

บทที่ 6

ผลการทดลองและวิจารณ์ : เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP

6.1 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/CSM/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก ใช้สารเพิ่มความเข้ากัน PhHRJ-PP ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน และกำหนดอัตราส่วนของ ENR-25/CSM = 50/50 % โดยน้ำหนัก เลือกใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์จากหัวข้อที่ 3.3.3.1 ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง ได้ผลการทดลองดังนี้

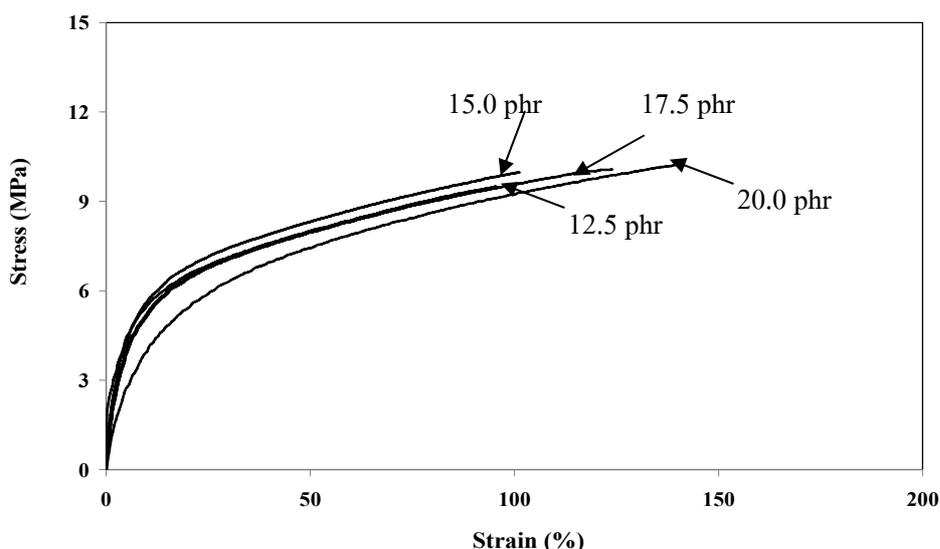
6.1.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 แปรปริมาณ TMPTMA ดังนี้คือ 12.5, 15.0, 17.5 และ 20.0 phr ได้ผลดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP

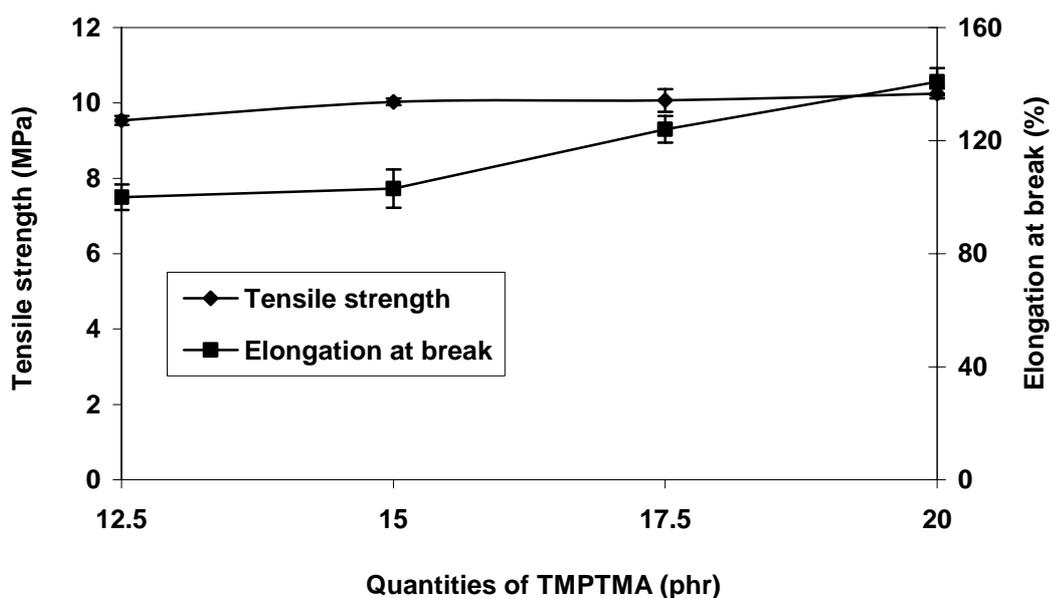
Quantities of TMPTMA (phr)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
12.5	9.5 ± 0.1	100.0 ± 4.5	87.5 ± 0.35	33.0	747
15.0	10.0 ± 0.1	103.0 ± 6.8	87.0 ± 0.5	33.0	826
17.5	10.1 ± 0.3	124.0 ± 4.7	86.0 ± 0.5	31.0	1000
20.0	10.3 ± 0.1	140.8 ± 4.8	85.5 ± 0.5	30.0	1090

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 6.1 และค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดดังรูปที่ 6.2



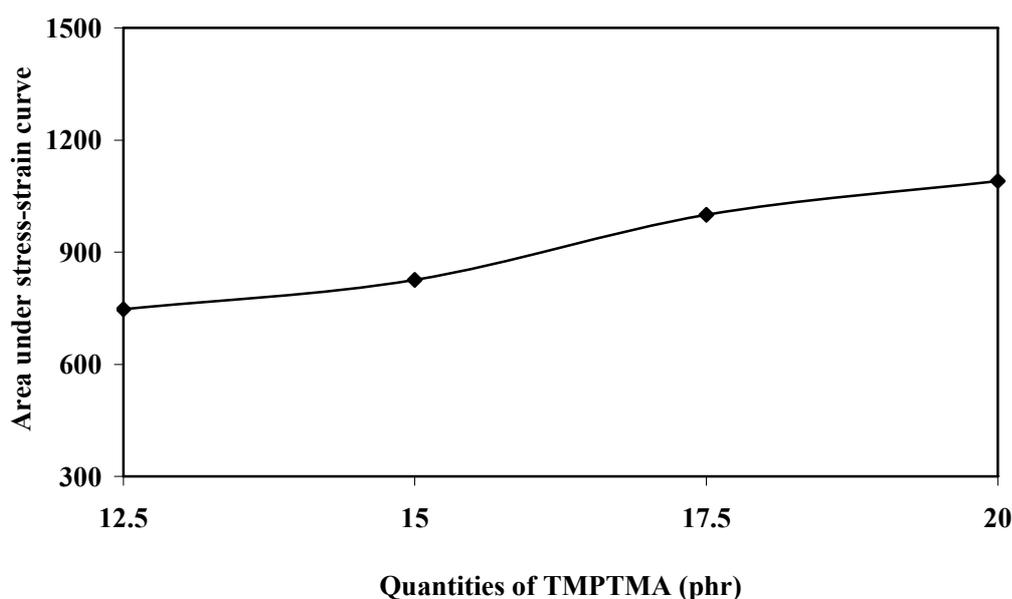
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

จากรูปที่ 6.1 พบว่า การเพิ่มปริมาณของ TMPTMA ช่วยเสริมประสิทธิภาพการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ซึ่ง TMPTMA จะทำหน้าที่รับอนุมูลอิสระทำให้เกิดพันธะการเชื่อมโยงในยางดังรูปที่ 5.7 ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติที่ดีขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ TMPTMA ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการทดลองในยางเบลนด์ ENR-25/CSM ในหัวข้อที่ 4.2.1 และสอดคล้องกับการอธิบายกลไกการใช้โคเอเจนต์ร่วมกับเปอร์ออกไซด์ในยางบิวทาไดอีนโดย Akiba and Hashim (1997) แสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 6.2 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

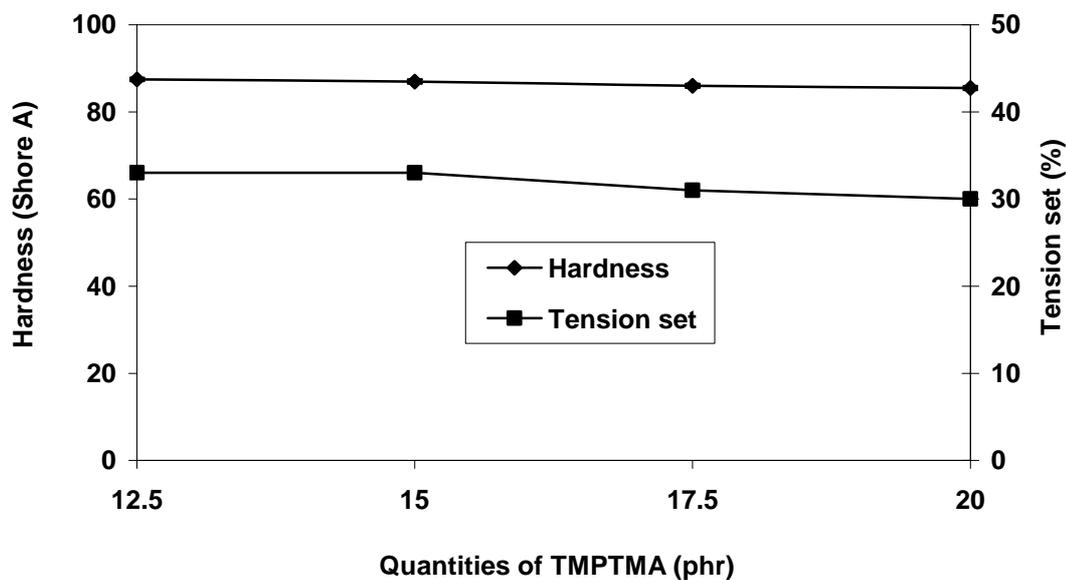
จากรูปที่ 6.2 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของ TMPTMA ทั้งนี้ เนื่องจากการใช้โคเอเจนต์ในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ทำให้มีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงในเฟสยางเบลนด์ได้มากขึ้น ทำให้ความแน่นของพันธะเชื่อมโยงมากขึ้นดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในรูปที่ 4.5 และ TMPTMA ลดการเกิดการตัดสายโซ่ (chain scission) ในเฟสพอลิโพรไพลีน เนื่องจาก TMPTMA จะเป็นตัวรับอนุมูลอิสระของ DCP ซึ่งจะช่วยลดการดึงไฮโดรเจนในโมเลกุลของพอลิโพรไพลีน ซึ่งการเกิดการตัดสายโซ่ของพอลิโพรไพลีนจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงเฉือนและอุณหภูมิสูง ดังรูปที่ 5.11 ดังนั้นเมื่อใช้ TMPTMA ร่วมกับ DCP สามารถลดการตัดสายโซ่ของพอลิโพรไพลีน จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เพิ่มปริมาณของ TMPTMA มีความแข็งแรงสูงขึ้น จากรูปที่ 6.2 ค่าความสามารถในการยืดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของ TMPTMA เป็นเพราะ TMPTMA ที่ใส่เข้าไปในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์นั้นช่วยเพิ่มความยาวของพันธะการเชื่อมโยงได้มากขึ้น จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สามารถยืดได้มากขึ้นดังที่อธิบายในหัวข้อ 4.2.1 คือ TMPTMA ทำให้ความยาวของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการยืดของเทอร์โมพลาสติกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.3 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

จากรูปที่ 6.3 เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ TMPTMA ที่เพิ่มขึ้น โดยการใส่ TMPTMA ปริมาณ 20 phr ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีความเหนียวมากที่สุด โดยมีเหตุผลดังที่ได้อธิบายไว้ในสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืด

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ได้ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงและค่าความแข็งดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ค่าความแข็งและการผิดรูปถาวรจากการยืดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

จากรูปที่ 6.4 พบว่า ค่าความสามารถในการคืนรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามการเพิ่มปริมาณ TMPTMA ทั้งนี้อาจเนื่องจากการใช้ TMPTMA ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายและสามารถกลับสู่รูปร่างเดิมได้ดีขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.2.1.1 ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีการผิดรูปน้อยเมื่อใช้ TMPTMA ปริมาณมากขึ้น จากรูปที่ 6.4 ยังพบว่า ค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีค่าไม่แตกต่างกันมากเมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA แสดงให้เห็นว่าการใช้ TMPTMA ไม่มีผลต่อความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ อย่างมีนัยสำคัญ

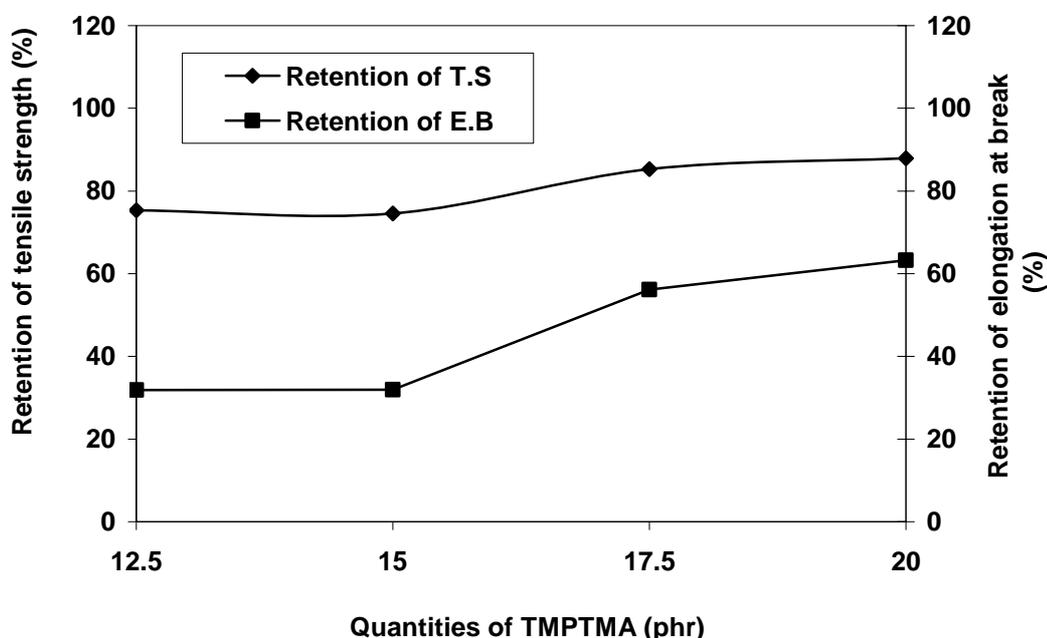
6.1.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

Quantities of TMPTMA (phr)	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
12.5	75.4	31.9
15.0	74.6	31.9
17.5	85.3	56.1
20.0	87.9	63.2

จากตารางที่ 6.2 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาด หลังการบ่มเร่งมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 6.5

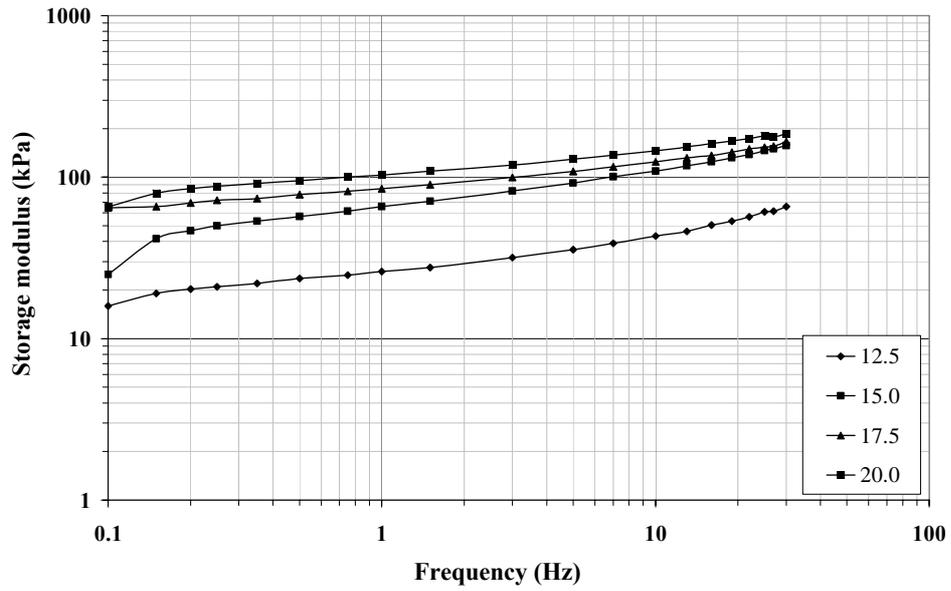


รูปที่ 6.5 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

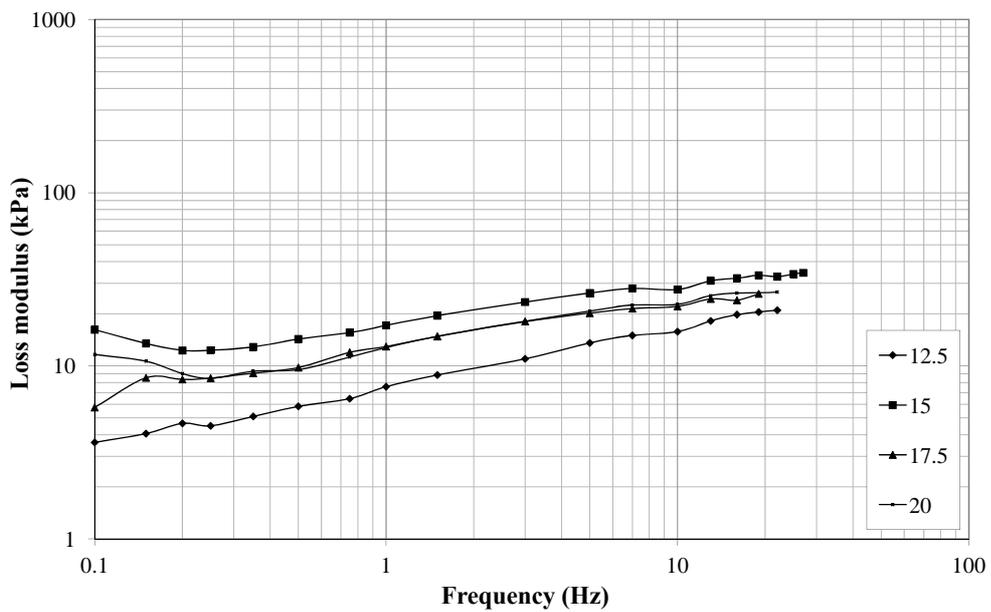
จากรูปที่ 6.5 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนบ่มเร่ง อาจเกิดจากมี DCP ตกค้างแล้วทำให้เกิดการตัดสายโซ่ โมเลกุลพอลิโพรพิลีนทำให้สมบัติลดลง โดยที่การใช้ TMPTMA ปริมาณ 20.0 phr ให้สมบัติด้านการบ่มเร่งดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณ TMPTMA ที่มากขึ้น เนื่องจากการใส่ TMPTMA ช่วยให้การวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น และพันธะการเชื่อมโยงมีความเสถียรมากขึ้น จึงทนต่อการออกซิเดชัน ทำให้เทอร์โมพลาสติกทนความร้อนได้ดีกว่าปริมาณ TMPTMA ต่ำๆ

6.1.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

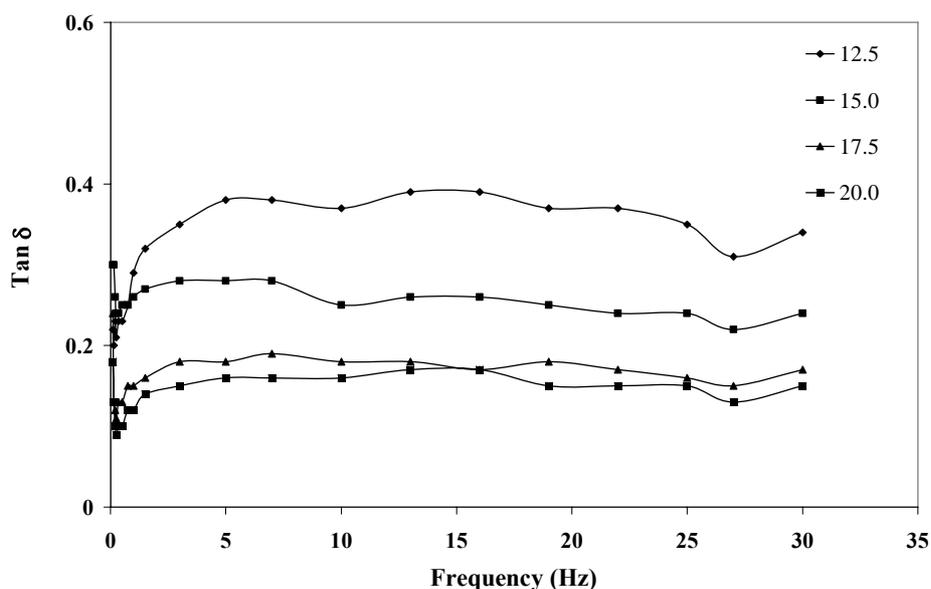
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลด้วยเครื่อง MDPT โดยทดสอบแบบแปรความถี่ที่อุณหภูมิ 180°C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.6 – 6.9



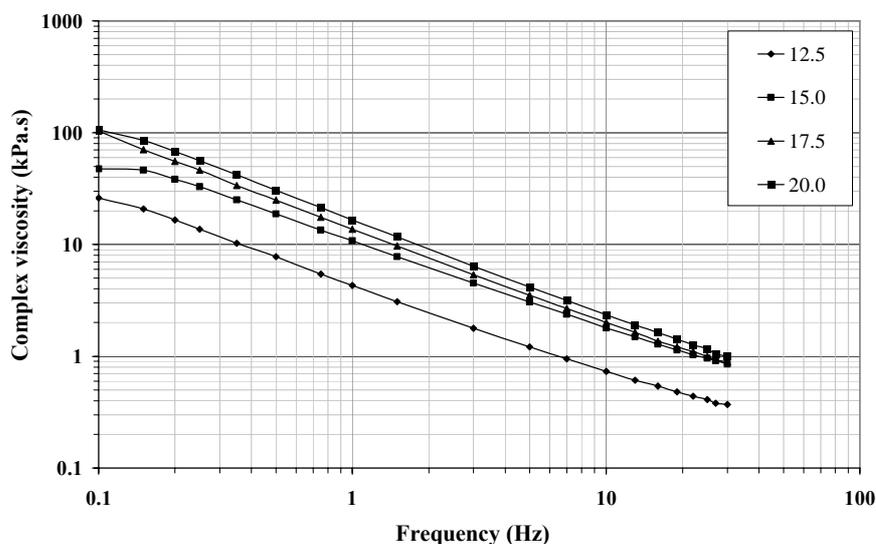
รูปที่ 6.6 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้ TMPTMA ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 6.7 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้ TMPTMA ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 6.8 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้ TMPTMA ปริมาณต่างๆ จากรูปที่ 6.6 – 6.7 พบว่า มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความถี่ในการทดสอบ เนื่องจากความถี่ต่ำๆ พอลิเมอร์มีเวลามากพอในการคลายตัวและลดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ทำให้เกิดการผิดรูปง่าย จึงส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสมมีค่าต่ำ แต่เมื่อรับแรงกระทำทำให้ผิดรูปที่ความถี่สูงขึ้นสายโซ่พอลิเมอร์ไม่มีเวลามากพอที่จะเกิดการคลายตัวจึงทำให้มอดูลัสสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน พบว่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ TMPTMA สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้มากขึ้นดังเช่นได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้น และ TMPTMA สามารถเกิดไฮมอโพลิเมอร์ขึ้นเองแล้วกราฟต์บนโมเลกุลยาง ทำให้เฟสยางมีความยืดหยุ่น จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สามารถเก็บสะสมพลังงานได้เพิ่มขึ้น และค่า Tan δ (รูปที่ 6.8) มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับมอดูลัสสะสม แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ TMPTMA ทำให้สมบัติความยืดหยุ่นดี



รูปที่ 6.9 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้ TMPTMA ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 6.9 พบว่า ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ทุกปริมาณการใช้ TMPTMA มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ความหนืดเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความถี่ เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน พบว่าความหนืดเชิงซ้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณ TMPTMA สอดคล้องกันกับมอดูลัสสะสม และ $\tan \delta$ ดังเหตุผลที่อธิบายไว้แล้วข้างต้น

จากการทดลองแปรปริมาณ TMPTMA พบว่า การใช้ TMPTMA ปริมาณ 20 phr ให้สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง และสมบัติพลวัตเชิงกลดีที่สุด จึงเลือกใช้ TMPTMA ปริมาณดังกล่าวในการวัลคาไนซ์เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP

6.2 ศึกษาอิทธิพลของชนิดน้ำมันต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/CSM/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR25/CSM/PP ที่อัตราส่วนยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก ใช้สารเพิ่มความเข้ากัน PhHRJ-PP 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน ตามวิธีการทดลองหัวข้อที่ 3.3.3.2 ทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง และสมบัติพลวัตเชิงกล ได้ผลการทดลองดังนี้

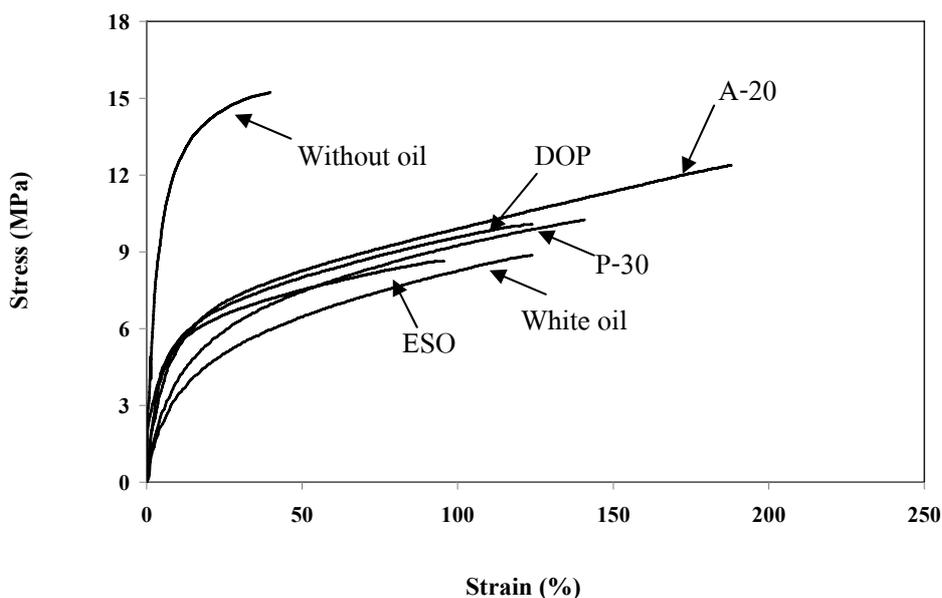
6.2.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรน้ำมันชนิดต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 โดยแปรชนิดน้ำมัน 5 ชนิด ได้แก่ แปรชนิดน้ำมัน 5 ชนิด ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซีไดซ์ (ESO) น้ำมันขาว (White oil) น้ำมันไดออกทิล พะทาเลท (DOP) น้ำมันพาราฟินิก (P-30) และน้ำมันอะโรมาติก (A-20) เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่น้ำมัน ได้ผลดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 อิทธิพลของชนิดน้ำมันต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

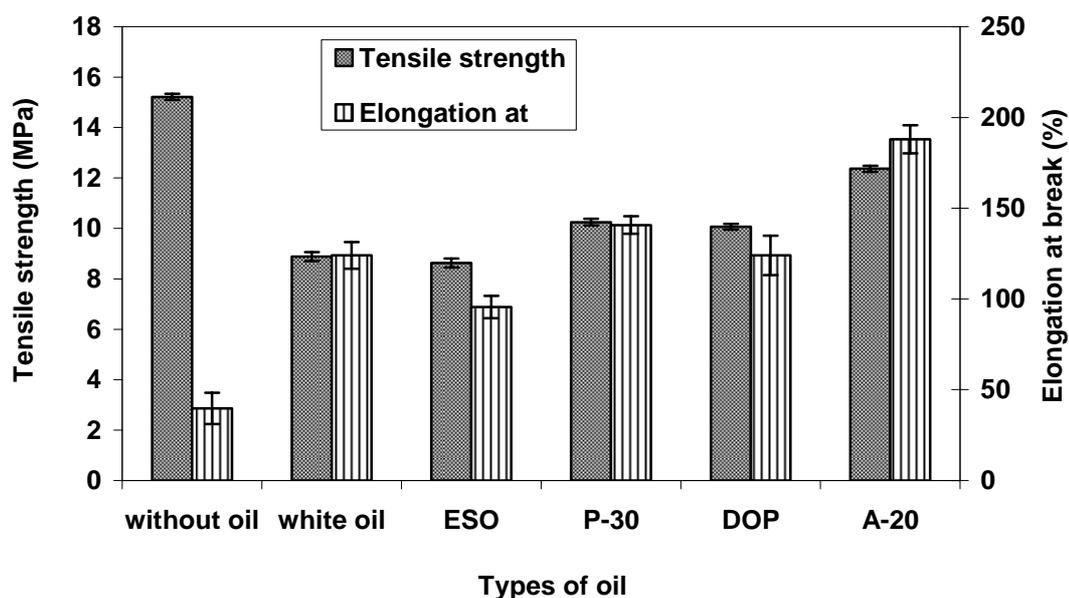
Types of oil	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
Without oil	15.2 ± 0.1	39.7 ± 8.6	89.0 ± 0.5	-	516
ESO	8.6 ± 0.2	95.6 ± 6.1	85.5 ± 0.8	-	675
White oil	8.9 ± 0.2	124.0 ± 7.4	85.5 ± 1.0	31.0	808
DOP	10.1 ± 0.1	124.0 ± 10.9	88.0 ± 0.9	33.0	1000
P-30	10.3 ± 0.1	140.8 ± 4.8	85.5 ± 0.5	30.0	1090
A-20	12.4 ± 0.1	191.0 ± 3.0	86.5 ± 0.4	30.0	1761

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรชนิดน้ำมันชนิดต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 6.10



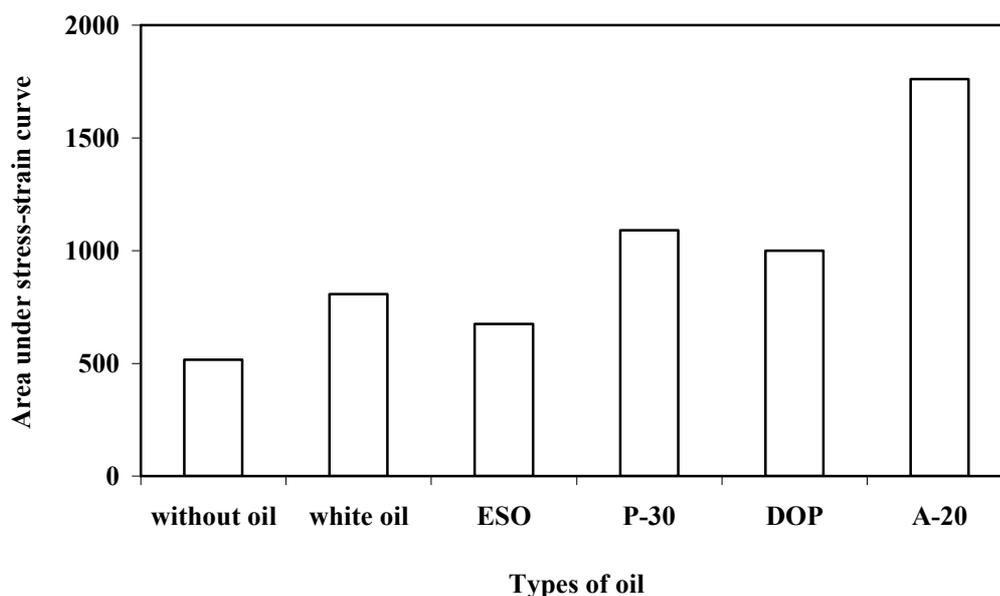
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดน้ำมันต่างๆ

จากรูปที่ 6.10 พบว่า ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่ใส่น้ำมันจะให้ความสามารถในการยืดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่น้ำมัน เนื่องจากน้ำมันที่ใส่ลงไปจะไปขัดขวางการตกผลึกของผลึกพอลิโพรพิลีน ทำให้ปริมาณผลึกพอลิโพรพิลีนลดลง ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกลดลง นอกจากนี้ น้ำมันหรือพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่ลงไปยังไปลดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลยางและเพิ่มปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางทำให้สายโซ่โมเลกุลยางบิดตัวและเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นจึงเพิ่มความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น (อนุวัตติ, 2551) และการใส่น้ำมันอะโรมาติก A-20 มีความสามารถในการยืดสูงที่สุด อาจเนื่องมาจากน้ำมัน A-20 สามารถเข้ากับยางได้ดีกว่า ดูได้จากค่า aniline point ($^{\circ}\text{C}$) (A-20= 42.9, P-30=99.4, White oil = 225) ที่ต่ำสามารถเข้ากับยางได้ดี นอกจากนี้ความเหนียว (toughness) คือ พื้นที่ใต้กราฟของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่น้ำมันอะโรมาติกสูงที่สุด และความชันของกราฟตอนเริ่มต้น คือยังมอดูลัสของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่น้ำมันสูงกว่าที่ใส่น้ำมัน แสดงว่าความแข็งตึง (stiffness) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 6.11 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดน้ำมันต่างๆ

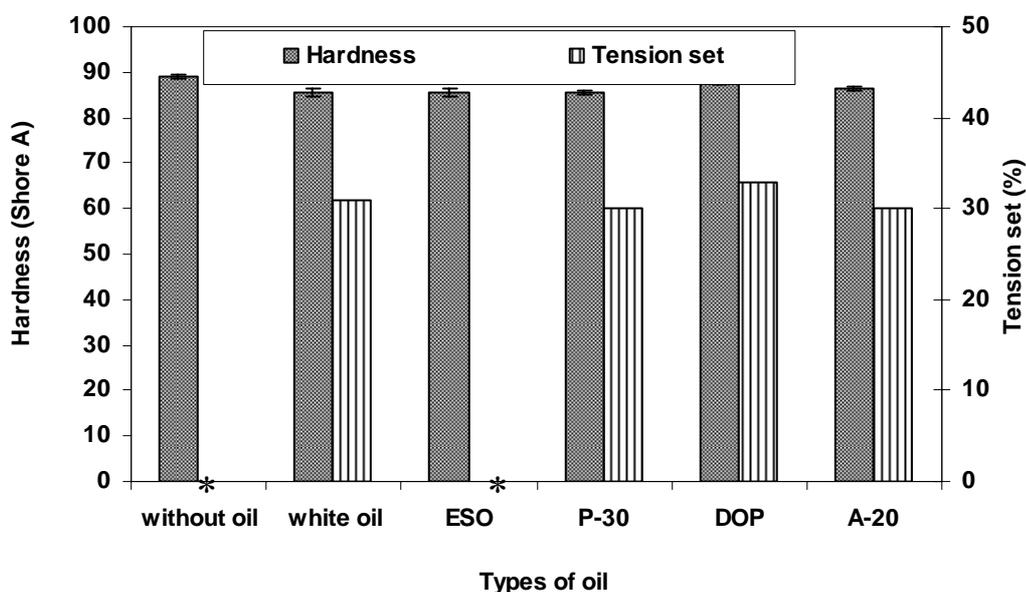
จากรูปที่ 6.11 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใส่น้ำมันมีค่าน้อยกว่าที่ไม่ใส่น้ำมัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำมันที่ใส่ลงไปจะไปขัดขวางการตกผลึกของผลึกของพอลิโพรพิลีนทำให้ปริมาณผลึกพอลิโพรพิลีนลดลง ดังที่กล่าวข้างต้นในรูปที่ 4.89 ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ลดลงด้วย และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่น้ำมันอะโรมาติก มีสมบัติดีกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ใส่น้ำมันชนิดอื่นๆ เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่วงแหวนเบนซีนจึงจัดเป็นน้ำมันไม่อิ่มตัวและในโครงสร้างส่วนมากเป็นอะโรมาติกทำให้สามารถเข้ากับยางได้ดี (พรพรรณ, 2528) ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า การใส่น้ำมันในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามากกว่าการไม่ใส่น้ำมัน เนื่องจากน้ำมันที่ใส่ลงไปจะทำให้ลดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลยางและเพิ่มปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยางบิดตัวและเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นความยืดหยุ่นของยางมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP เพิ่มขึ้น และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่น้ำมันอะโรมาติก (A-20) ให้สมบัติความยืดหยุ่นที่ดีที่สุดดูได้จากค่า $Tan\delta$



รูปที่ 6.12 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดน้ำมันต่างๆ

จากรูปที่ 6.12 เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟในกรณีที่ใช้ น้ำมันอะโรมาติก A-20 มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ P-30, DOP, white oil ESO และไม่ใช้น้ำมัน ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกทำให้สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดน้ำมันต่างๆ ได้ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงและค่าความแข็งดังรูปที่ 6.13 พบว่า สมบัติความสามารถในการคืนตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้น้ำมันอะโรมาติก มีค่า Tension set ต่ำสุด แสดงว่ามีความสามารถในการคืนตัวสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกมีค่า aniline point (°C) ต่ำ จึงสามารถเข้ากับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ดีกว่าน้ำมันพาราฟินิก น้ำมันไดออกทิลพทาเลท และน้ำมันขาว นอกจากนี้ยังพบว่า ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่น้ำมันมีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ได้ใส่น้ำมัน เนื่องจากการใส่น้ำมันจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ขยับตัวได้ง่ายขึ้น และมีความยืดหยุ่นมากขึ้นจึงทำให้มีความนิ่มมากขึ้น



*ไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากกระยะยืดไม่ถึง 100%

รูปที่ 6.13 ค่าความแข็งและการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดน้ำมันต่างๆ

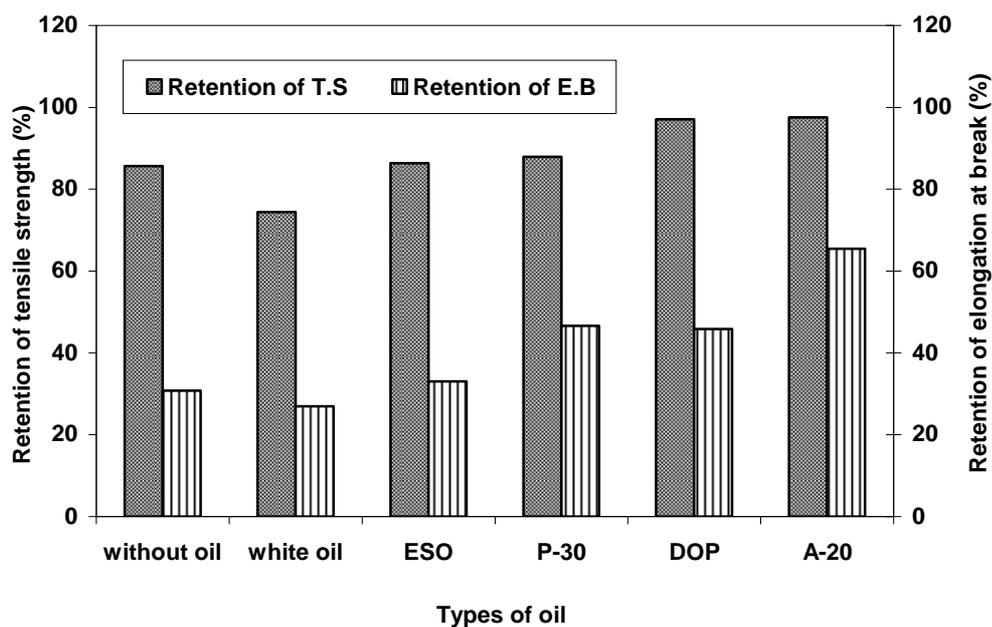
6.2.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรปริมาณน้ำมันชนิดต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลได้ผลการวิจัยดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 อิทธิพลของชนิดน้ำมันต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

Types of oil	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
Without oil	85.6	30.8
ESO	86.3	33.0
White oil	74.4	27.0
DOP	97.1	45.8
P-30	87.9	45.6
A-20	97.6	65.4

จากตารางที่ 6.4 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังการบ่มแรงมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 6.14

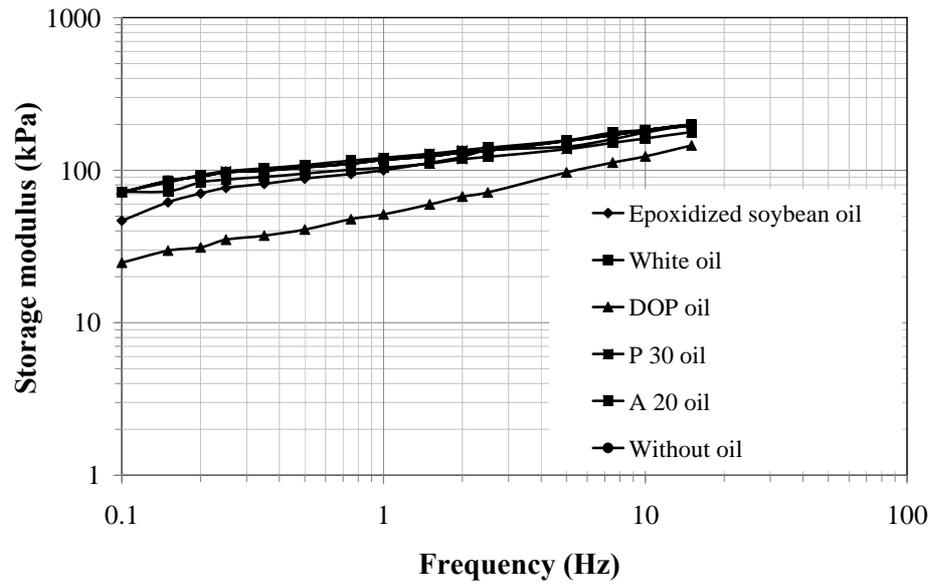


รูปที่ 6.14 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดน้ำมันต่างๆ

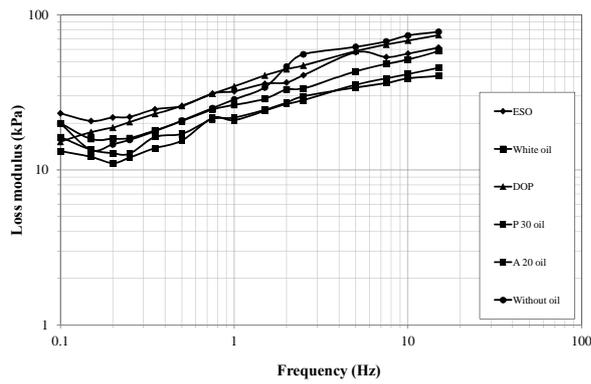
จากรูปที่ 6.14 พบว่า สมบัติหลังการบ่มแรงของ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้น้ำมันอะโรมาติกให้สมบัติหลังการบ่มแรงดีที่สุด กล่าวคือ ความต้านทานต่อแรงดึงหลังการบ่มแรงมีการเปลี่ยนแปลงน้อย เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกมีปริมาณของอะโรมาติกในโครงสร้างมากจึงช่วยให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทนทานต่อความร้อนได้มากขึ้น แต่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้น้ำมันขาวมีสมบัติหลังการบ่มแรงด้อยที่สุด จากรูปที่ 6.14 พบว่า ค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง คือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่น้ำมันอะโรมาติก A-20 ให้สมบัติด้านการบ่มแรงดีที่สุด เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ของค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงมากที่สุด โดยที่น้ำมัน A-20 มีปริมาณอะโรมาติกในโครงสร้างมากจึงช่วยให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทนทานต่อการออกซิเดชันได้มากขึ้น แต่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้น้ำมันขาวมีสมบัติหลังการบ่มแรงด้อยที่สุด เนื่องจากน้ำมันขาวโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นอะลิฟาติกมากกว่าอะโรมาติกจึงทำให้ทนต่อการออกซิเดชันได้น้อยกว่าน้ำมันที่มีปริมาณอะโรมาติกมาก

6.2.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดน้ำมันต่างๆ

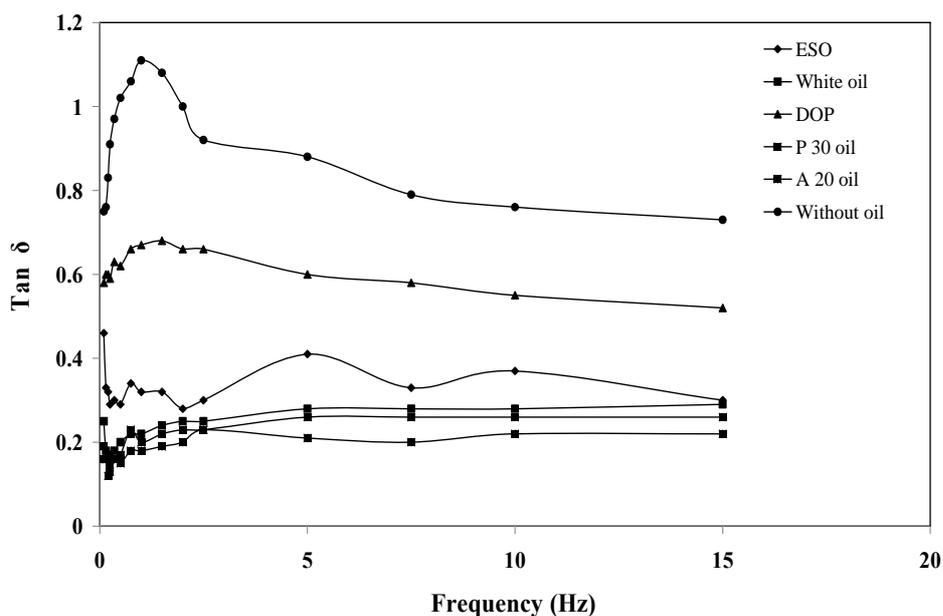
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลด้วยเครื่อง MDPT โดยทดสอบแบบแปรความถี่ที่อุณหภูมิ 180°C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.15 – 6.18



รูปที่ 6.15 มอดุลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้น้ำมันชนิดต่างๆ



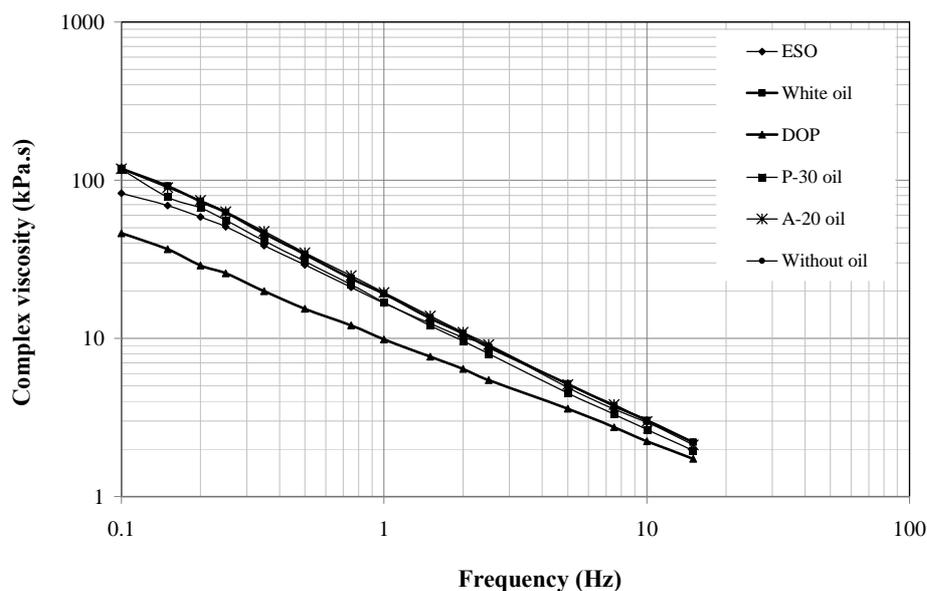
รูปที่ 6.16 มอดุลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้น้ำมันชนิดต่างๆ



รูปที่ 6.17 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้น้ำมันชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 6.15 – 6.17 พบว่า โมดูลัสสะสมและโมดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความถี่ในการทดสอบ และพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้น้ำมัน DOP มีค่าโมดูลัสสะสมน้อยที่สุด และมีค่า Tan δ สูงกว่าน้ำมันชนิดอื่น แสดงให้เห็นว่าน้ำมัน DOP เข้ากับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ได้น้อยกว่าน้ำมันชนิดอื่น เมื่อพิจารณา Tan δ พบว่าเทอร์โมพลาสติกที่ใส่น้ำมันให้ค่า Tan δ ต่ำ แสดงให้เห็นว่าน้ำมันสามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่เกิดการขยับตัวได้ง่ายส่งผลให้พอลิเมอร์สมบัติความยืดหยุ่นมากขึ้น สอดคล้องกับ tension set ซึ่งน้ำมันอะโรมาติกมีค่า Tan δ ต่ำที่สุด เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่วงแหวนเบนซีนจึงจัดเป็นน้ำมันไม่อิ่มตัวและในโครงสร้างส่วนมากเป็นอะโรมาติก ทำให้สามารถเข้ากับยางได้ดี

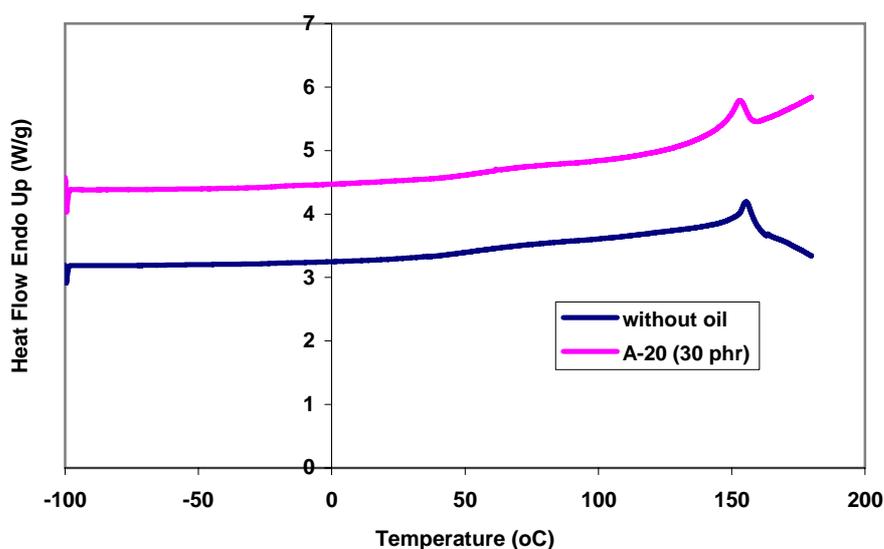
จากรูปที่ 6.18 พบว่า ความหนืดเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความถี่ในการทดสอบ และพบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้น้ำมัน DOP มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับค่าโมดูลัสสะสม



รูปที่ 6.18 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้น้ำมันชนิดต่างๆ

6.2.4 สมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP

วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน ด้วยเทคนิค DSC โดยใช้ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ระหว่าง ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก 60/40 % โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ใส่น้ำมัน และใส่น้ำมัน A-20 ปริมาณ 30 phr วิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบตั้งแต่ -100°C ถึง 180°C อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่ากับ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ได้เทอร์โมแกรมแสดงดังในรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP เปรียบเทียบที่ไม่ใส่น้ำมันและใส่น้ำมัน A-20

จากรูปที่ 6.19 เป็นเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC สามารถระบุค่า อุณหภูมิหลอมผลึกของพอลิโพรไพลีนและปริมาณผลึกได้ผลแสดงดังในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 อุณหภูมิการหลอมของผลึกและปริมาณผลึกของของผสม PP ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง ENR-25/CSM/PP เปรียบเทียบที่ใช้และไม่ใช้น้ำมัน

Oil content (phr)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	Crystallinity (%)
0	155.37	15.69
30	152.87	9.49

จากรูปที่ตารางที่ 6.5 พิจารณาอุณหภูมิหลอม ผลึก (T_m) ของพอลิโพรไพลีนในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP เปรียบเทียบที่ใช้และไม่ใช้น้ำมัน A-20 พบว่า เมื่อใช้น้ำมันทำให้ T_m มีค่าลดลง เนื่องจากน้ำมันที่ใส่ลงไปจะแพร่เข้าไปอยู่ในส่วนที่เป็นอสัณฐานทำให้สายโซ่พอลิโพรไพลีนมีความเป็นระเบียบลดลง จึงมีผลให้ลดการเกิดผลึก (สกุรัตน์, 2551) ทำให้อุณหภูมิการหลอมของผลึกของผสมพอลิโพรไพลีนในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลง ส่วนปริมาณผลึกของพอลิโพรไพลีนมีค่าลดลงเมื่อใช้น้ำมันเนื่องจากน้ำมันจะแพร่เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบลดลงส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง ซึ่งให้ผลการวิจัยในการทำงานเดียวกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP

6.3 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนยางกับพลาสติกต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/CSM/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.4.4 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง สมบัติพลวัตเชิงกล สันฐานวิทยา ความทนทานต่อน้ำมัน และความทนทานต่อความร้อน ได้ผลดังนี้

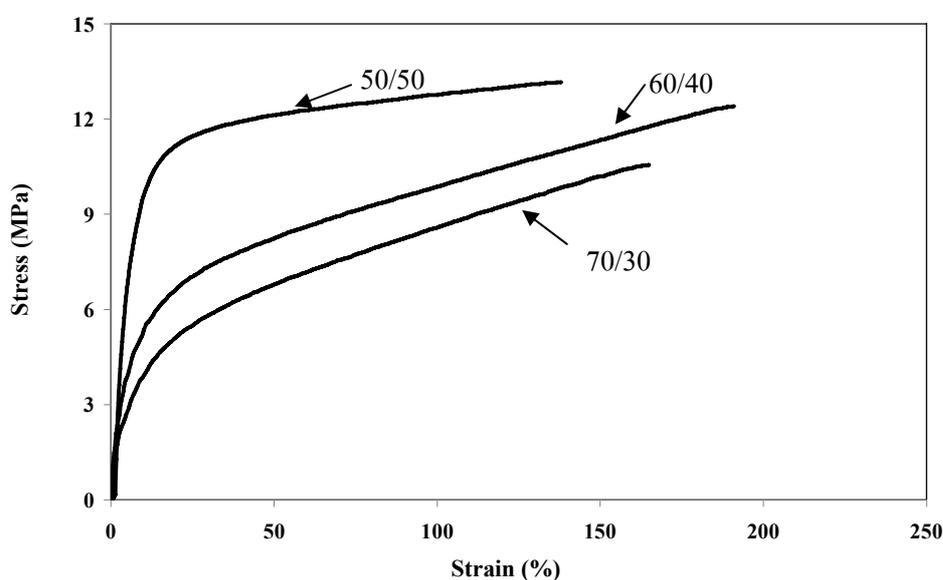
6.3.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ ใช้น้ำมัน A-20 แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติกที่ 50/50 60/40 และ 70/30 ได้ผลดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 อิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์กับพลาสติกต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

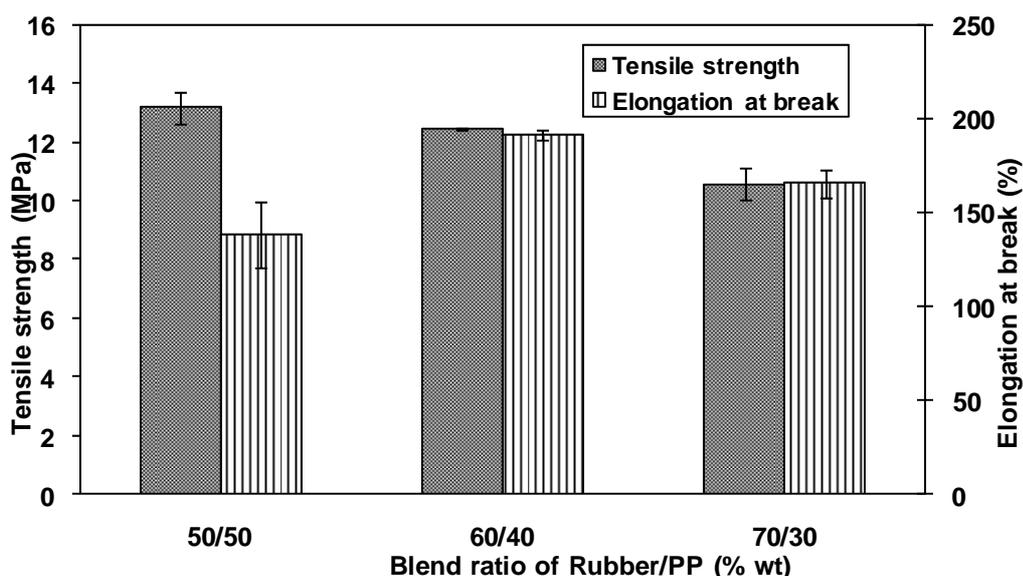
Blend ratio of rubber/PP	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
50/50	13.2 ± 0.5	138.0 ± 17.6	90.5 ± 0.7	49.0	1632
60/40	12.4 ± 0.1	191.0 ± 3.0	86.5 ± 0.4	30.0	1797
70/30	10.6 ± 0.5	165.0 ± 7.8	83.5 ± 0.4	27.0	1265

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติก ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 6.20



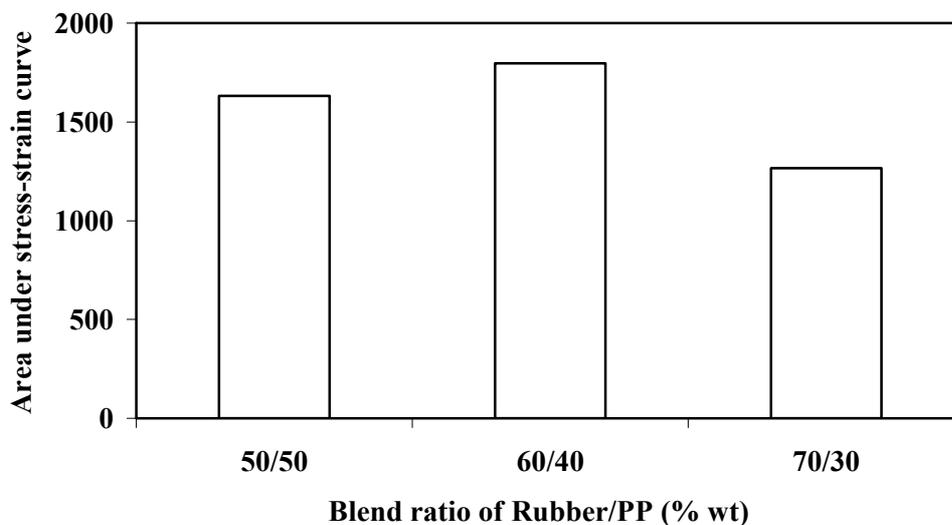
รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกต่างๆ

จากรูปที่ 6.20 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณยางเบลนด์ ENR-25/CSM ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ส่งผลให้ค่าความชันของกราฟมีแนวโน้มลดลง คือค่าความแข็งตึง (stiffness) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลงมีพฤติกรรมแสดงสมบัติเป็นยางมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเฟสของพอลิโพรไพลีน ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงมีปริมาณลดลง เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เบลนด์ที่อัตราส่วนเบลนด์ต่างๆพบว่ากราฟของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เบลนด์ที่อัตราส่วนเบลนด์ 40/60 จะมีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุด นั่นแสดงว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เบลนด์ที่อัตราส่วนเบลนด์ 60/40 มีความแข็งแรงเหนียวมากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เบลนด์ด้วยอัตราส่วนเบลนด์ 50/50 และ 70/30 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความแข็งตึง (stiffness) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เบลนด์ที่อัตราส่วนเบลนด์ต่างๆ พบว่าความแข็งตึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิโพรไพลีนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณพอลิโพรไพลีน เนื่องจากพอลิโพรไพลีนเป็นเฟสแข็งอันเนื่องจากการมีผลึกในโมเลกุล ดังนั้นเมื่อปริมาณพอลิโพรไพลีนในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งตึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 6.21 ความความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกต่างๆ

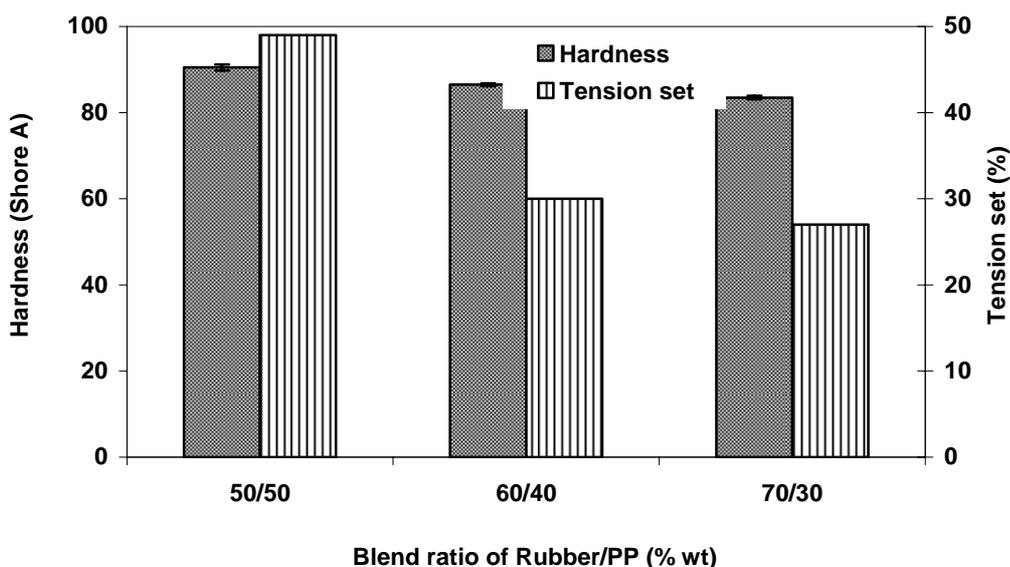
จากรูปที่ 6.21 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยที่อัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP เท่ากับ 50/50 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 และ 70/30 ตามลำดับ เนื่องจากเฟสที่ให้สมบัติด้านความแข็งแรงเป็นเฟสของพอลิโพรไพลีน ดังนั้นเมื่อลดปริมาณของพอลิโพรไพลีนส่งผลให้ความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลงด้วยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nakason *et al.* (2006c) คือความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิโพรไพลีน นอกจากนี้ยังพบว่า ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP เท่ากับ 60/40 มีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนการเบลนด์นี้ทำให้เกิดการกระจายตัวของเฟสภายในพลาสติกดีที่สุด จึงทำให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนการเบลนด์ที่ 70/30 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนการเบลนด์ที่ 70/30 มีปริมาณยางมาก ซึ่งเป็นเฟสที่มีความยืดหยุ่น ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สามารถยืดได้มากกว่าที่อัตราส่วนการเบลนด์ 50/50 ที่มีเฟสของพลาสติกสูงกว่า



รูปที่ 6.22 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

จากรูปที่ 6.22 เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า การใช้อัตราส่วนของยาง (ENR-25/CSM) และพลาสติก (PP) เท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ใต้กราฟสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่า การใช้อัตราส่วนดังกล่าวมีความเหนียวหรือความทนทานต่อการกระแทกสูงที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน 50/50 และ 70/30 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ได้ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงและค่าความแข็ง ดังรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.23 ค่าความแข็งและการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกต่างๆ

จากรูปที่ 6.23 พบว่า ค่าความสามารถในการคืนตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เนื่องจากยางเบลนด์ ENR-25/CSM เกิดการเชื่อมโยงภายในโมเลกุล เมื่อได้รับแรงกระทำจากการดึงจึงสามารถยืดและหดตัวกลับสู่รูปร่างเดิมได้ดีขึ้นเมื่อมีปริมาณยางมากขึ้น และพบว่า ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิโพรไพลีนที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากพอลิโพรไพลีนเป็นพลาสติกที่มีความแข็งและแข็งแรง เมื่อพลาสติกกล่าวนี้มีแนวโน้มสูงขึ้นจึงทำให้ค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย

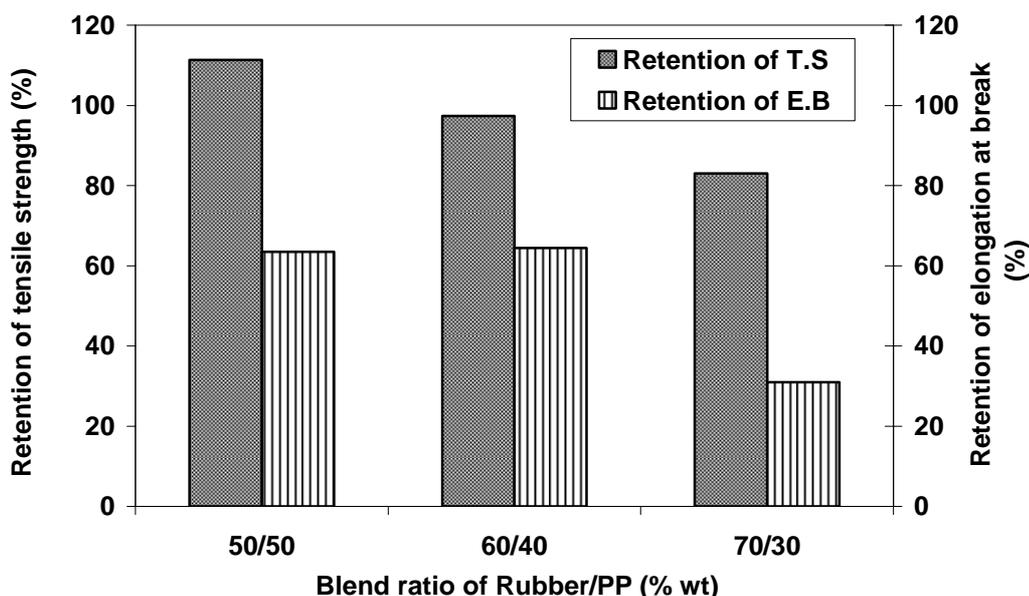
6.3.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติกต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 อิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์กับพลาสติกต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

Blend ratio of rubber/PP	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
50/50	111.3	63.5
60/40	97.3	64.4
70/30	83.0	30.9

จากตารางที่ 6.7 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังการบ่มแรง และความต้านทานต่อการฉีกขาดมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 6.24

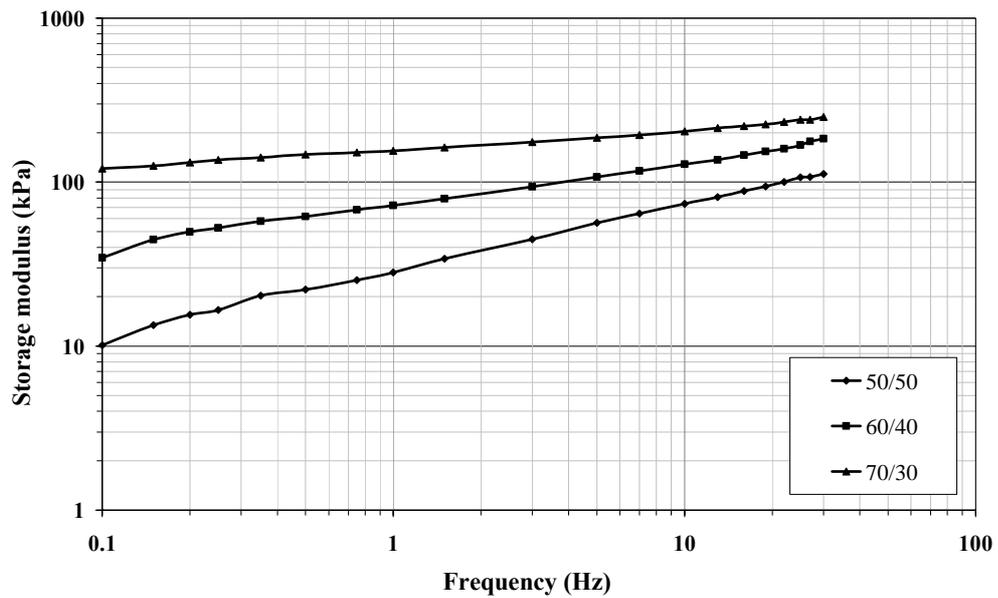


รูปที่ 6.24 ความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกต่างๆ

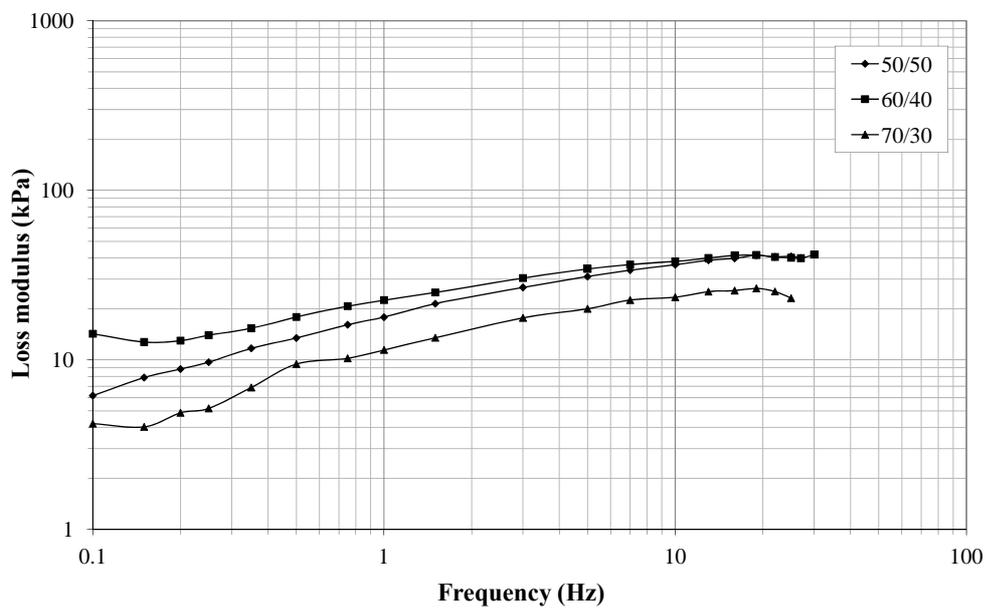
จากรูปที่ 6.24 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่มีปริมาณของพอลิโพรไพลีนสูงจะให้สมบัติด้านความทนทานต่อการออกซิเดชันสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณพอลิโพรไพลีนต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนที่มีพลาสติกมากกว่าส่วนที่เป็นยาง ซึ่งโมเลกุลของพอลิโพรไพลีนไม่มีพันธะคู่จึงทนต่อการออกซิเดชันได้ดีกว่ายาง ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทนต่อการออกซิเดชันได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ให้ผลเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึง กล่าวคือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณของพอลิโพรไพลีนสูงทำให้ทนต่อการออกซิเดชันได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางมากกว่า

6.3.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติกต่างๆ

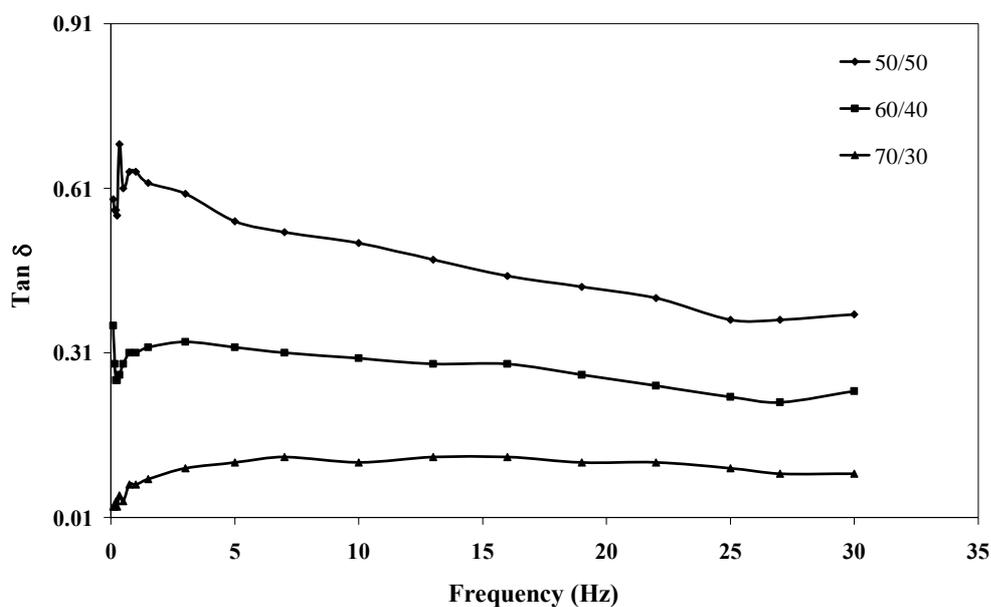
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกล โดยทดสอบแบบแปรความถี่ที่อุณหภูมิ 180°C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.25 – 6.28



รูปที่ 6.25 โมดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติกต่างๆ

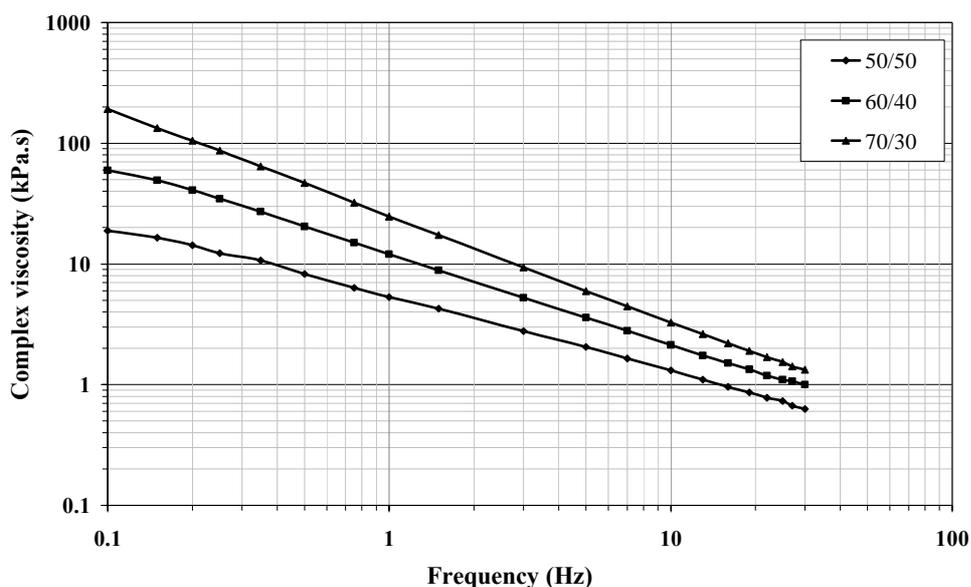


รูปที่ 6.26 โมดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก



รูปที่ 6.27 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติกต่างๆ

จากรูปที่ 6.25 – 6.27 พบว่า ค่าโมดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความถี่ของการทดสอบ เนื่องจากที่ความถี่ต่างๆ พอลิเมอร์มีเวลามากพอในการคลายตัวและลดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ทำให้เกิดการผิดรูปได้ง่าย ส่งผลให้โมดูลัสสะสมมีค่าต่ำ แต่เมื่อได้รับการกระทำผิดรูปที่ความถี่สูงขึ้นสายโซ่พอลิเมอร์ไม่มีเวลามากพอที่จะเกิดการคลายตัวจึงทำให้ค่าโมดูลัสสะสมจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่โมดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติกต่างๆ ที่ความถี่เดียวกัน พบว่าค่าโมดูลัสสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางเบลนด์ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ จัดเป็นวัสดุประเภทวิสโคอีลาสติก (viscoelastic material) คือมีการตอบสนองต่อแรงกระทำทั้งแบบยืดหยุ่น (elastic) และแบบไหลหนืด (viscous) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของยางเบลนด์ ENR-25/CSM เป็นการเพิ่มส่วนที่ยืดหยุ่นจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สามารถเก็บสะสมพลังงานได้มากขึ้น สัมพันธ์กับค่า Tan δ ที่ต่ำลง ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ยืดหยุ่นได้ดีขึ้นแสดงดังรูปที่ 6.27

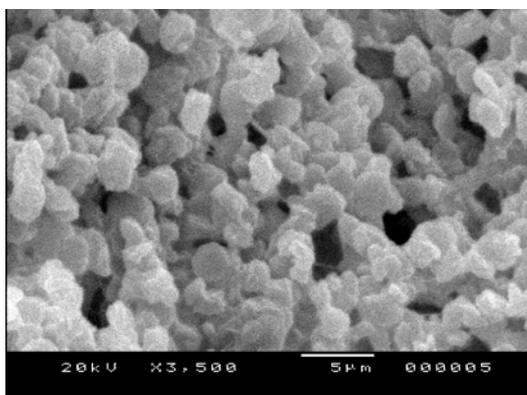


รูปที่ 6.28 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติกต่างๆ

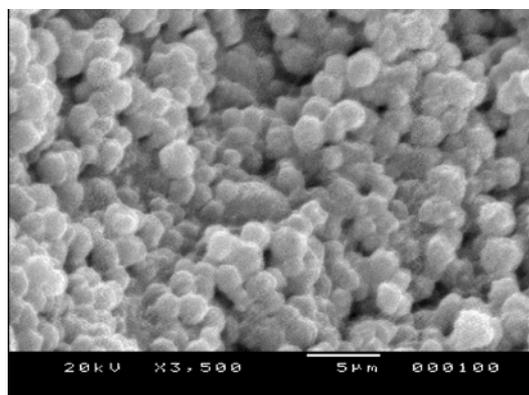
จากรูปที่ 6.28 พบว่า ค่าความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติกต่างๆ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ในการทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของยางเบลนด์ทำให้ความหนืดเชิงซ้อนสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าโมดูลัสสะสมดังที่กล่าวแล้วในรูปที่ 6.25

6.3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

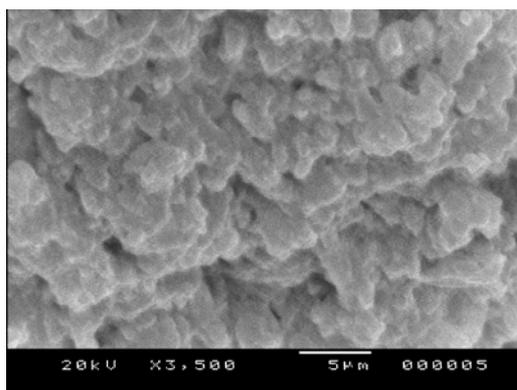
วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก (ENR-25/CSM)/PP เท่ากับ 50/50, 60/40 และ 70/30 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.29



(ENR-25/CSM)/PP=50/50



(ENR-25/CSM)/PP=60/40



(ENR-25/CSM)/PP=70/30

รูปที่ 6.29 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกต่างๆ

จากรูปที่ 6.29 พบว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนยางต่อพลาสติกต่างๆ มีความแตกต่างกัน โดยพบว่าขนาดอนุภาคของเฟสยางที่กระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วนการเบลนด์ (ENR-25/CSM)/PP เท่ากับ 60/40 มีขนาดของเฟสยางเบลนด์ที่เล็กสุดประมาณ 1-3 ไมครอน จึงมีพื้นที่ผิวมากที่สุด การมีพื้นที่ผิวมากทำให้เกิดอันตรกิริยากันระหว่างเฟสยางเบลนด์กับพลาสติกได้ดี ส่งผลให้สมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วนการเบลนด์ (ENR-25/CSM)/PP เท่ากับ 60/40 ดีที่สุด ถ้าปริมาณยางมากถึง 70 ส่วนโดยน้ำหนัก จะมีปริมาณของเฟสยางมาก เฟสของพลาสติกน้อยซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสต่อเนื่องได้ไม่ดี ส่งผลให้เฟสยางกระจายตัวได้ไม่ดี

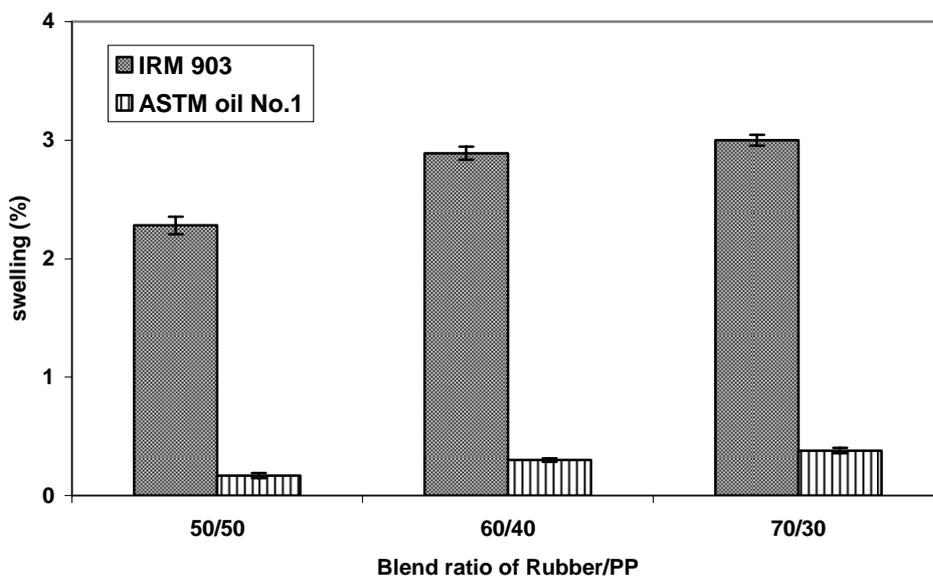
6.3.5 สมบัติด้านการทนต่อน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกต่างๆ

การทดสอบสมบัติการทนต่อน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกที่ 50/50, 60/40 และ 70/30 ได้ผลแสดงดังตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ค่าการบวมพองในตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกต่างๆ

Blend ratio of rubber/PP	Swelling (%)	
	ASTM oil No. 1	IRM 903
50/50	0.17±0.02	2.28±0.08
60/40	0.30±0.02	2.89±0.06
70/30	0.38±0.02	3.00±0.05

จากตารางที่ 6.8 สามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบการบวมของพองเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกต่างๆได้ดังรูปที่ 6.30

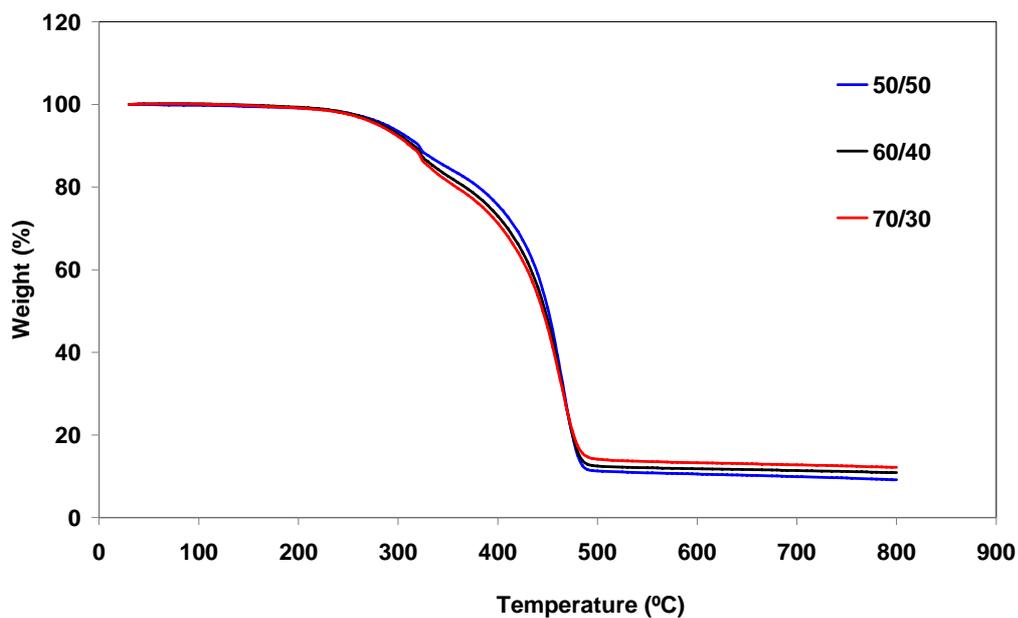


รูปที่ 6.30 การบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกต่างๆ

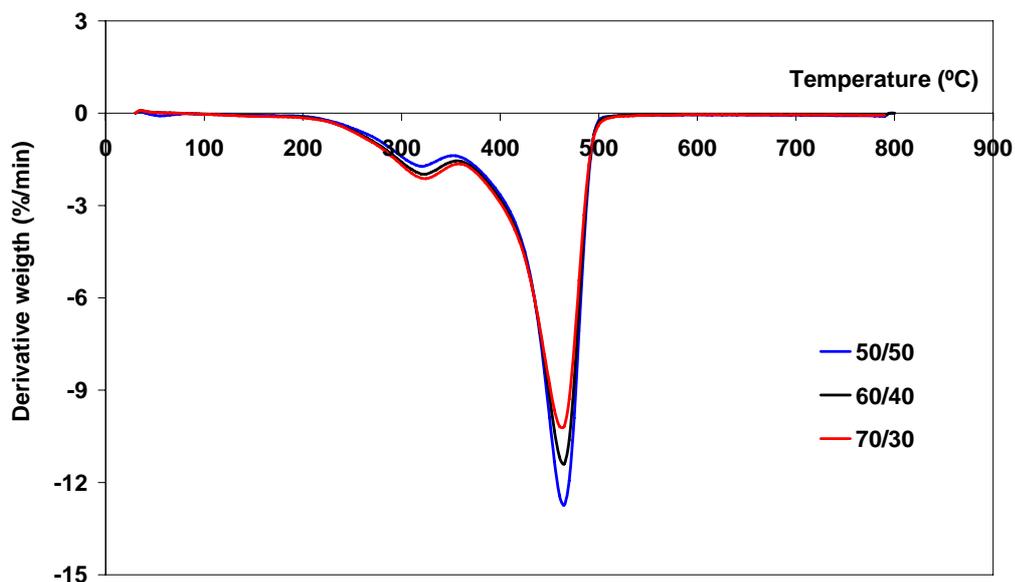
จากรูปที่ 6.30 พบว่า การบวมพองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณยางเบลนด์ ENR-25/CSM อาจเนื่องจากการเพิ่มปริมาณของยางเบลนด์ จะทำให้มีส่วนอสัณฐาน (amorphous region) เพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนของพอลิเมอร์อสัณฐานเป็นส่วนที่ทำให้ไขมันสามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ได้มากขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มปริมาณพอลิโพรไพลีนจะทำให้ส่วนของกึ่งผลึก (semi-crystalline region) เพิ่มขึ้น โดยส่วนของกึ่งผลึกจะเป็นตัวขัดขวางไม่ให้ตัวทำละลายแทรกเข้าไปได้ ซึ่งผลึกในพอลิโพรไพลีนจะมีลักษณะเป็น spherulite ทำให้เส้นทางการแทรกของตัวทำละลายมีความคดเคี้ยวมากขึ้นและการแทรกของตัวทำละลายเป็นไปได้ยากมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.39 ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ บวมพองน้อยลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณยางเบลนด์จะทำให้ตัวทำละลายสัมผัสกับเฟสยางได้มากขึ้นทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์บวมพองได้มากขึ้น โดยพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP สามารถทนต่อน้ำมัน ASTM oil No.1 ได้มากกว่าน้ำมัน IRM 903

6.3.6 สมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกทนวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกต่างๆ

นำเทอร์โมพลาสติกทนวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA ตามหัวข้อที่ 3.3.5.12 โดยทดสอบภายใต้สภาวะก้านโตรเจนได้ผลการวิจัยดังรูปที่ 6.31 – 6.32



รูปที่ 6.31 เทอร์โมแกรม TGA ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วน
 ยางเบลนด์ต่อพลาสติกต่างๆ

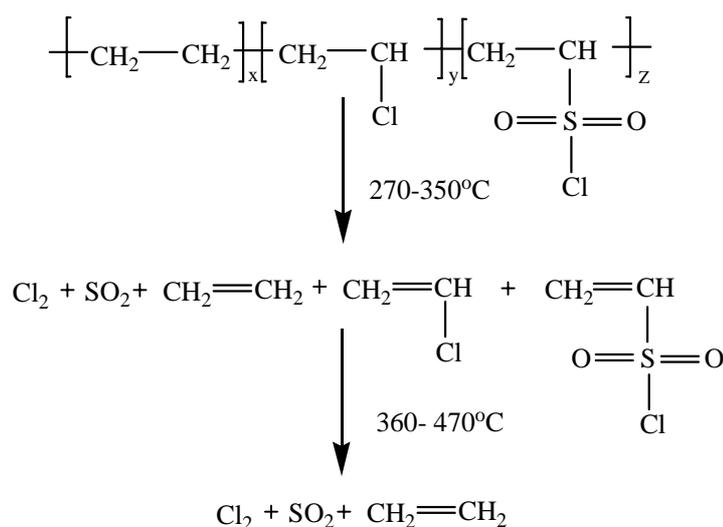


รูปที่ 6.32 เทอร์โมแกรม DTG ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่
 แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติกต่างๆ

ตารางที่ 6.9 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนการเบลนดระหว่างยางกับพลาสติก

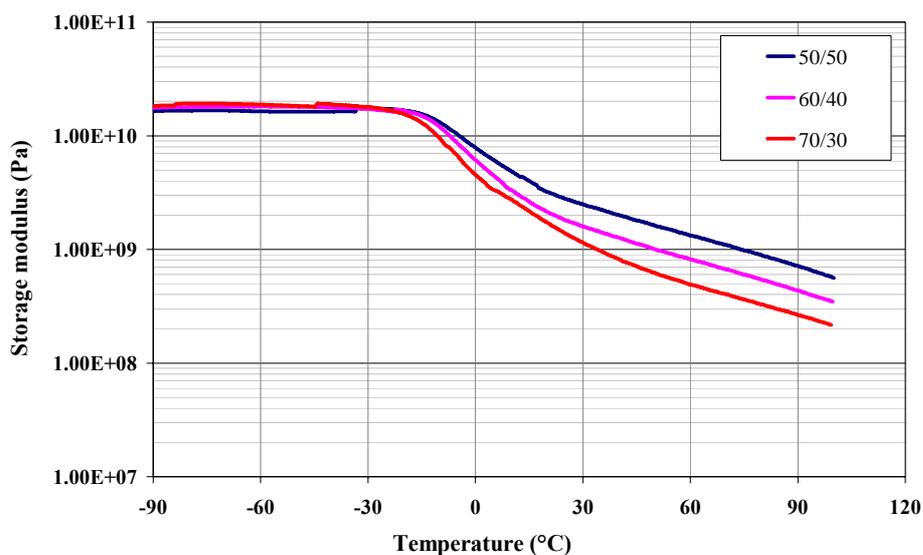
Blend ratio of rubber/PP	Decomposition temperature(T_d) (°C)	
	1st step	2nd step
50/50	310	360
60/40	315	365
70/30	320	365

จากรูปที่ 6.31 และตารางที่ 6.9 พบว่า เกิดการสลายตัวเป็นสองขั้น คือ ขั้นแรกเป็นการสลายตัวส่วนประกอบของเฟสยาง ขั้นที่สองเป็นการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลหลักในเฟสยางและเฟสพลาสติก และจากรูปที่ 6.31 สามารถหาอุณหภูมิการสลายตัวได้ดังแสดงในรูปที่ 6.32 เมื่อพิจารณาในเฟสของยางในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนการเบลนดระหว่างยางกับพอลิโพรพิลีนต่างกัน พบว่าเมื่อใช้สัดส่วนของยางเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากในส่วนของเฟสยางมียางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนที่ช่วยให้ทนต่อความร้อน เพราะสายโซ่หลักของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเป็นพันธะอิมิตัว จึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ การสลายตัวของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเสนอโดย Roydhouhury et al. (1993) การสลายตัว ขั้นแรกได้เป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดไฮโดรคลอริก และจากนั้นมีการเสนอการสลายตัวของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ด้วยความร้อนโดย Markovic et al. (2009) พบว่าการสลายตัวในขั้นแรกเป็นของเอทิลีน คลอโรเอทิลีน ซัลโฟคลอโรเอทิลีน ส่วนการสลายตัวในขั้นที่สองเป็นการเกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลหลัก ดังแสดงในรูปที่ 6.33

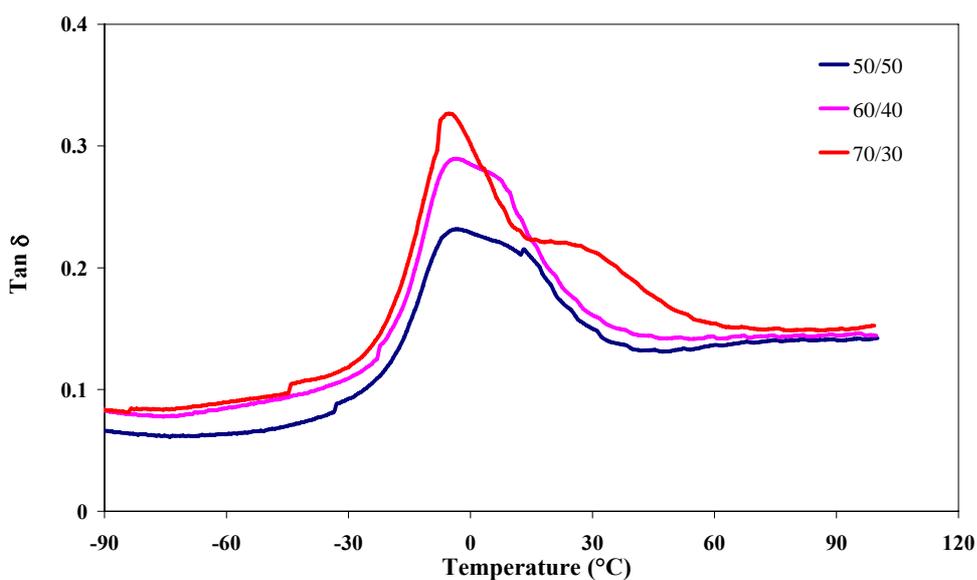


รูปที่ 6.33 การสลายตัวของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (Markovic et al., 2009)

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกที่ 50/50, 60/40 และ 70/30 ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DMTA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.34 – 6.35



รูปที่ 6.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสสะสมกับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางกับพลาสติกต่างๆ



รูปที่ 6.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางกับพลาสติกต่างๆ

จากรูปที่ 6.35 สามารถหาค่า T_g ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก แสดงดังตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 ค่า T_g ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกต่างๆ

(ENR-25/CSM)/PP ratio	T_g
50/50	-3.65
60/40	-3.62
70/30	-5.20

จากรูปที่ 6.34 – 6.35 พบว่า ค่ามอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ออสฐาน (ENR-25/CSM) ซึ่งจะเป็นช่วงกลาสทรานซิชัน (T_g) ของยางเบลนด์ แสดงดังตารางที่ 6.10 ส่วนการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปเป็นช่วงกลาสทรานซิชันของพอลิโพรไพลีนซึ่งสัมพันธ์กับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เป็นเฟสยางและเฟสพลาสติก และเมื่อเพิ่มปริมาณของเฟสยาง (ENR-25/CSM) ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีปริมาณผลึกลดลงซึ่งสามารถดูได้จากค่า $\tan \delta$ ที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6.35 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miguel *et al.* (2001) ที่ศึกษาอัตราส่วนระหว่างยาง EPDM กับพอลิโพรไพลีน

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์ต่อพลาสติก พบว่าที่อัตราส่วน 60/40 ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด มีขนาดอนุภาคที่เล็ก และสมบัติการบวมพอง และสมบัติเชิงความร้อนอยู่ในระดับที่ดี จึงเลือกอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกที่ 60/40 เพื่อศึกษาในหัวข้อถัดไป

6.4 ศึกษาอิทธิพลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/CSM/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3.4 ศึกษาชนิด 3 ชนิด คือ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA และปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ ที่ 0, 3, 5, 7 และ 9 % โดยน้ำหนักพอลิโพรไพลีน

6.4.1 ศึกษาอิทธิพลของชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/CSM/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยการเตรียมยางเบลนด์ ENR-25/CSM ใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ นำยางเบลนด์ผสมสารเคมีมาเบลนด์กับพอลิโพรไพลีนโดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ 3 ชนิด คือ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีนและเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3.4 ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

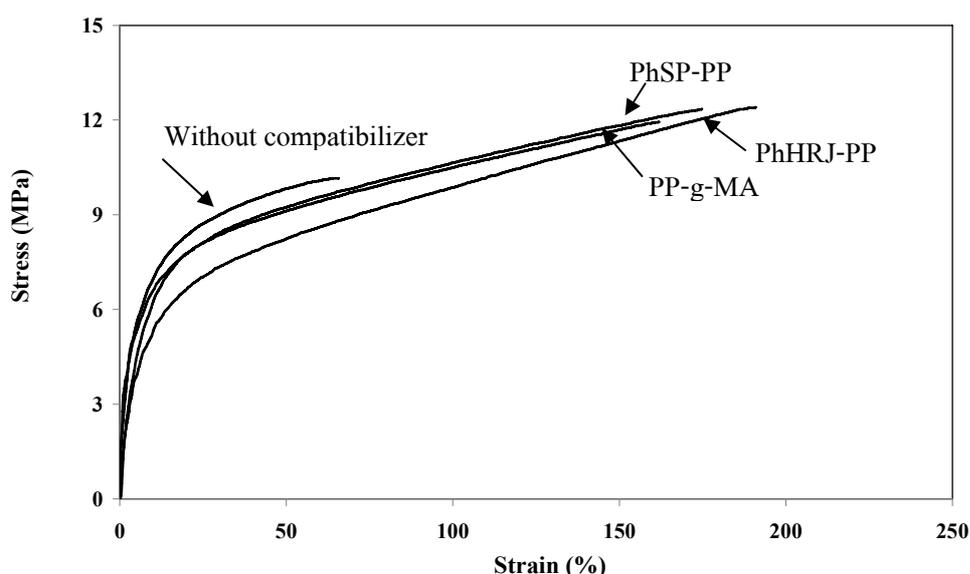
6.4.1.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ 3 ชนิด ได้แก่ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA เปรียบเทียบกับที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้ผลดังตารางที่ 6.11

ตารางที่ 6.11 อิทธิพลของชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

Types of compatibilizer	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
Without compatibilizer	10.2 ± 0.1	65.7 ± 6.7	89.5 ± 0.4	-	562
PhHRJ-PP	12.4 ± 0.1	191.0 ± 3.0	86.5 ± 0.4	30.0	1797
PhSP-PP	12.3 ± 0.3	174.8 ± 9.0	87.5 ± 0.4	31.0	1731
PP-g-MA	11.9 ± 0.1	162 ± 6.6	86 ± 0.5	33.0	1567

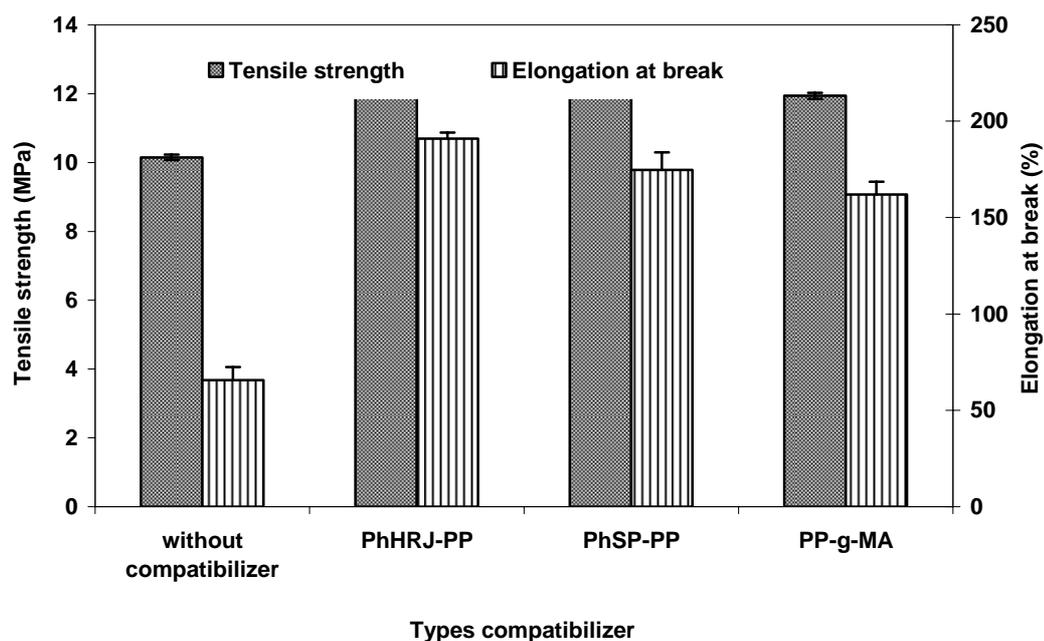
ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 6.36



รูปที่ 6.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

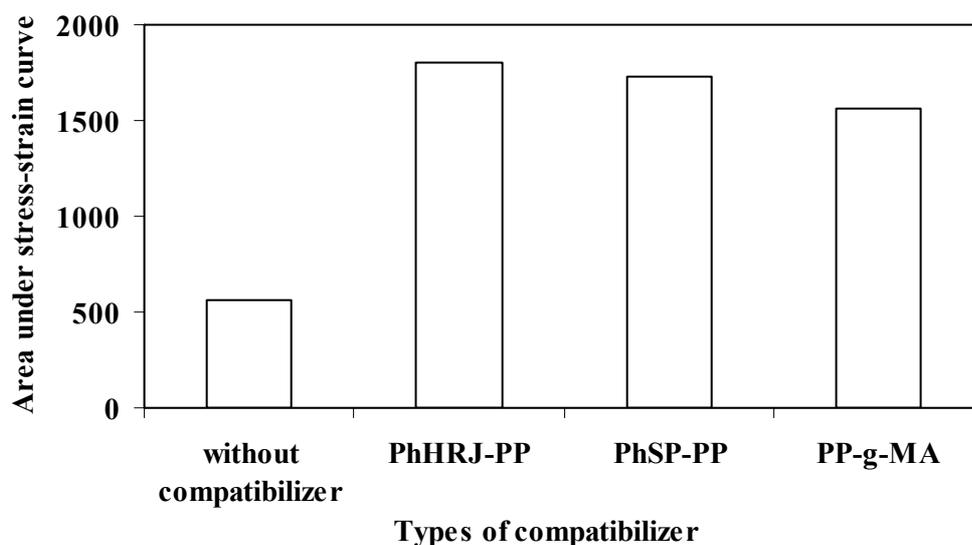
จากรูปที่ 6.36 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้มีพื้นที่ใต้กราฟ คือ ความแข็งตึง (stiffness) สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ได้ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ทั้งนี้เนื่องจากสารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสยางและเฟสพลาสติกมากขึ้น ทำให้การส่งผ่านแรงระหว่างเฟสมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้มีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นด้วย การใช้สารเพิ่มความเข้าได้จะทำให้เฟสที่แยกกันมีขนาดเล็กลง (สกุรัตน์, 2551) และมีอันตรกิริยากันมากขึ้นทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยสารเพิ่มความเข้าได้จะแทรกอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เบลนด์ ทำหน้าที่คล้ายสารลดแรงตึงผิว ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของสารเพิ่มความเข้ากันได้จะมีส่วนประกอบทางเคมีหรือส่วนของโมเลกุลเหมือนหรือคล้ายกับพอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์ (Datta and Lohse, 1996) ซึ่งสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 3 ชนิดที่ใส่ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีส่วนที่เข้ากับยางเบลนด์ ENR-25/CSM และมีส่วนที่เข้ากับพอลิโพรไพลีน คือ

เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ PhHRJ-PP และ PhSP-PP เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ จะมีส่วนของพอลิโพรไพลีนที่เข้ากันได้กับพอลิโพรไพลีน และส่วนของหมู่เมทิลลอลสามารถเข้ากับยางเบลนด์ ENR-25/CSM ส่วนสารเพิ่มความเข้ากันได้ PP-g-MA ส่วนที่เป็นพอลิโพรไพลีนสามารถเข้ากันได้กับพอลิโพรไพลีน และส่วนที่เป็นมาลิกแอนไฮไดรด์สามารถเข้ากับยางเบลนด์ ENR-25/CSM ได้ จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้มีสมบัติดีกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ได้ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 6.37 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

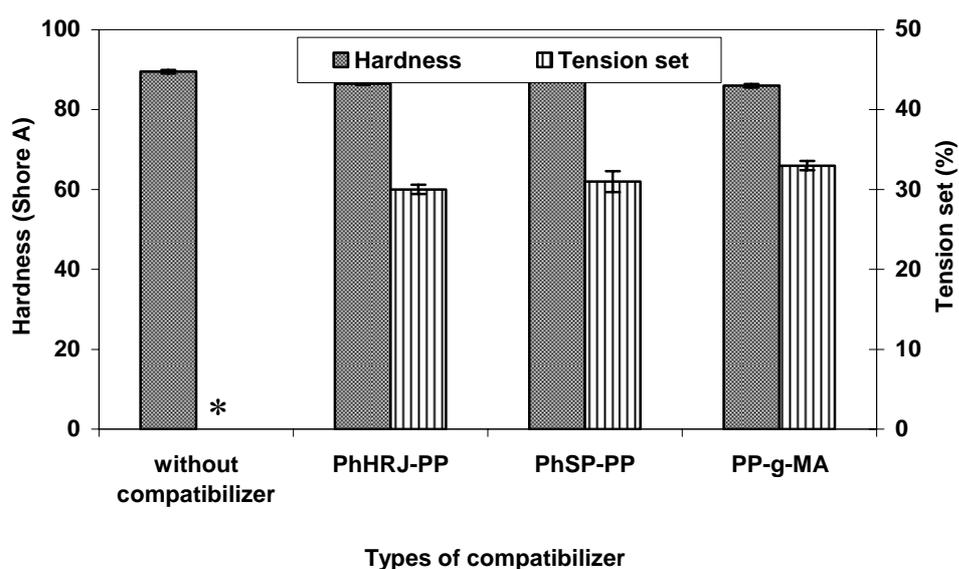
จากรูปที่ 6.37 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP จะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาคือ PhSP-PP และ PP-g-MA ตามลำดับ เนื่องจากสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ PhHRJ-PP, PhSP-PP มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วคือ หมู่ไฮดรอกซิลฟีนอลิก และ PP-g-MA มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วคือ หมู่ซัลฟอนิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วนี้จะทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างเฟสยาง ENR-25/CSM และพลาสติกพอลิโพรไพลีนมากขึ้นดังที่อธิบายแล้วในรูปที่ 4.58 นอกจากนี้ยังพบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะมีความสามารถในการยืดสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ได้ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ทั้งนี้เนื่องจากสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA จะทำหน้าที่เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสและลดแรงดึงผิวระหว่างเฟสจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สามารถยืดได้มากขึ้น โดยการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP จะให้ความสามารถในการยืดจนขาดสูงที่สุด เนื่องจาก HRJ-10518 มีหมู่ฟีนอลิกน้อยกว่า SP-1045 ทำให้การใช้ PhHRJ-PP มีความยืดหยุ่นดีกว่า และการใช้ PP-g-MA จะให้ความสามารถในการยืดต่ำกว่า PhHRJ-PP และ PhSP-PP



รูปที่ 6.38 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 6.38 พบว่า พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดในกรณีที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ PhSP-PP, PP-g-MA และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งได้อธิบายด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ได้ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง และค่าความแข็ง ดังรูปที่ 6.39



*ไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากระยะยืดไม่ถึง 100%

รูปที่ 6.39 ค่าความแข็งและการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

จากรูที่ 6.39 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะมีความสามารถในการคืนรูปร่างเดิมได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ได้ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ แสดงให้เห็นว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะช่วยปรับปรุงให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความเป็นยางมากขึ้น เนื่องจากสารเพิ่มความเข้ากันได้จะเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสยางและเฟสพลาสติก โดยที่ PhHRJ-PP จะมีความสามารถในการคืนรูปร่างเดิมได้ดีที่สุด แสดงให้เห็นว่าการใช้ PhHRJ-PP เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำให้เฟสยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดซึ่งดูได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยา (สกุรัตน์, 2551) และมีความยืดหยุ่นมากขึ้น รองลงมาได้แก่ PhSP-PP และ PP-g-MA ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า ค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA ให้ค่าแข็งไม่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่และไม่ใส่สารเพิ่มความเข้าได้ก็มีความไม่แตกต่างกันมาก

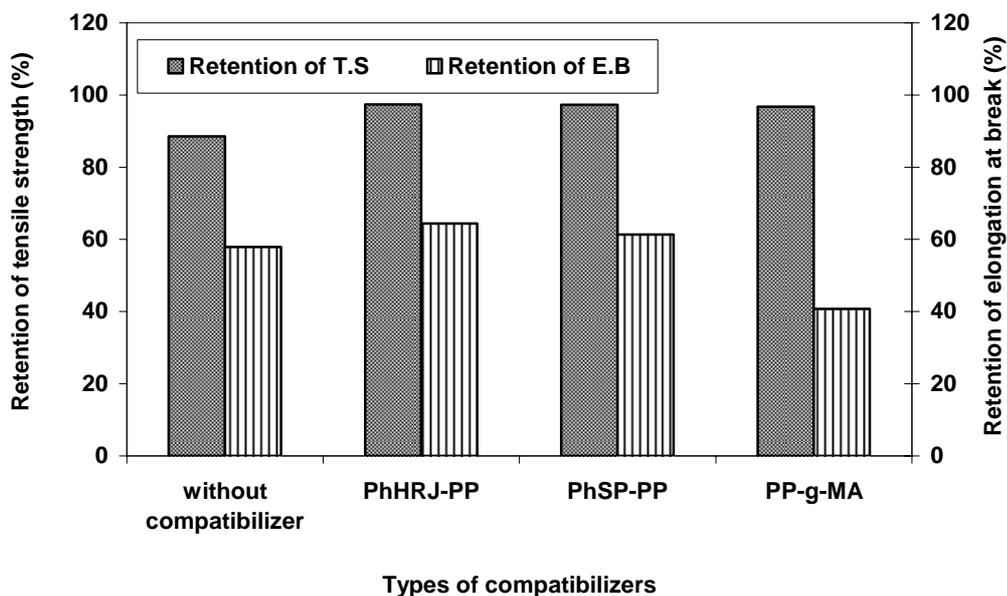
6.4.1.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.12

ตารางที่ 6.12 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

Types of compatibilizer	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
Without compatibilizer	88.6	57.8
PhHRJ-PP	97.3	64.4
PhSP-PP	97.3	61.3
PP-g-MA	96.7	40.7

จากตารางที่ 6.12 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังการบ่มแรง และความต้านทานต่อการฉีกขาดมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 6.40

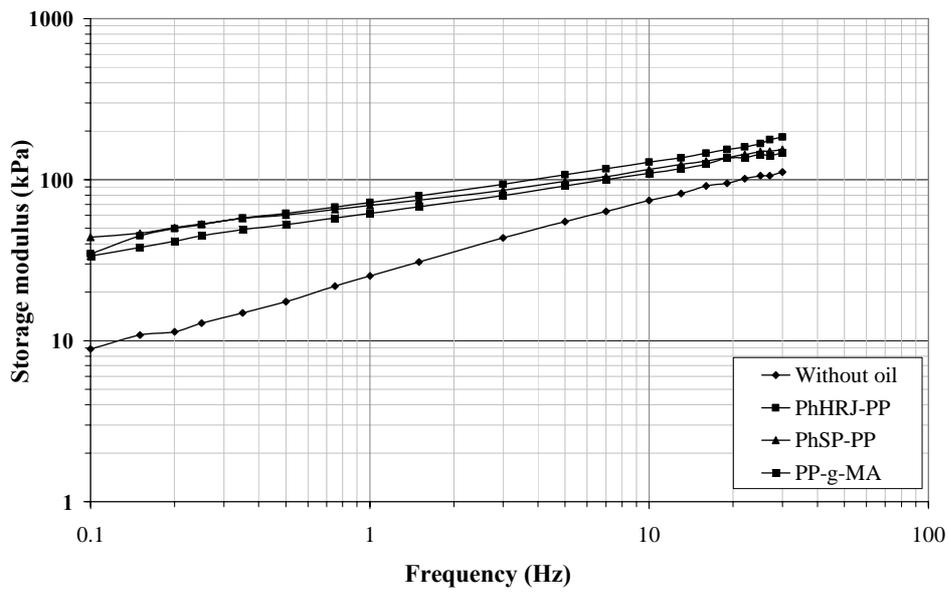


รูปที่ 6.40 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบสลาต ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

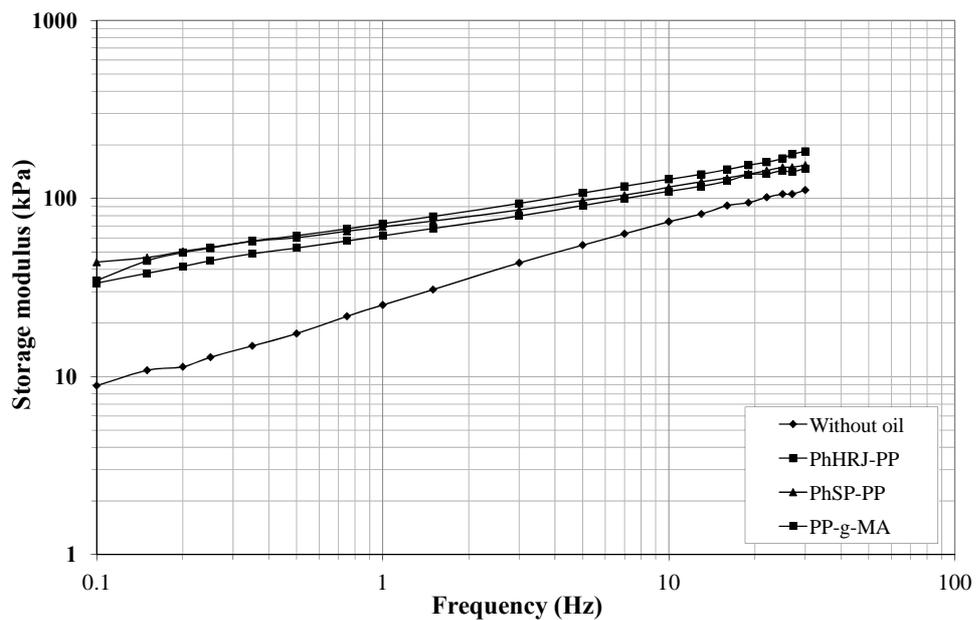
จากรูปที่ 6.40 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบสลาต ENR-25/CSM/PP ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้มีความทนทานต่อการออกซิเดชันได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ทำให้เกิดความแข็งแรงระหว่างเฟสยางกับพลาสติก ซึ่งเฟสกระจายเป็นเฟสเล็กทำให้เกิดออกซิเดชันได้ยาก เพราะมีพอลิโพรไพลีนเป็นเฟสต่อเนื่อง ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกทนความร้อนดีกว่า จากรูปที่ 6.40 ยังพบว่า ค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบสลาต ENR-25/CSM/PP ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP และ PhSP-PP ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ PP-g-MA ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เข้ากันได้ทั้งเฟสยางและพลาสติกดีกว่า ทำให้เกิดความแข็งแรงระหว่างเฟสยางกับพลาสติกส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกทนต่อการออกซิเดชันดีกว่า

6.4.1.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณต่างๆ

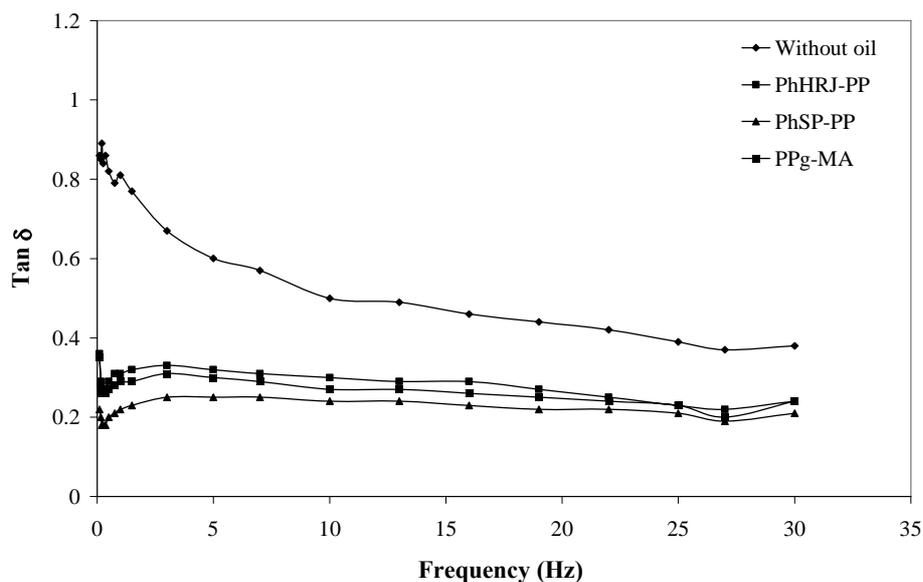
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ แปรชนิดสารเพิ่มความเข้าได้ 3 ชนิด PhHRJ-PP, PhSP-PP, PP-g-MA เปรียบเทียบกับไม่ใส่สารเพิ่มความเข้าได้ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.41 – 6.44



รูปที่ 6.41 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดต่างๆ

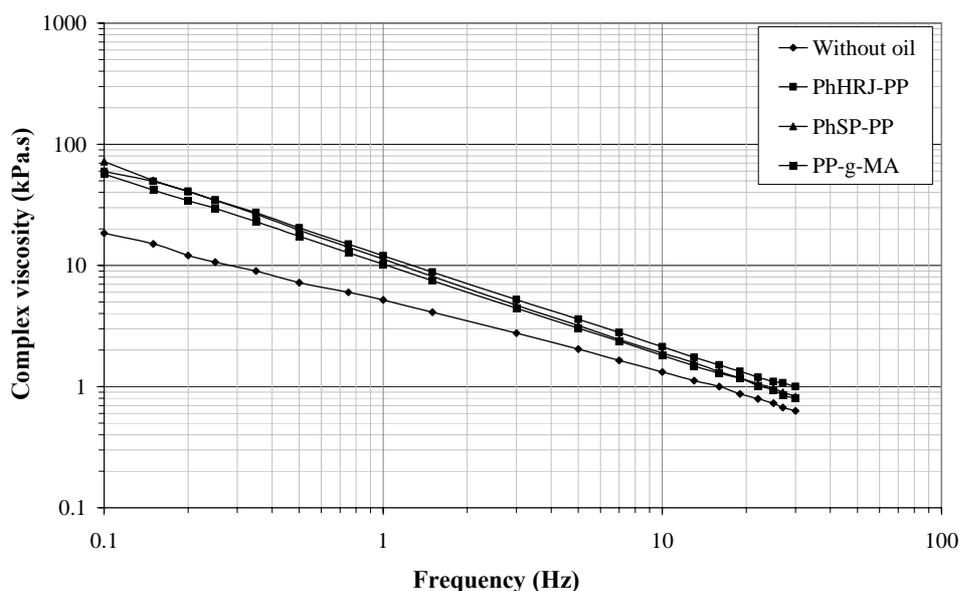


รูปที่ 6.42 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 6.43 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

จากรูปที่ 6.41 – 6.43 พบว่า มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความถี่ เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกันพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 3 ชนิดคือ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA ไม่แตกต่างกัน และพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้มีมอดูลัสสะสมสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ แสดงให้เห็นว่าการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเฟสพอลิโพรไพลีนกับเฟสยางเบลนด์เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันและมีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยสารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำให้ผิวประจัญ (interface) มีแรงยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น ทำให้ความหนาของผิว (interfacial thickness) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การส่งผ่านแรง (stress transfer) ระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพมากขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า Tan δ ก็ให้ผลสอดคล้องกับมอดูลัสสะสมคือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้จะไม่แตกต่างกันแต่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันมีค่า Tan δ สูงที่สุด ซึ่งค่า Tan δ แสดงถึงความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยค่า Tan δ ต่ำจะมีความยืดหยุ่นมาก แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันมีความยืดหยุ่นน้อยที่สุด

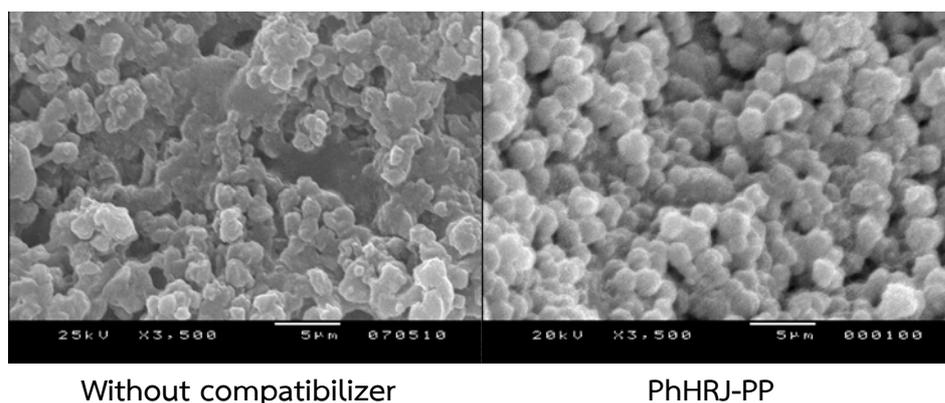


รูปที่ 6.44 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 6.44 พบว่า ค่าความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่และใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดต่างๆ มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความถี่ เมื่อเปรียบเทียบความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้มีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้มีค่าความหนืดเชิงซ้อนน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ PP-g-MA, PhSP-PP และ PhHRJ-PP จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกให้แรงยึดเหนี่ยวและมีความเข้ากันได้มากขึ้น ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ไหลได้ยากขึ้น เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ ดังรูปที่ 7.52

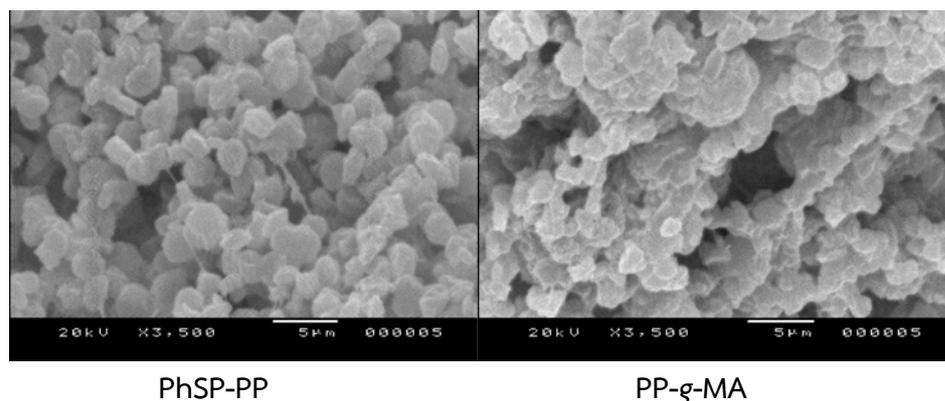
6.4.1.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA เปรียบเทียบกับไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.45



Without compatibilizer

PhHRJ-PP



รูปที่ 6.45 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดต่างๆ และไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 6.45 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 3 ชนิด คือ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA มีลักษณะเฟสยางเบลนด์กระจายตัวอยู่ในเฟสพลาสติกได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 3 ชนิด พบว่า เทอร์โมพลาสติกที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP มีเฟสยางเบลนด์กระจายตัวอยู่ในเฟสพลาสติกสม่ำเสมอกว่า PhSP-PP และ PP-g-MA แสดงว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเฟสพอลิโพรไพลีนกับเฟสยางเบลนด์เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันและมีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยสารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำให้ผิวประจัญ (interface) มีแรงยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น

6.4.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/CSM/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 ใช้ PhHRJ-PP เป็นสารเพิ่มความเข้าได้ โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้าได้ที่ 0, 3, 5, 7, 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.3.5 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง และสมบัติพลวัตเชิงกล

6.4.2.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

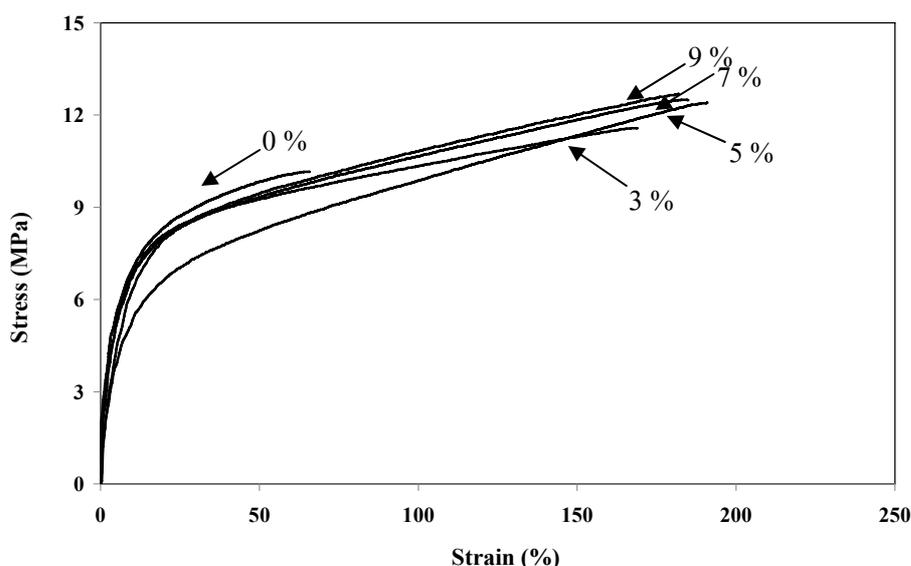
ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้าได้ PhHRJ-PP ที่ 0, 3, 5, 7 และ 9 % โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน เปรียบเทียบกับที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้ผลดังตารางที่ 6.13

ตารางที่ 6.13 อิทธิพลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

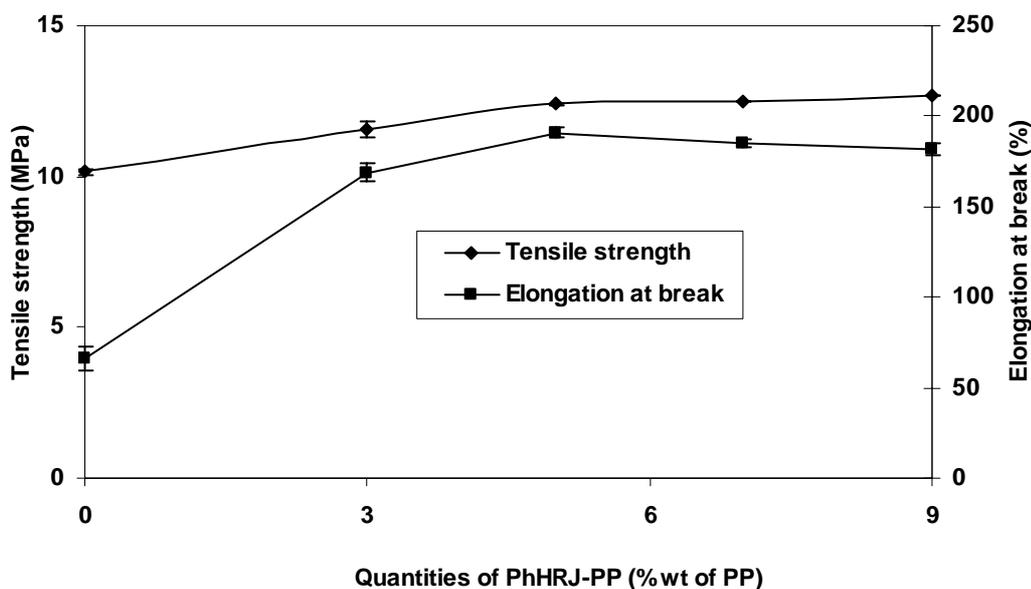
Quantities of compatibilizer (% wt. PP)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
Without compatibilizer	10.2 ± 0.1	65.7 ± 6.7	89.5 ± 0.4	-	562
3	11.6 ± 0.3	169.0 ± 4.5	87.0 ± 0.3	35.0	1636
5	12.4 ± 0.1	191.0 ± 3.0	86.5 ± 0.4	30.0	1797
7	12.5 ± 0.1	185.0 ± 2.5	86.5 ± 0.8	31.0	1879
9	12.7 ± 0.1	182.0 ± 3.5	88.5 ± 0.3	31.0	1852

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ที่ปริมาณต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 6.46

จากรูปที่ 6.46 พบว่า การใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ทำให้ทำให้เทอร์โมพลาสติกมีความแข็งแรงความสามารถในการยืดดีขึ้นดูได้จากพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ และความสามารถในการยืดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดูได้จากระยะยืด ซึ่งเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้นั้นมีระยะยืดน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ และจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ ทั้งนี้เนื่องจากการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ช่วยให้เฟสของยางกับพลาสติกเกิดความแข็งแรงขึ้น และพบว่าปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ 7 และ 9% โดยน้ำหนักพอลิโพรไพลีนแล้วไม่ได้ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติที่ดีขึ้น

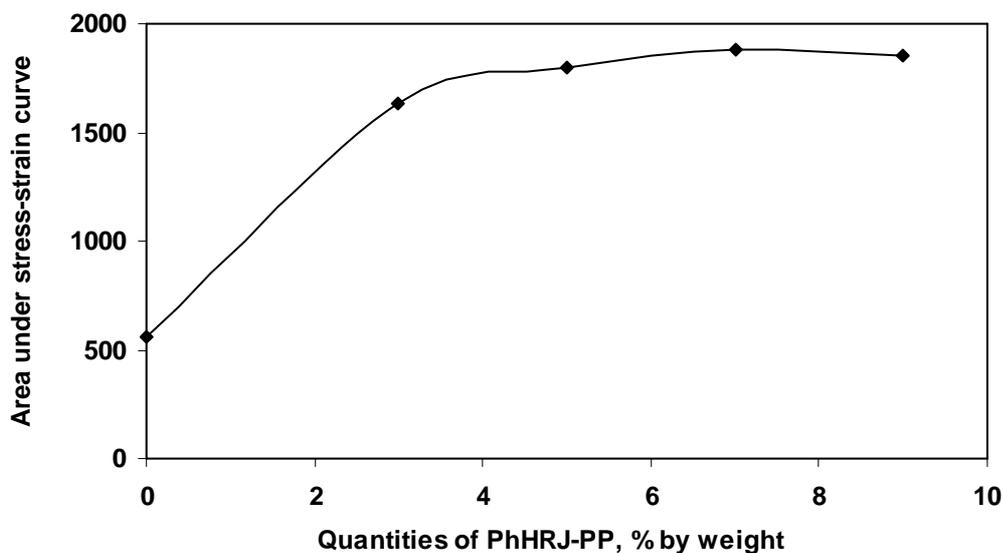


รูปที่ 6.46 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP



รูปที่ 6.47 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP

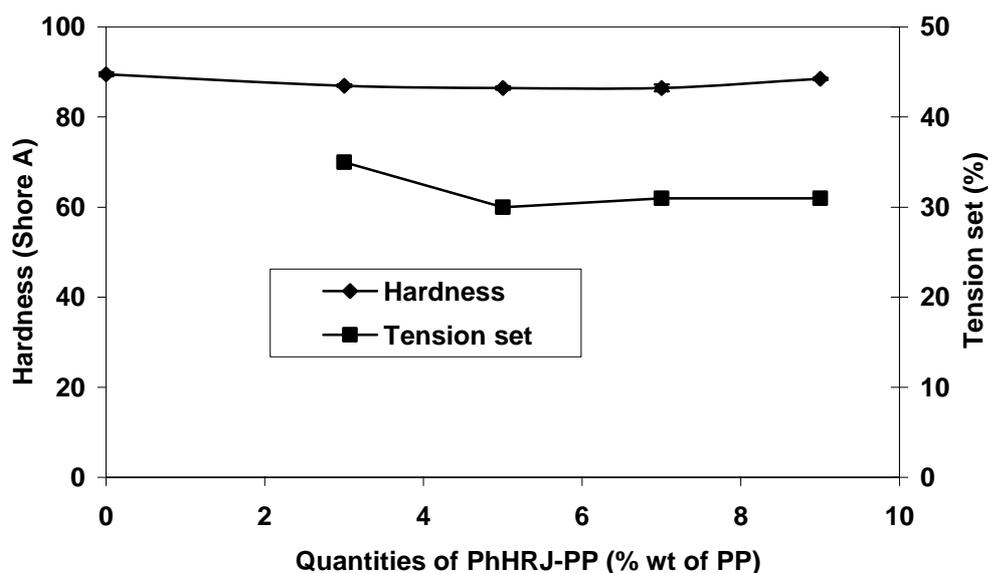
จากรูปที่ 6.47 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน การเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้สูงกว่านี้จะทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มาก แสดงว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน ทำให้เกิดการเชื่อมประสานระหว่างเฟสของยางเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR/CSM/PP จะเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณ PhHRJ-PP เท่ากับ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกมีแนวโน้มที่จะลดลง



รูปที่ 6.48 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP

จากรูปที่ 6.48 พบว่า พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PhHRJ-PP โดยมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อใช้ปริมาณมากกว่า 5 % โดยน้ำหนักพอลิโพรไพลีน

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ได้ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง และค่าความแข็ง ดังรูปที่ 6.49



รูปที่ 6.49 ค่าความแข็งและการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ PhHRJ-PP

จากรูปที่ 6.49 พบว่า ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ลดลงตามการเพิ่มของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP จนถึงปริมาณสารเพิ่มความเข้าได้ที่ 5% โดยน้ำหนักพอลิโพรไพลีนแล้ว เมื่อเพิ่มปริมาณ PhHRJ-PP จะมีค่าคงที่ ส่วนความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ปริมาณต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้กับไม่ใส่พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน

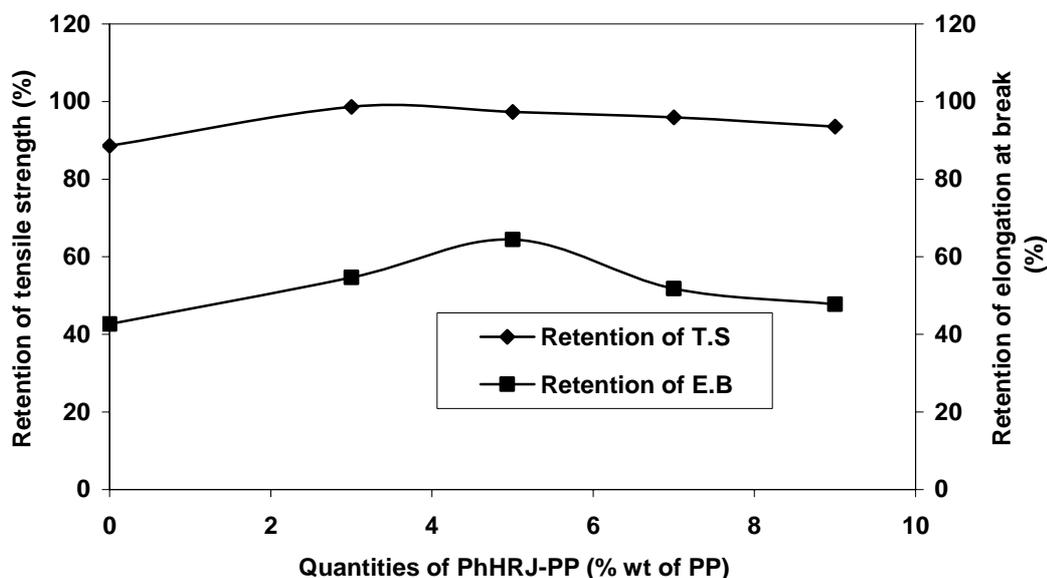
6.4.2.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.14

ตารางที่ 6.14 อิทธิพลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

Quantities of compatibilizer (%)	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
Without compatibilizer	88.6	42.6
3	98.6	54.6
5	97.3	64.4
7	95.9	51.8
9	93.5	47.8

จากตารางที่ 6.14 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังการบ่มแรง มาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 6.50

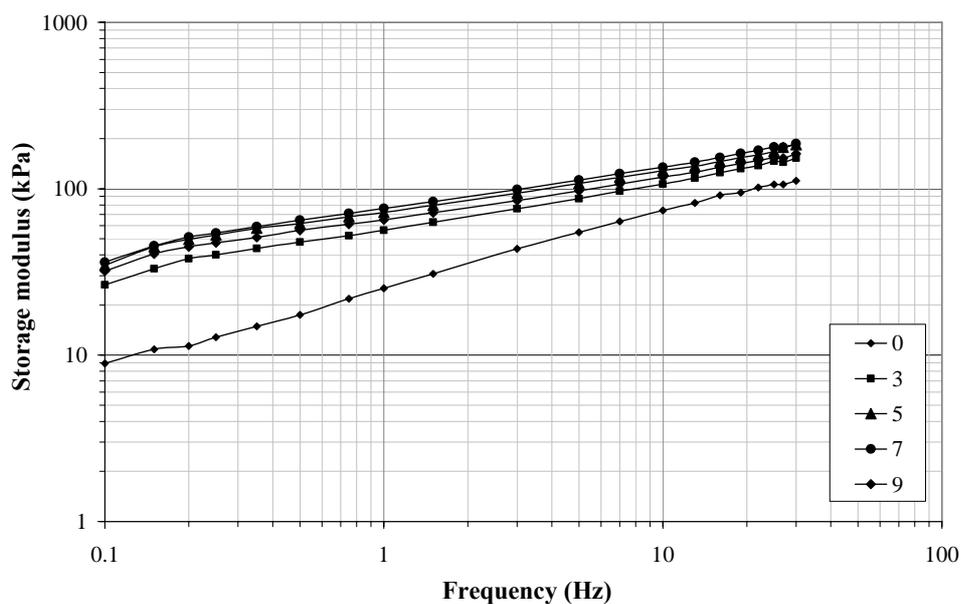


รูปที่ 6.50 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบ ลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

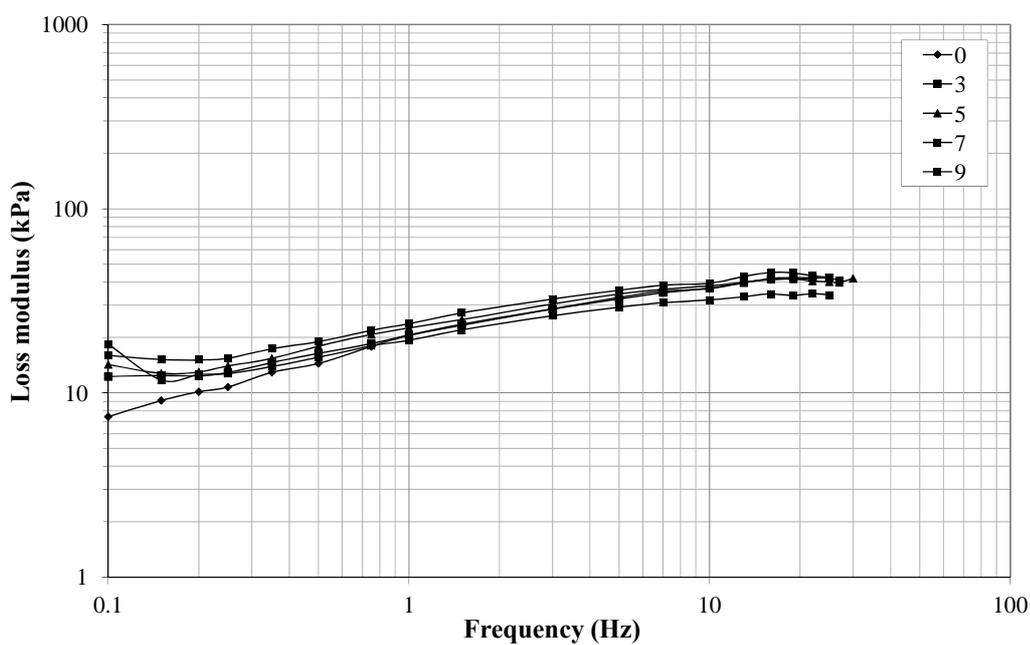
จากรูปที่ 6.50 พบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลัง บ่มแรงของยางเบ ลนด์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณสารเพิ่มความเข้า ได้ จนถึงปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ที่ 5% โดยน้ำหนักพอลิโพรไพลีน จึงมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อ เพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ขึ้นอีก เนื่องจากปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันที่ 5% โดยน้ำหนักพอลิโพรไพลี น เป็นปริมาณที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มปริมาณอีกทำให้ความสามารถในการยืดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ลดลง เนื่องจากมีเฟสพลาสติกมากขึ้น (PhHRJ-PP) เกิดแรงกระทำระหว่างเฟสมากเกินไป ทำให้สูญเสีย ความยืดหยุ่น

6.4.2.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณต่างๆ

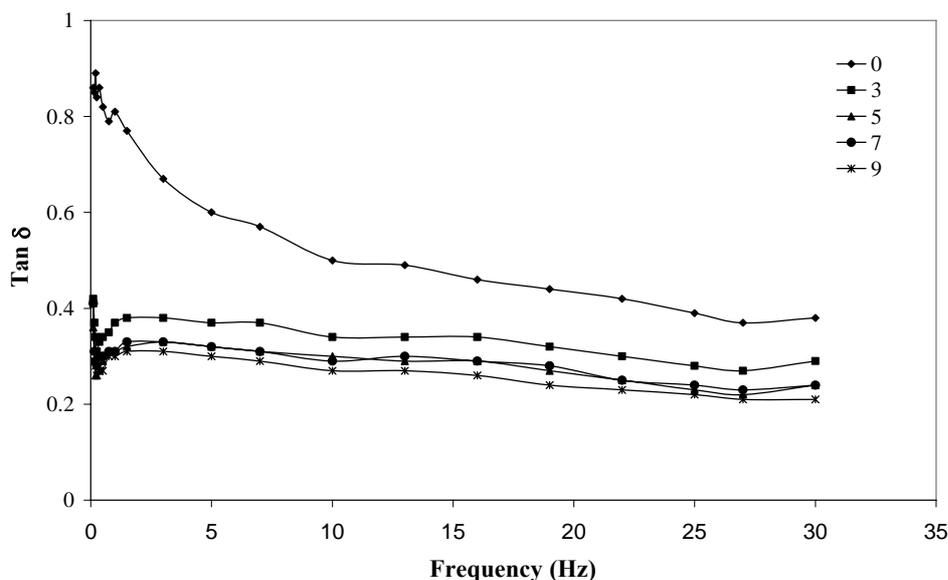
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ PhHRJ-PP เป็นสารเพิ่มความเข้า กัน แปรปริมาณที่ 0, 3, 5, 7 และ 9% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีนได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.51 – 6.54



รูปที่ 6.51 มอดุลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ปริมาณต่างๆ

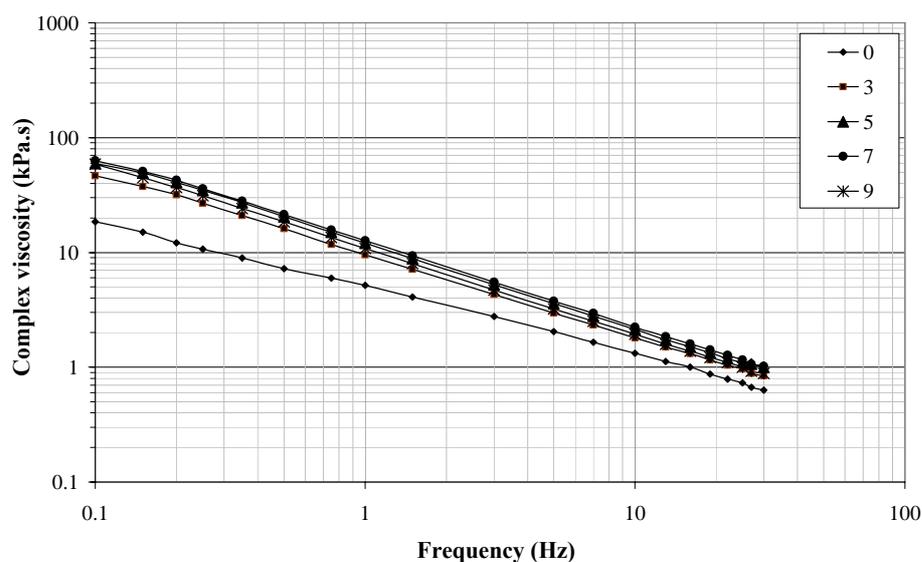


รูปที่ 6.52 มอดุลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP



รูปที่ 6.53 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 6.51 – 6.53 พบว่า โมดูลัสสะสมและโมดูลัสเสถียรของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ใช้ PhHRJ-PP ในทุกปริมาณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความถี่ และเมื่อเปรียบค่าโมดูลัสสะสมที่ความถี่เดียวกันพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มสารเพิ่มความเข้ากันได้จนถึงปริมาณที่ 5% โดยน้ำหนักพอลิโพรพิลีน ซึ่งปริมาณดังกล่าวน่าจะเป็นปริมาณที่สามารถทำให้สารเพิ่มความเข้ากันได้เคลือบที่ผิวประจัญได้ในปริมาณพอดี ดังนั้นสารเพิ่มความเข้ากันได้ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างเฟสพอลิโพรพิลีนและเฟสของยางเบลนด์ได้ดีที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณมากกว่า 5% โดยน้ำหนักพอลิโพรพิลีนไม่มีผลให้ค่าโมดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น และค่า Tan δ สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกับกรณีโมดูลัสสะสม



รูปที่ 6.54 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ต่างๆ

จากรูปที่ 6.54 พบว่า ค่าความเหนียวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ทุกปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ของการทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเหนียวที่ความถี่เดียวกัน พบว่าความเหนียวเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้สอดคล้องกับผลการทดลองสมบัติเชิงกลและโมดูลัสสะสม

6.5 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/CSM/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3.6 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงสมบัติพลวัตเชิงกล ความทนทานต่อน้ำมัน และสมบัติเชิงความร้อน ได้ผลการทดลองดังนี้

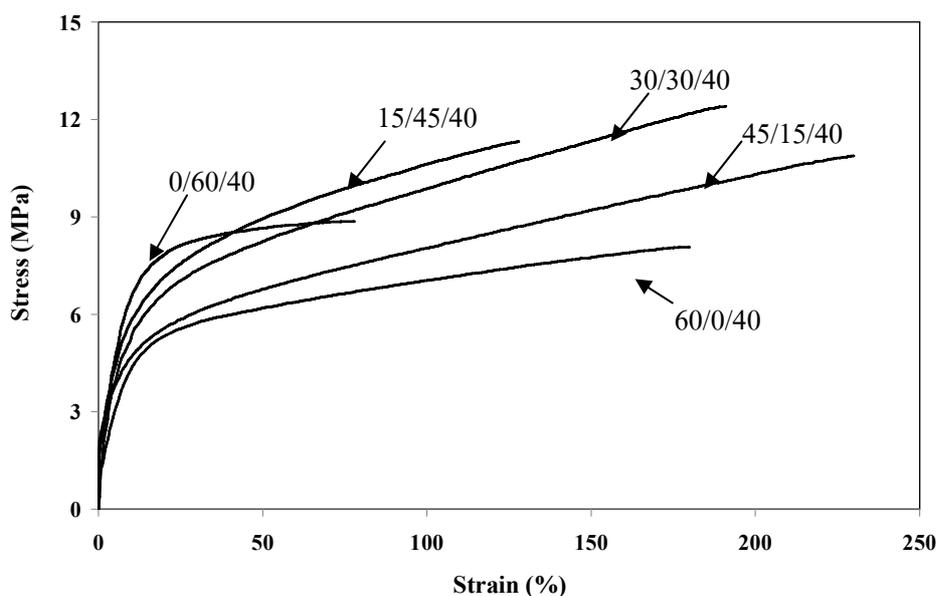
6.5.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ยาง ENR-25/CSM ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ดังนี้ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ได้ผลดังตารางที่ 6.15

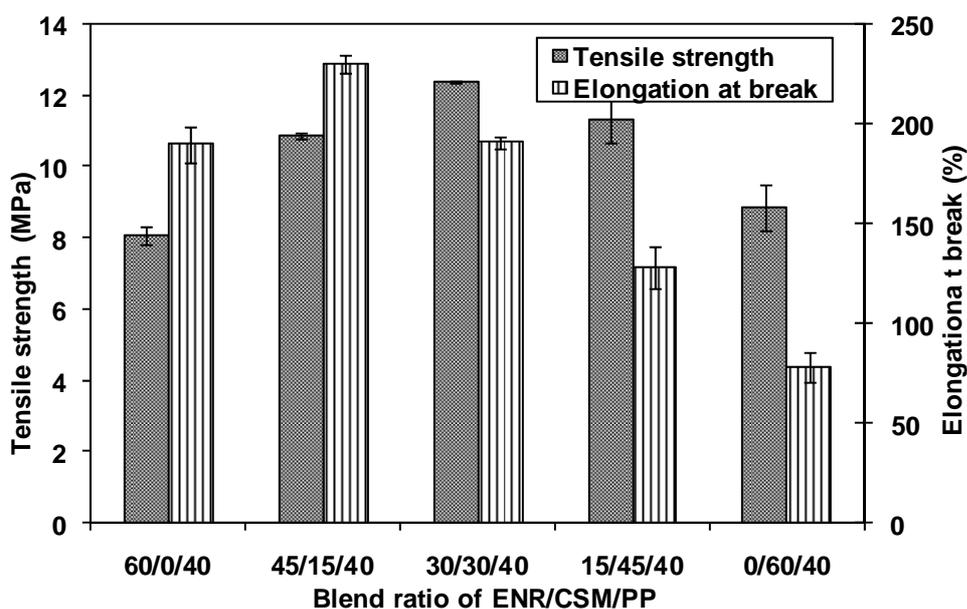
ตารางที่ 6.15 อิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

ENR-25/CSM/PP ratio	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
60/0/40	8.1 ± 0.2	190.0 ± 9.0	79.5 ± 0.4	30.5	1193
45/15/40	10.9 ± 0.1	230.0 ± 4.5	84.0 ± 0.3	30.0	1884
30/30/40	12.4 ± 0.1	191.0 ± 3.0	86.5 ± 0.4	30.0	1797
15/45/40	11.3 ± 0.6	128.0 ± 10.8	87.5 ± 0.4	40.0	1150
0/60/40	8.86 ± 0.7	77.7 ± 7.6	88.5 ± 0.4	-	611

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 6.55



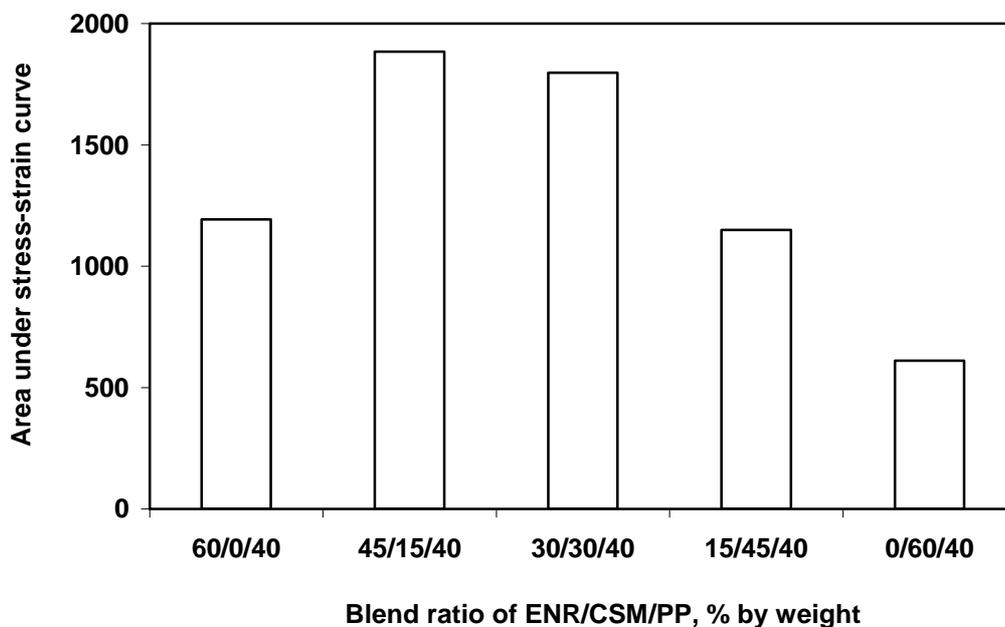
รูปที่ 6.55 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ



รูปที่ 6.56 ความสามารถในการดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.56 ความสามารถในการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนจนถึงอัตราส่วนที่ 30/30/40 และเมื่อเพิ่มปริมาณขึ้นอีกไม่ได้ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนที่ 30/30/40 ทำให้ยางกระจายตัวอยู่ในเฟสพลาสติกดีที่สุด ซึ่งสามารถดูได้จากผลทางสัณฐานวิทยามีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด และอาจเนื่องจากเฟสยาง ENR-25/CSM เกิดแรงกระทำทางเคมีได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนยางเบลนด์ 50/50 เข้ากันได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคา

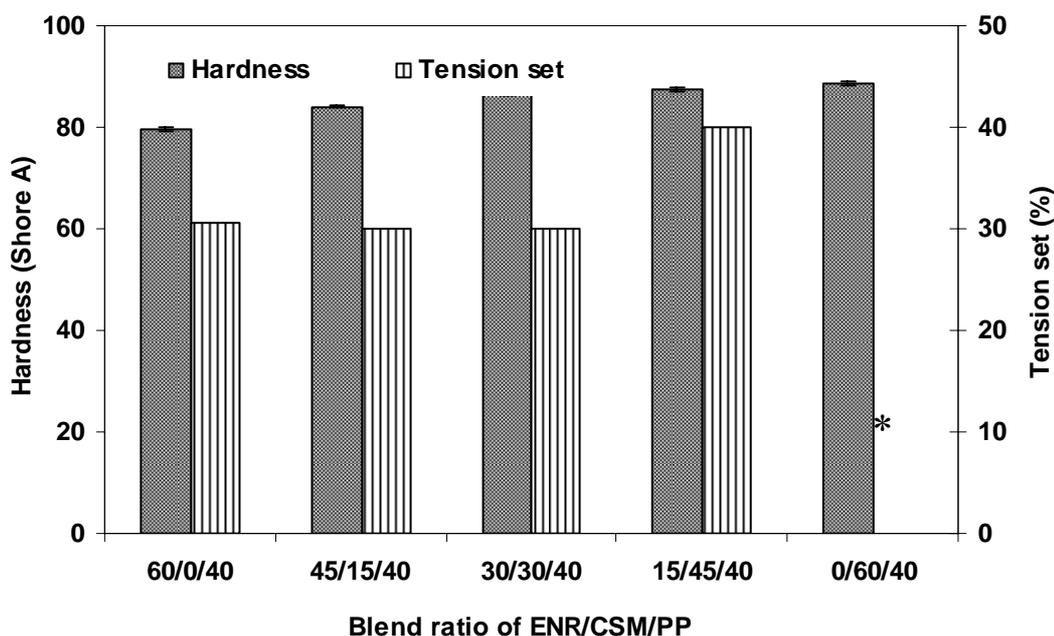
ไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มของปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ทั้งนี้อาจเนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีความยืดหยุ่นมากกว่ายางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีอัตราส่วนยางธรรมชาติอีพอกไซด์มากจึงมีความสามารถในการยืดมาก



รูปที่ 6.57 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.57 พบว่า พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ในกรณีที่ใช้อัตราส่วน 45/15/40 % โดยน้ำหนัก มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ 30/30/40, 60/0/40, 15/45/40 และ 0/60/40 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ได้ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง และค่าความแข็งดังรูปที่ 6.58



*ไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากกระষยยืดไม่ถึง 100%

รูปที่ 6.58 ค่าความแข็งและการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.58 พบว่า ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยางธรรมชาติอ็อกไซด์มีความยืดหยุ่น (elasticity) มากกว่ายางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณยางธรรมชาติอ็อกไซด์มากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สามารถคืนรูปได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน จากรูปที่ 6.58 พบว่า ค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (CSM) และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน 0/60/40 มีความแข็งสูงสุด และที่อัตราส่วน 60/0/40 มีความแข็งต่ำที่สุด เนื่องจากยาง CSM มีสมบัติคล้ายพลาสติกทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง CSM เพิ่มขึ้น

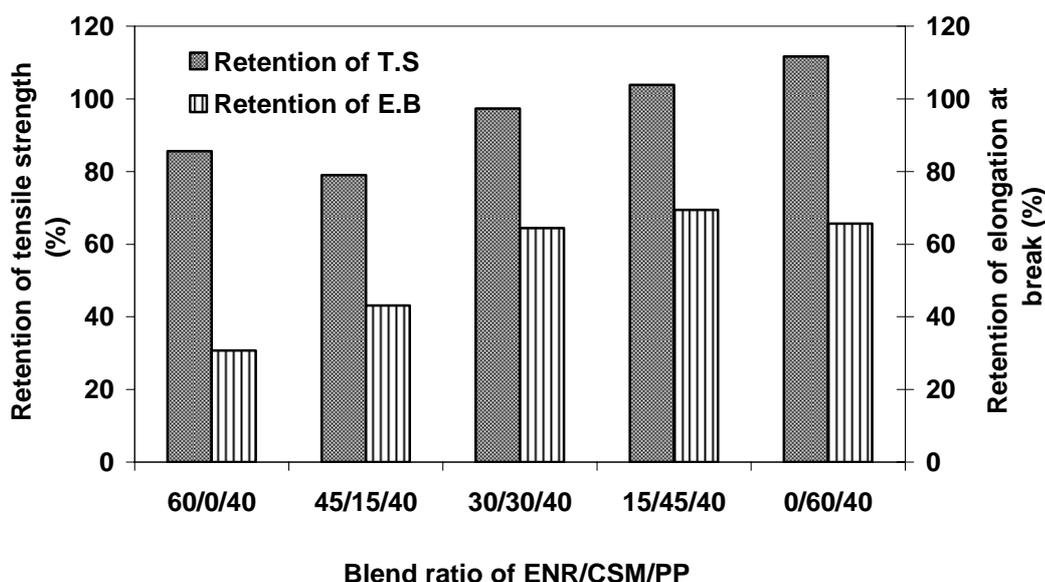
6.5.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรปริมาณอัตราส่วนการยางเบลนด์ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.16

ตารางที่ 6.16 อิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

ENR-25/CSM/PP ratio	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
60/0/40	85.6	30.7
45/15/40	79.1	43.1
30/30/40	97.3	64.4
15/45/40	103.9	69.4
0/60/40	111.6	65.6

จากตารางที่ 6.16 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังการบ่มแรง และความต้านทานต่อการฉีกขาดมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 6.59



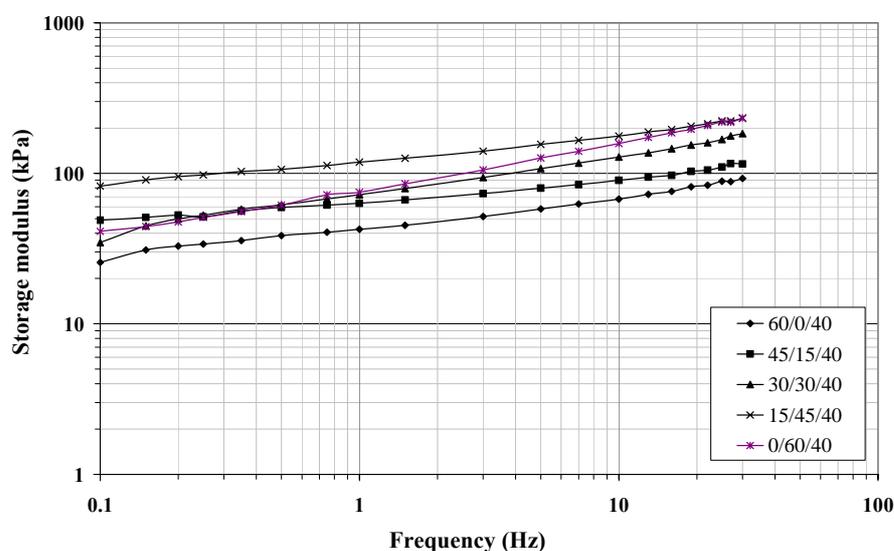
รูปที่ 6.59 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยึดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.59 พบว่า เมื่อยางธรรมชาติออกไซด์เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ลดลง เนื่องจากยางธรรมชาติออกไซด์เกิดการออกซิเดชันได้มากกว่ายางคลอโรซิลโฟเนตพอลิเอทิลีน เพราะยางธรรมชาติออกไซด์มีพันธะคู่ที่เหลืออยู่ในโครงสร้าง ทำให้วงไวต่อการเกิดออกซิเดชันได้มากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางคลอโรซิลโฟเนตพอลิเอทิลีนสูง จากรูปที่ 6.59 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของยางคลอโรซิลโฟเนตพอลิเอทิลีนทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีสมบัติที่คงอยู่หลังการบ่มแรงสูงขึ้น แสดงว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความทนทานต่อการ

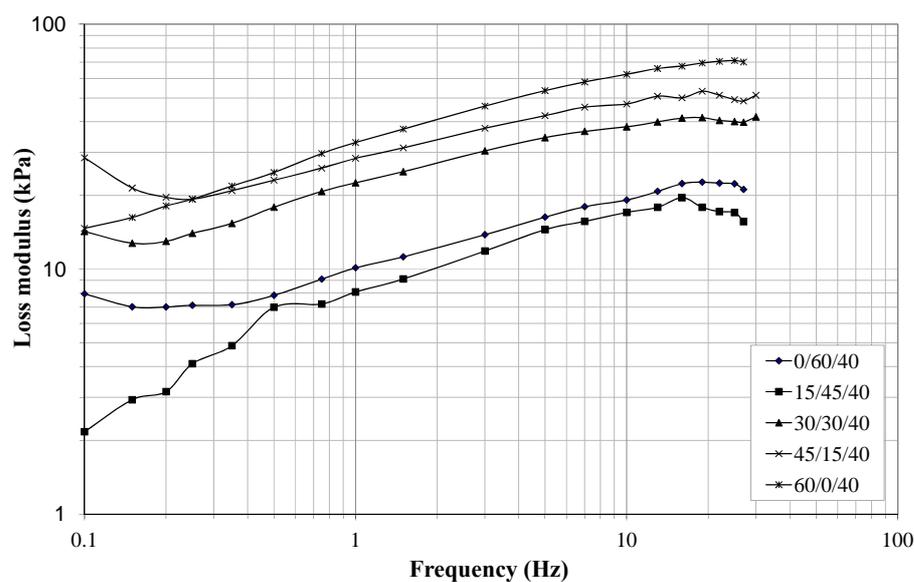
ออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่หลักของยางคลอโรซัลโฟโพลีเอทิลีน เป็นพันธะที่อิ่มตัวหมด จึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนได้อย่างดีเยี่ยม ดังนั้นเมื่อยางเบลนด์ที่มีปริมาณยางคลอโรซัลโฟโพลีเอทิลีนมาก ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความทนทานต่อการออกซิเดชันได้ดี

6.5.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

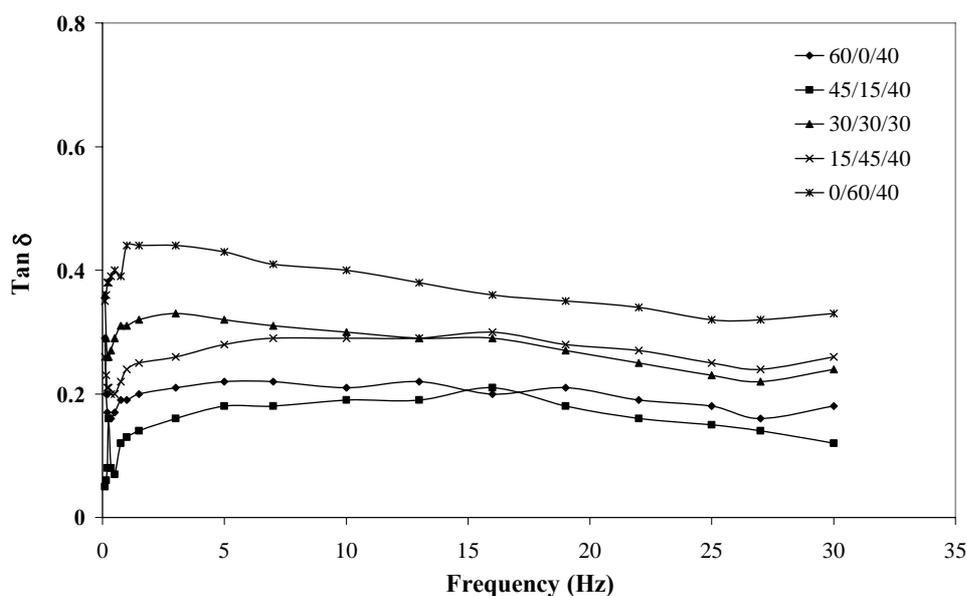
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ใช้เครื่อง MDPT แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.60 – 6.63



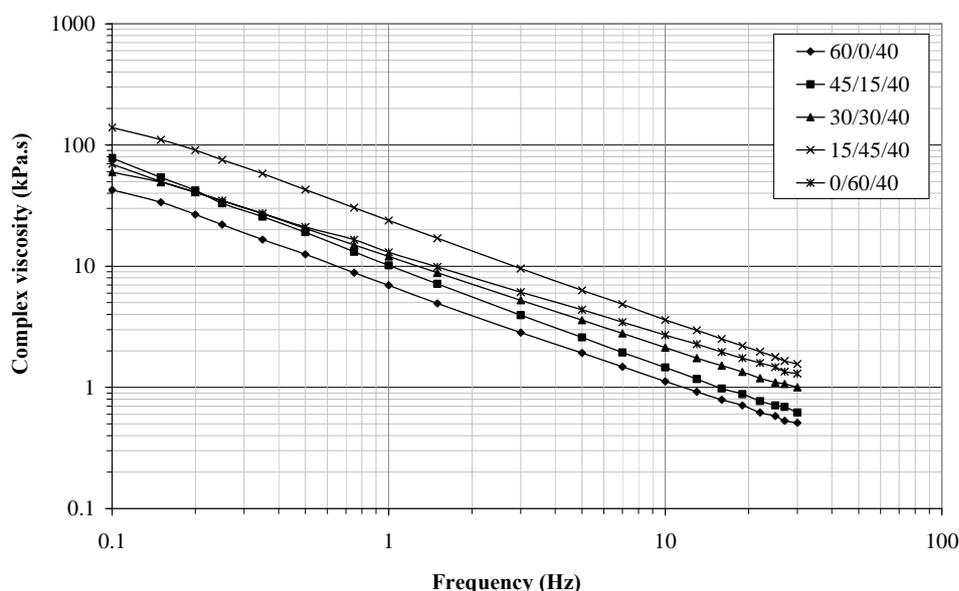
รูปที่ 6.60 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้อัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ



รูปที่ 6.61 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ



รูปที่ 6.62 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ จากรูปที่ 6.60 – 6.62 พบว่า โมดูลัสสะสมและโมดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความถี่ เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตมากทำให้มีค่าโมดูลัสสะสมมากแต่มีพลังงานสูญเสียสูงเช่นกันซึ่งดูได้จากค่า Tan δ ที่มาก เนื่องจากค่า Tan δ แปรผันตรงกับพลังงานสูญเสีย แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ที่มีค่า Tan δ มากมีความยืดหยุ่นน้อยซึ่งสอดคล้องกันกับค่าการผิดรูปถาวรที่มีค่าสูง



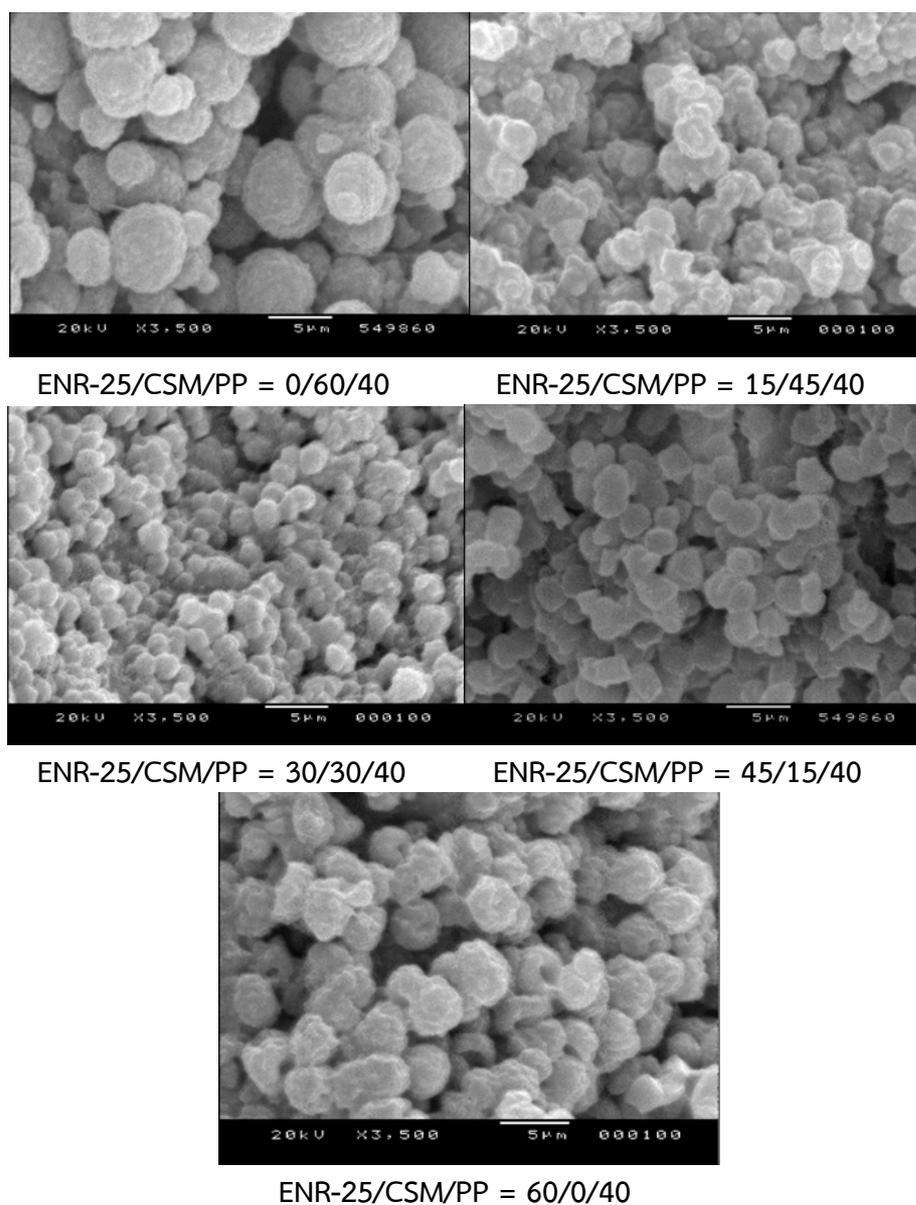
รูปที่ 6.63 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.63 พบว่า ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเช่นเดียวกับโมดูลัสสะสม เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกันพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง CSM สูงจะมีค่า

ความเหนียวสูงเนื่องจากยาง CSM มีความเป็นขี้สูงกว่ายาง ENR-25 ส่งผลให้แรงดึงดูระหว่างโมเลกุลสูงกว่า ทำให้มีความต้านทานต่อการไหลได้มาก จึงส่งผลให้ความเหนียวสูง

6.5.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR/CSM ที่แปรปริมาณอัตราส่วนต่างๆ

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรปริมาณอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP เท่ากับ 0/60/40, 15/45/40, 30/30/40, 45/15/40 และ 60/0/40 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.64



รูปที่ 6.64 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.64 พบว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วน 30/30/40 มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด จึงมีพื้นที่ผิวที่ทำให้เกิดแรงระหว่างเฟส ยางกับพลาสติกเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดีที่สุดที่ได้จากสมบัติเชิงกล

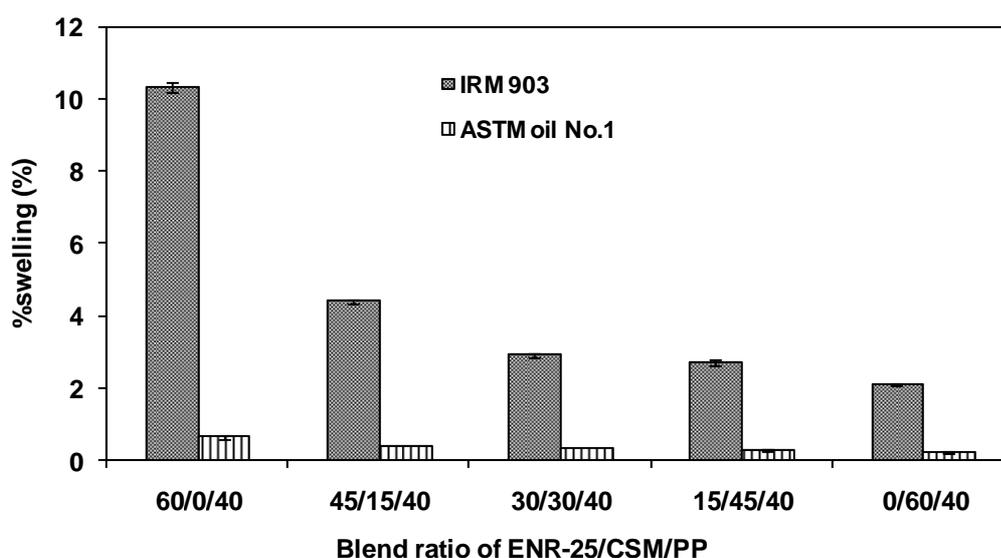
6.5.5 สมบัติด้านการทนต่อตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ

การทดสอบสมบัติการทนต่อตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 6.17

ตารางที่ 6.17 ค่าการบวมพองในตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดการเบลนด์ต่างๆ

ENR-25/CSM/PP	Swelling (%)	
	ASTM oil No.	IRM 903
	1	
60/0/40	0.62±0.03	10.32±0.15
45/15/40	0.35±0.02	4.39±0.05
30/30/40	0.30±0.02	2.89±0.06
45/15/40	0.26±0.02	2.69±0.66
0/60/40	1.95±0.07	2.08±0.04

จากตารางที่ 6.17 สามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบการบวมของพองเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดการเบลนด์ NR/CSM/PP, ENR-25/CSM/PP และ ENR-50/CSM/PP ได้ดังรูปที่ 6.65

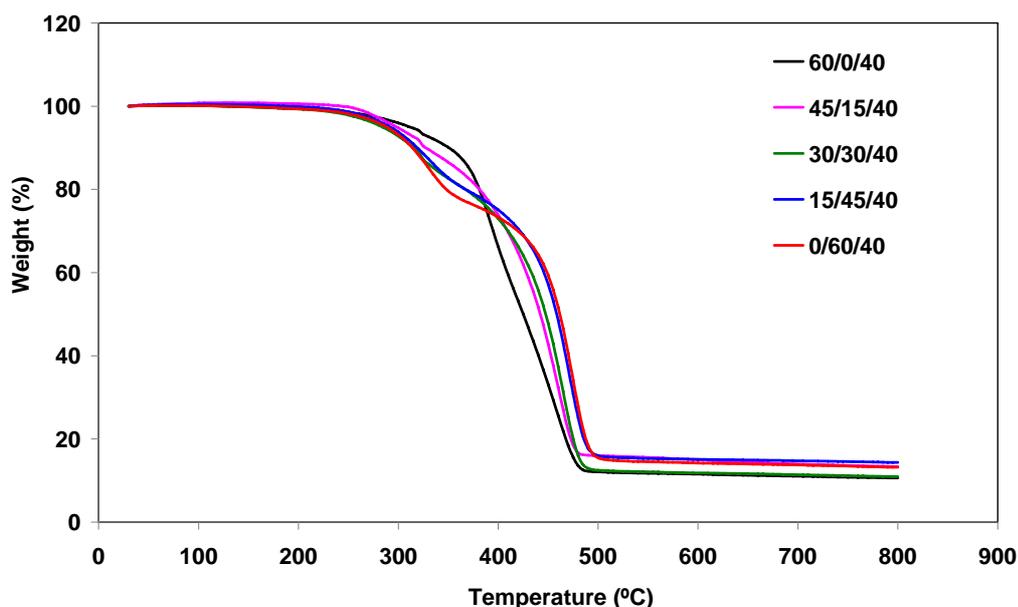


รูปที่ 6.65 การบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ

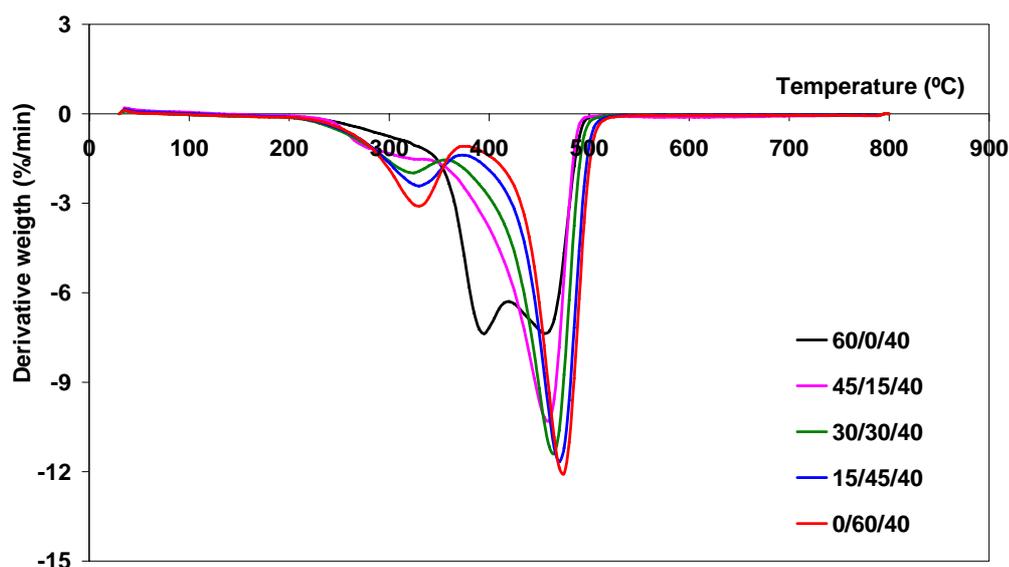
จากรูปที่ 6.65 พบว่าการบวมพองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน เนื่องจากคลอรีนในโมเลกุลยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงกว่าอะตอมออกซิเจนในโครงสร้างยางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงมีความเป็นขั้วสูงกว่า ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทนน้ำมันเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความทนทานต่อน้ำมัน ASTM oil No.1 ได้มากกว่าน้ำมัน IRM 903 เช่นเดียวกับกรณียางเบลนด์ ENR-25/CSM

6.5.6 สมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางในเทอร์โมพลาสติกที่ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/30, 15/45/40 และ 0/60/40 ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA ตามหัวข้อ 3.3.5.12 และ DMTA ตามหัวข้อ 3.3.5.13 โดยทดสอบภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน ได้ผลดังรูปที่ 6.66 – 6.67



รูปที่ 6.66 เทอร์โมแกรม TGA ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ



รูปที่ 6.67 เทอร์โมแกรม DTG ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

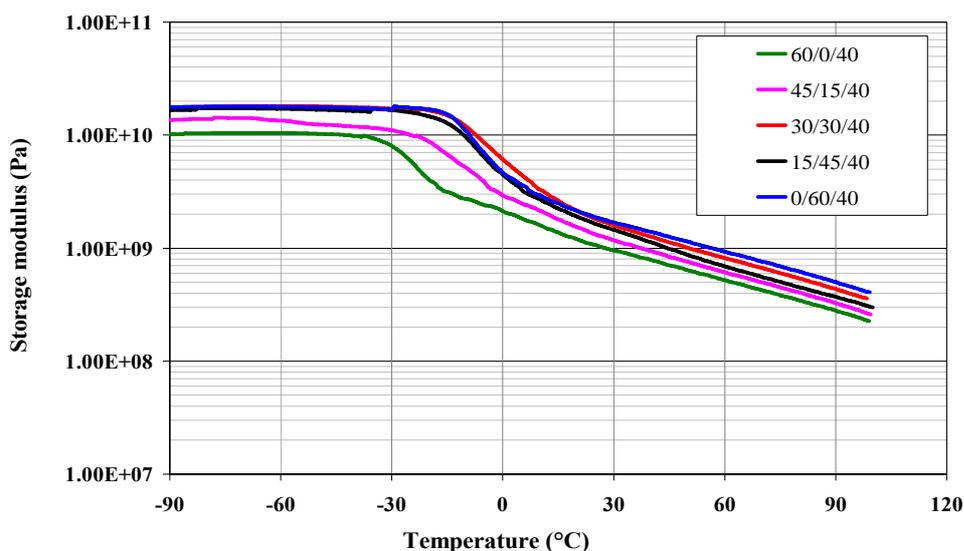
ตารางที่ 6.18 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

ENR-25/CSM/PP ratio	Decomposition temperature(T_d) (°C)	
	1st step	2nd step
60/0/40	390	450
45/15/40	310	460
30/30/40	315	465
15/45/40	325	470
0/60/40	325	475

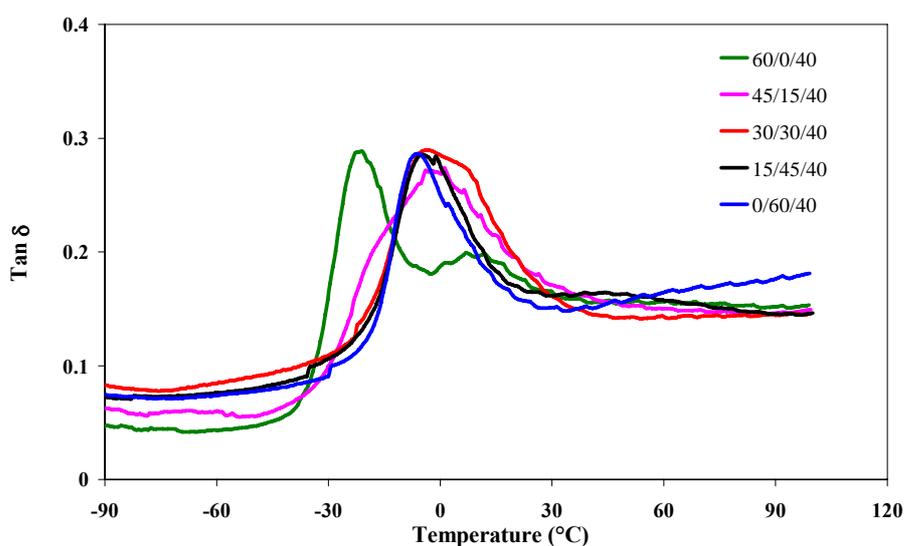
จากรูปที่ 6.67 และตารางที่ 6.18 พบว่า การสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีการสลายตัว 2 ขั้นคือ ที่อัตราส่วน 60/0/40 ขั้นแรกเป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ส่วนขั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของพอลิพรไพลีน ส่วนเทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ที่ใช้ยางคลอโรซิลโฟเนตพอลิเอทิลีน และเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซิลโฟเนตพอลิเอทิลีน มีการสลายตัว 2 ขั้น ขั้นแรกเป็นการสลายตัวของส่วนประกอบในยางคลอโรซิลโฟเนตพอลิเอทิลีน และขั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลหลักของยางเบลนด์และพอลิพรไพลีน ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางเบลนด์มีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ แสดงว่าเมื่อเบลนด์ยางทั้งสองทำให้เกิดวัลคาไนซ์ด้วยตัวเอง ส่งผลให้การสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น แลเมื่อใช้ปริมาณของยางคลอโรซิลโฟเนตพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจะทำให้

อุณหภูมิการสลายตัวได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่หลักของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเป็นพันธะอิมตัว จึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ส่วนยางธรรมชาติอีพอกไซด์ยังมีส่วนที่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลทำให้ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนน้อยกว่า

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง DMTA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.68 – 6.69



รูปที่ 6.68 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสสะสมกับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์



รูปที่ 6.69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

จากรูปที่ 6.68 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ซึ่งสอดคล้องกับมอดูลัสสะสมจากการทดสอบเชิงพลวัตด้วยเครื่อง MDPT และสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันคือ ยาง CSM มีแรงดึงดูดระหว่างขั้วสูงทำให้ยางมีพลังงานสะสมสูงแต่ก็มี

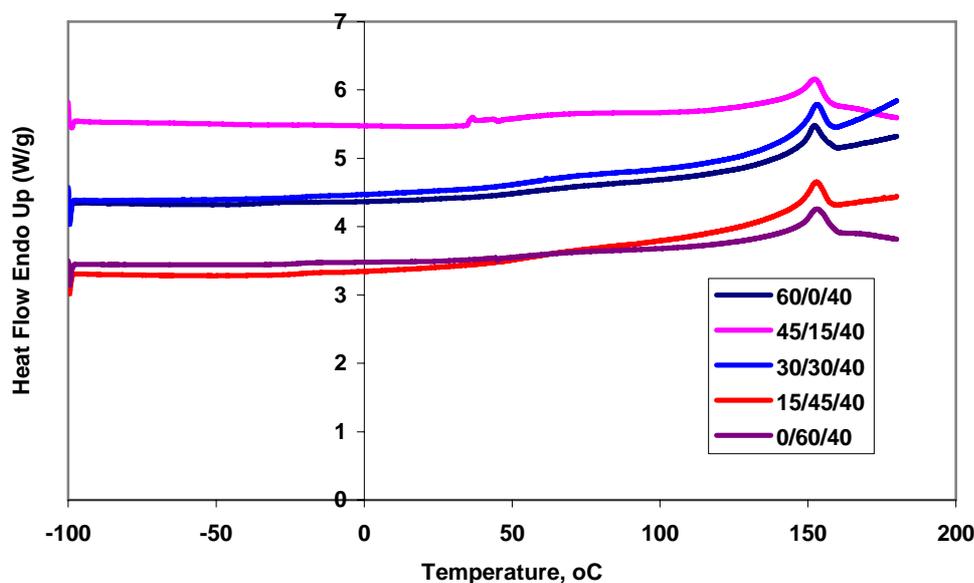
พลังงานสูญเสียสูงเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิสูงตั้งรูปที่ 6.69 พบว่า ค่า T_g ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางเบลนด์ ENR-25/CSM แสดงดังตารางที่ 6.19 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่า T_g เพียงค่าเดียว และมีการเลื่อนไปในทิศทางที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ T_g ของ ENR-25(-47) (Gelling and Portor, 1988) CSM (-8.5) (Tanrattanakul and Petchkaew, 2005) แสดงว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสยางธรรมชาติพอกไซต์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนทำให้เกิดความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ส่งผลให้สมบัติดีขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิสูงจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการทดสอบเชิงพลวัตด้วยเครื่อง MDPT

ตารางที่ 6.19 ค่า T_g ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

ENR-25/CSM/PP ratio	$T_g, ^\circ\text{C}$
60/0/40	-20
45/15/40	1
30/30/40	-3
15/45/40	-4
0/60/40	-5

6.5.7 สมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP

วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน ด้วยเทคนิค DSC โดยใช้ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ระหว่าง ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก 60/40 % โดยน้ำหนัก โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/CSM ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบตั้งแต่ -100°C ถึง 180°C อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่ากับ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จากทดลองได้เทอร์โมแกรมแสดงดังในรูปที่ 6.70



รูปที่ 6.70 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/CSM

จากรูปที่ 6.70 เป็นเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC สามารถระบุค่าอุณหภูมิหลอมผลึกของพอลิโพรไพลีนและปริมาณผลึกได้ผลแสดงดังในตารางที่ 6.20

ตารางที่ 6.20 อุณหภูมิการหลอมของผลึกและปริมาณผลึกของของผสม PP ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/CSM

ENR-25/CSM/PP ratio, by weight	T _m (°C)	Crystallinity (%)
60/0/40	152.20	9.57
45/15/40	152.20	16.08
30/30/40	152.87	9.49
15/45/40	152.7	9.12
0/60/40	152.87	12.39

จากรูปที่ 6.70 อุณหภูมิหลอมผลึกของพอลิโพรไพลีนในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่อัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ มีค่าไม่ต่างกัน เนื่องจากทุกอัตราส่วนการเบลนด์มีปริมาณของพอลิโพรไพลีนเท่ากัน จึงไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมผลึกของพอลิโพรไพลีน ส่วนปริมาณผลึก พบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้อย่างคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์เดี่ยวๆในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP จะเห็นว่าการใช้อย่างคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทำให้ผสมพอลิโพรไพลีนมีปริมาณผลึกมากกว่ากรณีที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ เนื่องจากยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมีโครงสร้างเป็นเอทิลีนอยู่ด้วยซึ่งสามารถเกิดผลึกได้บางส่วนเช่นเดียวกับพอลิโพรไพลีน และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการเบลนด์อื่นๆ พบว่าที่อัตราส่วน

การเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่ 45/15/40 % โดยน้ำหนัก มีปริมาณผลึกสูงกว่าที่อัตราส่วน 30/30/40 และ 15/45/40 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

6.6 ศึกษาอิทธิพลของชนิดยางเบลนด์ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ 3 ชนิด คือ NR/CSM, ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง สมบัติพลวัตเชิงกล ความต้านทานต่อน้ำมัน และสมบัติเชิงความร้อน ดังนี้

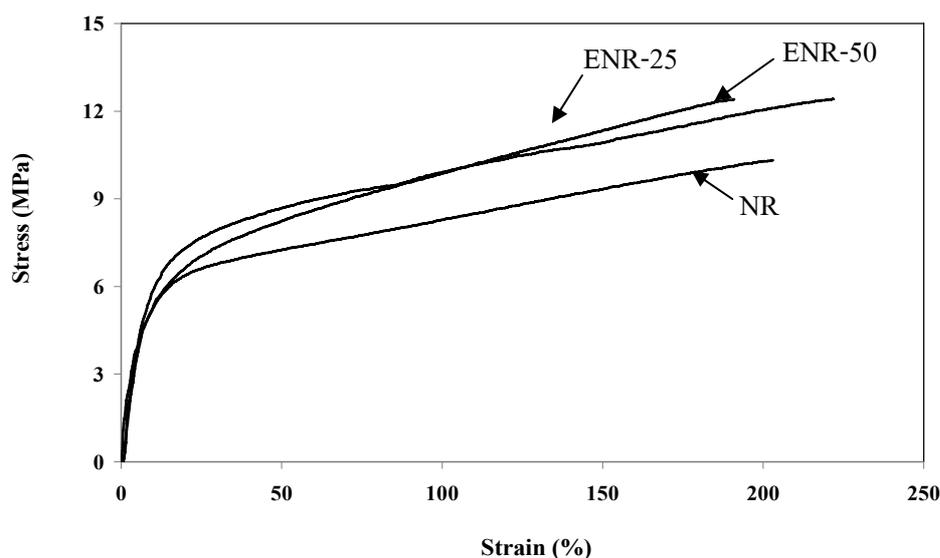
6.7.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ ได้แก่ NR/CSM, ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM ได้ผลดังตารางที่ 6.21

ตารางที่ 6.21 อิทธิพลของชนิดยางเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

Samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
NR/CSM/PP	10.3 ± 0.1	203.0 ± 2.7	86.5 ± 0.8	34.0	1648
ENR-25/CSM/PP	12.4 ± 0.1	191.0 ± 3.0	86.5 ± 0.3	30.0	1797
ENR-50/CSM/PP	12.7 ± 0.1	222.0 ± 16.1	87.0 ± 0.5	30.0	2177

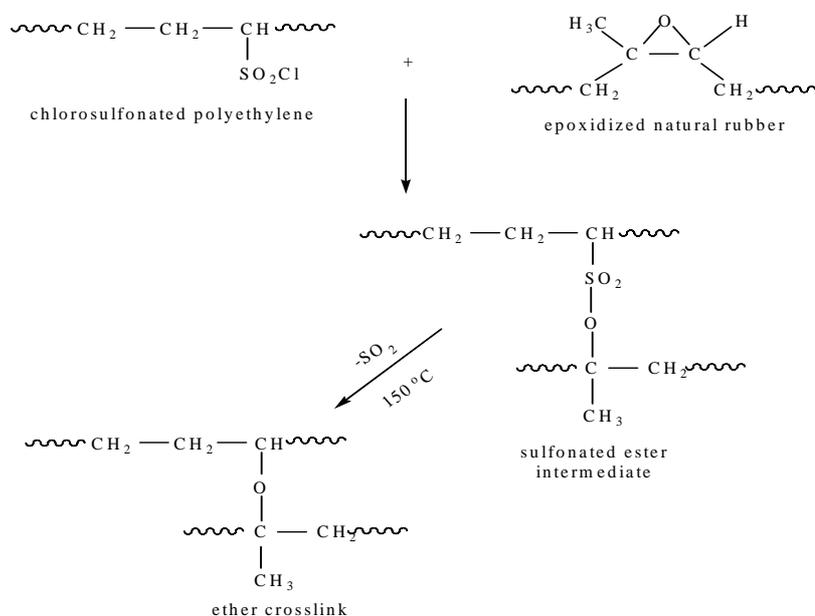
ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 6.71



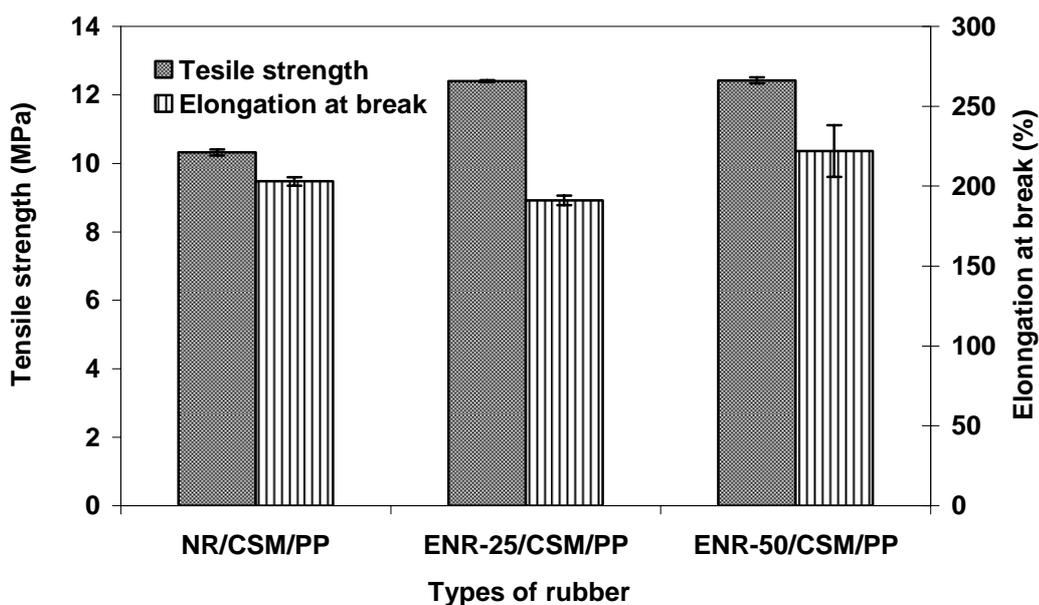
รูปที่ 6.71 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.71 พบว่า ความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของหมู่ฮิพอกไซด์ เนื่องจากความเป็นขั้วของยาง ENR ที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถเบลนด์เข้ากับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิ

เอทิลีนที่มีซัลเฟอร์ได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ระหว่าง NR/CSM/PP กับ ENR-25/CSM/PP และ ENR-50/CSM/PP พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP และ ENR-50/CSM/PP มีความแข็งแรงสูงกว่า NR/CSM/PP เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยตัวเองดังรูปที่ 6.72

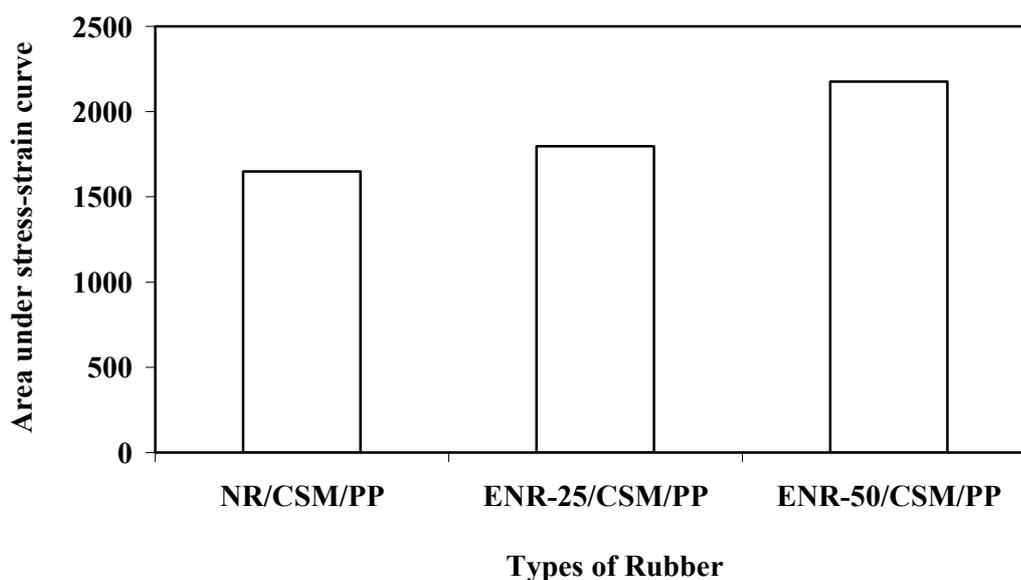


รูปที่ 6.72 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (Roychoudhury *et al*, 1993)



รูปที่ 6.73 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

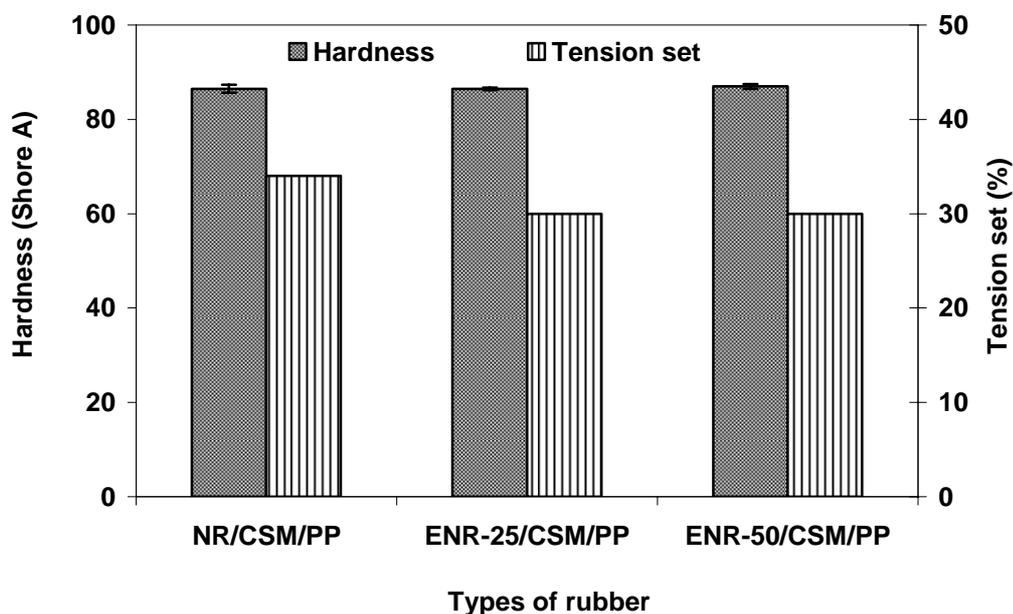
จากรูปที่ 6.73 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP และ ENR-50/CSM/PP มีค่าสูงกว่า NR/CSM/PP เนื่องจากยางเบลนด์สามารถเข้ากันได้ดีกว่าเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนได้ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในรูปที่ 6.72 และสามารถดูได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีขนาดเล็กและกระจายตัวในเฟสของพลาสติกดีกว่าดังรูปที่ 6.81 นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการยึดจนวนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าไม่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 6.74 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรยางเบลนด์ชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 6.74 พบว่า พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ กรณีที่ใช้ยาง ENR-50 มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ ENR-25 และ NR ตามลำดับ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรชนิดยางเบลนด์ NR/CSM, ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ได้ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง และค่าความแข็ง ดังรูปที่ 6.75



รูปที่ 6.75 ค่าความแข็งและการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.75 ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR/CSM/PP ดีกว่า NR/CSM/PP เนื่องจากความเข้ากันได้ของยางเบลนด์จึงส่งผลให้สมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ดีกว่า ดูได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกในหัวข้อ 4.4.7.4 จะเห็นได้ว่าเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติ นอกจากนี้ ยังพบว่า ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าไม่แตกต่างกันทั้งในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ NR/CSM/PP, ENR-25/CSM/PP และ ENR-50/CSM/PP ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะความแข็งจะมาจากเฟส แข็งคือพอลิโพรพิลีน เมื่อเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีปริมาณของพอลิโพรพิลีนเท่ากันทำให้มีความแข็งไม่แตกต่างกัน

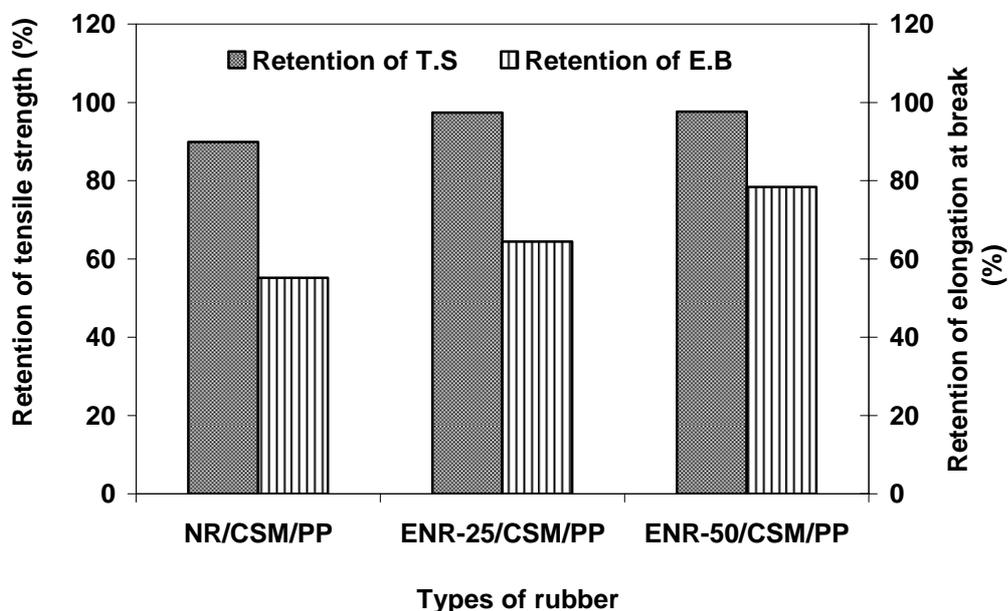
6.7.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.22

ตารางที่ 6.22 อิทธิพลของชนิดยางต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

Sample	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
NR/CSM/PP	89.8	55.2
ENR-25/CSM/PP	97.3	64.4
ENR-50/CSM/PP	97.6	78.4

จากตารางที่ 6.22 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังการบ่มเร่งมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 6.76

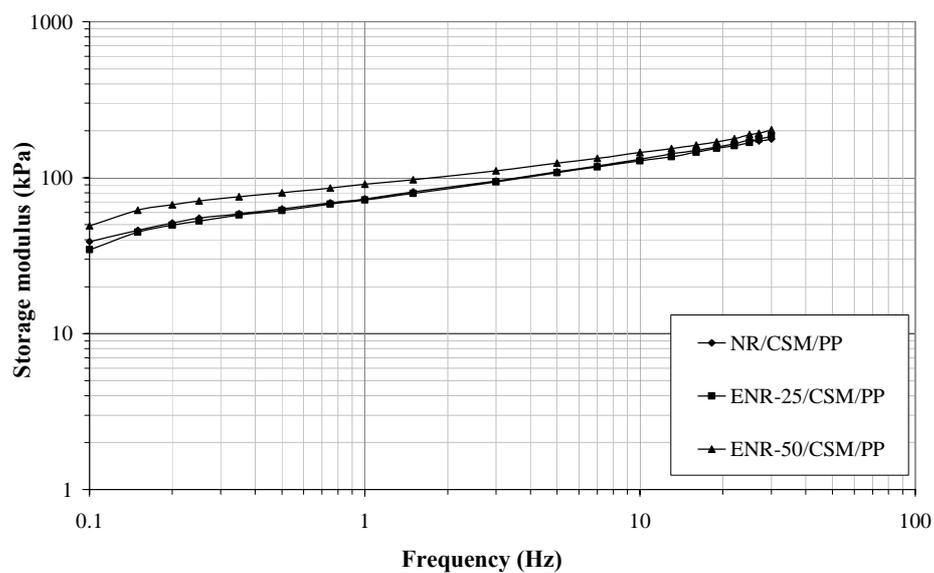


รูปที่ 6.76 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของยางเบลนด์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

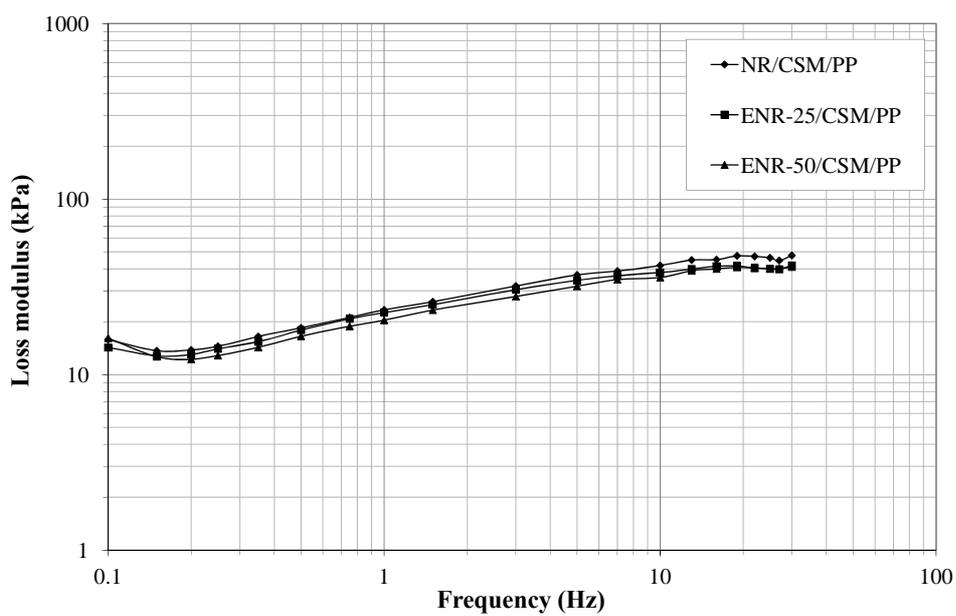
จากรูปที่ 6.76 พบว่า ยาง ENR-25 และ ENR-50 มีสมบัติที่คงอยู่หลังการบ่มเร่งดีกว่ายางธรรมชาติ อาจเป็นผลมาจากในยางเบลนด์ NR/CSM มีอันตรกิริยาระหว่างเฟสต่ำ เมื่อนำไปอยู่ในสภาวะที่เร่งการเสื่อมสภาพ ทำให้ยางเบลนด์เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว โดยจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดของยางเบลนด์มีแนวโน้มที่จะลดลงมาก และอาจเนื่องมาจากในโครงสร้างยางธรรมชาติที่มีพันธะคู่อยู่มากกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพได้ในที่สุด

6.7.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

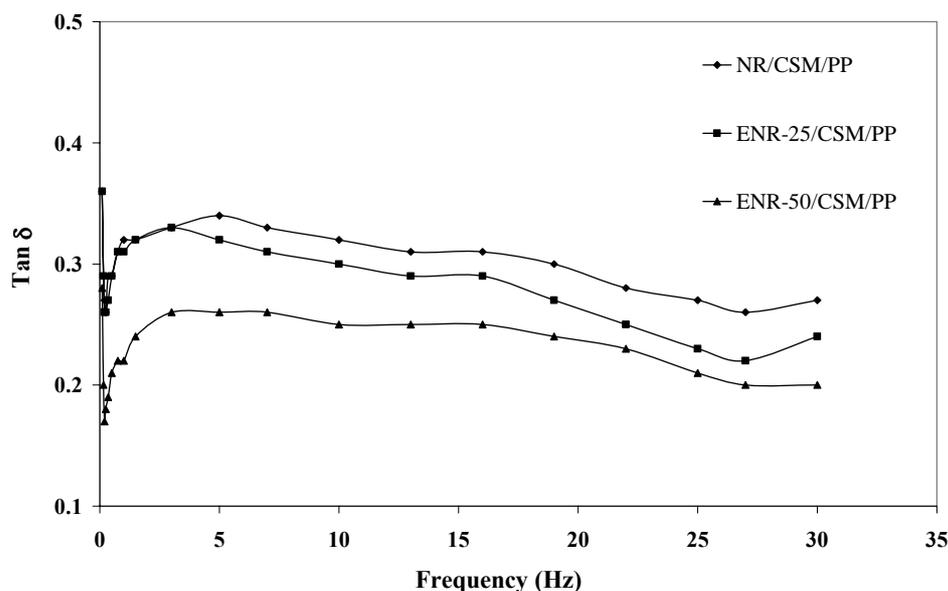
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ชนิดยางเบลนด์ต่างๆ โดยนำน้ำหนักของพอลิโพรไพลีนได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.77 – 6.80



รูปที่ 6.77 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้ชนิดการเบลนด์ต่างๆ

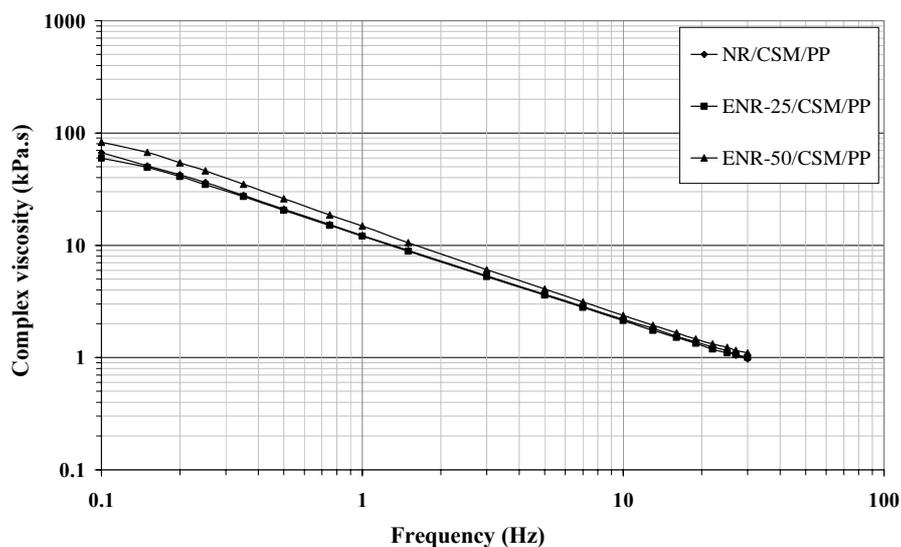


รูปที่ 6.78 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ



รูปที่ 6.79 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้ชนิดการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.77 – 6.79 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มตามการเพิ่มความถี่ในการทดสอบ และเมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่ามอดูลัสสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ด้วยตัวเอง ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงมากจึงแสดงพฤติกรรมการตอบสนองต่อความยืดหยุ่นสูง ดูได้จาก Tan δ ที่มีค่าต่ำ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ ENR-50 เบลนด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน สามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยตัวเองได้มากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ ENR-25 ส่วนยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนไม่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ด้วยตัวเอง โมเลกุลจึงมีการเกี่ยวพันกันน้อย ซึ่งแสดงพฤติกรรมการตอบสนองต่อความยืดหยุ่นต่ำ ดูได้จากค่า Tan δ ที่มีค่าสูง

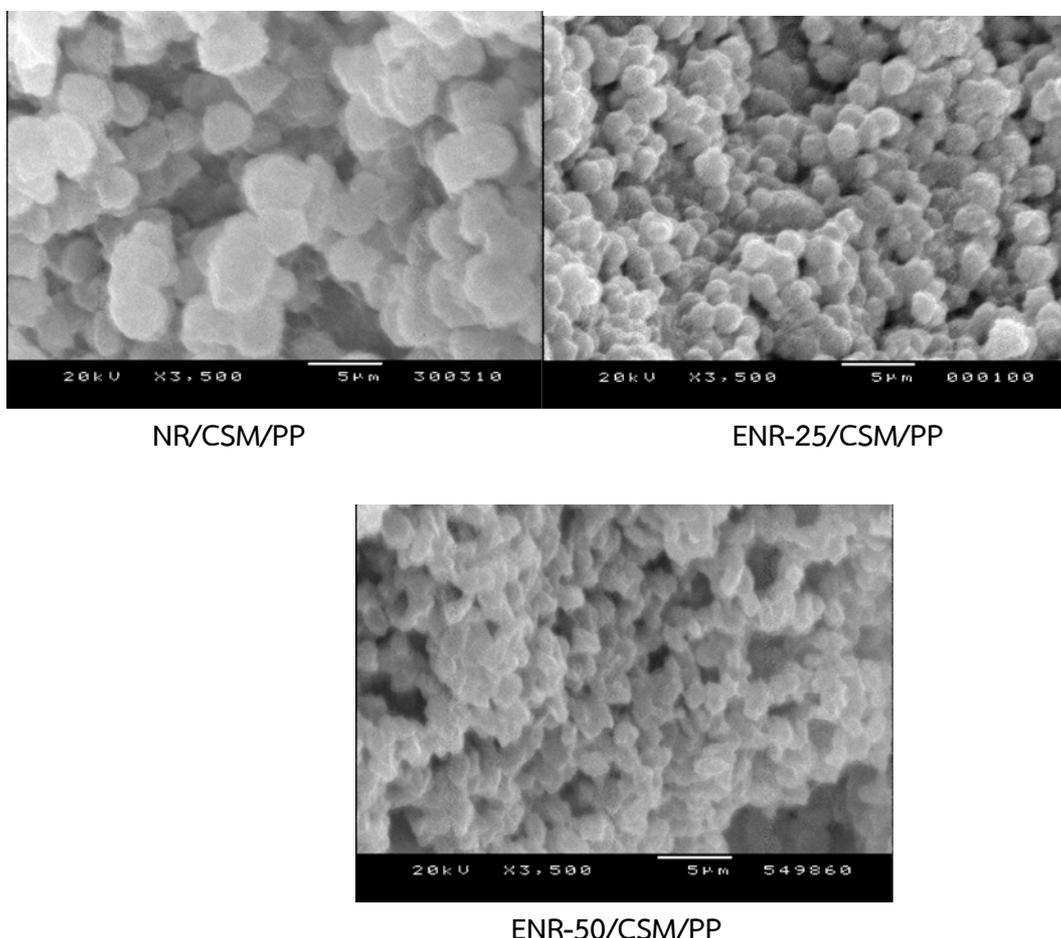


รูปที่ 6.80 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่ใช้ชนิดการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.80 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความถี่ในการทดสอบซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลแบบลดแรงเฉือน สอดคล้องกับมอดูลัสสะสมและ $\tan \delta$ คือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีสมบัติเชิงพลวัตดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟพีนทพอลิเอทิลีนสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ด้วยตัวเอง และอาจเนื่องจากความเป็นขี้ของยางทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูง ส่งผลให้สามารถต้านการไหลได้มากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติ

6.7.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่แปรปริมาณชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่แปรชนิดการเบลนด์ คือ NR/CSM/PP, ENR-25/CSM/PP และ ENR-50/CSM/PP ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.81



รูปที่ 6.81 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.81 พบว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ชนิดการเบลนด์ต่างๆ มีขนาดเล็กลงตามการเพิ่มปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ เนื่องจากหมู่อีพอกไซด์ทำให้เพิ่มอัตราปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่เมทิลอนในการเพิ่มความเข้าได้ PhHRJ-PP ส่งผลให้อนุภาคมีขนาดเล็กซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ดี และสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Nakason *et al.*, 2006d)

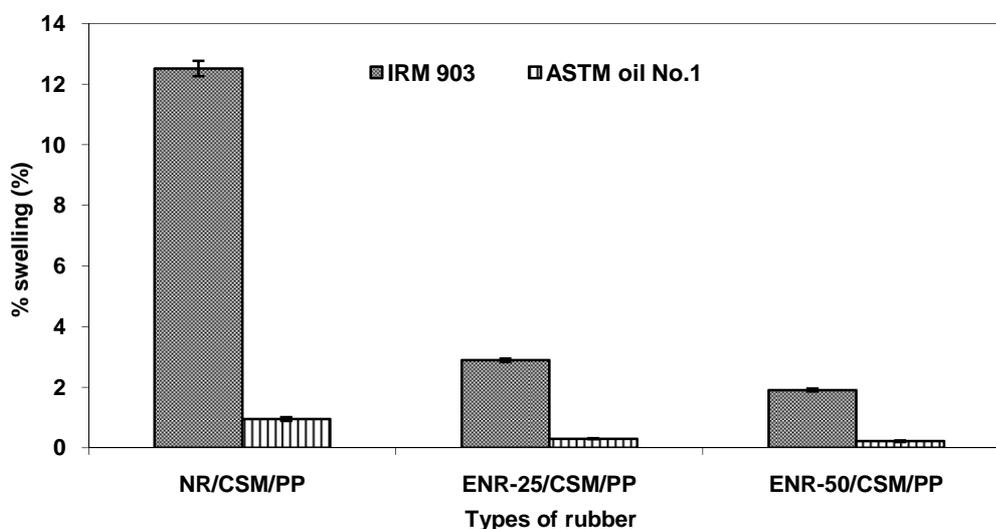
6.7.5 สมบัติด้านการทนต่อตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

จากการทดสอบสมบัติการทนต่อตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดการเบลนด์ NR/CSM/PP, ENR-25/CSM/PP และ ENR-50/CSM/PP ได้ผลแสดงดังตารางที่ 6.23

ตารางที่ 6.23 ค่าการบวมพองในตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดการเบลนด์ต่างๆ

Sample	Swelling (%)	
	ASTM oil No.	IRM 903
	1	
NR/CSM/PP	1.87±0.07	12.52±0.25
ENR-25/CSM/PP	0.30±0.02	2.89±0.06
ENR-50/CSM/PP	0.22±0.03	1.91±0.04

จากตารางที่ 6.23 สามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบการบวมของพองเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดการเบลนด์ NR/CSM/PP, ENR-25/CSM/PP และ ENR-50/CSM/PP ได้ดังรูปที่ 6.82



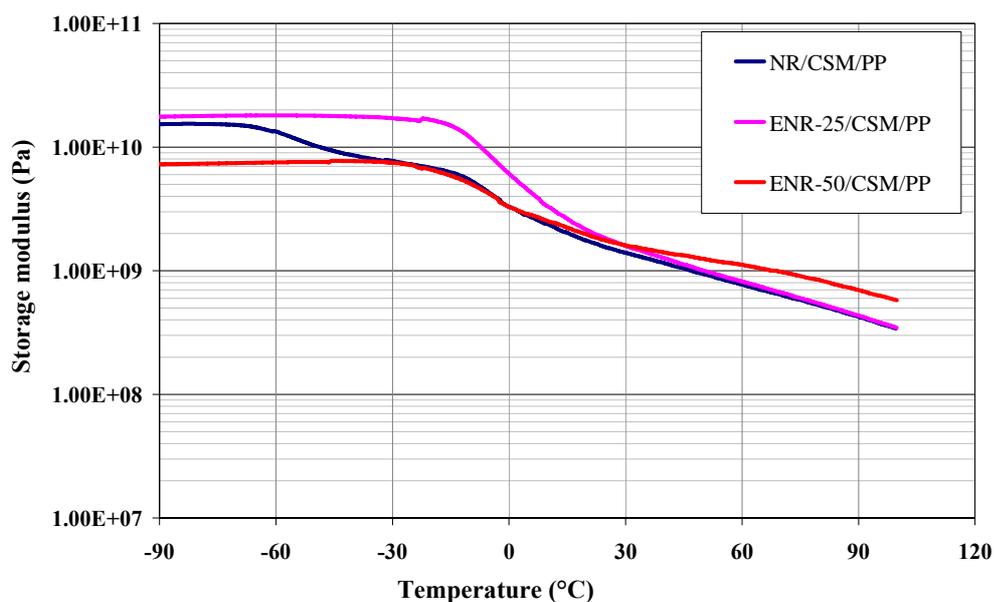
รูปที่ 6.82 การบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR/CSM/PP ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 6.82 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR/CSM/PP ทนน้ำมันได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ NR/CSM/PP ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางธรรมชาติตรงพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์ ดังนั้นยางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงมีความเป็นขั้ว จึงทนต่อน้ำมันที่ไม่มีขั้วได้ดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP กับ ENR-50/CSM/PP พบว่ายางที่มีระดับอีพอกไซด์สูงกว่าทำให้ยางมีขั้วมากกว่าจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-50/CSM/PP ทนน้ำมันได้ดีกว่ายางเบลนด์ ENR-25/CSM/PP เมื่อเปรียบเทียบที่เทอร์โม

พลาสติกวัลคาไนซ์ชนิดเดียวกัน พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความทนทานต่อน้ำมัน ASTM oil No.1 ได้มากกว่าน้ำมัน IRM 903

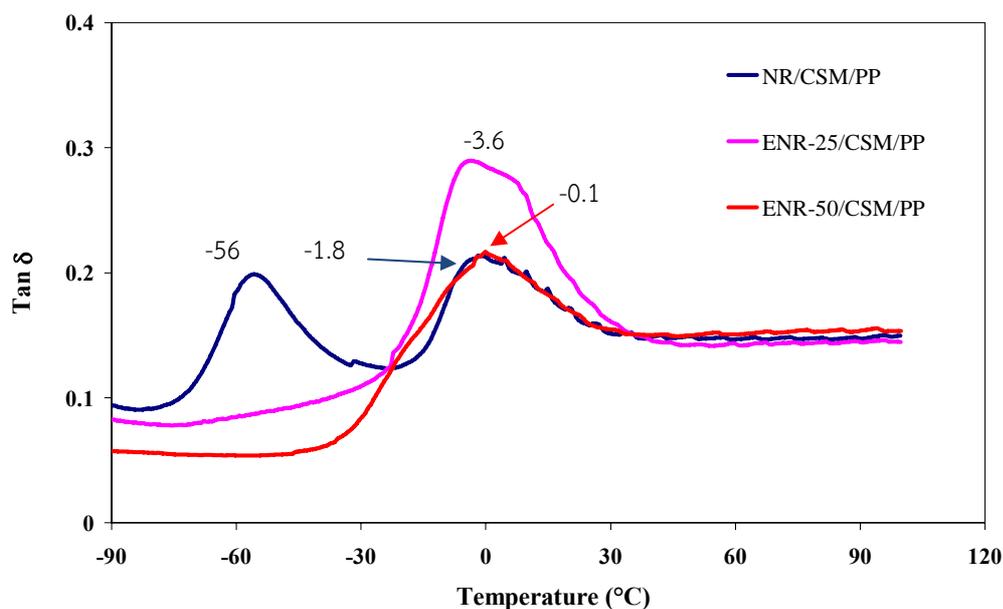
6.7.6 สมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ NR/CSM/PP, ENR-25/CSM/PP และ ENR-50/CSM/PP ตามหัวข้อที่ 3.3.5.13 ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่องDMTA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.83



รูปที่ 6.83 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสสะสมกับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP

จากรูปที่ 6.83 พบว่ามอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP และ ENR-50/CSM/PP มีการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วง ส่วนเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ NR/CSM/PP มีการเปลี่ยนแปลง 3 ช่วง อาจเกิดจากความไม่เข้ากันของยางเบลนด์ NR/CSM ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ซึ่งสามารถดูได้จากค่า Tan δ รูปที่ 6.84



รูปที่ 6.84 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP

จากรูปที่ 6.84 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ NR/CSM/PP ปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน 2 ค่า คือ ที่ตำแหน่งของอุณหภูมิกลาสทรานสิชันใกล้เคียงกับยาง NR (-72°C) และยาง CSM (-8.5°C) (Tanrattanakul and Petchkaew, 2005) แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกประกอบด้วยเฟสของยาง NR และยาง CSM และเกิดการแยกเฟสระหว่างเฟสทั้งสอง (phase separated) บ่งบอกถึงความไม่เข้ากันของยาง NR และยาง CSM ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ส่วนเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ยางเบลนด์ ENR/CSM ปรากฏค่า T_g เพียงค่าเดียว และเมื่อเทียบกับค่า T_g ของ ENR-25 (-47°C) (Gelling and Porter, 1988) และ CSM (-8.5°C) (Tanrattanakul and Petchkaew, 2005) ค่า T_g ของยางเบลนด์เกิดการเลื่อนไปในทางที่อุณหภูมิสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเบลนด์ ENR-25/CSM ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เกิดความเข้ากันและเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางเบลนด์ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดีกว่าการใช้เฟสยางเป็นการเบลนด์ระหว่าง NR/CSM และเมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ พบว่า กรณีที่ใช้ยาง ENR-50 (-22°C) (Gelling and Porter, 1988) มีค่า T_g ที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ ENR-25 เนื่องจาก ENR-50 มีปริมาณวงอีพอกไซด์มากกว่า ENR-25 จึงเกิดการขยับตัวได้ยากเพราะเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nakason *et al.* (2004)