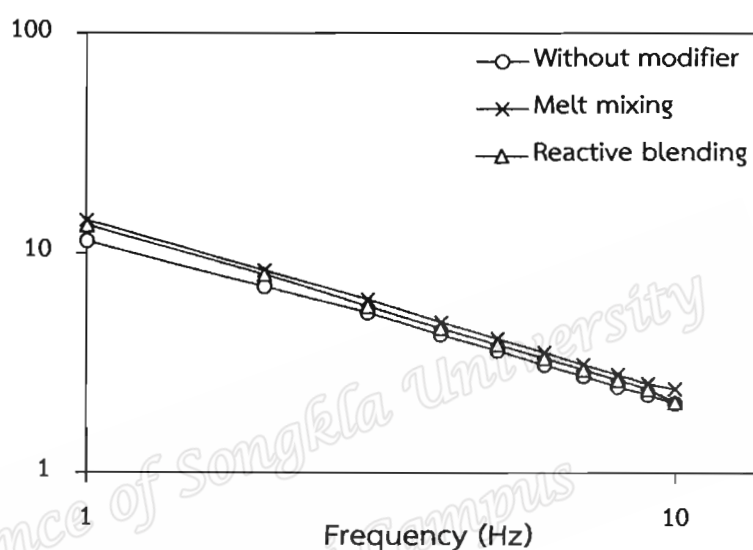
นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่แปรวิธีการผสมสารตัดแปรวิธีต่างๆ มาทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.6 ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน และ $\tan \delta$ กับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.31-4.33



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารตัดแปร

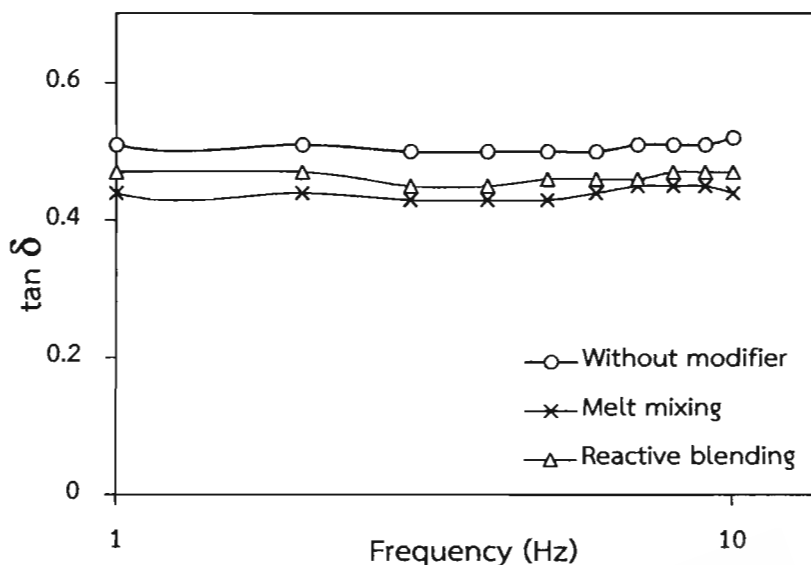
จากรูปที่ 4.31 พบว่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงแรกที่มีความถี่ต่ำพอลิเมอร์ยังมีเวลาในการพักความเค้น (Relaxation time) แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเวลาในการพักความเค้นของโมเลกุลสั้นลง ทำให้โมเลกุลตอบสนองไม่ทันต่อความเค้นและความเครียดที่กระทำบนสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ค่ามอดุลัสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกันพบว่าค่ามอดุลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สูตรที่ใส่สารตัดแปร จะมีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติก

วัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารดัดแปร (Without modifier) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการผสมสารดัดแปรพบว่า การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้วิธี Melt mixing ให้ค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่าวิธี Reactive blending เล็กน้อย แสดงให้เห็นการใส่ฟีนอลิกเรซินในขั้นตอนแรกของการเตรียมจะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสได้ดีกว่า ทำให้สามารถส่งผ่านแรงเค้นระหว่างเฟสได้ดี ทำให้เก็บสะสมพลังงานบนสายโซ่โมเลกุลได้มาก เป็นผลให้มอดุลัสสะสมมากขึ้น



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.32 พบว่าความหนืดเชิงซ้อนมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดปรากฏจากการทดสอบสมบัติการไหลในหัวข้อที่ 4.3.4 ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของการไหลแบบซูโดพลาสติก โดยที่เมื่อพอลิเมอร์เบลนด์เกิดการหลอมเนื่องจากความร้อนและความถี่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้การต่อต้านการไหล (ความหนืดเชิงซ้อน) ลดลงตามความถี่ และเมื่อพิจารณาค่าความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่เดียวกันพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing จะให้ค่าความหนืดเชิงซ้อนสูงที่สุด รองลงมาคือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Reactive blending และ Without modifier ตามลำดับ เนื่องจากการใส่ฟีนอลิกเรซินในขั้นตอนการเตรียมยางรีเคลมซึ่งเป็นขั้นตอนแรกทำให้ฟีนอลิกเรซินมีเวลาและโอกาสในการเกิดปฏิกิริยากับเฟสต่างๆ มากกว่าวิธีการเตรียมแบบ Reactive blending ส่งผลให้ต้องใช้แรงเฉือนสูงขึ้นในการทำให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหว เป็นผลให้การใช้วิธีผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing มีค่าความหนืดเชิงซ้อนสูงที่สุด



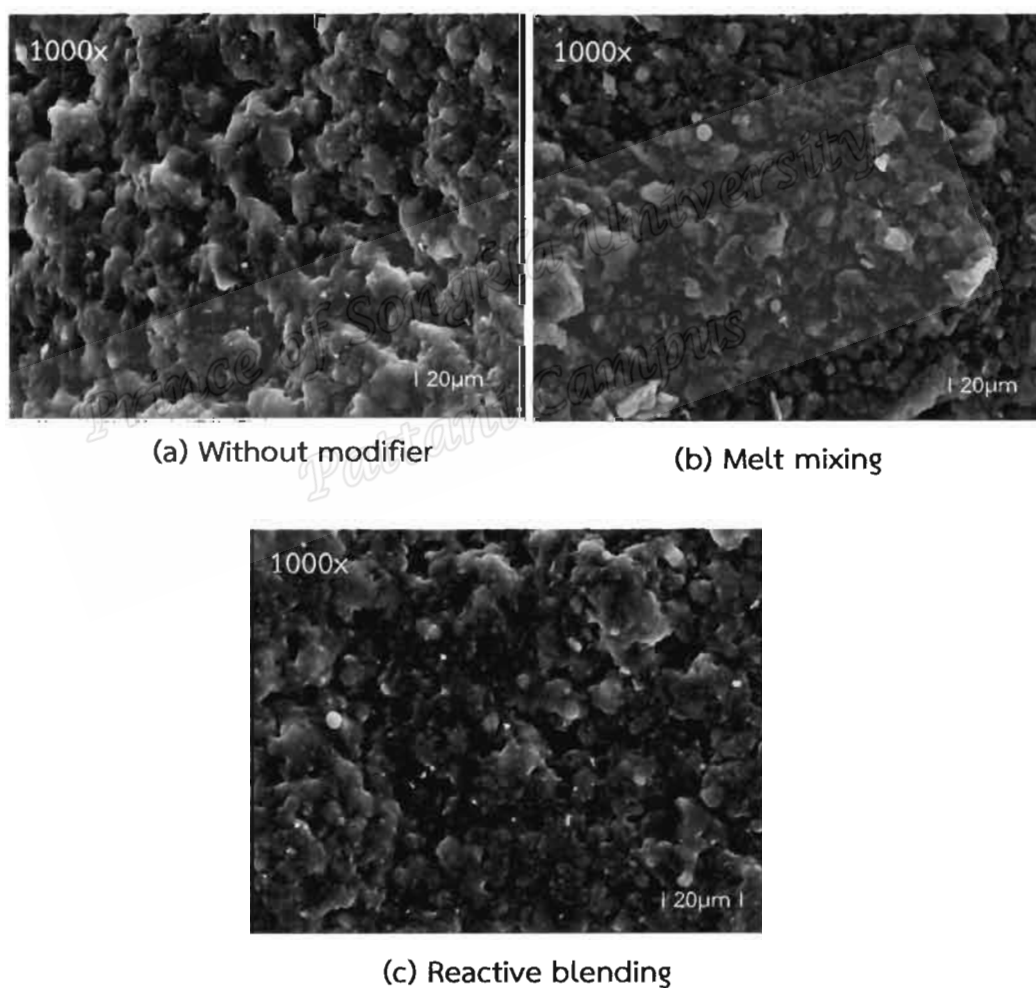
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับความถี่ ซึ่งค่า $\tan \delta$ เป็นสัดส่วนระหว่างมอดุลัสสูญเสียต่อมอดุลัสสะสม โดยที่ค่า $\tan \delta$ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นอีลาสติกของพอลิเมอร์ กล่าวคือถ้า $\tan \delta$ มีค่าต่ำแสดงว่าวัสดุมีสมบัติอีลาสติกสูงสามารถผ่อนคลายความเค้นจากแรงกระทำได้ดี โดยจะพบว่าค่า $\tan \delta$ มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สารดัดแปร กล่าวคือเมื่อใช้ฟีนอลิกเรซินจะทำให้วัสดุสามารถตอบสนองกลับได้ดี มีสมบัติอีลาสติกปรับปรุงดีขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากฟีนอลิกเรซินซึ่งแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ช่วยให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความสามารถในการผ่อนคลายความเครียดเนื่องจากการได้รับแรงกระทำในโมเลกุลได้ดี จึงทำให้มีค่า $\tan \delta$ ต่ำ จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช่วิธีการผสมสารดัดแปร 2 วิธี พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยการผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Melt mixing มีค่า $\tan \delta$ ต่ำกว่าการผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Reactive blending อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการใส่ฟีนอลิกเรซินในขั้นตอนการเตรียมที่แตกต่างกันซึ่งได้อธิบายไปแล้วก่อนหน้านี้ ในหัวข้อที่ 4.3.2 กล่าวคือการผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Melt mixing จะบดผสมฟีนอลิกเรซินกับยางรีคลมก่อน เพื่อให้ฟีนอลิกเรซินอยู่ในเฟสของยางรีคลมก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยากับยางธรรมชาติและโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ ต่อไปในขั้นตอนของการเตรียมคอมพาวนด์และการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยจะเห็นว่าวิธีการเตรียมแบบ Melt mixing มีเวลาสำหรับให้ฟีนอลิกเรซินเกิดการกระจายตัวและเกิดปฏิกิริยากับเฟสอื่นๆ มากกว่าการใช้การผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Reactive

blending จึงส่งผลให้การผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Melt mixing สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสได้มากกว่าวิธี Reactive blending

4.3.6 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC ที่แปรรูปวิธีการผสมสารดัดแปรวิธีต่างๆ มาศึกษาสัณฐานวิทยา ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.7 ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.34



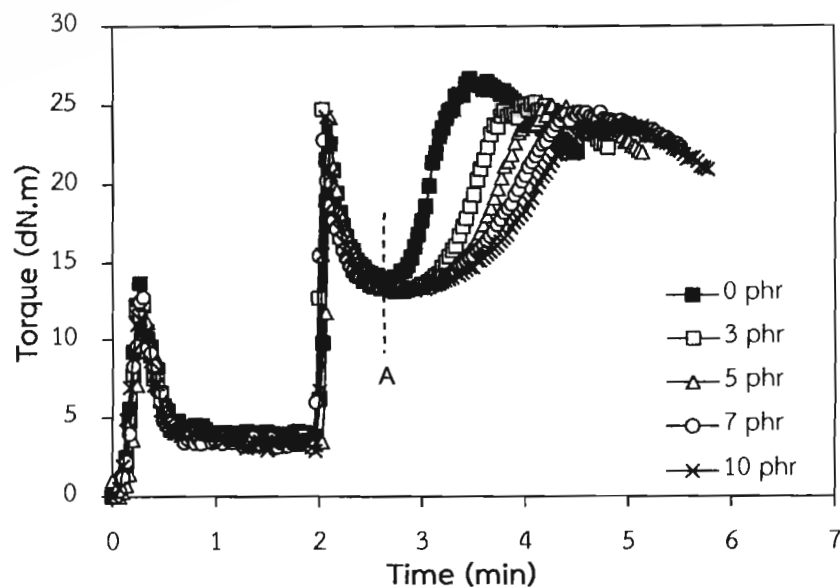
รูปที่ 4.34 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด NR/RR/PEC เมื่อแปรรูปวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.34 พบว่าเมื่อใช้วิธีการผสมสารดัดแปรที่แตกต่างกันจะให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกันด้วย โดยสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปร และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธี Reactive blending มีลักษณะของพื้นผิวที่หยาบและขรุขระ (Roughness) กว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Melt mixing อย่างเห็นได้ชัด ความละเอียดของสัณฐานวิทยาที่ปรับปรุงดีขึ้นแสดงให้เห็นถึงผลของการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเฟสอย่างทั้ง 2 ชนิด และระหว่างเฟสยางกับพลาสติกเกิดขึ้น (Lee *et al.*, 2007)

4.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (NR/RR/PEC TPVs)

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 30/30/40 ส่วนโดยน้ำหนัก ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.4 ศึกษาผลของปริมาณสารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซิน ที่ปริมาณ 0, 3, 5, 7 และ 10 phr โดยใช้วิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing method

4.4.1 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC

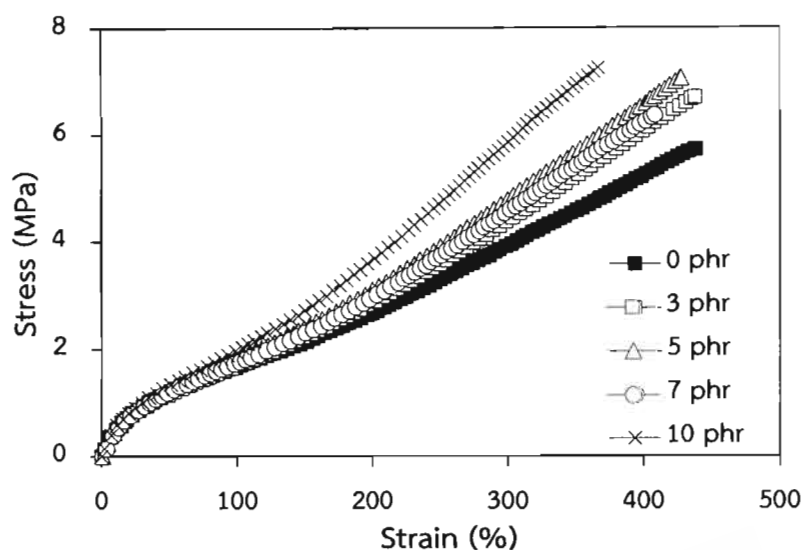


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.35 สามารถอธิบายลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าทอร์กได้เช่นเดียวกับรูปที่ 4.15 กล่าวคือ ค่าทอร์กจะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่โพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เนื่องจากโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์เป็นของแข็งทำให้เกิดการต้านการหมุนของโรเตอร์สูง จากนั้นค่าทอร์กจะลดลงเนื่องจากโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์เกิดการหลอม จากนั้นใส่ยางคอมพาวนด์ที่เวลา 2 นาที จะพบว่าค่าทอร์กจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากยางคอมพาวนด์มีความหนืดสูง และค่าทอร์กจะค่อยๆลดลงเมื่อได้รับความร้อนและแรงเฉือนจากการบดผสมจนยางนิ่มลง จากนั้นค่าทอร์กจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเกิดการเชื่อมขวางภายในเฟสยางหรือการเกิดการวัลคาไนซ์เซชันแบบไดนามิกซ์ จะเห็นได้ว่าระยะเวลาการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์จากจุดที่ค่าทอร์กเริ่มเพิ่มขึ้น (จุด A ในรูปที่ 4.35) จนถึงจุดที่มีค่าทอร์กสูงสุดจะใช้เวลานานขึ้นตามปริมาณของฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าค่าสูงสุดของทอร์กการผสมในช่วงการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์จะมีความสูงลดลงตามปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น

4.4.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC

อิทธิพลของปริมาณฟีนอลิกเรซินต่อพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC แสดงดังรูปที่ 4.36 พบว่าค่าความแข็งตึง (Stiffness) หรือมอดุลัสซึ่งดูได้จากความชันของกราฟจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณฟีนอลิกเรซินเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มทำให้ความแข็งตึงในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณฟีนอลิกเรซินที่ใช้ กล่าวคือเมื่อปริมาณของพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นมอดุลัสของยางจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะยืดจนขาดของยางจะลดลง (บุญธรรม และคณะ, 2555) ประกอบกับฟีนอลิกเรซินสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟสของยางรีเคลมและเฟสของยางธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของยาง รวมถึงช่วยให้เกิดการกระจายตัวและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) กับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ได้ดี เนื่องจากฟีนอลิกเรซินสามารถเกิดปฏิกิริยากับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ได้ด้วย ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้แสดงดังรูปที่ 4.21 และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.9 รวมถึงยังแสดงผลการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงและการผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ด้วย

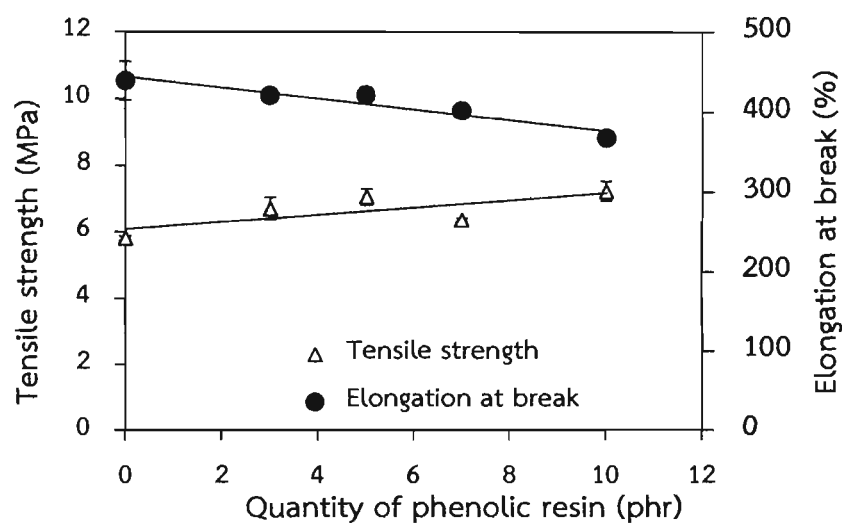


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

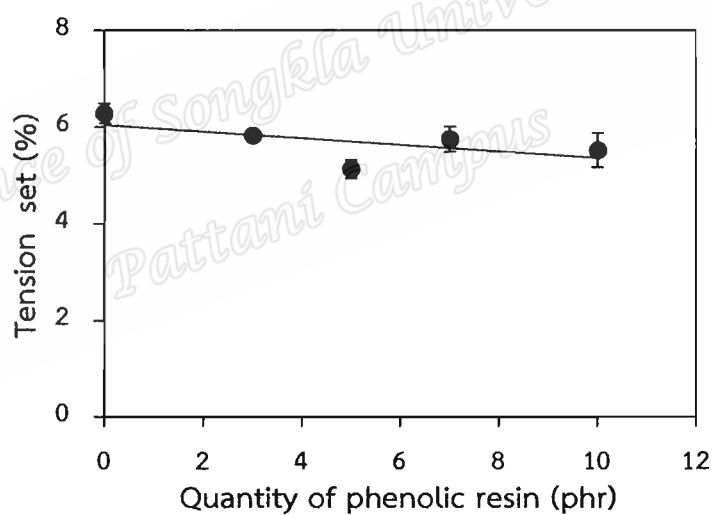
ตารางที่ 4.9 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

Quantity of phenolic resin	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tension set (%)	Hardness (shore A)
0 phr	5.81±0.06	439±24.64	6.28±0.21	52
3 phr	6.71±0.33	421±25.49	5.82±0.10	55
5 phr	7.06±0.24	422±8.87	5.13±0.19	55
7 phr	6.37±0.05	402±10.79	5.75±0.26	56
10 phr	7.23±0.29	368±13.74	5.52±0.35	57

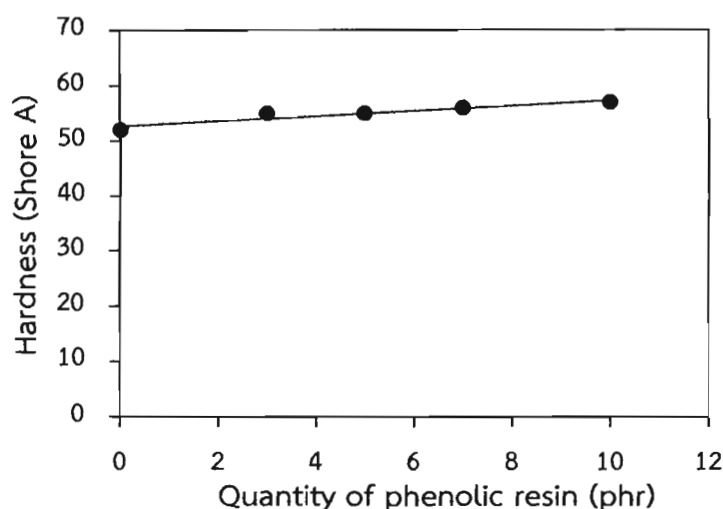
จากตารางที่ 4.9 สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ค่าความสามารถในการคืนรูป และค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน ดังรูปที่ 4.37, 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ



รูปที่ 4.37 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน



รูปที่ 4.38 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน



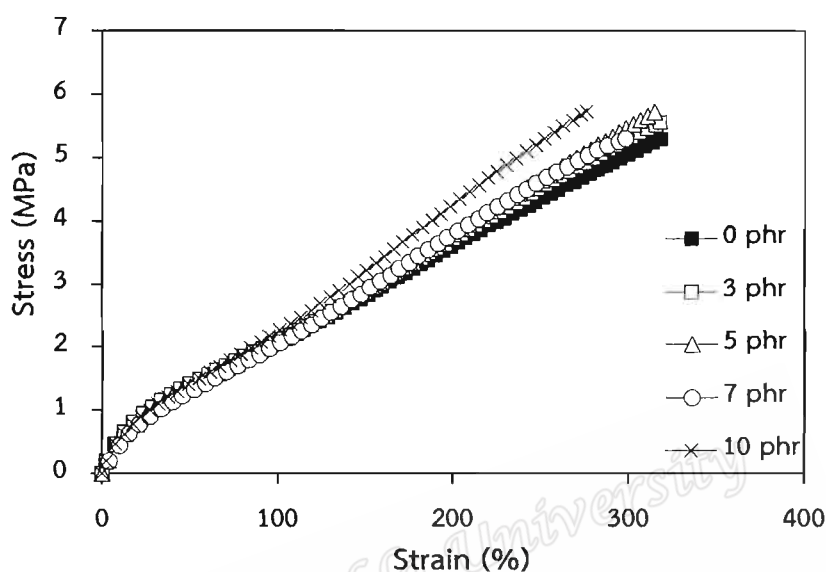
รูปที่ 4.39 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.37-4.39 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาด และค่าการผิดรูปถาวรแบบดึงมีแนวโน้มลดลง โดยที่ปริมาณฟีนอลิกเรซิน 10 phr จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็งสูงสุด เนื่องจากการใช้ฟีนอลิกเรซินจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ผิวประจัญ ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณฟีนอลิกเรซินที่มากบางส่วนยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางในโมเลกุลยางให้มากขึ้น รวมถึงที่อุณหภูมิห้องฟีนอลิกเรซินเป็นของแข็งเปราะ จึงช่วยเสริมความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ให้เพิ่มขึ้นด้วย และมีงานวิจัยของ Wu *et al.* (1997) และ Hirano *et al.* (2013) ที่ระบุว่าการใช้ฟีนอลิกเรซินจะช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของพอลิเมอร์เบลนด์ ดังนั้นสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จึงเพิ่มขึ้น เมื่อความแข็งแรงของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มลดลง และจากรูปที่ 4.38 ที่พบว่าการผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของฟีนอลิกเรซินที่ใช้ แสดงให้เห็นว่าการใช้ฟีนอลิกเรซินช่วยในการเกิดการเชื่อมประสานระหว่างเฟสยางรีเคลมกับยางธรรมชาติ และเฟสยางกับเฟสพลาสติกได้ดี ส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสเพิ่มขึ้น

4.4.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC โดยแปรฟีนอลิกเรซินที่ปริมาณต่างๆ จากนั้นนำมาทดสอบความต้านทานต่อการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา

22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำตัวอย่างออกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.40 แสดงพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรฟีนอลิกเรซินที่ปริมาณต่างๆ พบว่าพฤติกรรมการผิดรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ก่อนและหลังบ่มแรงไม่แตกต่างกัน กล่าวคือความแข็งแรงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น โดยจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถนำมาคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 นอกจากค่าความความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คำนวณได้แล้ว สามารถนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้วย

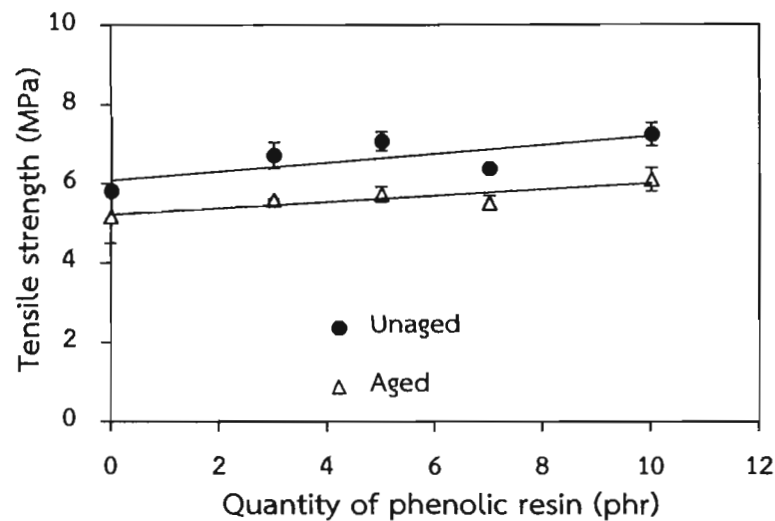
ตารางที่ 4.10 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

Quantity of phenolic resin	Tensile strength (MPa)		Change in property of tensile strength (%)
	Unaged	Aged	
0 phr	5.81±0.06	5.16±0.67	-11.19
3 phr	6.71±0.33	5.58±0.03	-16.84
5 phr	7.06±0.24	5.72±0.19	-18.98
7 phr	6.37±0.05	5.50±0.18	-13.66
10 phr	7.23±0.29	6.09±0.30	-15.77

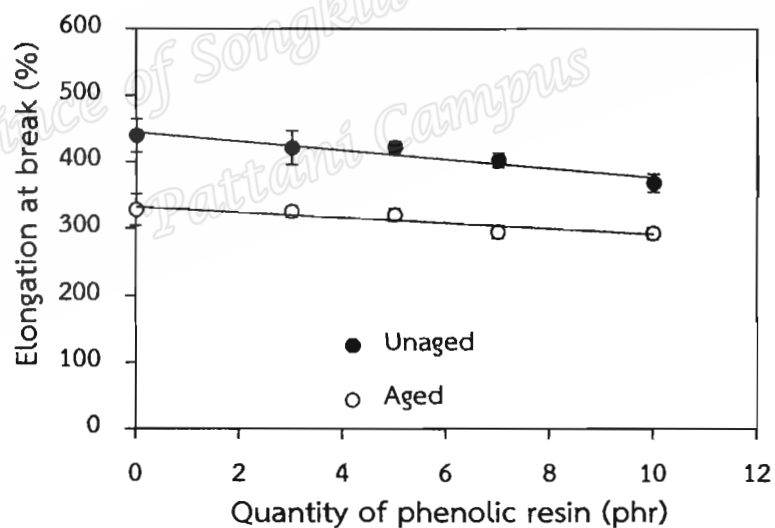
ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

Quantity of phenolic resin	Elongation at break (%)		Change in property of elongation at break (%)
	Unaged	Aged	
0 phr	439±24.64	328±24.08	-25.28
3 phr	421±25.49	325±8.10	-22.80
5 phr	422±8.87	320±9.50	-24.17
7 phr	402±10.79	294±9.42	-26.87
10 phr	368±13.74	292±8.59	-20.65

จากตารางที่ 4.10 และ 4.11 สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน แสดงดังรูปที่ 4.41 และ 4.42 รวมถึงแสดงกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติภายหลังบ่มแรงในรูปที่ 4.43



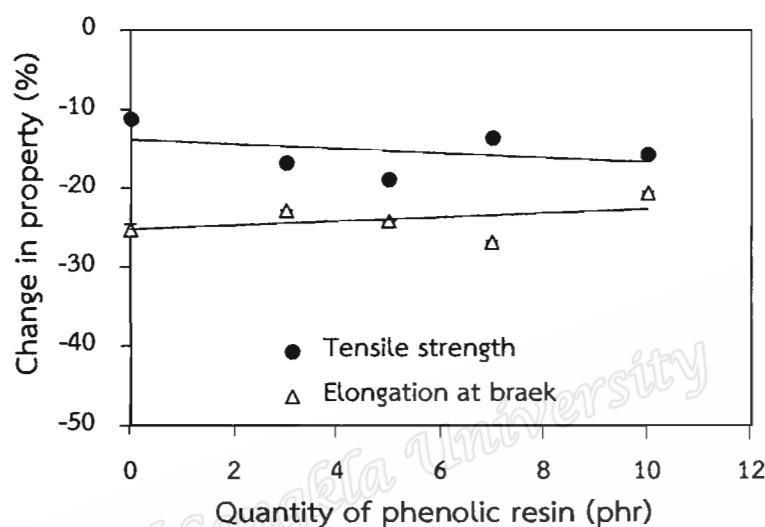
รูปที่ 4.41 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน



รูปที่ 4.42 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.41 และ 4.42 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ทุกปริมาณของฟีนอลิกเรซินมีค่าต่ำกว่าก่อนบ่มแรง เนื่องจากเฟสยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะกัแบบปกติซึ่งมีพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลฟิดิกเป็นส่วนใหญ่ที่สามารถเกิดการแตกได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน และเฟสยางเกิดการเสื่อมจากการถูก

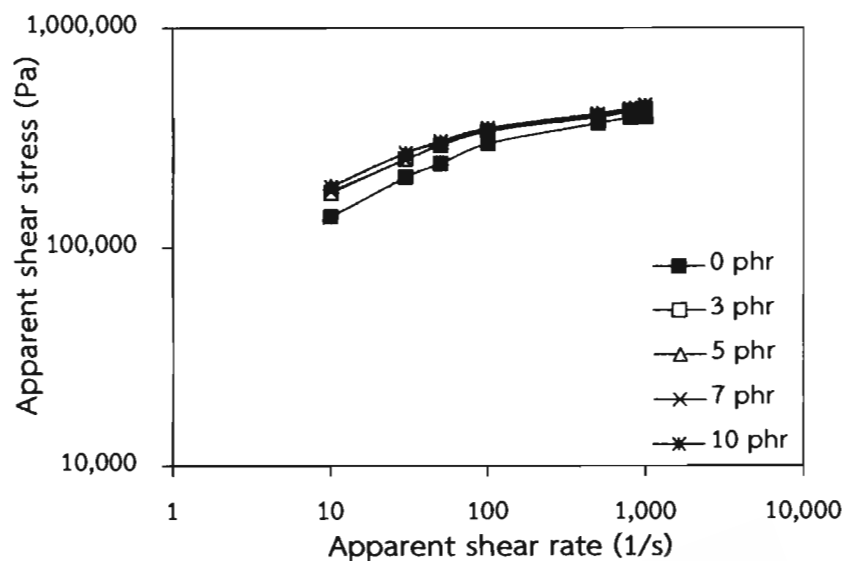
ออกซิไดซ์ (พรพรรณ, 2540) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต้านต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มแรงให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณฟีนอลิกเรซินเช่นเดียวกับก่อนบ่มแรง กล่าวคือ ความต้านต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มลดลง



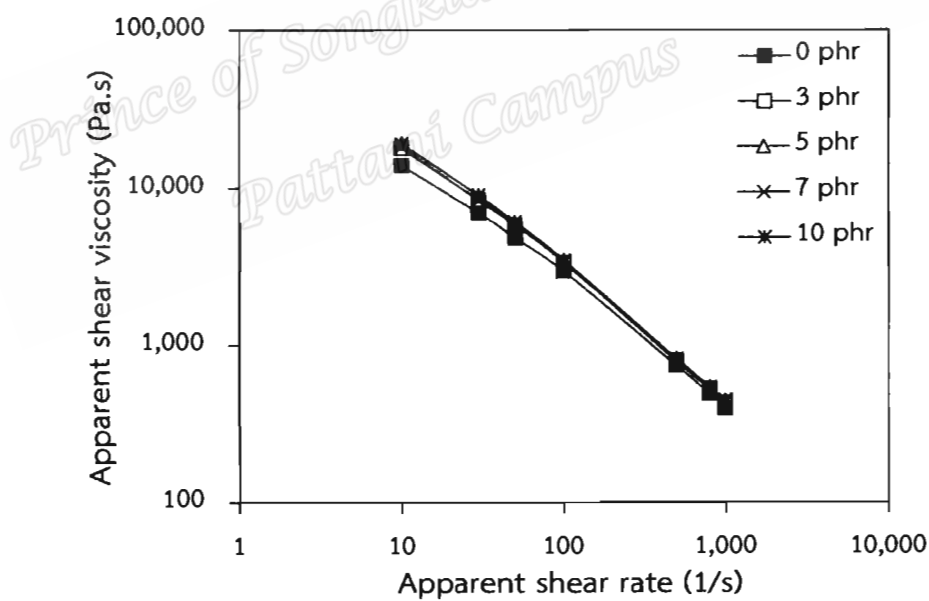
รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

4.4.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

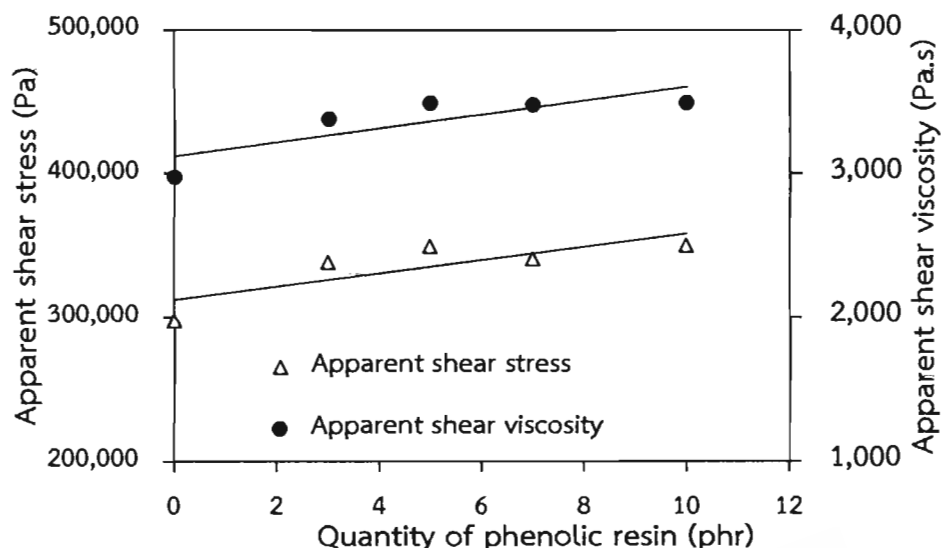
นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติการไหลตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.5 เปรียบเทียบสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เมื่อแปรฟีนอลิกเรซินที่ปริมาณ 0, 3, 5, 7, 10 phr ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ดังแสดงในรูปที่ 4.44 และ 4.45 และสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือนปรากฏ 100 1/s กับปริมาณฟีนอลิกเรซิน ดังแสดงในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

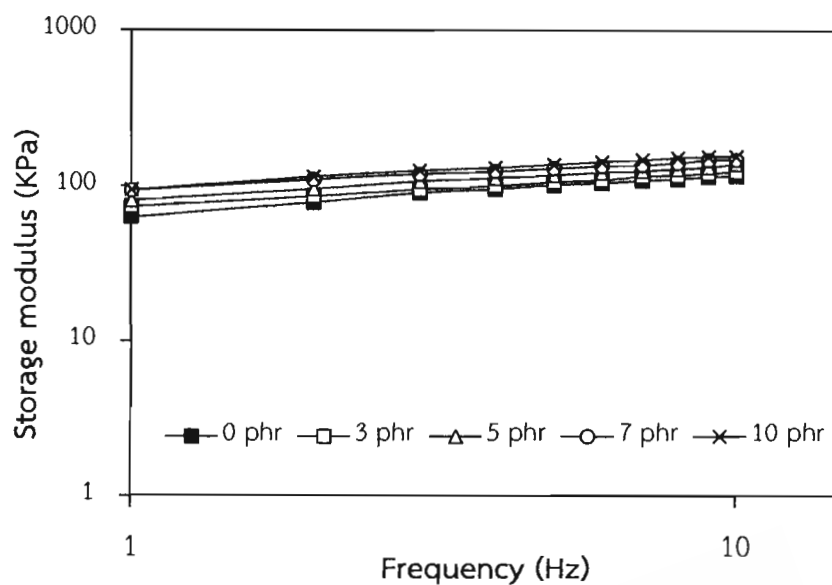


รูปที่ 4.46 ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

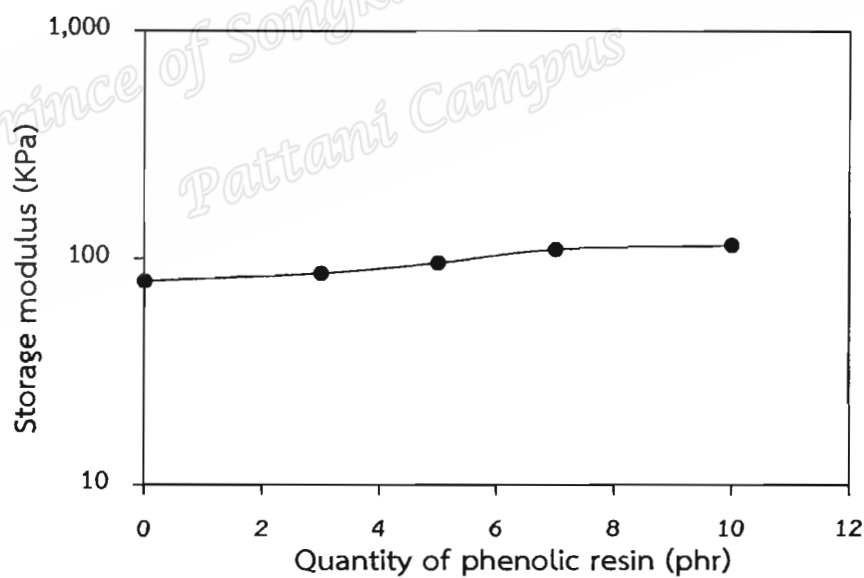
จากรูปที่ 4.44 และ 4.45 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความเค้นเฉือนปรากฏเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉือนปรากฏที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาที่อัตราเฉือนปรากฏเดียวกันในรูปที่ 4.46 พบว่าค่าความเค้นเฉือนปรากฏและค่าความหนืดเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากฟีนอลิกเรซินจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟส โดยสามารถเกิดการเชื่อมประสานภายในเฟสยาง และเฟสยางกับเฟสพลาสติกได้ ตลอดจนฟีนอลิกบางส่วนยังไปทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางในโมเลกุลยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสต่างๆ เพิ่มขึ้น จึงต้องใช้แรงหรือความเค้นมากขึ้นที่อัตราเฉือนเท่าเดิม เพื่อให้วัสดุเกิดการไหล

4.4.5 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

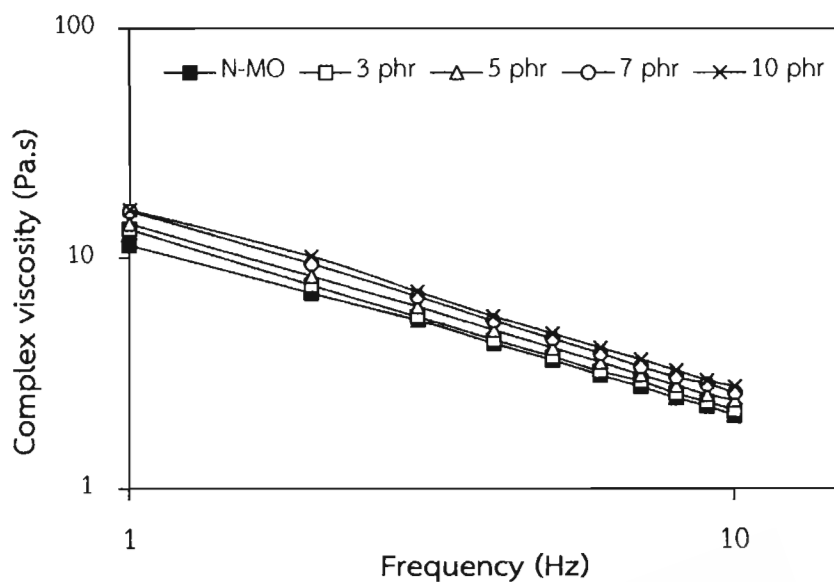
นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.6 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้ฟีนอลิกเรซินที่ปริมาณแตกต่างกัน ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน และ $\tan \delta$ กับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.47, 4.49 และ 4.50 ตามลำดับ



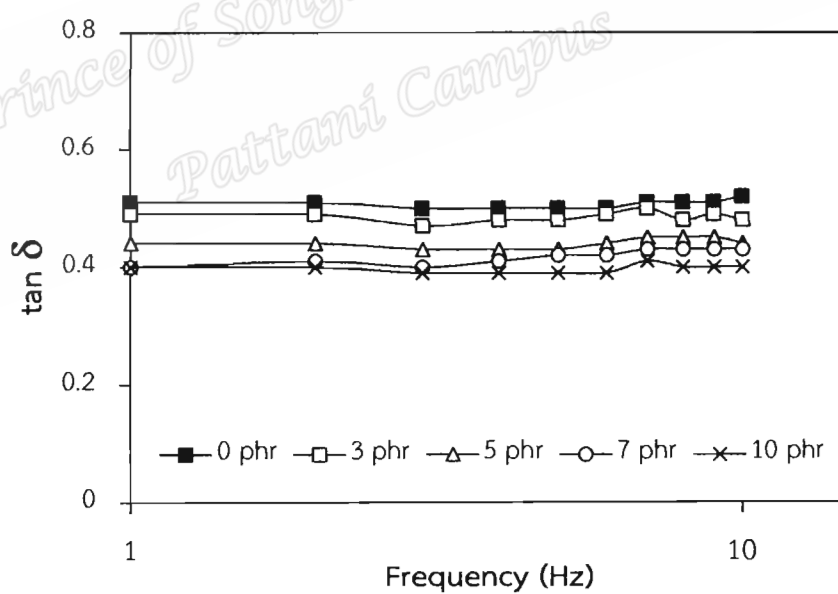
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน



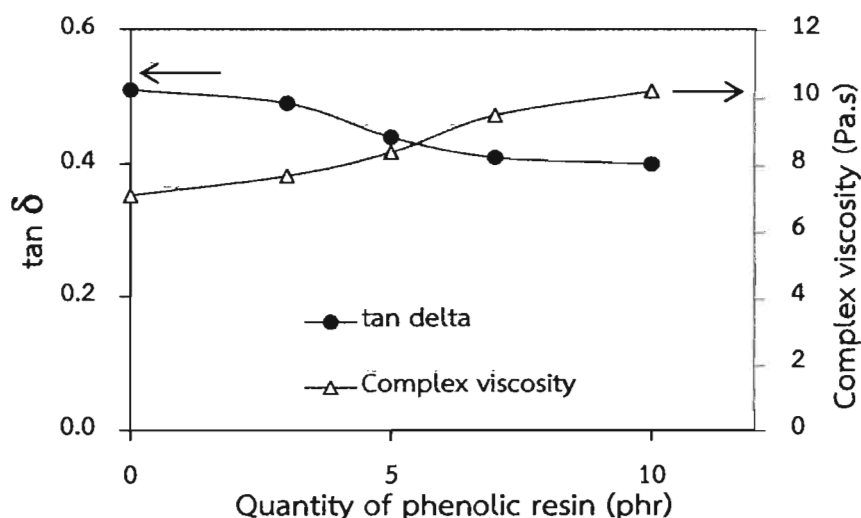
รูปที่ 4.48 มอดุลัสที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน



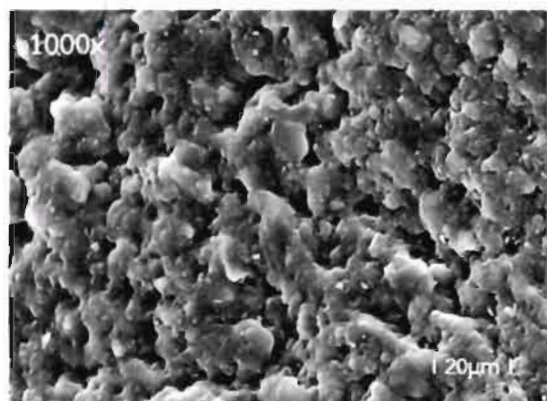
รูปที่ 4.51 $\tan \delta$ และ ค่าความหนืดเชิงซ้อน ที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

ผลการทดสอบสมบัติเชิงพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ได้ผลดังรูปที่ 4.47-4.51 ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณสารดัดแปรฟีนอลิกเรซินในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์แสดงสมบัติเชิงพลวัต โดยมีความอดุลัสสะสม ค่าความหนืดเชิงซ้อน เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณฟีนอลิกเรซิน ขณะที่ค่า $\tan \delta$ มีแนวโน้มลดลง ผลการทดลองสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องคาร์ปิลลารี ในหัวข้อ 4.4.6 ซึ่งอธิบายได้ว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความแข็งตึงในโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นจากผลของการเกิดพันธะเชื่อมขวางด้วยฟีนอลิกเพิ่มเติมมาจากเดิมที่มีเพียงพันธะเชื่อมขวางจากกำมะถัน และการที่ฟีนอลิกเรซินเข้าไปดัดแปรที่ผิวประจัญระหว่างเฟสยางรีเคลมกับยางธรรมชาติ และระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติก ส่งผลให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวประจัญดีขึ้น ช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของเฟสในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ดังนั้นที่ความถี่ของการทดสอบให้เกิดการผิดรูปเท่ากัน เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้ฟีนอลิกในสูตรจะต้านแรงบิดของโรเตอร์และไหลได้ยากขึ้น (Nakason *et al.*, 2006a และ Pichaiyut *et al.*, 2008) จึงปรากฏผลการทดสอบที่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความอดุลัสสะสม ค่าความหนืดเชิงซ้อน เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณฟีนอลิกเรซิน และเช่นเดียวกันผลของการปรับปรุงเฟสยางและเฟสพลาสติกช่วยให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์แสดงสมบัติแบบอิลาสติกดีขึ้น ค่า $\tan \delta$ มีแนวโน้มลดลง

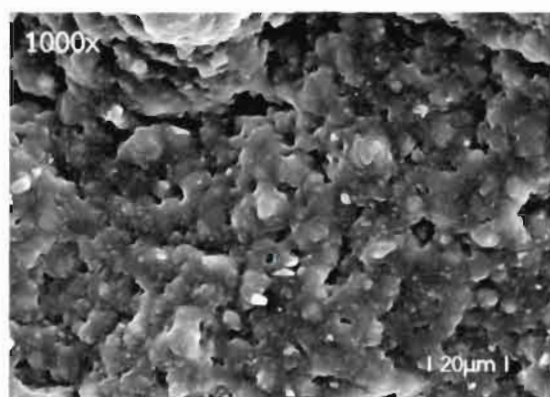
4.4.6 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC ที่แปรปริมาณสารดัดแปร มาศึกษาสัณฐานวิทยาตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.7 ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.52 ซึ่งจากรูปที่ 4.52 พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ปรากฏอนุภาคของยางวัลคาไนซ์กระจายตัวอยู่ในเฟสของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคยางวัลคาไนซ์พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้ฟีนอลิกเรซินจะให้อนุภาคที่เล็กกว่า และมีความขรุขระของผิวหน้าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้ฟีนอลิกเรซิน (ฟีนอลิกเรซิน 0 phr) โดยขนาดอนุภาคและความขรุขระจะลดน้อยลงตามปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกลพลวัตก่อนหน้านี้ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณฟีนอลิกเรซินจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสเพิ่มขึ้น และเฟสยางมีการวัลคาไนซ์สูงขึ้น จึงเกิดความต่างของความหนืดระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกมากยิ่งขึ้น ทำให้สัณฐานวิทยาเกิดการเนียนลดขนาดอนุภาคได้ดีและมีการกระจายได้ดีกว่าเดิม

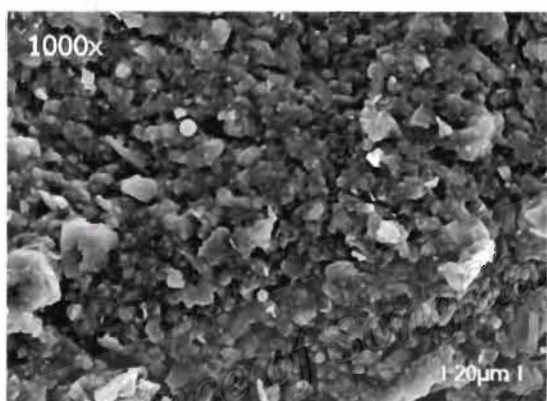
Prince of Songkla University
Pattani Campus



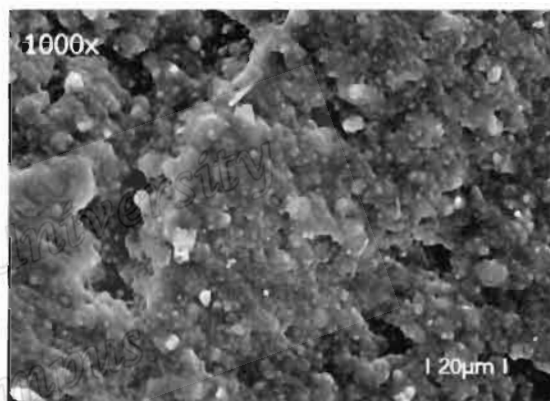
(a) 0 phr



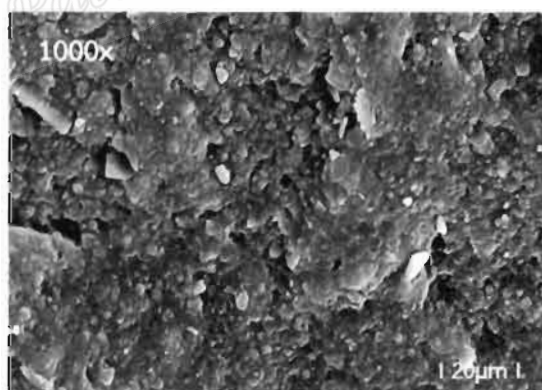
(b) 3 phr



(c) 5 phr



(d) 7 phr



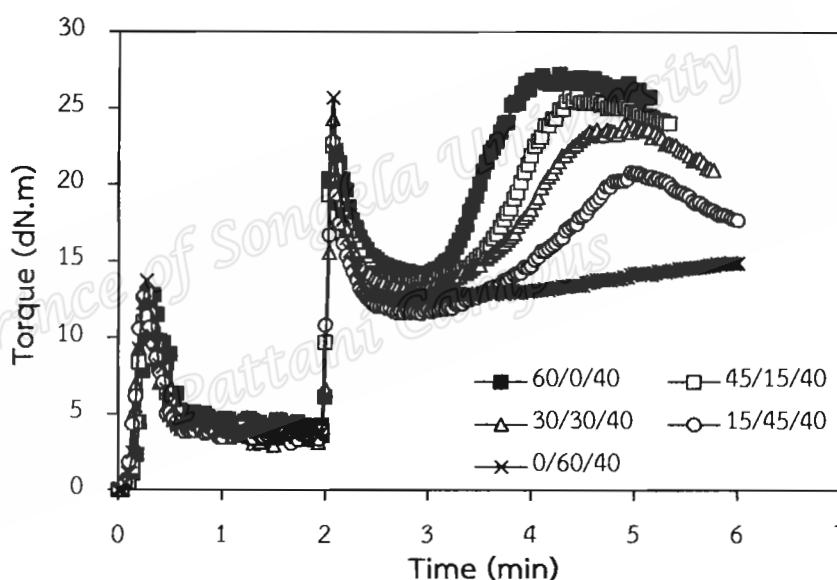
(e) 10 phr

รูปที่ 4.52 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

4.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ด้วยวิธีการผสมแบบ Melt mixing method ตามหัวข้อที่ 3.3.3.1 และใช้ปริมาณสารดัดแปรฟีนอลิกเรซินที่ 10 phr โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC เท่ากับ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ส่วนโดยน้ำหนักตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.5

4.5.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC



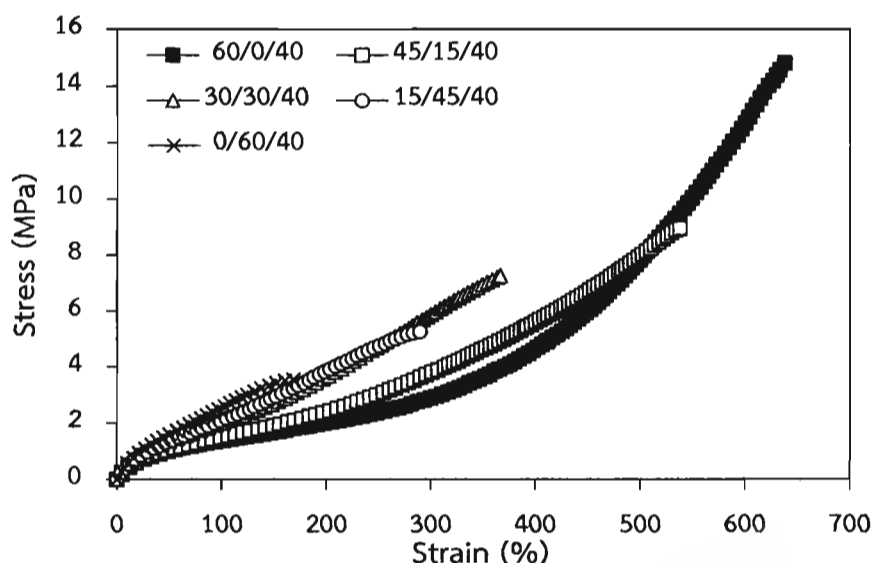
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนระหว่าง NR/RR/PEC

จากรูปที่ 4.53 พบว่าทอร์กการผสมจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในช่วงที่เฟสยางเกิดการวัลคาไนซ์ที่เวลาประมาณนาที่ที่ 3 โดยค่าทอร์กจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเฟสยางเกิดการวัลคาไนซ์จนถึงจุดสูงสุดจากนั้นค่าทอร์กจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเฟสยางวัลคาไนซ์สมบูรณ์ ซึ่งพบว่าเวลาที่เฟสยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์หรือช่วงที่ทอร์กการผสมเพิ่มขึ้นจะเกิดในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ในขณะที่ระยะเวลาของการเกิดการวัลคาไนซ์ของเฟสยางไม่เท่ากัน จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางเพิ่มขึ้นส่งผลต่อระยะเวลาของการวัลคาไนซ์มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ความแตกต่าง

ของทอว์การผสมจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดสูงสุดของการเกิดวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกลดลงตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนเฟสยางเพิ่มมากขึ้นทำให้มีสัดส่วนของยางธรรมชาติในเฟสยางลดลง ส่งผลให้พันธะคู่ซึ่งอยู่ในทุกหน่วยซ้ำของไอโซพรีนลดลงตามสัดส่วนของยางธรรมชาติในเฟสยาง โดยพันธะคู่ในยางธรรมชาตินั้นเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ดังนั้นการมีสัดส่วนของยางธรรมชาติในเฟสยางลดลงทำให้การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ลดลงด้วย ประกอบกับยางรีเคลมเป็นยางที่ผ่านกระบวนการรีเคลมเพื่อให้สามารถนำกลับมาวัลคาไนซ์ใหม่ได้อีกครั้ง แต่จากการวิเคราะห์หาส่วนที่ละลายได้ในยางรีเคลมมีเพียง 24.64% ในขณะที่มีส่วนที่ไม่ละลายถึง 75.36% แสดงให้เห็นว่าในยางรีเคลมมีปริมาณพันธะเชื่อมขวางทางเคมีและพันธะเชื่อมขวางทางกายภาพจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม (Bound rubber) เหลืออยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วนของยางรีเคลมมากจึงมีแนวโน้มเกิดการวัลคาไนซ์ได้น้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติอยู่สูง

4.5.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ส่วนโดยน้ำหนัก มาศึกษาสมบัติเชิงกล ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.54



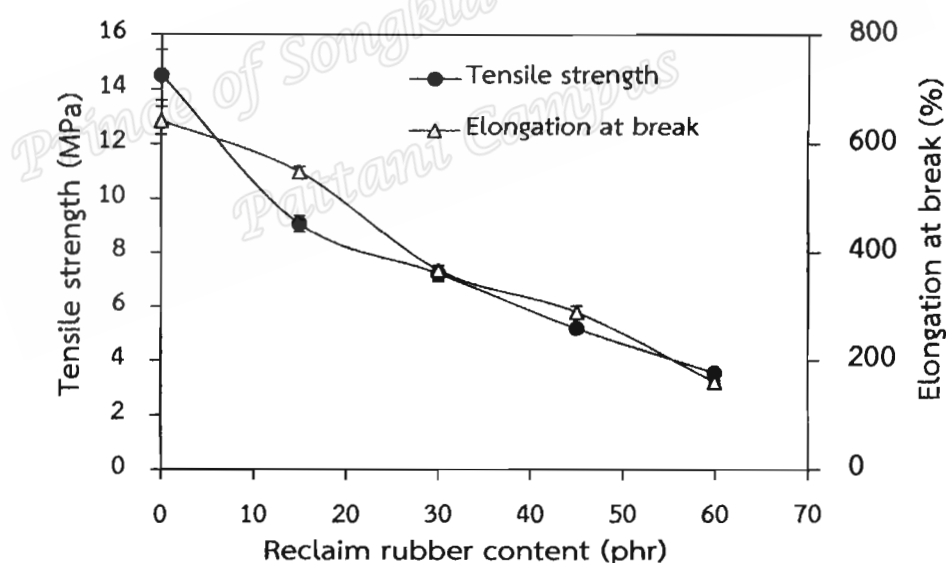
รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากรูปที่ 4.54 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วนของยางรีเคลมและยางธรรมชาติแตกต่างกันความแข็งตึงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันความเหนียวทนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ลดลง เนื่องจากเมื่อมีปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณพันธะเชื่อมขวางจากยางรีเคลมหรือส่วนที่ไม่ละลาย (Gel fraction) เพิ่มขึ้น สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น (De *et al.*, 2007 และ De *et al.*, 2013) ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีมอดุลัสเพิ่มสูงขึ้นและในขณะเดียวกันระยะยืดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนยางรีเคลมในเฟสยางมากขึ้นส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มสมบัติเชิงกลต้อยลงและจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ แสดงผลดังตารางที่ 4.12 นอกจากนี้ยังแสดงค่าความสามารถในการคืนรูป และความแข็งด้วย

ตารางที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

Blend ratio (NR/RR/PEC)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tension set (%)	Hardness (Shore A)
60/0/40	14.52±0.92	643±10.91	4.78±0.89	51
45/15/40	9.07±0.31	549±37.63	5.65±0.18	54
30/30/40	7.23±0.29	368±13.74	5.52±0.35	57
15/45/40	5.20±0.07	290±2.62	6.65±0.31	59
0/60/40	3.56±0.03	161±1.89	8.83±0.83	62

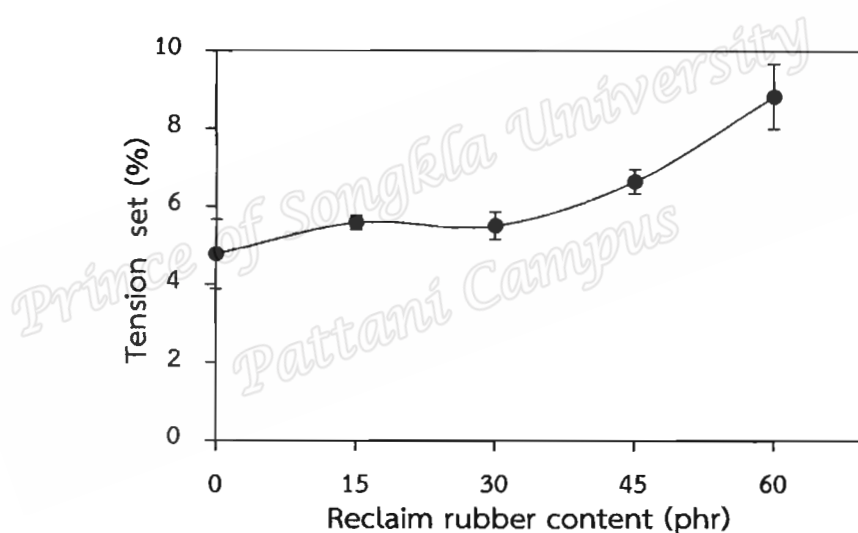
จากตารางที่ 4.12 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ดังรูปที่ 4.55-4.57 ตามลำดับ



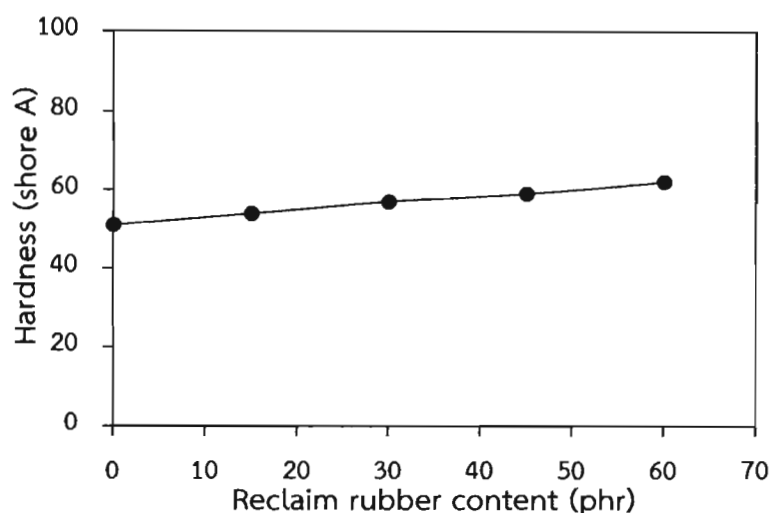
รูปที่ 4.55 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากที่รูปที่ 4.55 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น โดยเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน 60/0/40 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนที่ 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ตามลำดับ เนื่องจาก

เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติในสัดส่วนของเฟสยางมากให้ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดที่ดี เพราะยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อยืด และมีความสามารถในการส่งผ่านแรงเค้นได้ดี ประกอบกับมีความต่อเนื่องของเฟสยางที่ดีในทางกลับกันยางรีเคลมมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจากผลของกระบวนการเตรียมยางรีเคลม ที่ใช้แรงเฉือนและความร้อนสูงเพื่อทำให้เกิดการแตกออกของพันธะการเชื่อมขวาง ส่งผลให้ยางรีเคลมมีสายโซ่โมเลกุลสั้น (Hassan *et al.*, 2010) นอกจากนี้การมีปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางมากขึ้นส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างเฟสยางรีเคลมและยางธรรมชาติลดน้อยลง ส่งผลให้เกิดจุดอ่อนแอขึ้นทำให้การส่งผ่านแรงเค้นเกิดได้ไม่ดี (De *et al.*, 2007 และ Sombatsompop and Kumnuantip, 2003) มีผลทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ลดลง



รูปที่ 4.56 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

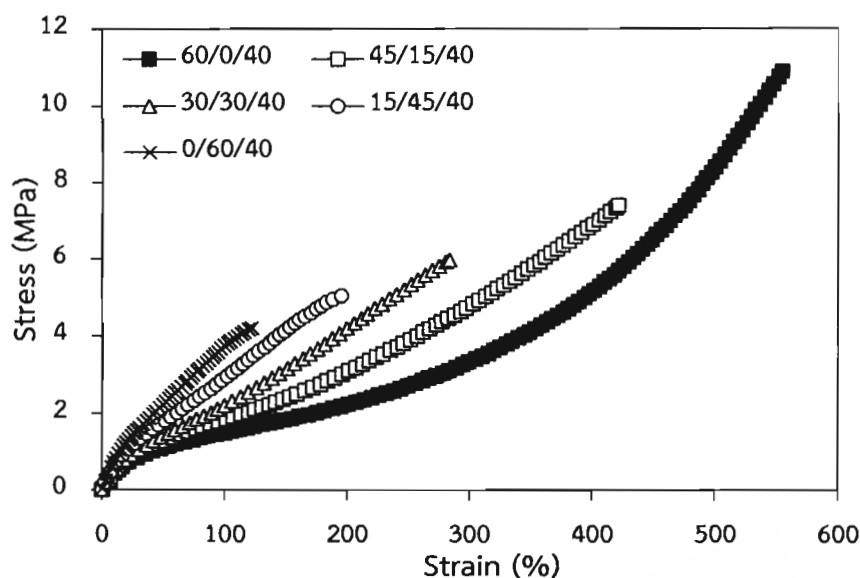


รูปที่ 4.57 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากรูปที่ 4.56 และ 4.57 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความสามารถในการคืนรูปลดลง (Tension set เพิ่มขึ้น) และมีความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของยางธรรมชาติในเฟสยางลดลง ส่งผลให้การวัลคาไนซ์ของเฟสยางเกิดได้น้อยลง ทำให้มีปริมาณพันธะเชื่อมขวางลดลงตามสัดส่วนของยางรีเคลมในเฟสยางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการมีปริมาณพันธะเชื่อมขวางน้อยจะทำให้ยางไหลได้ง่าย อีกทั้งยางรีเคลมมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีสารตัวเติม จึงส่งผลต่อการกลับคืนรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ได้น้อยลง ส่วนความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น

4.5.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ที่ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ส่วนโดยน้ำหนักมาทดสอบความต้านทานต่อการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำตัวอย่างออกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.58



รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากรูปที่ 4.58 แสดงพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นภายหลังบ่มแรงด้วยความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์พบว่าพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ก่อนและหลังบ่มแรงไม่แตกต่างกัน กล่าวคือความแข็งตึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางรีเคลมในเฟสยางที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเหนียวทนมีค่าลดลงซึ่งเกิดจากการเพิ่มสัดส่วนของยางรีเคลมในองค์ประกอบเบลนด์เป็นการเพิ่มปริมาณส่วนที่ไม่ละลายเพิ่มขึ้น ดังที่กล่าวไปข้างต้น และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถนำมาคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์แสดงผลดังตารางที่ 4.13 และ 4.14 รวมถึงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติแสดงในตารางนี้ด้วย

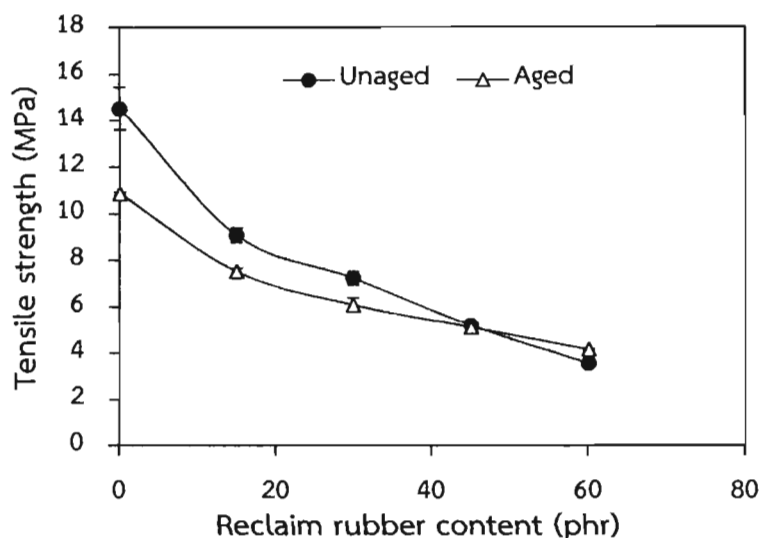
ตารางที่ 4.13 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

Blend ratio (NR/RR/PEC)	Tensile strength (MPa)		Change in property of tensile strength (%)
	Unaged	Aged	
60/0/40	14.52±0.92	10.87±0.06	-23.13
45/15/40	9.07±0.31	7.52±0.14	-17.09
30/30/40	7.23±0.29	6.09±0.30	-15.77
15/45/40	5.20±0.07	5.12±0.06	-1.54
0/60/40	3.56±0.03	4.16±0.03	16.85

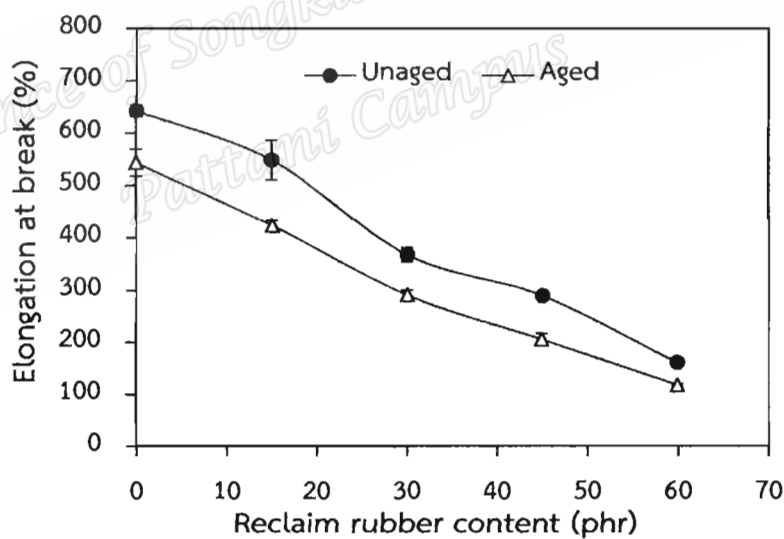
ตารางที่ 4.14 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

Blend ratio (NR/RR/PEC)	Elongation at break (%)		Change in property of elongation at break (%)
	Unaged	Aged	
60/0/40	643±10.91	544±25.85	-15.66
45/15/40	549±37.63	424±9.61	-22.77
30/30/40	368±13.74	292±8.59	-20.65
15/45/40	290±2.62	206±11.47	-28.97
0/60/40	161±1.89	118±2.75	-26.71

จากตารางที่ 4.13 และ 4.14 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ดังแสดงในรูปที่ 4.59 และ 4.60 รวมถึงแสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติภายหลังบ่มแรงในรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.59 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

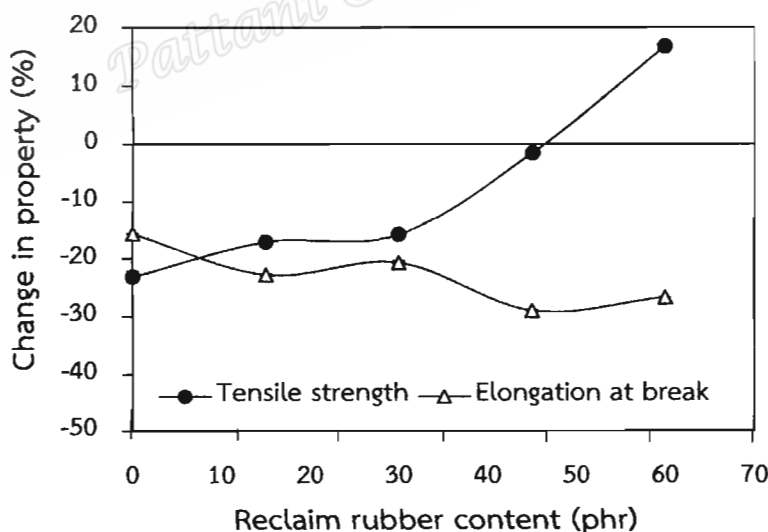


รูปที่ 4.60 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากรูปที่ 4.59 และ 4.60 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ให้สมบัติต่ำกว่าก่อนบ่มแรง และสมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยางรีไซเคิลในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันกับ

พฤติกรรมก่อนการบ่มแรง ยกเว้นที่อัตราส่วนการเบลนด์ 0/60/40 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าก่อนบ่มแรง เนื่องจากยางรีเคลมยังมีส่วนที่สามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางได้อยู่ (Active crosslinking sites) เมื่อได้รับความร้อนจากการบ่มแรงทำให้สามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางได้บางส่วน (De *et al.*, 2007 และ Mandal *et al.*, 2014)

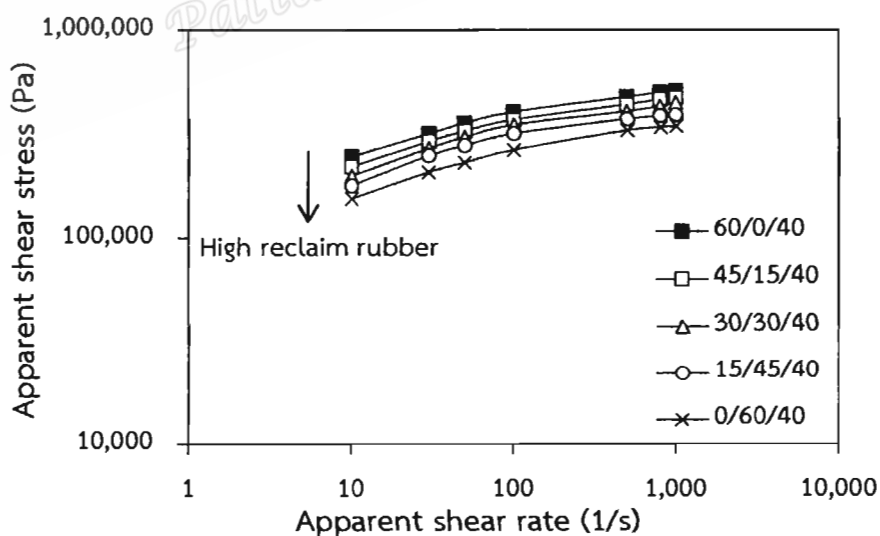
รูปที่ 4.61 แสดงข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง (การคงอยู่ของสมบัติภายหลังบ่มแรงดีขึ้น) ตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น และลักษณะการเปลี่ยนแปลงสมบัติให้ค่าไปทางบวก ทั้งนี้เกิดจากยางรีเคลมมีความสามารถทนต่อการถูกออกซิไดซ์ได้ดีกว่ายางธรรมชาติ กล่าวคือในกระบวนการทำยางรีเคลมต้องผ่านกระบวนการที่มีความร้อนสูงจึงสามารถเกิดการออกซิเดชันในระหว่างกระบวนการรีเคลมได้ตลอดเวลา ทำให้ยางรีเคลมเกิดการออกซิเดชันจนมากเกินพอ ส่งผลให้ยางรีเคลมมีความต้านทานต่อการบ่มแรงที่ดี ทอปรกับเมื่อมีปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น พันธะคู่ที่ว่องไวทำให้ยางธรรมชาติทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนส่งผลให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมได้มาก (พรพรรณ, 2540) ขณะที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทางลบเล็กน้อยเมื่อปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางมากขึ้น



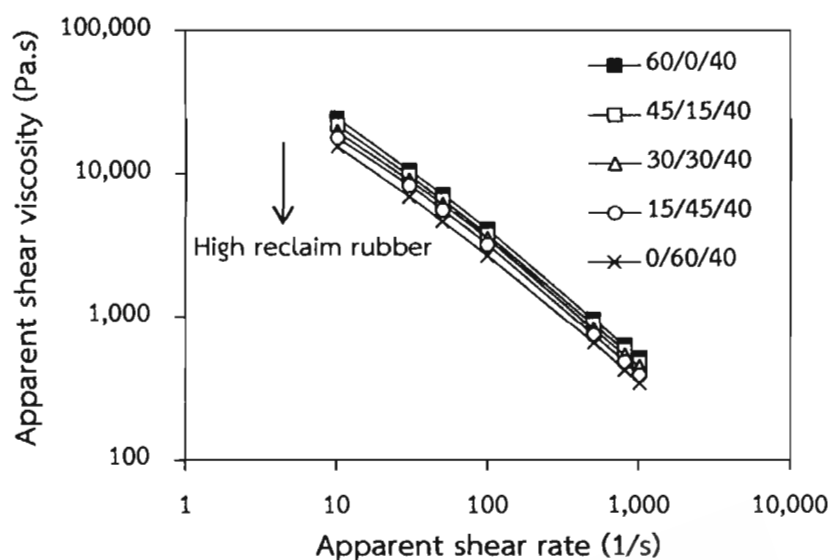
รูปที่ 4.61 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

4.5.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติการไหลตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.5 เปรียบเทียบสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ได้ผลการทดลองค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏ และอัตราเฉือนปรากฏ รวมถึงความหนืดเฉือนปรากฏและอัตราเฉือนปรากฏดังในรูปที่ 4.62 และ 4.63 พบว่าที่อัตราเฉือนปรากฏเดียวกัน ความเค้นเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลงตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือที่อัตราส่วน 60/0/40 ให้ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏสูงที่สุด รองลงมาคือ 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของยางรีเคลมทำให้สัดส่วนของยางธรรมชาติในองค์ประกอบเบลนด์ลดลง ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เกิดการหลอมและไหลได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากยางรีเคลมเป็นยางที่เคยผ่านการวัลคาไนซ์มาแล้วและนำมาตัดพันธะเชื่อมขวางแบบสุ่มจึงมีน้ำหนักรีดต่ำ ในขณะที่ยางธรรมชาติมีน้ำหนักรีดสูง และมีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลมากกว่ายางรีเคลม รวมถึงการที่ยางธรรมชาติสามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางได้มากกว่ายางรีเคลม จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติในองค์ประกอบเบลนด์มากต้องใช้แรงเฉือนสูงมากกว่า จึงจะเกิดการไหลได้ที่อัตราเฉือนเดียวกัน



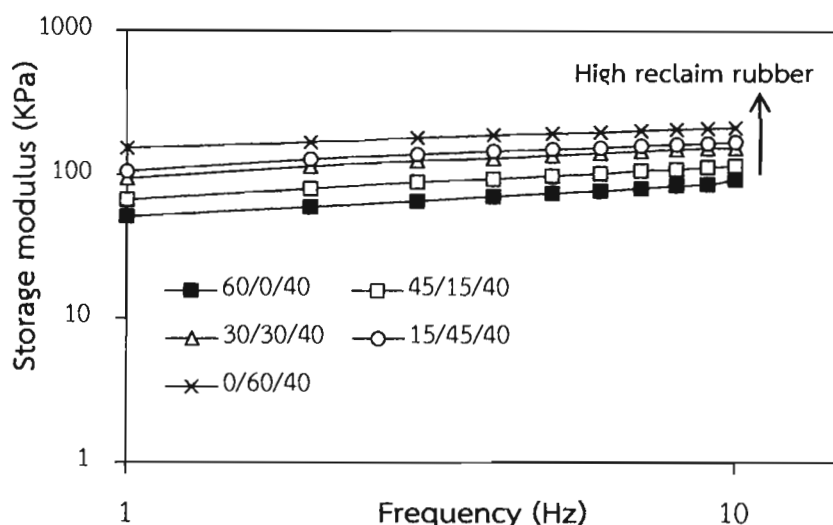
รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

4.5.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ นำมาทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน มอดุลัสสูญเสีย และ $\tan \delta$ กับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.64, 4.65, 4.67 และ 4.68 ตามลำดับ

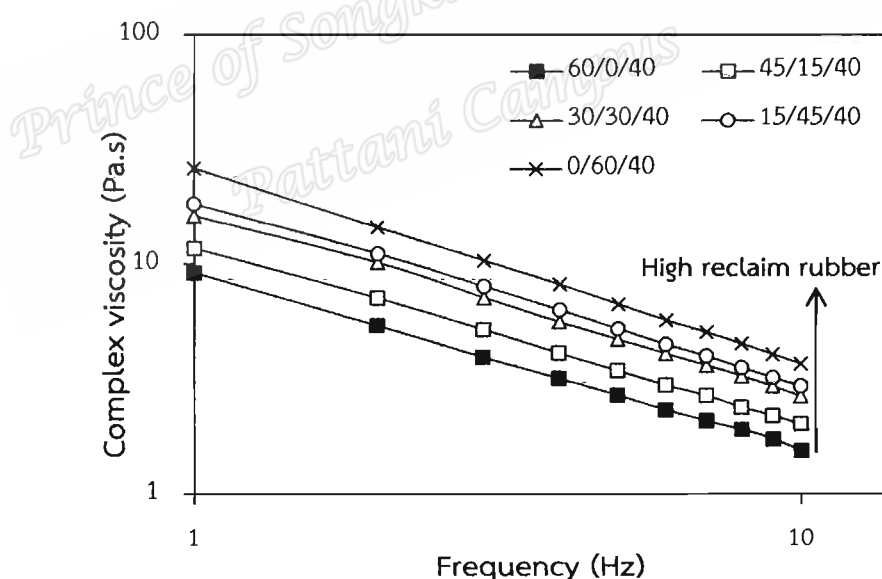


รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

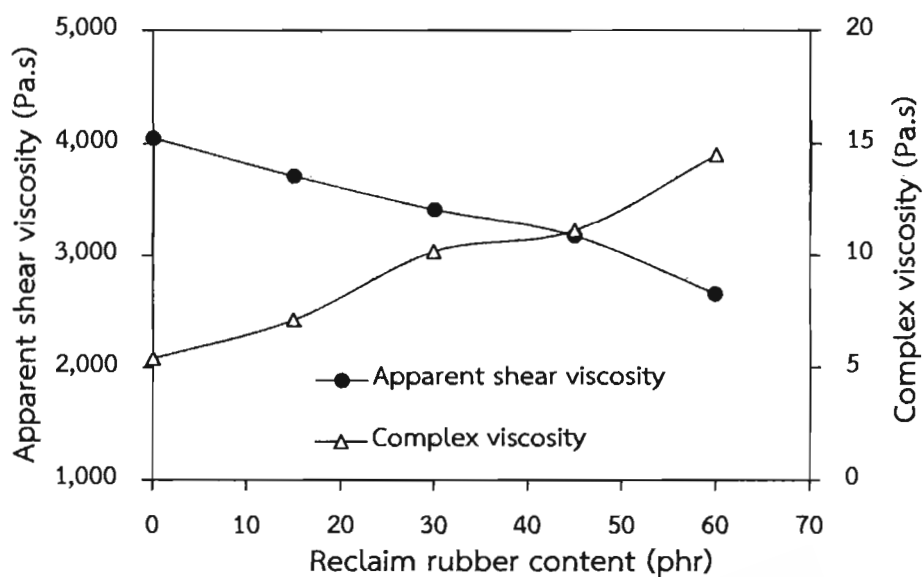
จากรูปที่ 4.64 พบว่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น เป็นที่น่าสนใจว่าผลการทดลองนี้สวนทางกับการทดสอบสมบัติการไหลในรูปที่ 4.61 ที่พบว่าค่าความเค้นเฉือนปรากฏมีค่าลดลงเมื่อเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสัดส่วนของยางรีเคลมมากขึ้น ซึ่งการพบผลการทดลองที่แตกต่างกันนี้เกิดขึ้นในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีอัตราส่วนการเบลนด์แตกต่างกัน (หัวข้อวิจัยก่อนหน้านี้ กำหนดอัตราส่วนการเบลนด์คงที่) อาจเป็นผลมาจากรูปแบบการทดสอบของทั้ง 2 เทคนิคที่แตกต่างกัน โดยการทดสอบด้วยเครื่องคาร์ปิลลารีโอมิเตอร์ทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการเลื่อนไถลระหว่างโมเลกุลสูง เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จึงแสดงสมบัติที่เป็นผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลของแต่ละองค์ประกอบที่แตกต่างกัน เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วนยางรีเคลมในองค์ประกอบที่เป็นยางมาก น้ำหนักโมเลกุลของยางรีเคลมต่ำทำให้การเลื่อนไถลของสายโซ่โมเลกุลเกิดได้ง่ายขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการใช้ยางรีเคลมเป็นสารช่วยในการปรับปรุงการแปรรูปของยาง (Shi *et al.*, 2014) จึงพบว่าความเค้นเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลงตามปริมาณยางรีเคลมที่มากขึ้นในสัดส่วนของเฟสยาง ในทางกลับกันการทดสอบด้วยเครื่อง MDPT ใช้อัตราเฉือนต่ำ (ความถี่ต่ำ ในการทดลองอยู่ระหว่าง 1-10 Hz) ซึ่งเป็นความถี่ที่วัสดุเกิดการผิดรูปน้อย การผิดรูปส่วนใหญ่ยังเป็นการผิดรูปแบบอีลาสติกจึงเป็นไปได้ว่าการตอบสนองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อได้รับความเค้น (แรงบิด) ยังไม่ปรากฏชัดเจนจากผลการเลื่อนไถลของโมเลกุล แต่เป็นผลมาจากการตอบสนองของสารตัวเติมที่มีอยู่ในยางรีเคลมแทน โดยเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้ยางรีเคลมในสัดส่วนการเบลนด์ขององค์ประกอบอย่างมาก จะมีสารตัวเติมเขม่าดำมากด้วย ที่การทดสอบแบบใช้การผิดรูปต่ำๆ สารตัวเติมเขม่าดำจะแสดงผลการ

เสริมแรงต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแทน (Sombatsonpop and Kumnuantip, 2003) ส่งผลให้พบว่าค่ามอดุลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลม

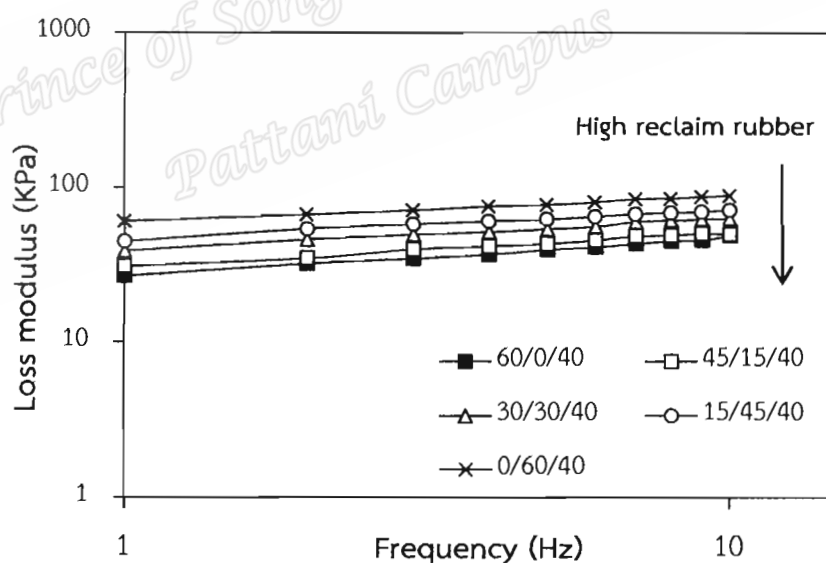
จากรูปที่ 4.65 พบว่าความหนืดเชิงซ้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนเพสยางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับความหนืดเฉือนปรากฏในการทดสอบสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.63 เช่นเดียวกัน และเมื่อเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือนปรากฏคงที่ค่าหนึ่ง และความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่คงที่ค่าหนึ่ง เป็นฟังก์ชันกับอัตราส่วนการเบลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.66 พบว่าให้ผลการทดลองที่ตรงกันข้ามกันอย่างเห็นได้ชัด การลดลงของความหนืดเฉือนปรากฏเมื่อปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนการเบลนด์เพิ่มมากขึ้น เกิดจากน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำของยางรีเคลม รวมถึงปริมาณพันธะเชื่อมขวางของเพสยางมีน้อยดังที่กล่าวไปข้างต้น ในขณะที่ความหนืดเชิงซ้อนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมนั้น อาจจะแสดงผลของสารตัวเติมเขม่าดำซึ่งเป็นองค์ประกอบในยางรีเคลม โดยเมื่อมียางรีเคลมในปริมาณที่มากขึ้นทำให้มีปริมาณของเขม่าดำเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เขม่าดำไปขัดขวางการไหลของสายโซ่พอลิเมอร์ (Sombatsompop and Kumnuantip, 2003)



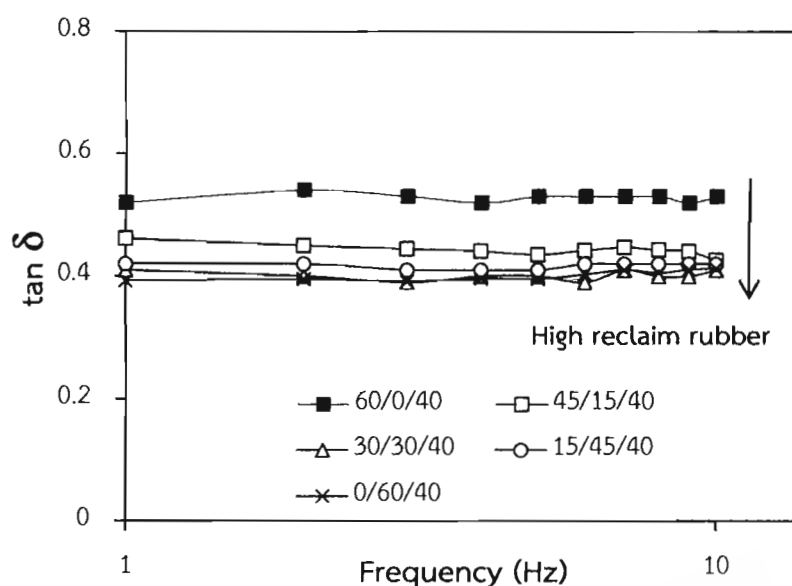
รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 4.66 ความเค้นเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) และความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสียกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์



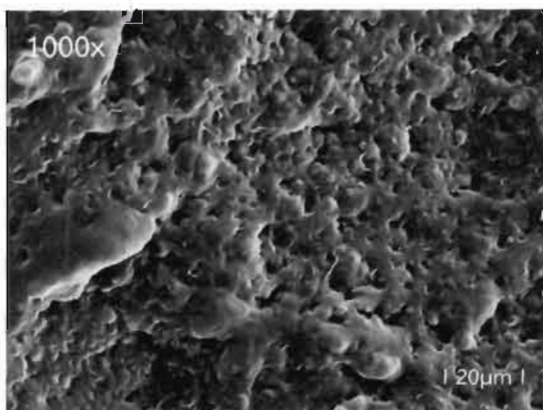
รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากรูปที่ 4.67 พบว่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสสูญเสียกับความถี่ ซึ่งค่ามอดุลัสสูญเสียแสดงสมบัติการเป็นของไหลหนืด (Viscous liquid) คือเมื่อได้รับแรงกระทำจะเกิดการผิดรูปโดยไม่กลับคืนรูปเดิม เกิดการสูญเสียพลังงานไปอยู่ในรูปความร้อนสะสมของวัสดุสูง พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามอดุลัสสูญเสียเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในยางรีเคลมมีสารตัวเติมเคมีดำอยู่ ทำหน้าที่เสริมแรงในโมเลกุลยางส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยางเกิดการคืนรูปกลับได้น้อย แต่เมื่อพิจารณาค่าแทนเจนต์สูญเสีย ($\tan \delta$) แสดงในรูปที่ 4.68 จะเห็นว่าที่ความถี่เดียวกันค่า $\tan \delta$ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์กลับมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงวัสดุมีพฤติกรรมการตอบสนองต่อความยืดหยุ่น (Elastic response) สูงกว่าการตอบสนองต่อการไหลหนืด (Viscous response) คือมีความหน่วง (Damping) ในพอลิเมอร์ต่ำ ซึ่งผลการทดลองนี้สวนทางกับค่ามอดุลัสสูญเสียที่เพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการถ่วงกันระหว่างการเสริมแรงของเคมีดำกับน้ำหนักโมเลกุลของยางรีเคลม

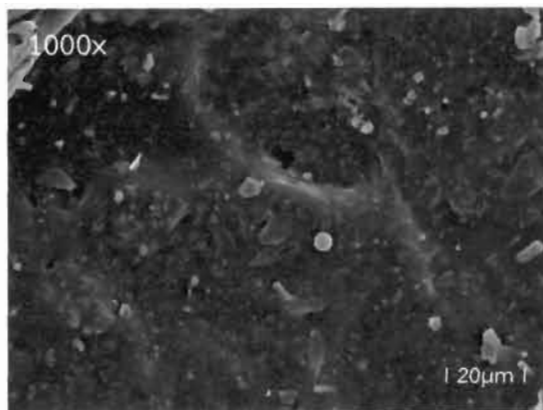
4.5.6 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์มาศึกษาสัณฐานวิทยา ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.69 พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนการเบลนด์ที่ต่างกันจะให้ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ที่อัตราส่วนเบลนด์ 60/0/40 ลักษณะสัณฐานวิทยามีความสม่ำเสมอมากที่สุดและเมื่อปริมาณของยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคยางมีขนาดเล็กลง แต่มีความขรุขระเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางเพิ่มขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) มากขึ้น ทำให้เกิดเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณยางรีเคลม ส่งผลให้เกิดความขรุขระและความไม่เข้ากันระหว่างเฟสเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเป็นจุดอ่อนแอระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ทำให้มีสมบัติเชิงกลด้อยลง

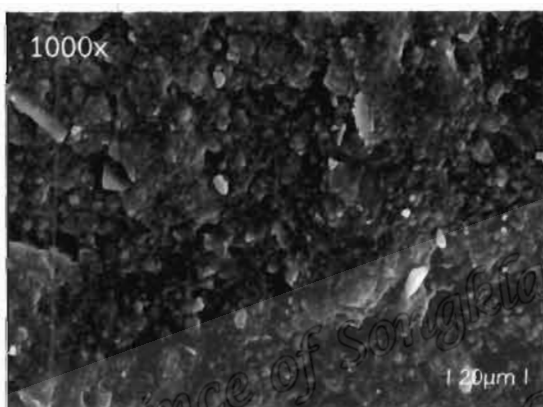
Prince of Songkla University
Pattani Campus



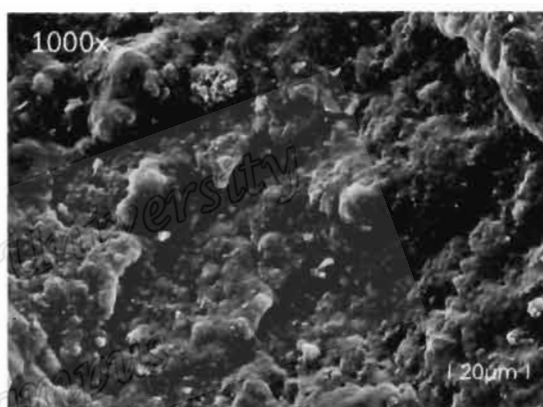
(a) 60/0/40



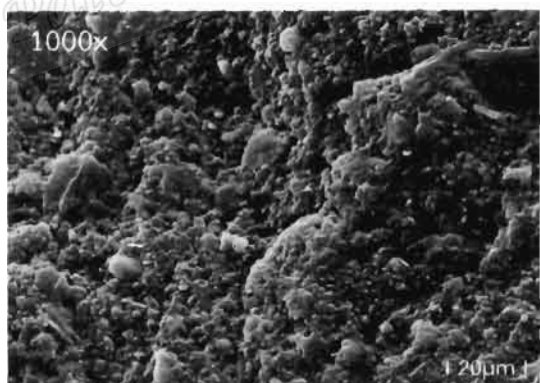
(b) 45/15/40



(c) 30/30/40



(d) 30/30/40



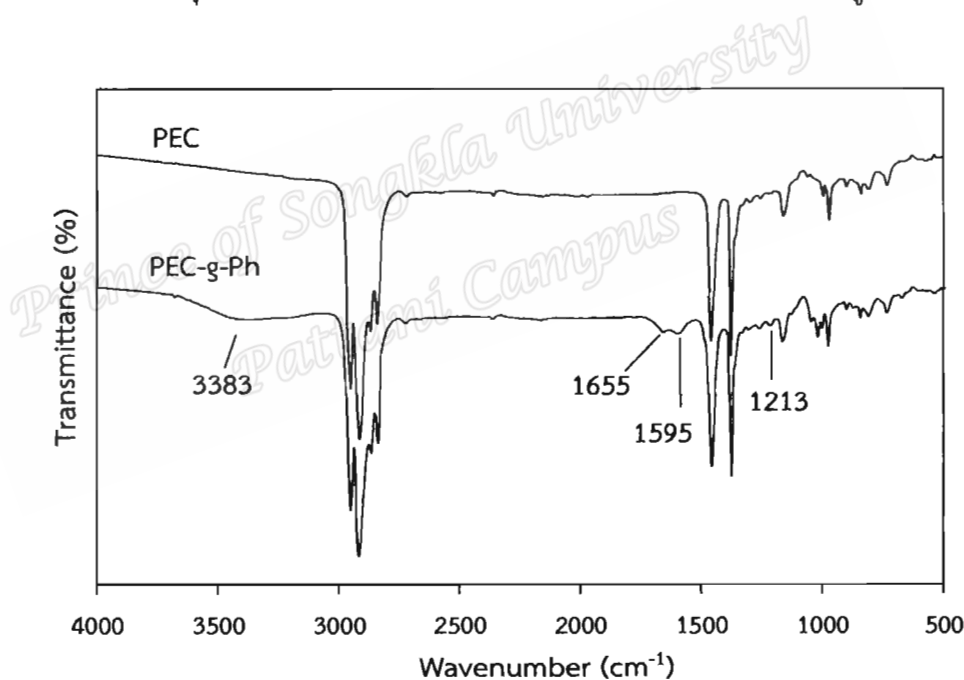
(e) 0/60/40

รูปที่ 4.69 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

4.6 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟีนอลิกเรซิน (Propylene-ethylene copolymer grafted phenolic resin, PEC-g-Ph) ร่วมกับวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวิสคาโนซ์จากการเบลนดระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

4.6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟีนอลิกเรซิน (PEC-g-Ph) เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

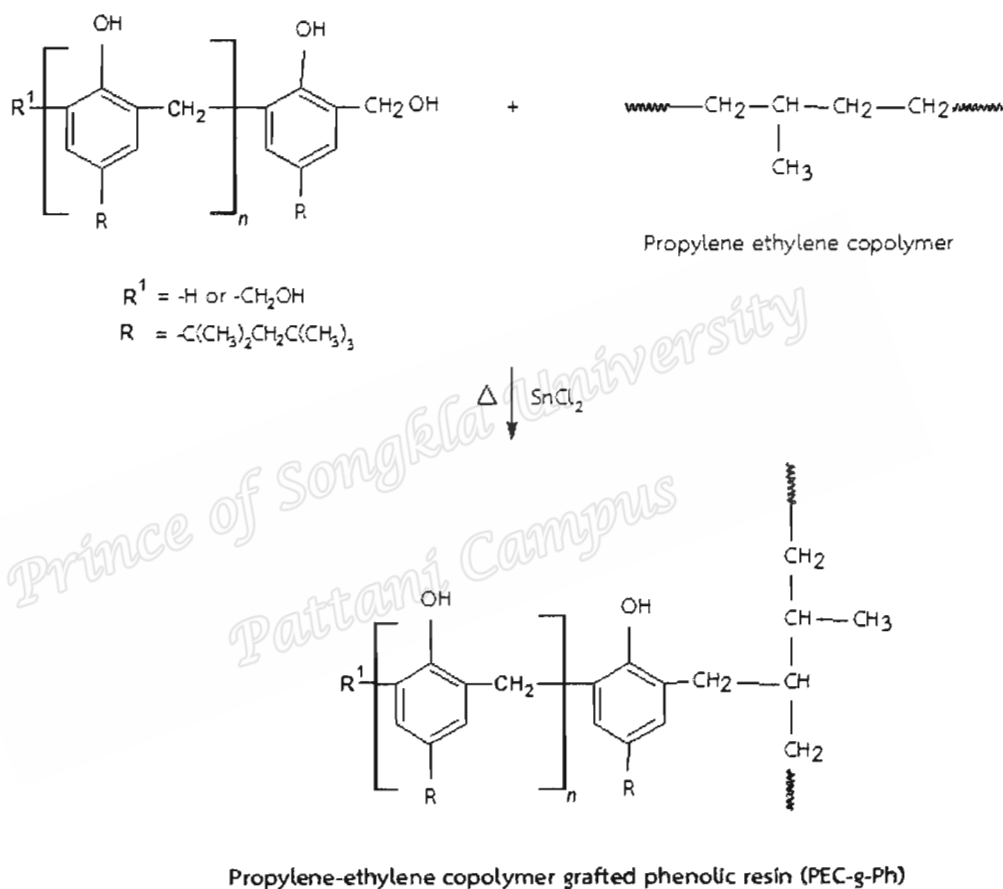
ดัดแปรโมเลกุลของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ด้วยฟีนอลิกเรซินชนิด HRJ-10518 ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.6 โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะหลอม จากนั้นนำไปวิเคราะห์การเกาะติดของฟีนอลิกเรซินบนโมเลกุลของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ด้วยเครื่อง FTIR แสดงดังรูปที่ 4.70



รูปที่ 4.70 สเปกตรัม FTIR ของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟีนอลิกเรซินเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

จากรูปที่ 4.70 แสดงสเปกตรัม FTIR ของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟีนอลิกเรซิน (PEC-g-Ph) เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (PEC) จะเห็นว่าสเปกตรัมของสารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph จะปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3383 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะไฮโดรเจนในหมู่ฟีนอล (Hydrogen bonding of phenol) และพบพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1597 cm^{-1} และ 1656 cm^{-1}

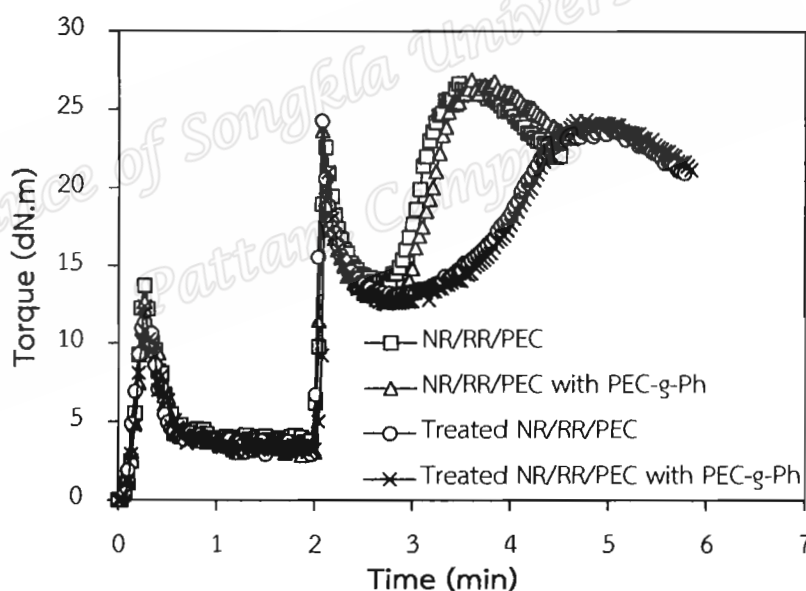
แสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ $-C=C$ ในวงแหวนอะโรมาติก ($-C=C$ stretching of aromatic rings of phenol) รวมถึงจะปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1213 cm^{-1} จากการสั่นแบบยืดของพันธะ $-C-O$ ($-C-O$ stretching of aromatic rings of phenol) (Nakason *et al.*, 2006b และ Wongthong *et al.*, 2015) โดยพิกที่ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆ ที่กล่าวมาแสดงถึงการมีฟีนอลิกเรซินที่กราฟต์บนโพลีเอทิลีนโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ การเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างฟีนอลิกเรซินกับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.71



รูปที่ 4.71 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างฟีนอลิกเรซินกับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (ดัดแปลงจาก Nakason *et al.*, 2006b)

4.6.2 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารตัดแปรฟีนอลิกเรซินต่อพฤติกรรมการณ์ผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และ โพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ด้วยวิธีการผสมแบบ Melt mixing method ทำการศึกษาลักษณะการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารตัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซิน (เติมโดยตรง) ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กการผสมกับเวลาการผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.72 โดยกำหนดให้ NR/RR/PEC แทนสูตรควบคุม (Control) ที่ไม่ใช้สารตัดแปรและสารเพิ่มความเข้ากันได้ Treated NR/RR/PEC แทนสูตรที่ใช้สารตัดแปร NR/RR/PEC with PEC-g-Ph แทนสูตรที่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ และ Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph แทนสูตรที่มีการใช้สารตัดแปรและการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ร่วมกัน



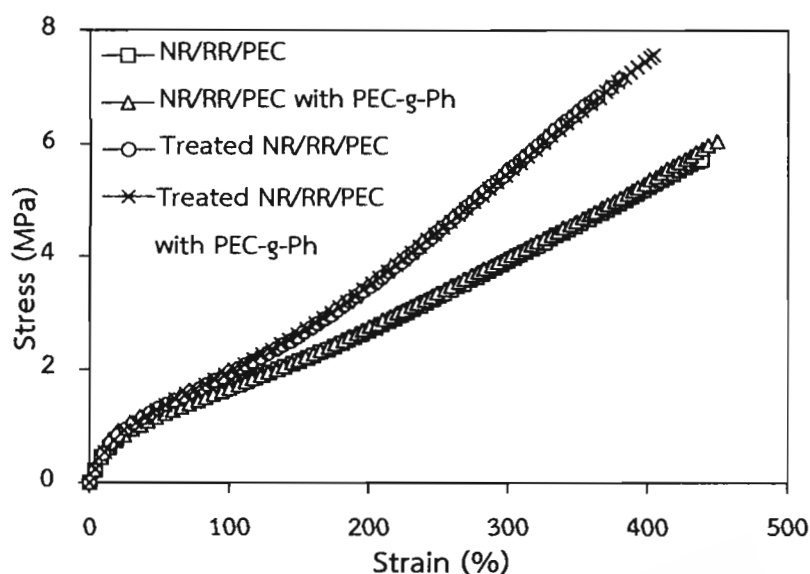
รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารตัดแปรฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.72 พบว่าค่าทอร์กการผสมในสูตร NR/RR/PEC และ NR/RR/PEC with PEC-g-Ph ซึ่งไม่ใส่สารตัดแปรฟีนอลิกเรซินให้ลักษณะทอร์กการผสมที่เหมือนกันในขณะที่สูตร Treated NR/RR/PEC และ Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้เป็นสารตัดแปรฟีนอลิกเรซินจะให้ลักษณะของทอร์กการผสมเหมือนกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบทอร์กการผสมในกรณี

ของการใช้และไม่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน (Untreated and treated) พบว่าทอร์กการผสมจะให้ลักษณะเช่นเดียวกับการศึกษาอิทธิพลวิธีการผสมสารดัดแปร และการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อใช้สารดัดแปรทำให้ทอร์กการผสมในช่วงของการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์มีระยะเวลาในการเกิดการวัลคาไนซ์ที่นานกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปร เนื่องจากการใช้ฟีนอลิกเรซินเป็นสารดัดแปรร่วมกับวิธีการเตรียมแบบ Melt mixing method จะผสมฟีนอลิกเรซินกับยางรีเคลมในขั้นตอนแรกก่อนนำไปเตรียมเป็นยางพาวนด์และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ในลำดับสุดท้าย ทำให้ฟีนอลิกเรซินผสมอยู่ในคอมพาวนด์ทำให้ระบบเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าลงซึ่งได้อธิบายไปแล้วในรูปที่ 4.15 ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของทอร์กการผสมเมื่อใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph กับพบว่ามึลักษณะของทอร์กการผสมที่ไม่แตกต่างกัน

4.6.3 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC ที่ศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph มาศึกษาสมบัติเชิงกล ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.73 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้และไม่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สูตรที่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน (Treated NR/RR/PEC และ Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph) มีความแข็งตึงสูงกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน (NR/RR/PEC และ NR/RR/PEC with PEC-g-Ph) ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สูตรที่ใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าเส้นกราฟให้ลักษณะที่ซ้อนทับกันไม่สามารถเห็นผลการทดลองที่ชัดเจน นอกจากนี้จุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์แสดงผลดังตารางที่ 4.15 รวมถึงแสดงค่าความสามารถในการคืนรูปและความแข็ง

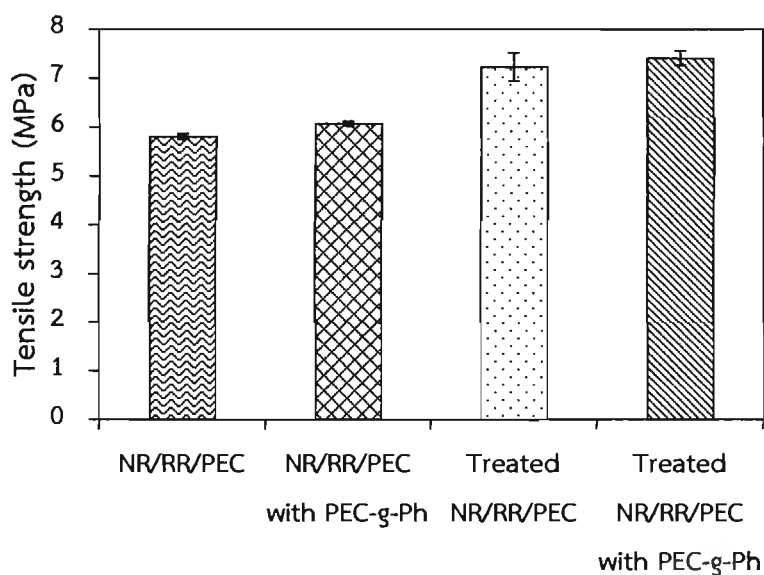


รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

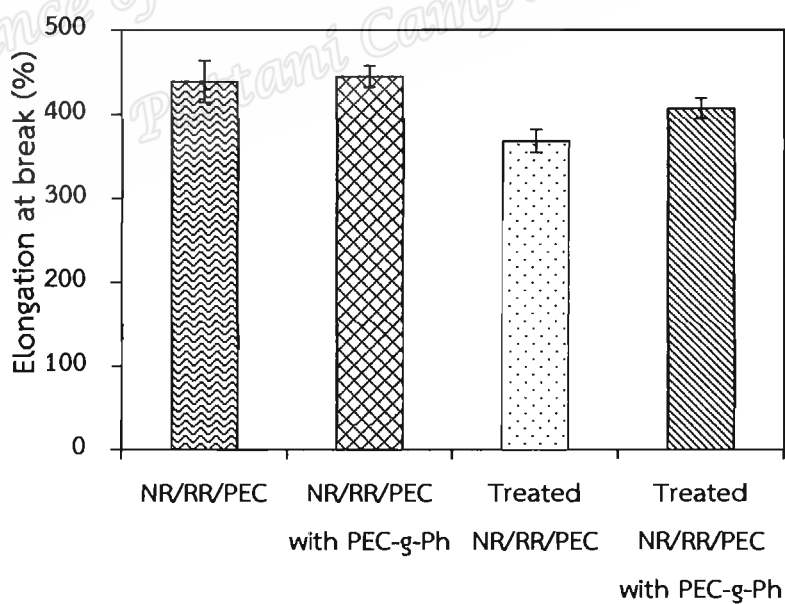
ตารางที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

Blend	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tension set (%)	Hardness (shore A)
NR/RR/PEC	5.81±0.06	439±24.64	6.28±0.21	52
NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	6.07±0.05	445±12.64	6.25±0.20	54
Treated NR/RR/PEC	7.23±0.29	368±13.74	5.52±0.35	57
Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	7.41±0.15	407±12.36	5.55±0.05	58

จากตารางที่ 4.15 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็ง เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินดังรูปที่ 4.74, 4.75, 4.77 และ 4.78 ตามลำดับ

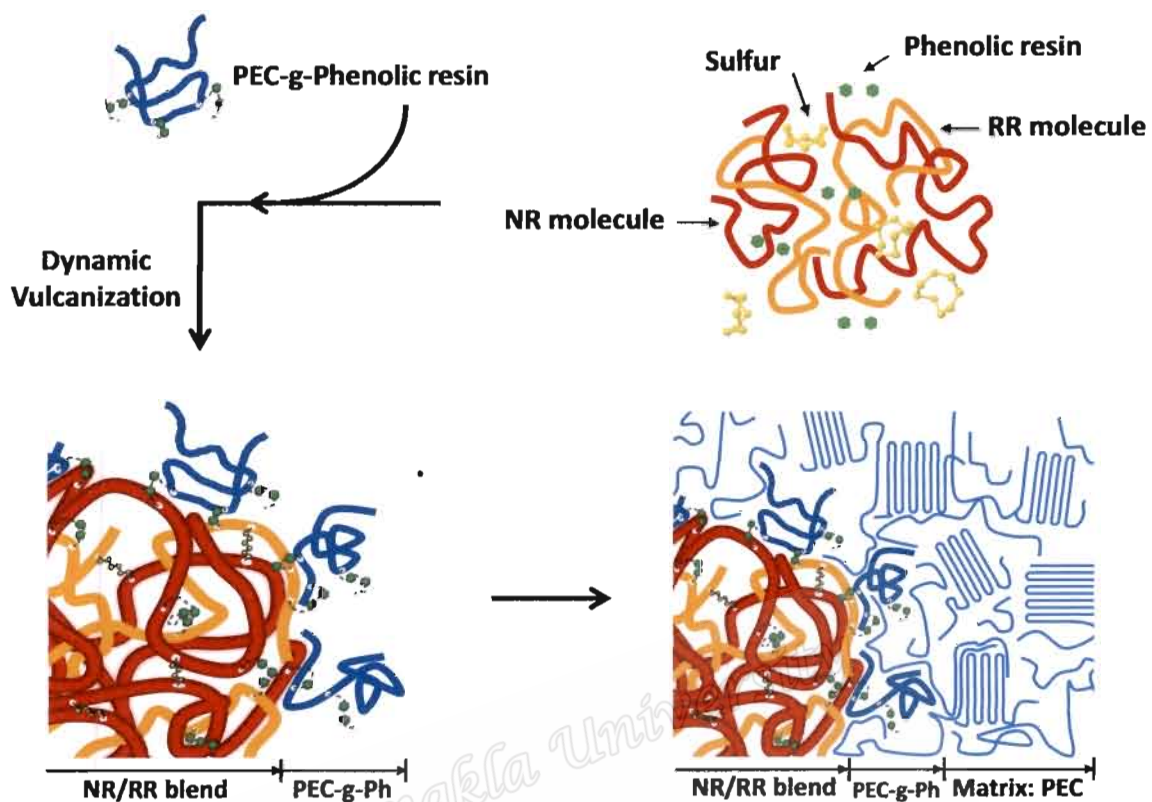


รูปที่ 4.74 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

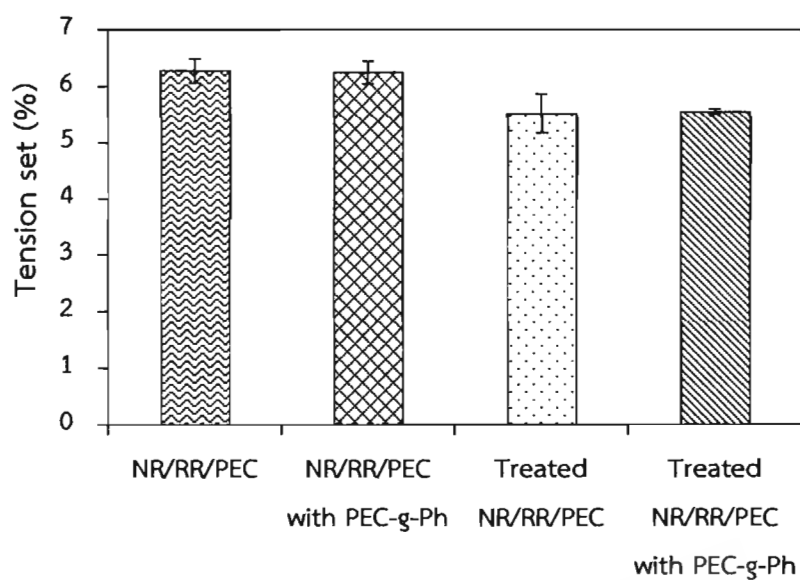


รูปที่ 4.75 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

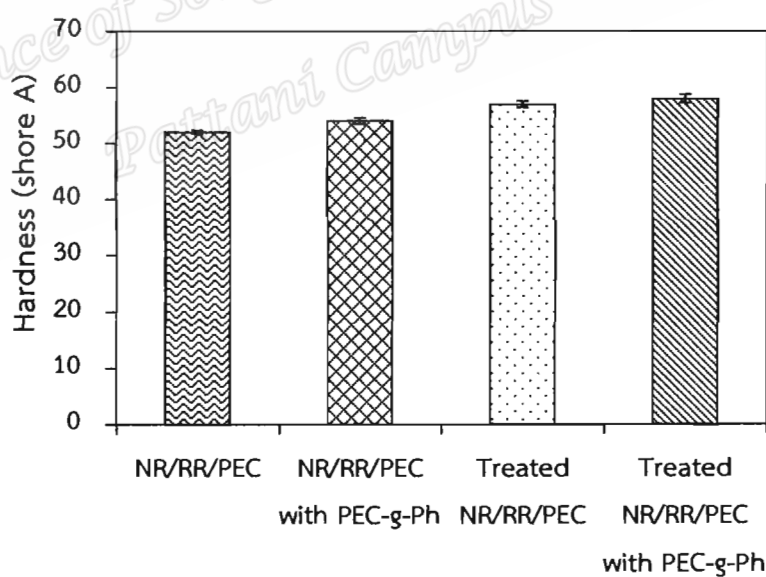
จากรูปที่ 4.74 และ 4.75 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารดัดแปร พบว่าการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยึดจนขาดลดลง เนื่องจากการใช้ฟีนอลิกเรซินเป็นสารดัดแปรจะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางรีเคลมและยางธรรมชาติได้ ซึ่งเกิดจากการที่หมู่เมทิลลอลในฟีนอลิกเรซินเกิดปฏิกิริยากับพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลของยาง (Nakason *et al.*, 2006b) ทำให้ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าเมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยึดจนขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และพบว่าการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินร่วมกับสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph (Treated NR/RR/PECwith PEC-g-Ph) ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงที่สุด เนื่องจากผลของการใช้ฟีนอลิกเรซินเป็นสารดัดแปรมีความสามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางรีเคลมและยางธรรมชาติ และเมื่อใช้ร่วมกับสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติก เนื่องจาก PEC-g-Ph เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีโครงสร้างส่วนหนึ่งเป็นโมเลกุลของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ทำให้สามารถเบลนด์เข้าโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ได้ดี แสดงลักษณะการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้เมื่อใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินร่วมสารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph ดังรูปที่ 4.76 โดยที่สารเพิ่มความเข้ากันได้จะเข้าไปเป็นตัวประสานที่ผิวประจัญ (Interface) ของทั้งสองเฟสซึ่งส่งผลต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของยางและพลาสติกทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่ดี และมีโอกาสทำให้เฟสยางเกิดการกระจายอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น



รูปที่ 4.76 การเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้เมื่อใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินร่วมสารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph



รูปที่ 4.77 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

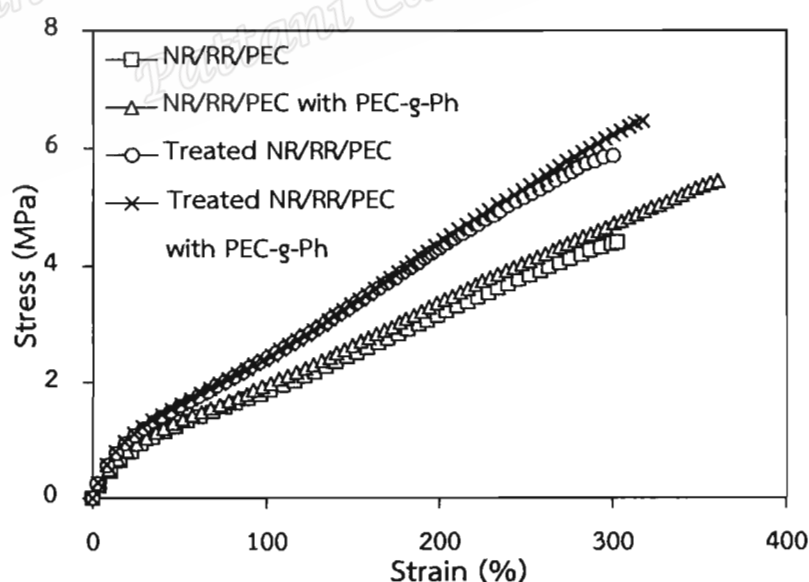


รูปที่ 4.78 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.77 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความสามารถในการคืนรูปเพิ่มขึ้น (Tension set ลดลง) เมื่อใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน ซึ่งเกิดจากการที่ฟีนอลิกเรซินเข้าไปช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางดัดที่กล่าวไว้ข้างต้น และเมื่อเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความสามารถในการคืนรูปไม่แตกต่างกัน ผลการวัดความแข็งแรงแสดงในรูปที่ 4.78 พบว่าให้ผลเช่นเดียวกันกับค่าความสามารถในการคืนรูป กล่าวคือความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีความแข็งแรงไม่แตกต่างกันเมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph

4.6.4 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC ที่ศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph มาทดสอบความต้านทานต่อการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างออกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.79



รูปที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.79 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์หลังจากนำไปบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงแสดงพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นไม่ได้แตกต่างจากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ก่อนบ่มแรง กล่าวคือเมื่อพิจารณาโมดูลัสที่ระยะยืดเดียวกันพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินจะให้โมดูลัสสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าโมดูลัสไม่แตกต่างกัน แต่พบว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความสามารถในการยืดจนขาดและความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้เล็กน้อย และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ แสดงดังตารางที่ 4.16 และ 4.17 รวมถึงแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติภายหลังบ่มแรงด้วย

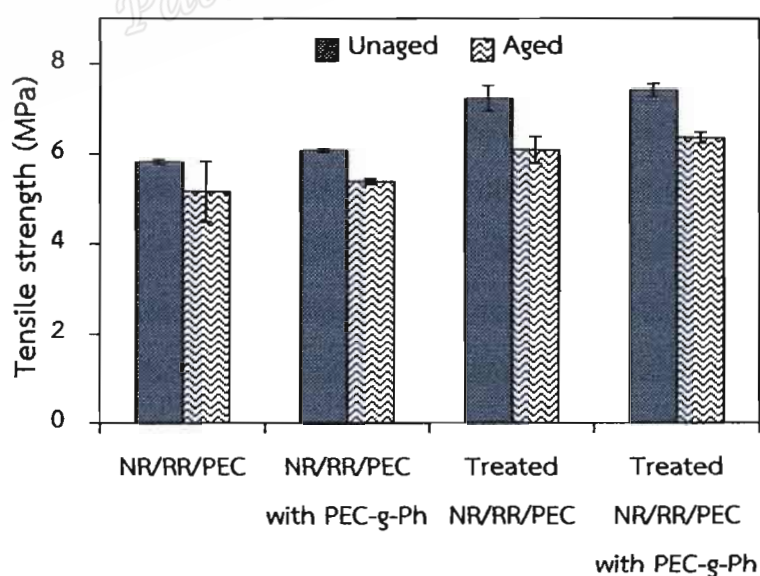
ตารางที่ 4.16 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

Blend	Tensile strength (MPa)		Change in property of tensile strength (%)
	Unaged	Aged	
NR/RR/PEC	5.81±0.06	5.16±0.67	-11.19
NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	6.07±0.05	5.38±0.06	-11.37
Treated NR/RR/PEC	7.23±0.29	6.09±0.30	-15.77
Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	7.41±0.15	6.36±0.12	-14.17

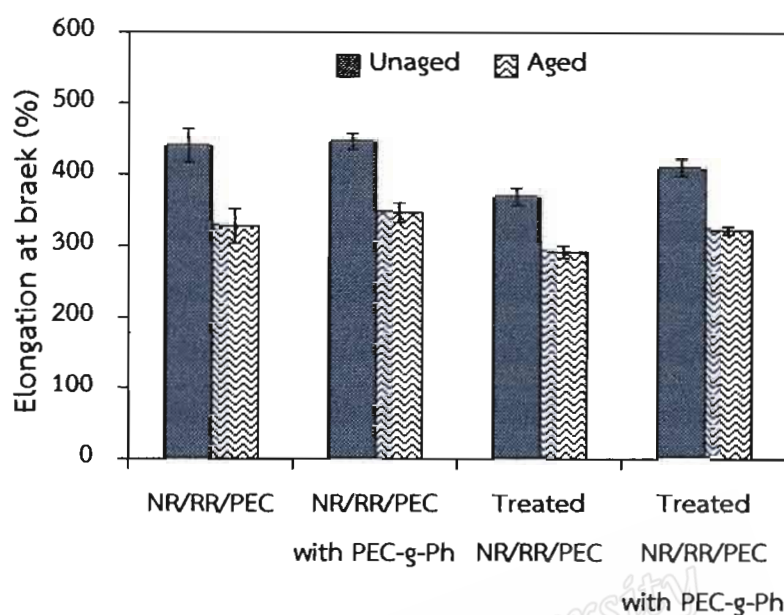
ตารางที่ 4.17 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

Blend	Elongation at break (%)		Change in property of elongation at break (%)
	Unaged	Aged	
NR/RR/PEC	439±24.64	328±24.08	-25.28
NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	445±12.64	347±13.47	-22.02
Treated NR/RR/PEC	368±13.74	292±8.59	-20.65
Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	407±12.36	322±5.71	-20.88

จากตารางที่ 4.16 และ 4.17 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ดังแสดงในรูปที่ 4.80 และ 4.81 รวมถึงแสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังบ่มแรงในรูปที่ 4.82



รูปที่ 4.80 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

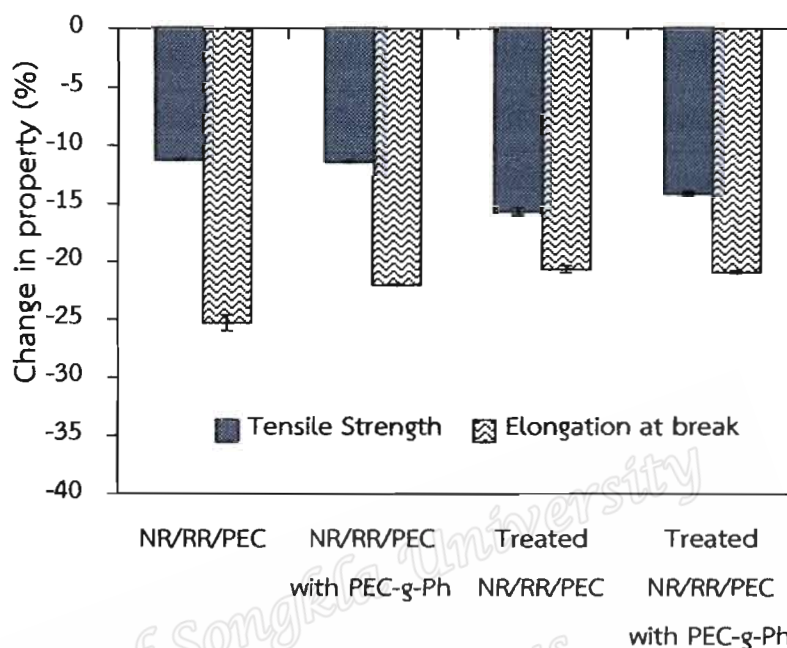


รูปที่ 4.81 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.80 และ 4.81 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าน้อยกว่าก่อนบ่มแรง เนื่องจากผลของการเสื่อมสภาพในเฟสยางธรรมชาติภายหลังการบ่มแรง ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้และไม่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินจะให้ผลการทดลองคล้ายคลึงกับผลสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรง กล่าวคือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินจะให้ค่าความต้านต่อแรงดึงสูงกว่า ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าต่ำกว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปร ส่วนการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ส่งผลให้ความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติซึ่งแสดงในรูปที่ 4.82 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าติดลบ และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารดัดแปรเล็กน้อย ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดต่ำกว่า นอกจากนี้พบว่าเทอร์โม

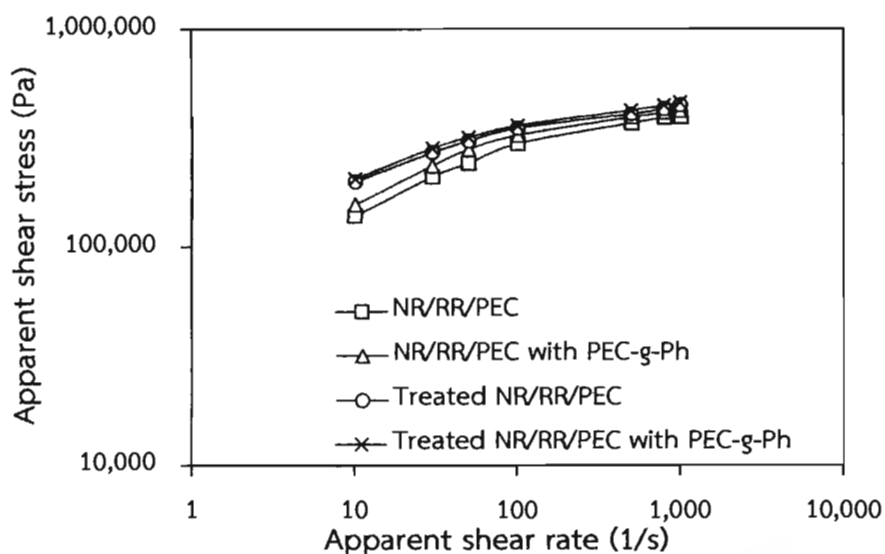
พลาสติกที่ใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph จะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติไม่แตกต่างกัน



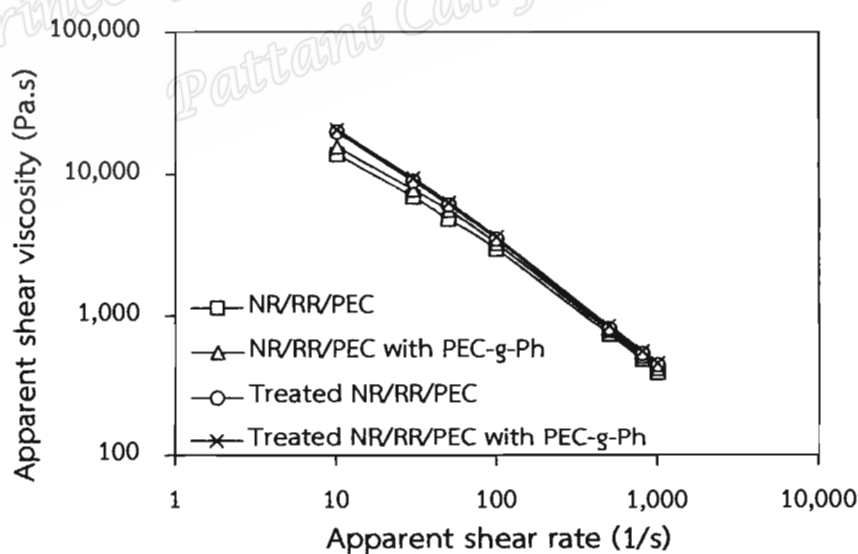
รูปที่ 4.82 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

4.6.5 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติการไหลตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.5 เปรียบเทียบสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพื่อศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏดังแสดงในรูปที่ 4.83 และ 4.84



รูปที่ 4.83 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

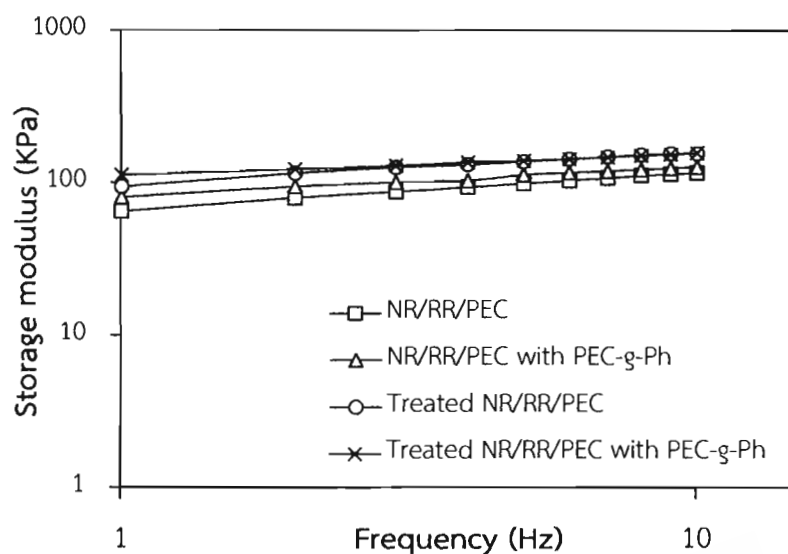


รูปที่ 4.84 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

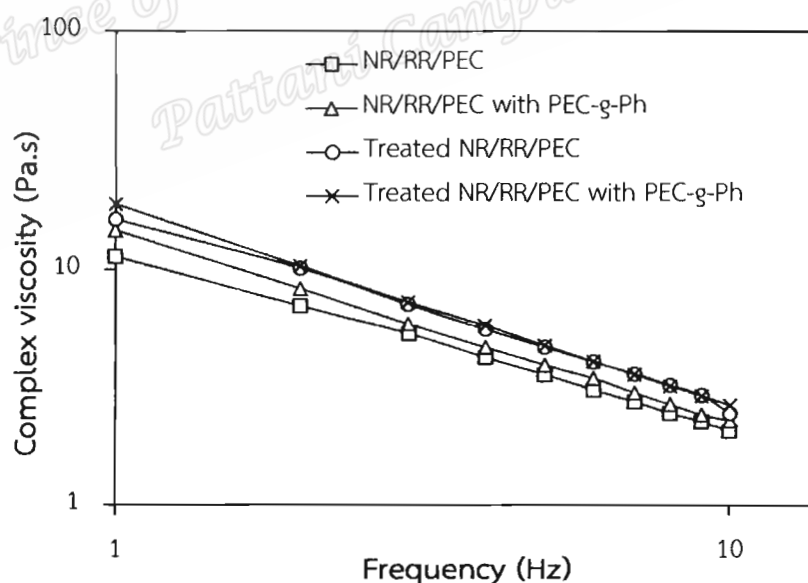
จากรูปที่ 4.83 และ 4.84 เมื่อพิจารณาที่อัตราเฉือนปรากฏเดียวกันพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน ไม่ว่าจะมีการหรือไม่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันชนิด PEC-g-Ph (Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph และ Treated NR/RR/PEC) ให้ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปรทั้ง 2 สูตร (NR/RR/PEC with PEC-g-Ph และ NR/RR/PEC) แสดงให้เห็นว่าการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เกิดการหลอมและไหลได้ยากขึ้น เนื่องมาจากผลของการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางธรรมชาติกับยางรีเคลมด้วยฟีนอลิกเรซินที่ผูกผสมเข้ากับยางรีเคลมและยางธรรมชาติในขั้นตอนการเตรียมยางคอมพาวนด์ นอกจากนี้การเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นอาจส่งผลให้ช่วยลดแรงตึงผิวและทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสเพิ่มมากขึ้น ทำให้การส่งผ่านแรงเค้นระหว่างเฟสยางและเฟสพลาสติกมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงยังช่วยให้การลื่นไถลระหว่างผิวลดลง

4.6.6 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC โดยศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph นำมาทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.6 ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน และ $\tan \delta$ กับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.85-4.87 ตามลำดับ

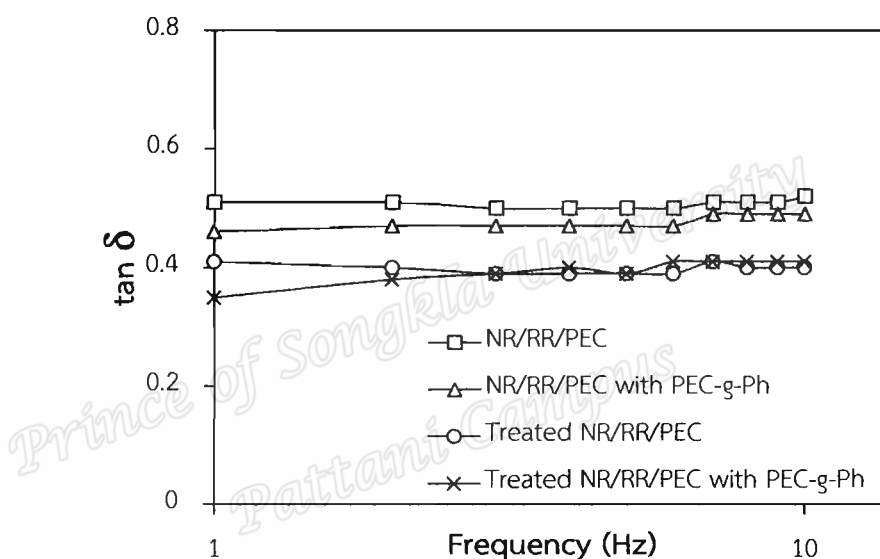


รูปที่ 4.85 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน



รูปที่ 4.86 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.85 และ 4.86 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินให้มอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนสูงกว่ากรณีไม่ใช้สารดัดแปรในการปรับปรุงความเข้ากันได้ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ให้มอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนสูงกว่า แสดงให้เห็นว่าการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินร่วมกับการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ช่วยเสริมให้โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความแข็งแรงมากขึ้นจึงต้านการบิดของโรเตอร์สูงและไหลได้ยาก

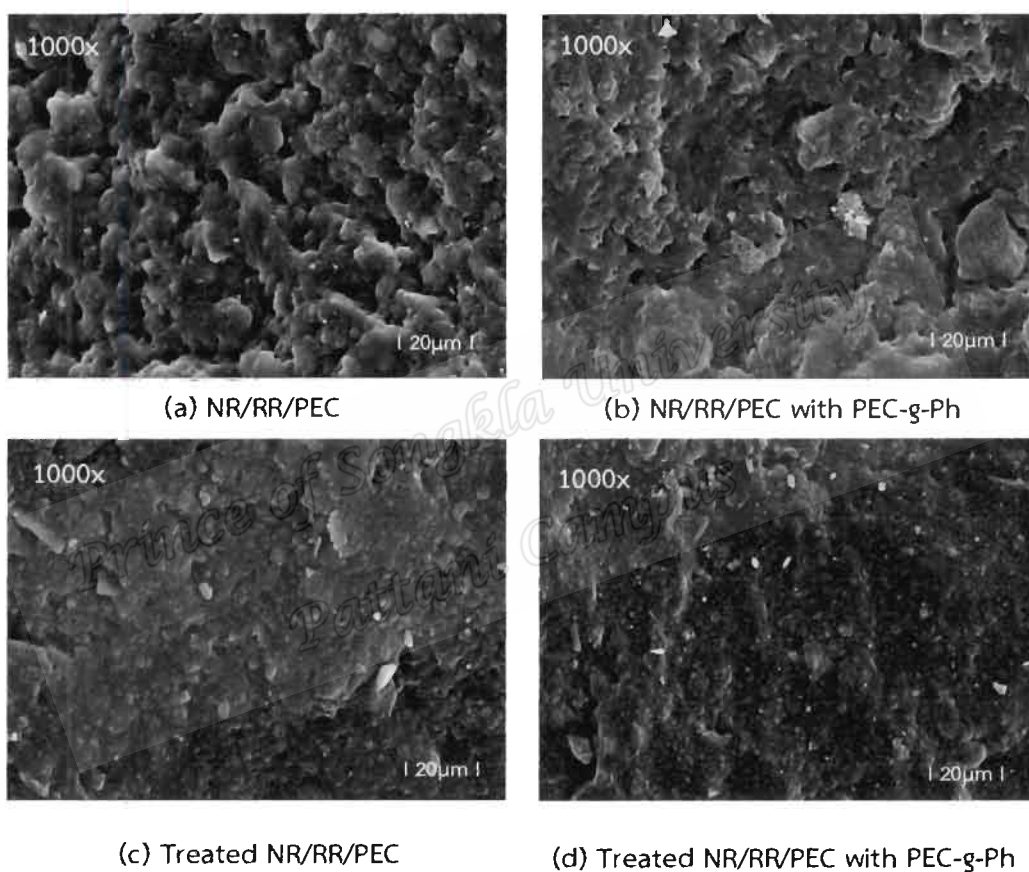


รูปที่ 4.87 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.87 เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกันพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สูตร NR/RR/PEC ให้ค่า $\tan \delta$ สูงที่สุด รองลงมาคือ NR/RR/PEC with PEC-g-Ph ในขณะที่ Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph และ Treated NR/RR/PEC มีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินและการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ทำให้พื้นที่บริเวณผิวประจัญระหว่างเฟสทั้งสาม มีการยึดเหนี่ยวกันและเข้ากันได้มากขึ้นจึงสามารถส่งผ่านพลังงานบริเวณรอยต่อเฟสได้ดี ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่อยู่ในรูปของความร้อนน้อยที่สุดและมีการตอบสนองแบบอีลาสติกสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการคืนรูปซึ่งแสดงในรูปที่ 4.77

4.6.7 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/RR/PEC ที่ศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph มาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.88



รูปที่ 4.88 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.88 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน (รูปที่ 4.88(c) และ 4.88(d)) จะมีลักษณะพื้นผิวที่สม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน (รูปที่ 4.88(a) และ 4.88(b)) และเมื่อเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph พบว่าเมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph (รูปที่ 4.88(b) และ 4.88(d))

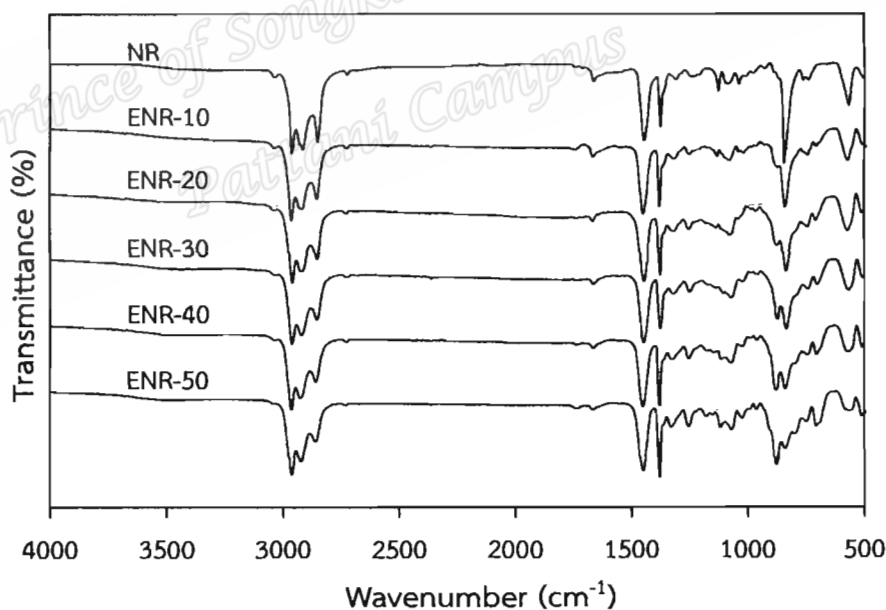
พบว่าเฟสยางในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะเกิดการกระจายตัวที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับไม่ใช้ (รูปที่ 4.88(a) และ 4.88(c)) รวมถึงจะให้ลักษณะของพื้นผิวที่สม่ำเสมอมากกว่า ซึ่งลักษณะฐานวิทยาศาสตร์ได้สอดคล้องกับสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลพลวัต โดยใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินร่วมกับสารเพิ่มความเข้ากัน PEC-g-Ph (Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph) ให้สมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด

4.7 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

4.7.1 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

4.7.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เตรียมขึ้นตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.7 ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ได้สเปกตรัมของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.89



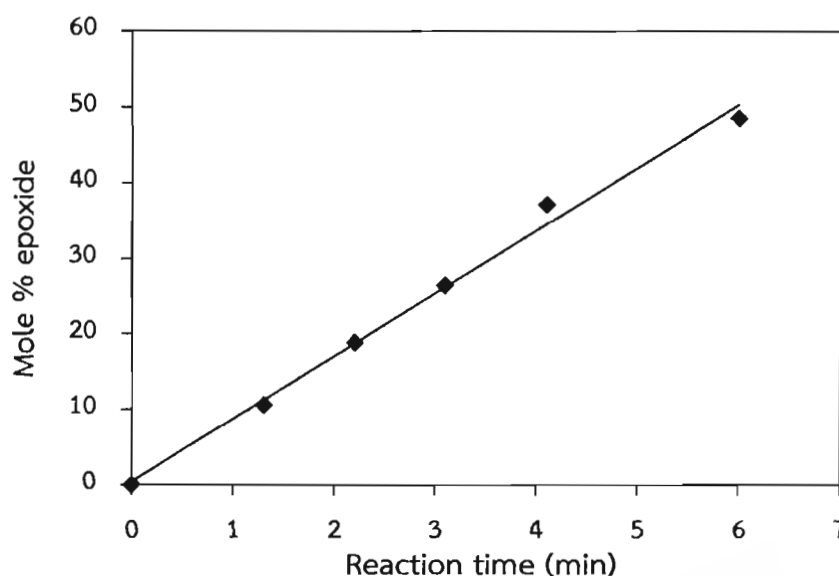
รูปที่ 4.89 สเปกตรัม FTIR ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในระดับต่างๆ เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.89 แสดงสเปกตรัม FTIR ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ(NR) จะเห็นว่าสเปกตรัมของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} และ 1240 cm^{-1} เพิ่มขึ้นมาซึ่งแสดงถึงการเกิดวงแหวนออกซิเรน (Oxirane ring) หรือหมู่อีพอกไซด์ที่เกาะติดบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ และพบว่าความเข้มของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 835 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยึดของพันธะคู่ (cis C=C) และ C-H out of plane bending ของพันธะ -C-H ที่ต่อกับ C=C ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ จะลดลงตามปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และจากสเปกตรัม FTIR สามารถนำไปคำนวณหาอัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (Absorbance ratio, Ar) ของหมู่อีพอกไซด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} เปรียบเทียบตำแหน่งเลขคลื่นที่ 835 cm^{-1} โดยใช้สมการที่ 2.1 จากนั้นนำอัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่ากราฟมาตรฐานของ Davey and Loadman (1984) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 ได้ผลดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ปริมาณหมู่อีพอกไซด์เมื่อใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50°C

Reaction time (hr)	Epoxide content (mole%)
1.30	10.56
2.30	18.82
3.30	26.45
4.30	37.18
6.30	48.55

จากตารางที่ 4.18 สามารถนำเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหมู่อีพอกไซด์กับระยะเวลาการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้ดังแสดงในรูปที่ 4.90



รูปที่ 4.90 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหมู่อีพอกไซด์กับระยะเวลาการทำปฏิกิริยา

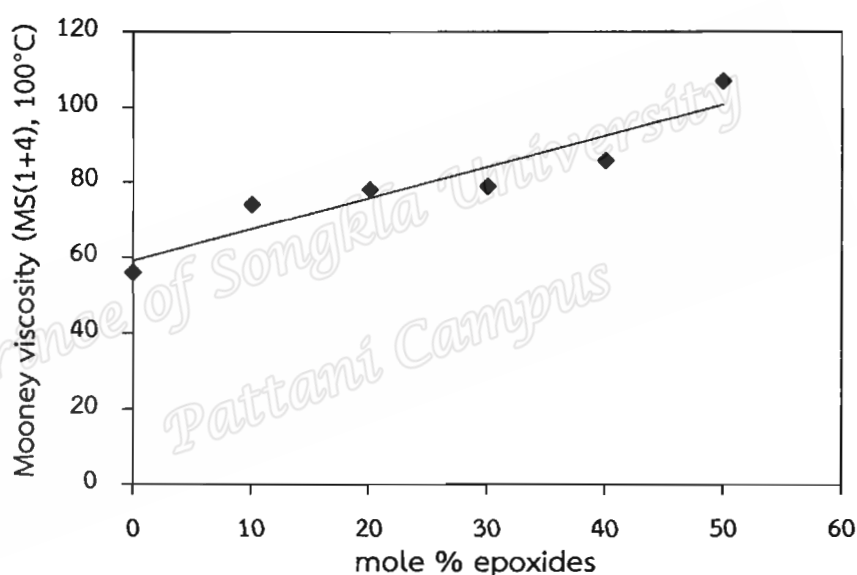
จากรูปที่ 4.90 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน จะทำให้เกิดปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในโมเลกุลของยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกรดเปอร์ฟอร์มิกจะทำปฏิกิริยากับโครงสร้างไม่อิ่มตัวของยางธรรมชาติ ได้โมเลกุลที่มีวงแหวนอีพอกไซด์บนโครงสร้างและกรดฟอร์มิกที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา และสามารถเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้อีก ทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะหมด ดังนั้นจึงทำให้มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น

4.7.1.2 ความหนืดมูนี (Mooney viscosity) ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

นำยางธรรมชาติและยางอีพอกไซด์ที่เตรียมได้ซึ่งมีปริมาณหมู่อีพอกไซด์แตกต่างกัน มาทดสอบหาค่าความหนืดมูนี ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.1 ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.19 และสามารถนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนีกับปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.91

ตารางที่ 4.19 ความหนืดมูนีของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์

Types of rubber	Mooney viscosity (MS(1+4), 100°C)
NR	56
ENR-10	74
ENR-20	78
ENR-30	79
ENR-40	86
ENR-50	107

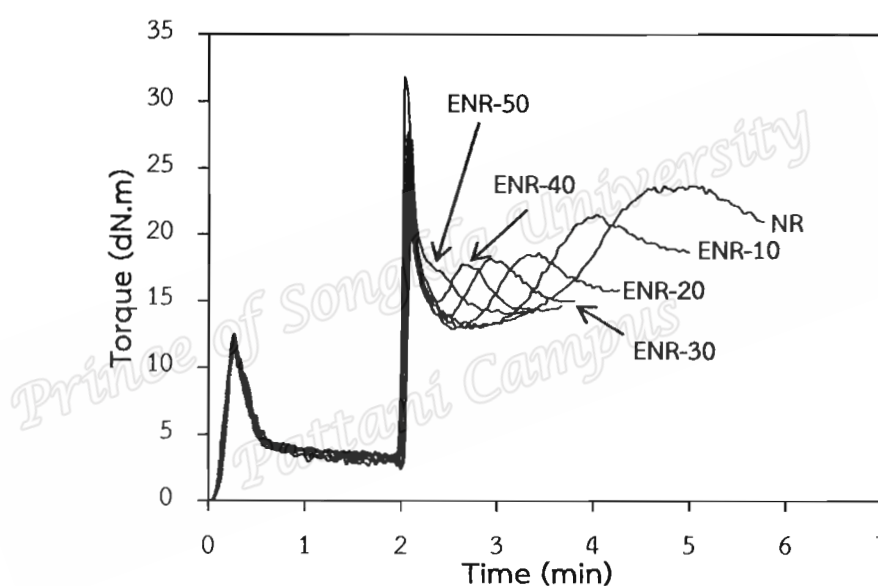


รูปที่ 4.91 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนีของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

จากตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.91 พบว่าค่าความหนืดมูนีของยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ และจะมีค่าความหนืดมูนีเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการดัดแปรโมเลกุลยางธรรมชาติด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันทำให้พันธะในโมเลกุลยางเปลี่ยนเป็นหมู่อีพอกไซด์ที่มีสภาพขั้ว ซึ่งการเพิ่มหมู่อีพอกไซด์เป็นการเพิ่มสภาพขั้วในโมเลกุลยาง ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงขึ้น (ภริพงศ์, 2548) อีกทั้งหมู่อีพอกไซด์เป็นหมู่ขนาดใหญ่ที่สามารถขัดขวางความเป็นระเบียบของสายโซ่ยางธรรมชาติได้ ส่งผลให้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ไหลได้ยากขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

4.7.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และ โพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ด้วยวิธีการผสมแบบ Melt mixing method และใช้ปริมาณสารดัดแปร ฟีนอลิกเรซินปริมาณ 10 phr โดยแปรชนิดยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (NR) และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ 10 (ENR-10), 20 (ENR-20), 30 (ENR-30), 40 (ENR-40) และ 50 (ENR-50) เปอร์เซ็นต์โดยโมล ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กการผสมกับเวลาการผสมดังแสดงในรูปที่ 4.92



รูปที่ 4.92 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.91 พบว่าที่เวลาประมาณนาทีที่ 2 เป็นช่วงที่ไสยงคอมพาวนด์เข้าไปผสมกับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ พบว่าเมื่อพิจารณาในช่วงการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์จะมีระยะเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์และค่าทอร์กสูงสุดที่การวัลคาไนซ์สมบูรณ์ลดลงตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ดังข้อมูลสรุปในตารางที่ 4.20 เนื่องจากการมีหมู่อีพอกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลของยางเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของพันธะคู่ในโมเลกุลยางธรรมชาติลดลง (Poh *et al.*, 2000 และ Noriman *et al.*, 2010) ทำให้การเกิดพันธะเชื่อมขวางด้วยกำมะถันมีน้อยลง ส่งผลให้ความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางลดลงตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการที่ระยะเวลา

การวัลคาไนซ์ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ระยะเวลาสั้นลงตามปริมาณของหมู่เอพอกไซด์ในยางธรรมชาติเอพอกไซด์ที่มากขึ้น น่าจะมาจากผลของอันตรกิริยาหรือปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างพีนอลิกเรซินกับหมู่ oxirane ring ในยางธรรมชาติเอพอกไซด์

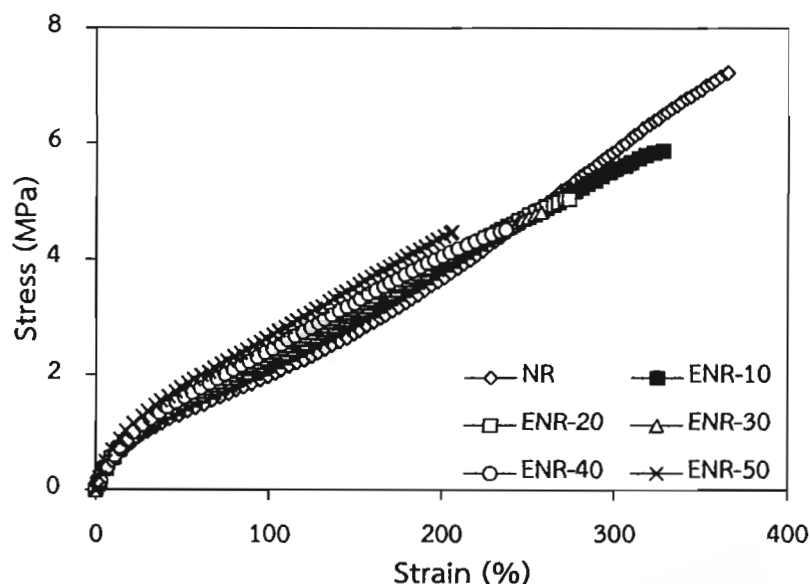
ตารางที่ 4.20 ค่าทอร์กสูงสุดและระยะเวลาการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์

Type of rubber	Max torque (dN.m)	Time of vulcanization (min)
NR	23.67	1.4
ENR-10	21.49	1.48
ENR-20	18.58	0.86
ENR-30	18.14	0.26
ENR-40	17.72	0.14
ENR-50*	-	-

หมายเหตุ *ENR-50 ทอร์กจะมีค่าลดลงเรื่อยๆไม่ปรากฏพีคที่ชัดเจน

4.7.3 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC โดยแปรชนิดยางธรรมชาติ มาศึกษาสมบัติเชิงกล ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.93



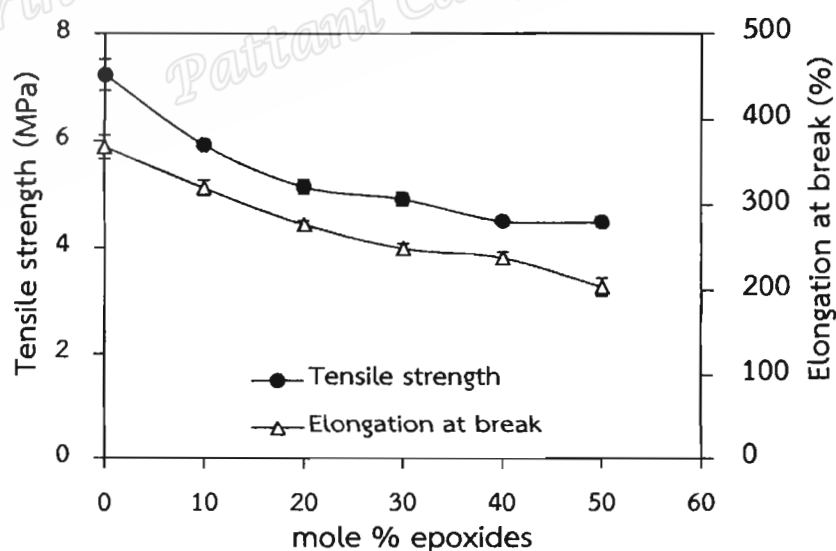
รูปที่ 4.93 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.93 เมื่อพิจารณามอดูลัสที่ระยะยืด 100% พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีความแข็งตึงมากกว่ายางธรรมชาติ โดยความแข็งตึงในโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเหนียวทนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์กลับมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีความเป็นขั้วและความแข็งตึงของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้นจากผลของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Nakason *et al.*, 2005) ในขณะเดียวกันการมีปริมาณหมู่อีพอกไซด์เพิ่มมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มความกะกัให้โมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จึงทำให้มีความยืดหยุ่นลดลงส่งผลให้ระยะยืดลดลงประกอบกับค่าทอร์กการผสมที่แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีระดับค่าทอร์กที่ตำแหน่งไดนามิกวัลคาไนเซชันลดลง และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.21 รวมทั้งแสดงค่าความสามารถในการคืนรูป และความแข็งด้วย

ตารางที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

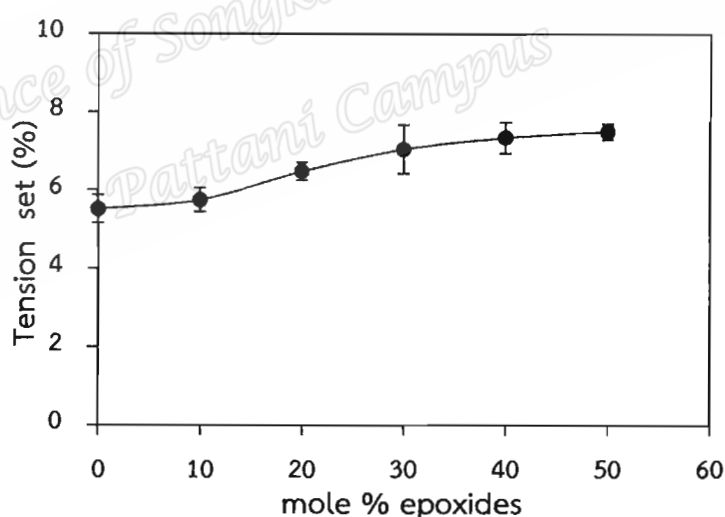
Type of rubber	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tension set (%)	Hardness (Shore A)
NR	7.23±0.29	368±13.74	5.52±0.35	57
ENR-10	5.92±0.06	320±8.98	5.75±0.30	59
ENR-20	5.14±0.13	277±4.44	6.47±0.23	61
ENR-30	4.91±0.12	249±5.65	7.03±0.62	61
ENR-40	4.50±0.05	238±6.89	7.33±0.40	62
ENR-50	4.48±0.10	204±10.79	7.48±0.20	65

จากตารางที่ 4.21 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็ง เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.94, 4.95 และ 4.96 ตามลำดับ

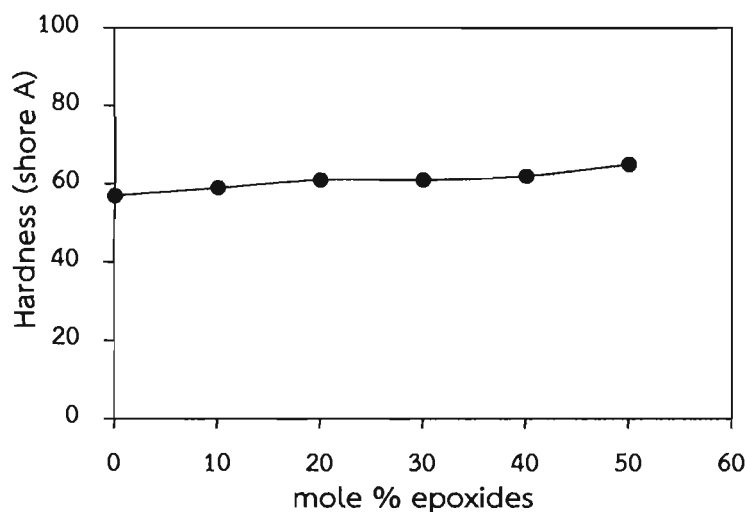


รูปที่ 4.94 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากที่รูปที่ 4.94 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติจะมีค่ามากกว่าสมบัติดังกล่าวของยางธรรมชาติอีพอกไซด์อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีค่าลดลงตามปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในโมเลกุล เนื่องจากเมื่อมีปริมาณหมู่อีพอกไซด์เพิ่มมากขึ้นทำให้มีปริมาณพันธะคู่บนสายโซ่โมเลกุลที่จะไปเกิดปฏิกิริยากับสารวัลคาไนซ์ได้น้อยลง ส่งผลให้มีปริมาณพันธะเชื่อมขวางน้อยลงซึ่งสอดคล้องกับความสูงของทอร์การผสมซึ่งแสดงในรูปที่ 4.90 ในขณะที่การลดลงของความสามารถในการยืดจนขาดนั้นเป็นผลมาจากปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเค้นในโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์เพิ่มมากขึ้น รวมถึงทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์แข็งตึงขึ้น (Nakason *et al.*, 2005) ส่งผลให้ความยืดหยุ่นลดลง นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันระหว่างเฟสของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์เนื่องจากความแตกต่างของสภาพขั้วในแต่ละเฟสดังนั้นจึงให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ลดลง



รูปที่ 4.95 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

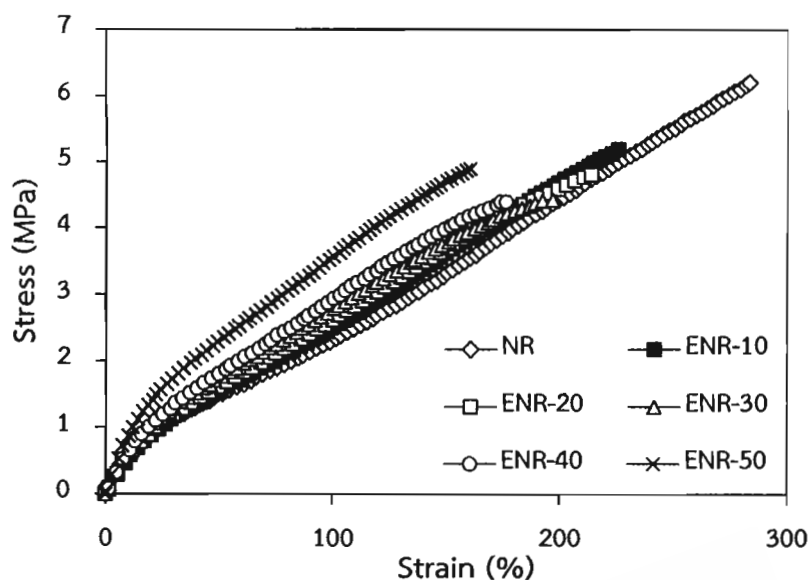


รูปที่ 4.96 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.95 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมีความสามารถในการคืนรูปดีที่สุด ขณะที่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีความสามารถในการคืนรูปลดลง (Tension set เพิ่มขึ้น) ตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ซึ่งเกิดจากหมู่อีพอกไซด์มีสภาพเป็นขั้วและมีขนาดใหญ่ทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติกของวัสดุลดลง นอกจากนี้การที่มีหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์มากขึ้นจึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความแข็ง (รูปที่ 4.96) เพิ่มขึ้น

4.7.4 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC โดยแปรชนิดยางธรรมชาติมาทดสอบความต้านทานต่อการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำตัวอย่างออกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.97



รูปที่ 4.97 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.97 แสดงพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติพบว่าพฤติกรรมการผิดรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ก่อนและหลังบ่มแรงไม่แตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อพิจารณาโมดูลัสที่ระยะยืด 100% พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีโมดูลัสสูงขึ้นตามสภาพขั้วในยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นขณะที่ให้ระยะยืดลดลงซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของหมู่ไอพอกไซด์ซึ่งได้อธิบายไปแล้วข้างต้น และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถนำมาคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.22 และ 4.23 นอกจากนี้ยังแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้วย

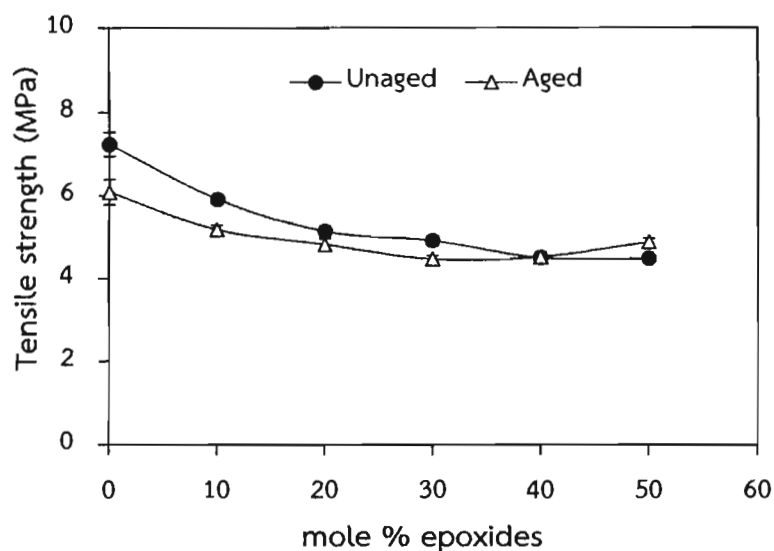
ตารางที่ 4.22 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

Type of rubber	Tensile strength (MPa)		Change in property of tensile strength (%)
	Unaged	Aged	
NR	7.23±0.29	6.09±0.30	-15.77
ENR-10	5.92±0.06	5.18±0.10	-12.50
ENR-20	5.14±0.13	4.82±0.13	-6.23
ENR-30	4.91±0.12	4.47±0.08	-8.96
ENR-40	4.50±0.05	4.52±0.12	0.44
ENR-50	4.48±0.10	4.88±0.08	8.93

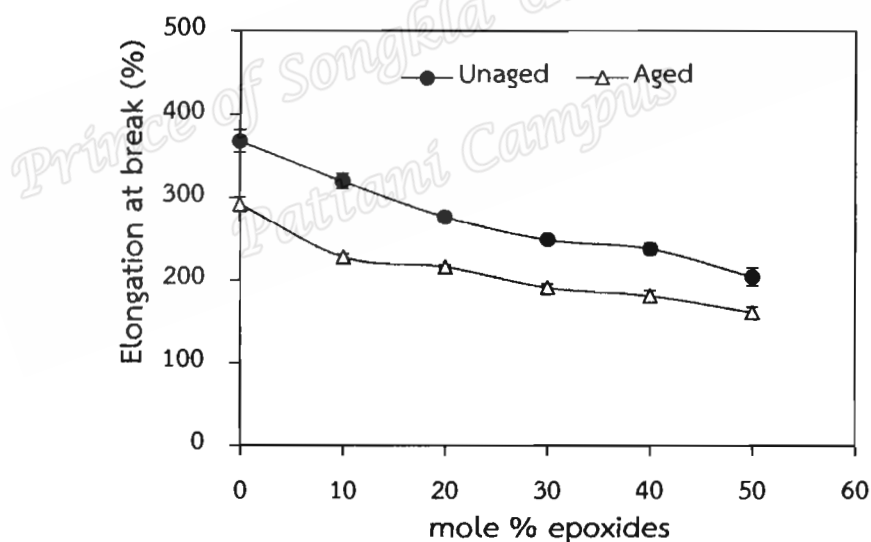
ตารางที่ 4.23 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

Type of rubber	Elongation at break (%)		Change in property of elongation at break (%)
	Unaged	Aged	
NR	368±13.74	292±8.59	-20.65
ENR-10	320±8.98	228±3.35	-28.75
ENR-20	277±4.44	216±2.31	-22.02
ENR-30	249±5.65	191±4.29	-23.29
ENR-40	238±6.89	181±6.60	-23.95
ENR-50	204±10.79	161±6.45	-21.08

จากตารางที่ 4.22 และ 4.23 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด ก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ดังแสดงในรูปที่ 4.98 และ 4.99 รวมถึงแสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติภายหลังบ่มแรงในรูปที่ 4.100



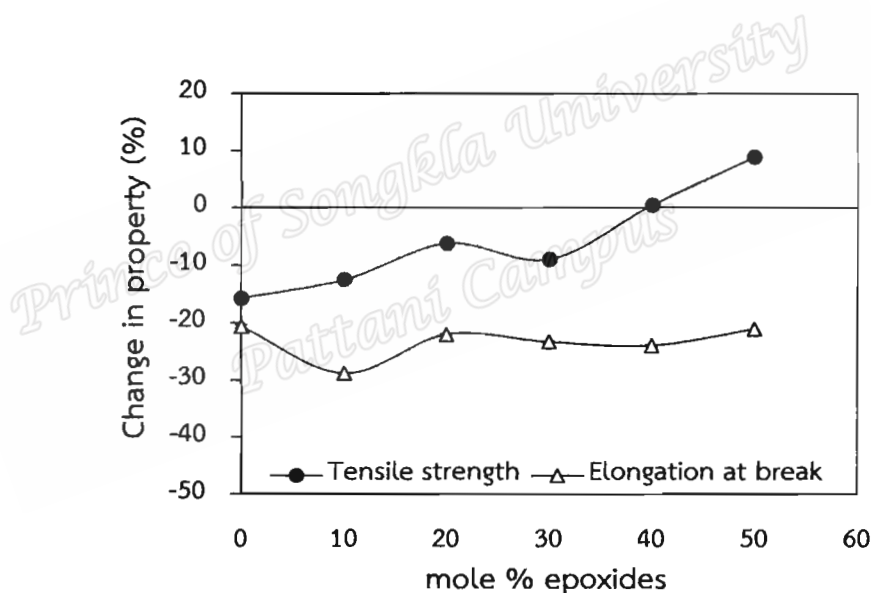
รูปที่ 4.98 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.99 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.98 และ 4.99 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติเช่นเดียวกับก่อนบ่มแรง ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ภายหลังบ่มแรงจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่

เพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ยกเว้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้ยาง ENR-50 จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากเฟสของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เกิดการเปิดวงแหวนและเกิด Self crosslinking reaction ระหว่างโมเลกุล (เด่นศักดิ์, 2558) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดซึ่งแสดงในรูปที่ 4.100 พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ แสดงให้เห็นว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในองค์ประกอบเบลนด์ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มต้านทานต่อการบ่มแรงได้ดีกว่าการใช้ยางธรรมชาติ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันจะเป็นการปลดปล่อยปริมาณของส่วนที่ไม่อึดตัวในสายโซ่ยางธรรมชาติ (Gelling, 1991) กล่าวคือปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พันธะคู่ในหน่วยซ้ำของไอโซพรีนของยางธรรมชาติมีปริมาณลดลงจึงมีความต้านทานต่อการบ่มแรงได้ดีขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

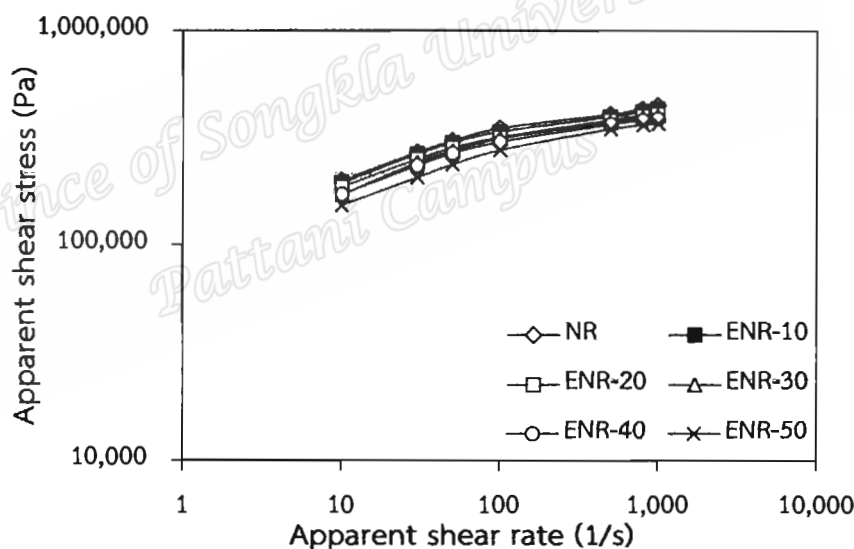


รูปที่ 4.100 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

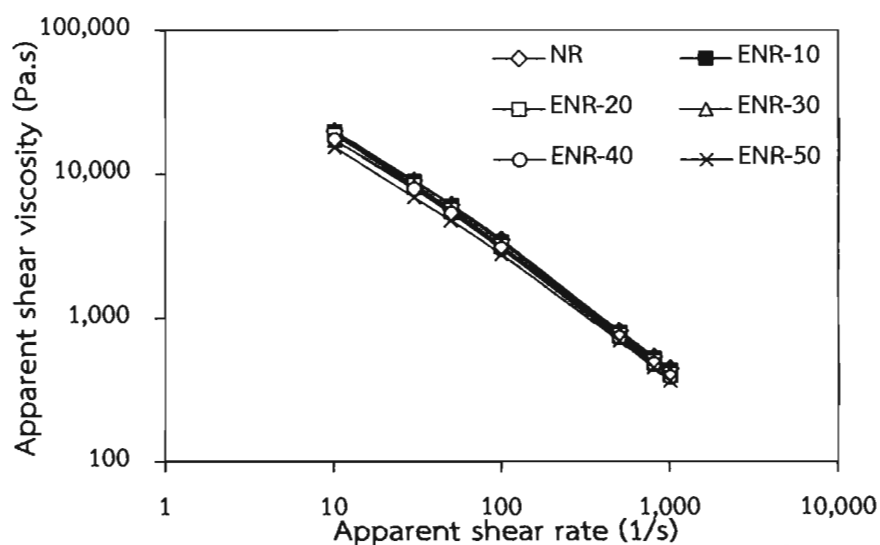
4.7.5 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC โดยแปรชนิดยางธรรมชาติ มาศึกษาสมบัติการไหลได้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ

และความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏดังแสดงในรูปที่ 4.101 และ 4.102 พบว่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้ยางธรรมชาติจะให้ค่าสูงที่สุด และจะลดลงเมื่อเปลี่ยนมาใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์แทนที่ยางธรรมชาติในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ค่าดังกล่าวจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใช้ยางธรรมชาติจะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ได้ดีกว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ การปรับการใช้ยางธรรมชาติจะทำให้มีปริมาณพันธะเชื่อมขวางในเฟสอย่างมากกว่าจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงหรือมอดุลัสมากกว่าและจะไหลได้ยากกว่า นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันระหว่างเฟสต่างๆในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เนื่องจากความเป็นขั้วของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จึงทำให้ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลงตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น



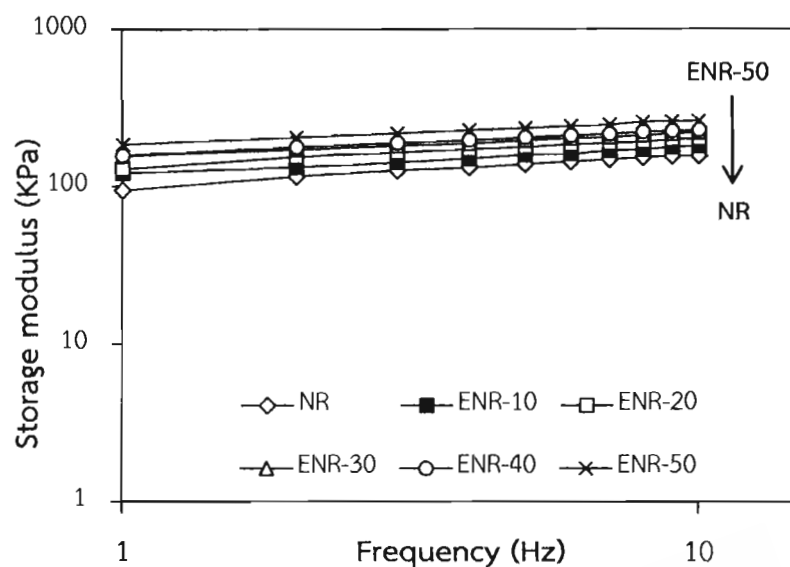
รูปที่ 4.101 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ



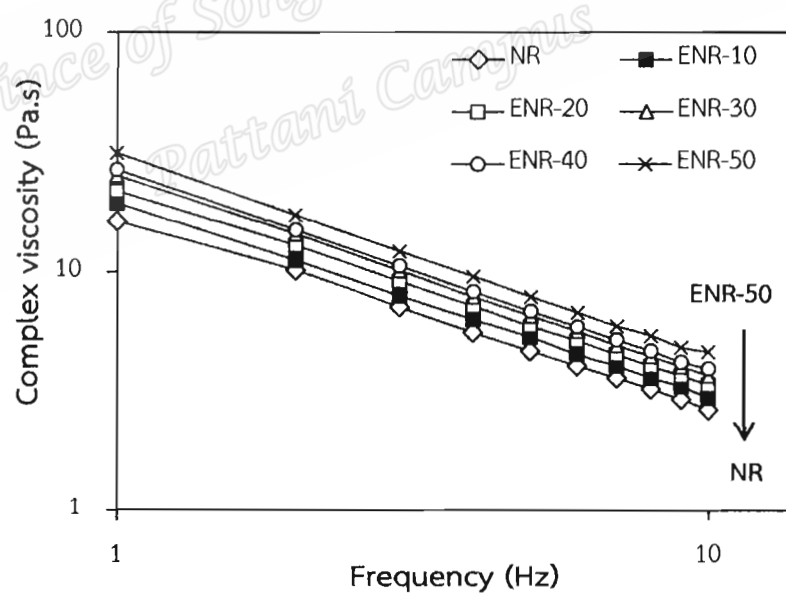
รูปที่ 4.102 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

4.7.6 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC โดยแปรชนิดยางธรรมชาติ มาศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน และ $\tan \delta$ กับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.103, 4.104 และ 4.106

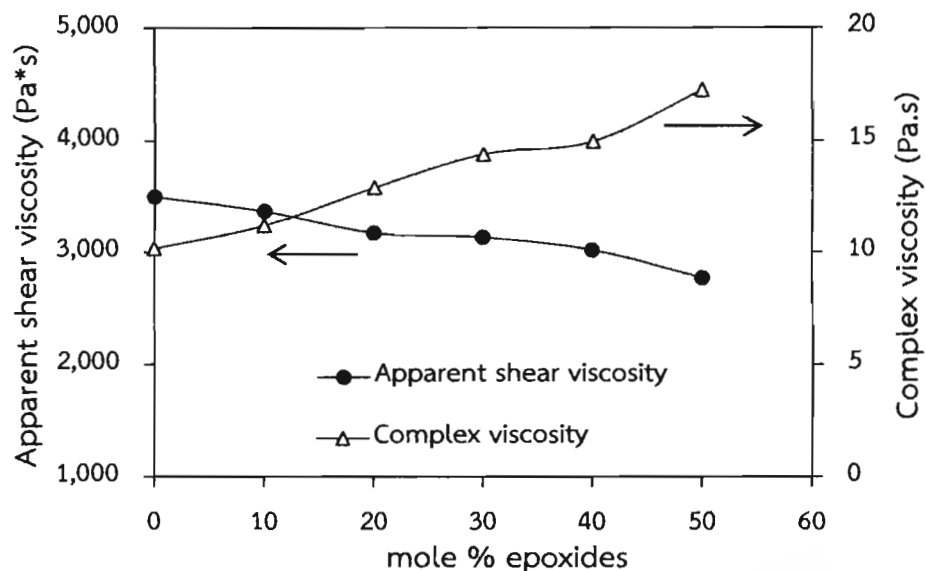


รูปที่ 4.103 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนส์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

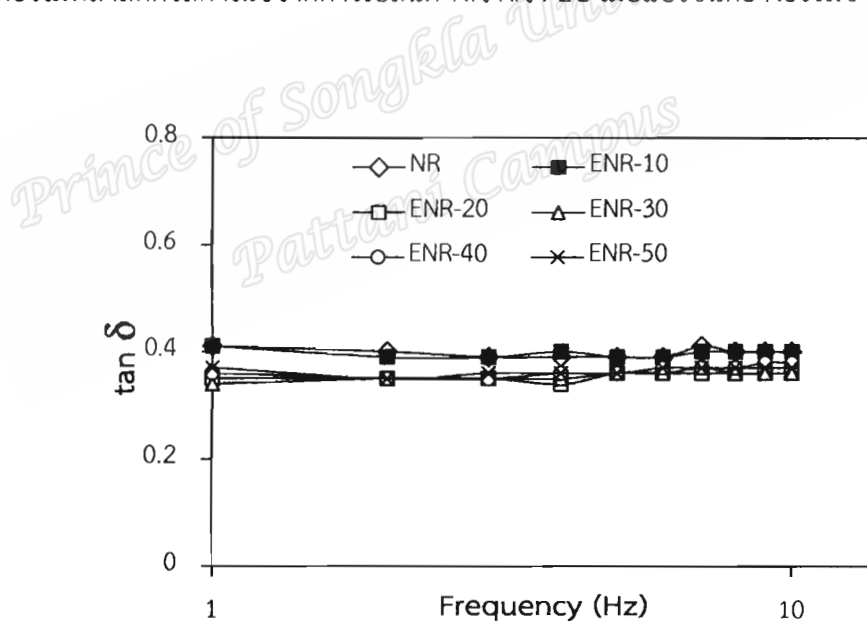


รูปที่ 4.104 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนส์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.103 และ 4.104 พบว่ามอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยาง ENR-50 จะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยาง ENR-40, ENR-30, ENR-20, ENR-10 และ NR ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สวนทางกับการทดสอบการไหลด้วยเครื่องคาร์ปิลลารี (หัวข้อ 4.7.5) ดังแสดงในรูปที่ 4.105 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากรูปแบบการทดสอบของทั้ง 2 เทคนิคที่แตกต่างกัน โดยการทดสอบด้วยเครื่องคาร์ปิลลารีโรตอร์ทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการเลื่อนไถลระหว่างโมเลกุลสูง เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จึงแสดงสมบัติที่เป็นผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลหรือการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุล เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีระดับการอีพอกซิเดชันมาก น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีมากกว่ายางธรรมชาติทำให้การเลื่อนไถลของสายโซ่โมเลกุลเกิดได้ยากขึ้น ประกอบกับการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลสูงจากความเกาะเกาะของหมู่อีพอกไซด์และการเกิด self crosslink จึงน่าที่จะให้สมบัติความเค้นเหนียวปรากฏและความหนืดเหนียวปรากฏมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ แต่การทดลองกลับพบว่าค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงซึ่งเป็นผลมาจากระดับการวัลคาไนซ์ที่ต่ำและการไม่เข้ากันของเฟสยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางรีเคลมและเทอร์โมพลาสติก ในทางกลับกันการทดสอบด้วยเครื่อง MDPT ใช้อัตราเฉือนต่ำ (ความถี่ต่ำ ในการทดลองอยู่ระหว่าง 1-10 Hz) ซึ่งเป็นความถี่ที่วัสดุเกิดการผิดรูปน้อย การผิดรูปส่วนใหญ่ยังเป็นการผิดรูปแบบอีลาสติก จึงเป็นไปได้ว่าการตอบสนองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อได้รับความเค้น (แรงบิด) ยังไม่ปรากฏชัดเจนจากผลการเลื่อนไถลของโมเลกุล แต่เป็นผลมาจากการตอบสนองของสารตัวเติมที่มีอยู่ในยางรีเคลมและความแข็งของสายโซ่โมเลกุลแทน โดยเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีระดับการอีพอกซิเดชันมาก ก็จะมี ความแข็งแรงมาก ดังนั้นการทดสอบแบบใช้การผิดรูปต่ำๆ จึงพบว่าค่ามอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มากขึ้นในยางธรรมชาติอีพอกไซด์



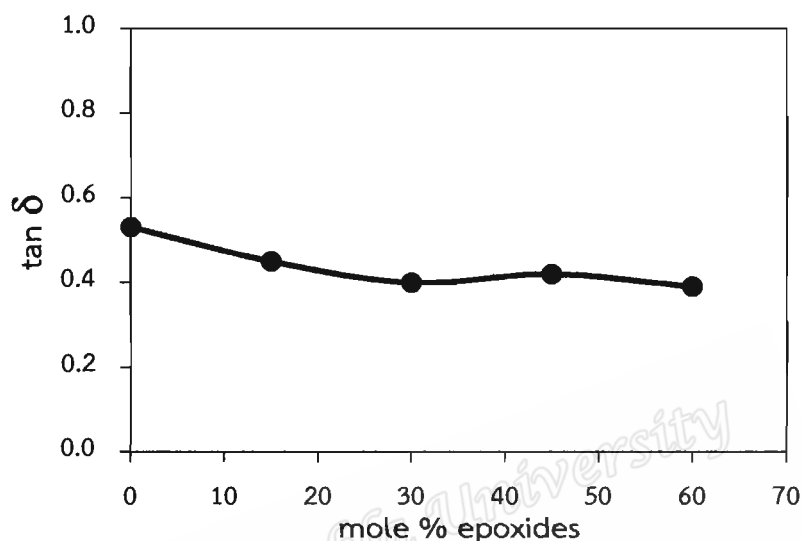
รูปที่ 4.105 ความเค้นเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) และความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.106 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.106 แสดงค่า $\tan \delta$ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติพบว่าเมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.107 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติจะให้ค่า $\tan \delta$ สูงที่สุด รองลงมาคือยาง ENR-10, ENR-20, ENR-30, ENR-40 และ

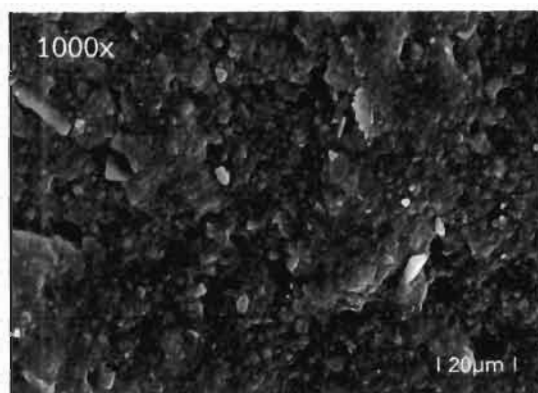
ENR-50 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับความสามารถในการคืนรูปซึ่งแสดงในรูปที่ 4.94 กล่าวคือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีความสามารถในการคืนรูปลดลง (Tension set เพิ่มขึ้น) เมื่อปริมาณหนุอิพอกไซด์เพิ่มขึ้น



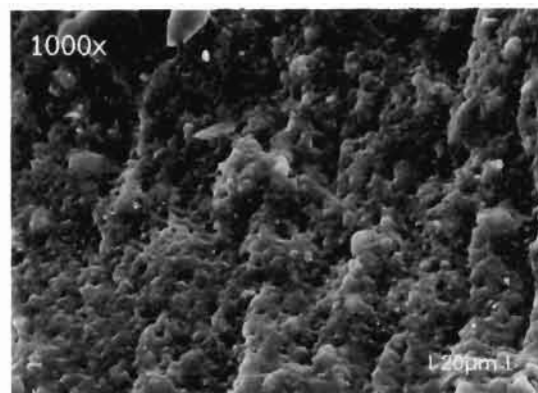
รูปที่ 4.107 ค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่ 2 Hz กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

4.7.7 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

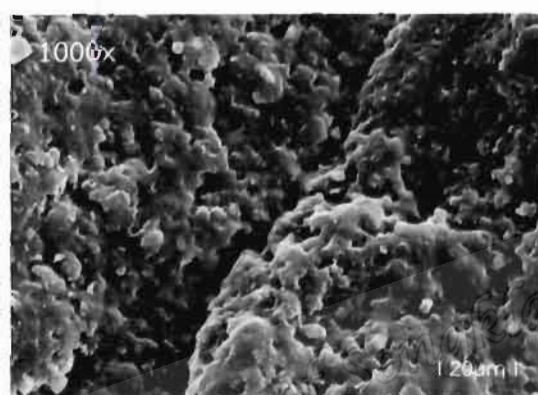
นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่ศึกษาผลของชนิดยางธรรมชาติ มาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.108 พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติ (รูปที่ 4.108(a)) จะมีลักษณะของพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (รูปที่ 4.108(b)-(f)) รวมถึงจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าด้วย และเมื่อเปรียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ พบว่าลักษณะพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีลักษณะที่หยาบและขรุขระเพิ่มมากขึ้น และเกิดการแยกเฟสมากขึ้นตามปริมาณหนุอิพอกไซด์ในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น



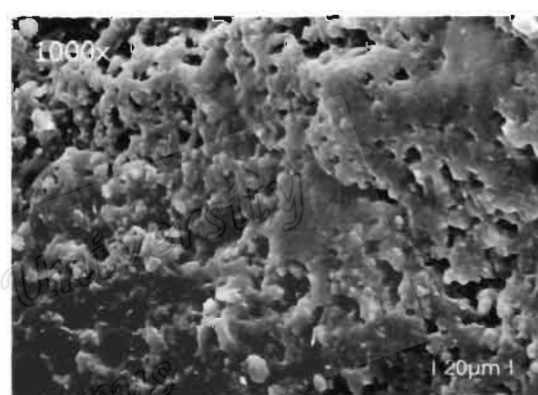
(a) NR



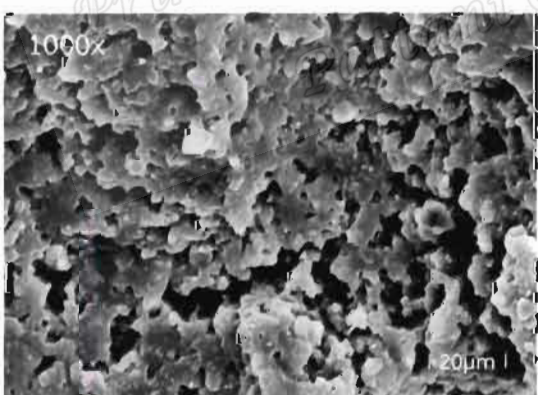
(b) ENR-10



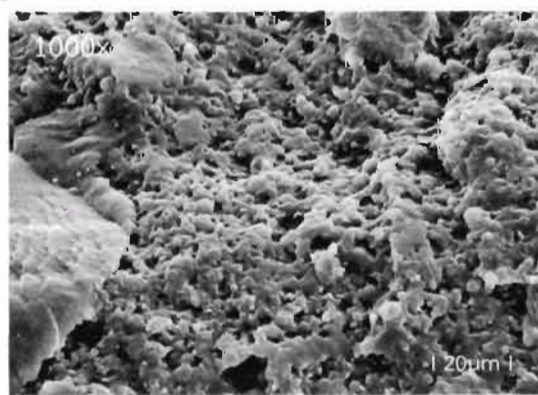
(c) ENR-20



(d) ENR-30



(e) ENR-40



(f) ENR-50

รูปที่ 4.108 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ