

ANALISIS KARAKTERISTIK PENGEMBANGAN (SWELLING) PADA KOMPOSIT HIBRIDA AKIBAT PAPARAN ASAM: STUDI KASUS DENGAN DAN TANPA PERKUATAN NANOFILLER MWCNT

Abiyu Ramadhan ¹⁾, Iis Azizah ²⁾, Moh. Fikri Salwa Nafi' Kifni ¹⁾, Andoko ^{*1)}

- 1) Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang
2) Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang
E-mail: andoko.ft@um.ac.id

Abstrak

Komposit hibrida (serat karbon/kaca/kevlar) merupakan material penting di beberapa industri strategis, namun durabilitasnya rentan terhadap lingkungan asam yang diawali oleh penyerapan cairan (swelling). Penguatan dengan nanofiller multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) menjadi solusi menjanjikan, namun pengaruhnya terhadap mekanisme swelling sebagai pemicu degradasi belum dipahami secara mendalam. Penyerapan cairan oleh komposit polimer di lingkungan asam merupakan mekanisme awal yang memicu degradasi material. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan nanofiller MWCNT terhadap karakteristik swelling degree dan degradasi massa pada komposit yang direndam dalam larutan asam klorida (HCl) 1 M selama 28 hari. Dua jenis komposit difabrikasi: komposit murni (B) dan komposit yang diperkuat MWCNT (BM). Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan MWCNT secara signifikan meningkatkan durabilitas komposit melalui mekanisme ganda. Komposit BM menunjukkan swelling degree yang jauh lebih rendah dibandingkan komposit murni (B). Fenomena ini diatribusikan pada kemampuan MWCNT untuk mengisi rongga mikro, menciptakan struktur yang lebih padat. Komposit BM juga terbukti lebih unggul dalam menahan degradasi kimia, dengan persentase kehilangan massa yang lebih rendah. Penambahan MWCNT secara efektif meningkatkan ketahanan komposit dengan bertindak sebagai barrier difusi sekaligus penguat struktural yang mengurangi porositas. Temuan ini menggarisbawahi potensi besar MWCNT dan pentingnya optimasi dispersi nanofiller untuk memaksimalkan durabilitas komposit di lingkungan agresif.

Kata kunci: Komposit Hibrida, MWCNT, Swelling Degree, Penyerapan Asam, Degradasi.

Pendahuluan

Komposit hibrida berbasis serat karbon, kaca, dan kevlar telah menjadi material pilihan dalam berbagai industri strategis berkat kekuatan mekaniknya yang superior [1]. Namun, durabilitas material ini seringkali terancam oleh paparan lingkungan kimia yang agresif, khususnya medium asam, yang dapat memicu degradasi dan mempersingkat umur pakainya. Salah satu mekanisme fundamental yang mengawali proses degradasi adalah penyerapan (*absorption*) cairan oleh matriks polimer, sebuah fenomena yang dikenal sebagai *swelling*. Proses *swelling* ini tidak hanya menyebabkan perubahan dimensi, tetapi juga memfasilitasi masuknya agen korosif yang dapat merusak antarmuka serat-matriks dan matriks itu sendiri [2].

Untuk mengatasi masalah ini, berbagai inovasi telah dikembangkan. Pendekatan termutakhir yang paling menjanjikan adalah penguatan matriks polimer dengan *nanofiller*, di mana *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) menunjukkan potensi yang sangat besar. Penelitian telah membuktikan bahwa MWCNT mampu meningkatkan sifat mekanik [3], [4] dan ketahanan kimia material [5]. Pendekatan ini dipilih karena kemampuannya untuk memodifikasi properti matriks pada skala nano, yang diharapkan dapat memengaruhi perilaku penyerapan cairan.

Meskipun potensi MWCNT telah diakui, pemahaman mengenai pengaruhnya terhadap perilaku *swelling* pada sistem komposit hibrida yang kompleks di lingkungan asam masih sangat terbatas. Sebagian besar studi lebih berfokus pada hasil akhir degradasi (seperti kehilangan massa atau penurunan kekuatan) dan belum secara spesifik mengkaji mekanisme penyerapan cairan sebagai langkah awal degradasi [6], [7]. Dengan demikian, celah penelitian (*research gap*) yang krusial terletak pada kurangnya data kuantitatif dan pemahaman mengenai bagaimana MWCNT memengaruhi kinetika dan tingkat *swelling* pada komposit hibrida.

Penelitian ini dirancang untuk mengisi kesenjangan ilmiah tersebut. Kebaruan yang ditawarkan adalah analisis mendalam terhadap *swelling degree* sebagai parameter kunci untuk

memahami ketahanan awal komposit terhadap paparan asam. Dengan menganalisis kinetika penyerapan massa, penelitian ini akan memberikan pemahaman yang lebih fundamental mengenai mekanisme protektif yang diberikan oleh MWCNT dalam menghambat penetrasi medium asam.

Berdasarkan kebutuhan tersebut, maka penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan secara kuantitatif tingkat penyerapan cairan (*swelling degree*) pada komposit hibrida dengan dan tanpa penambahan 1% wt MWCNT saat direndam dalam larutan HCl 1 M. Hasilnya diharapkan dapat menyediakan data ilmiah mengenai mekanisme awal degradasi yang penting untuk pengembangan material komposit canggih yang lebih tahan lama [8].

Studi Pustaka

Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNT)

MWCNT telah digunakan secara luas untuk memperkuat komposit karena memberikan keunggulan signifikan dalam kekuatan mekanik dan ketahanan kimia. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penambahan MWCNT dalam matriks komposit dapat meningkatkan sifat mekanik secara substansial. Misalnya, sebuah studi pada tahun 2021 melaporkan bahwa penambahan MWCNT pada komposit besi meningkatkan kekuatan dan kekakuan material secara signifikan [9]. Selain itu, penelitian lain pada tahun 2020 menemukan bahwa penambahan MWCNT dan *graphene* nanoplatelets dalam matriks poliuretan meningkatkan modulus penyimpanan hingga 86% pada suhu 25 [10]. Fungsionalisasi MWCNT memungkinkan interaksi yang lebih baik dengan matriks, meningkatkan ikatan antar komponen dalam komposit, dan pada akhirnya memperkuat integritas strukturalnya. Penggunaan MWCNT sangat berguna dalam aplikasi industri yang memerlukan material kuat dan tahan lama, menjadikannya bahan aditif yang sangat berharga dalam pengembangan material komposit inovatif.

Komposit Serat Karbon, Serat Kaca, dan Kevlar

Komposit berbasis serat karbon, serat kaca, dan kevlar menawarkan keunggulan berupa kekuatan mekanik yang tinggi dan ketahanan terhadap lingkungan ekstrem [6]. Menurut Kojnoková et al [1], degradasi material komposit ini dalam medium asam lebih disebabkan oleh matriks resin daripada seratnya. Hal ini menunjukkan bahwa serat karbon, serat kaca, dan kevlar memiliki ketahanan intrinsik yang tinggi terhadap kondisi asam [11]. Keunggulan ketahanan ini menjadikan material komposit berbasis serat tersebut sangat potensial untuk aplikasi industri modern yang memerlukan material yang kuat dan tahan lama, seperti dalam industri otomotif, dirgantara, dan konstruksi. Dengan penambahan MWCNT, kekuatan dan ketahanan komposit ini dapat lebih ditingkatkan lagi, memastikan performa unggul dalam berbagai kondisi ekstrem.

Degradasi Material dalam Medium Asam

Degradasi material oleh medium asam menjadi salah satu tantangan dalam pengaplikasian komposit berbasis serat. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Jin et al. [2] mencatat penurunan kekuatan mekanik yang signifikan pada material GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) ketika terpapar alkali, menunjukkan bahwa komposit ini rentan terhadap serangan kimia. Pada lingkungan asam, degradasi material disebabkan serangan asam pada matriks resin, yang mengakibatkan penurunan integritas struktural dan kekuatan mekanik. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Shen et al. [8] menunjukkan pentingnya memahami mekanisme degradasi ini untuk mengembangkan komposit yang lebih tahan terhadap lingkungan asam dan alkali. Penelitian mendalam mengenai interaksi kimia antara medium asam dan komposit berbasis serat penting untuk meningkatkan ketahanan material, termasuk langkah-langkah seperti pemilihan resin yang lebih tahan terhadap asam atau penambahan aditif yang dapat memperlambat proses degradasi, menghasilkan material komposit yang lebih andal dan tahan lama khususnya dalam aplikasi yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap lingkungan yang korosif seperti dalam industri kimia dan kelautan.

Metodologi Penelitian

Material

Bahan-bahan yang digunakan untuk penelitian ini meliputi serat karbon tipe 3K *weave twill* 2/2 dengan spesifikasi 240 gsm dan serat kaca 600 gsm dari FRP Indonesia, serta kain Kevlar aramid tipe 1414 standar EN388:2003 180 gsm. Matriks yang digunakan yaitu resin epoksi dan *hardener* oleh Eposchon. Untuk *nanofiller*, digunakan *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) yang dibeli dari XFNano, China, serta aseton dari Sigma-Aldrich untuk difungsikan sebagai agen pendispersi. Seluruh material tersebut digunakan langsung sesuai kondisi saat diterima guna menjaga konsistensi dan reliabilitas dalam proses pembuatan struktur komposit.

Fabrikasi Komposit

MWCNT didispersikan ke dalam 100 mL aseton, kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik (*magnetic stirrer*) selama 1 jam pada suhu ruang. Proses sonikasi dilakukan menggunakan mesin *ultrasonic homogenizer* dari LABOCON dengan 100 W selama 10 menit. Campuran aseton dan MWCNT tersebut selanjutnya dicampurkan dengan resin epoksi dan diaduk pada kecepatan 2000 RPM dengan suhu 80°C hingga seluruh aseton penguap sepenuhnya. Campuran resin-MWCNT disonikasi kembali pada daya 100 W selama 1 jam untuk menghasilkan dispersi yang homogen, dilanjutkan dengan divakum selama 24 jam. Setelah itu, *hardener* ditambahkan ke dalam campuran resin-MWCNT dengan rasio 2:1 (campuran Resin+MWCNT terhadap *Hardener*), lalu diaduk selama 10 menit untuk memastikan pencampuran yang merata. Sampel kontrolnya yakni komposit murni tanpa MWCNT.

Fabrikasi komposit dilakukan dengan metode *hand-lay-up*, di mana lapisan-lapisan serat diimpregnasi dengan campuran resin yang telah disiapkan. Laminat yang terbentuk kemudian diberi tekanan sebesar 5 kN selama 24 jam. Tahap terakhir adalah proses *curing* di dalam lingkungan termal terkontrol, yang terdiri dari *curing* awal pada suhu 80°C selama 2 jam, dilanjutkan dengan *post-curing* pada suhu 120°C selama 6 jam untuk mencapai sifat mekanik yang optimal.

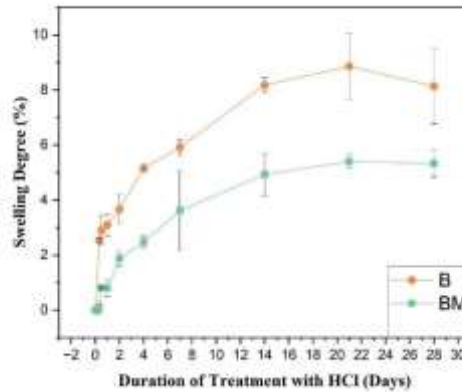
Uji Sifat Fisik

Spesimen yang telah selesai difabrikasi dipotong sesuai ukuran standar pengujian yang ditentukan, yakni ASTM D792 untuk pengujian *swelling*. Spesimen kemudian direndam dalam larutan Asam Klorida (HCl) dengan variasi waktu perendaman selama 0, 8, 12, 24, 48, 96, 168, 336, dan 672 jam. Setiap spesimen diuji untuk mengetahui tingkat *swelling* material komposit terhadap ketahanan material terhadap lingkungan korosif. Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif untuk mengevaluasi pengaruh penambahan MWCNT terhadap performa komposit. Uji degradasi massa dilakukan untuk menganalisis ketahanan komposit terhadap lingkungan asam. Prosedur pengujian diawali dengan pengukuran massa awal setiap spesimen kering menggunakan timbangan analitik presisi tinggi. Setelah periode perendaman selesai, spesimen dibersihkan, lalu dikeringkan di dalam oven pada suhu 80°C selama 24 jam untuk memastikan seluruh kelembapan telah hilang. Massa akhir spesimen kemudian diukur kembali untuk menghitung persentase degradasi massa.

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Analisis *Swelling Degree*



Gambar 1. Grafik presentase *swelling degree*

Perilaku penyerapan cairan (*swelling*) dari kedua jenis komposit selama 28 hari disajikan pada Gambar 1 dan Tabel 1. Hasil menunjukkan bahwa kedua jenis komposit mengalami peningkatan persentase *swelling* seiring berjalannya waktu, dengan laju penyerapan yang cepat pada 7 hari pertama sebelum cenderung melambat. Perbandingan antara kedua kelompok menunjukkan bahwa komposit murni (B) secara konsisten menunjukkan nilai *swelling degree* yang lebih tinggi dibandingkan komposit dengan MWCNT (BM). Pada akhir pengujian hari ke-28, komposit B mencapai nilai *swelling* rata-rata sebesar 8.135%, sementara komposit BM mencapai nilai yang lebih rendah, yaitu 5.326%. Uji statistik Two-Way ANOVA mengonfirmasi bahwa pengaruh Jenis Komposit ($p = 0.002$) dan Waktu Perendaman ($p < 0.001$) keduanya signifikan secara statistik.

Tabel 1. Hasil Pengujian *Swelling*

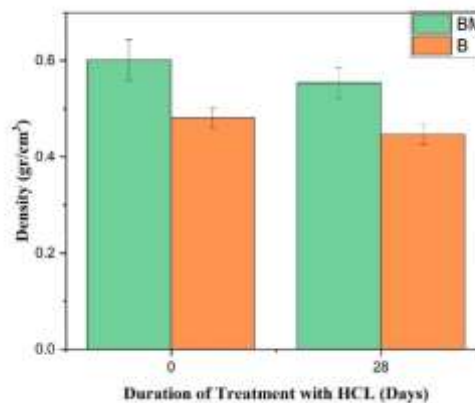
| Duration of Treatment with HCl | Swelling Percentage \pm Standard Deviation | |
|--------------------------------|--|---------------------------|
| | Pure Composite (B) | Composite with MWCNT (BM) |
| 0 Hours | 0.000 \pm 0.000 | 0.000 \pm 0.000 |
| 8 Hours | 2.537 \pm 0.070 | 0.040 \pm 0.200 |
| 12 Hours | 2.900 \pm 0.528 | 0.795 \pm 0.031 |
| 24 Hours | 3.101 \pm 0.395 | 0.795 \pm 0.302 |
| 2 Days | 3.665 \pm 0.520 | 1.868 \pm 0.277 |
| 4 Days | 5.155 \pm 0.110 | 2.464 \pm 0.237 |
| 7 Days | 5.920 \pm 0.287 | 3.617 \pm 1.450 |
| 14 Days | 8.176 \pm 0.276 | 4.928 \pm 0.751 |
| 21 Days | 8.860 \pm 1.188 | 5.405 \pm 0.265 |
| 28 Days | 8.135 \pm 1.366 | 5.326 \pm 0.494 |

Analisis Degradasi Massa dan Perubahan Densitas

Tabel 2. Perubahan Dimensi, Massa, dan Densitas Spesimen

| Specimen ID | Initial Dimension | | | | Mass (g) | | Final Dimension | | | | Density | |
|-------------|-------------------|-------|-------|---------------------|--------------|------------|-----------------|-------|-------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | l(cm) | w(cm) | h(cm) | V(cm ³) | Initial Mass | Final Mass | l(cm) | w(cm) | h(cm) | V(cm ³) | ρ_0 (g/cm ³) | ρ_1 (g/cm ³) |
| B1 | 1.243 | 1.153 | 1.145 | 1.641 | 0.818 | 0.764 | 1.231 | 1.141 | 1.174 | 1.649 | 0.498 | 0.463 |
| B2 | 1.325 | 1.173 | 1.142 | 1.775 | 0.811 | 0.757 | 1.312 | 1.161 | 1.170 | 1.782 | 0.457 | 0.425 |
| B3 | 1.231 | 1.237 | 1.154 | 1.757 | 0.854 | 0.798 | 1.219 | 1.225 | 1.183 | 1.767 | 0.486 | 0.452 |
| BM1 | 1.252 | 1.121 | 1.102 | 1.547 | 0.972 | 0.894 | 1.227 | 1.099 | 1.146 | 1.545 | 0.628 | 0.579 |
| BM2 | 1.021 | 0.978 | 1.155 | 1.153 | 0.718 | 0.661 | 1.001 | 0.959 | 1.201 | 1.153 | 0.623 | 0.573 |
| BM3 | 1.212 | 1.052 | 1.173 | 1.496 | 0.826 | 0.760 | 1.188 | 1.031 | 1.220 | 1.494 | 0.552 | 0.509 |

Perubahan massa dan densitas spesimen sebelum dan sesudah perendaman disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 2. Setelah 28 hari, kedua jenis komposit mengalami kehilangan massa dan penurunan densitas. Komposit dengan MWCNT (BM) mengalami kehilangan massa rata-rata sebesar 5.85%, sedangkan komposit murni (B) menunjukkan kehilangan massa yang lebih rendah, yaitu 5.43%.



Gambar 2. Diagram perubahan densitas

Analisis densitas menunjukkan bahwa komposit B memiliki densitas awal yang lebih rendah (rata-rata 0.476 g/cm³) dibandingkan komposit BM (rata-rata 0.601 g/cm³). Setelah perendaman, kedua kelompok mengalami penurunan densitas. Hasil uji Two-Way ANOVA untuk degradasi massa menunjukkan bahwa pengaruh Jenis Komposit ($p < 0.001$), Waktu Perendaman ($p < 0.001$), dan Interaksi keduanya ($p = 0.002$) adalah signifikan secara statistik.

Pembahasan

Mekanisme Swelling dan Pengaruh Porositas

Hasil pengujian menunjukkan sebuah fenomena yang menarik: komposit murni (B) menyerap lebih banyak cairan dan terdegradasi lebih banyak. Tingkat *swelling degree* yang lebih tinggi pada komposit B, dapat dijelaskan melalui analisis densitas. Densitas awal komposit B yang secara signifikan lebih rendah mengindikasikan adanya peningkatan porositas atau volume rongga (*voids*) di dalam strukturnya.

Secara teoritis, Penambahan *nanofiller* secara fundamental bertujuan untuk memperkuat struktur komposit dengan mengisi celah-celah mikro pada antarmuka serat-matriks [12]. Ketika terdispersi secara merata, partikel nano ini mengurangi volume rongga (*voids*) secara signifikan, menghasilkan struktur yang lebih padat dan solid. Rongga-rongga inilah yang menyediakan lebih banyak ruang bagi molekul cairan asam untuk berpenetrasi dan mengisi struktur komposit, sehingga menyebabkan nilai *swelling degree* yang lebih tinggi pada komposit B. Fenomena ini sejalan dengan penelitian oleh Ghahramani et al. [7] kepadatan yang meningkat berfungsi sebagai penghalang yang

mempersulit molekul cairan untuk berpenetrasi ke dalam material. Akibatnya, kemampuan komposit dalam menahan penyerapan cairan menjadi lebih superior, yang ditandai oleh nilai *swelling degree* yang lebih rendah dan secara langsung menunjukkan peningkatan daya tahan terhadap degradasi.

Peran Ganda MWCNT: Penguat Struktur dan Pelindung Matriks

Penambahan MWCNT terbukti efektif dalam meningkatkan ketahanan kimia komposit, yang terlihat dari tingkat degradasi massa yang lebih rendah. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh peran ganda MWCNT yang berfungsi sebagai penguat struktur sekaligus sebagai penghalang fisik dan kimia.

- Sebagai Penghalang Fisik: MWCNT yang tersebar di dalam matriks menciptakan jalur yang lebih berliku-liku (*tortuous path*) bagi molekul asam. Hal ini secara efektif memperlambat laju difusi asam ke dalam matriks polimer, sehingga mengurangi laju reaksi hidrolisis yang menyebabkan degradasi.
- Sebagai Pelindung Kimia: Sifat inert dari karbon pada MWCNT dapat melindungi area matriks di sekitarnya dari serangan kimia langsung oleh asam, layaknya sebuah perisai mikroskopis.

Temuan ini sejalan dengan latar belakang penelitian yang menyoroti potensi MWCNT untuk meningkatkan durabilitas komposit di lingkungan asam [5]. Meskipun komposit murni (B) lebih padat dan menyerap lebih sedikit cairan, ketiadaan penghalang protektif membuat matriksnya lebih rentan terhadap serangan kimia langsung, yang mengakibatkan tingkat degradasi massa yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan studi oleh Kojnoková et al. [1] yang menyatakan bahwa degradasi komposit di lingkungan asam utamanya disebabkan oleh penuaan matriks resin. Efek interaksi yang signifikan pada uji degradasi massa ($p = 0.002$) semakin memperkuat temuan ini, yang menunjukkan bahwa efek protektif dari MWCNT menjadi semakin nyata seiring bertambahnya durasi paparan asam.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a) Penambahan 1% wt nanofiller MWCNT secara signifikan meningkatkan durabilitas komposit hibrida di lingkungan asam. Hal ini dibuktikan pertama oleh tingkat penyerapan cairan (*swelling degree*) yang jauh lebih rendah pada komposit yang diperkuat MWCNT (BM) sebesar 5.326% dibandingkan komposit murni (B) sebesar 8.135%. Fenomena ini menunjukkan bahwa MWCNT berhasil mengisi rongga-rongga mikro dalam struktur, menciptakan komposit yang lebih padat dan kurang permeabel terhadap cairan.
- b) Keunggulan komposit BM diperkuat oleh kemampuannya dalam menahan degradasi kimia. Data menunjukkan persentase kehilangan massa yang lebih rendah (5.43%) pada komposit BM dibandingkan komposit murni B (5.85%). Temuan ini mengonfirmasi bahwa jaringan MWCNT berhasil bertindak sebagai barier difusi yang efektif, memperlambat laju serangan asam pada matriks polimer.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa penambahan MWCNT secara efektif meningkatkan durabilitas komposit melalui mekanisme ganda: mengurangi porositas untuk menahan penyerapan cairan dan bertindak sebagai barier untuk mencegah degradasi kimia. Hasil ini menunjukkan bahwa performa komposit dapat dimaksimalkan lebih lanjut melalui optimasi teknik dispersi nanofiller guna mencapai durabilitas puncak di lingkungan yang agresif.

Ucapan Terima kasih

Penelitian ini didanai oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Negeri Malang melalui skema Bantuan Inovasi Mahasiswa tahun anggaran 2025.

Daftar Pustaka

- [1] T. Kojnoková, F. Nový, L. Markovičová, and E. Harea, “Evaluation of selected properties and surface quality of cured pre-impregnated carbon-fiber fabrics after exposure to sulphuric acid,” *Production Engineering Archives*, vol. 29, no. 1, pp. 1–6, Mar. 2023, doi: 10.30657/pea.2023.29.1.
- [2] Q. Jin, P. Chen, Y. Gao, A. Du, D. Liu, and L. Sun, “Tensile Strength and Degradation of GFRP Bars under Combined Effects of Mechanical Load and Alkaline Solution,” *Materials*, vol. 13, no. 16, p. 3533, Aug. 2020, doi: 10.3390/ma13163533.
- [3] S. Gul *et al.*, “Development of hybrid composite by integrating functionalized multi-walled carbon nanotubes (f-MWCNTs) with glass fiber reinforced polyester composite,” *PLoS One*, vol. 17, no. 12, p. e0279647, Dec. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0279647.
- [4] S. K. Chaudhary and K. K. Singh, “Influence of multi-walled carbon nanotubes on mechanical characteristics of glass fiber reinforced polymer composites: An experimental and analytical approach,” *SPE Polymers*, vol. 5, no. 3, pp. 382–394, Jul. 2024, doi: 10.1002/pls2.10131.
- [5] Y. Harmen *et al.*, “Thermal performance of PEG-MWCNTs composites as shape-stabilised phase change materials for thermal energy storage,” *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, vol. 29, no. 9, pp. 732–738, Sep. 2021, doi: 10.1080/1536383X.2021.1887146.
- [6] S. Ishtiaq, M. Q. Saleem, R. Naveed, M. Harris, and S. A. Khan, “Glass–Carbon–Kevlar fiber reinforced hybrid polymer composite (HPC): Part (A) mechanical and thermal characterization for high GSM laminates,” *Composites Part C: Open Access*, vol. 14, p. 100468, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jcomc.2024.100468.
- [7] P. Ghahramani, K. Behdinin, R. Moradi-Dastjerdi, and H. E. Naguib, “Theoretical and experimental investigation of MWCNT dispersion effect on the elastic modulus of flexible PDMS/MWCNT nanocomposites,” *Nanotechnol Rev*, vol. 11, no. 1, 2021, doi: 10.1515/ntrev-2022-0006.
- [8] B. Shen, H. Liu, S. Lv, Z. Li, and W. Cheng, “Acid Aging of CFRP Composite Materials for Solar UAV Structure,” *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2021, pp. 1–12, Oct. 2021, doi: 10.1155/2021/1664847.

- [9] R. Ishraaq, M. Rashid, and S. M. Nahid, “Reinforcing Iron Metal Matrix Composite by Multi-Wall Carbon Nanotube : A Combined Theoretical and Computational Approach”.
- [10] A. Navidfar, O. Bulut, T. Baytak, H. Iskender, and L. Trabzon, “Synergically enhanced viscoelastic behavior of binary nanocarbon based polyurethane hybrid nanocomposite foams,” 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2006.13363>.
- [11] R. Kattaguri, A. O. Fulmali, R. K. Prusty, and B. C. Ray, “Effects of acid, alkaline, and seawater aging on the mechanical and thermomechanical properties of glass fiber/epoxy composites filled with carbon nanofibers,” *J Appl Polym Sci*, vol. 137, no. 10, 2020, doi: 10.1002/app.48434.
- [12] A. Kausar, “Fullerene *Nanofiller* Reinforced Epoxy Nanocomposites—Developments, Progress and Challenges,” *Materials Research Innovations*, vol. 25, no. 3, pp. 175–185, 2021, doi: 10.1080/14328917.2020.1748794.