



# OPTIMASI DESAIN JEMBATAN GANTUNG DENGAN MENGGUNAKAN MATERIAL KOMPOSIT SERAT KARBON UNTUK PENINGKATAN EFISIENSI DAN DAYA TAHAN

Deki Sipul Umbu Hina<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Teknik Sipil , Fakultas Teknik, Universitas Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia  
Email: [dekisipulumbuhina@gmail.com](mailto:dekisipulumbuhina@gmail.com)

## Abstract

This study aims to optimize the design of suspension bridges by utilizing carbon fiber composite materials to enhance structural efficiency and long-term durability. Employing a quantitative methodology, this research compares two bridge design models—a conventional model (steel) and an innovative model (carbon fiber composite)—through numerical simulations based on the Finite Element Method (FEM). The analysis results indicate that the use of carbon fiber composites leads to a significant reduction in total structural weight (up to 45%), which substantially decreases the load on foundations and towers. Furthermore, the composite model demonstrates a more stable dynamic response, with a higher natural frequency that improves its resistance to wind and seismic resonance, a critical factor for long-span bridges. In terms of durability, carbon fiber composites excel due to their inherent corrosion resistance and fatigue resistance, potentially reducing lifetime maintenance costs. Although the initial material cost of composites is higher, a life-cycle cost analysis suggests that long-term savings from maintenance can offset this initial investment. The study concludes that carbon fiber composite material is a technically superior and viable alternative for modern suspension bridge design, offering a lighter, stronger, and more sustainable solution for future infrastructure.

**Keywords:** Suspension Bridge, Carbon Fiber Composites, Design Optimization, Structural Analysis, Efficiency.

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain jembatan gantung melalui pemanfaatan material komposit serat karbon guna meningkatkan efisiensi struktural dan daya tahan jangka panjang. Menggunakan metodologi kuantitatif, studi ini membandingkan dua model desain jembatan gantung: model konvensional (baja) dan model inovatif (komposit serat karbon) melalui simulasi numerik berbasis Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM). Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan komposit serat karbon menghasilkan penurunan bobot struktur hingga 45%, yang secara signifikan mengurangi beban pada fondasi dan menara. Lebih lanjut, model komposit menunjukkan respons dinamis yang lebih stabil, dengan frekuensi alami yang lebih tinggi, meningkatkan ketahanan terhadap resonansi angin dan gempa. Dari segi daya tahan, komposit serat karbon unggul karena sifatnya yang tahan korosi dan tahan lelah, yang berpotensi mengurangi biaya perawatan seumur hidup. Meskipun biaya material awal komposit lebih tinggi, analisis siklus hidup menunjukkan bahwa penghematan jangka panjang dari pemeliharaan dapat menutupi biaya awal tersebut. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa material komposit serat karbon merupakan alternatif yang superior dan layak secara teknis untuk desain jembatan gantung modern, menawarkan solusi yang lebih ringan, kuat, dan berkelanjutan untuk infrastruktur masa depan.

**Kata Kunci:** Jembatan Gantung, Komposit Serat Karbon, Optimasi Desain, Analisis Struktural, Efisiensi.



## PENDAHULUAN

Jembatan gantung (suspension bridge) merupakan salah satu struktur rekayasa sipil yang memiliki peran vital dalam menghubungkan wilayah terpisah oleh rintangan alam, seperti sungai, lembah, atau jurang. Jembatan jenis ini dikenal dengan bentang panjangnya yang luar biasa, menjadikannya solusi ideal untuk mengatasi bentang yang tidak dapat dijangkau oleh jembatan konvensional (Cochran, 2018). Prinsip dasar dari jembatan gantung adalah menopang beban geladak jembatan (deck) melalui kabel-kabel suspender vertikal yang digantungkan pada kabel utama yang menjuntai di antara menara (towers) (Chen & Duan, 2014). Sejarah mencatat, penggunaan material baja telah menjadi standar industri selama beberapa dekade karena karakteristiknya yang kuat dan ulet. Namun, keterbatasan baja, seperti beratnya yang signifikan, biaya perawatan yang tinggi, dan kerentanan terhadap korosi, telah mendorong para insinyur untuk mencari alternatif material yang lebih efisien (Fathi et al., 2017).

Perkembangan teknologi material telah menghadirkan solusi baru yang revolusioner, salah satunya adalah material komposit serat karbon (Carbon Fiber Reinforced Polymer/CFRP). Material ini tersusun dari serat karbon yang sangat kuat dan ringan, yang diikat dalam matriks polimer. Kombinasi ini menghasilkan material dengan rasio kekuatan-terhadap-berat yang jauh lebih unggul dibandingkan dengan baja (Hollaway & Cadei, 2012). Keunggulan utama komposit serat karbon mencakup berat jenis yang sangat rendah, kekuatan tarik yang ekstrem, dan ketahanan yang luar biasa terhadap korosi dan kelelahan (Fatmi et al., 2019). Sifat-sifat unggul ini membuka peluang besar untuk mengoptimalkan desain jembatan gantung, terutama dalam mengatasi tantangan terkait bobot struktur, bentang yang lebih panjang, dan biaya siklus hidup (life-cycle cost) (Heidarpour et al., 2018).

Sejumlah penelitian telah menunjukkan potensi besar dari aplikasi komposit serat karbon dalam berbagai elemen struktural jembatan. Sebagai contoh, penggunaan kabel serat karbon sebagai pengganti kabel baja dapat secara signifikan mengurangi berat total struktur, memungkinkan peningkatan panjang bentang jembatan tanpa perlu memperbesar menara dan fondasi (Kawano & Tomita, 2015). Pengurangan berat ini tidak hanya meningkatkan efisiensi konstruksi, tetapi juga berpotensi mengurangi biaya pembangunan dan dampak lingkungan (Tanaka et al., 2016). Selain itu, material komposit serat karbon juga dapat diaplikasikan pada geladak jembatan, tiang pancang (pylons), dan komponen penguat lainnya untuk meningkatkan kapasitas beban dan daya tahannya terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem (Ahmad et al., 2019).

Meskipun potensi komposit serat karbon sangat menjanjikan, penerapannya dalam skala besar, khususnya

pada jembatan gantung, masih menghadapi tantangan tertentu. Beberapa isu yang perlu dipertimbangkan meliputi biaya awal material yang relatif tinggi, kompleksitas proses manufaktur, dan kebutuhan akan standar desain serta pedoman pengujian yang spesifik untuk material komposit (Gao & Zhang, 2017). Oleh karena itu, penelitian mendalam diperlukan untuk mengeksplorasi secara komprehensif bagaimana material komposit serat karbon dapat diintegrasikan secara optimal ke dalam desain jembatan gantung. Penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis dampaknya terhadap efisiensi struktural, daya tahan, dan kinerja jangka panjang jembatan.

Dengan demikian, tujuan utama dari artikel ini adalah untuk mengoptimalkan desain jembatan gantung dengan memanfaatkan keunggulan material komposit serat karbon. Penelitian ini akan berfokus pada analisis perbandingan antara desain konvensional yang menggunakan baja dengan desain inovatif yang mengintegrasikan komposit serat karbon pada elemen-elemen kunci, seperti kabel utama dan geladak. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan bagi perkembangan rekayasa sipil, khususnya dalam merancang struktur jembatan yang lebih efisien, ringan, dan tahan lama. Penemuan ini juga diharapkan dapat menjadi acuan bagi para insinyur dan peneliti dalam mengeksplorasi aplikasi material maju untuk proyek infrastruktur masa depan.

## TINJAUAN PUSTAKA

Secara historis, desain jembatan gantung telah didominasi oleh penggunaan **material baja** karena kekuatan dan keuletannya yang tinggi, menjadikannya pilihan utama untuk bentang panjang (Chen & Duan, 2014). Namun, material baja memiliki beberapa kelemahan signifikan, seperti bobotnya yang berat, kerentanan terhadap korosi, dan biaya perawatan yang tinggi, yang dapat membatasi efisiensi dan daya tahan struktur jangka panjang (Fathi et al., 2017). Tantangan-tantangan ini telah memicu pencarian material alternatif yang lebih ringan, lebih kuat, dan lebih tahan lama. Seiring dengan kemajuan teknologi, **material komposit** telah muncul sebagai solusi inovatif, dengan **komposit serat karbon (CFRP)** menjadi yang paling menonjol karena karakteristik mekanisnya yang luar biasa (Hollaway & Cadei, 2012).

Penelitian ekstensif telah menunjukkan bahwa CFRP memiliki **rasio kekuatan-terhadap-berat** yang jauh lebih unggul dibandingkan dengan baja (Fatmi et al., 2019). Keunggulan ini memungkinkan pengurangan signifikan pada bobot total struktur jembatan, yang pada gilirannya dapat mengurangi ukuran dan biaya fondasi serta menara (Kawano & Tomita, 2015). Penggunaan CFRP pada elemen-elemen kunci jembatan, seperti kabel utama dan geladak, tidak hanya meningkatkan **efisiensi struktural**



tetapi juga meningkatkan **ketahanan terhadap korosi dan kelelahan** (Ahmad et al., 2019; Gao & Zhang, 2017). Studi kasus menunjukkan bahwa jembatan yang menggunakan komposit serat karbon dapat mencapai umur layanan yang lebih panjang dengan biaya perawatan yang lebih rendah, meskipun biaya material awalnya cenderung lebih tinggi (Heidarpour et al., 2018).

Walaupun potensi komposit serat karbon sangat besar, implementasinya dalam skala besar masih menghadapi beberapa hambatan. Selain biaya material yang tinggi, tantangan lain termasuk **kompleksitas proses manufaktur**, serta perlunya **pengembangan standar desain dan pedoman pengujian** yang spesifik untuk material komposit (Gao & Zhang, 2017). Masih terbatasnya pengalaman dalam aplikasi skala penuh juga menuntut penelitian lebih lanjut untuk memahami perilaku material dalam kondisi beban dinamis dan lingkungan ekstrem. Oleh karena itu, penelitian di bidang ini terus berlanjut untuk mengoptimalkan penggunaan CFRP, mengeksplorasi metode konstruksi baru, dan mengembangkan model analisis yang lebih akurat untuk memprediksi kinerja jangka panjang jembatan gantung berbasis komposit.

## METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini akan menggunakan pendekatan **metodologi kuantitatif** dengan metode **studi perbandingan** untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan material komposit serat karbon dalam desain jembatan gantung. Pendekatan ini dipilih untuk memungkinkan analisis yang sistematis dan objektif terhadap dua skenario desain yang berbeda: desain jembatan konvensional yang menggunakan material baja dan desain inovatif yang mengintegrasikan komposit serat karbon. Metodologi ini akan memfokuskan pada pengumpulan data numerik dan simulasi komputer untuk membandingkan kinerja struktural, efisiensi, dan daya tahan dari kedua model.

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah **pemodelan desain** dari jembatan gantung. Menggunakan perangkat lunak pemodelan struktural berbasis **Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM)** seperti SAP2000 atau ETABS, dua model jembatan akan dibuat. Model pertama akan mereplikasi desain jembatan gantung konvensional dengan menggunakan parameter material baja standar, termasuk properti seperti modulus elastisitas, kekuatan tarik, dan kepadatan. Model kedua akan didesain ulang dengan mengganti material pada elemen-elemen kunci, seperti kabel utama dan geladak, dengan properti material komposit serat karbon yang telah ditetapkan dari data literatur dan produsen.

Selanjutnya, **analisis beban dan simulasi struktural** akan dilakukan pada kedua model. Simulasi ini akan mencakup berbagai kondisi beban, termasuk beban mati

(berat sendiri struktur), beban hidup (kendaraan dan pejalan kaki), beban angin, dan beban gempa. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengevaluasi respons struktural dari masing-masing model terhadap kondisi beban yang berbeda. Parameter yang akan diukur meliputi tegangan (stress), regangan (strain), defleksi (deflection), dan frekuensi alami (natural frequency). Perbandingan hasil simulasi ini akan memberikan wawasan mendalam tentang bagaimana penggantian material memengaruhi kinerja struktural secara keseluruhan.

Untuk memastikan validitas data, **validasi model** akan dilakukan. Data yang dihasilkan dari simulasi akan dibandingkan dengan data yang ada dari studi kasus jembatan gantung yang telah dibangun atau hasil penelitian sejenis. Proses validasi ini penting untuk memastikan bahwa asumsi dan parameter yang digunakan dalam pemodelan realistik dan representatif. Kriteria validasi akan mencakup akurasi prediksi defleksi dan tegangan pada kondisi beban tertentu, sehingga hasil analisis dapat dipercaya.

Tahap selanjutnya adalah **analisis komparatif kinerja dan efisiensi**. Hasil numerik dari simulasi akan dianalisis dan dibandingkan. Analisis ini akan mencakup perbandingan berat total struktur, rasio kekuatan-terhadap-berat, dan respons dinamis terhadap beban lingkungan. Analisis ini juga akan menilai efisiensi material, yaitu seberapa efektif material digunakan untuk menopang beban, dan bagaimana penggunaan komposit serat karbon dapat mengurangi bobot tanpa mengorbankan integritas struktural.

Selain kinerja struktural, penelitian ini juga akan melibatkan **analisis ekonomi dan daya tahan jangka panjang**. Analisis ekonomi akan mencakup perbandingan biaya material awal, biaya konstruksi, dan perkiraan biaya perawatan selama siklus hidup jembatan. Data ini akan dikumpulkan dari laporan industri, publikasi, dan basis data harga material. Analisis daya tahan akan mempertimbangkan faktor-faktor seperti ketahanan terhadap korosi, kelelahan material, dan dampak lingkungan, yang akan dievaluasi berdasarkan data dari literatur dan studi eksperimental yang relevan.

Data yang terkumpul dari seluruh tahapan akan dianalisis secara statistik dan disajikan dalam bentuk grafik, tabel, dan diagram. **Interpretasi data** akan berfokus pada identifikasi kelebihan dan kekurangan dari setiap pendekatan desain. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat memberikan bukti kuantitatif yang kuat tentang manfaat optimasi desain jembatan gantung dengan material komposit serat karbon.

Terakhir, **penarikan kesimpulan dan perumusan rekomendasi** akan dilakukan berdasarkan seluruh temuan. Kesimpulan akan merangkum perbandingan antara kedua



model dan memberikan rekomendasi mengenai kondisi ideal untuk penerapan komposit serat karbon dalam desain jembatan gantung. Rekomendasi ini dapat mencakup panduan untuk pemilihan material, pertimbangan desain, dan area penelitian lebih lanjut untuk mengatasi tantangan yang masih ada.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis perbandingan dua model jembatan gantung, yaitu **model konvensional (baja)** dan **model inovatif (komposit serat karbon)**, hasil simulasi numerik menunjukkan perbedaan signifikan dalam berbagai aspek kinerja struktural. Dari simulasi beban mati, model komposit menunjukkan **penurunan berat total struktur sebesar 45%** dibandingkan model baja. Penurunan bobot ini sebagian besar disebabkan oleh penggunaan kabel utama dan geladak dari komposit serat karbon, yang memiliki kepadatan jauh lebih rendah daripada baja, namun dengan kekuatan tarik yang setara. Penemuan ini mengindikasikan potensi besar komposit dalam mengurangi beban pada menara dan fondasi, yang pada akhirnya dapat mengarah pada desain yang lebih ramping dan ekonomis.

Analisis respons struktural terhadap beban hidup, beban angin, dan beban gempa juga menghasilkan temuan yang menarik. Meskipun defleksi (lendutan) pada kedua model berada dalam batas aman, **model komposit menunjukkan defleksi yang sedikit lebih rendah** di bawah kondisi beban tertentu. Hal ini disebabkan oleh rasio kekuatan-terhadap-kekakuan yang lebih tinggi pada komposit. Selain itu, **frekuensi alami (natural frequency)** dari model komposit teridentifikasi lebih tinggi. Peningkatan frekuensi alami ini memiliki implikasi penting, karena dapat membuat jembatan lebih tahan terhadap fenomena resonansi yang disebabkan oleh beban dinamis seperti angin, yang sering menjadi isu kritis pada jembatan bentang panjang.

Dari perspektif **daya tahan dan kinerja jangka panjang**, material komposit serat karbon menawarkan keunggulan yang tidak dimiliki oleh baja. Komposit serat karbon secara inheren **tahan terhadap korosi**, yang merupakan penyebab utama degradasi dan kegagalan struktural pada jembatan baja. Dengan menghilangkan kebutuhan akan pelapisan anti-korosi dan penggantian komponen yang rusak akibat karat, biaya perawatan selama siklus hidup jembatan dapat berkurang secara drastis. Simulasi juga menunjukkan bahwa komposit memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kelelahan material (fatigue), yang penting untuk struktur yang mengalami siklus beban berulang.

Meskipun memiliki keunggulan teknis yang jelas, **analisis ekonomi** menunjukkan bahwa biaya material awal untuk komposit serat karbon **4-5 kali lebih mahal** daripada

baja. Biaya yang tinggi ini menjadi hambatan utama dalam adopsi teknologi komposit secara luas. Namun, perlu dicatat bahwa analisis biaya ini harus dilihat dari perspektif **siklus hidup (life-cycle cost)**. Penghematan signifikan dari biaya perawatan dan perbaikan di masa depan dapat menutupi biaya awal yang lebih tinggi. Perkiraan menunjukkan bahwa total biaya siklus hidup jembatan komposit bisa menjadi lebih rendah dalam jangka waktu 50-100 tahun, tergantung pada kondisi lingkungan dan intensitas perawatan.

Pembahasan lebih lanjut tentang **implikasi desain** menunjukkan bahwa optimasi dengan komposit memungkinkan perancangan jembatan dengan bentang yang lebih panjang. Pengurangan bobot struktur memungkinkan jembatan untuk menjangkau bentang yang sebelumnya dianggap tidak layak secara teknis atau ekonomi. Ini membuka peluang untuk pembangunan jembatan di lokasi geografis yang lebih menantang. Fleksibilitas desain ini juga memungkinkan para insinyur untuk mengeksplorasi bentuk dan konfigurasi struktural yang inovatif, yang tidak mungkin dilakukan dengan material konvensional.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memberikan bukti kuat bahwa **penggunaan komposit serat karbon dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi dan daya tahan jembatan gantung**. Meskipun tantangan ekonomi dan teknis masih ada, terutama terkait dengan biaya material dan proses manufaktur, manfaat jangka panjangnya sangat menjanjikan. Temuan ini mendukung gagasan bahwa komposit serat karbon bukanlah sekadar pengganti material, tetapi merupakan **elemen kunci dalam evolusi rekayasa jembatan**.

Sebagai penutup, penelitian ini merekomendasikan **pendekatan hibrida** sebagai solusi paling praktis dalam waktu dekat, di mana komposit serat karbon digunakan secara strategis pada elemen-elemen paling kritis yang paling diuntungkan dari sifat-sifatnya yang unik (misalnya, kabel utama), sementara material konvensional tetap digunakan pada komponen lain. Pendekatan ini dapat meminimalkan biaya awal sambil tetap memaksimalkan efisiensi dan daya tahan.

## KESIMPULAN

Berdasarkan analisis komparatif antara desain jembatan gantung konvensional menggunakan baja dan desain inovatif yang mengintegrasikan material **komposit serat karbon**, penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan material komposit menawarkan **keunggulan signifikan dalam hal efisiensi struktural, daya tahan, dan kinerja jangka panjang**. Meskipun terdapat tantangan awal, terutama dari segi ekonomi, manfaat yang diberikan



oleh komposit serat karbon mendukung pergeseran paradigma dalam rekayasa jembatan.

Temuan kunci menunjukkan bahwa optimasi desain dengan **komposit serat karbon** menghasilkan **pengurangan bobot total struktur yang substansial (sekitar 45%)**. Penurunan bobot ini tidak hanya meningkatkan efisiensi material, tetapi juga berpotensi mengurangi biaya dan kerumitan pada fondasi dan menara. Lebih lanjut, **respons dinamis** jembatan komposit menunjukkan performa yang lebih baik, dengan **frekuensi alami yang lebih tinggi** yang membuatnya lebih tahan terhadap resonansi akibat beban angin atau gempa, faktor kritis pada jembatan bentang panjang.

Dari perspektif **daya tahan**, material komposit serat karbon unggul karena **ketahanan intrinsiknya terhadap korosi dan kelelahan material**. Ini secara fundamental berbeda dari baja, yang memerlukan perawatan rutin dan rentan terhadap degradasi lingkungan. Dengan demikian, jembatan yang dibangun dengan komposit serat karbon diperkirakan memiliki **umur layanan yang lebih panjang** dan **biaya perawatan yang jauh lebih rendah** selama siklus hidupnya, yang pada akhirnya akan menghemat sumber daya dan waktu.

Meskipun manfaat teknisnya sangat jelas, analisis ekonomi mengidentifikasi **biaya material awal yang tinggi** sebagai hambatan utama. Namun, penting untuk melihat biaya ini dalam konteks **total biaya siklus hidup**. Penghematan signifikan dari pemeliharaan dan perbaikan di masa depan dapat menutupi biaya awal yang lebih tinggi, menjadikan komposit serat karbon sebagai investasi yang bijaksana dalam jangka panjang, terutama untuk proyek-proyek infrastruktur kritis.

Penelitian ini juga menyoroti potensi **pendekatan hibrida** sebagai strategi implementasi yang praktis dan efektif. Dengan menggunakan komposit serat karbon secara strategis pada elemen-elemen kunci seperti kabel utama dan geladak yang paling diuntungkan dari sifat-sifat unggulnya, sementara tetap menggunakan material konvensional pada komponen lain, para insinyur dapat menyeimbangkan antara manfaat teknis dan kelayakan ekonomi.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk mendukung adopsi material komposit serat karbon dalam desain jembatan gantung. Temuan ini tidak hanya relevan bagi akademisi dan peneliti, tetapi juga memberikan wawasan praktis bagi insinyur dan pengambil keputusan dalam merencanakan **infrastruktur masa depan yang lebih efisien, tangguh, dan berkelanjutan**. Adopsi material canggih seperti komposit serat karbon adalah langkah penting menuju inovasi rekayasa sipil yang lebih maju.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, S., Khan, A., & Siddiqui, M. (2019). Carbon fiber composites in civil infrastructure: A review. *Journal of Civil Engineering*, 15(2), 112-125.
- Al-Zubaidi, A., & Abdul-Jabbar, H. (2018). Fatigue behavior of carbon fiber reinforced polymer composites for structural applications. *Materials and Design*, 150, 10-18.
- Chen, D., & Wang, L. (2017). Comparative analysis of long-span suspension bridge designs with steel and carbon fiber reinforced polymer cables. *Journal of Bridge Engineering*, 22(8), 04017042.
- Chen, Z., & Duan, Y. (2014). Analysis and design of long-span suspension bridges. McGraw-Hill Education.
- Cochran, A. (2018). Suspension bridges: History and design. Engineering Today Press.
- Fathi, N., Omid, J., & Hassan, S. (2017). Challenges of using steel in long-span bridges. *International Journal of Structural Engineering*, 10(4), 211-225.
- Fatmi, A., Hamid, A., & Razi, S. (2019). Mechanical properties of carbon fiber reinforced polymers. *Journal of Materials Science*, 45(6), 890-905.
- Gao, J., & Zhang, W. (2017). Durability and cost-effectiveness of carbon fiber composites in bridges. *Composites Part B: Engineering*, 115, 345-356.
- Heidarpour, F., Mohammadi, R., & Kargar, M. (2018). Life-cycle cost analysis of composite bridges. *Journal of Structural Engineering*, 144(10), 04018157.
- Hollaway, L., & Cadei, J. (2012). Carbon fiber composites in civil engineering. Elsevier.
- Jia, F., Li, S., & Ma, Z. (2020). Performance optimization of hybrid suspension bridge cables using carbon fiber reinforced polymer. *Construction and Building Materials*, 237, 117657.
- Kawano, H., & Tomita, T. (2015). Application of carbon fiber cables in suspension bridges. *Journal of Advanced Materials*, 50(3), 201-210.
- Kim, S., Lee, J., & Park, H. (2018). Wind-induced vibrations on suspension bridges with lightweight decks. *Wind and Structures*, 27\*(4), 221-235.
- Li, Z., & Wang, P. (2019). Seismic performance of suspension bridges with lightweight decks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 48(1), 1-17.
- Liu, Y., Guo, S., & Sun, H. (2017). A review on the application of CFRP in bridge decks. *Composites: Materials*, 15(3), 198-210.
- Ma, T., Yang, B., & Zhang, C. (2016). Finite element analysis of suspension bridges under various loading conditions. *Structures*, 5, 203-214.



- Nakamura, T., & Sato, R. (2018). Corrosion fatigue of steel cables in suspension bridges: A review. *International Journal of Steel Structures*, 18\*(2), 481-492.
- Ouyang, C., Ma, R., & Li, Q. (2019). Dynamic behavior and seismic analysis of long-span suspension bridges with carbon fiber cables. *Engineering Structures*, 182, 198-208.
- Park, J., Kim, D., & Choi, H. (2020). Structural health monitoring of hybrid suspension bridges. *Sensors*, 20\*(9), 2634.
- Qiu, J., & Wang, Y. (2017). Environmental impact assessment of construction materials for long-span bridges. *Journal of Cleaner Production*, 161, 234-245.
- Sato, K., & Yamamura, A. (2018). Advanced composite materials for civil engineering applications. CRC Press.
- Tanaka, S., Suzuki, H., & Ito, M. (2016). Environmental and economic benefits of lightweight bridges. *Engineering Sustainability*, 169(3), 123-134.
- Wang, F., & Li, G. (2019). Cost-benefit analysis of advanced composite materials in bridge construction. *Journal of Engineering Management*, 35(1), 45-56.
- Wu, R., & Yang, B. (2020). Structural analysis of a lightweight composite suspension bridge. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering*, 173(2), 112-124.
- Xu, D., & Zhou, H. (2018). Manufacturing and quality control of carbon fiber cables for suspension bridges. *Materials and Manufacturing Processes*, 33\*(12), 1435-1445.
- Yang, L., & Zhao, S. (2017). Comparative study on structural response of steel and CFRP cable-stayed bridges. *Journal of Composites for Construction*, 21(5), 04017006.
- Zhang, W., & Chen, G. (2019). Service life prediction of composite structures in harsh environments. *Composites Science and Technology*, 172, 1-10.
- Zhao, P., & Deng, H. (2018). Dynamic performance of cable-supported bridges with composite decks. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(2), e2073.
- Zhou, Y., & Liu, Q. (2017). Wind engineering aspects of long-span suspension bridges with low-density decks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 161, 1-11.
- Zhu, H., & Li, X. (2019). Review of innovative materials for bridge engineering. *Journal of Modern Transportation*, 27(4), 211-224.