
Analisis dan Optimalisasi Desain Struktur Bangunan Gedung Tahan Gempa di Kawasan Rawan Gempa (Studi Kasus: Kota Medan)

Ardiansyah Putra Siregar

Program Studi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Medan, Indonesia,

ardiansyahputrasiregar@students.polmed.ac.id

*Penulis korespondensi, email: ardiansyahputrasiregar@students.polmed.ac.id

Abstrak—Kota Medan terletak di zona pertemuan lempeng aktif sehingga memiliki potensi gempa yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan desain struktur bangunan gedung tahan gempa dengan mempertimbangkan karakteristik seismik dan kondisi tanah lokal. Metode yang digunakan meliputi studi literatur, pengumpulan data seismik, evaluasi desain struktur eksisting, serta simulasi struktur menggunakan perangkat lunak SAP2000. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan mutu material sesuai standar SNI 1726:2019 dapat meningkatkan kinerja struktur terhadap beban gempa, terbukti dengan nilai base shear dinamik yang memenuhi syarat serta partisipasi massa ragam yang optimal. Pembahasan menekankan pentingnya integrasi data geoteknik lokal dalam perencanaan desain agar respons getar alami bangunan berada dalam batas aman. Kesimpulannya, pendekatan desain berbasis kondisi lokal efektif meningkatkan ketahanan struktur di kawasan rawan gempa seperti Kota Medan. Rekomendasi penelitian ini adalah perlunya penerapan analisis berbasis kinerja (performance-based design) pada bangunan dengan fungsi dan bentuk lebih kompleks, serta pengembangan kajian untuk wilayah lain dengan karakteristik tanah berbeda di Indonesia.

Kata kunci: Kota Medan, struktur tahan gempa, optimalisasi desain, SAP2000, SNI 1726:2019

This article is licensed under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik tertinggi di dunia karena terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik [1]. Hal ini menjadikan sebagian besar wilayah di Indonesia, termasuk kota-kota besar, berisiko tinggi mengalami gempa bumi dengan potensi kerusakan infrastruktur yang signifikan [2]. Risiko ini juga didukung oleh masih ditemukannya ketidaksesuaian antara standar perencanaan bangunan tahan gempa dengan praktik pelaksanaan di lapangan [3]. Kota Medan sebagai pusat pertumbuhan di Sumatera Utara, berada pada jalur sesar aktif, menjadikannya salah satu daerah dengan tingkat kerawanan gempa yang cukup tinggi [4].

Di sisi lain, regulasi perencanaan struktur tahan gempa seperti yang diatur dalam SNI 1726:2019 telah disusun dengan mengacu pada kondisi geoteknik dan seismotektonik di Indonesia [5]. Namun, implementasi di lapangan masih sering dihadapkan pada tantangan, mulai dari akurasi data tanah hingga pemilihan sistem struktur yang tepat [6]. Beberapa studi sebelumnya menunjukkan bahwa pendekatan konvensional tanpa evaluasi performa dinamik dapat menurunkan ketahanan bangunan saat

menghadapi beban gempa [7]. Oleh karena itu, penggunaan perangkat lunak pemodelan numerik seperti SAP2000 banyak direkomendasikan untuk menganalisis perilaku struktur pada zona gempa [8].

Urgensi penelitian ini semakin jelas dengan meningkatnya kebutuhan pembangunan gedung bertingkat di kawasan perkotaan Kota Medan. Pertumbuhan permukiman dan fasilitas publik di area rawan gempa berpotensi menambah kerugian material maupun korban jiwa apabila bangunan tidak dirancang secara tepat [9]. Beberapa penelitian juga menegaskan pentingnya pendekatan berbasis data lokal serta metode analisis riwayat waktu untuk memahami kinerja struktur secara lebih detail [10], [11], [12]. Selain itu, studi mengenai dampak gempa pada infrastruktur transportasi di Medan pun menunjukkan perlunya strategi mitigasi risiko yang lebih terintegrasi [13].

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada integrasi antara data seismik terbaru, kondisi tanah lokal, dan pemodelan numerik untuk mengevaluasi serta mengoptimalkan desain struktur bangunan gedung tahan gempa. Pendekatan ini mengadopsi metode performance-based design yang telah banyak dikaji pada bangunan di wilayah rawan gempa lain, seperti Yogyakarta dan Semarang [14], [15]. Optimalisasi desain juga dapat didukung oleh pemanfaatan teknologi digital dalam proses pemodelan struktur secara detail [16]. Penelitian terdahulu tentang perbandingan deformasi SRPM baja dan beton pada struktur yang terkena getaran gempa pun mendukung pentingnya evaluasi mendalam terhadap setiap parameter pembebanan [17].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter seismik dan geoteknik terhadap desain struktur bangunan gedung di Kota Medan, mengevaluasi kinerja struktur eksisting, serta memberikan rekomendasi optimalisasi desain berbasis kondisi lokal. Hasil penelitian diharapkan menjadi referensi praktis bagi perencana dan pihak terkait dalam meningkatkan ketahanan struktur gedung di kawasan rawan gempa [18].

2. Metode

Penelitian ini dilaksanakan di Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara, yang secara geografis terletak pada zona seismik aktif akibat pertemuan tiga lempeng tektonik utama. Objek penelitian berupa bangunan gedung bertingkat yang mewakili tipologi struktur umum di kawasan perkotaan Kota Medan. Pendekatan penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan tahapan yang terdiri atas studi literatur, pengumpulan data seismik dan geoteknik, evaluasi desain struktur eksisting, serta simulasi numerik dengan perangkat lunak analisis struktur SAP2000.

Tahap awal dilakukan studi literatur untuk mengkaji teori-teori dasar perencanaan struktur tahan gempa, standar peraturan terbaru seperti SNI 1726:2019, serta referensi penelitian terdahulu mengenai optimasi desain bangunan di daerah rawan gempa. Hasil studi literatur menjadi landasan dalam menentukan parameter analisis dan kriteria evaluasi kinerja struktur. Selanjutnya, data karakteristik seismik wilayah Kota Medan dikumpulkan berdasarkan peta mikrozonasi gempa, data sesar aktif, serta parameter tanah dominan di lokasi studi. Data tersebut digunakan untuk menentukan parameter input dalam simulasi beban gempa.

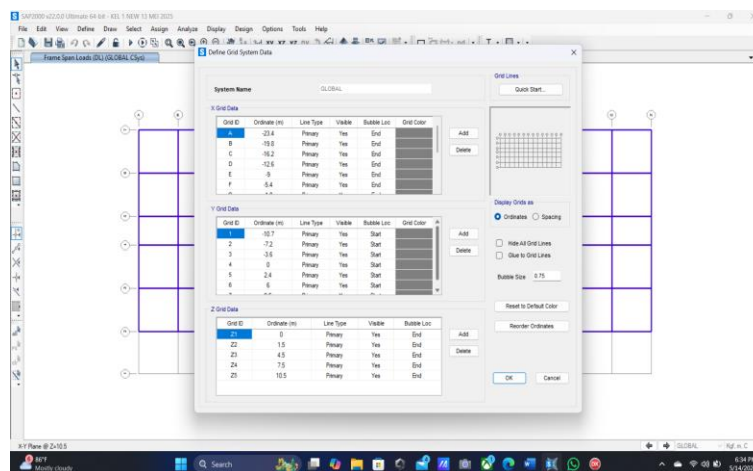
Evaluasi desain struktur eksisting dilakukan dengan memeriksa kesesuaian spesifikasi material, konfigurasi sistem struktur, serta metode perhitungan beban gempa yang diterapkan pada bangunan. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi kelemahan desain yang dapat memengaruhi perilaku struktur saat menerima beban dinamis. Tahap berikutnya adalah pemodelan numerik menggunakan SAP2000 untuk memeriksa respons struktur terhadap beban gempa. Model struktur dibuat berdasarkan data geometri, detail material, dan beban rencana yang mengacu pada kondisi aktual bangunan.

Simulasi dilakukan dengan metode analisis statik ekuivalen dan analisis dinamik respon spektrum sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Respon getar alami bangunan, distribusi gaya geser dasar, rasio partisipasi massa, dan base shear dianalisis untuk menilai performa struktur secara menyeluruh. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan kriteria perencanaan untuk menentukan apakah desain struktur sudah memenuhi syarat keamanan dan ketahanan terhadap gempa. Berdasarkan hasil evaluasi, dilakukan analisis optimalisasi desain dengan penyesuaian elemen struktural, sistem rangka pemikul momen, serta modifikasi detail sambungan jika diperlukan.

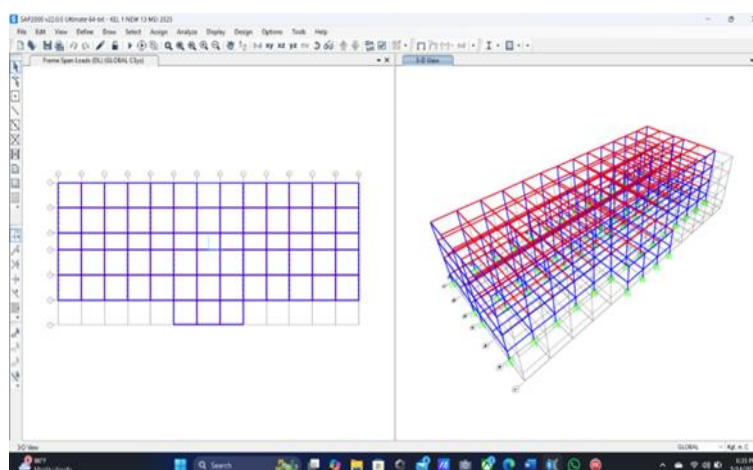
Seluruh rangkaian metode ini diharapkan menghasilkan rekomendasi teknis berupa parameter desain yang optimal dan sesuai dengan kondisi seismik serta geoteknik Kota Medan. Pendekatan ini juga diharapkan dapat menjadi acuan bagi penerapan desain berbasis kinerja (performance-based design) di kawasan rawan gempa lainnya di Indonesia.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pemodelan struktur menunjukkan bahwa bangunan gedung yang dianalisis memiliki konfigurasi portal dengan jumlah elemen rangka yang relatif memadai. Berdasarkan data geometri bangunan, sistem portal memiliki 14 batang rangka pada arah X, 4 batang pada arah Y, dan 4 rangka pada arah Z, dengan dimensi panjang 46,8 meter, lebar 16,8 meter, serta tinggi antar lantai sebesar 3 meter. Data grid system yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan potongan XY dan tampilan tiga dimensi dari model struktur ditampilkan pada Gambar 2. Konfigurasi ini mewakili tipologi bangunan bertingkat di kawasan Kota Medan yang menjadi objek penelitian.



Gambar 1. Data Grid System



Gambar 2. Potongan XY dan Tampilan 3D Struktur

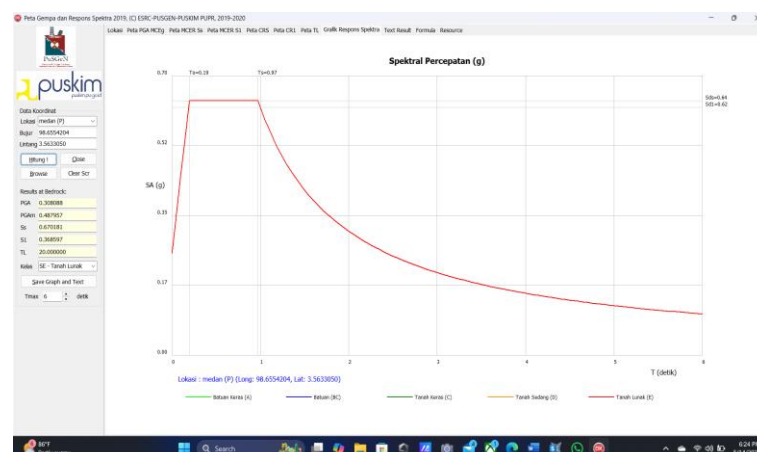
Mutu bahan yang digunakan dalam perencanaan struktur ini mengikuti standar material beton bertulang konvensional. Elemen struktur utama seperti kolom, balok, plat lantai, dan plat atap direncanakan menggunakan mutu beton dengan kuat tekan f_c' sebesar 30 MPa. Sementara itu, mutu baja tulangan terdiri dari dua jenis, yaitu baja tulangan ulir BJTS 280 dengan $f_y = 280 \text{ N/mm}^2$ dan $f_u = 350 \text{ N/mm}^2$, serta BJTS 420 dengan $f_y = 420 \text{ N/mm}^2$ dan $f_u = 525 \text{ N/mm}^2$. Pemilihan mutu material ini disesuaikan dengan kebutuhan performa elemen struktur terhadap beban gempa yang dominan pada zona rawan gempa [1].

Analisis beban gempa pada penelitian ini mengikuti tata cara perencanaan ketahanan gempa berdasarkan SNI 1726:2019. Penentuan parameter beban gempa memperhatikan klasifikasi risiko bangunan dengan kategori risiko IV, faktor keutamaan (I) sebesar 1,5, serta faktor reduksi gempa (R) sebesar 8 untuk rangka beton bertulang pemikul momen khusus (SRPMK) di kedua arah X dan Y. Kondisi tanah di lokasi bangunan diklasifikasikan sebagai tanah keras sesuai data geoteknik. Beban angin tidak diperhitungkan lebih lanjut karena kontribusinya tidak signifikan dibandingkan dengan beban gempa. Grafik respon spektrum analisis dinamik dan statik ekuivalen ditunjukkan pada Gambar 3 sebagai dasar evaluasi perilaku struktur terhadap guncangan horizontal.

Pada tahap analisis gempa dinamik, respons spektrum disesuaikan dengan ketentuan SNI 03-1726-2002 Pasal 7.2.1, di mana nilai input spektrum gempa dikalikan dengan faktor I/R , serta faktor percepatan gravitasi bumi (g) sebesar $9,81 \text{ m/detik}^2$. Untuk bangunan ini, nilai faktor pengali ditetapkan sebesar 1,839375. Hasil deformasi mode shape alami bangunan ditunjukkan pada Gambar 4, yang menunjukkan bahwa waktu getar pada kondisi retak mencapai 0,583 detik. Setelah dilakukan penyesuaian pada set modifiers penampang menjadi satu, waktu getar alami fundamental bangunan menjadi 0,463 detik sebagaimana terlihat pada Gambar 5. Perhitungan manual menggunakan rumus dari SNI 1726:2019 dengan parameter $C_t = 0,0466$, tinggi total struktur $h_n = 10,5 \text{ m}$, dan eksponen $x = 0,9$ menghasilkan waktu getar teoritis sebesar 0,3868 detik, yang dijadikan acuan nilai maksimum dalam simulasi.

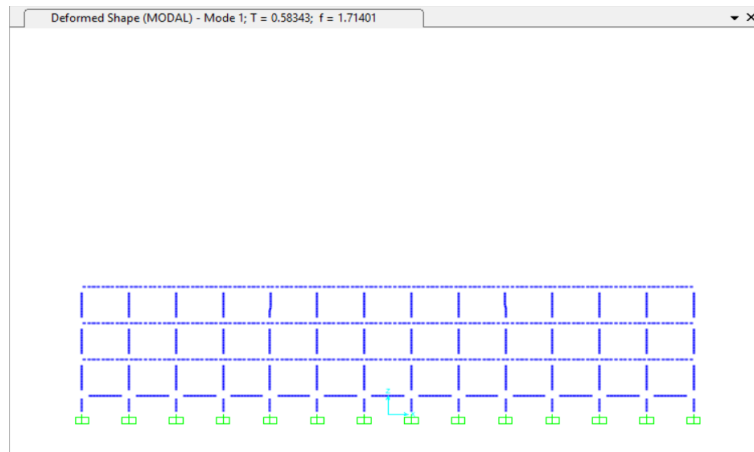
Validasi kombinasi ragam pada beban gempa menunjukkan bahwa selisih rata-rata masih di atas 15%, sehingga metode kombinasi ragam diubah dari Complete Quadratic Combination (CQC) menjadi Square Root of Sum of Squares (SRSS) untuk meningkatkan akurasi hasil. Informasi detail mengenai modal periods ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Sementara itu, pemeriksaan modal participating mass ratio pada mode ke-9 yang disajikan pada Gambar 8 menunjukkan partisipasi massa kumulatif mencapai 98% untuk arah X dan 96% untuk arah Y. Hal ini berarti persyaratan minimal partisipasi massa sebesar 90% telah terpenuhi sesuai rekomendasi desain [2].

Analisis gaya geser dasar (base shear) menunjukkan bahwa gaya geser dinamik pada arah X (dibaca pada kolom Global FX) sebesar 1.464,718 kN, sedangkan gaya geser statik ekuivalen (Q_x) tercatat sebesar 1.554,37 kN.

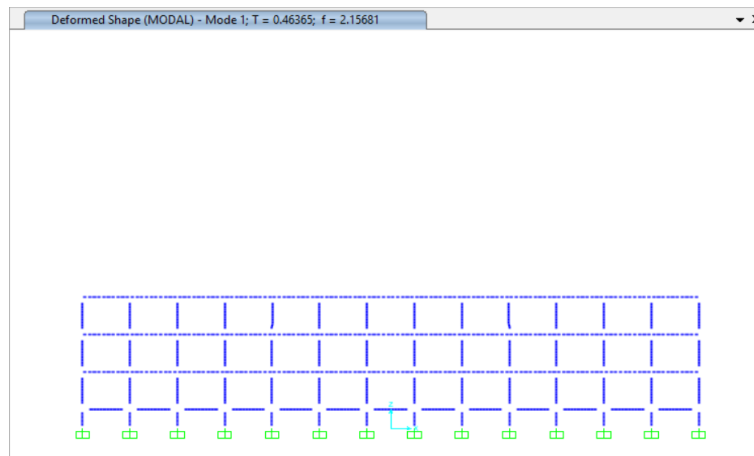


Gambar 3. Grafik Respon Spektrum

Nilai 80% dari gaya geser statik adalah 1.243,496 kN, sehingga nilai gaya geser dinamik melebihi ambang batas yang dipersyaratkan. Kondisi serupa juga terjadi pada arah Y, dengan nilai V statik sebesar 1.570,594 kN dan V dinamik sebesar 1.464,718 kN, yang juga melampaui nilai 80% V statik sebesar 1.256,475 kN. Informasi perbandingan gaya geser dasar ini dapat dilihat pada Gambar 9. Analisis base reactions sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 10 menunjukkan berat total struktur dengan beban mati sebesar 22.916,935 kN dan beban hidup total sebesar 4.297,363 kN. Hal ini juga sekaligus memvalidasi pembebanan struktur secara keseluruhan dan menunjukkan bahwa model simulasi sudah sesuai dengan parameter perencanaan.



Gambar 4. Deform Shape Alami



Gambar 5. Deform Shape Mode-1

OutputCase	StepType	StepNum	Unitless	Period Sec	Frequency Cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad2/sec2
MODAL	Mode	1		0.583427	1.71401180...	10.7694537...	115.981134...
MODAL	Mode	2		0.522094	1.91539889...	12.0348062...	144.836560...
MODAL	Mode	3		0.421594	2.37290462...	14.9037445...	222.121602...
MODAL	Mode	4		0.190702	5.24379650...	32.9477451...	1085.55391...
MODAL	Mode	5		0.165788	6.03180346...	37.8989388...	1436.32956...
MODAL	Mode	6		0.152516	6.55670149...	41.1969705...	1697.19037...
MODAL	Mode	7		0.132642	7.53906337...	47.3693322...	2243.85363...
MODAL	Mode	8		0.116754	8.56504796...	53.8157835...	2896.13855...
MODAL	Mode	9		0.100069	9.99311558...	62.7885970...	3942.40791...
MODAL	Mode	10		0.069629	14.5710233...	91.5524398...	8381.84923...
MODAL	Mode	11		0.02451	40.7999126...	256.353411...	65717.0718...
MODAL	Mode	12		0.024464	40.8759965...	256.831461...	65962.3994...

Gambar 6. Modal Periods

TABLE: Modal Periods And Frequencies

OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue		
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2	selisih	average
MODAL	Mode	1	0.583427	1.714011805	10.76945379	115.981135	10.51425	
MODAL	Mode	2	0.522084	1.915398899	12.03480622	144.8365608	19.24978	
MODAL	Mode	3	0.421584	2.372004622	14.90374459	222.1216029	54.76536	
MODAL	Mode	4	0.190702	5.243796506	32.94774516	1085.553911	13.06436	
MODAL	Mode	5	0.165788	6.031803463	37.8989389	1436.32957	8.005404	
MODAL	Mode	6	0.152516	6.566701497	41.19697051	1697.190379	13.03076	21.89009
MODAL	Mode	7	0.132642	7.539063376	47.36933224	2243.853637	11.97811	
MODAL	Mode	8	0.116754	8.565047966	53.81578354	2896.138558	14.29073	
MODAL	Mode	9	0.100069	9.993115585	62.78859702	3942.407915	31.41832	
MODAL	Mode	10	0.068629	14.57102335	91.5524398	8381.849234	64.28623	
MODAL	Mode	11	0.02451	40.79991269	256.3534119	65717.07181	0.187678	
MODAL	Mode	12	0.024464	40.87599659	256.8314612	65962.39947		

Gambar 7. Modal Periods (Excel)

TABLE: Modal Periods And Frequencies

OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue		
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2	selisih	average
MODAL	Mode	1	0.583427	1.714011805	10.76945379	115.981135	10.51425	
MODAL	Mode	2	0.522084	1.915398899	12.03480622	144.8365608	19.24978	
MODAL	Mode	3	0.421584	2.372004622	14.90374459	222.1216029	54.76536	
MODAL	Mode	4	0.190702	5.243796506	32.94774516	1085.553911	13.06436	
MODAL	Mode	5	0.165788	6.031803463	37.8989389	1436.32957	8.005404	
MODAL	Mode	6	0.152516	6.566701497	41.19697051	1697.190379	13.03076	21.89009
MODAL	Mode	7	0.132642	7.539063376	47.36933224	2243.853637	11.97811	
MODAL	Mode	8	0.116754	8.565047966	53.81578354	2896.138558	14.29073	
MODAL	Mode	9	0.100069	9.993115585	62.78859702	3942.407915	31.41832	
MODAL	Mode	10	0.068629	14.57102335	91.5524398	8381.849234	64.28623	
MODAL	Mode	11	0.02451	40.79991269	256.3534119	65717.07181	0.187678	
MODAL	Mode	12	0.024464	40.87599659	256.8314612	65962.39947		

Gambar 8. Modal Participating Mass Ratio

S Base Reactions

File View Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Base Reactions

Filter:

OutputCase	CaseType	StepType	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ	GlobalX	GlobalY	GlobalZ
Text	Text	Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m	m	m	m
Qx	LinRespSpec	Max	1554.37	3.502E-07	3.087E-09	3.508E-07	12278.9714	1701.2306	0	0	0
Qy	LinRespSpec	Max	7.474E-07	1570.594	2.363	12197.9989	5.014E-07	1.029E-06	0	0	0
Ex	LinStatic		-1464.718	4.231E-10	-1.98E-12	-4.318E-09	-11619.9418	1552.6251	0	0	0
Ey	LinStatic		5.27E-10	-1464.718	-2.635E-11	11619.9418	6.092E-09	-1.174E-07	0	0	0

Gambar 9. Base Shear

S Base Reactions

File View Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Base Reactions

Filter:

OutputCase	CaseType	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ	GlobalX	GlobalY	GlobalZ	XCe
Text	Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m	m	m	m	
DEAD	LinStatic	4.598E-14	-2.375E-11	14481.503	13929.1718	-8.172E-09	2.183E-10	0	0	0	0
DL	LinStatic	9.958E-13	6.154E-13	8435.432	9922.0345	381.2826	-7.098E-11	0	0	0	0
LL	LinStatic	2.612E-13	-8.273E-12	4297.363	4460.0544	-1.374E-09	3.614E-11	0	0	0	0

Gambar 10. Base Reactions

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa desain struktur bangunan gedung di kawasan rawan gempa seperti Kota Medan harus mempertimbangkan integrasi data seismik dan kondisi tanah lokal secara menyeluruh. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa penggunaan sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) dengan mutu material beton bertulang konvensional $f_c' = 30$ MPa dan baja tulangan sesuai standar mampu memberikan kinerja struktur yang memadai terhadap beban gempa dominan. Nilai waktu getar alami struktur yang diperoleh melalui simulasi dinamik berada dalam rentang aman, serta rasio partisipasi massa pada mode ragam getar telah memenuhi syarat minimum lebih dari 90%, menunjukkan bahwa distribusi gaya inersia ke struktur dapat diterima.

Analisis gaya geser dasar juga memperlihatkan bahwa nilai gaya geser dinamik melebihi batas 80% dari gaya geser statik ekuivalen di kedua arah, menandakan pemodelan dinamik yang dilakukan sudah valid dan mampu menggambarkan perilaku struktur secara realistis. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan metode simulasi numerik untuk menguji performa struktur terhadap berbagai parameter pembebanan, khususnya di wilayah dengan potensi seismik tinggi.

Secara umum, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa pendekatan optimalisasi desain berbasis kondisi lokal dapat meningkatkan keandalan struktur bangunan gedung dalam menghadapi gempa. Oleh karena itu, direkomendasikan agar perencana dan praktisi konstruksi di Kota Medan dan kawasan rawan gempa lainnya menerapkan prinsip desain berbasis kinerja (performance-based design) dengan dukungan analisis dinamik terintegrasi. Penelitian lanjutan dapat dikembangkan pada struktur bangunan dengan bentuk dan fungsi yang lebih kompleks serta memperluas variabel kajian pada jenis tanah yang berbeda di wilayah lain di Indonesia.

Daftar Pustaka

- [1] A. Kusumastuti, “Seismic hazard assessment and risk mitigation in Indonesia,” *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 19, no. 4, pp. 779–789, 2020.
- [2] BMKG, “Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017,” Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, 2017.
- [3] S. Syahbana et al., “Review of Indonesian Earthquake-Resistant Building Codes,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 159, p. 01021, 2018.
- [4] I. S. Sihombing and A. Ginting, “Kajian Risiko Gempa Bumi pada Struktur Gedung Bertingkat di Medan,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 14, no. 2, pp. 121–128, 2020.
- [5] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, BSN, Jakarta, 2019.
- [6] D. Setiawan, A. H. Lubis, and E. Sembiring, “Analisis Perbandingan Struktur Gedung dengan Sistem SRPMK dan SRTMK di Daerah Gempa,” *Jurnal Sipil Statik*, vol. 8, no. 6, pp. 443–450, 2020.
- [7] R. R. Darmawan, E. Susanti, and D. K. Fitriyah, “Studi Komparasi Parameter Respons Spektrum Gempa SNI 1726-2012 terhadap SNI 1726-2019,” *Prosiding Seminar Teknologi Perencanaan, Perancangan, Lingkungan dan Infrastruktur*, pp. 139–145, 2021.
- [8] H. P. Hasibuan and T. N. Pohan, “Analisis Dinamik Struktur Gedung dengan SAP2000 pada Zona Gempa,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 17, no. 2, pp. 67–74, 2021.
- [9] A. Sarya, M. Azwir, and D. Novariant, “Analisa Perbandingan Pengaruh Gempa Terhadap Gedung Berdasarkan SNI 1726:2012 dan SNI 1726:2019,” *PORTAL: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 16, no. 1, pp. 68–75, 2021.
- [10] S. P. Sibarani and J. H. Sihombing, “Optimasi Desain Struktur Gedung Tahan Gempa di Medan,” *Jurnal Teknik Sipil ITB*, vol. 22, no. 1, pp. 33–42, 2021.
- [11] M. F. N. Hakim, *Pengaruh Variasi Zonasi Kerawanan Gempa Bumi terhadap Perilaku Seismik Struktur Bangunan Tahan Gempa di Yogyakarta*, Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia, 2024.
- [12] D. V. H. Sinaga, *Analisis Komparatif Penulangan Struktur Gedung Bertingkat Menggunakan Tekla Structural Designer Melalui Pendekatan BIM*, Doctoral dissertation, Universitas Medan Area, 2025.
- [13] E. Tambunan, “Dampak Bencana Alam Terhadap Infrastruktur Transportasi (Studi Kasus: Wilayah Kota Medan),” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UKI*, vol. 1, pp. 103–108, 2023.
- [14] M. F. Y. Ayash, *Kajian Aplikasi Metode Analisis Riwayat Waktu (Time History) Terhadap Kinerja Sebuah Struktur Bangunan Gedung Kuliah di Yogyakarta*, Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia, 2024.
- [15] M. Bagir and I. Buchori, “Model Optimasi Lokasi Pos Pemadam Kebakaran (SK: Kota Semarang),” Doctoral dissertation, Universitas Diponegoro, 2009.

- [16] A. Satria, F. A. Lubis, and Z. R. Pasaribu, “Optimalisasi Penggunaan Aplikasi Digital dalam Teknik Penggambaran Struktur Bangunan,” *Jurnal Riset Rumpun Seni, Desain Dan Media*, vol. 3, no. 1, pp. 80–89, 2024.
- [17] E. R. Lubis, “Perbandingan Deformasi Struktur SRPM Baja yang Mengalami Getaran Gempa Mengandung Pulse dan Fling (Literatur),” *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik*, vol. 1, no. 2, 2021.
- [18] S. P. Sibarani and J. H. Sihombing, “Optimasi Desain Struktur Gedung Tahan Gempa di Medan,” *Jurnal Teknik Sipil ITB*, vol. 22, no. 1, pp. 33–42, 2021.