

การเตรียมและสมบัติด้านแรงดัดของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก โดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสาร

Preparation and Flexural Property of Composite of Carbon Black

Reinforced Epoxy Resin

^{1*}ณัฐพล เกษางาม, ^{2#}วรุฒ ธรรมวิชัย

¹สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

²ภาควิชาเคมีฟิสิกส์ กองวิชาวิทยาศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

^{1*}Nattapon Kesangam, ^{2#} Warut Thammawichai

¹The Graduate School of Navaminda Kasatriyadhiraj Raoyal Air Force Academy,

Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

²Chemistry and Physics Department, Sciences Division, Faculty of Academic,

Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

*nkkesangam@gmail.com, #warut_t@rtaf.mi.th

Received : September 12, 2022

Revised : October 18, 2022

Accepted : December 20, 2022

บทคัดย่อ

วัสดุคอมโพสิตที่มีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารจัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในช่วงศตวรรษที่ 20 เนื่องจากมีความหลากหลายและมีความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้งาน โดยนิยมใช้ร่วมกับสารเสริมแรงในกลุ่มคาร์บอนเพื่อให้เกิดเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาและวิเคราะห์การเตรียมอนุภาคคาร์บอนแบล็กด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค (Couple ultrasonic) ซึ่งเป็นการประยุกต์การกระจายตัวของอนุภาคโดยการสั่นด้วยเครื่องสั่นแบบอ่าง (Ultrasonicate bath) และเครื่องสั่นแบบโพรบ (Ultrasonic probe) ในตัวทำละลาย 5 ชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน อะซิโตน เอทานอล เมทานอล และเมทิลเอทิลคีโตน และศึกษาสมบัติด้านแรงดัดของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการศึกษาพบว่า อนุภาคคาร์บอนแบล็กสามารถกระจายตัวได้ดีในสารละลาย 4 ชนิด นั่นคือ อะซิโตน, เอทานอล, เมทานอล, และเมทิลเอทิลคีโตน แต่อนุภาคคาร์บอนแบล็กจะเริ่มตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที มีเพียงอนุภาคคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายเมทานอลเท่านั้นที่รักษาเสถียรภาพได้ดี ไม่กลับมารวมตัวกันอีกครั้งและไม่ตกตะกอนลงก้นภาชนะแม้เวลาจะผ่านไป 5 วัน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 298.2 นาโนเมตร นอกจากนี้ วัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กปริมาณ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มสมบัติด้านทานแรงดัด โดยเฉพาะความเค้น ณ จุดครากได้ โดยวัสดุอีพ็อกซีเรซินที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กปริมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มค่าความเค้น ณ จุดครากถึง 19 % ในขณะที่ค่ามอดูลัสของยังมีค่าคงเดิม

คำสำคัญ: วัสดุคอมโพสิต, คาร์บอนแบล็ก, อีพ็อกซีเรซิน, สมบัติด้านแรงดัด, ความเค้น ณ จุดคราก

Abstract

Composite materials derived from epoxy resin as a thermoplastic are widely used in the 20th century due to their variety and flexibility in applications. It is commonly used in combination with carbon reinforcing to create a new kind of high-strength but lightweight material. The main objective of this research is to study and analyze the preparation of carbon black particles by using a couple of ultrasonic technique, which is particle dispersion through ultrasonic bath and ultrasonic probe in 5 solvents DI water, acetone, ethanol, methanol, and methyl ethyl ketone. And to study the flexural property of composite reinforced carbon black by the universal testing machine. The result found that the carbon black could be dispersed in 4 solvents: acetone, ethanol, methanol, and methyl ethyl ketone. However, it was precipitated after 60 minutes unless the carbon black was in the methanol. The particles were dispersed in the methanol without aggregation or precipitation after 5 days. The particle size of carbon black had an average particle diameter of 298.2 nm. In addition, the composite materials reinforced 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5 wt.% of carbon black increase the flexural properties especially the stress at the yield point. The composite materials reinforced with 0.3 wt.% of carbon black increase the yield stress by 19% while Young's modulus remains unchanged.

Keywords: Composite material, Carbon black, Epoxy resin, Flexural property, Yield stress

1. บทนำ

ในช่วงกลางคริสต์ศตวรรษที่ 20 เป็นช่วงต้นของการประยุกต์และพัฒนาความรู้ทางวัสดุศาสตร์โดยการเตรียมวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลักที่แตกต่างกัน นั่นคือ เนื้อสาร (Matrix) ซึ่งเป็นเฟสของสารที่มีความต่อเนื่องกัน และสารเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งเป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อสาร [1,2, 3] มาใช้ทดแทนวัสดุเดิมที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติ เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม และไม้ และในขณะนั้นเป็นช่วงของสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งต้องการวัสดุชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรง ทนทาน และน้ำหนักเบา จึงมีการใช้ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพัฒนาวัสดุคอมโพสิตขึ้น โดยเริ่มมีการสังเคราะห์วัสดุกลุ่มพอลิเมอร์หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นเรซินยูเรียฟอรัลดีไฮด์ พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว และอีพ็อกซีเรซิน สำหรับผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงสูง ส่งผลให้ปลายคริสต์วรรษที่ 20 จนถึงปัจจุบันมีการนำวัสดุคอมโพสิตมาปรับปรุง ประยุกต์และพัฒนาจนสามารถนำมาใช้งานเป็นเครื่องมือหรือชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมสิ่งก่อสร้าง เป็นต้น [4,5]

วัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีเนื้อสารอยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์ โดยอีพ็อกซีเรซินซึ่งเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่มีการพัฒนาจนสามารถนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเริ่มตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 และในปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ มากมาย [6, 7] อาทิเช่น สารเคลือบผิว สารช่วยยึดติด และเนื้อสารของวัสดุคอมโพสิต สำหรับขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องมือและเครื่องจักรในงานวิศวกรรม ชิ้นส่วนยานยนต์ และชิ้นส่วนอากาศยาน เนื่องจากอีพ็อกซีเรซินมีความสามารถในการทนทานต่อสารเคมี ความร้อน และความชื้นได้ดี นอกจากนั้น เมื่อนำอีพ็อกซีเรซินมาขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตจะส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยเป็นผลมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารเสริมแรงจำนวนมากจากหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ห่างกันอย่างมีระเบียบภายในโมเลกุลของอีพ็อกซีเรซิน ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่สูง รวมทั้งโครงสร้างโมเลกุลของอีพ็อกซีเรซินประกอบด้วยวงอะโรมาติก จึงส่งผลให้สายโซ่มีความแข็งแรงมากขึ้น

สารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตทำหน้าที่ในการกระจายแรงไปยังเนื้อสารเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ โดยวัสดุในกลุ่มคาร์บอนเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสำหรับนำมาใช้เป็นสารเสริมแรง เนื่องจากสามารถยึดติดกับเนื้อสารได้ดี มีน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คาร์บอนแบล็ก (Carbon Black) เป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถใช้สารเสริมแรงในรูปแบบอนุภาค (Particles) ให้กับวัสดุคอมโพสิต [8] โดยลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กเกิดจากการเรียงซ้อนทับกันของแผ่นกราฟีน (Graphene) ขนาดเล็กหลายชั้นอย่างเป็นระเบียบ ยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) เกิดเป็นก้อนคาร์บอนแบล็กขึ้น [9,10,11] โดยทั่วไปคาร์บอนแบล็กมักใช้เสริมแรงให้กับยางวัลคาไนซ์ การเคลือบผิว พลาสติก [12,13] และปัจจุบันคาร์บอนแบล็กมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์อื่นๆ [14] Khalil และคณะ [15] สังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินเสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยสังเคราะห์คาร์บอนแบล็กจากไม้ไผ่ เส้นใยมะพร้าว และปาล์มน้ำมัน ผลการทดลองพบว่าวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้ยังคงมีความแข็งแรง แต่มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นที่ดีขึ้น โดยคาร์บอนแบล็กที่สังเคราะห์ได้สามารถกระจายแรงไปยังเนื้อวัสดุจนทำให้สามารถรับแรงกระทำได้ดีขึ้น Kuzhir และคณะ [16] นำคาร์บอนแบล็กมาช่วยเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตที่มีเนื้อสารเป็นอีพ็อกซีเรซิน โดยผลการทดสอบพบว่า คาร์บอนแบล็กสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตได้ Yue และคณะ [17] ได้พัฒนาวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินเสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กชนิดโฟม โดยสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกล ให้ดีกว่าวัสดุเดิมที่ไม่มีการเติมคาร์บอนแบล็ก นอกจากนี้ Tanusree Bera และคณะ [18] ได้สังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสาร ในอัตราส่วนผสมแตกต่างกัน และทดสอบสมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัด และสมบัติด้านแรงกระแทก ผลการทดลองพบว่า วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินเสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กมีสมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัด และสมบัติด้านแรงกระแทกที่สูงขึ้นเมื่อเติมคาร์บอนแบล็ก 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ในการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กจำเป็นต้องคำนึงถึงการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็ก [19] เนื่องจากวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [20] ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้เทคนิคการกระจายตัวด้วยการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonication) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่มีการใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาเพิ่มเติม โดยการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นการใช้คลื่นอัลตราโซนิกซึ่งเป็นคลื่นทางกลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุลของสารละลายและอนุภาคเกิดการสั่นไปมา จนทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ตัวทำละลายเปลี่ยนเป็นไอจำนวนมาก เมื่อไอเหล่านี้เกิดการเคลื่อนที่ที่จะทำให้เกิดแรงมหาศาลซึ่งสามารถทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กจนอนุภาคกระจายตัวออกจากกันได้ [21,22] ทั้งนี้ ในการทำให้อนุภาคคาร์บอนแบล็กกระจายตัวโดยใช้การสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจำเป็นต้องใช้ของเหลวหรือตัวทำละลายเป็นตัวกลางในการช่วยกระจายตัว ดังนั้น การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ โดยต้องพิจารณาตามหลักการเข้ากันได้ของสารเคมีร่วมด้วย

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักที่จะศึกษาและวิเคราะห์การเตรียมอนุภาคคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายทั่วไป 5 ชนิด คือ น้ำปราศจากไอออน (DI water), เอทานอล (Ethanol, EtOH), เมทานอล (Methanol, MeOH), อะซิโตน (Acetone) และเมทิลเอทิลคีโตน (Methyl Ethyl Ketone, MEK) และทดสอบสมบัติด้านทานแรงดัดของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสาร ในแง่ของความกัน ฅ จุคคราก เนื่องจากเป็นจุดเปลี่ยนโครงสร้างพื้นฐานถาวรของวัสดุ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพการคงรูปของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาตัวทำละลายที่มีความเป็นขั้วต่างกัน 5 ชนิด คือ ปราศจากไอออน EtOH, MeOH, Acetone และ MEK

2.2 งานวิจัยนี้ขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารด้วยคาร์บอนแบล็กชนิดอะซิโตนแบล็ก

2.3 งานวิจัยนี้ขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารด้วยเทคนิคการหล่อขึ้นรูปบนแม่พิมพ์อะคลิลิก

2.4 งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติความต้านแรงดัดในส่วนของความเค้น ณ จุดครากของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine, UTM) รุ่น NRT-TS500-50B หัวกดขนาด 10 ตัน และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม NNI-Testing Machine (V.4.0)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 วัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิต เป็นการนำวัสดุ 2 ชนิด หรือมากกว่ามาผสมรวมกันจนเกิดวัสดุชนิดใหม่ โดยมีสมบัติหลักของวัสดุแต่ละชนิดคงเดิม แต่มีคุณสมบัติในด้านต่างๆ ดีขึ้น เช่น สมบัติด้านการนำไฟฟ้า สมบัติด้านการนำความร้อน และสมบัติด้านการรับแรง ซึ่งโดยทั่วไปประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ เนื้อสาร และสารเสริมแรง [1,2, 3]

1. เนื้อสาร

เนื้อสารเป็นส่วนประกอบหลักของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งมีปริมาณมากที่สุด ทำหน้าที่ห่อหุ้มและยึดสารเสริมแรงเข้าด้วยกัน เพื่อให้สารเสริมแรงสามารถกระจายตัว และอยู่ในตำแหน่งที่คงที่ตามที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปเนื้อสารมักจะเป็นวัสดุที่มีความเหนียวสูงแต่มีความแข็งแรงและมอดูลัสต่ำกว่าสารเสริมแรง เนื่องจากหน้าที่หลักของเนื้อสาร คือ ช่วยรักษาเสถียรภาพของรูปร่างและขนาด รักษาการกระจายตัวของสารเสริมแรง และยังทำหน้าที่กระจายแรงกระทำไปยังสารเสริมแรงเพื่อให้วัสดุคอมโพสิตสามารถทนต่อแรงกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปเนื้อสารสามารถแบ่งตามวัสดุหลักได้ 3 ชนิด คือ โลหะ (Metal) เซรามิก (Ceramic) และโดยเฉพาะพอลิเมอร์ (Polymer) ประเภทเทอร์โมเซตเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นเนื้อสารในวัสดุคอมโพสิตยุคใหม่[4] ตัวอย่างเช่น พอลิยูรีเทน (Polyurethane) พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) และอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) เนื่องจากโมเลกุลของเทอร์โมเซตมีการเชื่อมต่อกันเป็นแบบร่างแหจับกันแน่น มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงมาก และยังมีสมบัติทนความร้อนสูง

2. สารเสริมแรง

สารเสริมแรง เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต โดยจะมีความแข็งแรงและค่ามอดูลัสที่สูงมากเมื่อเทียบกับเนื้อสาร สารเสริมแรงมีหน้าที่หลักในการรับแรงกระทำที่ถูกส่งผ่านมาจากเนื้อสาร ซึ่งขนาดและรูปร่างมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำให้สูงขึ้น โดยสารเสริมแรงอาจมีลักษณะและรูปร่างหลายแบบ เช่น แบบแผ่น เส้นใย ผืนผ้า และอนุภาคขนาดเล็ก เป็นต้น วัสดุเสริมแรงสามารถแบ่งตามลักษณะรูปร่างได้ 4 แบบ คือ แบบอนุภาค (Particle) แบบเส้นใยสั้น (Whisker) แบบเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous fiber) และแบบแผ่น (Sheet) [8]

3.2 อีพ็อกซีเรซิน

อีพ็อกซีเรซินเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต ที่ถูกพัฒนามาใช้ในกิจการอุตสาหกรรมตั้งแต่ ค.ศ.1974 โดยเริ่มใช้งานในรูปกาวยึดโลหะ และผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส ในงานวิศวกรรมที่ต้องการความทนทานสูง เนื่องจากมีการหดตัวในระหว่างการบ่มตัว ดูดซับความชื้นต่ำ และสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (25 - 150 องศาเซลเซียส) [1] วัสดุตั้งต้นของอีพ็อกซีเรซินเป็นของเหลวอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ประกอบไปด้วยอีพอกไซด์ (Epoxide) และสารทำให้แข็งตัว (Hardener) เมื่อผ่านกระบวนการหล่อเรซิน (Epoxy resin casting) เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ระหว่างสารตั้งต้นสร้างพันธะระหว่างกันเกิดปฏิกิริยาอุกโชกโชกมีโครงสร้างเครือข่ายสามมิติและจะคายความร้อนออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ระหว่างนี้ความหนืดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันหมด โดยมีคุณสมบัติเด่น ดังนี้

3.2.1 มีความแข็งแรง สามารถรับแรงกระทำกระแทกหรือขีดข่วนได้เป็นอย่างดี

3.2.2 ทนความร้อนได้สูงถึง 150 - 200 องศาเซลเซียส

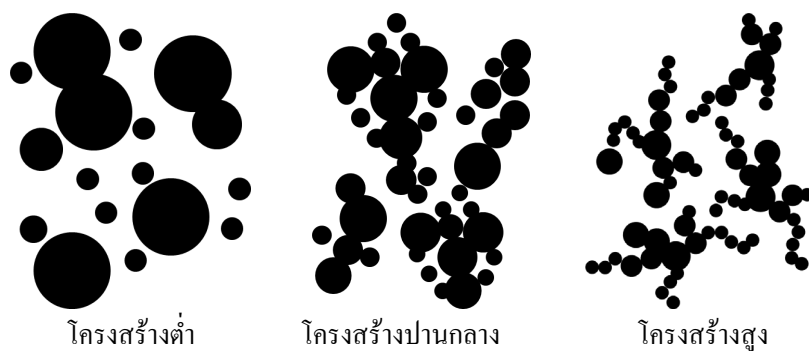
3.2.3 สามารถผสมสีเพิ่มความสวยงามให้ชิ้นงานตามต้องการ

3.3.4 มีคุณสมบัติเหมือนกาว ยึดเกาะกับผิววัสดุได้หลายชนิด เช่น ผสานกับไม้ พลาสติก และเหล็ก

3.4.5 สามารถใช้กับวัสดุเสริมแรงได้หลากหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นวัสดุกลุ่มอินทรีย์หรืออนินทรีย์

3.3 คาร์บอนแบล็ก

คาร์บอนแบล็ก เป็นเขม่าสีดำที่ได้จากการเผาแบบย่อยสลายภายใต้สภาวะควบคุมของเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีหลากหลายชนิดทำให้มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน ทั้งในระดับไมโครเมตรจนถึงระดับนาโนเมตร โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กสามารถสังเกตได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง โดยอนุภาคของคาร์บอนแบล็กมีลักษณะเป็นทรงกลมเชื่อมต่อกันคล้ายลูกโซ่เรียกว่า “โครงสร้าง” และมีหมู่คาร์บอนซิทหรือหมู่ไฮดรอกซิลเกิดการสร้างพันธะกันขึ้นที่ผิวของคาร์บอนแบล็กตามองค์ประกอบ จำนวน ขนาดและโครงสร้างของอนุภาค เรียกว่า “เคมีพื้นผิว” ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงคุณสมบัติของคาร์บอนแบล็ก และมีผลต่อ ความสามารถในการกระจายตัว ความเข้ม และลักษณะของสีเมื่อผสมกับสารอื่นหรืออีพ็อกซีเรซิน [23] คาร์บอนแบล็กที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันหรือแก๊สที่มีปริมาณออกซิเจนมากเกินไปในเตาเผาขนาดใหญ่ จะสามารถผลิตคาร์บอนแบล็กได้ในปริมาณและคุณภาพที่แตกต่างกัน เนื่องจาก กระบวนการผลิต เวลา และอุณหภูมิภายในเตาเผามีผลต่อขนาดและการเชื่อมต่อกันของอนุภาคคาร์บอน ทำให้สามารถจำแนกคาร์บอนแบล็กออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ การเผาไหม้แบบสมบูรณ์และการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ และสามารถแบ่งคาร์บอนแบล็กออกได้เป็นกลุ่ม (Group) และเกรด (Grade) จำนวนมาก อย่างไรก็ตามสามารถแบ่งกลุ่มใหญ่ๆ เป็น 5 กลุ่มหลักตามระบบของ IUPAC ได้แก่ 1) แชนแนลแบล็ก (Channel black) ได้จากภาชนะรองรับคราบเขม่าที่เกิดจากการฟืนเปลวไฟและควันไฟออกจากหัวฉีดเชื้อเพลิง มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 10 - 30 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มประมาณ 50 - 200 นาโนเมตร 2) เฟอร์นาซแบล็ก (Furnace black) เกิดในเตาเผาน้ำมัน (Oil furnace) หรือไฮโดรคาร์บอนในสภาวะที่เป็นไอภายใต้ห้องควบคุมทนความร้อน (Refractory chamber) มีขนาดอนุภาคประมาณ 10 - 400 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มประมาณ 50 - 400 นาโนเมตร 3) อะซีทิลีนแบล็ก (Acetylene black) ได้จากการเผาย่อยสลาย แก๊สอะซีทิลีนในสภาวะสุญญากาศ อนุภาคที่เกิดขึ้นมีการนำไฟฟ้าที่ดี สามารถใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ มีขนาดอนุภาคประมาณ 30 - 50 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มประมาณ 350 - 400 นาโนเมตร กระบวนการผลิตอะซีทิลีนแบล็ก ถูกผลิตในเครื่องสังเคราะห์แบบปิด โดยใช้วิธีการสลายตัวด้วยความร้อนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน สารตั้งต้นในการะบวนการผลิตสามารถย่อยสลายได้ภายใต้ความร้อน โดยอะซีทิลีนซึ่งไม่เสถียรทางความร้อนสามารถสลายพันธะไฮโดรเจนและออกซิเจนออกจนเหลือเพียงคาร์บอน และฟอร์มตัวเป็นคาร์บอนแบล็ก 4) แลมป์แบล็ก (Lamp black) ได้จากการเผาน้ำมันโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสกัดจากน้ำมันดิน (Coal tar creosote) โดยเผาภายในเตาเผาที่ควบคุมอากาศ มีขนาดอนุภาคประมาณ 60 - 200 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มประมาณ 300 - 600 นาโนเมตร และ 5) เทอร์มัลแบล็ก (Thermal black) มีได้จากการเผาย่อยสลายแก๊สธรรมชาติ (Natural gas) ในสภาวะสุญญากาศ โดยพ่นเชื้อเพลิงดังกล่าวลงบนผิวของเตาที่ร้อน (Heated refractory) จนได้เทอร์มัลแบล็กที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 120 - 500 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มประมาณ 400 - 600 นาโนเมตร โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กส่งผลต่อความสามารถในการกระจายตัวและความเข้มของสี โดยทั่วไปการเพิ่มขนาดของโครงสร้างจะเพิ่มความสามารถในการกระจายทำให้มีความเข้มลดลง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก

3.4 เทคนิคการกระจายตัว

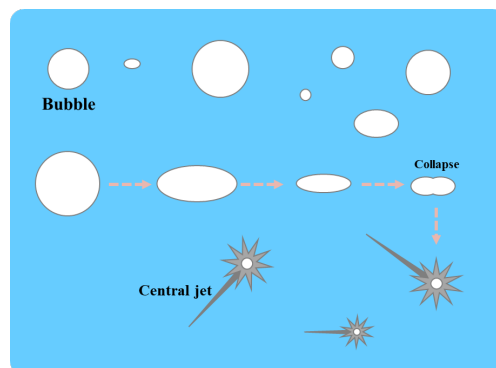
เทคนิคการกระจายตัวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic waves) เป็นเทคนิคที่แพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง และให้ผลการกระจายตัวที่ดี โดยคลื่นอัลตราโซนิก คือ พลังงานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่าปกติ (มากกว่า 20,000 เฮิรตซ์) สั่นไปมาจนเกิดความดัน (Pressure waves) โดยคลื่นเสียงจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของตัวกลางที่มีความยืดหยุ่น (Elastic medium) ในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal waves) แต่เมื่อคลื่นเสียงผ่านเข้าไปในวัตถุที่เป็นของแข็งอาจอยู่ในลักษณะของคลื่นตามยาวหรือตามขวาง (Transverse waves) โดยส่งผ่านพลังงานไปยังอนุภาคที่เกาะตัวกันให้สามารถแยกตัวออกจากกัน หรือสามารถกระจายตัวอย่างอิสระได้ ซึ่งหลักการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานหลากหลายด้าน เช่น การใช้เป็นเครื่องตรวจร่างกายเพื่อวินิจฉัยโรคในทางด้านการแพทย์ การล้างทำความสะอาดอุปกรณ์และเครื่องมือที่ต้องการความสะอาดสูงในทางด้านวิศวกรรม ในทางด้านวิทยาศาสตร์นิยมใช้คลื่นอัลตราโซนิกสำหรับการกระจายตัวของอนุภาคในสารละลายหรือตัวกลาง โดยมีหลักการในการกระจายตัวเบื้องต้นดังนี้ [24,25]

3.4.1 การทำให้เกิดและสลายฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกกระบวนการนี้ว่า “การเกิดโพรง (Cavitation)” โดยคลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดฟองอากาศต่างชนิดกัน นั่นคือ ชนิดที่เกิดขึ้นแล้วแตกทันที (Temporary bubble) และชนิดที่เป็นฟองอยู่ระยะหนึ่งแล้วจึงแตก (Stable bubble) ซึ่งการแตกของฟองอากาศเหล่านี้ทำให้เกิดแรงดันมหาศาลจนดันให้อนุภาคที่เกาะรวมตัวกันกระจายตัวออกมา ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถแบ่งออก ได้เป็น 3 ระยะ คือ

ระยะที่ 1 ระยะเริ่มต้น (Initial phase) เป็นระยะสร้างฟองอากาศทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความดัน 2 ทิศทาง (Dielectric pressure) ในทิศตรงข้ามกัน จนกันทำให้เกิดนิวเคลียส (อาจเป็นไอน้ำจากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำถูกทำลายหรืออนุภาคนาโนเล็กอยู่ในตัวกลาง) ก่อเกิดเป็นฟองสุญญากาศ (Vacuum bubble) ขึ้น

ระยะที่ 2 ระยะทำลายฟองขนาดใหญ่ (Catastrophic phase) เป็นระยะที่เกิดฟองอากาศขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรจำนวนมากหลายล้านฟองจากการทำลายฟองอากาศขนาดใหญ่ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ระยะที่ 3 ระยะสุดท้าย (Final phase) เป็นระยะที่มีความดันสูง ซึ่งเกิดขึ้นจากฟองอากาศยุบตัวแล้วแตกออก (Collapse) เกิดเป็นแรงดันของของเหลว (Hydrostatic pressure) ที่มีค่าสูงถึง 18,000 บรรยากาศ พุ่งออกจากฟองอากาศแต่ละฟอง เรียกว่า “เซนทรัลเจ็ต (Central jet)” ดังรูปที่ 2 จำนวนฟองอากาศและแรงระเบิดของฟองอากาศขึ้นอยู่กับความถี่ ความแรงของคลื่นอัลตราโซนิก ความดัน ปริมาณแก๊สในตัวกลาง และอุณหภูมิของตัวกลาง หากตัวกลางมีความดันและปริมาณแก๊สมาก จะทำให้เกิดฟองอากาศได้น้อย ตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงจะมีจำนวนฟองอากาศมากแต่แรงดันของของเหลวจะน้อยกว่าอุณหภูมิต่ำกว่า



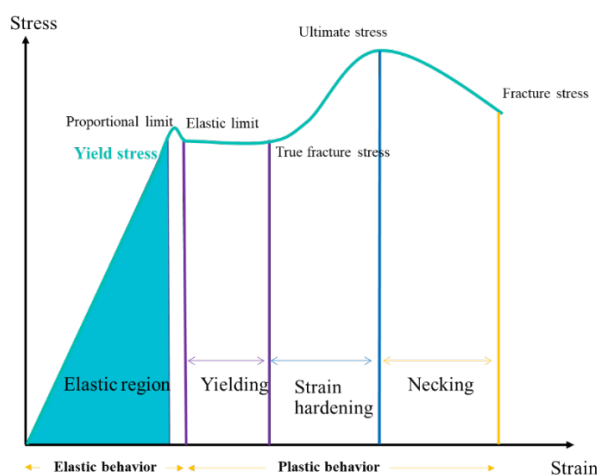
รูปที่ 2 การเกิดแรงดันของของเหลวเนื่องจากการแตกของฟองอากาศ

3.4.2 ความเร่งของของเหลว (Acceleration of fluid) ซึ่งเกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกและแรงดูดตามรูเข็ม (Capillary suction) ทำให้ของเหลวซึ่งเป็นตัวกลางเกิดความเร่งกระทำต่ออนุภาคที่เกาะตัว

3.4.3 ผลจากความร้อน (Thermal effect) เกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกให้กับสิ่งแวดล้อม มีผลให้ตัวกลางมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งช่วยให้อนุภาคบางชนิดกระจายได้ดีขึ้น

3.6 สมบัติด้านแรงดัด

สมบัติความต้านทานแรงดัด (Flexural strength) คือ ความสามารถของวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรงดัด โดยแรงที่กระทำกับวัตถุจะส่งผลให้เกิดแรงดึงที่บริเวณด้านบนของชิ้นงานและเกิดแรงอัดที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงาน ทำให้วัสดุเกิดความโค้งงอและเกิดความวิบัติในที่สุด [3] การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D790 เป็นมาตรฐานที่รองรับการทดสอบพลาสติกที่มีการเสริมแรงและไม่เสริมแรง โดยกำหนดให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปตามมาตรฐานและทดสอบกดชิ้นงานด้วยหัวกดชิ้นงานตามแรงกดที่มีอัตราการกด (Crosshead speed) คงที่ [26] การทดสอบนี้จะสามารถวัดค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ และสามารถรายงานเป็นกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ดังรูปที่ 3 โดยในระยะแรกสัดส่วนระหว่างความเค้น - ความเครียดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งสมบัติของวัสดุในบริเวณนี้สามารถคืนรูปเดิมได้ทันทีเมื่อลดหรือถอดแรงกระทำ ซึ่งเรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงแบบอีลาสติก (Elastic deformation) แต่เมื่อให้แรงกระทำมากขึ้น หรือมากกว่าแรงกระทำก่อนหน้านี้ จะทำให้วัสดุไม่สามารถคืนรูปเดิมได้ โดยเรียกการเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (Plastic deformation) ซึ่งจะเกิดหลังจากจุดคราก นั่นคือ จุดครากเป็นจุดที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของชิ้นงานและยังเป็นจุดของการเปลี่ยนแปลงสมบัติของชิ้นงานจากแบบอีลาสติกเป็นแบบพลาสติก ซึ่งเป็นจุดที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบวัสดุรองรับแรงกระทำต่างๆ



รูปที่ 3 ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ของวัสดุคอมโพสิต

4. การดำเนินการวิจัย

4.1. การเตรียมอนุภาคคาร์บอนแบล็กในสารละลาย

นำคาร์บอนแบล็กน้ำหนัก 0.02 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีการเตรียมตัวทำละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ต่างชนิดกัน ทั้งหมด 5 ชนิด นั่นคือคือ น้ำปราศจากไอออน, EtOH, MeOH, Acetone และ MEK จากนั้นทำการสั่นด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก [27] ซึ่งเป็นการประยุกต์การกระจายตัวของอนุภาคโดยการสั่นด้วยเครื่องสั่นแบบอ่าง (Elma Elmasonic, E30H) และแบบโพรบ (Cole Parmer, Model CV334) โดยตั้งค่าการสั่นของเครื่องสั่นแบบอ่าง ที่ความถี่การสั่น 40 kHz กำลัง 130/180 W และเครื่องสั่นแบบโพรบ ที่ความถี่การสั่น 20 kHz กำลัง 500 W เป็นเวลา 30 นาที

4.2. การวิเคราะห์การกระจายตัวและเสถียรภาพของคาร์บอนแบล็กในสารละลาย

วิเคราะห์การกระจายตัวของคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายโดยการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) (Carl zeiss evo10) วิเคราะห์เสถียรภาพของคาร์บอนแบล็กด้วยเทคนิคการตกตะกอน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 5 วัน และวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (Dynamic Light Scattering Particle Size Analyzer) (Malvern, Zetasizer-nano ZS)

4.3 การขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านแรงดัด

นำคาร์บอนแบล็กที่ผ่านการกระจายตัวในตัวทำละลายด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกไปประเหจนมีสารละลายเหลือเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จากนั้นผสมกับอีพ็อกไซด์ และทำให้สารเข้ากันได้ดีโดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิกอีกครั้ง ภายใต้อุณหภูมิห้อง และผสมกับสารทำให้แข็งตัว (อัตราส่วนระหว่างอีพ็อกไซด์กับสารทำให้แข็งตัวเท่ากับ 100 : 35 โดยน้ำหนัก) และใส่ฟองอากาศด้วยสูญญากาศเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงขึ้นรูปชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D790 ด้วยเทคนิคการหล่อขึ้นรูปบนแม่พิมพ์ซิลิโคน และทิ้งไว้ให้ชิ้นงานแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และอบเพื่อไล่ความชื้น และเพื่อให้สารทำให้แข็งตัวและสารอื่น ๆ ระเหยไป โดยใช้เตาอบอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

4.4 การทดสอบสมบัติเชิงด้านแรงดัดของชิ้นงาน

นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติด้านแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM D790 [26] ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) รุ่น NRT-TS500-50B ขนาดหัวกด 10 ตัน ที่ความเร็วหัวกด (Cross head speed) เท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร/นาที

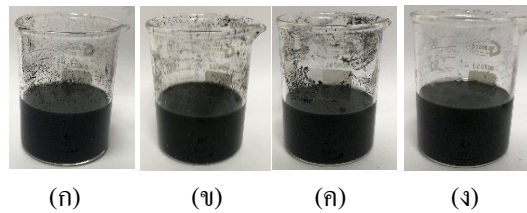
5. ผลการวิจัย

5.1 การกระจายตัวของคาร์บอนแบล็กในสารละลาย

จากการเตรียมคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายทั้ง 5 ชนิด พบว่า คาร์บอนแบล็กไม่สามารถกระจายตัวในน้ำปราศจากไอออนได้ ดังรูปที่ 4 เนื่องจากพื้นผิวของคาร์บอนแบล็กมีองค์ประกอบของคาร์บอนสูง (มากกว่า 95%) มีความเปียกชื้นต่ำ (Low wettability) มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) [28,29,30] และไม่มีความสามารถในการละลายในน้ำ ทำให้คาร์บอนแบล็กเกิดการรวมกลุ่มกัน และลอยอยู่เหนือผิวน้ำปราศจากไอออน อย่างไรก็ตามคาร์บอนแบล็กสามารถกระจายตัวได้ในสารละลายเอทานอล เมทานอล แอซีโตน และเมทิลเอทิลคีโตน ดังรูปที่ 5 อาจเนื่องมาจากสภาพความเป็นขั้วเล็กน้อยของคาร์บอนแบล็กกับตัวทำละลายละลายที่มีสภาพความเป็นขั้วมากกว่าน้ำปราศจากไอออน



รูปที่ 4 ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในน้ำปราศจากไอออน



รูปที่ 5 ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวใน EtOH, MeOH, Acetone และ MEK

ภายหลังทำการสั่นด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกรู

(ก) ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวใน EtOH

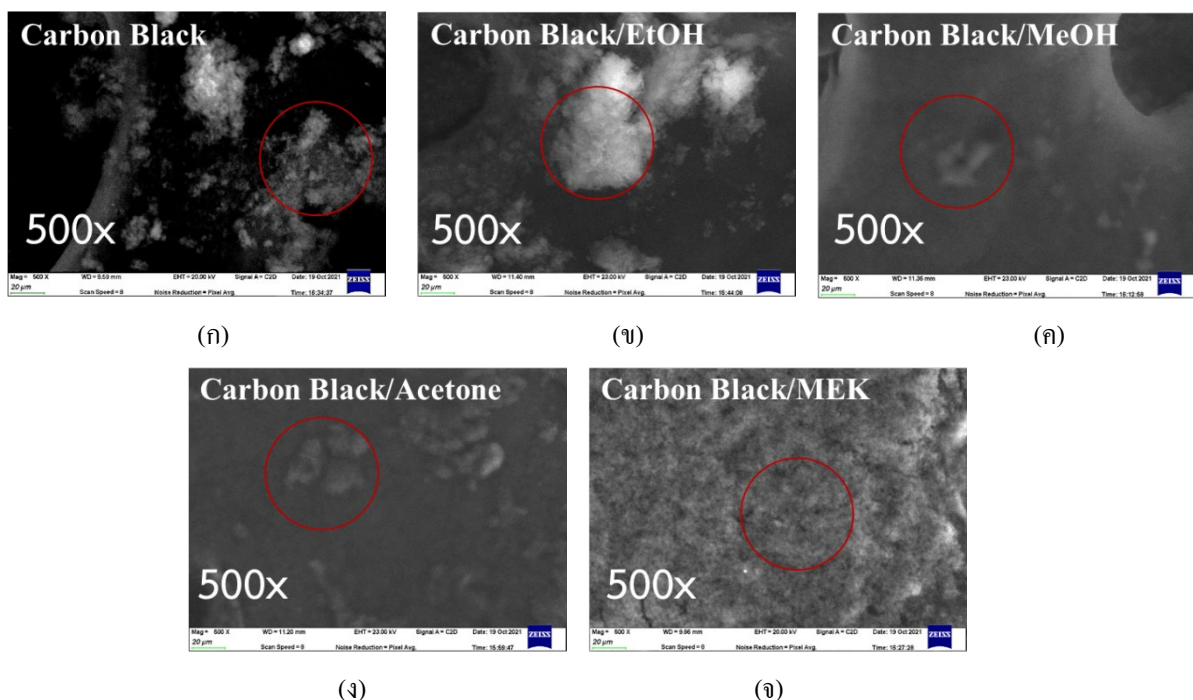
(ข) ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวใน MeOH

(ค) ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวใน Acetone

(ง) ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวใน MEK

5.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวและเสถียรภาพของคาร์บอนแบล็กในสารละลาย

จากการสังเกตการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กในสารละลาย EtOH, MeOH, Acetone และ MEK ด้วยภาพถ่ายพบว่า อนุภาคคาร์บอนแบล็กมีสีดำสนิทในทุกสารละลาย จึงทำการศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าคาร์บอนแบล็กที่ไม่ถูกกระจายตัวในตัวทำละลาย สังเกตได้จากการเกาะตัวกันเป็นก้อนของอนุภาค ดังรูปที่ 6 (ก) อย่างไรก็ตามอนุภาคของคาร์บอนแบล็กมีการกระจายตัวออกจากกันดีขึ้นเล็กน้อย โดยมีลักษณะเป็นกลุ่มอนุภาคนาขนาดเล็ก เมื่อผ่านการกระจายตัวในสารละลาย EtOH, MeOH, Acetone และ MEK ดังรูปที่ 6 (ข) – (ง)



รูปที่ 6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 500 เท่า

แสดงอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่ไม่ถูกกระจายตัว และถูกกระจายตัวในสารละลายต่าง ๆ

- (ก) คาร์บอนแบล็กที่ไม่ถูกกระจายตัว
- (ข) คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลาย EtOH
- (ค) คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลาย MeOH
- (ง) คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลาย Acetone
- (จ) คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลาย MEK

ในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารจะต้องศึกษาเสถียรภาพของอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลายร่วมด้วย เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปต้องใช้เวลาในการเตรียมการขึ้นรูป ทำให้อนุภาคคาร์บอนแบล็กอาจเกิดการรวมตัวหรือตกตะกอนอีกครั้ง ดังนั้น คณะวิจัยจึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพของอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิด โดยการติดตามการตกตะกอนของอนุภาคคาร์บอนแบล็ก ที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้แรงดันบรรยากาศ โดยมีผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1

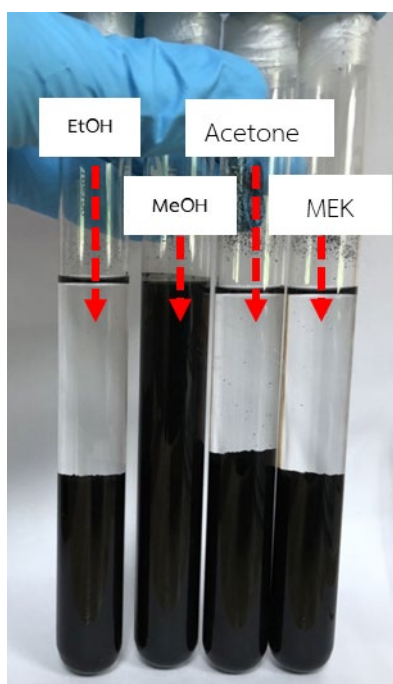
ตารางที่ 1 การตกตะกอนของคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายต่าง ๆ

ตัวทำละลาย	เวลา (นาที)				
	0	30	60	120	180
EtOH					
MeOH					

ตารางที่ 1 (ต่อ) การตกตะกอนของคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายต่าง ๆ

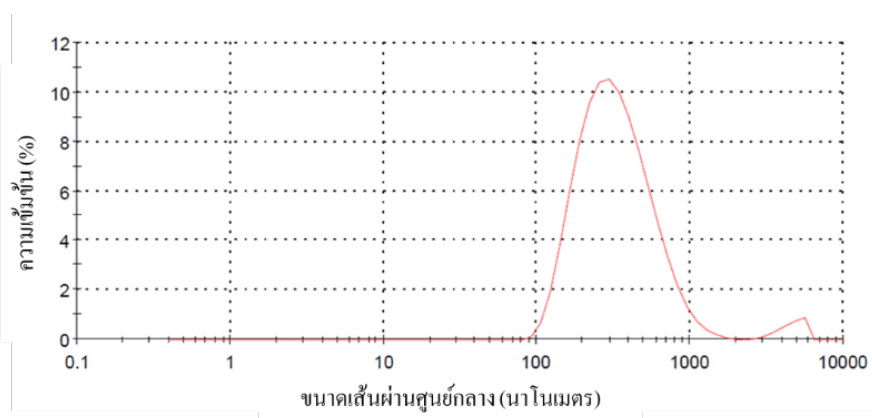
ตัวทำละลาย	เวลา (นาท)				
	0	30	60	120	180
Acetone					
MEK					

ผลการทดลองพบว่า คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลาย EtOH และ MEK เริ่มตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที และการตกตะกอนจะช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ขณะที่คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลาย Acetone เริ่มตกตะกอนอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และเริ่มตกตะกอนช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ในขณะที่คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลาย MeOH ไม่สังเกตเห็นการตกตะกอนแม้เวลาจะผ่านไป 180 นาที นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเสถียรภาพเพิ่มเติม โดยนำคาร์บอนกระจายตัวในตัวทำละลาย EtOH, MeOH, Acetone และ MEK ใส่ในหลอดทดลองที่ปิดฝาสนิทด้วยแผ่นพาราฟิน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 5 วัน พบว่า คาร์บอนแบล็กในสารละลาย EtOH, Acetone และ MEK มีการตกตะกอนลงด้านล่างหลอดทดลอง มีเพียงคาร์บอนแบล็กในสารละลาย MeOH เท่านั้นที่ยังคงสามารถกระจายตัวอยู่ได้ โดยไม่เกิดการตกตะกอน แม้จะผ่านไป 5 วัน ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 อนุภาคคาร์บอนแบล็กที่ตกตะกอนในสารละลาย EtOH, MeOH, Acetone และ MEK เมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน

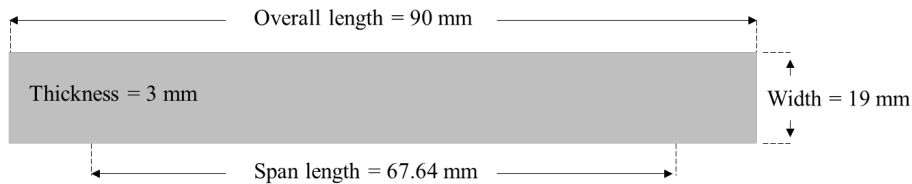
อย่างไรก็ตาม แม้ว่าคาร์บอนแบล็กจะสามารถกระจายตัวได้ในตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิด แต่คาร์บอนแบล็กจะเริ่มตกตะกอนลงด้านล่างมีเพียงสารละลาย MeOH เท่านั้นที่ยังคงเสถียร และสามารถกระจายตัวได้ดี ในการพิจารณาขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค โดยใช้เทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลาย EtOH, Acetone และ MEK ไม่สามารถวัดการกระจายตัวได้ เนื่องจากคาร์บอนแบล็กตกตะกอนอย่างรวดเร็ว ทำให้ลำแสงของเครื่องวัดขนาดอนุภาคไม่สามารถทะลุผ่านได้ ขณะที่คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลาย MeOH ยังคงกระจายตัวได้ จึงทำให้วัดขนาดอนุภาคได้ โดยขนาดอนุภาคที่วัดได้ มีค่าเฉลี่ยประมาณ 298.2 นาโนเมตร ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กที่ทำการกระจายตัวด้วยเทคนิคอัลตราโซไนคร่วมเป็นเวลา 30 นาที

5.3 การขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านแรงคด

ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านแรงคดขึ้นรูปด้วยอีพ็อกซีเรซินและเสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กที่มีรูปร่างและขนาดตามมาตรฐาน ASTM D790 ดังรูปที่ 9 โดยชิ้นงานมีลักษณะผิวเรียบ มีความเง และมีสีดำกระจายทั่วทั้งชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 10



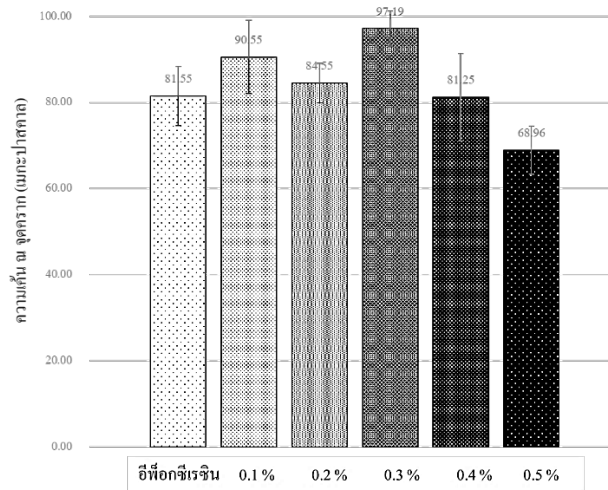
รูปที่ 9 ขนาดชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านแรงคดตามมาตรฐาน ASTM D790



รูปที่ 10 ตัวอย่างชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก

5.4 การทดสอบสมบัติด้านแรงคดของชิ้นงาน

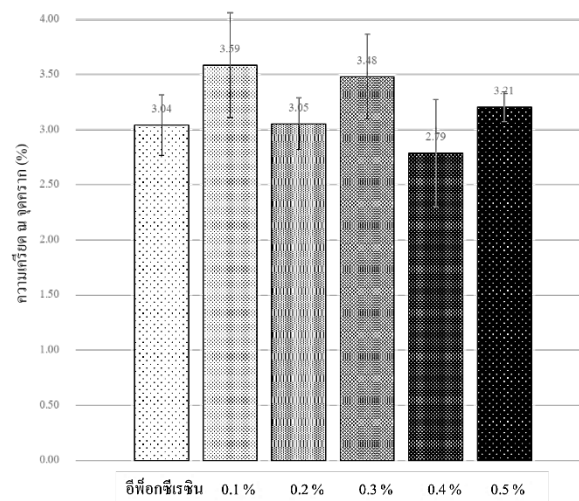
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติด้านแรงคดตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยทำการศึกษาในอัตราส่วนผสมของคาร์บอนแบล็กที่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบสมบัติด้านแรงคดของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยทำการศึกษาในอัตราส่วนผสมของคาร์บอนแบล็กที่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ความเค้น ณ จุดคราก เริ่มต้นมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มมากขึ้น โดยชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความเค้น ณ จุดครากสูงที่สุด ซึ่งสูงขึ้นจากค่าความเค้น ณ จุดคราก ของอีพ็อกซีเรซินถึง 19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากอนุภาคคาร์บอนแบล็กสามารถกระจายแรงกระทำไปยังเนื้อวัสดุจนทำให้สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มสูงขึ้นมากเกินไป จะทำให้ความเค้น ณ จุดครากลดลง นั่นคือ ชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความเค้น ณ จุดครากลดลง 15 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 11 ซึ่งเกิดจากอนุภาคคาร์บอนแบล็กมีปริมาณไม่เหมาะสม ทำให้มีจุดอ่อน (Weak point) ระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กกับอนุภาคคาร์บอนแบล็กหรืออนุภาคคาร์บอนแบล็กกับเนื้อวัสดุ แทนการกระจายแรงกระทำจากภายนอก



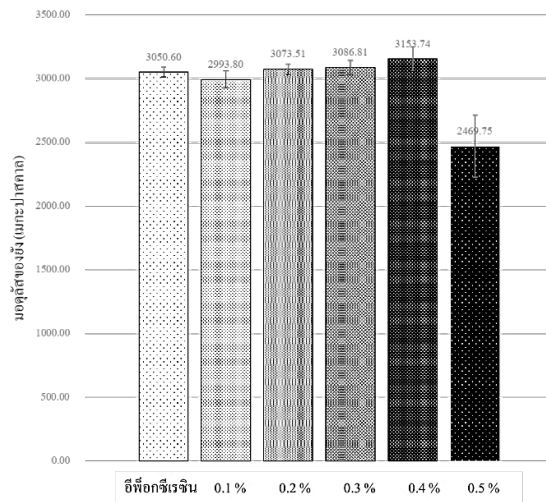
รูปที่ 11 ความเค้น ณ จุดครากของชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก ในอัตราส่วนผสม 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ความเครียด ณ จุดครากของชิ้นงานมีค่าไม่แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากปริมาณเนื้อวัสดุส่วนใหญ่เป็นอีย็อกซีเรซิน จึงยังคงสภาพการยึดหยุ่นไว้ได้ ดังรูปที่ 12 เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานที่ไม่มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กคงสภาพวัสดุได้ใกล้เคียงกับวัสดุเดิม ดังรูปที่ 13

จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การใช้คาร์บอนแบล็กเป็นสารเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กมีความสามารถรับแรงกระทำ โดยที่ชิ้นงานยังคงสภาพได้ดีขึ้น แต่ต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสม ที่ปริมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 12 ความเครียดของชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก ในอัตราส่วนผสม 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 13 มอดูลัสของยังของชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก
ในอัตราส่วนผสม 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

6. สรุป

6.1 อนุภาครีคาร์บอนแบล็กสามารถกระจายตัวด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกได้เป็นเวลา 30 นาที ในสารละลาย EtOH, Acetone, MeOH และ MEK แต่ไม่สามารถกระจายตัวได้ในน้ำปราศจากไอออน

6.2 อนุภาครีคาร์บอนแบล็กสามารถกระจายตัวในสารละลาย MeOH โดยไม่มีการตกตะกอนแม้เวลาจะผ่านไป 5 วัน

6.3 ขนาดของอนุภาครีคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลาย MeOH ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกได้เป็นเวลา 30 นาที มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 298.2 นาโนเมตร

6.3 ชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสาร ที่เตรียมสำหรับการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง มีค่าสมิทจากอนุภาครีคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน

6.5 การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตที่มีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารด้วยอนุภาครีคาร์บอนแบล็กที่ผ่านการกระจายตัวด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกได้เป็นเวลา 30 นาที ในสารละลาย MeOH สามารถเพิ่มสมบัติด้านแรงดึงได้ โดยคาร์บอนแบล็กปริมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มค่าความเค้น ณ จุดคราก ได้สูงถึง 19 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่ามอดูลัสของยังมีค่าคงเดิม

7. ข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารตามขอบเขตที่กำหนดเท่านั้น ซึ่งสามารถทำการศึกษาเพิ่มเติมในหัวข้อผลของการกระจายตัวอนุภาครีคาร์บอนแบล็กในเนื้อสารอีพ็อกซีเรซิน การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตด้วยอนุภาครีคาร์บอนแบล็กในเนื้อสารชนิดอื่นๆ การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตด้วยอนุภาครีคาร์บอนแบล็กที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลอื่นๆ เป็นต้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มากขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ เนื่องจากได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณอุดหนุนและคุณสมบัติของอาจารย์ รร.นนก. ทั้งนี้คณะวิจัยขอขอบพระคุณ ร.อ.ณัฐวัฒน์ ภูักดี และ ร.ท.หญิง พิชญ์ธิดา จิตตมาโร ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ จนทำให้โครงการวิจัยบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการบริหารงบประมาณอุดหนุนและคุณสมบัติของอาจารย์ งานวิจัย รร.นนก. ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญรักษาญจนวรณิษฐ์, โพลีเมอร์คอมโพสิต. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
- [2] อาติสละห์ ศิริวิมล. (2558). วัสดุเชิงประกอบจากโพลิเมอร์ไฮดรอกซีไดรีนรีไซเคิลและเส้นใยธรรมชาติ. (วิทยานิพนธ์
มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา).
- [3] สมิต, วิลเลียม เอฟ. (2544). วัสดุวิศวกรรม **Principles of materials science and engineering**. พิมพ์ครั้งที่ 3.
กรุงเทพมหานคร : แมคกรอ-ฮิล อินเทอร์เน็ตชั่นแนล.
- [4] หฤทกั กิรติเสว, ภัทรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตร. (2553), ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ An overview of
composite material. วิศวกรรมสารมก., 22(12): 18-32.
- [5] ธนินทร์รัฐ สิทธิเวชนาศิริ,ละอองดาว วรณฤทธิ์ และศพล พงษ์แก้ว. (2021). การศึกษาการเพิ่มขีดความสามารถด้าน
วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ. Sci & Tech.J.NKRAFA.[2021], 17(2):
54 -68.
- [6] จันทร์นัย ทองปิ่น และสุตศิริ เหมศิริ. (2548). การใช้ยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรเพื่อปรับปรุงความเหนียวของอีพ็อก
ซีเรซิน. วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [7] เอนก ภู่อานงค์. (2553). วัสดุอีพ็อกซีเรซินกับการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก. MTEC. เมษายน - มิถุนายน 2553: 14 – 20.
- [8] Przemyslaw D. Pastuszek & Aleksander Muc. (2013). Application of Composite Materials in Modern
Constructions. Key Engineering Materials.13(542): 119 – 129.
- [9] Ateeq Rahman, Ilias Ali, Saeed M. AL Zahrani & Rabeh H. Eleithy. (2013). A REVIEW OF THE APPLICATIONS
OF NANOCARBON POLYMER COMPOSITES. NANO: Brief Reports and Reviews. 11(6): 185–203.
- [10] Andrei Honciuc. (2021). **Chemistry of Functional Materials Surfaces and Interfaces**.1st edition. Elsevier.
- [11] Ming-Yuan Shen , Wen-Yuan Liao, Tan-Qi Wang & Wei-Min Lai. (2021). Characteristics and Mechanical
Properties of Graphene Nanoplatelets-Reinforced Epoxy Nanocomposites: Comparison of Different Dispersal
Mechanisms. Sustainability. 21(13): 1-18.
- [12] Li, H.Y., Chen, H.Z., Xu, W.J., Yuan, F., Wang, J.R. & Wang, M. (2005). Polymer-encapsulated hydrophilic carbon
blacknanoparticles free from aggregation. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.
5(254): 173-178.
- [13] Jakab, E. & Omastová, M. (2005). Thermal decomposition of polyolefin/carbon black composites. Journal of
Analytical and Applied Pyrolysis. 5(74): 204-214.
- [14] Zhang, W., Zhang, X., Liang, M. & Lu, C. (2008). Mechanochemical preparation of surface-acetylated cellulose
powder to enhance mechanical properties of cellulose-filler-reinforced NR vulcanizates. Composites Science and
Technology, 8(68): 2479-2484.
- [15] Khalil, H.A., Firoozian, P., Bakare, I.O., Akil, H.M. & Noor, A.M. (2010). Exploring biomass based carbon black as
filler in epoxy composites: Flexural and thermal properties. Materials & Design, 10(31): 3419-3425.
- [16] Kuzhir, P., Paddubskaya, A., Plyushch, A., Volynets, N., Maksimenko, S., Macutkevicius, J., Kranauskaite, I., Banys,
J., Ivanov, E.,Kotsilkova, R. & Celzard, A. (2013). Epoxy composites filled with high surface area-carbon fillers:
Optimization of electromagnetic shielding, electrical, mechanical, and thermal properties. Journal of Applied
Physics. 13(114): 164304-1 - 164304-7.
- [17] Yue, J., Xu, Y. & Bao, J. (2017). Epoxy-carbon black composite foams with tunable electrical conductivity and

- mechanical properties: Foaming improves the conductivity. *Journal of Applied Polymer Science*, 17(134): 45071-1 - 45071-10.
- [18] Tanusree Bera, S.K. Acharya & Punyapriya Mishra. (2018). Synthesis, mechanical and thermal properties of carbon black/epoxy composites. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 18(10): 12-20.
- [19] Chifei We, Shigeo Asai, Masao Sumita, & Keizo Miyasaka. (1992). Dispersion of Particle in Polymer Composites Filled with Carbon Black Studied by Scanning Electron Microscopy Observation. *Integration of CiNii Articles into CiNii Research*. 92(48): 69 – 72.
- [20] Ai-Jie Ma, Weixing Chen, Yonggang Hou & Gai Zhang. (2010). Dispersion, Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin Composites Filled with the Nanometer Carbon Black. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 10(49): 916–920.
- [21] Boris I. Kharisov, Oxana V. Kharissova & Ubaldo Ortiz Méndez. (2014). Methods for Dispersion of Carbon Nanotubes in Water and Common Solvents. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 14(1700): 109 – 114.
- [22] Shouci Lu, Robert J. Pugh & Eric Forssberg. (2005). **Interfacial Separation of Particles**. ScienceDirect.
- [23] วัชรพันธุ์ มณีรัตน์. (2549). การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนแบล็ก. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร).
- [24] Julian S. Taurozzi, Vincent A. Hackley & Mark R. Wiesner. (2011). Ultrasonic dispersion of nanoparticles for environmental, health and safety assessment – issues and recommendations. *Nanotoxicology*, December 2011. 11(5): 711–729.
- [25] Thomas Hielscher. (2005). ULTRASONIC PRODUCTION OF NANO-SIZE DISPERSIONS AND EMULSIONS. ENS'05 Paris, France, 14-16 December 2005.
- [26] ASTM D790. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [27] Nathawat Poopakdee & Warut Thammawichai. (2019). FABRICATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE AND CELLULOSE MICROFIBRIL REINFORCED EPOXY COMPOSITE. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 19(7): 39 – 43.
- [28] จันทร์จิรา อภิรักษ์เมฆาวงศ์. (2557). การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา).
- [29] Ridaoui H, Jada A, Vidal L & Donnet JB. (2006). Effect of cationic surfactant and block copolymer on carbon black particle surface charge and size. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 278(1-3): 149–159
- [30] Hsiang Yi Hsieh & Weng Tung Cheng. (2021). Fabrication and Stabilization of Oxidized Carbon Black Nanoparticle Dispersion in Aqueous Solution for Photothermal Conversion Enhancement. *ACS Omega* 2021. 21(6): 3693–3700.