

Perilaku Dinamik Struktur Gedung Beton Bertulang 12 Lantai dengan Peredam Viskoelastis pada Tahap Awal Operasional : Pengukuran Mikrotremor

N. R. Hasrul¹, A. F. Setiawan^{1*}, I. S. Irawati¹, H. Priyosulistyo¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: angga.fajar.s@ugm.ac.id

INTISARI

Penelitian ini mengkaji perilaku dinamik struktur bangunan beton bertulang 12 lantai yang dilengkapi dengan peredam viskoelastis secara pengukuran mikrotremor. Penelitian ini dilakukan pada masa awal operasional bangunan yang dapat menjadi tolak ukur untuk kondisi bangunan di masa depan. Perilaku dinamik ini diharapkan menjadi acuan untuk pemantauan ketahanan seismik struktur di masa mendatang. Metode pengukuran dilakukan dengan *accelerometer* yang memiliki ketelitian 9,999 mV/g, yang dipasang pada kolom di lantai 1, 2, 6, 7, 11, dan 12 dalam arah *longitudinal* (barat-timur) dan *transversal* (utara-selatan). Untuk mendapatkan frekuensi alami struktur, data sinyal *history* dari *accelerometer* di domain waktu dilakukan dengan *double integral* sehingga menjadi domain waktu perpindahan, yang kemudian dianalisis menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Selanjutnya, data frekuensi dianalisis dengan *averaging*. Data yang telah diproses kemudian dibagi menjadi 25 potongan matriks, dirata-ratakan, dan disajikan dalam bentuk grafik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai frekuensi alami dominan adalah 1,37 Hz pada arah *longitudinal* dan 1,27 Hz pada arah *transversal*. Selain itu, faktor amplifikasi antara lantai terhadap lantai dasar pada arah *longitudinal* adalah 7,17, sedangkan pada arah *transversal* di lantai teratas adalah 9,09 dengan arah *transversal* yang lebih besar daripada *longitudinal*.

Kata kunci: Frekuensi alami, *accelerometer*, Faktor amplifikasi

1 PENDAHULUAN

Menyadari pentingnya memasukkan data masa layanan ke dalam manajemen bangunan sangatlah krusial dalam mematuhi standar penulisan jurnal internasional. Perencanaan strategis masa layanan bangunan secara signifikan memengaruhi pemilihan bahan dan komponen yang sesuai (Alataby et al. 2021). Salah satu aspek penting dalam merancang struktur tahan gempa adalah memahami pentingnya frekuensi alami struktur (Bruneau dan Reinhorn 2007). Resonansi dapat terjadi selama gempa ketika frekuensi gempa sesuai dengan frekuensi alami bangunan, sehingga dapat memengaruhi stabilitas struktur (Bruneau et al. 2019).

Penelitian De Domenico et al. 2019 dan Duggal (2006) mendefinisikan "dinamis" sebagai perubahan temporal, yang menunjukkan bahwa beban dinamis mengalami variasi dalam ukuran, posisi, atau orientasi dari waktu ke waktu. Karakteristik dan dinamika bangunan meliputi frekuensi alami, rasio redaman, dan indeks kerentanan bangunan. Upaya untuk meningkatkan kinerja bangunan yang ada melibatkan perbaikan, pemulihan, dan peningkatan. Tren arsitektur ini menjadi signifikan mengingat biaya renovasi bangunan yang ada secara global lebih tinggi dibandingkan dengan biaya pembangunan baru (Gallipoli et al. 2020).

Sebagai respons terhadap tantangan seismik, penerapan peredam muncul sebagai alternatif untuk meminimalkan kerusakan akibat gempa. Banyak penelitian menunjukkan bahwa peredam efektif dalam mengurangi getaran dan mencegah kerusakan bangunan selama gempa, meskipun ada beberapa kelemahan yang terkait (Hu et al. 2020; Rauf dan Crawford 2015; Setia et al. 2019; Shen et al. 2019; Sungkono et al. 2011). Dampak gempa tidak hanya terbatas pada kerusakan struktural, tetapi juga mencakup pemulihan pasca-bencana. Oleh karena itu, konsep daya tahan menjadi sangat penting dalam proses desain kontemporer (Wang et al. 2024). Dengan demikian, *benchmarking* pemantauan seismik struktur menjadi sangat diperlukan. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk memeriksa perilaku dinamis struktural selama periode awal operasional mereka.

2 LANDASAN TEORI

2.1 Frekuensi Alami

Menurut Oppenheim dan Schafer (1999) frekuensi alami adalah frekuensi di mana suatu struktur cenderung bergetar secara alami ketika dikenai gangguan. Frekuensi alami ini bergantung pada kekakuan (*stiffness*) dan massa struktur.

Struktur yang lebih kaku dan lebih ringan cenderung memiliki frekuensi alami yang lebih tinggi. Frekuensi alami untuk sistem massa-pegas satu derajat kebebasan dapat dihitung dengan persamaan 1.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

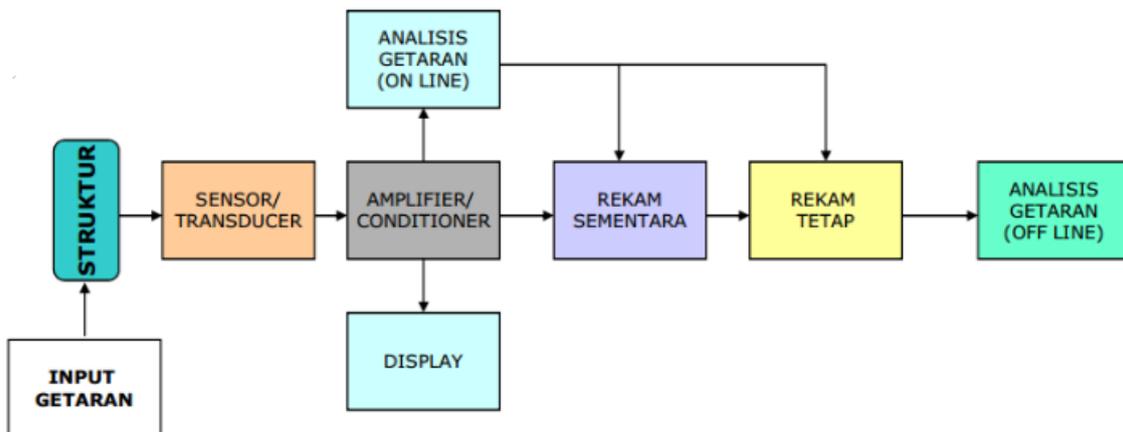
Frekuensi alami merupakan parameter penting dalam perancangan struktur karena menentukan respons dinamis dari struktur tersebut. Ketika frekuensi eksitasi dari sumber eksternal seperti gempa bumi mendekati frekuensi alami struktur, dapat terjadi resonansi yang memperbesar respons dinamis, sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan struktural. Frekuensi alami ini, yang diukur dalam *hertz* (Hz), bergantung pada kekakuan pegas yang diukur dalam *newton per meter* (N/m) dan massa dalam *kilogram* (kg).

2.2 Pengukuran Dinamik Pada Struktur

Getaran yang terjadi pada struktur dapat dipicu oleh aktivitas manusia maupun fenomena alam. Salah satu getaran yang menimbulkan risiko signifikan terhadap struktur adalah yang disebabkan oleh gempa bumi, terkenal karena efek dahsyatnya dan kurangnya peringatan tepat waktu. Untuk mengatasi masalah ini, pengamat lapangan dapat melakukan pemodelan untuk mensimulasikan dampak getaran pada struktur. Proses pemodelan ini melibatkan representasi struktur secara sederhana, memungkinkan deteksi getaran menggunakan alat khusus dan konversi data getaran menjadi data sinyal. Getaran dapat dikategorikan berdasarkan karakteristiknya, seperti getaran harmonik *sinusoidal* yang diwakili oleh persamaan 2.

$$Y = A \sin(pt) \tag{2}$$

di mana *Y* adalah getaran harmonik *sinusoidal*, *A* adalah amplitudo, *p* adalah frekuensi sudut, dan *t* adalah waktu. Selain itu, terdapat getaran periodik yang berosilasi di sekitar titik pusat secara terus menerus dalam kerangka waktu yang ditentukan, getaran acak atau murni acak, dan getaran acak secara berkala. Metode untuk mengukur getaran dalam struktur dapat dilakukan dengan memanfaatkan intensitas getaran atau amplitudo untuk membandingkan hasil pengukuran dengan standar yang ditetapkan. Teknik dinamis yang digunakan dalam metode ini bergantung pada proses pemodelan struktural. Ketika struktur dapat dimodelkan secara akurat, pengukuran lapangan memberikan wawasan tentang gaya yang diterapkan pada struktur. Pendekatan pengukuran lain berfokus pada penilaian respons struktur terhadap gaya dinamis dengan mempertimbangkan parameter seperti frekuensi alami, koefisien redaman, kekakuan, dan bentuk mode. Analisis dinamis struktur dan cara mengukurnya secara efektif diilustrasikan pada Gambar 1.

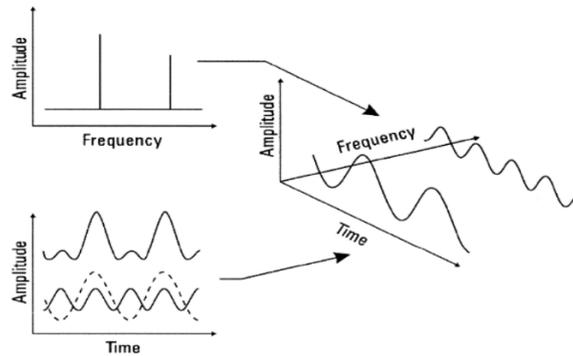


Gambar 1. Cara Pengukuran Struktur dengan Analisis Dinamik (Kurniawan dan Priyosulistyo 2020)

2.3 Teori Dasar Transformasi *Fourier*

Transformasi *Fourier* digunakan untuk mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi, yang sangat penting dalam pemrosesan sinyal karena banyak sinyal lebih mudah dianalisis dalam domain frekuensi. Transformasi *Fourier* memecah sinyal menjadi komponen frekuensi *sinusoidal*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Transformasi Fourier Diskrit (DFT) adalah metode yang digunakan untuk menganalisis sinyal diskret dalam domain frekuensi, mengubah sinyal dari domain waktu $X[n]$ menjadi domain frekuensi $X[k]$ menggunakan Persamaan 3.



Gambar 2. Skema cara pandang domain frekuensi (Priyosulistyo 2022).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \tag{3}$$

di mana $X[k]$ adalah komponen frekuensi ke- k , $X[n]$ adalah nilai sinyal pada waktu n , N adalah jumlah sampel dalam sinyal, dan j adalah bilangan imajiner. Invers DFT mengembalikan sinyal dari domain frekuensi ke domain waktu dengan Persamaan 4.

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \tag{4}$$

Fast Fourier Transform (FFT) adalah algoritma yang sangat efisien untuk menghitung DFT dan inversnya, mengurangi jumlah operasi aritmetika yang diperlukan dari $O(N^2)$ menjadi $O(N \log N)$. Algoritma *Cooley-Tukey* adalah metode FFT yang paling umum digunakan, bekerja dengan membagi DFT dari ukuran N menjadi dua DFT dari ukuran $N/2$. FFT digunakan dalam analisis getaran untuk mengidentifikasi frekuensi alami struktur dan mendeteksi resonansi, yang memungkinkan analisis frekuensi dominan yang menyebabkan getaran. Transformasi *Fourier* mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi dengan Persamaan 5.

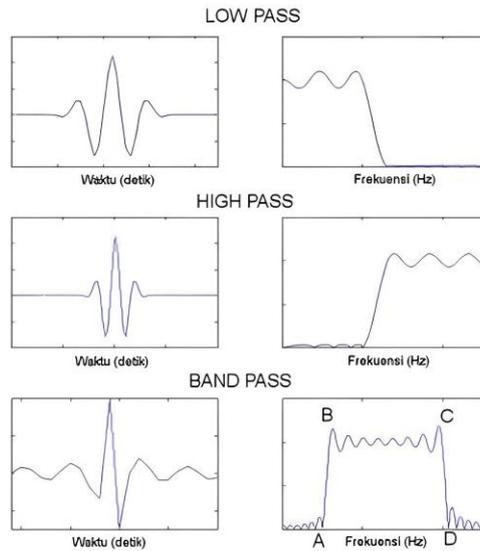
$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \tag{5}$$

Untuk mengembalikan sinyal dari domain frekuensi ke domain waktu, digunakan Invers Transformasi *Fourier* dengan Persamaan 6.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \tag{6}$$

Kelemahan dalam hasil transformasi disebabkan oleh asumsi bahwa $-\infty$ dan $+\infty$ dalam fungsi integral setara dengan awal dan akhir perekaman data, dikenal dengan *Dirichlet Condition*, yang membahas sifat-sifat dan batasan dari DFT. Sifat penting dari DFT termasuk frekuensi *Nyquist*, frekuensi tertinggi yang dapat dideteksi dalam domain frekuensi, dan ketelitian frekuensi, yang meningkat dengan panjang total waktu perekaman. Filter digital adalah sistem yang mengubah karakteristik sinyal seperti bentuk gelombang, frekuensi, fase, dan amplitudo, untuk meningkatkan kualitas sinyal atau memisahkan sinyal yang tergabung. Jenis filter termasuk filter lolos tengah (*band pass*), filter lolos bawah (*low pass*), filter lolos atas (*high pass*), dan filter henti (*band stop*), yang diilustrasikan dalam domain waktu dan frekuensi pada Gambar 3.

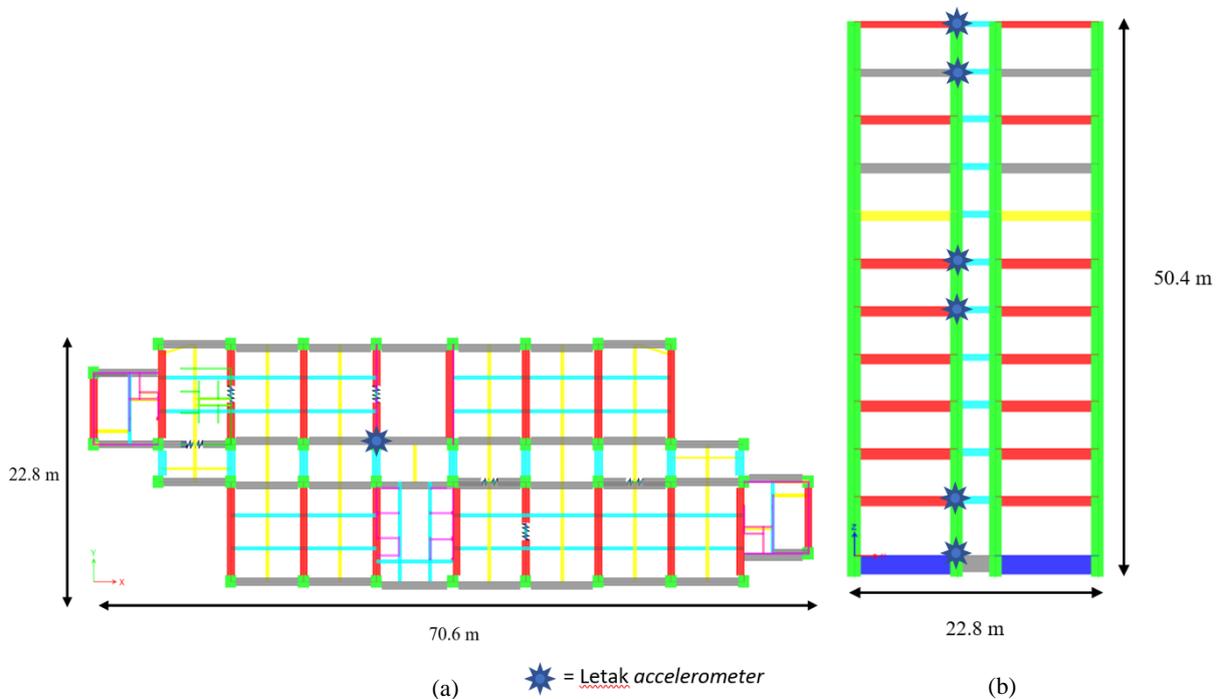
Transformasi *Fourier* dan FFT memungkinkan analisis respons struktur terhadap beban dinamis, membantu merancang struktur yang lebih tahan terhadap beban dinamis dan menghindari resonansi yang dapat menyebabkan keruntuhan struktur.



Gambar 3. Jenis tapis dalam basis waktu dan basis frekuensi (Priyosulistyo 2022).

3 METODE

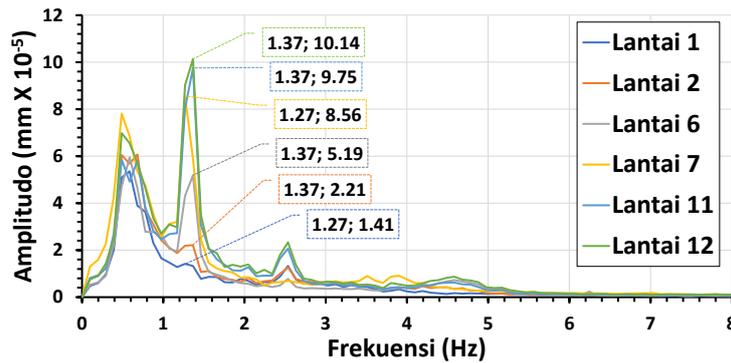
Dalam penelitian ini, bangunan yang diteliti adalah bangunan beton bertulang setinggi 12 lantai yang dilengkapi dengan peredam viskoelastis, dengan total tinggi 50,4 meter, lebar 22,8 meter, dan panjang 70,6 meter, seperti yang terlihat pada Gambar 4. Pengujian mikrotremor dilakukan menggunakan *accelerometer*, yang ditempatkan pada kolom bangunan. Perangkat *accelerometer* ini dipasang di lantai 1, 2, 6, 7, 11, dan 12. *Accelerometer* digunakan untuk membaca sinyal getaran mikro struktur sekitar. Perekaman data *accelerometer* dilakukan pada dini hari untuk meminimalkan gangguan. Pembacaan data *accelerometer* dilakukan menggunakan aplikasi Dewesoft dengan laju sampel 50 Hz dan akurasi instrumen 9,990 mV/g dengan durasi 10 menit. Selain itu, data diproses dengan analisis FFT. Kemudian, data yang telah diproses dibagi menjadi 25 bagian matriks, dan dilakukan rata-rata untuk mendapatkan frekuensi alami struktur.



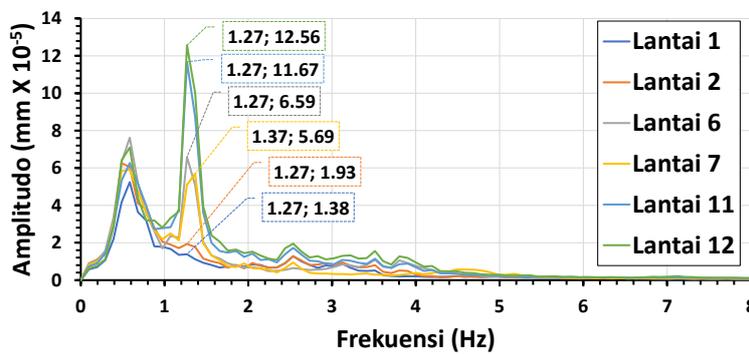
Gambar 4. Ukuran gedung (a) Tampak atas (b) Tampak samping.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

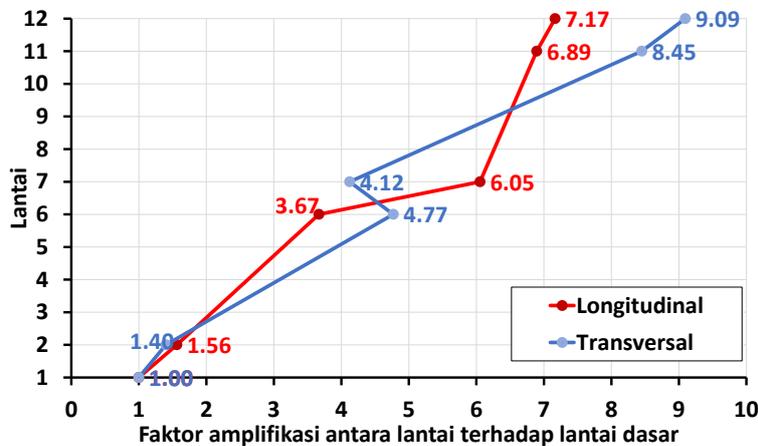
Berdasarkan pengukuran frekuensi alami dalam arah *longitudinal* dan *transversal*, frekuensi yang diperkirakan berada dalam rentang 1,27 – 1,37 Hz. Dalam hal ini, arah *longitudinal* lebih sering menunjukkan frekuensi 1,37 Hz, sementara arah *transversal* cenderung menunjukkan frekuensi 1,27 Hz, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5 dan 6. Berdasarkan ASCE 7-16, Frekuensi alami fundamental menunjukkan 1,3 detik atau 0,77 Hz, yang berarti sesuai dengan standar. Munculnya amplitudo yang besar dengan frekuensi 0,59 Hz pada arah *longitudinal* dan *transversal* kemungkinan merupakan efek dari sistem pondasi atau tanah sehingga tidak terjadi perbedaan yang signifikan antara satu lantai ke lantai lain. Selain itu, faktor amplifikasi antara lantai terhadap lantai dasar *transversal* lebih besar daripada *longitudinal*, dengan nilai 9,09 pada arah *transversal* dan 7,17 pada arah *longitudinal*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 5. Frekuensi dominan longitudinal.



Gambar 6. Frekuensi dominan transversal.



Gambar 7. Faktor amplifikasi antara lantai terhadap lantai dasar.

5 KESIMPULAN

Berdasarkan pengukuran, frekuensi alami bangunan 12 lantai dengan peredam viskoelastis adalah 1,37 Hz dalam arah *longitudinal* dan 1,27 Hz dalam arah *transversal*. Faktor amplifikasi antara lantai terhadap lantai dasar yang terjadi di lantai atas adalah 7,17 dalam arah *longitudinal* dan 9,09 dalam arah *transversal*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Fakultas Teknik UGM atas izin untuk akses data dari sistem rekaman getaran mikro Gedung Roeseno dan Yusuf Haroki atas kontribusinya dalam pengolahan data FFT.

REFERENSI

- Alataby, E. K., J. A. Kadhim, dan M. A. Ahmed. 2021. "Study on the Effect of Distribution of Viscous Damper for Steel Frame Structure." *J. Phys. Conf. Ser.*, 1973 (1): 31–36. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012220>.
- Bruneau, M., dan A. Reinhorn. 2007. "Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities." *Earthq. Spectra*, 23 (1): 41–62. <https://doi.org/10.1193/1.2431396>.
- De Domenico, D., G. Ricciardi, dan I. Takewaki. 2019. "Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: A review." *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 118 (December 2018): 144–165. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.024>.
- Duggal, S. K. 2006. *Earthquake Resistant Design of Structures*. PHI Learn. Pvt. Ltd., New Delhi.
- Gallipoli, M. R., G. Calamita, N. Tragni, D. Pisapia, M. Lupo, M. Mucciarelli, T. A. Stabile, A. Perrone, L. Amato, F. Izzi, G. La Scaleia, D. Maio, dan V. Salvia. 2020. "Evaluation of soil-building resonance effect in the urban area of the city of Matera (Italy)." *Eng. Geol.*, 272 (April): 105645. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105645>.
- Hu, G., Y. Wang, W. Huang, B. Li, dan B. Luo. 2020. "Seismic mitigation performance of structures with viscous dampers under near-fault pulse-type earthquakes." *Eng. Struct.*, 203 (July 2019): 109878. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109878>.
- Kurniawan, A. D. P. B., dan H. Priyosulistyo. 2020. "Review Kekuatan Gedung Terhadap Gempa Bumi (Membandingkan Uji Eksperimen dan Numerik Gedung Lab Bahan Bangunan UGM)."
- Oppenheim, A., dan R. Schaffer. 1999. *Discrete-Time Processing- Second Edition*.
- Priyosulistyo, H. 2022. *Analisis Dinamika Struktur dan Aplikasinya di Bidang Teknik Sipil*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Rauf, A., dan R. H. Crawford. 2015. "Building service life and its effect on the life cycle embodied energy of buildings." *Energy*, 79 (C): 140–148. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.093>.
- Setia, T. N., M. Afifuddin, dan Y. Idris. 2019. "Identifikasi Frekuensi Natural dan Damping Ratio Dengan Menggunakan Mikrotremor Pada Gedung Evakuasi Bencana Desa Ulee Lheue dan Desa Alue Deah Teungoh." *J. Civ. Eng. Student*, 1 (3): 162–168.
- Shen, W., A. Niyitangamahoro, Z. Feng, dan H. Zhu. 2019. "Tuned inerter dampers for civil structures subjected to earthquake ground motions: optimum design and seismic performance." *Eng. Struct.*, 198 (July): 109470. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109470>.
- Sungkono, D. D. Warnana, Triwulan, dan W. Utama. 2011. "Evaluation of Buildings Strength from Microtremor Analyses." *Int. J. Civ. Environ. Eng. IJCEE-IJENS*, 11 (05): 93–99.
- Wang, W., J. Wang, X. Peng, dan L. Guo. 2024. "Nonlinear analysis model and seismic resilience assessment of LEM-filled CFS residence." *J. Constr. Steel Res.*, 212 (June 2023): 108305. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108305>.