

Pengaruh Tingkat Daktilitas terhadap Respons Seismik Rangka Pemikul Momen di Tanah Lunak

Nauval Rabbani^{1,*}, Lulu Isnaini Ija¹, Galih Prayogo¹

Program Studi Sarjana Terapan Teknik Konstruksi, Fakultas Teknik, Universitas Pekalongan¹

Koresponden*, Email: nauvrabbani@gmail.com

Info Artikel		Abstract
Diajukan	07 Agustus 2026	<i>This study evaluates the seismic performance of a four-story office building in soft-soil Pekalongan using three moment-resisting frames: Reinforced Concrete (SRPMK), Structural Steel (SRPMM), and Structural Steel (SRPMB). Based on SNI 1726:2019 and ETABS Response Spectrum Analysis, the study assessed weight efficiency, base shear, and story drift. While steel structures are 35% lighter than concrete, ductility differences negate this benefit. SRPMB steel sustains a 107.5% higher base shear than SRPMK concrete, requiring uneconomical, massive sections. Furthermore, SRPMM steel proved overly flexible, failing safe drift limits (22.36 mm). In contrast, SRPMK concrete provided superior stiffness, effectively limiting drift to 14.25 mm. Ultimately, using pure steel moment frames in soft soils is impractical. The study highly recommends incorporating additional bracing elements to safely control lateral drift.</i>
Diperbaiki	23 Agustus 2026	
Disetujui	26 Agustus 2026	
Keywords: seismic performance; moment resisting frame system; soft soil.		Abstrak Penelitian ini mengevaluasi kinerja seismik gedung perkantoran empat lantai di tanah lunak Pekalongan menggunakan tiga sistem rangka pemikul momen: Beton Bertulang Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), Struktur baja struktural dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM), dan Struktur baja struktural dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB). Analisis dilakukan menggunakan ETABS berdasarkan SNI 1726:2019 dengan fokus pada efisiensi berat, gaya geser dasar, dan simpangan antar lantai. Hasilnya menunjukkan bahwa meski struktur baja 35% lebih ringan dari beton, perbedaan daktilitas membuatnya tidak efisien. Baja SRPMB menanggung gaya geser dasar 107,5% lebih besar dari Beton SRPMK, sehingga membutuhkan penampang masif yang tidak ekonomis. Selain itu, Baja SRPMM terlalu fleksibel dan gagal memenuhi batas simpangan aman (22,360 mm). Sebaliknya, Beton SRPMK terbukti paling kaku dan aman dengan simpangan hanya 14,250 mm.
Kata kunci: kinerja seismik; sistem rangka pemikul momen; tanah lunak		

1. Pendahuluan

Indonesia secara geografis terletak pada zona tektonik aktif yang menjadikannya salah satu wilayah dengan tingkat kerawanan seismik tertinggi di dunia [1]. Kondisi ini menuntut setiap perencanaan struktur gedung untuk mematuhi regulasi ketat mengenai ketahanan gempa, sebagaimana diatur dalam standar nasional SNI 1726:2019. Dalam perancangan struktur tahan gempa, karakteristik profil tanah lokal memiliki peran yang sangat krusial dalam menentukan besaran beban seismik dasar yang akan diterima oleh bangunan. Perhatian khusus harus diberikan pada konstruksi yang didirikan di atas tanah lunak (Kelas Situs SE), seperti yang banyak dijumpai pada wilayah pesisir [2]. Profil tanah jenis ini memiliki sifat fisik yang cenderung mengamplifikasi gelombang seismik secara signifikan, terutama pada eksitasi periode getar menengah hingga panjang [3]. Amplifikasi percepatan gempa pada tanah lunak berpotensi memicu deformasi lateral yang berlebihan pada struktur rangka gedung bertingkat. Sejalan dengan fenomena tersebut, Elza et al. [4] menegaskan bahwa bangunan yang

direpresentasikan berdiri di atas kelas situs tanah lunak di Indonesia memiliki tingkat kerentanan yang jauh lebih tinggi terhadap masalah pemenuhan batas izin simpangan antar lantai, sehingga menuntut perencana untuk melakukan evaluasi kekakuan lateral yang komprehensif sejak tahap pra-desain.

Dalam merespons tantangan seismik tersebut, pemilihan material utama penyusun struktur menjadi keputusan rekayasa yang sangat mendasar. Secara konvensional, struktur beton bertulang khususnya yang menerapkan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) telah menjadi standar baku yang mapan di Indonesia karena keandalannya dalam memberikan kapasitas lentur serta kekakuan lateral yang superior [5]. Meskipun massa beton yang berat akan berkonsekuensi pada peningkatan gaya inersia bangunan, kekakuan inherennya terbukti sangat efektif dalam meredam deformasi lateral. Di sisi lain, sejalan dengan tuntutan efisiensi desain dan tren evaluasi komparatif sistem struktur saat ini [6], material baja struktural muncul sebagai alternatif pembanding yang potensial. Baja menawarkan keunggulan

berupa rasio kekuatan terhadap berat yang jauh lebih tinggi dibandingkan beton, sehingga secara teoretis mampu mereduksi total massa bangunan dan gaya inersia seismik awal secara signifikan [7]. Pengurangan beban mati ini secara konseptual sangat menguntungkan untuk meminimalisasi beban yang ditransfer ke subsistem fondasi, menjadikannya opsi desain yang tampak sangat rasional untuk diaplikasikan pada wilayah dengan daya dukung tanah lunak.

Namun demikian, realisasi penggunaan material baja sebagai sistem penahan gaya seismik utama sering kali berbenturan dengan kompleksitas teknis dan regulasi eksekusi di lapangan. Berdasarkan pedoman desain seismik SNI 1726:2019, wilayah dengan risiko kegempaan menengah hingga tinggi idealnya mengadopsi Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) guna memastikan struktur memiliki tingkat daktilitas yang memadai melalui penetapan faktor modifikasi respons (R) sebesar 8 [8]. Pada struktur beton bertulang, pemenuhan kriteria SRPMK umumnya dapat dicapai secara praktis oleh kontraktor lokal melalui pengetatan jarak sengkang pengekan di area sendi plastis. Sebaliknya, aplikasi SRPMK pada material baja struktural menuntut persyaratan pendetailan yang sangat ketat sesuai SNI 1729:2020. Sistem baja daktil mewajibkan penggunaan sambungan teruji seperti metode Reduced Beam Section (RBS) serta pengawasan mutu pengelasan penetrasi penuh di lapangan yang membutuhkan tingkat presisi tinggi [9]. Tingginya biaya fabrikasi dan keterbatasan keahlian teknis pelaksana dalam memenuhi standar sambungan momen khusus tersebut sering kali memaksa perencana struktur untuk mengambil kompromi desain. Kondisi ini sering kali berujung pada kompromi teknis, di mana derajat daktilitas sistem diturunkan menjadi SRPMM ($R = 4,5$) atau bahkan SRPMB ($R = 3$). Peralihan ini umumnya dipilih untuk menghindari kerumitan fabrikasi sambungan khusus, meskipun harus dibayar dengan konsekuensi peningkatan gaya geser desain yang signifikan. Kedua sistem alternatif ini memberikan kemudahan konstruksi karena mengizinkan penggunaan detail sambungan standar, terlepas dari konsekuensi penurunan kapasitas daktilitas dan kemampuan disipasi energi sistem secara keseluruhan [10].

Keputusan untuk menurunkan kelas sistem daktilitas baja tersebut bukanlah tanpa risiko teknis yang signifikan. Penggunaan nilai faktor modifikasi respons (R) yang lebih kecil sebagai kompensasi rendahnya daktilitas akan mengharuskan struktur untuk didesain memikul gaya geser dasar seismik yang jauh lebih besar secara elastis. Peningkatan beban lateral yang masif ini secara langsung memengaruhi perilaku mekanis dan tuntutan kekuatan pada

elemen rangka pemikul momen baja [11]. Jika peningkatan gaya ini tidak diimbangi dengan kekakuan penampang yang memadai, struktur baja tanpa sistem pengaku akan sangat rentan mengalami deformasi lateral yang berlebihan pada saat eksitasi gempa terjadi. Kondisi tersebut dapat memicu terjadinya simpangan sisa yang tinggi pasca-gempa, sebuah parameter kerusakan yang secara permanen dapat mengancam stabilitas struktur dan kelayakan huni bangunan [12]. Hal ini memunculkan sebuah permasalahan teknis yang memerlukan pembuktian empiris: apakah sistem rangka baja menengah dan biasa (SRPMM dan SRPMB) masih efektif secara proporsi dimensi profil dan aman dalam mengontrol simpangan antar lantai apabila diaplikasikan pada gedung perkantoran bertingkat rendah di atas tanah lunak, khususnya jika dikomparasikan dengan keandalan sistem beton SRPMK.

Berangkat dari problematika tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis komparatif terhadap kinerja seismik gedung perkantoran 4 lantai yang didesain menggunakan tiga sistem penahan gaya gempa yang berbeda, yaitu: Beton Bertulang SRPMK, Baja Struktural SRPMM, dan Baja Struktural SRPMB pada kondisi Kelas Situs SE (tanah lunak). Evaluasi kinerja struktur dilakukan dengan mengaplikasikan metode Analisis Spektrum Respons (RSA). Pemilihan metode linier dinamis ini didasarkan pada tingkat efisiensi dan keandalannya yang telah teruji dalam mengevaluasi respons dinamis awal, partisipasi massa ragam, dan distribusi gaya lateral pada bangunan tingkat rendah hingga menengah secara komprehensif [13]. Parameter utama yang dikaji dan dikomparasikan dalam studi ini difokuskan pada tiga aspek krusial, meliputi: efisiensi berat total struktur pembentuk gaya inersia, perbandingan gaya geser dasar desain empiris, serta pemenuhan batas izin simpangan antar lantai. Hasil dari analisis komparatif ini diharapkan dapat memberikan wawasan dan rekomendasi rekayasa yang praktis bagi para perencana struktur dalam menentukan sistem rangka bangunan yang paling aman dan rasional di wilayah dengan karakteristik tanah lunak.

2. Metode

2.1. Model dan Variasi Pemodelan

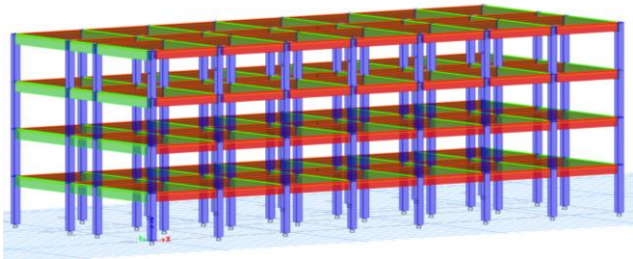
Penelitian ini mengambil objek studi berupa perencanaan struktur gedung perkantoran empat lantai yang diasumsikan berlokasi di wilayah Pekalongan. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada pertimbangan karakteristik geoteknik wilayah pesisir yang umumnya didominasi oleh profil tanah lunak atau Kelas Situs SE, sehingga sangat relevan dan kritis untuk kajian amplifikasi respons seismik. Secara geometris, bangunan ini memiliki bentang denah keseluruhan sepanjang

42 meter pada arah sumbu-X dan 17,5 meter pada arah sumbu-Y. Tinggi pias untuk setiap lantainya didesain seragam sebesar 3,5 meter, sehingga menghasilkan tinggi total bangunan mencapai 14 meter dari elevasi dasar tanah.

Guna melakukan evaluasi komparatif terhadap kinerja seismik bangunan tersebut, penelitian ini menetapkan tiga variasi pemodelan sistem penahan gaya lateral yang berbeda, yaitu:

1. Struktur beton bertulang dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).
2. Struktur baja struktural dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM).
3. Struktur baja struktural dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB).

Visualisasi representatif dari ketiga pemodelan struktur tiga dimensi (3D) tersebut di dalam perangkat lunak analisis disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pemodelan 3D Struktur Gedung

Setiap variasi pemodelan menggunakan spesifikasi material dan dimensi elemen struktural yang telah ditentukan secara terukur untuk memastikan validitas komparasi. Pada model struktur beton bertulang, material yang digunakan memiliki spesifikasi mutu kuat tekan beton (f'_c) sebesar 25 MPa. Elemen vertikal pemikul beban pada model ini, yakni kolom, dimodelkan menggunakan dimensi penampang seragam sebesar 500×400 mm. Sementara itu, elemen horizontal berupa balok dibedakan berdasarkan panjang bentangnya guna mengakomodasi dan mengoptimalkan distribusi momen lentur. Untuk rangka dengan bentang 7 meter, digunakan profil balok berdimensi 350×750 mm, sedangkan untuk bentang 6 meter diaplikasikan profil balok berdimensi 300×600 mm.

Di sisi lain, model struktur baja pada model kedua dan ketiga direncanakan menggunakan profil baja struktural mutu BJ37, dengan tegangan leleh minimum (f_y) sebesar 240 MPa. Pendimensian elemen profil kolom dan balok pada pemodelan struktur baja dilakukan melalui pendekatan otomasi desain. Pendekatan ini dieksekusi dengan memanfaatkan fitur auto-select list pada perangkat lunak ETABS v.22. Melalui fitur tersebut, program secara komputasional dan iteratif menyeleksi profil baja standar yang paling optimum dan ekonomis. Kriteria penerimaan

mutlak dari proses otomasi pendimensian ini adalah tercapainya tingkat keamanan elemen struktural, yang ditandai dengan nilai rasio tegangan kapasitas profil baja harus lebih kecil dari 1,0 pada semua kondisi kombinasi pembebanan.

2.2. Pemodelan Numerik dan Reduksi Kekakuan

Analisis struktur dilakukan secara tiga dimensi menggunakan program *finite element* ETABS. Elemen balok dan kolom dimodelkan sebagai frame elements dengan enam derajat kebebasan pada setiap titik kumpul, sedangkan pelat lantai dimodelkan sebagai elemen *shell* yang mentransfer beban gravitasi secara proporsional.

Satu tahapan krusial dalam pemodelan numerik ini adalah penerapan reduksi kekakuan inersia. Pada saat terjadi eksitasi gempa kuat, elemen beton bertulang diasumsikan akan mengalami keretakan mikroskopis yang menurunkan kekakuan utuhnya [13]. Mengacu pada SNI 2847:2019, pemodelan untuk Beton SRPMK (Model 1) diwajibkan menggunakan faktor reduksi momen inersia penampang (I_g) sebesar 0,70 untuk elemen kolom dan 0,35 untuk elemen balok. Penerapan faktor retak ini krusial untuk menghasilkan nilai simpangan lateral yang realistis pada struktur beton [14].

Sebaliknya, pada pemodelan struktur baja SRPMM (Model 2) dan SRPMB (Model 3), material baja diasumsikan memiliki sifat homogen dan isotropis yang tidak mengalami keretakan penampang pada kondisi pra-leleh. Oleh karena itu, kekakuan elemen balok dan kolom baja dalam analisis linier spektrum respons diasumsikan utuh dengan menggunakan faktor modifikasi kekakuan sebesar 1,0 I_g , sejalan dengan pendekatan analisis stabilitas elastis pada SNI 1729:2020 [9].

2.3. Parameter Seismik dan Analisis Spektrum Respons

Beban gempa rencana dievaluasi menggunakan metode Analisis Spektrum Respons linier dinamis yang disesuaikan dengan regulasi SNI 1726:2019. Mengingat fungsi struktur sebagai gedung perkantoran, bangunan ini diklasifikasikan ke dalam Kategori Risiko II dengan Faktor Keutamaan Gempa (I_e) ditetapkan sebesar 1,0. Kurva spektrum respons desain diformulasikan berdasarkan peta bahaya gempa wilayah Pekalongan dengan memperhitungkan parameter Kelas Situs SE. Karakteristik geoteknik tanah lunak ini menuntut tinjauan analitis yang komprehensif karena kecenderungannya dalam mengamplifikasi percepatan spektral pada eksitasi periode getar menengah hingga panjang, yang secara langsung berpotensi memicu amplifikasi deformasi lateral pada struktur gedung bertingkat.

Tabel 1. Parameter Desain Seismik Sistem Rangka Pemikul Momen (SNI 1726:2019)

Parameter Desain	Beton Bertulang (SRPMK)	Baja Struktural (SRPMB)	Baja Struktural (SRPMM)
Koefisien Modifikasi Respons	8	3	4,5
Faktor Kuat Lebih Sistem	3	3	3
Faktor Perbesaran Defleksi	5,5	3	4

Besaran gaya geser dasar desain dan simpangan lateral yang didistribusikan pada masing-masing pemodelan sangat bergantung pada penetapan koefisien respons sistem penahan gaya lateral. Parameter desain seismik yang diaplikasikan secara spesifik pada setiap variasi pemodelan dirangkum pada **Tabel 1**. Faktor modifikasi respons (R) bekerja sebagai reduktor gaya gempa elastis menjadi tingkat gaya desain berdasarkan kapasitas daktilitas sistem, di mana model Beton SRPMK memberikan ruang reduksi gaya terbesar. Pada tahap evaluasi kelayakan, faktor perbesaran defleksi (C_d) digunakan untuk mengonversi simpangan elastis (δ_e) hasil ekstraksi perangkat lunak komputasi menjadi simpangan antar lantai desain akhir (Δ), yang mutlak harus dikontrol agar tidak melampaui batas izin simpangan struktur.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Dinamis dan Efisiensi Massa Struktur

Pemilihan material struktur memberikan dampak langsung terhadap berat total bangunan (W) dan kekakuan lateralnya, yang secara fundamental memengaruhi perilaku dinamis gedung saat merespons beban seismik. Berdasarkan hasil pemodelan, struktur dengan sistem Beton Bertulang SRPMK memiliki berat total sebesar 18.126,45 kN. Di sisi lain, penggunaan material baja terbukti memberikan efisiensi massa yang sangat signifikan. Model Baja SRPMM memiliki berat total sebesar 11.687,06 kN, sedangkan model Baja SRPMB tercatat sebesar 11.853,03 kN. Penurunan massa yang mencapai kisaran 35% pada struktur baja ini secara teoretis mampu memperkecil gaya inersia seismik yang diterima oleh bangunan. Meskipun demikian, reduksi berat tersebut umumnya membawa konsekuensi langsung pada menurunnya kekakuan struktur secara keseluruhan. Oleh karena itu, keuntungan dari efisiensi massa ini harus dievaluasi secara hati-hati agar tidak mengorbankan stabilitas bangunan terhadap deformasi lateral.

Terdapat reduksi massa struktur sekitar 34% hingga 35% pada penggunaan sistem rangka baja dibandingkan beton bertulang. Pengurangan beban mati ini memberikan keuntungan teknis yang substansial dalam mereduksi gaya aksial pada elemen vertikal serta meringankan tuntutan daya dukung fondasi, sebuah aspek krusial bagi konstruksi yang didirikan di atas kelas situs SE. Fenomena ini sejalan dengan literatur yang menegaskan bahwa struktur baja menawarkan rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) yang lebih superior untuk menekan beban inersia bangunan [7]. Meskipun memiliki massa yang lebih ringan, evaluasi terhadap waktu getar alami (T) memperlihatkan variasi tingkat kekakuan antar sistem struktur. Tabel 2 menguraikan waktu getar alami struktur dari ragam pertama hingga ragam ke-12.

Tabel 2. Perbandingan Waktu Getar Alami (Periode) Struktur

Mode	Periode (s)		
	Beton	Baja SRPMM	Baja SRPMB
1	1,03	1,265	1,008
2	0,976	1,191	0,951
3	0,93	1,037	0,902
4	0,339	0,454	0,377
5	0,309	0,398	0,342
6	0,304	0,326	0,299
7	0,203	0,26	0,215
8	0,18	0,224	0,188
9	0,174	0,174	0,151
10	0,151	0,174	0,143
11	0,132	0,151	0,123
12	0,123	0,111	0,093

Pada ragam fundamental (Mode 1), model Baja SRPMM menunjukkan perilaku translasi yang paling fleksibel dengan periode mencapai 1,265 detik. Menariknya, model Baja SRPMB justru memiliki periode yang jauh lebih singkat (1,008 detik), menyamai kekakuan model Beton SRPMK (1,030 detik). Kekakuan lateral yang tinggi pada sistem SRPMB ini pada dasarnya merupakan konsekuensi logis dari kriteria desain.

Penggunaan faktor modifikasi respons yang sangat rendah ($R = 3$) pada SRPMB memaksa perencana untuk menggunakan penampang profil baja yang masif guna menjaga tegangan tetap berada dalam batas elastis saat memikul beban gempa yang lebih besar. Untuk memastikan bahwa analisis dinamis telah menangkap perilaku struktur secara komprehensif, standar SNI 1726:2019 mensyaratkan bahwa jumlah ragam yang ditinjau harus mampu memobilisasi sekurang-kurangnya 90% dari total massa struktur.

Tabel 3. Akumulasi Partisipasi Massa Ragam (Sum UX & Sum UY)

Mode	Beton			Baja SRPMM			Baja SRPMB		
	SumUX	SumUY	SumRZ	SumUX	SumUY	SumRZ	SumUX	SumUY	SumRZ
1	0.00	0.86	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	0.77	0.00
2	0.84	0.86	0.00	0.00	0.78	0.79	0.03	0.77	0.73
3	0.84	0.86	0.85	0.78	0.78	0.79	0.75	0.77	0.76
4	0.84	0.96	0.85	0.78	0.92	0.79	0.75	0.91	0.76
5	0.95	0.96	0.85	0.78	0.92	0.92	0.75	0.91	0.90
6	0.95	0.96	0.96	0.91	0.92	0.92	0.90	0.91	0.91
7	0.95	0.99	0.96	0.91	0.97	0.92	0.90	0.97	0.91
8	0.95	0.99	0.99	0.91	0.97	0.97	0.90	0.97	0.97
9	0.99	0.99	0.99	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
10	0.99	1.00	0.99	0.97	1.00	0.97	0.97	1.00	0.97
11	0.99	1.00	1.00	0.97	1.00	1.00	0.97	1.00	1.00
12	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabel 3 menunjukkan bahwa akumulasi rasio partisipasi massa untuk arah ortogonal X dan Y pada ketiga model struktur meningkat secara bertahap dan telah melampaui ambang batas minimum 90% pada mode ke-12. Terpenuhinya syarat partisipasi massa ini mengonfirmasi bahwa analisis spektrum respons linier yang dieksekusi telah valid, tidak mengalami kehilangan mode shape yang signifikan, dan representatif untuk dilanjutkan pada tahap evaluasi gaya geser dasar dan simpangan.

3.2. Evaluasi Gaya Geser Dasar Seismik dan Dampak Nilai R

Sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019, keandalan analisis dinamik spektrum respons harus divalidasi dengan membandingkan nilai gaya geser dasar dinamik (V_d) terhadap gaya geser dasar statik ekuivalen (V_s). Persyaratan ini mewajibkan nilai V_d tidak boleh kurang dari 100% nilai V_s untuk menjamin bahwa struktur didesain dengan tingkat keamanan dasar yang memadai, khususnya pada kelas situs tanah lunak (SE) di mana amplifikasi gelombang seismik terjadi secara signifikan pada periode menengah hingga panjang.

Hasil perhitungan gaya geser dari pemodelan ketiga sistem struktur dirangkum pada **Tabel 4**. Proses penyekalaan telah dilakukan pada pemodelan sehingga seluruh rasio memenuhi syarat minimum. Temuan yang paling krusial dari evaluasi ini adalah adanya perbedaan antara massa struktur dan besaran gaya gempa yang dipikul. Secara prinsip dinamika struktur, gaya inersia seismik berbanding lurus dengan massa bangunan. Namun, data menunjukkan bahwa struktur Baja SRPMB, yang merupakan model dengan bobot teringan, justru memikul gaya geser desain terbesar yakni mencapai 4.356,34 kN. Nilai gaya lateral ini lebih dari dua kali lipat besaran gaya geser dasar pada Beton SRPMK yang hanya sebesar 2.099,49 kN, meskipun massa beton jauh lebih masif.

Tabel 4. Perbandingan Gaya Geser pada Arah X

Parameter	Beton SRPMK	Baja SRPMM	Baja SRPMB
V_{static} Arah X	2.099,49 kN	2.887,70 kN	4.356,34 kN
$V_{dynamic}$ Arah X	2.099,24 kN	3.076,48 kN	4.469,53 kN
Rasio (V_s/V_d)	1,000	0,939	0,975
Status	Terpenuhi	Terpenuhi	Terpenuhi

Fenomena ini merupakan representasi langsung dari dampak penetapan Faktor Modifikasi Respons pada masing-masing sistem struktur. Beton SRPMK didesain dengan tingkat daktilitas yang sangat tinggi ($R = 8$). Angka ini mengindikasikan bahwa struktur diasumsikan mampu berdeformasi plastis secara optimal dan mendisipasi energi gempa dengan sangat baik melalui pembentukan sendi plastis, sehingga gaya desain elastisnya diizinkan untuk direduksi secara signifikan.

Sebaliknya, struktur Baja SRPMB didesain sebagai rangka momen biasa dengan tingkat daktilitas yang sangat rendah ($R = 3$). Keterbatasan kapasitas disipasi energi pada sistem ini memaksa struktur untuk memikul beban seismik yang jauh mendekati kondisi elastis murninya agar terhindar dari keruntuhan global. Hal ini pada hakikatnya merupakan kompensasi atau penalti desain bagi sistem SRPMB; kemudahan dan kepraktisan dalam pengerjaan detail sambungan standar di lapangan harus dibayar mahal dengan peningkatan dimensi profil baja secara drastis untuk menahan gaya geser dasar yang masif. Sementara itu, Baja SRPMM ($R = 4,5$) memosisikan dirinya sebagai jalan tengah antara kebutuhan daktilitas moderat dan efisiensi penampang.

3.3. Kontrol Simpangan Antar Lantai pada Tanah Lunak

Evaluasi kinerja *serviceability* pada struktur gedung yang didirikan di atas tanah lunak menjadi parameter yang paling

menentukan dibandingkan sekadar pengecekan kekuatan penampang. Karakteristik tanah lunak yang cenderung mengamplifikasi gelombang seismik pada periode panjang sangat berpotensi memicu deformasi lateral yang berlebihan pada struktur yang fleksibel.

Berdasarkan SNI 1726:2019, simpangan antar lantai desain (Δ) dihitung dengan mengalikan simpangan elastis (δ_e) hasil analisis ETABS dengan faktor perbesaran defleksi (C_d) dan membaginya dengan faktor keutamaan gempa (I_e). Hasil perhitungan simpangan untuk ketiga pemodelan disajikan pada **Tabel 5**. Pengecekan nilai simpangan ini merupakan langkah krusial untuk memastikan bahwa

deformasi lateral struktur tidak melampaui batas simpangan antar lantai izin yang disyaratkan.

Pemenuhan batasan tersebut sangat penting guna menjaga stabilitas bangunan, mencegah efek simpangan yang berlebihan, serta meminimalisasi kerusakan pada elemen non-struktural saat terjadi gempa rencana. Jika hasil analisis menunjukkan bahwa struktur gagal memenuhi batas simpangan ini, maka modifikasi desain seperti perbesaran penampang atau penambahan elemen pengaku lateral mutlak diperlukan.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Output Simpangan Antar Lantai

Lantai	Beton SRPMK Drift X	Beton SRPMK Drift Y	Baja SRPMM Drift X	Baja SRPMM Drift Y	Baja SRPMB Drift X	Baja SRPMB Drift Y
0	0	0	0	0	0	0
1	0.001906	0.002346	0.003117	0.005202	0.003243	0.004753
2	0.002591	0.002764	0.00559	0.007784	0.006007	0.007509
3	0.002054	0.002111	0.005577	0.00832	0.006478	0.001254
4	0.001193	0.001189	0.003974	0.006869	0.005937	0.0011

Berdasarkan **Tabel 5**, terlihat perbedaan perilaku deformasi yang sangat kontras antara sistem struktur beton bertulang dan baja struktural. Sistem Beton Bertulang SRPMK ($C_d = 5,5$) menunjukkan kinerja kekakuan lateral yang paling bagus. Kurva simpangan (garis biru) berada jauh di bawah batas izin aman sebesar 20 mm. Simpangan desain maksimum hanya mencapai 14,250 mm pada Lantai 4. Massa beton yang masif serta inersia penampang yang besar secara efektif meredam deformasi lateral, menjadikan sistem ini sangat andal untuk mengontrol drift pada kondisi eksitasi gempa di tanah lunak [4].

Model Baja SRPMM ($C_d = 4,0$) menunjukkan profil yang paling fleksibel di antara ketiganya. Pada Lantai 4, simpangan desain melonjak tajam menyentuh angka 22,360 mm, menembus garis merah batas izin (20 mm), sehingga dikategorikan Tidak Aman. Kegagalan ini membuktikan bahwa meskipun profil penampang mungkin sudah memenuhi syarat tegangan akibat gaya geser dasar (berdasarkan $R = 4,5$), kekakuan lenturnya tidak memadai untuk menahan deformasi yang diamplifikasi oleh tanah lunak.

Hal yang sangat menarik dan menjadi temuan penting dalam analisis ini adalah profil Baja SRPMB ($C_d = 3,0$). Meskipun merupakan sistem dengan daktilitas paling rendah, kurva simpangannya (garis oranye) ternyata lulus uji batas aman dengan nilai maksimum sebesar 19,434 mm pada atap.

Lolosnya model SRPMB dari batas izin ini bukanlah representasi dari efisiensi sistem, melainkan efek samping dari besarnya gaya desain. Seperti yang telah dibahas bagian

sebelumnya, model SRPMB dituntut untuk menahan gaya geser dasar elastis yang luar biasa besar (lebih dari 4.300 kN) akibat nilai $R = 3$. Untuk memenuhi tuntutan kekuatan stress ratio baja tersebut, perencana terpaksa harus menggunakan dimensi penampang H-beam/IWF yang masif. Dimensi profil raksasa inilah yang secara tidak langsung memberikan tambahan momen inersia ekstra, sehingga menahan simpangan SRPMB berada tepat di bawah batas 20 mm.

Sebaliknya, pada model SRPMM, penggunaan nilai $R = 4,5$ mengizinkan gaya desain yang lebih kecil, sehingga profil baja yang dipilih menjadi lebih ramping. Ironisnya, kerampingan ini menjadi bumerang saat dievaluasi terhadap kontrol simpangan akhir menggunakan faktor perbesaran defleksi ($C_d = 4,0$), yang berujung pada kegagalan pemenuhan syarat kelayakan [10]. Fenomena ini menegaskan bahwa untuk desain gedung tingkat rendah hingga menengah dengan sistem rangka momen di tanah lunak, faktor penentu desain pada material baja bergeser dari kriteria kekuatan menjadi kriteria kekakuan.

3.4. Implikasi Desain dan Solusi Rekayasa

Hasil evaluasi terhadap gaya geser dasar dan kontrol simpangan antar lantai mengungkapkan sebuah dilema teknis yang signifikan dalam perancangan struktur baja bertingkat rendah hingga menengah di atas tanah lunak (Kelas Situs SE). Secara teoretis, Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) baja adalah opsi yang paling ideal untuk mendisipasi energi gempa. Namun, kompleksitas eksekusi di lapangan seperti ketatnya pengawasan mutu pengelasan, kebutuhan detail sambungan teruji seperti *Reduced Beam*

Section, serta tingginya biaya fabrikasi sering kali mendorong praktisi untuk beralih ke sistem dengan persyaratan daktilitas yang lebih moderat atau rendah, yaitu SRPMM atau SRPMB.

Penelitian ini membuktikan bahwa peralihan ke sistem SRPMM dan SRPMB pada tanah lunak membawa konsekuensi desain yang sangat memberatkan. Berdasarkan hasil analisis simpangan **Tabel 5**, model SRPMM terbukti gagal memenuhi kriteria kelayakan akibat tingginya amplifikasi deformasi lateral pada tanah lunak. Di sisi lain, meskipun model Baja SRPMB secara numerik mampu memenuhi batas izin simpangan, pemenuhan tersebut dicapai melalui pengorbanan inefisiensi material yang ekstrem.

Untuk menahan gaya geser dasar elastis yang sangat besar akibat faktor $R = 3$ (mencapai 4.469,53 kN), penampang kolom dan balok SRPMB harus diperbesar secara signifikan melampaui kebutuhan kapasitas gravitasinya. Kondisi ini secara praktis menghilangkan keunggulan utama material baja, yaitu rasio kekuatan terhadap berat. Alih-alih mendapatkan struktur yang ringan dan ekonomis, perencana justru akan menghasilkan desain yang boros tonase baja [15].

Oleh karena itu, dapat disintesis bahwa penggunaan sistem Rangka Pemikul Momen murni (tanpa pengaku) dari material baja baik itu SRPMM maupun SRPMB merupakan solusi rekayasa yang tidak optimal untuk gedung perkantoran 4 lantai di wilayah dengan karakteristik tanah lunak. Tuntutan kekakuan akibat eksitasi seismik periode panjang jauh melampaui kapasitas profil penampang yang rasional secara ekonomi [10].

Sebagai rekomendasi rekayasa konstruksi, desain gedung baja pada kondisi tanah lunak sebaiknya tidak hanya mengandalkan aksi lentur elemen balok dan kolom. Penggunaan Sistem Rangka Baja Berpengaku Konsentris atau Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentris sangat disarankan. Penambahan elemen *bracing* diagonal akan secara drastis meningkatkan kekakuan lateral struktur dan mengontrol nilai simpangan antar lantai tanpa harus memperbesar dimensi elemen utama secara irasional [16]. Secara mekanis, sistem pengaku ini mengubah mekanisme penahan gaya lateral dari dominasi aksi lentur pada portal menjadi dominasi aksi aksial pada elemen diagonalnya. Peralihan jalur transfer beban ini memungkinkan *bracing* untuk menyerap porsi terbesar dari gaya geser seismik, sehingga beban momen pada balok dan kolom utama berkurang secara drastis dan efisiensi profil penampang baja dapat dikembalikan. Alternatif lain yang lebih mutakhir adalah pengintegrasian perangkat disipasi energi pasif untuk mereduksi respons dinamis struktur secara langsung.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis komparasi kinerja seismik menggunakan metode spektrum respons pada gedung perkantoran empat lantai di atas Kelas Situs SE (tanah lunak), dapat ditarik beberapa kesimpulan utama. Pertama, penggunaan material baja struktural (SRPMM dan SRPMB) terbukti mampu mereduksi berat total bangunan hingga 35% dibandingkan sistem beton bertulang. Meskipun efisiensi massa ini secara konseptual menguntungkan untuk mengurangi beban pada fondasi, keuntungan tersebut berbenturan dengan tuntutan gaya seismik akibat rendahnya daktilitas. Sistem Baja SRPMB terpaksa memikul gaya geser dasar elastis yang lebih dari dua kali lipat lebih besar dibandingkan Beton SRPMK, yang pada akhirnya menuntut penggunaan dimensi profil baja yang masif dan tidak ekonomis.

Kedua, evaluasi kelayakan terhadap batas izin simpangan antar lantai membuktikan bahwa sistem Rangka Pemikul Momen murni dari material baja rentan digunakan pada kondisi tanah lunak. Amplifikasi gempa periode panjang menyebabkan pemodelan Baja SRPMM gagal memenuhi syarat simpangan aman. Di sisi lain, kelulusan simpangan pada Baja SRPMB bukanlah cerminan efisiensi sistem, melainkan efek samping dari penggunaan profil penampang yang terlampaui besar akibat tingginya tegangan gaya geser dasar.

Sebaliknya, struktur Beton SRPMK menunjukkan kinerja yang paling superior dalam mengontrol deformasi lateral karena memiliki kekakuan bawaan yang memadai. Oleh karena itu, disarankan agar perancangan gedung tingkat rendah hingga menengah dengan material baja di wilayah tanah lunak tidak hanya mengandalkan sistem rangka momen murni, melainkan diintegrasikan dengan sistem pengaku tambahan guna mengontrol simpangan secara efektif dan rasional.

Daftar Pustaka

- [1] S. J. Hutchings and W. D. Mooney, "The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 22, no. 9, p. e2021GC009812, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1029/2021GC009812>.
- [2] A. Kumar and G. Ghosh, "Assessment of soil amplification effects on the seismic vulnerability of irregular reinforced concrete buildings of varying heights," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 34057, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-14145-2.
- [3] H. Kawase, K. Nakano, F. Nagashima, E. Ito, J. Sun, and Z. Wang, "Unified approach for evaluation of horizontal site amplification factors with special reference to history of studies on the effects of

- surface geology on seismic motion,” *Earth, Planets and Space*, vol. 75, no. 1, p. 95, 2023, doi: 10.1186/s40623-023-01849-w.
- [4] S. Putri Elza, Z. Citra, T. Edra Swasti, and D. Komerdevi, “Analisis Perbandingan Simpangan Akibat Gempa pada Bangunan 7 Lantai di Berbagai Kategori Situs Tanah di Indonesia,” 2025.
- [5] F. P. Yastari, J. M. Guci, I. Said, M. F. Falah, and S. P. Elza, “Studi Perilaku Penampang Balok Beton Bertulang dengan Variasi Rasio Tulangan Longitudinal Tarik dan Tekan,” *MEDIA KONSTRUKSI*, vol. 10, no. 2, pp. 163–174, Jul. 2025, doi: 10.33772/jmk.v10i2.132.
- [6] P. K. Askouni, “Seismic Comparison of Hybrid Steel-Reinforced Concrete and Conventional Frames,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2025, doi: 10.3390/app15073772.
- [7] H. Mostafaei, M. Ashoori Barmchi, and H. Bahmani, “Seismic Resilience and Sustainability: A Comparative Analysis of Steel and Reinforced Structures,” *Buildings*, vol. 15, no. 10, May 2025, doi: 10.3390/buildings15101613.
- [8] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 1726-2019: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1729-2020: Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2019.
- [10] F. Mazzolani, “Diaphragm effect for industrial steel buildings under earthquake loading,” *J. Constr. Steel Res.*, 2021.
- [11] G. Shi, L. Hou, and H. Zhao, “Numerical study on the seismic behaviour of high-strength steel moment-resisting frames: Multi-scale modelling and validation,” *Thin-Walled Structures*, vol. 208, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.tws.2024.112807.
- [12] N. Asgarkhani, F. Kazemi, and R. Jankowski, “Machine learning-based prediction of residual drift and seismic risk assessment of steel moment-resisting frames considering soil-structure interaction,” *Comput. Struct.*, vol. 289, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.compstruc.2023.107181.
- [13] A. Rahman, H. Sitepu, W. Clinton, A. Yudi, and A. Sinta Aprilia, “Analisis Kinerja Seismik Gedung Beton Bertulang 20 Lantai dengan Sistem Base Isolation Menggunakan Non-Linear Static Pushover Procedure (FEMA 440),” 2025.
- [14] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 2847-2019: Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [15] M. Ghasemi, C. Zhang, H. Khorshidi, L. Zhu, and P. C. Hsiao, “Seismic upgrading of existing RC frames with displacement-restraint cable bracing,” *Eng. Struct.*, vol. 282, May 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115764.
- [16] Z. Zhai, Q. Shu, H. Chen, and Y. Liu, “CCQC-based multi-seismic level optimum design of supplemental dampers in steel moment resisting frame,” *Journal of Building Engineering*, vol. 108, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.job.2025.112922.