



Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology



Volume 17, Issue 2, July-December 2025, Pages 1 – 16 ISSN 2985-2641 (Online)

Research Article

ผลของปริมาณสารแม่เหล็กที่ได้จากขยะอิเล็กทรอนิกส์ต่อค่ามอดูลัสและพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต

The Influence of the Quantity of Magnetic Materials Extracted From Electronic Waste on The Modulus and Electromagnetic Parameters of Polypropylene Composites

อนุชิต ฮันเย็ก*

Anuchit Hunyek*

สาขาวิชาศึกษาทั่วไป-วิทยาศาสตร์ (ฟิสิกส์) คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

Program of General Education – Science (Physics), Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus.

*Corresponding author, e-mail: anuchit.hun@rmutr.ac.th

Received: 7 June 2024; Revised: 7 January 2025; Accepted: 8 January 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารแม่เหล็กต่อค่ามอดูลัสและพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยบดแกนหม้อแปลงให้เป็นผง ด้วยเครื่องบดตัวอย่างแบบลูกบอล วิเคราะห์ผงที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ได้เป็นผงไอรอนออกไซด์ ผสมกับพอลิโพรไพลีนตามสัดส่วนโดยน้ำหนักเป็น 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 phr ด้วยเครื่องผสมแบบปิด ควบคุมอุณหภูมิ ความเร็วสกรู และเวลาในการผสม หลังการผสมแล้ว นำออกมารีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง เพื่อตัดเป็นชิ้นตัวอย่างทดสอบสำหรับเครื่องมือแต่ละชนิด ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถ่ายภาพ สามารถสังเกตได้ว่าผงไอรอนออกไซด์กระจายตัวในพอลิโพรไพลีน และเกาะกันเป็นคลัสเตอร์เมื่อปริมาณไอรอนออกไซด์ที่ผสมมากขึ้น การทดสอบสมบัติเชิงกลแบบไดนามิกแสดงให้เห็นว่าการผสมผงไอรอนออกไซด์ทำให้ค่ามอดูลัสของพอลิโพรไพลีนเพิ่มที่อุณหภูมิใด ๆ ขณะที่พารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแมกนีไทเซชัน ค่าเฟอร์มิอะบิลิตี้ และค่าเฟอร์มิตวิตี มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นกับปริมาณไอรอนออกไซด์

คำสำคัญ: ไอรอนออกไซด์; พอลิโพรไพลีน; ขยะอิเล็กทรอนิกส์

Abstract

This research investigated the influence of the quantity of magnetic materials on modulus and electromagnetic parameters. We ground transformer cores into powder in a ball mill. We analyzed the obtained powder using the X-ray diffraction technique, which revealed it to be iron oxide powder. We mixed the iron oxide powder with polypropylene at weights of 0, 5, 10, 15, 20, and 25 phr using an internal mixer. Control temperature, screw speed, and mixing time. Next, we used the two-roll mill to roll the material into sheets and cut test samples for each technique. Scanning electron microscopy (SEM) pictures revealed the spread of iron oxide powder in the polypropylene matrix. As the amount of iron oxide increased, the clusters got bigger. Dynamic mechanical properties tests showed that the iron oxide powder mixing increased the modulus of polypropylene at any temperature. The electromagnetic parameters, namely magnetization, permeability, and permittivity, vary linearly with the iron oxide content.

Keywords: iron oxide; polypropylene; electronic waste

บทนำ

การนำวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันมาผสม จะได้วัสดุคอมโพสิตที่มีลักษณะการผสมแบบไม่สร้างพันธะ สามารถมองเห็นวัสดุทั้งสองชนิดได้ อาทิ การผลิตคอนกรีต (Concrete) ด้วยการผสมซีเมนต์ (Cement) ทราย หิน และน้ำ หรือการผสมแบบสร้างพันธะในระดับโมเลกุล อาทิ การผลิตวัสดุอัลลอย (Alloy) ซึ่งเป็นการผสมระหว่างโลหะด้วยกัน แต่ถ้าเป็นการผสมโลหะหรือวัสดุอื่น ๆ ลงในพลาสติกหรือยาง มักจะมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยเสริมแรง (Reinforce) หรือช่วยลดต้นทุนการผลิต จะเรียกว่า พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) โดยมีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ (Matrix) และเฟสกระจาย (Dispersed Phase) ของวัสดุผสม ซึ่งอาจจะเป็นเส้นใย อนุภาค แผ่นหรือชิ้นของโลหะเล็ก ๆ เซรามิกส์ หรือพอลิเมอร์ด้วยกัน และเนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกัน เช่น พอลิเมอร์จะเปลี่ยนแปลงสถานะจากความร้อนได้ง่าย มีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงต่ำ ความเหนียวต่ำ นำไฟฟ้าไม่ได้ ราคาถูก ขณะที่เซรามิกส์มีความแข็งแรงสูง นำความร้อนได้ดี และนำไฟฟ้าได้บ้าง (บางชนิด) ทนต่อการสึกหรอ ผุกร่อน แต่เปราะแตกหักง่าย ราคาสูง ส่วนโลหะจะมีความเหนียว ความแข็งแรงสูง แต่เป็นสนิมง่าย น้ำหนักมาก ราคาสูง ดังนั้นการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตจากขยะอิเล็กทรอนิกส์พลาสติกและสารแม่เหล็ก นอกจากจะช่วยเสริมแรงให้กับพลาสติกแล้ว ยังสามารถแสดงคุณสมบัติเด่นของสารแม่เหล็กที่ผสมอยู่ (Combined property) ออกมาด้วย ทำให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้ มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก ตลอดจนช่วยปรับปรุงคุณสมบัติสารแม่เหล็กเอง ให้สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย มีน้ำหนักน้อยลง สมบัติเชิงกลดี เหนียว ไม่เปราะแตกหักง่าย ราคาถูกลง [1] สามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น เช่น วัสดุทำลวดลายแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit board, PCB) ที่มีน้ำหนักเบาและเหนียว [2] เป็นสารควบคุมการปลดปล่อยยา (Drug release intelligent coat material) ในระบบนำส่งยาตามเป้าหมาย (Target drug delivery) [3] ผลิตกล้ามเนื้อเทียม [4] วัสดุป้องกันปัญหาจากไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) [5] วัสดุโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic) ที่สามารถยืดหยุ่นได้ [6] ทรานซิสเตอร์ (Transistor) สำหรับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ [7] และวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave shielding materials) [8, 9]

ปัจจุบันมีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อการสื่อสารอย่างแพร่หลาย ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวได้ 2 ลักษณะ คือ ทำงานได้โดยไม่ถูกรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก (Electromagnetic interference, EMI) และทำงานได้โดยไม่ก่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน (Electromagnetic compatibility, EMC) จากปัญหานี้ วัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีบทบาทสำคัญต่อการใช้งานอุปกรณ์เหล่านี้ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าปัจจุบันนิยมผลิตจากสารแม่เหล็กผสมกับพอลิเมอร์ หลากหลายชนิดเพื่อให้ได้วัสดุที่ตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้สำหรับป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และยังได้คุณสมบัติเด่นของพอลิเมอร์ด้วย เช่น งานของ Hunyek [10] ได้เตรียมคอมโพสิตพอลิโพรไพลีนผสมกับคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) แล้วศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงแสง และสมบัติเชิงไฟฟ้า พบว่าปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดัด (Bending) ลดลง การดูดกลืนแสงและค่าเพอร์มิตติวิตีที่ความถี่ใด ๆ เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับพอลิโพรไพลีนที่ไม่ผสม หรือในงานของ Caramitu และคณะ [9] ที่สังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตจากพอลิโพรไพลีนรีไซเคิล (Recycled polypropylene) ผสมกับสตรอนเชียมเฟอร์ไรต์ ด้วยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในห้องโดยสารรถยนต์ พบว่าวัสดุที่ผสมสตรอนเชียมเฟอร์ไรต์มีคุณสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า และทางแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไป หรือการสังเคราะห์แม่เหล็กพอลิเมอร์คอมโพสิตของกลุ่ม Trukhanov และคณะ [11] ที่ผสมผงฟลูออรีนเอทิลีนโพรไพลีน (FEP) กับแม่เหล็กแบบซอฟต์ (Soft magnetic) ที่ง่ายต่อการทำให้เกิดหรือหมดสถานะแม่เหล็ก ด้วยการแมกนีไทซ์หรือดีแมกนีไทซ์ ได้แก่ โคบอลต์เฟอร์ไรต์ (CoFe_2O_4) และนิเกิลคอปเปอร์ซิงค์เฟอร์ไรต์ ($\text{Ni}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$) ในสัดส่วนต่าง ๆ แล้วเตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องอัดร้อน (thermal compression technique) พบการเกาะกลุ่มกันของฟิลเลอร์เฟอร์ไรต์ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าของแมกนีไทเซชันคงค้าง (Remanent Magnetization, Mr) และค่าลบล้างทางแม่เหล็ก (Coercivity, Hc) ลดลง โดยเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ขณะที่การผสมสารแม่เหล็กและสารไดรโบโลยี (Tribology) ลงในอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) ในงานของ Nowacki และคณะ [12] เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของคอมโพสิต สำหรับลดการสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากช่องว่างระหว่างโรเตอร์ (Rotor) และสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งมีผลต่อสนามแม่เหล็กในระบบ โดยการลดช่องว่างจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motor) พบว่าคอมโพสิตที่มีเหล็ก (Iron) และกราไฟต์ (Graphite) มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กและไดรโบโลยีที่ดีที่สุด ส่วนงานของ Usakova และคณะ [13] สังเคราะห์พอลิเมอร์คอมโพสิต จากนิเกิลซิงค์เฟอร์ไรต์ที่ดัดแปลงคุณสมบัติด้วยการเติมธาตุยูโรเพียม (Europium, Eu) ตามสูตร $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{Eu}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ แล้วผสมกับพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) ด้วยการอัดเบ้าที่มีรูปร่างเป็นวงแหวน ให้ความร้อนแล้วกดอัดเป็นชิ้นงาน พบว่าการเติมยูโรเพียมทำให้อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ของเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้น และค่าเพอร์มิอิมิตีในจินตภาพ (Imaginary part of permeability) ปรากฏที่ค่าความถี่สูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่รองรับการใช้งานเป็นวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะสังเคราะห์และวิเคราะห์วัสดุคอมโพสิต เพื่อใช้เป็นวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในอุตสาหกรรมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ขึ้นรูปง่ายเหมือนพลาสติก อีกทั้งเป็นการนำพลาสติกและสารแม่เหล็กที่เป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ใหม่ เลือกคอมโพสิตที่เตรียมจากแกนหม้อแปลง ซึ่งเป็นชิ้นส่วนของขยะอิเล็กทรอนิกส์หลาย ๆ ชนิด ผสมกับพลาสติกพอลิโพรไพลีนซึ่งนิยมใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากที่สุด [14] เช่น เป็นฉนวนร้อน อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการ ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า และรถยนต์ ฯลฯ [15] จนกลายเป็นขยะพลาสติกที่ย่อยสลายยากมากมาย ด้วยเครื่องผสมแบบปิด เนื่องจากเป็นเทคนิคการผสมที่สามารถควบคุมสัดส่วนการผสมในสถานะหลอมได้ดีกว่าเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่เป็นแบบเปิด ซึ่งอาจมีสารอื่น ๆ เจือปนได้ และดีกว่าเครื่องอัดรีด เพราะจะได้ชิ้นตัวอย่างเป็นก้อน สะดวกในการรีดเป็นแผ่น ขณะที่เครื่องอัดรีดจะได้ชิ้นตัวอย่างเป็นเม็ดและต้องนำมาหลอมเป็นแผ่นอีกที ทำให้ควบคุมการกระจายของฟิลเลอร์ในเนื้อเมทริกซ์ได้ยากกว่า แล้ววิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron

microscopy, SEM) วัดค่ามอดูลัสด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic mechanical analysis, DMA) วิเคราะห์พารามิเตอร์ทางแม่เหล็กด้วยเครื่องวิเคราะห์การสั่นตัวอย่างภายใต้สนามแม่เหล็ก (Vibrating sample magnetometer, VSM) วัดค่าเพอร์มีอิตีวี่และค่าเพอร์มิตติวิตีด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance analyzer, IA) โดยคาดว่าจะมีข้อมูลพื้นฐานการวิจัยหรือสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการเตรียมวัสดุคอมโพสิตจากขยะอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสามารถนำมาพัฒนาวัสดุและประยุกต์ใช้งานต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารแม่เหล็กที่ได้จากขยะอิเล็กทรอนิกส์ ต่อค่ามอดูลัส และพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สามารถขึ้นรูป ตัดแต่ง ได้ง่ายเหมือนพลาสติก สะดวกในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ สำหรับอุตสาหกรรมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

วิธีดำเนินการวิจัย

จัดหาสารแม่เหล็กที่เป็นขยะจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยเลือกแกนหม้อแปลงรูปตัวอี (E) ซึ่งเป็นรูปทรงที่นิยมในอุตสาหกรรมแกนหม้อแปลง เป็นเซรามิกส์ที่แตกหักง่าย นำมาบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดตัวอย่างแบบลูกบอล (Ball-Mill) ยี่ห้อ HERZOG รุ่น HSM 100H ได้ผลิตภัณฑ์เป็นผง นำผงที่ได้ ไปทดสอบด้วยเครื่อง XRD ยี่ห้อ PHILIPS รุ่น X'Pert MPD มีทองแดงเป็นเป้าสำหรับกำเนิดรังสีเอกซ์ (K_{α} , wavelength = 0.154 nm) ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดกับเป้า 40 กิโลโวลต์ สแกนมุม 2θ จาก 20 ถึง 70 องศา โดยใช้มุมสแกนครั้งละ 0.026 องศา เพื่อพิสูจน์ชนิดของเฟสแม่เหล็กและคำนวณขนาดผลึก (d) โดยใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) ดังสมการที่ 1

$$d = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta_B} \quad (1)$$

เมื่อ λ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

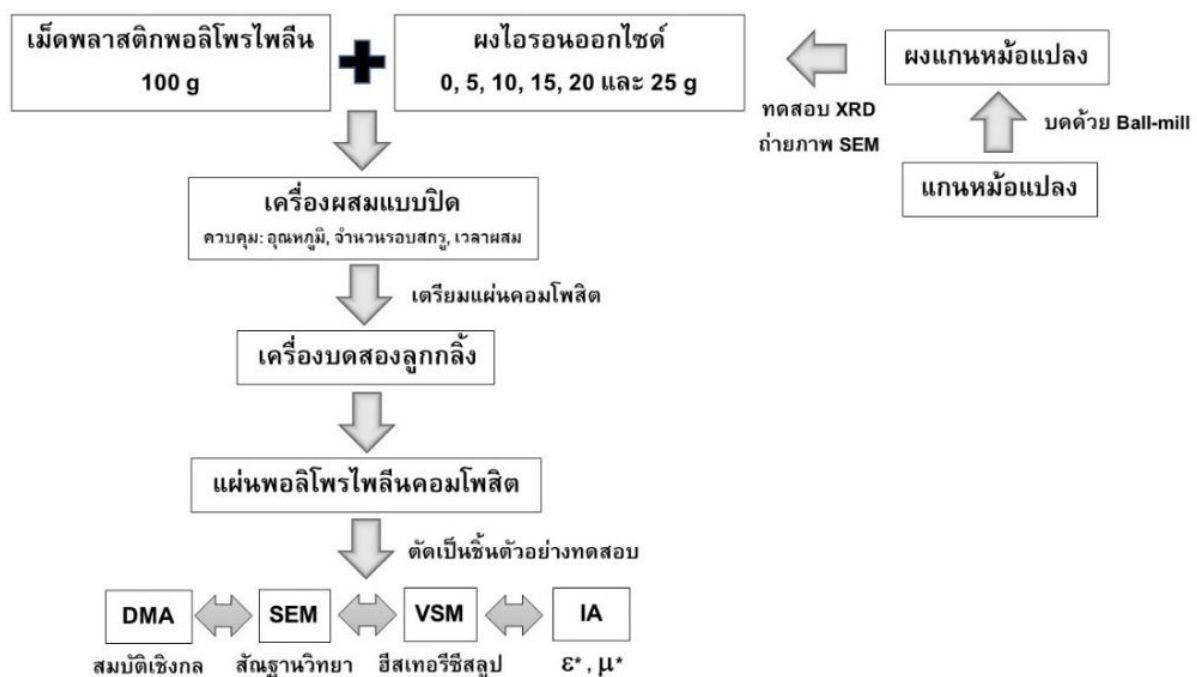
β ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของพีกสูงสุด (Full Width at Half Maximum, FWHM)

θ_B มุมของแบรกก์ (Bragg's angle)

เตรียมเม็ดพลาสติกพอลิโพรไพลีน ด้วยการอบไล่ความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และจัดเป็นชุด ชุดละ 100 กรัม เพื่อเตรียมผสมผงแกนหม้อแปลงบดตามสัดส่วนโดยน้ำหนักที่กำหนดเป็น 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 phr (part per hundred of resin) ทั้งหมด 6 ชุดตัวอย่าง ด้วยเครื่องผสมแบบปิด และเพื่อให้การกระจายตัวของฟิลเลอร์มีความสม่ำเสมอ จึงกำหนดตัวแปรควบคุมเป็นอุณหภูมิประมาณ 180 – 200 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 40 rpm ใส่เม็ดพลาสติก แล้วปล่อยให้หลอมประมาณ 2 นาที แล้วเติมผงแกนหม้อแปลงที่เตรียมไว้เข้าไป ปล่อยให้เครื่องทำการกวนคลุกเคล้าให้ผสมกันอีก 1 นาที นำพอลิโพรไพลีนคอมโพสิตที่ได้ไปรีดแผ่น ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) จนมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร เพื่อทำเป็นแผ่นสำหรับตัดชิ้นทดสอบ

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต เพื่อบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ และการกระจายตัวของผงแกนหม้อแปลงบดในเมทริกซ์พอลิโพรไพลีน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น 5800LV

และทดสอบสมบัติเชิงกลแบบไดนามิก เพื่อวิเคราะห์ค่ามอดูลัสของวัสดุ ด้วยเครื่อง DMA ยี่ห้อ PERKIN ELMER รุ่น DMA 8000 มีระบบการวัดแบบดิงยัด ความถี่ 1 Hz ใช้ชิ้นตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จับยึดแล้วดึง ในสภาวะช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 – 150 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อหนึ่งจุดข้อมูลเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำให้ได้ค่าของมอดูลัสสะสม และมอดูลัสสูญเสีย ที่สัมพันธ์กับช่วงอุณหภูมิทำการวัด แล้ววิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กจากกราฟฮิสเทอรีซิสลูป (Hysteresis loop) ที่วัดจากเครื่อง VSM โดยการแมกนีไทซ์ และดีแมกนีไทซ์ ในช่วงสนามแม่เหล็กภายนอก - 15 kOe และ +15 kOe ข้อมูลที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ของค่าแมกนีไทเซชัน (Magnetization, M) กับสนามแม่เหล็กภายนอก (Magnetic field, H) ได้เป็นกราฟฮิสเทอรีซิสลูป ที่สามารถบ่งชี้ค่าพารามิเตอร์สำคัญทางแม่เหล็ก ได้แก่ ค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (Remanent Magnetization, Mr) ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (Saturation Magnetization, Ms) และค่าลบ้างทางแม่เหล็ก (Coercivity, Hc) แล้ววิเคราะห์ค่าเพอร์มีอิตีวี่ ค่าเพอร์มีตติวี่ ด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ ยี่ห้อ Hewlett-Packard รุ่น HP16453A ช่วงความถี่ 1 – 1000 MHz โดยสรุปขั้นตอนเป็นแผนภาพดังภาพที่ 1

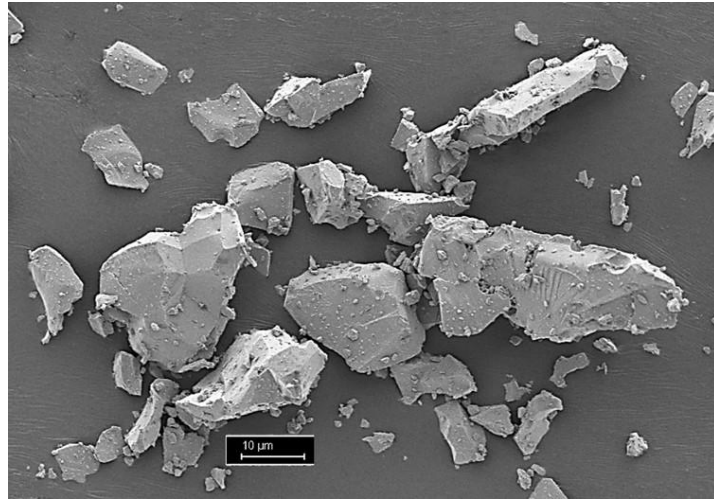


ภาพที่ 1 สรุปขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิไพโรไลนคอมโพสิต

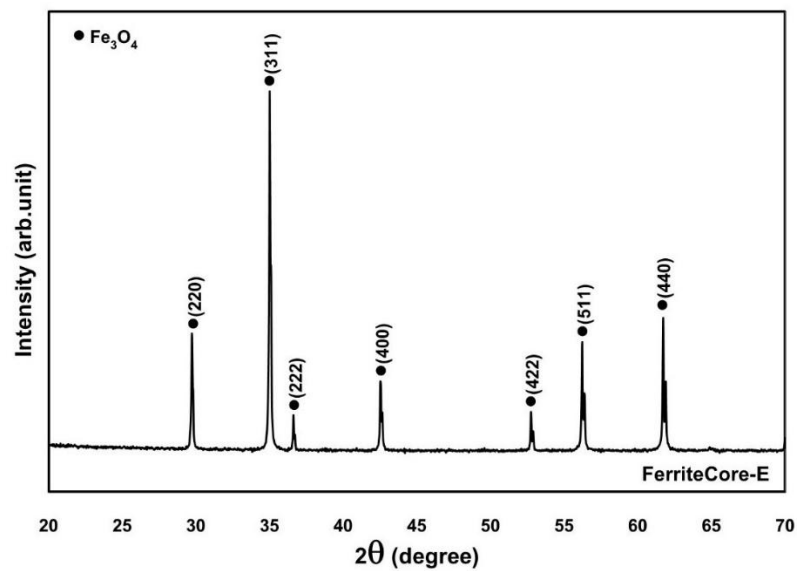
ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาที่ได้จากการบดแกมมาโอเอ็กซ์

ผลการวิเคราะห์เฟสของผงแกมมาโอเอ็กซ์ ก่อนนำไปผสมกับพอลิไพโรไลน สามารถสังเกตลักษณะทั่วไปได้ว่าเป็นผงละเอียดสีดำเข้ม และเมื่อถ่ายภาพด้วยกล้อง SEM ดังภาพที่ 2 พบลักษณะรูปร่างของผงมีรูปร่างไม่แน่นอนเป็นทรงหลายเหลี่ยม ซึ่งเกิดจากการแตกหักเนื่องจากการบด วิเคราะห์และยืนยันเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ได้ผลการทดสอบเป็น XRD pattern ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 ภาพถ่ายผงไอรอนออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

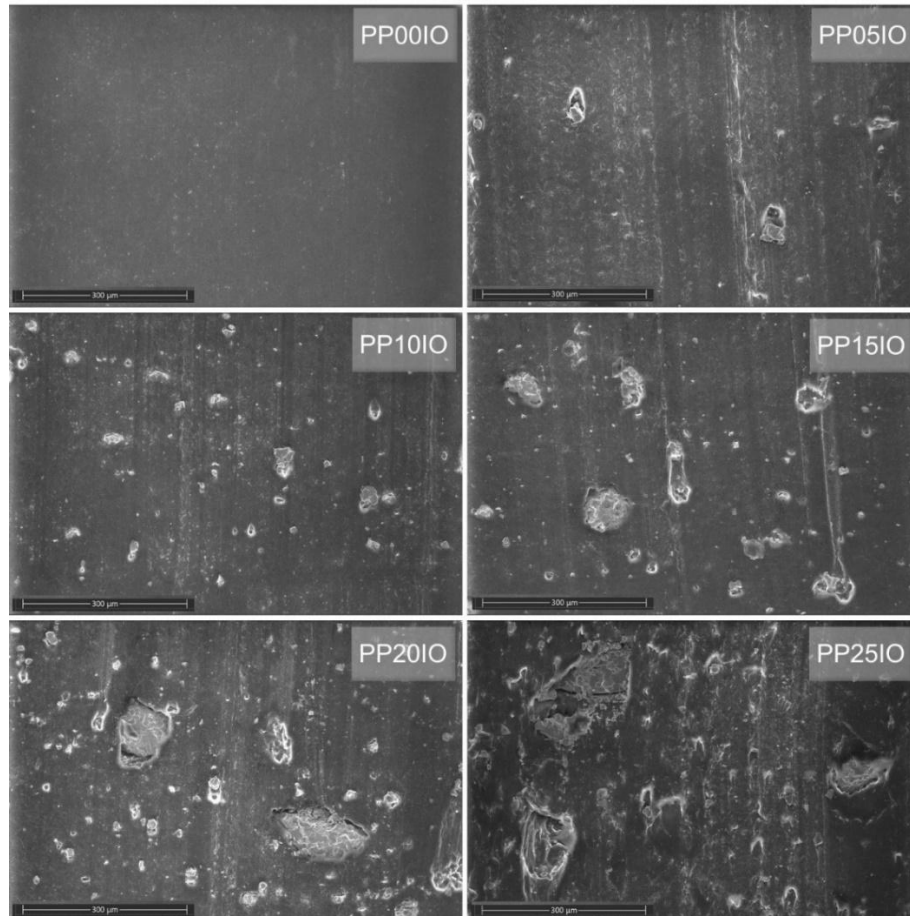


ภาพที่ 3 XRD Pattern ของผงไอรอนออกไซด์

จากพีคของรังสีเอ็กซ์ตามภาพที่ 3 สามารถเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง (Reference code) 01-080-6410 ว่าผงแกนหม้อแปลงที่บดได้ เป็นเฟสของไอรอนออกไซด์ (Compound name) หรือ แร่แมกนีไตต์ (Magnetite) (Common name) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบสปีเกลลูกบาศก์ โดยพีคที่มุม 29.73° , 35.01° , 36.62° , 42.54° , 52.76° , 56.23° , 61.73° สอดคล้องกับการเลี้ยวเบนจากระนาบ (220) (311) (222) (400) (422) (511) และ (440) ตามลำดับ และหาขนาดผลึกโดยใช้สมการเชอร์เรอร์ (Scherrer equation) ได้ขนาดอยู่ที่ 65.10 นาโนเมตร

2. ผลการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตัดชิ้นตัวอย่างพอลิโพรไพลีนคอมโพสิตเพื่อถ่ายภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า ใส่สเกลเปรียบเทียบขนาด 300 ไมโครเมตร แล้วศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการกระจายตัวของไอรอนออกไซด์ที่ผสมอยู่ ดังภาพที่ 4



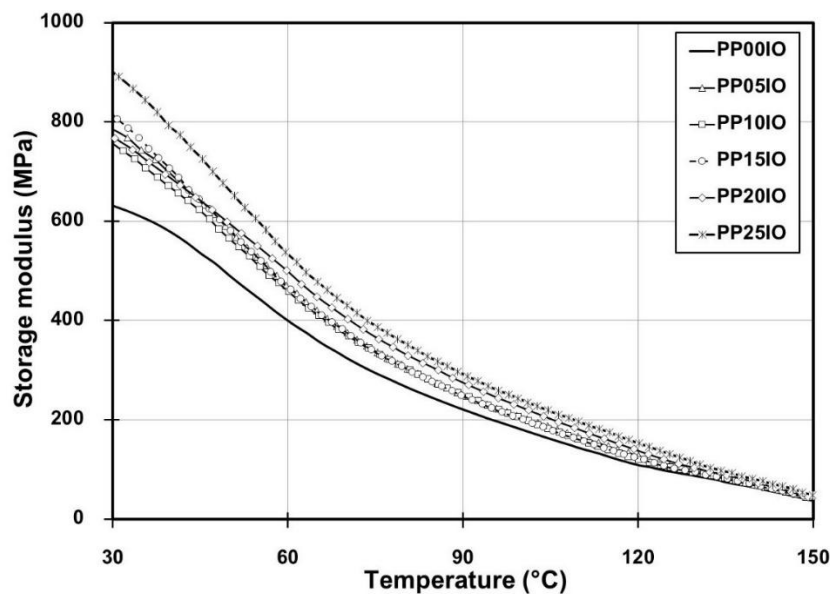
ภาพที่ 4 ภาพถ่ายพอลิโพรไพลีนคอมโพสิตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะพื้นผิวของพอลิโพรไพลีนที่ไม่ได้ผสมไอรอนออกไซด์ (PP00IO) มีลักษณะราบเรียบไร้ร่องรอย เนื่องจากการตัดเฉือน และเมื่อผสมไอรอนออกไซด์เป็นสัดส่วน 5 phr (PP05IO) สามารถสังเกตเห็นผบบางส่วนแทรกตัวอยู่อย่างห่าง ๆ กระจายตัว และเริ่มเห็นการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนหรือคลัสเตอร์ (Cluster) เมื่อผสมไอรอนออกไซด์เป็น 10 – 15 phr โดยขนาดของคลัสเตอร์อยู่ในช่วงต่ำกว่า 100 ไมโครเมตร และคลัสเตอร์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเกินกว่า 100 ไมโครเมตร เมื่อผสมไอรอนออกไซด์ 20 - 25 phr [16]

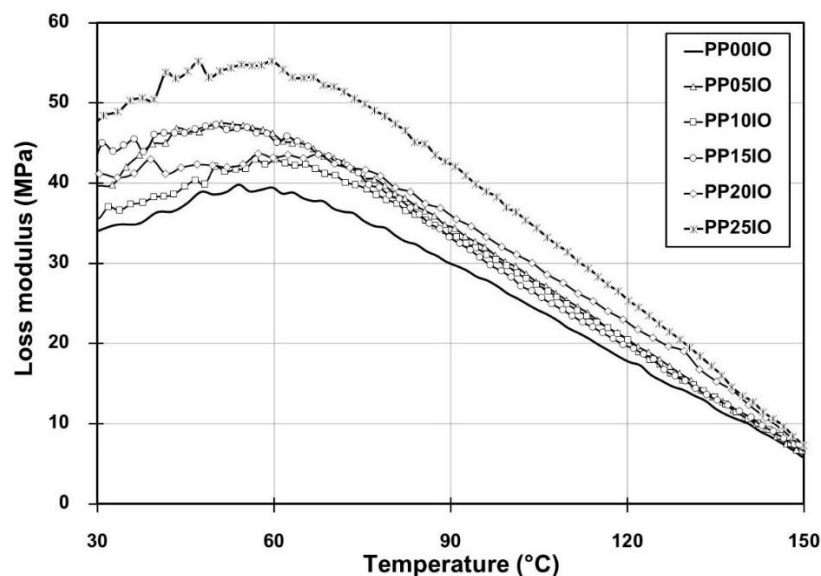
3. ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) และมอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) ที่อุณหภูมิใด ๆ เป็นการวัดการตอบสนองต่อพลังงานที่ได้รับของวัสดุที่มีสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) ด้วยเฟส (Phase) ที่อยู่ภายใน โดยค่ามอดูลัสสะสมจะเป็นการตอบสนองของเฟสที่เป็นอีลาสติก (Elastic phase) คือ พลังงานที่วัสดุรับเข้าไป

แล้วจะสามารถนำกลับมาได้ (Recoverable) ส่วนค่ามอดุลัสสูญเสีย เป็นการตอบสนองของเฟสที่เป็นความหนืด (Viscous phase) คือ พลังงานที่วัสดุรับเข้าไปไม่สามารถที่จะนำกลับมาได้ (Unrecoverable) [17]



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสสะสม ณ ช่วงอุณหภูมิ 30 – 150 องศาเซลเซียส



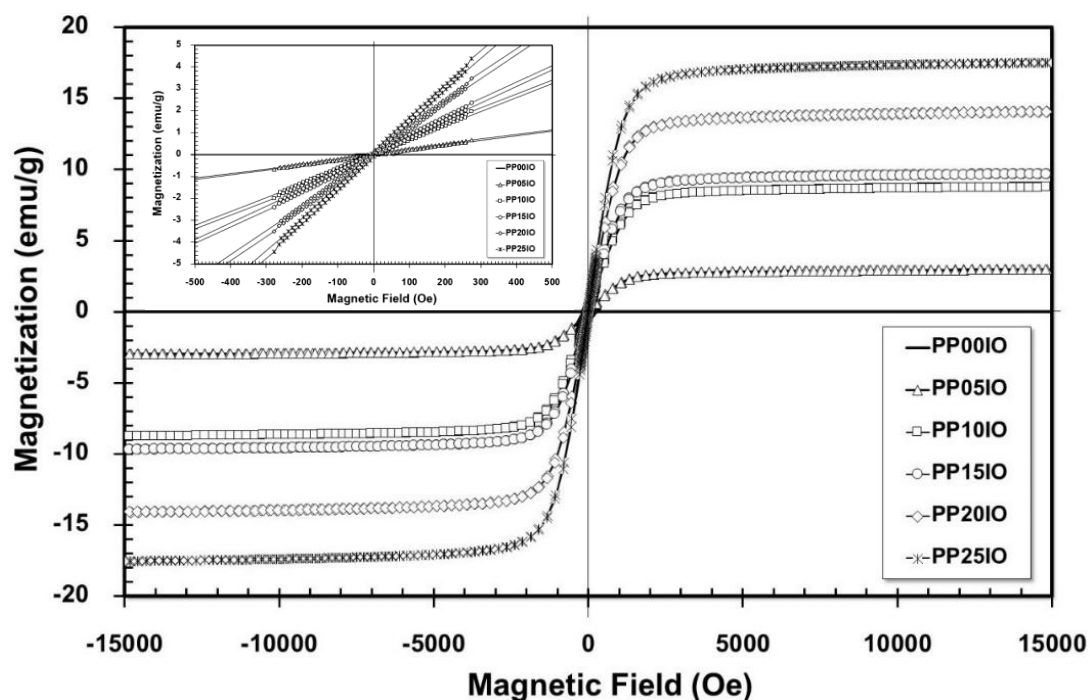
ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสสูญเสีย ณ ช่วงอุณหภูมิ 30 – 150 องศาเซลเซียส

ค่ามอดุลัสสะสมของคอมโพสิต ในช่วงอุณหภูมิ 30 – 150 องศาเซลเซียส พิจารณาจากกราฟดังกล่าวที่ 5 จะเห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าลดลง ในทุกสัดส่วนการผสม ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เช่นเดียวกับพอลิโพรไพลีนที่ไม่ได้ผสม (PP00IO) ส่วนกราฟดังกล่าวที่ 6 พิจารณาในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน แสดงการลดลงของค่ามอดุลัสสูญเสียในทำนองเดียวกัน และหากพิจารณาที่อุณหภูมิใด ๆ ตัวอย่างพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต จะมีมอดุลัสสูงกว่าพอลิโพรไพลีน แต่ไม่เป็นเชิงเส้นกับ

ปริมาณ อาทิที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าค่ามอดูลัสสะสมสูงสุด เมื่อพอลิโพรไพลีน คอมโพลีเมอร์ 25 phr เป็น 537.94 MPa ขณะที่พอลิโพรไพลีนมีค่าเพียง 402.42 MPa แสดงว่าพอลิโพรไพลีนคอมโพลีเมอร์มีความสามารถในการตอบสนองต่อพลังงานจากเฟสที่เป็นอีลาสติกได้มากกว่าพอลิโพรไพลีน และกรณีที่มีส่วนผสมไอรอนออกไซด์มากเกิน 25 phr จะทำให้คุณสมบัติของฟิลเลอร์แสดงออกมา สมบัติเด่นของพลาสติกจะเปลี่ยนแปลงไป

4. ผลการวิเคราะห์กราฟฮิสเทอรีซิสลูป

ฮิสเทอรีซิสลูป เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกนีไทเซชัน (M) กับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใช้แมกนีไทซ์ชิ้นตัวอย่าง (H) (อาจเรียกว่า กราฟแมกนีไทเซชันก็ได้) กราฟฮิสเทอรีซิสลูปของพอลิโพรไพลีนและพอลิโพรไพลีนคอมโพลีเมอร์วัดด้วยเทคนิคการสั่นตัวอย่างภายใต้สนามแม่เหล็ก (VSM) สามารถระบุค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (Saturation Magnetization) แมกนีไทเซชันคงค้าง (Remanent Magnetization) และค่าลบล้างทางแม่เหล็ก (Coercivity) โดยให้สนามแม่เหล็กสูง 15 kOe ดังภาพที่ 7 และสรุปค่าในตารางที่ 1



ภาพที่ 7 กราฟฮิสเทอรีซิสลูปของพอลิโพรไพลีนคอมโพลีเมอร์

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของพอลิโพรไพลีนคอมโพลีเมอร์

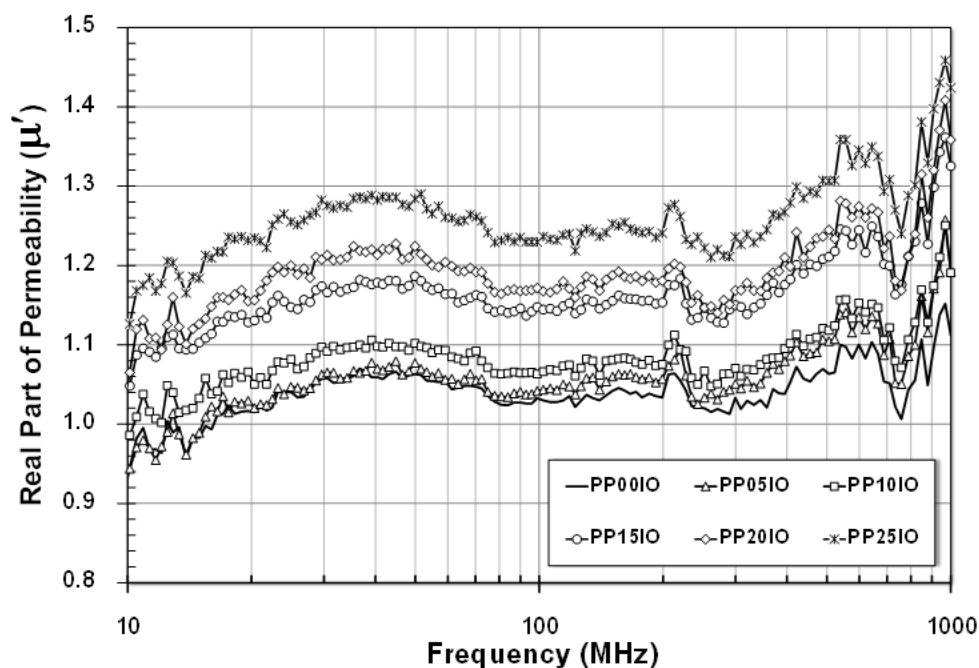
รหัสตัวอย่าง	ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (emu/g)	ค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (emu/g)	ค่าลบล้างทางแม่เหล็ก (Oe)
PP00IO	0.00	0.00	0.00
PP05IO	2.98	0.024	828.40
PP10IO	8.76	0.066	750.57
PP15IO	9.69	0.081	779.30
PP20IO	14.09	0.108	708.08

รหัสตัวอย่าง	ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (emu/g)	ค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (emu/g)	ค่าลบล้างทางแม่เหล็ก (Oe)
PP25IO	17.54	0.132	662.48

ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของพอลิโพรไพลีนและพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต จากกราฟฮิสเทอรีซิสลูป ได้ค่าแมกนีไทเซชันเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกับปริมาณของไอรอนออกไซด์ โดยที่ 25 phr จะมีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวและค่าแมกนีไทเซชันคงค้างเป็น 17.54 emu/g และ 0.132 emu/g ตามลำดับ ซึ่งเป็นพฤติกรรมของแม่เหล็ก เฟอร์รี (Ferri magnetisms) [18] สอดคล้องกับงานของ Said และคณะ [19] และเป็นไปตามกฎการผสม (Rule of mixtures, ROM) [16] ส่วนตัวอย่างที่ไม่ผสมไอรอนออกไซด์ จะไม่ปรากฏค่าแมกนีไทเซชัน และค่าลบล้างทางแม่เหล็ก ดังนั้นพอลิโพรไพลีนจึงแสดงความเป็นแม่เหล็กได้จากการผสมกับไอรอนออกไซด์

5. ผลการวัดค่าเพอร์มีอิตี

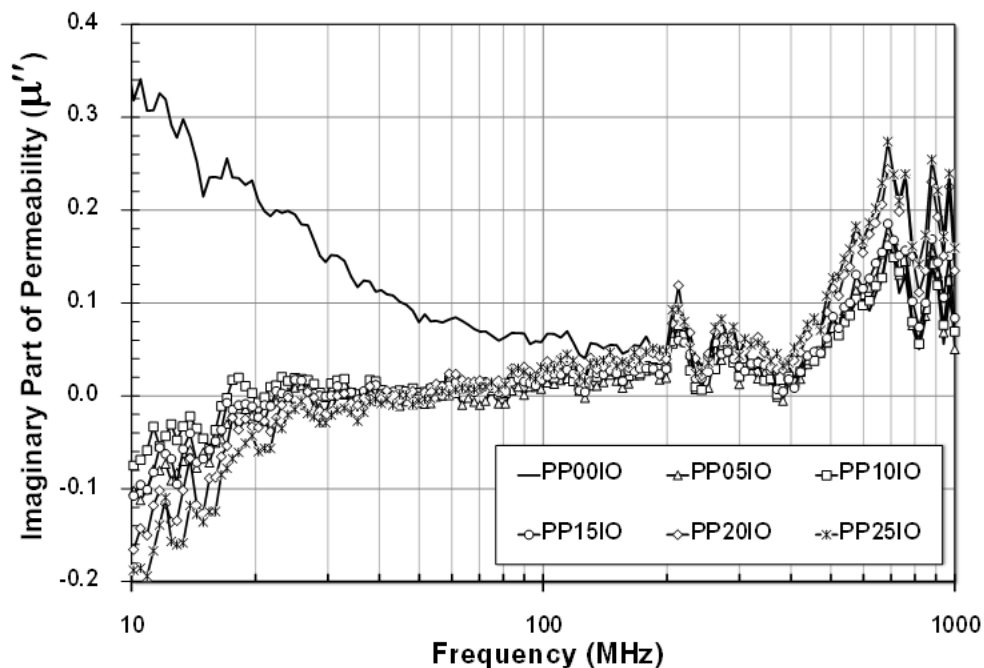
ค่าเพอร์มีอิตี (Permeability, μ) หรือค่าสภาพให้ซึมได้ทางแม่เหล็ก เป็นค่าแบบเชิงซ้อน ที่มีองค์ประกอบเป็นค่าเพอร์มีอิตีส่วนจริง (Real part of permeability, μ') ซึ่งเกี่ยวกับพลังงานสะสมภายในวัสดุ และส่วนจินตภาพ (Imaginary part of permeability, μ'') ซึ่งเกี่ยวกับพลังงานสูญเสียภายในวัสดุ สามารถบ่งบอกถึงระดับการแมกนีไทเซชันของวัสดุแต่ละชนิด เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกได้



ภาพที่ 8 ค่าเพอร์มีอิตีส่วนจริง (μ') ของแผ่นพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต

ผลการวัดค่าเพอร์มีอิตีส่วนจริงและส่วนจินตภาพดังภาพที่ 8 และ 9 ตามลำดับ ของพอลิโพรไพลีนและพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต พบว่าการเพิ่มความถี่มีผลให้ค่าเพอร์มีอิตีเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ปริมาณไอรอนออกไซด์มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มีอิตีส่วนจริง ที่สามารถสังเกตความแตกต่างได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ขึ้นไป

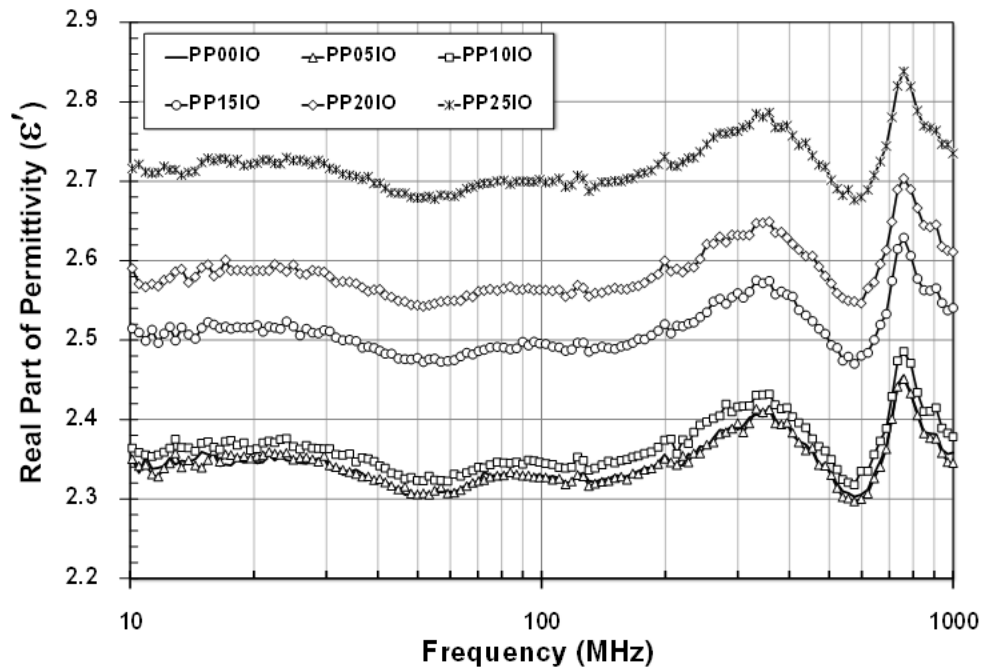
และแตกต่างกันมากที่สุดที่ 500 MHz ระหว่างพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต 5 phr กับพอลิโพรไพลีน เป็น 0.04 และไปถึง 1.28 เมื่อพอลิโพรไพลีนคอมโพสิตเป็น 25 phr สอดคล้องกับงานของ Hu และคณะ [20] ที่ผสมไฮดรอกไซด์เช่นเดียวกัน โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 10 MHz ถึง 1 GHz ที่ค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น และจะมากที่สุด เมื่อพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต 25 phr ขณะที่ส่วนจินตภาพสังเกตช่วงความถี่ 10 – 100 MHz ค่าของพอลิโพรไพลีนจะลดลงเมื่อผสมไฮดรอกไซด์ จากเดิมกว่า 0.4 แสดงว่าช่วงดังกล่าววัสดุมีการสูญเสียพลังงานน้อยลง และเมื่อความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ขึ้นไป จะมีแนวโน้มคงที่กับปริมาณไฮดรอกไซด์และความถี่



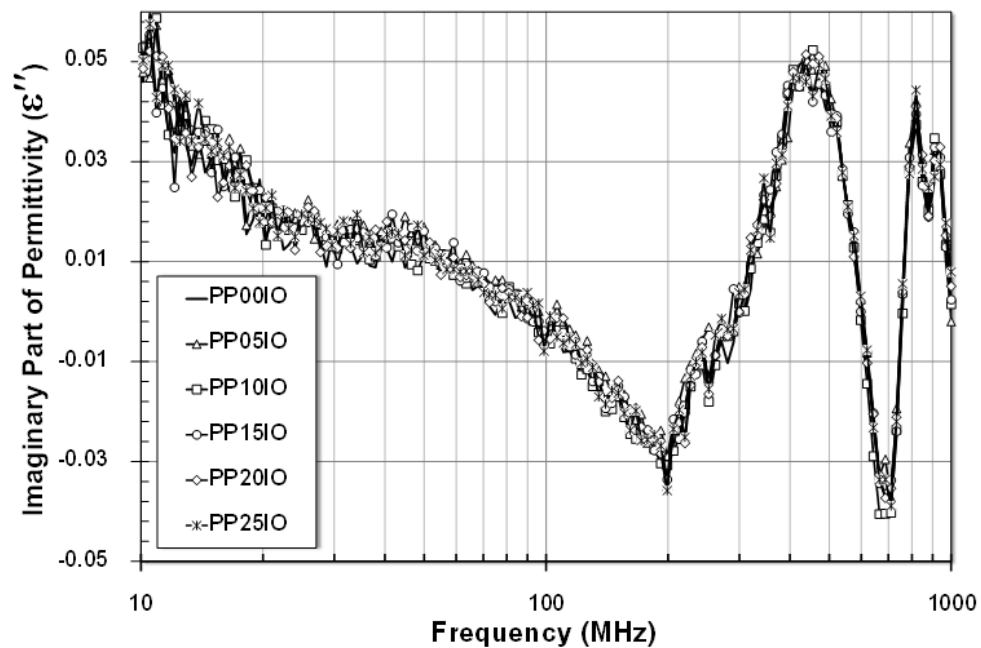
ภาพที่ 9 ค่าเพอร์มิอิตีส่วนจินตภาพ (μ'') ของแผ่นพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต

6. ผลการวัดค่าเพอร์มิตติวิตี

ค่าเพอร์มิตติวิตี (Permittivity, ϵ) หรือค่าคงที่ได้โอเล็กตริก เป็นค่าแบบเชิงซ้อน ที่มีองค์ประกอบเป็นค่าเพอร์มิตติวิตีส่วนจริง (Real part of permittivity, ϵ') ซึ่งเกี่ยวกับพลังงานสะสมภายในวัสดุ และส่วนจินตภาพ (Imaginary part of permittivity, ϵ'') ซึ่งเกี่ยวกับพลังงานสูญเสียภายในวัสดุ สามารถบ่งบอกความเป็นฉนวนไฟฟ้าของวัสดุ ที่สามารถต้านทานความต่างศักย์ได้มากหรือน้อยเพียงใด



ภาพที่ 10 ค่าเพอร์มิตติวิตีส่วนจริง (ϵ') ของแผ่นพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต



ภาพที่ 11 ค่าเพอร์มิตติวิตีส่วนจินตภาพ (ϵ'') ของแผ่นพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต

ผลการวัดค่าเพอร์มิตติวิตีส่วนจริงและส่วนจินตภาพดังภาพที่ 10 และ 11 ตามลำดับ ของพอลิโพรไพลีนและพอลิโพรไพลีนคอมโพสิต พบว่าการเพิ่มความถี่มีผลให้ค่าเพอร์มิตติวิตีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ปริมาณไอรอนออกไซด์มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตีส่วนจริงที่สามารถสังเกตความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น โดยจะเห็นว่าพอลิโพรไพลีนคอม

โพสติดปริมาณ 5 phr มีค่าใกล้เคียงกับพอลิโพรไฟลีน แต่เมื่อพอลิโพรไฟลีนคอมโพสติดมีปริมาณมากขึ้นจนถึง 25 phr อาทิ ความถี่ 800 MHz ค่าเพอร์มิตติวิตีส่วนจริงของพอลิโพรไฟลีนคอมโพสติด 5 phr มีค่าเป็น 2.37 มากกว่าพอลิโพรไฟลีนอยู่ 0.02 แต่เมื่อพอลิโพรไฟลีนคอมโพสติดปริมาณมากขึ้นจนถึง 25 phr ค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.73 สอดคล้องกับงานของ Lin และคณะ [21] ขณะที่ค่าส่วนจินตภาพจะมีแนวโน้มคงที่กับปริมาณโอโรนอนออกไซด์

สรุปและอภิปรายผล

ผลที่ได้จากการบดแทนหม้อแปลง ยืนยันผลด้วยกราฟ XRD Pattern ที่ปรากฏเพียงพีคของโอโรนอนออกไซด์ โดยไม่ปรากฏพีคที่แสดงถึงการเจือปนของเฟสอื่น ๆ ทำให้สามารถประเมินได้ว่าเป็นเฟสที่สมบูรณ์ของโอโรนอนออกไซด์ นำไปผสมกับพอลิโพรไฟลีน พบการกระจายและเกาะกลุ่มกันเป็นคลัสเตอร์ ตามการเพิ่มขึ้นของโอโรนอนออกไซด์ ทำให้พอลิโพรไฟลีนคอมโพสติดเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคโอโรนอนออกไซด์ภายในคลัสเตอร์ และร่องระหว่างคลัสเตอร์กับเนื้อพอลิโพรไฟลีน ส่งผลต่อการเกิดรูพรุน มองเห็นผิวของพอลิโพรไฟลีนคอมโพสติดขรุขระขึ้นตามขนาดคลัสเตอร์ ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่ามอดูลัสของพอลิโพรไฟลีนและพอลิโพรไฟลีนคอมโพสติดลดลง เนื่องจากพอลิเมอร์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนระดับหนึ่ง สายโซ่โมเลกุลจะเกิดการคลายตัว (Relaxation) เพื่อถ่ายเทพลังงานความร้อนนั้น พอลิโพรไฟลีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่สายโซ่โมเลกุลสามารถคลายตัวได้ [22] ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ได้รับเข้าไป ทำให้โซ่โมเลกุลของพอลิโพรไฟลีน คลายตัว ค่ามอดูลัสจึงลดลง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิใด ๆ ค่ามอดูลัสของพอลิโพรไฟลีนคอมโพสติดจะสูงกว่าพอลิโพรไฟลีน เนื่องจากการผสมโอโรนอนออกไซด์ ทำให้เกิดการขัดขวางการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุล และเพิ่มส่วนที่เป็นอสัณฐานมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการรับพลังงานเข้าไปแล้วนำกลับมาได้สูง สามารถด้านการเสียรูปได้ดี [23] แต่ไม่เป็นเชิงเส้นกับปริมาณ เนื่องจากรูพรุนหรือฟองอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการผสม ยังคงเป็นปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณา ส่วนค่าแมกนีไทเซชัน ซึ่งวิเคราะห์จากกราฟฮิสเทอรีซิสลูป พบการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของโอโรนอนออกไซด์แบบเชิงเส้น เนื่องจากน้ำหนักกรัมของโอโรนอนออกไซด์ที่เป็นสารแม่เหล็กมากขึ้น [21] สอดคล้องกับกฎการผสม คือ แมกนีไทเซชันของคอมโพสติดจะมีค่าเท่ากับผลคูณของสัดส่วนโดยน้ำหนักสารแม่เหล็กกับค่าแมกนีไทเซชันอิมิตัว จึงสามารถทำนายค่าแมกนีไทเซชันในพอลิโพรไฟลีนคอมโพสติดได้ ส่วนค่าเพอร์มิตติวิตีส่วนจริงของพอลิโพรไฟลีนคอมโพสติด มีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันกับปริมาณโอโรนอนออกไซด์ เนื่องจากค่าเพอร์มิตติวิตีจะถูกกำหนดด้วยกลไกการเกิดแมกนีไทเซชันที่เกี่ยวข้องกับแมกนีไทเซชันโรเตชัน (Magnetization rotation) ของกลุ่มอนุภาคสารแม่เหล็กขนาดเล็ก [24] เมื่อโอโรนอนออกไซด์เพิ่มขึ้นกลุ่มอนุภาคสารแม่เหล็กขนาดเล็กจะกระจายตัวในพอลิโพรไฟลีนหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ระดับการแมกนีไทเซชันเพิ่มสูงขึ้น และค่าเพอร์มิตติวิตีส่วนจริงของพอลิโพรไฟลีนคอมโพสติด มีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันกับปริมาณโอโรนอนออกไซด์ เช่นกัน เนื่องจากปริมาณประจุที่เกิดจากการโพลาริซ์บริเวณผิวรอยต่อของผิวด้านโอโรนอนออกไซด์กับเนื้อพอลิโพรไฟลีน โดยปกติค่าเพอร์มิตติวิตีของคอมโพสติดหรือวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) จะถูกกำหนดด้วยปริมาณประจุที่เกิดการโพลาริซ์แบบแมกซ์เวลล์-วากเนอร์ (Maxwell-Wagner) [25] บริเวณผิวรอยต่อระหว่างฟิลเลอร์กับเมทริกซ์ (Interfacial polarization) และระยะเวลาการกลับทิศโพลาริซ์ของประจุดังกล่าว ซึ่งสามารถอธิบายกรณีของอนุภาคโอโรนอนออกไซด์กระจายในเมทริกซ์พอลิโพรไฟลีนที่มีการนำไฟฟ้าต่ำ สภาพการนำไฟฟ้าที่ต่างกัน เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลา ประจุจะถูกตรึงอยู่บริเวณระหว่างผิวรอยต่อ (Interfacial area) การโพลาริซ์จึงมีค่าสูงกว่าพอลิโพรไฟลีนที่ไม่ผสมโอโรนอนออกไซด์ ซึ่งมีเพียงการโพลาริซ์ที่บริเวณผิวพอลิโพรไฟลีนเท่านั้น

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือการนำขยะอิเล็กทรอนิกส์มาสังเคราะห์เป็นวัสดุทดแทนคลีนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้ และมีข้อมูลของสมบัติเชิงกลและการตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่วิทยุและไมโครเวฟ เมื่อปริมาณฟิลเลอร์เปลี่ยนแปลง สามารถใช้เป็นวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ตรงตามวัตถุประสงค์ แต่การ

นำไปใช้งานจริง ยังต้องศึกษากระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ว่ามีความเหมือนพลาสติกหรือไม่ มีปัจจัยขัดขวางหรือไม่ และเมื่อแปรรูปแล้ว ส่งผลให้สมบัติเชิงกล พารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ปริมาตรว่าง และคลัสเตอร์ของฟิลเลอร์ในระหว่างการหลอมพลาสติกเปลี่ยนแปลงไปด้วยหรือไม่ อย่างไร โดยทำความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติของพอลิเมอร์เมื่อมีการหลอมหลาย ๆ ครั้ง หรือขนาดอนุภาคของฟิลเลอร์ ว่ามีผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างไร ดังนั้นการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตต่อไป จึงต้องมุ่งเน้นการสังเคราะห์และวิเคราะห์ด้วยเงื่อนไขอื่น ๆ ได้แก่ จำนวนครั้งในการหลอม ขนาดของฟิลเลอร์ ชนิดของฟิลเลอร์และเมทริกซ์ เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการพัฒนาวัสดุให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประจำปี 2566 ภายใต้เลขที่สัญญา C23/2566

เอกสารอ้างอิง

- [1] Singh, A. K., Bedi, R., and Kaith, B. S. (2020). Mechanical properties of composite materials based on waste plastic – A review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1293-1301. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.258>
- [2] Roa, C. F., Singh, N., Cherin, E., Yin, J., Boyes, A., Foster, F. S., and Demore, C. E. M. (2022). Pitch flexible printed circuit board patterning for miniaturized endoscopic microultrasound arrays. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 69, 2785-2797. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2022.3189338>
- [3] Sharifianjazi, F., Irani, M., Esmaeilkhani, A., Bazli, L., Asl, M. S., Jang, H. W., Kim, H. Y., Ramakrishna, S., Shokouhimehr, M., and Varma, R. V. (2021). Polymer incorporated magnetic nanoparticles: applications for magnetoresponsive targeted drug delivery. *Materials Science and Engineering: B*, 272, Article 115358. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115358>
- [4] Maksimkin, A. V., Dayyoub, T., Telyshev, D. V., and Gerasimenko, A. Y. (2022). Electroactive polymer-based composites for artificial muscle-like actuators: A review. *Nanomaterials*, 12, Article 2272. <https://doi.org/10.3390/nano12132272>
- [5] Yadav, R., Tirumali, M., Wang, X., Naebe, M., and Kandasubramanian, B. (2020). Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*, 16, 107-118. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.008>
- [6] Xie, C., Xiao, C., Jiang, X., Liang, S., Liu, C., Zhang, Z., Chen, Q., and Li, W. (2022). Miscibility-controlled mechanical and photovoltaic properties in double-cable conjugated polymer/insulating polymer composite. *Macromolecules*, 55, 322-330. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c02111>
- [7] Kodaira, H., and Oya, T. (2024). Development and evaluation of thread transistor based on carbon-nanotube composite thread with ionic gel and its application to logic gates. *Journal of Composite Science*, 8, Article 463. <https://doi.org/10.3390/jcs8110463>

- [8] Ismail, I., Matori, K. A., Abbas, Z., Zulkimi, M. M. M., Idris, F. M., Zaid, M. H. M., Rahim, N., Hasan, I. H., and Song, W. H. (2019). Single- and double-layer microwave absorber of cabalt ferrite and graphite composite at gigahertz frequency. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32, 935-943. <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4749-x>
- [9] Caramitu, A. R., Lungu, M. V., Ciobanu, R. C., Ion, I., Marin, M., Marinescu, V., Pinte, J., Aradoaei, S., and Schreiner, O. D. (2024). Recycled polypropylene/strontium ferrite polymer composite materials with electromagnetic shielding properties. *Polymers*, 16, Article 1129. <https://doi.org/10.3390/polym16081129>
- [10] Hunyek, A. (2019). Mechanical, optical and electrical properties of copper oxide-polypropylene composite. *The Journal of KMUTNB*, 29, 527-538. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/kmutnb-journal/article/view/211103> (in Thai).
- [11] Trukhanov, A. V., Trukhanova, E. L., Zubar, T. I., Yao, Y., Podgornaya, S. V., Almessiere, M. A., Baykal, A., Slimani, Y., Rotkovich, A. A., Sayyed, M. I., Silibin, M. V., Trukhanov, S. V., and Tishkevich, D. I. (2024). Structure and magnetic properties of the spinel-polymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 7115-7124. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.079>
- [12] Nowacki, B., Mistewicz, K., Starczewska, A., Jata, J., Kozito, M., Olesik, P., Smolen, J., Kowol, P., Pilsniak, A., and Burian, A. K. (2024). Tribological, magnetic and electric properties of magnetic polymer composites for airgap-less application, *Tribology International*, 194, Article 109542. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109542>
- [13] Usakova, M., Usak, E., Durisova, E., Dosoudil, R., Dobrocka, E., and Soka, M. (2024). Polymer composites with magnetically active Eu-substituted NiZn ferrite fillers. *Materials Today Chemistry*, 38, Article 102056. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102056>
- [14] Plastics Europe. (2021). Plastic - the facts 2021 an analysis of european plastics production, demand and waste data. Plastics Europe. Retrieved December 13, 2024, from <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>
- [15] Alawa, B., and Chakma, S. (2025). A review on feasibility and techno-economic analysis of hydrocarbon liquid fuels production via catalytic pyrolysis of waste plastic materials. *Carbon Capture Science & Technology*, 14, Article 100337. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100337>
- [16] Hunyek, A., and Sirisathitkul, C. (2023). Effect of cobalt ferrite on curing and electromagnetic properties of natural rubber composites. *Advances in Materials Research*, 12, 1-13. <https://doi.org/10.12989/amr.2023.12.1.001>
- [17] Hu, D., Xing, Y., Chen, M., Gu, B., Sun, Q., and Li, Q. (2017). Ultrastrong and excellent dynamic mechanical properties of carbon nanotube composites. *Composites Science and Technology*, 141, 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.01.019>

- [18] Jiles, D. C. (1996). *Introduction to magnetism and magnetic materials*. London: Chapman & Hall.
- [19] Said, M. M., Yunas, J., Pawinanto, R. E., Majlis, B. Y., and Bais, B. (2016). PDMS based electromagnetic actuator membrane with embedded magnetic particles in polymer composite. *Sensor and Actuators A: Physical*, 245, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.05.007>
- [20] Hu, X., Liang, Z., Li, Q., Hu, S., and Qu, S. (2022). Experimental study on the magnetic permeability of inclusion filled soft polymeric composite for soft-core transformer applications. *Polymer Testing*, 106, Article 107430. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107430>
- [21] Lin, Y., Liu, X., Yang, H., Wang, F., and Liu, C. (2017). Magnetic and dielectric properties of laminated $\text{Ca}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ magneto-dielectric composites. *Material Research Bulletin*, 86, 101-106. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.10.002>
- [22] Lei, M., Yu, K., Lu, H., and Qi, H. J. (2017). Influence of structural relaxation on thermomechanical and shape memory performances of amorphous polymers. *Polymer*, 109, 216-228. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.12.047>
- [23] Ni, X., Dong, A., Fan, X., Wang, Q., Yu, Y., and Paulo, A. C. (2015). Jute/polypropylene composites: effect of enzymatic modification on thermo-mechanical and dynamic mechanical properties. *Fibers and Polymers*, 16, 2276-2283. <http://doi.org/10.1007/s12221-015-5475-7>
- [24] Dobak, S., Fuzer, J., Kollar, P., Fáberova, M., and Bures, R. (2017). Interplay of domain walls and magnetization rotation on dynamic magnetization process in iron/polymer-matrix soft magnetic composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 426, 320-327. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.11.084>
- [25] Xia, X., Zhong, Z., and Weng, G. J. (2017). Maxwell-Wagner-Sillars mechanism in the frequency dependence of electrical conductivity and dielectric permittivity of graphene-polymer nanocomposites. *Mechanics of Materials*, 109, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.03.014>