

การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของ คอมโพสิตพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิลผสมกากชา โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

Analysis of Factors Influencing Mechanical Properties of Recycled Polypropylene/Tea Waste Composites Using Factorial Experimental Design

อนุชิต คงฤทธิ^{1*} ชีวินทร์ ลิ้มศิริ¹ และ สุรีพร มีหอม¹
Anuchit Khongrit^{1*}, Cheevin Limsiri¹ and Sureeporn Meehom¹

Received: 22 September 2024

Revised: 29 January 2025

Accepted: 3 April 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิลผสมกากชา โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ General Factorial Design เพื่อประเมินผลกระทบของชนิดกากชา (ชาไทยและชาเขียว) ปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) และปริมาณเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ต่อความแข็งแรง ณ จุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุดมอดูลัสยืดหยุ่น เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ความต้านทานแรงกระแทก และค่าความแข็ง การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการวิเคราะห์ผลกระทบเชิงปริมาณแสดงให้เห็นว่าทั้งสามปัจจัยมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต โดยชนิดของกากชามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงและมอดูลัสความยืดหยุ่น ในขณะที่ PP-g-MA ส่งผลเชิงบวกต่อความแข็งแรง ณ จุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสความยืดหยุ่น ส่วนปัจจัย TPE มีผลในการเพิ่มความต้านทานแรงกระแทกและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

การวิเคราะห์ภาพความสูงต่ำ (Contour plot) ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและสมบัติทางกล และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าอิทธิพลหลัก ไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ที่มีนัยสำคัญระหว่างชนิดของกากชากับปริมาณ PP-g-MA หรือ TPE ในเกือบทุกสมบัติทางกลยกเว้นค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นและค่าความแข็ง วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient Analysis) ตลอดจนการสร้างสมการเส้นตรง (Linear regression) สำหรับการพยากรณ์ค่าสมบัติทางกล (Prediction

¹ สาขาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล นครราชสีมา ประเทศไทย 30000

¹ Department of Engineering Management, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

*ผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding author) e-mail: anuchit_kho@vu.ac.th

Analysis) พบว่าสมการเส้นตรงมีความสามารถในการพยากรณ์สมบัติทางกลที่ไม่สูงมากนัก โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ระหว่าง 47.29% ถึง 67.77% การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธี Desirability Function ผลการ Optimization พบว่าสูตรที่ประกอบด้วยกากชาเขียวและ PP-g-MA 5% โดยไม่มี TPE ให้ค่า Composite Desirability สูงสุดที่ 0.90 แสดงถึงสมดุลที่ดีที่สุดของสมบัติทางกล อย่างไรก็ตามการเพิ่ม TPE 5% แม้จะช่วยเพิ่มความต้านทานกระแทกและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลง ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิตสามารถนำไปประยุกต์ในงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูงมากนัก จึงเหมาะสมสำหรับการผลิตเฟอร์นิเจอร์หรือตกแต่งภายในบ้านได้ เช่น ตกแต่งสวนและภูมิทัศน์ ใช้เป็นวัสดุตกแต่งผนังหรือฝ้าเพดาน ชั้นวางของหรือตู้เก็บของที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมาก

คำสำคัญ: วัสดุคอมโพสิต การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล การวิเคราะห์ความแปรปรวน การวิเคราะห์การถดถอย

ABSTRACT

This study aimed to analyze the influence of key factors on the mechanical properties of recycled polypropylene/tea waste composites using a General Factorial Design experiment. The research evaluated the effects of tea waste type (Thai tea and green tea), polypropylene-graft-maleic anhydride (PP-g-MA) content, and thermoplastic elastomer (TPE) content on yield strength, tensile strength, elastic modulus, elongation percentage, impact strength, and hardness. Analysis of Variance (ANOVA) and quantitative effect analysis revealed that all three factors had statistically significant impacts on the composites' mechanical properties. Specifically, tea waste type significantly influenced hardness and elastic modulus, while PP-g-MA positively affected the yield strength, tensile strength and elastic modulus, and TPE enhanced impact strength and elongation percentage.

The contour plot analysis provided insights into the relationship between factors and mechanical properties, aligning with the main effects analysis results. No significant interactions were found between tea waste types and PP-g-MA or TPE content for most mechanical properties, except for elastic modulus and hardness. Regression coefficient analysis and linear regression for mechanical properties prediction showed moderate predictive capability, with determination coefficients ranging from 47.29% to 67.77%. Using the desirability function optimization method, the formulation containing green tea waste and 5% PP-g-MA without TPE achieved the highest composite desirability of 0.90, indicating the best balance of mechanical properties. Although adding 5% TPE significantly improved impact resistance and elongation percentage, it reduced the maximum tensile strength. This research suggests that the material is suitable for applications not requiring high strength, making it appropriate for furniture manufacturing or home decoration

such as garden and landscape decoration, wall or ceiling panels, and shelves or storage cabinets with light load-bearing requirements.

Keywords: Composite Materials; Factorial Design of Experiment; Analysis of Variance (ANOVA); Regression Analysis

บทนำ

วัสดุคอมโพสิตระหว่างไม้และพอลิเมอร์ (Wood Polymer Composites หรือ WPCs) เป็นแนวทางการวิจัยที่สอดคล้องกับหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) อย่างชัดเจน โดยมุ่งเน้นการลดของเสียและการใช้วัสดุที่ยั่งยืน WPCs ซึ่งผสมผสานเส้นใยธรรมชาติกับพลาสติกรีไซเคิลถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดการพึ่งพาวัสดุบริสุทธิ์อื่นนำไปสู่การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การวิจัยเกี่ยวกับ WPCs จึงมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนเป้าหมายของเศรษฐกิจหมุนเวียน ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร ลดปริมาณของเสีย และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก นอกจากนี้ WPCs ยังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมก่อสร้างและยานยนต์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นทั้งด้านความทนทานและมีคุณสมบัติด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy-efficient properties) ในกระบวนการผลิตซึ่งสนับสนุนแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ WPCs จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการผลักดันการเปลี่ยนผ่านไปสู่รูปแบบการผลิตที่ยั่งยืนโดยมุ่งหวังที่จะตอบสนองทั้งเป้าหมายทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมไปพร้อมกัน [1, 2]

งานวิจัยที่ผ่านมาของผู้วิจัยได้มุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุที่สอดคล้องกับหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียนอย่างเป็นรูปธรรม โดยแบ่งออกเป็นสองแนวทางหลัก ได้แก่ การนำพอลิเมอร์รีไซเคิลมาผสมกันและปรับปรุงสมบัติทางกลและการนำสารตัวเติมธรรมชาติมาผสมเป็น WPCs ในแนวทางแรกนั้นได้มีการนำพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลมาสร้างพอลิเมอร์ผสมและปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยา [3] รวมถึงการใช้เทคนิคการเชื่อมขวางสายโซ่พอลิเมอร์ในการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิล [4] โดยกระบวนการเชื่อมขวางสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยาไฮเลนประกอบด้วยสี่กระบวนการหลัก ได้แก่ การกราฟต์ไฮเลนโดยไวนิลไฮเลนถูกกราฟต์เข้ากับสายโซ่พอลิเมอร์โดยใช้เปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ต่อมากระบวนการไฮโดรไลซิสของหมู่แอลคอกซี ($-OCH_3$) ของไฮเลนที่กราฟต์แล้วเกิดปฏิกิริยากับความชื้น ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) จากนั้นการควบแน่นโดยหมู่ไฮดรอกซิลเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันสร้างพันธะ $Si-O-Si$ เชื่อมระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ และสุดท้ายการเชื่อมขวางกับเส้นใยธรรมชาติโดยหมู่ไฮดรอกซิลเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของเส้นใยไม้สร้างพันธะ $Si-O-C$ ส่วนในแนวทางที่สองได้มีการนำกากกาแฟซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีส่วนประกอบของเส้นใย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โปรตีน และลิกนิน [5] มาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิโพรพิลีน [6] และพอลิ-แลคติกแอซิด [7] โดยพบว่าการใช้สารช่วยผสมในวัสดุคอมโพสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีนเป็นเนื้อพื้นผสมกับกากกาแฟสามารถเพิ่มการผสมผสานตัวระหว่างเฟส และปรับปรุงสมบัติทางกลให้สูงขึ้นได้ ในขณะที่การเติมกากกาแฟในพอลิแลคติกแอซิดที่สัดส่วนร้อยละ 20 ให้สมบัติทางกลที่เหมาะสมพร้อมด้วยมีค่าดัชนีการหลอมไหลที่สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดเข้าแบบ (Injection molding) เพื่อสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ ทั้งสองแนวทางนี้สะท้อนให้เห็นถึงความพยายามในการประยุกต์ใช้หลักการเศรษฐกิจหมุนเวียนในการพัฒนาวัสดุผสมและวัสดุคอมโพสิต โดยมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ การลดของเสีย และการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้ว

การศึกษาก่อนหน้านี้ได้นำกากชาไทยและกากชาเขียวจากร้านจำหน่ายเครื่องดื่มชามาเป็นสารตัวเติมในวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิล ทั้งนี้มีงานวิจัยที่พบว่ากากชามีส่วนประกอบของเซลลูโลส เฮมิ

เซลลูโลส ลิกนิน และซีเถ้าเช่นเดียวกันกับกากกาแฟ [8, 9] จึงสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมได้ การศึกษาดังกล่าวมุ่งเน้นการศึกษาสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของวัสดุคอมโพสิต ผลการวิจัยได้เผยให้เห็นถึงความท้าทายสำคัญในการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตดังกล่าว โดยการวิเคราะห์ภาพรอยแตกหักแสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ และการฉีกขาดของเนื้อพื้น ซึ่งส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้ผลการทดสอบสมบัติทางกลและการวิเคราะห์ทางสถิติยังพบว่าการผสมผงกากกาแฟส่งผลให้ความแข็งแรงจากการรับแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตลดลง แม้ว่าจะมีความแข็งแรงที่สูงขึ้น ทั้งนี้ชนิดของกากกาแฟที่ใช้มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบร่วมกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าสาเหตุหลักของการลดลงของสมบัติทางกลหลังจากการผสมกากกาแฟทั้งสองชนิดกับพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิลคือ การลื่นไหลในการยึดติด (Adhesion failure) และการฉีกขาดของเนื้อพื้น (Matrix fracture) ข้อค้นพบนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนาสูตรวัสดุคอมโพสิตโดยใช้สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มการยึดติดและการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดปัญหาความชื้นในเนื้อวัสดุที่ส่งผลต่อการเกิดรูพรุนในกระบวนการขึ้นรูปขึ้นงาน [10]

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยปัจจุบันจึงมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาความเข้ากันไม่ได้ระหว่างวัสดุหรือการลื่นไหลในการยึดติดนั้นโดยใช้สารเติมแต่งทางเคมีเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาของผู้วิจัยและการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าสามารถใช้สารช่วยผสม หรือสารเพิ่มความเข้ากันได้ เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) และสารปรับแต่งอื่นๆ เพื่อให้เกิดการผสมระหว่างวัสดุที่แตกต่างกัน ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้พอลิโพรพิลีนเกรดมาเลอิกแอนไฮไดรด์โคพอลิเมอร์ (PP-g-MA) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีนเป็นฐาน กลไกการทำงานของ PP-g-MA นั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิลของ PP-g-MA กับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนผิวของไม้ ส่งผลให้เกิดพันธะเอสเทอร์ซึ่งช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างองค์ประกอบของวัสดุ นอกจากนี้ PP-g-MA ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้นและช่วยลดการดูดซึมน้ำของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ [11, 12] นอกเหนือจาก PP-g-MA แล้วการศึกษานี้ยังเลือกใช้พอลีโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (TPE) เป็นสารเติมแต่งอีกชนิดหนึ่งเนื่องจาก TPE มีสมบัติเด่นในด้านความต้านทานต่อความเค้น ซึ่งมีความสำคัญในการเพิ่มความเหนียว และปรับปรุงการตอบสนองต่อแรงกระทำของวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้ TPE ยังช่วยป้องกันการแตกหักแบบเปราะซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยใน WPCs แบบดั้งเดิม [13, 14] โดยสรุปการใช้ PP-g-MA ร่วมกับ TPE คาดว่าจะสามารถแก้ปัญหาการยึดติดระหว่างเฟสและเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้กระบวนการออกแบบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง (Design and Analysis of Experiment) เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของกากกาแฟที่นำมาผสม ปริมาณการเติมพอลิโพรพิลีนเกรดมาเลอิกแอนไฮไดรด์โคพอลิเมอร์ และพอลีโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและสารเคมี

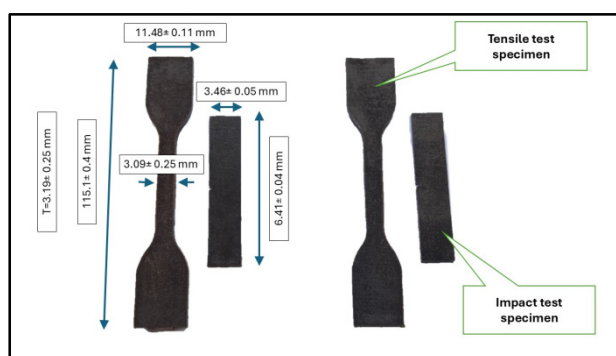
วัสดุเมทริกซ์ (Matrix) ในการวิจัยนี้คือพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิลที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลแก้วสีขาวขุนจากร้านจำหน่ายชา และกาแฟในรูปแบบเกล็ดชิ้นเล็กสารตัวเติมธรรมชาติในการวิจัยนี้ (Natural filler) คือกากชาไทย และกากชาเขียวที่เหลือจากการชงเครื่องดื่มจากร้านจำหน่ายเครื่องดื่มชาแฟรนไชส์ขนาดเล็ก

แห้งหนึ่งทีเน้นจำหน่ายเฉพาะเครื่องตีเม่นูชาเย็น นำมาทำให้แห้งโดยการตากในที่ร่มเป็นเวลา 3 วันจึงแห้งสนิทมีลักษณะเป็นผง ร่วน ไม่จับตัวกันเป็นก้อน เมื่อแห้งแล้วนำมาผ่านตะแกรงขนาด 30 Mesh ซึ่งอ้างอิงวิธีการตามการวิจัยที่ผ่านมา [10] สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์โคพอลิเมอร์ (PP-g-MA) เกรด POLYB® AM-920 (มาเลอิกแอนไฮไดรด์ประมาณ 1wt%Melt flow rate 100-120 g/10 min) จากบริษัท Hannanotech co., LTD พอลิโพรพิลีนสไตรีนบิวทิลเอสเตอร์ (TPE) เกรด Engage 7447 (Melt flow rate 5 g/10 min, Tensile strength 2.4 MPa, DSC Melting point 135°C) จากบริษัท Dow Chemical สารเสริมเสถียรภาพทางความร้อน Sunox 168 Antioxidant (Chemical structure Tris (2,4-ditert-butylphenyl) phosphite, Melting point 183-187 °C, Molecular weight 647g/mole) โดยสารเคมีทั้งหมดได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท โพลีเคมี พรีเมียร์ จำกัด



(A)

(B)



(C)

Figure 1 Thai tea residue powder (A), green tea residue powder (B), and specimens molded according to ASTM standards (C)

2.กระบวนการเตรียมวัสดุคอมโพสิต

การผสมแห้งเบื้องต้น (Pre-mixing) เริ่มจากการนำพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิล กากชา และสารเคมีต่างๆ ตามสูตรที่ออกแบบการทดลองมาผสมแห้งด้วยเครื่องผสมแห้งทางกล (Mechanical mixer) และนำไปอบเพื่อลดความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผสมแบบหลอมด้วยการคอมพาวนด์ (Compound) โดย

เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (L/D=12) แบบหมุนทางเดียวกัน (Co-rotation) ที่อุณหภูมิ 200-230 °C จากส่วนป้อน (Feed Zone) ไปจนถึงส่วนส่ง (Metering Zone) จากนั้นทำการหล่อเย็นให้แข็งตัวด้วยอากาศ และใช้เครื่องบดทางกลทำให้เป็นเม็ดขนาดเล็กก่อนนำเข้าตู้อบลมร้อน [10] สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ด้วยกระบวนการฉีดเข้าแบบ (Injection molding) โดยมีรูปชิ้นงานทดสอบที่แสดงดัง Figure 1 Thai tea residue powder (A), green tea residue powder (B), and specimens molded according to ASTM standards (C) โดยภาพที่ 1 (A) แสดงภาพของกากชาไทย ภาพ 1 (B) แสดงภาพของกากชาเขียว โดยกากชาทั้งสองชนิดมีลักษณะอนุภาคที่เป็นผงผสมกับลักษณะเส้นใยสั้น และมีส่วนที่เป็นเศษก้านที่มีขนาดใหญ่กว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยกากชาไทยมีสีน้ำตาลและกากชาเขียวมีสีเขียวเข้ม สำหรับขนาดการกระจายตัวของกากชาไทยและกากชาเขียวเท่ากับ 319.1 ± 175.1 micron และ 442.1 ± 168.6 micron ตามลำดับ [10] ส่วน 1 (C) แสดงภาพชิ้นงาน และขนาดชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติทางกล

3. การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง LLOYD รุ่น LR10K น้ำหนักภาระงาน 10 Kilonewtons (kN) อัตราการดึง 50 mm/min รายงานผลค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elastic) มีหน่วยเป็น MPa และค่าร้อยละการยืดตัว (%Elongation) การทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบ Izod impact โดยใช้เครื่องทดสอบแบบตุ้มเหวี่ยงน้ำหนัก (Pendulum) Instron รุ่น CEAST 9050 ด้วยค้อนเหวี่ยงที่มีค่าพลังงาน 2.7 Jule รายงานผลค่าความต้านทานแรงกระแทกมีหน่วยเป็น kJ/m^2 การทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 แบบคูโรมิเตอร์ด้วยเครื่อง Teclock รุ่น GS-612 น้ำหนักกด 5 Kg ระยะเวลากด 1 second รายงานผลเป็นค่าความแข็งมีหน่วยเป็น Shore D

4. การออกแบบการทดลอง

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่ผสมกากชา เนื่องจากมีทั้งปัจจัยเชิงคุณภาพ (ชนิดของกากชา) และปัจจัยเชิงปริมาณ (ปริมาณ PP-g-MA และ TPE) ที่ต้องพิจารณาร่วมกัน งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ General Factorial Design ที่มีความยืดหยุ่นสูงและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่มีระดับแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการผสมผสานระหว่างปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ [15-17] การออกแบบนี้ช่วยให้สามารถประเมินทั้งผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตที่ผสมกากชา ประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักได้แก่ ชนิดของกากชา (Tea residual) (2 ระดับชาเขียวและชาไทย) ปริมาณ PP-g-MA (3 ระดับ 0%, 2.5% และ 5 wt%) และปริมาณ TPE (3 ระดับ 0%, 5% และ 10 wt%) โดยกำหนดสัญลักษณ์ A, B และ C ตามลำดับ สัดส่วนการผสมกากชาเท่ากับทุกสูตรคือ 20 wt% และสารเสริมเสถียรภาพ 0.1 wt% ดังนั้นสำหรับพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิล (rPP) แปรผันตามปริมาณที่เหลือตั้งแต่ 79.9% ถึง 64.9 wt%

การทดลองประกอบด้วย 18 การทดลองพื้นฐาน (Base runs) แต่ละตัวแบบทดลองทดสอบซ้ำจำนวน 10 ครั้ง วัตถุประสงค์หลักคือการระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลสำคัญ สมบัติทางกลและหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติเพื่อช่วยให้เข้าใจถึงผลกระทบหลัก ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และแนวทางในการพัฒนาวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของตัวแบบทดลอง (Design Matrix) ในการวิจัยนี้ ตัวอย่างเช่น rPP/T/MA2.5/TPE10 สื่อถึงคอมโพสิตสูตรนี้มีการผสมกากชาไทย 20 wt% PP-g-MA ปริมาณ 2.5 wt% TPE ปริมาณ 10 wt% Antioxidant 0.1 wt% และพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิล 67.4 wt% เป็นต้น

Table 1 Formulations of Tea Residual-Based Composite Materials for Experimental Design

Run	Code	rPP	Type of tea residual(A)	Tea residual	PP-g-MA (B)	TPE (C)	Antioxi-dant
1	rPP/T	79.9	Thai	20	0	0	0.1
2	rPP/T/MA2.5	77.4	Thai	20	2.5	0	0.1
3	rPP/T/MA5	74.9	Thai	20	5	0	0.1
4	rPP/T/TPE5	74.9	Thai	20	0	5	0.1
5	rPP/T/TPE10	69.9	Thai	20	0	10	0.1
6	rPP/T/MA2.5/TPE5	72.4	Thai	20	2.5	5	0.1
7	rPP/T/MA5/TPE5	69.9	Thai	20	5	5	0.1
8	rPP/T/MA2.5/TPE10	67.4	Thai	20	2.5	10	0.1
9	rPP/T/MA5/TPE10	64.9	Thai	20	5	10	0.1
10	rPP/G	79.9	Green	20	0	0	0.1
11	rPP/G/MA2.5	77.4	Green	20	2.5	0	0.1
12	rPP/G/MA5	74.9	Green	20	5	0	0.1
13	rPP/G/TPE5	74.9	Green	20	0	5	0.1
14	rPP/G/TPE10	69.9	Green	20	0	10	0.1
15	rPP/G/MA2.5/TPE5	72.4	Green	20	2.5	5	0.1
16	rPP/G/MA5/TPE5	69.9	Green	20	5	5	0.1
17	rPP/G/MA2.5/TPE10	67.4	Green	20	2.5	10	0.1
18	rPP/G/MA5/TPE10	64.9	Green	20	5	10	0.1

Note: All mixing ratios throughout this study are expressed in weight percent (wt%).

5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดสอบสมบัติทางกลแล้วจะทำการสร้างชุดข้อมูล (Data set) สำหรับนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 18 Academic โดยการวิเคราะห์ทางสถิติประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองโดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha=0.05$) การวิเคราะห์ผลกระทบหลัก (Main Effects Analysis) การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ (Interaction Analysis) ด้วยกราฟ Main Effects Plot และ Interaction Plot ต่อมาทำการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Analysis) โดยการสร้างกราฟ Contour Plot จากนั้นทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient Analysis) เพื่อศึกษาขนาดและทิศทางของผลกระทบของแต่ละปัจจัยตลอดจนการสร้างสมการเส้นตรง (Linear regression) สำหรับการวิเคราะห์การทำนาย (Prediction Analysis) ค่าสมบัติทางกลในการวิจัยนี้

ผลการวิจัย

1.ผลการทดสอบสมบัติทางกล

ผลการทดสอบสมบัติทางกลในการวิจัยนี้แสดงเป็นค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละสมบัติจากแต่ละตัวแบบทดลองโดยแสดงได้ดังตารางที่ 2 สมบัติทางกลจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

Table 2 Mechanical properties for factorial design of experiment

Code	Tensile properties				Impact strength (kJ/m ²)	Hardness (shore D)
	Yield (MPa)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Elongation (%)		
rPP/T	27.84 ± 2.79	29.16 ± 2.28	628.97 ± 56.50	4.28 ± 1.14	4.66 ± 0.87	63.46 ± 3.34
rPP/T/MA2.5	31.99 ± 0.84	32.79 ± 0.96	673.64 ± 39.67	4.24 ± 0.28	5.19 ± 0.92	65.11 ± 0.60
rPP/T/MA5	33.90 ± 2.28	35.37 ± 3.01	742.31 ± 33.88	3.65 ± 0.35	4.96 ± 0.78	64.44 ± 3.38
rPP/T/TPE5	27.54 ± 2.52	28.38 ± 1.06	575.19 ± 26.31	4.97 ± 0.98	4.91 ± 1.00	63.03 ± 0.91
rPP/T/TPE10	23.97 ± 2.24	24.27 ± 2.15	513.52 ± 35.82	6.44 ± 1.93	6.37 ± 0.66	61.24 ± 2.41
rPP/T/MA2.5/TPE5	27.93 ± 2.13	28.65 ± 2.26	576.13 ± 51.03	4.73 ± 0.24	6.32 ± 0.60	63.20 ± 1.37
rPP/T/MA5/TPE5	28.12 ± 1.15	28.88 ± 1.97	606.20 ± 52.41	3.91 ± 0.65	6.89 ± 0.52	63.90 ± 1.18
rPP/T/MA2.5/TPE10	26.85 ± 3.37	25.91 ± 1.04	544.92 ± 52.79	5.77 ± 0.74	6.88 ± 0.66	62.16 ± 1.47
rPP/T/MA5/TPE10	24.89 ± 1.39	27.23 ± 3.05	561.93 ± 35.27	5.49 ± 0.88	6.89 ± 0.31	61.71 ± 2.17
rPP/G	27.05 ± 1.47	29.16 ± 2.28	624.45 ± 56.83	3.96 ± 0.39	5.49 ± 0.62	68.69 ± 0.90
rPP/G/MA2.5	30.55 ± 1.36	32.79 ± 0.96	637.50 ± 37.17	4.05 ± 0.42	5.70 ± 0.62	69.63 ± 0.74
rPP/G/MA5	31.72 ± 1.42	35.37 ± 3.01	665.29 ± 50.96	3.97 ± 0.45	5.69 ± 0.34	69.28 ± 1.25
rPP/G/TPE5	25.41 ± 1.44	28.38 ± 1.06	582.27 ± 44.02	4.71 ± 1.01	5.24 ± 0.83	63.37 ± 1.37
rPP/G/TPE10	23.90 ± 1.88	24.27 ± 2.15	526.42 ± 46.31	5.89 ± 1.19	6.34 ± 0.63	62.09 ± 1.39
rPP/G/MA2.5/TPE5	26.41 ± 2.57	28.65 ± 2.26	551.26 ± 55.96	4.64 ± 0.77	6.44 ± 0.69	64.02 ± 1.75
rPP/G/MA5/TPE5	25.56 ± 1.82	28.88 ± 1.97	574.82 ± 44.89	4.35 ± 0.45	7.16 ± 0.57	65.71 ± 1.63
rPP/G/MA2.5/TPE10	24.30 ± 2.13	25.91 ± 1.04	517.38 ± 55.60	5.43 ± 0.81	7.17 ± 0.51	63.03 ± 1.21
rPP/G/MA5/TPE10	24.75 ± 1.34	27.23 ± 3.05	532.88 ± 44.46	5.29 ± 0.83	7.42 ± 0.69	63.21 ± 2.00

1.1 สมบัติการรับแรงดึง (Tensile properties) ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ของคอมโพลีเมอร์ rPP ที่เสริมแรงด้วยกากชาเขียวและกากชาไทยพบว่ากากชาไทยให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดครากเฉลี่ยสูงกว่ากากชาเขียวเล็กน้อย (27.84 ± 2.79 MPa และ 27.05 ± 1.47 MPa ตามลำดับ) การเติม PP-g-MA ช่วยปรับปรุงความแข็งแรง ณ จุดครากได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PP-g-MA ที่เพิ่มขึ้นในคอมโพลีเมอร์ทั้งสองชนิด ทั้งนี้คอมโพลีเมอร์ที่ผสมกากชาไทยกับ PP-g-MA 5% (rPP/T/MA5) ให้ค่าความต้านแรง ณ จุดครากสูงสุดถึง 33.90 ± 2.28 MPa ในทางตรงกันข้าม การเติม TPE ส่งผลให้ค่าความแข็งแรง ณ จุด

ครากของคอมโพสิตลดลงโดยเฉพาะเมื่อผสมกากชาไทยและ TPE ในปริมาณสูง โดย rPP/T/TPE10 มีค่าความแข็งแรง ณ จุดครากต่ำสุดเพียง 23.97 ± 2.24 MPa ซึ่งสอดคล้องกับผลของความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของคอมโพสิต rPP ที่เสริมแรงด้วยกากชาเขียวและกากชาไทย พบว่ากากชาไทยให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงกว่ากากชาเขียวเล็กน้อย (29.16 ± 2.28 MPa และ 27.29 ± 1.27 MPa ตามลำดับ) คล้ายกับแนวโน้มของค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก อย่างไรก็ตามการเติมสาร PP-g-MA ช่วยปรับปรุงความต้านทานแรงดึงได้อย่างชัดเจน โดยค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PP-g-MA ที่เพิ่มขึ้นทั้งในคอมโพสิตกากชาเขียวและกากชาไทย โดยกากชาไทยที่ผสมกับ PP-g-MA 5% (rPP/T/MA5) มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 35.37 ± 3.01 MPa ในทางกลับกันการเติม TPE กลับส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิตลดลงแม้ผสมกับ PP-g-MA ก็ตามโดยคอมโพสิตกากชาไทยที่มี TPE 10% (rPP/T/TPE10) มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุดเพียง 24.27 ± 2.15 MPa

ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของคอมโพสิต rPP ที่เสริมแรงด้วยกากชาเขียวและกากชาไทยมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (624.45 ± 56.83 MPa และ 628.97 ± 56.50 MPa ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามการเติม PP-g-MA ช่วยเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นอย่างเห็นได้ชัด โดยเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PP-g-MA ในคอมโพสิตที่ผสมกากชาทั้งสองชนิด โดยเฉพาะเมื่อผสมกากชาไทยซึ่ง rPP/T/MA5 มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดถึง 742.31 ± 33.88 MPa ซึ่งให้เห็นว่า PP-g-MA ช่วยปรับปรุงความแข็งแรงได้ดีในทางตรงกันข้ามการเติม TPE ส่งผลให้ มอดูลัสของคอมโพสิตลดลงโดย rPP/T/TPE10 โดยมีค่าต่ำสุดเพียง 513.52 ± 35.82 MPa ซึ่งต่ำกว่าคอมโพสิตที่ผสมกากชาไทยอย่างมีนัยสำคัญค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ของคอมโพสิต rPP ที่เสริมแรงด้วยกากชาเขียวและกากชาไทย พบว่าทั้งสองชนิดให้ค่าใกล้เคียงกัน ($3.96 \pm 0.39\%$ สำหรับกากชาเขียวและ $4.28 \pm 1.14\%$ สำหรับกากชาไทย) การเติม PP-g-MA ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลงเล็กน้อยในคอมโพสิตทั้งสองชนิดโดยลดลงตามปริมาณ PP-g-MA ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มความแข็งแรงของคอมโพสิต ในทางตรงกันข้ามการเติม TPE ช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวที่วัดได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะคอมโพสิตสูตร rPP/T/TPE10 ที่ผสม TPE 10% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดถึง $6.44 \pm 1.93\%$ แสดงให้เห็นว่า TPE ช่วยเพิ่มความสามารถในการยืดตัวได้ดี

1.2 สมบัติการรับแรงกระแทก (Impact strength) ของคอมโพสิต rPP ที่เสริมแรงด้วยกากชาเขียวและกากชาไทย พบว่ากากชาเขียวให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่ากากชาไทยเล็กน้อย (5.49 ± 0.62 kJ/m² และ 4.66 ± 0.87 kJ/m² ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่ากากชาเขียวอาจช่วยปรับปรุงความเหนียวแน่นของคอมโพสิตได้ดีกว่าการเติม PP-g-MA ส่งผลให้ความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในคอมโพสิตทั้งสองชนิด แต่ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณ PP-g-MA อย่างชัดเจน ในทางกลับกันการเติม TPE ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงกระแทกได้ชัดเจนกว่า โดยเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเหล่านี้ โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับกากชาเขียวและกากชาไทยซึ่ง rPP/G/MA5/TPE10 มีค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงสุดถึง 7.42 ± 0.69 kJ/m² แสดงให้เห็นว่า TPE สามารถปรับปรุงความเหนียวแน่นของคอมโพสิตได้ดีกว่า PP-g-MA

1.3 สมบัติความแข็ง (Hardness) ของวัสดุคอมโพสิต rPP ที่เสริมแรงด้วยกากชาเขียวมีค่าความแข็งสูงกว่าคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยกากชาไทย (68.69 ± 0.90 Shore D และ 63.46 ± 3.34 Shore D ตามลำดับ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากากชาเขียวสามารถเพิ่มความแข็งของคอมโพสิตได้ดีกว่ากากชาไทย การเติม PP-g-MA ในคอมโพสิตทั้งสองชนิดช่วยเพิ่มค่าความแข็งได้เล็กน้อย โดยค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PP-g-MA ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่า PP-g-MA มีส่วนช่วยปรับปรุงความแข็งของคอมโพสิต ในทางกลับกันการเติม TPE ส่งผลให้ค่าความแข็งของคอมโพสิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความแข็งลดลงตามปริมาณของ TPE ที่เพิ่มขึ้น

โดยเฉพาะเมื่อใช้ในปริมาณสูง (10%) ซึ่งคอมโพสิตที่มี TPE 10% มีค่าความแข็งต่ำที่สุด การลดลงของค่าความแข็งเมื่อเติม TPE สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและความต้านทานแรงกระแทก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารเหล่านี้ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความเหนียวแน่น แต่ส่งผลให้ความแข็งและความแกร่งของคอมโพสิตลดลง

2.การวิเคราะห์ทางสถิติ

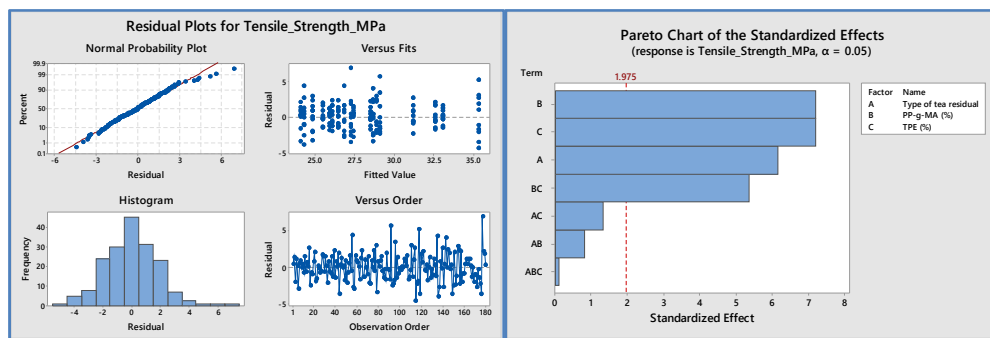
การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของกากชา (Type of Tea residual) ปริมาณ PP-g-MA (%) และปริมาณ TPE (%) ต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต โดยผลการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effects) ในตารางที่ 3 ค่า P-value จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลที่สำคัญในการวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าชนิดของกากชา ปริมาณ PP-g-MA และปริมาณ TPE มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ต่อสมบัติเชิงกลเกือบทุกประเภทซึ่งรวมถึงความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ความต้านแรงดึง (Tensile Strength) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elastic) ความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) และความแข็ง (Hardness) ยกเว้นเพียงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ที่ไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากชนิดของกากชา ($P = 0.486$) เมื่อพิจารณา 2-way interactions พบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของกากชาและปริมาณ PP-g-MA มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อโมดูลัสความยืดหยุ่น ($P < 0.05$) ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของกากชาและปริมาณ TPE มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแข็ง ($P < 0.05$) นอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PP-g-MA และ TPE ยังมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแข็งแรง ณ จุดคราก ความต้านแรงดึง ความต้านทานแรงกระแทก ($P < 0.05$) และโมดูลัสความยืดหยุ่น (มีค่า $P = 0.045$) อย่างไรก็ตาม 3-way interactions ไม่แสดงอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสมบัติเชิงกลใดๆ ($P > 0.05$ สำหรับทุกสมบัติ)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงให้เห็นอิทธิพลสำคัญของปัจจัยหลักทั้งสาม (ชนิดกากชา ปริมาณ PP-g-MA และ TPE) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์เพิ่มเติมผ่าน Main effects plot, Interaction plot และ Pareto chart เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ของปัจจัย ผลกระทบหลัก ปฏิสัมพันธ์ และลำดับความสำคัญ ซึ่งจะช่วยในการกำหนดสูตรคอมโพสิตที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการทดลองที่มีทั้งปัจจัยต่อเนื่อง (ปริมาณสารเติมแต่ง) และปัจจัยจำแนกประเภท (ชนิดของกากชา) ซึ่งอาจมีรูปแบบความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน

ภาพที่ 2 (a) แผนภาพค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับความต้านแรงดึงของคอมโพสิตผสมกากชาเขียว สำหรับค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับข้อสมมติทางสถิติที่สำคัญ Normal Probability Plot มีลักษณะเป็นเส้นตรง บ่งชี้ถึงการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน Versus Fits plot ที่แสดงการกระจายตัวของจุดข้อมูลรอบแกนศูนย์อย่างสม่ำเสมอสะท้อนถึงความคงที่ของความแปรปรวนโดยรูปร่างของ Histogram ที่ค่อนข้างสมมาตรและมียอดกลางชัดเจนสนับสนุนให้สามารถอธิบายได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ในขณะที่ Versus Order plot ไม่แสดงแนวโน้มที่ชัดเจนยืนยันความเป็นอิสระของข้อมูลตามลำดับการทดลอง ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้ช่วยยืนยันความเหมาะสมของการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์การถดถอยในการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ กับค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่ผสมกากชาเขียว ทำให้มั่นใจได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุจากการรับภาระทางกลได้

Table 3 P-values from ANOVA for the influence of factors on key mechanical properties

P-values	Tensile properties				Impact strength (kJ/m ²)	Hardness (shore D)
	Yield (MPa)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Elongation (%)		
Type of Tea residual	0.000	0.000	0.012	0.486	0.000	0.000
PP-g-MA (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TPE (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Type of Tea residual* PP-g-MA (%)	0.257	0.420	0.001	0.155	0.0936	0.205
Type of Tea residual*TPE (%)	0.171	0.182	0.283	0.432	0.248	0.000
PP-g-MA (%)*TPE (%)	0.000	0.000	0.045	0.786	0.000	0.560
Type of Tea residual* PP-g-MA (%)* TPE (%)	0.663	0.908	0.819	0.882	0.629	0.636



(a)

(b)

Figure 2 (a) Residual plot for tensile strength and (b) Pareto chart of the standardized effects on tensile strength of green tea residue composites.

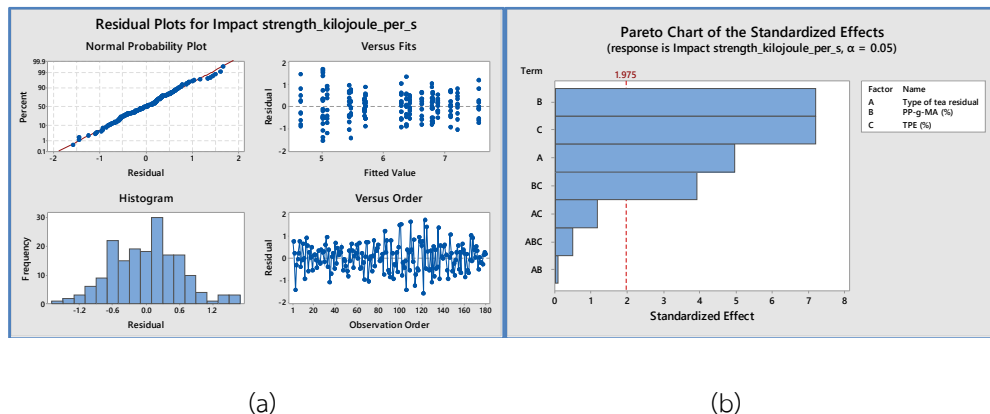


Figure 3 (a) Residual plot for impact strength and (b) Pareto chart of the standardized effects on impact strength of green tea residue composites.

ภาพที่ 2 (b) แผนภูมิพารेटอของผลกระทบที่เป็นมาตรฐานต่อความต้านแรงดึงของคอมโพสิตผสมกากชาเขียว แผนภูมิพารेटอของอิทธิพลมาตรฐาน (Pareto chart of the standardized effects) แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) เรียงลำดับจากมากไปน้อยคือปริมาณ PP-g-MA (B) ปริมาณ TPE (C) และชนิดของกากชา (A) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบอิทธิพลปฏิสัมพันธ์ระหว่าง PP-g-MA และ TPE (BC) รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดกากชาและ TPE (AC) ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งบ่งชี้ว่าผลของปัจจัยเหล่านี้ต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดไม่เป็นอิสระต่อกัน แต่ขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นด้วย อิทธิพลปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดกากชาและ PP-g-MA (AB) มีผลน้อยกว่าและไม่มีความสำคัญทางสถิติ

ภาพที่ 3 (a) แผนภาพค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิตผสมกากชาเขียว การวิเคราะห์ Residual plot สำหรับสมบัติความต้านทานแรงกระแทก พบว่าข้อมูลเป็นไปตามข้อสมมติทางสถิติที่สำคัญกล่าวคือ Normal Probability Plot แสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน ในส่วนของ Versus Fits plot แสดงความคงที่ของความแปรปรวนและ Histogram มีลักษณะใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติ อีกทั้ง Versus Order plot ไม่แสดงรูปแบบหรือแนวโน้มที่ชัดเจน บ่งชี้ถึงความเป็นอิสระของข้อมูล ผลการวิเคราะห์นี้สนับสนุนความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ทางสถิติและความเหมาะสมของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ กับค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตที่ผสมกากชาเขียว ภาพที่ 3 (b) แผนภูมิพารेटอ (Pareto chart) ของผลกระทบที่เป็นมาตรฐาน (standardized effects) ต่อความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิตผสมกากชาเขียว แสดงให้เห็นว่าทั้งสามปัจจัยหลักมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณ PP-g-MA (B) มีผลกระทบมากที่สุดรองลงมาคือปริมาณ TPE (C) และชนิดของกากชา (A) ตามลำดับ

3. การสร้างแบบจำลองการถดถอยของสมบัติวัสดุคอมโพสิต

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ทำการศึกษาที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเครื่องมือทางสถิติที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดลองแบบแฟกทอเรียลทั่วไปที่ประกอบด้วยทั้งปัจจัยต่อเนื่อง (ปัจจัยเชิงปริมาณ) และปัจจัยจำแนกประเภท (ปัจจัยเชิงคุณภาพ)

การศึกษานี้นำเสนอแบบจำลองการถดถอยเพื่อทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต พร้อมทั้งวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองและใช้กราฟความสูงต่ำ (Contour Plot) เพื่อแสดงผลกระทบของปัจจัยต่างๆต่อสมบัติของวัสดุ ซึ่งจะนำไปสู่การกำหนดสถานะที่เหมาะสมโดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4 สมการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอยที่มีสมการเส้นตรงสำหรับพยากรณ์ค่าสมบัติทางกลแยกตามประเภทของกากชา และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-sq) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว (R-sq(adj)) โดยแสดงสัญลักษณ์ของแต่ละปัจจัย

Table 4 Regression equations and coefficient of determination for mechanical properties of the composites

Property	Tea Residual Type	Regression Equation	R-sq (%)	R-sq(adj) (%)
Yield Strength (MPa)	Green tea	$= 27.719 + 0.710B\% - 0.4222C\% - 0.0621B\%C\%$	62.20	60.67
	Thai tea	$= 28.926 + 0.940B\% - 0.4241C\% - 0.0827B\%C\%$		
TensileStrength (MPa)	Green tea	$= 27.898 + 0.840B\% - 0.3739C\% - 0.0749B\%C\%$	67.77	66.46
	Thai tea	$= 29.899 + 0.979B\% - 0.5032C\% - 0.0669B\%C\%$		
ModulusofElastic(MPa)	Green tea	$= 634.8 + 3.42B\% - 10.06C\% - 0.689B\%C\%$	59.63	57.99
	Thai tea	$= 624.9 + 19.33B\% - 10.90C\% - 1.296B\%C\%$		
Elongation (%)	Green tea	$= 3.974 - 0.0186B\% + 0.1952C\% - 0.0110B\%C\%$	47.29	45.15
	Thai tea	$= 4.390 - 0.1844B\% + 0.1865C\% - 0.0007B\%C\%$		
Impact strength (kJ/m ²)	Green tea	$= 5.363 + 0.1087B\% + 0.0983C\% + 0.01834B\%C\%$	59.59	57.94
	Thai tea	$= 4.554 + 0.1753B\% + 0.1727C\% + 0.00160B\%C\%$		
Hardness (shoreD)	Green tea	$= 68.113 + 0.279 B\% - 0.6830 C\% + 0.0172B\%*C\%$	63.32	61.83
	Thai tea	$= 63.965 + 0.264 B\% - 0.2040 C\% - 0.0244B\%*C\%$		

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแก้ (R-sq(adj)) ของสมการทั้ง 6 สมบัติ พบว่าสมการที่มีค่า R-sq(adj) สูงที่สุดคือสมการการทำนายค่าความต้านทานแรงดึง โดยมีค่าสูงถึง 66.46% ทั้งในระบบของกากชาเขียวและกากชาไทย ส่วนสมการที่มีค่าต่ำที่สุดคือค่าการยืดตัวซึ่งมีค่าเพียง 45.15% ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณ PP-g-MA, TPE และปฏิกริยาระหว่างกันสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงได้ดีที่สุด ส่วนค่าการยืดตัวนั้นอาจมีปัจจัยอื่นนอกเหนือจากทั้ง 3 ปัจจัยที่ควบคุมในงานวิจัยนี้ที่เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ PP-g-MA (B%) และTPE (C%) ต่อสมบัติของคอมโพสิตในแต่ละสมการพบว่า B% ส่งผลในเชิงบวก (Positive effect) ต่อค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ค่าความต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าความแข็งแรงในระบบของกากชาเขียวและกากชาไทย ขณะที่ C% ส่งผลในเชิงลบต่อทุกสมบัตียกเว้นค่าการยืดตัวและความต้านทานแรงกระแทก ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ PP-g-MA มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของคอมโพสิตโดยรวม ส่วน TPE นั้นมีบทบาทในการเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการรับแรงกระแทกของคอมโพสิตเป็นหลัก นอกจากนี้ปฏิกริยาร่วมระหว่าง B% และ C% ก็มีบทบาทต่อสมบัติด้วยเช่นกัน โดยส่วนใหญ่มีผลในเชิงลบ (Negative effect) ยกเว้นค่าความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิตทั้ง 2 ระบบ และค่าความแข็งแรงในคอมโพสิตชาเขียวที่มีผลเชิงบวก

จากข้อมูลข้างต้นจึงสรุปได้ว่าการเติม PP-g-MA เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มสมบัติเชิงกลต่างๆ ของคอมโพสิต ส่วน TPE เหมาะสำหรับการปรับปรุงสมบัติเฉพาะด้าน โดยเฉพาะการเพิ่มค่าการยึดตัวและความต้านทานแรงกระแทก การใช้ประโยชน์จากปฏิกิริยาระหว่าง PP-g-MA และ TPE อาจเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการควบคุมสมบัติให้มีความสมดุลและเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน เพื่อให้เห็นภาพรวมของอิทธิพลขององค์ประกอบคอมโพสิตหาความสัมพันธ์เชิงกลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้แสดงกราฟอิทธิพลหลัก (Main effect) กราฟแสดงอิทธิพลร่วม (Interaction effect) และกราฟความสูง-ต่ำ (Contour plot) ของสมบัติที่สำคัญ และมีสมการถดถอยเชิงเส้นที่น่าสนใจทั้งสิ้น 2 สมบัติ ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ผสมกากชาเขียว การวิเคราะห์กราฟผลกระทบหลัก (Main Effects Plot) สำหรับค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของวัสดุคอมโพสิตที่ผสมกากชาดังภาพที่ 4 (a) พบว่าปัจจัยทั้งสามปัจจัยมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ชนิดของกากชาแสดงผลกระทบเชิงบวก (Positive effect) โดยกากชาไทยให้ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงสูงกว่ากากชาเขียวประมาณ 2 MPa (29 MPa เทียบกับ 27 MPa) ปริมาณ PP-g-MA แสดงผลกระทบเชิงบวก (Positive effect) อย่างชัดเจนต่อค่าความต้านทานแรงดึงโดยการเพิ่มปริมาณจาก 0% เป็น 5% ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงจาก 26.5 MPa เป็น 29.5 MPa ในทางตรงกันข้ามปริมาณ TPE แสดงผลกระทบเชิงลบ (Negative effect) อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านทานแรงดึง โดยการเพิ่มปริมาณจาก 0% เป็น 10% ทำให้ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัดจาก 31.5 MPa เหลือเพียง 25.5 MPa

ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมสัดส่วนของส่วนผสม โดยเฉพาะการเพิ่ม PP-g-MA และการจำกัดปริมาณ TPE เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่ผสมกากชาที่แสดงในภาพที่ 4 (b) แสดงการวิเคราะห์กราฟความสูง-ต่ำ (Contour plot) ของค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) พบว่าผลกระทบของ PP-g-MA และ TPE สอดคล้องกับที่พบในกราฟผลกระทบหลัก (Main Effects Plot) โดยแสดงให้เห็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยนี้อย่างชัดเจน PP-g-MA แสดงผลกระทบเชิงบวก (Positive effect) ต่อค่าความต้านทานแรงดึงโดยค่าสูงสุด (> 40 MPa) พบในบริเวณที่มี PP-g-MA สูง (4-5%) และ TPE ต่ำ (0-2%) ในทางตรงกันข้าม TPE แสดงผลกระทบเชิงลบ (Negative effect) อย่างเห็นได้ชัด โดยการเพิ่มปริมาณ TPE ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงลดลงอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในช่วง TPE 6-10% ที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุด (< 25 MPa) นอกจากนี้ยังพบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยโดยผลกระทบเชิงลบของ TPE สามารถลดทอนได้บางส่วนด้วยการเพิ่มปริมาณ PP-g-MA ผลการวิเคราะห์นี้ยืนยันความสำคัญของการควบคุมสัดส่วนระหว่าง PP-g-MA และ TPE เพื่อปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่ผสมกากชาให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยภาพที่ 5 (a) แสดงการวิเคราะห์กราฟปฏิสัมพันธ์ (Interaction plot) สำหรับค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ของวัสดุคอมโพสิตที่ผสมกากชา แสดงให้เห็นปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างปัจจัยต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่ากากชาเขียวแสดงผลกระทบเชิงบวก (Positive effect) ต่อความต้านทานแรงกระแทกมากกว่ากากชาไทยในทุกระดับของ PP-g-MA และผลต่างนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ PP-g-MA นอกจากนี้ทั้งกากชาเขียวและไทยแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงกระแทกเมื่อเพิ่มปริมาณ TPE บ่งชี้ถึงผลกระทบเชิงบวกของ TPE ที่สำคัญคือพบปฏิสัมพันธ์เชิงบวก (positive interaction) อย่างชัดเจนระหว่าง PP-g-MA และ TPE โดยการเพิ่ม PP-g-MA ส่งผลให้ความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อมี TPE ในปริมาณสูง (10%) เทียบกับกรณีที่มี TPE ต่ำ (0%) ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มทั้ง PP-g-MA และ TPE มีผลกระทบเชิงบวกต่อความต้านทานแรงกระแทก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ร่วมกันในปริมาณสูง และการใช้

กากชาเขียวให้ผลดีกว่ากากชาไทย ข้อมูลนี้มีความสำคัญในการออกแบบส่วนผสมของวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความต้านทานแรงกระแทก โดยต้องพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ร่วมกัน การวิเคราะห์กราฟความสูง-ต่ำ (Contour plot) ที่แสดงในภาพที่ 5 (b) แผนภาพความสูง-ต่ำ (contour plot) ของความต้านทานแรงกระแทกสำหรับวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยกากชาเขียว สำหรับค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์และปฏิสัมพันธ์ระหว่าง PP-g-MA และ TPE ที่สอดคล้องกับผลจากกราฟปฏิสัมพันธ์ (Interaction plot) โดยพบว่าทั้ง PP-g-MA และ TPE มีผลกระทบเชิงบวก (Positive effects) ต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงกระแทกตามการเพิ่มขึ้นของทั้งสองปัจจัย โดยค่าสูงสุดมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 8 kJ/m² พบในบริเวณที่มีทั้ง PP-g-MA และ TPE ในปริมาณสูง (PP-g-MA 4-5% และ TPE 8-10%) ซึ่งยืนยันปฏิสัมพันธ์เชิงบวก (Positive interaction) ระหว่างสองปัจจัยนี้ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าผลกระทบของ TPE มีความโดดเด่นมากกว่า PP-g-MA เล็กน้อย โดยเฉพาะในช่วง TPE 6-10% ที่แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงกระแทกอย่างชัดเจน ผลการวิเคราะห์นี้สนับสนุนข้อสรุปจากกราฟปฏิสัมพันธ์ว่าการเพิ่มทั้ง PP-g-MA และ TPE ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตที่ผสมกากชาได้

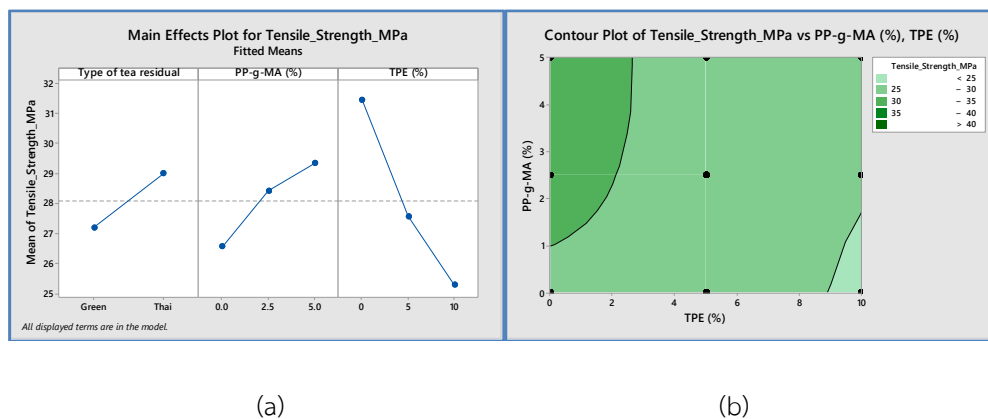


Figure 4 (a) Main effect plot and (b) contour plot of tensile strength for green tea residue reinforced composites.

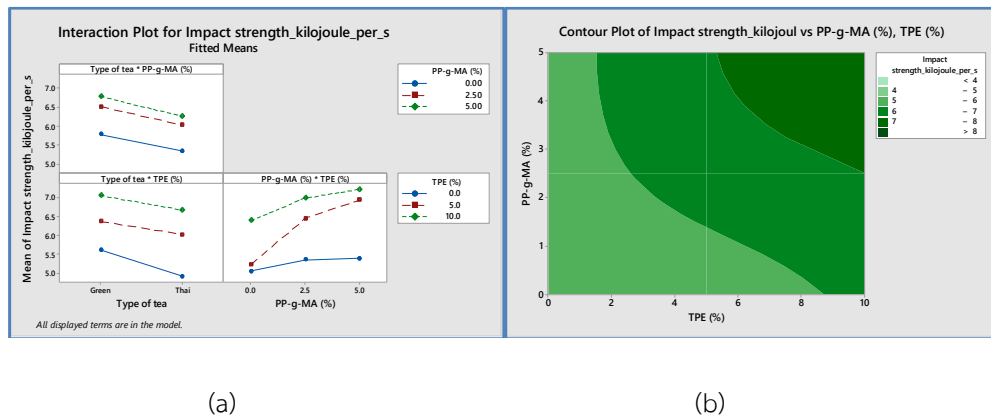


Figure 5 (a) Interaction effect plot and (b) contour plot of Impact strength for green tea residue reinforced composites.

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic review) พบว่าการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมกากชาได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นทั้งด้านความแข็งแรง น้ำหนักเบา และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พอลิเมอร์ที่นักวิจัยนิยมเลือกใช้เป็นวัสดุเนื้อพื้นในการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตที่ผสมกากชา ได้แก่ Polylactic acid, Polypropylene และ Epoxy (20%, 20% และ 14.3% ตามลำดับ) เป็นลำดับต้นๆ สำหรับกากชาที่นำมาใช้วิจัย โดยมากผู้วิจัยไม่ได้ระบุชนิดของชาสูงถึงร้อยละ 54 (54.5%) แต่อธิบายว่าเป็นชาที่มีในท้องถิ่น แต่มีบางงานวิจัยให้ข้อมูลชัดเจนว่าใช้กากชาชนิดใด ตัวอย่างเช่น ชาเขียว (12.2%) ชาดำ (9.8%) ชาจีน (7.3%) เป็นต้น ที่น่าสนใจคือส่วนใหญ่ประมาณ 45.7% มิได้มีการใช้สารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิต รองลงมาคือการใช้สาร Maleic anhydride grafted ในรูปแบบต่างๆ รวมแล้วประมาณ 14.3% และ Alkaline treatment (11.4%) เป็นลำดับต้น ซึ่งการวิจัยเน้นไปที่การศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพเป็นหลัก [18-35] ในขณะที่การศึกษาเกี่ยวกับการใช้พอลิเมอร์เกรดรีไซเคิลยังไม่ปรากฏที่เด่นชัด สำหรับงานวิจัยที่มีความคล้ายคลึงกับการวิจัยนี้เป็นการใช้พอลิโพรพิลีนที่เป็นเม็ดใหม่ผสมกากชา และมีการใช้สารเติมแต่งหรือกระบวนการเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตที่แตกต่างกัน [26-29] แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงที่มีนัยสำคัญในหลายงานวิจัย โดย Lanjewar et al. [27] พบว่าการใช้ Maleic anhydride (MA) ในการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคชาส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและมอดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุง Rathod et al. [28] พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วย styrene 10 wt% สามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงจาก 7 เป็น 9.95 MPa ในขณะที่ Bari et al. [29] รายงานว่าการใช้ Tetraethyl silane (TES) เป็นสารเชื่อมโยงร่วมกับการเติม Graphene oxide (GO) 2 wt% ให้ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่าและมอดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นประมาณ 80%

การปรับปรุงสมบัติทางกลเหล่านี้สามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากการเพิ่มความเข้ากันได้ และการยึดเกาะระหว่างผิวของวัสดุที่ผสมกันเป็นคอมโพสิตที่ดีขึ้น โดยสารเติมแต่งหรือการปรับปรุงพื้นผิวช่วยลดความแตกต่าง

ของความมีขั้วระหว่างอนุภาคกากชาและเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน ส่งผลให้อนุภาคกระจายตัวดีขึ้นและลดการรวมกลุ่ม นอกจากนี้การเกิดพันธะทางเคมีหรือแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพที่แข็งแรงขึ้นระหว่างอนุภาคและเมทริกซ์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการโอนถ่ายความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำทางกล ทำให้วัสดุสามารถทนทานต่อแรงกระทำได้มากขึ้น ลดการเกิดจุดรวมความเค้น และป้องกันการแยกตัวระหว่างเฟส ส่งผลให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงและสามารถต้านทานต่อการแตกหักที่สูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบทางกลในงานวิจัยนี้ จากการทดสอบสมบัติทางกลและการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของ PP-g-MA สามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงและค่าความแข็งแรงของคอมโพสิต (ค่าความแข็งแรง ณ จุดครากความต้านทานแรงดึง และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น) ตลอดจนความต้านทานแรงกระแทกและความแข็งเพิ่มขึ้น แม้ไม่ได้เพิ่มในอัตราส่วนเดียวกับสมบัติแรงดึง แต่ทั้งนี้การเติม PP-g-MA ทำให้ความเหนียวลดลงโดยพิจารณาจากการทดสอบการย่อยและการยืดตัว

อิทธิพลของอัตราส่วนต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่มีส่วนผสมจากสารตัวเติมธรรมชาติ ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางในงานวิจัยที่ผ่านมา จากการศึกษาของ Yi et al. [37] พบว่าการเติมอีลาสโตเมอร์โอเลฟินบล็อกโคพอลิเมอร์ (OBC) ร่วมกับการกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถเพิ่มความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนผสมผงไม้ได้ถึง 49% ในขณะที่ Teodorescu et al. [38] รายงานว่าการเติม SEBS 20% โดยน้ำหนักสามารถเพิ่มความต้านทานแรงกระแทกและความยืดหยุ่นได้ 25 - 39% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการปรับปรุงค่าความยืดหยุ่นและความเหนียวของวัสดุ อย่างไรก็ตาม Zheng et al. [39] ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณอีลาสโตเมอร์อาจส่งผลให้ความต้านทานแรงดึง และความแข็งแรง (มอดูลัสความยืดหยุ่น) ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งแรง ณ จุดคราก สำหรับการศึกษา TPE แสดงอิทธิพลในเชิงบวกเพียงค่าความเหนียว (ร้อยละการยืดตัว) และความเหนียวแน่น (ความต้านทานแรงกระแทก) ทั้งนี้จากการทดสอบ ANOVA และสมการถดถอยพบว่าปฏิสัมพันธ์ของ TPE และ PP-g-MA ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นจากปัจจัยทั้งสองนี้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าคอมโพสิตมีความเหนียวแน่นเพิ่มขึ้นทำให้สามารถดูดซับแรงกระแทกได้มากขึ้น แต่สำหรับค่าร้อยละการยืดตัวของคอมโพสิตในการวิจัยนี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม TPE อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ปฏิสัมพันธ์ร่วมกับ PP-g-MA นั้นทำให้ค่าร้อยละการยืดตัวลดลงแต่ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญจากผลการทดสอบ ANOVA ดังนั้นการใช้ TPE ในการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตจึงต้องพิจารณาถึงความสมดุลระหว่างการเพิ่มความเหนียว และความต้านทานแรงกระแทกกับการรักษาความสามารถในการรับแรงดึงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับความต้องการการประยุกต์ใช้งาน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าชนิดของกากชามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ต่อสมบัติทางกลหลายประการของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ ความแข็งแรง ณ จุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด มอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานแรงกระแทก และความแข็ง อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในด้านเปอร์เซ็นต์การยืดตัวระหว่างกากชาต่างชนิดกัน เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของสมบัติทางกลจากตารางที่ 2 พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ใช้กากชาไทยมีแนวโน้มแสดงค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุที่ใช้กากชาเขียวในสูตรผสมที่เทียบเคียงกัน ตัวอย่างเช่น ในสูตร rPP/T และ rPP/G ค่าความแข็งแรง ณ จุดครากเท่ากับ 27.84 และ 27.05 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 628.97 และ 624.45 MPa ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามคอมโพสิตที่ใช้กากชาเขียวแสดงค่าความแข็งที่สูงกว่าอย่างชัดเจนโดยมีค่าความแข็งในช่วง 62.09-69.63 Shore D เทียบกับ 61.24-65.11 Shore D ของคอมโพสิตที่ใช้กากชาไทย นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มที่วัสดุคอมโพสิต

จากกากชาเขียวมีค่าความต้านทานแรงกระแทกที่สูงกว่าเล็กน้อยในหลายสูตรผสม ผลลัพธ์ที่น่าสนใจคือไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ที่มีนัยสำคัญระหว่างชนิดของกากชากับปริมาณ PP-g-MA หรือ TPE ในเกือบทุกสมบัติทางกล (ยกเว้นมอดูลัสความยืดหยุ่นและค่าความแข็ง) ซึ่งบ่งชี้ว่าอิทธิพลของสารเติมแต่งเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะเป็นอิสระจากชนิดของกากชาที่ใช้ และเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ในการออกแบบสูตรผสมของคอมโพสิตที่เหมาะสมตามความต้องการใช้งาน

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติข้างต้น ขั้นตอนต่อมาคือการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของระดับปัจจัยต่างๆ เพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดีที่สุดสำหรับวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนผสมกากชา โดยพิจารณาจากผลกระทบของปัจจัยหลัก ได้แก่ ชนิดของกากชา ปริมาณ PP-g-MA และปริมาณ TPE ต่อสมบัติทางกลที่สำคัญ การจัดลำดับความสำคัญ และค่าน้ำหนักของสมบัติทางกลสำหรับ WPCs ได้รับการพิจารณาตามการใช้งานจริงและข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยเรียงลำดับดังนี้ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) (25%) เนื่องจากเป็นตัวชี้วัดความแข็งแรงโดยรวมในการรับแรงในการใช้งานทั่วไป รองลงมาคือค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) (20%) แสดงถึงความแข็งแกร่งซึ่งสำคัญต่อการรักษารูปร่างขณะใช้งานโดยเฉพาะในโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนัก ต่อมาคือค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength) (20%) สำคัญสำหรับการใช้งานภายนอกอาคารที่อาจเกิดแรงกระแทกได้บ่อย เช่น พื้นระเบียง รั้ว เป็นต้น ลำดับต่อมาคือค่าร้อยละการยืดตัว (%Elongation) (15%) บ่งบอกความเหนียวและความทนทานต่อการแตกร้าว ลำดับต่อมาคือค่าความแข็ง (Hardness) (10%) สำหรับการต้านทานการสึกหรอ โดยเฉพาะสำหรับพื้นผิวที่มีการสัมผัสบ่อย และสุดท้ายค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) (10%) สำหรับการประเมินความปลอดภัยในการออกแบบ ทั้งนี้การจัดลำดับนี้คำนึงถึงการใช้งานทั่วไปของ WPCs ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ โดยเน้นที่ความแข็งแรง ความทนทาน และความสามารถในการทนต่อแรงกระทำจากการใช้งานผลิตภัณฑ์ WPCs ภายนอก [40-44]

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของปัจจัยในการผลิตวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนที่ผสมกากชาเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาวัสดุที่มีสมบัติทางกลที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเฉพาะทาง ในการศึกษาี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ General Factorial Design ร่วมกับ Desirability Function Approach ผ่านโปรแกรม Minitab 18 เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของกากชา ปริมาณ PP-g-MA และปริมาณ TPE โดยพิจารณาจากสมบัติทางกลตามที่แสดงไปข้างต้นดังภาพที่ 6 พารามิเตอร์การหาค่าเหมาะสมที่สุดและลักษณะการตอบสนองสำหรับสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและกากชา และภาพที่ 7 ผลการหาค่าเหมาะสมที่สุดและสมบัติเชิงกลที่ทำนายได้สำหรับวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและกากชาที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน โดยพิจารณาสมบัติทางกลที่สำคัญหกประการพร้อมกัน โดยมุ่งเน้นการเพิ่มค่าสูงสุด (Maximum) ในทุกพารามิเตอร์ วิธีการนี้ช่วยให้สามารถพิจารณาทุกสมบัติพร้อมกันตามน้ำหนักความสำคัญที่กำหนด ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของวัสดุคอมโพสิตตามน้ำหนักที่กำหนดลำดับความสำคัญไว้ข้างต้น จากผลการวิเคราะห์พบว่า มีห้าสูตรที่ให้ผลลัพธ์ที่น่าสนใจ โดยสูตรที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยกากชาเขียวและ PP-g-MA 5% โดยไม่มี TPE ให้ค่า Composite Desirability สูงสุดที่ 0.909070 แสดงถึงความสมดุลที่ดีที่สุดระหว่างสมบัติทางกลต่างๆ สูตรนี้ให้ค่าความแข็ง ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความแข็งแรง ณ จุดครากที่สูง ในขณะที่สูตรที่ 3 ซึ่งใช้กากชาไทยและ PP-g-MA 5% ให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดแต่มี Composite Desirability ต่ำกว่าเล็กน้อย น่าสนใจว่าการเพิ่ม TPE 5% ในสูตรที่ 5 ช่วยเพิ่มค่าความต้านทานแรงกระแทกและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความแข็งแรง ณ จุดครากลดลง ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกสูตรที่

เหมาะสมตามความต้องการเฉพาะของการใช้งาน โดยอาจต้องพิจารณาถึงการแลกเปลี่ยน (trade-off) ระหว่างสมบัติต่างๆ โดยผลจากการวิจัยนี้พบว่าแม้ข้อจำกัดในด้านความแข็งแรงเมื่อเทียบกับไม้จริง แต่ด้วยสามารถขึ้นรูปได้หลากหลาย การบำรุงรักษาต่ำ เป็นวัสดุที่มีประโยชน์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน โดยเฉพาะในงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูงมากนัก จึงเหมาะสมสำหรับการผลิตเฟอร์นิเจอร์ หรือตกแต่งภายในบ้านได้ เช่น ตกแต่งสวนและภูมิทัศน์ ใช้เป็นวัสดุตกแต่งผนังและฝ้าเพดาน ชั้นวางของหรือตู้เก็บของที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมาก [45, 46] สำหรับแนวทางอื่นๆ เพื่อการปรับปรุงสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมสารตัวเติมธรรมชาติสามารถทำได้โดยการเติมสารก่อผลึก การควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูป ตลอดจนการใช้สารควบคุมปฏิกิริยาไฮเล็น เป็นต้น

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Hardness_shore_D	Maximum	57.00	71.70		0.10	5
Impact strength_kilojoule_per_s	Maximum	3.42	8.73		0.20	3
Percentage_of_Elongation	Maximum	2.50	9.23		0.15	4
Modulus_of_Elastic_Mpa	Maximum	448.03	780.96		0.20	2
Tensile_Strength_MPa	Maximum	20.30	40.55		0.25	1
Yield_strength_MPa	Maximum	18.96	37.11		0.10	6

Figure 6 Optimization parameters and response characteristics for mechanical properties of recycled polypropylene/tea waste composites

Solutions

Solution	Type of tea residual	PP-g-MA (%)	TPE (%)	Hardness_shore_D	Impact strength_kilojoule_per_s
				Fit	Fit
1	Green	5	0	69.68	5.689
2	Green	2.5	0	69.53	5.707
3	Thai	5	0	64.85	5.085
4	Thai	2.5	0	65.15	5.014
5	Green	5	5	66.11	7.088

Solution	Percentage_of_Elongation	Modulus_of_Elastic_Mpa	Tensile_Strength_MPa
	Fit	Fit	Fit
1	3.968	665.291	32.569
2	3.970	637.500	31.164
3	3.665	742.208	35.369
4	4.165	673.635	33.092
5	4.450	574.824	26.446

Solution	Yield_strength_MPa	Composite Desirability
	Fit	
1	31.786	0.909070
2	30.695	0.903078
3	33.712	0.895852
4	32.305	0.895835
5	25.921	0.889302

Figure 7 Optimization solutions and predicted mechanical properties for recycled polypropylene /tea waste composites with varying compositions.

References

- [1] Ramesh, M., et al. (2022). A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects. *Polymers*, 14(3), 589.
- [2] Zhou, Y., et al. (2019). A Circular Economy Use of Recovered Sludge Cellulose in Wood Plastic Composite Production: Recycling and Eco-Efficiency Assessment. *Waste Management*, 99, 42–48.
- [3] Khongrit, A., et al. (2016). Effect of Coupling Agent on Mechanical Properties Effect of Coupling Agent on Mechanical Properties. *SWU Engineering Journal*, 11(2), 57-66. (in Thai)
- [4] Nithikarnjanatharn, J. & Khongrit, A. (2019). Effect of Crosslinking Agents and Sauna Periods in Crosslinking Process on Mechanical and Physical Properties of Recycled Polyoxymethylene. *UBU Engineering Journal*. 12(2), 49-62. (in Thai)
- [5] Campos-Vega, R., et al. (2015) Spent Coffee Grounds: A Review on Current Research and Future Prospects. *Trends in Food Science & Technology*. 54, 24–36.
- [6] Khongrit, A. & Nithikarnjanatharn, J. (2018). Effect of Compatibilizing Agents on Mechanical and Physical Properties of Spent Coffee Ground Filled Polypropylene Composites. *UBU Engineering Journal*. 11(1), 18-28. (in Thai)
- [7] Nithikarnjanatharn, J. & Khongrit, A. (2020). Effects of Coupling Agent on Mechanical and Physical Properties of Spent Coffee Ground Filled with Polylactic Acid Composites. *UBU Engineering Journal*. 13(2), 64-76. (in Thai)
- [8] Rijo, B., et al. (2021). Catalyzed Pyrolysis of Coffee and Tea Wastes. *Energy*, 235, 121252.
- [9] Ballesteros, L. F., et al. (2014). Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. *Food and Bioprocess Technology*, 7(12), 3493–3503.
- [10] Khongrit, A., et al. (2022). A Preliminary Study on Composites from Recycled Grade Polypropylene Mixed with Spent Tea. *Rangsit University Journal of Engineering and Technology*, 25(2), 43-56. (in Thai)
- [11] Jubinville, D., et al. (2022). Simulated Recycling of Polypropylene and Maleated Polypropylene for the Fabrication of Highly-Filled Wood Plastic Composites. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(4), 2373–2383.
- [12] Burgada, F., et al. (2021). Upgrading Recycled Polypropylene from Textile Wastes in Wood Plastic Composites with Short Hemp Fiber. *Polymers*, 13(8), 1248.
- [13] Sbrescia, S., et al. (2022). Molecular Weight Effects on the Stress-Relaxation Behavior of Soft Thermoplastic Elastomer by Means of Temperature Scanning Stress Relaxation (TSSR). *Journal of Rheology*, 66(6), 1321–1330.
- [14] Torres, V. M., et al. (2021). Controlling Nanostructure and Mechanical Properties in Triblock Copolymer/Monomer Blends Via Reaction-Induced Phase Transitions. *Soft Matter*, 17(6), 1505–1512.

- [15] Saleem, M. M., & Somà, A. (2015). Design of Experiments Based Factorial Design and Response Surface Methodology for MEMS Optimization. *Microsystem Technologies*, 21(1), 263–276.
- [16] Solaiman, A., et al. (2016). Application of General Multilevel Factorial Design with Formulation of Fast Disintegrating Tablets Containing Croscaremellose Sodium and Disintequick MCC-25. *International Journal of Pharmaceutics*, 501(1–2), 87–95.
- [17] Uniyal, S., et al. (2021). New Insights into the Biodegradation of Chlorpyrifos by a Novel Bacterial Consortium: Process Optimization using General Factorial Experimental Design. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209, 111799.
- [18] Awadallah-F, A., & Naguib, H. F. (2017). Grafting of Tea Waste with Polyacrylic Acid and Its Potential Applications. *Polymer Bulletin*, 74(11), 4659-4679.
- [19] Atiqah, A., et al. (2019). Recycling and Sustainable Environmental Practices of Household Tea Waste. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 22(4-5), 352–363.
- [20] Sukthavorn, K., et al. (2021). Fabrication of Green Composite Fibers from Ground Tea Leaves and Poly (Lactic Acid) as Eco-Friendly Textiles with Antibacterial Property. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(5), 1964-1973
- [21] Gao, P., & Ogata, Y. (2019). Biodegradability of PLA and Tea Waste Composites Based on “CHAMU” and the “Tea Waste Recycling System”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 563(2), 022034.
- [22] Duan, J., et al. (2016). Effects of Spent Tea Leaf Powder on the Properties and Functions of Cellulose Green Composite Films. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 440-448.
- [23] Wu, C. (2018). Preparation, Characterization and Bioactivity of the Polyester and Tea Waste Green Composites. *Polymer Bulletin*, 75(11), 5197-5216.
- [24] Noori, A., et al. (2020). Development of Pressure-Responsive Polypropylene and Biochar-Based Materials. *Micromachines*, 11(4), 339.
- [25] de Cademartori, P. H. G., Silva, et al. (2015). Roughness and Color Evaluation of Wood Polymer Composites Filled by Household Waste of Mate-Tea. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(3), 457–468.
- [26] Mattos, B. D., et al. (2014). Properties of Polypropylene Composites Filled with a Mixture of Household Waste of Mate-Tea and Wood Particles. *Construction and Building Materials*, 61, 60–68.
- [27] Lanjewar, S. R., et al. (2018). Preparation and Analysis of Polypropylene Composites with Maleated Tea Dust Particles. *Science and Engineering of Composite Materials*, 25(2), 373-381.
- [28] Rathod, Y., et al. (2017). Elaboration of Performance of Tea Dust–Polypropylene

- Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(17), 44750.
- [29] Bari, P., et al. (2015). Influence of the Coupling Agent and Graphene Oxide on the Thermal and Mechanical Behavior of Tea Dust-Polypropylene Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(4), 42927.
- [30] Dönmez Çavdar, A., et al. (2011). Tea Mill Waste Fibers Filled Thermoplastic Composites: The Effects of Plastic Type and Fiber Loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(10), 833-844.
- [31] Xia, G., et al. (2015). Preparation and Properties of Biodegradable Spent Tea Leaf Powder/Poly (Propylene Carbonate) Composite Films. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 20(4), 377-387.
- [32] Bagheri, S., et al. (2022). Sound Absorption Performance of Tea Waste Reinforced Polypropylene and Nanoclay Biocomposites. *Polymer Bulletin*, 80, 5203–5218.
- [33] Prabhu, L., et al. (2020). Study of mechanical and Morphological Properties of Jute-Tea Leaf Fiber Reinforced Hybrid Composites: Effect of Glass Fiber Hybridization. *Materials Today: Proceedings*, 27(3), 2372-2375.
- [34] Hou LiJen, H. L., et al. (2009). Manufacture and Properties of Particleboards by Mixing Green Tea Leaves Waste with wood-Based Particles. *Forest Products Industries*, 28(1), 53-62.
- [35] Batiancela, M. A., et al. (2014). Particleboard from Waste Tea Leaves and wood Particles. *Journal of Composite Materials*, 48(8), 911-916.
- [36] Prabhu, L., et al. (2019). Mechanical, Chemical and acoustical Behavior of sisal-Tea Waste-Glass Fiber Reinforced Epoxy Based Hybrid Polymer Composites. *Materials Today: Proceedings*, 16(2), 653-660.
- [37] Yi, S., et al. (2019). Synergistic toughening Effects of grafting Modification and elastomer-Olefin Block Copolymer Addition On the fracture Resistance of wood Particle/ Polypropylene/ Elastomer Composites. *Materials & Design*, 181, 107918.
- [38] Teodorescu, G. M., et al., (2024). The Effect of Thermoplastic Elastomer and Fly Ash on the Properties of Polypropylene Composites with Long Glass Fibers. *Polymers*, 16(9), 1238.
- [39] Zheng, C., et al. (2018). AC performance, Physical and mechanical Properties of polypropylene/Polyolefin Elastomers Blends. In *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials* (p.910-913). 20 -24 May, 2018, Xi'an, China.
- [40] Stark, N. M., & Rowlands, R. E. (2003). Effects of Wood Fiber Characteristics on Mechanical Properties of Wood/Polypropylene Composites. *Wood and Fiber Science*. 35(2), 167-174.
- [41] Ashori, A., (2008). Wood – Plastic Composites as promising Green - Composites for automotive Industries. *Bioresource Technology*, 99(11), 4661–4667.

- [42] Klyosov, A. A. (2007). *Wood-plastic composites*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [43] Najafi, S. K., (2013). Use of recycled Plastics in wood Plastic Composites – A Review. *Waste Management*, 33(9), 1898–1905.
- [44] Spear, M. J., et al. (2015). Wood polymer composites. In Ansell, M. P. (Ed.). *Wood Composites* (p. 195-249). Cambridge: Woodhead Publishing.
- [45] Hugot, F., & Cazaurang, G. (2009). Mechanical Properties of an Extruded Wood Plastic Composite. *Mécanique & Industries*, 10(6), 519–524.
- [46] Xu, H., et al. (2023). Mechanical Properties Variation in Wood-Plastic Composites with a Mixed Wood Fiber Size. *Materials*, 16(17), 5801.