สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไม้เทียมโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป
The Optimum Condition for Artificial Wood Production from Compression Moulding Process

จุฑาทิพย์ อาจชมภู[1*] สุวัฒน์ รัตนพันธ์[1] ฉัตรชัย แก้วดี[2] และวีระยุทธ สุดสมบูรณ์[2]
Jutatip Artchomphoo[1*] Suwat Rattanapan[1] Chatchai Kaewdee[2]
and Weerayute Sudsomboon[2]

บทคัดย่อ

การผลิตไม้เทียมจากยางพาราผสมผงขี้เลื่อยไม้ โดยศึกษาการขึ้นรูปไม้เทียมที่อุณหภูมิ 125 135 145 และ 155 องศาเซลเซียส จากการใช้สารเร่งการคงรูปไม้เทียม 5 ชนิด คือ ซิงค์ เอ็น ไดเอธิล ไดไธโอคาร์บาเมต (ZDEC) เตตระเมธิล ไธยูแรม ไดซัลไฟด์ (TMTD) 2-เมอร์แคปโตเบนโซไธอะโซล ไดซัลไฟด์ (MBTS) เอ็น-ไซโคลกเฮกซิล-2-เบนโซไทอาโซลซัลฟีนาไมด์ (CBS) และเอ็น เอ็น-ไดฟีนิลกัวนิดีน (DPG) ศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้เทียมที่ปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ 20 40 60 80 และ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน พบว่าเวลาการคงรูปไม้เทียมลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส และ 135 องศาเซลเซียส สารเร่งการคงรูปทุกชนิดสามารถขึ้นรูปไม้เทียมได้อย่างสมบูรณ์ ยกเว้นการใช้ ZDEC ไม่สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 125 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามทั้งสองอุณหภูมินี้ไม่เหมาะสำหรับการผลิตเนื่องจากใช้เวลาในการคงรูปมากกว่า 60 และ 30 นาที ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส สารเร่งการคงรูป MBTS MBTS ร่วมกับ DPG และ CBS สามารถขึ้นรูปไม้เทียมที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร ได้อย่างสมบูรณ์ แต่สำหรับไม้เทียมที่มีความหนา 25.4 มิลลิเมตร สารเร่งการคงรูป MBTS และ MBTS ร่วมกับ DPG เท่านั้นที่สามารถให้การขึ้นรูปที่สมบูรณ์ และการใช้ MBTS ร่วมกับ DPG ให้ดัชนีการคงรูปสูงที่สุด มีวงรอบการผลิต (cycle time) 16.45±0.03 นาที และ 18.45±0.04 นาที สำหรับไม้เทียมที่มีความหนา 15 และ 25.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ปริมาณของผงขี้เลื่อยไม้ในวัสดุคอมโพสิตมีผลต่อสมบัติเชิงกลของไม้เทียม การเพิ่มปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ทำให้ไม้เทียมมีความแข็งตึง (stiffness) เพิ่มขึ้น มีความแข็งแรงดึงสูงสุดและความสามารถในการยืดจนขาดลดลง ในขณะที่มอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งของไม้เทียมเพิ่มขึ้น พบว่าการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ที่ปริมาณ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน (phr) สามารถเพิ่มความแข็งให้ไม้เทียมได้มากกว่า 80 shore A โดยการใช้ผลขี้เลื่อยไม้ที่มีขนาด 500 ถึง 1,000 ไมโครเมตร สามารถเพิ่มความแข็งให้ไม้เทียมได้สูงที่สุด ที่ 88±0.53 shore A นอกจากนี้การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์มาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่มีปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ 8 และ 10 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ($NRgMAH_8$ และ $NRgMAH_{10}$) เป็นสารเชื่อมติดทำให้เกิดแรงยึดระหว่างเฟสของผงขี้เลื่อยไม้และเนื้อยางทำให้ไม้เทียมที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้น

คำสำคัญ: ไม้เทียม คอมโพสิท ผงขี้เลื่อยไม้

[1] สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
[*]Corresponding author e-mail: jutatip.a@rmutsv.ac.th

Received: 17 March 2020, Revised: 21 May 2020, Accepted: 2 June 2020

Abstract

Artificial woods were mixed from rubber and sawdust powder. The research studied the artificial wood moulding temperature (125, 135, 145, and 155°C), composite accelerator (zinc- N-diethyl dithiocarbamate (ZDEC), tetramethyl thiuram disulphide (TMTD), 2-mercapto benzothiazol disulfide (MBTS), N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide (CBS), and N,N-diphenyl guanidine (DPG)) and the mechanical properties of artificial wood with the mixture of sawdust powder (20, 40, 60, 80, 100 phr). It was found that the curing time of artificial wood decreased according to the increasing temperature. All types of accelerators used in this case could be completely moulded to artificial wood at 125°C and 135°C, except for the ZDEC that the moulded temperature could not be higher than 125°C. However, both temperatures were not appropriate for production as it took more than 60 and 30 minutes to complete the product, respectively. For artificial wood with a thickness of 15 mm, the use of MBTS, the mixture of MBTS and DPG, and CBS could be completely molded at 145°C, but for artificial wood with a thickness of 25.4 mm, only MBTS and the mixture of MBTS and DPG can provide the most complete moulding. The mixture of MBTS and DPG provided the highest cure rate index. There were cycle times of 16.45±0.03 minutes and 18.45±0.04 minutes for artificial woods with the thickness of 15 and 25.4 mm., respectively. The amount of sawdust powder in composite materials also affected the mechanical properties of artificial wood. The increase of the wood sawdust increased the stiffness of the wood, with the highest tensile strength and the decreased elongation at break. However, the modulus at 100% elongation and hardness of artificial wood increased. It was found that the use of sawdust at 100 phr could increase the hardness of artificial wood by more than 80 shore A. By using wood sawdust sizes of 500-1000 micrometer, the hardness of artificial wood could increase to the highest level at 88±0.53 shore A. In addition, the use of grafted natural rubber with 8 and 10 phr of malic anhydride ($NRgMAH_8$ and $NRgMAH_{10}$) as a binding agent created a bond between the phase of the sawdust powder and the rubber matrix, making the artificial wood stronger.

Keywords: artificial wood, composite, sawdust powder

บทนำ

ความต้องการใช้ไม้เพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีปริมาณสูงขึ้นเรื่อย ๆ เช่น อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ ไม้ท่อนและไม้แปรรูป และไม้เพื่อการก่อสร้าง เนื่องจากไม้เป็นวัสดุหลักในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ทั้งในส่วนของโครงสร้างหลักโครงสร้างรอง และงานออกแบบตกแต่งภายใน ความต้องการไม้สวนทางกับปริมาณไม้ซึ่งมีปริมาณลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากพื้นที่ป่าน้อยลง รวมทั้งกฎหมายควบคุมการตัดไม้ทำให้การปลูกไม้เพื่อการค้าทำได้ยาก ต้องนำเข้าไม้บางสวนจากต่างประเทศและอาจนำไปสู่การขาดแคลนในอนาคต ไม้สังเคราะห์ คือวัสดุทดแทนไม้ (หรือ “ไม้เทียม”) เป็นวัสดุประกอบ (composite materials) ที่มีไม้จริงในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เกล็ดไม้ ชิ้นไม้ขนาดเล็ก ผงไม้ เส้นใย เป็นส่วนผสมร่วมกับวัสดุประเภทอื่น ๆ ซึ่งใช้ผลิตเป็นไม้สังเคราะห์ประเภทต่าง ๆ ได้ เช่น

เส้นใยเซลลูโลสผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เรียกว่าไฟเบอร์ซีเมนต์ (fiber cement) ชิ้นไม้ขนาดเล็กผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เรียกว่าไม้อัดซีเมนต์ (wood cement board) หรือแผ่นชิ้นไม้อัดซีเมนต์ความหนาแน่นสูง ผงไม้และเส้นใยผสมกับกาวสังเคราะห์ เรียกว่าแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (medium density fiber board, MDF) และวัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์และไม (wood polymer composites: WPCs) WPCs มีสมบัติเหนือกว่าไม้ธรรมชาติหลายด้าน เช่น ความทนทานและต้านทานเชื้อราสูง ต้นทุนในการบำรุงรักษาต่ำ ดูดซับน้ำน้อย มีความเสถียรทางด้านรูปร่างสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (ชาตรี, 2557) WPCs สามารถเตรียมได้จากพอลิเมอร์หลายชนิด การเติมผงไม้ยางพารามากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพีลีนสามารถเพิ่มความแข็งแรงและค่ามอดูลัสอย่างเป็นเส้นตรงตามปริมาณผงไม้ยางพาราที่เป็นส่วนผสม (Homkhiew *et al*., 2014) การผลิตไม้เทียมจากพีวีซีผสมผงขี้เลื่อยไม้ พบว่าสามารถผสมผงขี้เลื่อยได้ปริมาณสูงถึง 100 ส่วน ไม้เทียมที่ได้มีความเหนียว ความยืดหยุ่น ทนทานต่อปลวก ติดตั้งได้รวดเร็วและมีน้ำหนักเบา (Sombatsompop and Phromchirasuk, 2004; Sombatsompop and Chaochanchaikul, 2005)

ยางพาราเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่น เป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ และชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกรชาวสวนยางเป็นอย่างมาก จากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร เมื่อปี 2562 ประเทศไทยมีพื้นที่เก็บเกี่ยวผลผลิตยางพารามากถึง 20.46 ล้านไร่ โดยมีผลผลิตรวม 5.02 ล้านกิโลกรัม และกระจายไปทุกภาคของประเทศ แต่ปัจจุบันราคาตกต่ำเหลือประมาณ 40 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นราคาที่ต่ำกว่าต้นทุนการผลิตที่ระดับ 64.90 บาทต่อกิโลกรัม รัฐบาลจึงได้มีนโยบายเพื่อผลักดันให้นำยางพารามาใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น การพัฒนาไม้เทียมจากวัสดุคอมโพสิทของยางพาราผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีความสำคัญทั้งการส่งเสริมให้มีการใช้ยางพารามากขึ้นและช่วยแก้ปัญหาในการกำจัดผงขี้เลื่อยไม้และฝุ่นไม้จากโรงงานแปรรูปไม้ในชุมชน ช่วยเพิ่มคุณค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่น และสามารถใช้ทดแทนไม้ได้เนื่องจากยางพาราสามารถผสมเข้ากับเส้นใยไม้ได้ง่าย โดยเส้นใยจะเกิดการเสริมแรงในด้านของความแข็งแรงและความแข็งตึง (stiffness) หรือเพื่อลดต้นทุนให้ต่ำกว่าวัสดุเสริมแรงพวกผ้าใบ ซึ่งเส้นใยขนาดเล็กจะมีผลในการเสริมแรงได้ดีกว่าเส้นใยขนาดใหญ่ (Ismail *et al*., 1996) ขนาดของเส้นใยไม้ที่ใช้เตรียมคอมโพสิทที่ศึกษาในประเทศมาเลเซียอยู่ในช่วง 0.5-1.0 มิลลิเมตร ซึ่งหลังจากผ่านการบดผสมเป็นวัสดุคอมโพสิทจะมีขนาดประมาณ 450 ไมโครเมตร (Sameni *et al*., 2002) สำหรับในประเทศไทยขนาดที่ใช้ประมาณ 200-300 ไมโครเมตร และการจัดเรียงตัวของเส้นใยในลักษณะตามทิศทางการแปรรูป เส้นใยจะไม่ถูกตัดหรือเฉือนโมเลกุลมากจึงทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านไดนามิกส์ สมบัติด้านมอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อแรงดึง (Mohanty *et al*., 2005) นอกจากนี้การใช้ซิลิการ่วมกับผงใยไม้ในปริมาณรวมกัน 50 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน พบว่าการเพิ่มสัดส่วนซิลิกามีผลทำให้ความต้านทานต่อแรงดึง มอดูลัส ความแข็ง และความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น (Ismail *et al*., 2002) เนื่องจากการเสริมแรงของเส้นใยไม้ในยางจำเป็นต้องคำนึงถึงทั้งสมบัติของเส้นใย สมบัติของยาง และวิธีการผลิต ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของชนิดสารเร่งการคงรูป อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เหมาะสมต่อสมบัติการคงรูป การขึ้นรูป และสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทไม้เทียมจากยางพาราผสมผงขี้เลื่อยไม้ เพื่อให้ได้ไม้เทียมที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในรูปแบบไม้ระแนงภายในอาคาร เป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับยางพารา และช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากเศษวัสดุเหลือทิ้งในชุมชน ได้ไม้เทียมจากวัสดุธรรมชาติที่สามารถใช้งานทดแทนไม้ได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและสารเคมี

ยางพาราใช้ยางแท่ง STR 20 จากองค์การสวนยาง (นาบอน) กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ผงขี้เลื่อยไม้ยางพารา เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงเลื่อยไม้ของบริษัทชูศักดิ์แอนด์พรรณีลีดเดอร์ จำกัด อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช สารเร่งการคงรูปในวัสดุคอมโพสิท ประกอบด้วย ซิงค์ เอ็น ไดเอธิล ไดไธโอคาร์บาเมต (zinc- N-diethyl dithiocarbamate: ZDEC) เตตระเมธิล ไธยูแรม ไดซัลไฟด์ (tetramethyl thiuram disulphide: TMTD) 2-เมอร์แคปโตเบนโซไธอะโซล ไดซัลไฟด์ (2-mercapto benzothiazol disulfide: MBTS) เอ็น-ไซโคลกเฮกซิล-2-เบนโซไทอาโซลซัลฟีนาไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide: CBS) เอ็น เอ็น-ไดฟีนิลกัวนิดีน (N,N-diphenyl guanidine: DPG) ผลิตภัณฑ์บริษัท Asia Pacific Specialty จำกัด สารเคมีอื่น ๆ สำหรับการออกสูตรประกอบด้วย ซิงออกไซด์ (zinc oxide: ZnO) ผลิตภัณฑ์บริษัทยูนิไทย จำกัด กรดสเตียริก (stearic acid) และ วิงค์ สเตย์ เอล (wing stay L) ผลิตภัณฑ์บริษัทอิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมิคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด กำมะถัน (sulphur: S) ผลิตภัณฑ์บริษัทเพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด น้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) ผลิตภัณฑ์บริษัทโคซัน (ประเทศไทย) จำกัด เอ็น-ไซโคลเฮกซิล ไธโอ-พทาลิไมด์ (N-(cyclohexyl thio)-phthalimide: PVI) ผลิตภัณฑ์บริษัท Asia Pacific Specialty จำกัด ประเทศออสเตรเลีย สารเชื่อมติดประกอบด้วย ยางธรรมชาติกราฟต์มาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่มีปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ 8 และ 10 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ($NRgMAH_8$ และ $NRgMAH_{10}$) เตรียมในห้องปฏิบัติการ ตามวิธีของ Nakasan *et al.* (2004) และวิเคราะห์หาปริมาณการเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ โดยใช้อัตราส่วนของพีคสเปคตรัมอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1854 ซม.$^{-1}$ 1792 ซม.$^{-1}$ 1776 ถึง 1784 ซม.$^{-1}$ และ 1716 ซม.$^{-1}$ ต่อพีคสเปคตรัมอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 835 ซม.$^{-1}$ ตามวิธีของไพโรจน์ และอรภรณ์ (2547)

2. การเตรียมวัสดุคอมโพสิทและการขึ้นรูปไม้เทียม

ผงขี้เลื่อยไม้ร่อนคัดแยกขนาดด้วยเครื่องร่อนคัดแยกขนาดที่มีตะแกรงแยกขนาด 4 ชั้น ขนาดของรูตะแกรง 250 500 750 และ 1,000 ไมโครเมตร ตามลำดับ ผงขี้เลื่อยไม้ที่ผ่านรูตะแกรงของเครื่องคัดแยกขนาด จะผ่านการคัดแยกโดยอัตโนมัติได้เป็น 4 ขนาด คือ ต่ำกว่า 250 250-500 500-750 และ 750-1,000 ไมโครเมตร อบผงขี้เลื่อยไม้ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เก็บไว้ในถุงกันความชื้นก่อนนำไปทดลอง ผสมวัสดุคอมโพสิทที่แปรชนิดสารเร่งการคงรูปตามสูตรส่วนผสมในตารางที่ 1 ด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill) โดยใช้เวลาในการผสมทุกสูตรเท่ากับ 30 นาที ตามลำดับขั้นตอนดังนี้ บดยาง STR 20 จนนิ่มและพันลูกกลิ้งเติมส่วนผสมโดยเริ่มจากซิงออกไซด์ บดผสมจนเข้ากันกับยางแล้วจึงเติม วิงค์ สเตย์ เอล และกรดสเตียริก ตามลำดับ หลังจากนั้นเติมผงขี้เลื่อยไม้สลับกับน้ำมันอะโรมาติกเพื่อให้เข้ากับยางได้ดี ตามด้วยสารเชื่อมติด (ถ้ามี) เติมสารเร่งการคงรูปและสุดท้ายเติมสารคงรูปกำมะถัน หลังจากการผสมส่วนประกอบทั้งหมดในสูตรวัสดุคอมโพสิท รีดเป็นแผ่นบางเพื่อช่วยระบายความร้อน พักไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติการคงรูปที่อุณหภูมิ 125 135 145 และ 155 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (oscillating disk rheometer, ODR) ยี่ห้อ TECH PRO รุ่น rheo TECH OD+ ตามมาตรฐาน ASTM D5289 ทดสอบสมบัติการขึ้นรูปไม้เทียมด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (compression moulding) ด้วยแบบพิมพ์ไม้เทียมขนาด 300x30x15 มิลลิเมตร และ 450x50x25.4 มิลลิเมตร ทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Testometric รุ่น AX M350-10 kN ตามมาตรฐาน ASTM D412 ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบระบบ Durometer แบบ Shore A ยี่ห้อ Rex Gauge ตามมาตรฐาน ASTM D2240 และทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM)

ตารางที่ 1 การศึกษาสารเร่งการคงรูปในวัสดุคอมโพสิทสูตรไม้เทียม

Ingredients	Quantity of Ingredients (phr)						
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
STR 20	100	100	100	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5	5	5	5
stearic acid	1	1	1	1	1	1	1
sulphur	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
wing stay L	1	1	1	1	1	1	1
aromatic oil	5	5	5	5	5	5	5
ZDEC	1	-	-	-	-	-	-
TMTD	-	1	-	-	-	-	-
MBTS	-	-	1	0.5	1	0.5	-
CBS	-	-	-	-	-	-	1
DPG	-	-	-	0.5	-	0.5	-
PVI	-	-	-	-	0.5	0.5	-
Sawdust powder	100	100	100	100	100	100	100

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

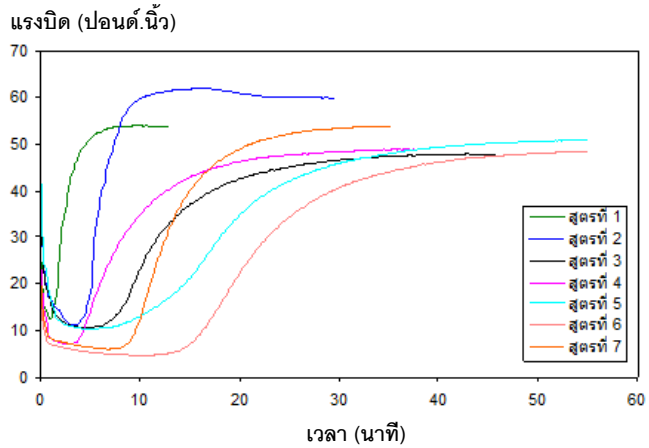
1. สมบัติการแปรรูป

การศึกษาสมบัติการแปรรูป พบว่า เมื่อขนาดของผงขี้เลื่อยไม้มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือเมื่อใช้ผงขี้เลื่อยไม้ปริมาณมากขึ้นจะทำให้ผสมยากขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวในยางเกิดได้ยากขึ้น การขึ้นรูปไม้เทียมโดยอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส พบว่ายางที่ผสมผงขี้เลื่อยไม้ขนาดต่ำกว่า 250 ไมโครเมตร ยางสามารถไหลได้ดีขึ้นรูปง่าย ชิ้นงานที่ได้มีผิวเรียบ มองเห็นเป็นเนื้อเดียวกับยาง ผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 250-500 และ 500-750 ไมโครเมตร ยางไหลได้ดีขึ้นรูปง่าย ชิ้นงานมีผิวเรียบ มองเห็นเส้นใยจากผงขี้เลื่อยไม้ชัดเจน ส่วนผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 750-1,000 ไมโครเมตร ยางยังมีการไหลและขึ้นรูปได้ง่าย ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมและสามารถใช้งานโดยการตัดด้วยเลื่อย การยึดด้วยตะปูเกลียวได้ดี แต่บางชิ้นงานจะมีผิวหยาบ เนื่องจากผงขี้เลื่อยมีขนาดใหญ่จึงกระจายได้ไม่ดีเท่าที่ควร สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิททั้งค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน ซึ่งพบว่ายิ่งขนาดของผงขี้เลื่อยไม้ใหญ่ขึ้นมอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งแรงดึงสูงสุดก็จะยิ่งลดลง และให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ismail *et al.* (1997) ที่สรุปว่าเส้นใยขนาดเล็กจะมีผลในการเสริมแรงได้ดีกว่าเส้นใยขนาดใหญ่

2. สมบัติการคงรูป

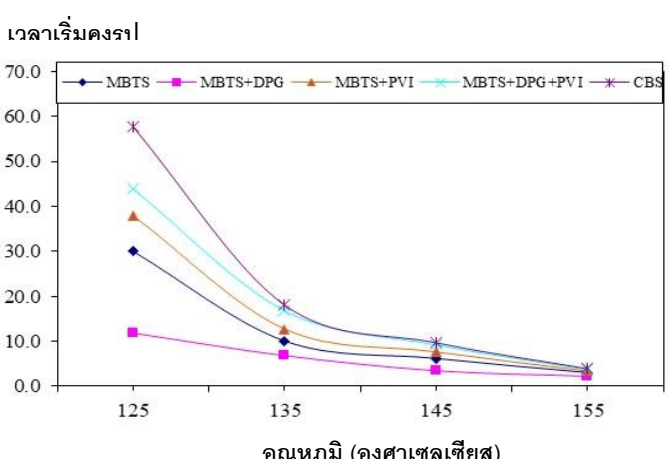
กราฟลักษณะการคงรูปของวัสดุคอมโพสิทสูตรไม้เทียมที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 1 พบว่าวัสดุคอมโพสิทสูตรที่ 2 ซึ่งใช้สารเร่งการคงรูป TMTD ให้ค่าแรงบิดสูงสุดที่ค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็นสูตรที่ 7 ซึ่งใช้สารเร่งการคงรูป CBS ตามลำดับ ส่วนสูตรอื่น ๆ ให้ค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าสำหรับวัสดุคอมโพสิทสูตรไม้เทียมที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส สารเร่งการคงรูป TMTD สามารถเกิดพันธะการเชื่อมโยงของคอมโพสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาไม่เกิน 5 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามสูตรที่ใช้สารเร่งการคงรูป ZDEC และ TMTD ส่วนผสมในคอมปาวด์คอมโพสิทมีลักษณะการคงรูปไม่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปไม้เทียม ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการบวมพองมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม้เทียมที่มีความหนา 25.4 มิลลิเมตร จะเกิด

การบวมพองมากกว่าไม้เทียมที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากสารเร่งการคงรูปทั้งสองชนิดนี้มีการเร่งให้วัสดุคอมโพสิทมีการเริ่มคงรูปเร็วเกินไป ส่งผลให้ผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์ซึ่งได้รับความร้อนโดยตรงจากเบ้าพิมพ์เกิดการคงตัว อากาศที่ขังอยู่ภายในไม่สามารถออกมาได้ในขณะการคงรูป จนกระทั่งการคงรูปสมบูรณ์ทำให้เกิดมีอากาศขังในชิ้นงาน



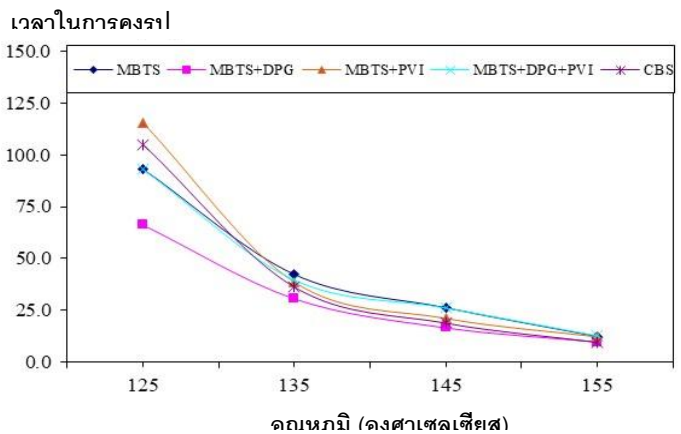
ภาพที่ 1 ลักษณะการคงรูปของวัสดุคอมโพสิทสูตรไม้เทียมที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส

การศึกษาสมบัติการคงรูปไม้เทียมที่อุณหภูมิ 125 135 145 และ 155 องศาเซลเซียส โดยเลือกชนิดของสารเร่งการคงรูปที่สามารถคงรูปผลิตภัณฑ์ไม้เทียมได้ทั้งแบบหนา 15 มิลลิเมตร และ 25.4 มิลลิเมตร คือ MBTS MBTS+DPG MBTS+PVI MBTS+DPG+PVI และ CBS พบว่าเวลาเริ่มคงรูปและเวลาในการคงรูปสมบูรณ์ของไม้เทียมจากวัสดุคอมโพสิตทุกสูตรมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการคงรูปเพิ่มขึ้น เวลาเริ่มคงรูปเฉลี่ยของการคงรูปที่อุณหภูมิ 125 135 145 และ 155 องศาเซลเซียส เท่ากับ 36.24±0.03 12.89±0.02 7.23±0.03 และ 3.25±0.03 นาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปไม้เทียม คือ 145 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีเวลาเริ่มคงรูปที่เหมาะสมไม่เร็วจนก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิต และไม่ช้าเกินไปจนกระทบต่อเป้าหมายจำนวนชิ้นงานต่อชั่วโมง โดยเวลาเริ่มคงรูปของสารเร่งในสูตรวัสดุคอมโพสิท เรียงลำดับจากเร็วไปช้าตามลำดับ ดังนี้ MBTS+DPG MBTS MBTS+PVI MBTS+DPG+PVI และ CBS

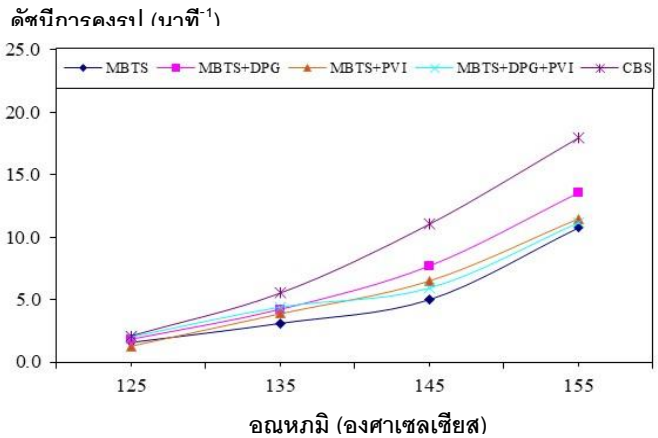


ภาพที่ 2 เวลาเริ่มคงรูปของวัสดุคอมโพสิทสูตรไม้เทียมที่อุณหภูมิต่างกัน

เวลาในการคงรูปสมบูรณ์ของวัสดุคอมโพสิทสูตรไม้เทียมที่แปรชนิดสารเร่งการคงรูปเรียงลำดับจากเร็วไปช้า ดังนี้ MBTS+DPG CBS MBTS+PVI MBTS ใกล้เคียงกับ MBTS+DPG+PVI ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 โดยการใช้สารเร่งการคงรูป CBS จะให้ดัชนีการคงรูปสูงที่สุด รองลงมาเป็น MBTS+DPG ในขณะที่ MBTS+PVI และ MBTS+DPG+PVI ให้ดัชนีการคงรูปที่ใกล้เคียงกัน ส่วน MBTS ให้ดัชนีการคงรูปต่ำที่สุด ดังภาพที่ 4 เนื่องจากการใช้ DPG จะช่วยกระตุ้นการทำงานของ MBTS ทำให้คงรูปสมบูรณ์ได้เร็วขึ้น ในขณะที่ PVI จะหน่วงให้เวลาเริ่มคงรูปของคอมโพสิตช้าลง แต่ไม่มีผลต่อเวลาในการคงรูปสมบูรณ์ จึงทำให้ดัชนีในการคงรูปสูงกว่าการใช้ MBTS แบบเดี่ยว ๆ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเวลาการคงรูปสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่างกันของวัสดุคอมโพสิทที่ใช้สารเร่งการคงรูป MBTS+DPG ซึ่งเป็นสูตรที่ให้เวลาในการคงรูปสมบูรณ์สั้นที่สุด พบว่าที่อุณหภูมิ 125 135 145 และ 155 องศาเซลเซียส มีเวลาการคงรูปสมบูรณ์เท่ากับ 66.11±0.05 30.46±0.03 16.45±0.03 และ 9.62±0.03 นาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามีเพียงที่อุณหภูมิ 145 และ 155 องศาเซลเซียส เท่านั้นที่มีระยะเวลาวงรอบการผลิต (cycle time) เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปไม้เทียม และเนื่องจากที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส สามารถขึ้นรูปได้แค่บางชิ้นงานและลักษณะไม้เทียมที่ได้จะมีสีเข้มขึ้น อาจจะเกิดจากอุณหภูมิสูงทำให้เส้นใยเกิดการเปลี่ยนสี ดังนั้นอุณหภูมิการขึ้นรูปไม้เทียมที่เหมาะสม คือ 145 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเวลาเริ่มคงรูปที่เหมาะสมสำหรับไม้เทียมทั้งสองระดับความหนา และสอดคล้องกับการศึกษาของ Ismail *et al.* (1997) ซึ่งศึกษาการใช้ผงขี้เลื่อยไม้เป็นสารตัวเติมในยางอิพอกไซด์และแนะนำให้ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปไม่เกิน 145 องศาเซลเซียส ในการคงรูปวัสดุคอมโพสิต



ภาพที่ 3 เวลาคงรูปสมบูรณ์ของวัสดุคอมโพสิทสูตรไม้เทียมที่อุณหภูมิต่างกัน



ภาพที่ 4 ดัชนีการคงรูปของวัสดุคอมโพสิทสูตรไม้เทียมที่อุณหภูมิต่างกัน

3. สมบัติการขึ้นรูป

การศึกษาสมบัติการขึ้นรูปไม้เทียมที่มีความหนา 15 และ 25.4 มิลลิเมตร โดยการอัดเบ้าขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 125 135 145 และ 155 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้สารเร่งการคงรูป MBTS และ MBTS+DPG ให้ผลดีที่สุด คือ สามารถขึ้นรูปไม้เทียมที่มีความหนา 25.4 มิลลิเมตร ได้ที่อุณหภูมิ 125 135 และ 145 องศาเซลเซียส ส่วนไม้เทียมที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร สามารถขึ้นรูปได้ทุกอุณหภูมิที่ศึกษา รองลงมา คือ สูตรที่ใช้ MBTS+DPG+PVI และ CBS สามารถขึ้นรูปไม้เทียมที่มีความหนา 25.4 มิลลิเมตร ได้ที่อุณหภูมิ 125 และ 135 องศาเซลเซียส ส่วนไม้เทียมที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิ 125 135 และ 145 องศาเซลเซียส และสูตรที่ใช้ MBTS+PVI สามารถขึ้นรูปได้สมบูรณ์เฉพาะที่อุณหภูมิ 125 และ135 องศาเซลเซียส ทั้งในไม้เทียมที่มีความหนา 15 และ 25.4 มิลลิเมตร ผลการประเมินความสมบูรณ์ผลิตภัณฑ์สรุปดังตารางที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากในผลิตภัณฑ์ไม้เทียมขนาด 450x50x25.4 มิลลิเมตร ที่มีความหนาและขนาดใหญ่กว่าไม้เทียมขนาด 300x30x15 มิลลิเมตร การถ่ายเทความร้อนจากแบบพิมพ์สู่ส่วนกลางผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นได้ช้ากว่า อุณหภูมิที่สามารถใช้ขึ้นรูปได้จึงมีขีดจำกัดมากกว่า ลักษณะของไม้เทียมที่คงรูปไม่สมบูรณ์จะมีลักษณะบวมพอง มีอากาศขังอยู่ภายในเนื่องจากผิวผลิตภัณฑ์ด้านนอกเกิดการคงรูปก่อนเนื้อด้านใน อากาศภายในจึงไม่สามารถระบายออกได้ทำให้เกิดลักษณะการบวมพอง

ตารางที่ 2 การประเมินความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างกัน

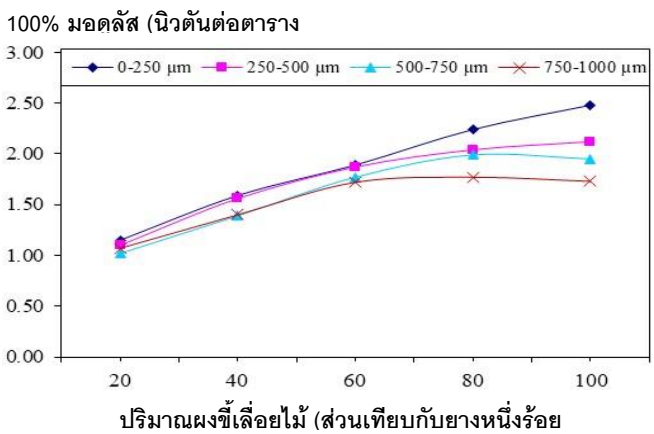
สารเร่งการคงรูป	ไม้ระแนง หนา 15 มิลลิเมตร				ไม้ระแนง หนา 25.4 มิลลิเมตร			
	125°C	135°C	145°C	155°C	125°C	135°C	145°C	155°C
ZDEC	/	X	X	X	/	X	X	X
TMTD	/	/	X	X	/	X	X	X
MBTS	/	/	/	/	/	/	/	X
MBTS+DPG	/	/	/	/	/	/	/	X
MBTS+PVI	/	/	X	X	/	/	X	X
MBTS+DPG+PVI	/	/	/	X	/	/	X	X
CBS	/	/	/	X	/	/	X	X

หมายเหตุ: / คือ ผลิตภัณฑ์มีความสมบูรณ์

X คือ ผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถคงรูปได้สมบูรณ์ มีการบวมพองหรือผิวสีคล้ำไหม้

4. สมบัติเชิงกล

การศึกษาขนาดและปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ เพื่อหาสัดส่วนขนาดและปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่เหมาะสมสำหรับไม้เทียมทั้งสองระดับความหนา โดยศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้เทียมที่ได้จากวัสดุคอมโพสิตที่ใช้สารเร่งการคงรูป MBTS+DPG และขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์มีความสมบูรณ์และมีวงรอบการผลิตเหมาะสมที่สุด ศึกษาโดยแปรขนาดผงขี้เลื่อยไม้ 4 ขนาด คือ 0-250 250-500 500-750 และ 750-1,000 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 20 40 60 80 และ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ผลการศึกษาพบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ ของไม้เทียมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่เพิ่มขึ้นเหมือนกันในทุกขนาดของผงขี้เลื่อยไม้ที่ศึกษา เนื่องจากปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่เพิ่มขึ้นไปขัดขวางการเคลื่อนไหวสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางขยับได้ยากขึ้น ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ จึงเพิ่มขึ้น และการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาดต่ำกว่า 250 ไมโครเมตร จะให้ไม้เทียมมีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ สูงที่สุด รองลงมาเป็นผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 250-500 500-750 และ 750-1,000 ไมโครเมตร โดยให้ค่าสูงสุดที่ปริมาณการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน เท่ากับ 2.48±0.04 2.12±0.02 1.95±0.03 และ 1.73±0.04 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อขนาดผงขี้เลื่อยไม้ใหญ่ขึ้นอาจมีผลต่อการกระจายตัวของผงขี้เลื่อยไม้ในวัสดุคอมโพสิต ส่งผลให้เกิดการเสริมแรงในเนื้อไม้ลดลง

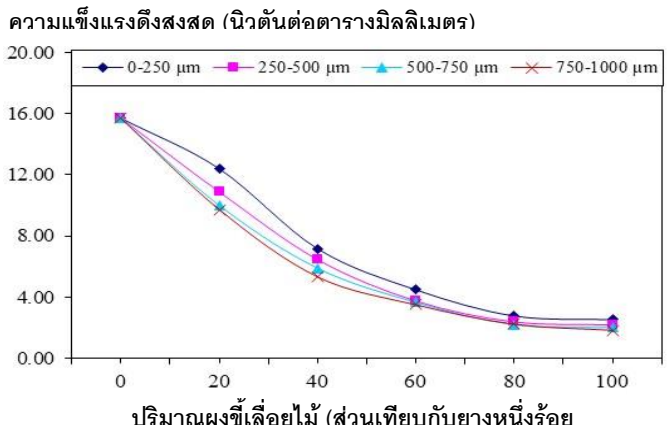


ภาพที่ 5 มอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ ของไม้เทียมที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ที่มีขนาดและปริมาณต่างกัน

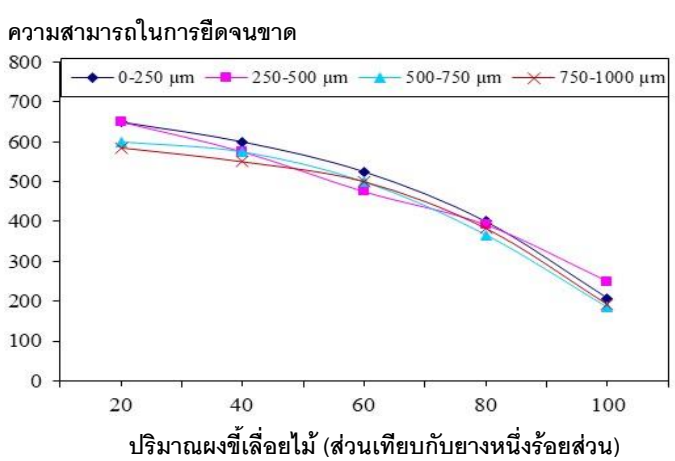
สมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานจากคอมโพสิตยางพารากับผงขี้เลื่อยไม้ให้ผลดังภาพที่ 6 พบว่าวัสดุคอมโพสิตมีความความแข็งแรงดึงสูงสุดน้อยกว่ายาง และเมื่อเพิ่มปริมาณของผงขี้เลื่อยไม้มากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานลดลง นอกจากนี้ยิ่งขนาดของผงขี้เลื่อยไม้ใหญ่ขึ้น ความแข็งแรงดึงสูงสุดก็จะยิ่งลดลง โดยความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงปริมาณการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ 20-60 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ทั้งนี้เนื่องจากผงขี้เลื่อยไม้ที่ศึกษาในทุกขนาดใหญ่กว่าสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้งานในยาง ซึ่งปกติสารตัวเติมที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงจะมีขนาดอนุภาคไม่เกิน 100 นาโนเมตร (Hepburn, 1991) ถ้าอนุภาคใหญ่กว่านี้จะไม่มีการเสริมแรงแต่ใช้งานเพื่อการลดต้นทุนหรือวัตถุประสงค์อื่น ดังนั้นจึงทำให้เกิดจุดอ่อนแอ (weak point) ขึ้นในเนื้อยาง นอกจากนี้การใช้ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณยางไม่เพียงพอจะหุ้มอนุภาคของผงขี้เลื่อยไม้ทำให้ความแข็งแรงดึงสูงสุดลดลงตามปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่เพิ่มขึ้น (Ismail *et al.*, 2002) และการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาดใหญ่อาจมีผลต่อการกระจายตัวของผงขี้เลื่อยไม้ในวัสดุคอมโพสิต ส่งผลให้เกิดการเสริมแรงในเนื้อไม้ลดลงดังได้กล่าวมาแล้ว โดยชิ้นงานที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาดต่ำกว่า 250 ไมโครเมตร

จะให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็นผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 250-500 500-750 และ 750-1,000 ไมโครเมตร โดยให้ค่าสูงสุดที่ปริมาณการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ 20 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน เท่ากับ 12.40±0.22 10.89±0.18 9.99±0.23 และ 9.73±0.19 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และชิ้นงานที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 750-1,000 ไมโครเมตร ปริมาณ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ให้ความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 1.82±0.33 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

สมบัติความสามารถในการยืดจนขาด ของคอมโพสิตยางพารากับผงขี้เลื่อยไม้ให้ผลดังภาพที่ 7 พบว่าความสามารถในการยืดจนขาดของชิ้นงานลดลง เมื่อผงขี้เลื่อยไม้เพิ่มขึ้นและขนาดของผงขี้เลื่อยไม้ใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณมากทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนไหวสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลองยางขยับได้ยากขึ้น วัสดุมีความยืดหยุ่นน้อยลง ความสามารถในการยืดจนขาดจึงลดลง และผงขี้เลื่อยไม้ขนาดใหญ่ทำให้เกิดจุดอ่อนแอในเนื้อยาง ส่งผลให้เนื้อยางไม่แข็งแรงและเป็นจุดเริ่มต้นการขาดได้ง่าย โดยชิ้นงานที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ปริมาณ 20 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ให้ความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วง 585±13.75 เปอร์เซ็นต์ ถึง 650±11.14 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงานที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ปริมาณ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ให้ความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 192±15.87 เปอร์เซ็นต์ ถึง 208±17.32 เปอร์เซ็นต์

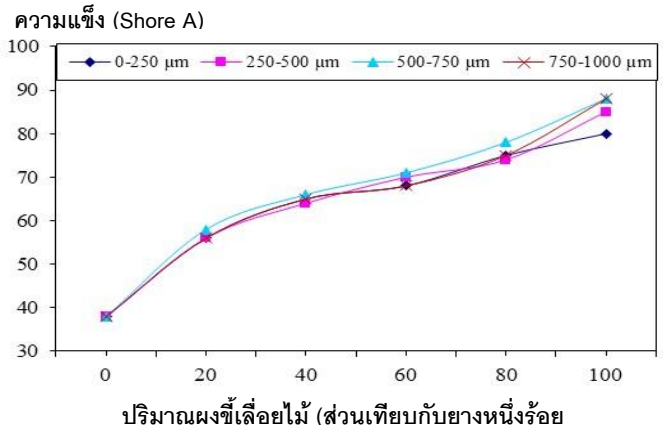


ภาพที่ 6 ความแข็งแรงดึงสูงสุดของไม้เทียมที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ที่มีขนาดและปริมาณต่างกัน



ภาพที่ 7 ความสามารถในการยืดจนขาดของไม้เทียมที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ที่มีขนาดและปริมาณต่างกัน

สมบัติความแข็ง การศึกษาสมบัติด้านความแข็งของชิ้นงานจากคอมโพสิตของยางพารากับผงขี้เลื่อยไม้ให้ผลดังภาพที่ 8 พบว่าความแข็งของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณของผงขี้เลื่อยไม้ที่เพิ่มขึ้นในทุกขนาดของผงขี้เลื่อยไม้ที่ศึกษา โดยผงขี้เลื่อยไม้สามารถให้ความแข็งของยางสูงกว่าการใช้สารตัวเติมลดต้นทุนโดยทั่วไปที่ให้ความแข็งของยางได้ประมาณไม่เกิน 75 shore A (Fred, 1993) แสดงให้เห็นว่าการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณสูง สามารถเพิ่มสมบัติความแข็งตึง (stiffness) ให้กับยางได้ เหมาะสำหรับการใช้ทำผลิตภัณฑ์ไม้เทียมที่ศึกษา โดยชิ้นงานที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ปริมาณ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ให้ความแข็งของชิ้นงานมีค่าสูงที่สุด ที่ค่าเท่ากับ 80±1.15 85±1.06 88±0.72 และ 88±1.01 shore A สำหรับการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาดต่ำกว่า 250 250-500 500-750 และ 750-1,000 ไมโครเมตร ตามลำดับ

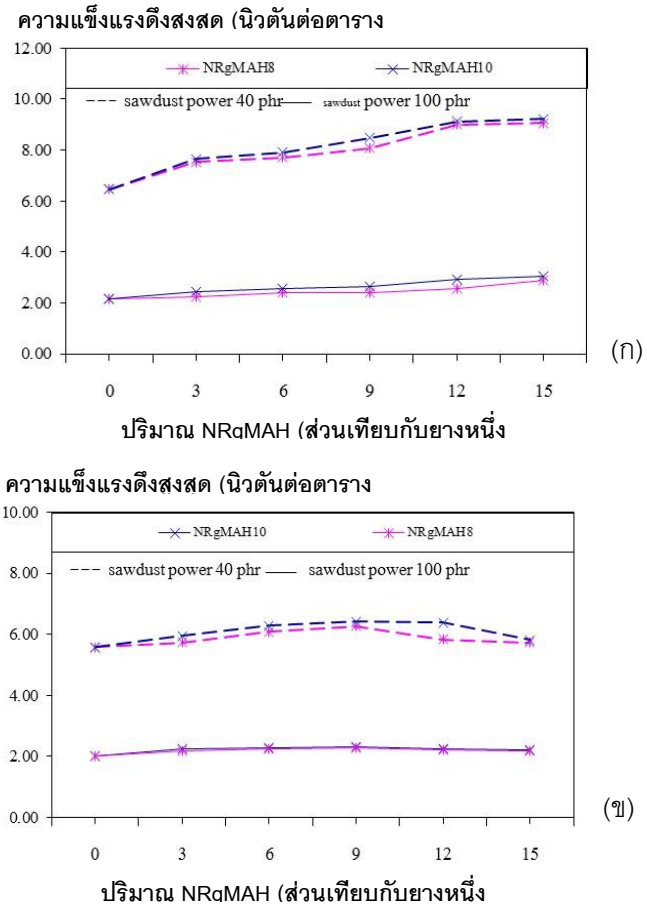


ภาพที่ 8 ความแข็งของไม้เทียมที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ที่มีขนาดและปริมาณต่างกัน

5. การปรับปรุงสมบัติด้วยยางดัดแปร

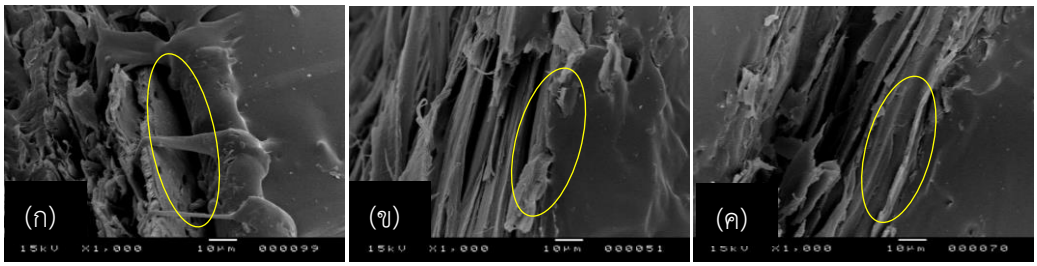
การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ (NRgMAH) ที่เตรียมโดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 8 และ 10 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ซึ่งมีปริมาณการเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติเท่ากับ 4.62 และ 4.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เป็นสารเชื่อมติดในไม้เทียมที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 250-500 และ 500-750 ไมโครเมตร ในปริมาณ 40 และ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน แปรปริมาณของ NRgMAH ที่ 3 6 9 12 และ 15 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน เพื่อให้ได้ไม้เทียมที่มีสมบัติที่ดีที่สุด เหมาะสมสำหรับจะใช้ทดแทนไม้ได้ ผลการศึกษาสารเชื่อมติดพบว่า ความแข็งแรงดึงสูงสุดของไม้เทียมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ $NRgMAH_8$ และ $NRgMAH_{10}$ ที่เพิ่มขึ้นเหมือนกันทั้งกรณีไม้เทียมจากผงขี้เลื่อยไม้ 40 และ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน อย่างไรก็ตามเนื่องจากไม้เทียมที่เตรียมโดยใช้ผงขี้เลื่อยไม้ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน มีสมบัติความแข็งตึงและความแข็งสูงมากทำให้ความยืดหยุ่นลดลง ในการปรับปรุงสมบัติของไม้เทียมโดยใช้ยางดัดแปรจึงเห็นผลการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงของไม้เทียมที่เตรียมโดยใช้ผงขี้เลื่อยไม้ 40 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน เด่นชัดกว่าไม้เทียมที่เตรียมโดยใช้ผงขี้เลื่อยไม้ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน โดยความแข็งแรงดึงสูงสุดของไม้เทียมที่ปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ 40 และ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ของผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 250-500 ไมโครเมตร ให้ความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 9.23±0.15 และ 3.04±0.13 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ดังภาพที่ 9 (ก) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 41.86 เปอร์เซ็นต์ และ 36.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และความแข็งแรงดึงสูงสุดของไม้เทียมจากผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 500-750 ไมโครเมตร ให้ความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 6.42±0.11 และ

2.32±0.07 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ดังภาพที่ 9 (ข) มีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 13.62 เปอร์เซ็นต์ และ 9.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



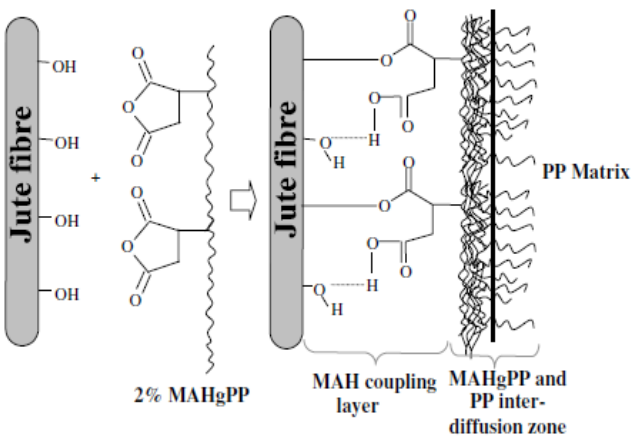
ภาพที่ 9 ความแข็งแรงดึงสูงสุดของไม้เทียมที่ปรับปรุงสมบัติด้วย NRgMAH : ไม้เทียมที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 250-500 ไมโครเมตร (ก) และไม้เทียมที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 500-750 ไมโครเมตร (ข)

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางพารากับผงขี้เลื่อยไม้ในไม้เทียม พบว่าคอมโพสิตที่ไม่ใช้สารเชื่อมติดในภาพที่ 10 (ก) มีการยึดติดระหว่างเฟสต่อเนื่องที่เป็นเนื้อยางและเฟสกระจายที่เป็นผงขี้เลื่อยไม้น้อย เกิดช่องว่างระหว่างเฟสขนาดใหญ่ที่ชัดเจนไม้เทียมที่ได้จึงไม่ค่อยแข็งแรง ส่วนการใช้สารเชื่อมติดทั้ง $NRgMAH_8$ และ $NRgMAH_{10}$ ในภาพที่ 10 (ข) และ (ค) ลักษณะสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นถึงการยึดติดระหว่างเฟสทำให้ไม่เห็นช่องว่างระหว่างเนื้อยางและผงขี้เลื่อยไม้ เนื่องจากผงขี้เลื่อยไม้สามารถเกิดอันตรกิริยากับเนื้อยางในระดับโมเลกุลระหว่างมาลิอิกแอนไฮไดรด์ในยางดัดแปรกับหมู่ไฮดรอกซิลของผงขี้เลื่อยไม้ด้วยพันธะไฮโดรเจน และ/หรือ พันธะเอสเทอร์ ตามลักษณะโมเดลโครงสร้างที่เสนอโดย Doan *et al.* (2006) ในภาพที่ 11 ทำให้เนื้อยางและผงขี้เลื่อยไม้มีการยึดติดที่ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดการเสริมแรงทำให้สมบัติเชิงกลของไม้เทียมสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sameni *et al*. (2002) และ Blendzki and Faruk (2003) ซึ่งพบว่าการใช้ยางธรรมชาติดัดแปรสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทระหว่างยางและเส้นใยธรรมชาติได้



No Binding $NRgMAH_8$ $NRgMAH_{10}$

ภาพที่ 10 สัณฐานวิทยากำลังขยาย 1000 เท่า ของวัสดุคอมโพสิทจากไม้เทียม : ไม่ใช้สารเชื่อมติด (ก) ใช้ $NRgMAH_8$ ปริมาณ 12 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน (ข) และใช้ $NRgMAH_8$ ปริมาณ 12 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน (ค)



ภาพที่ 11 โมเดลโครงสร้างอันตรกิริยาระหว่างหมู่มาลิอิกแอนไฮไดรด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใย

สรุปผลการวิจัย

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปไม้เทียม คือการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส โดยการใช้สารเร่งการคงรูป MBTS 0.5 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ร่วมกับ DPG 0.5 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ซึ่งจะมีเวลาเริ่มคงรูป 3.46±0.02 นาที และเวลาคงรูปสมบูรณ์ 16.45 นาที ให้วงรอบการผลิตที่เหมาะสมเท่ากับ 16.45±0.03 และ 18.45±0.04 นาที สำหรับไม้เทียมที่มีความหนา 15 และ 25.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ การใช้ผงขี้เลื่อยไม้ทำให้วัสดุคอมโพสิทมีความแข็งตึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานจากวัสดุคอมโพสิตของผงขี้เลื่อยไม้ขนาดต่ำกว่า 250 ไมโครเมตร จะให้สมบัติมอดูลัสสูงที่สุดที่ 2.48±0.04 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ในขณะที่ชิ้นงานจากวัสดุคอมโพสิตของผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 500-750 ให้สมบัติความแข็งสูงที่สุดที่ 88±0.72 shore A ความแข็งแรงดึงสูงสุดและความสามารถในการยืดจนขาดของวัสดุคอมโพสิตมีค่าน้อยกว่ายาง และมีค่าลดลงตามปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่เพิ่มขึ้นและขนาดของผงขี้เลื่อยไม้ที่ใหญ่ขึ้น โดยชิ้นงานที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาดต่ำกว่า 250 ไมโครเมตร มีความแข็งแรงดึงสูงสุดและความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าสูงที่สุด เมื่อใช้ปริมาณการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ 20 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน เท่ากับ 12.40±0.22 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และ 650±11.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และชิ้นงานที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 750-1,000 ไมโครเมตร มีความแข็งแรงดึงสูงสุดและความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าต่ำที่สุด เมื่อใช้ปริมาณการใช้ผงขี้เลื่อยไม้ 100 ส่วน

เทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน เท่ากับ 1.82±0.33 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และ 192±15.87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณที่เหมาะสมของผงขี้เลื่อยไม้สำหรับทำวัสดุคอมโพสิทสูตรไม้เทียม คือ ปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ซึ่งให้สมบัติความแข็งตึงคล้ายไม้และมีความแข็งสูงที่สุด 88±0.72 shore A การใช้ $NRgMAH_8$ และ $NRgMAH_{10}$ ในวัสดุคอมโพสิตของยางพารากับผงขี้เลื่อยไม้ ทำให้เกิดการยึดติดระหว่างเฟสต่อเนื่องที่เป็นเนื้อยางและผงขี้เลื่อยไม้ในระดับโมเลกุล สามารถปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงของชิ้นงานได้ โดยให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นสูงสุด 41.86 เปอร์เซ็นต์ และ 36.81 เปอร์เซ็นต์ สำหรับไม้เทียมที่ใช้ผงขี้เลื่อยไม้ขนาด 250-500 ไมโครเมตร ที่ปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ 40 และ 100 ส่วนเทียบกับยางหนึ่งร้อยส่วน ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณบริษัทชูศักดิ์แอนด์พรรณีลีดเดอร์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนผงขี้เลื่อยไม้ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ชาตรี หอมเขียว. (2557). การพัฒนาและการประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติเชิงอุตสาหกรรม. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม.* 10(2), 97-110.

ไพโรจน์ กลิ่นพิทักษ์ และอรภรณ์ บัวหลวง. (2547). การเตรียมกาวติดไม้จากยางธรรมชาติมาเลเอต. โครงการวิจัยแห่งชาติ : ยางพารา ฝ่ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. กรุงเทพฯ.

Blendzki. A.K. and Faruk, O. (2003). Wood fiber reinforced polypropylene composites : Effect of fiber geometry and coupling agent on physico-mechanical properties. *Applied Composite Materials*, 10(1), 365-379.

Doan, T.T.L., Gao, S.L. and Mader, E. (2006). Jute/polypropylene composites I. Effect of matrix modification. *Composites science and technology*. 66(7), 952-963.

Fred, W.B. (1993). *Rubber Compounding : Principles, materials and techniques*. New York: Marcel Dekker, Inc.

Hepburn, C. (1991). *Rubber compounding ingredients-need, theory and innovation Part 1: Vulcanising systems, antidegradants and particulate fillers for general purpose rubbers*. United Kingdom: Rapra Technology Limited.

Homkhiew, C., Ratanawilai, T. and Thongruang, W. (2014). Composites from recycled polypropylene and rubberwood flour: Effects of composition on mechanical properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials.* 28(2), 179-194.

Ismail, H., Edyhama, M.R. and Wirjosentono, B. (2002). Bamboo fibre filled natural rubber composites: the effects of filler loading and bonding agent. *Polymer Testing*, 21(2), 139-144.

Ismail, H., Rozman. H.D., Jaffri. R.M., and Ishak, M.Z.A. (1997). Oil palm wood flour reinforced epoxidized natural rubber composites : The effect of filler content and size. *Composites: Part A*, 33(10), 14-23.

Mohanty, A.K., Misra, M. and Drzal, T.L. (2005). *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. America: Taylor and Francis Group.

Nakason, C., Keasaman, A. and Supasathitikul, P. (2004). The grafting of maleic anhydride onto natural rubber. *Polymer Testing*, 23(1), 35-41.

Sameni, J.K., Ahmad, S.H. and Zakaria, S. (2002). Effects of processing parameters and graft-copolymer (propylene/maleic anhydride) on mechanical properties of thermoplastic natural rubber composites reinforced with wood fiber. *Plastic, Rubber and Composite*, 33(4), 162-166.

Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K. (2005). Average mixing torque, tensile and impact properties and thermal stability of PVC/sawdust composites with different silane coupling agents. *Journal of Applied Polymer Science*, 96(1), 213-221.

Sombatsompop, N. and Phromchirasuk, C. (2004). Effects of acrylic based processing aids on processability, rheology, thermal and structural stability, and mechanical properties of PVC/wood sawdust composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(2), 782-790.