

PENGARUH KLASIFIKASI SITUS TANAH TERHADAP KEBUTUHAN TULANGAN PADA DESAIN STRUKTUR GEDUNG TAHAN GEMPA DENGAN TSD

Hibban Dias Respati¹, Yehezkiel Septian Yoganata², Armin Naibaho³

Mahasiswa Program Studi D-IV Manajemen Rekayasa Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang², Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang³

Email: hibbandrespati@gmail.com¹, yehezkielseptian@polinema.ac.id², arminnaibaho1967@gmail.com³

ABSTRAK

Tingkat kegempaan Indonesia menuntut perencanaan struktur yang mempertimbangkan karakteristik tanah karena semakin lunak kondisi situs, semakin besar amplifikasi gelombang seismik yang meningkatkan tuntutan deformasi dan kebutuhan kekuatan elemen. Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh klasifikasi situs terhadap respons struktur, kajian yang menghubungkan perubahan kelas situs dengan kebutuhan tulangan dan biaya menggunakan pendekatan *Building Information Modeling* (BIM) masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh klasifikasi situs tanah terhadap *story drift*, kapasitas desain, kuantitas tulangan, dan Rencana Anggaran Biaya (RAB) pada gedung beton bertulang Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) enam lantai. Penelitian menggunakan metode kuantitatif melalui analisis komparatif pada kelas situs SB, SC, dan SD berdasarkan SNI 1726:2019 menggunakan *Tekla Structural Designer*, dengan normalisasi rasio kapasitas desain menjadi 0,80. Hasil menunjukkan bahwa pelunakan situs dari SB ke SD meningkatkan *story drift* maksimum dari 9,350 mm menjadi 29,700 mm pada arah X dan dari 8,800 mm menjadi 29,150 mm pada arah Y, serta meningkatkan rasio kapasitas desain sehingga elemen struktur bekerja lebih kritis. Dampaknya, kebutuhan tulangan meningkat dari 144.100,16 kg (SB) menjadi 177.428,82 kg (SC) dan 227.694,64 kg (SD), diikuti kenaikan biaya penulangan dari Rp3,23 miliar menjadi Rp3,97 miliar dan Rp5,08 miliar. Dengan demikian, klasifikasi situs tanah berpengaruh signifikan terhadap kinerja seismik, kebutuhan tulangan, dan biaya konstruksi, dengan Kelas Situs SD menghasilkan tuntutan struktural dan biaya tertinggi.

Kata kunci : klasifikasi situs tanah; kebutuhan tulangan; *story drift*; struktur tahan gempa; *Tekla Structural Designer*.

ABSTRACT

Indonesia's high seismicity necessitates structural designs that explicitly consider site conditions, as softer soil deposits amplify seismic waves, resulting in greater seismic demands and higher structural strength requirements. Although numerous studies have investigated the influence of site classification on structural response, comprehensive research quantifying its implications for reinforcement demand and construction cost using a *Building Information Modeling* (BIM) approach remains limited. This study evaluates the effects of site classification on interstory drift, demand-to-capacity ratio (DCR), reinforcement quantity, and reinforcement cost in a six-story reinforced concrete Special Moment Resisting Frame (SMRF) building. A quantitative comparative analysis was conducted for site classes SB, SC, and SD in accordance with SNI 1726:2019 using *Tekla Structural Designer*. To ensure an equivalent basis for comparison, the DCR of structural members was normalized to a target value of 0.80. The results indicate that the deterioration of site conditions from SB to SD increased the maximum interstory drift from 9.350 mm to 29.700 mm in the X-direction and from 8.800 mm to 29.150 mm in the Y-direction. The corresponding increase in DCR caused structural members to experience higher utilization levels, leading to a substantial increase in reinforcement demand from 144,100.16 kg (SB) to 177,428.82 kg (SC) and 227,694.64 kg (SD). Consequently, reinforcement cost increased from IDR 3.23 billion (SB) to IDR 3.97 billion (SC) and IDR 5.08 billion (SD). These findings demonstrate that site classification significantly influences seismic performance, reinforcement demand, and construction cost, with Site Class SD producing the highest structural demand and project cost.

Keywords : site class; reinforcement requirement; *story drift*; seismic resistant structure; *Tekla Structural Designer*

1. PENDAHULUAN

Interaksi tektonik antara Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik menyebabkan wilayah Indonesia memiliki tingkat bahaya seismik yang tinggi dengan potensi gempa yang tersebar di berbagai kawasan. Kondisi tersebut menuntut perencanaan struktur bangunan yang mampu menjamin keamanan terhadap beban gempa. Salah satu parameter penting dalam perencanaan tersebut adalah klasifikasi situs tanah karena setiap jenis tanah memiliki karakteristik yang berbeda dalam mengamplifikasi gelombang seismik sehingga memengaruhi percepatan tanah dan besarnya gaya gempa yang diterima struktur. Oleh karena itu, standar desain gempa di Indonesia menetapkan klasifikasi situs sebagai salah satu parameter utama dalam penentuan beban gempa rencana [1].

Untuk menahan beban gempa tersebut, struktur beton bertulang dirancang berdasarkan konsep *capacity design* dan *limit state design*, dengan memanfaatkan sifat komposit beton yang kuat terhadap tekan dan baja tulangan yang efektif menahan tarik [2], [3]. Pada wilayah dengan tingkat bahaya seismik tinggi, standar perencanaan mensyaratkan penerapan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) guna memperoleh perilaku struktur yang daktil melalui mekanisme disipasi energi saat terjadi gempa kuat [1]. Konsep ini diwujudkan melalui filosofi *Strong Column-Weak Beam (SCWB)*, di mana kapasitas momen kolom harus lebih besar daripada balok sehingga sendi plastis terbentuk pada balok terlebih dahulu, disertai pendetailan tulangan transversal yang memadai pada daerah sendi plastis untuk meningkatkan daktilitas serta mencegah mekanisme keruntuhan *soft story* [2], [4].

Meskipun persyaratan desain SRPMK telah dipenuhi, respons struktur tetap sangat dipengaruhi oleh kondisi geoteknik. Karakteristik situs tanah menentukan besarnya amplifikasi spektrum respons gempa sehingga memengaruhi gaya geser dasar, *story drift*, dan gaya dalam yang harus dipikul elemen struktur [5]. Peningkatan tuntutan struktur tersebut umumnya diakomodasi melalui penambahan dimensi penampang maupun rasio tulangan agar persyaratan kekuatan, kekakuan, dan daktilitas tetap terpenuhi [5]. Fenomena ini menunjukkan bahwa perubahan klasifikasi situs tanah tidak hanya memengaruhi kinerja struktur, tetapi juga berpotensi meningkatkan kebutuhan material konstruksi.

Pengaruh klasifikasi situs tanah terhadap respons struktur telah banyak dilaporkan pada penelitian terdahulu. Bangunan yang berdiri pada tanah lunak mengalami *base shear* dan *story drift* yang lebih besar dibandingkan bangunan pada tanah sedang maupun tanah keras akibat amplifikasi gelombang seismik [6]. Selain itu, kebutuhan tulangan pada

tanah lunak dilaporkan dapat meningkat lebih dari 200% dibandingkan tanah yang lebih kaku [7]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada evaluasi respons struktur tanpa menghubungkannya secara komprehensif dengan kebutuhan material dan implikasi biaya konstruksi. Akibatnya, keterkaitan antara klasifikasi situs tanah, respons struktur, kapasitas elemen, kebutuhan tulangan, dan biaya konstruksi masih belum banyak dikaji secara terintegrasi.

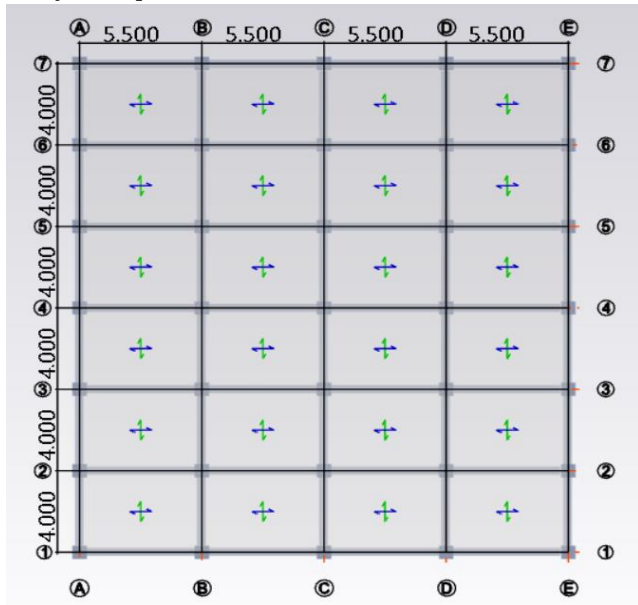
Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini memanfaatkan pendekatan *Building Information Modeling (BIM)* yang mampu mengintegrasikan analisis struktur, desain penulangan, dan kuantifikasi material dalam satu platform. Pendekatan ini menjadi semakin relevan untuk diterapkan pada wilayah dengan tingkat bahaya gempa yang tinggi, seperti Kota Denpasar, Bali, yang dipengaruhi oleh aktivitas Zona Subduksi Sunda dan Flores *Back-Arc Thrust* serta memiliki nilai *Peak Ground Acceleration (PGA)* yang relatif tinggi [8]. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi klasifikasi situs tanah terhadap *story drift*, *Demand-to-Capacity Ratio (DCR)*, kebutuhan tulangan, dan biaya konstruksi menggunakan pendekatan BIM. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya hanya mengevaluasi respons struktur, penelitian ini mengintegrasikan analisis respons struktur, evaluasi DCR, dan kuantifikasi kebutuhan tulangan dalam satu alur kerja sehingga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh klasifikasi situs tanah terhadap aspek teknis dan ekonomis perencanaan struktur tahan gempa.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis numerik tiga dimensi untuk mengevaluasi pengaruh klasifikasi situs tanah terhadap respons struktur dan kebutuhan tulangan pada gedung beton bertulang enam lantai. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak *Tekla Structural Designer* dengan konfigurasi Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang dirancang sesuai ketentuan SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019 [1], [2]. Lokasi studi ditetapkan di Kota Denpasar, Bali, yang memiliki tingkat bahaya gempa relatif tinggi sehingga representatif untuk mengevaluasi pengaruh variasi klasifikasi situs tanah terhadap perilaku struktur.

Model bangunan terdiri atas lima bentang pada arah X dengan jarak 5,5 m dan tujuh bentang pada arah Y dengan jarak 4,0 m. Tinggi lantai dasar ditetapkan 5,0 m, sedangkan lantai tipikal hingga atap memiliki tinggi 4,5 m. Sesuai fungsi bangunannya, model dikategorikan sebagai gedung dengan kategori risiko II berdasarkan SNI 1726:2019 [1].

Konfigurasi denah dan model tiga dimensi struktur ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2

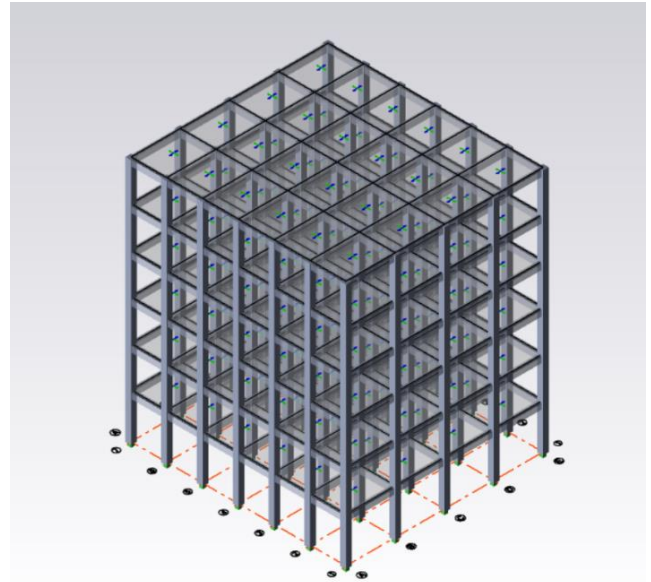


Gambar 1. Plan view struktur gedung

Sumber: Hasil permodelan Tekla Structural Designer

Model struktur dikembangkan secara tiga dimensi dengan merepresentasikan elemen balok, kolom, dan pelat sebagai satu kesatuan sistem rangka ruang yang menerima kombinasi beban gravitasi dan beban gempa. Seluruh konfigurasi geometri, dimensi elemen, dan material dipertahankan sama pada setiap model sehingga perbedaan respons struktur yang

diperoleh sepenuhnya merepresentasikan pengaruh variasi klasifikasi situs tanah. Elemen struktur menggunakan beton mutu 30 MPa dengan baja tulangan BjTS 420B untuk tulangan longitudinal dan BjTS 280 untuk tulangan transversal. Dimensi elemen struktur meliputi kolom 650×650 mm, balok B1 400×600 mm, balok B2 350×550 mm, dan pelat beton setebal 150 mm. Rincian parameter pemodelan disajikan pada Tabel 1.



Gambar 2. 3D view struktur Gedung

Sumber: Hasil permodelan Tekla Structural Designer

Tabel 1. Variabel penelitian yang dianalisis

No	Kelas Situs Tanah	Mutu Baja	Mutu Beton	Dimensi Elemen Struktur			
				Kolom	Balok B1	Balok B2	Pelat
1	SB	420 Mpa; 280 Mpa	30 Mpa	65/65	40/60	35/55	15 cm
2	SC	420 Mpa; 280 Mpa	30 Mpa	65/65	40/60	35/55	15 cm
3	SD	420 Mpa; 280 Mpa	30 Mpa	65/65	40/60	35/55	15 cm

Sumber: Dokumen Pribadi

Penelitian ini menggunakan klasifikasi situs tanah sebagai variabel bebas, yaitu kelas situs SB (batuan), SC (tanah keras), dan SD (tanah sedang). Parameter yang dievaluasi meliputi *story drift*, *Demand-to-Capacity Ratio* (DCR), kebutuhan tulangan, dan Rencana Anggaran Biaya (RAB). Seluruh parameter lainnya, seperti geometri bangunan, mutu material, dimensi elemen, sistem struktur, dan kombinasi pembebanan, dipertahankan konstan agar perbedaan hasil analisis hanya dipengaruhi oleh variasi klasifikasi situs tanah.

Seluruh model menggunakan kondisi pembebanan yang sama sesuai SNI 1727:2020 untuk beban gravitasi dan SNI 1726:2019 untuk beban gempa [1], [9]. Beban mati tambahan

(*Superimposed Dead Load* atau SIDL) dibedakan antara lantai tipikal dan atap sesuai komponen penyusunnya, sedangkan beban hidup mengikuti fungsi ruang. Rekapitulasi pembebanan yang digunakan disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Beban mati tambahan

No	Komponen	Story 1-5 (kN/m ²)	Story Roof (kN/m ²)
1	Suspended steel channel system	0,100	0,100
2	Ceramic or quarry tile (19 mm) on 25-mm mortar bed	1,100	-

3	Gypsumboard (9mm)	0,072	0,072
4	MEP (Mechanical duct allowance)	0,190	0,190
5	Waterproofing	-	0,050
Total		1,462	0,412

Sumber: Dokumen Pribadi

Tabel 3. Beban hidup setelah direduksi

No	Story ke-	Berat
1	Story 1-5	1,769 kN/m ²
2	Story 6 (Roof)	0,920 kN/m ²

Sumber: Dokumen Pribadi

Analisis gempa dilakukan menggunakan metode statik ekuivalen berdasarkan SNI 1726:2019 [1]. Variasi klasifikasi situs tanah memengaruhi parameter spektrum desain, meliputi S_s , S_1 hingga koefisien respons seismik (C_s), yang menjadi dasar pembentukan beban gempa pada setiap model. Rekapitulasi parameter gempa untuk masing-masing kelas situs disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi beban gempa

Parameter	Kelas Situs Tanah		
	SB	SC	SD
SS	0.9594	0.9594	0.9594
S1	0.3951	0.3951	0.3951
TL	12	12	12
Fa	0.9000	1.2000	1.1162
Fv	0.8000	1.5000	1.9049
S_{MS}	0.8635	1.1513	1.0709
S_{M1}	0.3161	0.5927	0.7526
S_{DS}	0.5756	0.7675	0.7139
S_{D1}	0.2107	0.3951	0.5018
KDS	D	D	D
T_{max}	1.380	1.288	1.288
T_0	0.0732	0.1030	0.1406
T_s	0.3661	0.5148	0.7028
S_a	0.2186	0.4099	0.5205
C_s	0.0273	0.0512	0.0892

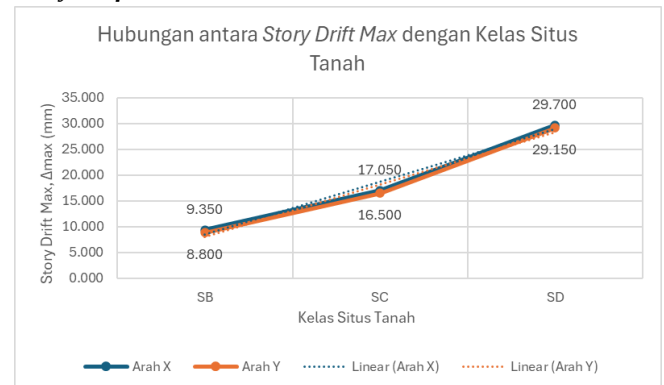
Sumber: Dokumen Pribadi

Berdasarkan parameter pemodelan dan pembebanan tersebut, setiap model dianalisis menggunakan *Tekla Structural Designer* hingga memenuhi persyaratan desain SRPMK sesuai SNI 2847:2019 [2]. Seluruh model kemudian dinormalisasi hingga memiliki nilai *Demand-to-Capacity Ratio* (DCR) sebesar 0,80 agar memiliki tingkat utilisasi penampang yang sebanding. Hasil desain selanjutnya digunakan untuk menentukan kebutuhan tulangan pasca-normalisasi dan menghitung Rencana Anggaran Biaya (RAB), sehingga pengaruh klasifikasi situs tanah terhadap respons struktur, kebutuhan tulangan, dan biaya konstruksi dapat dievaluasi secara komprehensif.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi klasifikasi situs tanah terhadap respons struktur dan kebutuhan material gedung beton bertulang. Pembahasan dilakukan secara berurutan melalui analisis *story drift*, rasio kapasitas desain (*Demand-to-Capacity Ratio*), kebutuhan tulangan pasca-normalisasi, dan Rencana Anggaran Biaya (RAB) guna menunjukkan keterkaitan antara kondisi tanah dan tuntutan desain struktur.

Story Drift

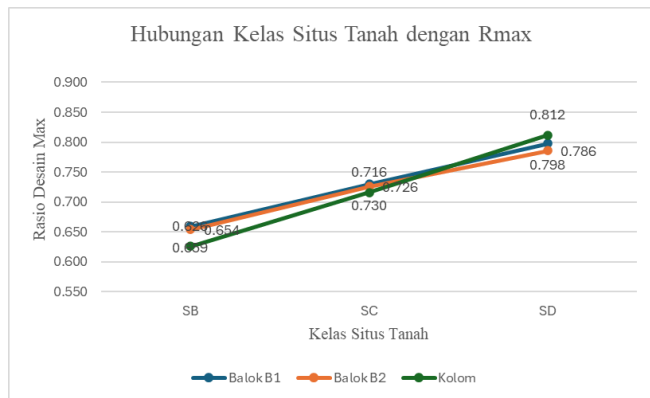


Gambar 3. Hubungan *storydrift max* dengan kelas situs tanah

Sumber: Dokumen Pribadi

Hasil pada Gambar 3 menunjukkan bahwa klasifikasi situs tanah berpengaruh signifikan terhadap *story drift* maksimum struktur. Penurunan kualitas situs dari SB ke SD meningkatkan amplifikasi gelombang seismik sehingga *story drift* arah X bertambah dari 9,350 mm menjadi 17,050 mm dan 29,700 mm, sedangkan arah Y meningkat dari 8,800 mm menjadi 16,500 mm dan 29,150 mm. Pada seluruh kelas situs, deformasi arah X secara konsisten lebih besar 0,550 mm dibandingkan arah Y, dengan *story drift* maksimum terjadi pada Lantai 2. Meskipun mengalami peningkatan yang signifikan, seluruh nilai *story drift* masih memenuhi batas yang diizinkan. Peningkatan deformasi lateral tersebut menunjukkan bahwa semakin lunak kondisi tanah, semakin besar tuntutan gaya dalam yang harus dipikul struktur, sehingga diperlukan kapasitas elemen dan kebutuhan tulangan longitudinal maupun transversal yang lebih tinggi.

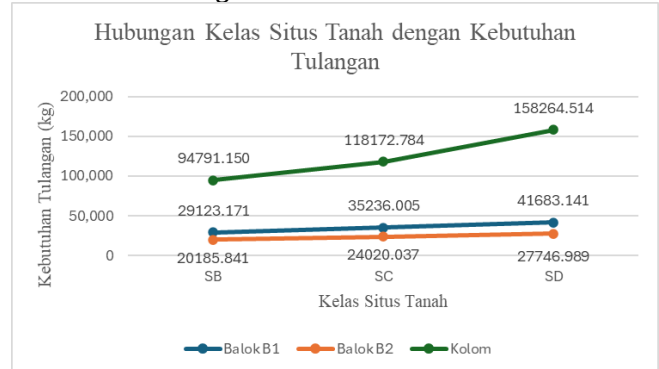
Rasio Desain



Gambar 4. Hubungan kelas situs tanah terhadap Rmax
Sumber: Dokumen Pribadi

Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa pelunakan kondisi tanah dari kelas situs SB ke SD secara konsisten meningkatkan rasio kapasitas desain (*Demand-to-Capacity Ratio / DCR*) pada seluruh elemen struktur. Nilai DCR Balok B1 meningkat dari 0,660 (SB) menjadi 0,730 (SC) dan 0,798 (SD), sedangkan Balok B2 meningkat dari 0,654 (SB) menjadi 0,726 (SC) dan 0,786 (SD). Tren yang sama juga terjadi pada kolom, dengan nilai DCR meningkat dari 0,626 (SB) menjadi 0,716 (SC) dan mencapai 0,812 (SD). Peningkatan DCR pada seluruh elemen menunjukkan bahwa semakin lunak kondisi tanah, semakin besar amplifikasi seismik dan gaya dalam yang harus dipikul struktur sehingga tingkat utilisasi penampang semakin mendekati kapasitas maksimumnya. Di antara seluruh elemen, kolom mengalami peningkatan DCR paling tajam, dari yang semula memiliki nilai terendah pada kelas situs SB menjadi elemen dengan nilai DCR tertinggi pada kelas situs SD. Temuan ini mengindikasikan bahwa kolom merupakan elemen yang paling sensitif terhadap perubahan kondisi situs, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam penentuan dimensi penampang serta kebutuhan tulangan untuk menjaga keamanan dan kinerja struktur.

Kebutuhan Tulangan Pasca-Normalisasi



Gambar 5. Hubungan kelas situs tanah terhadap kebutuhan tulangan
Sumber: Dokumen Pribadi

Mengacu pada Gambar 5, terlihat bahwa pelunakan kondisi tanah dari Kelas Situs SB ke SD meningkatkan kebutuhan tulangan pada seluruh elemen struktur. Peningkatan terbesar terjadi pada kolom, yaitu sebesar 67%, dari 94.791,150 kg (SB) menjadi 158.264,514 kg (SD), menunjukkan bahwa kolom merupakan elemen yang paling terpengaruh oleh amplifikasi gaya gempa. Pada elemen balok, kebutuhan tulangan Balok B1 meningkat sebesar 43,1%, dari 29.123,171 kg (SB) menjadi 41.683,141 kg (SD), sedangkan Balok B2 meningkat sebesar 37,5%, dari 20.185,841 kg (SB) menjadi 27.746,989 kg (SD). Tren tersebut mengindikasikan bahwa semakin lunak kondisi tanah, semakin besar gaya seismik yang harus dipikul struktur sehingga diperlukan peningkatan volume tulangan untuk mempertahankan nilai *Demand-to-Capacity Ratio* (DCR) sesuai target desain. Konsekuensinya, peningkatan kebutuhan tulangan tersebut menyebabkan kenaikan biaya konstruksi, terutama pada bangunan yang didirikan di atas kelas situs SD.

Estimasi Biaya Penulangan

Analisis Harga Satuan Pekerjaan penulangan dilakukan berdasarkan diameter tulangan yang digunakan pada elemen struktur. Harga satuan untuk penulangan BjTS diameter ≥ 12 mm sebesar Rp 21.884,06/kg, sedangkan untuk BjTS diameter < 12 mm sebesar Rp 26.100,36/kg. Hasil perhitungan telah menunjukkan bahwa total biaya penulangan meningkat seiring dengan penurunan kelas situs tanah, yaitu:

Kelas situs SB: Rp 3.235.981.997,16

Kelas situs SC: Rp 3.974.319.929,59

Kelas situs SD: Rp 5.082.437.729,87

Peningkatan biaya penulangan dari kelas situs SB hingga SD menunjukkan bahwa kondisi tanah yang lebih lunak memerlukan kebutuhan tulangan yang lebih banyak untuk mengakomodasi peningkatan gaya gempa. Dengan demikian, klasifikasi situs tanah tidak hanya memengaruhi

respons struktur dan kebutuhan material, tetapi juga berdampak langsung terhadap biaya konstruksi bangunan secara keseluruhan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan beberapa poin utama sebagai berikut:

1. Klasifikasi situs tanah berpengaruh signifikan terhadap nilai *story drift* pada struktur gedung tahan gempa. Semakin lunak kondisi tanah, semakin besar amplifikasi gelombang seismik yang terjadi sehingga meningkatkan deformasi lateral struktur. Nilai *story drift* maksimum arah X meningkat dari 9,350 mm pada situs SB menjadi 17,050 mm pada situs SC dan 29,700 mm pada situs SD. Pada arah Y, nilai *story drift* maksimum meningkat dari 8,800 mm pada situs SB menjadi 16,500 mm pada situs SC dan 29,150 mm pada situs SD. Meskipun mengalami peningkatan, seluruh model masih memenuhi batas simpangan yang diizinkan berdasarkan peraturan yang berlaku.
2. Klasifikasi situs tanah berpengaruh terhadap kapasitas desain struktur yang ditunjukkan oleh perubahan rasio desain (R_{max}). Pada elemen balok, nilai R_{max} meningkat seiring menurunnya kualitas tanah, yaitu dari 0,659 menjadi 0,730 (situs SC) dan 0,798 (situs SD) pada Balok B1, serta dari 0,654 menjadi 0,726 (situs SC) dan 0,786 (situs SD) pada Balok B2. Pada elemen kolom, nilai R_{max} juga menunjukkan tren peningkatan yang konstan, yaitu sebesar 0,625 pada situs SB, meningkat menjadi 0,716 pada situs SC, dan memuncak di angka 0,812 pada situs SD. Hasil ini menunjukkan bahwa tanah yang lebih lunak menyebabkan peningkatan kebutuhan kapasitas struktur akibat bertambahnya pengaruh beban gempa.
3. Klasifikasi situs tanah berpengaruh langsung terhadap kuantitas besi tulangan yang dibutuhkan pada struktur gedung tahan gempa. Total kebutuhan tulangan meningkat secara signifikan dari 144.100,16 kg pada situs SB menjadi 177.428,83 kg pada situs SC dan mencapai 227.694,64 kg pada situs SD. Peningkatan terbesar terjadi pada elemen kolom (dari 94.791,150 kg melonjak hingga 158.264,514 kg), sementara kebutuhan tulangan untuk elemen Balok B1 dan Balok B2 juga mengalami kenaikan yang konstan seiring dengan semakin lunaknya kondisi tanah. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lunak kondisi tanah, semakin besar kebutuhan tulangan untuk memenuhi kapasitas desain struktur.
4. Klasifikasi situs tanah berpengaruh terhadap biaya pekerjaan besi tulangan. Total biaya penulangan pada situs SB sebesar Rp 3.235.981.997,16, meningkat

menjadi Rp 3.974.319.929,59 pada situs SC, dan mencapai Rp 5.082.437.729,87 pada situs SD. Kenaikan biaya ini sejalan dengan bertambahnya kebutuhan tulangan akibat peningkatan gaya gempa pada tanah yang lebih lunak. Dengan demikian, klasifikasi situs tanah tidak hanya memengaruhi kinerja struktur, tetapi juga berdampak signifikan terhadap biaya konstruksi bangunan secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SNI 1726:2019, *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [2] SNI 2847:2019, *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [3] A. W. Zebua, "Desain Pelat Gedung Struktur Beton Bertulang di Wilayah Gempa Tinggi," *SIKLUS: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 4, no. 2, 2018.
- [4] C. Suhendi dkk., "Design of Structural Elements of Reinforced Concrete Beams and Columns in Multi-Storey Buildings Using A Special Moment Resisting Frame System (SMRFS)," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Nusa Putra (J-TESLINK)*, vol. 1, no. 3, 2020, [Daring]. Tersedia pada: <https://teslink.nusaputra.ac.id>
- [5] A. E. Nasution, A. S. Rejki, dan S. Wijaya, "Desain Elemen Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa Dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)," *Jurnal KOMPOSITS*, vol. 1, 2020.
- [6] L. F. J. I. Natalio dan N. Ray, "Studi Analisis Bangunan Bertingkat Beton Bertulang Akibat Perbedaan Kondisi Tanah di Kota Samarinda," 2022.
- [7] F. S. Yoresta, "Perbedaan Desain Tulangan Elemen Struktur Beton Bertulang Berdasarkan Jenis Tanah Pada SNI-1726-2002," vol. 13, no. 1, 2017, [Daring]. Tersedia pada: <http://jrs>.
- [8] R. I. Hielmy dan M. L. Rajagukguk, "Analisis Probabilistik Bahaya Seismik di Denpasar Dan Sekitarnya Berdasarkan Pendekatan PSHA," *Kel. Tanah Tinggi*, vol. 11, no. 1, hlm. 21–28, 2025.
- [9] SNI 1727:2020, *Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2020.