

อิทธิพลของการเสริมกำลังด้วยวัสดุนาโนร่วมกับวัสดุเสริมกำลังเส้นใย
ดั้งเดิมในโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนต
แบบหลายขนาด - การทบทวนวรรณกรรม

**Influence of nano-reinforcement through a
combination with traditional fiber reinforcement in
multi-scale laminate composites structural - Review**

นภาพ แยมไทรพัฒน์¹ ประพจน์ ทศภานนท์² และ วิวัฒน์ ประเสริฐมานะกิจ³

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Corresponding author²: E-mail: parpot@mut.ac.th

Manuscript Received February 15, 25025

Revised April 21, 2025

Accepted May 14, 2025

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนออิทธิพลการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังนาโนชนิด วัสดุแผ่นแกรฟีน (Graphene platelets, GPLs) กับกลุ่มโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใย โดยปัจจุบันวัสดุแผ่นแกรฟีนได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากคุณสมบัติที่เยี่ยมของ ความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง พื้นที่ผิวจำเพาะสูง ความหนาแน่นต่ำ และอื่น ๆ ดังนั้น จากปัจจัยสำคัญเหล่านี้นำไปสู่การพัฒนาโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตประเภทใหม่ ที่เรียกว่า วัสดุคอมโพสิตลามิเนตแบบหลายขนาด (Multiscale laminated composite) โดยงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นนำเสนออิทธิพลสำคัญของวัสดุแผ่นแกรฟีนที่มีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตประเภทใหม่ ดังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราส่วนความยาว (l/d) สัดส่วนทางน้ำหนัก (wt%) การกระจายตัวของวัสดุแกรฟีน และการจัดเรียงวัสดุเส้นใย ตามลำดับ

คำสำคัญ: วัสดุเสริมกำลังนาโน, แผ่นแกรฟีน, วัสดุเสริมกำลังเส้นใย, โครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตแบบหลายขนาด

ABSTRACT

The purpose of this study is to present the influence of nano-reinforcements graphene platelets (GPLs) with a sector of fiber-reinforced composite structures. Recently, GPLs has been widely used in composite structures due to its excellent properties such as high elastic modulus, high strength, large specific surface area, low density, etc. Therefore, these prominent properties are the promising choices for the development of novel types of laminated composite structures named multi-scale laminated composite. However, the paper focuses on the important effect of GPLs on the development of novel types of laminated composite structures, such as aspect ratio (l/d), weight fraction (wt.%), distribution of nano-reinforcements and aligned reinforcing fibers, respectively.

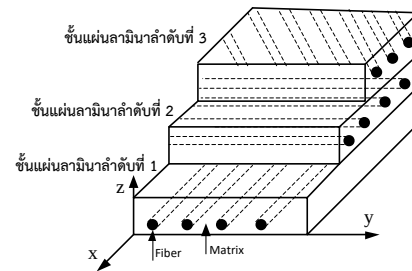
Keywords: Nano-reinforcement, Graphene platelets (GPLs), Fiber- reinforcement, Multi-scale laminated composite structural

1. บทนำ

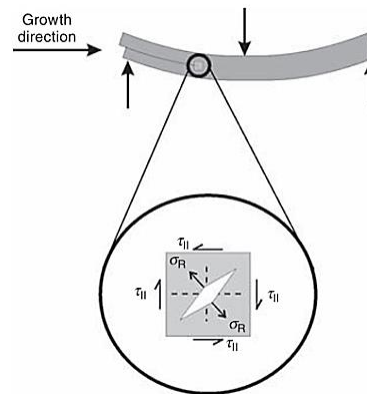
จากปัจจัยการแข่งขันทางธุรกิจ และราคาพลังงานที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้อุตสาหกรรมในกลุ่มขนส่งประเภทต่าง ๆ เช่น ทางบก ทางอากาศ และทางเรือ เป็นต้น [1] – [3] ต้องปรับเปลี่ยนทิศทางการออกแบบวัสดุและโครงสร้างเพื่อให้สอดคล้องกับปัจจัยข้างต้น โดยการใช้งานโครงสร้างในกลุ่มอุตสาหกรรมการขนส่งเหล่านั้น อาจเรียกว่าเป็นกลุ่มของการใช้งานโครงสร้างน้ำหนักเบา (Lightweight structures) ที่อยู่บนพื้นฐานของวัสดุคอมโพสิตลามิเนต (Laminated composite materials) ที่ได้จากการผสมผสานกันระหว่างวัสดุเนื้อหลัก (Matrix) และวัสดุเสริมแรงในกลุ่มวัสดุเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous Fiber Composites CFCs) เพราะสามารถออกแบบความแข็งแรงของวัสดุหรือโครงสร้างได้ตามทิศทางที่ต้องการ [4] และเรียกรวมวัสดุคอมโพสิตกลุ่มนี้ว่าเป็น วัสดุคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber reinforced composite materials) โดยข้อสรุปส่วนใหญ่ของวัสดุคอมโพสิตกลุ่มเสริมกำลังด้วยเส้นใยคือ โดดเด่นสมบัติด้านความแข็งแรง และความแข็งแรงสูงต่อน้ำหนักที่ดี (High strength–stiffness weight ratio) [5] จากอดีตที่ผ่านมาวัสดุคอมโพสิตลามิเนตได้มีบทบาทสำคัญมากมายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในสาขาต่าง ๆ โดยงานด้านโครงสร้างนับได้ว่าเป็นส่วนสำคัญที่มีผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์ในหลากหลายด้าน เช่น ที่อยู่อาศัย การเดินทาง สุขภาพ เป็นต้น แม้ว่าการประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิตลามิเนตจะได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายก็ตาม แต่ประเด็นข้อเสียของวัสดุคอมโพสิตลามิเนตก็ยังพบเจอและถูกกล่าวถึงบ่อยครั้ง นั่นคือ การแยกชั้น (Delamination) [6] – [7] อันเนื่องมาจากสาเหตุของการเกิดความเค้นในชั้นลามิเนตที่ไม่เท่ากัน ส่งผลทำให้ชั้นของลามิเนตเกิดการดึงรั้งต่อกันและเกิดรอยแตกแยกออกไปตามแนวยาวของโครงสร้าง ดังแสดงได้ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

โดยประเด็นจุดอ่อน หรือปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตในลักษณะการแยกชั้น ตามแสดงในรูปที่ 2 โดยส่วนใหญ่มักเกิดจากโครงสร้างที่มีความแข็งแรงเฉือนที่ต่ำ หรือโครงสร้างมีสมบัติของความเหนียวที่ต่ำ (Toughness) เฉพาะอย่างยิ่ง วัสดุเนื้อหลักชนิด วัสดุพอลิเมอร์ และเป็นกลุ่มของวัสดุเนื้อหลักที่นำมาสร้างโครงสร้างน้ำหนักเบามากหลายชนิด ด้วยสาเหตุนี้ นักวิจัยจำนวนมากจึงได้มีความพยายามจะจัดปัญหานี้ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนต ในเวลาต่อมา การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีที่มี

ความเกี่ยวข้องกับหลากหลายศาสตร์ เช่น วัสดุ เคมีสังเคราะห์ โดยเป็นการประยุกต์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมเพื่อสังเคราะห์และควบคุมสสารในระดับนาโน รวมไปถึงกระบวนการที่สามารถจัดเรียงสสารในระดับอะตอม [9]



รูปที่ 1 การจัดเรียงลำดับชั้นของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนต



รูปที่ 2 แสดงการแยกชั้นในโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนต [8]

ซึ่งนับได้ว่าเป็นการก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี และถูกเรียกชื่อเป็นทางการว่า นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) โดยเทคโนโลยีดังกล่าวได้นำไปสู่การสังเคราะห์วัสดุสมัยใหม่ และมีสมบัติที่โดดเด่นในหลายด้าน เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้า [10] รวมถึงสามารถผสมผสานเข้าร่วมกับวัสดุเนื้อหลักได้เป็นอย่างดีภายใต้กระบวนการกระจายตัวที่มีประสิทธิภาพ [11] ในด้านการออกแบบโครงสร้าง และการประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมรวมถึงนักออกแบบจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรักษาน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างให้ต่ำ แต่ในขณะเดียวกันก็พยายามเพิ่มความแข็งแรง และความแข็งแรง

ของโครงสร้างให้มากที่สุดเท่าที่เป็นได้ โดยลักษณะการออกแบบโครงสร้างดังกล่าวถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาโครงสร้างในกลุ่มน้ำหนักรเบา จากปัจจัยนี้ ทำให้วิศวกรและนักวิจัยจำนวนมากมุ่งเป้าศึกษาหาแนวทางการเพิ่มสมบัติความแข็งแรง ความแข็งแกร่งของขึ้นโครงสร้างประเภทต่าง ๆ ซึ่งพบว่าวัสดุที่มีบทบาทสำคัญต่อการนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงความแข็งแรง และความแข็งแกร่งของโครงสร้างที่ดีขึ้น รวมทั้งสามารถออกแบบความแข็งแรง และความแข็งแกร่งได้ตามต้องการ นั่นคือ วัสดุนาโนชนิดท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes, CNTs) ที่ได้จากการสังเคราะห์และค้นพบโดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่นชื่อว่า Iijima ในช่วงปี ค.ศ. 1991 [11] โดยวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะมีอยู่ 2 ลักษณะโครงสร้างคือ ผนังชั้นเดียว (Single wall, SWCNT) และผนังหลายชั้น (Multi-wall, MWCNT) ดังแสดงได้ในรูปที่ 3 ส่วนคุณสมบัติของวัสดุนาโนคาร์บอนในทั้ง 2 ลักษณะสามารถแสดงได้ในตารางที่ 1 นอกจากนี้ นักวิจัยยังคงพยายามค้นคว้าวัสดุใหม่ ๆ เพิ่มเติมตลอดเวลา เพื่อตอบสนองต่อการนำวัสดุไปประยุกต์ใช้งานขั้นสูงและมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมยานพาหนะสมัยใหม่ ด้วยปัจจัยดังกล่าว ทำให้นักวิจัยเร่งคิดค้นวัสดุ และหาแนวทางสำหรับการสังเคราะห์วัสดุนาโนชนิดใหม่ ๆ ออกมา ดังเช่น วัสดุแผ่นแกรฟีน (Nano-platelets Graphene, GNPs) ที่มีลักษณะของโครงสร้างเป็นแผ่นบางมีความหนาเพียง 1 อะตอมคาร์บอน [12] และให้สมบัติความแข็งแรงในแนวระนาบที่ดีเยี่ยม รวมถึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและเป็นประโยชน์ต่อสมบัติปฏิสัมพันธ์ในชั้นรอยต่อของวัสดุคอมโพสิต (Interaction) ทั้งนี้ ยังให้ข้อดีด้านต้นทุนต่อน้ำหนักที่ต่ำกว่าวัสดุนาโนคาร์บอนนั่นคือ แผ่นแกรฟีน มีต้นทุนอยู่ประมาณ 10-20 ดอลลาร์สหรัฐ (US\$) ต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (kg) [13] ส่วนวัสดุนาโนคาร์บอนอยู่ที่ประมาณ 30 ดอลลาร์สหรัฐ (US\$) ต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (kg) [14] สำหรับคุณสมบัติของวัสดุแผ่นแกรฟีน (GNPs) สามารถแสดงได้ในตารางที่ 2 ตามลำดับ

จากข้อดีของวัสดุนาโนตามที่กล่าวไว้ในเบื้องต้น ยังพบได้ว่าการใช้งานของวัสดุนาโนเหล่านี้อาจจะประสบกับปัญหา ด้านการจับกลุ่มของวัสดุนาโน (Agglomeration) ที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวของพันธะระหว่างอะตอมที่สูง หรือเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) [15-19] ด้วยเหตุนี้ การกระจายตัวของวัสดุนาโนในวัสดุเนื้อหลักจึงเป็นประเด็นสำคัญ และถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบของวัสดุนาโนใน

ปัจจุบัน ส่งผลทำให้ให้นักวิจัยส่วนหนึ่งมุ่งศึกษาหาแนวทางเพื่อจะกระจายตัวของวัสดุนาโนเหล่านั้นให้มีประสิทธิภาพสูงสุด หรืองานวิจัยที่มีการพิจารณาปัญหากลุ่มก้อนในวัสดุคอมโพสิตต่อพฤติกรรมของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต ดังนั้น เพื่อให้การออกแบบวัสดุหรือโครงสร้างใด ๆ ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดทั้งในด้านสมรรถนะ และด้านต้นทุน (Cost-effective design) [20] วิศวกรและนักวิจัยมากมายจึงมีแนวทางการวิจัยและศึกษาเพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุง หรือส่งเสริมประสิทธิภาพของโครงสร้างคอมโพสิตในยุคใหม่ โดยอาจนำมาศึกษาในแนวทางวิธีการเชิงทดลอง (Experiment method) หรือในแนวทางวิธีการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Analytical method) เป็นต้น

ตามที่กล่าวถึงปัญหาของการใช้งานวัสดุนาโนที่เกี่ยวข้องกับ การจับกลุ่มก้อน และมักเกิดขึ้นมาจากปัจจัยการใช้งานในสัดส่วนปริมาตรที่สูงของวัสดุนาโนเหล่านั้น (High volume fraction) [15] ซึ่งจะนำไปสู่การย่อยสลายตัวของวัสดุนาโนในบริเวณดังกล่าว หรืออาจกล่าวได้ว่าบริเวณการจับกลุ่มก้อนของวัสดุนาโนจะไปทำหน้าที่ลดสมบัติความยืดหยุ่น ความแข็งแรงในการดึง และความเหนียวในการแตกหักของโครงสร้างคอมโพสิต จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหา การจับกลุ่ม พบว่าแม้มีปริมาณการจับกลุ่มก้อนมีบางพื้นที่ หรือเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการแตกร้าว (Crack) และแพร่กระจายไปทั่วตำแหน่งของการจับกลุ่มก้อนของวัสดุนาโน [21] – [22] ดังนั้น เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการออกแบบโครงสร้างที่มีความเสถียรภาพในการทำงาน ปัจจัยทั้งหมดเหล่านั้นได้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อออกแบบการสร้างวัสดุคอมโพสิตยุคใหม่ และกำลังถูกได้รับความสนใจในวงกว้างสำหรับการพิจารณากับโครงสร้างน้ำหนักเบา ที่อยู่บนพื้นฐานการสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนต และเป็นหนึ่งโครงสร้างที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาโครงสร้างในอุตสาหกรรมยานพาหนะสมัยใหม่ มากขึ้น [23] โดยวัสดุคอมโพสิตลามิเนตยุคใหม่จะมุ่งการใช้วัสดุเสริมกำลังมากกว่า 1 ชนิด ที่ประกอบไปด้วย 3 วัฏภาค (Phase) คือ วัฏภาคของวัสดุเนื้อหลัก (Matrix) วัฏภาคของวัสดุเสริมกำลังแบบนาโน (Nano-reinforcement) และวัฏภาคของวัสดุเสริมกำลังแบบเส้นใย (Fiber-reinforcement) เนื่องจากวัฏภาคของวัสดุเสริมกำลังที่มีมิติแตกต่างกันอย่างมาก ดังนั้นจึงถูกบัญญัติเรียกชื่อวัสดุคอมโพสิตที่ใช้วัสดุเสริมกำลัง 2 ชนิด และมีความแตกต่างกันทางมิติ (Scale) ว่าเป็น Multi-scale laminated composite [24] ซึ่งวัสดุคอมโพสิต

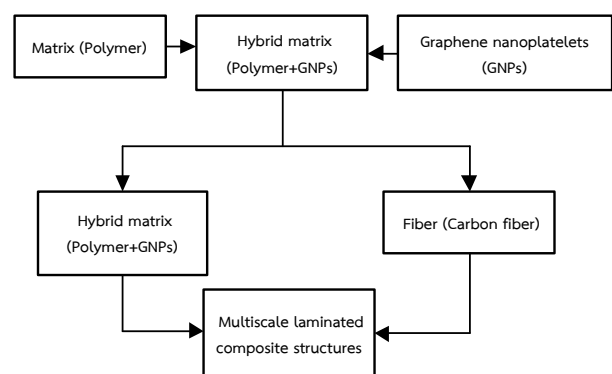
ในกลุ่มนี้ได้บรรลุถึงประสิทธิภาพทั้งความเหนียวและความแข็งแรงไปพร้อม ๆ กัน [25] และได้รับความนิยมนำไปออกแบบวัสดุคอมโพสิตในวัสดุเนื้อหลักชนิดต่าง ได้แก่ วัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ [26] – [27] วัสดุโลหะผสมไททานเนียม [25] และวัสดุโลหะ [28] ในปัจจุบันมากขึ้น

ดังนั้น จากประเด็นหลักของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างน้ำหนักเบาที่สร้างขึ้นมาจากวัสดุคอมโพสิตแบบลามิเนตในกลุ่มของวัสดุเนื้อหลักพอลิเมอร์ที่เกิดการแตกแยกออก (Delamination) อันเนื่องมาจากปัจจัยด้านสมบัติของความเหนียวที่ต่ำ (Toughness) ของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตประเภทนี้ ส่งผลให้นักวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมหาแนวทางการปรับปรุงสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความเหนียวของวัสดุคอมโพสิตให้ดีขึ้น ซึ่งแนวทางที่เป็นไปได้และกำลังได้รับความนิยมสำหรับนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุเนื้อหลักในกลุ่มวัสดุพอลิเมอร์ นั่นคือการผสมวัสดุเนื้อหลักพอลิเมอร์เข้ากับวัสดุนาโนในปัจจุบัน ฉะนั้นในงานวิจัยฉบับนี้มีจุดประสงค์ที่จะนำเสนอแนวคิดของการสร้างวัสดุคอมโพสิตแบบลามิเนตในยุคใหม่ที่มีมุ่งเน้นการนำวัสดุนาโนมาประยุกต์ใช้งาน และข้อได้เปรียบของการใช้งานวัสดุนาโนร่วมกับวัสดุเส้นใยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงสร้างในงานวิจัยฉบับนี้

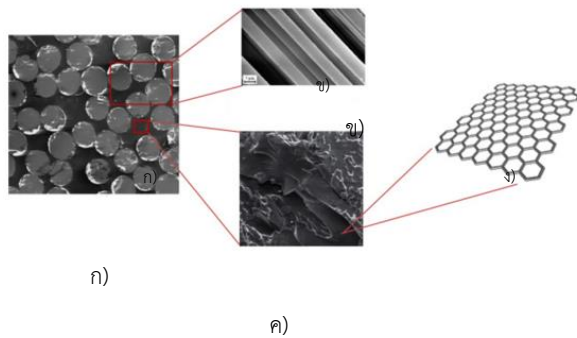
2. วิธีการผสมผสาน

จากข้อมูลในหัวข้อแรกที่ได้กล่าวถึงนาโนเทคโนโลยีของวัสดุนาโน และคุณสมบัติของวัสดุนาโนหลากหลายชนิด ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอน และแกรฟีน รวมทั้งผลกระทบที่ได้จากวัสดุนาโนต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่ผ่านมา โดยผลลัพธ์ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า วัสดุนาโนเหล่านี้มีอิทธิพลสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างวิศวกรรมสมัยใหม่มากขึ้น และนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจต่อการใช้งานวัสดุนาโนพวกนี้ต่อพฤติกรรมของโครงสร้างหลากหลายรูปแบบ ด้วยปัญหาการรวมกลุ่มก้อนของวัสดุนาโน และราคา จึงมีความพยายามคิดค้นหาแนวทางใหม่เพื่อลดการใช้งานวัสดุนาโนให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด รวมถึงสามารถลดต้นทุนของวัสดุนาโนลง อย่างไรก็ตาม แนวทางการออกแบบโครงสร้างต้องอยู่บนพื้นฐานของความแข็งแรงสูงสุดที่เป็นไปได้ ดังนั้น แนวทางที่สามารถเป็นได้และสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนต นั่นคือ การใช้งานวัสดุเสริมแรงแบบหลากหลายขนาด (Multiscale) หมายถึง การใช้วัสดุเสริมมากกว่า 1 ชนิด กับวัสดุเนื้อ

หลัก โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังคือ ในขั้นตอนแรกเป็นการนำวัสดุนาโน เช่นท่อนาโนคาร์บอน หรือแกรฟีนมาผสมเข้าร่วมกับวัสดุเนื้อหลัก เช่นวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้รับวัสดุเนื้อหลักที่ปรับแต่งด้วยวัสดุเสริมแรงนาโนในกลุ่มดังกล่าว และเรียกวัสดุเนื้อหลักที่ผ่านขั้นตอนการปรับแต่งสมบัติใหม่ว่าเป็นวัสดุเนื้อหลักผสม (Hybrid matrix) หรือวัสดุเนื้อหลักปรับแต่ง (Modify matrix) ตามลำดับ และในขั้นตอนลำดับถัดไปจะเป็นการใช้วัสดุเส้นใยดั้งเดิม เช่น วัสดุเส้นใยคาร์บอน หรือวัสดุเส้นใยแก้ว มาผสมเข้าร่วมกับวัสดุเนื้อหลักผสมที่ได้จากขั้นตอนแรก โดยวัสดุเส้นใยจะถูกจัดเรียงตามทิศทางที่ได้ออกแบบไว้ในแม่พิมพ์ และหลังจากนั้นวัสดุเนื้อหลักผสมจะถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ เพื่อให้ไปเคลือบหรือโอเบรตกับวัสดุเส้นใยในแม่พิมพ์และต่อจากนั้นชิ้นงานวัสดุจะถูกอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเพื่อให้ชิ้นของโครงสร้างเกิดการเชื่อมติดกันภายใต้ความร้อนที่กำหนด ซึ่งในลำดับต่อมาเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงภายใต้อุณหภูมิห้องจะได้รับชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีความแข็งแรงจากส่วนวัสดุประกอบจากวัสดุเสริมแรงนาโน และวัสดุเสริมแรงเส้นใยทั่วไป รวมถึงวัสดุเนื้อหลัก ที่ได้จากการใช้วัสดุเสริมแรงร่วม หรือผสมเข้ากับวัสดุเนื้อหลัก ซึ่งวัสดุที่ได้จะเป็นวัสดุคอมโพสิตประเภทใหม่ที่เราเรียกว่า วัสดุคอมโพสิตแบบหลายขนาด (Multiscale composite materials) หรืออาจเรียกว่าเป็นโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตแบบหลายขนาด (Multiscale laminated composite structures) ดังแสดงตามแผนผังในรูปที่ 3 และลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคของวัสดุคอมโพสิตลามิเนตแบบหลายขนาด สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 3 ขั้นตอนการผสมผสานวัสดุคอมโพสิตแบบหลายขนาด [29]



ก)

ค)

ก) ภาพตัดขวางของโครงสร้างลามิเนต

ข) ภาพพื้นที่บริเวณวัสดุเนื้อหลักกับวัสดุเส้นใย

ค) ภาพพื้นที่บริเวณวัสดุเนื้อหลักผสมกับวัสดุนาโน

รูปที่ 4 ภาพโครงสร้างจุลภาคของวัสดุคอมโพสิตลามิเนตแบบหลายขนาด [29]

3. วิธีการประเมินสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตแบบหลายขนาด

การทราบถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต (Mechanical properties) ได้แก่ สมบัติความแข็งแรง สมบัติการเหนียว และสมบัติอื่น ๆ ของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนต เราสามารถจะทราบได้จากการใช้วิธีทางทดลองโดยตรง อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีการทางทดลองดังกล่าวเพื่อตรวจสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต หรือโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตใดๆ นั้นมักต้องใช้เวลาในการทดลองที่ค่อนข้างมาก และมีราคาแพง ดังนั้น เพื่อลดเวลาในการทดลอง และช่วยประหยัดสำหรับการพัฒนาวัสดุใหม่ ๆ วิศวกร และนักวิจัยส่วนใหญ่มักเลือกใช้วิธีการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Math model) ที่อยู่บนหลักการกลศาสตร์ของวัสดุในระดับจุลภาค (Micromechanical) อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้ในการทำงานสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต [4,30]

เพื่อให้ได้รับผลสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่มีความแม่นยำ และมีความถูกต้องเพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมในด้านอื่น ๆ ของวัสดุ แบบจำลองทางจุลภาคของวัสดุคอมโพสิตก็เป็นอีกปัจจัยต่อความถูกต้องที่ได้รับ สำหรับแบบจำลองทางจุลภาคที่พิจารณาถึงลักษณะทางรูปร่างของวัสดุส่วนผสมด้วยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุส่วนผสมที่มีขนาดเล็ก และเป็นปัจจัยต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติ

เชิงกลของวัสดุคอมโพสิต โดยแบบจำลองทางจุลภาคของวัสดุที่กล่าวถึงปัจจัยทางรูปร่างของวัสดุองค์ประกอบ นั่นคือ Modified Halpin-Tsai model อีกทั้งแบบจำลองนี้สามารถให้ค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตใกล้เคียงกับผลการทดลองดังในงานวิจัย [31] ดังนั้น จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางจุลภาคของ Halpin-Tsai model สามารถนำมาใช้เพื่อประเมินหาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตชนิดใหม่ได้ตามแสดงในสมการที่ 1 – 14 โดยสมการดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ตามลำดับขั้นตอนแบ่งออกเป็น 2 ลำดับขั้นตอนสำคัญได้แก่ ขั้นตอนแรกเป็นส่วนของการประเมินหาสมบัติเชิงกลของค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเนื้อหลัก เช่น วัสดุเนื้อหลักพอลิเมอร์ (Polymer matrix) ที่ได้รับการเสริมความแข็งแรงด้วยวัสดุนาโนชนิด กราฟีน (Graphene) และเรียกวัสดุเนื้อหลักที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติใหม่ด้วยวัสดุเสริมแรงนาโนว่าเป็น วัสดุเนื้อหลักผสม (Hybrid matrix) และสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักผสมสามารถประเมินหาได้ตามความสัมพันธ์ และสมบัติเชิงกลของวัสดุส่วนผสมตามสมการที่ 1 - 4 ตามลำดับ

สมการประเมินสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตในลำดับขั้นตอนที่ 1

$$E_{HM} = E_p \left[\frac{5}{8} \left(\frac{1 + 2\beta_{dd} V_{GPL}}{1 - \beta_{dd} V_{GPL}} \right) + \frac{3}{8} \left(\frac{1 + 2 \left(\frac{l_{GPL}}{d_{GPL}} \right) \beta_{dl} V_{GPL}}{1 - \beta_{dl} V_{GPL}} \right) \right] \quad (1)$$

โดยที่

$$\beta_{dd} = \frac{\left(\frac{E_{GPL}}{E_p} \right) - \left(\frac{d_{GPL}}{4t_{GPL}} \right)}{\left(\frac{E_{GPL}}{E_p} \right) + \left(\frac{d_{GPL}}{2t_{GPL}} \right)} \quad (2)$$

$$\beta_{dl} = \frac{\left(\frac{E_{GPL}}{E_p} \right) - \left(\frac{d_{GPL}}{4t_{GPL}} \right)}{\left(\frac{E_{GPL}}{E_p} \right) + \left(\frac{l_{GPL}}{2t_{GPL}} \right)} \quad (3)$$

และ พารามิเตอร์

E_{GPL} คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุกราฟีน (N/m^2)

E_p คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุพอลิเมอร์ (N/m^2)

V_{GPL} คือ สัดส่วนปริมาตรของวัสดุแกรฟีน

d_{GPL} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุแกรฟีน (nm)

l_{GPL} คือ ขนาดความยาวของวัสดุแกรฟีน (nm)

t_{GPL} คือ ขนาดความหนาของวัสดุแกรฟีน (nm)

V_p คือ สัดส่วนปริมาตรของวัสดุพอลิเมอร์

v_{GPL} คือ ค่าอัตราส่วนปัวซองของวัสดุแกรฟีน

v_p คือ ค่าอัตราส่วนปัวซองของวัสดุพอลิเมอร์

สำหรับค่าพารามิเตอร์ V_{GPL} ในสมการที่ (1) ที่บ่งบอกถึง สัดส่วนปริมาตรของวัสดุแกรฟีน สามารถจะคำนวณหาได้ในรูป สมการของน้ำหนักดังแสดงได้ในสมการที่ (4)

$$V_{GPL} = \frac{W_{GPL}}{W_{GPL} + \left(\frac{\rho_{GPL}}{\rho_p} \right) (1 - W_{GPL})} \quad (4)$$

เมื่อ พารามิเตอร์

W_{GPL} คือ สัดส่วนทางน้ำหนักของวัสดุแกรฟีน ($wt. \%$)

ρ_{GPL} คือ ความหนาแน่นของวัสดุแกรฟีน (kg/m^3)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของวัสดุพอลิเมอร์ (kg/m^3)

โดยที่สัดส่วนทางปริมาตรของวัสดุส่วนผสมในที่นี้คือ วัสดุพอลิเมอร์ (V_p) และวัสดุแกรฟีน (V_{GPL}) จะเป็นไปความสัมพันธ์ของกฎการผสม ดังแสดงในสมการที่ (5) ดังนี้

$$V_p + V_{GPL} = 1 \quad (5)$$

นอกจากนี้ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักผสม ได้แก่ ค่ามอดุลัส การเฉือน (Shear modulus, G_{HM}) , ค่าความหนาแน่น (Density, ρ_{HM}) , และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, v_{HM}) สามารถ ประเมินหาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (6) - (8) ดังนี้

$$G_{HM} = \frac{E_{HM}}{2(1+v_{HM})} \quad (6)$$

$$\rho_{HM} = \rho_p V_p + \rho_{GPL} V_{GPL} \quad (7)$$

$$v_{HM} = V_p v_p + V_{GPL} v_{GPL} \quad (8)$$

เมื่อ พารามิเตอร์

E_{HM} คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุพอลิเมอร์ผสม (N/m^2)

V_{GPL} คือ สัดส่วนปริมาตรของวัสดุแกรฟีน

สมการประเมินสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตในลำดับขั้นตอน ที่ 2 สำหรับในขั้นตอนที่ 2 และเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่จะได้รับสมบัติ เชิงกลของวัสดุคอมโพสิตวัสดุแบบหลายขนาด (Multi-scale composite) ที่ถูกผสมผสานของวัสดุเส้นใยรวมระหว่างวัสดุเส้นใย ประเภทนาโนและวัสดุเส้นใยทั่ว ได้แก่ วัสดุเส้นใยแก้ว หรือวัสดุเส้นใยคาร์บอน เป็นต้น ดังนั้นเพื่อทราบสมบัติเชิงกลของการผสมผสาน ของวัสดุในระบบหลากหลายส่วนวัสดุองค์ประกอบ จึงจำเป็นต้อง แยกการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน หรือ 2 ขั้นตอนดังแสดงในแผนผัง ในรูปที่ 1 เพื่อช่วยต่อการคำนวณ และเป็นไปตามหลักการกฎของ ส่วนผสม (Rule of mixtures) ฉะนั้น ในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นผลลัพธ์ ของสมบัติเชิงกลของวัสดุหลายขนาดที่สามารถพิจารณาการนำวัสดุ เสริมแรงประเภทนาโนร่วมกับวัสดุเส้นใยทั่วไป ดังแสดงได้ในสมการ ที่ (9) – (13) ตามลำดับ

$$E_{11} = V_{Fiber} E_{11Fiber} + V_{HM} E_{HM} \quad (9)$$

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{1}{E_{22Fiber}} + \frac{V_{HM}}{E_{HM}} - V_{Fiber} V_{HM} \frac{(v_{Fiber}^2 E_{HM}) + (v_{HM}^2 E_{22Fiber})}{E_{22Fiber} E_{HM}} - 2V_{Fiber} V_{HM} \frac{v_{Fiber} E_{22Fiber} + V_{HM} E_{HM}}{V_{Fiber} E_{22Fiber} + V_{HM} E_{HM}} \quad (10)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_{Fiber}}{G_{12Fiber}} + \frac{V_{HM}}{G_{HM}} \quad (11)$$

$$\rho = V_{Fiber} \rho_{Fiber} + V_{HM} \rho_{HM} \quad (12)$$

$$v_{12} = V_{Fiber} v_{Fiber} + V_{HM} v_{HM} \quad (13)$$

$$V_{HM} = 1 - V_{Fiber} \quad (14)$$

เมื่อ พารามิเตอร์

E_{11} คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นตามแนวยาวของวัสดุคอมโพสิต (N/m^2)

E_{22} คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นตามแนวขวางของวัสดุคอมโพสิต (N/m^2)

G_{12} คือ ค่ามอดุลัสการเฉือนของวัสดุคอมโพสิต (N/m^2)

$E_{11Fiber}$ คือ คำนวณดูลึศยิตหยุ่นตามแนวยาวของวัสดุเส้นใย (N/m^2)

$E_{22Fiber}$ คือ คำนวณดูลึศยิตหยุ่นตามแนวขวางของวัสดุเส้นใย (N/m^2)

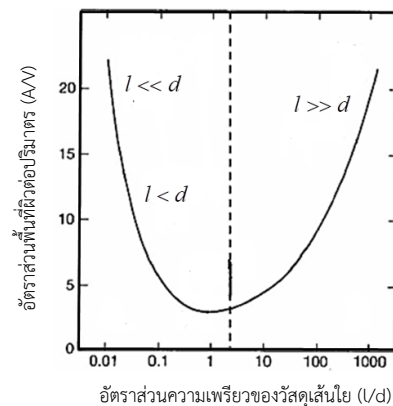
$G_{12Fiber}$ คือ คำนวณดูลึศการเฉือนของวัสดุเส้นใย (N/m^2)

V_{Fiber} คือ สัดส่วนปริมาตรของวัสดุเส้นใย

V_{HM} คือ สัดส่วนปริมาตรของวัสดุพอลิเมอร์ผสมร่วมกับวัสดุ

กรฟีน V_{Fiber} คือ ค่าอัตราส่วนผิวของของวัสดุเส้นใย

V_{HM} คือ ค่าอัตราส่วนผิวของของวัสดุพอลิเมอร์ผสมร่วมกับวัสดุ
กรฟีน

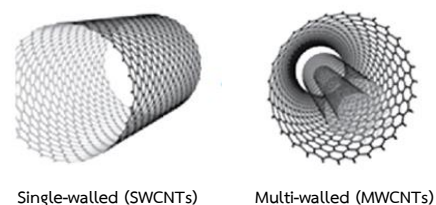


4. ปัจจัยลักษณะทางโครงสร้าง และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมกำลังชนิดนาโน

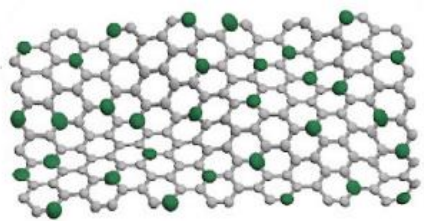
ลักษณะทางโครงสร้างของวัสดุเสริมกำลังนับได้ว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่อการปรับเปลี่ยนสมบัติความแข็งแรง ความแข็งแกร่งของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต โดยปัจจัยนี้ส่วนใหญ่จะอาศัยการบ่งชี้ด้วยพารามิเตอร์ที่เรียกว่า อัตราส่วนของความเพรียว (Aspect ratio) จากมิติด้านยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (l/d) ของวัสดุเสริมกำลังประเภทเส้นใยทั่วไป และวัสดุเสริมกำลังประเภทนาโน หากพารามิเตอร์นี้มีค่าน้อยกว่า 1 หรือมากกว่า 1 อาจบ่งบอกได้ว่าวัสดุเสริมกำลังชนิดนั้นจะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก หรือน้อย ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างนั้น ๆ ได้ เนื่องจาก พื้นผิวรอยจะมีผลโดยตรงต่อการถ่ายโอนภาระจากวัสดุเนื้อหลักไปสู่วัสดุเสริมกำลัง และมักอ้างอิงถึงสมบัติปฏิสัมพันธ์ (Interaction) และได้รับการอ้างอิงถึงบ่อยครั้งกับปัจจัยของอัตราส่วนความเพรียวที่มีค่าสูง ในวัสดุเสริมกำลังชนิดนาโน (Nanoscale reinforcement) ดังตามงานวิจัย [32] – [37] และสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเพรียวกับพื้นที่ผิวได้ตามรูปที่ 5 ดังนี้

รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบพื้นที่ผิวกับอัตราส่วนความเพรียว [38]

โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นวัสดุเสริมกำลังนาโนที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ประโยชน์กับการเสริมกำลังในวัสดุคอมโพสิต โดยมีลักษณะที่โดดเด่นในด้านต่าง ๆ และถูกเลือกนำมาใช้ในการเสริมกำลังกับวัสดุเนื้อหลักชนิดต่าง ๆ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตในรูปแบบดั้งเดิม ตลอดจนนำไปเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบวัสดุและโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตยุคใหม่ในปัจจุบันมากขึ้น นั่นคือ วัสดุนาโนคาร์บอน (CNTs) และวัสดุแผ่นกรฟีน (GPLs) โดยลักษณะทางโครงสร้างและสมบัติของวัสดุนาโนเหล่านี้ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 6 - 7 และตารางที่ 1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6 ลักษณะทางโครงสร้างวัสดุเสริมกำลังท่อนาโนคาร์บอน [37]



รูปที่ 7 ลักษณะทางโครงสร้างวัสดุเสริมกำลังท่อนาโนคาร์บอน [39]

ตารางที่ 1 ลักษณะทางโครงสร้าง และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมกำลังชนิดนาโนชนิดต่าง ๆ [40 - 41, 43]

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ	ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs)	แผ่นแกรฟีน (GPLs)
มอดูลัสของความยืดหยุ่น (Young modulus, GPa)	640	1,010
ความหนาแน่น (Density, kg / m^3)	1,300	1,060
อัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio)	0.33	0.006
ยาว (Length, μm)	2.5	2.5
กว้าง (Width, nm)	-	1.5
เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter, nm)	1.4	-
หนา (Thickness, nm)	0.34	1.5
พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area, m^2/g)	100	750

จากลักษณะทางโครงสร้างของวัสดุนาโนท่อนาโนคาร์บอน และแผ่นแกรฟีน ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 โดยจะเห็นได้ว่าลักษณะทางมิติความยาว (Length) ต่อมิติทางเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) หรืออัตราส่วนความเพียว (L/d) จะมีค่ามากกว่า 1 และในทำนองเดียวกันกับลักษณะทางมิติของวัสดุแผ่นแกรฟีนที่ให้มิติความกว้าง (Width) ต่อความยาวในอัตราส่วนที่มากกว่า 1 เช่นกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงข้อได้เปรียบและแนวโน้มการนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับเป็นวัสดุเสริมกำลังในปัจจุบัน พบได้ว่าวัสดุแผ่นแกรฟีน ถูกได้รับความนิยมอันเนื่องจากมีลักษณะทางโครงสร้างเป็น 2 มิติ และให้สมบัติความแข็งแรง และความแข็งแรงสูงถึงประมาณ 130 กิกะปาสกาล (GPa) และ 1,010 กิกะปาสกาล

(GPa) ตามลำดับ [40] ในขณะที่วัสดุนาโนชนิดท่อนาโนคาร์บอนให้สมบัติความแข็งแรงประมาณ 640 กิกะปาสกาล (GPa) ซึ่งต่ำกว่าวัสดุแผ่นแกรฟีนอย่างมาก

ตารางที่ 2 การประยุกต์ใช้วัสดุเสริมกำลังด้วยแผ่นแกรฟีนโนในโครงสร้างวัสดุเนื้อหลักชนิดต่าง ๆ

ปี ค.ศ.	วัสดุเนื้อหลัก	ผู้แต่ง และวัตถุประสงค์การใช้งาน
2015 [44]	SiBCN ceramics	Li และคณะ, ได้ทำการผสมวัสดุแกรฟีนร่วมกับวัสดุผงเซรามิก (SiBCN) เพื่อประเมินศักยภาพด้านการแตกหักของเซรามิก ซึ่งผลการศึกษาพบว่าผงเซรามิกที่ผสมกับวัสดุแกรฟีนในปริมาณสัดส่วนปริมาตร 5% สามารถเพิ่มความเหนียวในการแตกหักเกือบ 650 %
2017 [45]	Poly methyl methacrylate (PMMA)	Shen และคณะ, ได้ทำการตรวจสอบผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Modeling) โครงสร้างแผ่นบาง (Plate) ที่เสริมด้วยวัสดุแกรฟีนแบบฟังก์ชันต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะ (Buckling) และพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะ (Postbuckling) ภายใต้สภาวะรับแรงกดในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงของการโก่งเดาะ และหลังสามารถดีขึ้นเมื่อผ่านการใช้วัสดุแกรฟีนในฟังก์ชันที่ดี
2019 [46]	Poly methyl methacrylate (PMMA)	Rout และคณะ, ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสั่นแบบอิสระของแผ่นบางโค้ง (Shell panels) ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อม โดยใช้วิธีการทาง FEM ซึ่งแผ่นบางโค้งได้ทำการพิจารณาลักษณะรูปร่างหลายชนิด ได้แก่ cylindrical, elliptic paraboloid, hyperbolic paraboloid, conoidal and hyper ผลการศึกษาพบว่า ค่าความถี่ของโครงสร้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเรียวสูงขึ้น และพบว่าได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของวัสดุแกรฟีนในลักษณะแบบ x จะให้การลดค่าความถี่ของโครงสร้างต่ำลงน้อยกว่าในแบบอื่น ๆ

ตารางที่ 2 การประยุกต์ใช้วัสดุเสริมกำลังด้วยแผ่นแกรฟีนโนในโครงสร้างวัสดุเนื้อหลักชนิดต่าง ๆ (ต่อ)

ปี ค.ศ.	วัสดุเนื้อหลัก	ผู้แต่ง และวัตถุประสงค์
2015 [44]	SiBCN ceramics	Li และคณะ, ได้ทำการผสมวัสดุแกรฟีนร่วมกับวัสดุผงเซรามิก (SiBCN) เพื่อประเมินศักยภาพด้านการแตกหักของเซรามิก ซึ่งผลการศึกษาพบว่าเซรามิกที่ผสมกับวัสดุแกรฟีนในปริมาณสัดส่วนปริมาตร 5% สามารถเพิ่มความเหนียวในการแตกหักเกือบ 650 %
2017 [45]	Poly methyl methacrylate (PMMA)	Shen และคณะ, ได้ทำการตรวจสอบผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Modeling) โครงสร้างแผ่นบาง (Plate) ที่เสริมด้วยวัสดุแกรฟีนแบบฟังก์ชันต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะ (Buckling) และพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะ (Postbuckling) ภายใต้สภาวะรับแรงกดในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงของการโก่งเดาะ และหลังสามารถดีขึ้นเมื่อผ่านการใช้วัสดุแกรฟีนในฟังก์ชันที่ดี
2019 [46]	Poly methyl methacrylate (PMMA)	Rout และคณะ, ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสั่นแบบอิสระของแผ่นบางโค้ง (Shell panels) ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อม โดยใช้วิธีการทาง FEM ซึ่งแผ่นบางโค้งได้ทำการพิจารณาลักษณะรูปร่างหลายชนิด ได้แก่ cylindrical, elliptic paraboloid, hyperbolic paraboloid, conoidal and hyper ผลการศึกษาพบว่า ค่าความถี่ของโครงสร้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความยาวสูงขึ้น และพบว่าได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของวัสดุแกรฟีนในลักษณะแบบ x จะให้การลดค่าความถี่ของโครงสร้างต่ำลงน้อยกว่าในแบบอื่น ๆ
2020 [47]	Epoxy polymer	Mishra และคณะ, ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ Epoxy polymer ที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุแกรฟีน และมีวัสดุเส้นใยแก้ววางจัดเรียงในชั้นตามทิศทาง 2 แบบคือ (0/90/±45) _{6s} และ (0/90) _{12s} โดยขึ้นงานถูกทดสอบการดึง (Tensile test) การดัด (Bending test) และการกระแทก (Impact test) ตามลำดับ ผลการทดลอง

		พบว่า วัสดุแกรฟีนมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุผสม Epoxy สูงสุดที่สัดส่วนทางน้ำหนักประมาณ 2 wt% และในรูปแบบการจัดเรียงแบบ (0/90/±45) _{6s} เนื่องจากมีการวางตัวของวัสดุเส้นใยในหลายทิศทาง
2021 [48]	Aluminum (Al7075)	Patil และคณะ, ได้ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพเชิงกลของวัสดุ Aluminum (Al7075) ที่ถูกเสริมกำลังแบบกระจายคงที่ (Uniform) โดยทำการทดสอบความแข็งแรงดึง (UTS) ความแข็ง (Hardness) และตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุทดสอบผ่าน X-ray diffraction (XRD) และ Scanning Electron Microscope (SEM) ผลการทดลองพบว่า วัสดุแกรฟีนมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของความแข็งแรงดึงสูงสุด มอดูลัสความยืดหยุ่น และความแข็งเพิ่มขึ้นถึง 66.38%, 65.55% และ 49.41% ในสัดส่วนทางน้ำหนักของวัสดุแกรฟีนที่ 2wt%
2024 [49]	Copper (Cu)	Zhou และคณะ, ที่ได้ทำการสำรวจงานกรรมที่เกี่ยวข้องการเสริมสร้างสภาพการนำไฟฟ้าในวัสดุโลหะทองเหลือง (Cu) ที่เสริมด้วยวัสดุแกรฟีน โดยงานวิจัยพบว่ามีการตีพิมพ์ในวารสารจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการนำวัสดุแกรฟีนมาเสริมสภาพการนำไฟฟ้าในวัสดุทองเหลือง แนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2010 ถึง 2023
2024 [24]	Magnesium (Mg)	Yun และคณะ, ได้ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพเชิงกลของวัสดุแมกนีเซียม (Mg) ที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุแกรฟีน โดยวิธีการกระจายตัวแบบแทรกซึมด้วยแรงดัน กับวิธีการแบบดั้งเดิม โดยผลการศึกษาพบว่าวิธีการแทรกซึมด้วยแรงดัน ถือเป็นวิธีการใหม่และมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวของวัสดุแกรฟีนในวัสดุแมกนีเซียม ซึ่งปัญหาสำคัญของวัสดุแกรฟีนการกระจายตัวที่ดี

นอกจากนี้ยังให้พื้นผิวจำเพาะ (Specific surface area) ที่สูงถึงอยู่ประมาณ 750 ตารางเมตรต่อกรัม (m²/g) มากกว่าวัสดุนาโนชนิดอื่น[41] – [42] ฉะนั้น ด้วยสมบัติที่โดดเด่นหลายประการในสมบัติความแข็งแรง ความแข็งแรงแรง สมบัติด้านความร้อน และ

สมบัติอื่น ๆ ส่งผลให้นักวิจัยจำนวนมากเลือกพิจารณานำวัสดุนาโนแผ่นแกรฟีน (GPLs) มาประยุกต์ใช้เสริมกำลังในโครงสร้างที่สร้างมาจากวัสดุเนื้อหลักจากหลากหลายชนิด ดังแสดงได้ในตารางที่ 2 ตามลำดับ

5. ปัจจัยสัดส่วนทางน้ำหนักของวัสดุแผ่นแกรฟีน

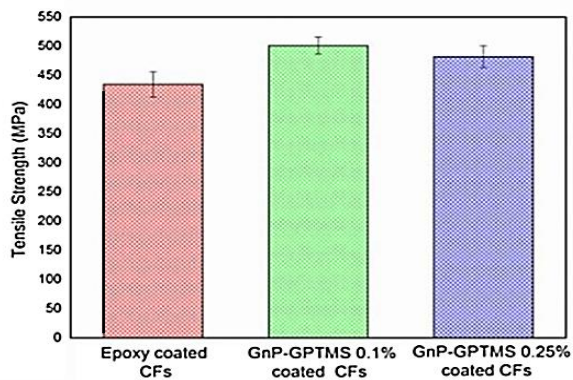
ด้วยการพิจารณาสมบัติด้านความแข็งแรง (Strength) และความแข็งแกร่ง (Stiffness) ที่เป็นข้อสำคัญหนึ่งต่อการได้รับประสิทธิภาพของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตทั้งในแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ ซึ่งการได้รับประสิทธิภาพของโครงสร้างที่ดันทันก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายส่วน เช่น วัสดุเนื้อหลัก วัสดุเสริมกำลัง และสมบัติการเกาะยึดที่ดี เป็นต้น โดยทั่วไป โครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตจะมุ่งเน้นปัจจัยการเลือกชนิดของวัสดุเสริมกำลังที่ให้สมบัติความแข็งแรง และความแข็งแกร่งสูง อาทิเช่น วัสดุเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber, CF) ซึ่งวัสดุเสริมกำลังชนิดนี้ในปัจจุบันได้ถูกลดบทบาทสำคัญต่อการได้รับเลือกสำหรับนำมาใช้ประโยชน์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตในยุคใหม่ โดยวัสดุเสริมกำลังชนิดนาโนได้เข้ามามีบทบาททดแทน เนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นหลายด้าน และสมบัติที่มีค่าสูง เช่น ความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง และสมบัติพื้นผิวที่ดี (Interaction) [47] อันเนื่องจากวัสดุนาโนชนิดมีลักษณะทางโครงสร้างเป็นรูปร่างแผ่นบาง (Plate) ซึ่งจะให้ข้อดีทางพื้นผิวที่ดีต่อการเชื่อมต่อกับวัสดุอื่น ๆ ในส่วนผสมโดยมีค่าพื้นผิวจำเพาะสูงได้ถึงประมาณ 2630 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) [47] โดยข้อเด่นนี้ทำให้วัสดุนาโนชนิด วัสดุแผ่นแกรฟีน (GPLs) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากสำหรับนำไปใช้ประโยชน์กับวัสดุเนื้อหลักชนิดต่าง ๆ ดังแสดงได้ในตารางที่ 2 จากงานวรรณกรรมที่ได้รับการตีพิมพ์ในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 2015-2024 ตามลำดับ

สำหรับการพิจารณานำวัสดุแผ่นแกรฟีนไปประยุกต์ใช้งานกับโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนต และให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้น ในการพิจารณาออกแบบโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตยุคใหม่จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยอื่นเพิ่มเติม นั่นคือ ปัจจัยสัดส่วนทางน้ำหนัก (weight fraction, wt.%) ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปริมาณความเข้มข้นของวัสดุแกรฟีนในวัสดุเนื้อหลัก

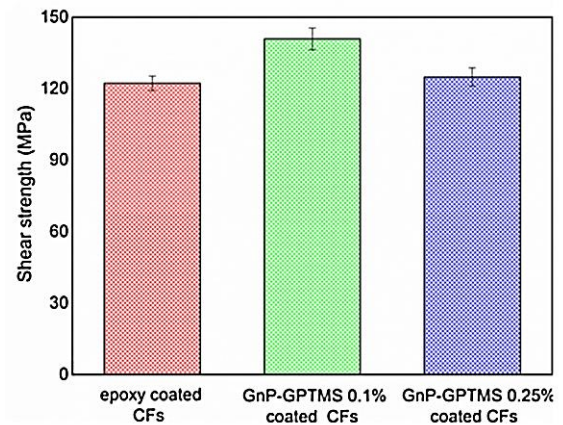
โดยปัจจัยนี้อาจจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตไปแนวทางที่ดีขึ้น หรืออาจแย่ลงได้ ในบางกรณีที่มีการใช้งานสัดส่วนทางน้ำหนักวัสดุแกรฟีนในสัดส่วนที่สูงและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับระดับวิกฤต (Critical) ซึ่งพบได้ว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุหรือโครงสร้างคอมสิตลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในงานวิจัยของ Wang และคณะ ในปี ค.ศ. 2024 [49] ที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของชั้นรอยต่อปฏิสัมพันธ์ (Interaction) และปัจจัยการรวมก้อนของวัสดุนาโนแกรฟีน ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นชัดเจนว่าปริมาณความเข้มข้นสูงของวัสดุแกรฟีนมีผลกระทบต่อการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นในระดับสัดส่วนทางปริมาตรที่ 6% และ 10% ตามลำดับ [49] นอกจากนี้ ผลการศึกษาถึงปัจจัยสัดส่วนทางน้ำหนักของวัสดุแกรฟีนยังพบได้ในงานวิจัยของ Arcos และคณะ ในปี ค.ศ. 2020 [50] ที่ได้แสดงถึงผลการปรับปรุงผิวของวัสดุเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ด้วยการเคลือบวัสดุเรซิน (Resin) และวัสดุนาโนแกรฟีนในสัดส่วนทางน้ำหนัก (wt.%) ที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 0.1 wt.% และ 0.25 wt.% ตามลำดับ และวัสดุนาโนแกรฟีนที่ใช้ในการศึกษามีสมบัติตามแสดงในตารางที่ 3 โดยผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณสัดส่วนทางน้ำหนักที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเส้นใยคาร์บอนมีแนวโน้มต่ำลง อันเนื่องมาจาก ปัจจัยการรวมกลุ่มของวัสดุนาโน (Agglomeration) ดังแสดงได้ในรูปที่ 8-10 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแกรฟีนในงานวิจัยของ Arcos [50]

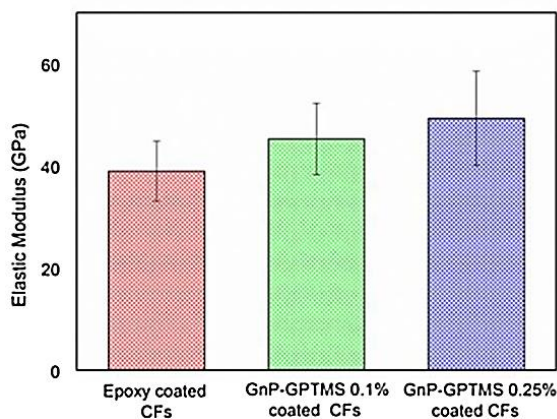
คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ	แผ่นแกรฟีน (GPLs)
เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter, μm)	< 2
ความหนา (Thickness, nm)	5-7
พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area, m^2/g)	750



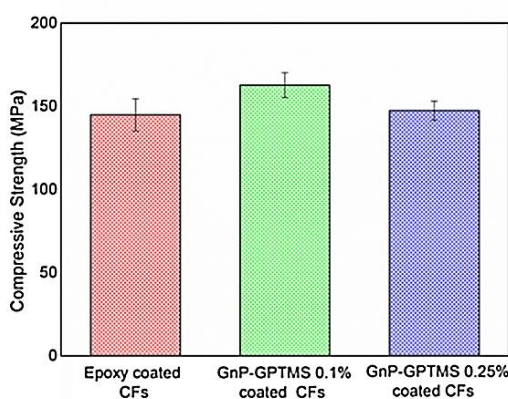
รูปที่ 8 คุณสมบัติความแข็งแรงดึงของวัสดุเส้นใยคาร์บอน [50]



รูปที่ 11 คุณสมบัติความแข็งแรงกดของวัสดุเส้นใยคาร์บอน [50]



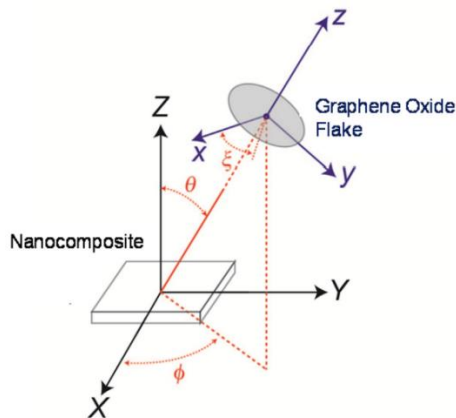
รูปที่ 9 คุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุเส้นใยคาร์บอน [50]



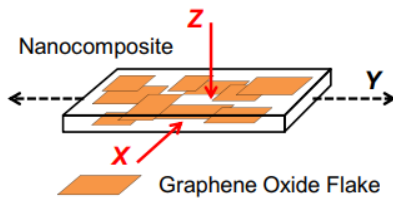
รูปที่ 10 คุณสมบัติความแข็งแรงกดของวัสดุเส้นใยคาร์บอน [50]

6. ปัจจัยลักษณะการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงวัสดุแผ่นแกรไฟ

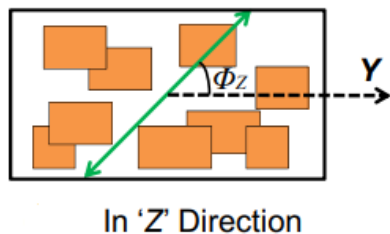
ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงปัจจัยเพิ่มเติม นอกเหนือจากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา โดยปัจจัยนี้เป็นอีกส่วนสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตยุคใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างกลุ่มน้ำหนักเบาที่สร้างมาจากวัสดุคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใย ซึ่งปัจจัยสำคัญนี้คือ ลักษณะการกระจายตัวของวัสดุเสริมกำลัง (Distribution) และปัจจัยนี้เป็นหนึ่งสำคัญต่อการสร้างคุณลักษณะโครงสร้างจุลภาค (Microstructural) ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติอื่น ๆ ของโครงสร้างโดยรวม [51] และมีการวรรณกรรมจำนวนมากที่มุ่งเน้นศึกษาถึงปัจจัยทางลักษณะของการกระจายตัวของวัสดุเสริมกำลังชนิดนาโนมากขึ้น ในวัสดุคอมโพสิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการพิจารณาวัสดุเสริมกำลังนาโน เช่น วัสดุแผ่นแกรไฟ (GPLs) ดังสามารถนำแสดงลักษณะการกระจาย และจัดเรียงวัสดุแกรไฟได้ในรูปที่ 12 - 15 ตามลำดับ



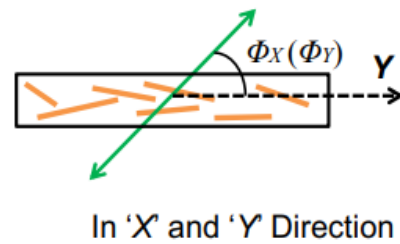
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ทางระบบพิกัดของวัสดุแกรฟีนที่อ้างอิงถึงระบบพิกัดหลักของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต [52]



รูปที่ 13 ลักษณะการจัดเรียงวัสดุแกรฟีนในระบบพิกัดหลักโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต [52]



รูปที่ 14 ลักษณะการจัดเรียงวัสดุแกรฟีนที่จัดเรียงทำมุมกับแนวแกน z [52]



รูปที่ 15 ลักษณะการจัดเรียงวัสดุแกรฟีนที่จัดเรียงทำมุมกับแนวแกน x และ y [52]

จากรูปที่ 12 - 15 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของวัสดุแกรฟีนแบบสุ่มใน 3 ทิศทาง นั่นคือ ทิศทางทำมุมกับแนวแกน z (ϕ_z), ทิศทางทำมุมกับแนวแกน x (ϕ_x) และทิศทางทำมุมกับแนวแกน y (ϕ_y) ตามลำดับ ซึ่งถูกอ้างอิงมาจากการวิจัยของ Li และคณะ ในปี ค.ศ. 2014 [52] ที่ได้ทำการศึกษาปัจจัยการจัดวางของวัสดุแผ่นแกรฟีนที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าลักษณะการจัดเรียงแนวตามแนวทิศทางที่แน่นอนมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่ดีกว่าแบบลักษณะการเรียงแบบสุ่ม ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dai และ Mishnaevsky Jr ในปี ค.ศ. 2014 [53] ที่ได้ทำการศึกษาจากแบบจำลองเชิงคำนวณ 3 มิติ (3D) เพื่อตรวจสอบกลไกความเสียหายและการแตกหักของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุนาโนแกรฟีน หลายปัจจัยของวัสดุแกรฟีนได้ถูกนำมาตรวจสอบ เช่น อัตราส่วนของความเพรียว (Aspect ratio) ลักษณะการจัดเรียง (Orientation) และสัดส่วนทางปริมาตร (Volume fraction) โดยหนึ่งในข้อสรุปที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการจัดเรียงตัวของวัสดุแกรฟีน นั่นคือ ลักษณะการจัดเรียงตัวของวัสดุแกรฟีนแบบสุ่ม (Random) จะให้สมบัติของความยืดหยุ่น (Young modulus) และสมบัติความแข็งแรง (Strength) ที่ต่ำกว่าลักษณะการจัดเรียงแบบมีทิศทาง

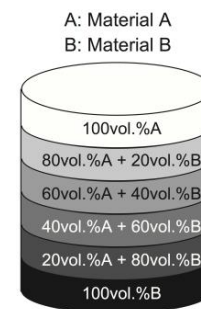
จากประเด็นข้างต้นทำให้นักวิจัยทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของวัสดุเสริมกำลังนาโนในวัสดุเนื้อหลักที่ควรจัดเรียงแนวการกระจายไปตามทิศทางที่แน่นอน ซึ่งโดยทั่วทิศทางที่ถูกจัดเรียงนั้นมักเป็นแนวทิศทางตามแนวแรงกระทำ (Direction force) แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาของการใช้งานวัสดุนาโนหลายชนิด เช่น ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) และแผ่นแกรฟีน (GPLs) ก็ยังพบกับปัญหาสำคัญยิ่ง นั่นก็คือ ปัญหาการรวมกลุ่มของวัสดุนาโน (Agglomeration) จากแรงยึดเหนี่ยวของพันธะระหว่างอะตอมที่สูง

หรือเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) ที่มีแนวโน้มทำให้วัสดุนาโน ดังเช่น วัสดุแผ่นแกรฟีน (GPLs) เกิดการรวมกลุ่มเป็นก้อนในวัสดุเนื้อหลัก ซึ่งบริเวณที่มีการรวมกลุ่มเป็นก้อนจะส่งผลเสียต่อคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุคอมโพสิต หรือโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตที่มีการนำวัสดุแกรฟีนมาเสริมกำลัง ดังแสดงตัวอย่างการถดถอยของสมบัติเชิงกลของวัสดุเส้นใยคาร์บอนที่ถูกเคลือบด้วยวัสดุนาโนแผ่นแกรฟีนในปริมาณที่สูงขึ้น นั่นคือ 0.25 wt.% ตามแสดงในรูปที่ 8 - 11 เป็นต้น

ดังนั้น แนวทางการกระจายวัสดุนาโนแบบวัสดุเชิงฟังก์ชัน (Functionally graded materials, FGM) ได้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อออกแบบสัดส่วนผสมของวัสดุเนื้อหลัก (Matrix) กับวัสดุเสริมกำลัง (Reinforcement) ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยแนวทางการออกแบบวัสดุส่วนผสมนี้ได้ถูกคิดค้นจากกลุ่มนักวิจัยชาวญี่ปุ่น ในช่วงปี ค.ศ. 1980 [54] ซึ่งเป็นการไล่ระดับส่วนผสมของวัสดุ 2 ชนิดแบบขั้นบันได และแนวทางนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาเป็นครั้งแรกในงานวิจัยของ Shen ในปี ค.ศ. 2009 [56] ที่ทำการศึกษาปัจจัยของการกระจายตัวของวัสดุนาโนคาร์บอน (CNTs) ในลักษณะวัสดุเชิงฟังก์ชัน (FGMs) กับวัสดุเนื้อหลักพอลิเมอร์ ในเวลาต่อมางานวิจัยของ Shen ได้รับความสนใจและถูกนำมาใช้เป็นแนวทางการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตในกลุ่มเสริมกำลังด้วยวัสดุนาโนชนิดอื่น นั่นคือ วัสดุแผ่นแกรฟีน (GPLs) ดังในงานวิจัยของ Shen และคณะ ในปี ค.ศ. 2017 [57] ที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะ (Buckling) และหลังการโก่งเดาะ (Postbuckling) ของโครงสร้างแผ่นบาง (Plate) ที่สร้างมาจากวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ และถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุแผ่นแกรฟีนแบบวัสดุเชิงฟังก์ชัน (FG-CNTRC plates) ผลการศึกษาพบว่า พฤติกรรมการโก่งเดาะและหลังการโก่งเดาะของโครงสร้างได้รับการปรับปรุงที่ดีขึ้นจากผลการใช้ลักษณะการกระจายตัวของวัสดุเสริมกำลังแกรฟีนแบบวัสดุเชิงฟังก์ชัน

จากลักษณะของการออกแบบสัดส่วนผสมของวัสดุแบบเชิงฟังก์ชัน (FGMs) ดังตามรูปที่ 16 และเป็นแนวทางการนำไปสู่การออกแบบสัดส่วนวัสดุผสมใหม่สำหรับกรณีการพิจารณาเสริมกำลังด้วยวัสดุนาโน อีกทั้ง แนวทางนี้ได้รับการศึกษากับวัสดุเสริมกำลังนาโนยุคแรก นั่นคือ ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) และผลลัพธ์ของพฤติกรรมของโครงสร้างเหล่านั้นที่ถูกกระจายตัวแบบวัสดุเชิงฟังก์ชันให้ผลลัพธ์ที่ดีเยี่ยมมากกว่าการกระจายแบบอิสระ

(Random) ในเวลาต่อมางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวัสดุนาโนมาใช้เสริมกำลังกับวัสดุเนื้อหลักในปัจจุบันได้มุ่งเน้นการใช้แนวทางการกระจายตัวของวัสดุนาโนแบบวัสดุเชิงฟังก์ชันมากขึ้น ดังเห็นได้จากงานวรรณกรรมที่ผ่านมาที่มีความเกี่ยวข้องเกี่ยวกับวัสดุเสริมกำลังนาโน และสามารถแสดงได้ในตารางที่ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 16 ลักษณะการออกแบบวัสดุเชิงฟังก์ชัน (FGMs) [55]

7. ปัจจัยการจัดเรียงวัสดุเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใย

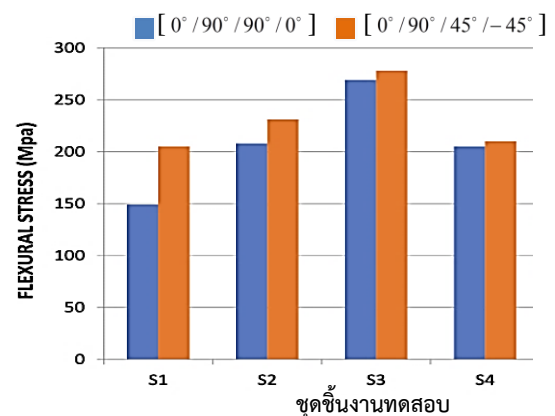
ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการกล่าวถึงปัจจัยหลายด้านของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุนาโน โดยปัจจัยเหล่านั้นต่างมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตในยุคใหม่ ซึ่งแนวทางการสร้างวัสดุคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใย หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปนั่นคือ วัสดุคอมโพสิตลามิเนตนั้น ได้ถูกพัฒนากระบวนการผสมผสานไปในลักษณะการใช้งานวัสดุเสริมกำลังร่วม นั่นคือ การนำวัสดุที่มีความแข็งแรง และแข็งแรงสูง เช่น วัสดุนาโน มาใช้เสริมกำลังของวัสดุเนื้อหลักให้มีความแข็งแรง และแข็งแรง เป็นลำดับต้น และหลังจากนั้นจะเป็นการนำวัสดุเสริมกำลังชนิด วัสดุเส้นใย เช่น วัสดุเส้นใยคาร์บอน หรือวัสดุเส้นใยแก้ว เป็นต้น มาใช้เสริมกำลังตามทิศทางของแรง หรือทิศทางที่ต้องการใช้งานความแข็งแรงจากวัสดุเส้นใยเหล่านี้ ทั้งนี้ จุดประสงค์ของการใช้งานวัสดุเสริมกำลังนาโนในวัสดุหลักเป็นส่วนแรกนั้น เพื่อสร้างสมบัติของความเหนียว (Toughness) และสมบัติที่มักเป็นจุดด้อยในโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตทั่วไป โดยเฉพาะยิ่งในกลุ่มโครงสร้างน้ำหนักเบา (Lightweight structures) ที่มีวัสดุพอลิเมอร์เป็นส่วนประกอบหลัก และความเสียหายมักจะเกิดกับตำแหน่งหรือบริเวณที่มีส่วนของวัสดุเนื้อหลักเข้มข้น หรือกล่าวได้ว่า พื้นที่ของวัสดุเนื้อหลักที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังอยู่ร่วม [50] ฉะนั้น ด้วยเหตุผลนี้

เป็นจุดด้อยของวัสดุคอมโพสิตลามิเนตจึงถูกได้รับการพัฒนาและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อการพัฒนาโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตยุคใหม่มากขึ้น และได้เรียกชื่อกันโดยทั่วไปว่าวัสดุคอมโพสิตแบบหลายขนาด (Multiscale composite) [62,63] หรืออาจเรียกว่าเป็น วัสดุคอมโพสิตแบบลูกผสม (Hybrid composites) [64] ได้เช่นกัน

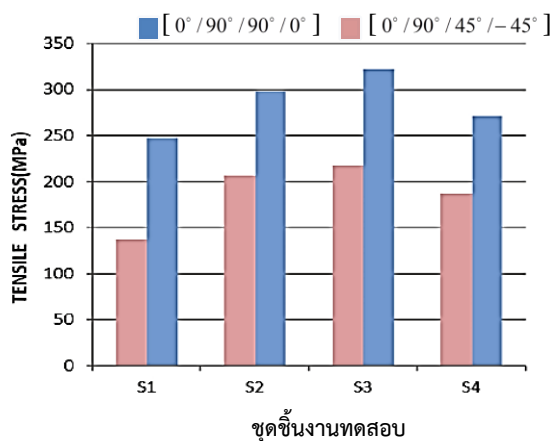
ตารางที่ 4 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำวัสดุนาโนแผ่นแกรฟีน (GPLs) กับการกระจายตัวแบบวัสดุเชิงฟังก์ชัน (FGMs) ในโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต

ปี ค.ศ.	โครงสร้าง	ผู้แต่ง และวัตถุประสงค์การใช้งาน
2025 [58]	Laminated และ sandwich beams	Ma และคณะ, เพื่อทำนายความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตแบบลามิเนต และแบบแซนด์วิชที่ถูกดัดเสริมกำลังด้วยวัสดุแผ่นแกรฟีนแบบวัสดุเชิงฟังก์ชัน (FG-GPRC)
2025 [59]	Porous plate	Zhang และคณะ, เพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมการโก่งเดาะ (Buckling) ของโครงสร้างคอมโพสิตพอร์นแผ่นบางที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุแผ่นแกรฟีนแบบวัสดุเชิงฟังก์ชัน
2025 [60]	Circular arches	Zhang และคณะ, เพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมการโก่งเดาะทางพลศาสตร์ (Dynamic buckling) ของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตพอร์นทรงโค้งวงกลม ที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุแผ่นแกรฟีนแบบวัสดุเชิงฟังก์ชัน
2025 [61]	Plate multiple cutouts	Zhang และคณะ, เพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free vibration) ของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตพอร์นที่เสริมกำลังด้วยวัสดุแผ่นแกรฟีนแบบวัสดุเชิงฟังก์ชันของโครงสร้างในลักษณะแผ่นบางที่ถูกพิจารณาโดนตัดเนื้อออกเป็นบางส่วน (Cutout) ในหลายรูปแบบ
2025 [62]	Smart plate	Tian และคณะ, เพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมทางพลศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีต่อสมบัติของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตฉลาดในรูปแบบของโครงสร้างแผ่นบางที่ชั้นกลางเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีลักษณะการเสริมกำลังด้วยวัสดุแผ่นแกรฟีนแบบวัสดุเชิงฟังก์ชันและถูกประกบด้วยชั้นของวัสดุ Magneto-electro-elastic (MEE)

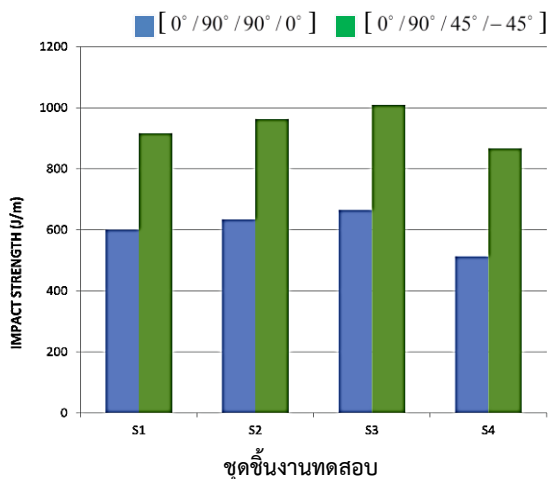
นอกจากประเด็นของความเสียหายอันเนื่องจากสมบัติของความเหนียวของวัสดุเนื้อหลักที่ต่ำแล้ว ยังมีประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตหลายขนาดนั้นคือ ต้นทุนของวัสดุนาโนที่มีราคาสูง ซึ่งจะต้องถูกนำมาพิจารณาออกแบบใช้งานอย่างเหมาะสมที่สุด [15] และออกแบบการจัดเรียงวัสดุเสริมกำลังชนิดวัสดุเส้นใยที่เหมาะสม ดังเห็นได้จากงานวิจัยของ Mishra และคณะ ในปี ค.ศ. 2020 [47] ที่ได้ทำการทดสอบวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุนาโนแกรฟีนในวัสดุเนื้อหลักพอลิเมอร์ในเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่าง ๆ คือ 0% , 1%, 2%, 3% และ 4% ตามลำดับ รวมถึงออกแบบการจัดเรียงของวัสดุเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยแก้ว (Glass fiber) ในแต่ละชั้นออกแบบ 2 แบบ คือ (0/90)_{12s} และ (0/90/±45)_{6s} ตามลำดับ โดยการทดสอบจะถูกทดสอบสมบัติของวัสดุหลากหลายสมบัติ ได้แก่ การทดสอบการดัดงอ (Bending test) การทดสอบการดึง (Tensile test) และการทดสอบการกระแทก (Impact test) เป็นต้น โดยผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้สามารถนำมาแสดงได้ในรูปที่ 17-19 ตามลำดับ



รูปที่ 17 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบการดัดงอ [47]



รูปที่ 18 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบการดึง [47]



รูปที่ 19 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบการกระแทก [47]

โดยผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตตามที่แสดงในรูปที่ 17 - 19 ตามลำดับนั้น จะสังเกตเห็นได้ว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วนทางน้ำหนักของวัสดุนาโน แกรฟีนหลังจาก 3 % ขึ้นไป ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในด้านลดต่ำลงชัดเจนในทั้ง 2 ลักษณะของการจัดเรียงวัสดุเส้นใย ซึ่งสาเหตุหลักเกิดขึ้นมาจากปัจจัยการรวมกลุ่มก้อน (Agglomeration) ของวัสดุเสริมกำลังชนิดนาโนตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้า เมื่อหากพิจารณาถึงลักษณะของการจัดเรียงวัสดุเส้นใยในทั้ง 2 ลักษณะดังกล่าว พบได้ว่าลักษณะการจัดเรียงวัสดุเส้นใยในแบบหลายทิศทาง $(0/90/\pm 45)_{6s}$ สามารถให้สมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ดีกว่าแบบทิศทาง $(0/90)_{12s}$ ดังนั้นลักษณะของการจัดเรียงวัสดุเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยแบบหลาย

ทิศทางจะส่งผลต่อการเพิ่มสมบัติการดัดงอ การดึง และการกระแทกของวัสดุคอมโพสิตในระดับ 20.1%, 29.8% และ 10% ตามลำดับ

8. สรุป

จากข้อมูลงานวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตแบบลามิเนตในแบบดั้งเดิมที่ต้องพบเจอกับปัญหาการแตกแยกออก ของชั้นโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตที่เกิดจากจุดอ่อนด้านสมบัติความเหนียวที่ต่ำของวัสดุเนื้อหลักในกลุ่มของวัสดุพอลิเมอร์ ด้วยปัจจัยนี้ได้มีการพัฒนาสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักกลุ่มวัสดุพอลิเมอร์ นั่นคือ การใช้งานวัสดุนาโนในกลุ่มของวัสดุแกรฟีนที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างแผ่นบาง ด้วยสมบัติเด่นของวัสดุนาโนที่มีขนาดมิตินขนาดเล็กที่สามารถจะผสมผสานเข้ากับวัสดุเนื้อหลักพอลิเมอร์เป็นอย่างดี ทำให้สมบัติของวัสดุเนื้อหลักสามารถปรับปรุงไปแนวทางที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุนาโนแกรฟีนก็มีข้อควรระวังในการใช้งาน รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่สามารถจะเพิ่มสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตดังมีข้อสรุปดังนี้

- 1) สมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตที่ได้รับการปรับแต่งด้วยวัสดุนาโนชนิด วัสดุแกรฟีน มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตลามิเนตที่ดีขึ้นได้
- 2) ปัจจัยคุณลักษณะทางรูปร่างของวัสดุแกรฟีน ที่มีมิติด้านความยาวมากกว่าด้านเส้นผ่านศูนย์กลางมาก ๆ จะมีผลต่อสมบัติของการเกาะยึดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุเนื้อหลักกับวัสดุนาโนที่ดีขึ้น
- 3) ปัจจัยสัดส่วนทางน้ำหนักของวัสดุนาโนที่สูงเกินมากกว่าร้อยละ 0.1 wt.% มีผลต่อการลดลงของสมบัติเชิงกลโดยรวมของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตจากผลของแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force)
- 4) ปัจจัยทิศทางการจัดเรียงวัสดุเส้นใยในโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตลามิเนตที่มีทิศทางจัดเรียงทำมุมของเส้นใยในมุม 0 และ 90 องศา เพียงอย่างเดียวจะให้ผลลัพธ์ของสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าในรูปแบบที่ถูกจัดวางวัสดุเส้นใยในหลายทิศทางได้แก่ 0 , 90, 45 และ -45 องศา อันเนื่องเส้นใยสามารถจะรับแรงในหลายทิศทางกว่า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Z.L. Lu, F. Lu, J.W. Cao, and D.C. Li, "Manufacturing properties of turbine blades of carbon fiber-reinforced SiC composite based on stereolithography," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 29 (2), pp. 201–209, 2014.
- [2] C. Kong, H. Lee, and H. Park, "Design and manufacturing of automobile hood using natural composite structure," *Composites Part B: Engineering*, vol. 91, pp. 18–26, 2016.
- [3] D. Balaji, P.S. Kumar, V. Bhuvaneshwari, L. Rajeshkumar, M.K. Singh, M.R. Sanjay, and S. Siengchin, "A review on effect of nanoparticle addition on thermal behavior of natural fiber-reinforced composites," *Heliyon*, vol. 11, pp. 1–13, 2024.
- [4] ไพโรจน์ สิงห์น้อยกิจ, "กลศาสตร์ของวัสดุคอมโพสิต", *จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2559.
- [5] M. Patni, S. Minera, R.M.J. Groh, A. Pirrera, and P. M. Weaver, "Three-dimensional stress analysis for laminated composite and sandwich structures," *Composites Part B: Engineering*, vol. 155, pp. 299–328, 2018.
- [6] B. Budiansky, and N.A. Fleck, "Compressive failure of fibre composites," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 41(1), pp. 183–211, 1993.
- [7] C.V. Opelt, G.M. Cândido, and M.C. Rezende, "Compressive failure of fiber reinforced polymer composites – A fractographic study of the compression failure modes," *Materials Today Communications*, vol. 15, pp. 218–227, 2018.
- [8] E. Greenhalgh, "Failure analysis and fractography of polymer composites," *Elsevier*, pp. 164–273, 2009.
- [9] ฌายา วงษ์พูน, โจพร พุ่มคำ และศิริศักดิ์ เทพาคำ, *ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี, วารสารอาหารและยา, พฤษภาคม-สิงหาคม, หน้า 10-13, 2557.*
- [10] C.O. Ujah, D.V.V. Kallon, and V.S. Aigbodion, , "Study on properties of high entropy alloys reinforced with carbon nanotubes/graphene – A review," *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, vol. 8, pp. 100117, 2024.
- [11] V.K. Sharma, "Influence of amine functionalized multi-walled carbonnanotubes on the mechanical properties of carbonfiber/epoxy composites," *Materials Today: Proceedings*, vol. 37(2), pp. 2978–2981, 2021.
- [12] ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย, คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น, *ไอที ออล ดิจิตอลพรีนท์, กรุงเทพฯ*, 2559.
- [13] V.U. Siddiqui, S.M. Sapuan, and M.R. Hassan, "Innovative dispersion techniques of graphene nanoplatelets (GNPs) through mechanical stirring and ultrasonication: impact on morphological, mechanical, and thermal properties of epoxy nanocomposites," *Defence Technology*, vol. 43, pp. 13–25, 2025.
- [14] X. Su, R. Wang, X. Li, S. Araby, H.C. Kuan, M. Naeem, and J. Ma, "A comparative study of polymer nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes and graphene nanoplatelets," *Nano Materials Science*, vol. 4(3), pp. 185–204, 2022.
- [15] Y. Jeawon, G.A. Drosopoulos, G. Foutsitzi, G.E. Stavroulakis, and S. Adali, "Optimization and analysis of frequencies of multi-scale graphene/fibre reinforced nanocomposite laminates with non-uniform distributions of reinforcements," *Engineering Structures*, vol. 228, pp. 111525, 2021.
- [16] B.R. Abhiram, and D. Ghosh, "Influence of nanofiller agglomeration on fracture properties of polymer nanocomposite: Insights from atomistic simulation," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 290, pp. 109503, 2023.
- [17] E. Sobhani, A.R. Masoodi, O. Civalek, A.R. Ahmadi-Pari, "Agglomerated impact of CNT vs. GNP nanofillers on hybridization of polymer matrix for vibration of coupled hemispherical-conical-conical shells," *Aerospace Science and Technology*, vol. 120, pp. 107257, 2022.
- [18] F. Ebrahimi, and A. Dabbagh, "Vibration analysis of fluid-conveying multi-scale hybrid nanocomposite shells with respect to agglomeration of nanofillers," *Defence Technology*, vol. 17(1), pp. 212–225, 2021.
- [19] J. Wang, L. Gong, S. Xi, C. Li, Y. Su, and L. Yang, "Synergistic effect of interface and agglomeration on Young's modulus of graphene-polymer nanocomposites," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 292, pp. 112716, 2024.
- [20] G.A. Drosopoulos, C. Gogos, and G. Foutsitzi, "Multi-objective optimization for maximum fundamental frequency and minimum cost of hybrid graphene/fibre-reinforced nanocomposite laminates," *Structures*, vol. 54, pp. 1593–1607, 2023.
- [21] B.R. Abhiram, and D. Ghosh, "Influence of nanofiller agglomeration on fracture properties of polymer nanocomposite: Insights from atomistic simulation," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 290, pp. 109503, 2023.
- [22] A.R. Alian, S. El-Borgi, and S.A. Meguid, "Multiscale modeling of the effect of waviness and agglomeration of CNTs on the elastic properties of nanocomposites," *Computational Materials Science*, vol. 117, pp. 195–204, 2016.
- [23] A. Wazeer, A. Das, C. Abeykoon, A. Sinha, and A. Karmakar, "Composites for electric vehicles and automotive sector: A review," *Green Energy and Intelligent Transportation*, vol. 2(1), pp. 100043, 2023.
- [24] Y. Jeawon, G.A. Drosopoulos, G. Foutsitzi, G.E. Stavroulakis, and S. Adali, "Optimization and analysis of frequencies of multi-scale graphene/fibre reinforced nanocomposite laminates with non-uniform distributions of reinforcements," *Engineering Structures*, vol. 228, pp. 111525, 2021.
- [25] H.Q. Duan, H.M. Zhang, X.W. Cheng, X.N. Mu, Q.B. Fan, N. Xiong, K. Feng, Y. Wang, K.F. Zheng, and Z.Y. Yang, "Enhanced strength and toughness in TC4-(GNPs/TC4) composites via heterogeneous multi-scale lamination design," *Materials Characterization*, vol. 216, pp. 114184, 2024.
- [26] M. Rafiee, X.F. Liu, X.Q. He, and S. Kitipornchai, "Geometrically nonlinear free vibration of shear deformable piezoelectric carbon nanotube/fiber/polymer multiscale laminated composite plates," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, pp. 3236–3251, 2014.
- [27] K. Guo, Y. Deng, Y. Ren, and H. Jiang, "Multi-scale moisture diffusion modeling and analysis of carbon/Kevlar-fiber hybrid composite laminates under the hygrothermal aging environment," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 229, pp. 110952, 2024.
- [28] C. Xingyu, K. Wang, Z. Wang, and Y. Huang, "Multi-Scale Simulation of Mo-Ag Laminated Metal Matrix Composites with Mo-Ag Diffusion Layer and Parallel Gap Resistance Welding in Solar Cells," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 30, pp. 1380–1387, 2024.
- [29] M. Rafiee, F. Nitzsche, and M.R. Labrosse, "Modeling and mechanical analysis of multiscale fiber-reinforced graphene composites: Nonlinear bending, thermal post-buckling and large amplitude vibration," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 103, pp. 104–112, 2018.
- [30] J. Zhao, D.X. Su, J.M. Yi, G. Cheng, L.S. Turng, and T. Osswald, "The effect of micromechanics models on mechanical property predictions for short fiber composites," *Composite Structures*, vol. 244, pp. 112229, 2020.
- [31] Z. Xu, X. Shao, and Q. Huang, "A micromechanical model of multi-scale nano-reinforced composites," *Polymer Testing*, vol. 125, pp. 108121, 2023.
- [32] J. Nafar Dastgerdi, G. Marquis, and M. Salimi, "Micromechanical modeling of nanocomposites considering debonding of reinforcements," *Composites science and technology*, vol. 93, pp. 38–45, 2014.
- [33] S. Panzavolta, B. Bracci, C. Gualandi, M.L. Focarete, E. Treossi, K. Kouroupis-Agalou, K. Rubini, F. Bosia, L. Brely, N.M. Pugno, V. Palermo, and A. Bigi, "Structural reinforcement and failure analysis in composite nanofibers of graphene oxide and gelatin," *Carbon*, vol. 78, pp. 566–577, 2014.
- [34] R. Sahu, and S. Anup, "Molecular dynamics study of toughening

- mechanisms in nano-composites as a function of structural arrangement of reinforcements,” *Materials & Design*, vol. 100, pp. 132-140, 2016.
- [35] H. Palza, M. Rojas, E. Cortez, R. Palma, and P. Zapata, “Nanoparticle reinforcement in elastomeric polyethylene composites under tensile tests,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 107, pp. 97-105, 2016.
- [36] M.Y. Zhou, L.B. Ren, L.L. Fan, K.S. Tun, M. Gupta, Y.W.X. Zhang, T.H. Lu, and G.F. Quan, “Achieving ultra-high strength and good ductility in AZ61 alloy composites containing hybrid micron SiC and carbon nanotubes reinforcements,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 768, pp. 138447, 2019.
- [37] E.W. Fenta, and B.A. Mebratie, “Advancements in carbon nanotube-polymer composites: Enhancing properties and applications through advanced manufacturing techniques,” *Heliyon*, vol. 10(16), e36490, 2024.
- [38] J. Giri, and R. Adhikari, “A brief review on preparation and application of MWCNT-based polymer nanocomposites,” *BIBICHANA*, vol. 20(1), pp. 65-75, 2023.
- [39] X. Gao, D. Ai, J. Zhang, H. Yue, X. Zhang, X., Zhang, C. Zhang, Z. Zhang, and J. Chang, “Interfacial structure and strengthening mechanisms of NiO-coated graphene reinforced aluminum matrix composites,” *Journal of Materials Research and Technology*, 35, 1494-1503, 2025.
- [40] T. Zhao, M.J. Bayat, and K. Asemi, “Free vibration analysis of functionally graded multilayer hybrid composite cylindrical shell panel reinforced by GPLs and CNTs surrounded by Winkler elastic foundation,” *Engineering Structures*, vol. 308, 117975, 2024.
- [41] S.F. Nikrad, A.H. Akbarzadeh, M. Hamidinejad, and Z.T. Chen, “Effects of functionally graded graphene reinforcements on nonlinear post-local buckling and axial stiffness of laminated channel section struts,” *Thin-Walled Structures*, vol. 195, pp. 111517, 2024.
- [42] X. Su, S.H. Lee, Y. Hou, N. Stanford, Q. Meng, Kuan, H. C. Kuan, X. Liu, and J. Ma, “Mechanochemically modified graphene nanoplatelets for high-performance polycarbonate composites,” *Smart Materials in Manufacturing*, vol. 3, pp. 100072, 2025.
- [43] M.E. Birch, T.A. Ruda-Eberenz, M. Chai, R. Andrews, and R.L. Hatfield, “Properties that influence the specific surface areas of carbon nanotubes and nanofibers,” *Annals of occupational hygiene*, vol. 57(9), pp. 1148-1166, 2013.
- [44] D. Li, Z. Yang, D. Jia, X. Duan, P. He, J. Yu, and Y. Zhou, “Spark plasma sintering and toughening of graphene platelets reinforced SiBCN nanocomposites,” *Ceramics International*, vol. 41(9), pp. 10755-10765, 2015.
- [45] H.S. Shen, Y. Xiang, F. Lin, and D. Hui, “Buckling and postbuckling of functionally graded graphene-reinforced composite laminated plates in thermal environments,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 119, pp. 67-78, 2017.
- [46] M. Rout, S.S. Hota, and A. Karmakar, “Thermoelastic free vibration response of graphene reinforced laminated composite shells,” *Engineering Structures*, vol. 178, pp. 179-190, 2019.
- [47] B.P. Mishra, D. Mishra, and P. Panda, “An experimental investigation of the effects of reinforcement of graphene fillers on mechanical properties of bi-directional glass/epoxy composite,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 5429-5441, 2020.
- [48] S. Patil, B.S. Raju, M. Haneef, and M. Nagaral, “Reinforcement with graphene nano platelets and Beryl in Al7075 matrix composites,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 27-33, 2021.
- [49] J. Wang, L. Gong, S. Xi, C. Li, Y. Su, and L. Yang, “Synergistic effect of interface and agglomeration on Young's modulus of graphene-polymer nanocomposites,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 292, pp. 112716, 2024.
- [50] A. Arcos-Alomía, P. Bartolo-Pérez, A. Valadez-González, and P.J. Herrera-Franco, “Enhancement of the in-plane and pin-load bearing behavior of a quasi-isotropic carbon fiber/epoxy matrix multi-scale laminate by modifying the fiber-matrix interphase using graphene nanoplatelets,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9(6), pp. 13855-13869, 2020.
- [51] O. Bayrak, M. Tashkinov, V.V. Silberschmidt, and E. mirci, “Quantitative analysis of orientation distribution of graphene platelets in nanocomposites using TEM,” *Composites Science and Technology*, vol. 262, pp. 111084, 2025.
- [52] Z. Li, R.J. Young, N.R. Wilson, I.A. Kinloch, C. Vallés, and Z. Li, “Effect of the orientation of graphene-based nanoplatelets upon the Young's modulus of nanocomposites,” *Composites Science and Technology*, vol. 123, pp. 125-133, 2016.
- [53] G. Dai, and L. Mishnaevsky Jr, “Graphene reinforced nanocomposites: 3D simulation of damage and fracture” *Computational Materials Science*, vol. 95, pp. 684-692, 2014.
- [54] N. Wattanasakulpong, “Thermal buckling and elastic vibration analysis of functionally graded beams and plates using improved third-order shear deformation theory”, *Doctoral dissertation*, UNSW Sydney, 2012.
- [55] T. Kunimine, H. Sato, and E. Miura-Fujiwara, “New Processing Routes for Functionally Graded Materials and Structures through Combinations of Powder Metallurgy and Casting,” *Advances in Functionally Graded Materials and Structures*, vol. 33, 2016.
- [56] H. Shen, “Nonlinear bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates in thermal environments,” *Composite Structures*, vol. 91(1), pp. 9-19, 2009.
- [57] H.S. Shen, Y. Xiang, F. Lin, and D. Hui, “Buckling and postbuckling of functionally graded graphene-reinforced composite laminated plates in thermal environments,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 119, pp. 67-78, 2017.
- [58] M. Rui, H. Chen, C. Lei, C. Yong, Z. Tianchen, Z. Jianqiang, and Z. Chao, “Analytical investigation of free vibration analysis in functionally graded graphene platelet-reinforced composite beams,” *Wave Motion*, vol. 135, pp. 103525, 2025.
- [59] J. Zhang, Y. Lv, J. Wu, and L. Li, “Buckling of functionally graded graphene platelets reinforced porous composite plate with defects,” *Engineering Structures*, vol. 326, pp. 119530, 2025.
- [60] Z. Zhang, Y. Liu, L. Liu, A. Liu, Z. Chen, and X. Yang, “Dynamic buckling of functionally graded porous graphene platelet reinforced composite arches under a locally distributed radial load,” *Thin-Walled Structures*, vol. 208, pp. 112838, 2025.
- [61] J. Zhang, and L. Li, “Free vibration of functionally graded graphene platelets reinforced porous composite plate with multiple cutouts,” *Thin-Walled Structures*, vol. 209, pp. 112952, 2025.
- [62] D. Puglia, M.A.S. Al-Maadeed, J.M. Kenny and S. Thomas, “Elastomer/thermoplastic modified epoxy nanocomposites: The hybrid effect of ‘micro’ and ‘nano’ scale,” *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 116, pp. 1-29, 2017.
- [63] G. Mittal, K.Y. Rhee, V. Mišковиć-Stanković, and D. Hui, “Reinforcements in multi-scale polymer composites: Processing, properties, and applications,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 138, pp. 122-139, 2018.
- [64] Z. Zhou, Y. Ni, Z. Tong, S. Zhu, J. Sun, and X. Xu, “Accurate nonlinear stability analysis of functionally graded multilayer hybrid composite cylindrical shells subjected to combined loads,” *Materials & Design*, vol. 182, pp. 108035, 2019.



ประพนธ์ ทศภานนท์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ สาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจในงานวิจัยทางด้านกลศาสตร์วัสดุคอมพิวเตอร์ในปัญหา

ด้านสถิติศาสตร์ และพลศาสตร์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ผศ.ดร.นภาพ แยมไตรพัฒน์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและปริญญาเอก สาขาเทคโนโลยีพลังงาน ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปัจจุบัน

เป็นอาจารย์ประจำที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล



วิวัฒน์ ประเสริฐมานะกิจ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ สาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจในงานวิจัยทางด้านพลศาสตร์ และ ระบบอัตโนมัติ