

การใช้วัสดุแกรฟีนกับโครงสร้างคานเชิงประกอบแบบ FGMs

- การทบทวนวรรณกรรม

Using graphene material with functionally graded beam structures - A comprehensive review

ประพจน์ ทศภานนท์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Email: parpot@mutacth.com

และ ฐิตะพล หุยนันท์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Corresponding author Email: thitaphol@mutacth.com

Manuscript received November 3, 2021

Revised November 23, 2021

บทคัดย่อ

วัสดุแกรฟีนได้รับความสนใจกันอย่างมากมาย เนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่า เช่น ความยืดหยุ่น ความแข็งแรง พื้นที่ผิวสัมผัสสูง และนำความร้อนสูง เป็นต้น สำหรับรูปแบบโครงสร้างคานที่พิจารณาอยู่ในรูปแบบวัสดุสมบัติเชิงหน้าที่ (Functionally Graded Materials) ที่เป็นลักษณะไล่ระดับระดับส่วนผสมตามทิศทางการออกแบบ ในส่วนการนำเสนอแบ่งออกเป็นหัวข้อได้แก่ (1) สมบัติเชิงกลของวัสดุแกรฟีน (2) ลักษณะวัสดุสมบัติเชิงหน้าที่และกระบวนการสร้าง (3) การประเมินสมบัติเชิงผลของวัสดุเชิงประกอบ (Effective properties) (4) บทความวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงประกอบด้วยวัสดุแกรฟีน และสรุปผล ตามลำดับ

คำสำคัญ: วัสดุแกรฟีน โครงสร้างคานเชิงประกอบ วัสดุสมบัติเชิงหน้าที่

ABSTRACT

Graphene materials (GPLs) have attracted a lot of attention. Owing to their superior mechanical properties such as Young's modulus, high strength, large specific surface area and good thermal conductivity etc. The structures considered in this paper are in form functionally graded materials (FGMs) with varying properties over a changing dimension. The present paper (1) briefly reviews the mechanical properties of graphene and graphene composites; (2) summarizes the characteristics of functionally graded materials (FGM) and fabrication (3) the prediction of effective mechanical properties of composite materials (4) presents a comprehensive review on the mechanical analyses and conclusion respectively.

Keywords: Graphene, Composite beam structures, Functionally Graded Materials (FGMs)

1. บทนำ

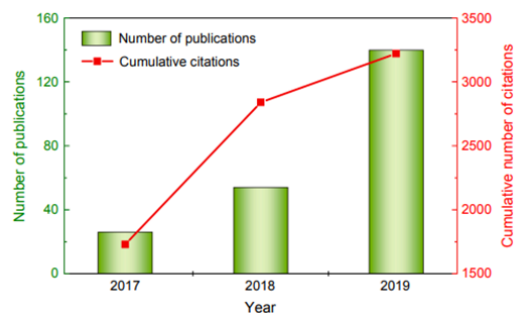
โครงสร้างเชิงประกอบแบบ FGMs (Functionally Graded Materials) เป็นลักษณะโครงสร้างที่เกิดจากการประกอบกันของวัสดุส่วนผสมที่มีการออกแบบส่วนผสมให้มีความแบบต่อเนื่องตามทิศทางของการออกแบบ และหลักการนี้ได้ถูกนำมาสร้างวัสดุคอมโพสิตหรือโครงสร้างเชิงประกอบจากวัสดุหลากหลายประเภทในปัจจุบันจากแนวทางของการสร้าง FGMs โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นในช่วงปี ค.ศ. 1984 ที่มีหน้าที่คิดค้นหาวัสดุเพื่อทนความร้อนสูงสำหรับงานการบินอวกาศ ซึ่งหลักการที่ได้ก็อาศัยหลักการจากธรรมชาติของการเจริญเติบโตของลำต้นไม้ที่มีลักษณะการกระจายความแข็งแรงตามวงปีที่ปรากฏคือ ความแข็งแรงของแต่ละตำแหน่งจะแปรเปลี่ยนจากแข็งไปอ่อน จากแนวดังกล่าวทำให้สร้างโครงสร้างเชิงประกอบในลักษณะนี้สามารถลดการเกิดปัญหาความเค้นในระหว่างชั้นของส่วนผสมได้ดี [1] การพัฒนาวัสดุประกอบและโครงสร้างเชิงประกอบให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในทางเทคนิคของกระบวนการสร้างวัสดุแล้วยังมีการพัฒนาวัสดุ และโครงสร้างด้านอื่น ๆ เช่น การคิดค้นหาวัสดุเสริมแรง (Reinforcements) ให้มีความแข็งแรง จากการคิดค้นนี้ก็พบวัสดุท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes ,CNTs) ในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิจัยที่ชื่อว่า Iijima ซึ่งวัสดุนี้นี้ให้ศักยภาพทางด้านความแข็งแรงสูง หรือมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) สูงถึง 1 TPa หรือ 1000 GPa มากกว่าเหล็กประมาณ 100 เท่า รวมถึงสมบัติด้านการนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดีเยี่ยม [2] และข้อดีนี้เป็นจุดสนใจทำให้นักวิจัยจำนวนมากนำวัสดุนี้นี้ไปศึกษากับโครงสร้างเชิงประกอบมากมาย

ในปี ค.ศ. 2004 มีนักวิจัยชาวรัสเซียคือ Prof. Andre Geim และ Prof. Konstantin Novoselov ได้ค้นพบกับวัสดุนี้นี้ใหม่เรียกว่า วัสดุแกรฟีน (Graphene) ซึ่งเป็นหนึ่งอัญรูปของคาร์บอน และมีโครงสร้างทางจุลภาคเป็นอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ในลักษณะรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal) ที่เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงคล้ายโครงสร้างรังผึ้ง จากลักษณะของโครงสร้างวัสดุแกรฟีนทำให้วัสดุนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 3 เท่าของวัสดุนาโนคาร์บอน และมีค่า Young's modulus สูงถึง 1 TPa [3] – [4] รวมถึงค่าความแข็งแรงภายใน (Intrinsic strength) สูงถึง 130 GPa จากจุดเด่นดังกล่าวเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยและอุตสาหกรรมสนใจวัสดุแกรฟีน [4]

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุแกรฟีนที่ใช้ในโครงสร้างเชิงประกอบในลักษณะของโครงสร้างแบบคาน แบบแผ่นบาง แผ่นโค้ง รวมถึงลักษณะในแบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุแกรฟีน ซึ่งข้อมูลจากการรวบรวมนี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาและออกแบบโครงสร้างเชิงประกอบจากวัสดุแกรฟีน อิทธิพลของวัสดุแกร - ฟีนที่มีต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง อิทธิพลของสัดส่วนวัสดุแกรฟีนที่เหมาะสมต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง

2. ข้อมูลความสนใจในวัสดุแกรฟีน

ตามข้อมูลของ Web of science ที่ได้แสดงถึงจำนวนผลงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการศึกษาวัสดุแกรฟีน รวมถึงแสดงจำนวนผลงานวิจัยที่นำไปใช้อ้างอิงมีจำนวนมาก โดยข้อมูลเหล่านี้ได้ถูกรายงานในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 2017 ถึง ค.ศ. 2019 ดังแสดงได้ในรูปที่ 1 จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าวัสดุแกรฟีนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังเห็นได้จากผลงานวิจัยที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 26 บทความในปี ค.ศ. 2017 ไปเป็น 140 บทความในปี ค.ศ. 2020 อีกทั้งข้อมูลดังกล่าวยังแสดงให้เห็นถึงกลุ่มประเทศที่ให้ความสนใจกับวัสดุนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2 ตามลำดับ [4]

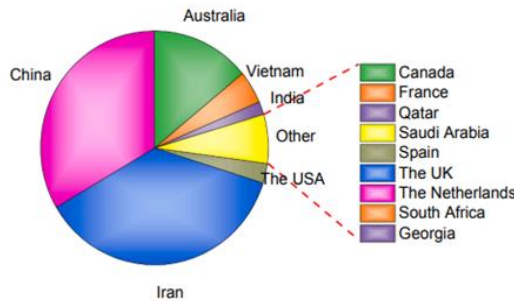


รูปที่ 1 ข้อมูลการตีพิมพ์ในวารสารช่วงปี ค.ศ. 2017-2019 [4]

3. ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุแกรฟีน

วัสดุแกรฟีนเป็นวัสดุในสองมิติที่มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นและเรียงต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal) ดังในรูปที่ 3 (ก) นอกจากรูปทรงดังกล่าวแล้ววัสดุแกรฟีนยังถูกออกเป็น 3 ลักษณะจากการจัดเรียงโครงสร้างคือ แกรฟีนจัดเรียงกันต่อกันเป็นชั้น ๆ ในรูปแบบ

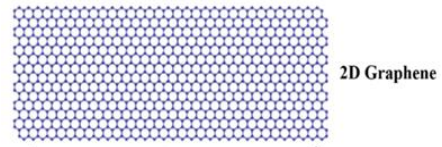
สามมิติจะได้วัสดุแกรไฟต์ (Graphite) และนำมาม้วนเป็นรูปทรงกระบอกในรูปแบบหนึ่งมิติเราจะได้วัสดุท่อนาโนคาร์บอน และสุดท้ายคือการนำมาห่อเป็นรูปทรงกลมซึ่งจะถูกเรียกว่าวัสดุฟูลเลอรีน [5] – [6] แสดงในรูปที่ 3 (ข) - (ง) ตามลำดับ



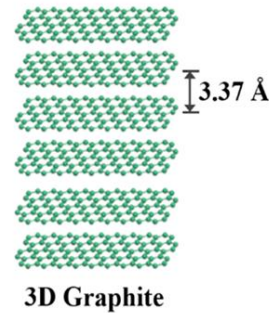
รูปที่ 2 ข้อมูลความสนใจในกลุ่มประเทศต่าง ๆ [4]

ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้เกี่ยวกับสมบัติของวัสดุแกรไฟน์ที่มีสมบัติของความยืดหยุ่นและความแข็งแรงสูง ซึ่งค่าเหล่านี้ได้มาจากการทดสอบวัสดุในครั้งแรกจากผลงานวิจัยของ Lee และคณะ [7] ในปี ค.ศ. 2008 และต่อมาในงานวิจัยของ Koenig และคณะ ในปี ค.ศ. 2011 [8] รวมถึงในงานของ Politano และคณะ ในปี ค.ศ. 2012 [9] ซึ่งในแต่ละงานวิจัยได้ใช้เทคนิคการวัดที่แตกต่างกันคือ Atomic Force Microscope, Phonon Dispersion และ Pressurized Blister Test โดยผลจากการวัดค่าความยืดหยุ่นทั้งใน 3 วิธีข้างต้นให้ผลที่ใกล้เคียงกันคือ 1 ± 0.1 , 1.020 และ 1.036 TPa

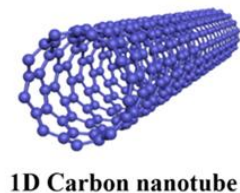
นอกจากนี้ สมบัติของความยืดหยุ่นวัสดุแกรไฟน์ยังสามารถประเมินได้จากวิธีการทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ Ab Initio Study Structural Mechanics based model, Density Functional Perturbation Theory, Continuum Mechanics, Finite Element Method, Molecular Dynamics Simulation จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้พบว่าให้ค่าสมบัติของความยืดหยุ่นที่มีความใกล้เคียงกับค่าสมบัติความยืดหยุ่นที่ได้จากวิธีการทดลองของ Lee และคณะ ดังแสดงผลลัพธ์ในตารางที่ 1



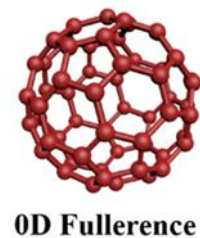
รูปที่ 3 (ก) โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุแกรไฟน์ [6]



รูปที่ 3 (ข) โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุแกรไฟต์ [6]



รูปที่ 3 (ค) โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุนาโนคาร์บอน [6]



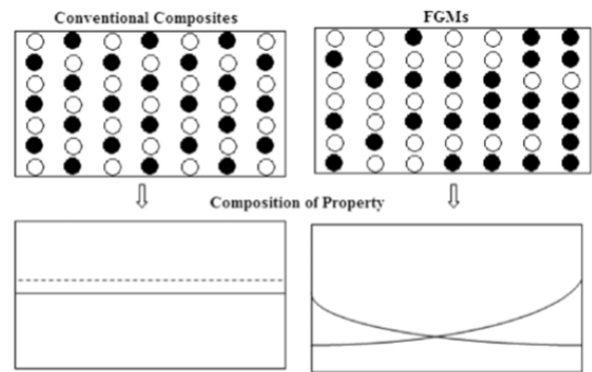
รูปที่ 3 (ง) โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุฟูลเลอรีน [6]

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของวัสดุเกรฟีนจากวิธีการต่าง ๆ

ผู้แต่ง (Author)	วิธีการ (Method)	E (TPa)
Lee และคณะ [7]	ทดลองกับวิธี Atomic Force Microscope (AFM)	1 ± 0.1
Politano และคณะ [9]	ทดลองกับวิธี Phonon Dispersion	1.020
Koenig และคณะ [8]	ทดลองกับวิธี Pressurized Blister Test	1.036
Lier และคณะ [10]	ทฤษฎี Ab Initio Study	1.110
Li และ Chou [11]	ทฤษฎี Structural Mechanics based model	1.033
Liu และคณะ [12]	ทฤษฎี Density Functional Perturbation Theory	1.050
Shokrieh และ Refiee [13]	ทฤษฎี Finite Element Method	1.140
Kvashnin และ Sorokin [14]	ทฤษฎี Molecular Dynamics Simulation	1.150

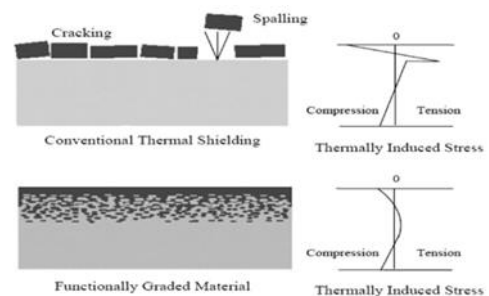
4. การใช้วัสดุเกรฟีนเสริมแรงกับโครงสร้างเชิงประกอบแบบวัสดุสมบัติเชิงฟังก์ชัน

การใช้งานวัสดุหรือโครงสร้างที่สร้างมาจากวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบดั้งเดิม (Conventional composite) มักประสบปัญหาเกี่ยวกับความเสียหายในรูปแบบของการแตกร้าว (Cracking) หรือการแยกตัวออกของชั้น (Delamination) และการหลุดลอก (Salling) [15] ซึ่งปัญหาเหล่านี้มักเกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของส่วนผสมจึงทำให้เกิดความเค้นสะสมในระหว่างชั้นส่วนผสม จากปัญหาดังกล่าวทำให้นักวิจัยวัสดุพยายามคิดค้นแนวทางเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเชิงประกอบในรูปแบบดั้งเดิม โดยในปี ค.ศ. 1984 ได้มีกลุ่มนักวิจัยชาวญี่ปุ่นที่พบกระบวนการสร้างวัสดุสมบัติเชิงฟังก์ชัน (Functionally graded material, FGMs) จากการนำวัสดุองค์ประกอบระหว่างวัสดุเซรามิก (Ceramic) กับโลหะ (Metal) เพื่อมาสร้างวัสดุเพื่อป้องกันความร้อนในโครงสร้างอากาศยาน ซึ่งหลักการสร้างคือให้สัดส่วนผสมของวัสดุทั้งสองเป็นไปแบบต่อเนื่องตามทิศทางของการออกแบบ และพบว่าโดยส่วนใหญ่ มักถูกออกแบบตามทิศทางของความหนา (Thickness) หรือแสดงภาพลักษณะการกระจายสัดส่วนผสมแบบต่อเนื่องได้ตามรูปที่ 4 ที่ได้แสดงลักษณะการกระจายสัดส่วนผสมในรูปแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง รวมถึงแสดงค่าสมบัติของวัสดุทั้งสองแบบตามลำดับ [16]



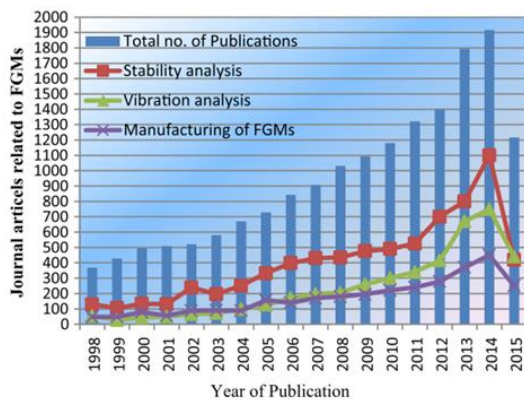
รูปที่ 4 การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุผสมในแบบดั้งเดิมและแบบสมบัติเชิงฟังก์ชัน (FGMs) [16]

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการสร้างวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบดั้งเดิมที่ให้การกระจายส่วนผสมเป็นไปแบบคงที่ตลอดหน้าตัดของโครงสร้างจะทำให้สมบัติของวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนการกระจายสัดส่วนผสมแบบต่อเนื่อง (FGMs) สามารถทำให้สมบัติของวัสดุประกอบมีการเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการออกแบบ ถ้าหากนำวัสดุทั้งสองมาทดสอบทางความร้อนดังในรูปที่ 5 พบว่าความเค้นเนื่องจากความร้อนในวัสดุประกอบแบบดั้งเดิมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในชั้นแบบฉับพลัน ซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกร้าวในโครงสร้างประกอบแบบดั้งเดิม ส่วนในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบแบบต่อเนื่อง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความเค้นแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งสามารถลดปัญหาของการแตกร้าวในโครงสร้างได้ [17]

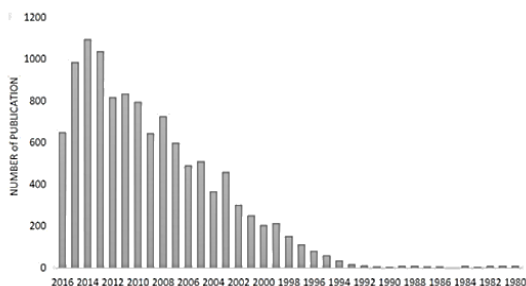


รูปที่ 5 การเปรียบเทียบการป้องกันความร้อนของวัสดุผสมดั้งเดิมกับ วัสดุผสมแบบ FGMs [17], [18]

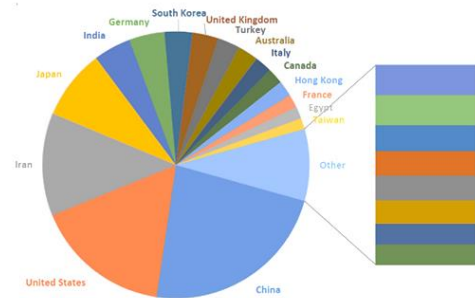
จากเทคนิคของกระบวนการสร้างวัสดุเชิงประกอบแบบสมบัติเชิงฟังก์ชัน (FGMs) ที่ได้แสดงถึงข้อดีของการลดปัญหาการเกิดความเค้นสะสมในระหว่างชั้นที่เป็นปัญหาหลักของโครงสร้างที่สร้างมาจากวัสดุเชิงประกอบในแบบดั้งเดิม ดังนั้นจากข้อได้เปรียบของการสร้างวัสดุเชิงประกอบแบบ FGMs ตามที่กล่าวไว้ทำให้กระบวนการนี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากและนำมาสร้างวัสดุเชิงประกอบอื่น ๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเชิงประกอบในด้านต่าง ๆ ดังเห็นได้จากจำนวนผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เพิ่มขึ้นในงานวิจัยของ Ankit และ Mohammad ในปี ค.ศ. 2015 [19] และงานวิจัยของ Minoo และ Kamyar ในปี ค.ศ. 2016 [20] ที่ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองและการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบแบบสมบัติเชิงฟังก์ชัน รวมไปถึงกระบวนการสร้างวัสดุสมบัติเชิงฟังก์ชันในวิธีการต่าง ๆ โดยข้อมูลที่แสดงถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวัสดุสมบัติเชิงฟังก์ชันแสดงได้ในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 6 จำนวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุสมบัติเชิงฟังก์ชัน (FGMs) [19]

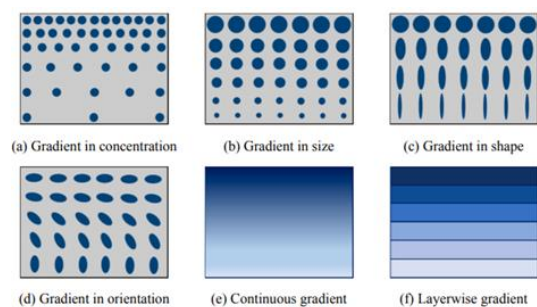


รูปที่ 7 (ก) จำนวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุสมบัติเชิงฟังก์ชัน (FGMs) [20]



รูปที่ 7 (ข) สัดส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุสมบัติเชิงฟังก์ชัน (FGMs) ในประเทศต่าง ๆ [20]

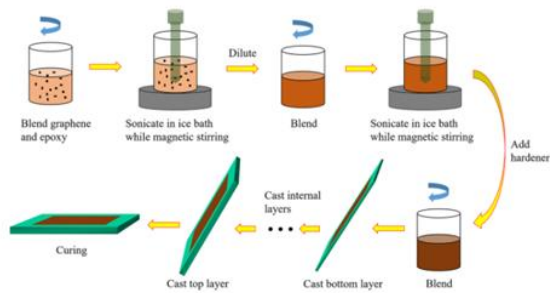
นอกจากนี้ กระบวนการสร้างวัสดุแบบสมบัติเชิงฟังก์ชันยังสามารถสร้างโครงสร้างทางจุลภาคระหว่างส่วนผสมให้มีความแตกต่างตามทิศทางการออกแบบดังในประเภทต่าง ๆ ดังนี้คือ ความเข้มข้น (Gradient in concentration) ขนาดรูปร่าง (Gradient in size) รูปทรง (Gradient in shape) การจัดเรียง (Gradient in orientation) แบบต่อเนื่อง (Continuous gradient) และแบบขั้นบันได (Layerwise gradient) ดังที่ได้นำเสนอในงานวิจัยของ Miyamoto และคณะ ในปี ค.ศ. 1999 [21] ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การสร้างวัสดุสมบัติเชิงฟังก์ชันในแบบประเภทต่าง ๆ [21]

ตามที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้นเกี่ยวกับข้อดีของการสร้างวัสดุเชิงประกอบแบบวัสดุสมบัติเชิงฟังก์ชัน รวมถึงความสนใจแนวทางการสร้างวัสดุเชิงประกอบประเภทนี้ส่งผลทำให้แนวทางนี้ได้รับการนำไปใช้งานสำหรับสร้างวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมหลักของวัสดุเกรฟีน ซึ่งก็พบว่าในงานวิจัยของ Yang และคณะ [22] – [24] ได้นำเสนอโครงสร้างแบบหลายชั้น (Multilayer) จากวัสดุพอลิเมอร์

ที่เสริมแรงความแข็งแรงด้วยวัสดุแกรฟีนแบบสมบัติเชิงฟังก์ชัน หรือเรียกว่า Functionally graded graphene platelets reinforced composites (FG-GPLRC) ซึ่งวัสดุแกรฟีนจะถูกกระจายไปแบบคงตัวในแต่ละชั้นตามสัดส่วนปริมาตรทางน้ำหนัก (Weight fraction) โดยโครงสร้างทดลองจะถูกประกอบขึ้นจากชั้นของการผสมผสานกันระหว่างวัสดุพอลิเมอร์กับวัสดุแกรฟีนตามสัดส่วนน้ำหนักที่มีความแตกต่างกันออกไปตามในแต่ละชั้น ซึ่งโครงสร้างนี้จะถูกประกอบขึ้นรวมกันทั้งหมด 6 ชั้น ดังแสดงได้ในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 ขั้นตอนการสร้างชั้นของโครงสร้างเชิงประกอบจากวัสดุพอลิเมอร์กับวัสดุแกรฟีน [22] – [24]



รูปที่ 10 โครงสร้างวัสดุพอลิเมอร์กับวัสดุแกรฟีน [[22] – [24]

สำหรับขั้นตอนการสร้างโครงสร้างหลายชั้นที่มีวัสดุแกรฟีนเป็นส่วนเสริมแรงในรูปที่ 9 และ 10 สามารถแยกออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการจัดเตรียมวัสดุพอลิเมอร์ (Matrix) กับวัสดุแกรฟีน (Reinforced) หลังจากนั้นนำวัสดุทั้งสองมาผสมเข้าด้วยกันผ่านกระบวนการ Blending Process ให้เป็นเนื้อเดียวกัน และต่อจากนั้นนำไปเทลงในแม่พิมพ์เพื่อได้รับโครงสร้างในชั้นแรก และขั้นตอนนี้จะทำการวนซ้ำเพื่อให้ได้รับโครงสร้างในชั้นต่อ ๆ ไป ส่วนขั้นตอนที่สองคือ การนำโครงสร้างมาเชื่อมต่อกันด้วยการกดร้อน (Hot pressing) ตามลำดับ

5. การหาค่าสมบัติเชิงผลของโครงสร้างวัสดุผสมแกรฟีน

สมบัติเชิงผล (Effective properties) ของวัสดุประกอบหรือโครงสร้างประกอบที่สามารถหาได้ในวิธีการทดสอบแล้วยังสามารถประเมินหาจากการใช้แบบจำลองที่หลากหลายโดยอยู่ในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้อยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์กลศาสตร์ระดับจุลภาค (Micromechanics) ที่ได้พิจารณาถึงปัจจัยทางกายภาพหรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของส่วนผสม และมีการพัฒนาแบบจำลองกันมาอย่างต่อเนื่องจนได้รับการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายได้แก่ กฎของส่วนผสม (Rule of mixture, ROM), Shear-lag theory Halpin-Tsai model, Eshelby's theory, Mori-Tanaka model, Self-consistent model, Hashin-Shtrikman's theory, Thermo-elastic model Effective medium theory model เป็นต้น แบบจำลองเหล่านี้ได้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ ได้แก่ กฎของส่วนผสม (ROM) พบได้ในงานวิจัยของ Piggott ในปี ค.ศ. 2002 [25] งานวิจัยของ Jones ในปี ค.ศ. 1999 [26] งานวิจัยของ Ungbhakorn และ Wattanasakulpong ในปี ค.ศ. 2013 [27] งานวิจัยของ Lei และคณะ ในปี ค.ศ. 2016 [28] งานวิจัยของ Li และคณะ ในปี ค.ศ. 2016 [29] งานวิจัยของ Royal และคณะ ในปี ค.ศ. 2018 [30] งานวิจัยของ Yihumie และคณะ ในปี ค.ศ. 2021 [31] เป็นต้น แบบจำลอง Shear-lag theory พบได้ในงานวิจัยของ Cox ในปี ค.ศ. 1952 [32] งานวิจัยของ Abhishek และ Sunil ในปี ค.ศ. 2015 [33] และแบบจำลอง Halpin-Tsai model พบได้ในงานวิจัยของ Halpin ในปี ค.ศ. 1969 [34] รวมทั้งงานวิจัยของ Halpin และ Kardos ในปี ค.ศ. 1976 [35] งานวิจัยของ Farzad และ Ali ในปี ค.ศ. 2019 [36] งานวิจัยของ Yasser และคณะ ในปี ค.ศ. 2019 [37] งานวิจัยของ Mustapha และคณะ ในปี ค.ศ. 2021 [38] แบบจำลอง Eshelby's theory พบได้ในงานวิจัยของ Eshelby ในปี ค.ศ. 1957 [39] และงานวิจัยของ Sergey และคณะ ในปี ค.ศ. 2011 [40] แบบจำลอง Mori-Tanaka model พบได้ในงานวิจัยของ Mori และ Tanaka ในปี ค.ศ. 1973 [41] งานวิจัยของ Tran และคณะ ในปี ค.ศ. 2018 [42] เป็นต้น ทั้งนี้ การใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประเมินหาค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมที่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุแกรฟีนในงานวิจัย ๆ เหล่านี้สามารถสรุปได้ในตารางที่

ตารางที่ 2 สรุปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับประเมินหาสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุผสมแกรฟีน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)	ผู้แต่ง
Rule of mixture (ROM)	Piggott [25], Jones [26], Ungbhakorn และ Wattanasakulpong [27], Lei และคณะ [28], Lei และคณะ [29], Royal และคณะ [30], Yihumie และคณะ [31]
Shear-lag theory	Cox [32], Abhishek และ Sunil [33]
Halpin-Tsai model	Halpin [34], Halpin และ Kardos [35], Farzad และ Ali [36], Yasser และคณะ [37], Mustapha และคณะ [38]
Eshelby's theory	Eshelby [39], Sergey และคณะ [40]
Mori-Tanaka model	Mori และ Tanaka [41], Tran และคณะ [42]

5.1 กฎของส่วนผสม (Rule of mixture)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามกฎของส่วนผสม (Rule of mixture, ROM) เป็นแบบจำลองหนึ่งถูกนำมาใช้งานสำหรับประเมินค่าสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุประกอบที่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุตามทิศทางแนวยาวของโครงสร้าง (Longitudinal direction, E_{11}) และตามทิศทางแนวขวางของโครงสร้าง (Transverse direction, E_{22}) โดยสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบตามทิศทางดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2)$$

โดยที่พารามิเตอร์ E_m, E_f, V_m, V_f ในสมการที่ 1 และ 2 คือ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและค่าสัดส่วนปริมาตรของเนื้อหลัก (Matrix, m) และวัสดุเสริมแรง (Reinforcement, f) ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันค่ามอดูลัสการเฉือน (Shear modulus, G_{12}) ของวัสดุประกอบก็สามารถหาได้ตามหลักการเดียวกันในสมการที่ 2 โดยสมการค่ามอดูลัสการเฉือนของวัสดุประกอบสามารถหาได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (3)$$

เมื่อพารามิเตอร์ ในสมการที่ 3 คือ ค่ามอดูลัสการเฉือนและค่าสัดส่วนปริมาตรของวัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรง ตามลำดับ

5.2 แบบจำลอง Halpin-Tsai

แบบจำลองของ Halpin-Tsai เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในอีกรูปแบบหนึ่งที่ใช้สำหรับการประเมินสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุประกอบที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber) ซึ่งแบบจำลองนี้นำมาพิจารณาหาสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุประกอบที่คำนึงถึงอิทธิพลของลักษณะทางรูปทรง (Geometric) และลักษณะการจัดเรียงของวัสดุเส้นใยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการเสริมแรงทั้งในทิศทางตามแนวยาว และแนวขวางของวัสดุประกอบ โดยสมการแบบจำลองของ Halpin-Tsai แสดงดังในสมการต่อไปนี้

$$E_{11} = \frac{1 + \xi_{11} \eta_{11} V_f}{1 - \eta_{11} V_f} E_m \quad (4)$$

$$E_{22} = \frac{1 + \xi_{22} \eta_{22} V_f}{1 - \eta_{22} V_f} E_m \quad (5)$$

$$G_{12} = \frac{1}{1 - \eta_{12} V_f} G_m \quad (6)$$

เมื่อ พารามิเตอร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตามทิศทางต่าง ๆ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta_{11} = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + \xi_{11}} \quad (7)$$

$$\eta_{22} = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + \xi_{22}} \quad (8)$$

$$\eta_{12} = \frac{(G_f / G_m) - 1}{(G_f / G_m)} \quad (9)$$

โดยที่พารามิเตอร์ ξ_{11}, ξ_{22} คือ สัดส่วนทางรูปทรงของวัสดุ

เกรฟพื้นด้านความยาวต่อความหนา (l/t) และความกว้างต่อความหนา (w/t) ดังหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\xi_{11} = 2\left(\frac{l}{t}\right), \quad \xi_{22} = 2\left(\frac{w}{t}\right) \quad (10)$$

การหาค่ามอดุลัสยังผล (Effective modulus, E_{eff}) และค่ามอดุลัสเฉือนยังผล (Effective shear modulus, G_{eff}) ของโครงสร้างวัสดุประกอบสามารถหาได้ตามสมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ โดยค่ามอดุลัสตามแนวแกนความยาว (E_{11}) และแนวขวาง (E_{22}) ซึ่งค่ามอดุลัสตามแนวแกนเหล่านี้สามารถได้จากใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามกฎส่วนผสม (ROM) หรือ Halpin-Tsai model ดังแสดงในสมการที่ (1) - (3) และสมการที่ (4) - (10) ตามลำดับ

$$E_{eff} = \frac{3}{8}E_{11} + \frac{5}{8}E_{22} \quad (11)$$

$$G_{eff} = \frac{1}{8}E_{11} + \frac{1}{4}E_{22} \quad (12)$$

5.3 แบบจำลอง Modified Halpin-Tsai model

การประเมินหาสมบัติยังผลของความยืดหยุ่นในวัสดุประกอบที่ได้คำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุแล้วตามที่กล่าวไว้ในแบบจำลอง Halpin-Tsai เงื่อนไขทางสภาพแวดล้อมก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติยังผลของวัสดุหรือโครงสร้าง ดังนั้นด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองให้มีความครอบคลุมถึงปัจจัยหลาย ๆ ด้านที่อาจส่งผลต่อสมบัติยังผลของวัสดุเชิงประกอบ โดยแบบจำลองของ Halpin-Tsai ได้ชี้ให้เห็นว่ายังไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยทางด้านอุณหภูมิ (Temperature effect) ตามการกล่าวถึงในงานวิจัยของ Sun และคณะ ในปี ค.ศ. 2019 [43] และงานวิจัยของ Lin และคณะ ในปี 2017 [44] โดยสมการที่ผ่านการปรับแต่งจากแบบจำลอง Halpin-Tsai มาเป็น Modified Halpin-Tsai model ดังในสมการต่อไปนี้ [44]

$$E_{eff} = \frac{3}{8} \frac{1 + \xi_{11}\eta_{11}V_f}{1 - \eta_{11}V_f} f_{11}(T)g_{11}(\delta)E_m + \frac{5}{8} \frac{1 + \xi_{22}\eta_{22}V_f}{1 - \eta_{22}V_f} f_{22}(T)g_{22}(\delta)E_m \quad (13)$$

$$E_{11} = \gamma_1 \frac{1 + \xi_{11}\eta_{11}V_f}{1 - \eta_{11}V_f} E_m \quad (14)$$

$$E_{22} = \gamma_2 \frac{1 + \xi_{22}\eta_{22}V_f}{1 - \eta_{22}V_f} E_m \quad (15)$$

$$G_{12} = \gamma_3 \frac{1}{1 - \eta_{12}V_f} G_m \quad (16)$$

5.4 แบบจำลอง Mori-Tanaka

แบบจำลองของ Mori-Tanaka เป็นแบบจำลองหนึ่งที่มีถูกนำมาใช้ประเมินหาสมบัติยังผลของความยืดหยุ่นและการเหือนของวัสดุเชิงประกอบ ที่มีการเสริมแรงด้วยผงอนุภาค (Particle) และประเมินหาสมบัติยังผลดังแสดงในสมการต่อไปนี้ [41] - [42]

$$E_c = \frac{9K_{eff}G_{eff}}{3K_{eff} + G_{eff}} \quad (17)$$

$$G_{eff} = G_m + \frac{V_f(G_f - G_m)}{1 + (1 - V_f)((G_f - G_m)/(G_f + f_m))} \quad (18)$$

$$K_{eff} = K_m + \frac{V_f(K_f - K_m)}{1 + (1 - V_f)(3(K_f - K_m)/(3K_m + 4G_m))} \quad (19)$$

โดยที่ f_m, K_m, K_f, G_m, G_f สามารถหาได้ตามสมการดังนี้

$$f_m = \frac{G_m(9K_m + 8G_m)}{6(K_m + 2G_m)} \quad (20)$$

$$K_m = \frac{E_m}{3(1 + 2\nu_m)}, \quad K_f = \frac{E_f}{3(1 + 2\nu_f)}, \quad (21)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}, \quad G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)}$$

จากแบบจำลองต่าง ๆ ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประเมินหาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบจากวัสดุแกรฟีน แต่แบบจำลองเหล่านั้นต่างมีข้อจำกัดต่อการพิจารณาวัสดุ ซึ่งส่งผลทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินสมบัติของวัสดุมีความแตกต่างกันออกไป ผลลัพธ์ของแบบจำลองต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus) ของวัสดุประกอบของพอลิเมอร์กับแกรฟีนในสัดส่วนน้ำหนัก 0.1 % (w%)

Models	Theoretical	Experimental [45]	Error (%)
Modified Halpin-Tsai model [45]	3.23	3.74 GPa	-13.6
Rule of mixture [22-24]	3.28	-	-12.3
Modified Halpin-Tsai model [22-24]	3.83	-	2.4
Mori-Tanaka model [22-24]	3.37	-	-9.9

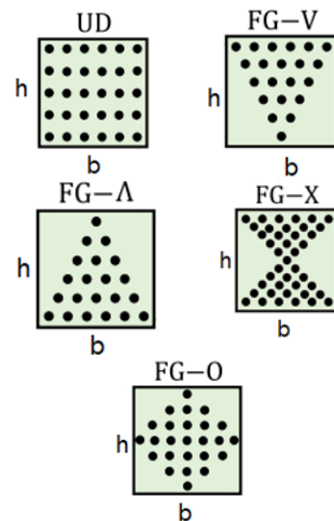
6. ผลการศึกษาวัสดุแกรฟีนในโครงสร้างคานวัสดุเชิงประกอบ

ในส่วนนี้เป็นการนำเสนอผลวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวข้องกับวัสดุแกรฟีนในโครงสร้างประเภทคานที่สร้างขึ้นจากวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) ดังแสดงตัวอย่างของหน้าตัดโครงสร้างคานวัสดุเชิงประกอบในรูปที่ 8 และ 10 ที่ประกอบขึ้นจากการผสมผสานกันระหว่างวัสดุเนื้อหลักพอลิเมอร์และวัสดุเสริมแรงประเภทวัสดุแกรฟีนในชั้นส่วนผสมต่าง ๆ ที่มีความแตกต่างกันไปตามทิศทางความหนาของโครงสร้างคาน สำหรับผลการศึกษาในหัวข้อนี้จะเน้นการวิเคราะห์โครงสร้างคานด้านต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์การดัด (Bending analysis) การวิเคราะห์การโก่งเดาะ (Buckling analysis) และการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration analysis) ตามลำดับ

6.1 ผลการศึกษาวัสดุแกรฟีนในโครงสร้างคานวัสดุเชิงประกอบ

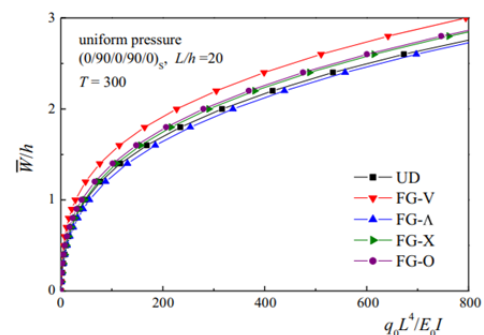
ในปี ค.ศ. 2017 Shen และ คณะ [46] ได้ศึกษาปัญหาการดัดไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear bending) และปัญหาหลังการโก่งเดาะ (Postbuckling) อันเนื่องมาจากอิทธิพลอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรม

ของโครงสร้างคานที่สร้างมาจากวัสดุแกรฟีนเสริมแรงแบบ FGMs โดยลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบชิ้นบันได (Piece-wise) และพิจารณาวางตัวอยู่บนฐานรากยืดหยุ่น (Elastic foundations) สมบัติเชิงกลของโครงสร้างถูกใช้ตามแบบจำลองของ Halpin-Tsai model จากผลเฉลยทางตัวเลขของปัญหาการดัดในรูปแบบการจัดเรียงส่วนผสมของวัสดุแกรฟีนในชั้นโครงสร้างตามทิศทางของความหนาแบบต่าง ๆ คือ UD, FG-V, FG-A, FG-X และ FG-O ดังแสดงในรูป 11

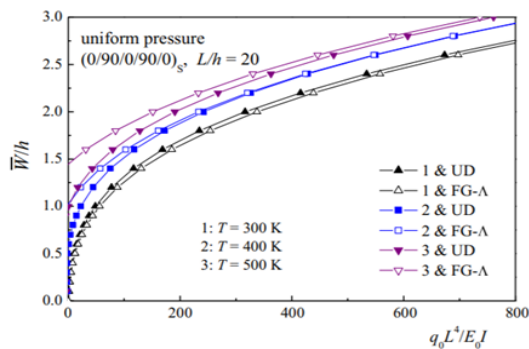


รูปที่ 11 รูปแบบการจัดเรียงส่วนผสมวัสดุแกรฟีนในชั้นโครงสร้าง

ในเงื่อนไขอุณหภูมิเดียวและเงื่อนไขของอุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างคานที่มีรูปแบบการเสริมแรงแบบ A ให้ผลต้านการดัดสูงสุด

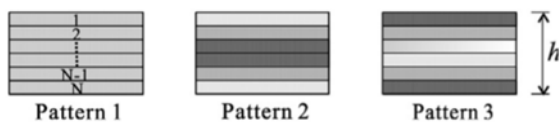


รูปที่ 12 ผลการดัดของโครงสร้างภายใต้อุณหภูมิ 300 เคลวิน (K) [46]



รูปที่ 13 ผลการดัดของโครงสร้างภายใต้อุณหภูมิ 300 เคลวิน (K) [46]

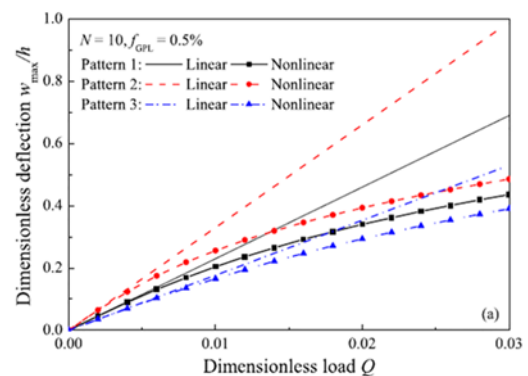
ในปี ค.ศ. 2017 Feng และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับปัญหาการดัดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear bending) กับโครงสร้างคานแบบหลายชั้นที่สร้างมาจากวัสดุพอลิเมอร์และวัสดุแกรไฟน์เสริมแรงมีลักษณะรูปแบบทั้งหมด 3 รูปแบบคือ รูปแบบที่ 1 (Pattern 1) คือรูปแบบที่กระจายสัดส่วนวัสดุแกรไฟน์เท่ากันทุกชั้น ส่วนรูปแบบที่ 2 และ 3 (Pattern 2 และ 3) จะถูกกระจายตามแบบวัสดุ FGMs โดยรูปแบบโครงสร้างของการจัดเรียงชั้นดังแสดงดังในรูปที่ 14 การประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างนี้ถูกประเมินภายใต้ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปของ Timoshenko beam theory จากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าลักษณะการเสริมแรงวัสดุแกรไฟน์แบบที่ 3 ให้ผลการดัดของโครงสร้างต่ำสุด เนื่องจากมีสัดส่วนปริมาณของวัสดุแกรไฟน์มากบริเวณผิวบนและล่างของโครงสร้าง ดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 15 ตามลำดับ



รูปที่ 14 รูปแบบการจัดเรียงวัสดุแกรไฟน์ในชั้นวัสดุพอลิเมอร์ [22]

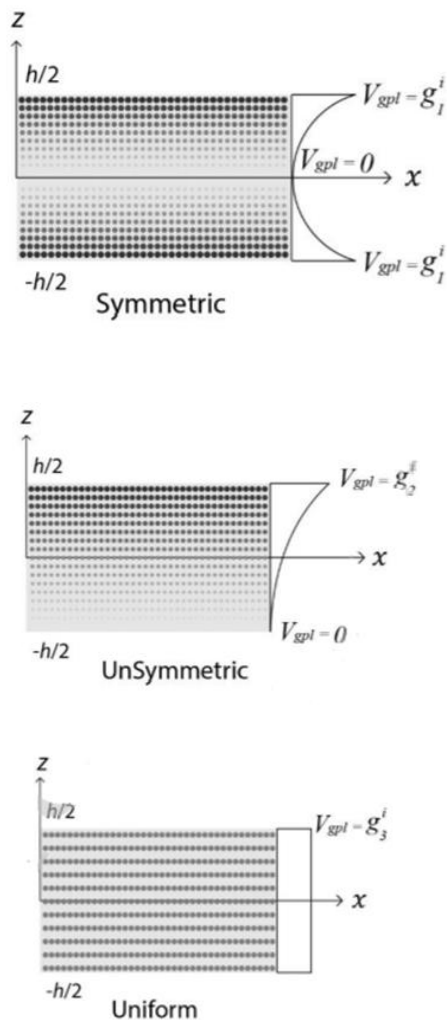
ในปี ค.ศ. 2018 Rafiee [47] ที่ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมของโครงสร้างคานที่พัฒนาสร้างขึ้นมาจากวัสดุหลายส่วน คือ วัสดุแกรไฟน์ วัสดุเส้นใย และวัสดุพอลิเมอร์ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของวัสดุ

แกรไฟน์ที่มีต่อผลการตอบสนองของโครงสร้างทางด้านการดัด (Bending) การสั่นสะเทือน (Vibration) รวมถึงการโก่งเดาะ (Buckling) ซึ่งผลเฉลยของพฤติกรรมต่าง ๆ ถูกพิจารณาอยู่บนทฤษฎีการเปลี่ยนรูปแบบ Euler-Bernoulli theory จากผลเฉลยที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุแกรไฟน์ในโครงสร้างส่งผลทำให้ประสิทธิภาพด้านต้านทานการดัด และการสั่นสะเทือนของโครงสร้างมีแนวโน้มที่ดีขึ้น ส่วนผลการวิเคราะห์การโก่งเดาะที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยทางความร้อนพบว่า การเพิ่มวัสดุแกรไฟน์ในโครงสร้างทำให้สมบัติของแรงวิกฤตลดลง



รูปที่ 15 อิทธิพลการจัดเรียงวัสดุแกรไฟน์ในชั้นโครงสร้างต่อพฤติกรรมการดัด [22]

ในปี ค.ศ. 2020 Anirudh และคณะ [48] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานโค้ง (Curved beam) ที่พัฒนาสร้างขึ้นมาจากวัสดุโลหะและมีการกระจายรูพรุนในโครงสร้างแบบแบบสมมาตร (Symmetric) แบบไม่สมมาตร (Unsymmetric) และแบบคงที่ (Uniform) ตามลำดับ โดยลักษณะของรูพรุนเหล่านี้จะถูกนำวัสดุแกรไฟน์มาเสริมเติมเพื่อให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราส่วนความยาวของคาน (slenderness ratio) สัดส่วนน้ำหนักของวัสดุแกรไฟน์ (Weight fraction) ระดับความปริมาณรูพรุน (Porosity) และเงื่อนไขขอบเขตแบบต่าง ๆ พบว่ารูปแบบของการกระจายของวัสดุแกรไฟน์มีส่วนสำคัญต่อลักษณะการดัดของโครงสร้าง ความแข็งแรงของโครงสร้างสามารถได้จากการเพิ่มวัสดุแกรไฟน์เข้าไปในส่วนของรูพรุน ลักษณะของรูพรุนวัสดุแกรไฟน์มีผลต่อระดับการดัดของโครงสร้าง



รูปที่ 16 ลักษณะรูปแบบการกระจายวัสดุแกรฟีนในโครงสร้างโลหะพูน [48]

ในปี ค.ศ. 2021 Fouaidi และคณะ [49] ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการดัดของโครงสร้างคานที่สร้างมาจากวัสดุพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยวัสดุแกรฟีนที่มีลักษณะรูปแบบของการกระจายตัวในพอลิเมอร์แบบต่าง ๆ คือ UD, FG-O, FG-V, FG-X โดยสมบัติของโครงสร้างจะถูกประเมินจากแบบจำลองของ Halpin-Tsai model และใช้ทฤษฎีการเสียรูปของโครงสร้างแบบเฉือนลำดับที่หนึ่ง (First-order shear deformation, FSDT) เพื่อมาสร้างสมการควบคุมระบบของโครงสร้าง โดยสมการควบคุมจะถูกนำมาแก้ไขด้วยวิธีการ Multiquadric radial basis function (MQRBF) method จากผล

การศึกษาที่เกี่ยวกับสัดส่วนวัสดุแกรฟีน และรูปแบบการกระจายตัวต่อพฤติกรรมการดัดของโครงสร้างรวมถึงปัจจัยด้านการออกแบบสัดส่วนความยาวต่อความหนา ภาระ เงื่อนไขขอบเขต พบว่าการเพิ่มสัดส่วนทางน้ำหนักของวัสดุแกรฟีนในระดับที่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพด้านการดัดของโครงสร้างให้ดีขึ้น รวมทั้งสมบัติทางด้านการสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่ดีขึ้นเช่นกัน [47]

6.2 การวิเคราะห์การโก่งเดาะ (Buckling analysis)

สำหรับปัญหาของการโก่งเดาะเป็นที่สำคัญของโครงสร้างที่รับภาระภายใต้แรงกด (Compression load) จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุแกรฟีนกับปัญหาการโก่งเดาะของโครงสร้าง พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เริ่มปี ค.ศ. 2017 เป็นต้นมา ซึ่งก็สอดคล้องกับข้อมูลกับของ Web of science ที่ได้รายงานสภาวะของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวัสดุแกรฟีน

ในปี ค.ศ. 2017 Yang และคณะ [50] ที่ได้ทำการสำรวจพฤติกรรมการโก่งเดาะ (Buckling) และหลังโก่งเดาะ (Postbuckling) ของคานที่สร้างมาจากวัสดุพอลิเมอร์กับวัสดุเสริมแรงแกรฟีน (Graphene) ในรูปแบบ FGMs หลากหลายรูปแบบ โดยรูปแบบของการกระจายตัววัสดุแกรฟีนจะกำหนดให้ไปตามทิศทางของความหนา ส่วนสมบัติของวัสดุจะถูกประเมินจากแบบจำลองของ Halpin-Tsai model อีกทั้งการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างนี้จะอยู่ภายใต้ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปลำดับที่ 1 (FSDT) ซึ่งปัจจัยที่ให้ความสนใจในการศึกษาคือ อิทธิพลของรูปแบบการกระจายตัวของวัสดุแกรฟีน สัดส่วนของน้ำหนักวัสดุแกรฟีน สัดส่วนทางรูปทรงของวัสดุแกรฟีน และปัจจัยการออกแบบ สัดส่วนความยาวของคาน เงื่อนไขขอบเขตของการรองรับ ที่มีต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะและหลังโก่งเดาะ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนน้ำหนักของวัสดุแกรฟีนเพียงเล็กน้อยมีนัยสำคัญต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการโก่งเดาะ และหลังการโก่งเดาะของคานประกอบวัสดุพอลิเมอร์ นอกจากผลของอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (w/t) ที่มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 4 ถึง 103 มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของการโก่งเดาะโครงสร้าง (P_{cr})

ในปี ค.ศ. 2017 Kitipornchai และคณะ [51] ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสั่นสะเทือนและการโก่งเดาะของคานที่สร้างมาจาก Metal foam ซึ่งเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่เป็นโฟมโลหะและประกอบด้วยโลหะแข็งที่มีรูพรุนที่เต็มไปด้วยก๊าซ และวัสดุนี้มักจะนำไป

สร้างเป็นโครงสร้างน้ำหนักเบา (Lightweight structures) ที่นำไปใช้จัดการทางความร้อน การดูดซับพลังงานที่ดี ดังนั้นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุนี้สามารถเพิ่มโดยการเติมวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงดังเช่น วัสดุแกรไฟินเข้าไปผสมในโครงสร้าง ซึ่งการตรวจสอบพฤติกรรมของโครงสร้างจะถูกประเมินทางทฤษฎีของ Timoshenko beam theory และสมบัติของวัสดุผสมจะถูกประเมินจากการใช้แบบจำลองของ Halpin-Tsai model กับ การแก้ปัญหาด้วยวิธีการทาง Ritz method พารามิเตอร์ที่ให้ความสนใจในการศึกษา คือ สัดส่วนน้ำหนักของวัสดุแกรไฟิน (Weight fraction) รูปแบบการจัดเรียงวัสดุแกรไฟิน (Pattern) สัดส่วนทางรูปทรง ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มสัดส่วนน้ำหนักของวัสดุแกรไฟินเพียงปริมาณเล็กน้อยสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างคานวัสดุพูนได้ ดังแสดงค่าการเพิ่มขึ้นของแรงวิกฤต (Critical load) ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังเพิ่มความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของโครงสร้างนี้ ส่วนลักษณะรูปแบบการจัดเรียงของวัสดุแกรไฟินก็เป็นไปตามทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยอื่น ๆ

ในปี ค.ศ. 2019 Song และคณะ [52] ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการโก่งคดและหลังการโก่งคดจากอิทธิพลของความร้อนกับโครงสร้างคานที่สร้างมาจากวัสดุพอลิเมอร์และเสริมแรงด้วยวัสดุแกรไฟินในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งการศึกษานี้ได้เน้นโครงสร้างมีการเกิดรอยร้าว (Crack) บนผิวของโครงสร้าง ผลการศึกษาทั้งหมดถูกพิจารณาอยู่ภายใต้ทฤษฎี First-order shear deformation (FSDT) สำหรับพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ อิทธิพลความยาวของรอยร้าว (Crack length) รูปแบบการกระจายวัสดุแกรไฟิน (Pattern) สัดส่วนน้ำหนักของวัสดุแกรไฟิน (Weight fraction) สัดส่วนทางรูปทรงวัสดุแกรไฟิน ($l/w, l/t$) เงื่อนไขขอบเขตการรองรับ (Boundary condition) และรวมไปถึงอิทธิพลของความแข็งแรงของฐานราก (Foundation) ผลการศึกษาพบว่าความยาวของรอยร้าวมีผลทำให้ค่าแรงวิกฤต (Critical buckling) ของโครงสร้างลดลง นอกจากนี้การเพิ่มสัดส่วนวัสดุแกรไฟินในโครงสร้างอาจทำให้ค่าแรงวิกฤตของโครงสร้างลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rafiee [47] ดังแสดงผลในตารางที่ 3 ส่วนพฤติกรรม การโก่งคด และหลังการโก่งคดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในโครงสร้างที่มีรอยร้าวพบว่า ลักษณะการกระจายวัสดุแกรไฟินที่มีชั้นผิวบนและล่างที่มีสัดส่วนปริมาณน้ำหนักที่ต่ำกว่าจะมีการตอบสนองต่อการโก่งคดและหลังการโก่งคดมากกว่า และในปีเดียวกันงานวิจัย

Song และคณะ [53] ก็ได้ขยายขอบเขตของปัญหาไปสู่การตรวจสอบพฤติกรรมการสั่นสะเทือน รวมถึงการโก่งคดของคานที่มีรอยร้าวบนโครงสร้างในวัสดุเดียวกันที่วางตัวอยู่บนฐานรากยืดหยุ่น (Elastic foundation) :โดยปัจจัยที่พิจารณาการต่อพฤติกรรม การสั่นสะเทือนและการโก่งคดในการศึกษานี้คือ อิทธิพลของตำแหน่งรอยร้าว (Crack location) สัดส่วนทางรูปทรงวัสดุแกรไฟิน (Size and geometry) เงื่อนไขขอบเขตการรองรับ (Boundary condition) สัดส่วนน้ำหนักวัสดุแกรไฟิน (Weight fraction) รูปแบบการกระจาย (Pattern) และอิทธิพลของความแข็งแรงของฐานราก (Foundation stiffness) ผลการศึกษาพบว่า การลดลงของความถี่ธรรมชาติและแรงวิกฤตของโครงสร้างคานเมื่อมีขนาดของรอยร้าวเพิ่มมากขึ้น ส่วนการเพิ่มสัดส่วนของวัสดุแกรไฟินมีส่วนทำให้สมบัติเหล่านี้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อให้สัดส่วนน้ำหนักวัสดุแกรไฟินมากใกล้บริเวณผิวด้านนอกของโครงสร้าง ส่วนเงื่อนไขขอบเขตที่แตกต่างกันก็ให้ผลลัพธ์ของความถี่และแรงวิกฤตแตกต่างกันออกไป

ในปี ค.ศ. 2020 Tam และคณะ [54] ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการดัดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear bending) ของโครงสร้างคานที่เสริมแรงด้วยวัสดุแกรไฟินแบบ FGMs ซึ่งโครงสร้างคานนี้ได้พิจารณาถึงปัจจัยของโครงสร้างที่เกิดรอยร้าว สำหรับปัจจัยที่นำมาพิจารณาต่อพฤติกรรมการดัดมีหลาย ปัจจัยได้แก่ ความลึกและตำแหน่งรอยร้าว รูปแบบการจัดเรียงวัสดุแกรไฟิน สัดส่วนน้ำหนักวัสดุแกรไฟิน และสัดส่วนทางรูปทรงของวัสดุแกรไฟิน จากปัจจัยเหล่านี้สรุปได้ว่า รูปแบบการจัดเรียงแบบ FG-X, สัดส่วนน้ำหนัก, สัดส่วนทางรูปทรงที่สูง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านการดัดของโครงสร้างให้สูงขึ้น

6.3 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration analysis)

ในปัญหาการสั่นสะเทือนดัด (Flexural vibration) คือการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในทิศทางนอกระนาบ และเป็นปัญหาหนึ่งที่ทำให้ความสนใจต่อพฤติกรรมนี้ของโครงสร้าง สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการสั่นสะเทือนดัดกับวัสดุแกรไฟินในโครงสร้างสามารถพบในงานวิจัยดังนี้

ในปี ค.ศ. 2017 Kitipornchai และคณะ [51] ที่ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างคานน้ำหนักเบาที่สร้างมาจาก Metal foam โดยโครงสร้างนี้ได้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างด้วยการเสริมแรงด้วยวัสดุแกรไฟิน

ซึ่งการเสริมแรงนี้ได้ถูกออกแบบให้มีรูปแบบการเสริมแรงในลักษณะต่าง ๆ ต่อพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบการจัดเรียงวัสดุแกรฟีนที่มีสัดส่วนของน้ำหนักที่มากอยู่ชั้นที่ใกล้กับผิวนอกของโครงสร้างส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง

ในปี ค.ศ. 2017 Wu และคณะ [55] ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างคานที่มีวัสดุแกรฟีนเสริมแรงในชั้นต่าง ๆ ภายใต้สภาพแวดล้อมของอุณหภูมิ โดยการตรวจสอบพฤติกรรมของโครงสร้างจะถูกตรวจสอบบนพื้นฐานของทฤษฎี FSDT ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบการกระจายสัดส่วนและสัดส่วนน้ำหนักของวัสดุแกรฟีนมีความสำคัญต่อพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง ส่วนปัจจัยทางด้านสัดส่วนทางรูปทรงของวัสดุแกรฟีนก็มีผลต่อพฤติกรรมการสั่นสะเทือนไปในแนวทางที่ดีเมื่อใช้สัดส่วนทางรูปทรงมากกว่า 10^3

ในปี ค.ศ. 2019 Wang และคณะ [56] ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุแกรฟีนภายใต้การรบกวนน้ำหนักเคลื่อนที่บนคาน (Moving masses) จากวิธีการทำนายทางแบบจำลองคณิตศาสตร์ ผลจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มสัดส่วนน้ำหนักของวัสดุแกรฟีนในอัตราที่ต่ำสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของความแข็งแกร่งของโครงสร้าง และการใช้รูปแบบการกระจายสัดส่วนของวัสดุแกรฟีนที่ใกล้กับผิวด้านบนและด้านล่างสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองการสั่นสะเทือนของโครงสร้างดีขึ้น ส่วนการใช้สัดส่วนทางรูปทรงของวัสดุแกรฟีนก็มีความสำคัญต่อพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้าง

ในปี ค.ศ. 2019 Song และคณะ [53] ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสั่นสะเทือนกับโครงสร้างคานที่มีรอยร้าวบนผิวของโครงสร้าง ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของรอยร้าวส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างลดลง และแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพนี้สามารถเพิ่มโดยการเสริมแรงวัสดุแกรฟีนเพียงสัดส่วนที่ต่ำ ส่วนรูปแบบของการจัดเรียงวัสดุเสริมแรงในรูปแบบต่าง ๆ ก็พบว่าควรเลือกใช้รูปแบบที่มีสัดส่วนของวัสดุแกรฟีนมากใกล้กับชั้นผิวด้านบนและล่างของโครงสร้าง

7. สรุป

จากผลงานวิจัยจำนวนมากได้แสดงถึงความสำคัญและแนวโน้มการใช้งานของวัสดุแกรฟีนที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ในโครงสร้างทางวิศวกรรมแบบคานที่มีน้ำหนักเบาหรือกลุ่มของโครงสร้างน้ำหนักเบา (Lightweight structures) และสร้างมาจากวัสดุพอลิเมอร์หรือกลุ่มของวัสดุพูน เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีประสิทธิภาพทางน้ำหนักที่ดี นั่นคือ น้ำหนักเบา แต่ทางตรงกันข้ามมีความแข็งแรงที่ต่ำ ดังนั้นแนวทางส่วนใหญ่จึงเลือกวัสดุแกรฟีนมาเสริมความแข็งแรงและความแข็งแกร่งให้กับโครงสร้างกลุ่มนี้มากขึ้น อีกทั้งรูปแบบการนำวัสดุมาผสมผสานกันระหว่างวัสดุพอลิเมอร์กับวัสดุแกรฟีนมักเป็นไปตามแบบวัสดุสมบัติเชิงหน้าที่ (Functionally graded materials, FGMs) ตามการพิสูจน์ในงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับรูปแบบการผสมผสานของวัสดุ และทำให้รูปแบบนี้ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางมากขึ้นสำหรับนำไปสร้างวัสดุประกอบต่าง ๆ ในปัจจุบัน สำหรับประเด็นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุแกรฟีนได้แก่ กระบวนการสร้าง (Fabrication) สัดส่วนทางน้ำหนัก (Weight fraction) อัตราส่วนทางรูปทรง (Aspect ratio) รูปแบบการกระจาย (Distributed pattern) ได้นำเสนอในงานวิจัยจำนวนมาก และพบว่าการใช้สัดส่วนทางน้ำหนักที่ต่ำส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงสร้างด้านการดัด (Bending) การโก่งเดาะ (Buckling) และการสั่นสะเทือน (Vibration) ส่วนลักษณะรูปแบบของการจัดเรียงที่มีผลต่อประสิทธิภาพในปัญหาดังกล่าวควรเลือกใช้รูปแบบที่มีการกระจายสัดส่วนน้ำหนักวัสดุแกรฟีนมากอยู่ในชั้นที่ใกล้กับผิวด้านนอกของโครงสร้างมากที่สุด ส่วนปัญหาการเพิ่มขึ้นของวัสดุแกรฟีนในปัญหาการโด่งภายใต้อุณหภูมิพบว่าให้ผลลัพธ์ค่อนข้างแย่ ส่วนปัจจัยทางรูปทรงพบว่าให้ผลดีเมื่อใช้สัดส่วนที่มีค่าเท่ากับ 10^3

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Simsek, "Fundamental frequency analysis of functionally graded beams by using different higher-order beam theories", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, pp. 697-705, 2010.
- [2] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, vol. 354, pp. 56-58, 1991.
- [3] K. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva and A.A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films", *Science*, vol. 306(5696), pp. 666-669, 2004.
- [4] S. Zhaoa, Z. Zhaob, Z. Yangc, L. Ked, S. Kitipornchaia and J. Yangb, "Functionally graded graphene reinforced composite structures: A review", *Engineering Structures*, vol. 210, 2020.
- [5] แมนมนัส ศรีแก้ว และสายันต์ แสงสุวรรณ, "วัสดุมหัศจรรย์แกรฟีน : กลยุทธ์การสังเคราะห์สมบัติการพัฒนาการพิสูจน์เอกลักษณ์และการประยุกต์ใช้", *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม-สิงหาคม, หน้า 39-49, 2563.

- [6] A.K. Geim and K.S. Novoselov, "The rise of graphen", *Nat Mater*, vol. 6, pp. 183-191, 2007.
- [7] C. Lee, X. Wei, J.W. Kysar and J. Hone, "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer grapheme", *Science*, vol. 321, pp. 385-388, 2008.
- [8] S.P. Koenig, N.G. Boddeti, M.L. Dunn and J.S. Bunch, "Ultrastrong adhesion of grapheme membranes", *Nat Nanotechnol*, vol. 6, pp. 543-546, 2011.
- [9] A. Politano, A.R. Marino, D. Campi, D. Farias, R. Miranda and G. Chiarello, "Elastic properties of a macroscopic grapheme sample from phonon dispersion measurements", *Carbon*, vol. 50, pp. 4903-4910, 2012.
- [10] G.V. Lier, C.V. Alsenoy, V.V. Doren and P. Geerlings, "Ab initio study of the elastic properties of single-walled carbon nanotubes and grapheme", *Chem Phys Lett*, vol. 326, pp. 181-185, 2000.
- [11] C. Li and T-W. Chou, "A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes", *Int. J. Solids Struct.*, vol. 40, pp. 2487-2499, 2003.
- [12] F. Liu, P. Ming and J. Li, "Ab initio calculation of ideal strength and phonon instability of grapheme under tension", *Phys. Rev. B*, vol. 76, 2007.
- [13] M.M. Shokrieh and R. Rafiee, "Prediction of Young's modulus of grapheme sheets and carbon nanotubes using nanoscale continuum mechanics approach", *Mater. Des.*, vol. 31, pp. 790-795, 2010.
- [14] D.G. Kvashnin and P.B. Sorokin, "Effect of ultrahigh stiffness of defective grapheme from atomistic point of view", *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 6, pp. 2384-2387, 2015.
- [15] J.N. Reddy, "Mechanics of Laminated composite plates and shells Theory and Analysis", 2nd ed., U.S.A: CRC Press, 2004.
- [16] M. Niino, T. Hirai and R. Watanabe, "The functionally gradient materials", *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, vol. 13, pp.257-264, 1987.
- [17] S.S. Wang, "Fracture mechanics for delamination problems in composite materials," *Journal of Composite Materials*, vol. 17(3), pp. 210-223, 1983.
- [18] A. Gupta, and M. Talha, "Recent development in modeling and analysis of materials and structures". *Progress in Aerospace Sciences*, vol.79, pp. 1-14, 2015.
- [19] A. Gupta, and M. Talha, "Recent development in modeling and analysis of materials and structures". *Progress in Aerospace Sciences*, vol.79, pp. 1-14, 2015.
- [20] M. Naebe, and K. Shirvanimoghaddam, "Functionally graded materials: A review of fabrication and properties," *Applied Materials Today*, vol. 5, pp.223-245, 2016.
- [21] Y. Miyamoto, W.A. Kaysser, B.H. Rabin and A. Kawasaki, "Functionally graded material: design processing and applications". New York: Springer Science Business Media, 1999.
- [22] C. Feng, S. Kitipornchai and J. Yang, "Nonlinear bending of polymer nano composite beams reinforce with non-uniformly distributed grapheme platelets (GPLs)", *Compos. B Eng.*, vol. 110, pp. 132-140, 2017.
- [23] M. Song, S. Kitipornchai and J. Yang, "Free and forced vibrations of functionally graded polymer composite plates reinforced With grapheme nanoplatelets", *Compos. Struct.*, vol. 159, pp. 579-588, 2017.
- [24] J. Yang, H. Wu and S. Kitipornchai, "Buckling and postbuckling of functionally graded multilayer grapheme platelet-reinforced composite beams", *Compos. Struct.*, vol. 161, pp. 111-118, 2017.
- [25] M. Piggott, "Load bearing fiber composites", Moscow: Kluwer Academic Publisher; 2002.
- [26] R.M. Jones, "Mechanics of composite materials", Taylor & Francis, 1999.
- [27] V. Ungbhakorn and N. Wattanasakulpong, "Thermo-elastic vibration analysis of third-order shear deformable functionally Graded plates with distributed patch mass under thermal environment", *Applied Acoustics*, vol. 74, pp. 1045-1059, 2013.
- [28] Z.X. Lei, L.W. Zhang and K.M. Liew, "Analysis of laminated CNT reinforced functionally graded plates using the element-free kp-Riz method", *Composites Part B*, vol. 84, pp. 211-221, 2016.
- [29] L. Li, L. Xiaobai and H. Yujin, "Free vibration analysis of nonlocal strain gradient beams made of functionally graded material", *International Journal of Engineering Science*, vol. 102, pp. 77-92, 2016.
- [30] M. Royal, B. Shubhankar and N.S. Kashi, "Stress and deformation of functionally graded rotating Disk based on modified rule of mixture", *Materialstoday:PROCEEDINGS*, vol. 9, pp. 17778-17785, 2018.
- [31] M.B. Yihumie, E.W. Dereje, T.C. Ewnetu, A.A. Solomon, K.S. Senthil and P. Velmurugan, "Effect of volumetric fraction index on temperature distribution in thick-walled functionally graded material made cylinder", *Materialstoday:PROCEEDINGS*, vol. 46, pp. 7442-7447, 2021.
- [32] H.L. Cox, "The elasticity and strength of paper and other fibrous materials", *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 3, pp. 72, 1952.
- [33] T. Abhishek and K.S. Sunil, "Modified shear lag theory based fatigue crack growth life prediction model for short-fiber reinforced metal matrix composites", *International Journal of Fatigue*, vol. 70, pp. 123-129, 2015.
- [34] J.C. Halpin, "Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites", *J. Compos. Mater.*, vol. 3, pp. 732-734, 1969.
- [35] J.C. Halpin and J.L. Kardos, "The Halpin-Tsai equations: a review", *Polym Eng. Sci.*, vol. 16, pp. 344-352, 1976.
- [36] E.Farzaad and D. Ali, "Vibration analysis of multi-scale hybrid nanocomposite plates based on a Halpin-Tsai homogenization model", *Composites Part B: Engineering*, vol. 173, 2019.
- [37] Z. Yasser, Y.R. Kyong and P. Soo-Jin, "A developed equation for electrical conductivity of polymer carbon nanotubes (CNT) nanocomposites based on Halpin-Tsai model", *Results in Physics*, vol. 14, 2019.
- [38] F. Mustapha, J. Mohammad, Z. Abdelkadir and B. Naoual, "Bending analysis of functionally graded graphene oxide powder-reinforced composite beams using a meshfree method", *Aerospace Science and Technology*, vol. 110, 2021.
- [39] J.D. Eshelby, "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems", *Proc. Roy. Soc. London.*, vol. 241, pp. 379-396, 1957.
- [40] L. Sergey, V.B. Dmitrii, L. Anatolii and A. Elias, "Eshelby's inclusion problem in the gradient theory of elasticity: Applications to composite materials", *International Journal of Engineering Science*, vol. 49, pp. 1517-1525, 2011.
- [41] T. Mori and K. Tanaka, "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions", *Acta Metall.*, Vol. 21, pp. 571-574, 1973.
- [42] V.P. Tran, S. Brisard, Guilleminot, K. Sab, "Mori-Tanaka estimates of the effective elastic properties of stress-gradient composites", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 146, pp. 55-68, 2018.
- [43] R. Sun, L. Li, S. Zhao, C. Feng, S. Kitipornchai and J. Yang, "Temperature-dependent mechanical properties of defective grapheme Reinforced polymer nanocomposite", *Mech. Adv. Mater. Struct.*, pp. 1-10, 2019.
- [44] F. Lin, Y. Xiang and H-S. Shen, "Temperature dependent mechanical properties of grapheme reinforced polymer nanocomposite-A molecular dynamics simulation", *Compos Part B Eng*, vol. 111, pp. 261-269, 2017.
- [45] M.A. Rafiee, J. Rafiee, Z. Wang, H. Song, Z-Z. Yu and N. Koratkar, "Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low grapheme content", *ACS Nano*, vol. 3, pp. 3884-3890, 2009.
- [46] H-S. Shen, F. Lin and Y. Xiang, "Nonlinear bending and thermal

- postbuckling of functionally graded graphene-reinforced composite laminated beams resting on elastic foundations”, *Engineering Structures*, vol. 140, pp. 89-97, 2017.
- [47] 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.
- [48] B. Anirudh, T.B. Zineb, O. Polit, M. Ganapathi and G. Prateek, “Nonlinear bending of porous curved beams reinforced by functionally graded nanocomposite graphene platelets applying an efficient shear flexible finite element approach”, *Mechanics*, vol. 119, 2020.
- [49] M. Fouaidi, M. Jamal, A. Zaite and N. Beloaggadia, “Bending analysis of functionally graded graphene oxide powder-reinforced composite beams using a meshfree method”, *Aerospace Science and Technology*, vol. 110, 2021
- [50] J. Yang, H. Wu and S. Kitipornchai, “Buckling and postbuckling of functionally graded multilayer graphene platelet-reinforced composite beams”, *Composite Structures*, vol. 161, pp. 111-118, 2017.
- [51] S. Kitipornchai, D. Chen and J. Yang, “Free vibration and elastic buckling of functionally graded porous beams reinforced by graphene platelets”, *Materials & Design*, vol. 116, pp. 656-665, 2017.
- [52] M. Song, L. Chen, J. Yang, W. Zhu and S. Kitipornchai, “Thermal buckling and postbuckling of edge-cracked functionally graded multilayer graphene nanocomposite beams on an elastic foundation”, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 161-162, 2019.
- [53] M. Song, L. Chen, J. Yang, W. Zhu and S. Kitipornchai, “Free vibration and buckling analyses of edge-cracked functionally graded multilayer graphene nanoplatelet-reinforced composite beams resting on an elastic foundation”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 458, pp. 89-108, 2019.
- [54] M. Tam, Z. Yang, S. Zhao, H. Zhang, Y. Zhang and J. Yang, “Nonlinear bending of elastically restrained functionally graded graphene nanoplatelet reinforced beams with an open edge crack”, *Thin-Walled Structures*, vol. 156, 2020.
- [55] H. Wu, J. Yang and S. Kitipornchai, “Dynamic instability of functionally graded multilayer graphene nanocomposite beams in thermal environment”, *Composite Structures*, vol. 162, pp. 244-254, 2017.
- [56] Y. Wang, K. Xie, T. Fu and C. Shi, “Vibration response of a functionally graded graphene nanoplatelet reinforced composite beam under two successive moving masses”, *Composite Structures*, vol. 209, pp. 928-939, 2019.



ประพนธ์ ทศพานนท์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี พ.ศ.2548 จบการศึกษาระดับปริญญาโท จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี พ.ศ.2547 จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี พ.ศ. 2562 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร งานวิจัยเน้นทางกลศาสตร์วัสดุคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาทางด้านการตัด การโค้งงอ และการสั่นสะเทือน การวิเคราะห์เชิงตัวเลข



จิตะพล หุยนันท์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ.2534 จบการศึกษาระดับปริญญาโทจาก Coventry University ประเทศอังกฤษ ปี พ.ศ.2540 จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก University of Sheffield ประเทศอังกฤษ ปี พ.ศ. 2547 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร งานวิจัยเน้นทางกลศาสตร์วัสดุประยุกต์ คอมพิวเตอร์ช่วยสำหรับการออกแบบและการผลิต การวิเคราะห์เชิงไฟไนท์เอลิเมนต์ การทดสอบและการวัดเชิงกล