

แต่ทว่าการนำเศษยางมาผสมกับวัสดุที่สามารถไหลได้ภายใต้ความร้อนและความดัน จะสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลาย และมีราคาถูก ทั้งนี้หัวใจในการที่จะทำให้การนำกลับมาใช้ใหม่ประสบความสำเร็จได้คือการลดต้นทุน ระบบการผลิตต่อเนื่อง เช่น การเอ็กซ์ทรูดซ์ หรือ การฉีดเข้าแบบ (injection molding) เป็นแนวทางสำคัญที่จะนำมาซึ่งผลสำเร็จนั้น

การผสมยางลงในพลาสติกจะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติพิเศษกับพลาสติกได้ เช่น ความทนทานต่อการกระแทก เป็นต้น เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซท (TPVs) ราคาถูกสามารถเตรียมได้โดยการผสมเศษยางจากยางรถยนต์เข้ากับพลาสติก เช่น โพลีโพรไพลีน หรือ โพลีเอทิลีน ได้การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากวัสดุนำกลับมาใช้ใหม่คือเศษยางรถยนต์ และพลาสติก จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ โดยนอกจากจะช่วยเป็นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรของธรรมชาติให้ได้ประโยชน์สูงสุดแล้ว จะยังเป็นการสร้างกลไกทางเศรษฐกิจที่จะผลักดันไปสู่ระบบการนำมาใช้ใหม่ของวัสดุประเภทยาง หรือแม้กระทั่งพลาสติกได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

การนำเศษยางรถยนต์ หรือแม้กระทั่งเศษยางวัลคาไนซ์ประเภทอื่น ๆ นำกลับมาใช้ใหม่ด้วยการผสมกับพลาสติกนั้นจะสามารถทำได้ค่อนข้างง่ายและราคาถูกกว่าการรีไซเคิลยางด้วยกระบวนการอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาผสมเข้ากับพลาสติกราคาถูกเช่น โพลีโพรไพลีน, โพลีเอทิลีน หรือ โพลีไวนิลคลอไรด์ จะทำให้ได้วัสดุเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ หรือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซทที่มีราคาถูก

วัสดุดังกล่าวนี้มีการใช้งานได้อย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นงานในอุตสาหกรรมยานยนต์, อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์, เครื่องมือ, เครื่องใช้ไฟฟ้า และอื่น ๆ อีกมากมาย เนื่องจากความง่ายในกระบวนการผลิต, ราคาถูก และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาเพื่อศึกษาถึงแนวทางการผลิตวัสดุเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ หรือ วัสดุเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซท จากเศษยางผสมกับพลาสติกนั้น จึงเป็นแนวความคิดที่น่าสนใจ ทั้งนี้นอกเหนือจากความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุราคาถูกสำหรับผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายประเภทแล้วยังส่งเสริมกิจกรรมรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาภาวะแวดล้อมอีกด้วย

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางครัมป์ (Crumb rubber)

ยางครัมป์เป็นยางที่สามารถนำไปผสมกับยางได้ ซึ่งได้มาจากการนำเศษยางวัลคาไนซ์แล้วมาบดเป็นผงขนาดเล็กประมาณ 20-40 เมช สามารถนำมาใช้ในงานอัดแบบ (Moulding) ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนของยาง และส่วนที่เป็นยางครัมป์ยังช่วยป้องกันการเกิดฟองอากาศที่จะเกิดขึ้นในการอัดแบบได้ด้วย โดยจะใช้ประมาณ 5-10 phr ส่วนยางวัลคาไนซ์ที่ผสมยางครัมป์จะช่วยลด "nerve" ของยางลงไป เพราะความเครียดที่มีอยู่ในยางครัมป์จะหายไป โดยที่ยางครัมป์จะทำหน้าที่คล้าย ๆ กับสารตัวเติมในยาง และถ้ายางครัมป์มีขนาดอนุภาคเล็กลงไปอีก จะทำให้สมบัติของยางวัลคาไนซ์ดีขึ้น ทัดเทียมกับการใช้ยางรีเคลม และถ้ามีจะดีขึ้นเล็กน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปริมาณยางครัมป์ที่ใช้ในการผสมด้วย สำหรับข้อจำกัดของยางครัมป์นี้คือไม่สามารถใช้กับเครื่องเอ็กซ์ทรูดซ์หรือเครื่องรีดแผ่นได้เนื่องจากมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้ผิวของยางขรุขระได้ (พรพรรณ, 2528; 341)

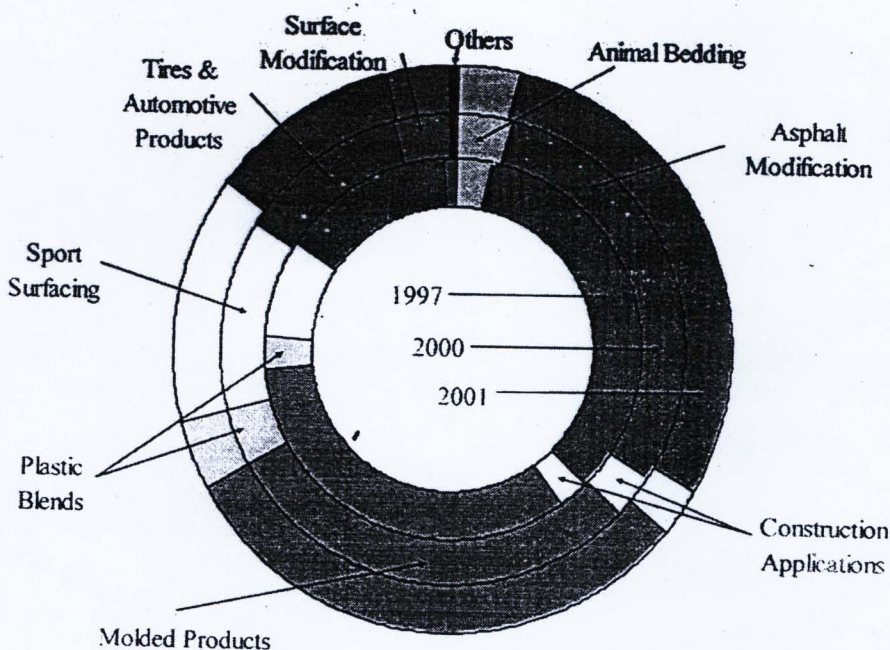
โดยทั่วไปยางครัมป์ได้จากโรงงานที่ทำผลิตภัณฑ์จากยางวัลคาไนซ์ ทั้งโรงงานรองเท้า โรงงานทำยางล้อดอก เป็นต้น ซึ่งยางครัมป์ที่ทำจากล้อจะเรียกว่าเป็นวัสดุคิดแปลงจากยางรถยนต์ (Tire-derived material, TDMs) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย โดยเฉพาะ

ในงานด้านวิศวกรรมโยธา เช่น สารตัวเติมสำหรับแอสฟัลต์พื้นถนน รวมไปถึงเศษยางครัมป์เกรดต่างๆ (Crumb rubber material, CRM) ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปของยางคอมเพาต์ หรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

ซึ่งโดยธรรมชาติของยางล่อนั้นถือว่าเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการสึกหรอที่สูงมาก คือแทบที่จะไม่มีการย่อยสลายได้ในธรรมชาติ สำหรับยางล่อนั้นถือได้ว่าเป็นการออกแบบทางวิศวกรรมที่ดีที่สุดอย่างหนึ่งและยังถือได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความคงทนมากที่สุดชนิดหนึ่งที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้น จากคุณสมบัติดังกล่าวของยางล่อร ทำให้เกิดปัญหามลภาวะจากยางล่อรขึ้นในหลายประเทศ อย่างไรก็ตาม ถ้าหากพิจารณาในอีกมุมหนึ่งก็จะพบว่ายางล่อรนั้นก็เปรียบเสมือนทรัพยากรอีกประเภทหนึ่งที่มีคุณค่าสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ และควรนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งจะมีตัวอย่างการศึกษาสมบัติและการใช้ประโยชน์ของยางครัมป์ ดังนี้

Rajalingam (1993) ได้ศึกษาการใช้ GRT เป็นสารเสริมแรงในพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สายโซ่ตรง (linear low density polyethylene; LLDPE)

Edson (2004) ซึ่งได้จัดสิทธิบัตรในการเตรียมวัสดุจากยางครัมป์ ดังนี้ 20-50% ยางและพลาสติก รีไซเคิล, 10-30% เป็นสารเกาะยึด (elastomeric binders), 20-40% เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ และอีก 10-30% เป็น HDPE



รูปที่ 2.1 ปริมาณการใช้ยางครัมป์ในอเมริกาเหนือ

(Sunthonpagasit, N., Duffey, M.R., 2003 อ้างจาก RRI, 1998RRI, 2001RRI, 2002.)

2.2 พอลิเมอร์เบลนด์

พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) คือ พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่เกิดจากการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน โดยมีลักษณะเป็นเนื้อผสม (heterogeneous) แต่มีการ

ดัดแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) ให้มีสมบัติเฉพาะกับการใช้งานลักษณะต่างกัน พอลิเมอร์ เบลนด์อาจถูกเรียกอีกชื่อ คือ พอลิเมอร์อัลลอยด์ (Polymer alloys)

2.2.1 วัตถุประสงค์ของการเบลนด์

พอลิเมอร์ชนิดใหม่ซึ่งเกิดจากการเบลนด์ เพื่อต้องการปรับปรุงให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติจากพอลิเมอร์แต่ละตัวที่นำมาเบลนด์ตามความต้องการของการใช้งาน โดยไม่จำเป็นต้องมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ชนิดใหม่ขึ้นมา ซึ่งมีความซับซ้อนมาก นอกจากนี้ยังเป็นการประหยัดต้นทุน เนื่องด้วยการนำพอลิเมอร์ที่มีราคาถูกเบลนด์กับพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานสมรรถนะสูง หรือมีราคาสูง ให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติยอมรับได้

2.2.2 การเข้ากันได้ของการเบลนด์

การเข้ากันได้ (Compatibilization) เป็นหลักสำคัญที่สุดของการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ โดยทั่วไปการเข้ากันได้ หมายถึง การผสมเข้ากันได้ (miscibility) ในระดับโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ให้มีการแยกเฟสขององค์ประกอบที่ต่างกัน แต่สามารถผลิตพอลิเมอร์เบลนด์ ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งหากการเบลนด์การเข้ากันได้ไม่ดี จะเกิดผลเสียต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์นั้น โดยปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ เช่น จลศาสตร์ของกระบวนการผสม อุณหภูมิของการผสม การมีตัวทำละลายหรือสารเติมแต่งอื่นๆ อยู่ในระบบ เป็นต้น เมื่อติดตามลักษณะทางสัณฐานวิทยา หลังจากผ่านกระบวนการผสม จะพบได้ 2 ลักษณะ ได้แก่

- 1) เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวและไม่เห็นการแยกเฟสเลย
- 2) เข้ากันได้บางส่วน สังเกตเห็นการแยกเฟส แต่ที่จุดต่อระหว่างเฟส (Boundary) หรือ ผิวประจัญ (Interface) จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูง

พอลิเมอร์เบลนด์ที่เข้ากันได้ไม่ดีหรือความไม่เข้ากันได้ (Incompatibilisation) อันเป็นปัญหาที่สำคัญของการเบลนด์ทำให้มีสมบัติที่ไม่ดีด้วย เนื่องจากจะเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด นั่นคือเป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ ก่อให้เกิดการแตกหัก (Crack) ได้ง่าย สมบัติเชิงกลแย่ และทำให้ตัวทำละลายแพร่เข้าไปได้ง่าย เนื่องจากการมีช่องว่างมากกว่าปริมาตรอิสระ (free volume) ของพอลิเมอร์เดิมแต่ละตัว

โดยทั่วไปความไม่เข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่นำมาเบลนด์จะเกิดจากปัจจัยหลัก 3 ประการคือ

1) ความไม่เข้ากันด้านความหนืด (Viscosity incompatibility) กล่าวคือถ้าความหนืดซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานพื้นผิวเข้ากันได้ดี ก็จะได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่เข้ากันได้ดีตั้งแต่ในขั้นตอนการผสม ซึ่งความเข้ากันไม่ได้นี้สามารถปรับปรุงได้โดยการปรับอัตราส่วนของน้ำมันหรือสารตัวเติม หรือปรับปรุงในส่วน of กระบวนการแปรรูป และสามารถปรับปรุงโดยการปรับความหนืดเริ่มต้นของพอลิเมอร์

2) ความไม่เข้ากันทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic incompatibility) ความไม่เข้ากันทางเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถปรับปรุงได้ถ้าพลังงานพื้นผิวนั้นมีความแตกต่างกันไม่มากจนทำให้เฟสพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่าเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนและมีความสามารถในการยึดติดระหว่างเฟสเพียงพอ

3) ความไม่เข้ากันทางอัตราวัลคาไนเซชัน (Cure-rate incompatibility) เป็นผลมาจากการที่ยางแต่ละชนิดนั้นมีพลังงานกระตุ้นในการวัลคาไนเซชันที่แตกต่างกัน ลดการที่สารเคมีกระจายตัวไม่เท่ากัน

ในยางแต่ละชนิด โดยเฉพาะสารตัวเร่ง (Accelerator) หรือสารที่ใช้ในการวัลคาไนเซชัน (Vulcanizing agent)

ดังนั้นในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จะต้องมีการปรับปรุงให้เกิดการเข้ากันได้ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ตัวประสาน (Compatibilizer) ช่วยให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองให้ดีขึ้น ได้แก่ การใช้โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์และบล็อกเป็นตัวประสาน ซึ่งเป็นตัวประสานที่มีส่วนที่มีธรรมชาติทางเคมีเหมือนกันเข้ากับพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้พอลิเมอร์ที่มีส่วนของโมเลกุลที่มีลักษณะทางเคมีเหมือนกับพอลิเมอร์ที่ต้องการผสม โคพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานจะมีตำแหน่งอยู่ที่ผิวประจัญ (interface) ของพอลิเมอร์ที่ผสม ซึ่งโคพอลิเมอร์จะผสมระหว่างหมู่ฟังก์ชันเป็นตัวประสาน ซึ่งเตรียมจากการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีเหมือนกับพอลิเมอร์ที่จะทำการเบลนด์ มาทำการดัดแปลงโมเลกุลโดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์ชนิดที่สองที่นำมาทำการเบลนด์ได้

2.3 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomers, TPEs) เป็นส่วนหนึ่งของพอลิเมอร์เบลนด์ ซึ่งหมายถึง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของทั้งยางและพลาสติกเข้าด้วยกัน โดยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้มีสมบัติของอีลาสโตเมอร์ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิใช้งาน กล่าวคือให้สมบัติและการใช้งานเหมือนยางคงรูป (Conventional rubbers) แต่สามารถแปรรูปโดยใช้กระบวนการผลิตแบบเทอร์โมพลาสติก กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดๆ หนึ่ง (ขึ้นกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์นั้นๆ) เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ก็จะอ่อนตัวและมีสมบัติเหมือนพลาสติก สามารถเกิดการไหลได้ง่าย จึงนำเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องมือทั่วไปที่ใช้สำหรับขึ้นรูปพลาสติก เช่น เครื่องฉีดเข้าเป้า (Injection molding) เครื่องเป่า (Blow molding) หรือเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ (Extruder) เป็นต้น เมื่อเทอร์โมพลาสติกเย็นตัวลงก็จะเปลี่ยนสภาพจากของเหลวไหลง่ายเป็นของแข็งที่มีสมบัติเหมือนยาง ซึ่งการเปลี่ยนสภาพดังกล่าวเกิดขึ้นได้ง่ายและสามารถย้อนกลับได้ ดังนั้นเศษเหลือใช้ หรือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้รูป หรือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช้แล้ว สามารถนำไปผ่านกระบวนการแปรรูปทางเทอร์โมพลาสติกได้ใหม่เหมือนเช่นพลาสติก

ลักษณะทั่วไปของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นของแข็งจากพลาสติก (Hard domain, Plastic phase) และส่วนที่นิ่มซึ่งเป็นส่วนของอีลาสโตเมอร์ (Soft domain, Elastomer phase) โดยทั้งสองส่วนมีลักษณะแยกเฟสกัน ในส่วนเฟสแข็งจะให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรง และช่วยไม่ให้ส่วนเฟสอีลาสโตเมอร์เกิดการไหลอย่างอิสระภายใต้แรงกระทำ และเมื่อได้รับความร้อนหรือละลายในตัวทำละลาย ซึ่งเมื่อทำให้เย็นหรือระเหยตัวทำละลายออกไป เฟสแข็งก็จะกลับสู่สภาพที่แข็งแรงอีกครั้ง โดยเฟสแข็งในเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์นี้จะแสดงลักษณะเหมือนกับการเชื่อมโยงด้วยกัมมันต์ในการวัลคาไนส์แบบปกติ โดยการเชื่อมโยงในเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์อาจจะเป็นการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink) หรือการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical crosslink) ส่วนเฟสอีลาสโตเมอร์ (Elastomer phase) แสดงลักษณะทางอีลาสติซิตี (Elasticity, flexibility) ในการใช้งานเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติในการต้านทานต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ดี มักจะใช้เฟสแข็งที่มีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกทำให้มีความต้านทานต่อน้ำมันและตัวทำละลาย ส่วนเฟสของอีลาสโตเมอร์จะทำหน้าที่ให้สมบัติด้านความยืดหยุ่นและลักษณะทางอีลาสติซิตี เช่นความสามารถในการยืด ความสามารถ

ในการคืนรูป ด้วยลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละส่วนนี้เองจึงทำให้สามารถผลิตชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยใช้กระบวนการแปรรูปของเทอร์โมพลาสติกทั่วไป และสามารถนำไปใช้งานในลักษณะของอิลาสโตเมอร์ได้

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ของยางปกติกับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ จะเห็นว่า เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีกระบวนการผลิตที่ง่ายกว่ายางทั่วไป และยังมีสมบัติที่ดีหลายประการ อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle or Reprocess)

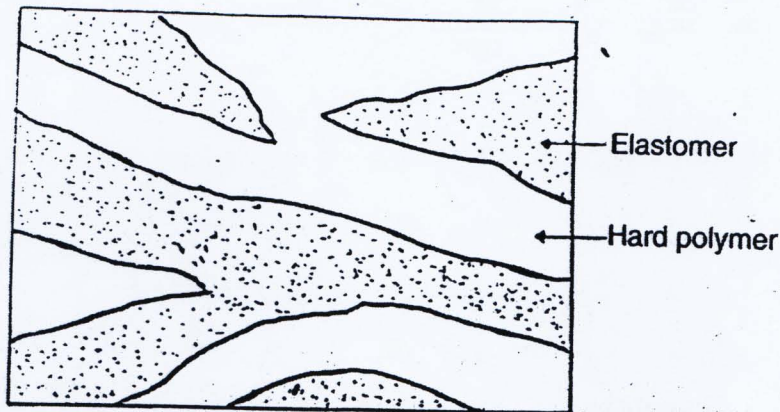
2.3.1 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แบบผสมพอลิเมอร์แข็งกับพอลิเมอร์ยืดหยุ่น

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แบบพอลิเมอร์แข็งหรือพลาสติกกับพอลิเมอร์ยืดหยุ่นหรือยาง (Hard polymer / elastomer combination) เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมในทางการค้า เนื่องจากมีความง่าย และสะดวกในการเตรียม กล่าวคือเป็นกระบวนการเบลนด์ภายในเครื่องมือที่มีอุณหภูมิเหมาะสมที่ทำให้พลาสติกหลอม และแรงเฉือนสูงเพื่อบดคานให้กระจายตัวอย่างเหมาะสมกับพลาสติกตามลักษณะของการเบลนด์ ซึ่งสามารถจำแนกการเตรียมได้ 2 วิธี ได้แก่

1) การเบลนด์แบบธรรมดา

การเบลนด์แบบธรรมดา (Simple blend) เป็นการเบลนด์พลาสติกกับยางในสถานะที่มีอุณหภูมิเพียงพอแก่การหลอมพลาสติกและมีแรงเฉือนสูง โดยพื้นฐานวิทยาของการเบลนด์แบบธรรมดาระหว่างพลาสติกกับยางมี 3 ลักษณะดังนี้

1. ส่วนของยาง (Elastomer phase) กระจายตัวในส่วนของพลาสติก (Hard phase) ซึ่งเฟสของพลาสติกเป็นเฟสต่อเนื่อง โดยวัสดุที่ได้จะสมบัติด้านความแข็ง (stiffness) และความแข็งแรง (strength) มาจากส่วนของพลาสติก ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จะมีความยืดหยุ่นเล็กน้อยและความเหนียวเหมือนเทอร์โมพลาสติก วัสดุชนิดนี้จะไม่แสดงความเป็นยางที่อุณหภูมิห้อง จึงไม่จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์
2. ส่วนของพลาสติกกระจายตัวอยู่ในส่วนของยางที่เป็นเฟสต่อเนื่อง สมบัติด้านความแข็ง และความแข็งแรงจะมาจากเฟสของยาง ซึ่งจะได้พอลิเมอร์ที่ไม่แข็งแรง สืบเนื่องมาจากส่วนของยางไม่ได้เกิดการวัลคาไนเซชัน จึงจำเป็นต้องใส่สารตัวเติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติ วัสดุไม่สามารถใช้งานในลักษณะของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ดังนั้นวัสดุในกลุ่มนี้จึงไม่จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์
3. ส่วนของพลาสติกและส่วนของยางกระจายตัวอย่างต่อเนื่องกันมีลักษณะคล้ายเซลล์เปิดของโฟม เรียกลักษณะแบบนี้ว่า เฟส โค-คอนตินิวอัส (co-continuous phase) พอลิเมอร์ที่ได้จะมีความแข็งแรงเป็นผลมาจากส่วนของพลาสติก แต่จะมีความยืดหยุ่นซึ่งเป็นผลมาจากส่วนของยาง เพราะว่ามีมีส่วนใดที่เกิดการเชื่อมโยง ทำให้สามารถเกิดการไหลได้ เรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



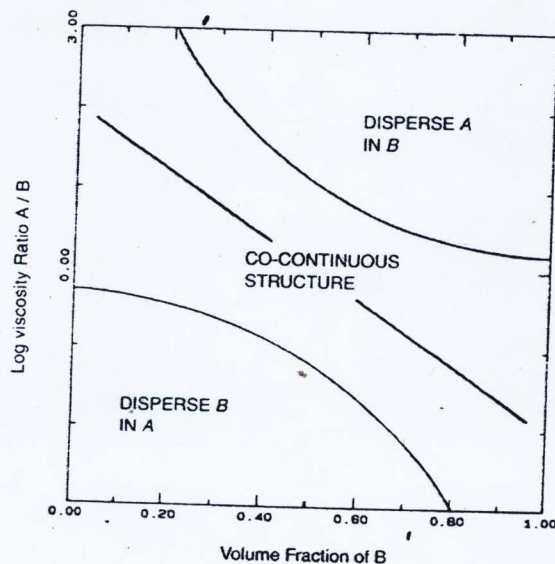
รูปที่ 2.2 สัมพันธภาพของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Holden, 2000)

การเบลนด์แบบธรรมดาที่มีปัจจัยที่สำคัญได้แก่ ความหนืดของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดต้องเข้ากันได้ ที่อุณหภูมิและอัตราเฉือนของการผสม ซึ่งอัตราเฉือนอยู่ในช่วง $100-1000 \text{ s}^{-1}$ ที่อัตราเฉือนต่ำๆ สามารถใช้เครื่องแปรรูปยางได้ เช่นเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ที่อัตราเฉือนสูงๆ สามารถใช้เครื่องมือแปรรูปพลาสติก เช่น เครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ (Twin screw extruder) ความหนืดสูงสุดที่เข้ากันได้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์ แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นลักษณะของความหนืดในอุดมคติ (Ideal viscosity) และสามารถเขียนสมการอธิบายได้ดังสมการที่ 1 และ 2

$$\log(\eta_A/\eta_B) = 2 - 4 \phi_B \quad (1)$$

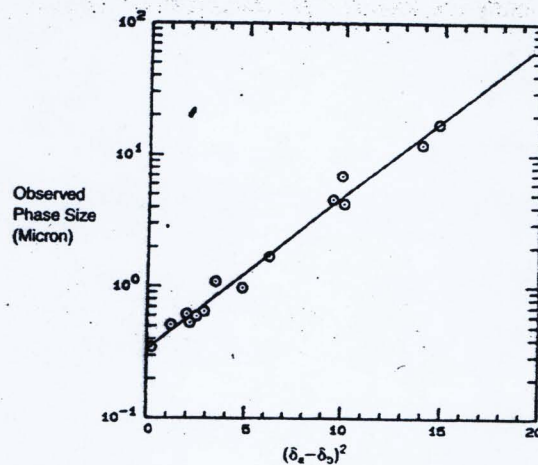
η_A และ η_B เป็นความหนืดของพอลิเมอร์ A และ B ส่วน ϕ_B เป็นอัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ B แสดงดังสมการที่ 2

$$\eta_A/\eta_B = \phi_A/\phi_B \quad (2)$$



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนืดของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดกับอัตราส่วนในการผสม (Holden, 2000)

ความเข้ากันได้ของการเบลนด์ จะพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างค่าความสามารถในการทำละลาย (Solubility parameter) ค่าความสามารถในการทำละลายของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดจะเกี่ยวข้องกับแรงตึงผิว (interfacial tension) ถ้าพอลิเมอร์ทั้งสองมีค่าแรงตึงผิวสูงจะทำให้เกิดเป็นระบบสองเฟส (two phase system) ที่มีขนาดใหญ่ โดยการเกิดเฟสขนาดใหญ่จะไปลดพื้นที่ผิวหน้า (interfacial area) และพลังงานพื้นผิว (interfacial energy) ในทางกลับกันถ้าพอลิเมอร์มีความสามารถใกล้เคียงกัน จะทำให้เกิดการกระจายตัวของเฟสที่เล็กมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์กับค่าความแตกต่างของความสามารถในการทำละลายของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่นำมาเบลนด์กัน พบว่าขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์มีขนาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความแตกต่างระหว่างค่าความสามารถในการทำละลายของพอลิเมอร์ที่ใช้



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของค่าความสามารถในการทำละลายต่อขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ (Holden, 2000)

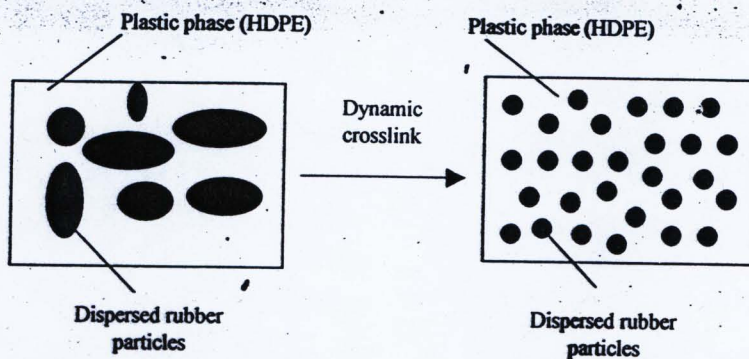
ถ้าปริมาตรของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเท่ากันจะเป็นการผสมในอุดมคติ (Ideal mixing) ซึ่งความหนืดของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดควรจะเท่ากัน แต่เมื่อปริมาตรไม่เท่ากันพอลิเมอร์ที่มีปริมาตรมากกว่าจะต้องมีความหนืดสูงกว่าด้วย เช่น ถ้าพอลิเมอร์ A มีปริมาตรเป็นสองเท่าของพอลิเมอร์ B ความหนืดของพอลิเมอร์ A ก็จะต้องเป็น 2-5 เท่าของพอลิเมอร์ B การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของความหนืดจะทำให้เกิดการกระจายตัวในเฟสของพอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูงกว่า การลดลงของความหนืดจะทำให้เกิดการกระจายตัวในเฟสของพอลิเมอร์ที่มีความหนืดต่ำกว่า

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยการเบลนด์แบบปกติ มักนิยมเลือกใช้กลุ่มพอลิโอเลฟินส์ (พอลิเอทิลีน และพอลิโพรไพลีน) ซึ่งจะมีราคาและความหนาแน่นต่ำ และจัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) ส่วนอิลาสโตเมอร์ที่นิยมนำมาเบลนด์ร่วม ได้แก่ ยางอีพียัวร์ (Ethylene polypropylene rubber, EPR) และยางอีพิดีเอ็ม (Ethylene polypropylene diene monomer, EPDM) เนื่องจากมีสมบัติการเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) ราคาถูก อุณหภูมิในการอ่อนตัวต่ำ และมีโครงสร้างคล้ายๆ กับพอลิโพรไพลีน และมีค่าความสามารถการละลายใกล้เคียงกันทำให้ได้การกระจายของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงทำให้การเบลนด์เข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรไพลีนกับยางอีพิดีเอ็มหรือยางอีพียัวร์ ทำให้ได้วัสดุที่มีราคาถูกและสามารถใช้งานที่อุณหภูมิช่วงกว้างได้ แต่ในระยะแรกมีการใช้ยางอีพิดีเอ็มมากกว่าเนื่องจากทำได้ง่ายกว่า

2) การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยใช้กระบวนการวัลคาไนเซชัน

แบบไดนามิกส์

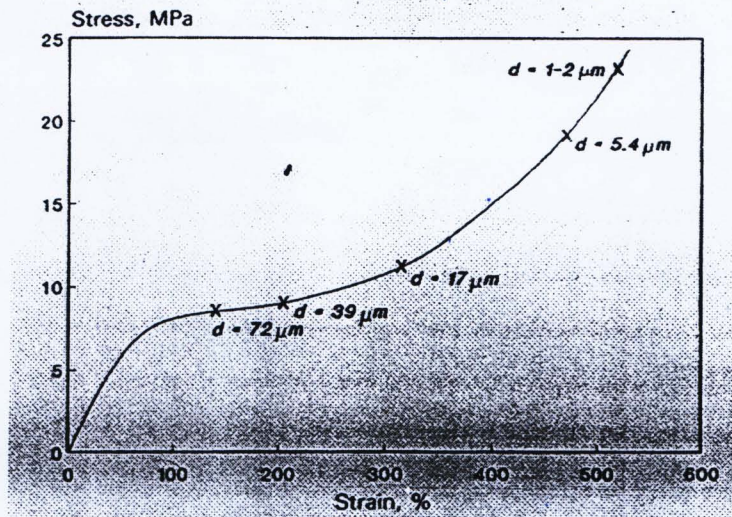
เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมโดยใช้กระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ จะเรียกอีกอย่างว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (Thermoplastic vulcanizate, TPVs) หรือไดนามิกส์วัลคาไนซ์ (Dynamic vulcanizate, DVs) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีความสำคัญมากในไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยมีหลักสำคัญในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์คือการใช้สารวัลคาไนซ์ในระบบ หรืออาจนำไปผ่านกระบวนการผสมสารเคมี (Compounding) จากนั้นก็นำมาเบลนด์กับพลาสติกในเครื่องผสมที่มีอุณหภูมิและแรงเฉือนสูงเหมาะสม ส่งผลให้ส่วนของยางเกิดการวัลคาไนเซชันในระหว่างการผสม หรือการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์นั่นเอง แล้วก็กระจายตัวในเฟสพลาสติกซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง ดังภาพที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาระหว่างการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ (ดัดแปลงจาก George, et al., 1999)

ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เริ่มจากการนำอิลาสโตเมอร์และเทอร์โมพลาสติกมาบดผสมเข้าด้วยกันภายใต้แรงเฉือนที่สูง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งวิธีแบบแบช (Batch process) โดยทั่วไปใช้เครื่องผสมแบบปิด หรือแบบต่อเนื่อง (Continuous process) โดยทั่วไปใช้ Co-rotating twin screw extruder แล้วเติมสารเคมีในการวัลคาไนซ์ ซึ่งอุณหภูมิการบดผสมต้องสูงพอในการหลอมเทอร์โมพลาสติก โดยการ วัลคาไนซ์จะเกิดขึ้นในระหว่างการบดผสม เมื่อเกิดการวัลคาไนซ์ความหนืดของอิลาสโตเมอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว. จนถึงจุดที่ความหนืดระหว่างเฟสอิลาสโตเมอร์กับเฟสพลาสติกต่างกัน (Mismatch) จึงเป็นสาเหตุให้เฟสอิลาสโตเมอร์เกิดการกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ในเฟสพลาสติกและเกิดการวัลคาไนซ์ต่อเนื่อง โดยต้องมีการให้แรงเฉือนจนกระทั่งเกิดการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ ฉะนั้นจะทำให้อนุภาคอิลาสโตเมอร์ กลับมารวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) และสามารถติดตามการวัลคาไนซ์ได้จากทอร์กการบดผสม (Mixing torque) หรือพลังงานการบดผสม หลังจากค่าทอร์กหรือพลังงานของการบดผสมขึ้นสูงสุดแล้วบดผสมต่อไปอีกเล็กน้อย เพื่อปรับปรุงความสามารถในการแปรรูปของพอลิเมอร์เบลนด์ หลังจากนั้นจึงนำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้ออกจากเครื่องบดผสมแล้วนำไปตัดให้มีขนาดเล็ก เพื่อทำการแปรรูปในขั้นต่อไป

อนุภาคขนาดเล็กที่เกิดขึ้นระหว่างทำการผสมทำให้เกิดการปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เช่น สมบัติด้านการคืนตัว สมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อการฉีก ความทนทานต่อน้ำมัน การใช้งานที่อุณหภูมิสูง และความแข็งแรงขณะหลอม



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) ของเทอร์โมพลาสติกโพลีอิมไนด์ที่เตรียมจากยางอีพ็อกซีกับพอลิโพรพิลีน โดยแปรขนาดอนุภาคของยางโพลีอิมไนด์ที่ระดับต่างๆ (Holden, 2000)

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าผลของขนาดอนุภาคของยางโพลีอิมไนด์ในช่วงที่มีขนาดใหญ่ (72 micron) ไปจนถึงขนาดเล็ก (1-2 micron) ต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกโพลีอิมไนด์ พบว่ายิ่งขนาดอนุภาคเล็กลง จะช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และมีความสามารถในการยืดตัวสูงขึ้น

2.3.2 การแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีทั้งส่วนที่มีความแข็ง (hard segment) และส่วนที่ความยืดหยุ่น (soft segment) ส่วนที่มีความแข็งจะทำหน้าที่เสมือนเป็นจุดเชื่อมโยงทางกายภาพ (physical crosslink) ของโซ่โมเลกุล ทำให้พอลิเมอร์ประเภทนี้มีพฤติกรรมตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมเหมือนกับยาง แต่ในขณะที่ความยืดหยุ่นสูงๆ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะประพฤติตัวเหมือนเทอร์โมพลาสติก ทำให้สามารถนำเทคนิควิธีการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกมาใช้ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ได้

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่อยู่ในสภาวะหลอม (molten state) มีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนอนนิวโทเนียน (non-Newtonian) คือความหนืดของพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน (shear rate) ที่อัตราเฉือนสูง เช่น ในกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีดหรือการขึ้นรูปแบบเอกซ์ทรูดเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะไหลได้ดีเพราะมีความหนืดต่ำ

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่หลังจากการแปรรูปแล้วได้อีก ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งเหนือยางโพลีอิมไนด์ซึ่งไม่สามารถจะนำกลับมาใช้ใหม่ได้

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์หลายชนิดสามารถดูดความชื้นได้ดีในเวลาอันสั้นทำให้เกิดปัญหาในการขึ้นรูปได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอบให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 70-100 °C อย่างน้อย 2 ชั่วโมงก่อนเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูป

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	12 ต.ค. 2553
เลขทะเบียน.....	245553
เลขเรียกหนังสือ.....	

2.3.2.1 การขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดเข้าปั้ (Injection Molding)

การขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดเข้าเป็นเทคนิคการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่สำคัญที่สุด เนื่องจากมีระยะเวลาต่อการอบการผลิต (Cycle time) สั้นและสามารถนำเศษวัสดุจากการขึ้นรูป (scrap) มาใช้ได้อีก เครื่องฉีดโดยทั่วไปที่ใช้ในการขึ้นรูปกับเทอร์โมพลาสติกสามารถนำมาใช้กับเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ได้ โดยแรงดันประกบแม่พิมพ์ (Clamping pressure) ควรจะอยู่ในช่วง 40-70 MPa หัวฉีด (Nozzle) กรวยฉีดน้ำ (Spruce cone) และประตู (Gates) ควรใช้ขนาดกลาง อุณหภูมิที่ใช้ควรมากกว่าอุณหภูมิหลอมของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ เนื่องจากระบบท่อวิ่งที่ร้อน (Hot runner system) จะลดการเสียหายของวัสดุ ทำให้ประหยัดวัสดุและระยะเวลาต่อการอบการผลิต ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ทั้งในการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยจะต้องใช้ช่องว่างของเบ้า (cavities) มากกว่า 1 หรือ 2 ช่องสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่

2.3.2.2 การขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูด (Extrusion Molding)

เทอร์โมพลาสติกอลิธาไคเมอร์สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยการเอกซ์ทรูดให้มีรูปทรงต่างๆ กัน เช่น เป็นท่อ แผ่นพลาสติก หรือโพรไฟล์พลาสติกได้โดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูด (Extruder) ที่ใช้สำหรับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป การควบคุมขนาดของเทอร์โมพลาสติกอลิธาไคเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดนั้นทำได้โดยการควบคุมการบวมพองที่หัวคาย (die swell) ซึ่งสำหรับเทอร์โมพลาสติกอลิธาไคเมอร์โดยทั่วไปแล้วจะเกิดการบวมพองน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกชนิดแข็งหรือยางวัลคาไนซ์ที่ผสมผงเขม่าดำ ปัจจุบันปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบวมพอง คืออัตราเฉือน กล่าวคือจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเอกซ์ทรูดเพิ่มขึ้น

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะใช้เครื่องเอกซเรย์ชนิดเดียวกับที่ใช้ในเทอร์โมพลาสติก
ตัวเครื่องจะมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ของสกรู อย่างน้อย 20/1 (โดยทั่วไปแล้ว
นิยมให้อยู่ในช่วง 24/1 ถึง 30/1) สกรูที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ โดยทั่วไปแล้วจะเป็นแบบ
เดียวกันกับที่ใช้สำหรับพอลิโอฟีน และอาจใช้สกรูที่ออกแบบพิเศษเพื่อช่วยในการผสมได้เช่นกัน

2.3.3 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

เนื่องจากการใช้งานวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาวัสดุดังกล่าวให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น ในปัจจุบันนิยมนำวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ไปใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น

- 1) การนำไปใช้เป็นสินค้าที่ใช้ในเครื่องจักรที่เป็นยาง เช่น ลูกกลิ้งที่ติดไว้ที่ขาโต๊ะ โคอะเฟรมที่ยึดหุ่นได้ ปะเก็น ท่อ เครื่องกันชน อุปกรณ์อุดรูรั่ว วาล์ว และปลั๊ก เป็นต้น
- 2) การนำไปใช้ภายใต้ฝากระโปรงรถ เช่น เป็นที่ครอบท่อเครื่องปรับอากาศ ครอบท่อน้ำ ท่อดูดสูญญากาศ ตัวต่อเครื่องดูดสูญญากาศ ตัวปลั๊ก อุปกรณ์อุดรูรั่ว ส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น
- 3) การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมท่อผ้าใบ เช่น สเปรย์ในงานเกษตรกรรม สเปรย์ในงานสี อุตสาหกรรมท่อ เป็นต้น
- 4) การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ปลั๊ก สายไฟ และสายเคเบิลที่เป็นฉนวน เป็นต้น

2.4 สารเพิ่มความเข้ากันได้

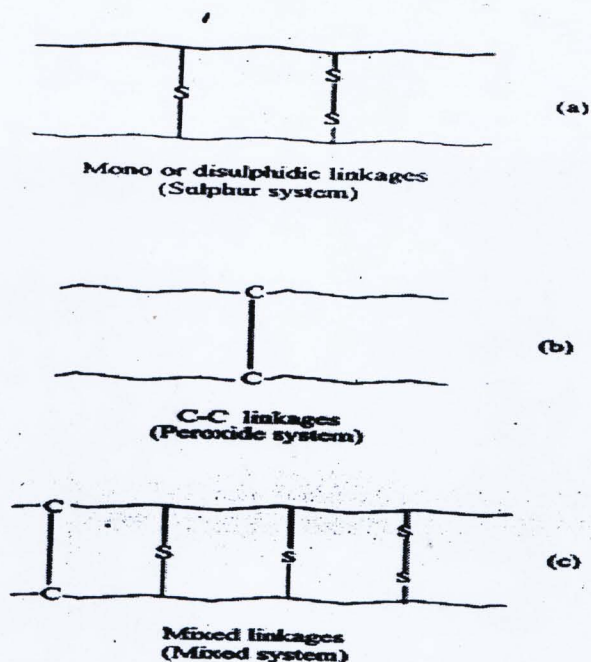
การเบลนค้ำยกับพอลิเอทิลีนจะต้องมีตัวช่วยคือสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) เพื่อช่วยให้เกิดการเข้ากันได้ดีขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ได้พอลิเมอร์เบลนค้ำยที่มีสมบัติที่ดีตามความต้องการในการใช้งาน ซึ่งสารเพิ่มความเข้ากันได้จากที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น สามารถเตรียมตามความเหมาะสม และมีการพัฒนาปรับปรุงหาสารเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนค้ำยนั้นๆ เรื่อยมา ตัวอย่างดังต่อไปนี้

Nakason *et al.* (2006) ได้ปรับปรุงโครงสร้างของพอลิโพรไพลีนด้วยสารฟีนอลิก เรียกว่า Ph-PP และใช้ PP-g-MA เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก Maleate natural rubber กับ พอลิโพรไพลีน

Punnarak *et al.* (2006) ได้เตรียมวัสดุเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากยางรีเคลมเบลนค้ำยกับพอลิเอทิลีน โดยใช้ Fusabond MB226D เป็น Compatibilizer ซึ่งทำจากการกราฟต์ LLDPE ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.65% (US Patent 6262137) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติกับระบบวัลคาไนซ์ 3 ระบบ คือระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบที่ผสมระหว่างกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ พบว่าการใช้ MB226D จะได้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดี

2.5 ระบบการวัลคาไนเซชัน

ระบบการวัลคาไนเซชันเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ซึ่งหากทราบระบบการวัลคาไนเซชันที่เหมาะสมจะส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลดี โดยระบบที่ทำการศึกษากันอย่างมากได้แก่ ระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสมกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ เช่น การศึกษาการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์ของพอลิเมอร์เบลนค้ำยระหว่างยางไนไตรล์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (NBR/HDPE) ทำการเบลนค้ำยในเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ที่อุณหภูมิ 160°C และใช้ Maleic anhydride modified PE (PE-g-MA) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ โดยแปรระบบวัลคาไนซ์ 3 ระบบ คือ ระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสม พบว่าพอลิเมอร์เบลนค้ำยที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะมีค่าความเค้นเฉือนและความหนืดสูงที่สุด รองลงมาคือระบบผสมกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ และระบบกำมะถันตามลำดับ โดยมีรูปแบบการเชื่อมโยงโมเลกุลในระบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.7 กล่าวคือระบบเปอร์ออกไซด์มีการเชื่อมโยงโมเลกุลผ่านพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (-C-C-) ในขณะที่ระบบกำมะถันมีการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน-คาร์บอน (-C-S-C-) ซึ่งเป็นพันธะที่ค่อนข้างอ่อนแอที่อุณหภูมิสูง ส่วนการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์จะมีการเชื่อมโยงโมเลกุลทั้งพันธะคาร์บอน-คาร์บอน และพันธะกำมะถัน-คาร์บอน (George *et al.*, 2000)

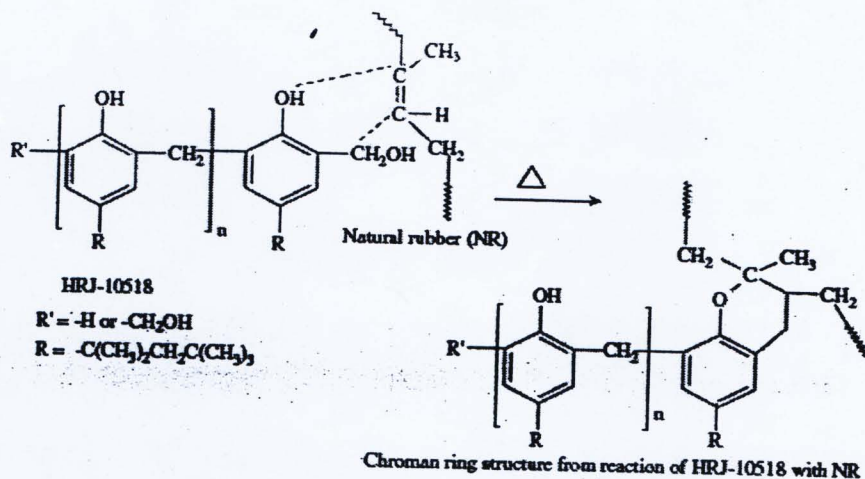


รูปที่ 2.7 รูปแบบการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยระบบต่างๆ (a) ระบบกำมะถัน (b) ระบบเปอร์ออกไซด์ (c) ระบบผสมกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ (George, et al., 2000)

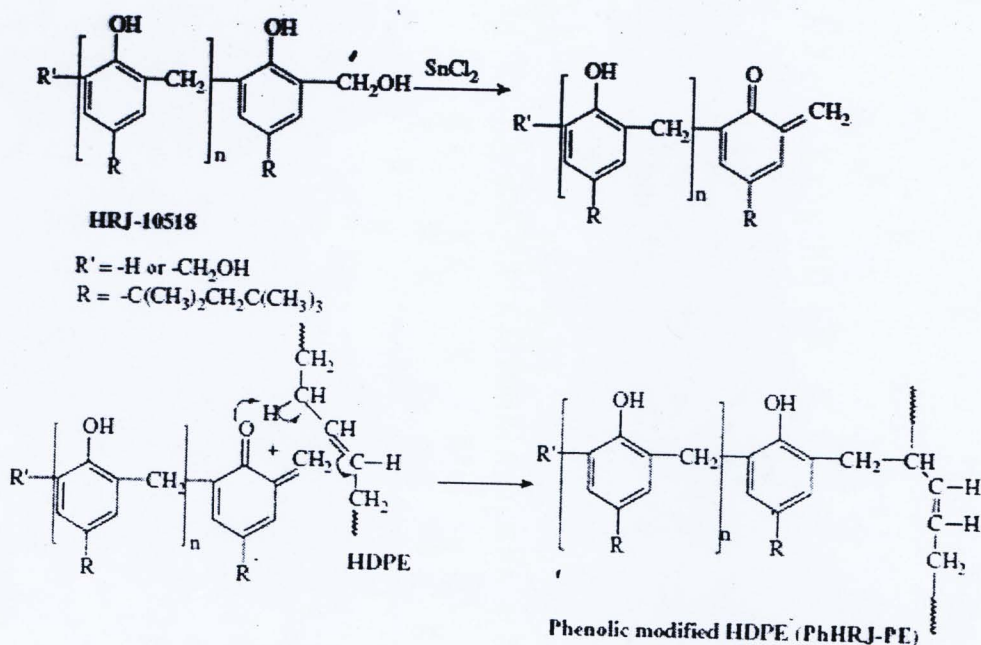
Thitithammawong et al. (2007) ได้ทำการศึกษาชนิดของเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติของ TPVs ที่เตรียมจากยางธรรมชาติเบลนค้กับพอลิโพรไพลีน พบว่า TPVs ที่ใช้ Dicumyl peroxide (DCP) กับ Di(tert-butylperoxyisopropyl)benzene (DTBPIB) ให้สมบัติดีกว่าเปอร์ออกไซด์ชนิดอื่น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเปอร์ออกไซด์ (meq) พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจะสูงขึ้นด้วย

ระบบการวัลคาไนเซชันอีกระบบที่ได้มีการนำมาศึกษาเพื่อแก้ปัญหาข้อเสียต่างๆ ของระบบกำมะถันและระบบเปอร์ออกไซด์ กล่าวคือระบบกำมะถันจะก่อให้เกิดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ในขณะที่เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ส่วนระบบเปอร์ออกไซด์ก่อให้เกิดการเสื่อมในพลาสติกบางชนิด เช่น พอลิ-โพรไพลีน (Polypropylene, PP) ดังนั้น พัฒนา (2549) ได้ศึกษาเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนค้ยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (NR/HDPE) โดยทำการแปรระบบการวัลคาไนเซชัน 5 ระบบ คือ ระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ ระบบผสมกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ และระบบฟีนอลิก เรซิน 2 ระบบ คือ ระบบ HRJ-10518 ระบบ SP-1045 พบว่าจากสมบัติเชิงกลของแต่ละระบบการ วัลคาไนซ์จะพบว่าระบบผสม และระบบเปอร์ออกไซด์ แม้ว่าจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงแต่ก็มีค่าความสามารถในการยืดที่น้อยมากซึ่งมีค่าไม่ถึง 100% ซึ่งทำให้ไม่สามารถหาค่าความสามารถในการคืนรูปได้ ส่วนของระบบกำมะถันแม้ว่าจะมีความสามารถในการยืดที่สูงที่สุดแต่ก็ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำที่สุดในขณะที่ระบบฟีนอลิก SP-1045 นั้นให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่มีค่ามากกว่าระบบกำมะถันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ระบบฟีนอลิก HRJ-10518 นั้นแม้ว่ามีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเป็นรองระบบผสมกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ และระบบเปอร์ออกไซด์ แต่ก็มีความสามารถในการยืดที่สูงกว่าและมีความสามารถในการคืนรูปได้ดีที่สุด ดังนั้นระบบฟีนอลิกเรซิน HRJ-10518 จึงมี

ความเหมาะสมที่สุดในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์อย่างธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (NR/HDPE)



รูปที่ 2.8 การเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างยางธรรมชาติกับฟีนอลิกเรซินชนิด HRJ-10518 (Nakason *et al.*, 2006)



รูปที่ 2.9 กลไกปฏิกิริยาระหว่าง HDPE กับฟีนอลิกเรซินชนิด HRJ-10518 (Nakason *et al.*, 2006)

Kiatkamjornwong, *et al.*, (2006) ได้ทำการศึกษาผลของชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้และระบบการวัลคาไนซ์ของ TPV จากยางธรรมชาติเบลนด์กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พบว่า TPV ที่ผสม PhSP-PP และ PhHRJ-PP ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดสูงกว่า TPV ที่ไม่ได้ผสมสารดังกล่าว โดยที่ TPV ที่ผสม PhHRJ-PP ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด และนอกจากนี้ยัง

พบว่าระบบวัลคาไนซ์ผสมระหว่างกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์จะให้ค่า shear stress และค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าระบบกำมะถันและระบบเปอร์ออกไซด์เดี่ยวๆ ,

พัฒนา (2549) ได้ศึกษาเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/HDPE โดยแปรระบบการวัลคาไนซ์ 5 ระบบ คือ ระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ ระบบผสมกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ และระบบฟีนอลิกเรซิน 2 ระบบ คือ ระบบ HRJ-10518 ระบบ SP-1045 พบว่าระบบฟีนอลิกเรซิน HRJ-10518 มีความเหมาะสมที่สุดในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/HDPE

วิสุทธิ (2550) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ แปรระบบวัลคาไนซ์ทั้ง 6 ระบบคือ ระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ ระบบผสมกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ ระบบ HRJ-10518 ระบบ SP-1045 และระบบผสม HRJ-10518 กับ SP-1045 พบว่า ระบบเปอร์ออกไซด์และระบบ SP-1045 ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด เหนือระบบอื่นๆ เล็กน้อย แต่ทั้งสองระบบมีความสามารถในการยืดน้อยมาก พบว่าระบบกำมะถันมีความสามารถในการยืดสูงที่สุด รองลงมาคือระบบ HRJ-10518 และระบบผสมกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งทำให้พบว่าการมีกำมะถันและ HRJ-10518 อยู่ในระบบวัลคาไนซ์ทำให้ยางธรรมชาติมีความสามารถในการยืดดีขึ้น

ในการทดลองจะแปรระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันโดยแบ่งเป็นระบบกำมะถันแบบปกติ (CV) ระบบกำมะถันแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และระบบกำมะถันแบบประสิทธิภาพ (EV) และใช้ระบบเปอร์ออกไซด์

ระบบกำมะถันแบบประสิทธิภาพ (EV) จะใช้ในการปรับปรุงความต้านทานต่อสารเสื่อมของยางจากการออกซิเดชัน รวมทั้งใช้ในกรณีที่ต้องการลด compression set ของยาง แต่ว่ายางที่มีสมบัติทนต่อการเสื่อมเนื่องจากการออกซิเดชันและมีค่า compression set ต่ำที่สุดนั้น จะเป็นยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ แต่ระบบเปอร์ออกไซด์จะมีปัญหาเรื่องกลิ่นและสมบัติของยางที่ได้ค่อนข้างไม่ดีรวมทั้งยางที่ใช้เปอร์ออกไซด์จะมีราคาสูงและต้องเก็บเปอร์ออกไซด์ไว้ในที่เย็นด้วย (พรพรรณ, 2528: 119)

ตารางที่ 2.1 การจำแนกการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

ระบบการวัลคาไนซ์	กำมะถัน (phr)	ตัวเร่ง (phr)
CV	2.0-3.5	1.0-0.4
Semi-EV	1.0-1.7	2.5-1.0
EV	0.3-0.8	6.0-2.5

2.6 Devulcanization

ระหว่างปี 1995 ถึง 2000 ได้มีการศึกษากระบวนการรีไซเคิลแบบใหม่โดยสารที่ชื่อว่า De-Link[®] เป็นสารเคมีที่ใส่เพื่อให้เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลแล้วก็เกิดการเชื่อมโยงอีกครั้งโดยไม่ต้องใส่สารวัลคาไนซ์เพิ่มเข้าไปอีก เรียกว่าระบบ Chemomechanical Devulcanization ซึ่งเป็นลิขสิทธิ์ของบริษัท STI-K Polymers Sdn. ประเทศมาเลเซีย (Myhre and Mackillop, 2002)