

สารตัวเติมในยางธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ชีวมวล

Filler in Natural Rubber from Waste Biomass

บุญญานิช อินทรพัฒน์

ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (ศูนย์เครือข่ายภาคใต้)

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: punyanich.i@psu.ac.th

บทคัดย่อ

สารตัวเติม เช่น เขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยางล้อรถ ยางในทางวิศวกรรม อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ เนื่องจากช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีด้านอื่นด้วย เช่น ความทนทานต่อการขีดถู ความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม ความทนทานต่อสารเคมี เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานนั้นๆ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม สารตัวเติมที่ใช้ในปัจจุบัน เช่น เขม่าดำ ซึ่งผลิตจากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล (น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ) ที่มีราคาสูงขึ้นและกำลังจะหมดไปจากโลกในอนาคตอันใกล้ รวมทั้งอันตรายจากก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกระบวนการผลิตส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้มีอรรถลดปริมาณการใช้ลง ดังนั้นการนำชีวมวลจากส่วนที่เหลือใช้ทางการเกษตร การปศุสัตว์ ขยะจากชุมชน และของเสียบางประเภทจากอุตสาหกรรม สำหรับนำมาใช้ทดแทนสารตัวเติมในปัจจุบัน จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม แหล่งวัตถุดิบมีมาก และหาได้ง่าย รวมทั้งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงนำไปสู่การประยุกต์ใช้ชีวมวลเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ บทความนี้ได้อธิบายถึงนิยามของวัสดุชีวมวล ข้อดี และการพิจารณาคูณสมบัติชีวมวลเพื่อนำมาใช้เป็นสารตัวเติม รวมทั้งตัวอย่างการใช้ชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากแหล่งต่างๆ เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและอนุพันธ์ที่มีผลต่อสมบัติของยางที่ได้

คำสำคัญ : สารตัวเติม ยางธรรมชาติ ชีวมวล

Abstract

Fillers such as carbon black, silica and calcium carbonate are an essential composition in producing various kinds of rubber products such as tire, rubber engineering, sport equipments and so on. This is due to its ability to reinforce materials that causes not only improving of the strength but also other physical and chemical properties (i.e., abrasion, weathering and chemical resistance) yielding a suitable rubber products in various applications requiring. However, fillers are normally commercial products, particular carbon black produced from fossil fuels source (i.e., clude oil and natural gas) that is high cost and tends to be lost in the near future including creating source of greenhouse gases from manufacturing process as well. Hence, the consumption of commercial filler is going to decrease. Therefore, using of waste biomass from agricultural products, husbandry products, and some kind of communities and industries wastes is the right alternative for the replacement of commercial fillers used in the present because of its suitable chemical compositions, a lot of materials with easily obtainable and environmental friendly of biomass. This article has provided a definition, advantages and characteristic of the biomass that can be used as filler in rubber. In addition, examples of biomass used as fillers in natural rubber and its derivatives from different sources on the properties of rubber are presented.

Keywords: Filler, Natural Rubber, Biomass

บทนำ

ประเทศไทยเป็นทั้งผู้ผลิตและผู้ส่งออกยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มากที่สุดอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งความต้องการใช้ยางทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยคาดการณ์ว่าความต้องการใช้ยางธรรมชาติจะเพิ่มสูงขึ้นจาก 9 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2553 เป็น 12.5 ล้านตันต่อปี ในปี พ.ศ. 2556 เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถนำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิดครอบคลุมกับทุกอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (ยางล้อ และยางในรถ) อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม (สายพาน ท่อยาง และอะไหล่รถยนต์) อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ (ถุงมือ สายยาง และหุ่นยาง) อุตสาหกรรมกีฬา (ผ้ายืด ลูกเทนนิส และบอลต่างๆ) และอุตสาหกรรมอื่นๆ (รองเท้า ฟอรั่มเจอร์ และยางพองน้ำ) เป็นต้น ซึ่งในผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่จะต้องมีการผสมสารเคมีโดยเฉพาะสารตัวเติม เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน หรือสมบัติการแปรรูป ฯลฯ ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน นอกจากความต้องการปรับปรุงสมบัติต่างๆแล้ว การใส่สารตัวเติมลงไปยังมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิตอีกด้วย ทำให้การใช้สารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ เป็นที่นิยมและแพร่หลายยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางด้วยการผสมสารตัวเติมหรือวัสดุเสริมแรง (Fillers or reinforce agents) เช่น เขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ในการทำผลิตภัณฑ์ยาง

สารตัวเติมในยาง มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่ถูกเติมลงไปในยางเพื่อวัตถุประสงค์หลายอย่าง เช่น เป็นสารเสริมแรงในยาง สารช่วยในกระบวนการผลิตและขึ้นรูปยาง รวมทั้งเป็นสารลดต้นทุนด้านวัตถุดิบ ทั้งนี้เพราะสารตัวเติมส่วนใหญ่มีราคาถูกกว่ายางธรรมชาติ โดยทั่วไปสารตัวเติมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ สารตัวเติมกลุ่มที่เสริมแรง (ได้แก่ เขม่าดำ ซิลิกา และเส้นใยแก้ว) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กและสามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับยางได้ดี ส่วนสารตัวเติมกลุ่มที่ไม่เสริมแรง (ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เคลย์ และทัลคัม) จะเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่และมีอันตรกิริยากับยางต่ำ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญทั้งที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรงและไม่เสริมแรง โดยทั่วไปปริมาณการใช้สารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยางมีตั้งแต่ 20-150 ส่วนต่อยางหนึ่งร้อยส่วน (Part per hundred

rubber, phr) ซึ่งปริมาณที่ใช้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวเติม จุดประสงค์ของการใช้สารตัวเติม สมบัติและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

แต่ถึงอย่างไรก็ตาม สารตัวเติมส่วนใหญ่ที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ยางเป็นวัสดุที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ ตัวอย่างเช่น การใช้สารตัวเติมเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมหลักในการทำผลิตภัณฑ์ประเภทยางล้อและยางทางวิศวกรรม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผลิตจากกระบวนการเผาไหม้ของน้ำมันปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติ ทำให้สามารถเกิดการปลดปล่อย ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) จากกระบวนการผลิตออกสู่บรรยากาศ หรือสารตัวเติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต ที่เตรียมได้จากการขุดเจาะหรือระเบิดของชั้นดินและภูเขา รวมทั้งการผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งต้องใช้วัตถุดิบ สารเคมี และพลังงานในกระบวนการผลิตสารตัวเติมอย่างมหาศาล ส่งผลต่อระบบนิเวศที่ถูกทำลาย ทรัพยากรที่ลดลง และอาจมีการปนเปื้อนของสารมลพิษต่างๆ สู่สิ่งแวดล้อมได้

ดังนั้นในการทำผลิตภัณฑ์ยางนอกจากการปรับปรุงสมบัติแล้ว ยังจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยของตัวผลิตภัณฑ์ ความปลอดภัยต่อผู้ผลิตและผู้บริโภคที่เกี่ยวข้อง ดังจะเห็นได้จากการออกกฎหมายและข้อบังคับใหม่ๆ โดยรัฐบาลหรือหน่วยงานต่างๆ ทั้งในและต่างประเทศ เช่น ห้ามการใช้สารประกอบอะโรมาติกในผลิตภัณฑ์ยาง หรือลดการใช้ส่วนประกอบที่ผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นต้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ประเภทยางล้อรถ [1] และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ยางในทางวิศวกรรม และอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีความปลอดภัยและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green product) รวมทั้งจะมีผลต่อการเพิ่มภาพลักษณ์ที่ดีในการแข่งขันทางการค้าของผู้ผลิตและผลิตภัณฑ์ด้วย ส่งผลทำให้ภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้มีการพัฒนาทั้งกระบวนการผลิตและวัตถุดิบที่นำมาทดแทนสารตัวเติมในทางการค้า เพื่อเพิ่มขีดความสามารถให้กับผู้ประกอบการสำหรับการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางและรองรับกับมาตรการทางสิ่งแวดล้อมของประเทศคู่ค้า

แนวโน้มการนำวัสดุชีวมวลมาใช้ทดแทนสารตัวเติมในทางการค้าจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ที่มีการหมุนเวียนและเกิดขึ้นได้ใหม่ตลอดเวลา ใช้แล้วไม่หมดไปเหมือนเช่นวัตถุดิบจากแหล่งฟอสซิล หรือ

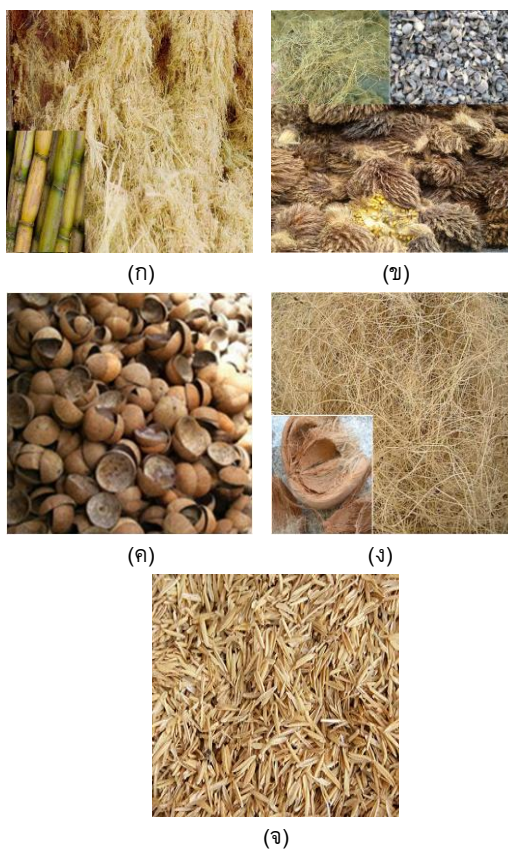
ถ่านหิน ซึ่งนอกจากจะช่วยลดปัญหาขยะมูลฝอยของชีวมวลที่เกิดขึ้นแล้ว ยังเป็นการสร้างรายได้ให้แก่ประชากรอีกประการหนึ่งด้วย เมื่อพิจารณาถึงคำว่า “ชีวมวล” อาจเข้าใจว่าเป็นสิ่งใกล้ตัว แต่โดยแท้จริงแล้วเป็นสิ่งของที่อยู่กับใกล้ตัว และพบเจอได้อยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือจากการแปรรูปสินค้า ได้แก่ ฟางข้าว ชานอ้อย กะลามะพร้าว เศษไม้ ชี้เลื่อย ฯลฯ ยังรวมถึงการเลี้ยงสัตว์ มูลสัตว์ และของเสียจากการอุปโภคและบริโภคจากแหล่งชุมชน หรือจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท ซึ่งวัสดุชีวมวลดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารตัวเติมได้ จึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของบทความนี้ที่มุ่งเน้นการเสนอแนวทางเลือกใหม่และศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ชีวมวลที่มีมากในประเทศไทย เนื่องจากชีวมวลหลายชนิด เช่น แกลบ เส้นใยปาล์ม เปลือกไข่ไก่ ฯลฯ มีคุณสมบัติที่สามารถใช้เป็นสารตัวเติมได้ นอกจากนี้ข้อดีของชีวมวลที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้ชีวมวลเป็นแหล่งวัตถุดิบอีกทางเลือกหนึ่งที่มีข้อได้เปรียบทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์และด้านสิ่งแวดล้อม สามารถนำไปสู่การพัฒนาอุตสาหกรรมยางและสารตัวเติมได้อย่างยั่งยืนบนพื้นฐานเศรษฐกิจพอเพียงของประเทศอย่างแท้จริง

ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล เป็นคำที่ถูกบัญญัติขึ้นเมื่อราวปี ค.ศ. 1975 เพื่อใช้อธิบายถึงการนำวัตถุดิบที่มีตามธรรมชาติมาใช้เป็นแหล่งพลังงานใหม่อีกครั้ง และเริ่มเป็นที่สนใจตั้งแต่ต้นยุค 1970 เป็นต้นมา เนื่องจากว่าในยุคนั้นได้มีการคาดการณ์ว่าน้ำมันอาจจะมามีราคาพุ่งสูงถึงกว่า 100 ดอลลาร์ต่อบาร์เรล และหลังจากปี 1980 พลังงานชีวมวลก็เป็นที่นิยมในนำไปผลิตไฟฟ้าทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดาอย่างแพร่หลาย [2] สำหรับการนำชีวมวลมาประยุกต์ใช้ประโยชน์เพื่อพัฒนาสมบัติและผลิตภัณฑ์ยางเริ่มมีการศึกษาในช่วงระยะเวลาประมาณ 15-20 ปีที่ผ่านมา

สารชีวมวล ประกอบด้วยคำสองคำ คือ “ชีว” และ “มวล” โดย “ชีว” คือ สิ่งมีชีวิต เช่น มนุษย์ พืช และสัตว์ ส่วน “มวล” คือ วัสดุสิ่งของต่างๆ ดังนั้นชีวมวล หมายถึงวัตถุหรือสารที่ได้จากสิ่งมีชีวิต หรือธรรมชาติโดยตรง เช่น ข้าว อ้อย ข้าวโพด และไม้ เป็นต้น หรือเป็นเศษวัสดุติดจากของเหลือใช้ เช่น แกลบได้จากข้าวเปลือกกะลามะพร้าวได้จากลูกมะพร้าวและมูลไก่ได้จากการเลี้ยงไก่ เป็นต้น สำหรับความหมายอีกนัยของชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานเนื่องจากพืชจะต้องอาศัยแสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์แสงและ

เจริญเติบโต จากนั้นจึงแปรเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของแข็งหรือเป็นมวลในทุกส่วน เช่น กิ่ง ก้าน ใบ ลำต้น ราก หรือแปรสภาพกลายเป็นของเหลว เช่น น้ำมันพารา น้ำมันหอมระเหย น้ำมันพืช เป็นต้น จะเห็นว่าชีวมวลมีความหมาย ที่ค่อนข้างกว้าง เพื่อให้มีความกระชับมากและเข้าใจยิ่งขึ้น ได้นิยามความหมายชีวมวลในที่นี้ว่า “สารทุกรูปแบบที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต โดยไม่นับการกลายเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลไปแล้ว” เช่น สิ่งที่ได้หรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร (เช่น แกลบ ชานอ้อย ฟางข้าว) จากสัตว์ (เช่น กระดองปลาหมึก เปลือกไข่ ขนสัตว์) หรือแม้กระทั่งมูลสัตว์ต่างๆ และของเหลือจากภาคอุตสาหกรรมหรือจากชุมชนบางชนิด (เช่น กากน้ำตาล ชี้เลื่อย เส้นใยปาล์ม) ซึ่งในบทความนี้ได้ให้ความสำคัญกับชีวมวลในประเด็นเศษวัสดุที่ได้จากส่วนที่เหลือใช้จากการเกษตรและปศุสัตว์ ที่มีมากในประเทศไทย เพื่อเป็นการนำสิ่งที่ไม่ใช่ประโยชน์มาเพิ่มมูลค่าและสร้างประโยชน์อีกครั้ง ตัวอย่างวัสดุเหลือใช้ชีวมวลจากการเกษตรและปศุสัตว์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เศษวัสดุเหลือใช้ชีวมวลที่ได้จากการเกษตรและปศุสัตว์



(จ)



(ข)



(ค)



(ง)



(ฉ)

- (ก) ชานอ้อยได้จากการผลิตนํ้าตาลทราย
- (ข) เส้นใยปาล์ม ทะลายปาล์ม และกะลาปาล์ม ได้จากกระบวนการสกัดนํ้ามัน
- (ค), (ง) กะลามะพร้าว กาบและเส้นใย ได้จากการผลิตกะทิและอาหาร
- (จ) แกลบได้จากการสีข้าว
- (ฉ) เปลือกหอยได้จากอุตสาหกรรมอาหารและชุมชน
- (ช), (ซ) เปลือกไข่และขนไก่ได้จากอุตสาหกรรมอาหารและชุมชน
- (ฅ) กระดองปลาหมึกได้จากอุตสาหกรรมอาหารและชุมชน
- (ญ) กระดองปูได้จากอุตสาหกรรมอาหารและชุมชน

รูปที่ 1 (ต่อ) เศษวัสดุเหลือใช้ชีวมวลที่ได้จากการเกษตรและปศุสัตว์

ข้อดีของการใช้สารตัวเติมชีวมวล

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการปลูกพืชและทำปศุสัตว์เป็นอาชีพพื้นฐานของประชากรส่วนใหญ่ของประเทศ จึงมีเศษวัสดุที่เกิดจากผลผลิตทางการเกษตรและปศุสัตว์อย่างมากมาย ทั้งที่สามารถใช้เป็นประโยชน์ทางการค้าได้ เช่น ไม้ ข้าว อ้อย ปาล์ม ฯลฯ และบางส่วนเป็นของเหลือใช้หรือใช้ไม่ได้ เช่น ชี้อ้อย แกลบ ชานอ้อย กากของผลปาล์ม ปัจจุบันการนำชีวมวลเหลือใช้มาเป็นวัสดุทดแทนสารตัวเติมที่มีใช้กันอยู่ อาจมีอุปสรรคบ้าง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการกระจายตัวของแหล่งชีวมวลในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมกับพื้นที่นั้นๆ รวมทั้งการนำเทคโนโลยีหรือความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการนำชีวมวลมาใช้ เช่น กระบวนการทางเคมี (ได้แก่ การสกัด การเผา และการปรับปรุงผิวด้วยวิธีต่างๆ) และกระบวนการทางกล (ได้แก่ การบด และการแยกขนาด) เพื่อให้สารตัวเติมจากชีวมวลมีคุณลักษณะและคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสารตัวเติมทางการค้ามากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตสารตัวเติมในทางการค้าที่มีความซับซ้อนและใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ถือได้ว่า ชีวมวลมีความสะดวกและได้เปรียบมากกว่าทั้งในเรื่องของแหล่งวัตถุดิบ และขั้นตอนในการผลิต ข้อมูลในปี พ.ศ. 2550-2551 พบว่า ในประเทศไทยมีชีวมวลเหลือใช้จากการเกษตรสูงถึงประมาณ 158,035,000 ล้านตัน [3] ซึ่งการนำเศษวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ จะก่อให้เกิดผลดีทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์ การพัฒนาอุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อมต่อประเทศ ดังนี้

1) สารตัวเติมชีวมวลเกิดจากการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การปศุสัตว์ และอุตสาหกรรมบางประเภทมาผลิต ซึ่งช่วยให้สามารถลดขั้นตอนในกระบวนการผลิตสารตัวเติม ตลอดจนช่วยลดการใช้พลังงาน ลดการเกิดสารมลพิษ และของเสียที่เกิดจากกิจกรรมหรือจากกระบวนการผลิต นอกจากนี้วัสดุชีวมวลยังสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาตามวัฏจักรชีวิตของชีวมวลจึงไม่มีวันหมดสิ้น

2) สารตัวเติมชีวมวลสามารถผลิตได้ในประเทศไทย ช่วยลดการนำเข้าสารตั้งต้นในการผลิตจากต่างประเทศ ช่วยให้เกิดการจ้างงานรวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องมีรายได้เพิ่มขึ้น

3) เป็นการสร้างและพัฒนาภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งเป็นสร้างงานขึ้นมาใหม่จากการใช้ประโยชน์จากชีวมวล และทำให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เพิ่มขึ้น

4) สารตัวเติมชีวมวลมีราคาถูก น้ำหนักเบา และชีวมวลบางชนิดมีความหนาแน่นต่ำกว่าสารตัวเติมในเชิงพาณิชย์ ทำให้สามารถใส่สารชีวมวลในการทำผลิตภัณฑ์ยางได้ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเจือจางเนื้อยางทำให้ต้นทุนทางด้านวัสดุต่อหน่วยลดลง นอกจากนี้ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นโดยทั่วไปจะส่งผลทำให้ผิวผลิตภัณฑ์เรียบและลดการบวมพองของชิ้นงานจากกระบวนการแปรรูปและสารเคมีได้

5) การใช้สารตัวเติมชีวมวลทดแทนสารตัวเติมในทางการค้า เช่น เขม่าดำ จะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต ที่จะส่งผลต่อสภาวะโลกร้อนและลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

6) สารตัวเติมชีวมวลมีปริมาณองค์ประกอบของกำมะถันที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการนำมาผลิตเขม่าดำ ดังนั้นการปลดปล่อยของสารประกอบของกำมะถันออกสู่บรรยากาศและสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงน้อยมาก ทำให้ลดก๊าซที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและการเกิดฝนกรดได้ **คุณสมบัติของชีวมวลที่มีผลต่อการนำมาใช้เป็นสารตัวเติม**

การนำวัสดุเหลือใช้จากชีวมวลมาประยุกต์ใช้เป็นสารตัวเติมนั้นจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้จากคุณลักษณะในด้านต่างๆ ของชีวมวลนั้นๆ เนื่องจาก ชีวมวลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะอย่าง เช่น ลักษณะทางเคมีและลักษณะทางกายภาพ ความเสถียร และ แหล่งวัตถุดิบ เป็นต้น จากปัจจัยดังกล่าวนอกจากจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยางแล้ว ยังส่งผลต่อความสะดวก ในการนำไปใช้งาน ความสำเร็จในการผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์และกระบวนการเตรียมชีวมวลเพื่อใช้เป็นสารตัวเติม ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาโดยทั่วไปประกอบด้วย

1. ลักษณะทางเคมีของชีวมวล (Chemical characteristic of biomass) สำหรับการนำชีวมวลไปเป็นสารตัวเติมจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี เนื่องจากองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีนี้มีผลต่อการเสริมแรงของยางโดยตรง ซึ่งสามารถแบ่ง ได้เป็น 2 ประเภทคือ

1.1 องค์ประกอบพื้นฐานของธาตุต่างๆ (Elemental analysis) เช่น ร้อยละของ C, O, N, Si, Al และ Ca เป็นต้น ซึ่งในการพิจารณาองค์ประกอบธาตุหลักที่สำคัญสำหรับ

นำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ ธาตุคาร์บอน ซึ่งจากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าธาตุคาร์บอนพบมากในกะลาปาล์มและขังข้าวโพด ดังนั้นการมีปริมาณคาร์บอนสูงซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเขม่าดำ จึงมีความเหมาะสมในการนำมาเตรียมและใช้เป็นสารตัวเติมประเภทเขม่าดำได้ โดยจะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลต่างๆ โดยเฉพาะโมดูลัส ความทนต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการขีดถูสูงขึ้น เป็นต้น

นอกจากธาตุคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุที่สำคัญ เช่น ซิลิกอน แคลเซียม และอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในสารตัวเติม ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และอะลูมิเนียมซิลิเกต ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบธาตุอื่นๆ ที่สามารถนำมาพิจารณาร่วมด้วย ได้แก่ ออกซิเจน และไนโตรเจน ซึ่งมีผลต่อการเสริมแรงของสารตัวเติมได้เช่นกัน เนื่องจากธาตุเหล่านี้ มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของสารตัวเติมชีวมวล ที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีต่างๆ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล คาร์บอกซิลิก คีโตน และเอมีน เป็นต้น โดยหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีความว่องไวทางปฏิกิริยา (Surface activity) ทำให้มีผลต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยางได้และยังมีผลต่อลักษณะ การวัลคาไนซ์ของยางอีกด้วย

การพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐาน ยังสามารถทำได้ในรูปของสารประกอบออกไซด์ เช่น SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 เป็นต้น 1.2 องค์ประกอบทั่วไป (Proximate analysis) คือ ความชื้น ปริมาณเถ้า และความหนาแน่น เป็นต้น หากสารตัวเติมมีความชื้นสูง จะบ่งชี้ถึงความสามารถดูดซึมน้ำหรือดูดความชื้นจากสิ่งแวดล้อมของสารตัวเติมได้ดี ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะของสารตัวเติมจึงเปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามระดับการดูดซึมน้ำ นอกจากนี้ความชื้นยังมีผลต่อกระบวนการผลิตและการแปรรูป รวมทั้งการกระจายตัวและลดประสิทธิภาพการเสริมแรงของสารตัวเติมได้เช่นกัน

นอกจากองค์ประกอบของชีวมวลที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางแล้ว ค่าความเป็นกรด-ด่าง สามารถส่งผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางได้โดยตรง ซึ่งสารตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะส่งผลต่อเวลาการวัลคาไนซ์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนสารตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นด่างจะส่งผลให้เวลา การวัลคาไนซ์ลดลง ทำให้มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปของยางคอม-ปาวด์

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลชนิดต่างๆ [4]

องค์ประกอบทั่วไป (%)	ชานอ้อย	แกลบข้าว	ฟางข้าว	ขังข้าวโพด	เส้นใยปาล์ม น้ำมัน	ทะลายปาล์ม เปล่า	กะลาปาล์ม
ความชื้น	50.73	8.20	10.00	7.00	31.84	58.60	12.00
สิ่งระเหย	41.98	58.90	60.70	70.40	48.61	30.44	68.20
เถ้า	1.43	13.20	10.39	1.40	6.35	2.92	3.50
องค์ประกอบธาตุ (%)							
C	21.33	39.10	38.17	43.70	31.35	15.11	44.44
H	3.06	4.59	5.02	5.21	4.57	1.51	5.01
N	0.12	0.18	0.32	0.19	0.02	2.57	0.28
O	23.29	34.70	35.28	42.50	25.63	19.13	34.70

2. ลักษณะทางกายภาพของชีวมวล (Physical characteristic of biomass) ควรมีการพิจารณาสำหรับ การนำชีวมวลใช้เป็นสารตัวเติมในยาง ดังนี้

2.1 มีลักษณะที่เหมาะสมและง่ายต่อการนำไปใช้งาน เช่น ในรูปของเส้นใย ผง แผ่นและเม็ด เป็นต้น

2.2 ขนาด และพื้นที่ผิวจำเพาะของชีวมวล เนื่องจากสารตัวเติมที่มีขนาดเส้นใยหรืออนุภาคเล็กจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยของน้ำหนัก (พื้นที่ผิวจำเพาะ) สูง ส่งผลให้มีพื้นที่ที่สามารถเกิดแรงกระทำหรืออันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น

2.3 โครงสร้างของชีวมวล เนื่องจากชีวมวลที่มีองค์ประกอบทางเคมีเช่นเดียวกับเขม่าดำ และซิลิกา นั้นลักษณะอนุภาคสารจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ โดยมีการเกาะกลุ่มระหว่างอนุภาคเกิดเป็นแอกกริเกตและแอกโกลเมอเรต ซึ่งระดับการเกาะกลุ่มนี้จะส่งผลต่อการจัดตัวให้มีโครงสร้างต่ำ (Low structure) และโครงสร้างสูง (High structure) ทำให้มีผลต่อการกระจายตัวและสมบัติเชิงกลของยางเช่นกัน ตัวอย่างของสารตัวเติมจากชีวมวลที่สามารถเกิดในลักษณะดังกล่าวได้ คือ เถ้าแกลบ เถ้ากะลามะพร้าว และเถ้าชานอ้อย ซึ่งจัดเป็นสารตัวเติมประเภทเขม่าดำ และซิลิกา ตามลำดับ การวิเคราะห์โครงสร้างของสารตัวเติมสามารถหาได้จากเทคนิคการดูดซึมน้ำมันไดบิวทิลพาทาเลตและค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D2414 และ ASTM D1510 ตามลำดับ

2.4 สี โดยในการทำผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีจำเป็นต้องเลือกใช้สารตัวเติมที่มีสีขาวหรือสีอ่อน หรือหากไม่คำนึงถึงสีก็สามารถใช้สารตัวเติมที่มีสีดำได้

2.5 ความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น ไม่มีโลหะหนักปนเปื้อน สารที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ติดไฟยาก และไม่เกิดการระเบิด เป็นต้น [5]

สารตัวเติมชีวมวลในยางธรรมชาติและอนุพันธ์

ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะใหญ่ คือ สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler) และสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นผงหรือเป็นเม็ด (Particulate filler)

1. เส้นใยชีวมวล

การนำเส้นใยชีวมวลที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น เส้นใยใบสับปะรด (Pineapple leaf fiber) [6] เส้นใยไผ่ (Bamboo fiber) [7], [8] เส้นใยมะพร้าว (Coconut fiber) [9] เส้นใยชานอ้อย (Bagasse fiber) [10], [11], [12] เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Palm oil fiber) [13], [14], [15], [16] เป็นต้น เนื่องจากเส้นใยเหล่านี้มีความแข็งแรง หาได้ง่าย และราคาไม่แพงตามที่ Murali Mohan Rao และ Mohana Rao [17] ได้รายงานความทนต่อแรงดึงของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าชีวมวลแต่ละชนิดจะมีลักษณะทางเคมีเฉพาะและมีสมบัติเชิงกลที่ดี

ตัวอย่างการนำเส้นใยปาล์มน้ำมันไปใช้เป็นสารตัวเติม
ในยางธรรมชาติ

ในปี พ.ศ. 2553 รัตนา ตันตเทอดธรรม และคณะ [18]
ได้ศึกษาการใช้เส้นใยที่เตรียมจากวัตถุดิบเหลือใช้ทาง
การเกษตรเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยศึกษา

ผลของชนิดของเส้นใยและปริมาณเส้นใย 2 ชนิด คือ เส้นใย
กามมะพร้าวและเส้นใยปาล์มน้ำมัน ส่วนสมบัติการวัลคาไนซ์
ของยางแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ความชื้น ความหนาแน่น และความทนต่อแรงดึงของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ [17]

แหล่งของ เส้นใย	ความชื้น	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	ระยะยืด จุด ขาด (%)	ความทนต่อ แรงดึง เฉลี่ย (MPa)	โมดูลัส เฉลี่ย (GPa)	ความทนต่อแรง ดึงจำเพาะ (MPa/(kg.m ⁻³))	โมดูลัสจำเพาะ (MPa/(kg.m ⁻³))
ปาล์มขวด	12.09	810	3.46	549	15.85	0.6778	19.56
อินทผลัม	10.67 ^a	990 ^a	2.73 ^a	309 ^a	11.32 ^a	0.3121 ^a	11.44 ^a
	09.55 ^b	960 ^b	24.00 ^b	459 ^b	1.91 ^b	0.4781 ^b	1.99 ^b
ไม้ไผ่	09.16 ^c	910 ^c	1.40 ^c	503 ^c	35.91 ^c	0.5527 ^c	39.47 ^c
	10.14 ^d	890 ^d	1.73 ^d	341 ^d	19.67 ^d	0.3831 ^d	22.10 ^d
ปาล์มน้ำมัน	12.08	1030	13.71	377	2.75	0.3660	2.67
มะพร้าว	11.36	1150	20.00	500	2.50	0.4348	2.17
กล้วย	10.71	1350	3.36	600	17.85	0.4444	13.22
ปาน ศรนารายณ์	9.76	1450	5.45	567	10.40	0.3910	7.17

a คือ ก้านใบ; b คือ ลำต้น; c คือ สกัดด้วยวิธีทางกล; d คือ สกัดด้วยวิธีทางเคมี

ตารางที่ 3 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ [18]

สูตร	ปริมาณ เส้นใย (phr)	เวลาสกอซ (T _{s1}) (min)	เวลาวัลคาไนซ์ (T ₉₀) (min)	ค่าทอร์ค สูงสุด, M _H (dN.m)	ค่าทอร์คต่ำสุด, M _L (dN.m)	ผลต่างทอร์ค M _H - M _L (dN.m)
ยางธรรมชาติ	0	4.55	12.50	4.69	0.69	4.00
ยางธรรมชาติผสม เส้นใยกาม มะพร้าว	10	4.36	12.55	5.02	0.72	4.30
	20	3.49	12.20	5.87	1.02	4.85
มะพร้าว	30	4.04	12.36	7.05	1.24	5.81
	40	3.41	12.15	7.95	1.40	6.55
ยางธรรมชาติผสม เส้นใยปาล์ม น้ำมัน	10	3.22	11.51	4.89	0.87	4.02
	20	3.22	10.43	6.37	0.96	5.41
น้ำมัน	30	3.10	10.23	7.29	1.12	6.17
	40	3.13	10.37	7.93	1.09	6.84

จากตารางที่ 3 พบว่า เมื่อมีการผสมเส้นใยจะส่งผล
ให้ค่าผลต่างทอร์คหรือค่าผลต่างของแรงบิดสูงกว่า
ยางคอมปาวด์ที่ไม่ใส่สารตัวเติมและมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ
เส้นใย ซึ่งค่าทอร์คบ่งบอกถึงโมดูลัสของยาง ที่เพิ่มขึ้น

เนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม และ
การเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง
นอกจากนี้ยังพบว่า ยางธรรมชาติที่ผสม เส้นใยกามมะพร้าว
และเส้นใยปาล์ม ส่งผลให้เวลาสกอซและเวลาวัลคาไนซ์ลดลง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกล ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าการผสมเส้นใยกาบมะพร้าวและเส้นใยปาล์มน้ำมันในยางยังส่งผลให้ยางวัลคาไนซ์มีค่าความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาดและระยะยืด ณ จุดขาดลดลง ส่วนค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% และความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถึงอย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลได้แก่ความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากเส้นใยจะไปรบกวนการเกิดผลึกของยางธรรมชาติจึงทำให้สมบัติเชิงกลด้อยกว่ายางที่ไม่ผสมเส้นใย [13] นอกจากนี้ องค์ประกอบทางเคมีของผิวของเส้นใยที่ไม่สามารถเกิดอันตรกิริยาหรือเกิดความไม่เข้ากันทางเคมีระหว่างเส้นใยกับยางได้ ทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลงเช่นกัน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงผิวเส้นใยก่อนนำไปใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรง โดยทั่วไปการใช้เส้นใยธรรมชาติในยางจะนิยมปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารละลายไซโตเดียมไฮดรอกไซด์หรือการใช้สารประสาน (Bonding agents) ในสูตรยาง เช่น เมื่อนำเส้นใยปาล์ม ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายต่างเป็นสารตัวเติม ในยางจะส่งผลให้สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนทานต่อ แรงดึง ความ

ทนทานต่อการฉีกขาด และความแข็งแรง มีค่าสูงกว่าการใช้เส้นใยที่ไม่ปรับปรุงผิว เนื่องจากการปรับปรุงเส้นใยด้วยวิธีดังกล่าว จะมีผลทำให้ผิวเส้นใยมีความขรุขระเพิ่มขึ้นซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว นอกจากนี้ช่วยลดความแข็งแรงของเส้นใยทำให้มีการจัดเรียงตัวในทิศทางของแรงที่มากกว่าและลดปริมาณช่องว่างขนาดเล็ก ซึ่งลักษณะเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการยึดติดระหว่างเส้นใยกับยางดีขึ้นและช่วยในการรับแรงเค้นที่มากระทำ รวมทั้งไม่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ ส่วนการใช้สารประสานจะส่งผลต่อเวลาวัลคาไนซ์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดพันธะได้มากกว่าสูตรยางที่ไม่มีการใช้สารประสาน แต่อาจส่งผลต่อเวลาสุกที่ลดลง ส่วนค่าทอร์คสูงสุดและค่าทอร์คต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพันธะที่แข็งแรงเกิดขึ้นระหว่างเส้นใยกับยาง ทำให้ยางคอมพอสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น รวมทั้งสมบัติเชิงกล เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด มอดูลัส และความแข็งแรงที่มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน [19]

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางกับเส้นใยกาบมะพร้าวและเส้นใยปาล์มน้ำมัน [18]

สูตร	ปริมาณ เส้นใย (phr)	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดูลัสที่ระยะยืด 300 % (MPa)	ความแข็งแรง (Shore A)	ความทนต่อการฉีกขาด (N/mm)
ยางธรรมชาติ	0	13.14±2.18	727±36.00	1.42±0.00	37.0	28.3
ยางธรรมชาติ	10	10.71±0.46)	713±31	1.45±0.17	45	27.5
ผสม เส้นใย	20	9.16 ±0.26	687± 91	1.47 ±0.09	51	23.6
กาบมะพร้าว	30	6.89 ±0.33	665±43	1.54 ±0.05	60.2	20.4
	40	5.80 ±0.12	651±45	1.52±0.07	61.6	21.1
ยางธรรมชาติ	10	10.37±0.96	687±31	1.59±0.13	45.9	27.4
ผสม เส้นใย	20	10.09±0.54	727 ±91	1.77 ±0.07	54.4	27.5
ปาล์มน้ำมัน	30	7.89 ±0.20	713 ±43	1.75 ±0.10	61.2	25.3
	40	6.40 ±0.36	753 ±45	1.79±0.06	66.2	21.2

2. ผงชีวมวล

การนำชีวมวลมาใช้เป็นสารตัวเติมในรูปของผง ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเถ้า เช่น ผงเถ้าแกลบ [20], [21], [22], [23] ผงเถ้าขานอ้อย [24] หรือวัสดุทุติยภูมิที่สามารถนำมาผ่านกระบวนการแปรรูปทางกลให้เป็นผงได้เลย เช่น ผงปาล์ม [25], [26] ผงขานอ้อย [27] ผงเปลือกไซ [28], [29] และผงกระดองปลาหมึก [30] เป็นต้น

ตัวอย่างการนำผงเถ้าแกลบไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

โดยทั่วไปเถ้าที่หลงเหลือจากการเผาวัสดุ อาจไม่มีความน่าสนใจ แต่ในกรณีของเถ้าแกลบพบว่า มีซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (Silica, SiO₂) เป็นองค์ประกอบ ในปริมาณสูงประมาณร้อยละ 70-90 ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีเช่นเดียวกับซิลิกาที่ใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในอุตสาหกรรมยาง นอกจากนี้ซิลิกาที่ได้จากชีวมวล

ยังมีข้อได้เปรียบเหนือกว่าซิลิกาในทางการค้าคือ มีความหนาแน่นน้อยกว่าจึงทำให้มีน้ำหนักเบาสามารถผสมลงไปในยางได้ในปริมาณมากกว่าที่ปริมาตรเท่ากัน

Ishak และ Bakar [23] ได้ศึกษาศักยภาพของการใช้เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติอีพอกไซดที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด 50 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-50) ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล โดยเถ้าแกลบที่เลือกใช้มี 2 ชนิด คือ เถ้าแกลบข้าวขาวและเถ้าแกลบข้าวดำ เปรียบเทียบกับการใช้สารตัวเติมในทางการค้าคือ ซิลิกา vulcasil S และเขม่าดำ N330 ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.011-0.019 μm และ 0.026-0.030 μm ตามลำดับ และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 170 m^2/g และ 98.9 m^2/g ตามลำดับ จากการศึกษา สารตัวเติมจากเถ้าแกลบ พบว่า เถ้าแกลบข้าวขาวมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์สูงถึง 96% ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเช่นเดียวกับสารตัวเติมซิลิกาในทางการค้า โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวเท่ากับ 5.4 μm และ 1.4 m^2/g ตามลำดับ ส่วนเถ้าแกลบข้าวดำมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 54% และมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 44% ดังนั้น

เถ้าแกลบข้าวดำจึงมีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นซิลิกาและเขม่าดำร่วมกัน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิว เท่ากับ 2.4 μm และ 26.4 m^2/g ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ทั้งเถ้าแกลบข้าวขาวและเถ้าแกลบข้าวดำยังประกอบด้วยโลหะออกไซด์ต่างๆ ได้แก่แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และโพแทสเซียมออกไซด์ ร่วมอยู่ด้วย สำหรับสูตรยางที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จะถูก นำมาวัลคาไนซ์และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 140°C ลักษณะการวัลคาไนซ์แสดงในตารางที่ 6 พบว่า การใช้เถ้าแกลบข้าวขาวส่งผลให้เวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์สั้นลง เนื่องจากในเถ้าแกลบข้าวขาวมีปริมาณโลหะออกไซด์สูงกว่าและพื้นที่ผิวของอนุภาคต่ำกว่าเถ้าแกลบข้าวดำ เขม่าดำ และซิลิกาในทางการค้าตามลำดับ ส่วนค่าทอร์กสูงสุดนั้นซิลิกาในทางการค้ามีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ เขม่าดำ เถ้าแกลบข้าวดำ และเถ้าแกลบข้าวขาว ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากซิลิกาทางการค้ามีขนาดอนุภาคเล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้มีพื้นที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยางได้มาก ส่งผลให้ค่าทอร์กในการผสมสูงตามไปด้วย

ตารางที่ 5 สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้สารตัวเติมจากเถ้าแกลบข้าวขาว เถ้าแกลบข้าวดำ ซิลิกา และเขม่าดำ [23]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติอีพอกไซด (ENR-50)	100
กำมะถัน	1.6
ซิงค์ออกไซด์	2.0
กรดสเตียริก	1.5
ไซโคลเฮกซิลเบนโซไรอาโซลซัลฟิโนไมด์ (CBS)	1.9
เตตระเมทิลโรยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD)	0.9
ไอโซโพรพิลฟีนีลีนไดเอมีน (IPPD)	2.0
สารตัวเติม (แกลบข้าวขาว เถ้าแกลบข้าวดำ ซิลิกา และเขม่าดำ)	20
ไซเลน	2.0

ตารางที่ 6 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางที่ใช้เถ้าแกลบข้าวขาว เถ้าแกลบข้าวดำ ซิลิกา และเขม่าดำ เป็นสารตัวเติม [23]

สารตัวเติม	เถ้าแกลบขาว	เถ้าแกลบดำ	ซิลิกา	เขม่าดำ
เวลาวัลคาไนซ์ (min)	3.85 (3.80)	4.50 (4.27)	6.00 (4.82)	4.27 (3.95)
เวลาสกอช (min)	1.38 (1.40)	1.88 (1.69)	3.40 (2.30)	1.67 (1.35)
ทอร์กสูงสุด (lb-inch)	9.60 (9.36)	10.70 (10.27)	11.64 (10.33)	11.05 (10.70)

() คือ สูตรที่มีการใช้สารคู่ควบไซเลน

ตารางที่ 7 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติพอกไซดวัลคาไนซ์ที่ใช้เถ้าแกลบข้าวขาว เถ้าแกลบข้าวดำ ซิลิกา และเขม่าดำ ที่ปริมาณ 20 phr เป็นสารตัวเติม ร่วมกับการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ [23]

สมบัติ	สารตัวเติม			
	เถ้าแกลบข้าวขาว	เถ้าแกลบข้าวดำ	ซิลิกา	เขม่าดำ
โมดูลัส ที่ระยะยืด 100% (MPa)	0.91 (1.01)	0.89 (1.11)	1.08 (0.69)	1.10 (0.98)
โมดูลัส ที่ระยะยืด 300% (MPa)	2.34 (3.19)	2.18 (2.94)	3.84 (3.69)	3.98 (3.69)
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	20.12 (21.59)	12.20 (19.28)	26.68 (30.99)	26.67 (27.06)
ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	957 (932)	914 (882)	976 (860)	910 (939)
ความทนต่อการฉีกขาด (kN/m)	10.67 (13.12)	10.24 (11.16)	11.30 (16.78)	7.00 (8.78)
ความแข็ง (Shore A)	50 (52)	53 (54)	56 (54)	58 (57)

() คือ สูตรที่มีการใช้สารคู่ควบไซเลน

ตารางที่ 7 แสดงสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่า สารตัวเติมจากเถ้าแกลบข้าวขาวมีค่าโมดูลัส ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาดและระยะยืด ณ จุดขาด สูงกว่าการใช้เถ้าแกลบข้าวดำ แต่มีค่าต่ำกว่าการใช้ซิลิกาและเขม่าดำในทางการค้า ส่วนการใช้สารคู่ควบไซเลน ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงของเถ้าแกลบข้าวขาวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เถ้าแกลบข้าวดำมีการเพิ่มขึ้นของค่าความทนต่อแรงดึงอย่างชัดเจน

นอกจากนี้สมบัติเชิงกลอื่นๆ เช่น โมดูลัส ความทนต่อการฉีกขาดและความแข็งของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้เถ้าแกลบข้าวขาว เถ้าแกลบข้าวดำ ซิลิกา และเขม่าดำมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นนอกจากการเลือกใช้วัสดุชีวมวลแล้ว การพัฒนาชีวมวลให้มีประสิทธิภาพเสริมแรงได้ดีมากขึ้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับปรุงสมบัติยางให้มีความแข็งแรงและความทนทานเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เช่น การใช้สารคู่ควบในเถ้าแกลบข้าวขาวที่เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยใช้สารคู่ควบ 2 ชนิด คือ สารคู่ควบไซเลนและสารคู่ควบที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (Multifunctional additive, MFA) เช่น สารคู่ควบที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิเลตแอนไอออน ซึ่งการใช้สารคู่ควบไซเลนและ/หรือ MFA จะช่วยเพิ่มอันตร-กิริยาระหว่างยางและเถ้าแกลบข้าวขาวมากขึ้น อีกทั้งมีการกระจายตัวที่ดีกว่าการใช้สารคู่ควบ นอกจากนี้การใช้ไซเลนร่วมกับ MFA จะให้ค่าโมดูลัสสูงกว่าการใช้ไซเลนหรือ MFA เพียงอย่างเดียว [31]

นอกจากการใช้สารคู่ควบแล้ว ยังอาจใช้เทคโนโลยีในการปรับปรุงผิวของอนุภาคของสารตัวเติมได้โดยตรงก่อนผสมลงในยางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น การปรับสภาพผิวของอนุภาคเถ้าแกลบข้าวดำด้วยยางธรรมชาติเหลวตัดแปร (Liquid epoxidized natural rubber, LENR) ที่มีกรวัลคาไนซ์ร่วมกับเถ้าแกลบข้าวดำ ซึ่งแสดงประสิทธิผลในการเข้ากันได้กับยางธรรมชาติดีกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลน [32]

ตัวอย่างการนำผงกระดองปลาหมึกไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

ในปี พ.ศ. 2551 Poompradub และคณะ [29] ได้ศึกษาการใช้ชีวมวลจากกระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ เปรียบเทียบกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในทางการค้า (Silver W) ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติพลวัตเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ ลักษณะสารตัวเติมที่ใช้แสดงในตารางที่ 8 ส่วนสมบัติของยางวัลคาไนซ์แสดงในตารางที่ 9 พบว่า การใช้กระดองปลาหมึกเป็นสารตัวเติมให้สมบัติเชิงกลและสมบัติพลวัตเชิงกลไม่แตกต่างจากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ในทางการค้า ถึงแม้ว่าขนาดอนุภาคของกระดองปลาหมึกจะมีขนาดใหญ่กว่าแคลเซียมคาร์บอเนตในทางการค้าถึง 6 เท่า แต่สมบัติต่างๆ ยังเทียบเท่ากับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในทางการค้า ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก

ตารางที่ 8 ลักษณะของอนุภาคกระดองปลาหมึกและแคลเซียมคาร์บอเนตในทางการค้า (Silver W) [29]

สารตัวเติม	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	พื้นที่ผิว BET (m^2/g)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	องค์ประกอบ (%)	
				CaCO_3 (อะราโกไนต์)	สาร อินทรีย์
ผงกระดองปลาหมึก	19.5	5.6	2.70	92	8
แคลเซียมคาร์บอเนต ทางการค้า (silver W)	3.1	6.8	2.71	100 (แคลไซต์)	0

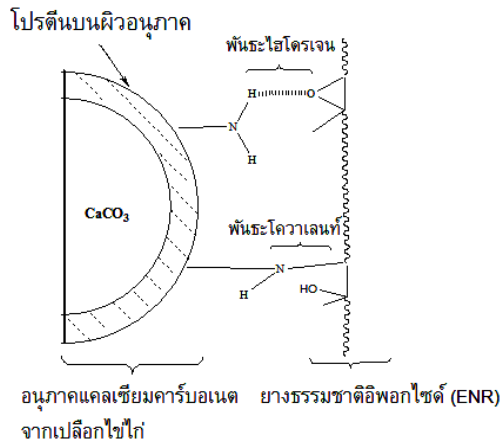
ตารางที่ 9 สมบัติของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้กระดองปลาหมึกและแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า (Silver W) เป็นสารตัวเติม [29]

ตัวอย่าง	โมดูลัสที่ระยะ	โมดูลัสที่ระยะ	ความทนต่อ	ระยะยืด ณ	โมดูลัส	ความสูง
	ยืด 100%	ยืด 300%				
	MPa	MPa	(MPa)	(%)	25°C (MPa)	$\tan \delta$
ไม่มีสารตัวเติม	0.7 \pm 0.01	2.1 \pm 0.02	7.0 \pm 0.05	575 \pm 3	1.5	2.7
กระดองปลาหมึก 10 phr	0.7 \pm 0.00	2.0 \pm 0.01	11.2 \pm 0.06	635 \pm 6	1.6	2.5
กระดองปลาหมึก 20 phr	0.8 \pm 0.01	2.3 \pm 0.03	11.3 \pm 0.08	615 \pm 6	1.8	2.4
กระดองปลาหมึก 40 phr	1.0 \pm 0.00	3.0 \pm 0.02	13.2 \pm 0.07	1615 \pm 2	2.3	2.4
กระดองปลาหมึก 80 phr	1.6 \pm 0.03	4.4 \pm 0.03	12.5 \pm 0.06	580 \pm 8	3.8	2.2
กระดองปลาหมึก 100 phr	1.9 \pm 0.03	4.5 \pm 0.01	7.5 \pm 0.06	500 \pm 7	4.5	1.9
แคลเซียมคาร์บอเนต 10 phr	0.7 \pm 0.01	2.2 \pm 0.04	11.4 \pm 0.04	616 \pm 3	1.5	2.7
แคลเซียมคาร์บอเนต 10 phr	0.8 \pm 0.01	2.6 \pm 0.03	11.5 \pm 0.02	596 \pm 0	1.8	2.4
แคลเซียมคาร์บอเนต 10 phr	1.0 \pm 0.00	3.0 \pm 0.02	11.0 \pm 0.04	579 \pm 3	2.1	2.3
แคลเซียมคาร์บอเนต 10 phr	1.5 \pm 0.01	4.1 \pm 0.01	8.4 \pm 0.03	511 \pm 1	3.0	2.3
แคลเซียมคาร์บอเนต 10 phr	1.8 \pm 0.01	5.2 \pm 0.02	8.8 \pm 0.07	490 \pm 2	4.5	1.8

องค์ประกอบอินทรีย์ เช่น ไคติน ที่มีอยู่ในกระดองปลาหมึกสามารถเพิ่มการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยางได้

นอกจากนี้ในปี พ.ศ. 2554 ปุญญานิช อินทรพัฒน์ [33] ได้ศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ไก่เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติอีพอกไซด์เปรียบเทียบกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในทางการค้า พบว่า เปลือกไข่ไก่ มีแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปของแคลไซต์มากถึง 96% และสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้เปลือกไข่ไก่เป็นสารตัวเติมมีค่าสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตในทางการค้า ถึงแม้ว่าจะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า แต่ผงเปลือกไข่ไก่นั้นมีพื้นที่ผิวมากกว่า ซึ่งนับเป็น

ข้อได้เปรียบของสารตัวเติม ซึ่งมีผลที่เหนือกว่าสารตัวเติมในทางการค้า รวมทั้งสารอินทรีย์ เช่น โพรตีนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเปลือกไข่ไก่ส่งผลให้เกิดยึดติดระหว่างอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่กับยางได้ดีขึ้น อาจเนื่องมาจากความสามารถในการเกิดอันตรกิริยา ได้แก่ การเกิดพันธะไฮโดรเจน และพันธะโควาเลนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่งผลให้ความหนืดของยางคอมพาวด์ และสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ผงเปลือกไข่ไก่สูงกว่ายางที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในทางการค้าเป็นสารตัวเติม



รูปที่ 2 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนบนอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่กับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ [33]

บทสรุป

ชีวมวลหลายชนิดที่ได้จากการเกษตร ปศุสัตว์ หรือ วัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมและชุมชน เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมที่มีสมบัติเทียบเท่ากับสารตัวเติมในทางการค้า ซึ่งในการนำชีวมวล มาทดแทนสารตัวเติมนั้นจะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบของชีวมวล เช่น องค์ประกอบทางเคมีที่สอดคล้องกับสารตัวเติมเสริมแรงในทางการค้า ได้แก่ เซลลูโลส ซิลิกา เขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต หรืออาจเป็นสารตัวเติมชนิดอื่นที่มีความแข็งแรงสูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีลักษณะหรือโครงสร้างทางเคมีที่มีความเข้ากันได้กับยางที่ต้องการผสม รวมทั้งการมีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไว และมีความเสถียรต่อสภาวะแวดล้อม

นอกจากนี้องค์ประกอบอื่นๆ ที่มีอยู่ในชีวมวล เช่น โลหะออกไซด์ ไคติน และสารประกอบโปรตีน สามารถส่งผลต่อการเสริมแรงและปรับปรุงสมบัติของยางได้อย่างมากเช่นกัน เนื่องจากองค์ประกอบดังกล่าวช่วยให้การเกิดอันตรกิริยาและพันธะเคมีระหว่างสารตัวเติมกับยางดีกว่าสารตัวเติมในทางการค้าหรือสารตัวเติมที่ไม่มีองค์ประกอบเหล่านี้ จึงเป็นข้อได้เปรียบของสารตัวเติม ชีวมวล และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้วชีวมวลเป็นวัสดุที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก และการนำชีวมวลมาประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมนับว่าเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในประเทศอย่างคุ้มค่า รวมทั้งยังเป็นการต่อยอดและพัฒนาวัสดุได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งประสิทธิภาพของชีวมวลนั้นไม่ได้ด้อยกว่าสารตัวเติมในทางการค้าและยังพบว่าชีวมวลบางชนิดให้คุณสมบัติที่ดีกว่าด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายอรุณ คงหนู บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม (Joint Graduate School of Energy and Environment, JGSEE) มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้คำแนะนำและข้อมูลอันเป็นประโยชน์

บรรณานุกรม

- [1] กรรณิการ์ สหะโร. 2554. "งานวิจัยเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตยางล้อ". การประชุมวิชาการยางพาราแห่งชาติ ครั้งที่ 3: ยางพาราไทยสู่ความมั่นคง ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค 24-25 มิถุนายน 2554 หน้า 52-54.
- [2] กฤษฏี อัจจะริยะกุล และคณะ. 2552. ชีวมวล. www.cpe.kmutt.ac.th/wiki. 24 กรกฎาคม.
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์. 2552. ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. <http://www.dede.go.th/dede>. 27 กรกฎาคม.
- [4] Laohalidanond, K. 2007. "The production of synthetic diesel from biomass". **Chiang Mai University Journal of Natural Sciences** 6: 127-139.
- [5] พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. สารเคมียาง. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [6] Lopattananon, N., and et al. 2006. "Performance of Pineapple Leaf Fiber-Natural Rubber Composites: The Effect of Fiber Surface Treatments". **Journal of Applied Polymer Science** 102: 1974-1984.

- [7] Ismail, H. and Edyham M.R. 2002. "Bamboo fibre filled natural rubber composites: the effects of filler loading and bonding agent". **Polymer Testing** 21: 139–144.
- [8] Ismail, H. and et al. 2002. "The effects of a silane coupling agent on curing characteristics and mechanical properties of bamboo fibre filled natural rubber composites". **European Polymer Journal** 38: 39-47.
- [9] โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา. 2552. **บทสรุปและการสังเคราะห์โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา (Small Projects on Rubber: SPR) ปี 2546-2549 (เล่มที่ 1)**. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- [10] Bras, J., and et al. 2010. "Mechanical, barrier, and biodegradability properties of bagasse cellulose whiskers reinforced natural rubber nanocomposites". **Industrial Crops and Products** 32: 627–633.
- [11] Abdelwahab, N.A., HelaLy, F.M. and Badran, A.S. 2008. "Effect of bagasse on the physico-mechanical properties of natural and styrene-butadiene rubbers". **Journal of Elastomers and Plastics** 40: 347-363.
- [12] ประชุม คำพุ่ม และคณะ. 2552. "ฉนวนความร้อนจากขาน้อยและน้ำยางธรรมชาติ". **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 7** ณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 21-22 พฤษภาคม 2552.
- [13] Joseph, S. and et al. 2006. "Green composites from natural rubber and oil palm fiber: physical and mechanical properties". **International Journal of Polymeric Materials** 55: 925–945.
- [14] Jacob, M., Varughese, K.T. and Thomas, S. 2004. "Natural rubber composites reinforced with sisal/oil palm hybrid fibers: tensile and cure characteristics". **Journal of Applied Polymer Science** 93: 2305–2312.
- [15] Jacob, M., Varughese, K.T. and Thomas, S. 2006. "Dielectric characteristics of sisal–oil palm hybrid biofibre reinforced natural rubber biocomposites". **Journal of Materials Science** 41: 5538–5547.
- [16] Ismail, H., Rosnah, N. and Rozman, H. D. 1998. "Curing characteristics and mechanical properties of short oil palm fibre reinforced rubber composites". **Polymer** 38: 4059-4064.
- [17] Murali Mohan Rao, K. and Mohana Rao, K. 2007. "Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo". **Composite Structures** 77: 288–295.
- [18] รัตนา ตันทเทอดธรรม วุฒินันท์ คงทัด และกล้าณรงค์ ศรีรอด. 2553. "การศึกษาการเตรียมและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับเส้นใยกาบมะพร้าวและปาล์มน้ำมัน". **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48** ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2553 หน้า 523-529.
- [19] Ismail, H., Rosnah, N. and Rozman, H.D. 1997. "Effects of various bonding systems on mechanical properties of oil palm fibre reinforced rubber composites". **European Polymer Journal** 33: 1231–1238.
- [20] Phrommedetch, S.2010. "Compatibility improvement of rice husk and bagasse ashes with natural rubber by molten-state maleation". **European Journal of Scientific Research** 43: 411-416.
- [21] Ishak, Z.A.M., and et al. 1997. "An investigation of the potential of rice husk ash as a filler for epoxidized natural rubber-II: Fatigue behavior". **European Polymer Journal** 33: 73-79.
- [22] แคทลียา ปัทมพรหม และคณะ. 2551. **โครงการ ผลของอัตราการปรับโครงสร้างเชิงโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยวิธี maleation ต่อสมบัติเชิงกลและเชิงอุณหภูมิตั้งประสิทธิภาพการเสริมแรงของ แก้ว กล้วย ไน ยาง ธรรมชาติ** . <http://www.elibrary.trf.or.th>. 25 กรกฎาคม.
- [23] Ishak Z.A.M. and Bakar, A.A. 1995. "An investigation on the potential of rice husk ash as fillers for epoxidized natural rubber (ENR)". **European Polymer Journal** 31: 259-269

- [24] Osarenmwinda, J.O. and Abode, S.I. 2010. "Potential of Carbonized Bagasse Filler in Rubber Products". **Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences** 1: 157-160.
- [25] Ismail, H. and Haw, F.S. 2008. "Effects of palm ash loading and maleated natural rubber as a coupling agent on the properties of palm-ash-filled natural rubber composites". **Journal of Applied Polymer Science** 110: 2867–2876.
- [26] อรสา ภัทรไพฑูรย์ชัย, ปัทมา อารีสิริสุข และ มาณวิกา แซ่จัน. 2549. ศึกษาการใช้ผงปาล์มน้ำมันเพื่อเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ. <http://www.elibrary.trf.or.th>. 25 กรกฎาคม.
- [27] Abdelwahab, N.A., Helaly, F.M. and Badran, A.S. 2008. Effect of bagasse on the physico-mechanical properties of natural and styrene-butadiene rubbers". **Journal of Elastomers and Plastics** 40: 347-363.
- [28] Dakhel, H.R. 2008. "Using eggshell as a filler in elastomeric compounds: effect of incubation period on its performance toward elastomers". **e-Polymers** 140: 1-14.
- [29] รักษา แก้วคำชาติ. 2553. อิทธิพลของสารตัวเติมจากเปลือกไข่ในยางธรรมชาติอิพอกไซด์. สารนิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [30] Poompradub, S., and et al. 2008. "Cuttlebone as reinforcing filler for natural rubber". **European Polymer Journal** 44: 4157–4164.
- [31] Ismai, H., Nasaruddin, M.N. and Rozman, H.D. 1999. "The effect of multifunctional additive in white rice husk ash filled natural rubber compounds". **European Polymer Journal** 35: 1429-1437.
- [32] Phetphaisit, C.W., Ployppardup, S. and Tepkit, P. 2008. "Effects of Modified Liquid Natural Rubber in Black Rice Husk Ash Filled Natural Rubber Compound". **NU Science Journal** 2008; 5(1): 92 – 107
- [33] ปุญญานิช อินทรพัฒน์. 2554. การใช้เปลือกไข่เหลือทิ้งเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์. รายงานการวิจัย: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.