



ST-16

KINERJA STRUKTUR MERU TERHADAP BEBAN ANGIN

I Putu Ellsa Sarasantika^{1*}, Putu Didik Sulistiana¹, I Gede Dhana Putra Sanjaya², Kadek Yonas Prameira Suwandi³, I Gusti Ngurah Agung Eka Arya Tejadinata⁴ dan I Made Nova Hartawan⁵

^{1}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar, Bali
e-mail: iputuellsas@gmail.com*

ABSTRAK

Studi ini menganalisis beban angin, pagoda bertingkat di Bali, yang selama ini tetap utuh meskipun lapisan atasnya berbahan kayu dan lapisan dasarnya dilapisi dinding bata. Penelitian ini meliputi bentuk arsitektur, sistem struktur, bahan bangunan, respons dinamis, dan dampak beban angin terhadap Meru dalam menghadapi aktivitas seismik. Dengan menggunakan model Elemen 3-D, Meru tingkat sebelas di Kawasan Pura Ulun Danu Batur Kintamani, Bali, dipelajari dalam konteks pengaruh beban angin. Studi ini mengidentifikasi periode alami dan mode getar struktur. Dengan mempertimbangkan pula pengaruh beban angin, penelitian ini memberikan wawasan awal mengenai perilaku Meru dalam situasi berangin dan kondisi lingkungan yang lebih luas. Penelitian selanjutnya dapat melibatkan eksperimen untuk mengonfirmasi temuan ini, termasuk analisis komponen individu dan struktur secara keseluruhan.

Kata kunci: meru; model numerik; beban angin; respons dinamis; struktur warisan budaya

PENDAHULUAN

Meru, yang dianggap sebagai tempat suci oleh komunitas Hindu di Bali untuk beribadah kepada Tuhan dan leluhur, diperkenalkan sebagai model arsitektur peribadatan pada abad ke-11 oleh seorang pendeta (Rahadian, 2001, p.144). Proses pembangunan Meru dipandu oleh para arsitek tradisional Bali yang dikenal sebagai "undagi" dan didasarkan pada pedoman yang tertulis dalam Lontar Asta Kosala (Paramadhyaksa I. N., 2008).

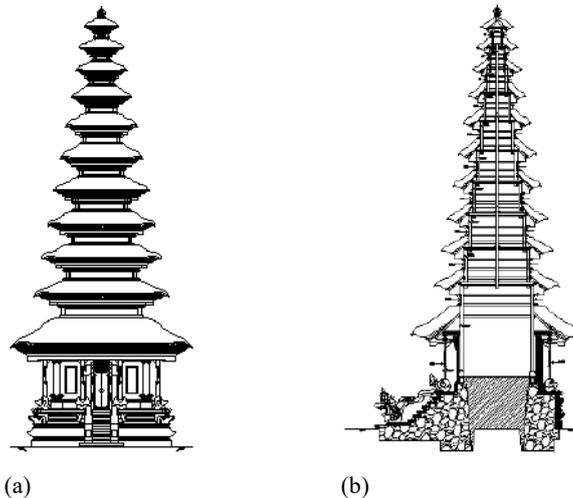
Meskipun banyak penelitian sebelumnya telah mengkaji berbagai aspek Meru seperti variasi, filosofi dasar, tata letak, dan jenis-jenis bangunan (Luxiana et al., 2021), penelitian yang lebih mendalam tentang bagaimana Meru merespons beban angin masih terbatas. Hal ini penting karena dengan memahami bagaimana Meru berperilaku secara struktural dan merespons beban angin, tukang lokal atau "undagi" dan masyarakat umum dapat mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana Meru dapat bertahan terhadap beban angin (William et al., 2017).

Dengan memanfaatkan bahan-bahan lokal dan desain struktural yang khas, Meru menciptakan respons terhadap beban angin yang berbeda dengan bangunan-bangunan modern. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengungkap karakteristik ketahanan Meru terhadap beban angin, informasi ini sangat penting untuk keperluan pemantauan, perawatan, perkuatan, dan pengembangan desain yang lebih efektif di masa depan. Pendekatan ilmiah yang diterapkan dalam ilmu teknik sipil dalam penelitian ini akan memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang bagaimana bangunan tradisional seperti Meru dapat memiliki ketahanan yang baik terhadap beban angin, serta dapat memberikan inspirasi bagi desain bangunan unik lainnya.

METODE

Dari berbagai bentuk dan struktur yang tersedia, dalam penelitian ini difokuskan pada Meru Ulun Danu Batur yang terletak di wilayah Kintamani, seperti yang terlihat pada Gambar 1. Pemilihan Meru ini didasarkan pada pertimbangan bahwa Meru ini merupakan salah satu yang paling tinggi dan memiliki

jumlah tingkat tertinggi, yaitu mencapai ketinggian 14.52 meter dengan total 11 tingkat. Dalam pandangan awal, struktur Meru ini dianggap memiliki potensi kerentanannya terhadap dampak beban angin.



Gambar 1. Meru Ulun Danu Batur (a) Tampak depan (b) Tampak potongan samping

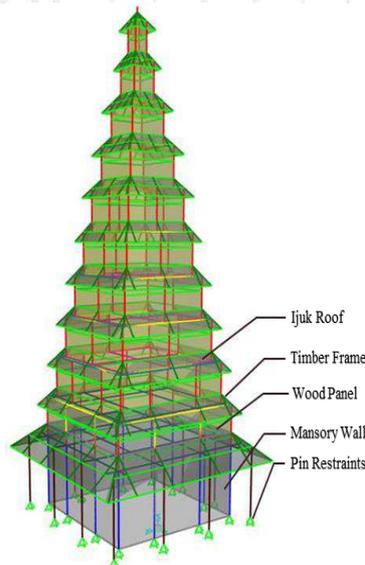
Studi ini mengembangkan model numerik untuk menginterpretasikan perilaku dinamis struktur Meru. Model ini tidak mencakup fondasi dan interaksi struktur-tanah. Modal analisis digunakan untuk mengevaluasi bentuk struktur saat bergetar pada frekuensi utama. Verifikasi keselamatan lokal dilakukan melalui mekanisme keruntuhan berdasarkan batas deformasi dari pedoman desain dan analisis keseimbangan.

Material dan Karakteristik Struktur

Di Bali, tradisi arsitektur utamanya didasarkan pada penggunaan kayu dan batu, terutama digunakan dalam konstruksi bangunan monumental. Ketika melihat pada peninggalan bangunan suci seperti Meru, akan ditemukan kombinasi struktur rangka kayu, panel kayu, dan dinding pasangan bata. Sehubungan dengan bata, ada berbagai jenis tanah liat yang digunakan, yang diproduksi oleh pengrajin lokal. Secara umum, kekuatan bata berkisar sekitar 5 MPa, dan tingkat kekuatan ini mencukupi untuk memenuhi kebutuhan struktural minimum sebesar 2,5 MPa. Batu bata ini memiliki berat jenis sekitar 1700 kg/m³, modulus elastisitas E sekitar 240 MPa, dan rasio Poisson sekitar 0,15 (Nyoman et al., 2016). Jenis kayu majegau adalah yang paling umum digunakan dalam elemen struktur. Kayu ini memiliki umur panjang dan estetika yang baik, dan dikategorikan sebagai kayu kelas satu. Kayu ini memiliki kekuatan aksial sekitar 11 MPa, modulus elastisitas E sekitar 12.500 MPa, dan berat jenis sekitar 670 kg/m³ (Putu et al., 2023). Atap bangunan biasanya terbuat dari ijuk dengan berat jenis sekitar 285 kg/m³ dalam kondisi basah (Supatmi, 2011).

Model Struktur

Kinerja seismik struktur kayu dengan panel kayu yang dipasang dievaluasi menggunakan model analisis yang dapat dilihat pada Gambar 2. Model struktur yang digunakan dalam analisis ini adalah rangka 3D yang memperhitungkan pengaruh dinding pasangan bata dan panel kayu. Elemen-elemen kolom dan balok dianggap elastis dalam model ini. Dalam sistem penyambungan tradisional Meru, pasak kayu digunakan sebagai elemen pengikat, dan sambungan ini dianggap sebagai sambungan semi kaku dengan faktor kekakuan sebesar 0,2 (Sudarsana et al., 2022). Sama halnya, dinding pasangan bata memiliki faktor kekakuan sebesar 0,35 (BSN SNI-2847:2019). Rasio redaman diasumsikan dari energi yang diserap pada sejumlah sambungan sebesar 5%.



Gambar 2. Struktur Model Meru

Pemilihan Beban

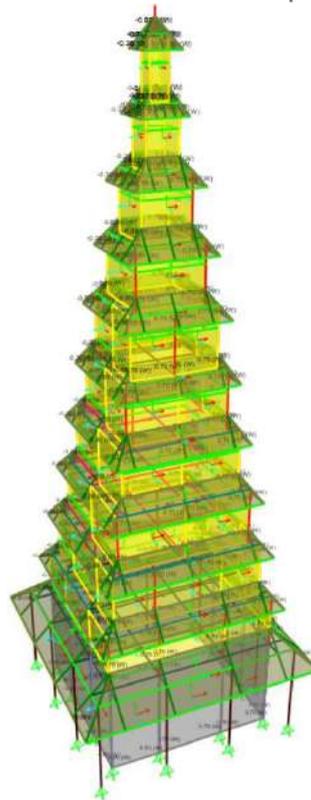
Beban mati yang digunakan dalam desain struktural adalah dengan mengidealisasikan beban atap, terdaftar pada tabel 1. Beban ini kemudian dikonversi menjadi beban gravitasi saat dinamik linear analisis berdasarkan modal struktur.

Tabel 1. Idealisasi pembebanan gravitasi per lantai pada meru

Tier	Atap		
	Height (m)	Weight per Unit Volume (Kg/m ³)	Weight per Area n (Kg/m ³)
1	0.35	285	99.75
2	0.35	285	99.75
3	0.35	285	99.75
4	0.35	285	99.75
5	0.35	285	99.75
6	0.35	285	99.75
7	0.35	285	99.75
8	0.35	285	99.75
9	0.35	285	99.75
10	0.35	285	99.75
11	0.24	285	68.40

Beban hidup yang digunakan sebesar 20 kg/m² disebabkan oleh air hujan sesuai SNI 1727:2020.

Beban angin diaplikasikan sebagai beban lateral otomatis (ASCE7-10), dengan parameter yang disesuaikan untuk memenuhi kode Indonesia SNI 1727:2020. Karakteristik beban angin meliputi kecepatan angin dasar (v) sebesar 100 mph (untuk keperluan desain), dengan kategori eksposur tipe B, topografi (Kzt) sebesar 1, faktor efek tiupan angin (G) sebesar 0,86, faktor arah angin sebesar 0,85, Cp sisi hembusan angin sebesar -0,7, serta sudut arah angin sebesar 35° sesuai dengan kemiringan atap.



Gambar 3. Display Assigned Load Wind

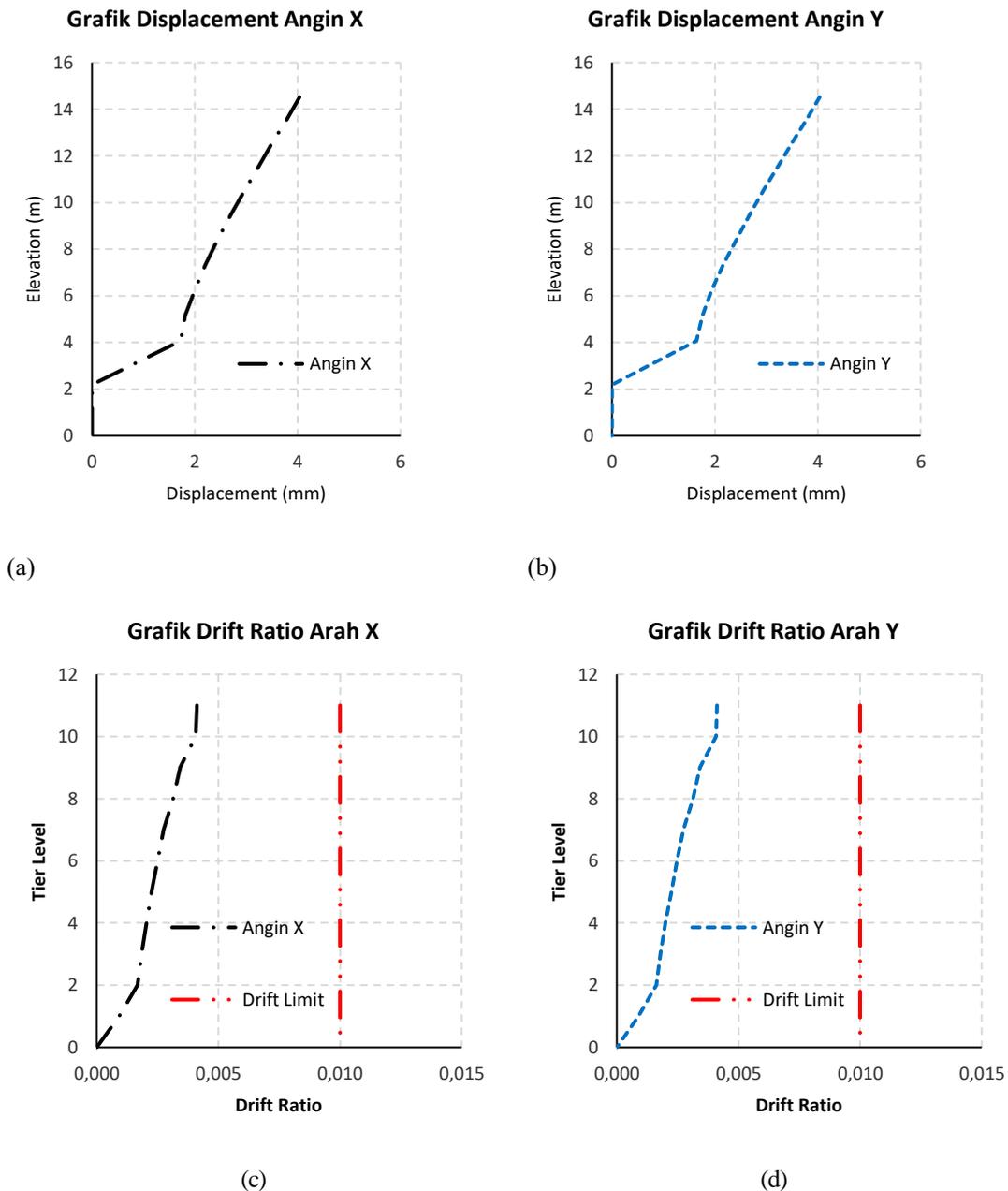
Koefisien yang digunakan pada beban angin kali ini mengacu pada peraturan (SNI-1727, 2020) Pada bagian dinding untuk koefisien C_p dinding pada angin datang yaitu 0,8. Koefisien C_p dinding pada angin pergi yakni -0,5 dan lalu pada koefisien C_p pada tepi dinding yakni 0,7. Pada bagian atap ijuk untuk angin tekan/datang digunakan Koefisien C_p 0,3 dan untuk angin pergi menggunakan Koefisien C_p -0,6 sesuai ketentuan (SNI-1727, 2020) pada kemiringan atap 35° . Lalu software SAP2000 akan otomatis menghitung beban angin sesuai dengan koefisien yang sudah diinput.

HASIL DAN DISKUSI

Hasil analisis terdiri dari dua bagian: analisis modal dan analisis batas kapasitas dan gaya kesetimbangan. Dalam analisis modal, diperoleh perkiraan berat struktur Meru sekitar 133 kN atau sekitar 13 ton, berdasarkan evaluasi massa dan kekakuan struktur. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa ketika struktur mengalami getaran, ada kecenderungan bentuk struktur yang dipengaruhi oleh kontribusi akumulatif massa serta deformasi pada frekuensi (periode) tertentu. Gambar 4 menunjukkan bahwa sebagian besar kontribusi berasal dari periode yang relatif kecil dalam grafik respon spektrum. Ini menandakan bahwa struktur Meru lebih sensitif atau responsif terhadap getaran dengan frekuensi yang lebih tinggi. Faktor ini terkait dengan perbandingan massa dan kekakuan struktur Meru, yang mengindikasikan bahwa bangunan ini termasuk dalam kategori struktur yang kaku atau kurang fleksibel.

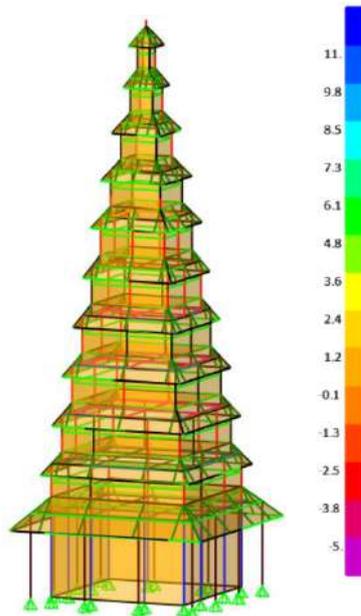
yang baik. Keunggulan struktur Meru adalah memiliki periode alami yang sangat rendah, sehingga mampu menghasilkan percepatan yang relatif rendah dan deformasi yang terkendali.

Untuk perbandingan deformasi struktur akibat beban, dapat dilihat pada Gambar 6(a) dan 6(b) yang menunjukkan deformasi seluruh tinggi struktur Meru. Gambar 6(c) dan 6(d) menunjukkan perbandingan tingkat drift ratio pada setiap tingkat struktur Meru. Dari pengamatan terhadap drift ratio, hasil menunjukkan bahwa simpangan maksimum antar tingkat adalah sekitar 0,0041 untuk beban angin. Drift ratio yang kecil ini mengindikasikan performa yang baik dari struktur kayu, yang cukup untuk memenuhi tingkat keamanan yang diperlukan untuk struktur kayu tradisional. Batas izin maksimum keamanan biasanya adalah 1% berdasarkan pedoman SNI 1726:2020.



Gambar 6. (a) Deformasi maksimum akibat beban angin X, (b) Deformasi maksimum akibat beban angin Y, (c) Drift ratio akibat beban angin X, (d) Drift ratio akibat beban angin Y

Gambar 7 menunjukkan hasil analisis tegangan dan regangan yang timbul akibat deformasi beban angin. Selama beban berlangsung, tegangan dan regangan berubah seiring dengan deformasi, dipengaruhi oleh karakteristik material. Tegangan maksimum yang muncul dari hasil analisis adalah sekitar 0,5 MPa untuk beban angin. Nilai-nilai ini masih berada di bawah batas kekuatan material yang digunakan, baik itu kayu dengan batas kekuatan 11 MPa maupun dinding bata dengan batas kekuatan 5 MPa. Dengan kapasitas yang lebih besar daripada tegangan yang dihasilkan, komponen struktural Meru tetap aman pada tingkat beban angin ini. Karakteristik respons seismik Meru yang menghasilkan deformasi yang relatif kecil adalah faktor kunci dalam menjaga keamanan struktur ini, sejalan dengan kapasitas material yang digunakan. Oleh karena itu, keberlanjutan Meru tingkat sebelas hingga saat ini dapat dijelaskan secara rasional.



Gambar 7. Tegangan Maksimum yang bekerja pada dinding pasangan bata dan panel kayu akibat beban angin

KESIMPULAN

Setiap Meru memiliki konfigurasi struktural yang unik, yang memengaruhi perilaku dinamis dan, sebagai akibatnya, ketahanannya terhadap beban angin. Konfigurasi ini tergantung pada geometri dan distribusi massa serta dipengaruhi oleh sifat mekanik dari elemen-elemen penyusunnya. Untuk memahami lebih lanjut perilaku struktur ini terhadap beban angin, telah dilakukan analisis modal, analisis batas deformasi, dan analisis kapasitas kesetimbangan.

Dari pembahasan hasil analisa didapat bahwa:

- Struktur Meru termasuk struktur yang kaku, dilihat dari perspektif perbandingan massa bangunan dan kekakuan yang dimilikinya.
- Selama diberikan beban angin, sebagian besar bentuk deformasinya berada dalam mode 1 dan mode 2, atau secara sederhana dapat dikatakan seperti deformasi kantilever beam.
- Dilihat pada tiap tingkat Meru, drift yang terjadi masuk dalam batas aman.
- Begitu pula dengan tegangan yang terjadi tidak lebih besar dari kapasitasnya.
- Dengan begitu dapat diperkirakan bahwa hal-hal inilah yang menjadi alasan bahwa Meru dapat bertahan dalam lama sampai saat ini walau terkena beban angin sejak pertama kali didirikan.
- Studi tentu masih mempunyai batasan di antaranya:
 - Efek degradasi kekuatan material akibat pembusukan belum diperhitungkan.
 - Analisa terbatas pada meru tingkat 11, untuk meru tingkat 9, 7, 5 dan 2 masih perlu diteliti.

Meskipun demikian, hasil analisis yang telah disampaikan dapat menjadi dasar untuk penelitian dan studi selanjutnya. Verifikasi melalui eksperimen tetap penting untuk meningkatkan akurasi hasil analisis ini. Hal

ini akan membantu dalam pengembangan dasar yang lebih solid untuk perencanaan dan aplikasi praktis dalam proyek konstruksi dunia nyata atau untuk perbaikan jika diperlukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Armeli, I. A., Agung, I. G., & Suryada, B. (2016). Penelitian yang dilakukan oleh. *Transform*, 2, 1–14.
- ASCE7-16. (2000). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. In *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- BSN SNI-1726. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. 1726. www.bsn.go.id
- BSN SNI-1727. (2020). Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain.
- Dasar, D. I., & Meru, B. (n.d.). Makna filosofis keberadaan ornamen.
- Dwijendra, N. K. A. (2020). Meru as a hindu sacred building architecture with a high roof and resistant to earthquakes in Bali, Indonesia. *Civil Engineering and Architecture*, 8(3), 350–358.
- Gede, I. W. P., & Sudibya, G. I. M. (2019). Analisis Kekuatan Struktur Beton pada Meru Pura Dalem Sakenan di Pulau Serangan Bali. *Jurnal Teknik Sipil*, 8(1), 1-8.
- Howe, L. E. A. (1983). An Introduction to The Cultural Study of Traditional Balinese Architecture. *Archipel*, 25(1), 137–158.
- H, R. P., Astrina, I., & Saliya, Y. (2016). The Typology of the Balinese Meru Shape and the Roots of Its Development. *6(12)*, 1–7.
- Lansing, J. S. (1991). *Meru: The Sacred Architecture of Bali*. Periplus Editions.
- Lansing, J. S. (1991). *Technologies Of Power in The Engineered Landscape of Bali*. California: Princeton University Press Princeton and Oxford.
- Lestari, D. A., & Indrawati, M. (2018). Analisis Struktur Meru Sebagai Bangunan Tradisional Bali Untuk Peningkatan Resistensi Gempa. *Jurnal Arsitektur Universitas Udayana*, 7(2), 55-63.
- Luxiana, I. W. S. (n.d.). *Arsitektur Bali Minimalis*. [http://repository.warmadewa.ac.id/id/eprint/501/1/ARSITEKTUR BALI MINIMALIS.pdf](http://repository.warmadewa.ac.id/id/eprint/501/1/ARSITEKTUR%20BALI%20MINIMALIS.pdf)
- Nyoman, N., Rahayu, R., Budiwati, I. A. M., & Sukrawa, M. (2016). Studi Karakteristik Bata Merah Lokal Bali Sebagai Dinding. In *Jurnal Spektran (Vol. 4, Issue 1)*.
- Paramadhyaksa, I. N. (2008). *Konsepsi Yang Melandasi Bagian Dasar Bangunan Meru Di Bali*. Denpasar: MEDIA TEKNIK No.3.
- Pranoto, A., & Marthanty, D. R. (2018). Analisis respon dinamik struktur Meru Bali. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 20(2), 101-108.
- Putu, I., Sarasantika, E., Gede, I. B., Putra, P., Tampubolon, S., Dhana, G., & Sanjaya, P. (2023). Analisa Performa Seismic Meru (Struktur Bertingkat Pagoda Khas Bali): Preliminary Study (Vol. 4, Issue 1). Online.
- Rita, R., et al. (2016). Traditional Building Materials in Balinese Architecture. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 437-444.
- Sudarsana, I. K., Susila, G. A., Silvi, N. P., & Dwijendra, N. K. A. (2022). Seismic Analysis on the Behaviors of Meru Structures: A Sacred Building in Balinese Temples. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1846193>
- Supatmi. (2011). Analisis Kualitas Genteng Beton Dengan Bahan Tambah Serat Ijuk Dan Pengurangan Pasir.
- William, R. (2017). The Architecture of Pagodas Viewed from the Angle of Site Lay-Out, Proportion, and Symbolization. *Riset Arsitektur (RISA)*, 1(02), 192–208.
- Yudistira, I. K., Astawa, I. B. P., & Wijaya, I. N. (2019). Analisis Struktur Meru Taman Ayun. *Jurnal Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 7(1), 50-57.