

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

2.1.1.1 ยางพารา (Hevea Brasiliensis)

วัตถุดิบที่เริ่มแรกรู้จักกันในชื่อ “Caouchouc” ซึ่งเป็นคำที่เรียกตามที Charles de la Condamine ใช้ (มาจากภาษาอินเดียนหมายถึงต้นไม้ร้องไห้) เป็นสารไอโซพรีน (Isoprene) ที่ได้จากน้ำเลี้ยงของต้นยาง Hevea Brasiliensis ปัจจุบันรู้จักวัตถุดิบนี้ในนาม Natural rubber(NR) และเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าต้นยางพารานับเป็นแหล่งวัตถุดิบยางธรรมชาติที่สำคัญที่สุดในปัจจุบันอาจนับเป็นพืชชนิดเดียวที่ให้ยางธรรมชาติซึ่งนำมาใช้เป็นประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมผลิตวัตถุดิบสำเร็จรูปยาง

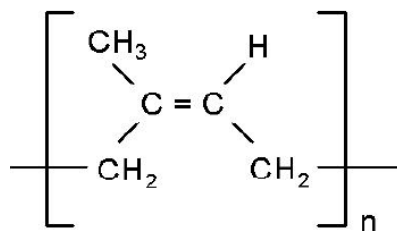
ยางแท่ง STR 5L เป็นยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางสด สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางแท่ง STR 5L ได้มีการคัดเลือกน้ำยางสด สำหรับนำมาใช้ในการกระบวนการผลิตเป็นอย่างดี

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ยางแท่ง STR 5L ในการผลิต

- ผลิตภัณฑ์ล้อเครื่องบิน
- ผลิตภัณฑ์ล้อรถยนต์/ล้อรถบรรทุก
- ผลิตภัณฑ์ยางรองคอสพาน/ทางยกระดับ
- ผลิตภัณฑ์ล้อยางเรเดียลทุกชนิด
- ผลิตภัณฑ์รองเท้า/พื้นรองเท้า
- ยางรัดของ
- อุปกรณ์กีฬา

2.1.1.2 โครงสร้างเคมียาง

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียว มีสมบัติที่สำคัญคือความยืดหยุ่น โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อยของยางธรรมชาติประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม (C_5H_8) มีชื่อทางเคมีว่าไอโซพรี (Isoprene) หน่วยย่อยดังกล่าวเมื่อเกิดการเชื่อมโยงเป็นโมเลกุลจะเรียงตัวกันในแบบ cis- 1, 4 Configuration ภาพรูปที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงสูตรโครงสร้างแบบ cis-1,4-polyisoprene ของยางธรรมชาติ

2.1.1.3 สมบัติของยางธรรมชาติ

1. สมบัติของยางดิบ

1. ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก นั่นคือ ยางสามารถแบนและไหลได้เมื่อได้รับแรงกดซึ่งเป็นสมบัติของพลาสติก เมื่อเอาแรงออกยางสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ซึ่งสมบัติของอีลาสติก ดังนั้น เมื่อยางมีสมบัติทั้งพลาสติกและอีลาสติก ทำให้ง่ายแบนหรือยืดเมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึง แต่เมื่อคลายแรงยางจะกลับคืนรูป แต่ไม่เท่าเดิม

2. ยางเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เมื่อยางอยู่ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำ ยางจะแข็งกระด้าง ถ้ายางอยู่ในสถานะที่อุณหภูมิสูง ยางจะนิ่ม ลักษณะเช่นนี้ทำให้ง่ายใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด

3. ยางมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ (Tensile strength) และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ (Abrasion resistance)

4. ยางไม่ทนต่อตัวทำละลายหลายชนิด สามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลาย

2. สมบัติของยางคงรูป

1. มีความยืดหยุ่นสูง

2. มีความทนต่อแรงดึงสูง (Tensile strength) สามารถทนแรงดึงได้มากกว่า 20 MPa

3. มีการยืดตัวก่อนขาดได้มาก (Elongation) สามารถยืดได้ 500% – 1,000%

4. มีความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear) และการสึกหรอ (Abrasion) ได้ดี

5. การคืนตัว (Compression set resistance) และ การกระดอน (Resilience) ดี

6. ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี

7. มีแรงยึด หรือติดกันระหว่างยางกับเส้นใย และโลหะได้ดี

8. มีความทนทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Heat ageing) ไม่ดี

9. ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจน และโอโซน ได้น้อย

10. ไม่ทนต่อตัวทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอน และน้ำมันปิโตรเลียม

11. อุณหภูมิการใช้งาน อยู่ระหว่าง – 40 ถึง 70 องศาเซลเซียส

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่างๆมากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซนและความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double bond) อยู่มาก ทำให้ง่ายว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิต ผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ Antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขั้วน้ำมันและสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันและสารเคมีต่างๆ

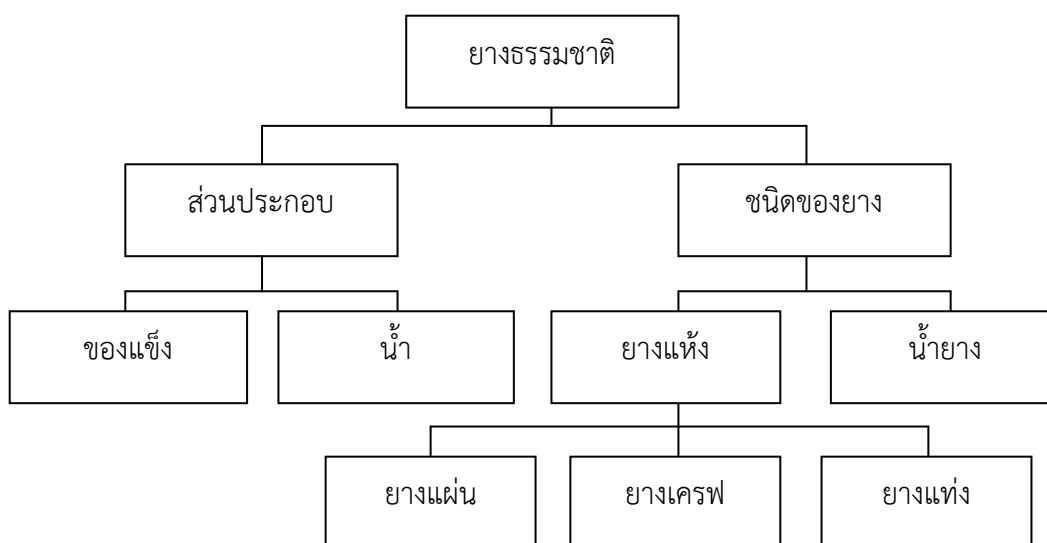
ยางธรรมชาติยังสามารถผลิตให้อยู่ในรูปแบบอื่นๆ ได้อีก เช่น ยางเกรดที่มีความหนืดคงที่หรือยาง CV (Constant viscosity) ยางที่แปรรูปได้ดี (Superior processing rubber, SP/PA grade) ยางที่ผสมน้ำมัน (Oil extended natural rubber, OENR) ยางธรรมชาติที่มีโปรตีนต่ำ (Deproteinized natural rubber, DPNR) ยาง ENR (Epoxidized natural rubber) ยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic NR) และยางผง (Powdered rubber) เพื่อให้เห็นถึงการนำยางแต่ละชนิดไปใช้งานและทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ จึงแสดงให้ทราบดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการใช้งานชนิดของยางดิบ

ชนิด	การใช้งาน	หมายเหตุ
STR XL, STR 5L, ADS,RSS1	ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เกล็ดขรุขระการสัมผัสอาหาร ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแต่งเติมสี สัน ด้าย ยางยืดแบบเหลื่อม กาวยาง เทปติดพื้นรองเท้า และ ส่วนประกอบ	เป็นยางที่มีความสะอาดมีสีจาง โดยเฉพาะยาง STR XL, STR, 5L และ RSS ค่อนข้างแข็งมาก ค่าความหนืดสูง
STR 20, RSS 2,3,4,5	ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์ ยางล้อดอกกรวมทั้งผลิตภัณฑ์ยางอะไหล่ ยางใช้ในงานวิศวกรรม และใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป	เป็นยางสีคล้ำส่วนใหญ่ใช้สารตัวเติมเขม่าดำ เพื่อเสริมความแข็งแรง
ยางสกี	ใช้ผสมกับยางชนิดอื่นๆ สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ระบุ ข้อจำกัด เช่น ยางปูพื้น ยางล้อรถเข็น และ ยางกันกระแทก	ใช้ผสมกับยางอื่นเพื่อลดต้นทุน มีสีอ่อนและมี Non rubber มากกว่ายางปกติ จึงสามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางสีจาง หรือ ต้องการแต่งเติมสี นอกจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบในการเกิดคงรูปได้เร็ว แต่มีสมบัติทางกายภาพต่ำ
น้ำยางข้น	ผลิตภัณฑ์จุ่มแบบ เช่น ถุงมือ ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย หุ่นลมสำหรับทารก ผลิตภัณฑ์ตีฟอง เช่น ที่นอน หมอน ตุ๊กตาฟองน้ำ ผลิตภัณฑ์หล่อแบบ เช่น ตุ๊กตา ยาง หุ่นการศึกษาผลิตภัณฑ์เส้นด้ายยืดแบบกลม เช่น ท่อยาง กาวน้ำยาง	สามารถออกสูตรสารเคมีผสม น้ำยางให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหนียวและแข็งแรงมาก โดยไม่เติมสารเสริมความแข็งแรง

ที่มา : วราภรณ์ ขจรไชยกุล, 2549 [1]

ยางธรรมชาติ (Natural rubber) จะมีลักษณะการแบ่งตามส่วนประกอบและชนิดของยางธรรมชาติ ดังภาพที่ 2.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 2.2 การแบ่งตามส่วนประกอบ และชนิดยางธรรมชาติ [2]

2.1.1.4 การแบ่งชนิดของยาง

1. น้ำยาง

เนื่องจากน้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีปริมาณน้ำมากเกินไปไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และยังทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่งดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสดจนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นจาก 30% เป็น 60% โดยน้ำหนัก เรียกน้ำยางที่ได้ว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีนและฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อยซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์หรือเชื้อแบคทีเรียได้เป็นก๊าซชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน หรือสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นน้ำยางจึงสามารถถูกเน่าสลายเหม็นได้จึงต้องมีการเติมสารแอมโมเนียเพิ่มให้สามารถเก็บไว้ได้นานน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียเพียงอย่างเดียวจะต้องใช้แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูงถึง 0.7% น้ำยางชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า High-Ammonia-Latex หรือ HA-latex ส่วนน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นต่ำเพียง 0.2% ก็จำเป็นต้องใช้สารเคมีอื่นๆร่วมด้วย เช่น ZnO/TMTD 0.02% หรือใช้กรดบอริก 0.2% หรือใช้ Santobrite 0.2% เป็นต้น ซึ่งน้ำยางชนิดหลังนี้เรียกว่า Low Ammonia latex หรือ LA latex

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของน้ำยางสด

ส่วนประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	36
- เนื้อยางแห้ง	33
- สารกลุ่มโปรตีนและไขมัน	1-1.2
- สารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต	1
- เถ้า	<= 1
น้ำ	64

2. ยางแห้ง

ได้จากการนำน้ำยางสดที่กรีตได้มาเติมกรด นิยมใช้กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือ กรดซัลฟูริก เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำจากนั้นก็ทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยางเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ยางแห้งมีหลายรูปแบบ ได้แก่

2.1 ยางแผ่น (Rubber sheet) ยางแผ่นได้จากการนำน้ำยางสดมาใส่ในตะกอนจากนั้นจึงเติมน้ำเพื่อเจือจางน้ำยางให้มีปริมาณเนื้อยางแห้งเหลือเพียงประมาณ 12.16% ก่อนทำการเติมกรดเพื่อให้ยางจับตัวกันและแยกออกจากน้ำ หากทำการเจือจางมากก็จำเป็นต้องใช้กรดมากขึ้นเช่นกัน โดยทั่วไปอนุภาคของน้ำยางจะเริ่มจับตัวเป็นก้อนหลังจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำยางอยู่ในช่วง 5.1-4.8 เรียกจุดนี้ว่า “จุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point)” หลังจากนั้นจึงนำยางที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง นำไปล้างน้ำแล้วจึงทำให้ยางแห้ง ซึ่งการทำให้ยางแห้งนี้อาจทำได้ 2 วิธี คือ

- นำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้นยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นไม่รมควัน (Air Dried Sheet, ADS)

- นำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2-3 วัน หรืออาจนานกว่านี้ ซึ่งยางที่ได้เรียกว่ายางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS) ยางแผ่นรมควันแบ่งออกเป็นชั้นต่างๆ ด้วยสายตา (ตามปริมาณสิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนในยาง) ตั้งแต่ชั้นที่ 1 ซึ่งจัดว่าเป็นเกรดที่ดีที่สุดถึงชั้นที่ 5 ซึ่งเป็นเกรดที่ต่ำที่สุด ส่วนยางแผ่นไม่รมควันมีชั้นเดียวหากตกชั้นก็ต้องนำไปรมควันต่อไปภายหลังจากที่ยางแผ่นแห้งสนิท ยางแผ่นเหล่านี้ก็จะถูกนำมาอัดให้เป็นก้อนๆ ละประมาณ 113 กิโลกรัม และก่อนส่งออกจำหน่ายก็จะมีการทาทัลลัม (Talc) ที่บริเวณพื้นผิวของก้อนยางเพื่อป้องกันการเกาะติดกันในระหว่างการขนส่ง ปัจจุบันประเทศไทยส่งออกยางพาราในรูปยางแผ่นรมควันมากที่สุดในโลก โดยมีประเทศคู่ค้าหลักได้แก่ สหรัฐอเมริกา จีน ญี่ปุ่น ฯลฯ

2.2 ยางเครฟ (Crepe rubber) ยางเครฟส่วนใหญ่เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยาง เช่น ยางกันถ้วยเศษยางที่ติดบนเปลือกไม้หรือติดบนดิน หรือเศษจากยางแผ่นรมควัน เป็นต้น ปรืดในเครื่องเครฟ (Creping machine) พร้อมทั้งใช้น้ำทำความสะอาดเอาสิ่งสกปรกต่างๆ ออกไปจากยางในระหว่างการรีด จากนั้นจึงนำยางแผ่นที่ได้ไปผึ่งลมให้แห้งโดยทั่วไปยางเครฟที่ผลิตได้มีหลายรูปแบบ เช่น Brown crepe, Flat bark crepe และ Blanket crepe เป็นต้น ซึ่งยางเครฟทั้งหลายนี้มีสีค่อนข้างเข้ม และมีความบริสุทธิ์แตกต่างกันมากขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต ส่วนยางเครฟขาวซึ่งจัดเป็นยางเครฟเกรดพิเศษที่ทำมาจากน้ำยาง โดยทั่วไปแล้วในน้ำยางจะมีสารเบต้าแคโรทีน (β Carotene) ทำให้ง่ายมีสีเหลืองอ่อน ดังนั้นหากต้องการผลิตยางเครฟที่มีสีขาวจึงจำเป็นต้องกำจัดสารให้สีดังกล่าวออกไปโดยการฟอกสารสีด้วยสารเคมี เช่น Xylyl mercaptane (0.05 wt%) หรือ Toly mercaptan (0.05 wt%) และ Sodium bisulfate (0.5-0.75wt%) ก่อนที่จะทำการเติมกรดเพื่อให้ยางจับตัวกันเป็นก้อน

2.3 ยางแท่ง (Technically classified rubber) เนื่องจากยางแท่งและยางเครฟมีการจัดชั้นด้วยสายตาซึ่งให้ผลที่ไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้ อุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ในปัจจุบันจึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางแท่ง ทั้งนี้ยางแท่งเป็นยางที่มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่นและยางเครฟผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ การจัดชั้นของยางแท่งจะพิจารณาจากปริมาณของสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยางเป็นสำคัญ นอกจากนี้ก็อาจพิจารณาตัวแปรอื่นๆ ร่วมด้วยเช่น ปริมาณเถ้า ดัชนีความอ่อนตัว ฯลฯ ปัจจุบันประเทศไทยมีมาตรฐานยางแท่งเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) ซึ่งแต่เดิมเรียกว่า Thai Tested Rubber (TTR) ยางแท่งเป็นยางที่ผลิตขึ้นมาโดยอาศัยหลักการดังนี้คือเริ่มต้นนำยางมาทำให้เป็นก้อนเล็กๆ (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร) เพื่อให้ง่ายต่อการชำระล้างสิ่งสกปรกออกไปด้วยน้ำและง่ายต่อการทำให้แห้งในขั้นตอนถัดไปหลังจากอบยางให้แห้งที่อากาศร้อนแล้วก็นำยางแท่งที่เป็นก้อนเล็กๆ เหล่านี้ไปอัดให้เป็นแท่งขนาดมาตรฐาน 330×670×170 มิลลิเมตร ที่มีน้ำหนักประมาณ 33.33 กิโลกรัม วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือแผ่นยางทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR XL หรือ STR 5L ซึ่งมีสีจางมาก (L ย่อมาจาก Light และ XL ย่อมาจาก Extra light) จำเป็นต้องใช้ น้ำยางเป็นวัตถุดิบและใช้กรดฟอร์มิคในการทำให้น้ำยางจับตัวกันภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมอย่างดี หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 10 หรือ STR 20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเหลืองปนสูงและมีสีเข้มกว่าก็อาจใช้ยางแผ่นหรือเศษยางซึ่งยังเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นยางแท่งจึงมีราคาสูงกว่ายางแผ่นรมควัน ยางแท่งที่ใช้มากคือยางแท่งเอสทีอาร์ 20 (STR 20) เป็นยางแท่งประเภทที่มีการผลิตมากที่สุดโดยมีการผลิตจากการผสม

ระหว่างซี่ยาง และยางแผ่น แล้วผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำยางที่แห้งแล้วไปชั่งน้ำหนักให้ได้ 33.33 กิโลกรัม อัดเป็นแท่งในเครื่องอัด แล้วบรรจุลงพอลิเอทิลีน ยางแท่ง STR 20 เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตยางล้อรถยนต์ หรือเป็นส่วนประกอบในโมลด์ (Mold) เพื่อผลิตส่วนประกอบของรถยนต์ และสินค้าอื่นๆทั่วไป เช่น ยางขอบประตู ยางขอบหน้าต่าง ยางรองคอสสะพาน นอกจากนี้ยางแท่งยังมีข้อได้เปรียบคือ มีสมบัติสม่ำเสมอและมีการกำหนดเกรดตามสมบัติทางเทคนิคในการซื้อขายพร้อมใบรับรองคุณภาพ ไม่เหมือนกับยางแผ่นรมควัน ซึ่งกำหนดเกรดในการซื้อขายด้วยสิ่งที่มองเห็นด้วยสายตาเช่น ปริมาณสิ่งสกปรกและฟองอากาศ ฯลฯ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ไม่ได้สะท้อนถึงสมบัติทางเทคนิคของเนื้อยางจึงเป็นข้อเสียเปรียบที่สำคัญของยางแผ่นรมควัน และยางสกินบล็อก

2.4 ยางสกินบล็อก (Skim block) หมายถึง ยางก้อนจากยางน้ำยางซึ่งทางน้ำยาง (Skim latex) เป็นส่วนแยกออกจากส่วนที่เป็นครีม (Concentrated latex) ในกระบวนการปั่นแยก (Centrifugation) รวบรวมส่วนที่เป็นสกินมาจับตัว รีด อบ อัดเป็นแท่ง จะได้สกินบล็อก หรือสกินเครพ ยางสกินมีข้อจำกัดในการใช้ด้านอุตสาหกรรม เพราะสมบัติด้านการกระดอน (Rebound) ต่ำ

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานยางแท่งของไทย (Standard Thai Rubber)

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	-	-	-

ตารางที่ 2.4 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางแท่งที่ผลิตในประเทศไทย

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

2.1.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางและขึ้นรูปยาง

ยางดิบมีสมบัติที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง จำเป็นต้องมีการผสมยางดิบกับสารเคมีต่างๆ เพื่อปรับสมบัติของยางให้ได้ตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์

นั้น และนำยางคอมปาวด์ที่ผสมได้ไปผ่านกระบวนการคงรูป (Vulcanization) ทำให้ยางมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ (3-D network) หรือที่เรียกว่า การเกิด Crosslink ระหว่างโมเลกุลของยาง โดยทั่วไป ขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางและขึ้นรูปยางเริ่มจาก การออกสูตรยางคอมปาวด์ จากนั้นบดผสมยางตามสูตรด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งแล้วนำยางที่เตรียมเก็บไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ยางคลายตัวจากการบดผสมยางต่อจากนั้นหาเวลาที่ใช้ขึ้นรูปยาง และทำการอัดขึ้นรูปยางตามเวลาขึ้นรูปยางแล้วนำชิ้นงานออก ลำดับสุดท้ายจะเป็นการตัดตกแต่งชิ้นงานเพื่อนำไปใช้งานในลำดับ

2.1.2.1 การออกสูตรยาง

การออกสูตรยางเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของยาง หน้าที่และความจำเป็นของการใช้สารเคมีผสมยาง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสมหรือคุ้มกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพราะต้นทุนการผลิตก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารกลุ่มต่างๆดังนี้

1. ยาง

การออกสูตรยางจะต้องทราบสมบัติของยางแต่ละชนิดเป็นอย่างดีดังต่อไปนี้คือ ต้องทราบข้อดีและข้อเสียของยางที่จะนำมาใช้ เช่น ยางธรรมชาติมีข้อดีคือ มีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วน (Pure gum) ดีมาก นั่นคือไม่ต้องเติมสารเสริมแรงก็สามารถให้ความแข็งแรงได้ดีในขณะเดียวกันยาง EPDM มีความแข็งแรงของน้ำยางล้วนๆ สู้อย่างธรรมชาติไม่ได้ แต่มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนและสภาพอากาศที่ดีกว่า เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการผสมยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มาใช้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดและยังมีส่วนลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

2. สารทำให้ยางคงรูป

สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent or curing agent) สารกลุ่มนี้จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยึดหยุ่นได้สูง หรืออาจใช้คำว่า “คงรูป” แต่ตามโรงงานมักเรียกกันว่า “ยางสุก” สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulphur) นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ซึ่งนิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำนอกจาก 2 ระบบดังกล่าว ยังมีการใช้สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ และสังกะสีออกไซด์ (MgO/ZnO) ในยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางนีโอพรีน

(1) ระบบยางคงรูปโดยกำมะถัน (Sulphur vulcanization system) เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูงคงรูป เช่น ยางธรรมชาติหรือยาง SBR เพราะพันธะคู่คือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชันด้วยกำมะถัน การทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันจะทำให้ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ ระบบนี้ประกอบด้วย

- กำมะถัน ซึ่งเป็นสารคงรูป
- สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator) เช่น TMTD (Tetramethyl thiuram disulphide) MBT (2-Mercaptobenzothiazole) และ CBS (n-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide) เป็นต้น

- สารกระตุ้นสารเร่ง (Activator) ได้แก่ สารอินทรีย์พวกซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สารอินทรีย์พวกกรด สเตียริก (Stearic acid) และสารที่เป็นต่าง (นิยมใช้ในสูตรที่มีสารที่เป็นกรดหรือซิลิกา รวมอยู่)

(2) ระบบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide system) ระบบนี้สามารถใช้ในการทำให้ยางเกือบทุกชนิดคงรูปโดยเฉพาะยางสังเคราะห์ที่ไม่มีหรือมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ ยางที่คงรูปด้วยระบบนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก ต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน และยางคงรูปที่ได้มักมีกลิ่น Acetophenone ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการทำปฏิกิริยารวกลไกไนซ์เซชันแต่ว่ายางจะมีความทนทานต่อความร้อนสูง

3. สารตัวเติม

สารตัวเติม (Filler) เป็นสารที่ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (Reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาวหรือ ซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (Inert filler or non-reinforcing filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (Clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต

2.1.2.2 การผสมยาง

การผสมยาง (Rubber Mixing) เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการแปรรูปยาง ทำให้ยางดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งสมบัติทางฟิสิกส์ และองค์ประกอบทางเคมี เริ่มต้นด้วยการบดยางให้นิ่มลง แล้วจึงทำการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปโดยที่สารเคมีเหล่านี้จะช่วยให้ยางแปรรูปได้ง่ายขึ้นหรือเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในบั้นปลายมีสมบัติตามที่ต้องการ สารเคมีดังกล่าวอาจเป็นตัวเติม (Filler) หรืออาจเป็นตัวทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการผสมคือ เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) กับเครื่องผสมยางแบบปิด (Internal mixer) ยางที่ผสมสารเคมีเข้าไปแล้วเรียกว่า ยางผสมสารเคมี (Rubber compound หรือ Compound หรือ Mix) แต่ยางที่ผสมสารเคมีเพียงตัวเดียวหรือสองตัวมีชื่อพิเศษว่า “Masterbatch” ตัวอย่างเช่น 50% กำมะถัน Masterbatch หมายถึงยางดิบที่มีกำมะถันผสมอยู่ 50 ส่วนใน Compound 100 ส่วนเป็นต้น Masterbatch จะใช้ในกรณีที่สารเคมีดังกล่าวอาจจะกระจายยางได้ไม่ดีหรือใช้ในกรณีที่มีการใช้สารเคมีนั้นน้อยมาก อาจจะก่อให้เกิดการผิดพลาดได้ง่าย ถ้าสารเคมีฟุ้งกระจายหายไป เป็นต้น ส่วนยางและสารเคมีที่ใช้ในการผสมจะมีสัดส่วนที่แน่นอนตามสูตร (Compound recipe) โดยทั่วไปปริมาณที่ใช้จะบอกเป็นน้ำหนักเมื่อเทียบกับยางหนัก 100 ส่วน เรียกว่า phr หรือ pphr (Parts per hundred rubber) น้ำหนักขององค์ประกอบ phr นี้จะเป็นหน่วยน้ำหนักใดก็ได้ เช่น กิโลกรัม หรือ ปอนด์ เป็นต้น เช่น การใช้กรดสเตียริก 1 phr จะหมายถึง ถ้ามียาง 100 กิโลกรัม ก็จะใช้กรดสเตียริก 1 กิโลกรัม

2.1.2.3 ระบบการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ได้หลายระบบด้วยกันคือ

1. ระบบกำมะถันแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization) หรือเรียกชื่อย่อ

ว่า ระบบ CV

กลไกการเกิดปฏิกิริยารวกลไกไนซ์ด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การวัลคาไนซ์เกิดขึ้นได้รวดเร็ว (เมื่อใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยา ในปริมาณที่เหมาะสม) การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulphidic cross-link) ภาพที่ 2.3 ยางที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติเชิงกล (เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และการยืดตัว ณ จุดขาด) สมบัติเชิงพลวัตรวมถึงความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue resistance) ที่ดี และมีสมบัติในการต้านการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก ด้วยเหตุนี้ ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันจึงนิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยางแทบทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ แต่ระบบการวัลคาไนซ์นี้ไม่ต้านสมบัติการ Reversion เช่น สมบัติจะต่ำเมื่ออบสุกเกินไป หรือเสื่อมเนื่องจากการถูกออกซิไดซ์ สมบัติในการทนทานต่อความร้อน การต้านความเสื่อม และสมบัติการยุบตัวอย่างถาวรเนื่องมาจากแรงอัด (Compression set) จะด้อยกว่าระบบอื่นๆ

ถ้าทำนายที่มีพันธะคู่มาผสมกับกำมะถันและให้ความร้อน ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ก็จะเริ่มเกิดขึ้นผ่านอนุมูลอิสระ โดยเริ่มแรกกำมะถัน (S_8) ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบวงแหวนจะแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ

อิเล็กตรอนของอนุมูลอิสระซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยาง (สายโซ่ที่ 1) ในขณะที่อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของอนุมูลอิสระก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยางอีกสายโซ่หนึ่ง (สายโซ่ที่ 2) เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้ช้ามาก จำเป็นต้องใช้อัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาสูง และต้องใช้อุณหภูมิสูงมากๆ จึงจะทำให้ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้ดี

ตัวอย่าง การใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบ CV ในหน่วย phr เป็นดังนี้

กำมะถัน 2-3.5 + Sulphenamide 0.5-1

กำมะถัน 2-3.5 + Thiazole 0.5-1 + DPG หรือ TMTD 0.1-0.5

กำมะถัน 2-3+ Thiuram หรือ Dithiocarbamate 0.3

2. ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization) หรือเรียกชื่อย่อว่า ระบบ EV

ในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันนี้ การเชื่อมโยงส่วนใหญ่จะเป็นแบบมอนอซัลฟิดิก (Monosulfidic) หรือไดซัลฟิดิก (Disulfidic) ภาพที่ 2.3 โดยอัตราส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ มีปริมาณกำมะถันอยู่น้อยมากๆ หรือมีอัตราส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำ หรือในบางครั้งอาจไม่จำเป็นต้องเติมกำมะถันลงในระบบเลย แต่ใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถให้กำมะถันออกมาในระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์ (Sulfur donor accelerator) แทนได้แม้ว่ายางที่คงรูปด้วยระบบ EV จะมีสมบัติทั้งเชิงกลเชิงพลวัตที่ไม่ดีเท่ากับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV แต่ว่ายางที่ได้ก็จะมี ความทนทานต่อความร้อนที่ดีกว่า มีความการยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัดที่ต่ำกว่า (โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ) มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเมื่ออบคงรูปนานเกินไป (Over curing) ได้ดีกว่า และมีสมบัติด้านการเสื่อมเมื่อถูกออกซิไดซ์ที่ดีกว่า

ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV จะมีความทนทานต่อความร้อนสูงกว่ายางที่คงรูปด้วยระบบ CV เนื่องจากพลังงานพันธะของ C-S (~279 kJ/mol) มีค่าสูงกว่าพลังงานพันธะของ S-S (~206 kJ/mol) พันธะแบบมอนอซัลฟิดิกจึงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีกว่าพันธะแบบพอลิซัลฟิดิก

ตัวอย่าง การใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบ EV ในหน่วย phr เป็นดังนี้

กำมะถัน 0.5 + CBS 6

กำมะถัน 0.3+ CBS 3 + TMTD 2 ให้ยางที่มีโมดูลัสสูง

กำมะถัน 0.25+ CBS 1.8 + TMTD 1.2 ให้ยางที่มีโมดูลัสต่ำ

กำมะถัน 0.7+ MBS 1.7 + TBTD 0.7 ระบบ Soluble EV

3. ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi efficient vulcanization) หรือเรียกชื่อย่อว่า ระบบ Semi-EV

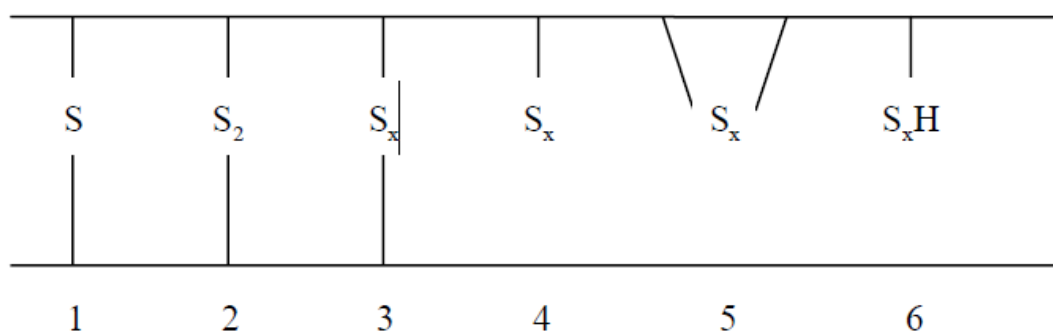
ในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันนี้ ใช้กำมะถันและสารตัวเร่ง กึ่งกลางระหว่างการใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบ CV กับระบบ EV ทำให้สมบัติทั้งเชิงกลและความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพอยู่ระหว่างทั้งสองระบบนี้

ตัวอย่าง การใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบ EV ในหน่วย phr เป็นดังนี้

กำมะถัน 2.0 + Sulphenamide 1.0

กำมะถัน 1.5 + Sulphenamide 1.5

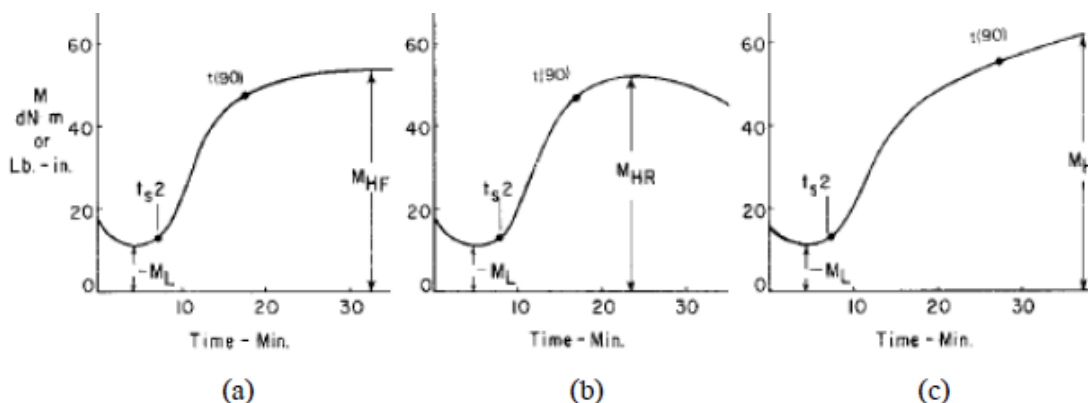
กำมะถัน 1.0 + Sulphenamide 2.0



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างการเชื่อมโยงแบบต่างๆ: (1) มอนอซัลฟิดิก (2) ไดซัลฟิดิก (3) พอลิซัลฟิดิก เมื่อ $x \geq 3$ (4) สายโซ่กำมะถัน (5) โครงสร้างแบบวง และ (6) หมู่ไทออล (Thiol) (พงษ์ธร, 2548)

2.1.2.4 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง

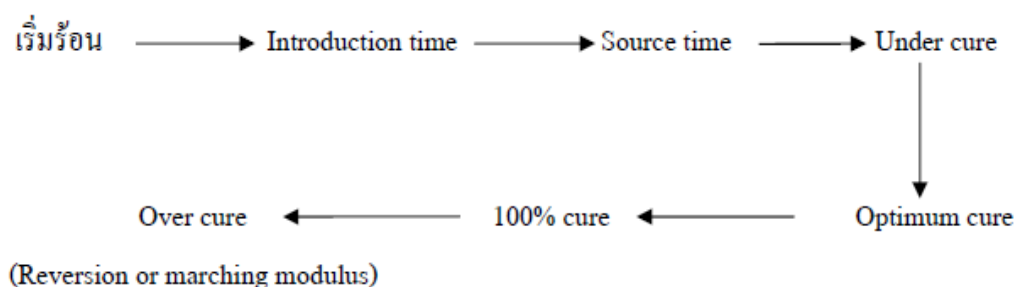
ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน มีลักษณะการวัลคาไนซ์ได้ 3 แบบ คือ แบบพลาโต (plateau หรือ flat) แบบรีเวอร์ชัน (reversion หรือ peaky cure) และแบบมาร์ชชิง ซึ่งกราฟการวัลคาไนซ์แสดงได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กราฟแสดงการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ (a) แบบพลาโต (b) แบบรีเวอร์ชั่น (c) แบบมาร์ชชิง (ASTM D2084)

2.1.2.5 ลักษณะการที่ยางสุกหรือวัลคาไนซ์

เมื่อนำยางคอมปาวด์มาทำให้ร้อน สารเคมีที่อยู่ในยางจะเริ่มตันเกิดปฏิกิริยา ในตอนเริ่มต้นนี้ สารเคมีจะเริ่มเกิดการแตกตัว หรือทำปฏิกิริยากันเอง ช่วงนี้จะใช้เวลาช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และ ชนิดของสารเคมีที่ใช้ โดยทั่วไปถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นระยะเวลาดังกล่าวจะสั้นลง ช่วงเริ่มต้นก่อนที่สารเคมี จะเข้าทำปฏิกิริยากับยางนี้ เรียกว่า Induction time เวลาต่อมาสารเคมีก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ก่อให้เกิดการ Crosslink ทำให้โมดูลัสของยางสูงขึ้นและยางแข็งขึ้นระยะเวลาที่ยางเกิดการแข็งตัวอย่าง เห็นได้ชัดเรียกว่า Scorch time เมื่อยางเกิดการ Scorch แล้วยางจะแปรรูปได้ยาก เมื่อยางทำปฏิกิริยา ต่ออย่างก็จะแข็งขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสารเคมีกระทำกับยางหมดอย่างก็จะแข็งสูงสุด ระยะเวลาดังกล่าว เรียกว่า 100% Vulcanization time หรือ 100% Cure time แต่หากปล่อยให้เกิดการวัลคาไนซ์จนถึง 100% อาจใช้เวลานานเกินไป ทำให้สมบัติอื่นๆ อาจต่ำลงดังนั้นโดยทั่วไปจะทำการทดสอบเพียง 90% หรือ 95% Cure time ซึ่งถือว่าเป็น Optimum cure ก็ได้ยางที่ได้รับความร้อนไม่ถึง Optimum cure เรียกว่าเกิด Under cure (ยางไม่สุก) จะทำให้ยางมีสมบัติที่ไม่ดี แต่ถ้าหากปล่อยให้ได้รับความร้อน มากกว่า 100% เรียกว่าเกิด Over cure คือ ถ้ายางนิ่มลงทำให้โมดูลัสลดลงเรียกว่าเกิด Reversion แต่ ถ้ายางแข็งขึ้นเรียกว่าเกิด Marching modulus ยางคอมปาวด์บางชนิดเกิด Reversion ได้ง่าย เรียกว่า ยางนั้นมีลักษณะเป็น Peaky cure แต่ยางที่สามารถรักษาโมดูลัสไม่ให้เกิดลงไปได้นานถึงแม้ว่าจะเกิน 100% cure แล้ว ยางคอมปาวด์นั้นเรียกว่าเป็นยางที่มี Flat cure หรือ Plateau cure ดังนั้นเมื่อให้ ความร้อนแก่ยางผสมสารเคมี ก็จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องผ่านลำดับขั้นตอนต่างๆ ดังรูปที่ 2.5 (คู่มือ ปฏิบัติการเรียนการสอนเรื่องยาง, 2548)



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการวัลคาไนซ์ยางคอมปาวด์

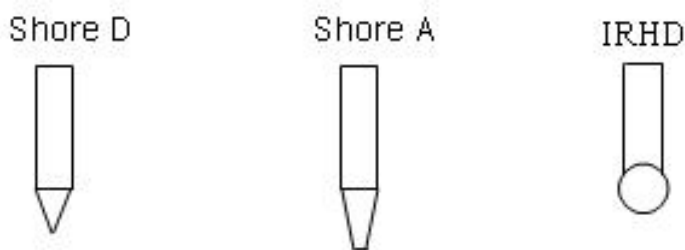
2.1.2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์

1. ค่าความแข็ง (hardness)

ความแข็งของยางหมายถึงความต้านทานของพื้นผิวต่อการทะลุทะลวงของตัวกดที่มีขนาดเฉพาะและภายใต้แรงกดที่กำหนด เครื่องวัดความแข็งของยางมีหลายชนิดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกดและแรงที่ใช้กดลงบนพื้นผิว สเกลที่ใช้วัดจะเริ่มตั้งแต่ศูนย์ (สำหรับยางที่อ่อนมากๆ) จนถึง 100 (สำหรับยางที่แข็งมาก) แรงที่ใช้กดอาจมาจากน้ำหนักที่คงที่หรืออาจใช้สปริงแทนก็ได้ หน่วยที่ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางมีอยู่ 2 หน่วยคือ IRHD (International rubber hardness degrees) และชอร์ (Shore unit) ซึ่งการวัดความแข็งในหน่วย IRHD นั้นจะใช้ลูกกลมแข็งแทนตัวกดและแรงกดจะมาจากน้ำหนักที่คงที่ ส่วนเครื่องวัดความแข็งที่ให้หน่วยชอร์นั้นเรียกว่าเครื่องดูโรมิเตอร์ ซึ่งมี 2 แบบคือแบบชอร์เอ (Shore A) และแบบชอร์ดี (Shore D) ได้แก่

1) เครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์เอใช้สำหรับวัดความแข็งของยางที่อ่อนมากๆ จนถึงยางที่มีความแข็งค่อนข้างมาก (90 ชอร์เอ) ตัวกดของเครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์เอจะเป็นแท่งรูปโคนที่ทื่อ ดังแสดงในภาพที่ 2.6

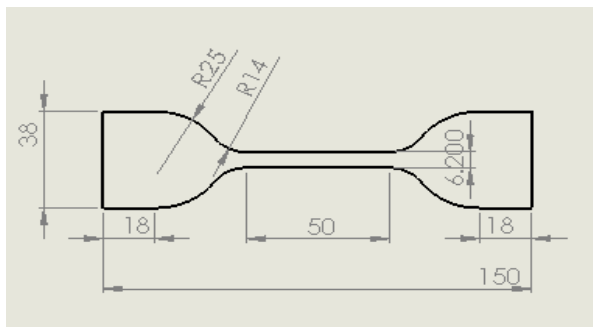
2) เครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์ดีใช้สำหรับวัดความแข็งของยางที่แข็งมากๆ (มากกว่า 90 ชอร์เอ) ตัวกดของเครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์ดีจะเป็นแท่งรูปโคนที่แหลม ดังแสดงในรูป 2.6



ภาพที่ 2.6 หัวกดแบบต่างๆ สำหรับการวัดค่าความแข็ง

2. ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

สมบัติเชิงกลของยางที่สำคัญ ได้แก่ การทนทานต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และมอดูลัส ซึ่งสมบัติต่างๆ เหล่านี้สามารถวัดได้โดยการดึงขึ้นตัวอย่างมาตรฐานรูปดัมเบลที่อัตราการดึงคงที่ด้วยเครื่องทดสอบที่เรียกว่า “Universal testing machine” ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะเป็นค่าแรงดึงที่แปรผันตามระยะการดึง ซึ่งสามารถนำค่าเหล่านี้ไปคำนวณหาค่าความเค้น (Stress, σ) และความเครียด (Strain, ϵ) ได้จากสมการ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ เนื่องจากในระหว่างการทดสอบ พื้นที่หน้าตัดของยางจะมีค่าไม่คงที่ กล่าวคือพื้นที่หน้าตัดของยางจะลดลงตามระยะทางที่ยืดตัว ด้วยเหตุนี้ในการทดสอบส่วนใหญ่จึงนิยามกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของยางมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบคือมีค่าเท่ากับค่าพื้นที่หน้าตัดตั้งต้น (ซึ่งมีค่าเท่ากับควมกว้างตั้งต้นคูณกับความหนาตั้งต้นของชิ้นทดสอบ)



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างทดสอบรูป Dumb-bell ตามมาตรฐาน ASTM D412

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

โดย

σ = ค่าความเค้น (Pa)

ε = ค่าความเครียด

F = ค่าแรงดึง (N)

A = ค่าพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (m^2)

ΔL = ระยะที่ย่างเกิดการยืดตัว (m^2)

L_0 = ความยาวตั้งต้นของชิ้นทดสอบ (m^2)

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ทำการทดสอบเหมือนการทดสอบความทนต่อแรงดึง ค่าที่ได้จะวัดโดยการอ่านระยะขึ้นที่ทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการยืดตัว ตามสูตรในการคำนวณ ดังนี้

$$(\text{Elongation, \%}) = \left[\left(\frac{L - L_0}{L_0} \right) \right] \times 100 \quad (2.3)$$

โดย

L = ระยะขึ้นงานที่ระยะสุดท้ายก่อนขาด (mm)

L_0 = ระยะขึ้นงานก่อนการทดสอบ (mm)

$$\text{การคำนวณค่าความยืดหยุ่น (Tensile modulus) } E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (2.4)$$

1) การทนทานต่อแรงดึง

คือค่าแรงดึงสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือค่าความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดึงชิ้นทดสอบมาตรฐานจนขาดที่อัตราการดึงคงที่ ซึ่งมีหน่วยเป็น MPa หรือ N/mm^2 อย่างแต่ละชนิดจะมีการทนทานต่อแรงดึงแตกต่างกัน อย่างที่สามารถแตกหักได้ในขณะที่ถูกดึงหรือได้รับความเครียด เช่น ยางธรรมชาติและยางนีโอพรีน จะมีค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางที่ไม่สามารถแตกหักได้ อย่างไรก็ตามการเติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ รวมถึงระบบการคงรูปก็ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติแรงดึงของยาง โดยทั่วไปค่าการทนทานต่อแรงดึงของยางจะอยู่ในช่วง 7 MPa ถึงมากกว่า 45 MPa ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสมเคมี

2) การยืดตัว

คือการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่เกิดขึ้นจากแรงดึง ซึ่งจะแสดงในรูปร้อยละการยืดตัวเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้น เช่น การยืดตัวที่ 300 % หมายถึงชิ้นตัวอย่างถูกยืดออกไปจนมีความยาวเป็น 4 เท่าของความยาวเริ่มต้น ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด คือระดับการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ ซึ่งค่าความเค้น ณ จุดนี้ก็คือค่าการทนทานต่อแรงดึงนั่นเอง โดยทั่วไป การยืดตัว ณ จุดขาดของยางมีค่าอยู่ในช่วง 100% ถึงมากกว่า 1000% ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสมเคมีส่วนค่าความเครียดก็สัมพันธ์กันโดยตรงกับค่าการยืดตัวของยางเพราะค่าความเครียดคืออัตราส่วนของระยะที่ยางยืดตัวต่อความยาวตั้งต้นของยาง ด้วยเหตุนี้ เมื่อยางยืดตัวมากขึ้น ค่าความเครียดของยางก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

3) โมดูลัส

สำหรับยางแล้ว ค่าโมดูลัสจะหมายถึงความเค้น (ในหน่วย MPa หรือ N/mm^2) ที่ต้องใช้ในการยืดยางให้ได้ค่าการยืดตัวตามที่กำหนดไว้ (โดยทั่วไปจะกำหนดการยืดตัวไว้ที่ 100% และ 300%) เช่น หากยางมีค่า 100% โมดูลัสเท่ากับ 5 MPa หมายถึงการที่จะดึงยางให้ได้ 100% ของการยืดตัวจะต้องใช้ความเค้นเท่ากับ 5 MPa เนื่องจากค่าโมดูลัสจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่าโมดูลัสของยางในการบ่งชี้สมบัติความแข็งแรง และระดับของการเชื่อมโยงของยาง โดยทั่วไป ค่า 100% โมดูลัสของยางอยู่ในช่วง 1 MPa ถึงมากกว่า 13 MPa ขึ้นอยู่กับสูตรการผสมเคมี

2.1.3 เส้นใย (Fiber)

เส้นใยหมายถึงวัสดุหรือสารใดๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้นที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) เท่ากับหรือมากกว่า 100

2.1.3.1 ประเภทของเส้นใย

ประเภทของเส้นใยสามารถแยกประเภทได้หลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการแบ่งในที่นี้จะแบ่งตามแหล่งกำเนิดของเส้นใยซึ่งจะแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยประดิษฐ์ในกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติก็ยังแบ่งย่อยได้อีกเป็นเส้นใยที่มาจากพืชจากสัตว์และจากแร่ส่วนเส้นใยประดิษฐ์สามารถแยกเป็นเส้นใยประดิษฐ์จากธรรมชาติเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยที่ประดิษฐ์จากวัสดุอื่นๆ

1. เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) หมายถึงเส้นใยที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ

1.1 เส้นใยจากพืช เช่น ฝ้าย ปอ ป่านและนุ่น

1.2 เส้นใยจากสัตว์ เช่น ขนสัตว์ ไหม และผม

1.3 แร่ เช่น แร่ใยหิน

2. เส้นใยประดิษฐ์ (man-made fiber) หมายถึงเส้นใยที่ผลิตออกมาโดยเป็นเส้นใยที่ไม่มีอยู่ในธรรมชาติ

2.1 ประดิษฐ์จากธรรมชาติเช่นเรยอนอะซิเตตและไตนอะซิเตต

2.2 เส้นใยสังเคราะห์เช่นโอเลอินพอลิเอสเตอร์พอลิเอทิลีนและไนลอน

2.3 แร่และเหล็กเช่นโลหะแก้วเซรามิกและกราไฟต์

เส้นใยธรรมชาติ

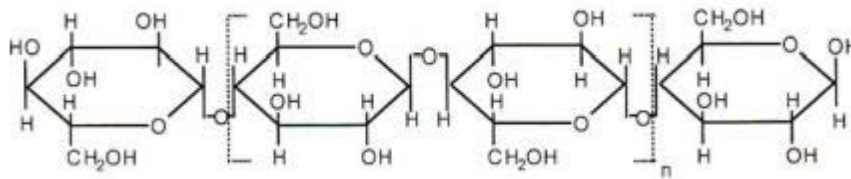
เส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรีย์วัสดุที่สำคัญหาได้ง่ายจากธรรมชาติมีปริมาณมากสามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆและมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารตัวเติมและสารเสริมแรงเพื่อเป็นการลดต้นทุนเพิ่มปริมาณการผลิตและเสริมแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemi cellulose) และสารประกอบอื่นๆดังนี้

ตารางที่ 2.5 แสดงความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด

Material (Fiber)	Density (g/cm ²)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
Flax	1.45	500-900	50-70	1.5-4.0
Hemp	1.48	350-800	30-60	1.6-4.0
Kenaf	1.43	400-700	25-50	1.7-2.1
Jute	1.3	300-700	20-50	1.2-3.0
Bamboo	1.4	500-750	30-50	2.0
Sisal	1.5	300-500	10-30	2-5
Coconut/Coir	1.2	150-180	4-6	20-40
Banana	1.35	500	12	5.9
Palmyra	0.7-1.2	196	2.5-5.4	2.0-4.5
Oil plam	0.7-1.55	150-500	0.57-9	4-18

เซลลูโลส

เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยขั้นพื้นฐานซึ่งเรียกว่า anhydro-d-glucose ($C_6H_{10}O_5$) ต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวดังแสดงในรูปที่ 2.8 แต่ละหน่วยของกลูโคสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน (เป็น primary group 1 หมู่ secondary group 2 หมู่) ซึ่งเหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไปแต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกันยาวเป็นโซ่ทำให้ไม่ละลายน้ำเหมือนกับที่เกิดกับน้ำตาลโครงสร้างทางเคมีนี้บ่งชี้ว่ามีบทบาทอย่างยิ่งต่อการกำหนดสมบัติของเส้นใยกล่าวคือหมู่ไฮดรอกซิล 6(-OH) จะเป็นตัวดึงดูดน้ำทำให้มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดีอีกทั้งเป็นจุดที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยากับกรดแอซิดิกได้เป็นเซลลูโลสแอซิดหรือเส้นใยประดิดษฐ์ชนิดแอซิดนั้นเองลักษณะการเรียงตัวเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวทำให้มีความแข็งแรงสูงตามไปด้วยนอกจากนั้นแล้วในโครงสร้างบริเวณที่เป็นการต่อกับของธาตุ C-O-C จะเป็นบริเวณที่ถูกทำลายได้ด้วยผลจากการเกิดออกซิเดชันหรือจากการถูกทำลายด้วยสภาพภูมิอากาศทำให้โมเลกุลยาวขาดลงกลายเป็นส่วนเล็กๆ คลายน้ำตาลและสลายเป็นอาหารของพืชและสัตว์ต่อไป



ภาพที่ 2.8 แสดงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลของเซลลูโลส

สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

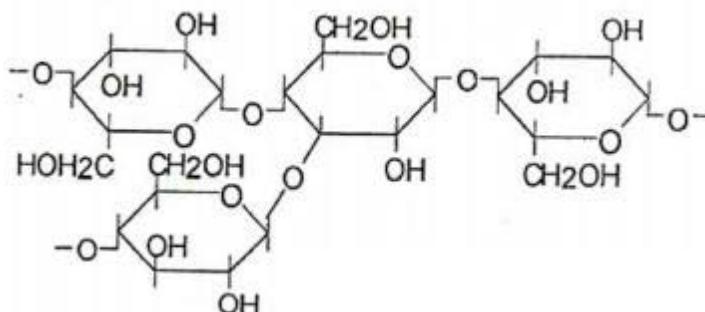
1. การละลายเซลลูโลสไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในกรดเข้มข้นเช่นกรดไฮโดรคลอริก (hydro acid) กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) เป็นต้นโดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้องและหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเซลลูโลสจะสามารถขยายตัวได้ในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิดเช่นสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิดเช่นสารละลายแอลคาไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide)

2. ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลสโดยถ้าความเข้มข้นของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจะทำให้เซลลูโลสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมีผลทำให้มีสมบัติทางกายภาพที่ดี

3. การดูดซับความชื้นเซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับความชื้นโดยปริมาณความชื้นที่เซลลูโลสดูดซับมีผลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการของเส้นใยเช่นเมื่อความชื้นสูงขึ้นเส้นใยจะมีความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

เฮมิเซลลูโลส (Hemi-Cellose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายกับเซลลูโลสเฮมิเซลลูโลสพบในเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารประกอบอื่นๆเช่นลิกนินและเซลลูโลสโดยเฮมิเซลลูโลสเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ประกอบด้วยไซแลน (xylans) ซึ่งมีน้ำตาลไซโลส (xylose) แมนแนน (mannans) ซึ่งมีน้ำตาลแมนโนส (mannose) และกาแลคแทน (galactans) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกาแลคโตส (galactose) นอกจากนั้นยังมีกลูโคสแมนแนนซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลแมนโนสไซโลกลูแคนประกอบด้วยน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสและแคลโลสซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่เกาะกันแบบ B-1,3-glycosidic bond โดยเฮมิเซลลูโลสจะมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานซึ่งมีความแข็งแรงน้อยและถูกไฮโดรไลซิสได้ง่ายในกรดเจือจางโครงสร้างทางเคมีแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเฮมิเซลลูโลส

ลิกนิน

ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของพืช โดยเป็นพืชที่เป็นไม้เนื้อแข็งจะมีสัดส่วนของลิกนินประมาณร้อยละ 17-25 และในไม้เนื้ออ่อนมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 24-32 และในเส้นใยที่ได้จากเปลือกของลำต้น (bast fibres) เช่นป่านลินินป่านนิลาและปอจะมีอยู่เล็กน้อยและแทบจะไม่มีเลย เส้นใยฝ้ายลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลสจะเกาะกันอยู่ในชั้นระหว่างใย (middle lamella) ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะเส้นใยเข้าด้วยกันและมีบางส่วนอยู่ในเส้นใยด้วยลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอนไฮโดรเจนและออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติกลิกนินไม่ละลายน้ำไม่มีสมบัติทางการยึดหยุ่นดังนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทานและมีความต้านทานต่อสารเคมีได้

ลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางดังนี้

1. ใช้เป็นสารยึดติด (adhesives) เช่นสารกันซึม (sizes) สารเชื่อมติด (binders) และสารเคลือบ (Coatings) ในอุตสาหกรรมกระดาษ
2. ใช้ในด้านเคมีภัณฑ์เกษตร (agricultural chemicals) ได้แก่ เคมีภัณฑ์ปรับปรุงดิน เคมีภัณฑ์ควบคุมฝูง ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ยากำจัดวัชพืช ใช้ในการหมัก และเป็นสารตัวเติมแต่งในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ เป็นต้น
3. ใช้ผสมในซีเมนต์ เพื่อเพิ่มสมบัติให้กับซีเมนต์ เช่น ช่วยให้การแข็งตัวของซีเมนต์ดีเพิ่มความแข็งแรง มีความคงทน
4. ใช้ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน เช่น drilling fluids และ oil well sealants แม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมาก จะมีความแข็งแรงสูง และในไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุนาน จะมีปริมาณลิกนินมากขึ้นเช่นกัน จากตารางที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.6 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ

ชนิดของเส้นใย	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
กล้วย	60-65	25-30	5-8
สับปะรด	80	16-19	12.0
มะพร้าว	43	<1	45.0
ลินิน	70-72	14	4-5
ปอกระเจา	61-63	13	5-13
ฝ้าย	90	6	-
ป่านรามิ	80-85	3-4	0.5
ป่านศรนารายณ์	60-67	10-15	8-12
ฟางข้าว	40	28	18.0
ไม้	45-50	23	27.0

เส้นใยแก้ว (Fiber glass)

ไฟเบอร์กลาสหรือใยแก้วเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่เกิดจากการหลอมละลายและแข็งตัวของ Silica ซึ่งเป็นวัตถุดิบจากแก้วที่การเผาในอุณหภูมิสูงๆ ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียสขึ้นไปตั้งแต่ 50-800 นาที่ ซึ่งทั่วไปแล้วใยแก้วจะประกอบด้วย SiO_2 52.72%, Al_2O_3 0.6-1.6%, CaO 10.25%, MgO 0-2.5%, B_2O_3 1-13%, $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ 0-14.2% และ SO_3 0.7 % โดยทั่วไปจะแบ่งประเภทของใยแก้วออกเป็นชนิดต่างๆดังนี้

A glass (Alkali) ใช้สำหรับงานที่ต้องการทนสารเคมีเป็นต่าง

C glass (Chemical) ใช้สำหรับงานที่ต้องการทนสารเคมีที่เป็นกรดและกัดกร่อน

E glass (Electrical) ใช้สำหรับงานที่ต้องการรับแรงและเป็นฉนวนป้องกันไฟฟ้าได้ดี

S glass (High Strength) ใช้สำหรับงานที่ต้องการรับแรงสูงกว่าชนิด E

สำหรับ E glass เป็นเส้นใยแก้วที่ใช้กันมากที่สุดและใช้กับกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ได้จากสารประกอบของ Lime-aluminum-borosilicate โดยประกอบด้วย SiO_2 52-56%, Al_2O_3 12-16%, CaO 16-25% และ B_2O_3 8-13% ซึ่ง E glass บริสุทธิ์มีค่าความแข็งแรงถึง 3.44 GPa และ Modulus of Elasticity 72.3 GPa

2.1.3.2 สมบัติของเส้นใย

ความแตกต่างของเส้นใยขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพองค์ประกอบทางเคมีและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลซึ่งส่วนผสมและความแตกต่างในปัจจุบันนี้ทำให้เส้นใยมีสมบัติที่หลากหลายและแตกต่างกัน

1. โครงสร้างทางกายภาพ

โครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยสามารถสังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 250-1000 เท่าโครงสร้างทางกายภาพนั้นครอบคลุมถึงความยาวขนาดหรือเส้นผ่าศูนย์กลางรูปร่างภาคตัดขวาง (cross-sectional shape) รูปร่างของผิวเส้นใยและความหยักของเส้นใยของเส้นใย

2. ความยาวเส้นใย (Fiber length)

ในเส้นใยธรรมชาติโดยทั่วไปเส้นใยจะมีความยาวที่ค่อนข้างแตกต่างกันมากด้วยเหตุผลจากอิทธิพลของธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นสภาพดินฟ้าอากาศน้ำหรืออาหารในดินดังนั้นแม้ว่าจะเป็นเส้นใยฝ้ายที่มาปลูกพร้อมๆกันการกระจายของความยาวเส้นใยก็ยังอยู่ในระดับค่อนข้างสูง

เส้นใยธรรมชาติมีทั้งชนิดสั้นและยาว ซึ่งความยาวของเส้นใยจะมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานชนิดของเส้นใย

1. เส้นใยสั้น (staple fiber) เป็นเส้นใยที่มีความยาวอยู่ในช่วง 2 ถึง 46 เซนติเมตร เส้นใยธรรมชาติทั้งหมดยกเว้นไหมเป็นเส้นใยสั้นยกตัวอย่างเช่นเส้นใยฝ้ายขนสัตว์เส้นใยสั้นมาจากเส้นใยประดิษฐ์มักทำเป็นเส้นยาวก่อนแล้วตัด (Chop) ให้เป็นเส้นใยสั้นตามความยาวที่กำหนด

2. เส้นใยยาว (filament fiber) เป็นเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องไม่สิ้นสุด มีหน่วยวัดเป็นเมตรหรือ หลา เส้นใยยาวส่วนใหญ่เป็นเส้นใยประดิษฐ์ ยกเว้นไหมซึ่งเป็นเส้นใยยาวที่มาจากธรรมชาติ เส้นใยยาวอาจเป็นชนิดเส้นใยเดี่ยว (monofilament) ที่มีเส้นใยเส้นเดียวหรือเส้นใยยาวกลุ่ม (multifilament) ซึ่งจะมีเส้นใยมากกว่า 1 เส้นรวมอยู่ด้วยกันตลอดความยาว

3. ขนาดเส้นใย

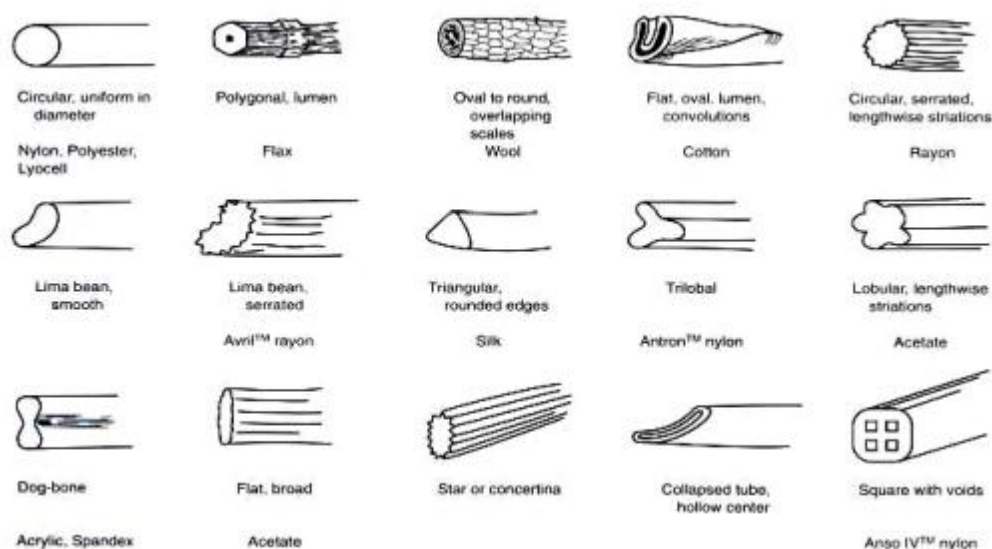
เส้นใยธรรมชาตินั้นมักมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ คุณภาพของเส้นใยธรรมชาติมักจะวัดจากความละเอียดของเส้นใย เส้นใยที่มีความละเอียดมาก (ขนาดเล็ก) จะมีคุณภาพที่ดีกว่า การวัดความละเอียดมักวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (ภายใต้กล้องจุลทรรศน์) ในหน่วยของไมโครเมตร (1 ไมโครเมตรเท่ากับ 1/1000 มิลลิเมตร) ตัวอย่างขนาดของเส้นใยธรรมชาติดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ขนาดของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ

ชนิดเส้นใย	ช่วงความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลาง (microns)
ฝ้าย	16-20
ลินิน	12-16
ขนสัตว์	10-50
ไหม	11-12

4. รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย

ความแตกต่างของรูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยธรรมชาตินั้นเกิดจากลักษณะการสร้างเซลล์ulos ในขณะที่พืชเติบโตเช่นในเส้นใยฝ้ายหรือการกระบวนการสร้างโปรตีนในสัตว์ เช่น ขนสัตว์ หรือรูปร่างของช่อง (Orifice) ในตัวไหมที่ทำหน้าที่ฉีดเส้นใยไหมออกมาดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 แสดงรูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยต่างๆ

5. ความหยัก (Crimp)

ความหยักในเส้นใยช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะ (Cohesiveness) ระหว่างเส้นใย ทำให้สามารถคืนตัวจากแรงอัด (Resilience) ได้ดี มีความต้านทานต่อแรงเสียดสี (Resistance to abrasion) และมีความยืดหยุ่น

ความหยักบนเส้นใยสามารถหาได้โดยตรงจากอัตราส่วนของความหยัก (Crimp ratio) ระหว่างผลต่างของเส้นใยที่ถูกยืดคลายออกจนเป็นเส้นตรงกับความยาวดั้งเดิมของเส้นใยที่มีความหยักอยู่เปรียบเทียบกับความยาวเดิม

6. องค์ประกอบทางเคมีและการจัดเรียงตัวของโมเลกุล

เส้นใยประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมากโมเลกุลเหล่านี้มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาวเรียกว่าพอลิเมอร์ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของหน่วยโมเลกุลเล็กๆคือมอนอเมอร์ (Monomer) และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีด้วยกระบวนการสังเคราะห์ที่เรียกว่าพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ขนาดของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความยาวของโมเลกุลซึ่งบอกได้จากจำนวนของมอนอเมอร์ที่อยู่ในพอลิเมอร์ (Degree of polymerization) พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลจะมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้นเนื่องจากจำนวนมอนอเมอร์ที่มากกว่านั่นเองซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยที่พอลิเมอร์นั้นเป็นองค์ประกอบอยู่

โมเลกุลหรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในเส้นใยมีการจัดเรียงตัวแตกต่างกันเมื่อแต่ละโมเลกุลมีการจัดเรียงตัวอย่างไรทิศทางก็จะทำให้เส้นใยบริเวณนั้นมีความเป็นอสัณฐานส่วนในบริเวณที่โมเลกุลมีการจัดเรียงซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบก็จะเป็นผลึกเกิดขึ้นโดยเส้นใยที่มีความเป็นผลึกมากก็จะมี ความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่มีความเป็นผลึกน้อย

อย่างไรก็ตามปริมาณความเป็นผลึกไม่ใช่ปัจจัยที่กำหนดความแข็งแรงของเส้นใยหากรวมไปถึงทิศทางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เป็นระเบียบเหล่านี้ด้วยถ้าโมเลกุลมีการจัดเรียงตัวอยู่ในทิศทางที่ขนานกับแกนตามยาวของเส้นใยก็จะช่วยให้เส้นใยมีความแข็งแรงมากเนื่องจากการเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำต่อเส้นใย (ตามความยาว) ทำให้สามารถมีส่วนช่วยในการรับแรงเต็มที่เรียกว่าเส้นใยนั้นมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่ดี (Oriented fiber) ในอีกกรณีหนึ่งแม้เส้นใยจะมีบริเวณที่เป็นผลึกมาก แต่จะมีทิศทางการจัดเรียงตัวที่ไม่ขนานกับแกนตามยาวของเส้นใย โมเลกุลก็ไม่สามารถรับแรงในทิศทางการดึงเส้นใยได้เต็มที่ ทำให้มีความแข็งแรงน้อยกว่าในกรณีแรก

2.1.4 คอมโพสิต (Composite)

คอมโพสิตคือวัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกันองค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิตคือ

1. วัสดุเสริมแรง (Reinforcing agent) คือส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิตวัสดุที่เป็นวัสดุเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูงตัวอย่างของวัสดุเสริมแรงที่สำคัญได้แก่เส้นใยชนิดต่างๆเช่น เส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) เส้นใยอะรามิด หรือเคพลาร์ (aramid fiber หรือ kevlar) และเส้นใยธรรมชาติเป็นต้นอาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (continuous fiber) หรือเส้นใยสั้น (discontinuous หรือ chopped short fiber) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (wave) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆและมีการจัดเรียงของวัสดุเสริมแรงแบบต่างๆ วัสดุเสริมแรงเป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต

2. เมตริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกันเพื่อให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนดเมตริกซ์มีความแข็งแรงและมอดุลัสต่ำกว่าวัสดุเสริมแรงเมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับไปสู่วัสดุเสริมแรงวัสดุที่ใช้เป็นเมตริกซ์ได้แก่พอลิเมอร์โลหะและเซรามิกส์เป็นต้น

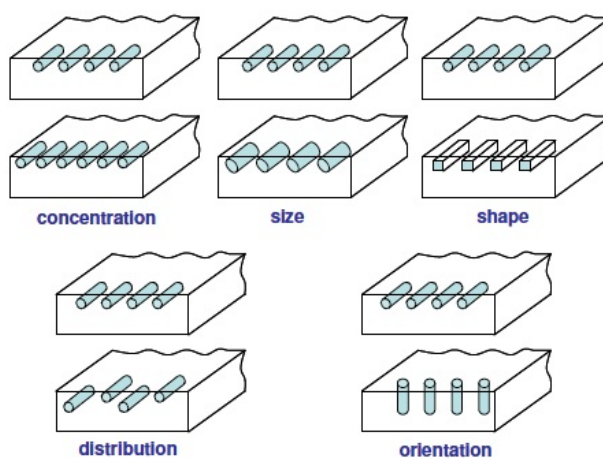
คอมโพสิต (Composite) คือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกัน โดยทั่วไปแล้วคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed phase) ในเมทริกซ์นั้น หรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforced phase) ยกตัวอย่างคอมโพสิตที่พบในธรรมชาติ เช่น ไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างลิกนิน (Lignin) กับเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fibre) หรือกระดูก ซึ่งเป็นคอมโพสิตระหว่างแร่อะพาไทต์ (Apatite) กับโปรตีนคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น คุณสมบัติของวัสดุที่สามารถนำมาเป็นเมทริกซ์ มีดังนี้

- เป็นเนื้อวัสดุที่มีปริมาณมากที่สุด
- มีหน้าที่ห่อหุ้มหรือจับยึดวัสดุเสริมแรงให้ฝังตัวอยู่ได้
- มีคุณสมบัติด้อยกว่าวัสดุเสริมแรง
- ต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับวัสดุเสริมแรง
- ต้องไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติกายภาพหรือระเหยได้ในภายหลัง
- ต้องยอมให้วัสดุเสริมแรงเข้าไปยึดเกาะได้และมีพันธะที่แข็งแรง
- ต้องมีความเหนียวและทนทานสูง

และคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวเสริมแรง มีดังนี้

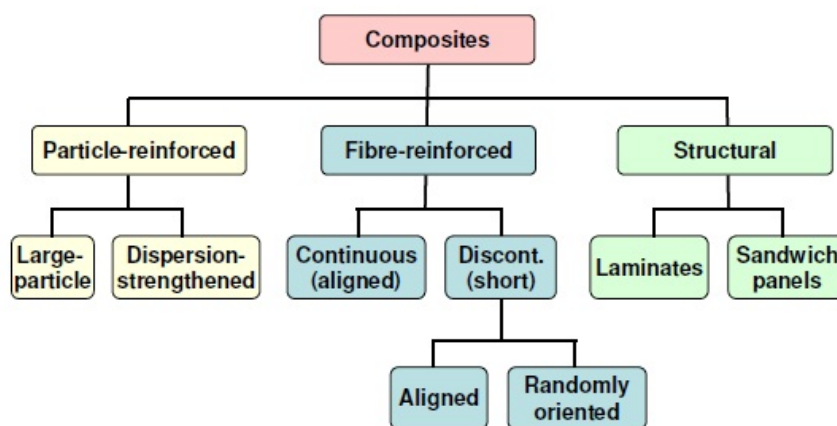
- เป็นวัสดุที่มีปริมาณน้อย
- มีสมบัติที่ดีกว่าวัสดุเนื้อหลัก
- กระจายตัวหรือฝังตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักหรืออัดซ้อนทับกับวัสดุเนื้อหลัก

ในส่วนของคอมโพสิตสังเคราะห์นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาเพื่อให้มีสมบัติที่ดีเหมาะกับการใช้งานเฉพาะทาง โดยสมบัติของคอมโพสิตที่ได้จะขึ้น อยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้น อัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ภาพที่ 2.11 แสดงถึงลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิต จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะเป็นคอมโพสิตที่เกิดจากเมทริกซ์และเฟสที่กระจายตัวอยู่ชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง ลักษณะการกระจาย หรือการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่แตกต่างกันแล้ว สุดท้ายคอมโพสิตที่ได้ก็จะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน



ภาพที่ 2.11 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอมโพสิต ได้แก่ ความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง การกระจาย และการจัดเรียงตัว [3]

คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภทใหญ่ๆ คือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibre-reinforced composite) และคอมโพสิตโครงสร้าง (Structural composite) นอกจากนี้แล้ว คอมโพสิตแต่ละประเภทยังสามารถเป็นประเภทย่อยๆได้อีก ดังแสดงในแผนผังการแบ่งประเภทของคอมโพสิตในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แผนผังการแบ่งประเภทของคอมโพสิต [3]

2.1.4.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

มีการแบ่งชนิดวัสดุคอมโพสิตได้หลายแบบเช่นอาจแบ่งชนิดคอมโพสิตตามลักษณะของวัสดุเสริมแรงแบ่งชนิดคอมโพสิตตามวัสดุที่ใช้เป็นเมทริกซ์และสามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต

การแบ่งชนิดคอมโพสิตตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composite) คือคอมโพสิตที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใยอาจเป็นเส้นใยสั้นหรือเส้นใยยาวต่อเนื่องมักเป็นเส้นใยขนาดเล็กมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูงทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ
2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composite) คือคอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์มีลักษณะเป็นชั้นๆคล้ายแซนวิช (sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honey comb)

การแบ่งชนิดคอมโพสิตตามวัสดุที่ใช้เป็นเมทริกซ์

1. พอลิเมอร์คอมโพสิตหรือพอลิเมอร์เชิงประกอบ (Polymer composite) คือคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เป็นพอลิเมอร์ทั้งประเภทเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต
2. โลหะคอมโพสิตหรือโลหะเชิงประกอบ (Metal composite) คือคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เป็นโลหะ
3. เซรามิกส์คอมโพสิตหรือเซรามิกส์เชิงประกอบ (Ceramic composite) คือคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เป็นเซรามิกส์

การแบ่งชนิดคอมโพสิตตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composite) คือวัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ฟันและกระดูกไม้ เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลสที่เป็นวัสดุเสริมแรงโดยมีสาร

จำพวกกลินินเป็นเมตริกซ์ยึดเซลล์โลสไว้ด้วยกันส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกของแข็งอนินทรีย์เช่นไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyl apatite) อยู่ในเมตริกซ์ของสารอินทรีย์เหนียวคอลลาเจน (collagen) เป็นต้น

2.4.1.2 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

ข้อดีของวัสดุคอมโพสิต

1. มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (properties to weight/density ratio) สูง เช่นความแข็งแรงจากพေးและมอดุลัสจำพေးเป็นต้นเนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำน้ำ
2. มีสมบัติหลากหลายสามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้
3. มีอายุการใช้งานยาวนานมักมีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
4. มีสมบัติการรับแรงและความหน่วง (damping) ดี
5. มีความทนทานต่อการล้า (fatigue resistance) ดี
6. มีเสถียรภาพของรูปร่าง (dimensional stability) สูงเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (coefficients of thermal expansion, CTE) ต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นเช่นโลหะหนักเบาจึงช่วยลดน้ำหนักของวัสดุได้

ข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

1. ต้นทุนการผลิตสูงเนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิตมีราคาแพง
2. มักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากันหรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของวัสดุเสริมแรงเป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (transverse direction)
3. ยากต่อการต่อหรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น
4. ยากต่อการทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (recycle)

2.4.1.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต

ในปัจจุบันการใช้งานวัสดุคอมโพสิตสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นอุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive) เครื่องบิน (Aircraft) ยานอวกาศ (Aerospace) อุปกรณ์กีฬา (Sporting goods) เป็นต้น การที่มีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมีขึ้นส่วนน้อยขึ้น ไม่ต้องการการประกอบมากสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

2.4.1.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย

1. การกระจายของเส้นใย (fiber dispersion)

ความต้องการเบื้องต้นของการเตรียมให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีนั้นคือการกระจายของเส้นใยในเมตริกซ์ที่ดีมีความสม่ำเสมอโดยปัจจัยที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของเส้นใยในเมตริกซ์คือการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับเส้นใยด้วยกันเองและความยาวของเส้นใยที่ใช้จากปัจจัยดังกล่าวนี้จะส่งผลต่อปริมาณของการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) ในระหว่างการผสมของเส้นใยกล่าวคือโดยธรรมชาติแล้วเส้นใยธรรมชาติจะเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนในระหว่างการผสมได้ง่ายเนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนของเซลล์โลสจากเส้นใยดังนั้นวิธีที่จะทำการลดการเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยได้โดยทำการปรับปรุงผิวเส้นใยซึ่งการปรับปรุงผิวเส้นใยถือว่ามีความ

จำเป็นเนื่องจากจะเป็นการช่วยลดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยด้วยกันเองและยังช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ให้เพิ่มขึ้นด้วย

2. การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ (fiber matrix adhesion)

การยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์ถือว่ามีความสำคัญอย่างมากสำหรับการเสริมแรงของเส้นใยในพอลิเมอร์เมตริกซ์ซึ่งการยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของเส้นใยกับเมตริกซ์มีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกลสมบัติทางกลศาสตร์เชิงพลศาสตร์และลักษณะทางรีโอโลยีของคอมโพสิตที่เตรียมได้ เนื่องจากการเกิดการส่งผ่านความเค้นจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของเมตริกซ์และเส้นใย

3. ค่าอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (aspect ratio) ของเส้นใย

ค่า Aspect ratio หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยโดยค่า aspect ratio ของเส้นใยในการเสริมแรงเพื่อเตรียมเป็นคอมโพสิตนั้นมีบทบาทที่สำคัญในการประเมินค่าของสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตโดยความยาววิกฤติของเส้นใย (critical fiber length) จะแสดงถึงการเกิดการส่งผ่านความเค้นของคอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพซึ่งทำให้สามารถทำนายค่าความแข็งแรงของคอมโพสิตได้โดยกลไกของการเกิดการส่งผ่านความเค้นจากเมตริกซ์ไปยังเส้นใยจะมีความสอดคล้องกับปริมาตรและความยาวของเส้นใย

4. การจัดเรียงตัวของเส้นใย (fiber orientation)

การจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมตริกซ์ถือว่ามีความสำคัญเกี่ยวกับแอนไอโซทรอปีในเมตริกซ์และการนำไปใช้งานของคอมโพสิตสำหรับในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยจากการศึกษาของ Moghe พบว่า 60-70% ของเส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของความเค้นในระหว่างกรขึ้นรูปเส้นใยที่นำมาเสริมแรงจะมีทิศทางของการจัดเรียงตัวขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการไหลเช่นการไหลแบบคอนเวอร์เจน (convergent flow) แบบไดเวอร์เจน (divergent flow) แบบเฉือนและแบบทิศทางตามการดึงยืด (elongation flow) กล่าวคือเส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงในทิศทางตามแนวยาวและการไหลแบบไดเวอร์เจนเส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวขวางดังนั้นจากการไหลทั้ง 2 แบบนี้จึงได้มีการออกแบบหัวตายของเครื่องอัดรีด (extruder) สำหรับเพื่อควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใยสำหรับการไหลแบบเฉือนมักจะพบในการผสมในเครื่องผสมแบบปิดหรือรีโอมิเตอร์แบบแคปิลลารี (capillary rheometer) พบว่าเส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบหรือจัดเรียงตัวในทิศทางที่ขึ้นอยู่กับอัตราของแรงเฉือนและการไหลแบบทิศทางตามการดึงยืดพบว่าเส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามการดึงยืดเช่นการรีดเป็นแผ่นโดยใช้เครื่องบดสองลูกกลิ้งหรือเครื่องรีด (calendering) เป็นต้นโดยการใช้เครื่องรีดจะทำให้มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่มีความสม่ำเสมอเช่นเดียวกับวิธีการอัดรีด (extrusion)

5. ปริมาณของเส้นใย (fiber concentration)

ปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิตถือว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่เตรียมได้กล่าวคือถ้าใช้ปริมาณเส้นใยที่น้อยจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ได้มีค่าด้อยลงเนื่องจากเส้นใยที่ใช้ในปริมาณน้อยจะไม่สามารถเสริมความแข็งแรงให้กับคอมโพสิตที่เตรียมได้ซึ่งการเติมปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงสมบัติความทนต่อแรงดึง โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าพอลิเมอร์เริ่มต้นโดยปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมที่สุดที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในการเสริมแรงในคอมโพสิตคือปริมาณเส้นใยที่อยู่ในช่วงระหว่าง 20 ถึง 30 phr มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาการเติมเส้นใยไนลอนและเส้นใยพีอีที (poly(ethylene terephthalate), PET) ที่เสริมแรงใน NR พบว่าการเติมเส้นใยในปริมาณที่ 40 phr หรือมากกว่าจะทำให้ค่าความแข็งแรงของคอมโพสิตมีค่าลดลงเพราะการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์มีไม่เพียงพอ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G. Venkatesha Prasanna และคณะ (2013) [4] ได้ทำการศึกษาความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึง และสมบัติสัณฐานวิทยาของไฮบริดคอมโพสิตชีวภาพ โดยใช้ polyester (UP) ผสม epoxy เป็นเนื้อหลักและ ใช้เส้นใยจากกล้วย และ เส้นตาลโตนด เป็นตัวเสริมแรง ในการทดสอบค่าความแข็งแรง และความต้านทานแรงดึง จะใช้เส้นใยระหว่างแบบปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์กับไม่ปรับปรุงผิวเส้นใยผสมลงในเนื้อหลักอยู่ที่ 10, 20 และ 30% โดยปริมาณ แล้วมาเปรียบเทียบกัน จากทดสอบเชิงกลพบคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยกล้วย และ เส้นตาลโตนด ที่เส้นใยได้รับการปรับปรุงผิวเส้นใยจะมีค่าสูงกว่าที่เส้นใยไม่ได้รับการปรับปรุงผิวเส้นใย และที่ปริมาณเส้นใยที่ปรับปรุงผิวเส้นใยที่ใส่ในเนื้อหลักที่ 20% ที่ได้ทำการทดสอบเชิงกล จะมีค่าสูงสุด เมื่อกับปริมาณอื่นๆ ที่ปรับปรุงผิวเส้นใยและไม่ปรับปรุงผิวเส้นใย

S. Raghavendra และคณะ (2013) [5] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลวัสดุคอมโพสิตจากยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยเส้นใยที่สั้นของเส้นใยกล้วย โดยใช้การวัลคาไนซ์ของยางที่ 150°C พบว่า เมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยทำให้มีความต้านทานเพิ่มขึ้น และมีความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมของเส้นใยกับยาง และวัสดุที่ใช้เส้นใยกล้วยที่มีความยาว 15 mm มีความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็งแรง และค่าความต้านทานแรงฉีกขาดสูงที่สุด

กษมา จารุกัจจกร และคณะ (2012) [6] ได้ทำการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและเส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์ ปริมาณเส้นใยคือ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์กับยางธรรมชาติถูกเตรียมโดยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ชิ้นงานสำหรับทดสอบถูกเตรียมโดยเครื่องกดอัด สมบัติทางกล สัณฐานวิทยา และสมบัติการคงรูปของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์กับยางธรรมชาติถูกตรวจสอบ การทำอัลคาไลน์เซชันและการใส่สารช่วยให้เข้ากัน (ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์) ถูกใช้ในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ พบว่าคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีการทำอัลคาไลน์เซชันกับยางธรรมชาติ แสดงสมบัติทางกลที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่มีการดัดแปรกับยางธรรมชาติที่ทุกปริมาณเส้นใย แต่อย่างไรก็ตาม เวลาการคงรูปและเวลาการสกอร์ชของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีการทำอัลคาไลน์เซชันกับยางธรรมชาติและคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่มีการปรับปรุงกับยางธรรมชาติพบว่ามีค่าไม่ต่างกันมาก การใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปรับปรุงสมบัติทางกลของยางคอมโพสิต การเพิ่มขึ้นของเวลาการสกอร์ช และเวลาคงรูปของยางคอมโพสิตถูกพบเมื่อใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทำอัลคาไลน์เซชันและการใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ให้การปรับปรุงสมบัติทางกลของยางคอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

ศรุต ศรีสันติสุข และคณะ (2012) [7] การเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ไผ่แก้ว และคาร์บอนไฟเบอร์พบว่าเศษใยไผ่ หรือเส้นใยไผ่ชนิดสั้น ไม่ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง แม้สัดส่วนของเส้นใยไผ่จะเพิ่มมากขึ้น แต่จะช่วยเพิ่มโมดูลัสแรงดึงเล็กน้อยเมื่อสัดส่วนของเส้นใยไผ่มากกว่า 8.23 %wt ขึ้นไปเศษใยไผ่มีคุณสมบัติด้อยกว่าเส้นใยไผ่ชนิดยาว เพราะไม่ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง แต่ช่วยเสริมโมดูลัสแรงดึงเล็กน้อย ดังนั้นหากจะนำเศษใยไผ่ไปใช้เสริมแรง ต้องใช้กับวัสดุที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา และต้นทุนต่ำส่วนคาร์บอนไฟเบอร์มี

คุณสมบัติที่ดีที่สุด ส่วนเส้นใยโพลีเอทิลีนมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับใยแก้ว โดยมีโมดูลัสสูงกว่า แต่มีความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งอาจใช้ทดแทนใยแก้วในการเสริมแรงได้

ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์ และคณะ (2011) [8] การศึกษาการใช้ยางธรรมชาติช่วยปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์คอมโพสิตจากปอแก้วพบว่าความหนืดของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นเมื่อใส่เส้นใยปอแก้ว และเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางเช่นเดียวกันกับกรณี EPDM ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสของยังค์ของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นเมื่อใส่เส้นใยปอแก้ว กรณีการเติมยางทั้งยางธรรมชาติและ EPDM ที่ปริมาณยาง w และ AB เปอร์เซ็นต์จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสของยังค์สูงกว่าพอลิโพรพิลีน ที่ปริมาณยางสูงกว่านี้จะมีแนวโน้มลดลง ค่าความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหักและค่าความต้านทานการกระทำของพอลิโพรพิลีนจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใส่เส้นใยปอแก้ว แต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางทั้งกรณียางธรรมชาติและ EPDM โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณยางเท่ากับ CB % โดยน้ำหนัก ยาง EPDM จะให้ค่าความต้านทานการกระทำของวัสดุเชิงประกอบที่สูงกว่ายางธรรมชาติ

N.Venkateshwaran และคณะ (2011) [9] จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพฤติกรรม การดูดซึมน้ำจากวัสดุคอมโพสิตผสมใยกล้วยและปานศรนาเรียงเสริมแรงไฮบริด พบว่า ความยาวของวัสดุคอมโพสิตผสมอีพ็อกซีจากเส้นใยที่เหมาะสมมีขนาด 15 มม.และร้อยละ 16 ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงที่ 16.12 MPa , 57.53 MPa และ 13.25 KJ/m² ในการเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงของเส้นใยกล้วยและวัสดุคอมโพสิตผสมอีพ็อกซีมีค่าความต้านทานแรงดึงที่ 43.54 มากกว่าเส้นใยสังเคราะห์จากปาล์ม 12.3 % ซึ่งสูงกว่ากล้วย/อีพ็อกซี

รัตนา ดันทะเทิธรธรรม และคณะ (2010) [10] ได้ทำการศึกษาการเตรียมและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติ กับเส้นใยคาบมะพร้าวและปาล์มน้ำมัน โดยการใช้เส้นใยคาบมะพร้าวและทะลายปาล์มน้ำมัน เป็นสารตัวเติมเสริมแรง ด้วยการผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ ด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งโดยศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณเส้นใย (0, 10, 20, 30, 40 ส่วนในยางร้อยละ) และปริมาณเส้นใยต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ เช่น การทดสอบความต้านทานแรงดึง การทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด และการทดสอบความแข็ง รวมทั้งพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของคอมโพสิตยางคอมปาวด์ที่เตรียมขึ้น ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นว่าการผสมเส้นใยทั้งสองชนิดกับยางธรรมชาตินั้นส่งผลให้ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% และความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดมีค่าลดลงส่วนการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์ที่ผสมเส้นใยคาบมะพร้าวและทะลายปาล์มน้ำมันในปริมาณต่างๆพบว่าระยะเวลาที่ยางคอมปาวด์เริ่มสุกและเวลาที่ใช้อบยางให้สุกของยางคอมปาวด์ผสมเส้นใยนั้นมีย่าน้อยกว่ายางคอมปาวด์ไม่ใส่เส้นใยและมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเส้นใยส่วนค่าแรงบิดสูงสุดซึ่งแสดงถึงความแข็งของยางคอมปาวด์ที่ได้วัลคาไนซ์แล้วนั้นมีย่านเพิ่มขึ้นเนื่องจากการผสมเส้นใยลงในยางทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลยางลดลงส่งผลให้ยางวัลคาไนซ์แข็งขึ้น

H. Ku และคณะ (2010) [11] ได้ศึกษาคุณสมบัติแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์เสริมเส้นใยธรรมชาติโดยเป็นการพิจารณางานวิจัยที่มีการรายงานถึงผลกระทบของปริมาณเส้นใยการใช้สารเคมีเทคนิคการผลิตและตัวแปรในการดำเนินการที่มีต่อคุณสมบัติแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ จากการสังเกตพบว่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยอย่างเห็นได้ชัดความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มปริมาณเส้นใยหากอัตราส่วนของน้ำหนักเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าค่าที่เหมาะสมน้ำหนักโหลดจะกระจายไปทั่วเส้นใยมาก

ขึ้นซึ่งทำให้มีการยึดเกาะกับเรซินเมทริกซ์ได้ดีส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติแรงดึงที่ดีแต่หากเพิ่มอัตราส่วน น้ำหนักเส้นใยมากขึ้นกลับส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติแรงดึงลดลง

เอกรัตน์ รวยรวย และคณะ (2009) [12] สมบัติของโดยใช้วัสดุผสมจากยางพาราแท้ STR 20 ในปริมาณเท่ากับ 100 phr ต่อเส้นใยมะพร้าวในปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 และ 70 phr ตามลำดับ และผสมปริมาณสารเคมีในอัตราส่วนคงที่ นำมาทำการบดผสมด้วยเครื่องบด แบบสองลูกกลิ้ง แล้วอัดขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ได้เป็นแผ่นยางพาราเสริมเส้นใยมะพร้าวขนาด 30 X 30 เซนติเมตรหนา 0.5 เซนติเมตร ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้สมบัติการคงรูปและความหนาแน่นดีขึ้นทุกอัตราส่วน ส่วนของสมบัติความต้านทานแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด และความสึกหรอนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมปริมาณเส้นใยในอัตราส่วนที่เหมาะสมเท่านั้นและแผ่นวัสดุที่ได้ไม่มีการดูดซึมน้ำในทุกอัตราส่วนผสม จากผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปพัฒนาเป็นแผ่นกระเบื้องสำหรับปูพื้นและผนังสำหรับตกแต่งอาคารที่ต้องการความสวยงามตามแบบธรรมชาติได้ดี

เกศินี โกศลเมธี (2009) [13] งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิตเตรียมจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมกับเส้นใยปอกระเจาทำการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากพอลิโพรพิลีนและยางธรรมชาติและทำการทดสอบด้วยสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนโดยการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์และลักษณะสัญญาณวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณของพอลิโพรพิลีนระบบวัลคาไนซ์และปริมาณฟีนอลิครีซินพบว่า เมื่อใช้ปริมาณของพอลิโพรพิลีนมากขึ้นจะมีค่ามอดูลัส, ความเค้น ณ จุดขาด, ระยะยืด ณ จุดขาด, ความต้านทานต่อการฉีกขาด, การผิดรูปถาวรแบบดึงและความแข็งเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความทนต่อแรงดึงหลังจากผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อนและโอโซนและเปอร์เซ็นต์การบวมตัวมีค่าลดลงนอกจากนี้พบว่าระบบวัลคาไนซ์ไม่มีผลต่อความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้การเติมปริมาณฟีนอลิครีซินที่ปริมาณต่างๆดังนี้ 6, 8, 10 และ 12 phr

- พบว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ฟีนอลิครีซินในปริมาณ 8 phr สามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆได้ดีกว่าที่ปริมาณ 6 phr

- เมื่อเติมฟีนอลิครีซินมากกว่า 8 phr พบว่าสมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและค่าที่ได้อยู่ในช่วงเดียวกันดังนั้นการศึกษาในส่วนของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกพบว่าสูตรที่ให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่จะนำไป

เส้นใยที่ปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบดึงดีกว่าเส้นใยที่ปรับปรุงผิวด้วยเมทานอลและเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าลักษณะผิวเส้นใยมีการฉีกขาดออกจากกันของกลุ่มเส้นใยทำให้เกิดเป็นเส้นใยขนาดไมครอนมากมายส่งผลให้เส้นใยสามารถยึดเกาะกับเมทริกซ์ได้ดีที่สุดศึกษาอิทธิพลของความยาวเส้นใยต่างๆดังนี้ 1, 3 และ 6 cm พบว่าเมื่อใช้เส้นใยที่มีความยาว 1 และ 3 cm สามารถปรับปรุงสมบัติความทนต่อแรงดึงความต้านทานต่อการฉีกขาดความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบดึงและการบวมตัวที่ดีขึ้นนอกจากนี้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้ยืนยันได้ว่าการเติมเส้นใยไม่ได้ไปขัดขวางการเกิดการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติและ การเปลี่ยนสัญญาณวิทยาของยางธรรมชาติเนื่องจากมีอนุภาคยางธรรมชาติกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องของพอลิโพรพิลีนเช่นเดียวกับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกอย่างใดก็ตามเมื่อทดสอบสมบัติความทนต่อ

แรงดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเมื่อนำกลับมาหลอมใช้ใหม่จำนวน 3 รอบพบว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมได้สามารถนำกลับมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้และมีสมบัติความทนต่อแรงดึงหลังจากผ่านการขึ้นรูปซ้ำลดลงมากขึ้นตามจำนวนครั้งของการขึ้นรูปซ้ำ

M. Jacob และคณะ (2008) [14] ศึกษาผลของการใส่เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวเส้นใยแบบการปรับปรุงอัลคาไลน์เซชัน ต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสมบัติทางสัญญาณวิทยาของยางคอมโพสิต พบว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใย 2 ชนิดที่ผ่านการทำปรับปรุงผิวเส้นใยมีค่าทอร์กสูงสุดค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยืดตัวก่อนขาด ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด และค่าความแข็งแรงมากกว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใย 2 ชนิดแต่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร เนื่องมาจากการยึดติดที่ีระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ จากการทดสอบทางสัญญาณวิทยาของคอมโพสิต พบว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใย 2 ชนิดที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวเส้นใยมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์ ในขณะที่คอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงผิวของเส้นใย มีเส้นใยที่หักและติดอยู่กับเมทริกซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงผิวเส้นใยส่งผลให้แรงยึดติดระหว่างเส้นใยทั้ง 2 ชนิดและยางธรรมชาติดีขึ้น

ณัฐพล ไพโรจน์ (2008) [15] ได้ทำการศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยาง STR 20 ผสมยางครัมในช่วง 50 - 150 phr และกรรมวิธีในการขึ้นรูปบล็อกปูพื้นซึ่งผิวด้านบนทำจากวัสดุผสมยางธรรมชาติผสมยางครัมและส่วนฐานทำจากพลาสติกโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณยางครัมในยางวัลคาไนซ์มากขึ้นส่งผลให้เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูปมีค่าลดลงเช่นเดียวกับความต้านทานต่อการฉีกขาดและการกระเด็นตัวในทางตรงข้ามกลับพบว่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นจากการวิจัยพบว่าอุณหภูมิการขึ้นรูปส่วนฐานของบล็อกปูพื้นที่ผลิตจากพลาสติกโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เหมาะสมคือ 150 °C และเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปพลาสติกส่วนฐานแปรตามความหนาของบล็อกปูพื้นสำหรับการอัดขึ้นรูปยางคอมเพานด์ที่ผสมยางครัมลงบนส่วนฐานพลาสติกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปยางคอมเพานด์คือ 170 °C และพลาสติกคือ 130 °C จากการทดสอบพบว่าค่าการกระเด็นตัวของบล็อกปูพื้นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางครัมลดลงในทางตรงข้ามเมื่อส่วนฐานของบล็อกปูพื้นหนาขึ้นค่าการกระเด็นตัวของบล็อกปูพื้นลดลงส่วนต้นทุนด้านวัสดุในการผลิตบล็อกปูพื้นลดลงเมื่อใช้พลาสติกหนาขึ้นและปริมาณยางครัมเพิ่มขึ้นต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตของบล็อกปูพื้นลดลงเมื่อความหนาของพลาสติกมากขึ้นแต่ต้นทุนด้านพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางครัมเพิ่มขึ้น

เล็ก สีคง และคณะ (2006) [16] ได้ศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยฝ้ายและทัลคัมโดยการเป็นการเอาความยืดหยุ่นของยางรวมกับความแข็งแรงและความเหนียวของเส้นใยเสริมแรงไว้ด้วยกันจะทำให้วัสดุผสมนี้มีความแข็งแรงขึ้นโดยจะมีคุณสมบัติคืออ่อนตัวยืดหยุ่นมีความเหนียวและความแข็งแรงโดยการบดยางให้นุ่มประมาณ 1 นาทีเติม ZnO, Stearic acid, MBTS, TMTD และ Sulphur บดรวมกันประมาณ 20 นาทีเติมใยฝ้ายและทัลคัมจะบดยางผสมกับทัลคัมให้เข้ากันก่อนที่จะเติมใยฝ้ายลงไปนำเอาสูตรยางที่ผสมกันเสร็จออกจากเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two rolls milling) ทั้งไว้ประมาณ 24 ชม. แล้วนำไปทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมทดสอบความแข็งแรงของวัสดุผสมและทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมที่ค่าความเค้นเริ่มกระจายสม่ำเสมอที่จุดวิกฤติอยู่ที่ระดับปริมาณเส้นใยฝ้าย 10 phr ผสมกับทัลคัม 20 phr และที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 10 phr ผสมกับทัลคัม 50 phr ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมเมื่อเทียบกับยาง STR 5L ลดลง

75.95% และ 66.44% ตามลำดับ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ 200%ของการยืดของวัสดุผสมที่จุดวิกฤติเพิ่มขึ้น 148.23% และ 193.33% ตามลำดับ

L. Mathew และคณะ (2007) [17] ศึกษาสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปอปิดและยางธรรมชาติ เส้นใยปอปิดผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 4 ชั่วโมง การทำอัลคาไลน์เซชันส่งผลให้ค่าทอร์กสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีลักษณะที่เหมาะสมในการเสริมแรง และเมื่อเทียบที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน สมบัติทางกลของคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันให้ค่าสูงกว่าคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ทำอัลคาไลน์เซชัน จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเส้นใย พบว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีขนาดเล็กลงเนื่องมาจากการหลุดไปของลิกนิน และส่วนที่เป็นกรดไขมันส่งผลให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระและเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกล

H. Ismail และคณะ (2009) [18] ศึกษาผลของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิทระหว่างเยื่อกระดาษ (paper sludge) และยางธรรมชาติพบว่าคอมโพสิทของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ให้ค่าทอร์กสูงสุดค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 100% strain) ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 300% strain) และค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าคอมโพสิทของยางธรรมชาติ เนื่องมาจากการยึดติดที่ดีระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของเยื่อกระดาษกับหมู่อีพ็อกซีของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์

M. Jacob และคณะ (2006) [19] รายงานผลของการดัดแปรด้วยความร้อนต่อสมบัติความทนทานต่อแรงดึงและลักษณะการบวมตัวของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และยางธรรมชาติเส้นใยป่านศรนารายณ์ถูกนำมาถักเป็นผืนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมงค่าความทนทานต่อแรงดึงค่าความทนทานต่อการฉีกขาดและค่าความแข็งของคอมโพสิทที่มีการดัดแปรโดยใช้ความร้อนมีค่าสูงกว่าคอมโพสิทที่ไม่มีการดัดแปรด้วยความร้อนเนื่องมาจากการให้ความร้อนแก่เส้นใยจนถึงอุณหภูมิที่พอเหมาะสามารถเพิ่มความสามารถในการเกิดผลึกของเส้นใยได้ การดัดแปรด้วยความร้อนส่งผลให้ความชื้นของเส้นใยลดลงและสามารถเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติได้จากการทดสอบสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทแสดงให้เห็นว่าการดัดแปรด้วยความร้อนสามารถช่วยให้เส้นใยและยางธรรมชาติเข้ากันได้ดีขึ้น

N. Lopattananon และคณะ (2006) [20] เตรียมคอมโพสิทระหว่างเส้นใยสับปะรดและยางธรรมชาติโดยเส้นใยสับปะรดถูกดัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 1 3 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 18 ชั่วโมงพบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์และสมบัติความทนทานต่อแรงดึงได้โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้เปอร์เซ็นต์การปรับปรุงความแข็งแรงของคอมโพสิทสูงที่สุดคือ 28 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ทำอัลคาไลน์เซชันการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถกำจัดลิกนินและสารประกอบพวกซึ้งออกไปจากเส้นใยได้ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มโอกาสให้เส้นใยและยางธรรมชาติเกิดกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกลและส่งผลให้สมบัติทางกลของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจากการลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทพบว่าคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ที่ดีซึ่งสังเกตได้จากมีส่วนของยางติดอยู่บนพื้นผิวของเส้นใย

จากงานวิจัยทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า การศึกษาวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติได้ถูกศึกษาอย่างแพร่หลาย ทั้งชนิดของเมทริกซ์ ชนิดของเส้นใยที่เสริมแรง ซึ่งศึกษาถึงผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล ดังนั้นในโครงการวิจัยชิ้นนี้จะศึกษา กระบวนการผลิตยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยเส้นใยเส้นใยมะพร้าว เส้นใยตาลโตนดและเส้นใยปาล์มน้ำมัน ผลของชนิดของเส้นใย ปริมาณการเติมเส้นใยและความยาวของเส้นใยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล