

1. อิทธิพลของปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม

ทำการทดลองโดยแปรปริมาณสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) ด้วยระบบกัมมะถันแบบปกติ โดยจะเทียบกับสัดส่วนของยางธรรมชาติหรือยางใหม่ (NR) สัดส่วนของยางทั้งหมด (CRM+NR) และสัดส่วนของยางรวมกับพลาสติกทั้งหมด (CRM+NR+HDPE) จะกำหนดให้ปริมาณของยางครีปปียางธรรมชาติ และพลาสติก (CRM/NR/HDPE) คงที่อยู่ที่อัตราส่วน 40/10/50 ตามลำดับ และใช้การวัลคาไนซ์ระบบกัมมะถันแบบปกติโดยใช้สูตรดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมTPVs ที่แปรปริมาณสารวัลคาไนซ์

Formula	Ingredients, parts by weight							
	CRM	NR	Stearic acid	6 PPD	ZnO	TBBS	Sulphur	HDPE
A	40	10	0.1	0.1	0.5	0.1	0.25	50
B	40	10	0.5	0.5	2.5	0.5	1.25	50
C	40	10	1	1	5	1	2.5	50

สูตร A จะใช้ปริมาณสารวัลคาไนซ์เทียบกับยางใหม่หรือยางธรรมชาติ ดังสมมติฐานว่าสารวัลคาไนซ์จะเข้าไปในส่วนของยางธรรมชาติที่ยังไม่ได้วัลคาไนซ์เท่านั้น (ยางธรรมชาติมี 10 ส่วน) ไม่เข้าไปในส่วนของยางครีปปียิ่งผ่านการวัลคาไนซ์มาแล้ว

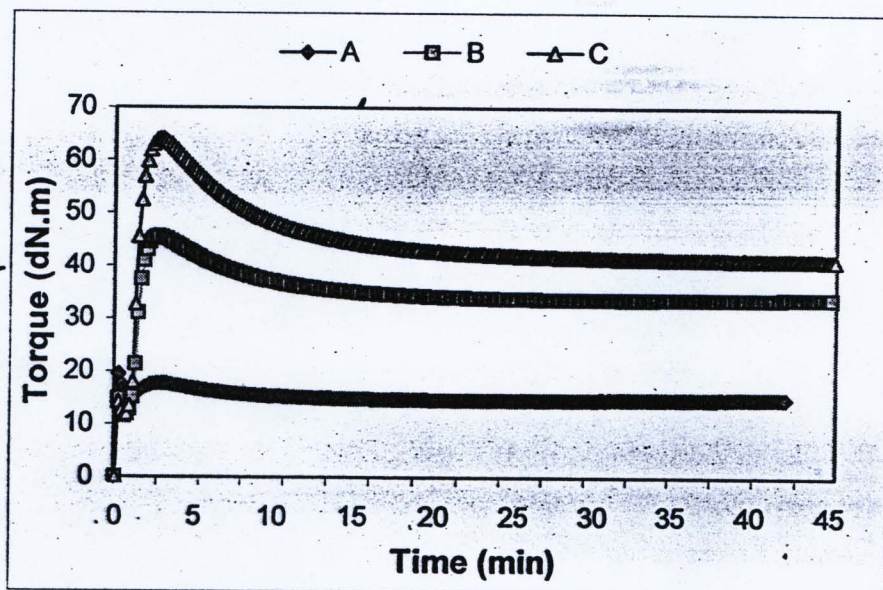
สูตรที่ B จะใช้ปริมาณสารวัลคาไนซ์โดยเทียบกับปริมาณยางทั้งหมดทั้งยางครีปปีและยางธรรมชาติ (CRM+NR คิดเป็น 50 ส่วน) โดยจะคูณ 5 เท่าของสูตรแรก ดังสมมติฐานว่าสารวัลคาไนซ์จะเข้าไปในส่วนของยางใหม่และยางครีปปีด้วย เพราะยางครีปปีอาจเกิดการ Devulcanization ขึ้นได้ทำให้สามารถเชื่อมโยงพันธะได้อีกครั้ง สารเคมีที่เหลืออยู่ในยางธรรมชาติอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์

และสูตร C จะเทียบปริมาณสารวัลคาไนซ์กับสารทั้งหมดทั้งยางและพลาสติก (CRM+NR+HDPE) คิดเป็น 100 ส่วน) โดยจะคูณ 10 เท่าของสูตรแรก ดังสมมติฐานว่าสารวัลคาไนซ์จะเคลื่อนที่เข้าไปในส่วนของยางธรรมชาติ ยางครีปปีและในพลาสติกด้วย เนื่องจากพลาสติกและยางธรรมชาติมีค่าพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกัน (8.0 และ 8.1 cal¹²cm⁻³² ตามลำดับ)

และในการทดลองข้อนี้ได้เปลี่ยนเกรดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เป็นเกรด R1760 มีค่าดัชนีการไหล เท่ากับ 5.3 g/10 min

สมบัติการวัลคาไนซ์ของ CRM-NR Masterbatch

ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ต้องผ่านความร้อนสูงจากการเบลนด์และการฉีดขึ้นรูป เป็นชิ้นงานใช้เวลาประมาณ 20 นาที จึงทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของ CRM-NR Masterbatch ด้วย เครื่อง Oscillating Disk Rheometer 2000 ที่อุณหภูมิ 180°C ได้กราฟการวัลคาไนซ์หรือ ODR curve กล่าวคือความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (ทอร์ค) กับเวลาแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คกับเวลาของ CRM-NR Masterbatch ที่แปรปริมาณสารวัลคาไนซ์ทดสอบที่อุณหภูมิ 180°C ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer 2000

ตารางที่ 2 ค่าทอร์คสูงสุด (M_H), ค่าทอร์คต่ำสุด (M_L), เวลาสก็อต (Scorch, T_{S1}) และเวลาการวัลคาไนซ์ (T_{C90}) ของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณสารวัลคาไนซ์ จากเครื่อง ODR ที่อุณหภูมิ 180°C

Formula	M_H (dN.m)	M_L (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	T_{C90} (min)	T_{S1} (min)
A	17.82	15.80	2.02	2.50	1.85
B	45.52	11.86	33.66	1.85	0.90
C	63.94	11.67	52.27	1.80	0.80

จากรูปที่ 1 และตารางที่ 2 จะพบว่า CRM-NR Masterbatch สูตร A ที่ใช้สารวัลคาไนซ์เทียบกับปริมาณของยางธรรมชาติหรือยางใหม่เพียงอย่างเดียว คิดเป็น 10 ส่วน จะมีค่าทอร์คต่ำและจะเกิดการรีเวอร์ชันเล็กน้อย แล้วค่าทอร์คจะคงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อยู่ที่ประมาณ 15 dN.m เท่านั้น ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์ จะมี scorch time และ cure time นานที่สุด และค่าทอร์คต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ CRM-NR Masterbatch ที่ใช้สารเคมีมากกว่า อาจเนื่องมาจากสารวัลคาไนซ์ไม่ได้เข้าไปในส่วน

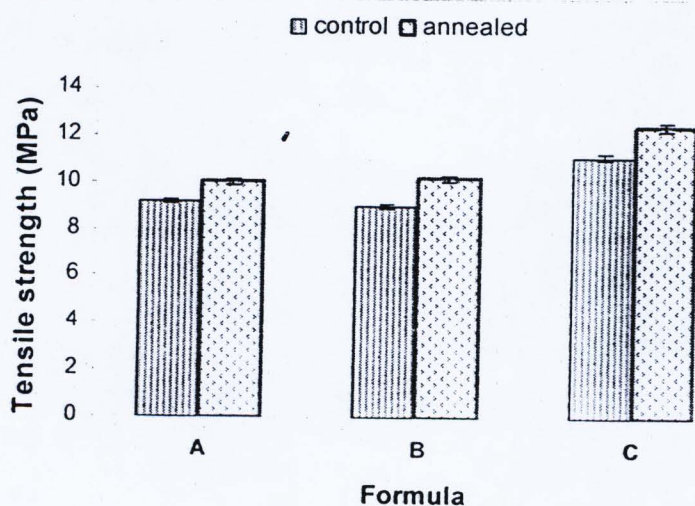
ยางใหม่เท่านั้น แต่ยังเข้าไปในส่วนของยางครีмпอีกด้วย เพราะยางครีмпสามารถเกิดการ Devulcanization ได้ด้วยแรงเฉือนขณะบดผสมซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการทำยางรีเคลมทำให้พันธะที่เชื่อมโยงถูกทำลายด้วยแรงกล (mechanical force) มีผลให้สารวัลคาไนซ์ไม่เพียงพอที่จะทำให้ยางสร้างพันธะได้ทั้งหมด (Myhre, M. and Mackillop, D.A., 2002) การที่ scorch time และ cure time ต่ำมากนั้น เนื่องจากในยางครีмпจะมีสารวัลคาไนซ์อยู่แล้วส่วนหนึ่งทำให้สารวัลคาไนซ์เข้าไปทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว

ส่วนใน CRM-NR Masterbatch สูตร B ที่ใช้สารวัลคาไนซ์เทียบกับยางทั้งหมด คิดเป็น 50 ส่วน พบว่าจะมีค่าทอร์ค สูงสุดที่ 45.52 dN.m เพิ่มจากการใช้สารเคมีเทียบกับยางใหม่เพียงอย่างเดียวเกือบ 3 เท่า มี scorch time และ cure time ต่ำมากและจะเกิดการรีเวอร์ชันขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่หลังจาก 20 นาทีผ่านไป ค่าทอร์คจะคงที่ประมาณ 35 dN.m แสดงว่าสารวัลคาไนซ์สามารถเข้าไปทำให้ยางสร้างพันธะเชื่อมโยงกันมากขึ้น

และใน CRM-NR Masterbatch สูตร C ที่ใช้สารวัลคาไนซ์เทียบกับยางและพลาสติกทั้งหมด คิดเป็น 100 ส่วน พบว่าจะมี scorch time และ cure time ต่ำมาก ค่าทอร์คสูงสุดที่ 63.94 dN.m และจะเกิดการรีเวอร์ชันอย่างชัดเจนมาจนถึงที่ 25 นาที กราฟจะค่อยๆคงที่ที่ 42 dN.m แสดงว่าสารเคมีเพียงพอในการวัลคาไนซ์ยาง

แสดงว่าในกระบวนการเบลนด์และการฉีดขึ้นรูปเป็นเวลานานประมาณ 20 นาที ที่อุณหภูมิ 180°C จะทำให้ยางมีค่าทอร์คคงที่ ยิ่งปริมาณสารวัลคาไนซ์สูงๆ จะทำให้ค่าทอร์คเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่ใน CRM-NR Masterbatch มีส่วนผสมแค่ยางเท่านั้น จึงไม่สามารถทราบได้ว่าสารวัลคาไนซ์จะเข้าไปในเฟสของพลาสติกหรือไม่ เมื่อเบลนด์ CRM-NR Masterbatch กับพลาสติกแล้ว สารวัลคาไนซ์อาจจะไม่เพียงพอหรือมากเกินไป จึงต้องทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ต่อไป

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

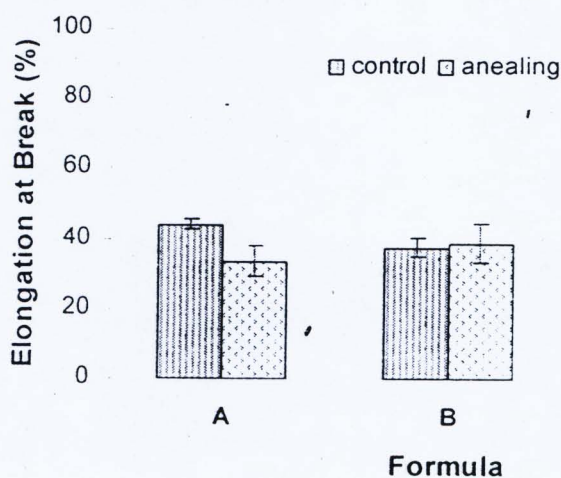


รูปที่ 2 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณสารวัลคาไนซ์เทียบกับส่วนต่างๆ และสมบัติหลังจากผ่านการ Annealing ที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 2 เป็นความต้านทานต่อแรงดึงจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณสารเคมีที่ใช้เทียบกับส่วนต่างๆ จะพบว่าชิ้นทดสอบสูตร A และสูตร B ความต้านทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 9 MPa ส่วนสูตร C จะมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด 11 MPa จะสังเกตลักษณะจากรูปที่ 1 ในสูตร B จะพบวาคอร์คอยู่ในระดับสูงกว่าสูตร A เป็นเท่าตัว น่าจะทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าด้วย แต่กลับมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจมาจากสารวัลคาไนซ์ใน CRM-NR masterbatch เคลื่อนที่เข้าสู่ในส่วนของพลาสติก ทำให้สารวัลคาไนซ์ไม่เพียงพอกที่จะทำให้ยางมีความแข็งแรง ส่วนในสูตร C ที่มีปริมาณสารวัลคาไนซ์มาก สารเคมีกระจายเข้าไปในส่วนของยางและพลาสติกได้พร้อมกัน ไม่เลือกเข้าเฉพาะเฟสของยาง การใช้สารวัลคาไนซ์ที่ปริมาณมากทำให้สารเคมีสามารถเข้าไปวัลคาไนซ์ในส่วนของยางได้เพียงพอ ทำให้ส่วนของยางมีความแข็งแรง เมื่อเบลนด์ผสมทำให้เฟสของยางวัลคาไนซ์กระจายตัวในพลาสติกได้ดี ผิวประจัญระหว่างเฟสยางกับพลาสติกเชื่อมติดกันดี มีความเข้ากันได้มากขึ้น การดึงให้ขาดจึงต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อไปทำลายพันธะระหว่างยางและผิวประจัญระหว่างยางกับพลาสติก

ผลของการนำชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้วนำไปอบต่อที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็นแนวโน้มเดียวกัน เนื่องจากพอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่สามารถตกผลึกได้ (Semi-crystalline) เมื่อผ่านการฉีดขึ้นรูปจะต้องหลอมด้วยอุณหภูมิสูงในสกรูแล้วเย็นตัวในเบ้าอย่างรวดเร็ว อาจทำให้โครงสร้างจัดเรียงตัวเป็นผลึกเร็วเกินไป และยางครีมีอาจไปรบกวนการตกผลึกของพอลิเอทิลีน ทำให้สมบัติที่ได้ยังไม่สมบูรณ์ การนำไปอบอีกครั้งในระยะเวลาที่นานขึ้น จะทำให้สายโซ่คลายตัวออกและเรียงตัวเป็นผลึกใหม่ (Recrystallization) ผลึกที่ได้จะเป็นระเบียบและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย ต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้ขาด

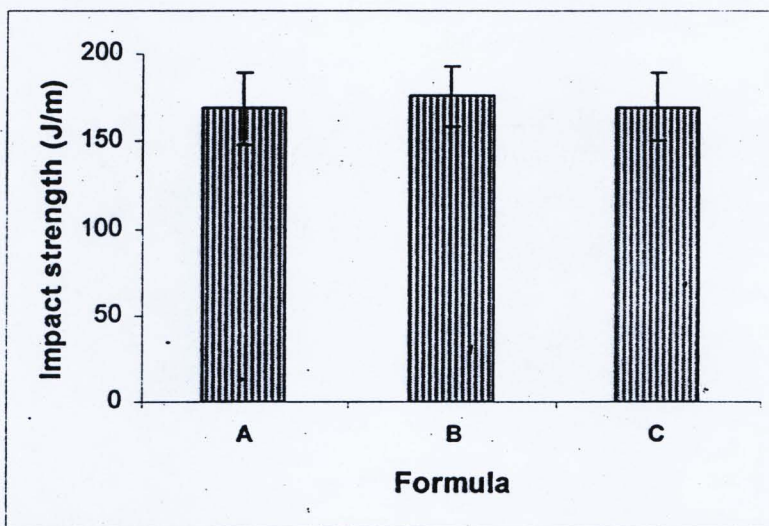
การทดสอบความสามารถในการยืดจนขาด



รูปที่ 3 ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ TPVs ที่มีปริมาณสารวัลคาไนซ์เทียบกับส่วนต่างๆ และสมบัติหลังจากผ่านการ Annealing ที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากการทดสอบเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์พบว่าค่าความสามารถในการยืดจนขาดค่อนข้างต่ำ (ไม่ถึง 100 %) แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันมากอยู่ที่ประมาณ $40 \pm 5\%$ และเมื่อผ่านการ Annealing ก็จะมี ความสามารถในการยืดน้อยลงเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างผลึกมีเปลี่ยนแปลงจากการอบ

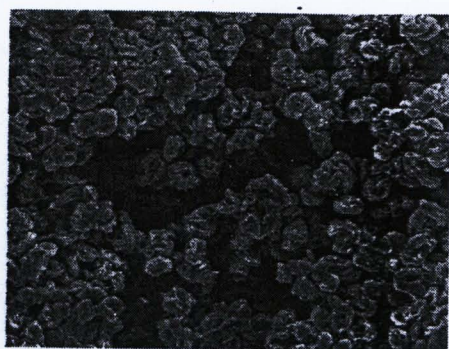
การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก



รูปที่ 4 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของ TPVs ที่มีปริมาณสารวัลคาไนซ์เทียบกับส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณสารวัลคาไนซ์จะมีความต้านทานต่อแรงกระแทกใกล้เคียงกันที่ประมาณ 170 ± 10 J/m อาจเนื่องมาจากสัดส่วนของยาง พลาสติกคงที่และ ปริมาณสารวัลคาไนซ์ไม่ได้เข้าไปเป็นตัวดูดกลืนพลังงานกระแทกไว้ ปริมาณสารวัลคาไนซ์จึงไม่เป็นตัวแปรที่ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

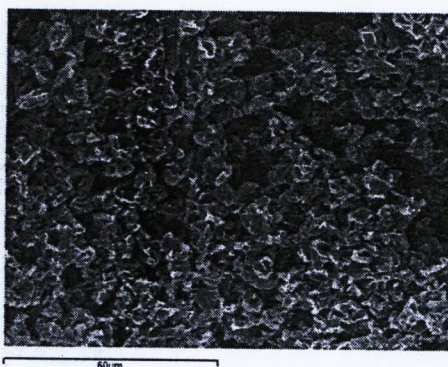
การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา



A



B



C

รูปที่ 5 SEM Micrographs ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด้วยครีมปีกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยแปรปริมาณสารวัลคาไนซ์ ซึ่งใช้กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 5 เป็นลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณสารวัลคาไนซ์ ที่วิเคราะห์โดยการส่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่าในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยกระบวนการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์จะทำให้อนุภาคยางมีลักษณะเป็นก้อนกลมกระจายตัว (dispersion) อยู่ในเฟสของพลาสติกที่เป็นเฟสต่อเนื่อง (matrix) และพบว่าการใช้สารวัลคาไนซ์ต่างกันจะทำให้อนุภาคมีขนาดต่างกันโดยจะเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ สูตร A > สูตร B > สูตร C ตามลำดับ ถ้าหากเฟสของยางมีขนาดยังเล็ก สม่าเสมอ และกระจายตัวอย่างทั่วถึงก็จะทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติดียิ่งขึ้น ในที่นี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ปริมาณสารวัลคาไนซ์เทียบกับยางและพลาสติกทั้งหมดมีสมบัติสอดคล้องกับสัณฐานวิทยา

II. เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณสารและชนิด Compatibilizer (HDPE-g-MA และ PhSP-HDPE) โดยเลือกใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพและสัดส่วนการเบลนด์ CRM/NR/HDPE ที่ 40/10/50

การดัดแปลงโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

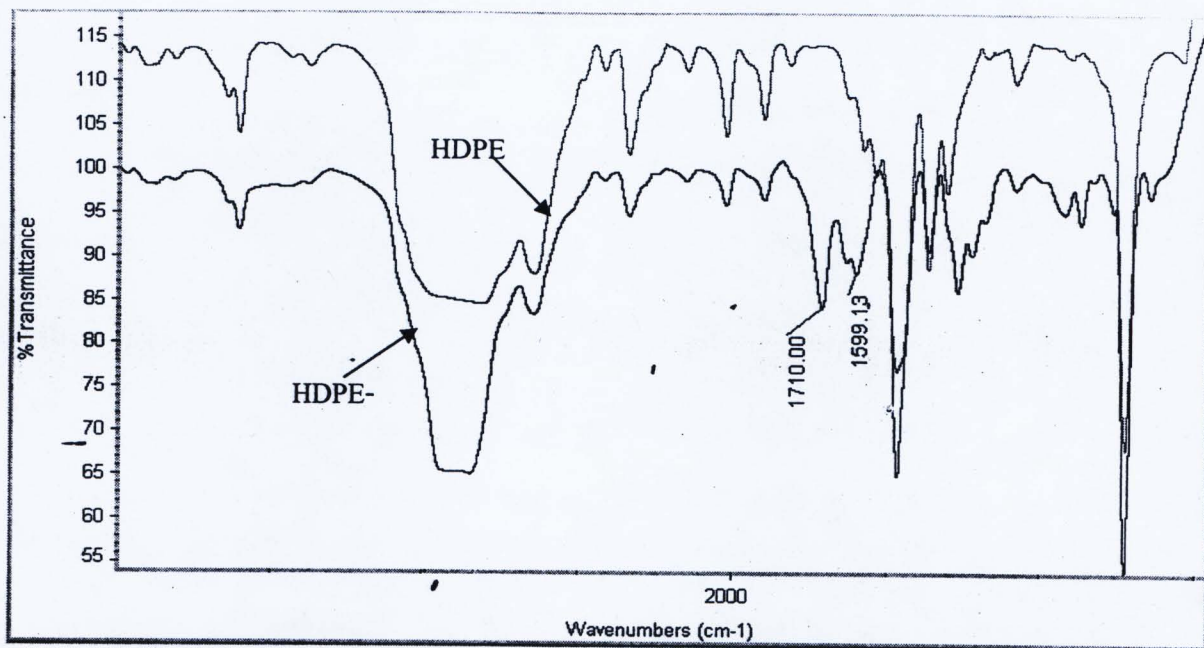
1.1 การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) และการวิเคราะห์หาปริมาณการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) โดยอบพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น ชั่งมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(%wt HDPE) ผสมกับไดคลอโรเมทิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ปริมาณ 2 %wt HDPE จากนั้นนำมาละลายในอะซิโตนแล้วนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ระเหยอะซิโตนออกโดยนำไปแช่ใน water bath แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ ที่อุณหภูมิ 180°C ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที (ใช้ Fill factor เท่ากับ 0.8 ของปริมาตรความจุห้องผสมของเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์) เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ด้วยเทคนิค FTIR

1.2 การดัดแปลงโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงด้วยไคเมททิลอล ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic modified high density polyethylene, PhSP-HDPE)

เตรียม PhSP-HDPE โดยทำการชั่งพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงปริมาณ 100 ส่วนโดยน้ำหนัก แล้วอบที่อุณหภูมิประมาณ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น ทำการบดผสมด้วยเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ ที่อุณหภูมิ 180°C ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที (ใช้ Fill factor เท่ากับ 0.8 ของปริมาตรความจุห้องผสมของเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์) เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นบดผสมกับไคเมททิลอลฟีนอลิกเรซิน (SP-1045) 4 ส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงเติม Stannous Chloride (SnCl_2) เพื่อเป็น Halogen donor ปริมาณ 0.8 ส่วนโดยน้ำหนักของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (George. *et al.*, 2000) ลงในห้องผสมต่ออีก 1 นาที แล้วนำพอลิเมอร์ออก ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไคเมททิลอล ฟีนอลิกเรซิน ด้วยเทคนิค FTIR

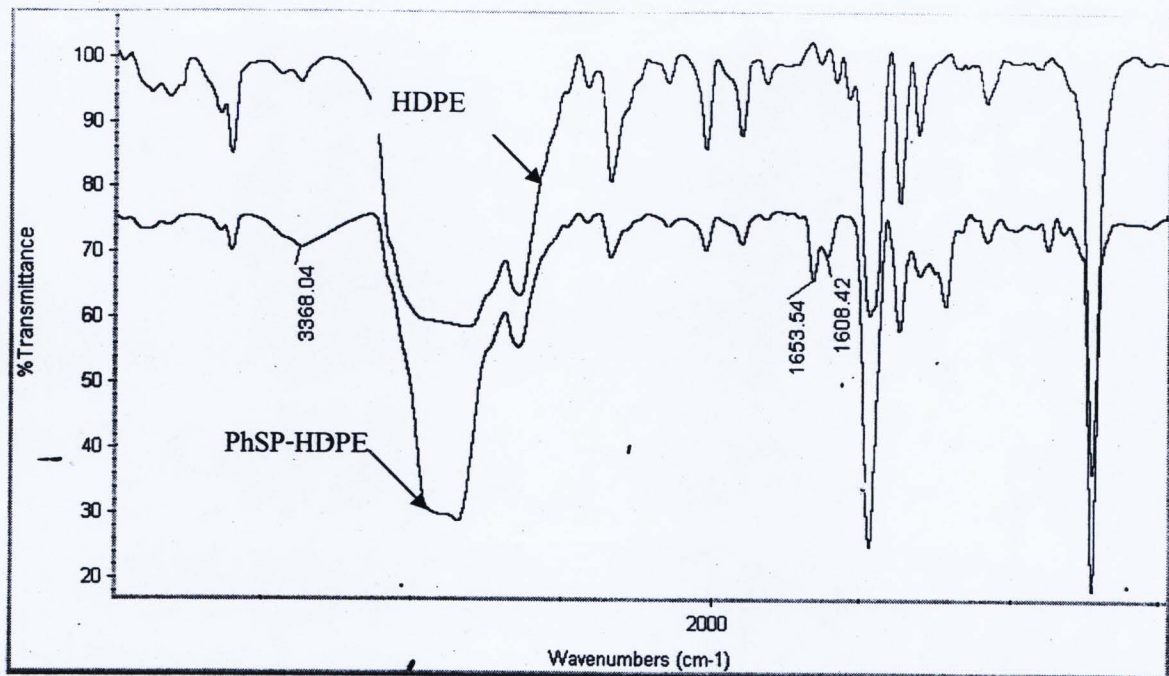
การเตรียมและสเปกตรัมอินฟราเรดของ HDPE-g-MA และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ได้
สเปกตรัมอินฟราเรด แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ HDPE และ HDPE-g-MA

จากการเตรียม HDPE-g-MA แล้วนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ HDPE ดังรูปที่ 6 พบว่า สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เตรียมได้นั้น ปรากฏพิกที่ตำแหน่งคลื่น 1710 cm^{-1} จะแสดงถึงการสั่นแบบยืดแบบสมมาตร (Symmetric stretching vibration) ของหมู่คาร์บอนิล (-C=O) ซึ่งเป็นการดูคดกลืนของหมู่กรดซัคซินิก (Succinic acid) ที่เกิดจากการแตกตัวของวงแหวนซัคซินิกแอนไฮไดรด์ หากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ยังอยู่ในรูปของวงแหวนแอนไฮไดรด์จะปรากฏที่เลขคลื่น 1784 cm^{-1} แสดงถึงการมีหมู่คาร์บอนิลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟชันพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (George, et al., 1995)

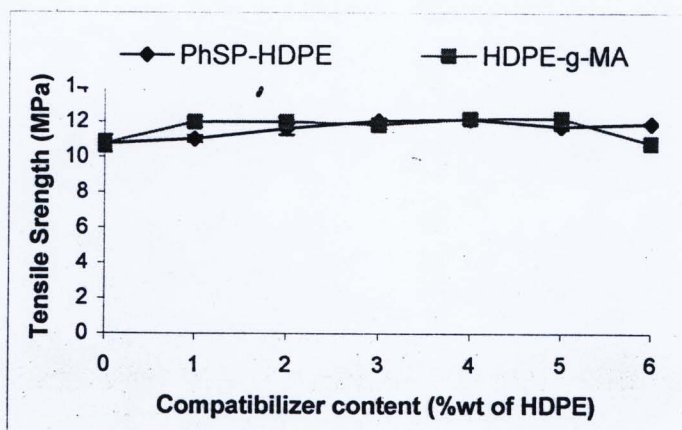
การเตรียมและสเปกตรัมอินฟราเรดของ PhSP-HDPE และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ได้
สเปกตรัมอินฟราเรด แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 อินฟราเรดสเปกตรัมของ HDPE และ PhSP-HDPE

จากการเตรียม PhSP-HDPE แล้วนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ HDPE ดังรูปที่ 7 พบว่า สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เตรียมได้นั้น ปรากฏพิกที่ตำแหน่งคลื่น 3368 cm^{-1} แสดงถึงการดูดกลืนของหมู่ฟีนอลในไดเมททิลลอลฟีนอลิกเรซิน ซึ่งเกาะติดอยู่กับโครงสร้างของพอลิเอทิลีน ส่วนเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 1653 cm^{-1} จะแสดงพิกของหมู่ $\text{C}=\text{C}$ บนพอลิเอทิลีนที่ถูกดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดเมททิลลอลฟีนอลิกเรซิน (George *et al.*, 1999)

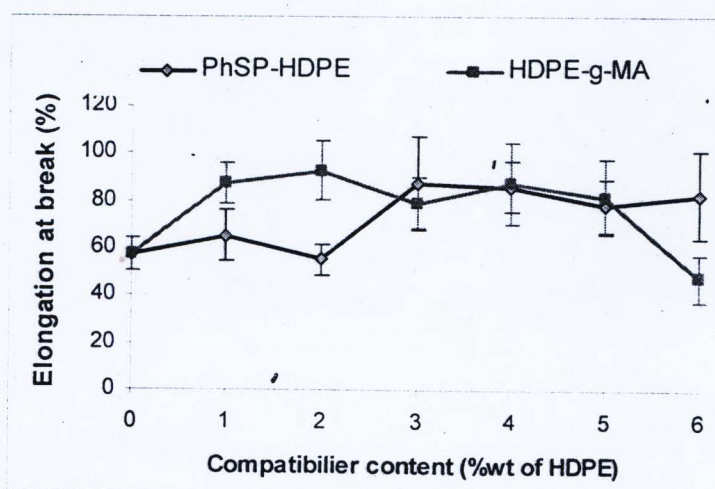
การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง



— รูปที่ 8 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ของ HDPE-g-MA และ PhSP-HDPE ที่ใช้ปริมาณ 1-6 %wt of HDPE

จากรูปที่ 8 จะพบว่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ แต่ที่ปริมาณ 6 %wt of HDPE ของการใช้ HDPE-g-MA ค่าจะเริ่มตกลง โดยที่ HDPE-g-MA จะทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า PhSP-HDPE เป็นผลเนื่องจากการใช้เปอร์ออกไซด์ในปฏิกิริยาการเตรียม HDPE-g-MA เข้าไปวัลคาไนซ์เกิดการเชื่อมโยงพันธะขึ้นในโครงสร้างของพอลิเอทิลีนและยางได้และไม่ได้ส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์การตัดสายโซ่ (Beta C-C Scission) ในโมเลกุลของพอลิเอทิลีน (พันทิภา, 2549) อีกทั้งหมีฟีนอลิกใน PhSP-HDPE เป็นหมีฟีนอกซีที่หนาแน่น มีความเกาะก่ทำให้ไปขัดขวางการเชื่อมโยง ทำให้พันธะไม่แข็งแรงเท่ากับ HDPE-g-MA

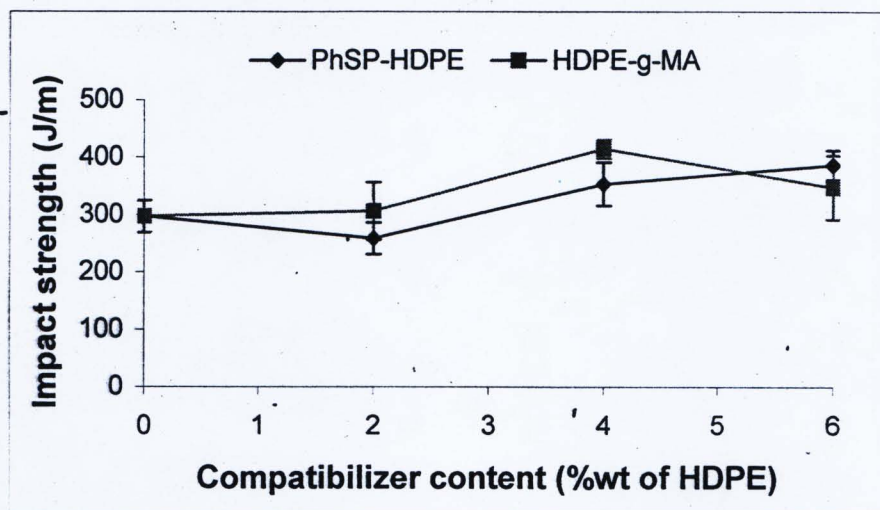
การทดสอบสมบัติความสามารถในการยืดจนขาด



รูปที่ 9 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ของ HDPE-g-MA และ PhSP-HDPE ที่ใช้ปริมาณ 1-6 %wt HDPE

สารเพิ่มความเข้ากันได้ นอกจากจะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นแล้ว ยังสามารถทำให้ความสามารถในการยึดจนขาดเพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 9 จะพบว่า HDPE-g-MA จะทำให้ความสามารถในการยึดจนขาดสูงกว่า PhSP-HDPE และค่าที่ได้จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ แต่ที่ปริมาณ 6 %wt HDPE ของการใช้ HDPE-g-MA ค่าจะเริ่มตกลงเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงในรูปที่ 8

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

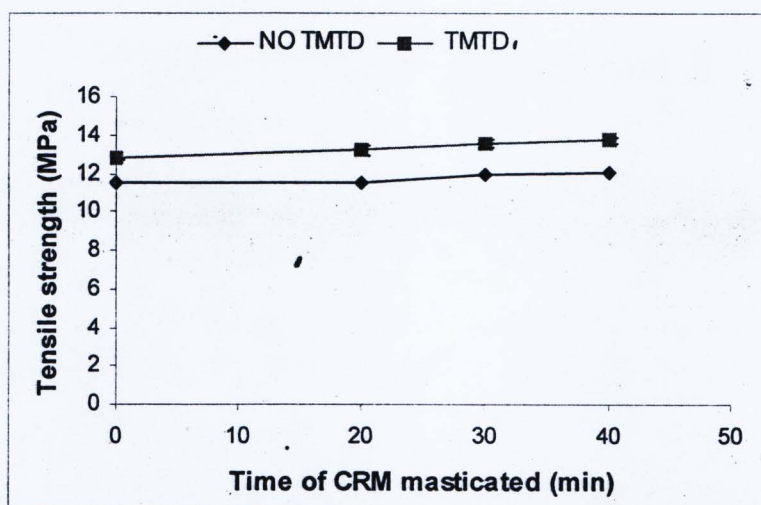


รูปที่ 10 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ของ HDPE-g-MA และ PhSP-HDPE ที่ใช้ปริมาณ 1-6 %wt HDPE

จากรูปที่ 10 คือค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ซึ่งในการทดสอบนี้จะเลือกชนิด HDPE-g-MA และ PhSP-HDPE ที่ปริมาณ 2, 4 และ 6%wt HDPE จะพบว่าสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด HDPE-g-MA จะทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าชนิด PhSP-HDPE และที่ปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้สูงขึ้นทำให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้นด้วย แต่ถ้ามีปริมาณสูงเกินไปจะทำให้ปริมาณที่ใช้เกินจุดวิกฤติของความเข้มข้นไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC) โดยจะเกิดการอิ่มตัวระหว่างผิว (Interface saturation) ของพอลิเมอร์เบลนด์ เมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มความเข้ากันได้มากกว่าจุด CMC แล้วทำให้ไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมระหว่างผิวประจัญของพอลิเมอร์ (พันทิภา, 2549) ส่วนที่เหลือก็จะไปแทรกตัวระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เบลนด์ทำให้สมบัติตกลง

III. ศึกษาอิทธิพลของเวลาการบดและการเติมสารเตตระเมทิลไทยูเรม ไดซัลไฟด์

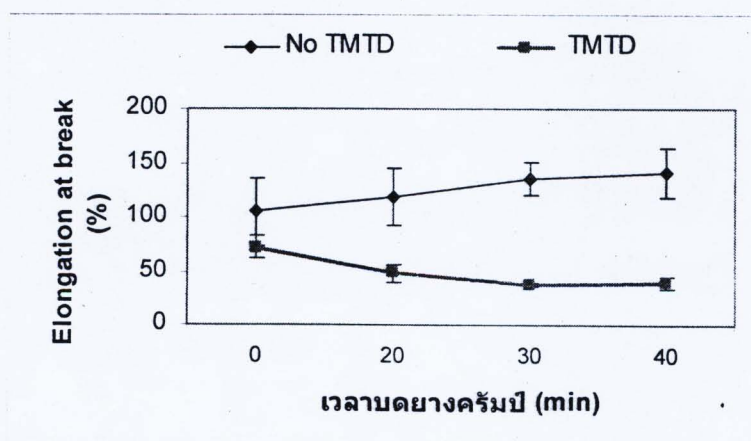
การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง



รูปที่ 11 ความทนทานต่อแรงดึงกับเวลาการบดยางครัมป์ที่ไม่ใส่และใส่ TMTD ของ TPVs

จากการทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงดึงที่แปรเวลาในการบดยางครัมป์ที่ไม่ใส่สาร TMTD ดังรูปที่ 11 นั้นพบว่า เมื่อยางครัมป์ผ่านการบดนานขึ้นก็จะทำให้ความทนทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย การบดยางครัมป์ที่มีสาร TMTD ที่เวลานานขึ้นก็จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันด้วย และถ้าเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกัน การใส่สารรีเคลม TMTD นั้นก็จะทำให้ความทนทานต่อแรงดึงมีค่าสูงกว่าการไม่ใส่ TMTD ดังรูปที่ 11

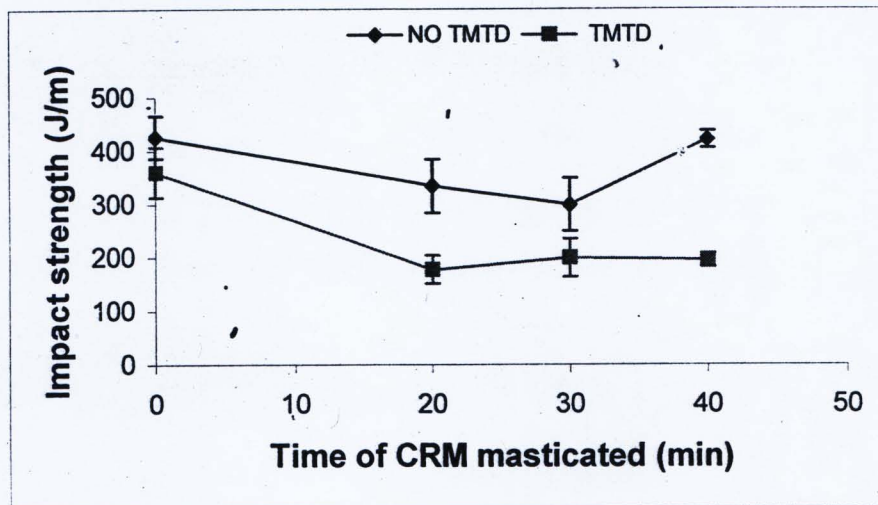
การทดสอบสมบัติความสามารถในการยืดจนขาด



รูปที่ 12 ความสามารถในการยืดจนขาดกับเวลาการบดยางครัมป์ที่ไม่ใส่และใส่ TMTD ของ TPVs

ความสามารถในการยึดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรเวลาบดยางครัมป์ที่เวลา 0, 20, 30 และ 40 นาที โดยจะแบ่งออกเป็นยางครัมป์ที่ไม่ใส่ TMTD กับยางครัมป์ที่ใส่ TMTD ดังรูปที่ 12 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่ TMTD ขณะบดยางครัมป์ที่เวลาต่างๆ ความสามารถในการยึดจนขาดจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาบดที่นานขึ้นด้วย ส่วนเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ TMTD ในขณะบดยางครัมป์ จะมีความต้านทานต่ำกว่าและมีแนวโน้มลดลงตามเวลาการบดที่นานขึ้น

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก



รูปที่ 13 ความต้านทานต่อแรงกระแทกกับเวลาการบดยางครัมป์ที่ไม่ใส่และใส่ TMTD ของ TPVs

จากรูปที่ 13 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สาร TMTD จะมีความต้านทานต่อแรงกระแทกมากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สาร TMTD อาจเนื่องมาจากการเข้าไปทำปฏิกิริยา Devulcanization จะมีการตัดสายโซ่และมีการรวมสายโซ่ของยางอีกครั้ง ซึ่งพันธะอาจจะไม่แข็งแรงและมีปริมาณการเชื่อมโยงลดลง ส่งผลให้สมบัติของยางที่ไม่ใส่ TMTD มีค่าสูงกว่า

จากการทดลองนี้จะได้ว่า การใช้ TMTD ที่เหมาะสมร่วมกับยางครัมป์ที่เวลาต่างๆ นั้นจะทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติดีขึ้นเฉพาะความทนทานต่อแรงดึงเท่านั้น แต่ความสามารถในการยึดจนขาดและความต้านทานต่อแรงกระแทกจะมีสมบัติต่ำกว่าการไม่ใส่ TMTD อย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งราคาดันทุนมีค่าสูงขึ้นด้วย จึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้สาร TMTD และสำหรับการบดเฉพาะยางครัมป์ที่เวลา 40 นาทีก่อนเบลนดจะทำให้เทอร์โมพลาสติกมีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติความสามารถในการยึดจนขาดมีค่าสูงขึ้น แต่จะเพิ่มพลังงานที่ใช้การบดนานขึ้นด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

พรพรรณ นิธิอุทัย. (2528). สารเคมีสำหรับยาง, ปัตตานี. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พัฒนา เกื้อเส้ง. (2549). อิทธิพลของน้ำมัน พลาสติกไซเซอร์และสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โม

พลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนดยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.

- วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พันทิภา วงษ์พานิช. 2549. การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์เบลนด์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สมบัติ พุทธจักร และหะหุรม หีมสุหรี. (2550). เอกสารประกอบการเรียนวิชา 723-272 ปฏิบัติการ สมบัติสสารและรีโอโลยี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- สมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกไทย, 2550. ข้อบกพร่องของชิ้นงานฉีดพลาสติกและวิธีแก้ไข (ออนไลน์). สืบค้นจาก: www.tpia.org [27 กันยายน 2550].
- วิสุทธิ แก้วสกุล (2550). การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับพอลิโพรไพลีน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อรอุษา สรวารี. (2546). สารเติมแต่งพอลิเมอร์. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Duin, M.V., 2006. Recent Developments for EDPM-Based Thermoplastic Vulcanisates (Online). Available: <http://www.ms-journal.de.html> [2007, July 1]
- Edson, G., 2004: U.S. Patent #6,703,440.
- George, S., Joseph, R., Thomas, S. and Varughese, K.T. 1995. Blends of isotactic polypropylene and nitrile rubber: morphology, mechanical properties and compatibilization. *Polymer*, 23: 4405-4416.
- George, S., Ramamurthy, K., Anand, J.S., Groeninckx, G., Varughese, K.T. and Thomas, S. 1999. Rheological behaviour of thermoplastic elastomers from polypropylene/ acrylonitrile-butadiene rubber blends: effect of blend ratio, reactive compatibilization and dynamic vulcanization. *Polymer*, 15: 4325-4344.
- George, S., Varughese, K.T. and Thomas, S. 2000. Thermal and crystallization behavior of isotactic polypropylene/nitrile rubber blends. *Polymer*, 14: 5485-5503.
- Holden, G. 2000. Understanding Thermoplastic Elastomers. Hanser Publishers, Munich, 9-72.
- Ishiaku, U.S., Chong, C.S. and Ismail, H. 1998. Determination of optimum De-Link R concentration in a recycled rubber compound. *Polymer Testing* 18 (1999) 621-633.
- Kiatkamjornwong, S., Nakason, C., Nuansomsri K., and Kaesaman A., 2006. Dynamic vulcanization of natural rubber/high density polyethylene blends: Effect of compatibilization, blend ratio and curing system. *Polymer testing* 25 782-796.
- Kumar, C. Radhesh, Fuhrmann, I., and Karger-Kocsis, J., 2002. LDPE-based thermoplastic elastomers containing ground tire rubber with and without dynamic curing. *Polymer Degradation and Stability*, 76 137-144.

- Myhre, M. and Mackillop, D.A. Rubber Recycling. Rubber Chemistry and Technology V.75 No. 3-5, Jul-Dec. (2002) 429-474.
- Nakason, C., Saiwari, S. and Kaesaman, A. 2006. Rheological properties of maleated natural rubber/polypropylene blends with phenolic modified polypropylene and polypropylene-g-maleic anhydride compatibilizers. Polym. Test., 3: 413-423.
- Naskar, A.K., De, and Bhomwick, J. *Appl. Polym. Sci.*, 84, 2002, p. 370.
- Punnarak, P., Tantayanon, S. and Tangpasuthadol, V. 2006. Dynamic vulcanization of reclaimed tire rubber and high density. polyethylene blends Polymer Degradation and Stability 91. 3456-3462.
- Rajalingam, P., Sharpe, J. and Baker W.E. Rubber Chem Technol 1993;66:664-77.
- Sunthonpagasit, N., Duffey, M.R., 2003. Scrap tire to crumb rubber: feasibility analysis for processing facilities, Resources, Conservation and recycling 40 (2004) 281-299.
- Thititthammawong, A., Nakason, C., Sahakaro, K., and Noordermeer, J., 2007. Effect of Different types of peroxides on rheological, mechanical, and morphological properties of thermoplastic vulcanizates based on natural rubber/polypropylene blends. Polymer testing 26 537-546.

ความเห็นและข้อเสนอแนะในการพัฒนาเพื่อใช้ผลงานวิจัยในระดับอุตสาหกรรม

ในขณะนี้อยู่ในขั้นตอนที่จะหาผู้ผลิตวัสดุเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในเชิงพาณิชย์ที่มีศักยภาพในการผลิตที่สูง และมีความสามารถในการแข่งขันทางด้านเศรษฐศาสตร์ ก่อนที่จะพัฒนาสู่ตลาดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อไป ในขณะที่ผลิตภัณฑ์หลังคายางดันแบบจำนวนหนึ่งได้ทดลองเข้าสู่ตลาดผู้จัดสวนในขั้นเริ่มต้น ซึ่งเบื้องต้นได้มีการนำผลงานเข้าประกวดและได้รับรางวัลชนะเลิศระดับประเทศในผลงานกระเบื้องยางที่เตรียมด้วยวัสดุที่ได้จากงานวิจัยนี้ ชื่อรางวัลคือ Green Innovation Award 2008 โดยการแข่งขันดังกล่าวจัดขึ้นโดยกระทรวงศึกษาธิการ ร่วมกับบริษัท ปตท. เคมีคัล (มหาชน) จำกัด คาดว่าจะสร้างความน่าเชื่อถือและสร้างการประชาสัมพันธ์ในตัวชิ้นงานระดับหนึ่ง

ในขณะนี้ได้มีการทดสอบการใช้วัสดุนี้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์ตัวอย่างในขั้นต้นแล้ว ทางภาคเอกชนผู้ร่วมทุน มีความเห็นว่าเพื่อให้มีศักยภาพในเชิงเศรษฐศาสตร์นั้นจำเป็นต้องมีการผลิตในปริมาณที่สูง ดังนั้นในขั้นต้นจึงควรที่จะทำการผลิตวัสดุเพื่อจำหน่ายเพื่อทดแทนในผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีในท้องตลาดก่อน โดยผู้ร่วมทุนภาคอุตสาหกรรมทำหน้าที่เป็นผู้จัดจำหน่าย และวัสดุส่วนหนึ่งจะสามารถนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ของผู้ร่วมทุนตามความเหมาะสม

ขณะเดียวกันเนื่องจากผลงานมีศักยภาพในเชิงพาณิชย์ จึงต้องมีขั้นตอนในการจดสิทธิบัตรเพื่อป้องกันทรัพย์สินทางปัญญาควบคู่กันไปด้วย ซึ่งต้องมีการเจรจาร่วมกันอีกครั้งหนึ่ง



