



Perilaku Sambungan *Near Surface Mounted (NSM) FRP* dalam Perkuatan Balok Komposit Baja dan Beton

Fransiskus X. Ndale^{1*}, Alfridus Gado², Ireneus Kota³

¹²³ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Flores, Ende

^{*)}Penulis korespondensi, e-mail: milanonet66@gmail.com

Received: 28 Oktober 2025

Revised: 09 Januari 2026

Accepted: 11 Januari 2026

ABSTRACT

Steel and concrete composite structures often require effective strengthening due to degradation and increased service loads. The Near Surface Mounted (NSM) Fiber Reinforced Polymer (FRP) technique has emerged as a superior solution owing to its high strength-to-weight ratio and corrosion resistance. However, critical challenges remain regarding brittle bond failure mechanisms and ductility management. This research utilizes a Systematic Literature Review (SLR) to synthesize experimental and numerical studies on NSM performance, bond parameters, and prestressing effects. The review indicates that passive NSM FRP increases flexural capacity (10%-20%) but significantly reduces ductility (14.8%-19.35%), with the dominant failure mode being brittle concrete cover peeling. Conversely, prestressed NSM (PNSM) application offers superior performance, including capacity increases (up to 16.36%) and better control over cracking and initial stiffness. Nonetheless, excessively high prestressing levels introduce the risk of premature FRP fracture and a very brittle failure. In conclusion, NSM strengthening design must optimize the prestressing level to balance strength enhancement and ductility. Further research is recommended to develop reliable predictive models for bond failure and to determine safe, optimal prestressing levels, especially for applications in tropical environments.

Keywords: NSM FRP, Composite Beam Strengthening, Prestressing, Bond Failure.

ABSTRAK

Struktur komposit baja dan beton sering membutuhkan perkuatan efektif akibat degradasi dan peningkatan beban layanan. Teknik *Near Surface Mounted (NSM) Fiber Reinforced Polymer (FRP)* telah muncul sebagai solusi superior karena rasio kekuatan-berat yang tinggi dan ketahanan korosi. Namun, tantangan utama tetap ada pada mekanisme kegagalan lekatan yang bersifat getas dan manajemen daktilitas. Penelitian ini menggunakan *Systematic Literature Review (SLR)* untuk mensintesis studi eksperimental dan numerik mengenai kinerja NSM, parameter lekatan, dan efek prategang. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa NSM FRP pasif meningkatkan kapasitas lentur (10%-20%), tetapi secara signifikan mengurangi daktilitas (14.8%-19.35%), dengan kegagalan dominan berupa pengelupasan penutup beton yang getas. Sebaliknya, penerapan prategang (PNSM) menawarkan kinerja unggul, termasuk peningkatan kapasitas (hingga 16.36%) dan kontrol yang lebih baik terhadap retak serta kekakuan awal. Meskipun demikian, tingkat prategang yang terlalu tinggi menimbulkan risiko fraktur FRP prematur dan kegagalan yang sangat getas. Kesimpulannya, desain perkuatan NSM harus mengoptimalkan tingkat prategang untuk menyeimbangkan peningkatan kekuatan dan daktilitas. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengembangkan model prediktif yang andal untuk kegagalan lekatan dan menentukan tingkat prategang optimal yang aman, terutama untuk aplikasi di lingkungan tropis.

Kata Kunci: NSM FRP, Perkuatan Balok Komposit, Prategang, Kegagalan Lektan,.

PENDAHULUAN

Struktur komposit baja dan beton, yang menggabungkan kekuatan tarik tinggi baja dengan kekuatan tekan optimal beton, merupakan sistem yang banyak digunakan dalam pembangunan gedung bertingkat dan jembatan. Meskipun dirancang untuk memiliki kekuatan dan kekakuan yang superior, seiring berjalannya waktu, struktur ini rentan terhadap degradasi dan memerlukan perkuatan (*retrofitting*). Kebutuhan perkuatan ini timbul karena beberapa faktor utama: 1)Peningkatan Beban Layanan: Perubahan fungsi bangunan atau peningkatan volume dan berat lalu lintas pada jembatan seringkali melebihi kapasitas desain awal. 2)Degradasi Lingkungan: Komponen baja rentan terhadap korosi di lingkungan tropis yang lembab, yang dapat memperpendek usia pakai jembatan, sementara pembebanan siklik (kelelahan/ *fatigue*) diperburuk oleh muatan berlebih, sehingga menuntut intervensi perkuatan. 3)Kerusakan pasca bencana: Kejadian gempa atau kebakaran dapat menyebabkan penurunan drastis pada kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan kekakuan material, yang memerlukan perkuatan elemen struktural seperti kolom dan balok.

Secara tradisional, perkuatan dilakukan dengan penambahan elemen struktural konvensional, seperti penambahan pelat baja atau *concrete jacketing*. Namun, metode ini memiliki keterbatasan: penambahan berat mati, meningkatnya dimensi penampang, kesulitan aplikasi, dan kerentanan baja baru terhadap korosi. *Fiber Reinforced Polymers (FRP)* seperti *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* dan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* muncul sebagai solusi revolusioner. FRP menawarkan beberapa keunggulan signifikan dibandingkan material konvensional: 1)Rasio Kekuatan terhadap Berat yang Tinggi: Memungkinkan penambahan kekuatan tanpa menambah beban mati yang substansial. 2)Ketahanan Korosi: Sangat cocok untuk struktur jembatan di lingkungan agresif. 3)Kemudahan Aplikasi: Mempercepat durasi perkuatan (*retrofitting*).

Dalam teknologi perkuatan FRP, terdapat dua teknik utama: *Externally Bonded Reinforcement (EBR)* dan *Near Surface Mounted (NSM)*. Teknik EBR, yang menempelkan FRP pada permukaan luar beton, sering mengalami kegagalan *peeling off* (pengelupasan) yang tiba-tiba dan getas (*brittle*). Sebagai respons, teknik NSM dikembangkan untuk mengatasi kelemahan EBR. NSM melibatkan penempatan bar atau strip FRP ke dalam alur yang digerinda pada penutup beton (*concrete cover*), kemudian alur diisi dengan perekat berbasis epoksi. Keunggulan utama NSM adalah: 1) Peningkatan Lekatan (*Bond Strength*): NSM memberikan kurungan (*confinement*) yang lebih baik pada FRP, yang secara signifikan meningkatkan kekuatan lekatan. 2) Proteksi Lingkungan: FRP yang ditanam di dalam penutup beton lebih terlindungi dari kerusakan mekanis dan paparan langsung lingkungan, menjadikannya pilihan yang andal untuk perkuatan jangka panjang. Meskipun NSM meningkatkan kekuatan, mode kegagalan yang tersisa, seperti kegagalan *peeling* pada penutup beton, masih menjadi perhatian kritis, terutama pada balok komposit baja dan beton. Oleh karena itu, studi mendalam tentang mekanisme lekatan dan efektivitas desain NSM sangat diperlukan.

Tujuan dari pelaksanaan studi literatur ini adalah untuk: 1)Mengidentifikasi dan mengklasifikasikan mode-mode kegagalan dominan yang terdokumentasi, seperti kegagalan *FRP debonding* dan *concrete cover peeling*, pada sistem NSM FRP untuk perkuatan lentur dan geser. 2)Menganalisis hasil-hasil uji eksperimental mengenai pengaruh parameter desain NSM (misalnya, jumlah bar, ukuran penampang FRP, dan panjang ankur) terhadap peningkatan kapasitas beban dan penurunan daktilitas struktural. 3)Menyintesis data kinerja jangka pendek dan jangka panjang dari balok komposit yang diperkuat dengan NSM FRP berprategang dan tanpa prategang, fokus pada efektivitasnya dalam mereduksi tegangan tarik di beton.

Berdasarkan prinsip kerja sama material yang sinergis, memanfaatkan kekuatan tarik tinggi baja hingga 410 MPa dan kekuatan tekan beton yang tinggi, menghasilkan elemen struktur yang lebih kuat dan ekonomis. Dalam sistem ini, profil baja menahan momen lentur dan beton menahan gaya tekan. Kunci dari perilaku komposit yang efektif adalah transfer gaya geser longitudinal yang memadai antara baja dan beton melalui konektor geser, yang harus dipastikan tidak mengalami kegagalan untuk mencapai kapasitas lentur penuh. Pola tegangan bervariasi di daerah momen positif (bentang tengah) beton tertekan dan baja tertarik, sementara di daerah momen negatif (di atas kolom) beton mengalami tarik, yang menuntut perancangan perkuatan lentur yang sesuai.

Material komposit canggih yang terdiri dari serat berkekuatan tinggi (seperti serat karbon atau kaca) yang tertanam dalam matriks polimer epoksi. FRP dikenal dalam rekayasa sipil karena rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan korosi, dan kemudahan aplikasi. Jenis yang paling umum digunakan adalah *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*, yang memiliki kekuatan dan modulus elastisitas superior, dan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*, yang lebih ekonomis. Aplikasi perkuatan FRP dapat dilakukan melalui dua metode yaitu: *Externally Bonded Reinforcement (EBR)*, yang rentan terhadap kegagalan pengelupasan, dan *Near Surface Mounted (NSM)*. Metode NSM menanam FRP ke dalam alur beton memberikan kinerja lekatan yang lebih unggul karena kurungan yang lebih baik, meskipun kegagalan *peeling off* dari penutup beton masih mungkin terjadi di ujung batang FRP.

Penelitian terdahulu : Fokus riset pada optimasi lekatan, pencegahan kegagalan getas, dan evaluasi dampak prategang terhadap kapasitas struktural. Studi oleh Gong et al. (2021) mengkonfirmasi bahwa perkuatan NSM CFRP di daerah momen negatif dapat meningkatkan kapasitas beban ultimate balok komposit sebesar 10% hingga 20%, meskipun peningkatan ini disertai dengan penurunan daktilitas yang signifikan dan kegagalan dominan berupa pengelupasan penutup beton. De Lorenzis et al. (2004) mengidentifikasi bahwa efisiensi lekatan NSM dipengaruhi oleh panjang *embedment* dan parameter geometri alur, yang penting untuk mencegah kegagalan *debonding*. Selain itu, penelitian mengenai NSM berprategang menyoroti keunggulan teknik ini dalam meningkatkan kekuatan lentur dan kekakuan, tetapi penerapan tingkat prategang yang terlalu tinggi harus dihindari karena berisiko menyebabkan fraktur prematur.

METODE

Penelitian mengenai perkuatan *Near Surface Mounted (NSM) Fiber Reinforced Polymer (FRP)* secara metodologis didasarkan pada *Systematic Literature Review (SLR)* kualitatif deskriptif. Pendekatan ini memastikan proses yang terstruktur, mulai dari identifikasi pertanyaan kunci spesifik mengenai mode kegagalan dan parameter desain, hingga pencarian sistematis menggunakan basis data ilmiah terkemuka. Kriteria inklusi difokuskan pada hasil penelitian eksperimental dan numerik yang relevan dengan perkuatan balok komposit baja dan beton. Data yang diekstraksi mencakup klasifikasi mode kegagalan, variasi parameter material dan geometris, hasil kuantitatif (kapasitas dan daktilitas), serta model prediktif, yang semuanya disintesis untuk mengidentifikasi tren dan kesenjangan studi.

Meskipun teknik NSM menawarkan peningkatan kinerja lekatan yang signifikan dibandingkan *Externally Bonded Reinforcement (EBR)*, sistem ini rentan terhadap kegagalan mendadak yang bersifat getas. Mode kegagalan kritis yang paling umum dan menjadi ciri khas pada NSM adalah Pengelupasan Penutup Beton (*Concrete Cover Peeling Off*). Kegagalan ini terjadi ketika lapisan beton tipis di atas alur terkelupas, melepaskan batang FRP akibat kombinasi konsentrasi tegangan tarik yang tinggi di ujung area lekatan dan keterbatasan kuat tarik beton. Selain itu, Kegagalan Lekatan FRP (*FRP Debonding*) juga merupakan mode getas yang tidak diinginkan. Sementara itu,

Kegagalan Fraktur FRP (putusnya batang FRP) jarang terjadi; mode ini hanya teramati pada balok dengan kuat tekan beton yang sangat tinggi, di mana lekatan begitu superior sehingga kapasitas penuh FRP tercapai sebelum beton di sekitarnya gagal.

Efisiensi lekatan NSM FRP sangat bergantung pada optimasi interaksi parameter kunci. Parameter geometris seperti lebar dan kedalaman alur, ketebalan perekat, serta jarak antar alur, harus dikelola dengan cermat untuk membatasi konsentrasi tegangan dan menjamin transfer gaya geser yang efektif. Penentuan Panjang *Embedment* yang optimal adalah krusial agar FRP dapat mencapai kapasitas ultimitnya sebelum terjadi *debonding*. Selain faktor geometri, kualitas Material Perekat (epoksi) menentukan kekuatan geser antarmuka. Selain itu, Konfigurasi Tulangan internal (terutama sengkang) juga memberikan efek kurungan (*konfinemen*) tambahan yang dapat menunda atau mencegah kegagalan *peeling off* pada penutup beton, menegaskan keunggulan teknis NSM dengan potensi peningkatan kekuatan lekat hingga 33% dibandingkan EBR.

Secara kuantitatif, penelitian pada balok komposit baja dan beton menunjukkan adanya *trade off* mendasar: perkuatan NSM CFRP menghasilkan peningkatan kapasitas beban ultimate rata-rata 10% hingga 20%, namun diikuti oleh penurunan daktilitas signifikan, berkisar antara 14.8% hingga 19.35%. Hal ini menggarisbawahi tantangan utama dalam desain, yaitu kecenderungan NSM memperburuk mode kegagalan getas. Oleh karena itu, kinerja optimal NSM FRP bergantung pada pemahaman mendalam mengenai mekanisme kegagalan *peeling* dan *debonding* yang getas. Dalam upaya mengatasi masalah penurunan daktilitas dan untuk mengendalikan retak pada kondisi beban layanan, fokus penelitian selanjutnya beralih pada penerapan gaya prategang pada NSM FRP.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Prinsip dan Mekanisme Perkuatan NSM FRP Berprategang

Perkuatan *Near Surface Mounted (NSM) Fiber Reinforced Polymer (FRP)* berprategang mewakili pendekatan canggih untuk mengoptimalkan kinerja balok komposit baja dan beton. Teknik ini melibatkan penerapan gaya tarik pada tendon FRP sebelum dilekatkan ke beton, yang kemudian mentransfer gaya tekan (kompresif) ke permukaan beton setelah gaya tarik dilepaskan.

Tujuan utama dari penerapan prategang adalah mengatasi kelemahan beton pada zona tarik dan meningkatkan kinerja pada tingkat beban layanan. Manfaat mekanis yang dihasilkan meliputi: 1) Peningkatan Kekakuan Awal: Gaya tekan yang diinduksi oleh prategang membantu menjaga penampang beton dalam kondisi tidak retak (*uncracked*) lebih lama, yang secara efektif meningkatkan kekakuan lentur struktur. 2) Pengurangan kerusakan tarik: Prategang mereduksi tegangan tarik yang timbul pada beton, mengendalikan lebar retak, dan mengurangi kerusakan tekan pada beton, yang menegaskan efektivitas metode ini. 3) Peningkatan Kapasitas Ultimate: NSM FRP berprategang memberikan peningkatan kapasitas lentur statik yang lebih tinggi dibandingkan dengan NSM pasif.

B. Analisis Kuantitatif Kinerja Kapasitas dan Daktilitas

Analisis komparatif terhadap hasil-hasil penelitian terdahulu mengungkapkan adanya pertukaran (*trade-off*) yang signifikan antara peningkatan kapasitas beban dan perilaku daktilitas struktural. Tabel 4.1 menyajikan sintesis data kuantitatif dari penelitian mengenai NSM pasif dan NSM berprategang.

Tabel 4.1: Sintesis Kinerja Kapasitas Ultimate dan Daktilitas Berbagai Sistem NSM FRP

Parameter Kinerja	Balok Kontrol (Tanpa Perkuatan)	NSM Pasif (Gong et al.)	NSM Berprategang (<i>High Prestress</i>)
Kapasitas Ultimate	100%	Peningkatan 10% (2 bar) hingga 20% (4 bar)	Peningkatan 15.76% hingga 16.36%
Mode Kegagalan Dominan	Leleh Tulangan Baja (Daktail)	Pengelupasan Beton (<i>Peeling off</i>)	Fraktur Prematur FRP atau <i>Peeling off</i>
Perubahan Daktilitas	Daktilitas Tertinggi	Penurunan 14.8% hingga 19.35%	Berpotensi Menjadi Sangat Rendah

Sumber: Hasil Analisis 2025

Analisis data menunjukkan bahwa penambahan batang CFRP NSM pasif, meskipun mampu meningkatkan kapasitas ultimate hingga 20%, secara simultan menyebabkan penurunan daktilitas yang signifikan (hampir 20%). Penurunan daktilitas ini meningkatkan risiko kegagalan getas (*brittle*) yang tidak diinginkan dalam konteks desain tahan gempa. Di sisi lain, penerapan prategang pada NSM menghasilkan peningkatan kapasitas yang besar, bahkan pada tingkat prategang tinggi (mencapai 15.76% - 16.36%). Keunggulan utama prategang terletak pada kemampuannya mereduksi kerusakan tarik dan tekan pada beton.

C. Analisis Kegagalan Kritis dan Optimasi Prategang

Resiko Fraktur Prematur FRP

Tantangan utama dalam perkuatan berprategang adalah manajemen tingkat tegangan. Penelitian menunjukkan bahwa jika tingkat prategang yang diterapkan terlalu tinggi, hal ini dapat menyebabkan kekuatan leleh pelat CFRP terkonsumsi terlalu banyak pada saat prategang diaplikasikan. Kondisi ini mengakibatkan fraktur prematur pada pelat CFRP, yaitu kegagalan putus yang terjadi mendadak dan bersifat sangat getas. Fraktur prematur mencegah balok mencapai mode kerusakan yang ideal (daktail), sehingga memerlukan optimasi yang sangat cermat dalam menentukan batas atas tingkat prategang yang aman.

Perbandingan Mekanisme Kinerja

Perbedaan mendasar antara perkuatan pasif dan berprategang dapat disintesis berdasarkan kriteria kinerja jangka pendek dan kontrol kerusakan, seperti yang dirangkum dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2: Perbedaan Kinerja NSM Pasif vs. NSM Berprategang

Kriteria Kinerja	NSM Pasif	NSM Berprategang
Kekakuan Awal	Kekakuan sedang, namun rentan retak dini.	Kekakuan tinggi; mempertahankan kondisi <i>uncracked</i> lebih lama.
Kontrol Retak	Hanya aktif setelah retak tarik inisiasi.	Menginduksi gaya tekan, aktif mengendalikan lebar retak sejak awal.
Ketahanan Korosi	Perluasan retak dapat mempercepat korosi baja internal.	Kontrol retak yang ketat menunda penetrasi agen korosif (meningkatkan durabilitas).
Fokus Peningkatan	Kapasitas Beban Ultimate Statik.	Kapasitas, Kekakuan, dan Kinerja Layanan Jangka Panjang.

Sumber : Hasil Analisis 2025

D. Kinerja Jangka Panjang dan Tantangan Durabilitas

Penelitian juga mencakup evaluasi kinerja jangka panjang dari sistem NSM FRP berprategang. Evaluasi ini mencakup kinerja di bawah beban statik berkelanjutan (*sustained loading*), di mana fenomena *creep* (rangkak) pada perekat epoksi dapat memengaruhi efektivitas lekatan seiring waktu. Selain itu, studi mengenai ketahanan lelah (*fatigue*) dan paparan lingkungan ekstrem (seperti siklus beku dan leleh) telah dilakukan untuk memvalidasi kelayakan NSM FRP berprategang sebagai solusi perkuatan permanen. Kontrol efektif terhadap retak yang ditawarkan oleh prategang adalah aspek kunci yang berkontribusi pada peningkatan durabilitas, karena ia membatasi jalur air dan ion klorida untuk mencapai dan mengkorosi tulangan baja internal pada balok komposit. Analisis ini menyimpulkan bahwa NSM FRP berprategang menawarkan kinerja yang unggul dalam hal peningkatan kapasitas dan kekakuan, serta kontrol retak yang lebih baik. Namun, optimalisasi desain sangat penting untuk menghindari risiko kegagalan getas katastrofik, seperti fraktur prematur akibat prategang yang berlebihan. Desain yang berhasil harus secara bersamaan memaksimalkan kekuatan sambil mempertahankan tingkat daktilitas yang dapat diterima.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Tinjauan literatur mengenai perkuatan balok komposit baja dan beton menggunakan teknik *Near Surface Mounted (NSM) Fiber Reinforced Polymer (FRP)* menghasilkan tiga kesimpulan utama:

1. Mode Kegagalan Getas Dominan: Mekanisme kegagalan utama yang membatasi kinerja NSM FRP adalah kegagalan lekatan getas (*brittle bond failure*). Kegagalan ini paling sering termanifestasi sebagai pengelupasan penutup beton (*concrete cover peeling off*) di ujung batang FRP, yang menyebabkan penurunan daktilitas struktural yang signifikan (hingga 19%) meskipun kapasitas beban ultimate meningkat.
2. Efektivitas Prategang: Penerapan prategang (*prestressing*) pada NSM FRP adalah metode yang sangat efektif untuk meningkatkan kinerja lentur dan kekakuan awal struktur. Prategang membantu mengendalikan retak tarik dan meningkatkan kapasitas beban hingga 16%.
3. Tantangan Optimalisasi Daktilitas: Manfaat prategang harus diimbangi dengan risiko kegagalan getas yang diperburuk. Tingkat prategang yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kekuatan pelat FRP terkonsumsi berlebihan dan memicu fraktur prematur pada pelat FRP, yang merupakan mode kegagalan yang sangat tidak diinginkan dalam desain tahan gempa.

Saran

Berdasarkan kesenjangan kritis (*research gaps*) yang teridentifikasi, penelitian di masa depan harus fokus pada:

1. Optimal Prategang dan Daktilitas: Melakukan studi eksperimental untuk menentukan batas tingkat prategang optimal pada NSM FRP yang mampu memaksimalkan peningkatan kekuatan sambil tetap menjaga daktilitas minimum sesuai standar tahan gempa.
2. Model Lekatan untuk Perkuatan Geser: Mengembangkan dan memvalidasi model prediktif yang andal mengenai mekanisme kegagalan lekatan NSM FRP ketika diterapkan secara spesifik untuk perkuatan geser (bukan hanya lentur) pada balok komposit.

3. Durabilitas Jangka Panjang: Mengkaji secara empiris perilaku jangka panjang sistem NSM FRP berprategang (termasuk efek *creep* pada epoksi) dalam konteks lingkungan tropis Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Albuja Sanchez, J., Damian Chalán, A., & Escobar, D. (2024). *Experimental Studies and Application of Fiber Reinforced Polymers (FRPs) in Civil Infrastructure Systems: A State-of-the-Art Review*. *Polymers*, 16(2), 250.
- ACI Committee 440. (2017). ACI PRC-440.2-17: *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- De Lorenzis, L., Nanni, A., & Arduini, F. (2004). *Bond mechanism of near surface mounted fiber reinforced polymer bars for flexural strengthening of concrete structures*. *ACI Structural Journal*, 101(6), 830–839.
- Dhari, A., & Aziz, A. H. (2025). Experimental Investigation on the Ultimate Strength of Corroded Composite Concrete Beams Strengthened with NSM GFRP Bars. *Rafidain Journal of Engineering Sciences*, 3(2), 38–48.
- Elbelbisi, A. H., El-Sisi, A. A., Hassan, H. A., Salim, H. A., & Shabaan, H. F. (2022). Parametric Study on Steel–Concrete Composite Beams Strengthened with Post-Tensioned CFRP Tendons. *Sustainability*, 14(23), 15792.
- El-Hacha, R., & Soudki, K. (2005). Prestressed near surface mounted fibre reinforced polymer reinforcement for concrete structures - A review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(6), 1109-1126.
- Faveryan, I. B., Triwiyono, A., & Siswosukarto, S. (2021). Numerical Modeling of Applied Near-Surface Mounted on Reinforcement Slab with ABAQUS CAE. *Jurnal Teknik Sipil*, 17(2), 112–120.
- Fayed, S., Ghalla, M., Hu, J. W., et al. (2024). Shear Strengthening of RC Beams Using Prestressed Near-Surface Mounted Bars Reducing the Probability of Construction Failure Risk. *Materials*, 17(23), 5701.
- Fernandes, P., Sena-Cruz, J., Xavier, J., Silva, P., Pereira, E., & Cruz, J. (2018). Durability of bond in NSM CFRP-concrete systems under different environmental conditions. *Composites Part B: Engineering*, 138, 19–34.
- Gong, Q., Li, J., & Zhou, W. (2021). Steel concrete composite beams strengthened with NSM CFRP systems at the hogging moment regions. *Journal of Constructional Steel Research*, 182, 106709.
- Gong, S., Su, M., Zhang, J., & Peng, H. (2024). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with gradually prestressed near surface mounted carbon fiber-reinforced polymer strips. *Advances in Structural Engineering*, 27(7), 1234–1250.
- Guo, H., Liao, H., Su, M., Zhang, B., Li, S., & Peng, H. (2024). Shear strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP: Influencing factors and analytical model. *Composite Structures*, 342, 118262.
- Haryanto, Y., Hu, H. T., Han, A. L., et al. (2021). Nonlinear 3D model of double shear lap tests for the bond of near-surface mounted FRP rods in concrete considering different embedment depth. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(3), 878–889.

- Haryanto, Y., Hsiao, F. P., Hu, H. T., Han, A. L., et al. (2022). Structural behavior of negative moment region NSM-CFRP strengthened RC T-beams with various embedment depth under monotonic and cyclic loading. *Composite Structures*, 301, 116214.
- Jati, D. G., Utomo, J., Tanudjaja, F. A., & Lie, H. A. (2023). Efektivitas Angkur Epoksi Terhadap Kekangan Eksternal Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan CFRP. *Jurnal Teknik Sipil*, 17(2), 103–111.
- Liu, X., Tang, L., Jing, Y., Xiang, J., et al. (2022). Behaviour of continuous steel-concrete composite beams strengthened with CFRP sheets at hogging-moment region. *Composite Structures*, 291(1), 115695.
- Mohammed, M., Chai, Y. Y., Doh, S. I., & Lim, K. S. (2021). Degradation of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Material Exposed to Tropical Atmospheric Condition. *Key Engineering Materials*, 879, 265–274.
- Nugroho, L., Haryanto, Y., Hu, H. T., et al. (2021). Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of RC beams strengthened with NSM CFRP prestressed concrete prisms. *Composite Structures*, 257, 113385.
- Thamrin, R., & Zakiyyah, A. (2021). Flexural Behavior of Reinforced Concrete (RC) Beams with Externally Bonded (EB) Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets. In *CIEC 2013*, Springer, Singapore, 637–648.
- Wang, Z. (2024). High level prestressing effects on flexural enhancement of NSM FRP strengthened beams. *Materials*, 17(6), 1408.