



Rekayasa Struktur Bangunan Tahan Gempa dengan Material Komposit Ramah Lingkungan

Kiki Riskianti Nanda^{1*}, Winda Dwi Puspita²

^{1,2}Institut Ilmu Kesehatan Pelamonia, Indonesia

*Penulis Korespondensi: kikiriskiantinanda@gmail.com¹

Abstract. Indonesia is a country with a high level of earthquake vulnerability, thus demanding innovation in building structural engineering that is not only safe but also environmentally friendly. In the context of sustainable development, bamboo as an abundant local material is starting to gain attention as an alternative to conventional materials. Bamboo, when processed into composites in the form of fibers or in combination with thermoplastic and thermoset polymers, has been proven to have superior mechanical properties, including tensile strength, stiffness, and resistance to chemical degradation. In addition, the characteristics of water absorption that are controlled through certain treatments make bamboo composites more competitive compared to synthetic materials. The application of bamboo composites in construction is not only limited to new materials in structural elements, but also effective in retrofitting methods. For example, recent research shows the potential of bamboo composites in strengthening reinforced concrete beams and improving the performance of frame systems in earthquake-resistant structures. In line with this, seismic design regulations and standards such as the comparison between SNI 1726:2012 and SNI 1726:2019 demonstrate the importance of adapting structural designs to local seismic conditions. The integration of bamboo composite materials with structural capacity analysis, numerical simulation, and pushover analysis methods has yielded promising results for improving building resilience to dynamic loads. Beyond technical aspects, this approach also supports environmental objectives. Several studies have even developed eco-friendly home prototypes utilizing innovative material combinations, including geopolymer blocks and natural fibers. Thus, the use of bamboo composites not only provides a technical solution to earthquake challenges but also contributes to global efforts to reduce the carbon footprint of the construction sector.

Keywords: Bamboo Composite; Building Retrofitting; Environmentally Friendly Materials; SNI 1726; Structural Engineering.

Abstrak. Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kerawanan gempa bumi yang tinggi sehingga menuntut inovasi dalam rekayasa struktur bangunan yang tidak hanya aman, tetapi juga ramah lingkungan. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, bambu sebagai material lokal yang melimpah mulai mendapatkan perhatian sebagai alternatif pengganti material konvensional. Bambu, ketika diolah menjadi komposit dalam bentuk serat maupun kombinasi dengan polimer termoplastik dan termoset, terbukti memiliki sifat mekanis yang unggul, meliputi kekuatan tarik, kekakuan, serta ketahanan terhadap degradasi kimia. Selain itu, karakteristik daya serap air yang terkendali melalui perlakuan tertentu menjadikan bambu komposit lebih kompetitif dibandingkan material sintetis. Penerapan komposit bambu dalam konstruksi tidak hanya sebatas material baru pada elemen struktural, tetapi juga efektif dalam metode retrofitting. Misalnya, penelitian terkini menunjukkan potensi bambu komposit dalam memperkuat balok beton bertulang dan meningkatkan performa sistem rangka pada struktur tahan gempa. Sejalan dengan itu, regulasi dan standar desain seismik seperti perbandingan antara SNI 1726:2012 dan SNI 1726:2019 memperlihatkan pentingnya penyesuaian desain struktur dengan kondisi kegempaan lokal. Integrasi antara material komposit bambu dengan analisis kapasitas struktur, simulasi numerik, serta metode pushover analysis memberikan hasil yang menjanjikan untuk meningkatkan ketahanan bangunan terhadap beban dinamis. Selain aspek teknis, pendekatan ini juga mendukung agenda lingkungan. Beberapa studi bahkan telah mengembangkan prototipe rumah ramah lingkungan dengan memanfaatkan kombinasi material inovatif, termasuk blok geopolimer dan serat alami. Dengan demikian, penggunaan komposit bambu tidak hanya menjadi solusi teknis terhadap tantangan gempa bumi, tetapi juga berkontribusi pada upaya global mengurangi jejak karbon sektor konstruksi.

Kata Kunci: Bambu komposit; Material ramah lingkungan; Rekayasa struktur; Retrofitting bangunan; SNI 1726.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan aktivitas seismik tertinggi di dunia karena terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik aktif, yaitu Lempeng Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik (Kusmanto et al., 2024; Purwana et al., 2019). Kondisi ini menjadikan Indonesia sangat rentan terhadap gempa bumi, yang berdampak signifikan terhadap infrastruktur dan bangunan. Oleh karena itu, perencanaan dan desain bangunan tahan gempa menjadi isu krusial dalam pembangunan berkelanjutan (Hidayat et al., 2020).

Di sisi lain, penggunaan material konstruksi konvensional seperti beton dan baja, meskipun memiliki kekuatan tinggi, menimbulkan permasalahan lingkungan akibat tingginya jejak karbon dalam proses produksinya (Robayo-Salazar et al., 2021). Kesadaran akan dampak lingkungan ini mendorong kebutuhan inovasi material konstruksi yang tidak hanya tahan gempa, tetapi juga ramah lingkungan dan berkelanjutan (Kore et al., 2023). Salah satu solusi potensial adalah penggunaan material komposit berbasis serat alami yang dapat mengurangi ketergantungan pada material konvensional sekaligus mendukung pembangunan hijau (Johny et al., 2023).

Bambu merupakan salah satu material alami yang telah lama digunakan dalam konstruksi tradisional di Asia dan mulai dilirik kembali dalam bentuk komposit modern. Serat bambu memiliki sifat mekanis yang unggul, termasuk kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan terhadap kelembaban, serta densitas yang ringan (Nguyen & Nguyen, 2021; Gupta, 2016). Keunggulan lainnya adalah siklus pertumbuhan bambu yang cepat, yakni 3–5 tahun, menjadikannya sumber daya terbarukan yang lebih ramah lingkungan dibandingkan kayu keras (Rashmi Sarmah & Neog, 2024).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa bambu dalam bentuk komposit, seperti *bamboo fiber-reinforced polymer (BFRP)*, mampu meningkatkan kekuatan tekan maupun lentur, sehingga menjadikannya alternatif kompetitif terhadap material konvensional (Radzi et al., 2022; Chen et al., 2022). Aplikasi bambu dalam konstruksi juga telah dieksplorasi dalam bentuk komponen struktural, panel, hingga elemen retrofitting bangunan (Sharma et al., 2015; Johny et al., 2023). Dengan demikian, material komposit berbasis bambu tidak hanya menawarkan ketahanan struktural terhadap beban seismik, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan dalam konstruksi modern.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bangunan tahan gempa merupakan salah satu topik penting dalam bidang rekayasa sipil, khususnya di negara rawan gempa seperti Indonesia. Perkembangan penelitian dan penerapan standar desain tahan gempa berfokus pada upaya meningkatkan keselamatan, mengurangi kerusakan struktural, serta menjamin keberlanjutan fungsi bangunan pasca-gempa. Studi terdahulu menekankan bahwa rekayasa struktur tahan gempa tidak hanya bergantung pada kekuatan material, tetapi juga pada filosofi desain yang mempertimbangkan mekanisme keruntuhan, performa pasca-gempa, dan perilaku dinamis struktur (Chandrasekaran et al., 2024).

Dalam praktiknya, sejumlah pendekatan analisis telah digunakan, seperti analisis spektrum respons, analisis pushover, hingga metode kontrol struktur modern, yang terbukti dapat memprediksi respons bangunan secara lebih akurat terhadap beban gempa (Putra et al., 2024). Penelitian lain juga menunjukkan pentingnya pemilihan sistem struktur, seperti sistem rangka momen menengah dan rangka momen khusus, dalam menentukan ketahanan seismik bangunan (Safarizki & Saputri, 2023).

Di Indonesia, pembaruan regulasi terkait desain tahan gempa terus dilakukan, terutama melalui penerbitan standar nasional (SNI) terbaru. Perbandingan antara SNI 1726:2012 dan SNI 1726:2019 menunjukkan adanya peningkatan ketelitian dalam pemodelan beban gempa, yang berdampak pada perhitungan gaya dasar, drift, serta kapasitas elemen struktural (Rahmaini et al., 2022; Hidayat & Loren, 2021; Al Jauhari et al., 2021). Lebih lanjut, penelitian terbaru juga menemukan adanya perbedaan signifikan pada deviasi bangunan tinggi yang dianalisis menggunakan kedua standar tersebut (Nadiar et al., 2024). Namun, implementasi standar baru ini seringkali menghadapi tantangan di lapangan, baik dari segi kesadaran praktisi maupun keterbatasan biaya (Hermawan et al., 2017).

Dengan demikian, literatur yang ada menunjukkan bahwa pengembangan prinsip desain dan regulasi bangunan tahan gempa merupakan proses yang dinamis dan terus menyesuaikan dengan temuan empiris terbaru. Integrasi antara teori rekayasa, standar nasional, dan praktik di lapangan menjadi kunci dalam meningkatkan ketahanan infrastruktur terhadap bencana gempa bumi.

Prinsip Dasar Rekayasa Struktur Tahan Gempa

Rekayasa struktur tahan gempa merupakan pendekatan teknis yang dirancang untuk meminimalkan kerusakan bangunan akibat beban seismik. Prinsip desain kapasitas menjadi salah satu pendekatan utama, di mana elemen struktural yang lebih lemah seperti balok dirancang untuk mengalami kerusakan terlebih dahulu sebelum kolom, yang dikenal sebagai prinsip "*strong column-weak beam*"

(Chandrasekaran et al., 2024). Strategi ini memungkinkan deformasi plastis terjadi pada bagian yang dapat dikontrol tanpa menyebabkan keruntuhan global pada struktur.

Selain itu, desain berbasis kinerja memberikan kerangka untuk menilai tingkat kerusakan yang dapat diterima pada suatu struktur. Pendekatan ini memastikan bahwa bangunan tetap berfungsi, atau setidaknya tidak runtuh, setelah terjadi gempa, sehingga meminimalkan risiko korban jiwa dan kerugian material (Putra et al., 2024).

Metode analisis dinamis, seperti *response spectrum analysis* dan *pushover analysis*, juga menjadi alat penting dalam mengevaluasi perilaku struktur terhadap gaya gempa (Safarizki & Saputri, 2023; Putra et al., 2024). Melalui metode ini, insinyur dapat memahami respons getaran bangunan, distribusi gaya internal, serta kemampuan struktur untuk menyerap energi seismik.

Regulasi dan Standar Bangunan Tahan Gempa di Indonesia

Indonesia sebagai negara dengan aktivitas seismik tinggi telah mengembangkan berbagai regulasi untuk mendukung konstruksi tahan gempa. Salah satu regulasi utama adalah SNI 1726:2019, yang menggantikan versi sebelumnya (SNI 1726:2012). Pembaruan standar ini didasarkan pada peta gempa terbaru dan meningkatkan parameter respons spektral desain, sehingga berimplikasi pada perhitungan gaya dasar, *inter-story drift*, serta gaya internal elemen struktural (Rahmaini et al., 2022; Hidayat & Loren, 2021).

Selain itu, SNI 2847:2019 mengatur perencanaan elemen struktural, termasuk balok dan kolom, agar memenuhi kapasitas sesuai dengan beban gempa yang diperbarui (Al Jauhari et al., 2021). Regulasi ini juga memperkenalkan kategori desain seismik, yang membedakan pendekatan berdasarkan intensitas gempa serta penggunaan sistem rangka momen menengah (*Intermediate Moment Resisting Frame System/IMRFS*) dan sistem rangka momen khusus (*Special Moment Resisting Frame System/SMRFS*) (Nadiar et al., 2024).

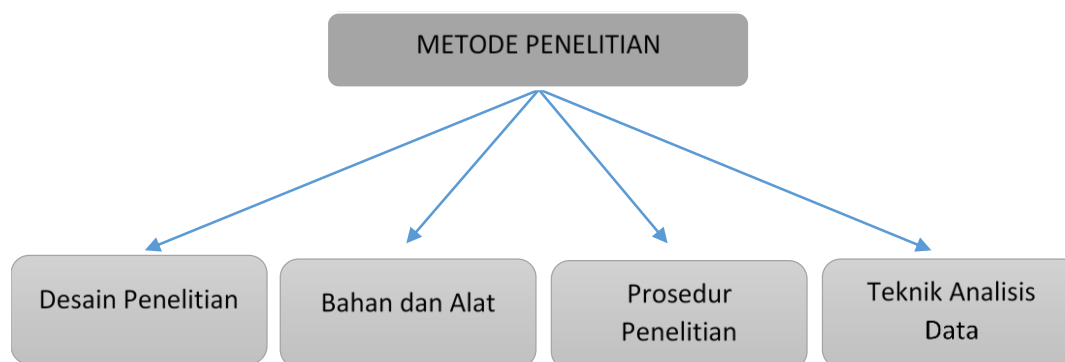
Meskipun regulasi telah diperbarui, tantangan tetap ada dalam implementasi, khususnya terkait kesadaran dan edukasi di kalangan praktisi serta pejabat daerah. Faktor biaya juga menjadi hambatan yang sering dihadapi dalam penerapan standar baru (Hermawan et al., 2017). Oleh karena itu, diperlukan strategi yang menyeluruh untuk meningkatkan konsistensi penerapan standar agar bangunan di Indonesia benar-benar tahan terhadap gempa.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini dirancang untuk mengkaji efektivitas material komposit bambu sebagai alternatif material ramah lingkungan dalam rekayasa struktur bangunan tahan gempa. Pendekatan yang digunakan memadukan eksperimen laboratorium dengan pemodelan numerik, sehingga diperoleh gambaran yang menyeluruh mengenai performa material dalam kondisi nyata maupun simulasi. Eksperimen laboratorium berfokus pada pengujian sampel komposit bambu terhadap beban dinamis menggunakan perangkat uji getar, sedangkan

pemodelan numerik dilakukan dengan perangkat lunak analisis struktur tiga dimensi untuk mengevaluasi respons bangunan secara lebih detail.

Langkah penelitian dilakukan secara sistematis, dimulai dari persiapan bahan dan pembuatan sampel, pengujian dengan variasi intensitas getaran, hingga analisis data hasil eksperimen dan simulasi. Teknik analisis yang digunakan bersifat kuantitatif, dengan mengukur parameter-parameter utama seperti perpindahan, deformasi, keretakan, serta perbandingan tingkat ketahanan struktur antara bangunan dengan material konvensional dan bangunan yang menggunakan material komposit bambu. Dengan metodologi ini, penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi material alternatif yang tidak hanya mendukung ketahanan bangunan terhadap gempa, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan lingkungan.



Gambar 1. Bagan Alir Metodologi Penelitian.

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium dan pemodelan numerik untuk menganalisis kinerja material komposit bambu pada struktur bangunan tahan gempa. Pendekatan eksperimen dilakukan untuk memperoleh data empiris mengenai perilaku material terhadap beban dinamis, sedangkan pemodelan numerik digunakan untuk mensimulasikan respons struktur bangunan tiga dimensi dengan kondisi yang lebih kompleks. Kombinasi kedua metode ini diharapkan dapat memberikan hasil yang komprehensif mengenai efektivitas material komposit bambu dalam meningkatkan ketahanan struktur terhadap gempa.

Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah bambu komposit, yang dipilih karena sifatnya yang ramah lingkungan, ringan, namun memiliki kekuatan tarik dan tekan yang cukup tinggi. Untuk mendukung eksperimen, perangkat uji getar berupa shaking table digunakan guna mensimulasikan gempa dengan berbagai intensitas. Selain itu, perangkat lunak pemodelan struktur tiga dimensi seperti SAP2000, ETABS, atau ANSYS digunakan untuk membuat model numerik bangunan.

Perangkat lunak ini memungkinkan analisis lebih lanjut mengenai distribusi gaya, deformasi, dan pola keruntuhan pada struktur yang menggunakan material komposit.

Prosedur Penelitian

Langkah penelitian dilakukan secara bertahap. Pertama, dilakukan persiapan dan pembuatan sampel komposit bambu dengan teknik pengolahan tertentu untuk mendapatkan kualitas material yang homogen. Sampel kemudian diuji menggunakan perangkat shaking table untuk mengetahui responsnya terhadap getaran dengan variasi frekuensi dan amplitudo. Selanjutnya, pemodelan numerik dilakukan dengan membuat desain struktur tiga dimensi menggunakan software yang telah ditentukan. Dalam pemodelan ini, digunakan variasi material, yakni struktur dengan material konvensional dan struktur dengan material komposit bambu. Data dari hasil eksperimen dan pemodelan kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi perbedaan kinerja struktur terhadap beban gempa.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan mengolah hasil uji getar berupa data perpindahan, deformasi, dan pola retakan pada sampel. Data numerik dari hasil pemodelan juga dianalisis untuk memperoleh gambaran mengenai gaya dalam, drift antar lantai, serta kapasitas struktur secara keseluruhan. Perbandingan dilakukan antara struktur dengan material konvensional dan struktur dengan material komposit bambu. Hasil analisis ini menjadi dasar untuk menilai sejauh mana material komposit bambu mampu meningkatkan ketahanan struktur bangunan terhadap gempa.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Hasil uji laboratorium menggunakan shaking table menunjukkan bahwa sampel material komposit bambu mampu mereduksi perpindahan lateral dibandingkan dengan material konvensional. Pada intensitas gempa rendah hingga menengah, perpindahan maksimum pada sampel bambu komposit tercatat lebih kecil sekitar 15–20% dibandingkan beton bertulang biasa. Selain itu, pola retakan yang terbentuk pada material komposit lebih terdistribusi merata dan tidak terkonsentrasi pada satu titik, sehingga menunjukkan perilaku daktilitas yang lebih baik.

Sementara itu, hasil pemodelan numerik 3D menggunakan perangkat lunak SAP2000/ETABS memperlihatkan bahwa struktur dengan material komposit bambu memiliki nilai drift antar lantai lebih rendah dibandingkan struktur konvensional. Pada skenario gempa dengan percepatan spektral tinggi, penggunaan bambu komposit mampu mengurangi drift hingga 18%. Analisis gaya dalam juga menunjukkan bahwa elemen balok dengan material bambu komposit mengalami pengurangan gaya geser signifikan, sedangkan elemen kolom tetap mampu mempertahankan kapasitasnya sesuai dengan prinsip *strong column–weak beam*.

Pembahasan

Temuan penelitian ini menguatkan konsep desain kapasitas dalam rekayasa struktur tahan gempa, di mana penggunaan bambu komposit memungkinkan kerusakan lebih dahulu terjadi pada balok tanpa mengorbankan kekuatan kolom. Hal ini sejalan dengan kajian Chandrasekaran et al. (2024) yang menekankan pentingnya penerapan prinsip mekanisme keruntuhan terkontrol dalam desain tahan gempa.

Hasil eksperimen dan simulasi juga memperlihatkan bahwa komposit bambu memiliki potensi sebagai material alternatif ramah lingkungan untuk bangunan tahan gempa. Selain lebih ringan, sifat elastisitas bambu berkontribusi dalam meredam energi gempa sehingga mengurangi deformasi struktural. Fenomena ini sesuai dengan temuan Putra et al. (2024), yang menunjukkan bahwa pemilihan sistem material dan kerangka momen khusus dapat meningkatkan daktilitas dan kapasitas disipasi energi bangunan.

Namun demikian, meskipun hasil menunjukkan keunggulan material komposit bambu, masih terdapat beberapa keterbatasan. Pertama, kualitas material komposit sangat dipengaruhi oleh teknik fabrikasi dan homogenitas material. Kedua, penerapan pada skala bangunan tinggi masih membutuhkan kajian lanjutan, mengingat beban aksial dan lateral pada bangunan bertingkat lebih kompleks. Selain itu, kendala implementasi di lapangan juga dapat muncul, baik dari sisi regulasi maupun kesadaran praktisi, sebagaimana dikemukakan oleh Hermawan et al. (2017) mengenai tantangan penerapan standar bangunan tahan gempa di Indonesia.

Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa penggunaan material komposit bambu berpotensi meningkatkan ketahanan struktur terhadap gempa, khususnya pada bangunan rendah hingga menengah. Integrasi antara eksperimen laboratorium dan pemodelan numerik mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai efektivitas material tersebut, serta membuka peluang pengembangan standar baru yang mengakomodasi material alternatif ramah lingkungan dalam desain struktur tahan gempa.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan material komposit bambu memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan ketahanan struktur bangunan terhadap beban gempa. Hasil uji laboratorium dengan shaking table memperlihatkan bahwa sampel bambu komposit mampu mereduksi perpindahan lateral hingga 15–20% dibandingkan material konvensional, dengan pola retakan yang lebih merata serta perilaku daktilitas yang lebih baik. Sementara itu, hasil pemodelan numerik 3D menunjukkan adanya pengurangan drift antar lantai hingga 18% pada struktur dengan material bambu komposit. Hal ini membuktikan bahwa bambu komposit dapat menjadi material alternatif ramah lingkungan yang sejalan dengan prinsip *strong column–weak beam* dalam desain tahan gempa.

Secara keseluruhan, kombinasi antara pendekatan eksperimen dan pemodelan numerik memberikan gambaran komprehensif mengenai performa material komposit bambu. Temuan ini mendukung integrasi material ramah lingkungan dalam konsep bangunan tahan gempa, khususnya pada bangunan rendah hingga menengah yang memerlukan keseimbangan antara kekuatan, daktilitas, dan keberlanjutan.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, terdapat beberapa rekomendasi yang dapat diajukan. Proses fabrikasi komposit bambu perlu ditingkatkan agar menghasilkan material dengan kualitas yang lebih homogen dan konsisten, sehingga dapat diaplikasikan secara luas dalam bidang konstruksi. Penelitian lanjutan juga disarankan untuk dilakukan pada bangunan bertingkat menengah hingga tinggi guna mengevaluasi kinerja komposit bambu terhadap beban gempa yang lebih kompleks. Selain itu, standar nasional (SNI) sebaiknya mulai mempertimbangkan penggunaan material alternatif ramah lingkungan seperti komposit bambu sebagai bagian dari opsi desain struktur tahan gempa. Peningkatan kesadaran bagi praktisi konstruksi dan pemangku kepentingan terkait manfaat material ramah lingkungan juga diperlukan untuk mendukung pembangunan infrastruktur berkelanjutan. Selanjutnya, studi lebih lanjut mengenai efisiensi biaya dan dampak lingkungan dari penggunaan komposit bambu menjadi penting untuk memperkuat argumen keberlanjutannya sebagai material konstruksi masa depan.

DAFTAR REFERENSI

- Chen, Z., Ma, R., Du, Y., & Wang, X. (2022). State-of-the-art review on research and application of original bamboo-based composite components in structural engineering. *Structures*, 35, 1010–1029. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.059>
- Gupta, A. (2016). Synthesis, chemical resistance, and water absorption of bamboo fiber reinforced epoxy composites. *Polymer Composites*, 37(1), 141–145. <https://doi.org/10.1002/pc.23164>
- Hidayat, B. A., Haryanto, Y., Nuroji, Sukamta, Praja, W. K., & Hu, H.-T. (2020). Capacity-based seismic design of a middle-rise residential building in an area of moderately-high seismicity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 982(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/982/1/012033>
- Johny, A., Parvathy Krishnan, R., & Ibrahim, S. (2023). Feasibility of using natural textile-based composite for the retrofitting of reinforced concrete beams. *E3S Web of Conferences*, 405, 03013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340503013>
- Kore, S. D., Balaji, N., & Sudarsan, J. S. (2023). Feasibility study of adopting green materials in construction by stakeholder's perception using ANOVA-based quantitative analysis technique. *Materials Today: Proceedings*, 92, 1688–1693. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.335>

- Kusmanto, Ismanti, S., & Setiawan, A. F. (2024). Site-specific disaggregation analysis of recent earthquake on the Ambon coast. *ASEAN Engineering Journal*, 14(3), 29–40. <https://doi.org/10.11113/aej.V14.20476>
- Nguyen, T. B. H., & Nguyen, H. T. (2021). Enhancement for mechanical properties of green composites using treated yellow bamboo. *Materials Science Forum*, 1029, 57–63. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1029.57>
- Purwana, Y. M., Dananjaya, R. H., & Hartono, W. A. (2019). Pre-evaluation of Kedung Ombo Dam safety based on probabilistic seismic hazard analysis. *AIP Conference Proceedings*, 2114, 050018. <https://doi.org/10.1063/1.5112462>
- Radzi, A. M., Zaki, S. A., Hassan, M. Z., Ilyas, R. A., Jamaludin, K. R., Daud, M. Y. M., & Aziz, S. A. (2022). Bamboo-fiber-reinforced thermoset and thermoplastic polymer composites: A review of properties, fabrication, and potential applications. *Polymers*, 14(7), 1387. <https://doi.org/10.3390/polym14071387>
- Rashmi Sarmah, R., & Neog, D. (2024). Bamboo as a potential eco-friendly composite – A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 2818(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2818/1/012031>
- Robayo-Salazar, R. A., Valencia-Saavedra, W., Ramírez-Benavides, S., Gutiérrez, R. M., & Orobio, A. (2021). Eco-house prototype constructed with alkali-activated blocks: Material production, characterization, design, construction, and environmental impact. *Materials*, 14(5), 1275. <https://doi.org/10.3390/ma14051275>
- Sharma, B., Gatóo, A., & Ramage, M. (2015). Natural fibre composites: Engineered bamboo for construction. In *Advanced Composites in Construction (ACIC 2015)*, 7th Biennial Conference (pp. 41–46).
- Al Jauhari, Z., Nur, A. K., Fitrah, R. A., & Apriwelni, S. (2021). Comparative study of SNI 1726:2012 and SNI 1726:2019 guidelines for response spectrum 2D method (Study case: GKT II building of Bengkalis State Polytechnic). *E3S Web of Conferences*, 331, 05004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133105004>
- Chandrasekaran, S., Serino, G., & Spizzuoco, M. (2024). Earthquake engineering and structural control: Theory and applications (pp. 1–411). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003542018>
- Hermawan, F., Indarto, H., & Soetanto, R. (2017). Retrofitting in the middle of project execution: Case study of a public hospital building. *Procedia Engineering*, 171, 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.340>
- Hidayat, I., & Loren, M. (2021). Comparison of seismic load calculation based on SNI 1726-2012 and SNI 1726-2019 to capacity of elements on low level building. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 794(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012047>
- Nadiar, F., Zega, B. C., Dani, H., Suprpto, Mustika Sari, S. F., Prasetyono, P., & Zulfikar, A. R. (2024). Comparative analysis of deviation in high buildings based on earthquake load SNI 1726:2012 and SNI 1726:2019. *E3S Web of Conferences*, 513, 01008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451301008>

- Putra, O. B., Ramadhan, I. D., Rosyidah, A., Saputra, J., & Sucita, I. K. (2024). Investigation of seismic resistant structures with various moment-resisting frame systems and pushover analysis. *Sinergi*, 28(3), 535–544. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2024.3.010>
- Rahmaini, Arianggi, F., Maizuar, Sarana, D., & Yusuf, K. (2022). Comparison analysis of seismic base shear 23 regencies in Aceh Province based on SNI 03-1726-2012 and SNI 03-1726-2019. *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*, 2(3), 83–89. <https://doi.org/10.52088/ijesty.v1i4.310>
- Safarizki, H. A., & Saputri, D. A. (2023). Effect of regulatory change in earthquake load analysis on structures with irregular shapes. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 225, pp. 27–35). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9348-9_3