

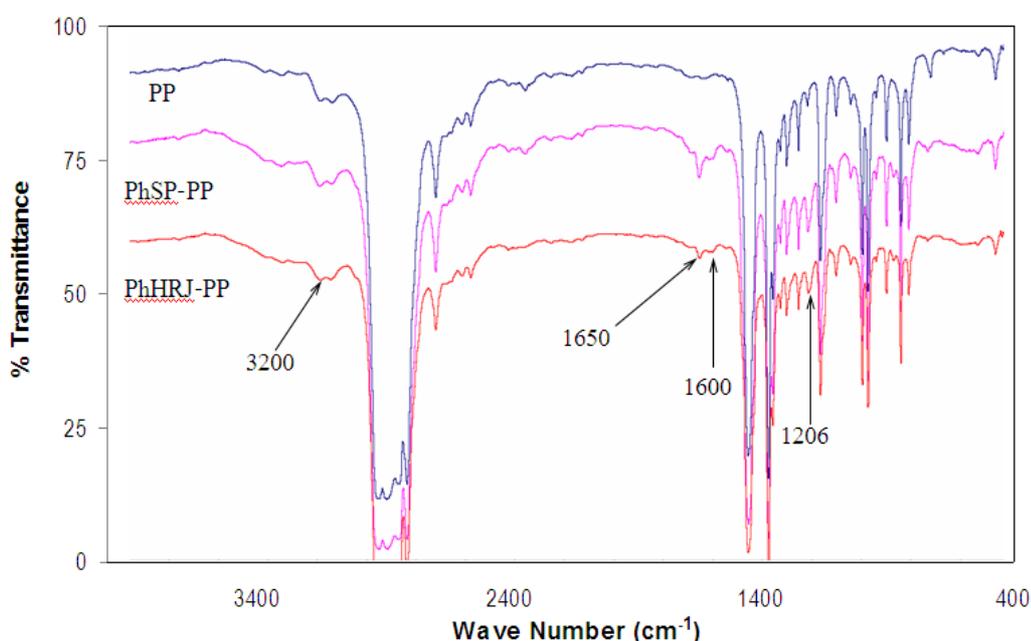
บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ : เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP

5.1 การดัดแปลงโมเลกุลของพอลิโพรไพลีนเพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

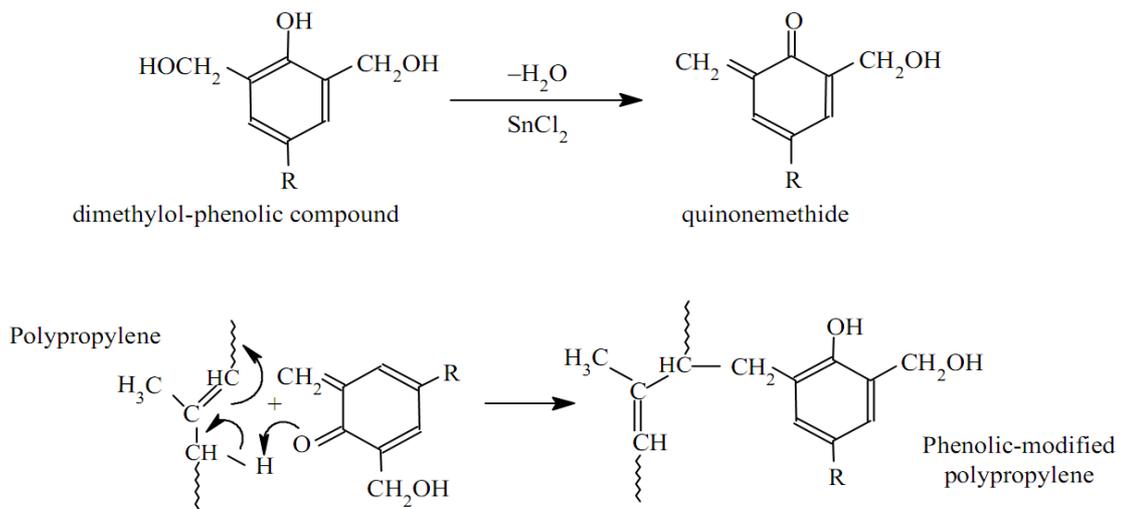
5.1.1 การดัดแปลงโมเลกุลของพอลิโพรไพลีนด้วยไดเมทิลอลฟีนอลิกเรซิน (Dimethylol phenolic modified polypropylene, PhHRJ-PP และ PhSP-PP)

ดัดแปลงโมเลกุลของพอลิโพรไพลีนด้วยไดเมทิลอลฟีนอลิกเรซินตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.2.2 จากนั้นนำพอลิโพรไพลีนที่ดัดแปลงโครงสร้างไปอัดเป็นแผ่นฟิล์ม แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 สเปกตรัมอินฟราเรดของพอลิโพรไพลีนที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดเมทิลอลฟีนอลิกเรซิน (PhHRJ-PP และ PhSP-PP)

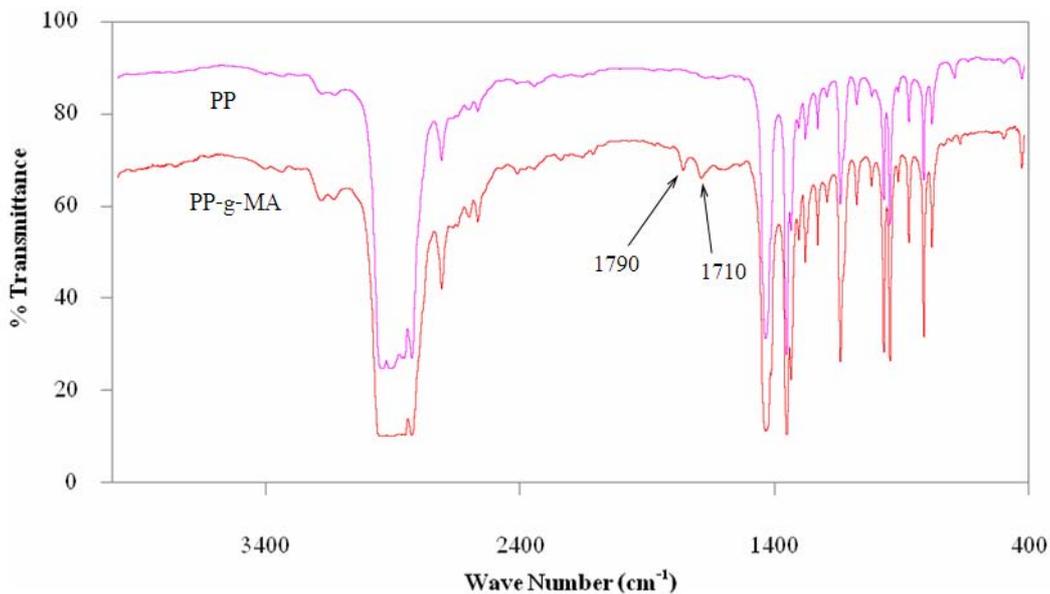
จากรูปที่ 5.1 พบพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3200 cm⁻¹ ซึ่งแสดงการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) แสดงถึงการมีหมู่ฟีนอลในพีนอลิกเรซินที่กราฟต์บนพอลิโพรไพลีน นอกจากนี้ยังพบพีคที่เลขคลื่น 1650 และ 1600 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพีคการดูดกลืนของการสั่นแบบยืดของพันธะ -C=C- ในวงแหวนอะโรมาติก และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1206 cm⁻¹ เป็นพีคการดูดกลืนของการสั่นแบบยืดของ -C-O- ซึ่งแสดงถึงการมีหมู่ฟีนอลิกเรซินที่กราฟต์บนพอลิโพรไพลีน แสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกกับพอลิโพรไพลีน (Nakason *et al.*, 2006f)

5.1.2 การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิโพรไพลีนกับมาลิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA)

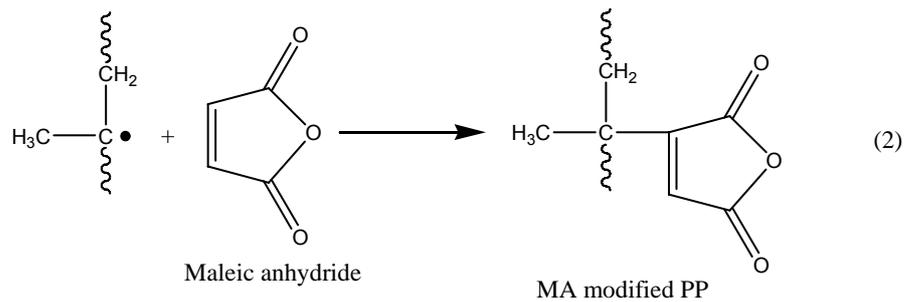
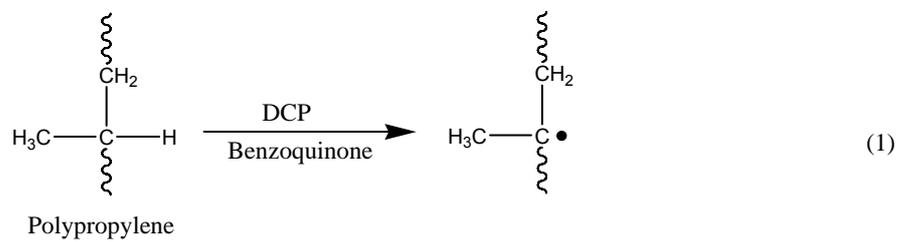
การดัดแปลงโมเลกุลของพอลิโพรไพลีนโดยทำการกราฟต์โคพอลิเมอร์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.2.2 จากนั้นนำกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ไปอัดเป็นแผ่นฟิล์ม แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.3



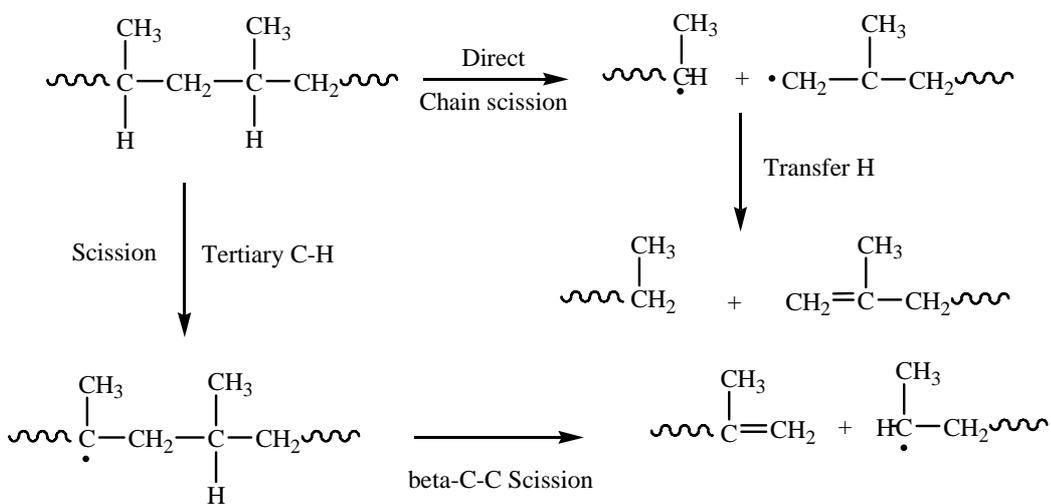
รูปที่ 5.3 สเปกตรัมอินฟราเรดของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิโพรไพลีนกับมาลิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA)

จากรูปที่ 5.3 พบว่า มีพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1790 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการดูดกลืนของคาร์บอนิลในซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (Succinic anhydride) ที่เป็นการสั่นยืดแบบสมมาตร (Symmetric stretching vibration) ซึ่งแสดงถึงการมีหมู่คาร์บอนิลของมาลิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนพอลิโพรไพลีนและที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1710 cm^{-1} เป็นพีคของหมู่คาร์บอนิลในซัคซินิกแอซิด (Succinic acid) ที่กราฟต์บนพอลิโพรไพลีน (George, *et al.*, 1999)

ในปฏิกิริยาการกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์บนพอลิโพรไพลีน เริ่มต้นจะเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ (Free radical reaction) ขึ้นโดยจะมีการดึง (Abstract) อะตอมของไฮโดรเจนออกจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรไพลีน ซึ่งความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณการกราฟต์ขึ้นอยู่กับระดับของการดึงอะตอมของไฮโดรเจน (อาจจะมากขึ้นโดยการเพิ่มปริมาณเปอร์ออกไซด์) ในการใช้เปอร์ออกไซด์จะมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นเสมอ โดยขึ้นอยู่กับอนุมูลอิสระ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกจะเกิดการกราฟต์ของมาลิกแอนไฮไดรด์บนสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรไพลีนดังรูปที่ 5.4 ส่วนในกรณีที่ 2 (ดังรูปที่ 5.5) จะเกิดปรากฏการณ์ β -scission ในสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรไพลีน (เมื่อมีการดึงอะตอมของไฮโดรเจนตรงตำแหน่งคาร์บอนอะตอมที่เชื่อมกับหมู่แทนที่, $-CH_3$) ซึ่งจะเกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลตรงตำแหน่ง β ทำให้โซ่โมเลกุลสั้นลง



รูปที่ 5.4 ปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ของพอลิโพรไพลีนและมาลิกแอนไฮไดรด์ (George, et al., 1999)



รูปที่ 5.5 กลไกการแตกตัวของพอลิโพรไพลีน (Naskar et al., 2004)

5.2 ศึกษาสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP

5.2.1 อิทธิพลของปริมาณไตรเมทิลลอลโพรเพนไตรเมทาคริเลตต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/EVA/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนยาง (ENR-25/EVA) ต่อพลาสติก (PP) เท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน ใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ และกำหนดอัตราส่วนของ ENR-25/EVA = 50/50 % โดยน้ำหนัก ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.3.1 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง และสมบัติพลวัตเชิงกล ได้ผลการทดลองดังนี้

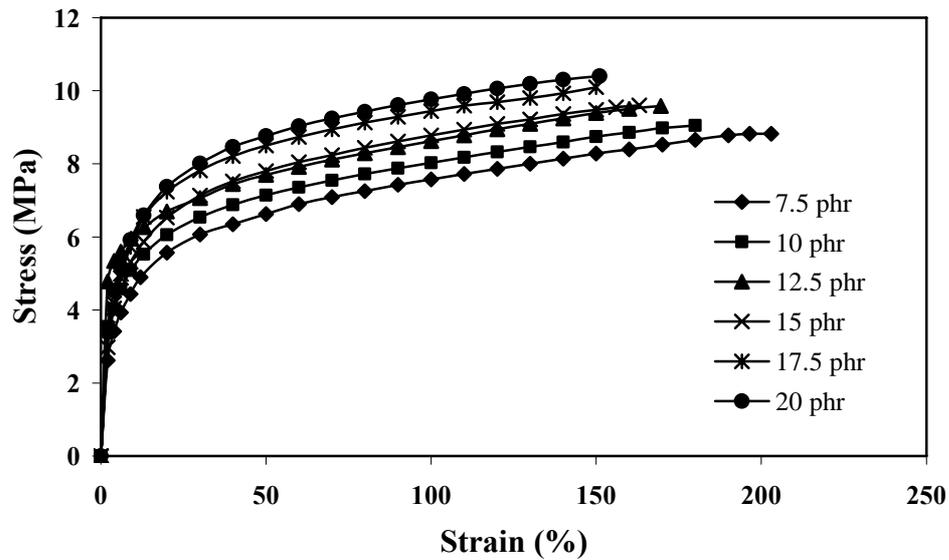
5.2.1.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ดังนี้ คือ 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 และ 20.0 phr ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA

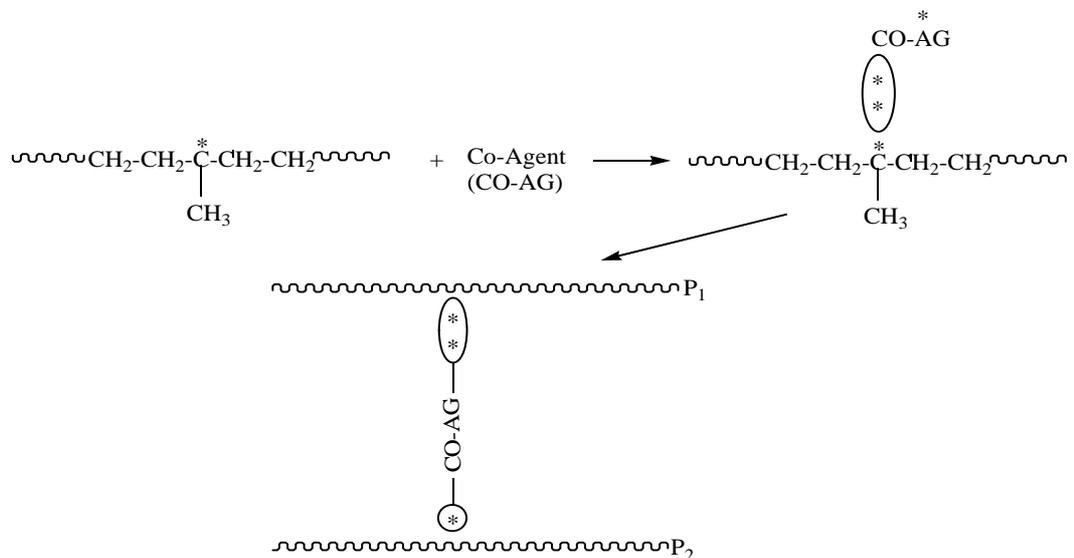
Quantities of TMPTMA (phr)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
7.5	8.84±0.13	203±2.08	82.5±2.09	34.0±1.00	1480.59
10.0	9.04±0.03	180±2.89	82.5±2.95	33.0±0.76	1367.51
12.5	9.59±0.31	169±0.58	84.0±0.84	34.0±1.73	1379.70
15.0	9.60±0.27	163±6.08	85.0±1.79	33.5±0.58	1320.46
17.5	10.02±0.37	151±1.53	87.0±1.58	32.5±1.04	1284.61
20.0	10.31±0.48	150±7.00	87.0±2.70	33.5±1.26	1342.45

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแสดงดังรูปที่ 5.6

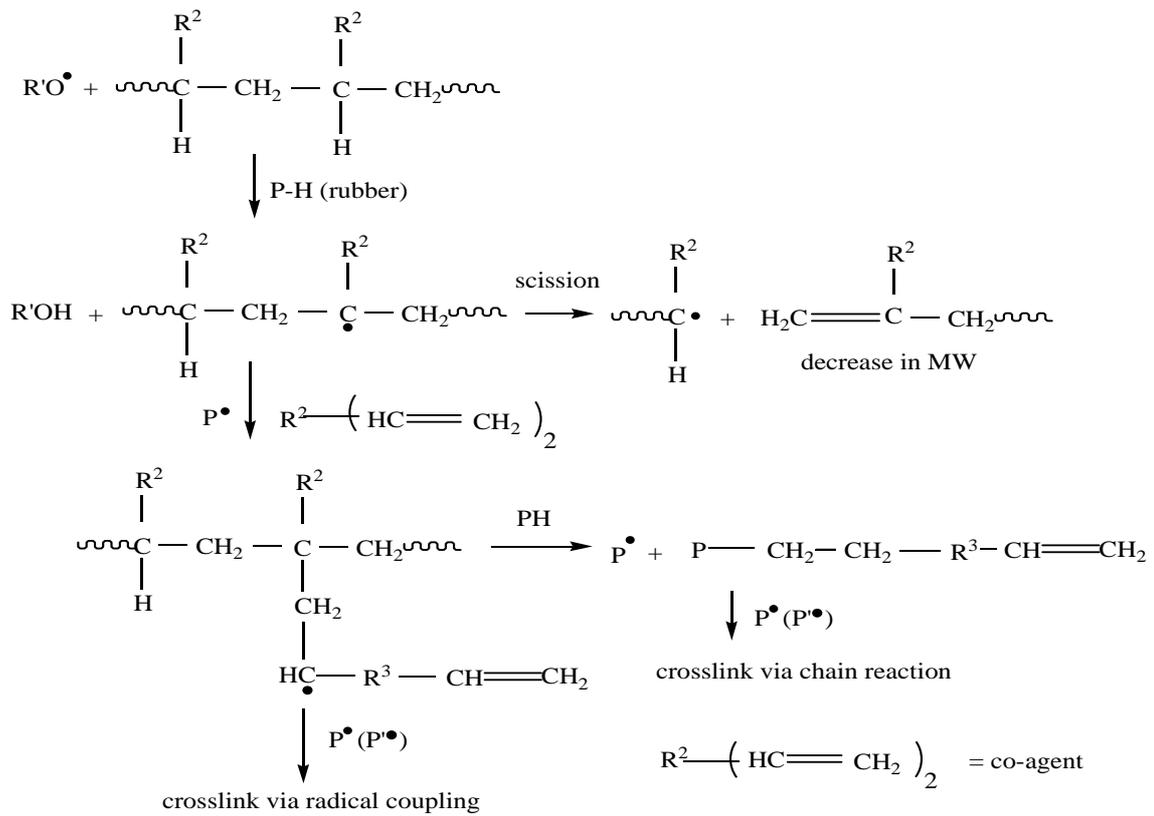


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

จากรูปที่ 5.6 พบว่า การเพิ่มปริมาณของ TMPTMA ช่วยเสริมประสิทธิภาพการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยการใส่ TMPTMA จะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการขาดของโมเลกุลพอลิเมอร์ (chain scission) การเกิดปฏิกิริยาการย้ายสายโซ่ (chain transfer) (Dluzneski, 2001) ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติดีขึ้นโดยค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากความชันของกราฟโดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ TMPTMA ซึ่ง TMPTMA จะทำหน้าที่รับอนุมูลอิสระทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงในยางดังรูปที่ 5.7 ซึ่งให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกับผลการทดลองในยางเบลนด์ ENR-25/EVA และสอดคล้องกับการอธิบายกลไกการใช้โคเอเจนต์ร่วมกับเปอร์ออกไซด์ในยางบิวทาไดอีนโดย Akiba and Hashim (1997) แสดงดังรูปที่ 5.8 จากรูปเมื่อ PH คือ ยาง $P\cdot$ และ $P\cdot$ คือ อนุมูลอิสระที่เกิดบนโซ่พอลิเมอร์ และ $R^2(CH=CH)_2$ คือ โคเอเจนต์ เมื่อใช้โคเอเจนต์จะลดการเกิด chain scission และทำให้เกิดการเชื่อมโยงกับสายโซ่พอลิเมอร์ได้มากขึ้น

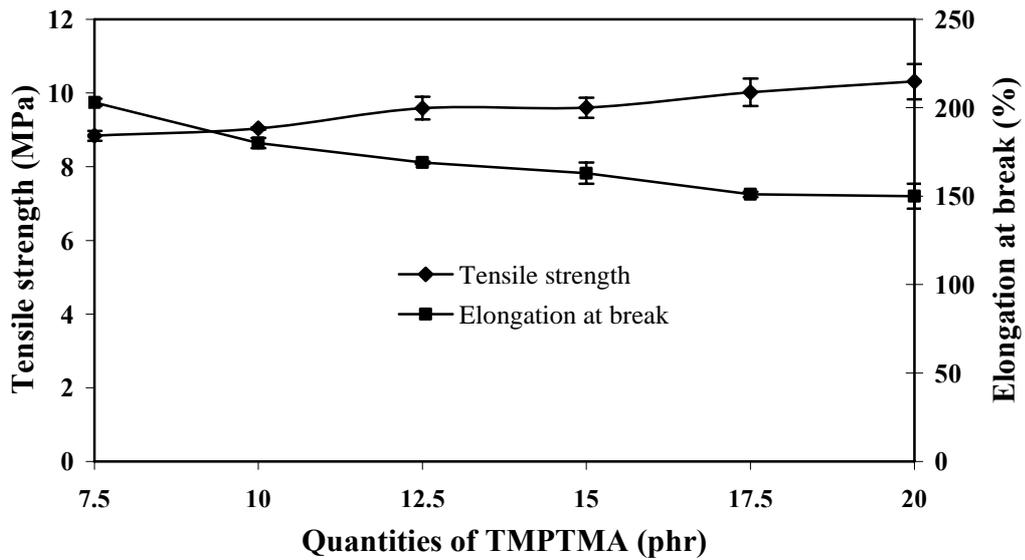


รูปที่ 5.7 การทำหน้าที่รับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกับเปอร์ออกไซด์ (Weng et al., 2000)

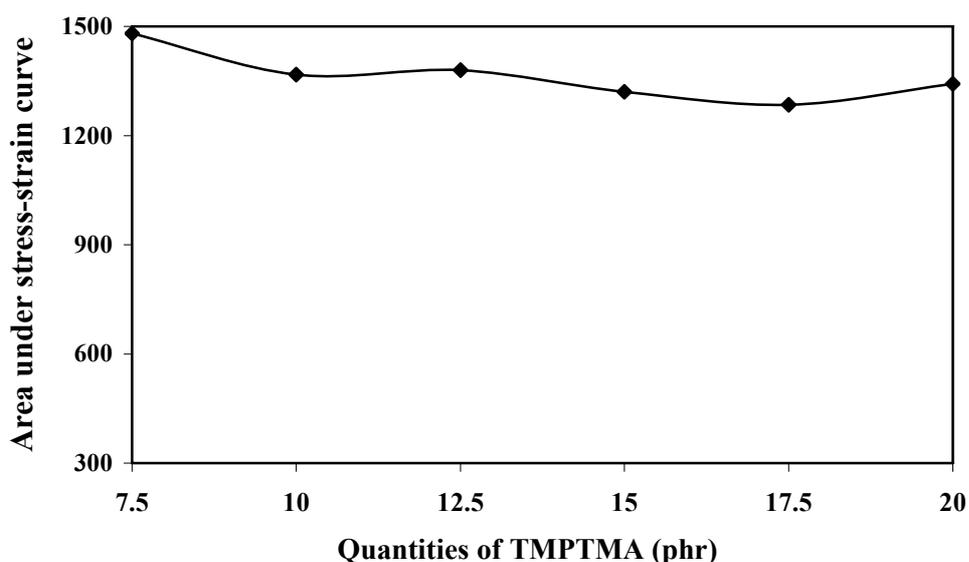


รูปที่ 5.8 กลไกการทำงานของโคเอเจนต์ (Akiba and Hashim, 1997)

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 5.9 – 5.10

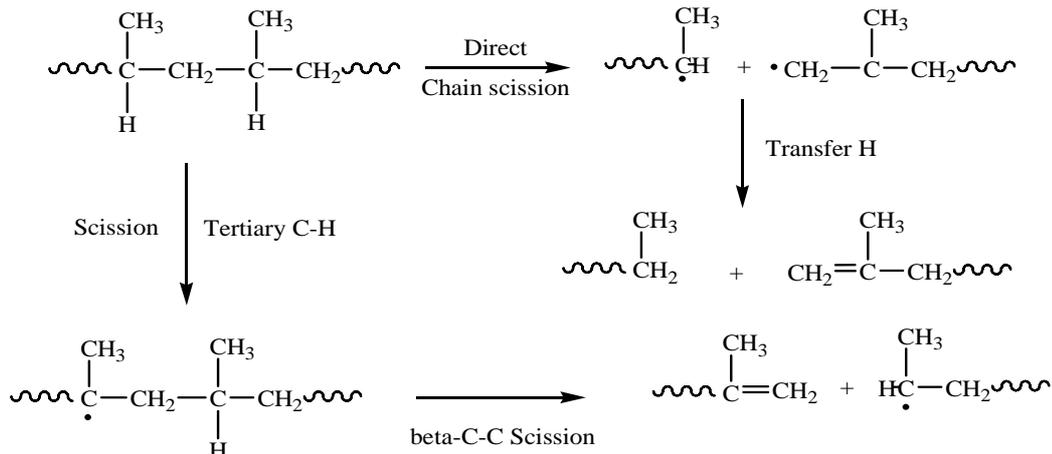


รูปที่ 5.9 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ



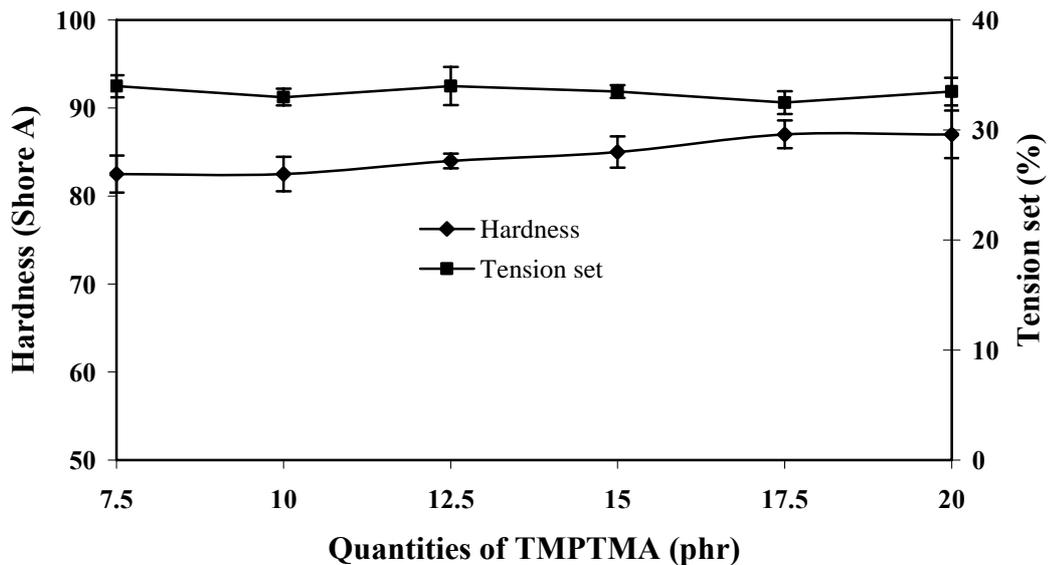
รูปที่ 5.10 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

จากรูปที่ 5.9 – 5.10 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของ TMPTMA เนื่องจากการใช้โคเอเจนต์ในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น (Henning, 2009) และ TMPTMA ลดการเกิดการตัดสายโซ่ (chain scission) ในเฟสพอลิโพรไพลีน เนื่องจาก TMPTMA จะเป็นตัวรับอนุมูลอิสระของไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะช่วยลดการดึงไฮโดรเจนในโมเลกุลของพอลิโพรไพลีน โดยปฏิกิริยาการตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรไพลีนจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงเฉือนและอุณหภูมิสูง ดังรูปที่ 5.11 เป็นผลมาจากการที่เปอร์ออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิโพรไพลีน โดยการดึงอะตอมไฮโดรเจนบนโซ่โมเลกุลของพอลิโพรไพลีนเป็นผลให้เกิดการขาดของโซ่โมเลกุล (β -scission) ทำให้โซ่โมเลกุลสั้นลง ดังนั้นเมื่อปริมาณ TMPTMA เพิ่มขึ้น ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลงตามการเพิ่ม TMPTMA เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรพอลิเมอไรเซชันของ TMPTMA เกิดโครงสร้างเป็นเทอร์โมเซต แล้วเกิดการเกาะติดหรือกราฟต์บนโมเลกุลยางทำให้ความสามารถในการยืดลดลง ดังอธิบายในหัวข้อ 4.1.1 เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่ม TMPTMA ซึ่งสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับข้างต้น กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้ TMPTMA ปริมาณ 7.5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการวัลคาไนซ์ร่วมกับเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 5.11 การตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรไพลีนภายใต้แรงเฉือนและอุณหภูมิสูงเมื่อมีไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (Naskar *et al*, 2004)

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ได้ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง และค่าความแข็งดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ค่าความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA

จากรูปที่ 5.12 พบว่า ค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP แนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึง ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่ามีค่ามอดูลัสสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA ส่วนค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง พบว่า ปริมาณ TMPTMA ไม่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการคืนรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP อย่างมีนัยสำคัญ

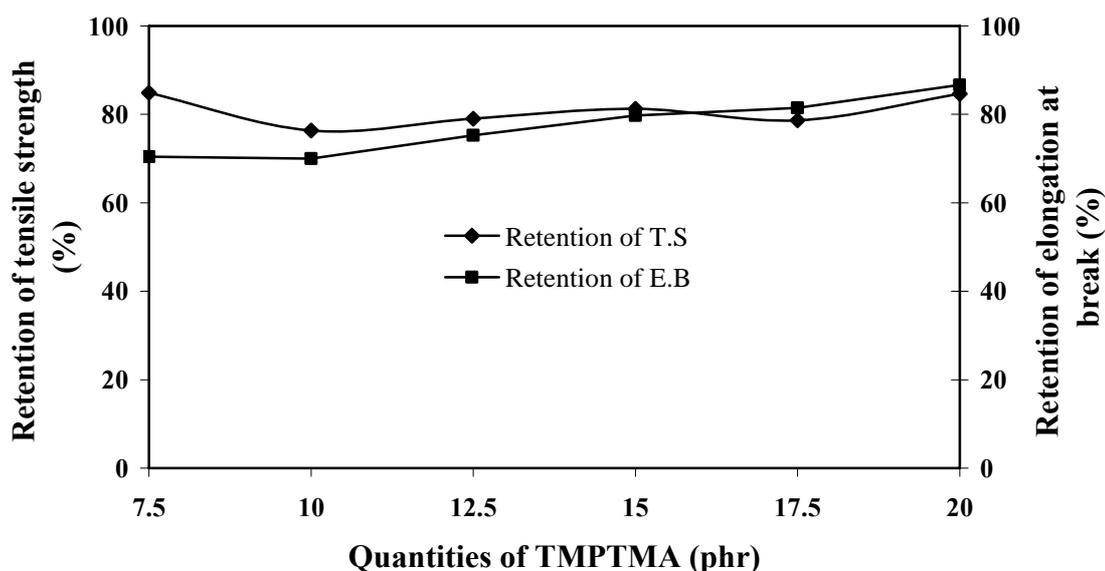
5.2.1.2 สมบัติหลังการบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรปริมาณ TMPTMA

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่เตรียมขึ้นจากการแปรปริมาณ TMPTMA ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA

Quantities of TMPTMA (phr)	Retention of Tensile strength (%)	Retention of Elongation at break (%)
7.5	84.84	70.44
10.0	76.33	70.00
12.5	79.04	75.30
15.0	81.25	79.75
17.5	78.64	81.46
20.0	84.68	86.67

จากตารางที่ 5.2 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มเร่งมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.13

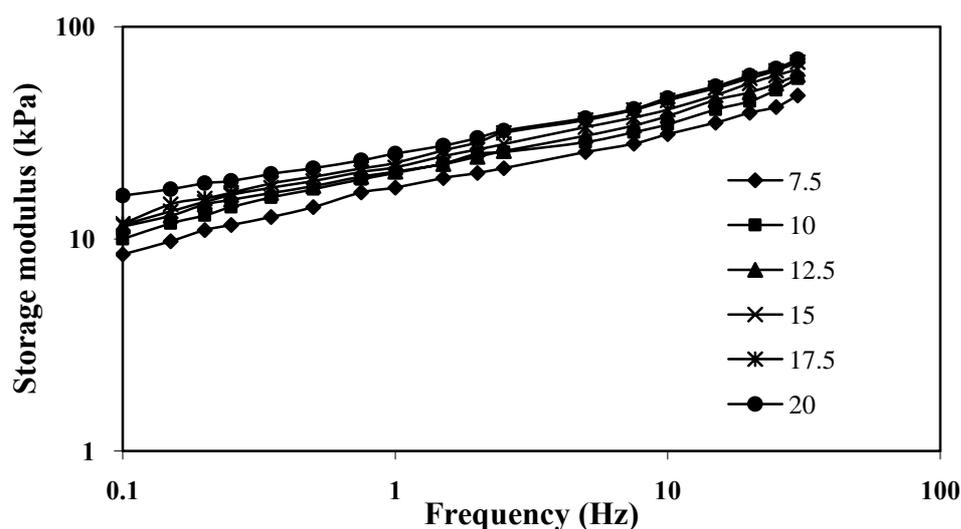


รูปที่ 5.13 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

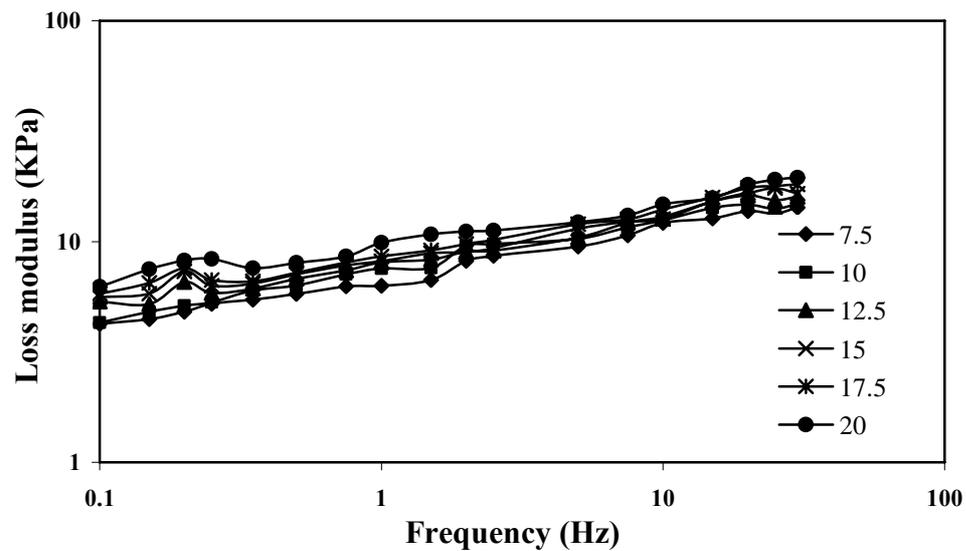
จากรูปที่ 5.13 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ลดลงเมื่อเทียบกับก่อนบ่มแรง อาจเกิดจากมีไดคิมิลเปอร์ออกไซด์ตกค้างแล้วทำให้เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลพอลิโพรไพลีนทำให้สมบัติลดลง และพบว่า เมื่อปริมาณ TMPTMA เพิ่มขึ้น สมบัติหลังการบ่มแรงโดยเฉพาะความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใส่ TMPTMA ช่วยให้การวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น และพันธะการเชื่อมโยงมีความเสถียรมากขึ้นจึงทนต่อการออกซิเดชัน ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทนความร้อนได้ดีกว่าการใช้ปริมาณ TMPTMA ที่ต่ำกว่า

5.2.1.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA

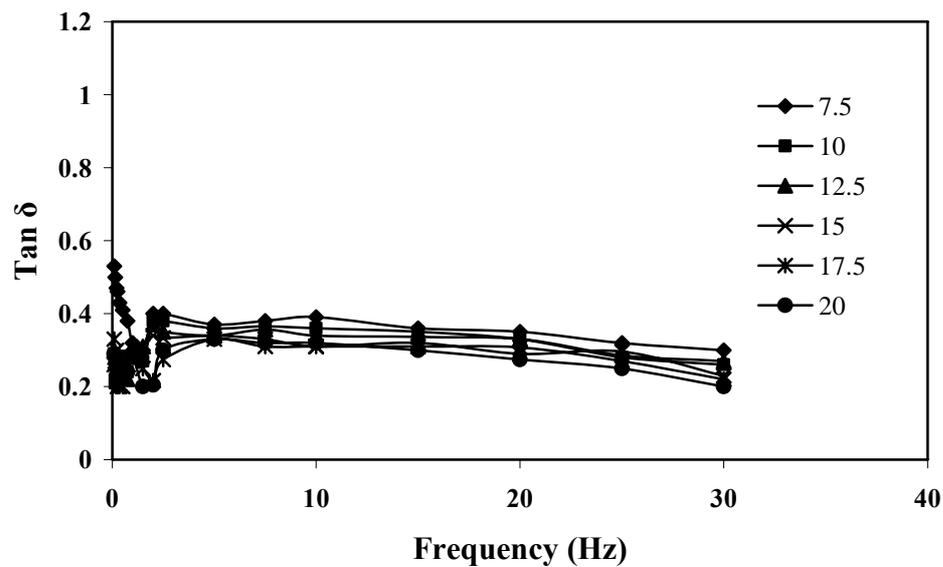
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/EVA/PP ด้วยเครื่อง MDPT โดยทดสอบแบบแปรความถี่ระหว่าง 0.1-30 Hz ที่อุณหภูมิ 180°C ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 5.14 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA

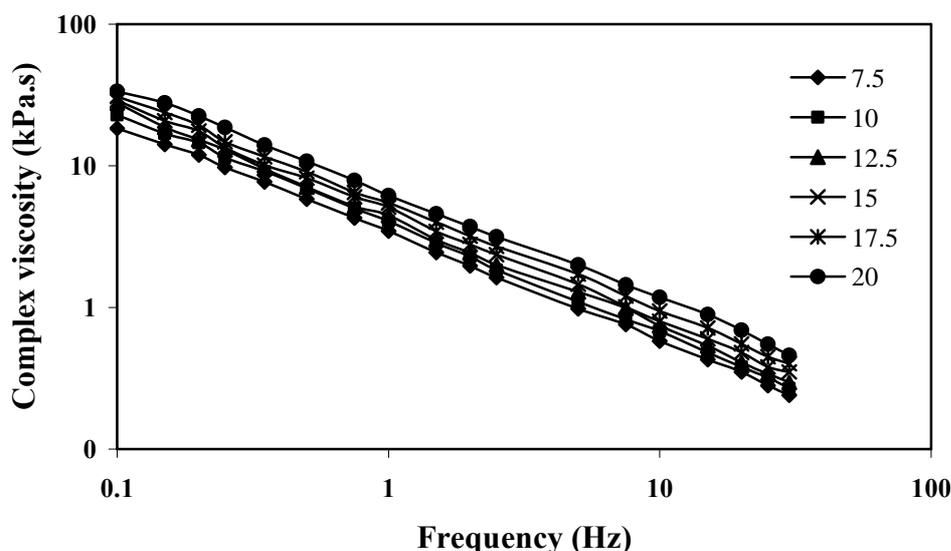


รูปที่ 5.15 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA



รูปที่ 5.16 $\text{Tan } \delta$ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA

จากรูปที่ 5.14 - 5.16 พบว่า มอดูลัสสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความถี่ในการทดสอบ เนื่องจากที่ความถี่ต่ำๆพอลิเมอร์มีเวลามากพอในการคลายตัวและลดการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลทำให้เกิดการผิดรูปง่าย จึงส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสมมีค่าต่ำ แต่เมื่อรับแรงกระทำให้เกิดรูปที่ความถี่สูงขึ้นสายโซ่พอลิเมอร์ไม่มีเวลามากพอที่จะคลายตัวจึงทำให้มอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกันพบว่า มอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ TMPTMA เนื่องจากการใช้ TMPTMA ทำให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดพันธะเชื่อมโยงปริมาณมากขึ้นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่วนค่า $\text{Tan } \delta$ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับมอดูลัสสะสม คือ $\text{Tan } \delta$ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม TMPTMA โดย $\text{Tan } \delta$ เป็นอัตราส่วนระหว่างมอดูลัสสูญเสียกับมอดูลัสสะสม แสดงถึงการหน่วง (Damping) หรือการตอบสนองต่อความเค้นที่กระทำอย่างไม่สมบูรณ์ ถ้ามอดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้การหน่วงเพิ่มขึ้น แสดงว่าสามารถตอบสนองต่อแรงที่มากกระทำได้มากขึ้น นั่นคือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น



รูปที่ 5.17 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA

จากรูปที่ 5.17 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ TMPTMA ทุกปริมาณแสดงพฤติกรรมแบบแรงเฉือนลด (Shear-thinning behavior) หรือสภาพคล้ายพลาสติก (Pseudoplasticity) กล่าวคือ ความหนืดเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความถี่ในการทดสอบ เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน พบว่า ความหนืดเชิงซ้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณ TMPTMA เนื่องจากการเพิ่ม TMPTMA ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในเฟสยางธรรมชาติอีพอกไซด์และเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

5.3.2 อิทธิพลของชนิดน้ำมันต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/EVA/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนของยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนของ ENR-25/EVA = 50/50 % โดยน้ำหนัก ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน กำหนดให้ใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ คือ DCP = 1.0 phr และ TMPTMA 7.5 phr ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.3.2 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง และสมบัติพลวัตเชิงกล ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

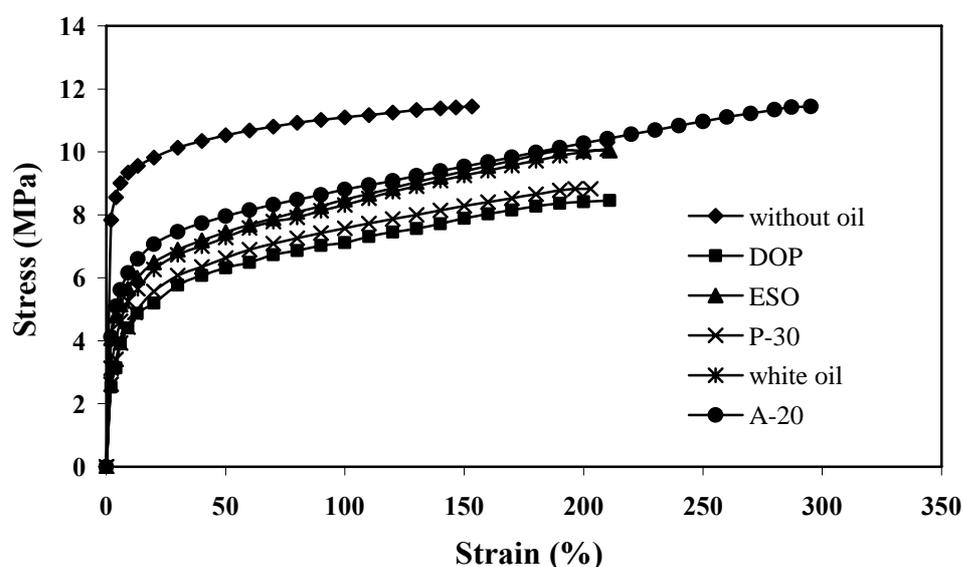
5.3.2.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดน้ำมัน

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP โดยกำหนดอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก โดยแปรชนิดน้ำมัน 5 ชนิดได้แก่ น้ำมันขาว (White oil) น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ (ESO) น้ำมันพาราฟินิก (P-30) น้ำมันไดออกทิลอะทาเลท (DOP) และน้ำมันอะโรมาติก (A-20) เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่น้ำมันได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน

Types of oil	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
Without oil	11.58±0.17	153±20.81	87.0±1.34	50.0±1.15	1629.65
White oil	10.00±0.26	210±2.00	81.0±1.92	35.0±0.76	1783.30
ESO	10.03±0.21	211±9.87	84.0±1.82	42.5±1.61	1704.82
P-30	8.84±0.16	203±2.08	82.5±2.09	34.0±1.00	1499.24
DOP	8.54±0.13	211±5.69	84.0±0.55	37.5±1.04	1480.59
A-20	11.44±0.04	295±2.08	84.5±1.44	33.5±0.58	2757.00

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแสดงดังรูปที่ 5.18

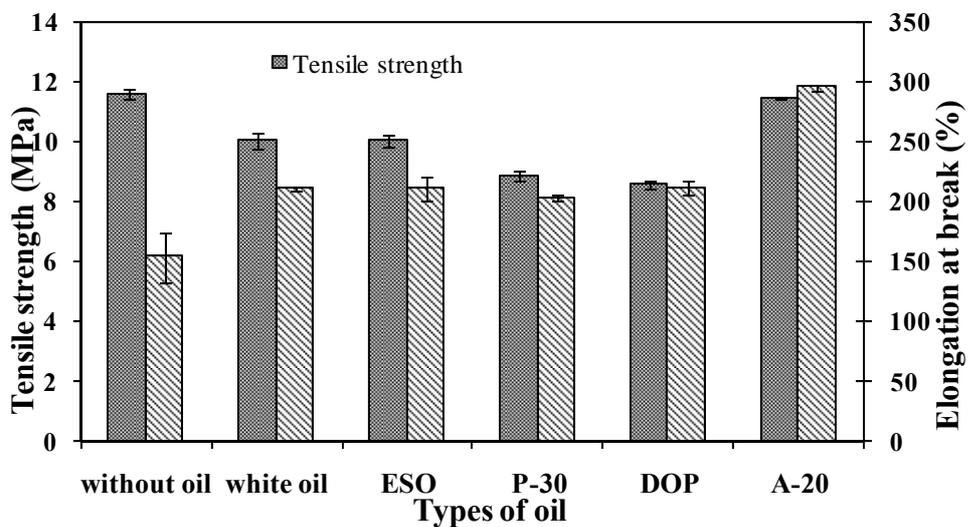


รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดน้ำมัน

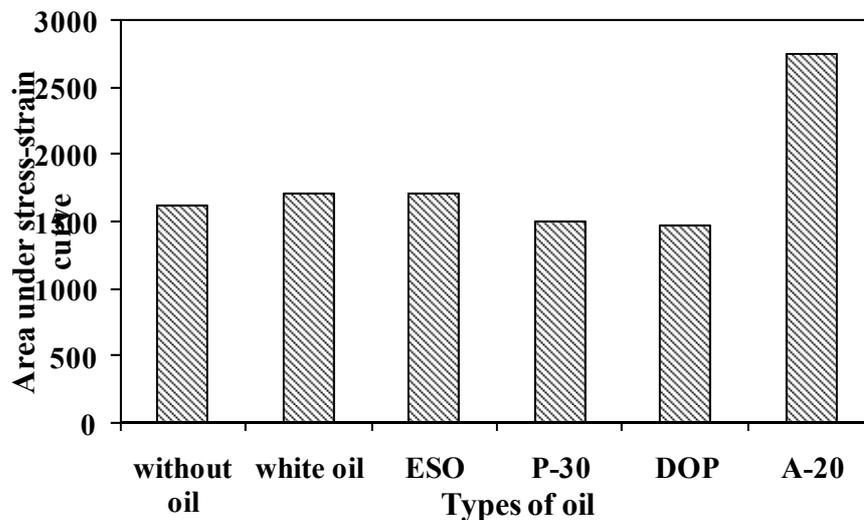
จากรูปที่ 5.18 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่ใส่น้ำมันจะให้ความสามารถในการยืดสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใส่น้ำมัน เนื่องจากน้ำมันจะไปขัดขวางการตกลึกของพอลิโพรไพลีน (อนุวัตร, 2551) ทำให้ปริมาณผลึกของพอลิโพรไพลีนลดลง ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงของพลาสติกลดลง นอกจากนี้ น้ำมันหรือพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่ลงไปยังไปลดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลอย่างทำให้สายโซ่โมเลกุลบิดและเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นส่งผลให้ความยืดหยุ่นของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น (อนุวัตร, 2551) นอกจากนี้ยังพบว่า การใส่น้ำมันอะโรมาติก A-20 ให้ความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าสูงสุด อาจเนื่องมาจากน้ำมัน A-20 สามารถเข้ากับ

ยางได้ดีกว่า พิจารณาได้จากค่า aniline point ของน้ำมันแต่ละชนิดมีค่าต่างๆดังนี้คือ A-20 = 42.9, P-30 = 99.4, white oil = 225 °C ซึ่งน้ำมันที่มีค่า aniline point ต่ำจะสามารถเข้ากับยางที่มีขี้ได้ดี ซึ่งยาง ENR-25 และ EVA มีความเป็นขี้จริงเข้ากันได้ดีกว่ากับน้ำมันที่มีความเป็นขี้ทำให้น้ำมันเกิดการกระจายตัวได้ดี ในเฟสยาง นอกจากนี้ความเหนียว (toughness) คือ พื้นที่ใต้กราฟของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์พบว่า การใช้น้ำมันอะโรมาติกให้พื้นที่ใต้กราฟที่สูงที่สุด เมื่อพิจารณาความชันตอนเริ่มต้นคือ ยังมอดูลัสของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่น้ำมันมีค่าสูงกว่าที่ใส่น้ำมัน

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 5.19 – 5.20



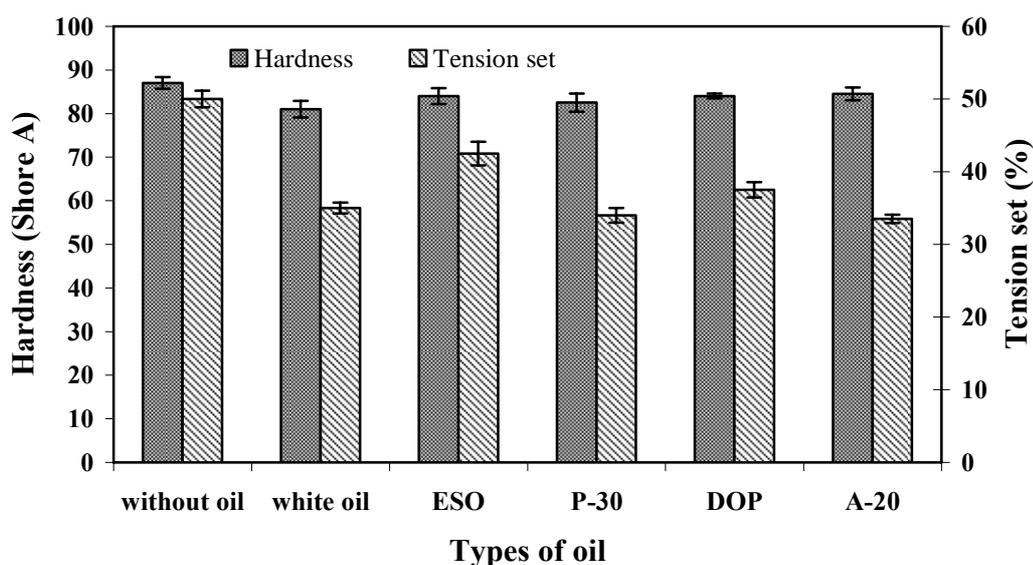
รูปที่ 5.19 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน



รูปที่ 5.20 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน

จากรูปที่ 5.19 – 5.20 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่ใส่น้ำมันมีค่าน้อยกว่าที่ไม่ใส่น้ำมัน เนื่องจากน้ำมันที่ใส่ลงไปจะไปขัดขวางการตกผลึกของพอลิโพรพิลีนทำให้ปริมาณผลึกพอลิโพรพิลีนลดลง (อนุวัตร, 2551) ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงด้วย และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่น้ำมันอะโรมาติกมีสมบัติดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่น้ำมันชนิดอื่นๆ เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่วงแหวนเบนซีนจึงจัดเป็นน้ำมันไม่อิ่มตัวและโครงสร้างส่วนมากเป็นอะโรมาติก ทำให้สามารถเข้ากับยางได้ดี (พรพรรณ, 2528) ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด ส่วนความสามารถในการยืดจนขาด พบว่า การใส่น้ำมันในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามากกว่าการไม่ใส่น้ำมัน เนื่องจากน้ำมันที่ใส่ลงไปจะไปลดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสายโซ่โพลิเมอร์และเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ความยืดหยุ่นจึงเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้อ่อนตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกัน

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณชนิดน้ำมัน ได้ค่าความแข็งและการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ค่าความแข็งค่าและการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน

จากรูปที่ 5.21 พบว่า ค่าความแข็งเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่น้ำมันมีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่น้ำมัน เนื่องจากการใส่น้ำมันทำให้สายโซ่โพลิเมอร์ของพอลิเมอร์เคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น และมีความยืดหยุ่นมากขึ้นทำให้มีความนิ่มมากขึ้น ส่วนค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง พบว่า สมบัติความสามารถในการคืนตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่ใส่น้ำมันอะโรมาติก มีค่า Tension set ต่ำสุด แสดงว่ามีความสามารถในการคืนตัวสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกมีค่า aniline point ต่ำ จึงสามารถเข้ากับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ดีกว่าน้ำมันพาราฟินิก น้ำมันไดออกทิวพะทาเลท น้ำมันขาว และน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซีไดซ์

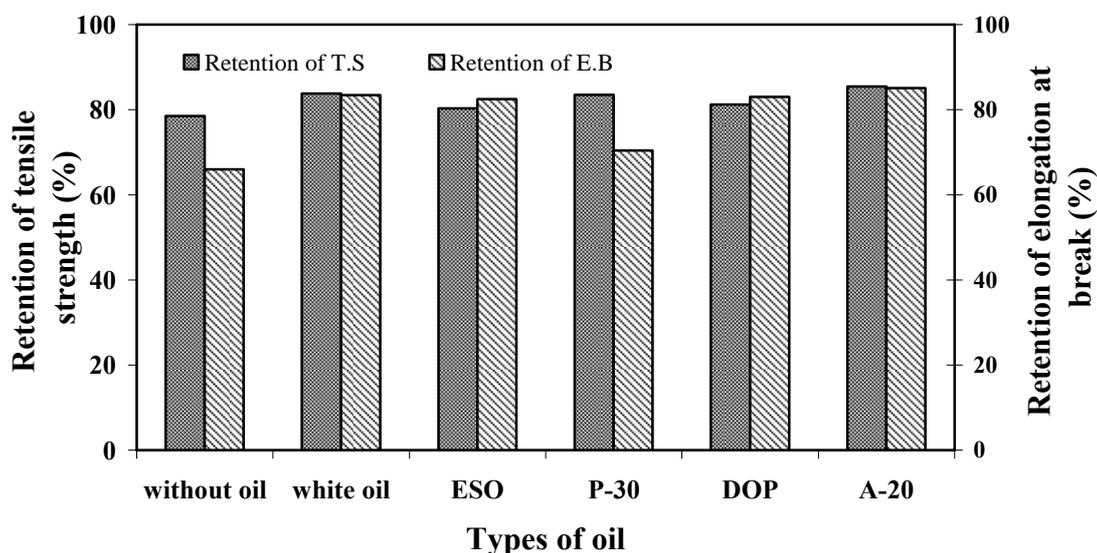
5.3.2.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดน้ำมัน

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมันไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน

Types of oil	Retention of Tensile strength (%)	Retention of Elongation at break (%)
Without oil	78.50	66.01
White oil	81.23	83.02
ESO	80.29	82.46
P-30	83.84	83.41
DOP	83.48	70.44
A-20	85.49	85.08

จากตารางที่ 5.4 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.22



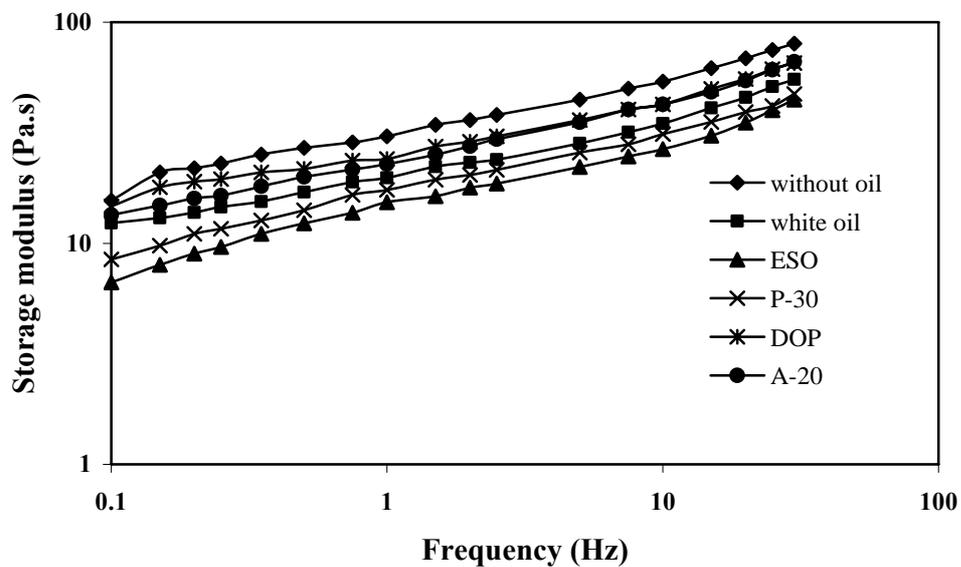
รูปที่ 5.22 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน

จากรูปที่ 5.22 พบว่า สมบัติหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่ใช้น้ำมันอะโรมาติก คือ A-20 ให้สมบัติหลังการบ่มแรงดีที่สุด กล่าวคือ ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงมีการเปลี่ยนแปลงน้อย เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกมีปริมาณ

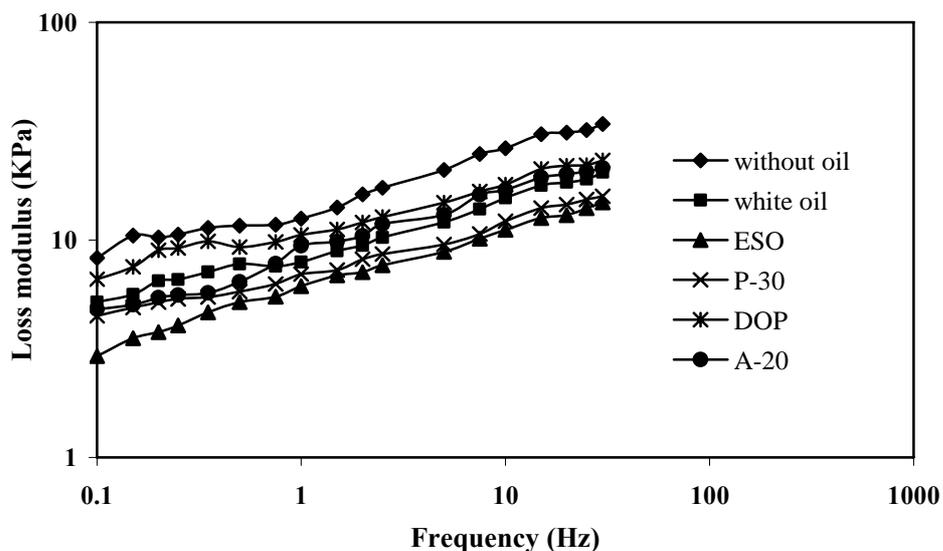
ของอะโรมาติกในโครงสร้างมากจึงช่วยให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทนทานต่อความร้อนได้มาก นอกจากนี้ อาจเนื่องมาจากการใช้น้ำมันอะโรมาติกทำให้การกระจายตัวของเฟสยางในเฟสพอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็ก (ชนิตา, 2553) เกิดออกซิเดชันได้ยาก โดยที่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้น้ำมันมีสมบัติหลังการบ่มแรง ต่อยที่สุด กล่าวคือ เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังการบ่มแรงมากที่สุด

5.3.2.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน

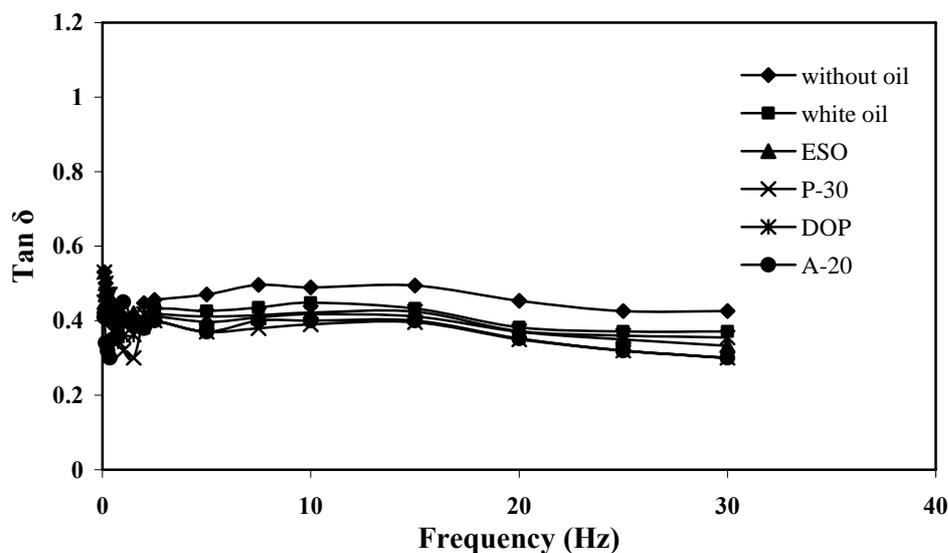
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลด้วยเครื่อง MDPT ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดของน้ำมันโดยทดสอบแบบแปรความถี่ระหว่าง 0.1-30 Hz ที่อุณหภูมิ 180°C ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 5.23 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน

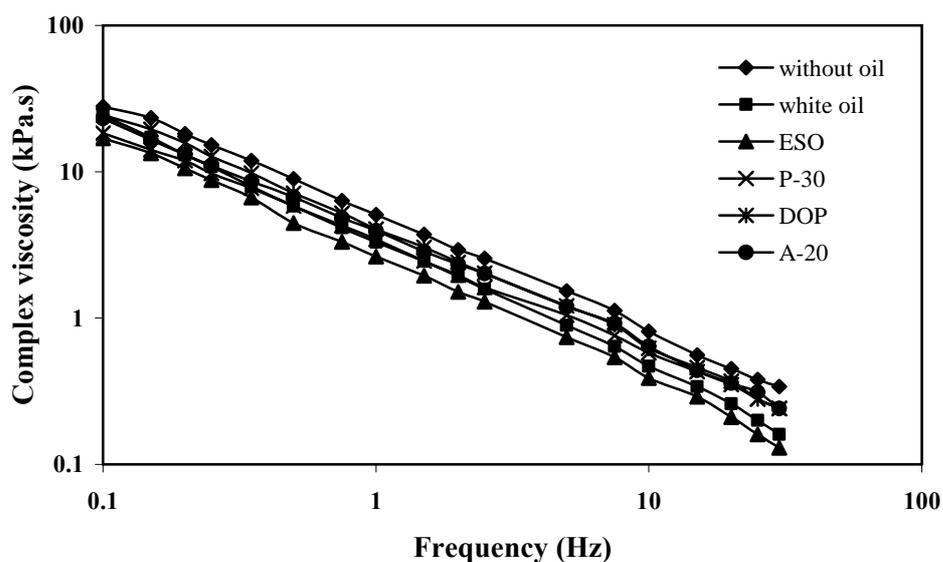


รูปที่ 5.24 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน



รูปที่ 5.25 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน

จากรูปที่ 5.23 – 5.25 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน มีมอดูลัสสะสมหรือพลังงานสะสมบนสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่ระดับเดียวกันพบว่า การใส่น้ำมันชนิดต่างๆทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีพลังงานสะสมลดลง ซึ่งน้ำมันชนิดต่างๆที่ผสมลงไป ทำให้มีพลังงานสะสมลดลงมากที่สุดคือ ถั่วเหลืองอีพอกซิไดซ์ รองลงมาคือน้ำมันพาราฟินิก ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันขาว น้ำมันอะโรติก และไดออกทิลเพทเทเลท ตามลำดับ การที่พลังงานสะสมบนสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ลดลงเพราะสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนตัวได้มากขึ้น ทำให้ใช้พลังงานในการเคลื่อนตัวมากจึงเก็บสะสมไว้น้อย เนื่องจากน้ำมันจะเข้าไปช่วยหล่อลื่นให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการขยับตัวได้ง่ายมากยิ่งขึ้น ส่วนน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดซ์ที่มีพลังงานสะสมบนโซ่พอลิเมอร์ต่ำที่สุด เนื่องจากน้ำมันเหลืองอีพอกซิไดซ์มีส่วนของโครงสร้างที่เป็นกรดไขมัน (Fatty acid) ผสมอยู่ด้วยซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) จึงทำให้พอลิเมอร์มีการเปลี่ยนรูปได้ง่ายหรือเกิดการขยับตัวของสายโซ่ได้ง่ายนั่นเอง ส่วนค่า Tan δ พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่น้ำมันชนิดต่างๆมีค่า Tan δ ต่ำกว่ากรณีไม่ใส่น้ำมัน แสดงให้เห็นว่า น้ำมันสามารถเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่ขยับตัวได้ง่าย ส่งผลให้เพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ (อนุวัตร, 2551) ซึ่งสอดคล้องกับการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงซึ่งน้ำมันอะโรมาติกมีค่า Tan δ ต่ำที่สุด เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่วงแหวนเบนซีนจึงจัดเป็นน้ำมันไม่อิ่มตัวและในโครงสร้างส่วนมากเป็นอะโรมาติก ทำให้สามารถมีความเข้ากันได้กับยางได้ดี

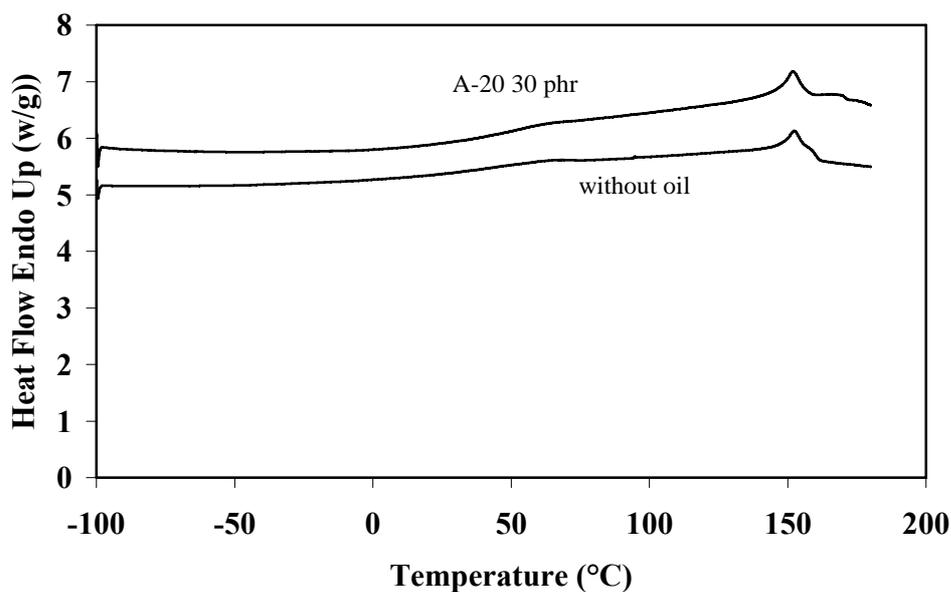


รูปที่ 5.26 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมัน

จากรูปที่ 5.26 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดน้ำมันมีความหนืดเชิงซ้อนลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นหรือมีพฤติกรรมแบบลดแรงเฉือน เมื่อพิจารณาที่ความถี่ระดับเดียวกันพบว่า การผสมน้ำมันทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความหนืดเชิงซ้อนลดลง ซึ่งน้ำมันที่ทำให้มีความหนืดลดลงมากที่สุดคือ น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดซ์ รองลงมาคือน้ำมันขาว ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำมันพาราฟินิก น้ำมันอะโรมาติก และไดออกทิลพิเพทาเลท ตามลำดับ การที่ความหนืดลดลงเพราะสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนตัวได้มากขึ้น ทำให้ใช้พลังงานในการเคลื่อนตัวมากขึ้น จึงเก็บสะสมไว้น้อย เนื่องจากน้ำมันจะเข้าไปช่วยหล่อลื่นให้สายโซ่เกิดการขยับตัวได้ง่ายมากยิ่งขึ้น ส่วนน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดซ์ที่มีความหนืดเชิงซ้อนต่ำที่สุด เนื่องจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดซ์อาจมีส่วนของโครงสร้างที่เป็นกรดไขมัน (Fatty acid) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) จึงทำให้พอลิเมอร์มีการเปลี่ยนรูปได้ง่ายหรือเกิดการขยับตัวของสายโซ่ได้ง่ายนั่นเอง

5.3.2.4 สมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP

วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน ด้วยเทคนิค DSC โดยใช้ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ระหว่าง ENR-25/EVA/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 5.27



รูปที่ 5.27 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP เปรียบเทียบที่ไม่ใส่น้ำมันและใส่น้ำมัน A-20

จากรูปที่ 5.27 เป็นเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC สามารถระบุค่า อุณหภูมิหลอมผลึกของพอลิโพรไพลีนและปริมาณผลึกได้ผลแสดงดังในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 5.5 อุณหภูมิการหลอมของผลึกและปริมาณผลึกของของเฟส PP ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง ENR-25/EVA/PP เปรียบเทียบที่ใส่และไม่ใส่น้ำมัน

Oil content (phr)	T_m (°C)	Crystallinity (%)
0	154.36	13.35
30	151.86	11.76

จากรูปที่ตารางที่ 5.5 พิจารณาอุณหภูมิหลอม ผลึก (T_m) ของพอลิโพรไพลีนในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP เปรียบเทียบที่ใส่และไม่ใส่น้ำมัน A-20 พบว่า เมื่อใส่น้ำมันทำให้ T_m มีค่าลดลง เนื่องจากน้ำมันที่ใส่ลงไปจะแพร่เข้าไปอยู่ในส่วนที่เป็นอสัณฐานทำให้สายโซ่พอลิโพรไพลีนมีความเป็นระเบียบลดลง จึงมีผลให้ลดการเกิดผลึก (สกุรัตน์, 2551) ทำให้อุณหภูมิการหลอมของผลึกของเฟสพอลิโพรไพลีนในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลง ส่วนปริมาณผลึกของพอลิโพรไพลีนมีค่าลดลงเมื่อใส่น้ำมันเนื่องจากน้ำมันจะแพร่เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบลดลงส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง

5.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ยางและพลาสติกต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/EVA/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนยางต่อพลาสติกเท่ากับ 50/50, 60/40 และ 70/30 % โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง ENR-25/EVA ที่อัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน กำหนดให้ใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ คือ DCP = 1.0 phr และ TMPTMA 7.5 phr และใช้น้ำมัน A-20 ปริมาณ 30 phr ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.3.3 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง สมบัติพลวัตเชิงกล ลักษณะสัญญาณวิทยา และสมบัติเชิงความร้อนได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

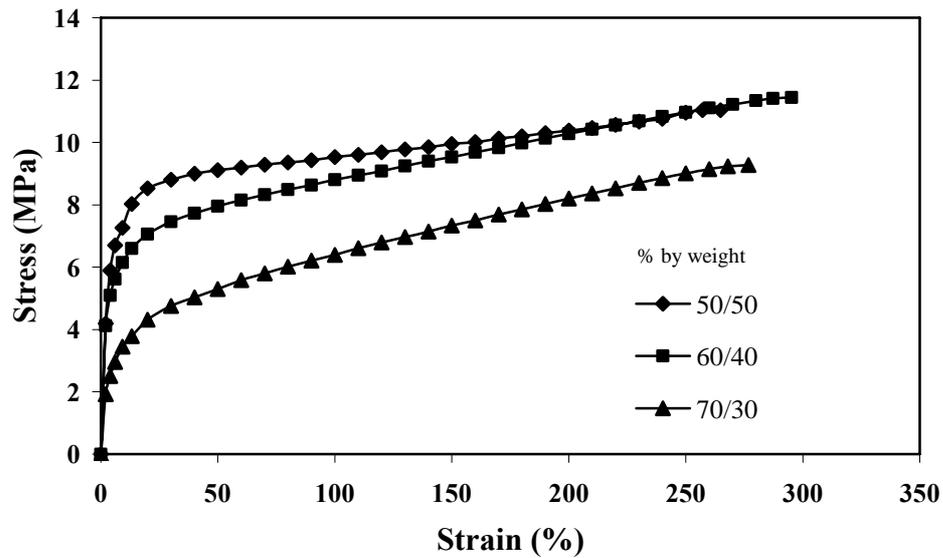
5.3.3.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกเท่ากับ 50/50, 60/40 และ 70/30 % โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

Blends ratio (% by weight)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress- strain curve
50/50	11.03±0.38	264±12.06	87.0±2.44	50.0±0.58	2558.00
60/40	11.44±0.04	295±2.08	84.5±1.44	33.5±0.58	2757.00
70/30	9.44±0.57	276±2.31	80.0±2.19	30.0±0.58	1914.08

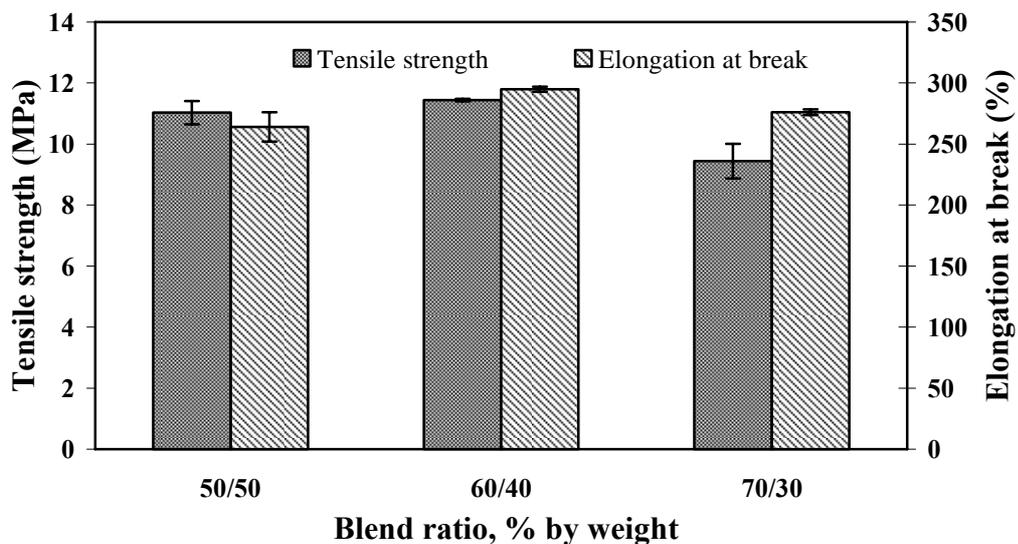
ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแสดงดังรูปที่ 5.28



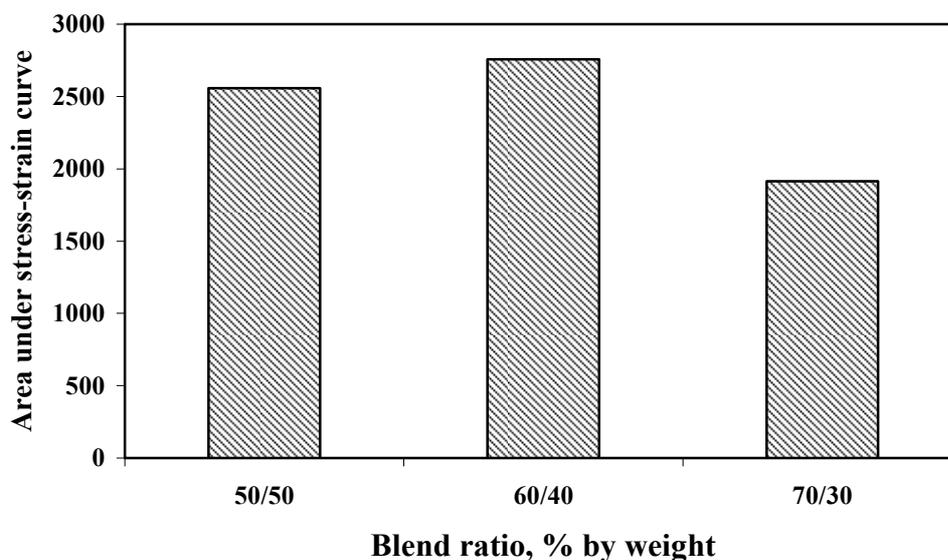
รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

จากรูปที่ 5.28 พบว่า อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกที่ 50/50 % โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงสูงสุด รองลงมาคืออัตราส่วน 60/40 และ 70/30 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าค่าความแข็งแรง (stiffness) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณพอลิโพรไพลีนในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เนื่องจากพอลิโพรไพลีนสามารถเกิดผลึกในโมเลกุล เมื่อปริมาณพอลิโพรไพลีนเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 5.29 – 5.30



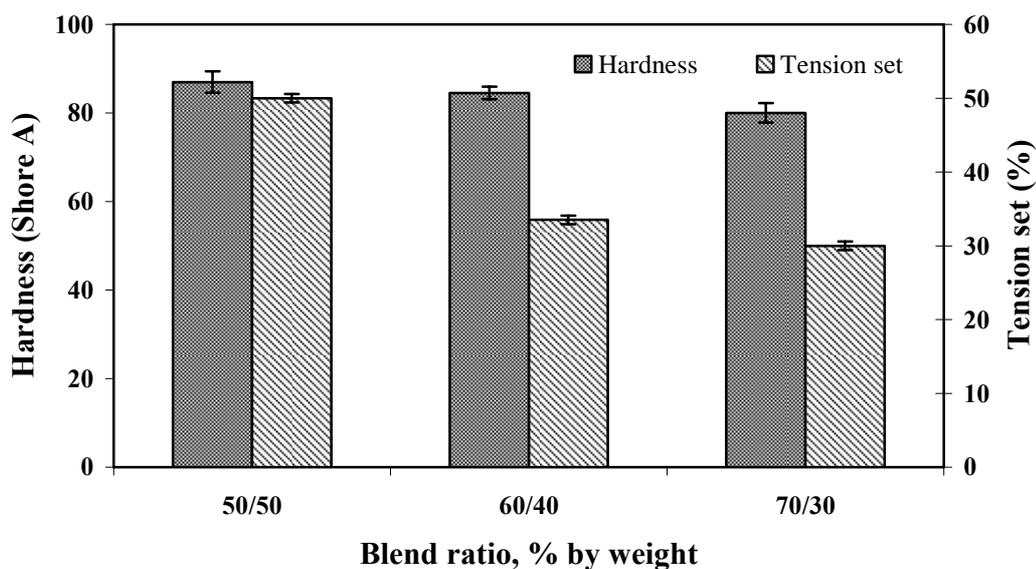
รูปที่ 5.29 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก



รูปที่ 5.30 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

จากรูปที่ 5.29 – 5.30 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยที่อัตราส่วน 60/40 % โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วน 50/50 และ 70/30 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์นั้นส่วนของพอลิโพรไพลีนเป็นเฟสแข็งและเป็นเฟสหลักที่ให้ความแข็งแรง ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางวัลคาไนซ์ซึ่งเป็นเฟสนิ่มลงไปความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จึงมีค่าลดลง ส่วนความสามารถในการยึดจุนขาดพบว่า ที่อัตราส่วน 60/40 % โดยน้ำหนัก มีค่าสูงที่สุดเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากที่อัตราส่วนการเบลนด์ดังกล่าวนี้ทำให้เกิดการกระจายตัวของเฟสยาง คือ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และเอทิลีนไวนิลอะซิเตทในเฟสพลาสติกดีที่สุด จึงทำให้ค่าความสามารถในการยึดจุนขาดสูงที่สุด รองลงมาคือที่อัตราส่วน 70/30 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเพิ่มปริมาณยางซึ่งเป็นเฟสที่มีความยืดหยุ่น ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความสามารถในการยึดสูงกว่าที่อัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก ที่มีปริมาณเฟสพลาสติกสูงกว่า เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้อินตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึง กล่าวคือ ที่อัตราส่วน 60/40 % โดยน้ำหนัก มีค่าพื้นที่ใต้กราฟสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วน 50/50 และ 70/30 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์นั้นส่วนของพอลิโพรไพลีนเป็นเฟสแข็งและเป็นเฟสหลักที่ให้ความแข็งแรง ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางวัลคาไนซ์ซึ่งเป็นเฟสนิ่มลงไปความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จึงมีค่าลดลง นอกจากนี้อาจเกิดจากอิทธิพลของขนาดเฟสยางวัลคาไนซ์ที่กระจายในเฟสพลาสติกมีขนาดเล็กดังรูปที่ 5.37

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก ได้ค่าความแข็งและค่าการผิถาวรเนื่องจากการดึงดังรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 ค่าความแข็งและค่าการผิดถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

จากรูปที่ 5.31 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเฟสยางมีผลทำให้ความแข็งของเทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มของเฟสยางจะทำให้เทอร์โมพลาสติกมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงทำให้ความแข็งลดลง ส่วนค่าการผิดถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะเห็นว่า มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของยางในการเบลนด์ ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มอัตราส่วนของยางทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความยืดหยุ่นเพิ่มสูงขึ้น จึงสามารถคืนตัวได้ดีหลังถูกกระทำให้ผิดรูป

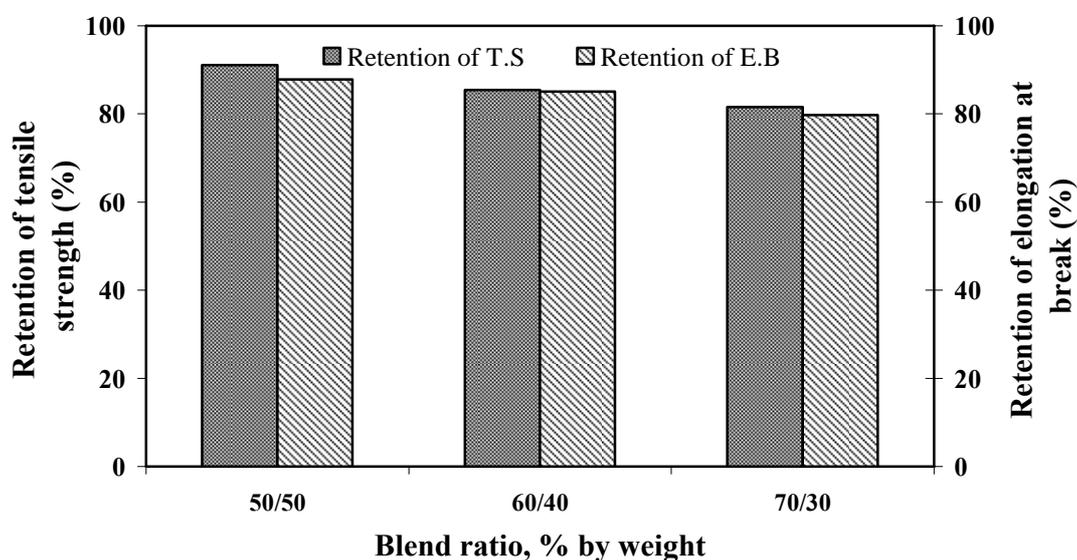
5.3.3.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางและพลาสติกไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

Blend ratio (% by weight)	Retention of Tensile strength (%)	Retention of Elongation at break (%)
50/50	91.12	87.88
60/40	85.49	85.08
70/30	81.57	79.71

จากตารางที่ 5.7 นำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.32

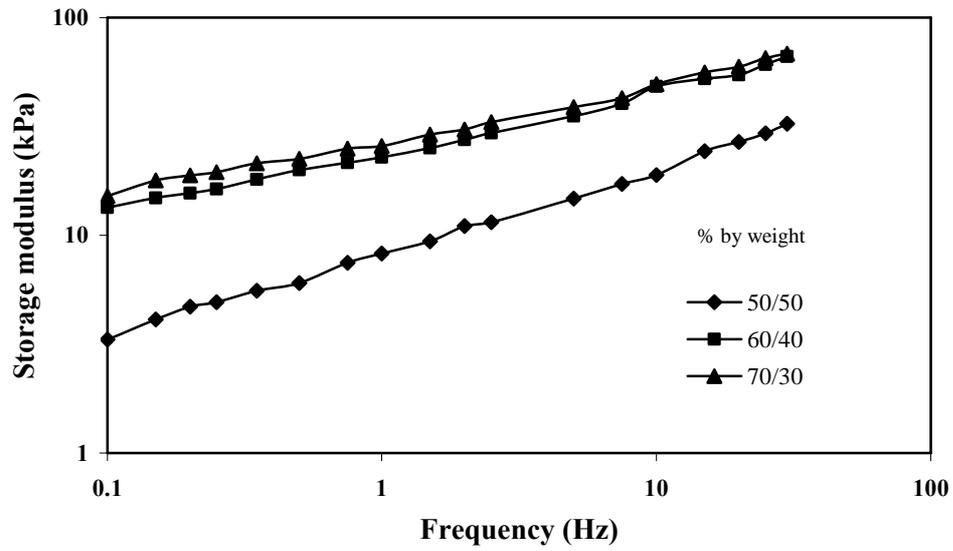


รูปที่ 5.32 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

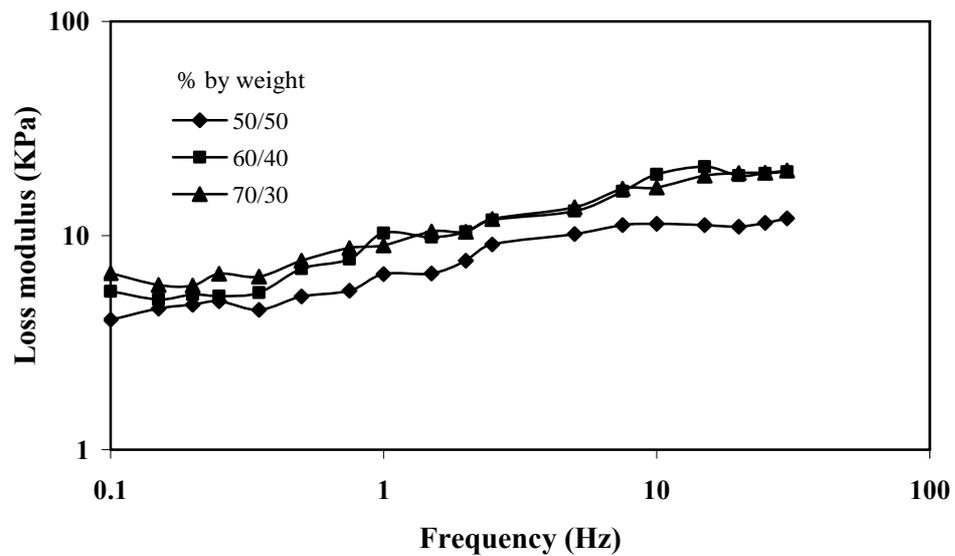
จากรูปที่ 5.32 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิโพรไพลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิโพรไพลีนมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีความอึดตัวไม่มีพันธะคู่ทำให้ทนความร้อนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงกว่าเฟสยางในกรณีนี้ คือ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตท

5.3.3.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

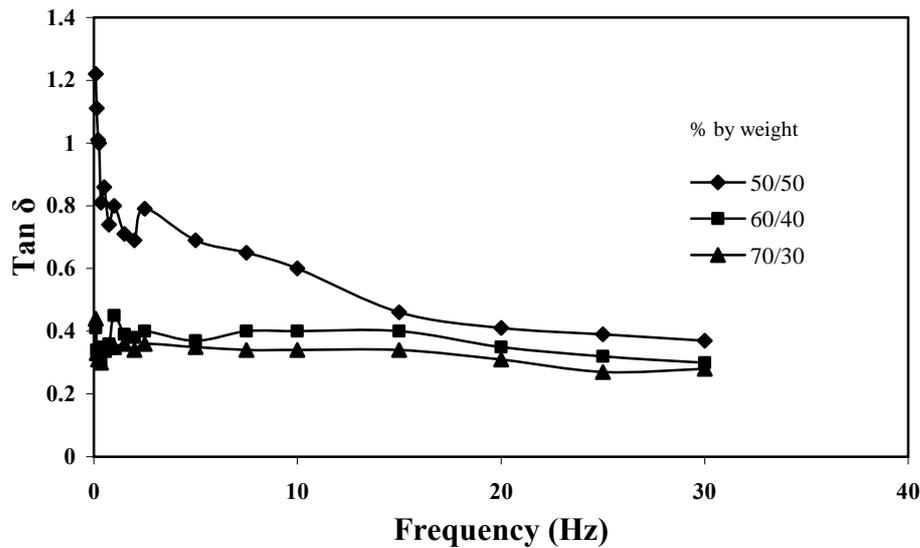
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลด้วยเครื่อง MDPT ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์โดยทดสอบแบบแปรความถี่ระหว่าง 0.1-30 Hz ที่อุณหภูมิ 180°C ได้ผลการทดลองดังนี้



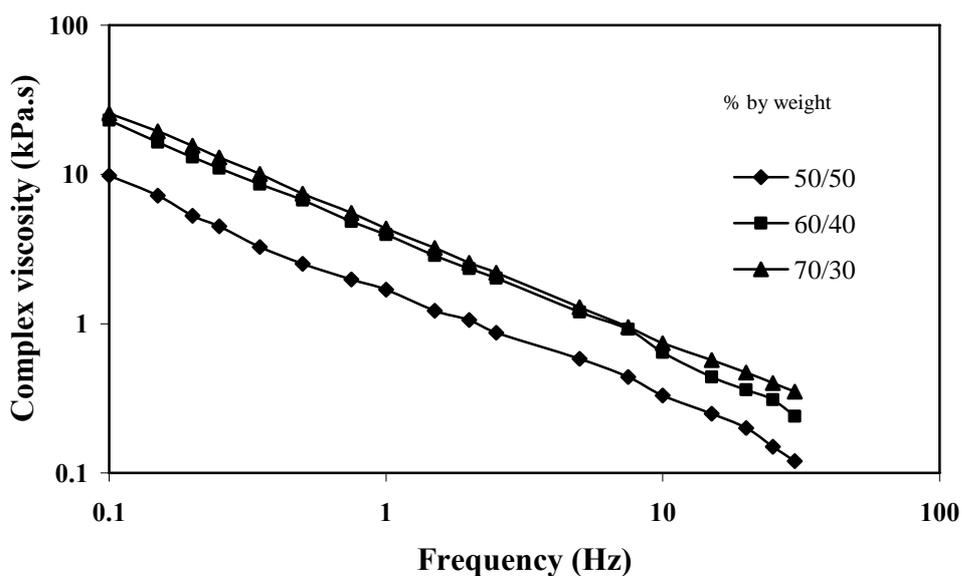
รูปที่ 5.33 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก



รูปที่ 5.34 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก



รูปที่ 5.35 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก จากรูปที่ 5.33 – 5.35 พบว่า มอดุลัสสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความถี่ เนื่องจากที่ความถี่ต่ำๆพอลิเมอร์มีเวลามากพอในการคลายตัวและลดการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ทำให้เกิดการผิดรูปง่าย จึงส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าต่ำ แต่เมื่อรับแรงกระทำทำให้ผิดรูปที่ความถี่สูงขึ้นสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ไม่มีเวลาพอที่จะคลายตัวจึงทำให้มอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกันพบว่า มอดุลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางวัลคาไนซ์ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จัดเป็นวัสดุประเภทวิสโคอิลาสติก คือ มีการตอบสนองต่อแรงกระทำทั้งแบบยืดหยุ่นและไหลหนืด ดังนั้นเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มส่วนที่ยืดหยุ่นส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สามารถเก็บสะสมพลังงานได้มากขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับ Tan δ ที่มีค่าต่ำลง ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

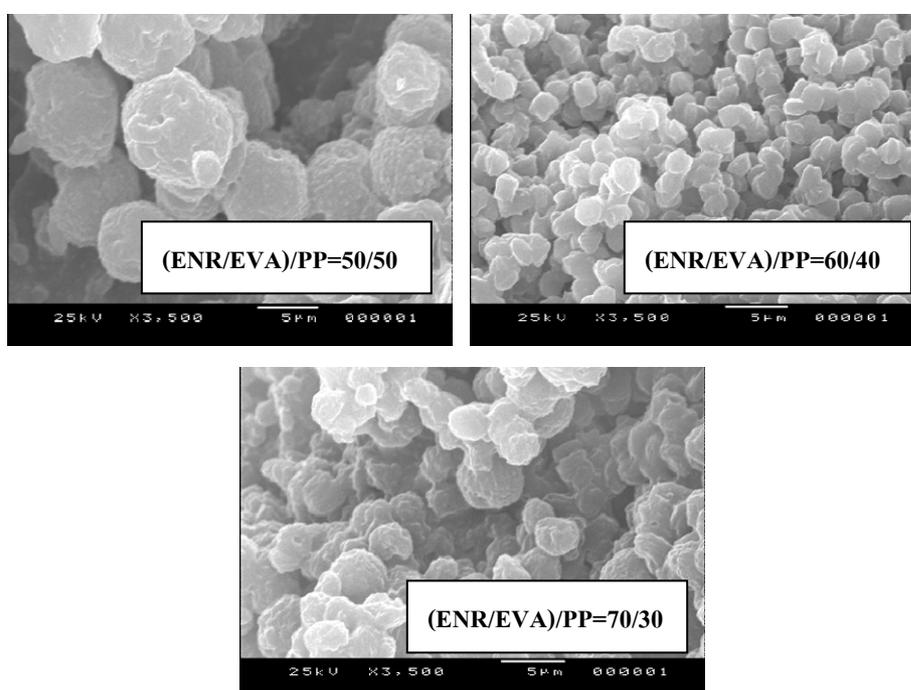


รูปที่ 5.36 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

จากรูปที่ 5.36 พบว่า ความเหนียวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนของยางและพลาสติกต่างๆมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ในการทดสอบซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลแบบลดแรงเฉือน เมื่อพิจารณาที่ความถี่ระดับเดียวกัน พบว่า เมื่อปริมาณยางเบลนด์ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นทำให้ความเหนียวสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่ามอดูลัสสะสมตั้งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

5.3.3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก (ENR-25/EVA)/PP เท่ากับ 50/50, 60/40 และ 70/30 % โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.37 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

จากรูปที่ 5.37 พบว่า ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนต่างๆ เป็นเฟสยางกระจายในเฟสพลาสติกของพอลิโพรไพลีน โดยขนาดอนุภาคของเฟสยาง (ENR-25/EVA) กระจายในเฟสต่อเนื่องของพอลิโพรไพลีน ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคของเฟสยางเล็กที่สุด จึงมีพื้นที่ผิวมากที่สุด ทำให้เกิดอันตรกิริยากันระหว่างเฟสยางกับพลาสติกได้ดีส่งผลให้เทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนดังกล่าวมีสมบัติที่ดีที่สุด เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน 70/30 % โดยน้ำหนัก พบว่า ขนาดอนุภาคยางใหญ่กว่าการเบลนด์ที่สัดส่วน 60/40 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่อสัดส่วนของยางวัลคาไนซ์ปริมาณมากขึ้นในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะทำให้โอกาสที่ยางจะรวมตัวกันเป็นอนุภาคยางใหญ่มีมากขึ้น และการบดเฉือนให้เฟสยางที่มีความเหนียวสูงกว่าเฟสพอลิโพรไพลีนให้มีขนาดเล็กลงทำได้ยากขึ้น ส่วนเฟสของพอลิโพรไพลีนมีปริมาณลดน้อยลง ทำให้แสดงพฤติกรรมเป็นเฟสต่อเนื่องได้น้อยลงด้วย ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนดังกล่าวมี

ความแข็งแรงลดลง ส่วนที่อัตราส่วนการเบลนด์ 50/50 % โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคยาง (ENR-25/EVA) กระจายตัวในพอลิพลาสติกขนาดใหญ่ที่สุดเป็นผลมาจากที่อัตราส่วนนี้มีปริมาณยางน้อยส่งผลให้มีแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างการเบลนด์น้อย

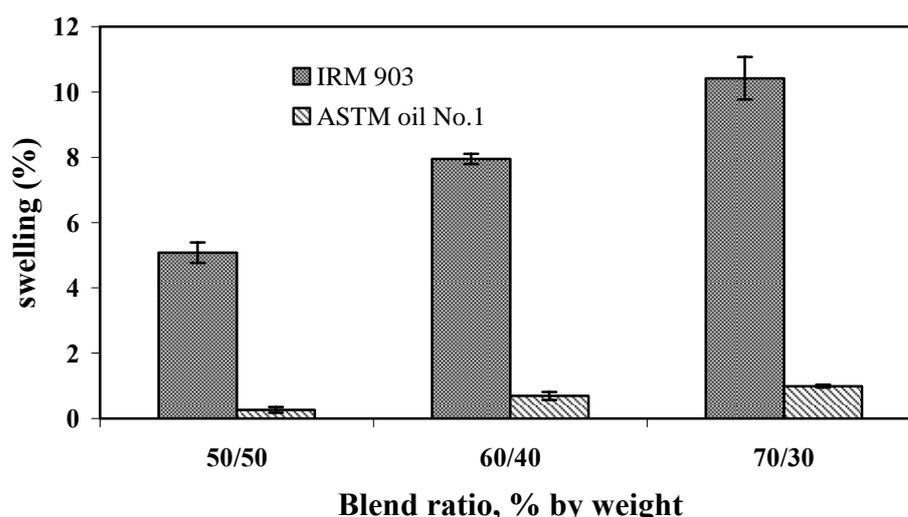
5.3.3.5 สมบัติการทนต่อน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

ทดสอบสมบัติการทนต่อน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกดังนี้คือ 50/50, 60/40 และ 70/30 % โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ค่าการบวมพองในตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ ENR-25/EVA/PP แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

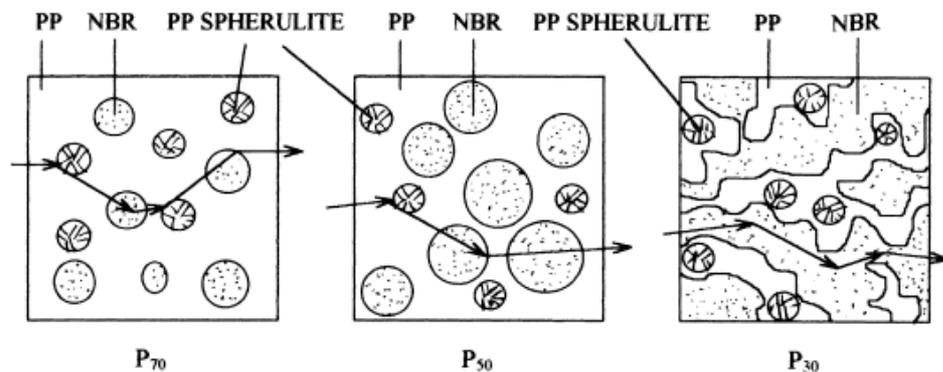
Blend ratio (% by weight)	Swelling (%)	
	ASTM oil No. 1	IRM 903
50/50	0.26±0.09	5.08 ±0.31
60/40	0.69±0.12	7.95 ±0.15
70/30	0.99±0.05	10.42 ±0.65

จากตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบการบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติกได้ดังรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 การบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก

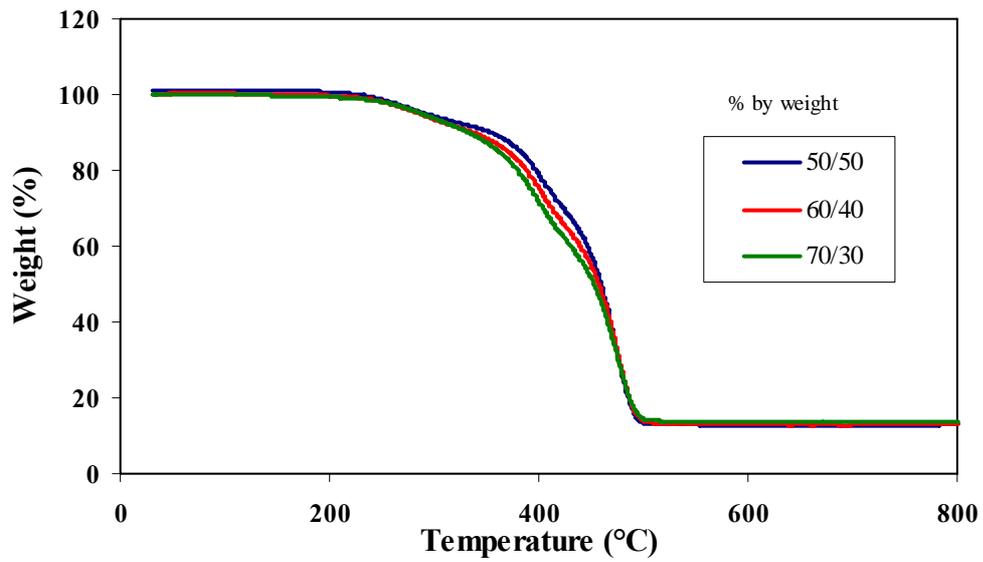
จากรูปที่ 5.38 พบว่า การบวมพองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง (ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และเอทิลีนไวนิลอะซิเตท) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณยางจะทำให้มีส่วนอสัณฐาน (Amorphous region) เพิ่มขึ้น โดยส่วนอสัณฐานเป็นส่วนที่ทำให้ตัวทำละลายสามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ได้มากขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มปริมาณพอลิโพรไพลีนจะทำให้ส่วนของกึ่งผลึก (Semi-crystalline region) เพิ่มขึ้น โดยส่วนของกึ่งผลึกจะเป็นตัวขัดขวางไม่ให้ตัวทำละลายแทรกเข้าไปได้ ซึ่งผลึกในพอลิโพรไพลีนจะมีลักษณะเป็นสเฟียรูไลต์ (Spherulite) ทำให้เส้นทางการแทรกของตัวทำละลายมีความคดเคี้ยวมากขึ้นและการแทรกของตัวทำละลายเป็นไปได้ยากมากขึ้น (ดังรูปที่ 5.39) ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์บวมพองน้อยลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณยางจะทำให้ตัวทำละลายสัมผัสกับเฟสยางได้มากขึ้นทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์บวมพองได้มากขึ้นเช่นกัน โดยพบว่า เทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ สามารถทนต่อน้ำมัน ASTM oil No. 1 ได้มากกว่าน้ำมัน IRM 903



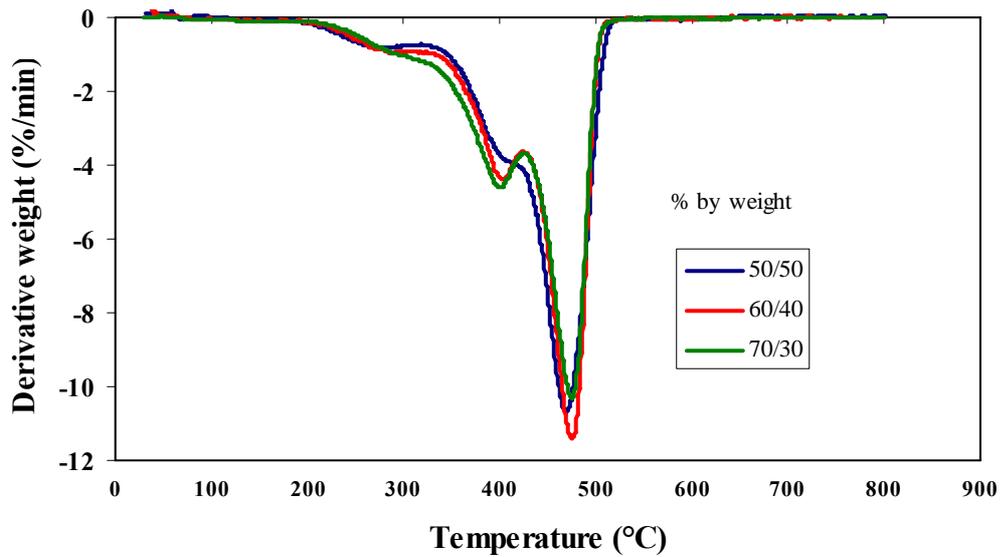
รูปที่ 5.39 ลักษณะการคดเคี้ยวของตัวทำละลายผ่านผลึกของพอลิโพรไพลีน (George, *et al.*, 2000)

4.3.3.6 สมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางต่อพลาสติก

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วน (ENR-25/EVA)/PP = 50/50, 60/40 และ 70/30 % โดยน้ำหนัก โดยกำหนดอัตราส่วนของ ENR-25/EVA = 50/50 % โดยน้ำหนัก ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA ตามหัวข้อ 3.3.5.12 โดยทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.40 – 5.41 และตารางที่ 5.9



รูปที่ 5.40 เทอร์โมแกรม TGA ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก



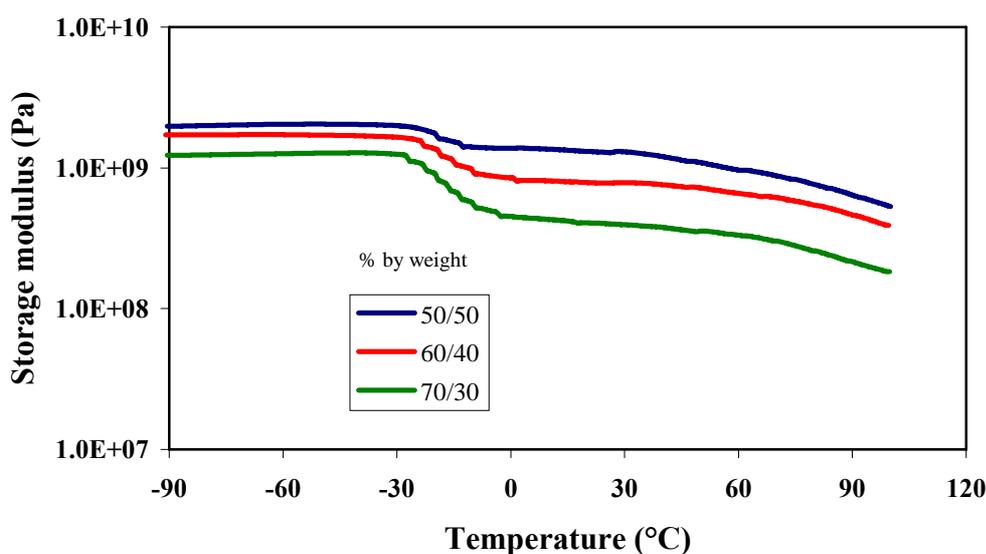
รูปที่ 5.41 เทอร์โมแกรม DTG ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก

ตารางที่ 5.9 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์อย่างต่อพลาสติก

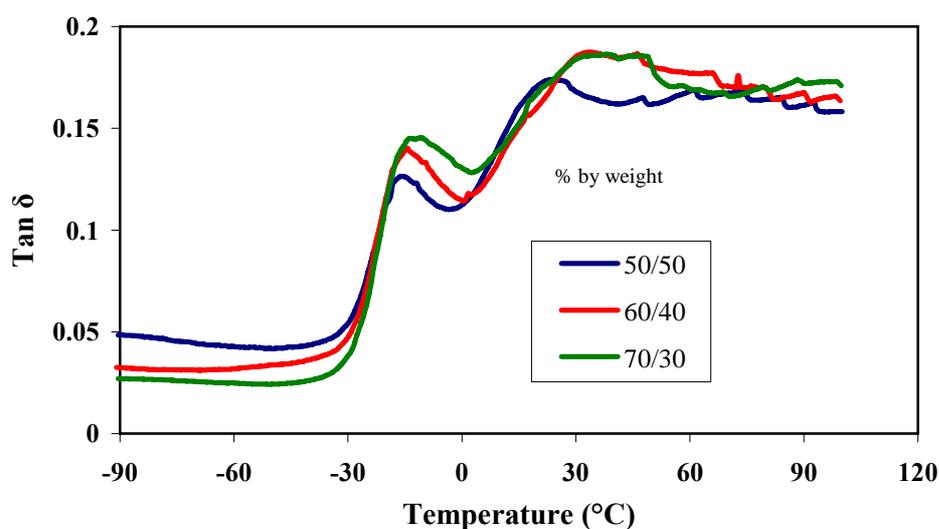
Blend ratio (% by weight)	Decomposition temperature (Td) (°C)	
	1st step	2nd step
50/50	410	470
60/40	403	475
70/30	400	475

จากรูปที่ 5.40 – 5.41 แสดงเทอร์โมแกรม TGA ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เริ่มมีการสลายตัวตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 200°C โดยสารที่เกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมินี้เป็นสารที่สามารถระเหยได้ง่าย เช่น น้ำมัน เป็นต้น เมื่อพิจารณาจากกราฟ DTG ในรูปที่ 6.41 จะเห็นพีคการสลายตัวอย่างชัดเจน 2 พีค โดยพีคแรกเป็นส่วนของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA เกิดการสลายตัว เนื่องจากในโครงสร้างมีส่วนของพันธะคู่ทำให้เกิดการสลายตัวก่อนพอลิโพรไพลีน โดยพบว่า เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นอุณหภูมิการสลายตัวจะลดลง ส่วนช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของพอลิโพรไพลีนซึ่งสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 470 °C

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์อย่างต่อพลาสติกที่ 50/50, 60/40 และ 70/30 % โดยน้ำหนัก ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง DMTA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.42 – 5.43 และตารางที่ 5.10



รูปที่ 5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสสะสมกับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์อย่างต่อพลาสติก



รูปที่ 5.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก

ตารางที่ 5.10 ค่า T_g ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก

ENR-25/EVA/PP ratio	T_{g1} , °C	T_{g2} , °C
50/50	-16	23
60/40	-14	34
70/30	-10	38

จากรูปที่ 5.42 – 5.43 พบว่า ค่ามอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์เบลนด์ (ENR-25/EVA) ซึ่งจะเป็นกลาสทรานซิชัน (T_g) ของยางเบลนด์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็นช่วงกลาสทรานซิชันของพอลิโพรไพลีนซึ่งสัมพันธ์กับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีเฟสยางและเฟสพลาสติก โดยค่ามอดูลัสสะสมมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลมาจากเมื่ออุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของโมเลกุลได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาค่า T_g พบว่า มีการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วง โดยช่วงแรกเป็น T_g ยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยยาง ENR-25 ค่า T_g เท่ากับ -47°C ส่วน EVA ค่า T_g เท่ากับ -6°C โดยค่า T_g ในช่วงแรกจะอยู่ระหว่าง T_g ของ ยาง ENR-25 และ EVA แสดงว่า ยาง ENR-25 และ EVA สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันทำให้เข้ากันได้ดี ส่วนช่วงที่ 2 เป็น T_g ของพอลิโพรไพลีน

5.3.4 อิทธิพลของชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/EVA/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนยางต่อพลาสติก เท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA ปริมาณ

5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน กำหนดให้ใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ คือ DCP = 1.0 phr และ TMPTMA 7.5 phr โดยใช้ไขมัน A-20 ปริมาณ 30 phr ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.3.4 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง สมบัติพลวัตเชิงกล และลักษณะสัญญาณวิทยาได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

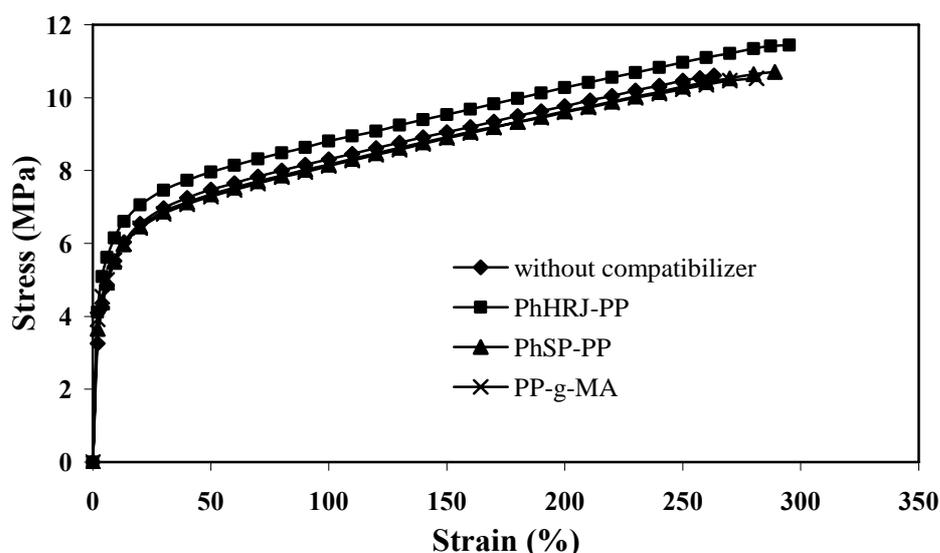
5.3.4.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก โดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

Types of compatibilizer	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
Without compatibilizer	10.62±0.17	264±2.65	87.0±1.147	37.0±0.58	2261.85
PhHRJ-PP	11.44±0.04	295±2.08	84.5±1.44	33.5±0.58	2757.00
PhSP-PP	10.92±0.15	289±2.08	86.0±1.70	34.0±1.32	2502.13
PP-g-MA	10.53±0.03	281±3.00	84.0±1.06	34.0±0.58	2374.49

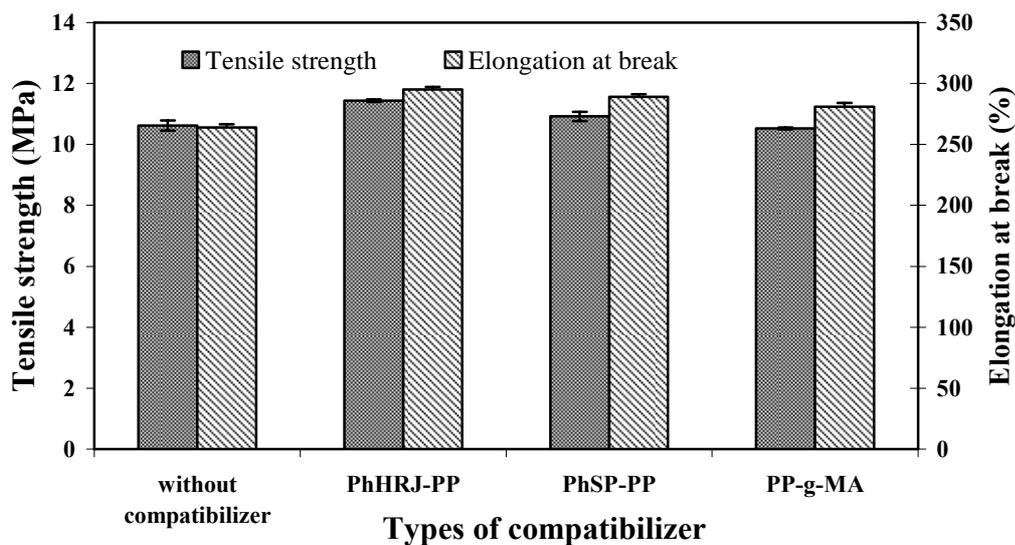
ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแสดงดังรูปที่ 5.44



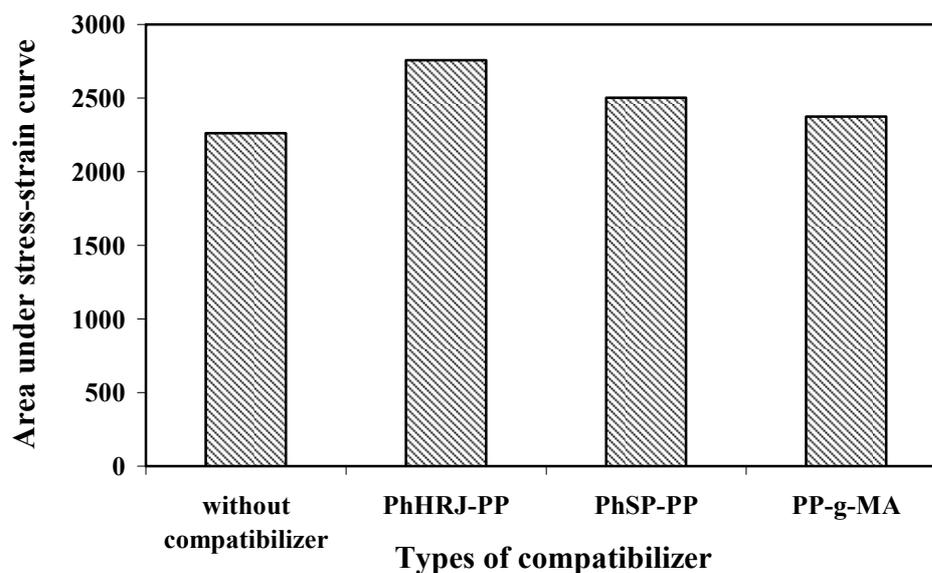
รูปที่ 5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคานซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 5.44 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคานซ์ ENR-25/EVA/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้มีพื้นที่ใต้กราฟ คือ ความเหนียว(Toughness) สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคานซ์ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ทั้งนี้เนื่องจากสารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสยาง (ENR-25 และ EVA) และเฟสพลาสติก (PP) มากขึ้น (ปญญาณิช, 2552) ทำให้การส่งผ่านแรงระหว่างเฟสมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคานซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้มีสมบัติเชิงกลสูงขึ้นด้วย โดยสารเพิ่มความเข้าได้จะแทรกอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เบลนด์ ทำหน้าที่คล้ายสารลดแรงตึงผิว ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของสารเพิ่มความเข้ากันได้จะมีส่วนประกอบทางเคมีหรือส่วนของโมเลกุลเหมือนหรือคล้ายกับพอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์ (Datta and Lohse, 1996) การใช้ PhHRJ-PP และ PhSP-PP เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้จะมีส่วนของพอลิโพรไพลีนที่เข้ากันได้กับพอลิโพรไพลีน และส่วนของหมู่เมทิลลอลสามารถเข้ากับยางเบลนด์ ENR-25/EVA ส่วนสารเพิ่มความเข้ากันได้ PP-g-MA นั้นส่วนของพอลิโพรไพลีนที่เข้ากันได้กับพอลิโพรไพลีน ในขณะที่ส่วนที่เป็นมาลิกแอนไฮไดรด์สามารถเข้ากับยางเบลนด์ ENR-25/EVA ได้จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคานซ์ที่มีสารเพิ่มความเข้าได้มีสมบัติดีกว่าที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคานซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 5.45 – 5.46



รูปที่ 5.45 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

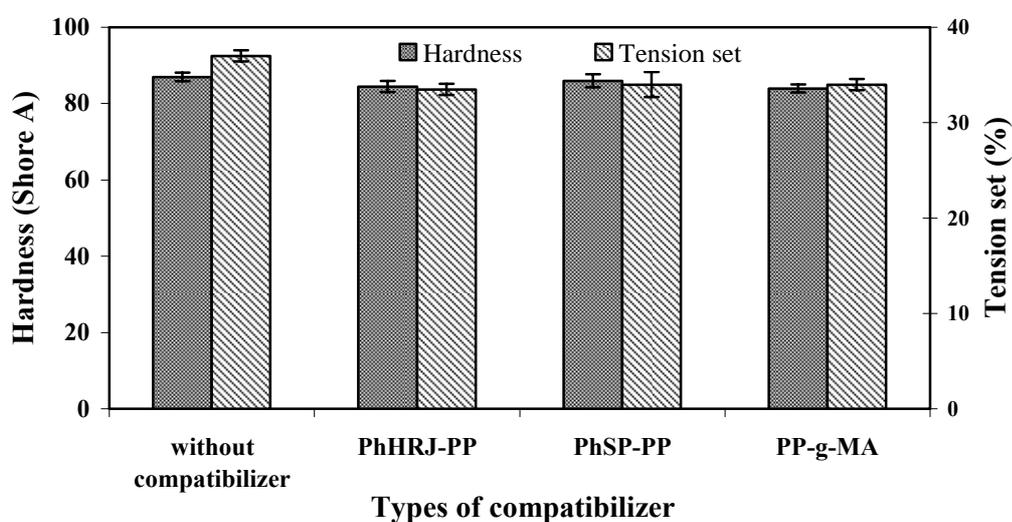


รูปที่ 5.46 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 5.45 – 5.46 พบว่า การใช้ PhHRJ-PP เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด เนื่องจากสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดนี้สามารถเข้าไปเชื่อมประสานระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกได้ดีกว่า PhSP-PP และ PP-g-MA และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ตามลำดับ ทำให้เฟสยางและพลาสติกเข้ากันได้ดีขึ้น ส่วนค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP พบว่า การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติดังกล่าวดีกว่าไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ เนื่องจากสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA ทำหน้าที่เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสและลดแรงดึงผิวระหว่างเฟสยางและพลาสติกจึงทำให้เทอร์โม

พลาสติกวัลคาไนซ์สามารถยืดได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกัน กล่าวคือ การใช้ PhHRJ-PP เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีพื้นที่ใต้กราฟสูงที่สุด เนื่องจากสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดนี้สามารถเข้าไปเชื่อมประสานระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกได้ดีกว่า PhSP-PP และ PP-g-MA และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ตามลำดับ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้ค่าความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงดังรูปที่ 5.47



รูปที่ 5.47 ค่าความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 6.47 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ จะมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน เนื่องจากความแข็งขึ้นอยู่กับเฟสพลาสติกพอลิโพรไพลีนเป็นหลัก แสดงว่าชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็ง ส่วนค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะมีความสามารถในการคืนรูปร่างเดิมได้ดีกว่าไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ แสดงให้เห็นว่า การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะช่วยปรับปรุงสมบัติทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความเป็นยางมากขึ้น เนื่องจากสารเพิ่มความเข้ากันได้จะเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสยางและเฟสพลาสติก โดยการใช้ PhHRJ-PP มีการเสียรูปอย่างถาวรภายหลังการยืดดีกว่า PhSP-PP และ PP-g-MA ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้ PhHRJ-PP เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำให้เฟสยางวัลคาไนซ์มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดซึ่งสังเกตได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยา (สกุสร์ตัน, 2551)

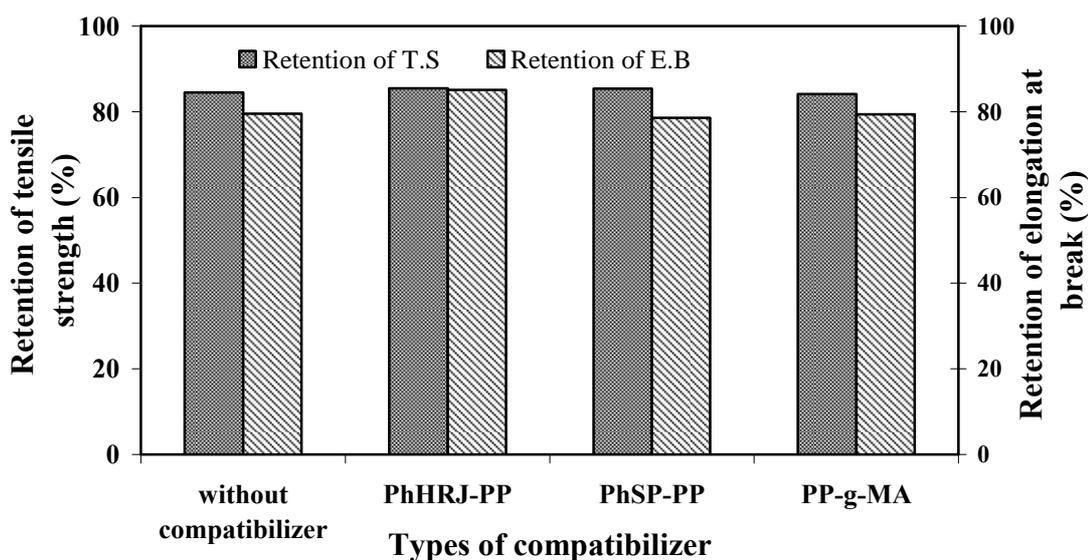
5.3.4.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

Types of compatibilizer	Retention of Tensile strength (%)	Retention of Elongation at break (%)
Without compatibilizer	84.56	79.55
PhHRJ-PP	85.49	85.08
PhSP-PP	85.44	78.55
PP-g-MA	84.14	79.36

จากตารางที่ 5.12 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.48



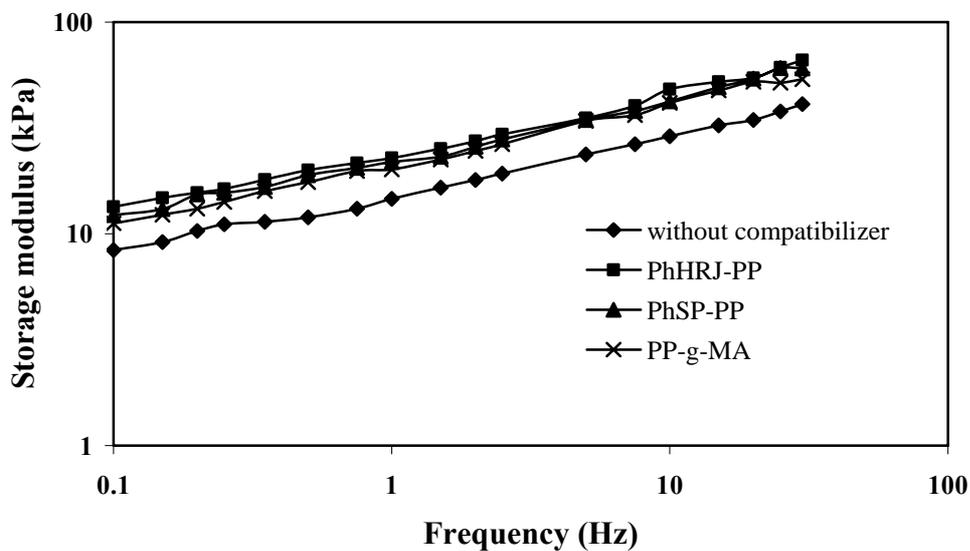
รูปที่ 5.48 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 6.48 พบว่า การใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานต่อแรงดึงขึ้นอยู่กับเฟสพลาสติกหรือพอลิโพรไพลีนเป็นหลัก และโครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรไพลีนไม่มีพันธะคู่ ทำให้มีความทนทานต่อการออกซิเดชัน ส่วนค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP พบว่า การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PhHRJ-PP จะให้ผลดีกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดอื่นๆและไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดดังกล่าว ทำให้ทั้งเฟสยางและพลาสติกมีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้นดังลักษณะทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 5.97 ส่งผลให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นและแรงกระทำระหว่างเฟสยางกับพลาสติกที่แข็งแรงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกทนต่อการออกซิเดชัน

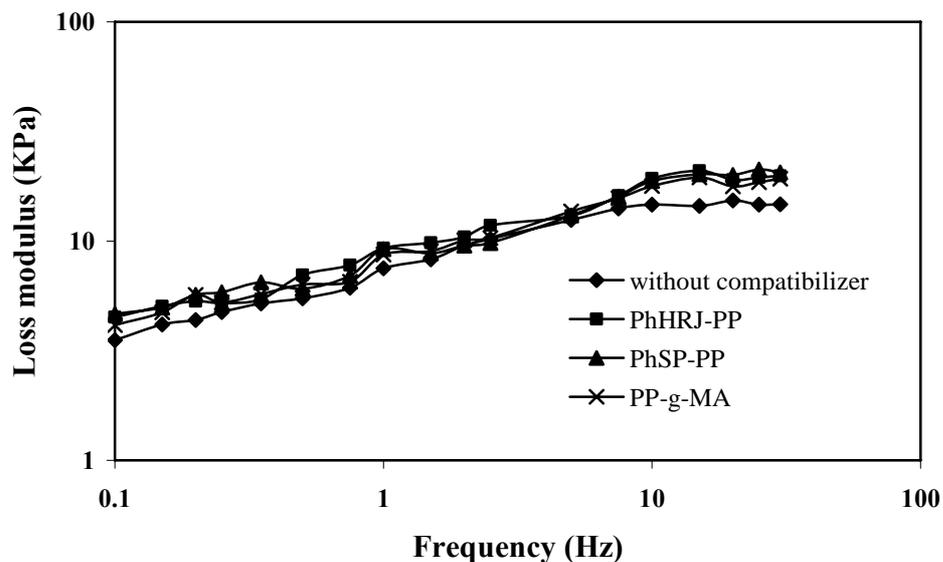
ดีกว่า โดยที่การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP มีค่าความสามารถในการยึดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงดีกว่าใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PP-g-MA ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PhSP-PP

5.3.4.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

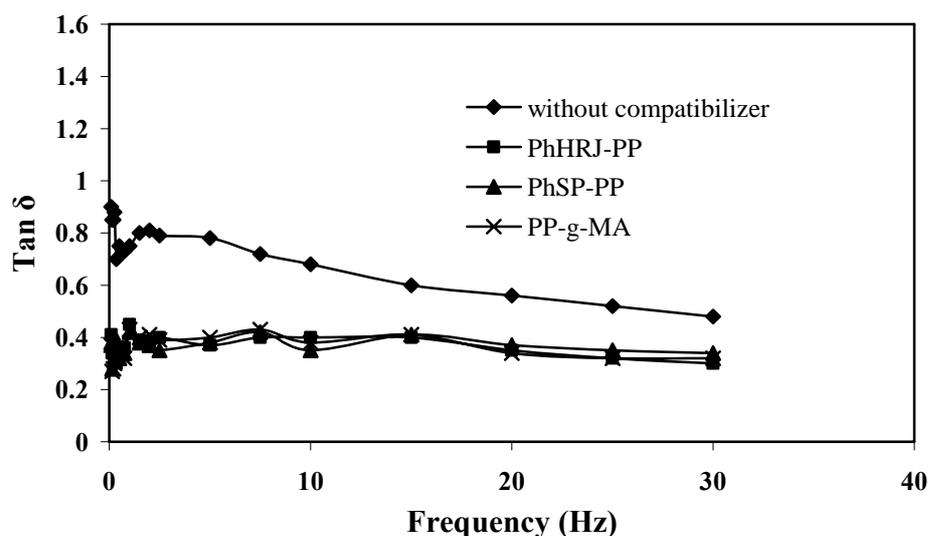
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ด้วยเครื่อง MDPT โดยทดสอบแบบแปรความถี่ระหว่าง 0.1-30 Hz ที่อุณหภูมิ 180°C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.49 – 5.52



รูปที่ 5.49 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

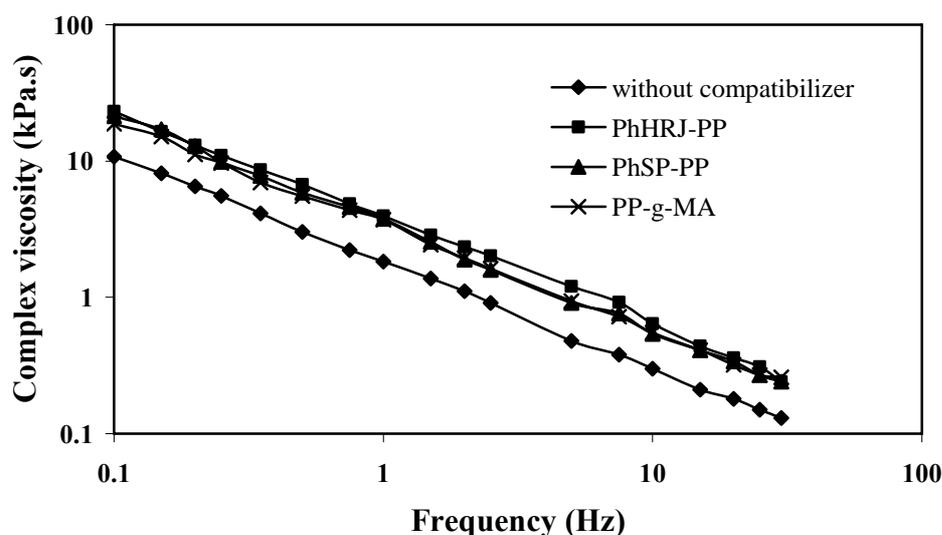


รูปที่ 5.50 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 5.51 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 5.49 – 5.51 พบว่า มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความถี่ เมื่อพิจารณาที่ความถี่ระดับเดียวกัน พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP มีค่ามอดูลัสสะสมสูงกว่า PhSP-PP และ PP-g-MA ตามลำดับ และพบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้มีมอดูลัสสะสมสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ แสดงให้เห็นว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเฟสพอลิโพรพิลีนกับเฟสยางเบลนด์ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันและมีความเข้ากันได้มากขึ้น (ซีตีไซยิตซ์, 2548) โดยสารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำให้ผิวประจัญ (interface) มีแรงยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น ทำให้ความหนาของผิว (interfacial thickness) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การส่งผ่านแรงหรือความเค้น (stress transfer) ระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่องมีประสิทธิภาพมากขึ้น (สกุลรัตน์, 2551) ส่วนค่า Tan δ ให้ผลสอดคล้องกับมอดูลัสสะสม กล่าวคือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้มีค่า Tan δ ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งค่า Tan δ แสดงถึงความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยค่า Tan δ ต่ำจะมีความยืดหยุ่นมาก แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้มีความยืดหยุ่นน้อยกว่ากรณีที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้

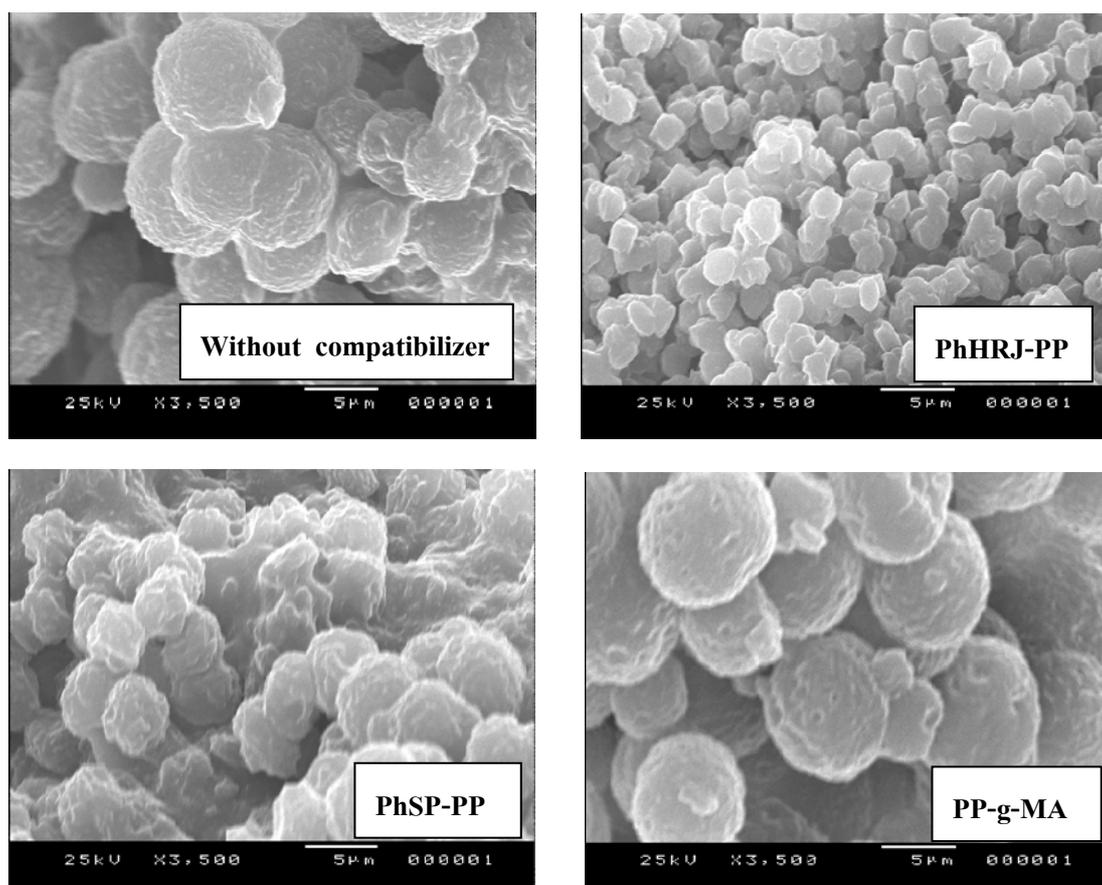


รูปที่ 5.52 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกโพลีโพรพิลีน ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 5.52 พบว่า ค่าความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกโพลีโพรพิลีน ENR-25/EVA/PP ที่ไม่ใส่และใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดต่างๆ มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความถี่ในการทดสอบหรือมีพฤติกรรมแบบลดแรงเฉือน เมื่อเปรียบเทียบความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่า เทอร์โมพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 3 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่เทอร์โมพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้มีค่าความหนืดเชิงซ้อนน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP, PhSP-PP และ PP-g-MA จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกให้แรงยึดเหนี่ยวและความเข้ากันได้มากขึ้น ทำให้เทอร์โมพลาสติกโพลีโพรพิลีนไหลได้ยากขึ้น

5.3.4.4 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกโพลีโพรพิลีน ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

วิเคราะห์สัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกโพลีโพรพิลีนจากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ เปรียบเทียบกับไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.53



รูปที่ 5.53 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 5.53 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ มีลักษณะเฟสยางวัลคาไนซ์กระจายอยู่ในเฟสพลาสติกได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ และพบว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PhHRJ-PP ทำให้การกระจายของเฟสยางวัลคาไนซ์ในเฟสพลาสติกมีความสม่ำเสมอมากกว่าและมีขนาดอนุภาคของเฟสยางวัลคาไนซ์เล็กกว่าการใช้ PhSP-PP และ PP-g-MA แสดงให้เห็นว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างเฟสของพอลิโพรไพลีนกับเฟสยางทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวและมีความเข้ากันได้มากขึ้นโดยที่สารเพิ่มความเข้ากันได้ทำให้ผิวประจัญมีแรงยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง มอดูลัสสะสม และความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ PhHRJ-PP เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้มีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดอื่นๆ

5.3.5 อิทธิพลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/EVA/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ดังนี้ คือ 0, 3, 5, 7 และ 9% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน กำหนดให้ใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ คือ DCP= 1.0 phr และ

TMPTMA 7.5 phr และใช้น้ำมัน A-20 ปริมาณ 30 phr ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.3.5 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง และสมบัติพลวัตเชิงกล ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

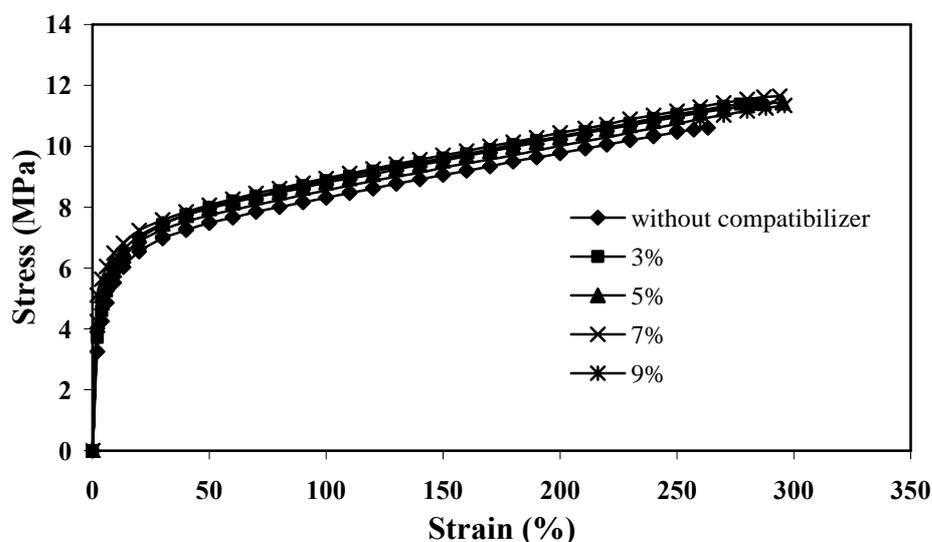
5.3.5.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/EVA/PP โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ที่ปริมาณ 0, 3, 5, 7 และ 9% โดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน ได้ผลดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้

Quantities of PhHRJ-PP (%wt. PP)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
0	10.62±0.17	264±2.65	87.0±1.14	37.0±0.58	2261.85
3	11.41±0.13	284±16.20	85.0±1.14	35.0±0.87	2637.85
5	11.44±0.04	295±2.08	84.5±1.44	33.5±0.58	2757.00
7	11.47±0.13	294±3.51	86.5±1.34	33.0±0.29	2795.56
9	11.19±0.21	296±14.05	87.0±1.58	33.0±0.58	2698.37

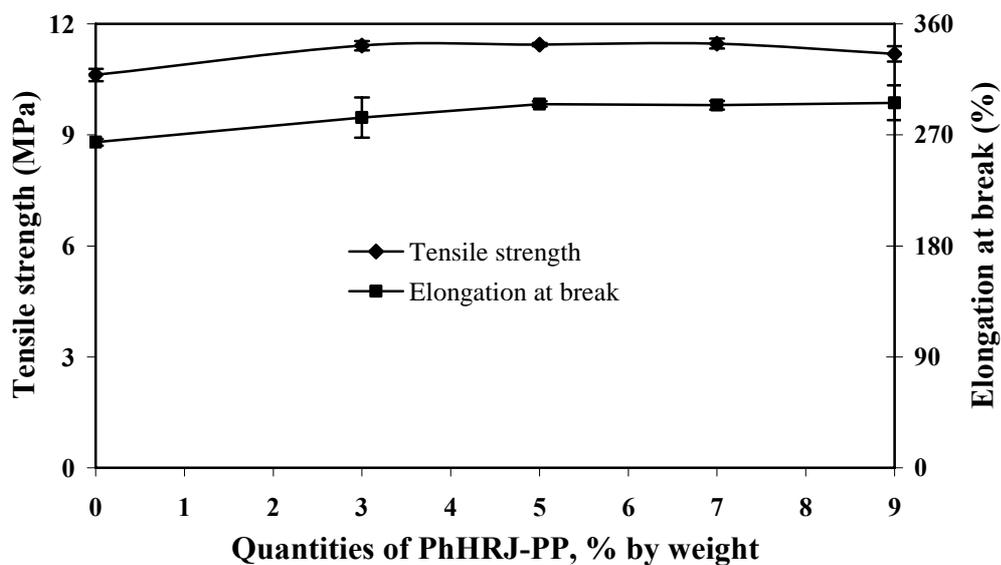
ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแสดงดังรูปที่ 5.54



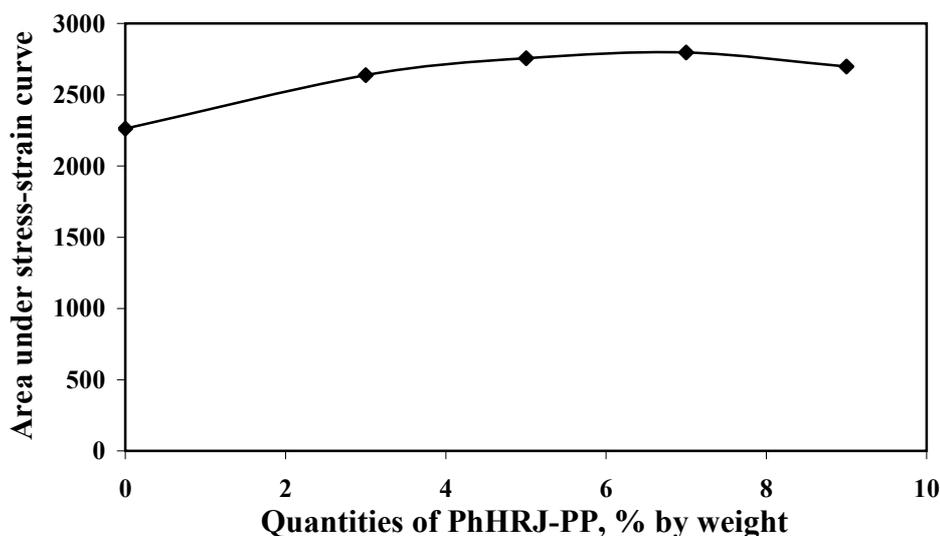
รูปที่ 5.54 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 5.54 พบว่า การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีค่าความเค้นกับความเครียด หรือพฤติกรรมตอบสนองต่อแรงดึงดีกว่ากรณีไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ทำให้ความสามารถในการยืดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งพิจารณาจากระยะยืดมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำให้เฟสของยางกับพลาสติกเกิดแรงกระทำระหว่างกันทำให้ความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น และพบว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 7 และ 9% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน ไม่ส่งผลทำให้สมบัติดังกล่าวข้างต้นของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 5.55 – 5.56



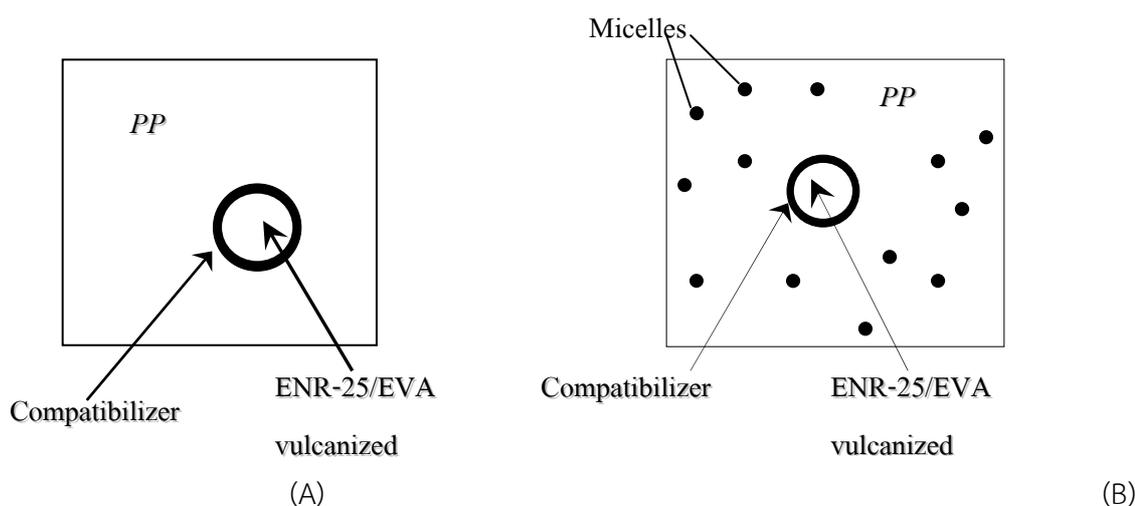
รูปที่ 5.55 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 5.56 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้

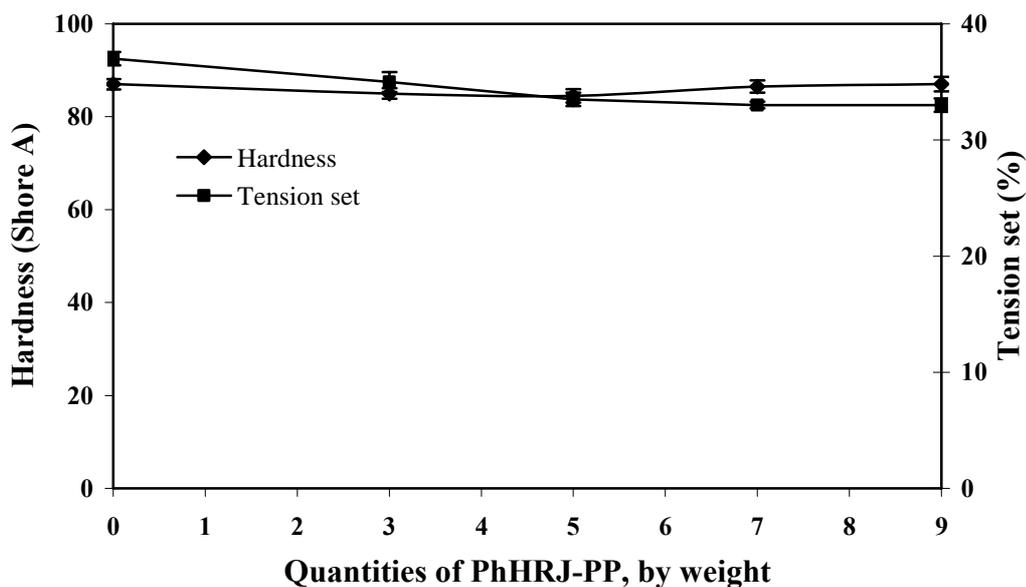
จากรูปที่ 5.55 – 5.56 พบว่า เมื่อปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ในการเบลนด์สถานะหลอมจะทำให้สารเพิ่มความเข้ากันได้ไปเคลือบที่ผิวประจัญ (interface) ระหว่างเฟสของยางและพลาสติกโดยที่ส่วนโมเลกุลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วคือ หมู่ไฮดรอกซิล และส่วนที่ไม่มีขั้วคือ โมเลกุลพอลิโพรพิลีน ซึ่งทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันแล้วทำให้การส่งผ่านความเค้นระหว่างเฟสทั้งสองมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ยังส่งผลให้ลดแรงดึงผิวระหว่างเฟส (interfacial tension) เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิว (interfacial adhesion) ดังนั้นการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีความสามารถในการเกิดแรงกระทำระหว่างผิวประจัญมากกว่าจะมีผล

ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น จากการทดลองการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP จนถึงปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีนจะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP มากกว่านี้ ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยึดจนขาด มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มาก เป็นผลมาจากการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณมากกว่า 5 % wt ของพอลิโพรไพลีน เป็นค่าที่สูงกว่าจุดวิกฤตของความเข้มข้นไมเซลล์ (critical micelle concentration, CMC) โดยที่จุดดังกล่าวสารเพิ่มความเข้ากันได้จะมีปริมาณมากเกินไปที่จะเคลือบที่บริเวณผิวประจัญระหว่างเฟสทั้งสองจึงมีการแยกตัวเกาะกันเองเป็นไมเซลล์ซึ่งเป็นเฟสที่ 3 เกิดขึ้นในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จึงทำให้สารเพิ่มความเข้ากันได้ส่วนที่เหลือไม่ได้ทำหน้าที่ช่วยประสานระหว่างเฟสยางและพลาสติกแต่จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (lubricant) แทนจึงทำให้สมบัติมีแนวโน้มลดลง (สกุลรัตน์, 2551) ปรากฏการณ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.57 จึงสรุปได้ว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดทำให้เกิดการเชื่อมประสานระหว่างเฟสของยางกับพลาสติกได้ดีที่สุด เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้อ่อนตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกัน กล่าวคือ พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP



รูปที่ 5.57 ลักษณะการทำหน้าที่ของสารเพิ่มความเข้ากันได้ในพอลิเมอร์เบลนด์ เมื่อมีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณพอดี (A) เปรียบเทียบกับกรณีใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณมากเกินไป (B) (ดัดแปลงจาก Nakason, *et al.*, 2006b)

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้ค่าความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงดังรูปที่ 5.58



รูปที่ 5.58 ค่าความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 5.58 พบว่า ค่าความแข็งเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีค่าไม่ต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความแข็งมีอิทธิพลมาจากเฟสพอลิโพรพิลีน ดังนั้นปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ไม่ส่งผลต่อความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ ส่วนค่าการผิดรูปถาวรจะลดลงตามปริมาณการเพิ่มสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP จนถึงปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลในทำนองเดียวกันกับความต้านทานต่อแรงดึง เมื่อเพิ่มปริมาณ PhHRJ-PP มากกว่านี้จะมีแนวโน้มของสมบัติดังกล่าวอ่อนข้างคงที่

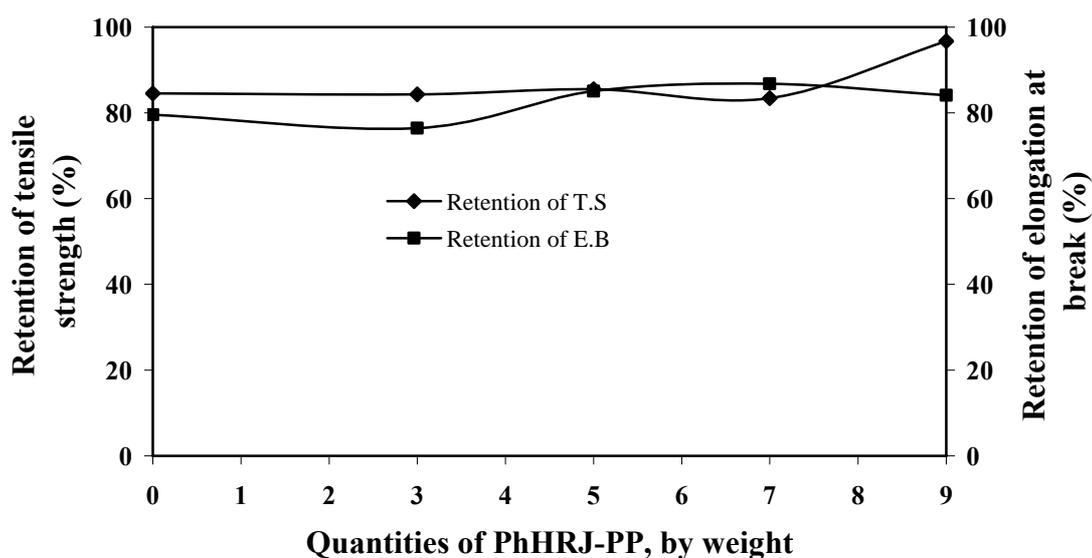
5.3.5.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณ PhHRJ-PP ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP

Quantities of PhHRJ-PP (% wt. PP)	Retention of Tensile strength (%)	Retention of Elongation at break (%)
0	84.56	79.55
3	84.31	76.41
5	85.49	85.08
7	83.44	86.73
9	96.69	84.12

จากตารางที่ 5.14 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.59

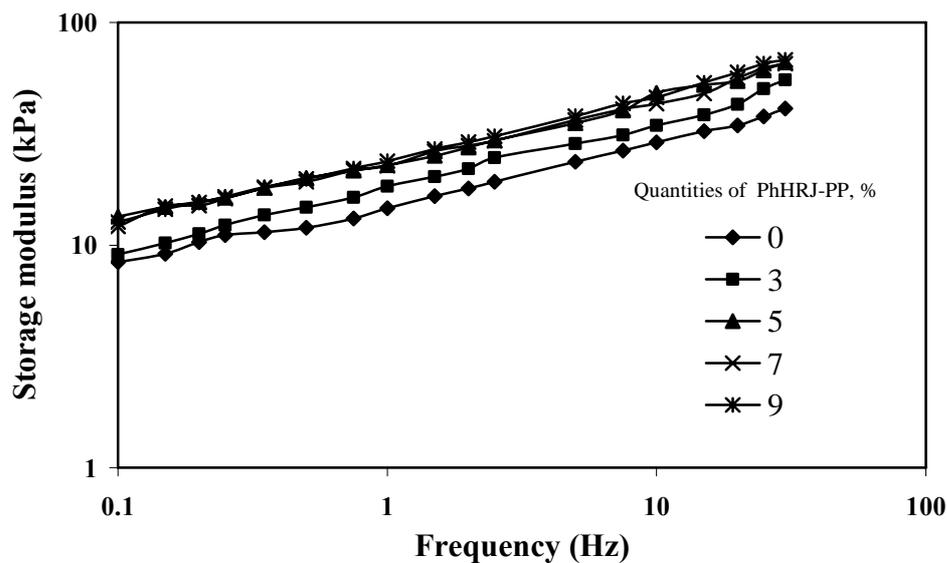


รูปที่ 5.59 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างๆ

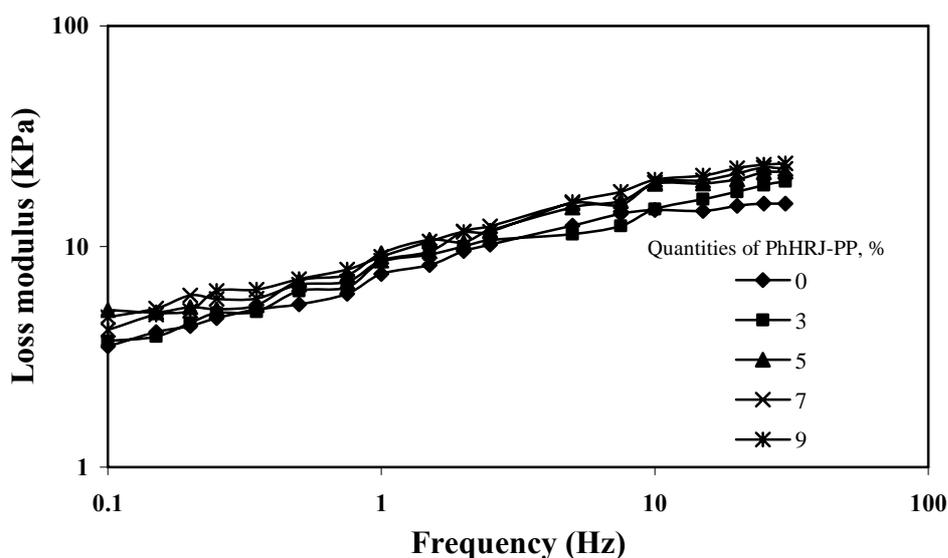
จากรูปที่ 5.59 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP เนื่องจากใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างผิวประจัญของเฟสยางและเฟสพลาสติกได้มากขึ้นโดยการใส่ปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังการบ่มแรงน้อยลง แสดงว่าทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทนต่อการออกซิเดชันมากขึ้น

5.3.5.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ปริมาณต่างๆ

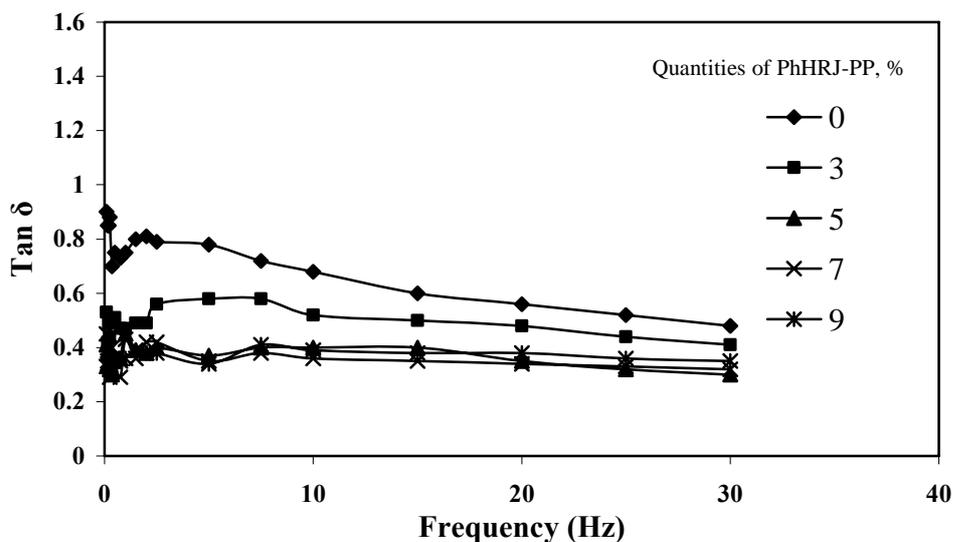
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรปริมาณ PhHRJ-PP ด้วยเครื่อง MDPT โดยทดสอบแบบแปรความถี่ระหว่าง 0.1-30 Hz ที่อุณหภูมิ 180°C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.60 – 5.63



รูปที่ 5.60 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP

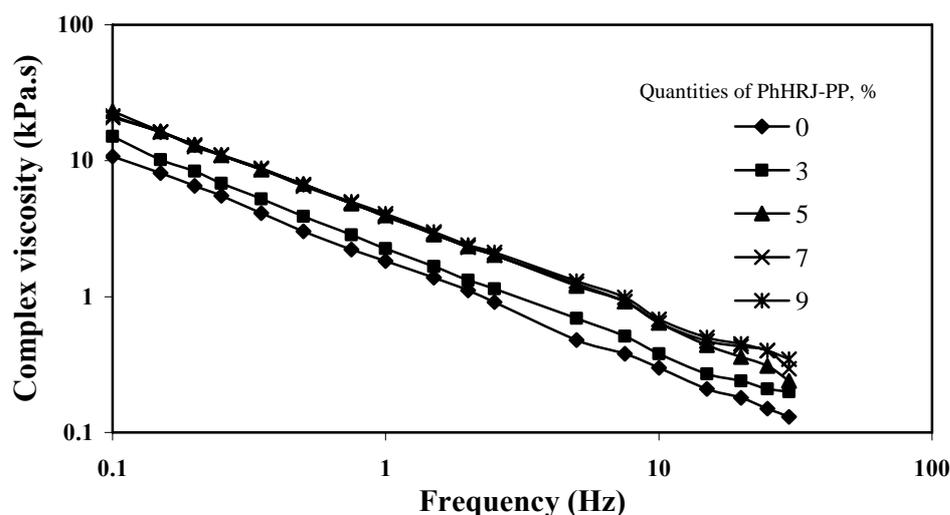


รูปที่ 5.61 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP



รูปที่ 5.62 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP

จากรูปที่ 5.60 – 5.62 พบว่า มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ทุกปริมาณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความถี่ในการทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสสะสมที่ความถี่ระดับเดียวกัน พบว่า สมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้จนถึงปริมาณ 5% โดยน้ำหนักพอลิโพรไพลีน ซึ่งปริมาณดังกล่าวเป็นปริมาณเหมาะสมที่ทำให้สารเพิ่มความเข้ากันได้เคลือบที่ผิวประจัญระหว่างเฟสยางและพลาสติกได้ในปริมาณพอดี ดังนั้นสารเพิ่มความเข้ากันได้ทำให้เกิดแรงกระทำทางเคมีระหว่างเฟสพอลิโพรไพลีนและเฟสของยางเบลดได้ดีที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP มากกว่า 5% โดยน้ำหนักพอลิโพรไพลีนไม่มีผลทำให้ค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น ส่วนค่า Tan δ จะสอดคล้องกับค่ามอดูลัสสะสม นอกจากนี้พบว่า การใช้ PhHRJ-PP ปริมาณ 5, 7 และ 9 % โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีนทำให้ได้ Tan δ มีค่าต่ำซึ่งค่าใกล้เคียงกันแสดงถึงเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดี



รูปที่ 5.63 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP

จากรูปที่ 5.63 พบว่า ค่าความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ที่ปริมาณ 0-9% โดยน้ำหนักพอลิโพรไพลีน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของการทดสอบหรือมีพฤติกรรมแบบลดแรงเฉือน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่เดียวกัน พบว่า ความหนืดเชิงซ้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้น โดยการใช้ปริมาณ 5, 7 และ 9 % โดยน้ำหนักพอลิโพรไพลีน มีค่าความหนืดเชิงซ้อนใกล้เคียงกันโดยให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกันกับสมบัติเชิงกลและมอดูลัสสะสม

5.3.6 อิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์ที่มีผลต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/EVA/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PhHRJ-PP ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิโพรไพลีน กำหนดให้ใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ คือ DCP = 1.0 phr และ TMPTMA 7.5 phr และใช้น้ำมัน A-20 ปริมาณ 30 phr ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.3.6 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง สมบัติพลวัตเชิงกล ลักษณะสัญญาณวิทยา และสมบัติเชิงความร้อน ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

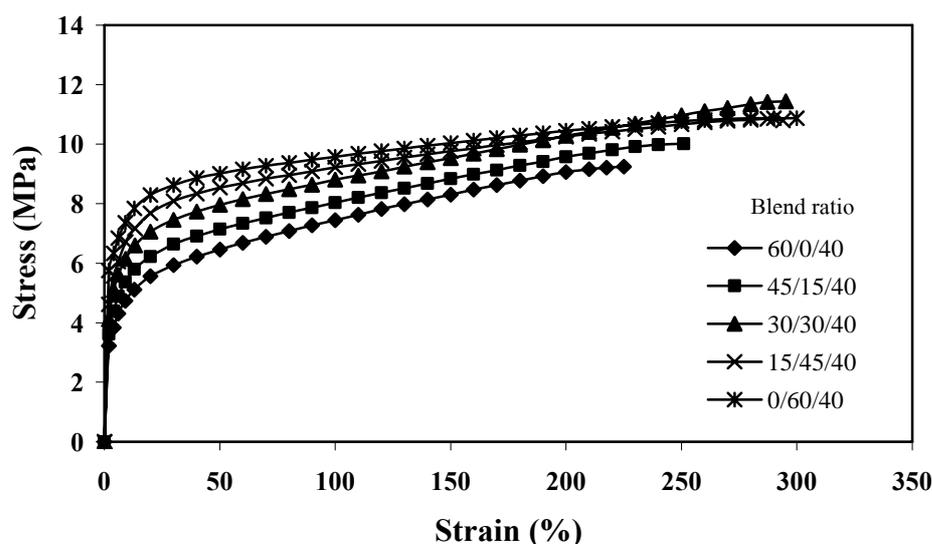
5.3.6.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติกเท่ากับ 60/40 % โดยน้ำหนัก โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ดังนี้ คือ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 % โดยน้ำหนัก ได้ผลดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA

ENR-25/EVA/PP ratio % by weight	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
60/0/40	9.25±0.29	225±6.66	83.0±0.71	27.5±0.87	1680.13
45/15/40	10.03±0.18	251±5.13	84.0±1.48	32.5±0.58	2070.19
30/30/40	11.44±0.04	295±2.08	84.5±1.44	33.5±0.58	2757.00
15/45/40	10.85±0.23	294±3.61	87.0±1.58	57.5±1.44	2792.11
0/60/40	10.87±0.25	300±10.39	89.0±2.41	62.5±1.44	2945.92

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วน ENR-25/EVA ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแสดงดังรูปที่ 5.64

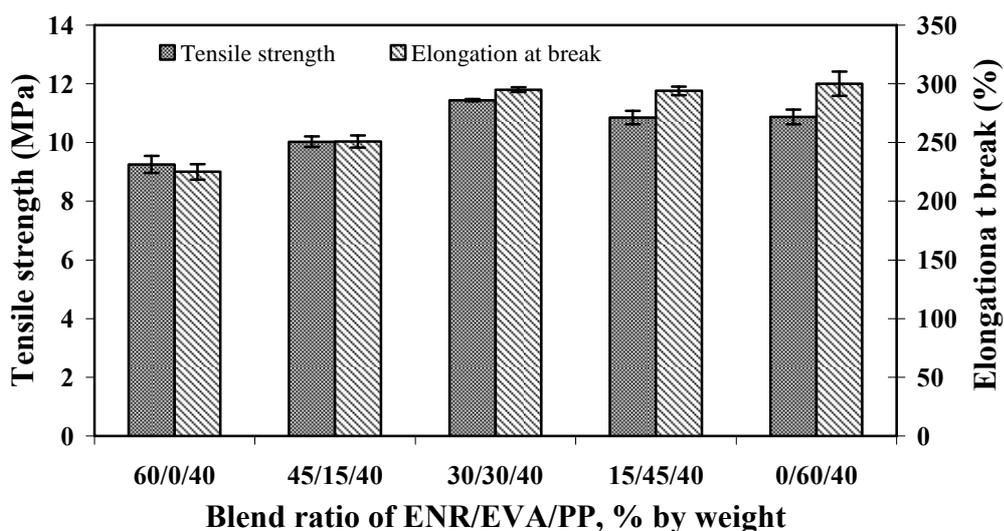


รูปที่ 5.64 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA

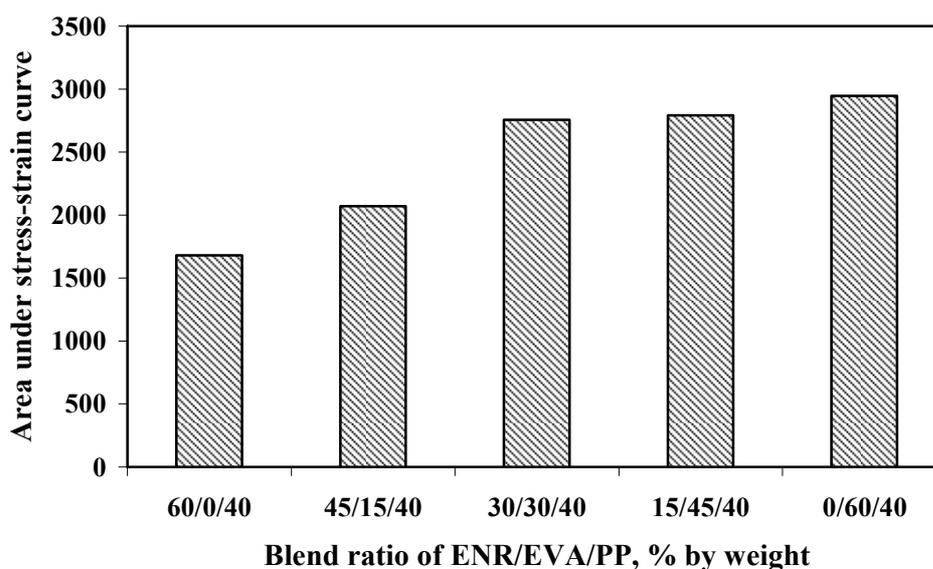
จากรูปที่ 5.64 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ มีพฤติกรรมการผิดรูปที่ต่างกันออกไป โดยเมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟซึ่งบ่งบอกถึงความเหนียวทน (Toughness) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเพิ่มขึ้นหรือความเหนียวทนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟจะพบว่า ค่ามอดูลัสมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีส่วนของพอลิเอทิลีนซึ่งสามารถเกิดผลึกได้ (Crystalline hard segments) ซึ่งจะส่งผลโดยตรงให้ค่าความเค้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเครียด ซึ่ง Varghese *et al.* (1995) และ Mohamad *et al.* (2005) ค้นพบในลักษณะเดียวกันโดยพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ EVA ในการเบลนด์ระหว่าง ENR-50/EVA ส่งผลให้ยางเบลนด์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในทาง

กลับกันการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์มากขึ้น มีผลให้ลดความเป็นระเบียบหรือลดการตกผลึกของเอทิลีนไวโนลอะซิเตท (วิสทุรี่, 2552) เมื่อมีปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์มากขึ้นจึงส่งผลโดยตรงให้มอดูลัสลดลง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ระหว่าง ENR-25/EVA ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 5.65 – 5.66



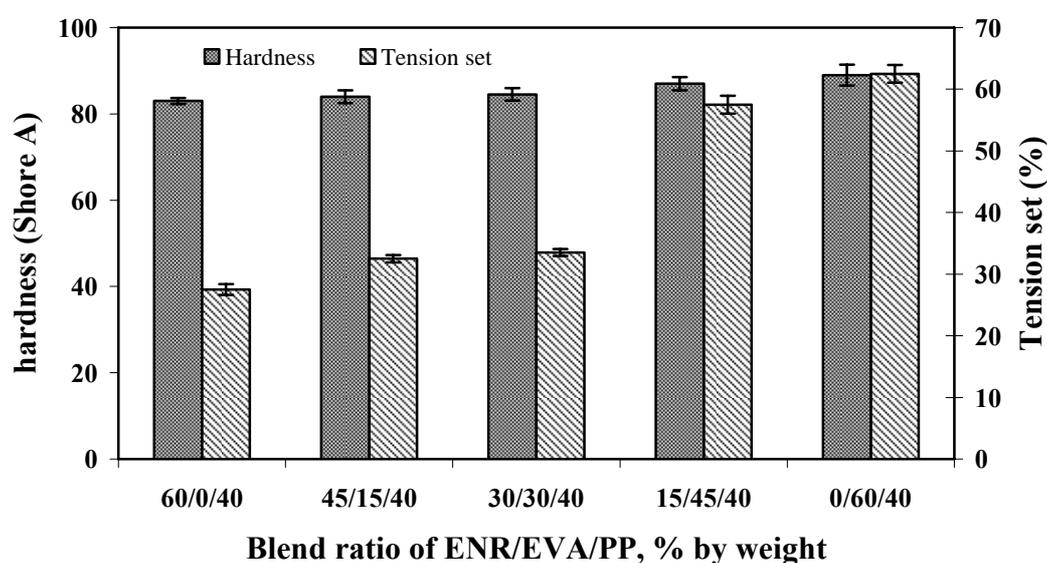
รูปที่ 5.65 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ



รูปที่ 5.66 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 5.65 – 5.66 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตท โดยเอทิลีนไวนิลอะซิเตทแสดงสมบัติเด่นทั้งความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตท มีหมู่ไวนิลอะซิเตทในโครงสร้างของพอลิเอทิลีน 28 mole % ซึ่งจะขัดขวางการตกผลึกของพอลิเอทิลีนบางส่วน จึงเป็นวัสดุที่มีทั้งความแข็งแรงและความสามารถในการยืดดีเยี่ยม (Harper, 2006) โดยจากการทดลองในหัวข้อ 4.1.3.3 พบว่า เอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่ผ่านการวัลคาไนซ์ (EVA vulcanized) มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด เท่ากับ 15.47 MPa และ 532 % ตามลำดับ ส่วนยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR-25 vulcanized) มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด เท่ากับ 1.26 MPa และ 254 % ตามลำดับ จะเห็นว่าเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีความแข็งแรงมากกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ ดังนั้นความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP จึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกัน กล่าวคือ พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตท

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ระหว่าง ENR-25/EVA ได้ค่าความแข็งแรงและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงดังรูปที่ 5.67



รูปที่ 5.67 ค่าความแข็งแรงและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 5.67 พบว่า ค่าความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP เพิ่มขึ้นตามปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทเป็นเทอร์โมพลาสติกจึงมีความแข็งแรงกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ โดยค่าความแข็งแรงจะสอดคล้องกับค่าโมดูลัส ส่วนค่าการผิดรูปถาวรพบว่า จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตทเนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์

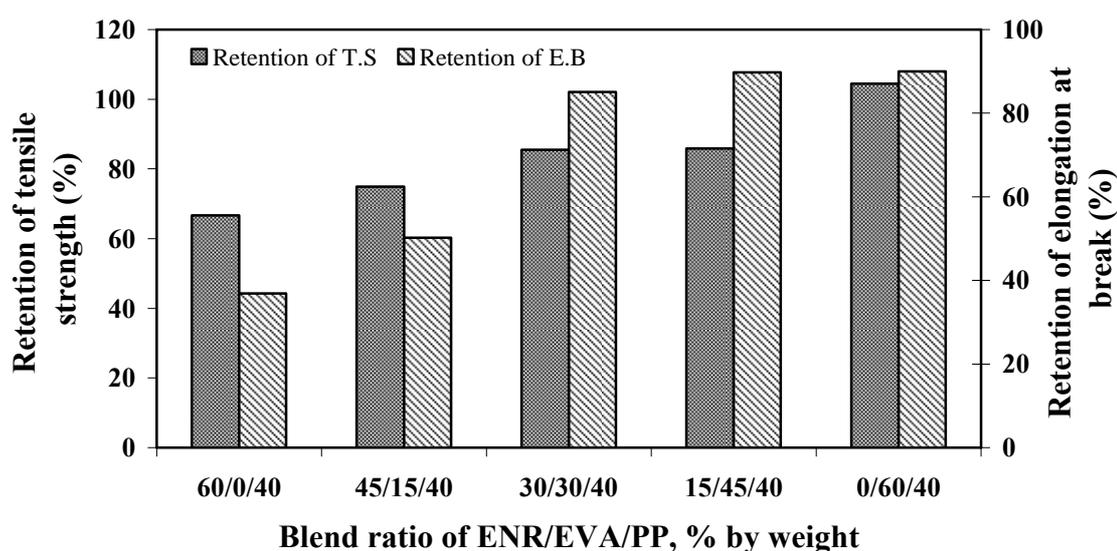
5.3.6.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วน ENR-25/EVA ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์

ENR-25/EVA/PP ratio (% by weight)	Retention of Tensile strength (%)	Retention of Elongation at break (%)
60/0/40	66.70	36.89
45/15/40	74.88	50.20
30/30/40	85.49	85.08
15/45/40	85.90	89.80
0/60/40	104.42	90.00

จากตารางที่ 5.16 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.68



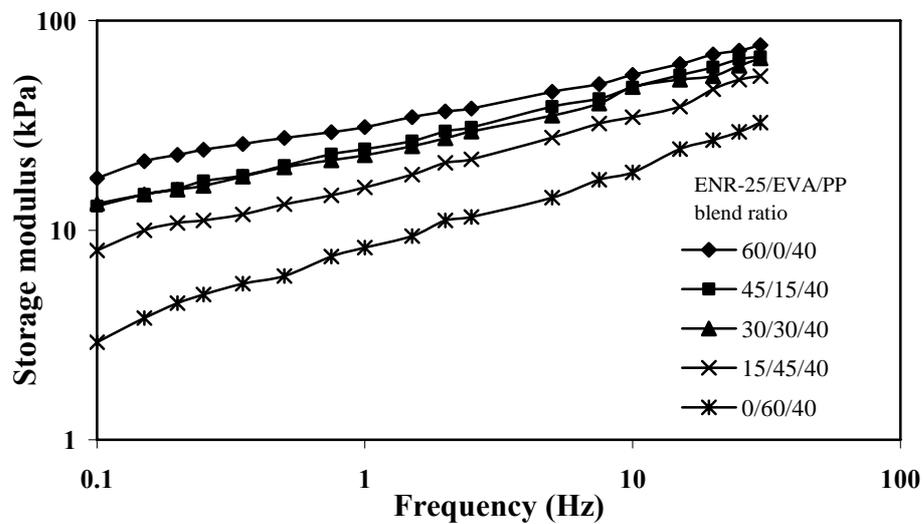
รูปที่ 5.68 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 5.68 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตททำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีสมบัติที่คงอยู่หลังการบ่มแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่หลักของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทเป็นพันธะที่อึดตัวทั้งสายโซ่ จึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนได้อย่างดีเยี่ยมเมื่อเทียบกับ

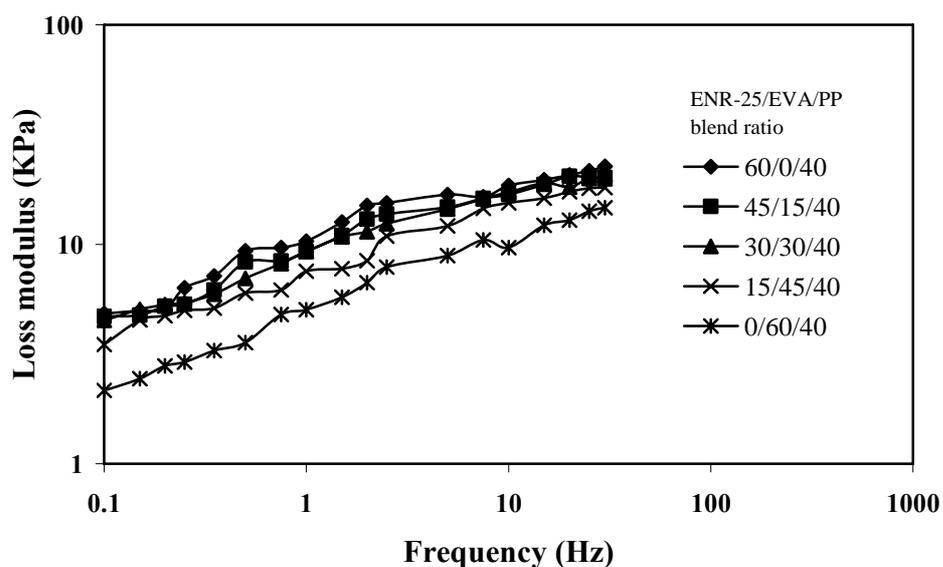
ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ดังนั้นเมื่อยางเบลนด์ ENR-25/EVA ที่มีปริมาณเอทิลีนไวโนลอะซิเตทมาก ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความทนทานต่อการออกซิเดชันได้ดีขึ้น

5.3.6.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ

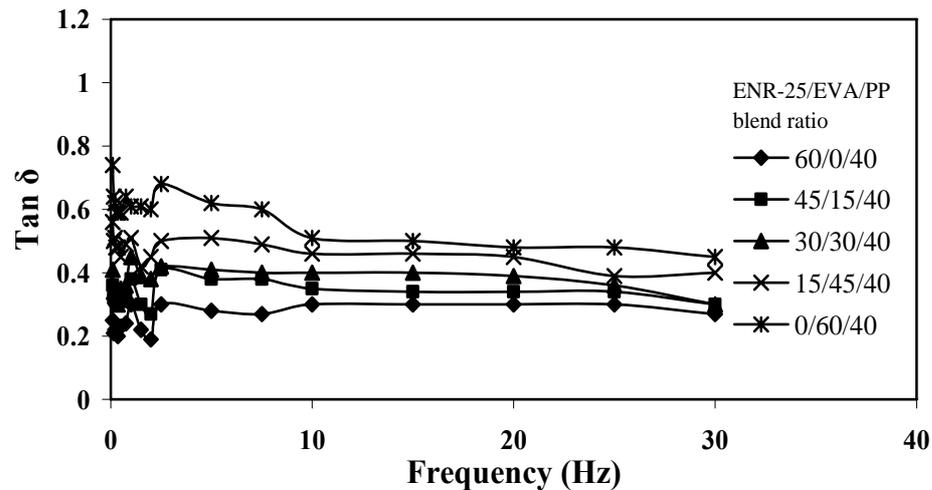
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนของ ENR-25/EVA ด้วยเครื่อง MDPT โดยทดสอบแบบแปรความถี่ระหว่าง 0.1-30 Hz ที่อุณหภูมิ 180°C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.69 – 5.72



รูปที่ 5.69 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ

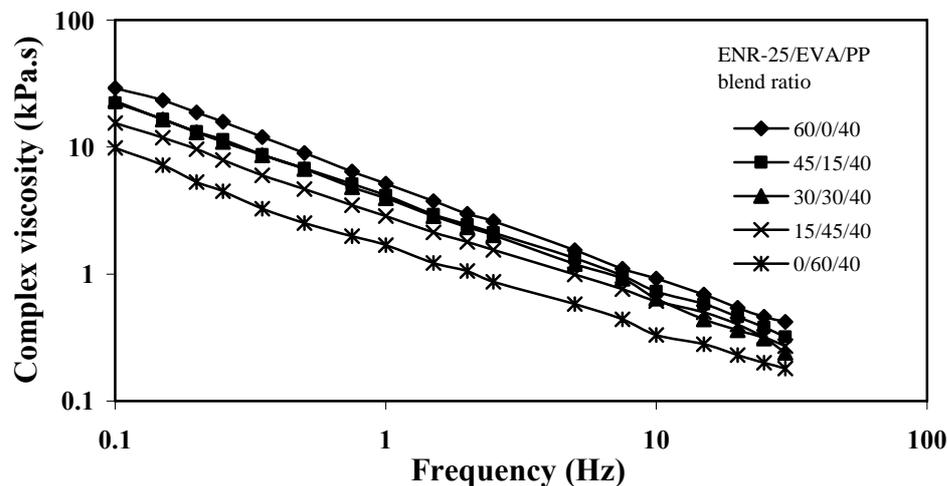


รูปที่ 5.70 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ



รูปที่ 5.71 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนยางblend ENR-25/EVA ต่างๆ

จากรูปที่ 5.69 – 5.71 พบว่า โมดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความถี่ในการทดสอบ เมื่อพิจารณาที่ความถี่ระดับเดียวกัน พบว่า ค่าโมดูลัสสะสมมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเอทิลีนส่วนใหญ่ จึงมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกสามารถไหลได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนและมีความยืดหยุ่นลดลงสอดคล้องกับค่า Tan δ ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีความยืดหยุ่นต่ำเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์

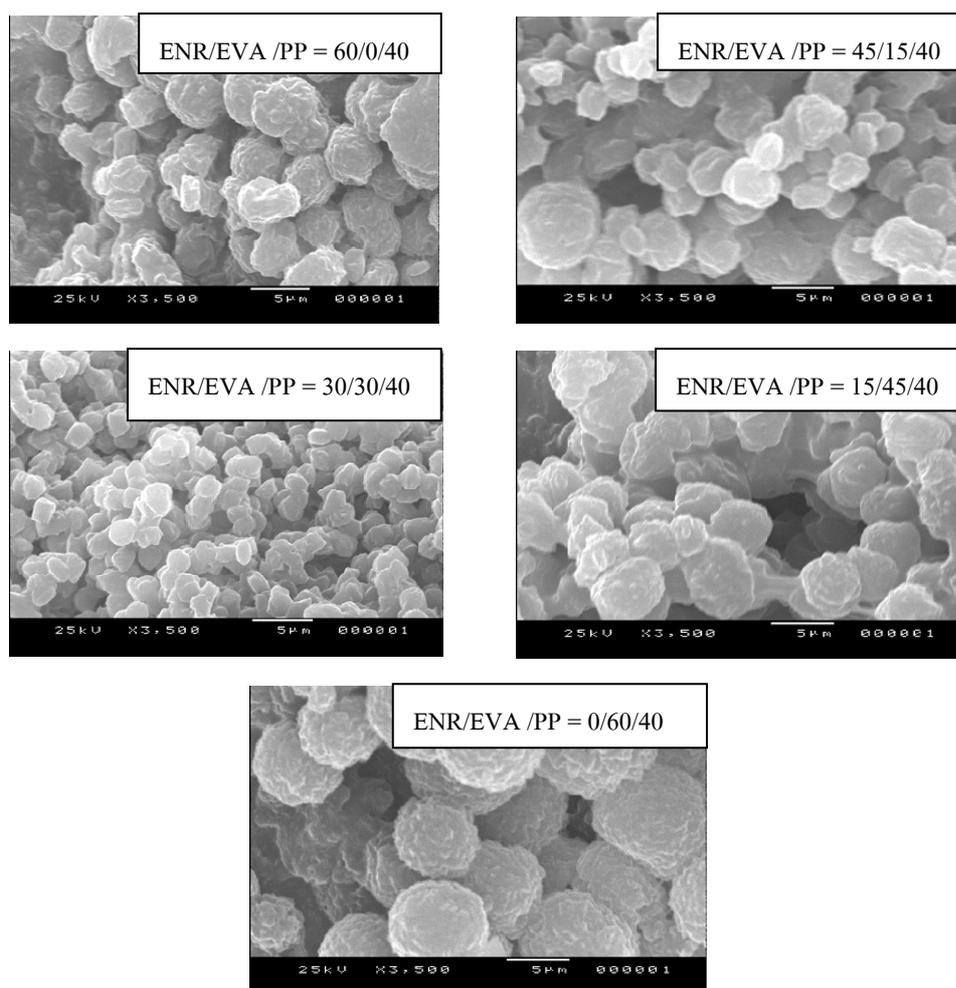


รูปที่ 5.72 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนยางblend ENR-25/EVA ต่างๆ

จากรูปที่ 5.72 พบว่า ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีแนวโน้มลดลงตามความถี่ในการทดสอบหรือมีพฤติกรรมแบบลดแรงเฉือน เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน พบว่า ความหนืดเชิงซ้อนลดลงตามการเพิ่มเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีความหนืดต่ำกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ (วิสุทธิ์, 2552)

5.3.6.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP เท่ากับ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 % โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.73



รูปที่ 5.73 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ

จากรูปที่ 5.73 พบว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วน 30/30/40 % โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคอย่างกระจายในเฟสพลาสติกเล็กที่สุดประมาณ 1-2 ไมครอน จึงมีพื้นที่ผิวที่ทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างเฟสยางกับพลาสติกเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้สมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนดังกล่าวดีที่สุดดังผลการทดลองจากสมบัติเชิงกลในตารางที่ 5.15 และรูปที่ 5.65 ส่วนกรณีที่อัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP เท่ากับ 60/0/40 และ 0/60/40 พบว่า กรณีใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เกิดการวัลคาไนซ์มากกว่าเอทิลีนไวนิลอะซิเตททำให้เกิดเฟสยางวัลคาไนซ์กระจายตัวในเฟสพอลิโพรไพลีนที่มีขนาดประมาณ 5 ไมครอน ในขณะที่การใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตทล้วน

มีขนาดของเฟสที่กระจายตัวประมาณ 10 ไมครอน เนื่องจากจากธรรมชาติของโพลีเอทิลีนที่มีความหนืดสูงกว่าเอทิลีนไวนิลอะซิเตทจึงเกิดแรงเฉือนสูงกว่าส่งผลให้ขนาดอนุภาคของโพลีเอทิลีนเล็กลงกว่า

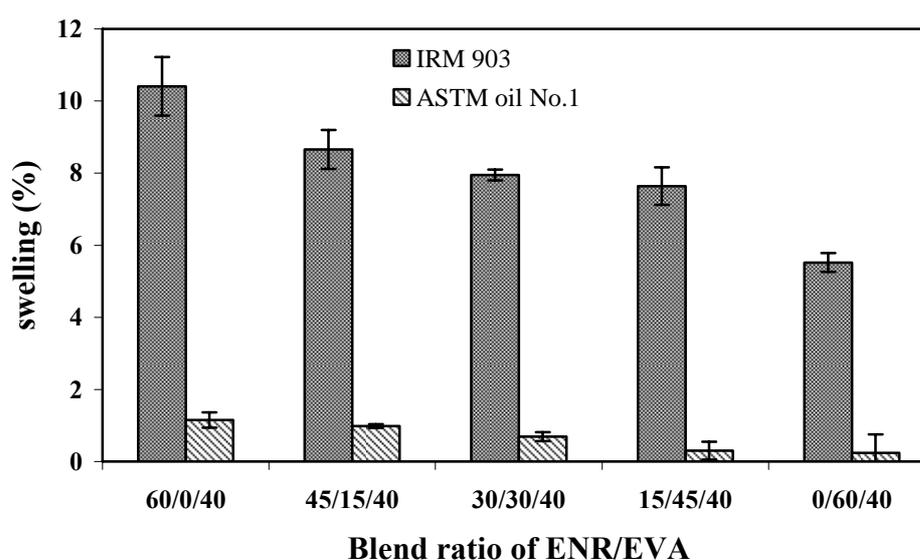
5.3.6.5 สมบัติด้านการทนต่อตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/ EVA ต่างๆ

การทดสอบสมบัติการทนต่อตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 ค่าการบวมพองในตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนการ เบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ

ENR-25/EVA/PP ratio, % by weight	Swelling (%)	
	ASTM oil No. 1	IRM 903
60/0/40	1.15±0.22	10.41±0.81
45/15/40	0.98±0.05	8.66±0.54
30/30/40	0.69±0.12	7.95±0.15
15/45/40	0.3±0.25	7.64±0.52
0/60/40	0.24±0.51	5.52±0.26

จากตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบการบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนต่างๆ ได้ดังรูปที่ 5.74

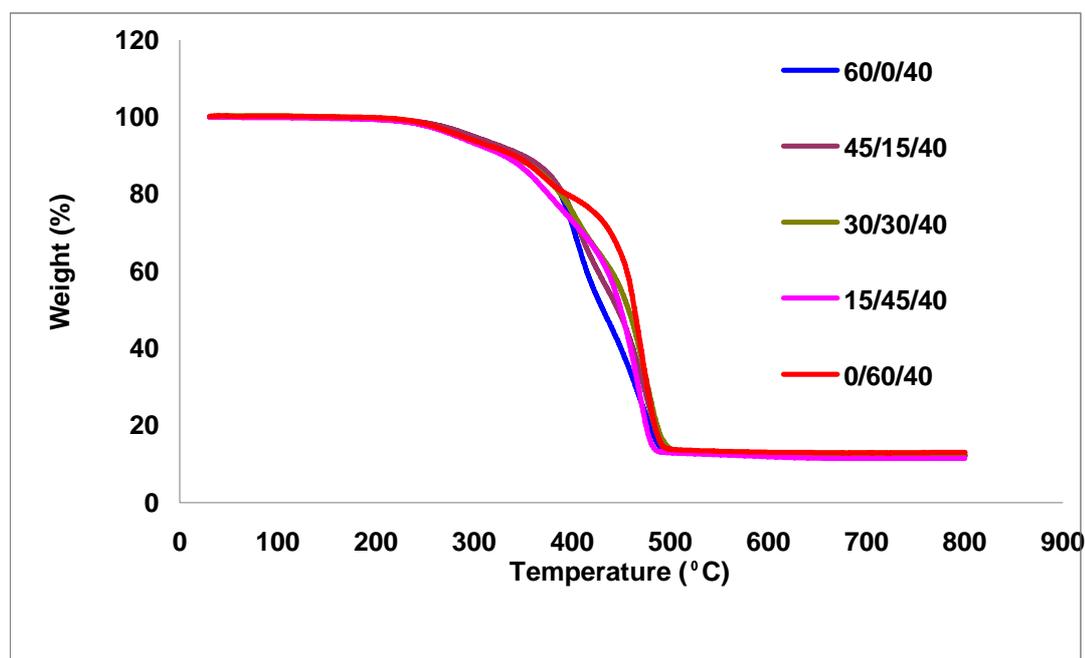


รูปที่ 5.74 การบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ

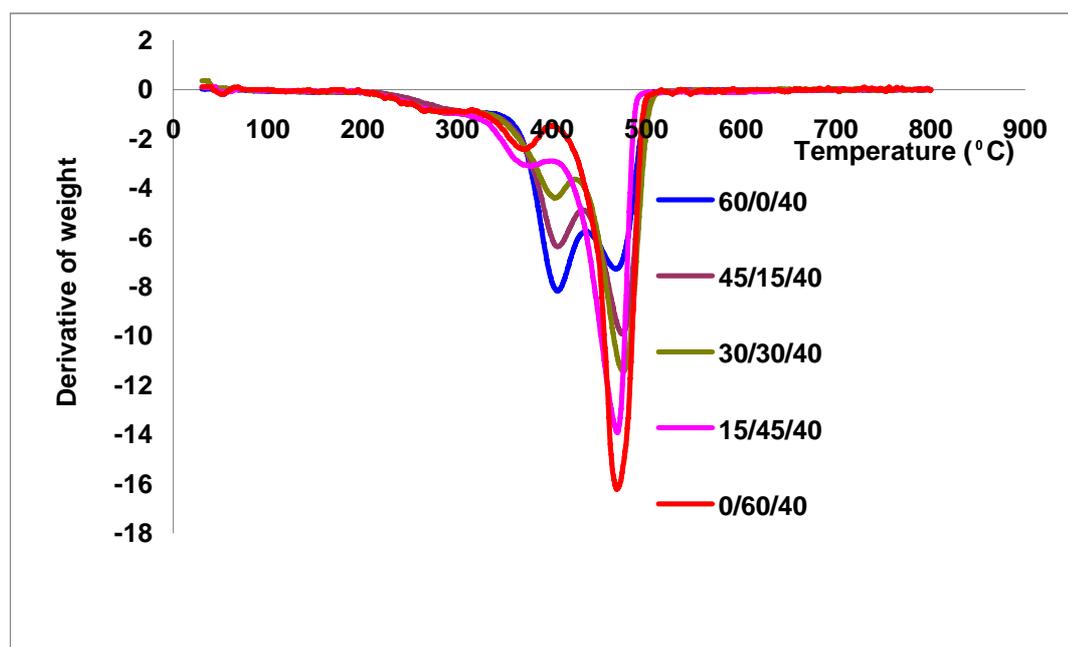
จากรูปที่ 5.74 พบว่า การบวมพองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25EVA/PP มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีหมู่ไวนิลอะซิเตทเป็นองค์ประกอบซึ่งมีความเป็นขั้วส่งผลให้เอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีความต้านทานต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้น โดย ENR-25 และ EVA มีค่า solubility parameter เท่ากับ 8.5 และ 8.6 (cal/cm^3)^{1/2} ตามลำดับ นอกจากนี้ จากโครงสร้างที่เป็นผลึกของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความต้านทานต่อตัวทำละลาย กล่าวคือ โครงสร้างของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีส่วนที่เป็นผลึกซึ่งสามารถขัดขวางการแทรกผ่านของตัวทำละลายในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ทำให้มีความคงเคี้ยวมากขึ้น (วิสุทธิ์, 2552) และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีความทนทานต่อน้ำมัน ASTM oil No.1 ได้มากกว่าน้ำมัน IRM 903 เช่นเดียวกับกรณียางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

5.3.6.6 สมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกทนวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP

นำเทอร์โมพลาสติกทนวัลคาไนซ์ ENR-25/CSM/PP ที่แปรอัตราส่วนยางในเทอร์โมพลาสติกที่ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/30, 15/45/40 และ 0/60/40 % โดยน้ำหนัก ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA (ตามหัวข้อที่ 3.3.5.12) เทคนิค DMTA (ตามหัวข้อที่ 3.3.5.13) และเทคนิค DSC (ตามหัวข้อที่ 3.3.5.14) โดยทดสอบภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจนได้ผลดังรูปที่ 5.75 – 5.76



รูปที่ 5.75 เทอร์โมแกรม TGA ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ



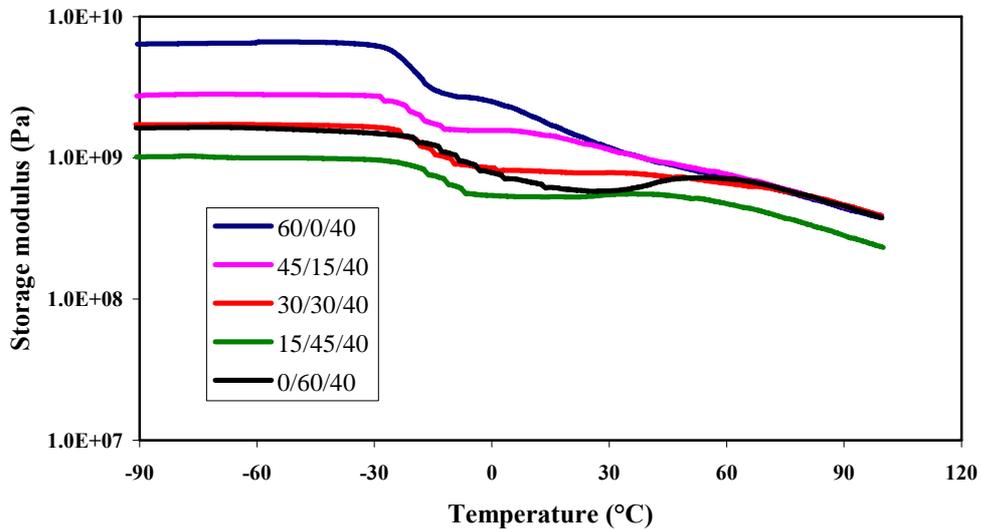
รูปที่ 5.76 เทอร์โมแกรม DTG ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

ตารางที่ 5.18 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

ENR-25/EVA/PP ratio	Decomposition temperature(T_d) (°C)	
	1st step	2nd step
60/0/40	410	473
45/15/40	411	477
30/30/40	411	474
15/45/40	376	471
0/60/40	375	473

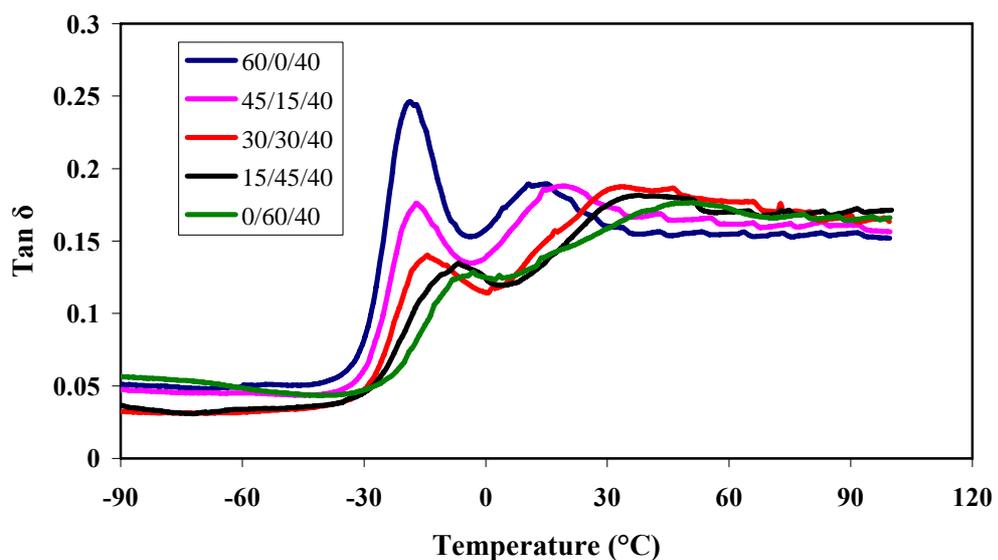
จากรูปที่ 5.75 และตารางที่ 5.18 พบว่า การสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอ็อกไซดมีการสลายตัว 2 ขั้นคือ ที่อัตราส่วน 60/0/40 ขั้นแรกเป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติอ็อกไซด ส่วนขั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของพอลิโพรไพลีน ส่วนเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตทปริมาณมากกว่า 30 % โดยน้ำหนัก (อัตราส่วน ENR-25/EVA/PP = 15/45/40 และ 0/60/40 % โดยน้ำหนัก) มีการสลายตัว 2 ขั้นเช่นเดียวกัน ขั้นแรกเป็นการสลายตัวของส่วนประกอบในเอทิลีนไวนิลอะซิเตท และขั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลหลักของยางเบลนด์และพอลิโพรไพลีน จะเห็นว่าอุณหภูมิในการสลายตัวในขั้นที่ 1 มีค่าต่ำลง แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนดังกล่าวมีความเสถียรต่อความร้อนลดลง โดยที่การใช้อัตราส่วน 30/30/40 มีความเสถียรต่อความร้อนที่เหมาะสมที่สุด และอาจเกิดจาก ENR-25 และ EVA สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง DMTA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.77 – 5.78 และตารางที่ 5.19



รูปที่ 5.77 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสสะสมกับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA

จากรูปที่ 5.77 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามอดูลัสสะสมแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ซึ่งสอดคล้องกับมอดูลัสสะสมจากการทดสอบพลวัตเชิงกลด้วยเครื่อง MDPT เนื่องจากการลดปริมาณยางธรรมชาติโอพอกไซต์หรือเพิ่มส่วนของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เป็นการลดส่วนที่ให้ความยืดหยุ่นดังนั้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จึงเก็บสะสมพลังงานไว้ได้น้อยลง



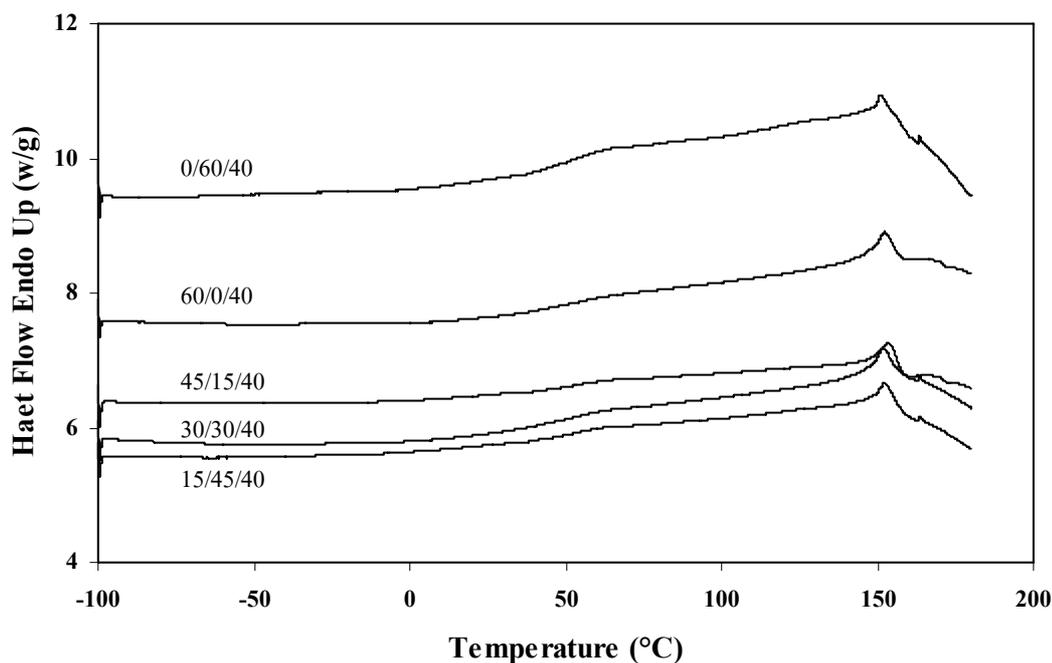
รูปที่ 5.78 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA

ตารางที่ 5.19 ค่า T_g ของเฟสยางในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA

ENR-25/EVA/PP ratio	$T_{g1}, ^\circ\text{C}$	$T_{g2}, ^\circ\text{C}$
Pure EVA	-6	-
Pure ENR-25	-47	-
60/0/40	-18	15
45/15/40	-17	20
30/30/40	-14	-
15/45/40	-7	-
0/60/40	-3	-

จากรูปที่ 5.78 ค่า T_g เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP แสดงดังตารางที่ 5.19 จากตาราง ค่า T_{g1} เป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันในส่วนของเฟสยางเบลนด์ ENR-25/EVA พบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันมีการเลื่อนไปในทิศทางที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ T_g ของ ENR-25 (-47°C) (Gelling and Porter, 1988) และ EVA (-6°C) แสดงว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตททำให้เกิดความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ ENR-25/EVA ส่งผลให้สมบัติดีขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตท พบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันมีการเลื่อนไปในทิศทางที่อุณหภูมิสูงขึ้นแสดงว่าการเพิ่มเอทิลีนไวนิลอะซิเตททำให้ความยืดหยุ่นลดลงเนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ซึ่งสอดคล้องกับค่า $\tan \delta$ จากการทดสอบพลวัตเชิงกลด้วยเครื่อง MDPT

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ระหว่าง ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางต่อพลาสติก 60/40 % โดยน้ำหนัก โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบตั้งแต่ -100°C ถึง 180°C อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่ากับ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จากทดลองได้เทอร์โมแกรมแสดงดังในรูปที่ 5.79



รูปที่ 5.79 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA

จากรูปที่ 5.79 เป็นเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC สามารถระบุค่าอุณหภูมิหลอมผลึกของพอลิโพรพิลีนและปริมาณผลึกได้ผลแสดงดังในตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 อุณหภูมิหลอมของผลึกและปริมาณผลึกของของเฟส PP ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง ENR-25/EVA/PP ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA

ENR-25/EVA/PP ratio, by weight	T _m (°C)	Crystallinity (%)
60/0/40	152.53	11.93
45/15/40	153.70	13.40
30/30/40	151.86	11.76
15/45/40	152.36	16.66
0/60/40	151.20	18.01

จากรูปที่ 5.79 อุณหภูมิหลอมผลึกของพอลิโพรพิลีนในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP ที่อัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ มีค่าไม่ต่างกันมากนักเนื่องจากทุกอัตราส่วนการเบลนด์มีปริมาณของพอลิโพรพิลีนเท่ากันจึงไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมผลึกของพอลิโพรพิลีน ส่วนปริมาณผลึก พบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้อีทิลีนไวนิลอะซิเตทกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์เดี่ยวๆในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP จะเห็นว่าการใช้อีทิลีนไวนิลอะซิเตทในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทำให้เฟสพอลิโพรพิลีนมีปริมาณผลึกมากกว่ากรณีที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีโครงสร้างเป็นเอทิลีนอยู่ด้วยซึ่งสามารถเกิดผลึกได้บางส่วนเช่นเดียวกับพอลิโพรไพลีน

5.3.7 อิทธิพลของชนิดยางเบลนด์ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของ ENR-25/EVA/PP

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ 3 ชนิด คือ NR/EVA/PP, ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP โดยใช้อัตราส่วน 30/30/40 % โดยน้ำหนัก ตามหัวข้อที่ 3.3.3.7 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง สมบัติพลวัตเชิงกล ลักษณะสัญญาณวิทยา และสมบัติเชิงความร้อนได้ผลการทดลองดังนี้

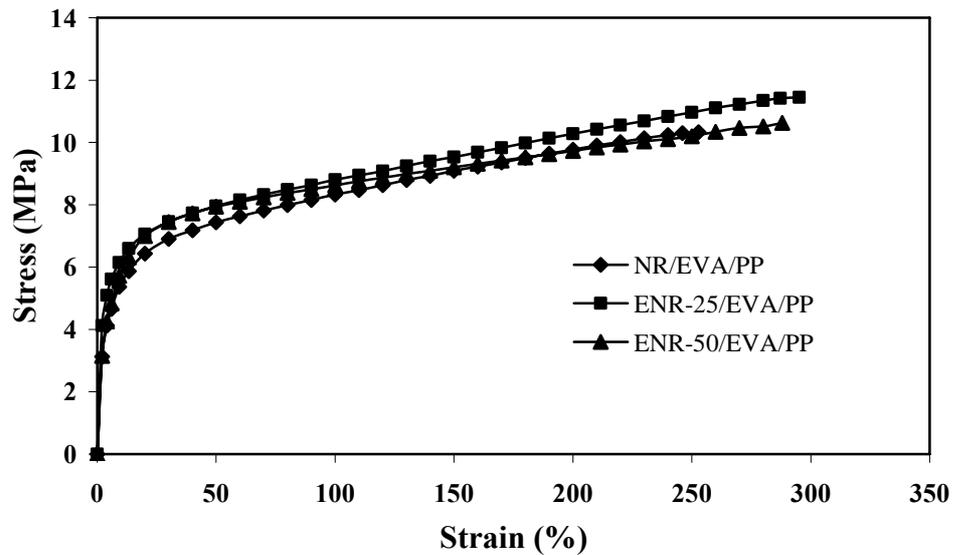
5.3.7.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆได้แก่ NR/EVA/PP, ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP ได้ผลดังตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP แปรชนิดยางเบลนด์

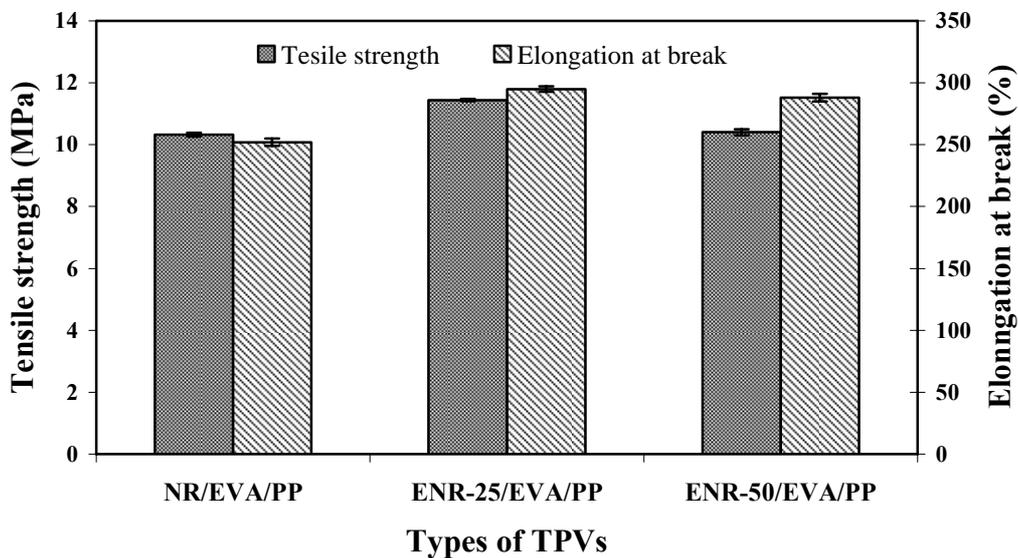
Types of TPVs	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
NR/EVA/PP	10.32±0.06	252±3.06	84.0±1.3	35.0±1.73	2145.48
ENR-25/EVA/PP	11.44±0.04	295±2.08	84.5±1.44	33.5±0.58	2757.00
ENR-50/EVA/PP	10.40±0.10	288±3.06	85.0±1.92	33.5±2.31	2559.89

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA/PP โดยแปรชนิดยางเบลนด์ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแสดงดังรูปที่ 5.80

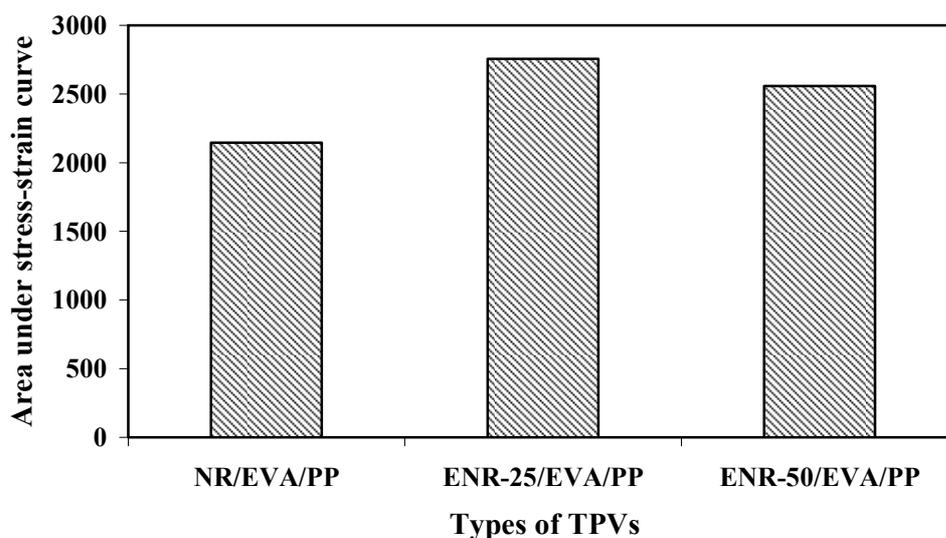


รูปที่ 5.80 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดยางเบลนด์ NR/EVA/PP, ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 5.81 – 5.82



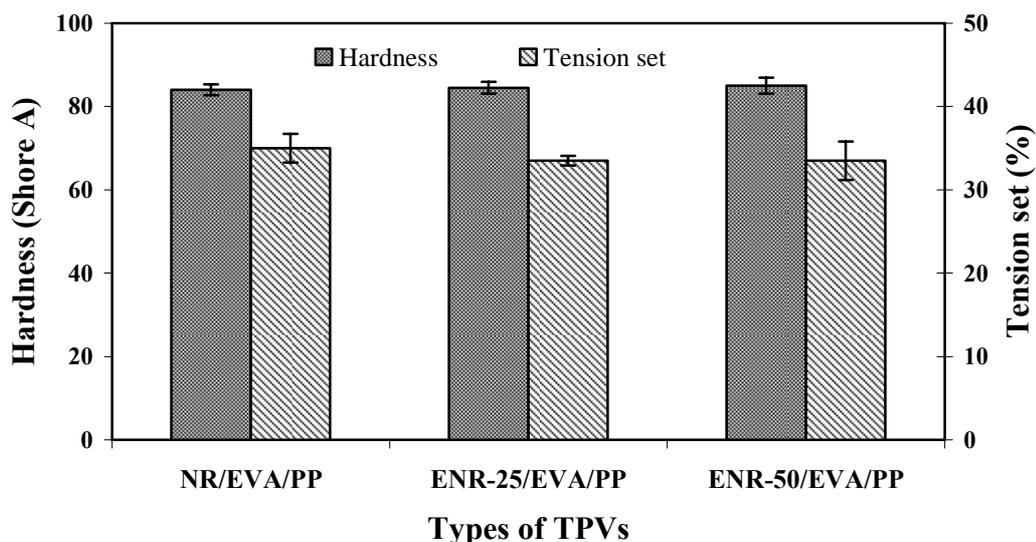
รูปที่ 5.81 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ



รูปที่ 5.82 พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบ ลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 5.80 – 5.82 เมื่อพิจารณากราฟความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ พบว่า ความชันของกราฟมีค่าใกล้เคียงกันและค่ามอดูลัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณหน่อโฟกไซต์ ส่วนค่า ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP มีค่าสูงกว่า NR/EVA/PP เนื่องจากเฟสของยางทั้ง 2 ชนิด ในยางเบ ลนด์สามารถเข้ากันได้ดีกว่า โดยเกิดแรงกระทำทางเคมีระหว่างยางธรรมชาติโฟกไซต์กับยางเอทิลีนไ ว นิลอะซิเตท ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณหน่อโฟกไซต์มากขึ้นทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อ เปรียบเทียบระหว่าง ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงและ ความสามารถในการยืดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยาง ENR-50 มีค่าต่ำกว่า ENR-25 เนื่องจาก ENR-50 มีขั้วสูงกว่า ENR-25 ทำให้เกิดอันตรกิริยาทางเคมีได้มากกว่าและส่งผลกระทบต่อ การเกิดผลึกที่เกิดขึ้นในระหว่างการดึง (Strain induced crystallization) กล่าวคือ ทำให้เกิดผลึกได้ลดลง นอกจากนี้ยาง ENR-50 มีความหนืดสูงกว่ายาง ENR-25 ทำให้เกิดการกระจายตัวในเฟสต่อเนื่องของพอลิโพรพิลีนได้ยาก กว่า ประกอบกับความเป็นขั้วที่สูงของยาง ENR-50 อาจจะทำให้เกิดการดึงดูดกันของโมเลกุลยางให้รวมตัว กันเป็นอนุภาคใหญ่อีกครั้งหลังจากถูกแรงเฉือนแยกออกจากกันแล้ว ทำให้เกิดการกระจายตัวในเฟสของพอลิโพรพิลีนได้ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าต่ำลง เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานใน การทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเช่นเดียวกับ ความต้านทานต่อแรงดึงสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกัน กล่าวคือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีพื้นที่ใต้กราฟสูงสุด รองลงมาคือ ENR-50/EVA/PP และ NR/EVA/PP ตามลำดับ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP ที่แปรชนิดยางเบ ลนด์ NR/EVA/PP, ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP ได้ค่าความแข็งและค่าการผิดรูปถาวร เนื่องจากการดึง ดังรูปที่ 5.83



รูปที่ 5.83 ความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 5.83 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าไม่แตกต่างกันทั้งในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ NR/EVA/PP, ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะสมบัติด้านความแข็งจะมาจากเฟสแข็งคือ พอลิโพรไพลีน เมื่อเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีปริมาณของพอลิโพรไพลีนเท่ากันทำให้มีความแข็งไม่แตกต่างกัน ส่วนค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ NR/EVA/PP มีค่าสูงกว่า ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP เนื่องจากความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ระหว่าง ENR/EVA เกิดได้มากกว่า NR/EVA จึงส่งผลให้สมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดีกว่า สังเกตได้จากลักษณะสัญญาณวิทยาในรูปที่ 5.89 ซึ่งพบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าการใช้ยางธรรมชาติ

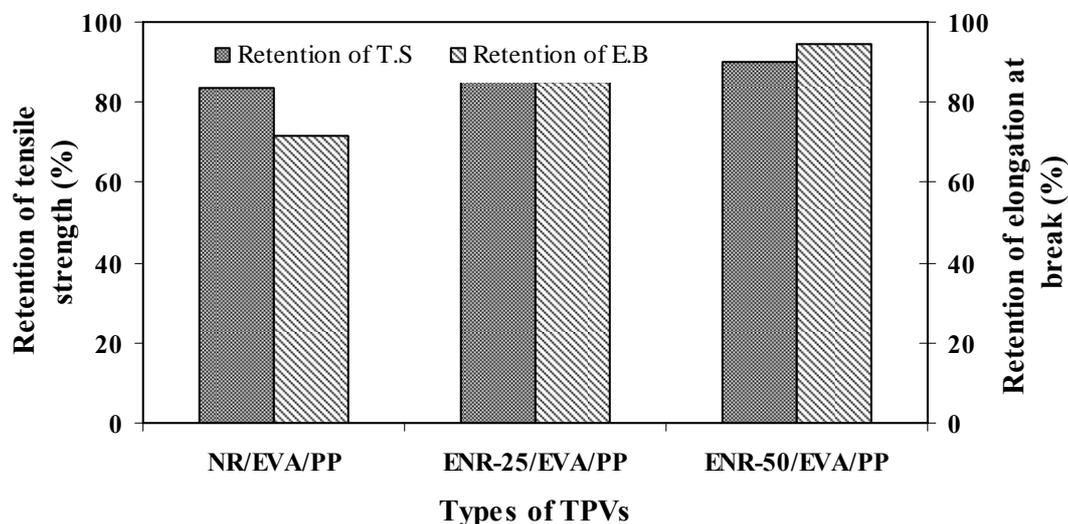
5.3.7.2 สมบัติหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ NR/EVA/PP, ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.22

ตารางที่ 5.22 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดยางเบลนด์

Types of TPVs	Retention of	Retention of
	Tensile strength (%)	Elongation at break (%)
NR/EVA/PP	83.62	71.43
ENR-25/EVA/PP	85.49	85.08
ENR-50/EVA/PP	90.00	94.44

จากตารางที่ 5.22 นำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.84

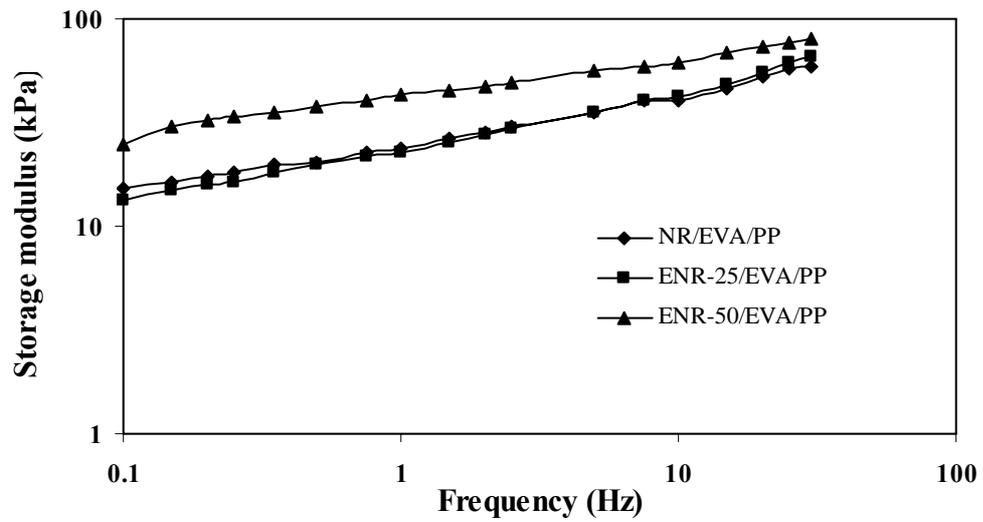


รูปที่ 5.84 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

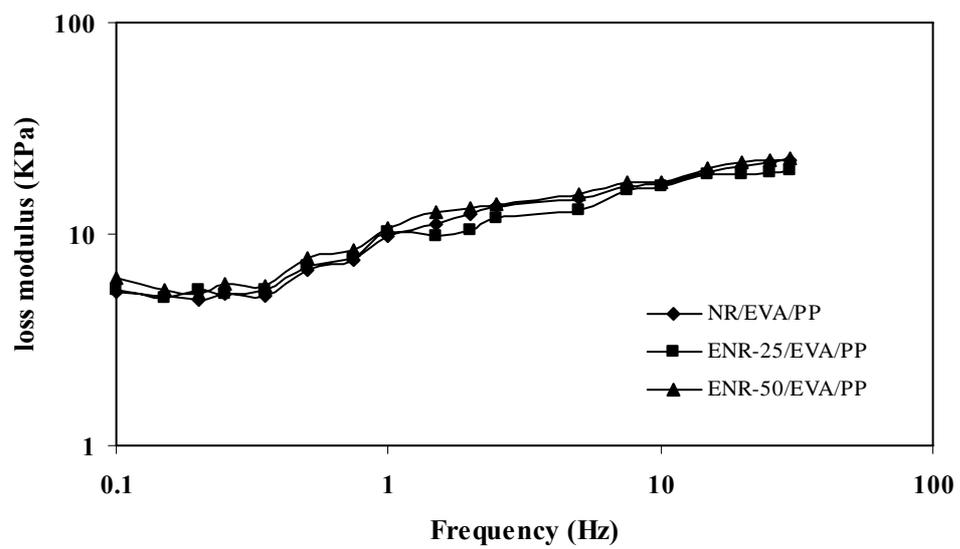
จากรูปที่ 5.84 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากยางเบลนด์ ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงต่ำกว่า NR/EVA/PP เนื่องจากการใช้ยางธรรมชาติซึ่งในโครงสร้างโมเลกุลมีความไม่อิ่มตัวหรือมีพันธะคู่ปริมาณมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลในยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงสมบัติดังกล่าวหลังการบ่มแรงมีค่าลดลง

5.3.7.3 สมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

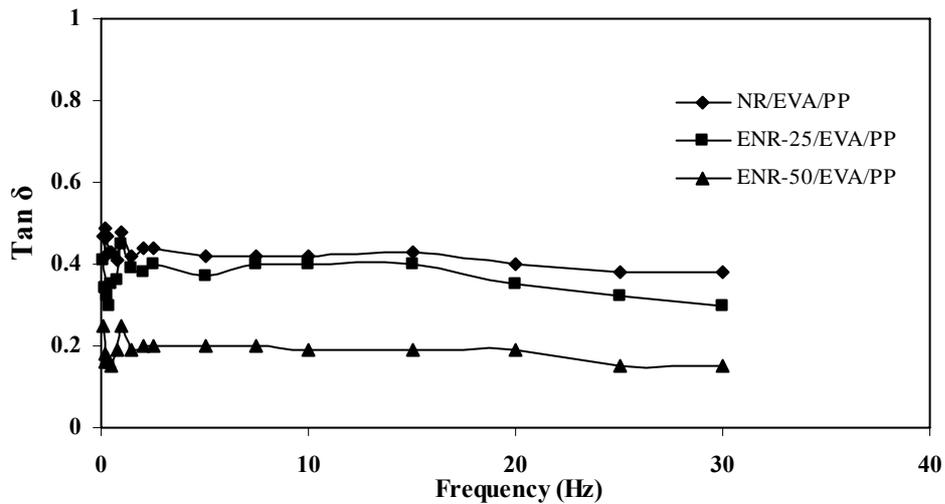
ทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆที่แปรชนิดของยางเบลนด์ด้วยเครื่อง MDPT โดยทดสอบแบบแปรความถี่ระหว่าง 0.1-30 Hz ที่อุณหภูมิ 180°C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.85 – 5.88



รูปที่ 5.85 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

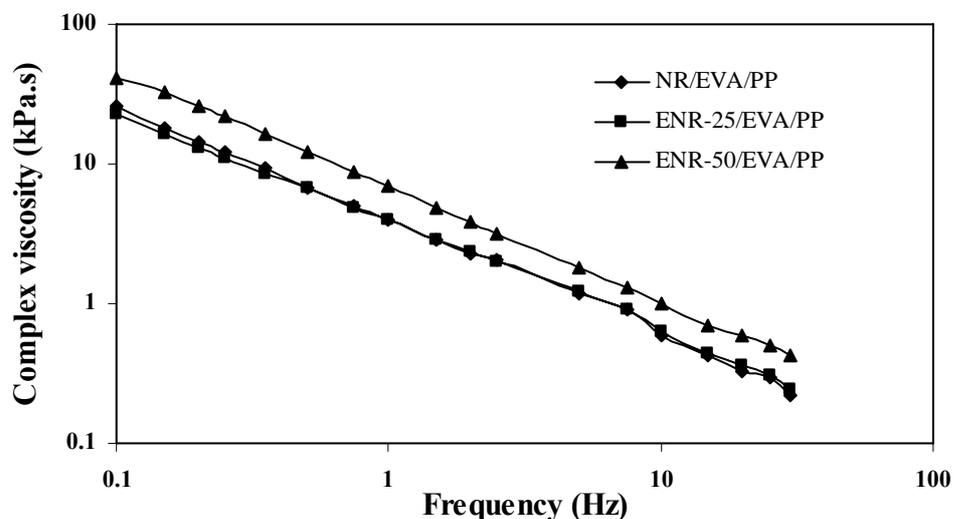


รูปที่ 5.86 มอดูลัสสูญเสียของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ



รูปที่ 5.87 Tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 5.85 – 5.87 มอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ทั้ง 3 ชนิดยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความถี่ในการทดสอบและเมื่อพิจารณาที่ความถี่ระดับเดียวกัน พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่ามอดูลัสสะสมสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติโดยเฉพาะกรณีที่ใช้ยาง ENR-50 เนื่องจากอิทธิพลของความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงและแรงกระทำทางเคมีระหว่างหมู่อีพอกไซด์ในยางวัลคาไนซ์จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.3 โดยพบว่า ENR-50/EVA มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงหรือผลต่างของค่าทอร์ก ($M_H - M_L$) สูงกว่า ENR-25/EVA และ NR/EVA นอกจากนี้อาจเกิดจากอิทธิพลของการเกิดอันตรกิริยาเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของ EVA และ ENR ดังรูปที่ 4.32 เนื่องจากการมีสภาพขั้วของทั้ง ENR และ EVA เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ ENR-50 และ ENR-25 มีมอดูลัสสะสมสูงกว่าใช้ยางธรรมชาติ ซึ่งทำให้ค่า Tan δ มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.83 โดยที่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-50/EVA/PP มีความยืดหยุ่นมากที่สุด รองลงมาคือ ENR-25/EVA/PP และ NR/EVA/PP ตามลำดับ โดยให้ผลสอดคล้องกับค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดิ่งในรูปที่ 5.83

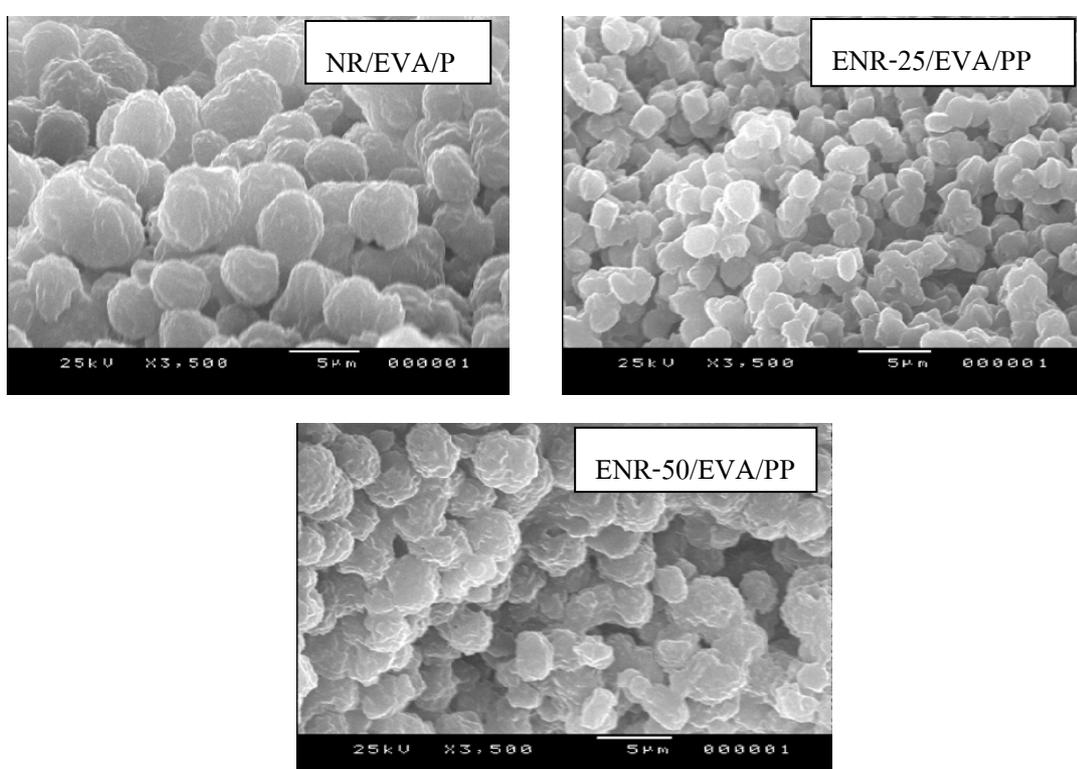


รูปที่ 5.88 ความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 5.88 ความเหนียวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มลดลงตามความถี่ในการทดสอบซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลแบบลดแรงเฉือน กล่าวคือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีสมบัติพลวัตเชิงกลดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติ เนื่องจากความเปราะบางของยางทำให้มีแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลสูงทำให้สามารถต้านการไหลได้มากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติ

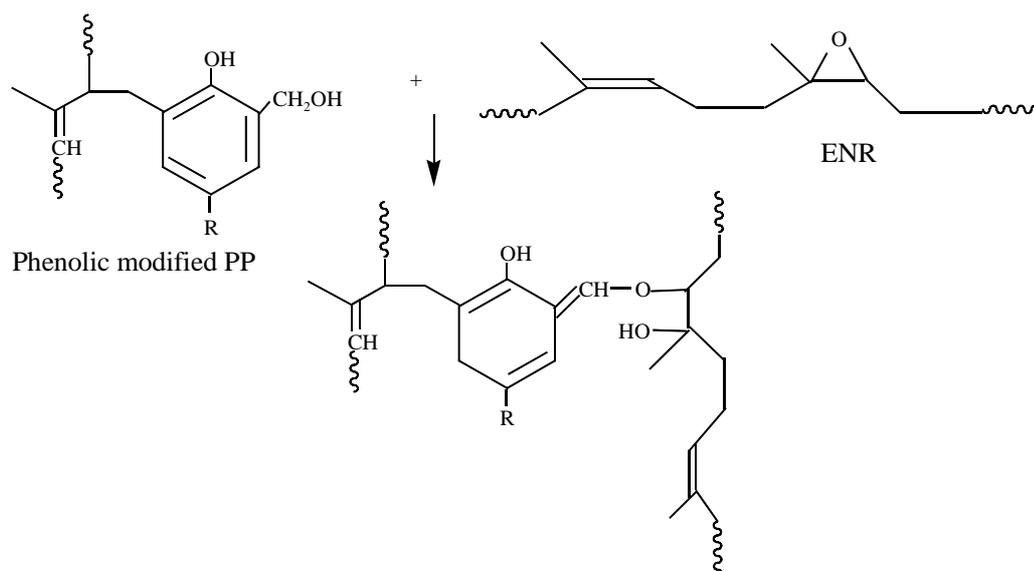
5.3.7.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดยางเบลนด์

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดการเบลนด์ คือ NR/EVA/PP, ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.89



รูปที่ 5.89 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 5.89 พบว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีขนาดอนุภาคยางวัลคาไนซ์กระจายในเฟสพลาสติกพอลิโพรไพลีนเล็กกว่ากรณีที่ใช้ยางธรรมชาติ โดยเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP มีขนาดอนุภาคยางกระจายในเฟสพลาสติกที่เล็กที่สุด ประมาณ 1-2 ไมครอน รองลงมาคือ ENR-50/EVA/PP มีขนาดอนุภาคประมาณ 5 ไมครอนและ NR/EVA/PP มีขนาดอนุภาคประมาณ 7 ไมครอน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากอิทธิพลของแรงกระทำทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันอีพอกไซด์กับไวนิลอะซิเตตดังรูปที่ 4.32 ทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความเหนียวสูงกว่า ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนมากกว่ากรณีใช้ยางธรรมชาติจึงทำให้ขนาดอนุภาคของเฟสยางวัลคาไนซ์เล็กกว่า และอาจเป็นผลมาจากหมู่อีพอกไซด์ซึ่งสามารถทำให้เกิดอันตรกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่อีพอกไซด์กับหมู่เมทิลอลไนโมเลกุลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ ดังรูปที่ 5.90 ส่งผลให้มีอนุภาคเล็กซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ดี



รูปที่ 5.90 กลไกปฏิกิริยาระหว่างหมู่เมทิลลอลของสารเพิ่มความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Nakason *et al*, 2006b)

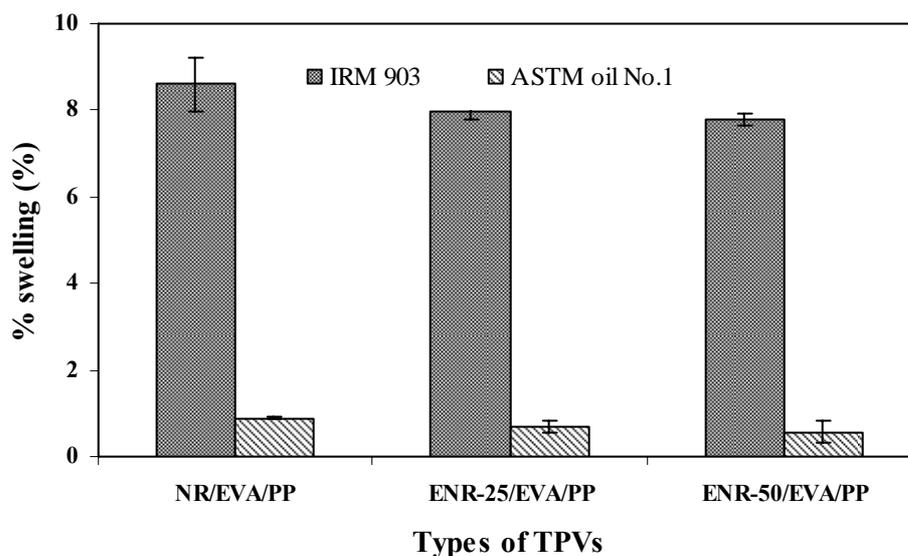
5.3.7.5 สมบัติด้านการทนต่อตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากการทดสอบสมบัติการทนต่อตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดการเบลนด์ NR/EVA/PP, ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP ได้ผลแสดงดังตารางที่ 5.23

ตารางที่ 5.23 ค่าการบวมพองในตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

Types of TPVs	Swelling (%)	
	ASTM oil No. 1	IRM 903
NR/EVA/PP	0.89±0.02	8.60±0.64
ENR-25/EVA/PP	0.69±0.12	7.95±0.15
ENR-50/EVA/PP	0.57±0.24	7.78±0.13

จากตารางที่ 5.23 เปรียบเทียบการบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดการเบลนด์ NR/EVA/PP, ENR-25/EVA/PP และ ENR-50/EVA/PP ได้ดังรูปที่ 5.91



รูปที่ 5.91 การบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 5.91 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR/EVA/PP ทนน้ำมันได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ NR/EVA/PP ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีวงแหวนอีพอกไซด์ ซึ่งมีความเป็นขั้วจึงทนต่อน้ำมันที่ไม่มีขั้วได้ดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-25/EVA/PP กับ ENR-50/EVA/PP พบว่า ยางธรรมชาติที่มีระดับอีพอกไซด์สูงขึ้นสูงกว่าทำให้ยางมีขั้วมากกว่าจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ENR-50/EVA/PP ทนน้ำมันได้ดีกว่า ENR-25/EVA/PP เมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ชนิดเดียวกัน พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ชนิด มีความทนทานต่อน้ำมัน ASTM oil No.1 ได้มากกว่าน้ำมัน IRM 903 เนื่องจากน้ำมัน IRM 903 มีค่า aniline point เท่ากับ 70°C ซึ่งมีค่าต่ำกว่า น้ำมัน ASTM oil No.1 ที่มีค่า aniline point เท่ากับ 124°C แสดงว่ามีส่วนของอะโรมาติกมากกว่าในน้ำมัน ASTM oil No.1 จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เกิดการบวมพองได้มากกว่า