

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอสเทอร์ (Ester)

เอสเทอร์ (ester) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่แอลคอกซีคาร์บอนิล (alkoxy carbonyl) โดยหมู่ฟังก์ชันมีสูตรทั่วไปเป็น $R'COOR$ หรือ $R'CO_2R$ เมื่อ R' และ R แทนหมู่แอลคิล (alkyl) หรือ หมู่แอริล (aryl) ซึ่งเอสเทอร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดคาร์บอกซิลิกกับแอลกอฮอล์ เรียกปฏิกิริยาการเตรียมเอสเทอร์ว่า เอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) (Wilhelm *et al.*, 2005)

การเรียกชื่อเอสเทอร์มี 2 ระบบ คือ ระบบ common name โดยอ่านชื่อ alkyl group ที่มาจาก alcohol ก่อน แล้วตามด้วยชื่อของ acid โดยเปลี่ยนจาก -ic acid เป็น ate และระบบ IUPAC ให้อ่านชื่อ alkyl group ของแอลกอฮอล์ก่อนตามด้วย alkyl group ของกรดอินทรีย์ลงท้ายด้วย oate เช่น methyl formate หรือ methyl methanoate, methyl acetate หรือ methyl ethanoate, ethyl propionate หรือ ethyl propanoate เป็นต้น

2.1.1 สมบัติของเอสเทอร์

2.1.1.1 เอสเทอร์กับกรดคาร์บอกซิลิกเป็นไอโซเมอร์โครงสร้างกัน โดยเอสเทอร์จะมีจุดเดือดต่ำกว่ากรดคาร์บอกซิลิก เนื่องจากเอสเทอร์ไม่มีพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจึงน้อยกว่ากรดคาร์บอกซิลิก

2.1.1.2 เมื่อมีจำนวนอะตอมคาร์บอนเพิ่มขึ้น เอสเทอร์จะมีจุดเดือดสูงขึ้น

2.1.1.3 เอสเทอร์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะละลายน้ำได้ แต่ความสามารถในการละลายได้จะลดลงเมื่อจำนวนอะตอมเพิ่มขึ้น

2.1.2 ปฏิกิริยาการเตรียมเอสเทอร์

2.1.2.1 จากปฏิกิริยาของ carboxylic acid กับ alcohol โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.2.2 จากปฏิกิริยาของ acid chloride หรือ acid anhydride กับ alcohol

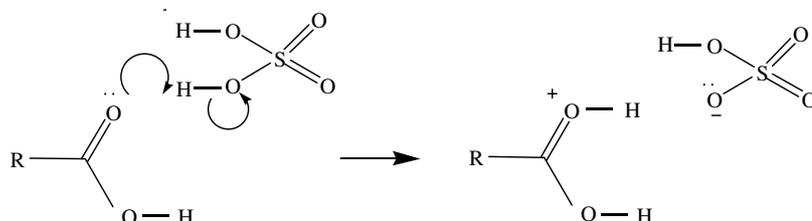
2.1.2.3 จากปฏิกิริยา transesterification ของ ester กับ alcohol

2.1.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นสารตัวเร่ง (Wilhelm *et al.*, 2005)

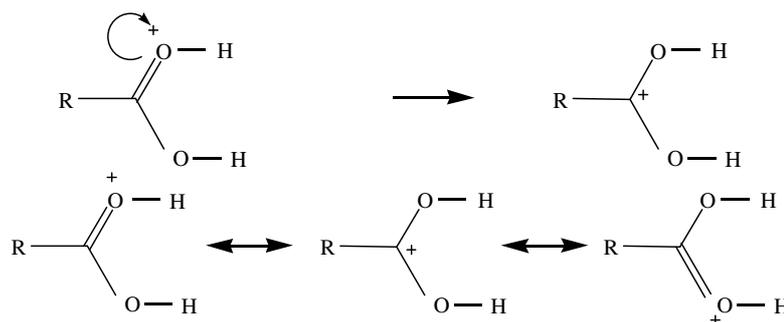
การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยการใช้กรดเป็นสารตัวเร่งแสดงขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1

ในขั้นตอนที่ 1 หมู่คาร์บอกซิลิกจะดึงโปรตอน (H^+) จากกรดซัลฟูริก เกิดพันธะกับออกซิเจนที่สร้างพันธะคู่กับอะตอมของคาร์บอน

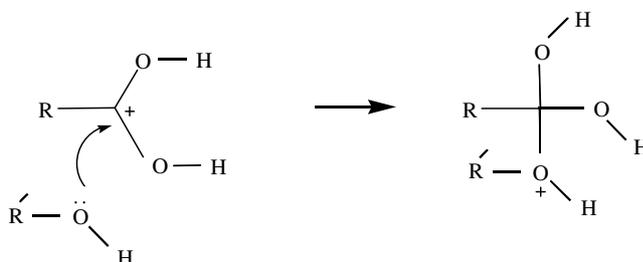


ต่อมาเกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับคาร์บอนไปยังอะตอมของออกซิเจน เกิดเป็นประจุบวกตรงตำแหน่งของคาร์บอน อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนย้ายจากอะตอมของออกซิเจนอีกอะตอมหนึ่งได้ด้วยทำให้เกิดประจุบวกที่อะตอมของออกซิเจน หรือเกิดเรโซแนนซ์ได้นั่นเอง



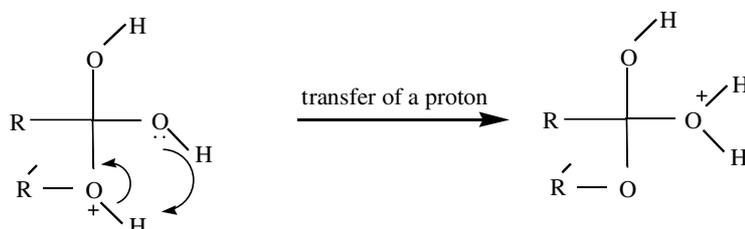
ขั้นตอนที่ 2

ในขั้นตอนที่ 2 ประจุบวกบนอะตอมของคาร์บอนจะถูกเข้าทำปฏิกิริยาโดยอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนอะตอมของออกซิเจนของหมู่แอลกอฮอล์



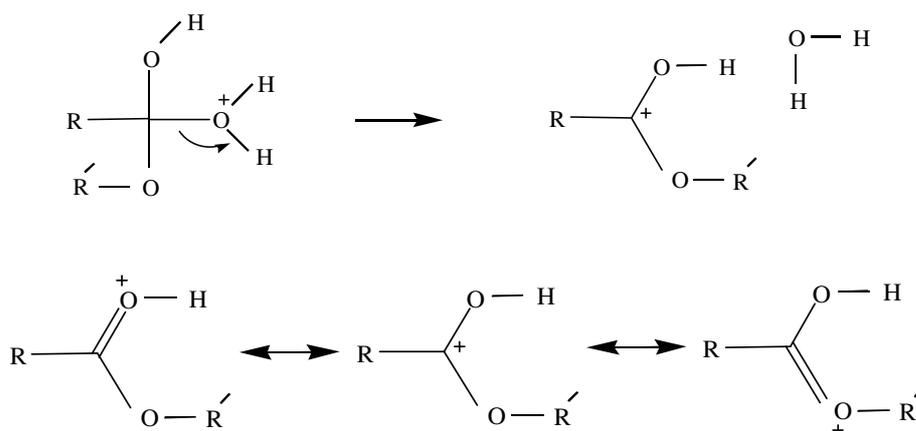
ขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนนี้โปรตอนบนออกซิเจนอะตอมจะเคลื่อนย้ายไปยังออกซิเจนอีกอะตอมหนึ่ง ซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเหลืออยู่



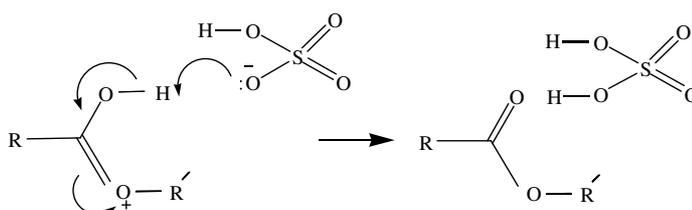
ขั้นตอนที่ 4

โมเลกุลของน้ำแยกตัวออกมาจากไอออน และอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนย้ายจากพันธะระหว่างออกซิเจนกับคาร์บอนไปยังอะตอมของออกซิเจน หรือสามารถเกิดเรโซแนนซ์ได้เหมือนในขั้นตอนที่ 1



ขั้นตอนที่ 5

ในขั้นตอนสุดท้ายไฮโดรเจนจะถูกเคลื่อนย้ายออกจากออกซิเจน โดยทำปฏิกิริยากับไอออนของไฮโดรเจนซัลเฟต ทำให้เกิดหมู่ของเอสเทอร์และกรดซัลฟิวริกขึ้น จากนั้นกรดซัลฟิวริกจะกลับมาเป็นสารตัวเร่งอีกครั้ง



2.1.4 วิธีการเตรียมเอสเทอร์

เอสเทอร์พบมากในธรรมชาติจากสัตว์และพืช เช่น น้ำมันพืช กลิ่นหอมจากดอกไม้ และกลิ่นที่สังเคราะห์ขึ้น จึงนิยมใช้สารแต่งกลิ่นอาหาร ทำน้ำหอม เป็นตัวทำละลาย เช่น น้ำมันขัดเงา น้ำยาล้างเล็บ บางชนิดเป็นยาบรรเทาอาการปวดเมื่อย เช่น น้ำมันระกำ ยาที่ใช้ระงับปวด เช่น แอสไพรินและยังใช้เอสเทอร์ในอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยสังเคราะห์ด้วย

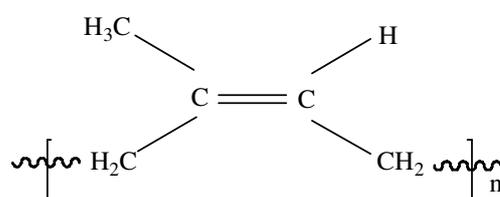
การเตรียมเอสเทอร์จากปฏิกิริยา esterification ของแอลกอฮอล์สายโซ่ยาว (long chain fatty alcohol) กับกรดอะโรมาติก (aromatic acid) ยังไม่มีการศึกษาโดยตรง เนื่องจากแอลกอฮอล์สายโซ่ยาวมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยและกรดอะโรมาติกที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxyl group) ต่อกับวงอะโรมาติกก็มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาน้อยเช่นกัน (Lu *et al.*, 2007) การศึกษาการเตรียมเอสเทอร์โดยใช้ไอโอดีน (I_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า แอลกอฮอล์สายโซ่ยาวทำปฏิกิริยากับกรดคลอไรด์ (acid chloride) ให้ผลดี แต่ถ้าให้ทำปฏิกิริยากับกรดอะโรมาติกจะไม่เกิดปฏิกิริยาเลย ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันทั่วไปคือกรด เช่น H_2SO_4 และเบส เช่น KOH, NaOH (Yuan *et al.*, 2008) และพบว่าการใช้ zinc hydroxide nitrate เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา transesterification ระหว่างเมทานอลกับกรดไขมันอิสระและน้ำมันพืช ให้ผลผลิตสูงถึง 95% (Cordeiro *et al.*, 2008 ; Ye *et al.*, 2008) นอกจากนี้ได้มีการศึกษา phosphomolybdic acid เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในแง่ของจลนศาสตร์ในปฏิกิริยาของ ethyl acetate (Wang *et al.*, 2007) และมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา กลุ่ม solid non-acidic ชนิด ferric chloride, stannous oxalate และ cupric sulfate ในการเตรียมเอสเทอร์จากกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่ยาว ส่วนสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้เป็นกลุ่ม Lewis acid ในปฏิกิริยาการเตรียมเอสเทอร์ เช่น tin chloride และ cobalt chloride (Erdem-Senatarlar *et al.*, 1994), titanium chloride (Shang *et al.*, 2007), ferric chloride และ xylene (Guo, 2006) ส่วนสารตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่นๆ ที่มีการนำมาใช้ เช่น graphite (Pang *et al.*, 2008), kaolinite (Konwar *et al.*, 2008), ionic catalyst (Li *et al.*, 2008), ionic liquid (Fang *et al.*, 2008) การเตรียมเอสเทอร์ระหว่าง triethylene glycol (TEG) กับ methacrylic acid (MAA) โดยใช้สารตัวเร่งในสถานะของแข็งหลายชนิด เพื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเร่งที่ใช้กันทั่วไป พบว่า phosphotungstic acid ที่ใช้เป็นสารตัวเร่งให้ผลดีกว่าสารตัวเร่งที่ใช้กันทั่วไป เนื่องจากความเป็นกรดของสารตัวเร่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา esterification ของ triethylene glycol (TEG) กับ methacrylic acid (MAA) ได้ดีขึ้น และสามารถขจัดตัวยับยั้งปฏิกิริยาได้ทั่วถึง เมื่อเทียบกับวิธีทั่วไปที่ซับซ้อนมากกว่า (Shanmugam *et al.*, 2004) นอกจากนี้การใช้ para-toluene sulfonic acid (*p*-TSA) เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา esterification ระหว่าง oleic acid และ 2-ethylhexanol พบว่าการใช้ 1% *p*-TSA (ของแข็ง) จะให้ esters ถึง 93% (Lacaze-Dufaure and Mouloungui, 2000) จะเห็นได้ว่าการเตรียมเอสเทอร์ที่มีการใช้ตัวเร่งที่หลากหลาย ซึ่ง

มีทั้งสถานะที่สารตัวเร่งละลายเป็นเนื้อเดียวกันและสถานะต่างกัน อย่างไรก็ตามสารตัวเร่งพื้นฐาน เช่น กรดซัลฟิวริก ก็ยังเป็นที่ยอมรับใช้กันโดยทั่วไป

2.2 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

2.2.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ (บุญธรรม, 2534)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (*cis*-1,4-polyisoprene) นั่นคือ โมเลกุลยางธรรมชาติ 1 โมเลกุล จะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาว ซึ่งยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นโปรตีน ไขมันและเกลืออนินทรีย์อื่นๆ ยางธรรมชาติประกอบด้วยโมเลกุลที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 50,000 ถึง 3,000,000 และประมาณร้อยละ 60 ของโมเลกุลเหล่านี้มีน้ำหนัก 1,300,000 (ชัยวัฒน์, 2526) โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นไอโซเมอร์ชนิด *cis*-isomer มากกว่า 99.99% (Hofmann, 1989) และมี *trans*-isomer ปริมาณน้อยมาก ดังนั้นจึงมักเรียกกยางธรรมชาติว่า *cis*-1,4-polyisoprene ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ (ชัยวัฒน์, 2526)

ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่อุณหภูมิ 20 °C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72 °C แสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า -72 °C สมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นเป็นของแข็งเปราะคล้ายแก้ว

โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยางธรรมชาติ คือ

ก. การมีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติ ไมทนน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

ข. มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ดี แต่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนได้ง่าย จึงเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยางธรรมชาติ

ค. มีสายโซ่โมเลกุลที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาและยืดหยุ่นได้ ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่น (elasticity) ได้ดี และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้

ง. มีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอทำให้ยางธรรมชาติตกผลึกได้เมื่อยืด จึงมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง และทำให้มีค่าความแข็งแรงขณะไม่วัลคาไนซ์ (green strength) สูงและความเหนียวติดกัน (tack) ดี

จ. มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางมีความหนืดสูงเกินไปที่จะนำมาแปรรูปโดยตรง จึงต้องนำยางไปบดเพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลก่อนการแปรรูป

2.2.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

สมบัติของยางตามที่คนส่วนใหญ่เข้าใจนั้นจะเป็นสมบัติของยางคงรูป (vulcanized rubber) เท่านั้น เพราะยางดิบมีข้อจำกัดในการใช้งานต่างๆ มากมาย เช่น มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี และสมบัติเชิงกลเหล่านี้ก็เปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ยางดิบยังมีความทนทานต่อสารเคมีและสารละลายต่างๆ ต่ำ อีกทั้งยังไม่สามารถคงรูปได้หลังจากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

2.2.2.1 ความแข็ง (Hardness)

ยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ให้มีความแข็งต่างๆ กันได้มาก ตั้งแต่นุ่มมาก (ความแข็ง 30-50 IRHD) ไปจนถึงความแข็งสูงมาก คือ ยางอิโบนต์ (มากกว่า 98 IRHD) การปรับความแข็งของยางทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติมหรือโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของกำมะถัน

2.2.2.2 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)

โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง ทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อดึง (strain induced crystallization) ดังนั้นจึงทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงและมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ยางธรรมชาติแม้ไม่มีสารตัวเติมยังมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงถึงประมาณ 30 MPa ซึ่งสมบัตินี้ทำให้ยางธรรมชาติมีความเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความบาง นิ่ม และแข็งแรงได้ เช่น การทำถุงมือผ่าตัด ลูกโป่ง ลูกยางอนามัย สายยางยืด และยางรัดของ เป็นต้น

เนื่องจากยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงในตัวเองสูง จึงทำให้สามารถใช้สารตัวเติมราคาถูก เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น ในกรณีผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความต้านทานต่อแรงดึงเป็นสมบัติหลัก เช่น ยางรองพื้นรถ ยางปูพื้น และยางรองขาเก้าอี้ เป็นต้น ซึ่งจากการที่ยางธรรมชาติสามารถใช้สารตัวเติมราคาถูกได้ ทำให้ยางธรรมชาติได้เปรียบกว่ายางชนิดอื่นๆ ในด้านต้นทุนการผลิต การใช้สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพที่มีราคาแพง คือ เชม์ดำ และซิลิกา จะใช้ต่อเมื่อต้องการความต้านทานต่อแรงดึงสูงเท่านั้น เช่น ดอกยางรถยนต์ พื้นและเส้นรองเท้าคุณภาพสูง ยางหุ้มสายพานลำเลียง เป็นต้น

2.2.2.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength)

ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้นไปอีก

2.2.2.4 ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at Break)

ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติมจะสามารถยืดได้ถึงปริมาณ 1000% ความสามารถในการยืด ของยางธรรมชาติจะลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของสารตัวเติม และตามปริมาณของพันธะเชื่อมโยง (crosslink density) การมีสมบัติด้านการยืดสูงทำให้สามารถใช้ยางธรรมชาติ ในการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดสูง เช่น เส้นยางยืด ยางรัดของและลูกโป่ง เป็นต้น

2.2.2.5 ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Flexibility)

ความสามารถในการหักงอไปมาได้ของยาง แม้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, Tg) มีค่าประมาณ -72°C ดังนั้นจึงรักษาความเป็นยางไว้ได้ แม้อุณหภูมิต่ำและมีสมบัติในด้านนี้ เหนือกว่ายางชนิดอื่นๆ ยกเว้นยางบิวทาไดอีน และยางซิลิโคน อย่างไรก็ตามการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจะใช้ได้ในช่วงสั้นๆ แต่ถ้าเป็นเวลานาน เช่น มากกว่า 1-2 วัน โมเลกุลของยางจะเรียงตัวกันเกิดผลึกขึ้น โดยอัตราการตกผลึกที่ค่าสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำ -26°C (พรพรรณ, 2540) การผสมน้ำมันในยางจะทำให้สามารถใช้งานยางได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม

2.2.2.6 ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and Chemical Resistance)

เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซิน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลง ถ้ายางเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านั้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามการบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือ แอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

2.2.2.7 ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging Resistance)

โมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผลิต ผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antioxidants) และไข (wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

2.3 น้ำมันจากปิโตรเลียม

ในการผลิต ผลิตภัณฑ์ยางมักมีความจำเป็นต้องใช้น้ำมันเป็นส่วนผสมในสูตรยางชนิดต่างๆ ที่เห็นได้ชัดคือการใช้น้ำมันก็เพื่อช่วยปรับลดความหนืดของยางคอมพาวนด์ในกระบวนการผสม ทำให้สามารถแปรรูปยางได้ง่ายขึ้น ผสมสารตัวเติมเข้าไปในยางได้เร็วขึ้น สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น และยังสามารถช่วยให้เติมสารตัวเติมเข้าไปในยางได้ในปริมาณที่มากขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติบางประการที่ดีขึ้น เช่น ความสามารถในการยืดจนขาด นอกจากนี้อีกจุดประสงค์หนึ่งของการใช้น้ำมันในยาง คือ ใช้เพื่อทำให้ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ลดลง ซึ่งการใช้น้ำมันในกรณีหลังนี้จำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำมันมากกว่าในกรณีแรก

น้ำมันที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน ได้แก่ น้ำมันแร่ (mineral oils) หรือ น้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม เนื่องจากมีราคาถูก สามารถเข้ากับยางได้หลายชนิด โดยทั่วไปน้ำมันแร่แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ (พรพรรณ, 2528)

ก. น้ำมันพาราฟินิก (paraffinic oil) คือ น้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbons) หรือไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวชนิดอิ่มตัว ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทั่วไป C_nH_{2n+2} และมีส่วนประกอบที่เป็นอะโรมาติกน้อยกว่าร้อยละ 30

ข. น้ำมันแนฟทีนิก (naphthenic oil) คือ น้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน (alicyclic hydrocarbons) มีโครงสร้างเป็นแบบวงแหวนชนิดอิ่มตัวที่มีเฉพาะพันธะเดี่ยว มีสูตรโครงสร้างทั่วไป C_nH_{2n} และมีส่วนประกอบที่เป็นอะโรมาติกอยู่ร้อยละ 30-60

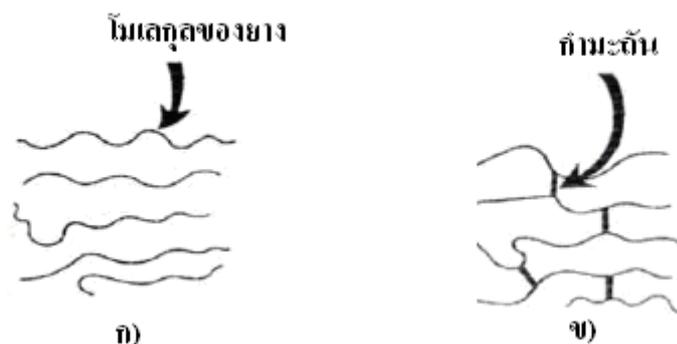
ค. น้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) คือ น้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเบนซีน (benzene ring) ตั้งแต่ 2 วงขึ้นไปอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทั่วไป C_nH_n และมีส่วนประกอบที่เป็นอะโรมาติก อยู่เกินร้อยละ 60

2.4 การวัลคาไนซ์ (Vulcanization)

การวัลคาไนซ์ คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงที่อยู่สภาพไม่คงตัวให้เป็นอย่างที่รักษา รูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งกระด้างในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น โดยใช้สารวัลคาไนซ์ (vulcanization agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลที่เรียกว่าเกิด crosslink ตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา การวัลคาไนซ์ยังธรรมชาติโดยทั่วไปจะนิยมใช้กำมะถัน สารที่ให้กำมะถัน (sulfur donor) และเปอร์ออกไซด์ ร่วมกับการใช้สารเคมีชนิดอื่นๆ เช่น สารตัวเร่ง สารกระตุ้น เป็นต้น (พรพรรณ, 2528)

2.4.1 การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

เมื่อนำกำมะถันใส่รวมในยางแล้วนำยางนั้นมาให้ความร้อนจะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้นซึ่งจะทำให้ยางมีสมบัติที่ดีขึ้น คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะไม่เกิดการอ่อนตัว เมื่ออุณหภูมิต่ำลง จะไม่เกิดการแข็งเปราะ ไม่มีกลิ่น และไม่เกิดการเหนียวที่ผิวของยาง เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะกำมะถันทำให้โมเลกุลเกิดการเชื่อมต่อกัน (crosslink) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิด crosslink ของยางธรรมชาติเมื่อวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

ก) ลักษณะโมเลกุลยางก่อนการวัลคาไนซ์ ข) ลักษณะโมเลกุลยางหลังวัลคาไนซ์

ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของกำมะถันและสารตัวเร่ง โดยมีการจำแนกดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกระบบที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (พรพรรณ, 2528)

Vulcanization system	Sulphur (phr)	Accelerator (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

ก. การวัลคาไนซ์ในระบบปกติ (Conventional Vulcanization System, CV)

การวัลคาไนซ์ในระบบปกติ เป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุดในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันทั้งสามระบบ โดยปกติจะใช้กำมะถัน 2.5 ส่วน สารตัวเร่ง 0.5 ส่วน ต่ออย่าง 100 ส่วน ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน โดยพบว่าในหนึ่งพันธะของการเชื่อมโยงจะใช้กำมะถัน 1-6 ตัว ซึ่งเรียกการเชื่อมโยงแบบนี้ว่า polysulphidic linkage (พรพรรณ, 2528)

จากชนิดการเชื่อมโยงที่เป็น polysulphidic linkage โดยส่วนใหญ่ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีกว่า เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการล้า นอกจากนี้ยังมีสมบัติด้านการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก แต่ไม่ต้านทานต่อการ reversion เช่น สมบัติตกเมื่ออบยางสุกเกินไป และเกิดการเสื่อมเนื่องจากการถูกออกซิไดซ์

ข. การวัลคาไนซ์ในระบบอีวี (Efficiently Vulcanization System, EV)

การวัลคาไนซ์ในระบบอีวีเป็นการปรับปรุงกระบวนการวัลคาไนซ์ให้มีการใช้กำมะถันให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเพิ่มสัดส่วนของสารตัวเร่งต่อกำมะถันให้สูงขึ้น ซึ่งผลของการปรับปรุงนี้ทำให้การเชื่อมโยงส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 90 เป็น monosulphidic linkage อย่างไรก็ตามชนิดของสารตัวเร่งและสารกระตุ้นก็มีผลมากต่อการเปลี่ยนแปลงของชนิดของพันธะเชื่อมโยง โดยจำเป็นต้องเลือกสารตัวเร่งและสารกระตุ้นที่ทำให้เกิด intermediate ที่สามารถละลายในยางที่กำลังวัลคาไนซ์ นอกจากนั้นเวลาในการวัลคาไนซ์ต้องมากพอที่จะทำให้ polysulphidic linkage ที่เกิดขึ้นในขั้นแรกเปลี่ยนไปเป็น monosulphidic linkage (พรพรรณ, 2528) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวีส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีกว่าการใช้ระบบกำมะถันปกติ แต่จะให้สมบัติการต้านทานต่อการ reversion การทนทานความร้อน การต้านความเสื่อมเนื่องจากการถูกออกซิไดซ์ และมีสมบัติการจัดตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่ดีขึ้น

ค. การวัลคาไนซ์ในระบบเซมิอีวี (Semi-Efficiently Vulcanization System, Semi-EV)

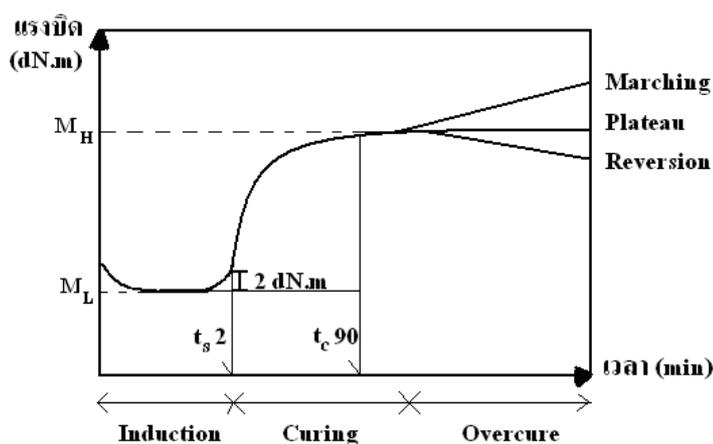
การวัลคาไนซ์ในระบบเซมิอีวีเป็นระบบที่มีการใช้ปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่งอยู่กึ่งกลางระหว่างการใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบปกติกับการใช้กำมะถันระบบอีวี ทำให้ได้ยางที่มีสมบัติเชิงกลและความต้านทานการเสื่อมอยู่ระหว่างทั้งสองระบบนี้

2.4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง

เมื่อนำยางที่ผสมสารวัลคาไนซ์แล้วมาให้ความร้อน สารวัลคาไนซ์ที่อยู่ในยางก็จะเริ่มเกิดปฏิกิริยา เช่น อาจเกิดการแตกตัว หรือเกิดปฏิกิริยากันเองในตอนเริ่มต้นของปฏิกิริยา การใช้เวลาช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสารเคมีที่ใช้ในการผสม โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระยะเวลาดังกล่าวก็จะลดลง ระยะเวลาในช่วงนี้จะเป็นช่วงเริ่มต้นก่อนที่สารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยาง เรียกว่า induction time หลังจากนั้นสารเคมีก็จะเริ่มทำปฏิกิริยากับยาง

ก่อให้เกิดการเชื่อมโอยงที่โมเลกุลของยางทำให้ยางมีมอดูลัสสูงขึ้นและมีความแข็งแรงมากขึ้น ระยะเวลาที่ยางเกิดการแข็งตัวจนเห็นได้ชัด เรียกว่า ระยะเวลาสกอร์ช (scorch time) เมื่อยางเกิดการสกอร์ชแล้วยางจะแปรรูปได้ยาก การเริ่มสกอร์ช นี้ เรียกว่า การเริ่มการสุกของยาง

เมื่อสารเคมีทำปฏิกิริยากับยางต่อไป ยางเริ่มแข็งขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางจนหมด ยางก็จะแข็งที่สุด ระยะเวลาที่ใช้เพื่อให้ยางทำปฏิกิริยากับสารเคมีจนหมด เรียกว่า 100% vulcanization time หรือ 100% cure time แต่ในการปฏิบัติจริงนั้นพบว่า 100% cure time ใช้เวลามากเกินไป และอาจทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ของยางทางด้านอื่นด้อยลง ดังนั้น การวัลคาไนซ์ยางมักจะใช้เวลาที่ยางมีมอดูลัสเพียง 90% หรือ 95% ของมอดูลัสสูงสุด ระยะเวลาดังกล่าวถือเป็น 90% cure time หรือ 95% cure time ตามลำดับ ระยะเวลาดังกล่าวอาจถือว่าเป็น optimum cure ก็ได้ ถ้าเวลาการวัลคาไนซ์ของยางไม่ถึงระดับระยะเวลาของ optimum cure เรียกว่า เกิด under cure (หรือยางไม่สุก) จะได้ยางที่มีสมบัติที่ไม่ดีเต็มที่ ถ้ายางไม่สุกมากๆ ยางจะรักษารูปทรงไม่ได้ เมื่อเอาเล็บจิก หรือยึดออกแล้วชิ้นจะตกลงไป เมื่อปล่อยยางกลับก็จะยังเห็นรอยนั้น ถ้าหากปล่อยให้ยางได้รับความร้อนต่อไปหลังจากที่ผ่าน 100% cure แล้ว นั้นหมายถึง ยางเกิดการ over cure (ยางสุกเกินไป) โมเลกุลของยางจะเกิดการสลายตัว ทำให้ยางนิ่มลง (ถ้าเป็นยางธรรมชาติ) เรียกว่า เกิดการ reversion หรือว่ายางอาจจะแข็งขึ้นอีก (เช่น ยาง SBR เป็นต้น) เรียกว่า เกิดการ marching modulus ยางบางชนิดเกิดการ reversion ได้ง่าย เรียกว่ายางนั้นมีสมบัติเป็น peaky cure แต่ถ้ายางใดที่สามารถรักษามอดูลัสให้คงที่ได้ยาวนานถึงแม้ว่าจะเกิน 100% cure แล้ว จะเรียก



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางเมื่อได้รับความร้อน (บุญธรรมและปรีชา, 2534)

เริ่มต้น ----> Induction time ----> Scorch time ----> Under cure ----> Optimum cure ----> 100% Cure ----> Over cure ----> Reversion หรือ Marching หรือ Plateau cure

ยางนั้นว่าเป็นยางที่มีสมบัติ flat cure หรือ plateau cure ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนกับยางก็จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นลำดับขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางเมื่อได้รับความร้อน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ คือ

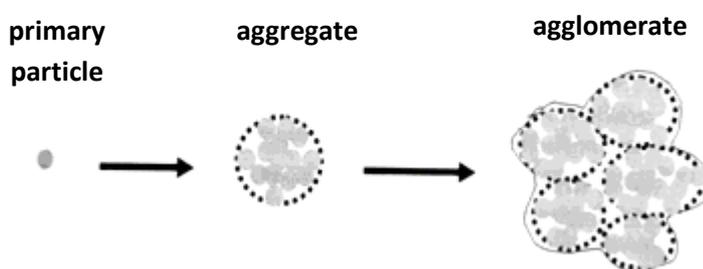
ก. ช่วงเริ่มต้น (Induction time) : เมื่อตัวอย่างได้รับความร้อน ยางก็จะอ่อนลงทำให้แรงบิดลดลงในระยะแรกๆ ของการทดสอบ จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ความหนืดของยางก็จะมีค่าต่ำสุดและจะมีค่าคงที่อยู่นาน จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดการคงรูป ค่าความหนืดต่ำสุดนี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความหนืดของยางที่ยังไม่คงรูป (ความสามารถในการไหลของยางคอมพาวนด์) และใช้สัญลักษณ์ว่า M_L

ข. ช่วงการคงรูป (Curing) : หลังจากที่ยางมีค่าความหนืดต่ำสุด ความหนืดของยางก็จะเริ่มสูงขึ้นเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเริ่มเกิดการคงรูป (แรงบิดจึงเริ่มสูงขึ้นตามเวลา) ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มบิดตาย (Die) จนถึงเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปเรียกว่า ระยะเวลาสกอร์ช (scorch time) และใช้สัญลักษณ์เป็น t_s ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งของโรเตอร์เท่ากับ 1° ค่าระยะเวลาสกอร์ชคือ ระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด (M_L) 1 dN.m ใช้สัญลักษณ์ว่า t_{s1} แต่ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ 3° ค่าระยะเวลาสกอร์ช คือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 2 dN.m และใช้สัญลักษณ์ว่า t_{s2} เนื่องจากระยะเวลาสกอร์ชเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้นๆ ดังนั้น ระยะเวลาสกอร์ชจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิต เมื่อการทดสอบดำเนินต่อไป ค่าแรงบิดจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระดับของการคงรูปจนกระทั่งถึงจุดที่มีการคงรูปเกิดขึ้นสมบูรณ์ แรงบิด ณ จุดนี้มีค่าสูงที่สุดและใช้สัญลักษณ์ว่า M_H ซึ่งค่าแรงบิดที่สูงที่สุดนี้จะเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความแข็งแรงหรือค่าโมดูลัสเฉือนของยางคงรูป ณ อุณหภูมิของการทดสอบ ตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของการคงรูปยางคือ ระยะเวลาของการคงรูป (curing time) ใช้สัญลักษณ์เป็น $t_{c,x}$ เมื่อ x คือร้อยละการเพิ่มขึ้นของแรงบิดจากจุดต่ำสุด (M_L) เช่น $t_{c,90}$ ก็หมายถึงระยะเวลาที่ทำให้ยางคงรูปไปร้อยละ 90 หรือระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับค่าแรงบิดต่ำสุดบวกด้วย 90% ของผลต่างระหว่างค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ $t_{c,90}$ เท่ากับ ระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับ $M_L + (90(M_H - M_L)/100)$ โดยทั่วไปค่า $t_{c,90}$ จัดเป็นค่า ระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสม (optimum curing time) ทางเทคนิคของยางคอมพาวนด์ เพราะการคงรูป ณ จุดนี้จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี นอกจากตัวแปรต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถใช้แสดงลักษณะการคงรูปของยางนั้นคือดัชนีอัตราการคงรูป (cure rate index, CRI) ซึ่งแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่สามารถคำนวณได้จากสมการ CRI เท่ากับ $100/(\text{ระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม} - \text{ระยะเวลาสกอร์ช})$

ค. ช่วงของการคงรูปที่มากเกินไป (Over cure) : เมื่อปฏิกิริยาการคงรูปเกิดได้สมบูรณ์แล้ว แต่ยังคงดำเนินการทดสอบต่อไป ความร้อนของยางที่ได้รับจะทำให้เกิดปฏิกิริยา 2 ปฏิกิริยาในเวลาเดียวกันคือปฏิกิริยาการคงรูป (ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โพลีเมอร์) และปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน (ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่โพลีเมอร์) หาก 2 ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดได้ในอัตราเร็วที่ใกล้เคียงกัน แรงบิดก็จะคงที่ตามเวลา เรียกว่าเกิด flat cure แต่ถ้าปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นได้มากกว่าปฏิกิริยาการคงรูป แรงบิดก็จะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา เรียกว่าเกิด reversion

2.5 การใช้สารตัวเติมในยาง

เนื่องจากสารตัวเติมเสริมแรงชอบรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า แอกลอมเมอเรต (agglomerate) ยังประกอบไปด้วยกลุ่มก้อนขนาดเล็กหลายๆ ก้อนมาเกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ ด้วย แรงแวนเดอวาลส์ (Van de Waals force) หรือพันธะไฮโดรเจน (H-bond) เรียกกลุ่มก้อนขนาดเล็กเหล่านี้ว่า แอกก리게ต (aggregate) โดยที่แอกก리게ต 1 ก้อนจะเกิดจากอนุภาคปฐุมภูมิหลายๆ อนุภาคมาอยู่รวมกันด้วยพันธะทางเคมีที่แข็งแรงหรือเกิดการหลอมรวมกันที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคปฐุมภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.4



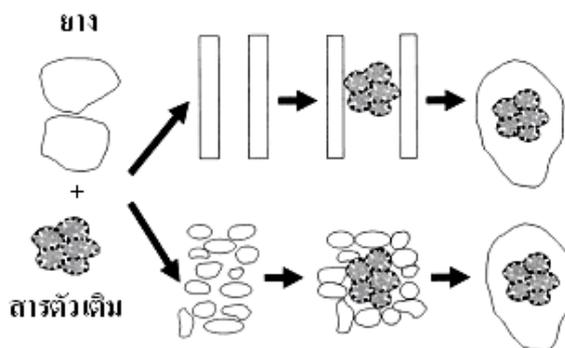
รูปที่ 2.4 แบบจำลองลักษณะของสารตัวเติมเสริมแรง (พงษ์ธรและชาคริต, 2550)

กลไกของการผสมยางกับสารตัวเติมเสริมแรงจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่

ก. การเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติม (Incorporation หรือ Wetting)

หลังจากที่ยางถูกบดขยี้ด้วยกระบวนการมาสติเคชัน (mastication) จนมีค่าความหนืดต่ำเพียงพอที่จะรับสารตัวเติมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเติมสารตัวเติมลงไป โดยที่สารตัวเติมที่เติมลงไปนี้จะเข้าไปรวมกับเนื้อยางโดยผ่านกลไก 2 แบบดังแสดงในรูปที่ 2.5 กล่าวคือ ในกลไกแรกยางที่ได้รับแรงเฉือนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงเฉือน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางดังกล่าวจะทำให้ยางมีพื้นที่ที่จะสัมผัสกับสารตัวเติมสูงขึ้นและแรงเฉือนที่มากกระทำกับยางหมดไป ยางก็จะคลายตัวกลับคืนสู่สภาพที่ไม่มี

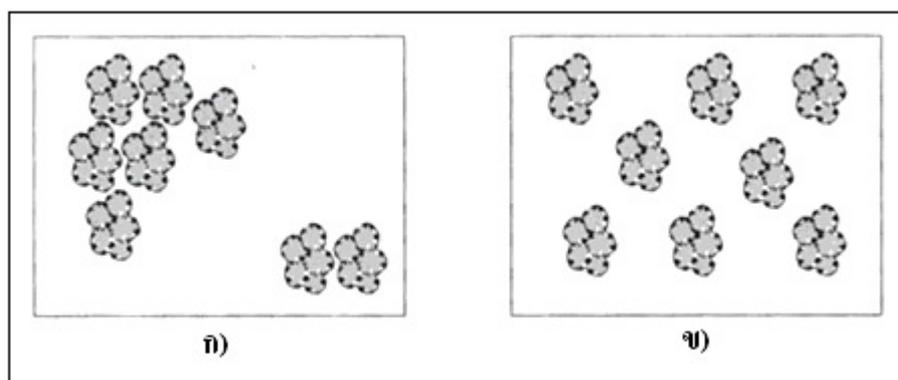
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโอบล้อมเอาสารตัวเต็มไว้ภายในยาง ส่วนในกลไกที่สอง ยางขึ้นขนาดใหญ่ที่ได้รับความร้อนสูงๆ จะเกิดการฉีกขาดได้เป็นยางชั้นที่มีขนาดเล็กลง จากนั้นยางชั้นเล็กๆ เหล่านี้ก็จะเข้าไปโอบล้อมเอาสารตัวเต็มไว้ภายในยางเช่นกัน กลไกแบบแรกเป็นกลไกในระดับมหภาคจึงสามารถสังเกตเห็นได้โดยง่าย แต่กลไกแบบหลังเป็นกลไกระดับจุลภาคจึงไม่สามารถสังเกตเห็นได้



รูปที่ 2.5 กลไกการเข้าไปรวมกันระหว่างยางและสารตัวเต็ม (พงษ์ธรและชาคริต, 2550)

ข. การกระจายตัวของสารตัวเต็มในยาง (Distribution)

หลังจากที่สารตัวเต็มเข้าร่วมกันกับยางเรียบร้อยแล้ว แรงเหนียวที่เกิดขึ้นจะทำให้สารตัวเต็มที่ถูกโอบล้อมโดยสารตัวเต็มจะเริ่มเกิดการกระจายตัวในเนื้อยาง กระบวนการกระจายตัวนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการผสม ในกรณีที่กระบวนการกระจายตัวเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ยางคอมพาวนด์ที่ได้จะมีสมบัติไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจะส่งผล

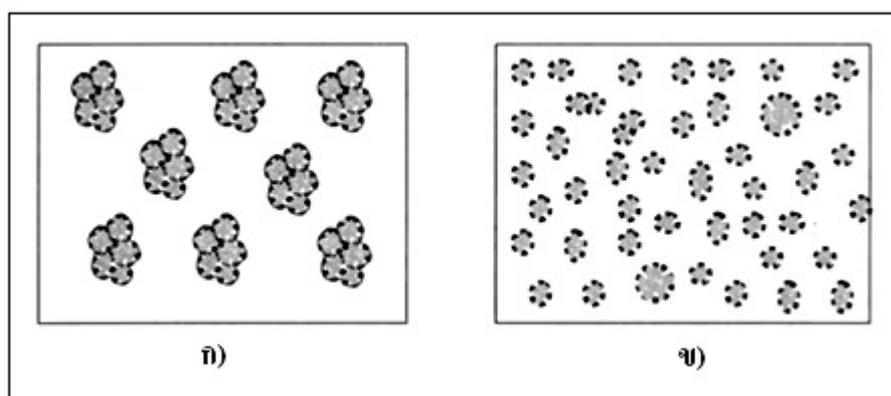


รูปที่ 2.6 แบบจำลองแสดงลักษณะการผสม (ก) การกระจายตัวที่ไม่ดีของสารตัวเต็ม (ข) การกระจายตัวที่ดีของสารตัวเต็ม (พงษ์ธรและชาคริต, 2550)

ต่อเนื่องทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพไม่คงที่ ประสิทธิภาพในการกระจายตัวของสารตัวเติมจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลของยางในห้องผสม โดยทั่วไปยางที่มีความหนืดต่ำจะมีความสามารถในการไหลที่ดีจึงทำให้การกระจายตัวเกิดขึ้นได้โดยง่าย

ค. การแตกตัวของสารตัวเติม (Dispersion)

การแตกตัวของสารตัวเติมเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากในการผสมสารตัวเติมให้เข้ากับยาง เพราะการแตกตัวที่ดีจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูง กระบวนการแตกตัวคือกระบวนการที่ทำให้สารตัวเติมซึ่งอยู่ในรูปของแอกโกลเมอร์ขนาดใหญ่ซึ่งถูกโอบล้อมด้วยยางแตกตัวออกเป็นแอกโกลเมอร์ที่มีขนาดเล็กลงด้วยแรงเฉือนที่เกิดจากเครื่องผสม จากนั้นแอกโกลเมอร์ขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ก็จะกระจายตัวในเนื้อยางต่อไป เมื่อการผสมดำเนินต่อไป แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำให้แอกโกลเมอร์ขนาดเล็กเหล่านี้แตกตัวต่อไปจนสุดท้ายได้เป็นแอกกรีเกตซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของสารตัวเติมที่ได้จากการผสม ในขั้นนี้จะถือว่าการผสมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ การทำให้สารตัวเติมแตกตัวเป็นหน่วยที่เล็กลง มีความสำคัญมากต่อสมบัติของยางคอมพาวนด์ เพราะถ้าหากกระบวนการแตกตัวเกิดขึ้นได้ไม่ดี (อาจเนื่องจากสภาวะการผสมไม่ดีพอ เช่น ใช้ระยะเวลาในการผสมน้อยเกินไปหรือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเครื่องผสมมีค่าต่ำเกินไป) ยางคอมพาวนด์ที่ได้ก็就会有ความหนืดสูง ส่งผลทำให้กระบวนการขึ้นรูปเป็นไปด้วยความยากลำบาก และต้องสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการผลิตสูง นอกจากนี้การแตกตัวที่ไม่ดีของสารตัวเติมยังส่งผลทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่ำ โดยเฉพาะค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความทนทานต่อการขัดถู เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แบบจำลองแสดงลักษณะการผสม

(ก) ยางที่มีการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีแต่สารตัวเติมไม่เกิดการแตกตัว

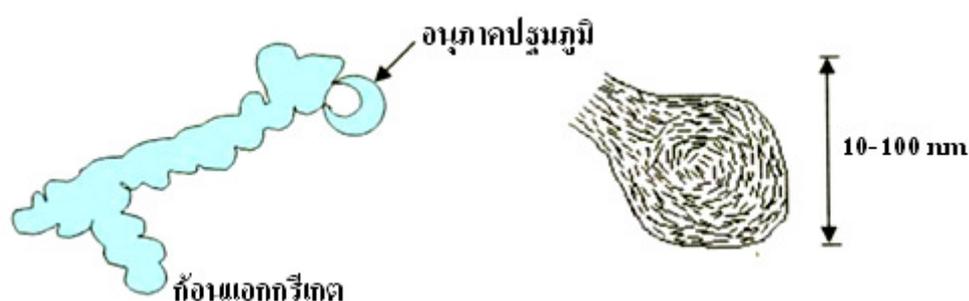
(ข) ยางที่มีการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีและสารตัวเติมเกิดการแตกตัว

(พงษ์ธรและชาคริต, 2550)

ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อการแตกตัวของสารตัวเติมคือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม เพราะการที่จะทำให้สารตัวเติมแตกตัวและการบังคับให้ยางเข้าไปสัมผัสและโอบล้อมสารตัวเติมนั้นจำเป็นต้องอาศัยแรงเฉือนที่สูงมากๆ นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการผสมจะต้องนานเพียงพอที่จะทำให้สารตัวเติมแตกตัวเป็นแอกกรีเกต (หรือแอกโกลเมอเรตที่มีขนาดเล็กมากๆ) และทำให้แอกกรีเกตที่แตกออกมานี้กระจายตัวในยางได้อย่างทั่วถึง อย่างไรก็ตามควรหลีกเลี่ยงการผสมที่นานเกินไป เพราะนอกจากจะทำให้สิ้นเปลืองเวลาและพลังงานไฟฟ้า (รวมถึงต้นทุน) ในการผลิตแล้ว การผสมที่นานเกินไปยังก่อให้เกิดผลเสียต่อสมบัติเชิงกลของยางได้ เพราะยางที่ได้รับแรงเฉือนนานมากๆ จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง นอกจากนี้การผสมยางที่นานเกินไปอาจทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้เนื่องจากยางได้รับอนุมูลอิสระสูงนานเกินไป ซึ่งการกระจายตัวของเขม่าดำขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนแอกโกลเมอเรต และระยะทางระหว่างแอกกรีเกต (Maingam, 1994) การกระจายตัวที่ดีจะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ของยาง ในปี 1997 Ghosh และคณะ ได้ศึกษาการใช้กลุ่มผลิตภัณฑ์จากพืช ซึ่งเป็นสารจำพวก long aliphatic chain substituted phenol กับเขม่าดำ พบว่าสารเหล่านี้สามารถช่วยให้การบดผสมเขม่าดำกับยางธรรมชาติทำได้ง่าย และกระจายตัวดี นอกจากนี้ยังปรับปรุงความต้านทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการหักงอ และความต้านทานต่อการสึกหรอ ส่วนสมบัติด้านอื่นๆ มีผลกระทบเพียงเล็กน้อย (Ghosh *et al.*, 1997) การเพิ่มเวลาการบดผสมก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของเขม่าดำ ซึ่งทำให้การกระเด็นตัวและความร้อนสะสมต่ำลงในยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวตะไดอิน และยางคลอโรพรีน (Maingam, 1994)

2.6 เขม่าดำ (Carbon Black)

ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง องค์ประกอบหลักของผงเขม่าดำคือ ธาตุคาร์บอน อนุภาคของผงเขม่าดำมีโครงสร้างกิ่งแกรไฟต์ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเขม่าดำ (พงษ์ธร, 2548)

นั่นคือ อะตอมของคาร์บอนจะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ขนานกัน บางส่วนก็เกิดการเชื่อมต่อกันเล็กน้อย ทำให้อนุภาคมีโครงสร้างแบบกิ่งแกรไฟต์ เขม่าดำที่ใช้กันในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-100 nm

2.6.1 ชนิดของเขม่าดำ

2.6.1.1 เฟอร์เนชแบล็ก (Furnace Black) เป็นผงเขม่าดำชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ผงเขม่าดำชนิดนี้เตรียมจากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันในเตาเผาที่มีอากาศจำกัด เขม่าดำจะปะปนอยู่กับก๊าซผสมที่ได้ซึ่งสามารถทำให้ตกตะกอน โดยวิธีหมุนเหวี่ยงหรือการตกตะกอนแบบอิเล็กโตรสแตติก (electrostatic precipitation) เขม่าดำชนิดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 140-900 °A มีสมบัติเป็นด่าง มี pH ตั้งแต่ 8.0-10.0 เขม่าดำที่ได้จากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในการผลิตล้อยางรถยนต์ สี พลาสติก หมึกพิมพ์ ฯลฯ

2.6.1.2 เทอร์มอลแบล็ก (Thermal Black) เป็นผงเขม่าดำที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1,300 °C ในภาวะที่ไม่มีอากาศของก๊าซธรรมชาติ ผงเขม่าดำชนิดนี้ ที่พื้นผิวของเขม่าดำจะไม่มีรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำชนิดอื่นๆ ด้วยเหตุนี้เทอร์มอลแบล็กจึงไม่เสริมแรงในยางเพราะทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางคงรูปสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เขม่าดำชนิดนี้จะทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและได้ยารักษารูปทรง ซึ่งจะมีสมบัติการกระด้างกระดอนและสมบัติเชิงพลวัตที่ดีกว่าเฟอร์เนชแบล็ก ซึ่งมีราคาถูกกว่าแทนได้ ส่วนใหญ่จึงนำเขม่าดำชนิดนี้มาใช้เฉพาะในกรณีพิเศษเท่านั้น

2.6.1.3 แชนแนลแบล็ก (Channel Black) โดยเขม่าดำชนิดนี้จะเตรียมได้จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติในบรรยากาศที่มีอากาศจำกัดทำให้เปลวไฟกระทบแผ่นโลหะเย็น ซึ่งแผ่นโลหะจะมีรูปต่างๆ กันอาจเป็นจานลูกกลิ้งตัวยูซึ่งมีช่องแคบเรียกว่า channel เมื่อควบคุมปริมาณของอากาศในการเผาไหม้ อุณหภูมิของเตาเผาเขม่าดำและปริมาณอากาศที่ให้ออกมา ความดันของก๊าซที่ใช้ในการเผาไหม้และอื่นๆ ก็ทำให้สามารถควบคุมขนาดของเขม่าดำที่ออกมาได้ เขม่าดำที่ได้จากวิธีนี้มีสมบัติเป็นกรด มีค่า pH ตั้งแต่ 3.7-5.0 ฉะนั้นจะทำให้ยางสุกช้าลงไปบ้างและมีขนาดตั้งแต่ 100-400 °A โดยทั่วไปเขม่าดำที่มีขนาดเล็กกว่า 150 °A จะไม่นำมาใช้กับยางเพราะผสมเข้ากับยางได้ยากและยางที่ได้จะแข็งและแปรรูปยาก ส่วนใหญ่จะถูกใช้ในงานในสี

2.6.2 สมบัติของเขม่าดำและอิทธิพลต่อสมบัติของยาง

2.6.2.1 ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ

อนุภาคปฐมภูมิของเขม่าดำมีรูปร่างเป็นทรงกลมและจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ แต่จะถูกหลอมรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่าแอกกรีเกต เขม่าดำเกรดที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิลึกจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เขม่าดำเกรดนี้ก็จะเสริมแรงให้แก่ยางได้ดี Studebaker (1965) และ Morton

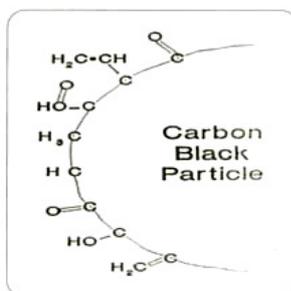
(1993) พบว่าการใช้เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กเป็นสารตัวเติม ทำให้ยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น และต้องใช้เวลาในการผสมเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของยางหลังการผสมสูงขึ้น และส่งผลให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง ความต้านทานต่อความล้า ความสามารถในการกระเด็นตัว และความต้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำที่มีอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้สูง ส่งผลให้ยางแข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณของเขม่าดำก็มีผลต่อสมบัติของยางเช่นเดียวกัน ซึ่งจะต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม หากใช้ในปริมาณสูงเกินไป จะทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลงเช่นกัน

2.6.2.2 โครงสร้าง

โครงสร้างของเขม่าดำบ่งบอกถึงลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำ นอกจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคปฐมภูมิเกิดเป็นแอกกรีเกตซึ่งเป็นโครงสร้างปฐมภูมิแล้ว แอกรีเกตแต่ละกลุ่มยังสามารถเกาะกลุ่มกันได้อย่างหลวมๆ ด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อน (แรงแวนเดอร์วาลส์) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เรียกว่าแอกโกลเมอเรต ซึ่งโครงสร้างแบบหลังนี้จะถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม โครงสร้างของเขม่าดำมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตมากกว่าสมบัติของยางคงรูป โดยพบว่าการใช้เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง ทำให้ยางคอมพาวนด์มีความหนืดสูงขึ้น เวลาในการผสมลดลง การเอ็กทรูด (extrusion) ทำได้เร็วขึ้น ผิวเรียบขึ้น และเกิดการ die swell ลดลง ส่วนสมบัติของยางคงรูปพบว่ามีค่ามอดูลัสและความแข็งสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด (Studebaker, 1965; Ghosh and Chakrabarti, 2000)

2.6.2.3 สมบัติทางเคมีของพื้นผิว

เขม่าดำประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนประมาณ 90-95% ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ออกซิเจน และไฮโดรเจน ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำค่อนข้างแตกต่างกันมากเพราะพื้นผิวของเขม่าดำประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมายและการกระจายตัว



รูปที่ 2.9 หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำ (พงษ์ธร, 2548)

ของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้บนพื้นผิวก็แตกต่างกันด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวเหล่านี้ไม่เพียงจะมีผลต่อความว่องไวทางปฏิกิริยา (surface activity) ยังมีผลต่ออัตราเร็วของการคงรูปยางอีกด้วย การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในเขม่าดำจะทำให้ยางมีค่าระยะเวลาสกรอทที่ยาวขึ้น มีอัตราเร็วในการคงรูปและค่ามอดูลัสที่ต่ำลง

หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำมีผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน โดยเฉพาะหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ฟีนอลิก เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันเคมีเหล่านี้ทำให้เขม่าดำมีความเป็นกรดสูงขึ้น ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเกิดได้ช้าลง ในกรณีที่เขม่าดำมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิใกล้เคียงกัน พบว่าเขม่าดำเกรดที่มีโครงสร้างสูงกว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า ทำให้ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเกิดได้ช้า เพราะสารตัวเร่งปฏิกิริยาถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนมากขึ้น

2.7 สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizers and Processing Aids)

สารช่วยให้ยางนิ่มมีจุดประสงค์ในการผสมในยางเพื่อ

ก. ปรับความเหนียวของยางให้ลดลง ทำให้ยางไหลได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ประหยัดพลังงานในระหว่างกระบวนการผลิต

ข. ช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตและสมบัติความเหนียวติดกันของยางคอมพาวนด์

ค. ช่วยลดสัดส่วนของยางลงเพราะการใช้สารทำให้ยางนิ่มจะช่วยทำให้สามารถเติมสารตัวเติมลงไปปริมาณที่สูงขึ้นได้

ง. ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น

จ. ทำให้ยางคงรูปมีสมบัติบางประการดีขึ้น เช่น ช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ยางมีค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำลงและมีค่าการยึดตัว ณ จุดขาดสูงขึ้น (พงษ์ธร, 2548)

สารช่วยให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิตที่ใช้ในยางมีดังนี้

2.7.1 น้ำมันแร่ (Mineral oils) จัดเป็นสารทำให้ยางนิ่มกลุ่มที่มีความสำคัญมากที่สุดเพราะมีราคาถูกและสามารถเข้ากับยางได้หลากหลายชนิด น้ำมันแร่ส่วนใหญ่ได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ) ซึ่งน้ำมันที่ผลิตได้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อย ตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี คือ น้ำมันพาราฟินิก (paraffinic oil) น้ำมันแนฟทีนิก (naphthenic oil) และน้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil)

2.7.2 ไขมันสัตว์และน้ำมันพืช (Animal fat and Vegetable oils) ไขมันจากสัตว์หรือที่เรียกว่า ทาวโลร์ (tallow) สามารถนำมาใช้เป็นสารทำให้ยางนิ่มได้ ไขมันเหล่านี้นอกจากจะมีส่วนช่วยให้กระบวนการผสมเป็นไปได้อย่างยิ่งยั้งแล้ว ยังมีส่วนช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิต

โดยเฉพาะในขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยการอัดผ่านคานและการรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องคานเดออร์ นอกจากนี้ช่วยปรับปรุงพื้นผิวของยางที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการดังกล่าวอีกด้วย ส่วนการใช้น้ำมันพืช เช่น น้ำมันปาล์ม และน้ำมันถั่วเหลือง แม้ว่าจะช่วยลดความหนืดของยางและทำให้ยางสามารถรับสารตัวเติมได้ในปริมาณที่สูงขึ้น แต่เนื่องจากน้ำมันเหล่านี้มีพันธะคู่อยู่มากจึงอาจส่งผลเสียดอายุการใช้งานของยาง ซึ่งมีการศึกษาการใช้ไขมันพืชปริมาณเล็กน้อยใส่ลงในยางคอมพาวนด์ในระหว่างการผสม มีผลให้ค่าแรงบิดที่ได้จากกราฟวัลดคาไนซ์มีค่าลดลง ซึ่งส่งผลต่อเนื่องไปยังสมบัติเชิงกลและสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงลดลง สมบัติด้านความต้านทานต่อการสึกหรอและความแข็งจะลดลงในยางที่ใช้ไขมันพืช ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำมันพืชทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ดี และความหนาแน่นของพันธะการเชื่อมโยงที่น้อยลง ค่า $\tan \delta$ ณ จุดที่ให้ค่าแรงบิดสูงสุดที่ต่ำลง บ่งบอกถึงการลดลงของการสูญเสียและการเกิดความร้อน การใช้ไขมันพืชในยางทำให้ค่ามอดูลัสลดลง แต่ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่เพิ่มสูงขึ้น ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ไขมันพืชจะให้ค่าการผิดรูปจากการกดต่ำ แต่ให้ค่าการกระเด็งตัว ความต้านทานต่อการฉีกขาด และการขยายตัวของรอยแตกที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพาวนด์สูตรมาตรฐานที่ไม่ใส่ไขมันพืช (Kundu, 1999) การใช้ไขมันพืชในการปรับสภาพผิวของเขม่าดำแล้วผสมในยางคอมพาวนด์ พบว่าค่าแรงบิดที่ได้จากกราฟการวัลดคาไนซ์ลดลง สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไขมันพืชที่ใช้ การเกิดการคู่ควบต่อ (coupling) และการเกิดสภาพการเชื่อมต่อเพียงชั้นเดียว (monolayer หรือ microplasticization) ของไขมันพืชที่อยู่ระหว่างผิวของเขม่าดำกับยาง มีผลทำให้เกิดการลดลงของ ค่า $\tan \delta$ ความสามารถในการยืดจนขาด และความต้านทานต่อแรงดึง ส่วนค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ ความแข็ง และ 300% มอดูลัส จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับการใช้ไขมันพืชที่ปริมาณ 3 phr และเมื่อใช้ไขมันพืชในปริมาณมากกว่า 3 phr พบว่าสมบัติต่างๆ จะมีแนวโน้มต่ำลง ความต้านทานต่อการฉีกขาดและการกระเด็งตัวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไขมันพืชที่ใช้ อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มขึ้นจะค่อยๆ ลดลงเมื่อปริมาณไขมันพืชที่ใช้เข้าใกล้ระดับ 3 phr และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้ไขมันพืชมากกว่า 3 phr เนื่องจากการเกิดการ coupling และ plasticizing (Kundu and Kukreja, 2002) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของสารเคมีในไขมันพืชชนิดต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลรวมถึงการยึดติดของเขม่าดำกับยางคอมพาวนด์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไขมันละหุ่งจนถึงระดับ 1 phr ทำให้ค่ามอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งและความแข็งแรงต่อการยึดติดจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่เมื่อใช้ไขมันละหุ่งที่สูงกว่า 1 phr สมบัติด้านมอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความแข็งลดลง แต่ความแข็งแรงต่อการยึดติดและความต้านทานต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อใช้ที่ปริมาณ 2.5-3 phr ดังนั้นจึงได้ข้อสรุปว่าไขมันละหุ่งมีพฤติกรรมเป็น coupling agent เมื่อใช้ในปริมาณไม่เกิน 1 phr และจะ

แสดงเป็นทั้ง plasticizer และ coupling agent เมื่อใช้ในช่วง 1-3 phr และเมื่อใช้ในปริมาณที่สูงกว่า 3 phr น้ำมันละหุ่งจะทำหน้าที่เป็น plasticizer เมื่อเทียบกับน้ำมันชนิดต่างๆ ที่ปริมาณการใช้ 1 phr พบว่าน้ำมันพืชสามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันพาราฟินิก นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้น้ำมันละหุ่งและน้ำมันพืช สามารถเสริมสมบัติเชิงพลวัตและเชิงกลได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันพาราฟินิก (Kukreja *et al.*, 2003)