

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ประเทศไทย เป็นประเทศอุตสาหกรรมใหม่บนพื้นฐานเกษตรกรรม พืชเศรษฐกิจหลายชนิดจึงมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาประเทศ ยางพาราหรือยางธรรมชาติ (natural rubber) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศชนิดหนึ่ง เมื่อปี พ.ศ. 2534 จนถึงปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางพารามากเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยนิยมปลูกกันมากทางภาคใต้ของประเทศและยังมีการส่งเสริมให้ปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนืออีกด้วย ผลผลิตจากยางธรรมชาติสามารถนำมาแปรรูปได้หลายรูปแบบเพื่อให้ตรงตามความต้องการใช้งาน ในโรงงานอุตสาหกรรมยางทั่วโลกได้ผลิตผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปได้อย่างมากมาย และใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางทั้งในด้านการแพทย์ การวิทยาศาสตร์ การก่อสร้าง การสื่อสาร การขนส่ง ตลอดจนผลิตเป็นของใช้ต่าง ๆ ภายในครัวเรือน ปัจจุบันจึงมีผลผลิตจากยางธรรมชาติเป็นจำนวนมาก และเนื่องจากยางธรรมชาติมีราคาต้นทุนต่ำ ประกอบกับมีคุณสมบัติที่สามารถปรับปรุงได้อย่างกว้างขวาง ประเทศอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ จึงนิยมนำยางธรรมชาติมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากขึ้น

ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ ยางในรถยนต์ ยางรองเท้า และยางเทียมนอื่นๆ มีการใช้ยางเป็นวัตถุดิบหลัก และในกระบวนการต่างๆ ของการผลิตจะมีเศษยางและยางคัดทิ้ง (rejected rubber and scraped rubber) เกิดขึ้น ซึ่งยางเหล่านี้จะมีปริมาณสูงขึ้นไปตามปริมาณการใช้วัตถุดิบ ในปี พ.ศ. 2544 มีรายงานว่าประเทศสหรัฐอเมริกามียางคัดทิ้งเกิดขึ้นประมาณ 281 ล้านตัน สำหรับเศษยางและยางคัดทิ้งถือได้ว่าเป็นขยะชนิดหนึ่งที่มีการกำจัดได้ยาก หากมีปริมาณที่สูงมากๆ และมีการกำจัดไม่ถูกวิธีแล้วจะส่งให้เกิดปัญหามลพิษต่อชุมชนได้ และหากปัญหานี้ยังไม่ได้รับการแก้ไข อาจเกิดปัญหาการลดระดับความน่าเชื่อถือทางสภาพแวดล้อมจากต่างประเทศได้ ซึ่งวิธีทางหนึ่งที่แก้ไขได้คือการนำขยะยางกลับมาใช้ใหม่ โดยนำยางเหล่านี้ ที่ผ่านกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของยางที่เชื่อมขวางกันแล้ว (cross-linked rubber) มาทำให้แตกออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่สามารถใช้งานได้ เรียกว่า ยางรีเคลม (reclaimed rubber) แล้วนำ

ไปผสมกับสารเคมี แล้วนำไปวัลคาไนซ์ใหม่ได้อีก โดยที่ยังคงมีคุณสมบัติความยืดหยุ่น และคุณสมบัติเชิงกลที่ดีอยู่ จึงสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติได้

ในปัจจุบันยานพาหนะต่างๆมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุสูงขึ้น จากรายงานของหน่วยงานการเฝ้าระวังการบาดเจ็บรุนแรงระดับชาติ ประเทศไทย พ.ศ. 2545 พบว่า สาเหตุการบาดเจ็บและการตายเกิดเนื่องจากอุบัติเหตุชนส่งมากเป็นอันดับ 1 คิดเป็นร้อยละ 54.2 ของผู้บาดเจ็บและคิดเป็นร้อยละ 67.4 ของผู้เสียชีวิต ซึ่งเป็นตัวเลขการสูญเสียที่สูงมาก ดังนั้น การติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการจราจรและช่วยลดการเกิดอุบัติเหตุ เช่น การติดตั้งหลักกั้นเส้นทางเดินรถบริเวณตรงกลางระหว่างช่องทางจราจร หรือติดตั้งบริเวณไหล่ทาง จึงเป็นสิ่งจำเป็นและเป็นประโยชน์สำหรับผู้ใช้เส้นทางจราจร ปัจจุบันหลักกั้นเส้นทางเดินรถที่ใช้ในประเทศไทยจะผลิตจากวัสดุที่ใช้คอนกรีตเป็นหลัก เมื่อเกิดอุบัติเหตุและยานพาหนะกระแทกกับหลักกั้นเส้นทางเดินรถ จะทำให้ยานพาหนะได้รับความเสียหายและอาจเกิดอันตรายรุนแรงแก่ผู้ขับขี่จนถึงขั้นเสียชีวิตได้ ถ้าหากหลักกั้นเส้นทางเดินรถมีลักษณะที่สามารถรับแรงกระแทกและมีความยืดหยุ่นเพื่อรับแรงจากการชนจะสามารถลดอันตรายที่เกิดจากการชนได้ โดยคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นได้นั้นมาจากการใช้วัสดุที่เป็นอีลาสโตเมอร์ เช่นยางธรรมชาติ และหากสามารถนำยางธรรมชาติที่เหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้ ก็จะเป็นการลดปัญหาขยะยาง ซึ่งเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่สินค้าได้อีกทางหนึ่ง

หลักกั้นเส้นทางเดินรถที่สามารถรับแรงกระแทกได้สูง และสามารถโค้งกลับได้มีการผลิตใช้แล้วในต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยมีการขยายตัวของการผลิตที่น้อย หรือมีเพียงบริษัทที่เป็นตัวแทนจำหน่าย โดยนำสินค้าเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ยังคงมีราคาสูง ดังนั้น จึงไม่มีหลักกั้นเส้นทางเดินรถที่สามารถรับแรงกระแทกได้สูงและสามารถโค้งกลับได้ใช้ในประเทศไทย ข้อกำหนดหรือมาตรฐานของผลิตภัณฑ์หลักกั้นเส้นทางเดินรถที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จำเป็นต้อง มีความทนทานต่อการรับแรงกระแทกที่ความเร็วสูงๆ ได้ดี มีความสามารถในการมองเห็นได้ดีทั้งกลางวันและกลางคืน สามารถติดตั้งได้ง่าย รวดเร็ว และมีค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระยะยาวต่ำ สามารถออกแบบให้มีลักษณะตามต้องการ มีความแข็งแรง สามารถยืดหยุ่นได้ ทนทานต่อสภาวะอากาศและรังสีอัลตราไวโอเลตได้ดี ซึ่งลักษณะเหล่านี้สามารถนำคุณสมบัติของยางธรรมชาติมาปรับปรุง และใช้ยางธรรมชาติ เป็นวัสดุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลักกั้นเส้นทางเดินรถได้ โดยอาศัยเทคโนโลยีภายในประเทศและนำความรู้ทางด้านวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ เพื่อลดปัญหาการเกิดความเสียหายและอันตรายจากอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งการที่มีแหล่งวัสดุดิบส่วนใหญ่อยู่ภายในประเทศ ทำให้ผู้ผลิตมีข้อได้เปรียบในการที่จะสามารถหาวัสดุดิบได้ง่าย เพียงพอต่อ

ความต้องการ และมีต้นทุนต่ำกว่าประเทศที่ต้องนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศ อีกทั้งยังเป็นการลดการเสียดุลทางการค้าของประเทศได้อีกทางหนึ่ง

ทฤษฎีและหลักการ

1.1 พอลิเมอร์

พอลิเมอร์ (polymer) เป็นสารโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโมเลกุลเล็กๆ ซึ่งเรียกว่า มอนอเมอร์ (monomer) ที่ซ้ำๆกันเป็นจำนวนมากมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมี (พันธะโควาเลนต์) สารพอลิเมอร์ เป็นสารที่พบได้มากมายทั้งในธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้น ตัวอย่าง สารพอลิเมอร์ในธรรมชาติที่รู้จักกันดี ได้แก่ ยางพาราหรือยางธรรมชาติ

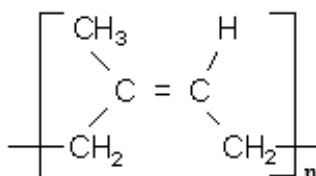
1.2 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่น และมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็ง แยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70°C เป็นเวลา 3 วัน จะได้ยางแผ่นรมควัน

นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือน้ำยางข้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเงาปนสูงและมีสีเข้ม ก็อาจใช้ยางแผ่นหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene (C_5H_8) โดยที่หน่วยที่ซ้ำๆกัน (repeating units: n) มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 หน่วย แสดงสูตรโครงสร้างของยาง

ธรรมชาติดังภาพประกอบที่ 1 และเนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น ยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสถานะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกดึงยืด ยางจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนนุ่มลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง



ภาพประกอบที่ 1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ

ลักษณะเด่นอีกอย่างของธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและมีขนาดใกล้เคียงหรือเท่ากับขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยางดิบจะมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือ ยางจะอ่อนนุ่มและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เนื่องจากประการแรกยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือ ยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น ประการที่สองยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic

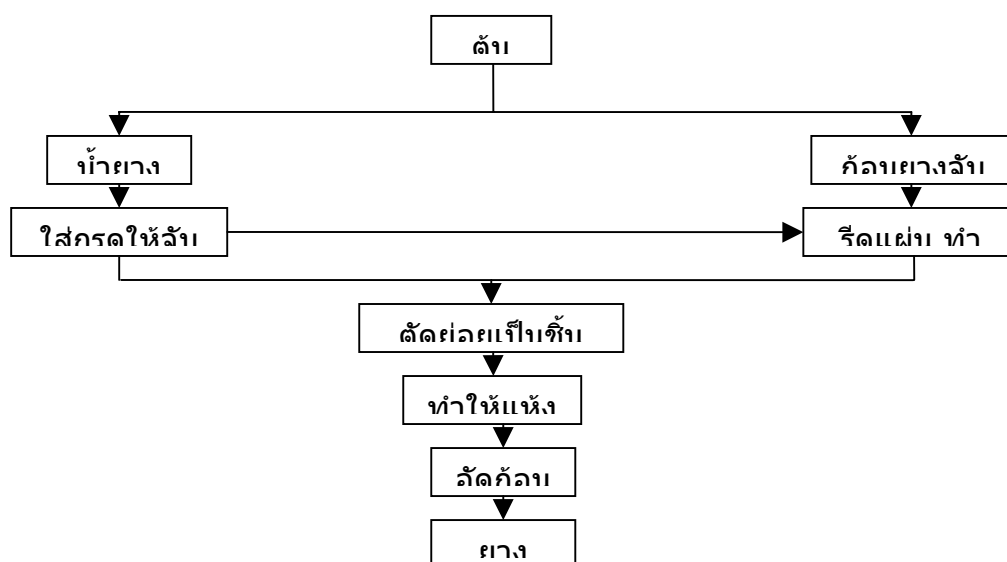
properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (heat build-up) ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกัน (tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น ประการที่สามยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) สูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดี เหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่มาก ทำให้ยางไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารในกลุ่มของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ เช่น น้ำมันและทนต่อสารเคมีได้น้อย จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีดังกล่าวได้ การปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติมีมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1839 เมื่อ ชาลส์ กูดเยียร์ (Charles Goodyear) ได้ผสมกำมะถันกับยางธรรมชาติและให้ความร้อนซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า การวัลคาไนซ์ (vulcanization) การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันสามารถใช้ได้กับยางที่มีพันธะคู่ที่ไวอยู่ในโมเลกุลเท่านั้น โดยกำมะถันทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน (crosslink) ทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้น และความแข็งของยางจะขึ้นอยู่กับระดับการวัลคาไนซ์ด้วย เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ภายในโครงสร้างของโมเลกุลของยางธรรมชาติจึงมีลักษณะที่เป็นการเชื่อมขวางทางเคมี หรือเป็นการพันกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่ขดแบบหลวมๆ ความเป็นอิลาสติกจึงเกิดขึ้นเนื่องจากสายโซ่สามารถยืดออกได้เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ และการเชื่อมขวางจะเกิดขึ้นอีกครั้งเมื่อนำแรงนั้นออกไป การที่ยางมีประโยชน์ในการใช้งาน จึงเกิดเนื่องมาจากการที่ยางมีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัวที่วัสดุอื่นไม่มี คือ ยางเป็นพอลิเมอร์ประเภทอิลาสโตเมอร์ นั่นเอง ซึ่ง อิลาสโตเมอร์ (elastomer) หมายถึง วัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นได้สูงเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก และจะกลับคืนสู่สภาพเดิม (หดกลับทันที) เมื่อนำแรงออกไป ยางดิบที่สำคัญประเภทหนึ่งซึ่งเป็นยางที่อยู่ในรูปของของแข็งได้แก่ ยางแท่ง

1.2.1 ยางแท่ง (block rubber)

ยางแท่ง (block rubber) เป็นยางธรรมชาติที่ผลิตขึ้นโดยมีการควบคุมคุณภาพของยางดิบ หมายถึง ยางที่อัดเป็นแท่ง มีขนาด กว้าง×ยาว×สูง ประมาณ 33×67×17 cm. ได้มีการออก

แบบขนาดของยางแท่งเพื่อให้เหมาะสมแก่การจัดเรียงยางในการขนส่ง และเพื่อให้มีขนาดไม่ใหญ่เกินไป โดยสามารถส่งเข้าเครื่องผสมทั้งก้อนได้ แสดงขั้นตอนการผลิตยางแท่งดังกล่าวประกอบที่ 2

ยางแท่งที่ผลิตโดยควบคุมมาตรฐานของยางดิบ มีชื่อเรียกแตกต่างกันตามประเทศผู้ผลิต สำหรับประเทศไทยมีชื่อเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) และได้ทำการผลิตยางแท่งตามมาตรฐานสากล ISO 2000-1978 ซึ่งได้จัดแบ่งชั้นของยางแท่งออกเป็น 5 ชั้นดังนี้คือ STR 5, STR 5L, STR 10, STR 20 และ STR 50 โดยที่ตัวเลขดังกล่าวแสดงถึงปริมาณของสิ่งสกปรกที่ปะปนอยู่ในยาง เช่น เลข 10 จะหมายถึง ยางแท่งที่มีสิ่งสกปรกในยางไม่เกิน 0.10% เป็นต้น ส่วนอักษร L มาจากคำว่า light หมายถึง สียางจาง เช่น STR 5L จะมีสียางจางหรือมีสีใสมากกว่า STR 5 เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 2 ขั้นตอนการผลิตยางแท่ง

ที่มา: เสาวนีย์, 2540

ยางแท่งเริ่มผลิตขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2508 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของยางธรรมชาติให้มีมาตรฐาน มีขนาดเหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่งการจัดชั้นคุณภาพของยางแท่ง จะใช้มาตรฐานการกำหนดชั้นโดยอาศัยสิ่งสกปรกเป็นเกณฑ์ และมีสมบัติอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มาตรฐานการจัดชั้นคุณภาพของยางแท่งที่ผลิตในประเทศไทย

parameter	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 10	STR 20
Dirt retained on 44 μ aperture(max,wt%)	0.02	0.04	0.04	0.08	0.16
Ash (max, wt%)	0.40	0.40	0.60	0.60	0.80
Nitrogen (max, wt%)	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60
Volatile matter (max, wt%)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Initial plasticity (min)	35	35	30	30	30
Plasticity retention index (min)	60	60	60	50	40
Color lovibond scale (value, max)	4.0	6.0	-	-	-

ที่มา: เสาวนีย์, 2540

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางแท่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ น้ำยางสดและ ก้อนยางจับตัว ซึ่งก้อนยางจับตัวอาจจะหมายถึง ยางแผ่นดิบ (unsmoked sheet) ยางก้นถ้วย (cup tump) ยางตามรอยกรีด (tree lace) ยางตกตามพื้น (earth scrap) หรือยางติดเปลือก (bark scrap) เป็นต้น

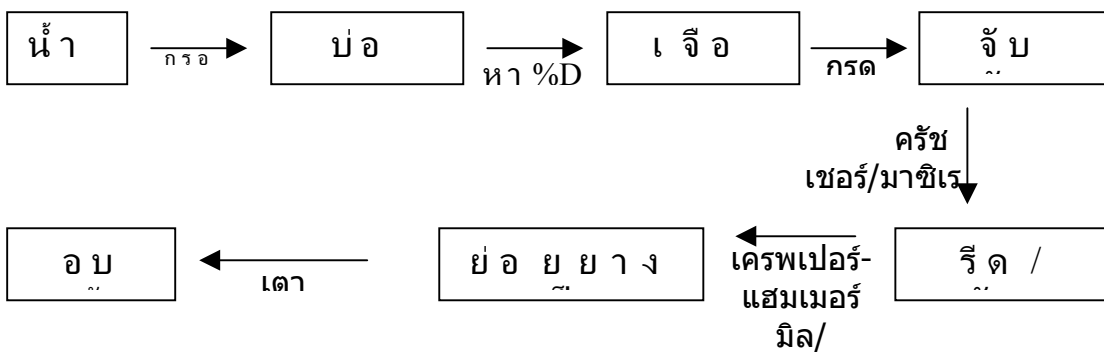
ตารางที่ 2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางแท่งที่ผลิตในประเทศไทย

ชั้นยางแท่ง	วัตถุดิบที่ใช้
STR XL, STR 5L	น้ำยางสด
STR 5	น้ำยางสด หรือยางแผ่น
STR 10, STR 20	ก้อนยางจับตัว

ที่มา: เสาวนีย์, 2540

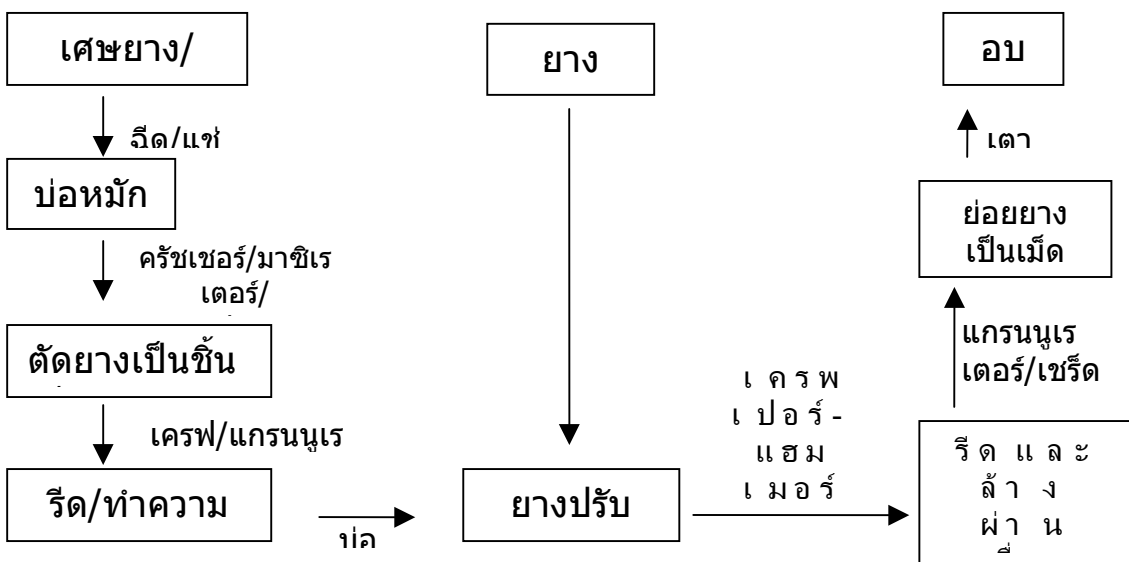
การผลิตยางแท่งมีหลักสำคัญในการผลิตคือ เป็นกระบวนการทำให้ยางเป็นชิ้นเล็กๆ โดยมีการใช้เครื่องตัด รีด และย่อยก้อนยางให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาอบให้แห้งและอัดให้เป็นแท่ง แสดงขั้นตอนการผลิตยางแท่งดังภาพประกอบที่ 3 และภาพประกอบที่ 4

ขั้นตอนการผลิตยางแท่งจากน้ำยาง



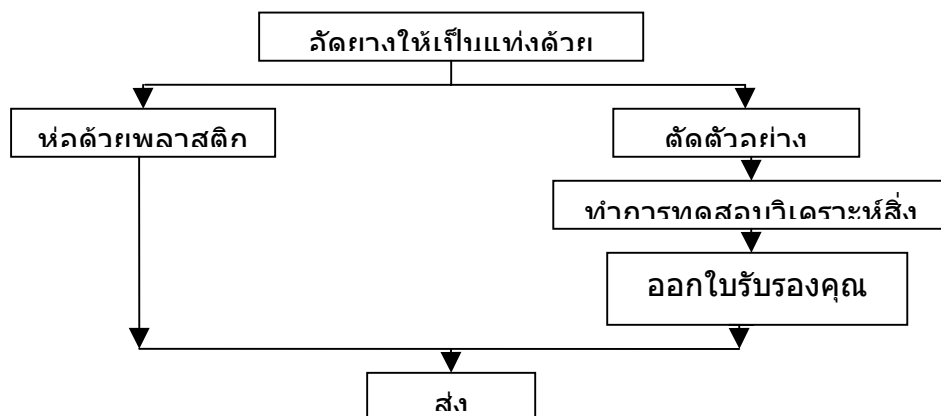
ภาพประกอบที่ 3 ขั้นตอนการผลิตยางแท่งจากน้ำยาง
ที่มา: เสาวนีย์, 2540

ขั้นตอนการผลิตยางแท่งจากก้อนยางจับตัว



ภาพประกอบที่ 4 ขั้นตอนการผลิตยางแท่งจากก้อนยางจับตัว
ที่มา: เสาวนีย์, 2540

หลังจากอบยางแห้งแล้ว จะทำการอัดยางให้เป็นแท่ง แล้วห่อด้วยพลาสติกพอลิเอทิลีน (polythene) เก็บตัวอย่างยางเพื่อทดสอบคุณภาพ และออกไปรับรองคุณภาพของยางแท่งก่อนส่งจำหน่าย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 5



ภาพประกอบที่ 5 ขั้นตอนการผลิตยางแท่งหลังอบแห้ง
ที่มา: เสาวนีย์, 2540

1.2.2 คุณสมบัติของยางธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติเด่นของอีลาสโตเมอร์ คือ พฤติกรรมการยืดหยุ่นหลังจากการทำให้เสียรูปเนื่องจากการกดอัดหรือการดึงยืด เช่น อีลาสโตเมอร์จะยืดออกเป็น 10 เท่าของความยาวเดิมและจะกลับคืนสู่สภาพเดิมเมื่อนำแรงออกไป นอกจากนี้ อีลาสโตเมอร์มีลักษณะเฉพาะ เช่น มีความเหนียวภายใต้ความเครียดสถิต (static stress) หรือความเครียดพลวัต (dynamic stress) สูง มีความต้านทานต่อการขีดข่วนสูงกว่าเหล็ก และมีความต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศและน้ำได้ดี ยางธรรมชาติมีความเป็นอีลาสโตเมอร์ มีการจัดเรียงตัวแบบซิส (cis- arrangement) และสามารถเกิดการหมุนของโมเลกุลในพันธะได้ (spatial configuration) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ยางธรรมชาติมีความเป็นอีลาสติกสูงและสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้เป็นไปตามความต้องการได้ง่าย

ฟลอรี (มนัส, 2530) ได้ให้ความหมายที่แสดงถึงคุณสมบัติที่สำคัญที่สุด 2 ประการอันเป็นเอกลักษณ์ของยาง คือ ประการที่หนึ่งยางเป็นวัตถุที่มีการเปลี่ยนรูปได้มากโดยไม่ถูกทำลายหรือฉีกขาด จึงมีคุณสมบัติด้านความหนืด (viscosity) เหมือนกับเป็นของเหลว และประการที่สองยางเป็นวัตถุที่มีความสามารถคืนตัวสู่ขนาดเดิมในทันทีที่ที่แรงเค้น (strain) หยุดกระทำ ทำให้ยางมี

คุณสมบัติของของแข็งคือมีความยืดหยุ่น (elasticity) เมื่อรวมคุณสมบัติทั้งสองประการเข้าด้วยกัน จึงมักเรียกขานว่าเป็นวัสดุ viscoelastic material ซึ่งจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- โมเลกุลต้องมีความยาวมากและสามารถหมุนได้อย่างอิสระที่จุดต่อของหน่วยโมเลกุลเล็กๆ
- โมเลกุลจะต้องเชื่อมต่อกันเป็นร่างแหสามมิติ (three-dimension network)
- แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีน้อย

นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเด่นอื่นๆอีกหลายประการพอสรุปได้ดังนี้

1.2.2.1 ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางการใช้งานต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง โดยการเติมสารเคมี เช่น กำมะถัน สารตัวเร่ง หรือสารเสริมแรง แล้วทำให้คงรูปด้วยความร้อน กระบวนการแปรรูปยางเป็นวิธีนำยางดิบมาผสมสารตัวเติมต่างๆ เรียกว่าสูตรยาง ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ ยางที่ได้เรียกว่า ยางผสมสารเคมี (rubber compound) แล้วจึงนำยางนี้ไปขึ้นรูป และทำให้คงตัวโดยกระบวนการวัลคาไนซ์ กลายเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งผู้ผลิตสามารถออกแบบให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติอื่นๆได้อย่างกว้างขวาง ตามข้อกำหนดทางเทคนิคการออกสูตรที่ต้องการผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

1.2.2.2 ยางธรรมชาติมีความแข็ง จึงสามารถวัลคาไนซ์ให้มีความแข็งต่างๆกันได้มากมาย ตั้งแต่นุ่มมากไปจนถึงความแข็งของอีโบนิต์ (ebonite) การปรับความแข็งของยางทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติม หรือการเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน เช่น ในช่วงของการเติมกำมะถันปริมาณ 10-20 phr จะทำให้ยางมีความแข็งคล้ายหนังแต่จะมีความแข็งแรงต่ำและเสื่อมสภาพได้ง่าย

1.2.2.3 ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึง เนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ ทำให้สามารถตกผลึกได้เมื่อดึงยางให้ยืดออก ดังนั้น จึงทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูงและมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ยางธรรมชาติที่ยังไม่เติมสารตัวเติมหรือยางดิบมีความแข็งแรงสูงถึงประมาณ 30 MPa ด้วยเหตุนี้ จึงสามารถใช้สารตัวเติมที่มีราคาถูกได้สำหรับในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความแข็งแรงเป็นสมบัติหลัก เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต และดินขาว เป็นต้น จึงทำให้ยางธรรมชาติได้เปรียบกว่ายางชนิดอื่นๆในด้านต้นทุนการผลิต สำหรับการใส่สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพที่มีราคาแพง เช่น เขม่าดำและซิลิกา จะใช้ต่อเมื่อต้องการความแข็งแรงสูงเท่านั้น

1.2.2.4 ยางธรรมชาติมีความสามารถในการยืดหยุ่น ซึ่งมีความแตกต่างในคุณสมบัติยืดหยุ่นจากของแข็งทั่วไป คือ ยางใช้แรงคั้นน้อยในการเปลี่ยนรูป และยางสามารถเปลี่ยนรูปได้มาก

ซึ่งเป็นคุณสมบัติตรงข้ามกับของแข็งชนิดอื่น เช่น เหล็กหรือเหล็กกล้า ต้องใช้แรงเค้นสูงในการเปลี่ยนรูปแต่สามารถเปลี่ยนรูปได้เพียงเล็กน้อย ถ้าพิจารณาถึงความสามารถในการรับพลังงานในขณะที่มีแรงเค้นกระทำ พบว่า ยางสามารถรับพลังงานได้ถึง 150 เท่าของสปริงเหล็กกล้าเมื่อมีมวลเท่ากัน และยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติมจะสามารถยืดได้ประมาณ 100% หรือมากกว่านั้น ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติ จะลดลงตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น และลดลงตามปริมาณของพันธะที่วัลคาไนซ์

1.2.2.5 ยางธรรมชาติมีความสามารถในการกระเด็งตัวที่เค้นมาก ความกระเด็งตัวของยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมผสมอยู่ด้วยจะสูงถึงประมาณร้อยละ 70 ความกระเด็งตัวของยางจะลดลงตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของความกระเด็งตัวของยางนี้แสดงให้เห็นว่า ยางธรรมชาติจะไม่สะสมพลังงานไว้ในตัวเองเมื่อได้รับแรงกระทำ ทำให้ความร้อนสะสมในยางมีน้อย

1.2.2.6 ยางธรรมชาติมีความสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีความสามารถในการหักงอไปมาได้ที่อุณหภูมิต่ำๆ เนื่องจากยางธรรมชาติมีค่าอุณหภูมิแข็งคล้ายแก้ว (glass transition: Tg) ประมาณ -72°C การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจะใช้ได้ในช่วงเวลาสั้นๆ การใส่น้ำมันลงไปในยางธรรมชาติจะทำให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำลงไปจากเดิมได้อีก

1.2.2.7 ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อความเสียดทาน และทนทานต่อการสึกหรอดีเยี่ยม โดยทั่วไปเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำเข้าไปในยางมากขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอจะดีขึ้น ในทางตรงกันข้ามสามารถปรับคุณสมบัติให้ยางมีเนื้ออยู่สึกหรอได้ง่ายขึ้น โดยการเติมสารประเภทแฟคตีส (factice) ลงไปในยาง

1.2.2.8 ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี จึงสามารถผลิตสูตรยางที่ทนกรดได้ โดยจะเคลือบหรือบุถึงโลหะด้วยยางทนสารเคมีเพื่อใช้ขนส่งสารเคมีได้ ซึ่งการใช้ยางจะมีความเหมาะสมกับงานที่ภาชนะหรือท่อมีการขยายตัวหรือหดตัวหรือมีการโค้งงอได้ เนื่องจากยางมีความยืดหยุ่นดังได้กล่าวมาแล้ว

1.2.2.9 สามารถใช้ยางธรรมชาติเป็นตัวประสานหรือกาว เนื่องจากยางมีคุณสมบัติการเกาะติดที่ดี มีความเหนียวสูงจึงมีความสามารถในการติดประสานที่ดีทั้งเส้นใยและโลหะ

1.2.2.10 ยางธรรมชาติมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง จึงเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ซึ่งยางธรรมชาติมีสภาพต้านทานไฟฟ้าถึง $10^{17} \Omega\text{-hr}$ และมีความทนได้อิเล็กตริก สูงถึง 4-22 kV/mm สามารถใช้หุ้มสายเคเบิลไฟฟ้าได้ดี โดยเฉพาะสายที่มีความต้องการการโค้งงอมาก

1.2.2.11 ยางธรรมชาติมีความสามารถป้องกันการซึมผ่านของของเหลวและก๊าซได้ดี จึงใช้เก็บ บรรจุ หรือกั้นของเหลวและก๊าซได้เป็นอย่างดี

ส่วนข้อจำกัดของยางธรรมชาติ คือ มีความทนทานที่ต่ำต่อการบวมตัวในน้ำมัน น้ำมันเชื้อเพลิง และสารละลายไฮโดรคาร์บอน มีความทนทานที่ต่ำต่อความร้อน โอโซน และแสงแดด เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวในปฏิกิริยา ซึ่งทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ จึงเป็นจุดอ่อนที่ทำให้ถูกโจมตีด้วยออกซิเจนและโอโซนได้ง่าย โดยทั่วไป ยางธรรมชาติไม่เหมาะกับงานหลายชนิดที่ต้องการความต้านทานต่อการเสื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงและมีโอโซนอยู่ด้วย การเติมสารป้องกันการเสื่อมจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (antioxidant) ลงไปในยางสามารถปรับปรุงให้ยางมีความต้านทานต่อการเสื่อมดีขึ้น

อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติถือได้ว่าเป็นวัสดุราคาถูกที่มีคุณสมบัติทางกายภาพในระดับที่สูง เหมาะสำหรับการผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอ และมีความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก ยางธรรมชาติยังมีความแข็งแรงเหนียวและทนต่อการขีดสี อีกทั้งยังสามารถที่จะออกแบบให้ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำถึง -60°C

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นผลผลิตจากธรรมชาติ ดังนั้นยางธรรมชาติจึงสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อย่างไรก็ตาม การย่อยสลายทางชีวภาพดังกล่าวไม่จัดว่าเป็นการรีไซเคิล เพราะกระบวนการดังกล่าวต้องใช้เวลาานมาก โดยธรรมชาติแล้ว ยางธรรมชาติสามารถเกิดการย่อยสลายได้เอง แต่ในการใช้งานจริง เป็นการทำให้ยางธรรมชาติผสมกับสารเคมีต่างๆ ก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปและอบให้ยางคงรูปด้วยกระบวนการวัลคาไนซ์ ดังนั้น โมเลกุลของยางในผลิตภัณฑ์จึงเชื่อมขวางกันเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ซึ่งการเกิดโครงสร้างดังกล่าวจะส่งผลอย่างมากต่อความสามารถในการรีไซเคิลของยางธรรมชาติ โดยทั่วไป การนำผลิตภัณฑ์ยางที่วัลคาไนซ์แล้วมารีไซเคิลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำผลิตภัณฑ์หรือบางส่วนของผลิตภัณฑ์กลับมาใช้ใหม่ เช่น การหล่อดอกยางใหม่ การรีเคลมหลังจากการบดผลิตภัณฑ์ การย่อยสลายผลิตภัณฑ์ หรือการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการเผาไหม้เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืนมา ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้มีสองวิธี คือ การรีเคลมและการย่อยสลาย การรีเคลมนั้นจะเริ่มต้นด้วยการนำผลิตภัณฑ์ไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการผ่านยางเข้าไปในโบริมิดที่หมุนด้วยความเร็วสูงหรืออาจใช้วิธีการทุบให้ละเอียด แล้วเติมสารที่ทำให้นิ่ม (softeners) และสารเคมีที่ช่วยในการรีเคลม (reclaiming chemicals) ลงไป จากนั้นจึงให้ความร้อน หลังจากขั้นตอนการรีเคลม โครงสร้างร่างแหสามมิติของยางจะถูกทำลายและยางจะมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ยางจึงสามารถไหล และถูกวัลคาไนซ์ใหม่ได้อีก ทั้งนี้ การผสมยางรีเคลมกับยางใหม่ น่าจะเป็นวิธีแก้ปัญหาขยะยางที่ย่อยสลายได้ช้า โดยยังคงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติที่ไม่แตกต่างไปจากเดิมมากนัก ด้วยเหตุนี้ยางรีเคลมจึงกลายเป็นสารเติมแต่งที่มีคุณค่าต่อยางคอมพาวด์

1.2.3 ยางรีเคลม

ยางรีเคลม (reclaim rubber) หมายถึงยางที่วัลคาไนซ์แล้วนำกลับมาผ่านกระบวนการให้ยางนั้นมาใช้ใหม่ได้อีก ยางที่วัลคาไนซ์แล้วที่นำมาทำยางรีเคลมจะเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ยางเก่าที่ใช้แล้ว เช่น ยางรถยนต์ ยางในรถยนต์ ยางรองเท้า และยางเทียมนอื่นๆ หรือยางคงรูปที่เป็นของเสียซึ่งเกิดในระหว่างกระบวนการผลิต เป็นต้น

กระบวนการทำยางรีเคลม เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของยางที่เชื่อมขวางกันแตกออกเป็นโมเลกุลเล็กๆขนาดที่ใช้งานได้อีกครั้งหนึ่ง โดยที่โมเลกุลของยางที่วัลคาไนซ์อาจแตกได้ที่ตำแหน่งเชื่อมขวางหรือแตกตรงโมเลกุลของยางเองได้ เมื่อโมเลกุลของยางเล็กลงได้ขนาดก็สามารถนำยางดังกล่าวไปผสมสารเคมี แล้วนำไปวัลคาไนซ์ใหม่ได้อีก

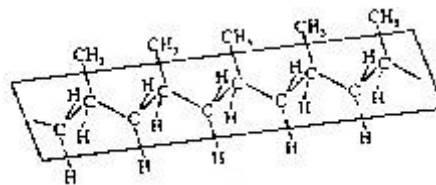
โดยปกติแล้ว ยางรีเคลมมีราคาถูกกว่ายางดิบ และมีความหนาแน่นประมาณ 1.16-1.20 g/cm³ ทำให้การใช้ยางรีเคลมเป็นการลดต้นทุนได้ นอกจากนี้ยางรีเคลมยังมีประโยชน์อื่นอีก เช่น ช่วยในการแปรรูป ช่วยเพิ่มการเกาะติด (tack) ช่วยในเรื่องการไหลของยาง ช่วยลด die swell และเพิ่มความเร็วในการวัลคาไนซ์เล็กน้อยเนื่องจากยางรีเคลมมีฤทธิ์เป็นด่าง และยังคงมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีอยู่ เช่น คุณสมบัติความยืดหยุ่น (resilience) คุณสมบัติการกระดอนกลับ (rebound) ความแข็งแรงต่อการดึงยืด (tensile strength) ความสามารถโค้งงอได้เมื่อมีแรงกระทำ (flex cracking) และสามารถปรับปรุงให้มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมภายนอก (weather resistance) มีความทนทานต่อโอโซน (ozone resistance) และมีความทนทานต่อการใช้งานได้นาน (durability)

1.3 พอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีน (polypropylene) จัดเป็นพลาสติกในกลุ่มที่มีการใช้งานในปริมาณสูง เนื่องจากมีการประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีคุณสมบัติเชิงกลเด่นหลายประการ เช่น เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะขุ่นมัวที่มีสภาพกึ่งผลึก ส่งผลให้มีความแข็งแรง มีความทนทานต่อแรงดึงได้สูง มีความเหนียวดีที่อุณหภูมิห้อง ทนทานต่อแรงกระทำได้ดี มีความทนทานต่อสารเคมี มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีความเงามันสูง มีความแข็งแรงที่ผิวหน้าสูง ผิวหน้าจึงมีความต้านทานต่อการขีดข่วนได้ดี สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.90-0.91 g/cm³ จึงมีน้ำหนักเบา และมีจุดหลอมตัวที่สูงประมาณ 165°C จึงมีความทนทานต่อการเสียรูปที่อุณหภูมิสูง มีความทนทานต่อความร้อน น้ำร้อน หรือไอน้ำเดือดได้ และอุณหภูมิการใช้งานสามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C ได้ นอกจากนี้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิโพรพิลีนให้ดีขึ้นกว่าเดิม โดยการเติมการผสมผงแร่หรือยางเพื่อให้มีความต้านทานต่อแรงกระทำได้ดียิ่งขึ้น แต่พอลิโพรพิลีนไม่ค่อยเสถียรต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตและตัวออกซิไดซ์ เนื่องจากในสายโซ่โมเลกุลมีไฮโดรเจนอะตอมเกิดพันธะกับ tertiary carbon ดังนั้น ก่อนนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งาน จึงต้องมีการเติมสารเคมีประเภทสารป้องกันการเสื่อม (antioxidant) และสารที่ทำให้

เสถียรต่อแสงอัลตราไวโอเลต (ultraviolet stabilizer) ในปริมาณที่เหมาะสม การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนสามารถกระทำโดยใช้ Ziegler-Natta catalyst หรือใช้วิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบโคออร์ดิเนชัน (co-ordination polymerization) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งประกอบด้วยสารเคมีสองกลุ่ม คือ กลุ่มทิตาเนียมเฮไลด์ (titanium halide) และกลุ่มอะลูมิเนียมไตรอัลคิล (aluminium trialkyl) ส่งผลทำให้ได้พอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของหมู่เมทิลอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเป็นพอลิโพรพิลีนที่มีความเป็นผลึกสูง เรียกพอลิโพรพิลีนชนิดนี้ว่า ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene) และในปัจจุบันมีการผลิตพอลิโพรพิลีนที่มีการจัดตัวของหมู่เมทิลอยู่สลับระนาบกัน ซึ่งเรียกพอลิโพรพิลีนชนิดนี้ว่า syndiotactic polypropylene มักจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมทัลโลซีนในการสังเคราะห์ โดยโครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีนแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ

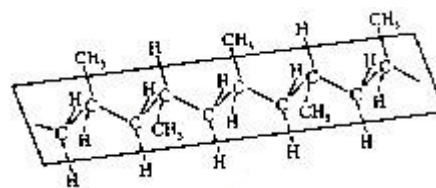
1.3.1 Isotactic polypropylene คือ พอลิโพรพิลีนที่มีหมู่เมทิลทั้งหมดอยู่ทางด้านเดียวกันตลอดความยาวของสายโซ่



ภาพประกอบที่ 6 โครงสร้างของ Isotactic polypropylene

ที่มา: Hanna and Rubin, 1990

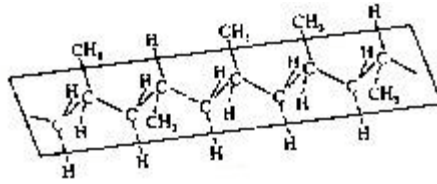
1.3.2 Syndiotactic polypropylene คือ พอลิโพรพิลีนที่มีหมู่เมทิลอยู่สลับด้านกันไปตลอดความยาวของสายโซ่



ภาพประกอบที่ 7 โครงสร้างของ Syndiotactic polypropylene

ที่มา: Hanna and Rubin, 1990

1.3.3 Atactic polypropylene คือ พอลิโพรพิลีนที่มีหมู่เมทิลกระจายตัวแบบสุ่มตลอดความยาวของสายโซ่



ภาพประกอบที่ 8 โครงสร้างของ Atactic polypropylene

ที่มา: Hanna and Rubin, 1990

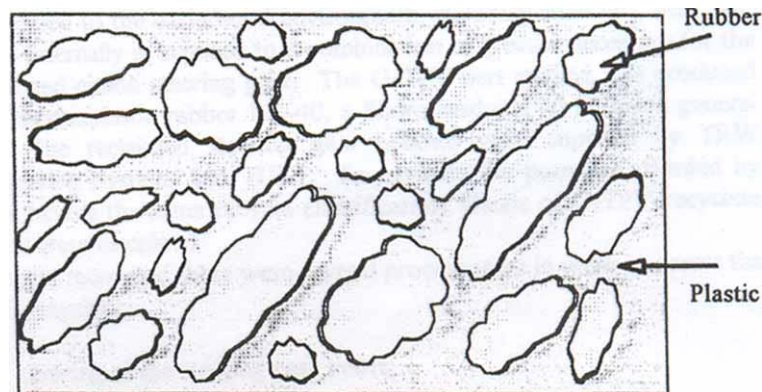
1.4 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ หรือเรียกว่า ยางเทอร์โมพลาสติก เป็นวัสดุที่มีการรวมคุณสมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกกับอิลาสโตเมอร์เข้าด้วยกัน วัสดุประเภทนี้จะแสดงคุณสมบัติที่เป็นลักษณะทั่วไปของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น (อิลาสโตเมอร์) แต่สามารถนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปได้เหมือนกับวัสดุที่เป็นเทอร์โมพลาสติก และสามารถนำเศษวัสดุคัดทิ้งของยางเทอร์โมพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ สามารถใช้กระบวนการง่าย ๆ ในการแปรรูปวัสดุยางเทอร์โมพลาสติกได้ เช่น ใช้เครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) หรือใช้เครื่องผสมแบบอัดรีด (extrusion) โดยคุณสมบัติของยางเทอร์โมพลาสติกจะมีหลากหลายตามองค์ประกอบของผสมที่แปรผันไป

คุณสมบัติของยางเทอร์โมพลาสติกชนิดอ่อนนุ่ม (soft blends) จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนวิทยาของพอลิเมอร์สองชนิดที่นำมาผสมกัน โดยบริเวณของ hard phase มีลักษณะแข็งคล้ายแก้ว (glassy) หรือสามารถเกิดผลึกเล็กๆ ได้ (micro crystalline) เสมือนว่ามีการเชื่อมขวางเกิดขึ้น (pseudo-cross links) หรือเป็นจุดเชื่อมต่อกัน (tie-points) และปรากฏการณ์เหล่านี้จะหายไปตามการให้ความร้อนแก่ของผสมชนิดนั้นๆ ทั้งนี้ ยางเทอร์โมพลาสติกมีความแตกต่างจากโคพอลิเมอร์เนื่องจากยางเทอร์โมพลาสติกเป็นของผสมทางกายภาพของพอลิเมอร์สองชนิดที่ไม่เข้ากัน (incompatible polymer) ซึ่งมี hard phase เป็นเฟสต่อเนื่อง ส่วน soft phase จะแสดงคุณสมบัติความเป็นอิลาสติก โดยที่ soft phase จะเป็น disperse particles ที่เล็กพอที่จะเกาะติดหรือยึดติดกับ matrix ได้เมื่อได้รับแรงจากภายนอกมากระทำ

ยางเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติ หรือที่เรียกว่า thermoplastic natural rubber สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ thermoplastic polyolefin (TPO) และ thermoplastic vulcanizate (TPV) โดยที่ TPOs เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินอันได้แก่ พอลิเอทิลีน หรือพอลิโพรพิลีน ผสมกับยางดิบ (unvulcanization natural rubber) มีลักษณะสัดส่วนวิทยาเป็นแบบ co-continuous phase morphology ส่วน TPVs เกิดจากการผสม

เทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินกับยางสุก (vulcanization natural rubber) ซึ่งยางจะเกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม เรียกวิธีการเกิดการเชื่อมขวางนี้ว่า dynamic vulcanization โดยจะมีเฟสยางกระจายตัวอยู่ในเฟสของพลาสติก (Nakason, et al., 2006) แสดงดังภาพประกอบที่ 9



ภาพประกอบที่ 9 สัณฐานวิทยาของของผสม O-TPV

ที่มา: Payne, 1995

โดยทั่วไป TPV เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นอีลาสติกมากกว่า TPO เนื่องจาก TPV มีการเชื่อมขวางกันภายในเฟสของยางอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเรียกการเชื่อมขวางนี้ว่า “dynamic vulcanization” การเชื่อมขวางลักษณะนี้ ทำให้มีการเชื่อมต่อกันระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกในลักษณะที่เป็น stable morphology โดยที่อนุภาคของยางใน TPV จะกระจายตัวอยู่ใน thermoplastic matrix พื้นที่ผิวของอนุภาคยางที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอสามารถเกิดอันตรกิริยากับ thermoplastic matrix เพื่อที่จะทำให้มีองค์ประกอบที่มีความเป็นอีลาสโตเมอร์สูงขึ้น ซึ่งกลไกนี้ทำให้อนุภาคของยางที่มีการเชื่อมขวางกันอย่างสมบูรณ์มีความหนาแน่นในการอัดตัวกันในเฟสของ thermoplastic matrix สูงขึ้น ส่งผลให้เกิด elastomeric performance ที่แท้จริง

1.5 การผสมยาง

1.5.1 วิธีการผสม

การผสมยางเป็นวิธีที่ทำให้สารเคมีเกาะติดกับยาง โดยให้งานกลทำให้สารเหล่านั้นเข้าไปในยาง แล้วจึงทำงานต่อไปเพื่อให้สารเกิดการแตกตัวออกและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

พาร์มเกรน (Palmgren, 1975) ให้ขั้นตอนของกระบวนการผสมยางว่าประกอบด้วย กระบวนการย่อย 4 ขั้นตอน คือ

1.5.1.1 การลดความเหนียวของยาง คือ การทำให้ยางนิ่มลงถึงระดับหนึ่ง จึงจะสามารถใส่หรืออัดสารเคมีเข้าไปในยางได้ง่าย กระทำโดยใช้งานกลกระทำต่อยางในบรรยากาศที่มีออกซิเจน เรียกกระบวนการนี้ว่าการบดยาง (mastication) ซึ่งลักษณะการบดยางเป็นปฏิกิริยา machano-thermal-oxidative reaction

1.5.1.2 การใส่สารเคมีเข้าไปในยาง เมื่อความเหนียวลดลงสามารถออกแรงเฉือนทำให้ยางยืดออก ทำให้พื้นที่ผิวที่ห่อหุ้มเคมีไว้มีมากขึ้น และแทรกเข้าไปในที่ว่างระหว่างอนุภาคของพวงเหล่านั้น เกิดการเกาะติดเป็นเนื้อเดียวกัน ขั้นตอนนี้มีความสำคัญที่สุดของกระบวนการผสม คือ ยางกับสารเคมีจะต้องเข้าเป็นเนื้อเดียวกันเสียก่อน จึงจะเรียกว่าเกิดการผสมสารเคมีขึ้นได้ หน้าที่ที่สำคัญที่สุดของเครื่องมือผสมยางแบบปิด คือ การทำให้สารเคมีเข้าไปในยางให้ได้จำนวนมาก และใช้เวลาน้อยที่สุด

1.5.1.3 การทำให้สารเคมีที่เข้าไปในยางแล้ว แยกตัวออก และกระจายออกอย่างสม่ำเสมอ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกับกระบวนการใส่สารเคมีเข้าไปในยาง เมื่อยางกับสารเคมีเข้ากันแล้วยางจะไหลยากขึ้น เพราะความเหนียวเพิ่มมากขึ้น จึงต้องเพิ่มการออกแรงเฉือนกระทำมากขึ้น เพื่อบดอนุภาคสารเคมีให้มีขนาดเล็กลงพร้อมกับกระจายตัวออกจากกัน

1.5.1.4 ถ้าการผสมดำเนินต่อไป งานกลและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ยางที่ผสมสารเคมีแล้วนิ่มลงไปเรื่อยๆ โดยไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกระจาย เรียกขั้นตอนนี้ว่า plasticization

เครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) เป็นเครื่องจักรหลักของโรงงานอุตสาหกรรมยาง เครื่องจักรอาจจะมีหลายแบบและหลายขนาด แต่เครื่องผสมยางแบบปิดจะมีส่วนประกอบหลักและมีการทำงานเหมือนกัน กล่าวคือ เครื่องจักรมีโรเตอร์ 1 คู่ หมุนเข้าหากันอยู่ในห้องผสม ทั้งห้องเสื้อและโรเตอร์สามารถหล่อน้ำร้อนหรือไอน้ำหรือหล่อน้ำเย็นได้ ยางและสารเคมีถูกป้อนเข้าทางด้านบน ปิดเครื่องด้วยฝาปิด (ram) ที่อัดส่วนผสมภายในด้วยความดันค่าหนึ่ง เมื่อผสมเสร็จแล้วจึงเปิดฝาล่าง (drop door) ให้ยางตกลงบนเครื่องรีดยางแผ่น เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการแปรรูปขั้นตอนต่อไป

เครื่องผสมแบบปิดบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์ดเดอร์ (Brabender plasticorder) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาคุณลักษณะของยางคอมพาวด์ได้อย่างกว้างขวาง ประโยชน์ด้านหนึ่งที่เครื่องมือชนิดนี้ได้รับความนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ การใช้เป็นเครื่องผสมแบบปิดขนาดเล็ก (miniature internal mixer) เพื่อทำการศึกษาการผสมยางในระดับทดลอง ทั้งนี้เพราะลักษณะการ

ทำงานคล้ายคลึงกับเครื่องผสมแบบปิดขนาดใหญ่ (banbury internal mixer) ดังนั้น จึงเหมาะในการทดลองเพื่อการทดสอบและพัฒนา แล้วจึงขยายส่วนไปสู่การผสมในเครื่องผสมแบบปิดขนาดใหญ่ที่ใช้จริงในการผลิตต่อไป

โดยทั่วไปเมื่อต้องการนำยางมาใช้งานจำเป็นต้องผสมสารเคมีลงไป เพื่อแก้ไขข้อเสียบางอย่างทำให้มีขอบเขตการใช้งานได้กว้างขึ้น ช่วยในการแปรรูปหรือเพื่อลดต้นทุนการผลิต ซึ่งสารเคมีที่นำมาผสมลงไปจะประกอบด้วยสารดังนี้ คือ สารกระตุ้น สารตัวเร่ง สารป้องกันการเสื่อมสภาพ สารตัวเติม สารวัลคาไนซ์ และสารอื่นๆ

1.5.2 สารเคมีที่ใช้ในการผสมยาง

1.5.2.1 สารกระตุ้น (activator) คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของรูป เนื่องจากสารเคมีในกลุ่มนี้จะเข้าไปกระตุ้นสารตัวเร่งให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น ทำให้มีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของรูปสูงขึ้น โดยทั่วไปสารกระตุ้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ สารอนินทรีย์ กรดอินทรีย์ และสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง สารอนินทรีย์ที่ใช้เป็นสารกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโลหะ และออกไซด์ของตะกั่ว ซึ่งสารกระตุ้นที่สำคัญและนิยมใช้มากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม คือ ซิงค์ออกไซด์ ส่วนออกไซด์ของตะกั่วส่วนใหญ่จะใช้ในกรณีพิเศษที่ต้องการให้ยางคงรูปมีความทนทานต่อการบวมตัวในน้ำสูงมากเท่านั้น สารกระตุ้นจำพวกกรดอินทรีย์ที่สำคัญ คือ สารพวกกรดไขมัน (นิยมใช้กรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมในช่วง 12-18) ได้แก่ กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก เป็นต้น สารกระตุ้นมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ เมื่อเติมเข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ยางมีโมดูลัสสูงขึ้น และบางครั้งถ้าไม่มีสารกระตุ้นอาจทำให้ไม่มีการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น ดังนั้นสารกระตุ้นจึงจำเป็นในการทำให้ยางเกิดการสุกได้อย่างสมบูรณ์ โดยทั่วไป สารกระตุ้นที่นิยมใช้คู่กัน ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก

1.5.2.2 สารตัวเร่ง (accelerator) ได้มีการค้นพบสารตัวเร่งอินทรีย์ในปี ค.ศ. 1906 โดย Oenslager และเมื่อนำสารตัวเร่งอินทรีย์มาใช้ร่วมกับสารวัลคาไนซ์ พบว่า สารตัวเร่งที่เติมลงไปจะช่วยลดเวลาการวัลคาไนซ์ลงได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์จะลดลง และปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่ใช้ก็ลดลงด้วย ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความต้านทานต่อการตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานาน (good aging resistance) และสามารถลดการซึมออกมาที่ผิวหน้าของสารวัลคาไนซ์ลงได้ ดังนั้น จำเป็นต้องใช้สารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์อีกชนิดหนึ่ง โดยทั่วไป มีการจำแนกสารตัวเร่งออกเป็นหมวดหมู่ตามลักษณะของโครงสร้างทางเคมีของสารตัวเร่งนั้นๆ ซึ่งสารตัวเร่งที่มีโครงสร้างทางเคมีต่างกัน จะมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดการเชื่อมขวางพันธะในยางต่างกัน ปัจจุบันสามารถแบ่งสารตัวเร่งออกเป็นกลุ่มแสดงดังตารางที่ 3

1.5.2.3 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants) เนื่องจากยางส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลจะเสื่อมสภาพได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาวะการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดด ออกซิเจน โอโซน ความร้อน หรือโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (metal catalysis) รวมถึงการใช้งานที่ต้องมีการหักงอเชิงกลตลอดเวลา (mechanical flexing) ดังนั้น การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้ยางมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ได้แก่ สารแอนติออกซิแดนท์และสารแอนติโอโซนแนนท์ (antioxidant and antiozonant) เป็นสารเคมีที่ช่วยป้องกันไม่ให้อย่างเสื่อมสภาพเนื่องจากอิทธิพลของออกซิเจน โอโซน กลือโลหะหนัก ความร้อน แสง การหักงอและการเกิดรอยแตกในยาง ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยาง การป้องกันเพื่อให้ยางทำปฏิกิริยากับโอโซนน้อยลงทำได้โดยการเติมสารที่ฝังลงไปนยางหรือเติมสารแอนติโอโซนแนนท์ที่เป็นอนุพันธ์ของ p-phenylene diamine เป็นต้น ส่วนสารแอนติออกซิแดนท์แบ่งตามโครงสร้างทางเคมีเป็นสามชนิด ได้แก่ สารประกอบอะมีนและอนุพันธ์ สารประกอบฟีนอล และอนุพันธ์ และ imidazyl derivative

ตารางที่ 3 ชนิด ตัวอย่าง และหน้าที่ของสารตัวเร่งที่เป็นสารประกอบอินทรีย์

ชนิด	ตัวอย่าง	การใช้งานทั่วไป
อัลดีไฮด์-เอมีน (aldehyde-amine)	สารที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง butylaldehyde และ aniline	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็ว ใช้ในยางรีเคลมและยางแข็ง (มีความเป็นพิษสูง)
เอมีน (amines)	hexamethylene tetramine, HEXA	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบช้าที่มีผล delayed action ใช้ในยางธรรมชาติ
กวานิดีน (guanidines)	diphenyl guanidine, DPG	สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิที่นิยมใช้ร่วมกับสารตัวเร่งในกลุ่มไทอะโซล
ไทโอยูเรีย (thioureas)	ethylene thiourea, ETU	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็ว ใช้ในยาง CR EPDM CSM และ ECO (มีความเป็นพิษสูง)
ไทอะโซล (thiazoles)	benzothiazyl disulfide, MBTS	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วปานกลาง ใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เช่น SBR IR NBR และ EPDM เป็นต้น

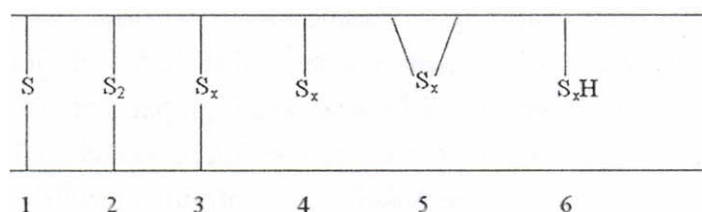
ไทูแรม (thiurams)	tetramethylthiuram disulfide, TMTD	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วที่สามารถแตกตัวให้กำมะถันได้ ใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เช่น SBR IR และ EPDM เป็นต้น
ซัลฟีนามิด (sulfenamides)	N-cyclo hexyl-2-benzothiazyl-sulfenamide, CBS	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วที่มีผล delayed action ใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เช่น SBR IR NBR และ EPDM เป็นต้น
ไดไทโอบาไมต์ (dithiocarbamates)	zinc dimethyl dithiocarbamate, ZDMC	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วมาก ใช้ในยาง SBR และ IR
แซนทาต (xanthates)	dibutylxanthogen disulfide	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วมากที่สามารถทำให้อย่างคงรูปได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ใช้ในยางธรรมชาติและยาง SBR

ที่มา: พงษ์ธร, 2548

1.5.2.4 สารตัวเติม (filler) หมายถึงสารที่เติมลงไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง เพื่อเสริมแรงให้ยางมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต ลดต้นทุนการผลิต เพื่อลดการพองตัวของยางในน้ำมัน เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า หรือเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ตามประสิทธิภาพการเสริมแรง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers) และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงหรือเรียกว่าสารตัวเติมเฉื่อย (non-reinforcing fillers หรือ inert fillers)

1.5.2.5 สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) เป็นสารที่ทำให้ยางคงรูป เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องผสมลงไปในยาง เพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน หรือปฏิกิริยาการคงรูป การวัลคาไนซ์จึงเป็นการเปลี่ยนยางที่อยู่ในสภาพไม่คงตัวให้เป็นอย่างที่มีรูปทรงได้ในลักษณะยึดหยุ่นหรือแข็งกระด้างโดยการใช้สารวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมขวางกันเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติ ซึ่งทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อนนุ่มเหนียวหนึบ (tacky) และไหลได้แบบเทอร์โมพลาสติกไปเป็นอย่างคงรูปที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทานและมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก การทำให้ยางคงรูปสามารถทำได้ด้วยการใช้รังสีที่มีพลังงานสูงโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารวัลคาไนซ์ แต่วิธีการคงรูปแบบนี้ต้องใช้

เครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ต้องการคงรูปยางที่บางๆ เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ การทำให้ยางคงรูปด้วยรังสีที่มีพลังงานสูงจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบัน การคงรูปยางส่วนใหญ่เกิดจากการเติมสารกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป ซึ่งสารกลุ่มที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (sulfur) ระบบที่ใช้เพอร์ออกไซด์ (peroxide) และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์ เป็นต้น โดยที่ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปเกิดขึ้นได้เร็ว (เมื่อใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสม) และยางคงรูปที่ได้ นั้นมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี อย่างไรก็ตาม ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันมีข้อจำกัดหลัก คือ ไม่สามารถใช้ในการคงรูปยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลได้ เช่น ยางซิลิโคนและยาง ethylene propylene monomer ซึ่งในระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน การเชื่อมขวางอาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ แสดงดังภาพประกอบที่ 10 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า หากใช้กำมะถันหนึ่งอะตอมต่อหนึ่ง crosslink จะเรียกการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นว่า mono-sulphidic crosslink หากใช้กำมะถันสองอะตอมต่อหนึ่ง crosslink จะเรียกการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นว่า disulphidic crosslink และถ้าหากใช้กำมะถันมากกว่าสองอะตอมต่อหนึ่ง crosslink จะเรียกการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นว่า polysulphidic crosslink



ภาพประกอบที่ 10 โครงสร้างการเชื่อมขวางแบบต่างๆ (1) mono-sulphidic (2) disulphidic (3) polysulphidic crosslink (4) สายโซ่กำมะถัน (5) โครงสร้างแบบวงแหวน (6) หมู่ไทออล (thiol)

ที่มา: พงษ์ธร, 2548

ในระบบที่มีปริมาณกำมะถันสูง หรือในระบบที่มีอัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งสูง การเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเป็นแบบ polysulphidic crosslink ยางคงรูปที่ได้ จะมีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติเชิงกล เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อแรงฉีกขาด การยึดตัว ณ จุดขาด และคุณสมบัติพลวัต รวมถึงมีความต้านทานต่อการล้าตัวที่ดี เรียกกระบวนการนี้ว่า

ระบบการควบรูปแบบดั้งเดิม (conventional vulcanization) หรือใช้ชื่อเรียกย่อๆว่า ระบบ CV แต่ในระบบที่มีปริมาณกำมะถันอยู่น้อยมากๆ หรือมีอัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งตัว หรือในบางครั้งอาจไม่จำเป็นต้องเติมกำมะถันลงไปในระบบเลย แต่ใช้สารตัวเร่งที่สามารถให้กำมะถัน (sulfur donor accelerator) ออกมาในระหว่างกระบวนการควบรูปแทนได้ การเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแบบ mono-sulphidic crosslink หรือ disulphidic crosslink เรียกกระบวนการควบรูปนี้ว่า ระบบการควบรูปแบบมีประสิทธิภาพ (efficient vulcanization) หรือใช้ชื่อเรียกย่อๆว่า ระบบ EV ซึ่งยางที่ควบรูปด้วยระบบ EV จะมีความทนทานต่อความร้อนสูงกว่ายางที่ควบรูปด้วยระบบ CV เนื่องจากพลังงานพันธะของ C-S (ประมาณ 279 kJ/mol) มีค่าสูงกว่าพลังงานพันธะของ S-S (ประมาณ 206 kJ/mol) พันธะแบบมอโนซัลไฟด์จึงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีกว่าพันธะแบบพอลิซัลไฟด์

ดังนั้น การใช้อัตราส่วนระหว่างกำมะถันกับสารตัวเร่งจึงเป็นตัวกำหนดว่าระบบการควบรูปจะเป็นแบบระบบ CV หรือเป็นระบบ EV ถ้าหากค่าของอัตราส่วนระหว่างกำมะถันกับสารตัวเร่งอยู่ระหว่างนี้ให้จัดเป็นระบบ semi-EV

การตรวจเอกสาร

Chuntip and Narongrit (2001) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการอบและการไหลของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม โดยแปรผันปริมาณยางรีเคลมอยู่ในช่วง 20-80 phr พบว่า ทอร์กสูงสุด (maximum torque) ของของผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น ความหนืดมูนนี่ (mooney viscosity) ลดลงตามการบดยาง (mastication) แต่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางรีเคลม ต่อมา Chuntip and Narongrit (2003) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลไดนามิกส์ของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม พบว่า ปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิแข็งคล้ายแก้ว (glass transition temperature: Tg) มีการเปลี่ยนแปลง คืออุณหภูมิแข็งคล้ายแก้วสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของยางรีเคลม ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรกมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นและประการที่สองมีคาร์บอนแบล็ค (carbon black) ในยางรีเคลม

Ismail et al. (2002) ศึกษาผลของยางที่นำกลับมาใช้ใหม่ (recycled rubber powder) ที่มีปริมาณอยู่ในช่วง 0-50 phr ต่อลักษณะเฉพาะของการอบ คุณสมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง และพฤติกรรมการบวมตัวของยางธรรมชาติคอมพาวด์ พบว่า ทอร์กต่ำสุด (minimum torque) ความหนืดมูนนี่ (mooney viscosity) และความต้านทานต่อการบวมตัวของยางธรรมชาติคอมพาวด์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของยางที่นำกลับมาใช้ใหม่ แต่เวลาที่ยางสุกก่อนกำหนด (scorch time) เวลาที่จะต้องอบยางให้สุก (cure time) และระยะยืดที่จุดขาด (elongation at break) มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยางธรรมชาติคอมพาวด์มีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางที่นำกลับมาใช้ใหม่ และมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุดเมื่อเติมปริมาณยางที่นำกลับมาใช้ใหม่เท่ากับ 10 phr

Radheshkumar and Karger-Kocsis (2002) ได้ทำการศึกษาผลของยางรีเคลมที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.4 mm-0.7 mm ต่อของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low-density polyethylene: LDPE) เพื่อที่จะผลิตเป็นสารวัลคาไนซ์เชิงพลวัตที่เป็นเทอร์โมพลาสติก ซึ่งพบว่า การใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นอีลาสติก (elasticity) และประสิทธิภาพเชิงกลต่อแรงดึง (tensile mechanical performance) โดยวิเคราะห์ว่า เป็นผลมาจากการพันกันระหว่างผิวหน้า (interfacial entanglement) และการเกิดร่างแหเชื่อมขวางร่วมกัน (co-crosslinking phenomena)

เมื่อพิจารณาวัสดุเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomers: TPEs) ซึ่งเป็นวัสดุที่รวมคุณสมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกและอีลาสโตเมอร์เข้าด้วยกัน วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติทั่วไปคล้ายยางแต่สามารถขึ้นรูปได้ง่ายเหมือนเทอร์โมพลาสติก โดยที่สามารถนำเทอร์โมพลาสติกที่เป็นเศษเหลือและถูกคัดทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้

พอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่มีราคาปานกลาง สามารถใช้ในงานได้หลากหลายประเภท สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปที่ง่าย และมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี จึงมีการนำพอลิโพรพิลีนมาใช้กันอย่างกว้างขวาง ปัจจุบันจึงมีการพัฒนาคุณสมบัติของของผสมจากพอลิโพรพิลีนเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เช่น การศึกษาการเพิ่มความเหนียวของพอลิโพรพิลีนด้วยการเติมวัสดุที่เป็นอีลาสโตเมอร์บางชนิดลงไป กลายเป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ซึ่งมีผลให้ใช้งานได้ที่อุณหภูมิช่วงกว้าง โดยที่ยังคงความแข็ง ความแข็งแรง และความสามารถในการขึ้นรูปได้ง่าย

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่ได้จากการผสมยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน หรือเรียกว่ายางเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic natural rubber: TPNR) เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness) ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสของ อีลาสโตเมอร์ (modulus of elasticity) และความทนทานต่อแรงฟาดกระทบของพลาสติก (impact resistant plastic)

ของของผสมให้มีค่าสูงขึ้น ยางเทอร์โมพลาสติกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยม มีคุณสมบัติเชิงพลวัตก่อนข้างดี และมีความต้านทานต่อสภาพอากาศภายนอก (weather resistance) และความต้านทานต่อโอโซน (ozone resistance) ที่ดีกว่ายางธรรมชาติ สามารถใช้งาน TPNR ที่อุณหภูมิช่วงกว้างคือ -30°C ถึง 70°C ยางเทอร์โมพลาสติกมีความแข็งแรงต่อแรงดึงในทิศทางกรไพลประมาณ 20 MPa มีความแข็งแรงต่อแรงดึงในทิศทางตรงข้ามประมาณ 17 MPa และมีค่ามอดูลัสของการโค้งงอ (flexural modulus) อยู่ในช่วง 300-1000 MPa จึงสามารถใช้งานในด้านยานยนต์ที่ต้องการความแข็งแรงต่อแรงฟาดกระแทกที่อุณหภูมิต่ำได้

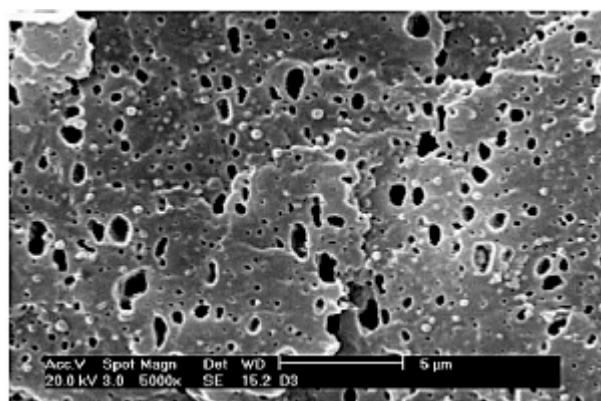
ได้มีการศึกษาพฤติกรรมกรไพลได้ของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน ต่อผลของสัดส่วนการผสม พบว่า ที่การผสมโดยใช้ shear stress ต่ำๆ ค่าความหนืด (viscosity) ของของผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น แต่ที่การผสมโดยใช้ shear stress สูงๆ ค่าความหนืดของของผสมมีค่าขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมของยางธรรมชาติและพอลิโพรพิลีน

Phadke and De (1986) ได้ศึกษาการผสม cryo-ground rubber ลักษณะที่เป็นผง และลักษณะที่เป็น master batch กับยางธรรมชาติ ผสมกับพอลิโพรพิลีน เพื่อศึกษาถึงลักษณะการไพลและคุณสมบัติเชิงกลของของผสมนี้ พบว่า ยางธรรมชาติทำหน้าที่เป็น dispersing agent ได้ดี การเติม cryo-ground rubber ลงไป ไม่มีผลที่มีนัยสำคัญต่อ viscosity ของของผสมที่การผสมด้วย shear rate สูงๆ (มากกว่า 60 s^{-1}) แต่การผสมด้วย shear rate ต่ำๆ (น้อยกว่า 60 s^{-1}) viscosity ของของผสมจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการเติม cryo-ground rubber ด้านคุณสมบัติเชิงกลของของผสมจะบ่งชี้ว่าของผสมระหว่าง cryo-ground rubber กับพอลิโพรพิลีนมีความไม่เข้ากัน ซึ่งผง cryo-ground rubber จะให้ผลการยึดเกาะ (adhesion) กับ polypropylene matrix ที่ต่ำ ทำให้คุณสมบัติด้านความทนทานต่อแรงฟาดกระแทก (impact strength) ลดลง แต่การเติม master batch ของ cryo-ground rubber กับยางธรรมชาติ สามารถปรับปรุงการยึดเกาะระหว่าง cryo-ground rubber กับ polypropylene matrix ส่งผลให้ของผสมนี้มีคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฟาดกระแทกสูงขึ้น

การศึกษาพฤติกรรมด้านความร้อน ของของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาติ ด้วยเครื่องมือ differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetry (TG) และ dynamic mechanical analysis (DMTA) พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนมีค่า 165°C การใช้เครื่องมือ DSC วิเคราะห์ผลทางความร้อนของของผสม พบว่า ค่าของอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนมีค่าลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ซึ่งความสามารถในการเกิดผลึกลดลงถึง 79% เมื่อเติมยางธรรมชาติลงไป 70% และอุณหภูมิแข็งคล้ายแก้ว (glass transition temperature) ของของผสม มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแข็งคล้ายแก้วของยางธรรมชาติบริสุทธิ์ ผลของการใช้เครื่องมือ

thermogravimetry พบว่า การเสียรูปเริ่มต้น (onset degradation) ของพอลิโพรพิลีนจะช้าลงเมื่อเติมยางธรรมชาติลงไปผสม และผลของการใช้เครื่องมือ DMTA พบว่า มีอุณหภูมิคลายแก้วปรากฏสองค่า ซึ่งค่าหนึ่งเป็นอุณหภูมิของเฟสอสัณฐานและอีกค่าหนึ่งเป็นอุณหภูมิของเฟสพอลิโพรพิลีน ผลของการปรากฏอุณหภูมิแข็งคล้ายแก้วสองค่านี้ ทำให้ทราบว่าของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีนมีความไม่เข้ากัน

เนื่องจาก พบว่า ของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีนมีปัญหาด้านการเข้ากันได้ Hassan et al. (2003) จึงได้มีการศึกษารอยแตกที่ผิวหน้าของของผสมยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า เกิดรอยแตกตรงบริเวณระหว่างผิวหน้าของพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ (polypropylene matrix) กับเฟสยาง (disperse rubber phase) แสดงดังภาพประกอบที่ 11



ภาพประกอบที่ 11 รอยแตกที่ผิวหน้าของของผสม PP/NR (80/20)

ที่มา: Hassan et al., 2003

Hassan et al. (2003) ได้ทำการทดลองเติม *m*-phenylenebismaleimide, HVA-2 ลงไปในของผสมยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน โดยที่ HVA-2 เป็นสารเคมีที่มีจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Du Pont ซึ่งเป็นสารร่วมที่ใช้ในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (coagent in peroxide vulcanization) โดยทั่วไปจะใช้ HVA-2 เป็นสาร curing agent ในยางธรรมชาติคอมพาวด์ ซึ่งจะเสถียรต่อความร้อนมาก และทำหน้าที่เป็น multi-functional radical acceptors ของ dissimilar polymer radicals เพื่อที่จะลด interfacial tension และให้การเชื่อมขวางกันในเฟสยางมีปริมาณต่ำลง โดยที่ HVA-2 จะเข้าไปเชื่อมขวางกับยางธรรมชาติแทนการเชื่อมขวางกันเองของยางธรรมชาติ ซึ่ง

ทำให้เกิดกลไกการเพิ่ม interfacial adhesion ส่งผลให้สามารถเพิ่มคุณสมบัติการทนทานต่อแรงฟาดกระแทก (notched Izod impact strength) ของของผสม PP/NR ที่อุณหภูมิต่ำได้สูงขึ้น

การศึกษาการเข้ากันได้ ของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีนด้วยการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) ปริมาณเล็กน้อยลงไปในของผสม พบว่า มีการเชื่อมขวางกับเฟสยางได้ดีขึ้น โดยที่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะเข้าไปอยู่รอบๆบริเวณแบ่งเฟส (phase boundary) และช่วยปรับปรุงการยึดเกาะกันระหว่างพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ (polypropylene matrix) กับเฟสยาง (disperse rubber phase) ซึ่งสาเหตุนี้จะส่งผลให้การเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงปริมาณเล็กน้อยลงไปในของผสมสามารถปรับปรุงคุณสมบัติการทนทานต่อแรงฟาดกระแทก (notched Izod impact strength) ได้ โดยที่ของผสมจะมีความทนทานต่อแรงฟาดกระแทกเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิที่สูงกว่า -20°C เป็นผลเนื่องมาจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่เติมลงไปจะช่วยปรับปรุงความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีน จึงส่งผลให้ของผสมระหว่าง PP/NR/HDPE มีคุณสมบัติการทนทานต่อแรงฟาดกระแทกสูงขึ้น

Ismail et al. (2001) ได้ศึกษาวัสดุคอมโพสิต จาก white rice husk ash (WRHA)-polypropylene/natural rubber ใช้เครื่องมือ brabender plasticoder ในการผสมที่อุณหภูมิ 180°C ใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที โดยศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุนี้ พบว่า การเติม WRHA ในพอลิโพรพิลีนที่ผสมกับยางธรรมชาติ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติ tensile modulus ได้ แต่คุณสมบัติด้าน tensile strength, elongation at break และ stress at yield มีค่าลดลงเมื่อเติม WRHA ปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งคุณสมบัติที่ลดลงเหล่านี้ มีสาเหตุเนื่องมาจากการมีอันตรกิริยาที่ไม่ดีระหว่าง matrix กับสารตัวเติม นอกจากนี้ Ismail et al. ได้ทำการทดลองเติม silane coupling agent ที่ชื่อว่า 3-aminopropyl triethoxysilane (3-APE) ลงไปในวัสดุคอมโพสิต WRHA-polypropylene/ natural rubber พบว่า สามารถปรับปรุงคุณสมบัติ tensile modulus, tensile strength และ stress at yield ได้ และการศึกษาคุณสมบัติการดูดซับน้ำ พบว่า การใช้ coupling agent สามารถลดปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับไว้ได้

Ismail and Nasir (2001) ได้ศึกษาผลของการเชื่อมขวางแบบพลวัต (dynamic crosslink) ต่อคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติการดูดซับน้ำ และสัณฐานวิทยาของของผสม rubberwood-polypropylene/natural rubber โดยใช้เครื่องมือ brabender plasticoder ในการผสมที่อุณหภูมิ 180°C ใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์ 50 rpm และแปรผันปริมาณกำมะถันในช่วง 0-2.0 wt% พบว่า การเชื่อมขวางแบบพลวัตทำให้คุณสมบัติ tensile strength, stress at peak, Young's modulus, flexural modulus และ stabilization torque ของของผสม rubberwood-

polypropylene/natural rubber มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้โดยการลดลงของน้ำหนักของ gain และการลดลงของน้ำหนักที่หายไปของของผสมเมื่อมีปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้น

Hashim and Ong (2002) ได้เตรียมยางธรรมชาติที่ปรับปรุงด้วยพอลิสไตรีน (polystyrene-modified natural rubber, SNR) เพื่อใช้เป็นสารที่ทำให้ของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาติมีความเข้ากันได้ดี โดยเตรียม SNR จากสไตรีนปริมาณ 25 wt% และเนื้อยางแห้งปริมาณ 75 wt% โดยให้เกิดปฏิกิริยา in situ polymerization ของสไตรีนในน้ำยางธรรมชาติที่มีการกำจัดโปรตีนออก (deproteinized natural rubber latex, DPNR) ที่อุณหภูมิ 60°C ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5 hrs ที่เวลายุติปฏิกิริยาทำยางให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จะได้ gum SNR และพบว่า ของผสมที่มีระบบการวัลคาไนซ์แบบ efficient curative system มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุดเมื่อเติม SNR ปริมาณ 5 wt% และของผสมที่มีระบบการวัลคาไนซ์แบบ semi-efficient curative system ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุดเมื่อเติม SNR ปริมาณ 10 wt% และการเติม SNR ทำให้ของผสมมีคุณสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าของผสมที่ไม่เติม SNR

Oh et al. (2003) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงการเข้ากันได้ของของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาติ โดยไม่ใช้สารเคมี ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการใช้ ultrasonic reactor ในกระบวนการแบบรีด (extrusion process) มีการศึกษาปฏิกิริยา in situ compatibilization ของของผสมที่ไม่เข้ากันระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาติ พบว่า วิธีการนี้สามารถปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างเฟสของพอลิโพรพิลีนและเฟสของยางธรรมชาติได้ ส่งผลให้ของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาติมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 4

Ismail and Suryadiansyah (2002) ได้ทำการศึกษาวัสดุเทอร์โมพลาสติก-อีลาสโตเมอร์ จากของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาติ และของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางที่นำกลับมาใช้ใหม่ (recycle rubber: RR) พบว่า ของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางที่นำกลับมาใช้ใหม่มีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) และยังมีมอดูลัส (Young's modulus) สูงกว่าของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาติ แต่มีระยะยืดที่จุดขาด (elongation at break) และความเสถียรต่อแรงบิด (stabilization torque) ต่ำกว่าของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาติ และเมื่อทดสอบการแตกหักที่ผิวหน้าจากแรงดึงของของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางที่นำกลับมาใช้ใหม่ ด้วยเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางที่นำกลับมาใช้ใหม่ ต้องการพลังงานที่จะทำให้ชิ้นทดสอบแตกหักสูงกว่าของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4 คุณสมบัติเชิงกลของ untreated PP/NR และ ultrasonically treated PP/NR

Amplitude	TS ^a (MPa)	EB ^b (%)	Young's modulus (MPa)	toughness (MPa)	Impact energy (joule)
Untreated	8.39	38.9	191.0	2.99	2.75
Treated 6 μm	11.27	111.7	250.0	12.19	5.89
Treated 10 μm	10.60	126.8	215.0	13.19	3.52

เมื่อ a คือ tensile strength

และ b คือ elongation at break

ที่มา: Oh et al. (2003)

Malaika and Amir (1989) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบ่มเร่ง (ageing) และคุณสมบัติเชิงกลของระบบผสมระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และพอลิโพรพิลีน พบว่า ผลของการแทนที่ยางธรรมชาติด้วยยางรีเคลม ปริมาณครึ่งหนึ่งในของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน มีคุณสมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ของผสมระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลมและพอลิโพรพิลีน มีพฤติกรรมคล้ายกับของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน คือ ทั้งสองระบบยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่อยู่เมื่อแปรรูปใหม่ได้ถึงสี่ครั้งและสามารถใช้อุณหภูมิได้ถึง 180°C

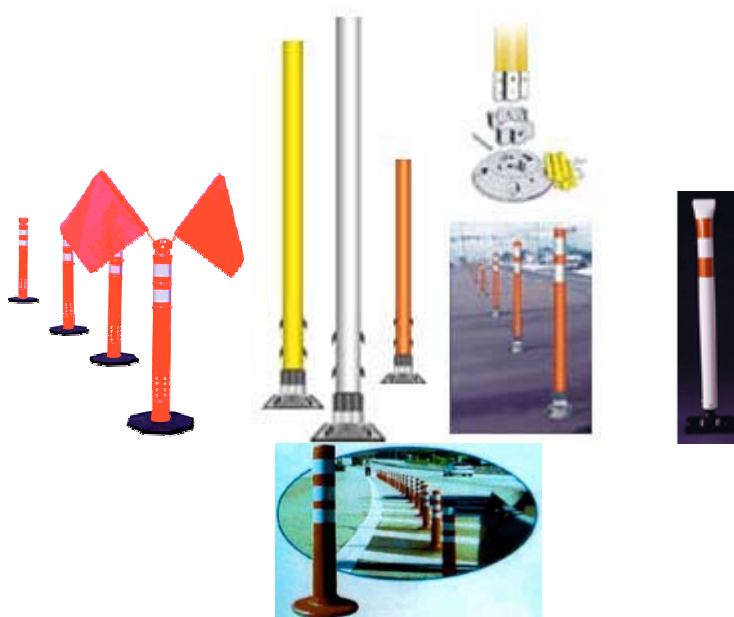
Ismail and Suryadiansyah (2004) ได้ทำการศึกษาผลของสารตัวเติม อันได้แก่ เชม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่แปรผันในช่วง 0-30 wt% ในของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน ยางธรรมชาติ และผงยางรีเคลม (recycle rubber powder) ที่สัดส่วนการผสม 70/15/15 ด้วยเครื่องมือ brabender plasticoder ที่อุณหภูมิ 190°C ใช้ความเร็วรอบในการผสม 50 rpm พบว่า คุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงและ Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเชม่าดำและซิลิกาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้ผลของคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง ในขณะที่ค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้น การเติมเชม่าดำทำให้ของผสมมีค่าความทนทานต่อการบวมตัวน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมซิลิกาลงไปของผสมจะทำให้มีความยุ่งยากในการผสมมากกว่าการเติมเชม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต

Rattanasom et al. (2005) ได้ศึกษาผลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ได้แก่ ระบบ conventional vulcanization (CV) และระบบ efficient vulcanization (EV) ต่อคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติ heat aging resistance ของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม (tire

tread reclaimed rubber: RR) ซึ่งในแต่ละระบบจะแปรผันปริมาณยางรีเคลมในช่วง 10-50 phr พบว่า คุณสมบัติเชิงกล เช่นคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง คุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด คุณสมบัติความทนทานต่อการขีดข่วน ของของผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของยางรีเคลมเพิ่มขึ้น แต่สำหรับคุณสมบัติด้านความแข็งและ modulus จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น

ปัจจุบันมีผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ road divider จากยางธรรมชาติผสมเพื่อการพาณิชย์ คือ สถาบัน Rubber Research Institute of Malaysia ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่กล่าวถึงนี้มีลักษณะคล้ายกับหลักกั้นเส้นทางเดินรถ และยังพบว่าประเทศสหรัฐอเมริกามีการผลิตผลิตภัณฑ์ delineators ที่สามารถรับแรงกระแทกได้สูงและสามารถโค้งกลับได้ เช่น บริษัท Chagrin Safety Supply แต่ผลิตภัณฑ์นี้มีราคาจำหน่ายสูงถึง 82-87 ดอลลาร์สหรัฐ

ตัวอย่างลักษณะของผลิตภัณฑ์ delineator posts ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด แสดงดังภาพประกอบที่ 12



ภาพประกอบที่ 12 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ delineator posts ในท้องตลาด

ที่มา: Chagrin Safety Supply, Inc., 2547

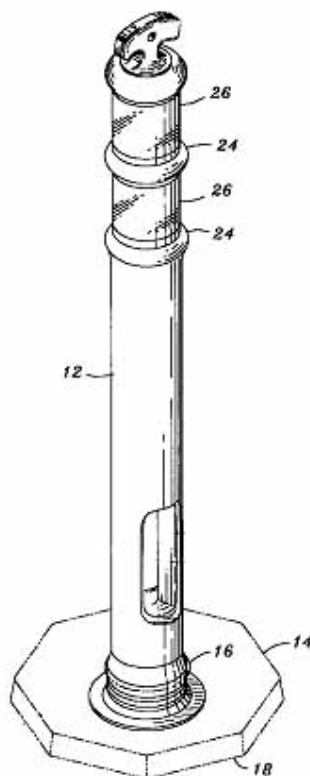
นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Flint Trading Inc. ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า Dura-Post[®] heavy duty tubular marker เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตจากพอลิยูรีเทน ผลิตโดยกระบวนการฉีด (injection molding) สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายประการ เช่น เป็นอุปกรณ์นำทาง (channelizing devices) เกาะกลางถนน (traffic islands) กั้นเขต (gore areas) บังบอกริเวณที่เครื่องจักรกำลัง

ทำงาน (work zone) แบ่งช่องจอดยานพาหนะ (parking lots/bike trails/airports/malls/rental car areas/car washes) เป็นเครื่องหมายที่ใช้บอกการปฏิบัติเกี่ยวกับการจราจร (drive through lanes/dangerous curve/obstacle warning) หรือสามารถติดตั้ง ณ สถานที่อื่นใดที่อุบัติเหตุอาจเกิดขึ้นได้บ่อยครั้ง

จากการศึกษาสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับ delineator posts ซึ่งมีปริมาณมาก แต่พบว่าสิทธิบัตรที่คล้ายคลึงกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตเพียง 11 สิทธิบัตร ยกตัวอย่างเช่น สิทธิบัตรของสหรัฐอเมริกา เลขที่ 6,014,941 ซึ่งมีข้อมูลโดยสังเขป คือ traffic delineator จะกล่าวถึงเสาทรงกระบอก (cylinder) และฐาน ซึ่งฐานจะมีช่องว่างตรงกลางเพื่อให้ cylinder ตั้งตรงอยู่บนฐานได้ และจะมีค้ำจับ (grip) อยู่บริเวณตรงกลางของ cylinder เพื่อให้จับถือได้ง่ายขึ้น โดยที่จะขึ้นรูป cylinder ด้วยวิธี blow molding

จากภาพประกอบที่ 13 ประกอบด้วย cylinder (หมายเลข 12) ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย มีน้ำหนักเบา เป็นพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยวิธี blow molding วางอยู่ในฐาน (หมายเลข 14) ที่มีช่องว่างเป็นรูวงกลม (หมายเลข 16) ตรงกลางฐานเพื่อรองรับ cylinder ให้ตั้งตรงอยู่ได้ และได้ออกแบบบริเวณผิวหน้าที่หมายเลข 18 ให้เหมาะสำหรับติดบนผิวถนนได้ ส่วนหมายเลข 24 ออกแบบเพื่อให้ cylinder มีความแข็งแรงและดูสวยงาม นอกจากนี้อาจจะติดแผ่นสะท้อนแสงที่หมายเลข 26 เพื่อให้สามารถมองเห็น cylinder ได้ง่าย ซึ่ง cylinder และฐานสามารถผลิตได้จากวัสดุหลายชนิด เช่น ฐานสามารถใช้วัสดุที่เป็นยาง เช่น recycled automobile tires หรือวัสดุอื่นที่มีความหนาแน่นสูง หรืออาจจะผลิตจากพลาสติกที่มีน้ำหนักเบาก็ได้ โดยทั่วไปฐานมักจะมีลักษณะเป็นรูปแปดเหลี่ยมและผิวด้านล่างจะมีลักษณะเป็นผิวเรียบ สำหรับส่วนของ cylinder นั้นสามารถออกแบบให้มีลักษณะ สี สัน ได้ตามความต้องการ

สำหรับการทดสอบผลิตภัณฑ์หลักกันเส้นทางเดินรถหรือ delineator posts อาจได้รับกรับรองจาก NCHRP-350 (National Cooperative Highway Research Program- report 350) ซึ่งเป็นข้อตกลงที่เกิดจากหน่วยงาน Federal Highway Administration (FHWA) และองค์กร Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD) เสนอให้ทางหลวงแห่งชาตินำไปปฏิบัติ โดยเนื้อหาจะกล่าวถึง การประเมินศักยภาพความปลอดภัยของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการจราจร พร้อมทั้ง เสนอขั้นตอนสำหรับประเมินศักยภาพความปลอดภัยของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการจราจรบนทางหลวง และจะครอบคลุมถึงขั้นตอนการทดสอบและเกณฑ์การประเมินผลการทดสอบ การชนอุปกรณ์ดังกล่าว การชนอุปกรณ์ตามการทดสอบของ NCHRP-350 แสดงดังภาพประกอบที่



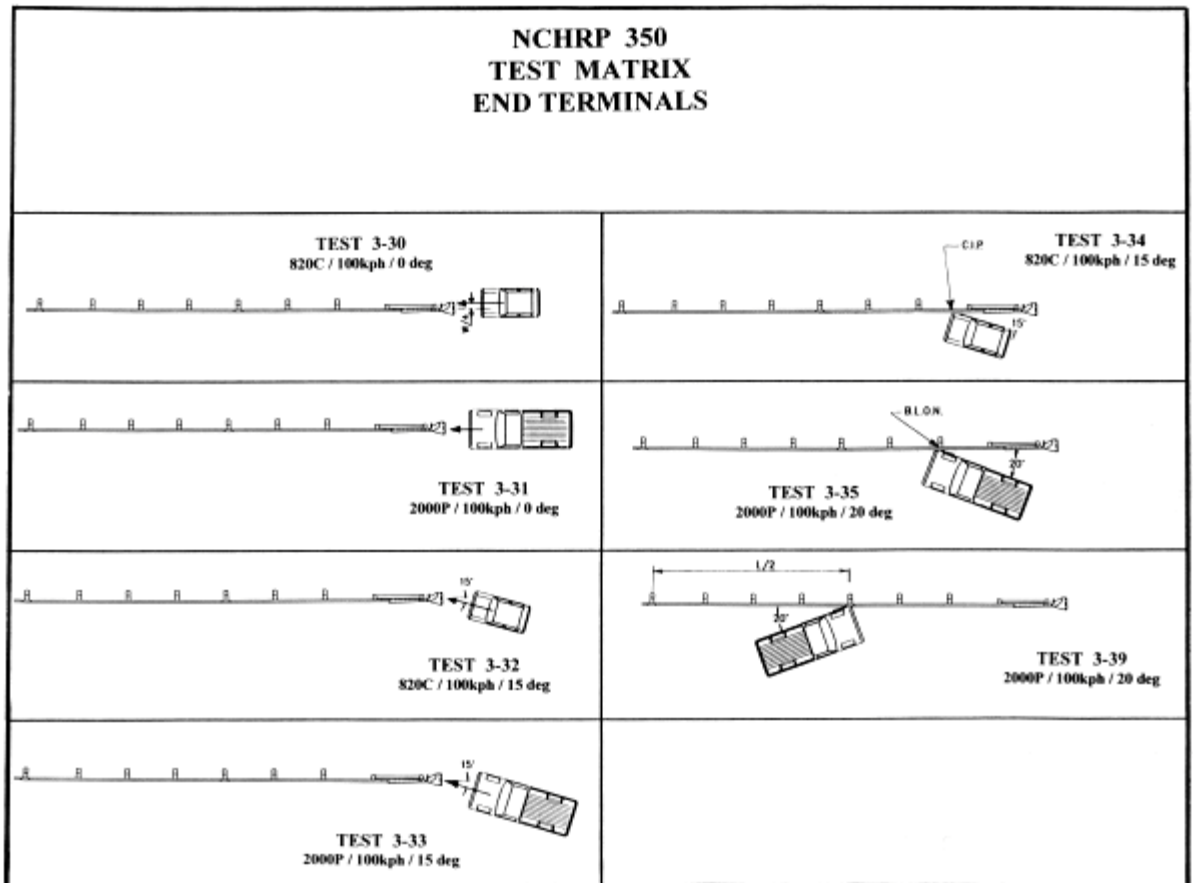
ภาพประกอบที่ 13 ลักษณะของ traffic delineator ตามสิทธิบัตรของสหรัฐอเมริกา

เลขที่ 6,014,941

ที่มา: Bent et al., 2000

หรือทดสอบผลิตภัณฑ์ตามสิทธิบัตรของสหรัฐอเมริกา เลขที่ 5,066,163 ซึ่งมีข้อมูลโดยสังเขป แบ่งขั้นตอนการทดสอบออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. เป็นการทดสอบ impact resistance เพื่อทดสอบความทนทานต่อการฟาดกระทบของ flexible delineator posts
2. เป็นการทดสอบความแข็ง ซึ่งจะวัดความแข็งของ flexible delineator posts ภายใต้แรงสถิต (static load) โดยวัดการบิดเบี้ยวก่อนและหลังการทดสอบ impact resistance
3. เป็นการทดสอบความทนทานต่ออุณหภูมิ โดยวัดความทนทานของ flexible delineator posts ต่อการแตกหักหรือการบิดเบี้ยวอย่างถาวรเมื่อตัด flexible delineator posts ให้องศา ที่อุณหภูมิสูงๆ (ประมาณ 200°C)



ภาพประกอบที่ 14 การชนอุปกรณ์ตามการทดสอบของ NCHRP-350

ที่มา: Ross et al., 2548

หากจะกล่าวถึงข้อดีของผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตขึ้น พบว่า ผลิตภัณฑ์จะมีความยืดหยุ่น สามารถรับแรงกระแทกได้สูง มีน้ำหนักเบาสามารถขนย้ายได้สะดวก ติดตั้งได้ง่ายจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นทั้งเสาถนนไหล่ทางและเป็นหลักกั้นเส้นทางเดินรถ เพื่อแทนเสาคอนกรีตที่มีการแตกหักเมื่อมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นได้ ดังนั้น จึงเป็นการดีที่จะผลิตขึ้นงานเพื่อช่วยลดความรุนแรงจากอุบัติเหตุ พร้อมทั้งเป็นการสร้างโอกาสในการทำธุรกิจทางด้านผลิตภัณฑ์จากยางพาราของประเทศ เพื่อแก้ไขปัญหาการคายพาราถูกลงในระยะยาว และยังเป็นการลดการพึ่งพาสถาปัตยกรรมต่างประเทศในการส่งออกยางพาราได้อีกทางหนึ่ง

วัตถุประสงค์

เพื่อกำหนดสูตรและสถานะการขึ้นรูปของการผลิตหลักกันเส้นทางเดินรถจากยวง
ธรรมชาติ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยนี้ก่อให้เกิดประโยชน์หลายด้าน ได้แก่

- 1 เป็นการพัฒนาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เกิดขึ้นในประเทศ
- 2 เป็นการเพิ่มมูลค่าสินค้าและลดการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศ
- 3 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้เพื่อลดปัญหาอุบัติเหตุได้
- 4 มีความก้าวหน้าทางวิชาการ และสามารถพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต
สู่ขั้นอุตสาหกรรมได้
- 5 สร้างโอกาสงานให้แก่ชุมชนและประเทศได้