



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 6075-6088

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Kinerja Struktur dengan Metode Pushover pada Struktur SRPMK Gedung 11 Lantai di Jakarta

Muhammad Alvinnur Fatih, M Haniifuzzidan, Sumirin

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung

*alvinnur898@gmail.com, mhaniifuzzidan@gmail.com, sumirinmail@gmail.com

Abstrak

Akibat posisi Indonesia di zona Cincin Api Pasifik, risiko seismik sangat tinggi, terutama di Jakarta yang memiliki lapisan endapan tanah lunak tebal (kelas situs SE) yang memicu amplifikasi gelombang gempa. Bangunan 11 lantai dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) murni mengandalkan filosofi Strong Column Weak Beam (SCWB) untuk mengarahkan kerusakan pada balok dan mencegah keruntuhan. Namun, pada fase pasca leleh, peningkatan kekuatan aktual balok (*overstrength*) dan degradasi kekakuan dapat menyebabkan kegagalan SCWB di lapangan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pemenuhan kriteria SCWB secara eksplisit pada kondisi pasca leleh melalui analisis pushover, serta menentukan urutan pembentukan sendi plastis dan level kinerja menurut ATC-40. Metode mencakup pemodelan 3D dengan ETABS, perhitungan rasio SCWB elastis sesuai SNI 2847:2019, dan analisis static non-linear pushover dengan distribusi beban lateral berbasis ragam. Hasil verifikasi menunjukkan semua hubungan balok-kolom memenuhi $\Sigma M_{nc} \geq 1,2 \Sigma M_{nb}$ dengan rentang 1,22–4,41. Analisis pushover mengonfirmasi mekanisme beam sidesway, dengan sendi plastis pertama muncul pada balok lantai dasar pada step 27 (arah X) dan step 25 (arah Y), tanpa kerusakan kolom hingga akhir. Titik kinerja dari metode spektrum kapasitas ATC-40 menghasilkan gaya geser ultimit melampaui demand desain; total drift mengindikasikan Immediate Occupancy, namun inelastic drift mengarah pada Damage Control. Disimpulkan bahwa kriteria SCWB elastis cukup protektif pada fase inelastis, namun analisis non-linear diperlukan untuk menangkap redistribusi gaya dan drift plastis signifikan pada tanah lunak.

Kata kunci: Strong Column Weak Beam, SRPMK, Analisis Pushover, Tanah Lunak, ATC-40

1. Latar Belakang

Indonesia menempati posisi geografis yang sangat rentan terhadap bencana seismik karena wilayahnya dilintasi oleh zona tektonik Cincin Api Pasifik (Pacific Ring of Fire). Konvergensi tiga lempeng tektonik utama—Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik—menjadikan kepulauan Indonesia sebagai salah satu kawasan dengan aktivitas kegempaan tertinggi di dunia [1]. Catatan historis kebencanaan secara konsisten mengindikasikan bahwa jatuhnya korban jiwa pada peristiwa gempa bumi lebih didominasi oleh kegagalan sistem struktur bangunan daripada dampak langsung dari pergerakan tanah [2]. Realitas ini menegaskan urgensi penerapan prinsip-prinsip rekayasa kegempaan yang ketat, khususnya pada bangunan bertingkat di kawasan perkotaan dengan kepadatan penduduk tinggi.

Wilayah DKI Jakarta memiliki problematika rekayasa struktural yang amat krusial dan mendesak untuk ditangani. Keberadaan lapisan endapan tanah lunak (Kelas Situs SE) yang tebal di ibu kota memunculkan kerentanan terhadap efek amplifikasi gelombang gempa yang signifikan. Studi mikrotremor yang dilakukan oleh Ridwan et al. [3] menunjukkan bahwa variasi kecepatan gelombang geser VS30 di Jakarta menghasilkan faktor amplifikasi tanah yang berbeda, dengan kelas situs SE (tanah lunak) yang terletak di endapan aluvial di bagian utara dan barat Jakarta. Efek site secara jelas memengaruhi bahaya seismik pada periode panjang (>1 detik), yang sangat relevan untuk bangunan berlantai menengah hingga tinggi. Penelitian Misliniyati et al. [4] melalui analisis respons situs satu dimensi pada profil tanah lunak Jakarta mengonfirmasi bahwa seluruh parameter yang dikaji, termasuk kedalaman bedrock dan kecepatan gelombang geser, memiliki efek signifikan terhadap spektrum respons di permukaan tanah. Indikasi bahaya ini semakin diperkuat oleh pemutakhiran Peta Bahaya Gempa Bumi Nasional 2017 dan SNI 1726:2019 yang menetapkan kenaikan nilai percepatan spektral desain untuk area Jakarta [5]. Ancaman ini menjadi semakin nyata dengan adanya proyeksi dari para pakar mitigasi bencana mengenai potensi guncangan berdurasi panjang (long-duration earthquake) dari zona megathrust Selat Sunda, yang memiliki sifat

merusak bagi eksistensi bangunan berlantai menengah hingga tinggi [1]. Studi tentang potensi gempa megathrust di selatan Jawa Barat dan tenggara Sumatra [6] menekankan bahwa peristiwa megathrust berskala besar pada zona subduksi Sunda berpotensi menimbulkan bahaya gempa dan tsunami yang signifikan bagi masyarakat sekitar, sehingga memerlukan upaya pemahaman yang lebih mendalam tentang kemungkinan dan frekuensi kejadian tersebut.

Penggunaan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) merupakan pendekatan struktural yang esensial untuk diaplikasikan pada gedung berlantai menengah dalam meredam gaya lateral, terutama di lingkungan bertanah lunak. Sistem ini mengandalkan sepenuhnya kapasitas elemen balok, kolom, dan titik hubung (joint) untuk berdeformasi secara inelastis dan mendisipasi energi gempa tanpa mengalami keruntuhan [7]. Pemilihan bangunan 11 lantai sebagai objek kajian dalam studi ini merepresentasikan struktur mid-rise dengan tingkat fleksibilitas yang rentan terhadap deformasi lateral yang besar. Berbeda dengan sistem struktural lain yang dibantu oleh elemen kaku seperti dinding geser, keseluruhan gaya geser dasar seismik pada SRPMK ditahan murni oleh interaksi lentur subsistem rangka, sehingga menuntut pemenuhan detail daktilitas tingkat tinggi [5]. Mapari dan Ghugal [8] melalui studi komparatif antara SRPMK dan Ordinary Moment Resisting Frame (OMRF) menunjukkan bahwa SRPMK memiliki kapasitas daktilitas yang jauh lebih unggul, yang merupakan persyaratan fundamental untuk aplikasi di zona risiko seismik tinggi seperti Jakarta.

Di dalam merancang sistem rangka tersebut, konsep Strong Column Weak Beam (SCWB) bertindak sebagai filosofi pertahanan mendasar guna menghindari kolaps pada struktur secara total. Prinsip utamanya adalah memastikan balok yang memiliki sifat daktil mengalami kerusakan atau pembentukan sendi plastis terlebih dahulu dibandingkan dengan kolom. Mekanisme keruntuhan beam sidesway mechanism ini memungkinkan struktur mengalami disipasi energi yang signifikan melalui pelelehan balok di berbagai tingkat, sementara kolom tetap mempertahankan kapasitas pikul beban gravitasinya [9]. Persamaan fundamental SCWB menurut SNI 2847:2019 mensyaratkan bahwa jumlah kapasitas momen nominal kolom pada suatu hubungan balok-kolom minimal 1,2 kali lipat dari jumlah kapasitas momen nominal balok yang bertemu pada hubungan tersebut ($\Sigma M_{nc} \geq 1,2 \Sigma M_{nb}$) [7]. Namun demikian, berbagai telaah empiris membuktikan bahwa nilai ambang elastis ini terkadang gagal menopang bangunan, khususnya ketika deformasi akibat pergerakan lateral memasuki teritori inelastis lanjutan atau tahap pasca leleh (post-yield) [10].

Fenomena degradasi kekakuan dinamis pada fase pasca leleh mengakibatkan perubahan profil respons dinamis bangunan secara drastis. Momen lentur aktual balok dapat melonjak jauh di atas asumsi desain aslinya akibat efek strain hardening pada baja tulangan. Konsekuensi dari fluktuasi pasca leleh ini adalah terjadinya pelonjakan transfer gaya menuju kolom, yang berisiko menggagalkan pencapaian kriteria SCWB aktual di lapangan [11]. Pada struktur SRPMK murni, ketiadaan dinding geser membuat ancaman kegagalan SCWB di fase inelastis menjadi persoalan yang sangat kritis. Seiring dengan peningkatan intensitas gempa, struktur bertingkat menengah pada tanah lunak akan mengalami simpangan antar lantai (drift) yang signifikan. Firoj et al. [12] menunjukkan bahwa efek interaksi tanah-struktur nonlinear pada bangunan mid-rise RC secara signifikan memengaruhi respons seismik dan distribusi kerusakan, terutama pada kondisi tanah lunak. Golafshani dan Akhtarpour [13] melalui studi respons bangunan low dan mid-rise di atas tanah lunak menemukan bahwa gempa near-field memberlakukan respons struktural yang lebih kritis dibandingkan dengan gempa far-field, dan bahwa interaksi tanah-struktur meningkatkan amplitudo respons dan tegangan pada elemen struktural.

Fenomena sekunder seperti efek P-Delta secara instan melipatgandakan beban lentur yang harus dipikul oleh kolom, sehingga mempercepat potensi pelelehan pada kolom sebelum balok mencapai kapasitas disipasi energi mekanisnya [14]. Zameeruddin et al. [15] melalui evaluasi seismik berbasis kinerja pada Reinforced Concrete Moment Resisting Frames (RCMRFs) menunjukkan bahwa respons nonlinear pada titik kinerja sangat dipengaruhi oleh degradasi kekakuan dan kekuatan elemen, yang tidak tertangkap dalam analisis linear konvensional. Meskipun ancaman kegagalan struktural tersebut nyata, tinjauan literatur dan praktik desain rekayasa di Indonesia mayoritas masih bertumpu pada evaluasi respons statik linear dan rasio desain statis. Mengandalkan standar SCWB elastis pada desain gedung menengah murni SRPMK di Jakarta dapat diibaratkan sebagai menyimpan "bom waktu" struktural. Apabila gempa megathrust memicu deformasi plastis masif yang tidak terprediksi oleh analisis elastis, kelebihan kekuatan (overstrength) pada balok seiring dengan deformasi lateral akan memicu mekanisme tingkat lunak (soft story) akibat keruntuhan kolom prematur, mendahului kemampuan balok dalam menahan gempa [11].

Kajian ini menghadirkan urgensi yang tinggi karena secara spesifik membahas kinerja mekanis komponen balok dan kolom ketika struktur mengalami simpangan inelastis melalui analisis static non-linear pushover. Evaluasi

dilakukan dengan menerapkan permodelan beban gempa site-specific Jakarta berdasarkan SNI 1726:2019 dan Peta Bahaya Gempa Nasional 2017. Penggunaan prosedur Capacity Spectrum Method (CSM) yang diadopsi dalam ATC-40 [16] memungkinkan penentuan titik kinerja (performance point) secara iteratif, yang merupakan perpotongan antara kurva kapasitas struktur dengan spektrum demand gempa rencana dalam format Acceleration-Displacement Response Spectrum (ADRS). Zihni et al. [17] dalam studi pushover analysis pada bangunan bertingkat di Indonesia menggunakan ATC-40 dan FEMA 440 menunjukkan bahwa metode spektrum kapasitas mampu memberikan evaluasi tingkat kinerja yang komprehensif untuk bangunan eksisting.

Penelitian ini bertujuan untuk menyajikan analisis kuantitatif mendalam terkait pembentukan sendi plastis (plastic hinge sequence) serta evaluasi pemenuhan aktual kriteria SCWB pasca leleh pada gedung 11 lantai SRPMK murni di Jakarta. Dengan ini, diharapkan para perencana struktur dapat merekonstruksi pemahaman terkait efektivitas ambang batas aman rasio elastis 1,2 di lapangan, sekaligus menjadikannya sebagai rekomendasi penyempurnaan desain untuk menghadapi ancaman seismik mendatang.

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah: pertama, Bagaimana pemenuhan desain tulangan berdasarkan kriteria SCWB pasca leleh pada bangunan 11 lantai di tanah lunak Jakarta? Kedua, bagaimana urutan pembentukan sendi plastis (plastic hinge sequence) pascaleleh pada struktur SRPMK yang ditinjau? Dan terakhir, bagaimana posisi titik kinerja (performance point) dan termasuk dalam level kinerja apakah bangunan tersebut berdasarkan peraturan ATC-40?

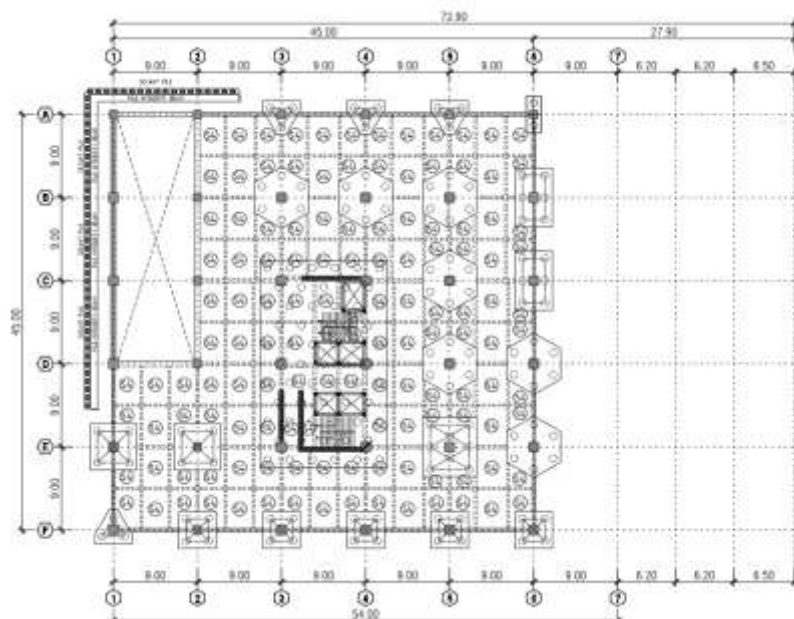
Berdasarkan rumusan masalah yang telah diidentifikasi, tujuan penelitian ini adalah: Pertama, Merancang detailing tulangan balok dan kolom beton bertulang berdasarkan kriteria SCWB pasca leleh pada bangunan 11 lantai di tanah lunak Jakarta. Kedua, menganalisis urutan pembentukan sendi plastis (plastic hinge sequence) pascaleleh melalui simulasi pushover analysis. Dan terakhir, menganalisis level kinerja bangunan berdasarkan parameter drift ratio yang ditetapkan dalam peraturan ATC-40.

2. Metode Penelitian

2.1. Objek dan Data Penelitian

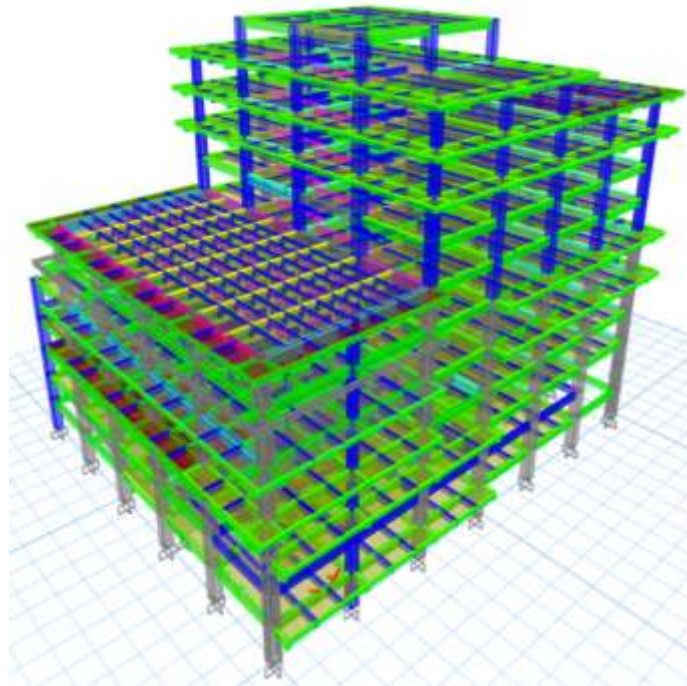
Objek penelitian adalah sebuah gedung perkantoran 11 lantai ditambah 1 *basement* yang berlokasi di Jakarta Pusat. Denah gedung dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

Gambar 1. Denah Lantai Basement



Sumber: Data Konsep DED Proyek

Struktur bangunan dirancang menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) murni tanpa dinding geser. Data bangunan yang digunakan merupakan data dari konsep Detail Engineering Design (DED) proyek. Spesifikasi material dan dimensi elemen struktur disajikan sebagai berikut: Mutu Beton: Kolom 40 MPa, Balok 35 MPa, Pelat lantai 35 MPa, Pile cap 35 MPa, Shearwall 40 MPa, Fondasi tiang bor 30 MPa. Selimut beton untuk kolom dan balok 40 mm, sedangkan untuk pelat dan dinding 30 mm. Mutu Baja Tulangan: Tulangan polos BJTP 280 ($f_y = 280$ MPa) untuk diameter 10 mm, tulangan ulir BJTS 420 ($f_y = 420$ MPa, $f_u = 525$ MPa), serta tulangan wiremesh dengan $f_y = 500$ MPa. Dimensi Kolom: Terdapat sepuluh tipe kolom dengan rentang dimensi dari 450×450 mm (K4) hingga 1000×1000 mm (K1a dan K1b), termasuk kolom lift dan kolom tangga dengan dimensi khusus. Dimensi Balok: Dua puluh tipe balok digunakan dalam struktur, dengan dimensi bervariasi mulai dari 200×400 mm (B4) hingga 500×1100 mm (G0). Balok induk (girder) utama memiliki dimensi 500×900 mm dan 400×800 mm. Pelat Lantai: Enam tipe pelat dengan ketebalan bervariasi dari 130 mm hingga 200 mm, disesuaikan dengan bentang dan fungsi ruang. Elevasi total bangunan adalah 49 meter, terdistribusi dari lantai basement pada elevasi 0,00 m hingga lantai dak pada elevasi +49,00 m, dengan tinggi antar lantai berkisar antara 3,50 m hingga 5,00 m.



Gambar 2. Permodelan SRPMK Program Software ETABS 2023
Sumber: Data Permodelan ETABS

2.2. Prosedur Analisis

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis yang meliputi studi literatur, pengumpulan data, pemodelan struktur, analisis pembebanan, evaluasi kriteria SCWB konvensional, dan analisis static non-linear pushover.

Tahap 1: Pemodelan Struktur. Model tiga dimensi struktur gedung dibuat menggunakan perangkat lunak ETABS 2023. Pemodelan mencakup seluruh elemen struktural termasuk balok, kolom, pelat lantai, dan elemen penunjang lainnya. Diaphragm constraint diterapkan pada setiap lantai untuk mensimulasikan kekakuan diafragma kaku pada pelat.

Tahap 2: Analisis Pembebanan. Pembebanan struktur mengacu pada SNI 1727:2020 untuk beban mati dan beban hidup, serta SNI 1726:2019 untuk beban gempa. Beban mati tambahan pada pelat lantai dihitung sebesar $2,85 \text{ kN/m}^2$ yang mencakup finishing lantai, plafond, instalasi ME, waterproofing, dan beban tambahan lainnya. Beban hidup bervariasi sesuai fungsi ruang, mulai dari $1,92 \text{ kN/m}^2$ untuk ruang kuliah hingga $7,18 \text{ kN/m}^2$ untuk podium.

Respons spektrum gempa elastis dihitung berdasarkan data site-specific Jakarta dengan parameter sebagai berikut: $S_s = 0,8007$ g, $S_1 = 0,39$ g, kelas situs SE (tanah lunak) dengan $F_a = 1,26$ dan $F_v = 2,44$. Kategori risiko bangunan adalah III dengan faktor keutamaan gempa $I_e = 1,25$. Perhitungan parameter spektral desain menghasilkan $SDS = 0,672$ g dan $SD_1 = 0,6344$ g. Faktor modifikasi respons (R) untuk SRPMK adalah 8, dengan faktor kuat lebih sistem $\Omega_0 = 3$ dan faktor perbesaran defleksi $C_d = 5,5$ sesuai Tabel 12 SNI 1726:2019.

Tahap 3: Verifikasi Kriteria SCWB Konvensional. Evaluasi kriteria Strong Column Weak Beam dilakukan dengan menghitung rasio antara jumlah kapasitas momen nominal kolom (ΣM_{nc}) terhadap jumlah kapasitas momen nominal balok (ΣM_{nb}) pada setiap hubungan balok-kolom. Kapasitas momen nominal kolom diperoleh dari analisis diagram interaksi P-M menggunakan perangkat lunak SPColumn, sedangkan kapasitas momen nominal balok dihitung berdasarkan konfigurasi tulangan terpasang hasil desain ETABS. Batas minimum rasio SCWB yang disyaratkan adalah 1,2 sesuai ketentuan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3.2.

Tahap 4: Analisis Static Non-Linear Pushover. Prosedur pushover analysis dilaksanakan sesuai panduan ATC-40 (Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings). Sendi plastis (plastic hinges) didefinisikan pada lokasi-lokasi kritis elemen balok dan kolom berdasarkan kriteria FEMA 356. Sendi plastis pada balok didefinisikan sebagai sendi momen lentur (M3) yang ditempatkan pada jarak 0,05 dan 0,95 dari panjang bentang bersih. Sendi plastis pada kolom didefinisikan sebagai sendi interaksi P-M2-M3 yang juga ditempatkan pada jarak 0,05 dan 0,95 dari tinggi bersih kolom.

Prosedur pembebanan pushover dilakukan dalam dua tahap. Pertama, beban gravitasi nonlinear diterapkan dengan faktor skala 1,0 untuk beban mati, 1,0 untuk beban mati tambahan, dan 0,25 untuk beban hidup. Efek P-Delta diaktifkan untuk memperhitungkan pengaruh geometri nonlinear. Kedua, beban lateral static nonlinear diterapkan secara monotonik dengan pola distribusi yang proporsional terhadap massa lantai dan bentuk ragam getar fundamental struktur. Analisis dilakukan pada dua arah independen, yaitu arah X-X dan arah Y-Y.

Tahap 5: Evaluasi Kinerja. Penentuan titik kinerja (performance point) dilakukan menggunakan metode spektrum kapasitas (Capacity Spectrum Method) yang diadopsi dalam ATC-40. Kurva kapasitas hasil pushover analysis ditransformasikan ke dalam format ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum), yang kemudian diinterseksikan dengan spektrum demand gempa rencana yang telah direduksi oleh faktor redaman efektif (β_{eff}). Level kinerja struktur ditentukan berdasarkan batasan drift ratio sesuai Tabel 2.1 ATC-40: Immediate Occupancy (IO) untuk total drift maksimum $\leq 0,01$ dan inelastic drift maksimum $\leq 0,005$, Damage Control (DC) untuk total drift 0,01-0,02 dan inelastic drift 0,005-0,015, Life Safety (LS) untuk total drift $\leq 0,02$, dan Structural Stability (SS) untuk batasan yang lebih tinggi.

3. Hasil dan Diskusi

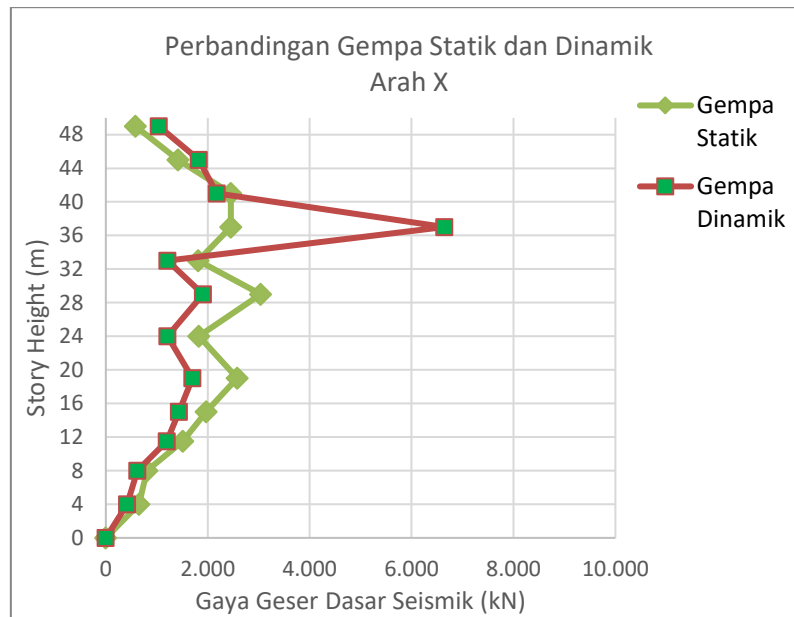
3.1. Berat Seismik dan Periode Getar Struktur

Analisis berat seismik bangunan menghasilkan total massa struktur sebesar 203.688,17 kN. Distribusi massa seismik per lantai menunjukkan variasi yang signifikan, dengan massa terbesar terkonsentrasi pada lantai 3 (26.454,60 kN) dan lantai 5 (22.683,60 kN), sementara massa terkecil terdapat pada lantai dak (2.937,67 kN) dan basement (2.729,45 kN). Variasi distribusi massa ini memengaruhi distribusi gaya geser tingkat dan pola deformasi lateral struktur. Hasil analisis ragam getar (modal analysis) menunjukkan bahwa struktur memiliki 48 mode getar dengan partisipasi massa kumulatif mencapai 100% pada mode ke-48. Mode pertama struktur merupakan translasi dominan arah X dengan periode getar 1,985 detik dan partisipasi massa 64,46%. Mode kedua merupakan translasi dominan arah Y dengan periode 1,795 detik dan partisipasi massa 66,92%. Mode ketiga merupakan rotasi arah Z dengan periode 1,446 detik dan partisipasi massa rotasi 59,14%. Pola ini menunjukkan bahwa dua mode pertama struktur telah memenuhi persyaratan translasi dominan orthogonal sesuai SNI 1726:2019.

Berdasarkan perhitungan periode fundamental pendekatan, diperoleh nilai $T_a = C_t \times h_n^x = 0,0488 \times (49)^{0,75} = 0,904$ detik. Dengan koefisien batas atas $C_u = 1,4$, diperoleh $T_{a \max} = 1,265$ detik. Mengingat periode getar dari analisis komputer (T_c) untuk arah X (1,985 detik) dan arah Y (1,795 detik) melebihi nilai $T_{a \max}$, maka periode getar yang digunakan dalam perhitungan gaya geser dasar adalah $T_{a \max} = 1,256$ detik. Penggunaan periode batas atas ini menghasilkan estimasi gaya geser dasar yang lebih konservatif, yang diperlukan untuk struktur dengan tanah lunak di mana periode panjang dapat memicu respons resonansi yang signifikan. Temuan ini selaras dengan hasil studi Ridwan et al. [3] yang menunjukkan bahwa efek site pada periode panjang (>1 detik) sangat

memengaruhi bahaya seismik di permukaan tanah Jakarta.

Dari hasil perhitungan skala faktor yang diperoleh, selanjutnya skala koreksi di input kedalam ETABS 2023 dan dapat dibuat grafik perbandingan Vdinamik respon spektrum > 100% Vstatik ekivalen dengan melihat Gambar 2.



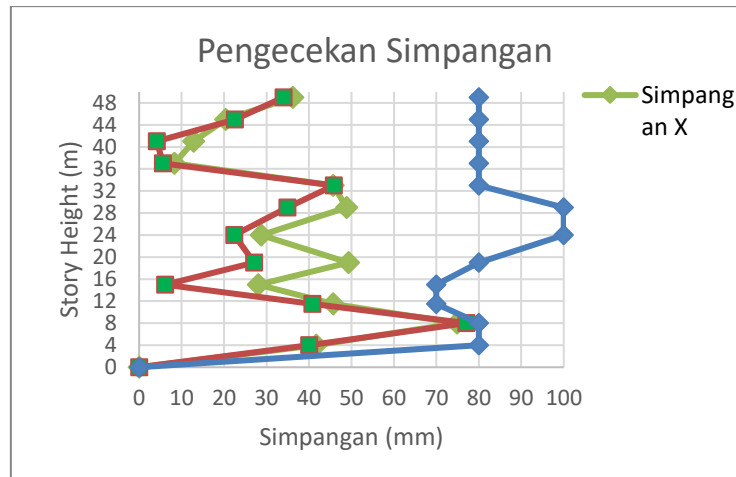
Gambar 3. Gempa Dinamik > 100% Gempa Statik Arah X (SRPMK)
Sumber: Data Perhitungan Excel

3.2. Verifikasi Gaya Geser Dasar dan Simpangan Antar Lantai

Perhitungan koefisien respons seismik (C_s) menghasilkan nilai 0,105 untuk kedua arah, yang kemudian dikalikan dengan berat seismik total untuk mendapatkan gaya geser dasar desain $V = 21.110$ kN. Evaluasi perbandingan antara gaya geser dinamik respons spektrum dengan gaya geser statik ekivalen menunjukkan bahwa gaya geser dinamik awal lebih kecil dari 100% gaya geser statik, sehingga diperlukan faktor skala koreksi.

Setelah penerapan faktor skala, gaya geser dinamik pada seluruh tingkat untuk kedua arah telah melampaui 100% gaya geser statik ekivalen. Pada arah X, gaya geser dinamik terkoreksi mencapai 21.386,44 kN di lantai dasar, sementara pada arah Y mencapai 16.373,67 kN. Pemenuhan syarat ini mengonfirmasi bahwa analisis respons spektrum yang dilakukan telah memenuhi ketentuan Pasal 7.9.1.4.1 SNI 1726:2019.

Hasil perhitungan simpangan antar lantai (story drift) menunjukkan bahwa seluruh tingkat pada struktur SRPMK memenuhi batas simpangan izin. Simpangan maksimum arah X terjadi pada lantai Mezzanine ($\Delta x = 74,85$ mm) terhadap batas izin 80 mm, sementara simpangan maksimum arah Y terjadi pada lantai Mezzanine ($\Delta y = 77,09$ mm) terhadap batas izin 80 mm. Lantai 4 dan 5 dengan tinggi antar lantai 5.000 mm menunjukkan simpangan yang lebih moderat terhadap batas izin yang lebih besar (100 mm), masing-masing 48,88 mm dan 45,72 mm untuk arah X. Temuan ini mengindikasikan bahwa desain kekakuan lateral struktur relatif memadai pada fase elastis, namun tetap memerlukan verifikasi lebih lanjut pada fase inelastis mengingat struktur berada di atas tanah lunak.

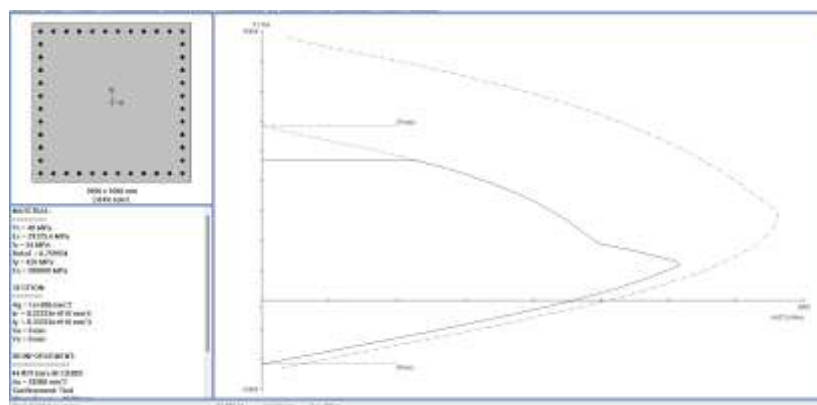


Gambar 4. Simpangan Antar Tingkat Arah X dan Y (SRPMK)

3.3. Evaluasi Pemenuhan Kriteria SCWB

Evaluasi kriteria Strong Column Weak Beam dilakukan pada delapan tipe kolom utama (K1A hingga K3C) yang menumpu berbagai tipe balok girder. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh hubungan balok-kolom memenuhi kriteria SCWB dengan rentang rasio yang bervariasi antara 1,22 hingga 4,41. Kolom K1A (1000×1000 mm, 44 D29) menunjukkan rasio SCWB tertinggi sebesar 4,41 pada kedua arah. Kapasitas momen nominal kolom sebesar 6.154 kNm per penampang (total 12.308 kNm untuk dua kolom) secara signifikan melampaui jumlah momen nominal balok G2B yang ditumpunya (2.788,68 kNm). Margin keamanan yang besar pada kolom berukuran besar ini memberikan keyakinan bahwa mekanisme strong column weak beam akan tetap terjaga bahkan dalam kondisi pasca leleh. Kolom K3A (700×700 mm, 28 D25) menunjukkan rasio SCWB yang paling kritis, yaitu 1,22 pada arah X. Dengan kapasitas momen nominal kolom 4.124 kNm (total) berbanding 3.373,04 kNm (total balok), margin keamanan hanya 2% di atas batas minimum 1,2. Kondisi ini patut mendapat perhatian khusus karena pada fase pasca leleh, fenomena overstrength balok akibat strain hardening dapat melampaui margin yang tersedia, sehingga berpotensi mengakibatkan pelelehan kolom prematur.

Kolom K3C (700×700 mm, 24 D22) menunjukkan rasio SCWB 1,22 pada arah Y, serupa dengan K3A. Namun pada arah X, rasio SCWB-nya mencapai 2,12 karena perbedaan balok yang ditumpu. Variasi rasio SCWB antar arah pada kolom yang sama ini menunjukkan pentingnya evaluasi SCWB pada kedua arah secara independen, terutama mengingat sifat pembebanan gempa yang bersifat multi-directional [18]. Hasil evaluasi SCWB ini memberikan gambaran bahwa pada level desain elastis, seluruh hubungan balok-kolom telah memenuhi persyaratan SNI 2847:2019. Namun demikian, perlu dicermati bahwa margin yang tipis pada K3A dan K3C (arah Y) rentan terhadap kegagalan SCWB pada kondisi pasca leleh, mengingat analisis pushover akan mengungkapkan redistribusi gaya dan degradasi kekakuan yang tidak terprediksi oleh analisis linear elastis.



Gambar 5. Grafik Diagram Interaksi Kolom
 Sumber: Data Perhitungan SPColumn

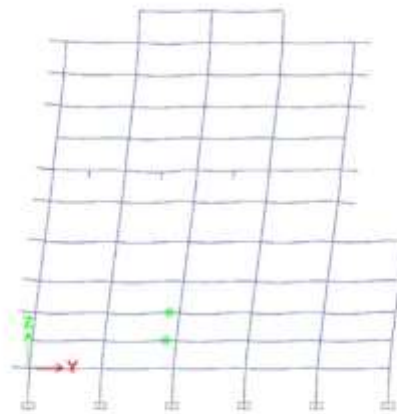
3.4. Urutan Pembentukan Sendi Plastis (Plastic Hinge Sequence)

Hasil analisis pushover memberikan informasi komprehensif mengenai urutan pembentukan sendi plastis pada elemen struktural. Pada arah X-X, sendi plastis pertama kali muncul pada step ke-27, yang berkorespondensi dengan displacement atap sebesar 109,28 mm dan gaya geser dasar 9.835,96 kN. Lokasi sendi plastis awal terkonsentrasi pada balok lantai Ground Floor dan Mezzanine. Fenomena ini sesuai dengan ekspektasi desain, di mana balok pada lantai bawah yang menerima gaya geser terbesar mencapai kapasitas lelehnya terlebih dahulu.

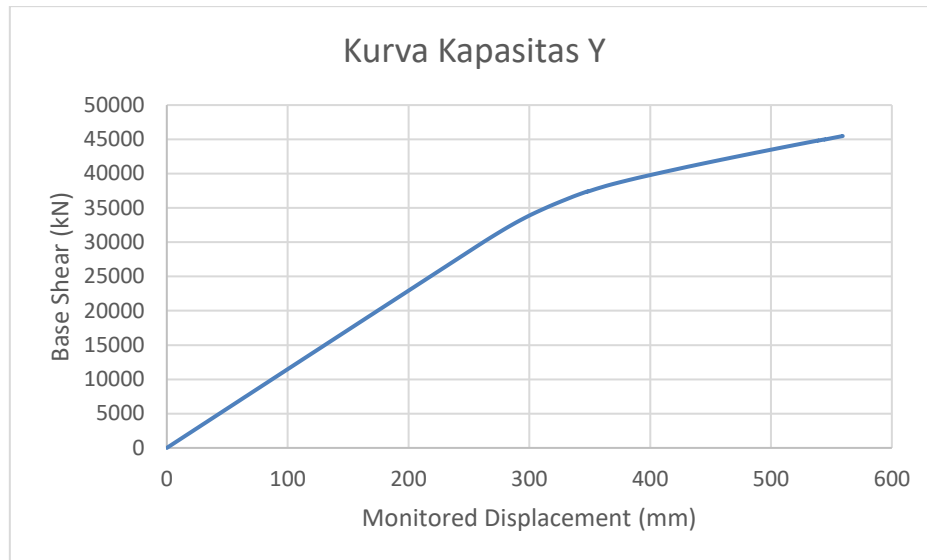
Berdasarkan pengamatan distribusi sendi plastis pada setiap step:

- Step 27 (109,28 mm): 12 sendi plastis telah terbentuk pada level B-C, semuanya pada elemen balok di lantai Ground Floor dan Mezzanine. Kolom masih berada pada kondisi elastis (level A-B), menandakan bahwa mekanisme SCWB berfungsi pada tahap awal inelastis.
- Step 50 (210,37 mm): Jumlah sendi plastis pada balok meningkat menjadi 22, masih terkonsentrasi pada lantai-lantai bawah. Belum ada sendi plastis pada kolom, mengonfirmasi bahwa struktur masih mempertahankan integritas kolom sesuai prinsip SCWB.
- Step 100 (439,96 mm): Jumlah sendi plastis pada balok mencapai 1.138. Satu sendi telah memasuki level IO-LS (Immediate Occupancy - Life Safety), menandakan bahwa beberapa elemen balok mulai mengalami kerusakan yang lebih signifikan. Namun kolom masih seluruhnya dalam kondisi A-B.
- Step 170 (708,50 mm): Tahap akhir analisis, total 1.804 sendi plastis telah terbentuk pada balok, dengan 96 sendi di antaranya telah melampaui batas IO dan memasuki level IO-LS. Tidak ada satupun sendi plastis yang terbentuk pada kolom.

Pola pembentukan sendi plastis pada arah Y-Y menunjukkan karakteristik yang serupa. Sendi plastis pertama kali muncul pada step ke-25 (displacement 100,17 mm, base shear 11.498,09 kN), terutama pada balok lantai Mezzanine dan lantai 1. Sampai dengan step ke-133 (displacement 559,32 mm, base shear 45.480,78 kN), seluruh sendi plastis (1.534 buah) terbentuk pada balok, tanpa satupun sendi plastis pada kolom.



Gambar 6. Pushover Arah Y Step 25
Sumber: Data Hasil Analisis Pushover ETABS



Gambar 7. Kurva Kapasitas Arah Y-Y
Sumber: Data Hasil Analisis Pushover ETABS

Observasi kritis dari hasil analisis pushover ini adalah sebagai berikut:

Pertama, mekanisme keruntuhan yang terjadi adalah beam sidesway mechanism, yang merupakan mekanisme keruntuhan yang diinginkan dalam desain tahan gempa. Seluruh sendi plastis terbentuk pada elemen balok terlebih dahulu, memungkinkan struktur mendisipasi energi gempa melalui pelelehan balok yang bersifat duktail. Temuan ini konsisten dengan prinsip SCWB dan mengonfirmasi bahwa detailing tulangan yang diterapkan berhasil mengarahkan kerusakan ke elemen balok.

Kedua, tidak terbentuknya sendi plastis pada kolom hingga akhir analisis (step 170 untuk arah X dan step 133 untuk arah Y) menunjukkan bahwa margin SCWB yang disediakan—termasuk pada kolom K3A dengan rasio minimum 1,22—masih memadai untuk mencegah pelelehan kolom bahkan pada deformasi yang sangat besar (708,50 mm atau sekitar 1,45% drift atap). Ini merupakan indikasi positif terhadap efektivitas kriteria SCWB.

Ketiga, konsentrasi sendi plastis pada lantai-lantai bawah (Ground Floor hingga lantai 5) menunjukkan bahwa distribusi kerusakan tidak sepenuhnya merata di sepanjang tinggi bangunan. Fenomena ini terkait dengan distribusi gaya geser tingkat yang menurun di lantai-lantai atas, serta variasi dimensi elemen struktural antar tingkat. Meskipun mekanisme yang terjadi adalah beam sidesway yang diinginkan, konsentrasi kerusakan pada lantai bawah perlu diantisipasi dalam desain untuk menghindari akumulasi kerusakan yang berlebihan pada tingkat-tingkat tersebut.

Keempat, perbandingan antara arah X dan Y menunjukkan bahwa arah Y membutuhkan gaya geser yang lebih besar (11.498,09 kN vs 9.835,96 kN) untuk memicu sendi plastis pertama. Hal ini berkaitan dengan konfigurasi denah dan distribusi elemen struktural yang berbeda pada kedua arah.

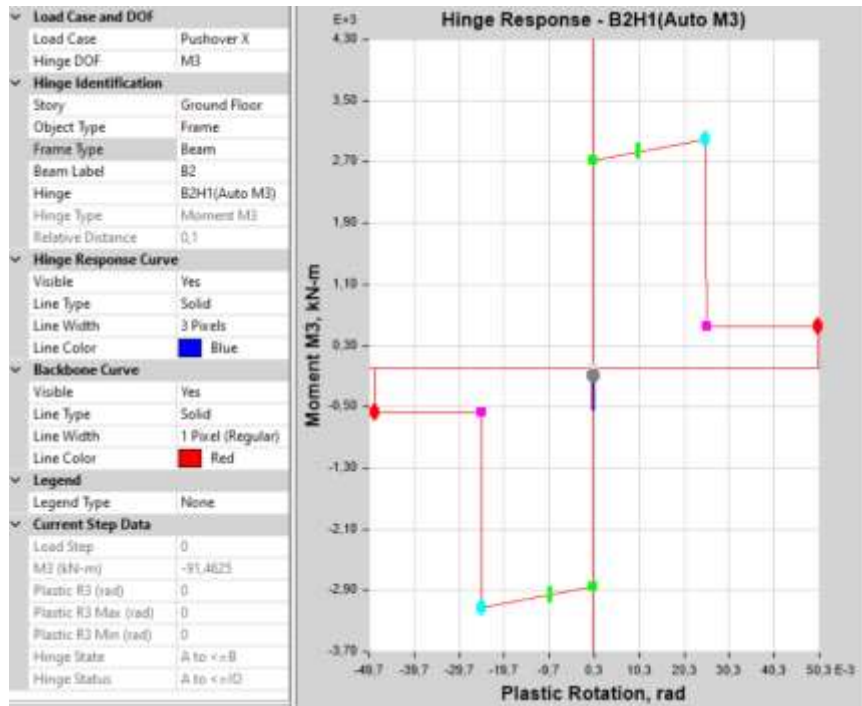
3.5. Kurva Kapasitas dan Perilaku Inelastis

Kurva kapasitas yang dihasilkan dari analisis pushover memberikan informasi penting mengenai perilaku inelastis struktur. Kurva kapasitas arah X-X menunjukkan empat fase karakteristik yang berbeda. Fase pertama (0-109 mm) merupakan fase elastis penuh di mana hubungan gaya-perpindahan bersifat linear. Fase kedua (109-254 mm) menandai transisi menuju inelastis dengan terbentuknya sendi plastis pada balok dan mulai terjadinya degradasi kekakuan gradual. Fase ketiga (254-440 mm) menunjukkan respons inelastis penuh dengan pembentukan sendi plastis yang masif dan peningkatan gaya geser yang melambat (strain hardening). Fase keempat (>440 mm) mengindikasikan pendekatan terhadap kapasitas ultimit, di mana peningkatan displacement yang besar hanya menghasilkan penambahan gaya geser yang kecil.

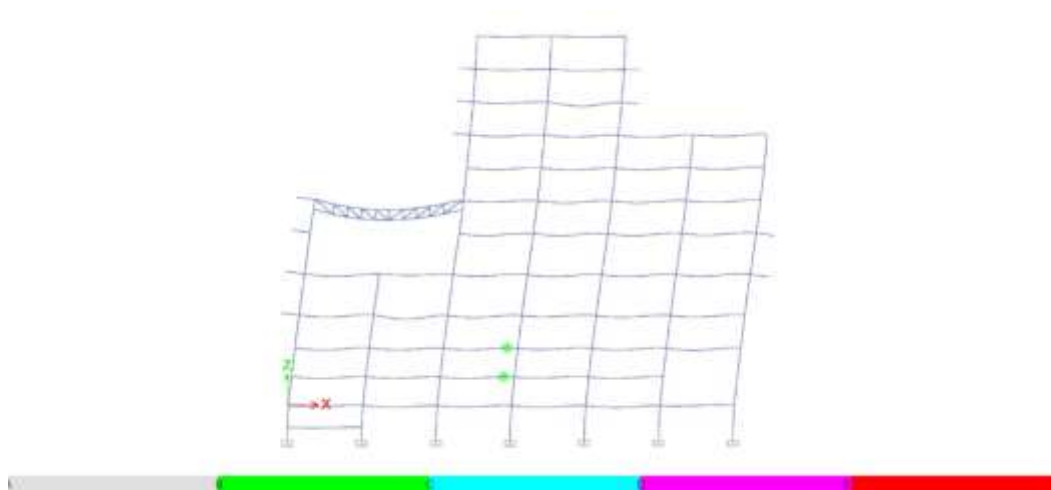
Gaya geser maksimum yang dicapai pada arah X adalah 41.642,15 kN pada step 170 (displacement 708,50 mm), atau sekitar 1,97 kali gaya geser desain (21.110 kN). Rasio overstrength aktual ini secara signifikan lebih tinggi

dari faktor kuat lebih sistem $\Omega_0 = 3$ yang ditetapkan dalam SNI 1726:2019 untuk SRPMK, mengindikasikan bahwa struktur memiliki kapasitas cadangan yang substansial pada fase inelastis.

Kurva kapasitas arah Y-Y menunjukkan perilaku yang lebih kaku dengan gaya geser maksimum mencapai 45.480,78 kN pada step 133 (displacement 559,32 mm), atau sekitar 2,15 kali gaya geser desain. Kekakuan awal yang lebih tinggi pada arah Y berkaitan dengan konfigurasi portal dan jumlah bentang yang berbeda pada kedua arah.



Gambar 8. Grafik Sendi Plastis Balok Pushover X
 Sumber: Data Hasil Analisis Pushover ETABS



Gambar 9. Pushover Arah X Step 27
 Sumber: Data Hasil Analisis Pushover ETABS

3.6. Titik Kinerja (Performance Point) dan Level Kinerja

Penentuan titik kinerja dilakukan menggunakan metode spektrum kapasitas (Capacity Spectrum Method) yang diadopsi dalam ATC-40. Hasil perpotongan antara kurva kapasitas spektral dengan spektrum demand yang telah direduksi oleh redaman efektif disajikan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Performance Point Hasil Analisis Pushover Metode ATC-40

Arah Beban	V desain (kN)	Vt (kN)	Dt (m)	Sa (g)	Sd (m)	Teff (sec)	β_{eff}
X-X	21.109,74	33.355,97	0,454	0,236	0,303	2,159	0,066
Y-Y	21.109,74	39.975,22	0,405	0,284	0,279	1,894	0,056

Hasil analisis menunjukkan bahwa gaya geser pada titik kinerja untuk arah X ($V_t = 33.355,97$ kN) dan arah Y ($V_t = 39.975,22$ kN) keduanya melampaui gaya geser desain ($V = 21.109,74$ kN). Kondisi ini mengindikasikan bahwa respons struktur pada titik kinerja telah memasuki fase inelastis, yang ditandai dengan terbentuknya sendi plastis pada berbagai elemen balok. Kapasitas struktur yang melampaui demand gempa desain menunjukkan bahwa secara global, struktur memiliki kinerja seismik yang memadai. Fenomena ini selaras dengan temuan Sephanie et al. [19] yang mengonfirmasi bahwa analisis pushover pada struktur eksisting di Indonesia mampu memvalidasi prinsip SCWB dan memberikan indikasi kinerja yang lebih akurat dibandingkan pendekatan berbasis gaya.

Nilai periode efektif (T_{eff}) pada titik kinerja mencapai 2,159 detik untuk arah X dan 1,894 detik untuk arah Y, lebih tinggi dari periode elastis awal ($T_x = 1,985$ detik; $T_y = 1,795$ detik). Pemanjangan periode efektif ini merupakan manifestasi dari degradasi kekakuan struktur akibat pelelehan elemen balok. Redaman efektif (β_{eff}) sebesar 6,6% (arah X) dan 5,6% (arah Y) merepresentasikan disipasi energi histeretik tambahan di samping redaman viskos inheren struktur.

Target displacement (D_t) pada titik kinerja diperoleh sebesar 0,454 m untuk arah X dan 0,405 m untuk arah Y. Kedua nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimum simpangan atap yang diizinkan, yaitu 2% dari tinggi total bangunan ($0,02 \times 49$ m = 0,98 m). Dengan demikian, kinerja struktur pada kedua arah masih memenuhi kriteria yang disyaratkan. Evaluasi level kinerja berdasarkan parameter drift ratio ATC-40 [16] disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Level Kinerja Struktur Berdasarkan Parameter Drift Ratio

Parameter	Arah X	Arah Y	Batasan IO	Batasan DC
Maximum Total Drift	0,00927	0,0083	$\leq 0,01$	0,01 - 0,02
Maximum Inelastic Drift	0,00926	0,0082	$\leq 0,005$	0,005 - 0,015

Berdasarkan batasan maximum total drift, struktur pada arah X (0,00927) dan arah Y (0,0083) termasuk dalam kategori Immediate Occupancy (IO). Level kinerja ini mengindikasikan bahwa struktur diperkirakan tidak mengalami kerusakan struktural yang berarti saat menghadapi gempa rencana. Bangunan tetap dapat berfungsi dan tidak memerlukan perbaikan struktural yang signifikan pasca gempa.

Namun demikian, evaluasi berdasarkan maximum inelastic drift menunjukkan gambaran yang berbeda. Nilai inelastic drift pada arah X sebesar 0,00926 dan arah Y sebesar 0,0082 melampaui batas atas Immediate Occupancy (0,005) dan masuk ke dalam rentang Damage Control (DC) (0,005-0,015). Level Damage Control mengindikasikan bahwa struktur mungkin mengalami kerusakan sedang, namun masih dalam batas yang dapat dikendalikan dan diperbaiki, dengan risiko korban jiwa yang sangat kecil.

Perbedaan klasifikasi antara total drift dan inelastic drift ini mencerminkan karakteristik penting dari respons inelastis struktur. Total drift yang masih dalam rentang IO menunjukkan bahwa deformasi keseluruhan struktur

relatif terkendali. Namun, komponen inelastic drift yang lebih besar mengindikasikan bahwa sebagian signifikan dari deformasi total merupakan deformasi plastis yang tidak dapat pulih (irrecoverable), berkaitan dengan pembentukan sendi plastis pada balok. Kondisi ini merupakan trade-off yang wajar dalam desain tahan gempa berbasis daktilitas: struktur diizinkan mengalami kerusakan terkendali pada balok untuk mendisipasi energi gempa, selama kolom tetap dalam kondisi elastis.

Mengacu pada protokol ATC-40 yang mensyaratkan pengambilan kategori terburuk, level kinerja struktur secara keseluruhan ditetapkan sebagai Damage Control (DC). Klasifikasi DC ini konsisten dengan ekspektasi kinerja untuk bangunan yang dirancang dengan SRPMK pada tanah lunak. Struktur telah memenuhi tujuan desain untuk mempertahankan keselamatan penghuni (life safety) sambil mengalami kerusakan struktural yang terbatas dan dapat diperbaiki.

3.7. Diskusi Komprehensif

Hasil penelitian ini memberikan beberapa wawasan penting terkait kinerja seismik struktur SRPMK murni pada tanah lunak di Jakarta:

Pertama, efektivitas kriteria SCWB elastis pada fase inelastis. Seluruh hubungan balok-kolom dengan rasio SCWB $\geq 1,2$ berhasil mempertahankan mekanisme strong column weak beam hingga tahap deformasi yang sangat besar (708,50 mm pada arah X). Tidak terbentuknya sendi plastis pada kolom hingga step terakhir analisis pushover mengonfirmasi bahwa kriteria SCWB yang diterapkan pada fase desain elastis masih efektif melindungi kolom pada fase inelastis. Temuan ini sejalan dengan studi yang dilakukan oleh Zaidir dan Wardi [20] yang menekankan pentingnya evaluasi kapasitas seismik dengan mempertimbangkan kegagalan pada hubungan balok-kolom.

Kedua, urgensi analisis non-linear untuk validasi desain. Meskipun kriteria SCWB elastis terpenuhi, analisis pushover mengungkapkan informasi kritis yang tidak terlihat dalam analisis linear: distribusi sendi plastis yang tidak merata, degradasi kekakuan, pemanjangan periode efektif, dan komponen inelastic drift yang signifikan. Tanpa analisis non-linear, insinyur struktur tidak dapat memverifikasi apakah mekanisme keruntuhan yang diinginkan benar-benar tercapai dalam kondisi gempa kuat. Shakeri et al. [21] dalam studi tentang respons struktur moment frame terhadap gempa berulang menekankan bahwa degradasi siklik elemen struktural merupakan parameter kunci dalam evaluasi kinerja seismik yang sering terabaikan dalam analisis linear.

Ketiga, sensitivitas level kinerja terhadap parameter evaluasi. Klasifikasi level kinerja yang berbeda antara total drift (IO) dan inelastic drift (DC) menunjukkan bahwa pemilihan parameter evaluasi dapat memengaruhi kesimpulan akhir tentang keamanan struktur. Untuk struktur SRPMK pada tanah lunak, parameter inelastic drift memberikan gambaran yang lebih realistis tentang kerusakan aktual yang mungkin terjadi, karena memperhitungkan komponen deformasi plastis yang terkait langsung dengan pembentukan sendi plastis.

Keempat, implikasi untuk praktik desain di Indonesia. Peningkatan signifikan nilai percepatan spektral desain pada SNI 1726:2019 untuk wilayah Jakarta, ditambah dengan karakteristik tanah lunak yang memperkuat respons pada periode panjang, menuntut pendekatan desain yang lebih komprehensif. Penggunaan analisis pushover sebagai alat verifikasi desain—tidak hanya untuk evaluasi bangunan eksisting tetapi juga untuk validasi desain bangunan baru—merupakan praktik yang perlu didorong dalam konteks kegempaan Indonesia yang tinggi.

Kelima, keterbatasan dan arah penelitian selanjutnya. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, analisis dibatasi pada prosedur static non-linear (pushover) yang tidak sepenuhnya menangkap efek dinamik seperti degradasi kekakuan siklik, efek durasi gempa panjang, dan respons terhadap gempa berulang (aftershock). Kedua, pemodelan tanah hanya diakomodasi melalui respons spektrum yang disesuaikan dengan kelas situs, tanpa memperhitungkan efek interaksi tanah-struktur (Soil-Structure Interaction) secara eksplisit. Mengingat bangunan berdiri di atas tanah lunak SE yang tebal, efek SSI berpotensi signifikan dan perlu diinvestigasi dalam studi lanjutan. Ketiga, penelitian ini tidak mengeksplorasi skenario gempa spesifik dari zona megathrust Selat Sunda, melainkan menggunakan spektrum desain generik berdasarkan SNI 1726:2019. Analisis dengan ground motion site-specific dari skenario megathrust Sunda akan memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang kinerja struktur pada kondisi gempa ekstrem.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan dapat ditarik dari penelitian ini: 1). Pemenuhan kriteria SCWB: Seluruh hubungan balok-kolom pada struktur gedung 11 lantai SRPMK di tanah lunak Jakarta telah memenuhi kriteria SCWB sesuai SNI 2847:2019 dengan rentang rasio 1,22 hingga 4,41. Kolom K1A menunjukkan rasio tertinggi 4,41, sedangkan kolom K3A (arah X, rasio 1,22) dan K3C (arah Y, rasio 1,22) memiliki margin yang paling kritis. Meskipun margin tipis pada kolom-kolom tersebut, hasil pushover analysis menunjukkan bahwa kriteria SCWB tetap efektif melindungi kolom dari pelelehan hingga tahap deformasi yang sangat besar. 2). Urutan pembentukan sendi plastis: Mekanisme keruntuhan yang terjadi adalah beam sidesway mechanism yang diinginkan, di mana sendi plastis pertama terbentuk pada balok lantai Ground Floor dan Mezzanine pada step ke-27 (arah X, displacement 109,28 mm) dan step ke-25 (arah Y, displacement 100,17 mm). Tidak terbentuknya sendi plastis pada kolom hingga step terakhir analisis (step 170 untuk arah X, step 133 untuk arah Y) mengonfirmasi keberhasilan prinsip SCWB dalam mengarahkan kerusakan ke elemen balok yang bersifat daktail. 3). Titik kinerja dan level kinerja: Titik kinerja metode ATC-40 menunjukkan bahwa struktur memiliki kapasitas yang melampaui demand gempa desain (Vt arah X = 33.355,97 kN; Vt arah Y = 39.975,22 kN vs V desain = 21.109,74 kN). Berdasarkan parameter maximum total drift, struktur termasuk dalam level kinerja Immediate Occupancy (IO). Namun, berdasarkan maximum inelastic drift yang lebih konservatif, level kinerja struktur adalah Damage Control (DC). Klasifikasi DC ini dianggap sebagai representasi yang lebih realistis mengingat karakteristik tanah lunak dan besarnya komponen deformasi plastis yang terjadi. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa kriteria SCWB dengan rasio elastis 1,2 yang diterapkan pada gedung 11 lantai SRPMK di tanah lunak Jakarta mampu memberikan perlindungan yang memadai pada fase pasca leleh. Namun demikian, analisis pushover non-linear tetap direkomendasikan sebagai alat verifikasi desain untuk memastikan mekanisme keruntuhan yang diinginkan benar-benar tercapai, terutama untuk struktur pada tanah lunak dengan periode getar panjang yang rentan terhadap amplifikasi gempa. Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk mengeksplorasi efek interaksi tanah-struktur, analisis dinamik non-linear dengan ground motion site-specific, serta studi parametrik variasi rasio SCWB untuk mengidentifikasi batas aman yang optimal pada berbagai kondisi tanah dan ketinggian bangunan.

Referensi

1. Pusat Studi Gempa Nasional, *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Pemutakhiran*. Jakarta: Kementerian PUPR, 2017.
2. Badan Standarisasi Nasional, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726:2019)*. Jakarta: BSN, 2019.
3. M. Ridwan, P. R. Cummins, S. Widiyantoro, and M. Irsyam, "Site characterization using microtremor array and seismic hazard assessment for Jakarta, Indonesia," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 109, no. 6, pp. 2644–2657, Dec. 2019, doi: 10.1785/0120190041.
4. R. Misliniyati, A. Sahadewa, H. Hendriyawan, and M. Irsyam, "Parametric study of one-dimensional seismic site response analyses based on local soil condition of Jakarta," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 51, no. 3, pp. 392–410, 2019, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.3.7.
5. Badan Standarisasi Nasional, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 2847:2019)*. Jakarta: BSN, 2019.
6. B. Philibosian et al., "On the potential for megathrust earthquakes and tsunamis off the southern coast of West Java and southeast Sumatra, Indonesia," *Natural Hazards*, vol. 116, pp. 695–723, 2023, doi: 10.1007/s11069-022-05696-y.
7. Badan Standarisasi Nasional, *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 1727:2020)*. Jakarta: BSN, 2020.
8. A. K. Mapari and Y. M. Ghugal, "Seismic performance of multi-storey RC SMRF and OMRF buildings," *Journal of Structural Engineering*, vol. 44, no. 6, pp. 663–672, 2024.
9. S. S. Surya and R. Sajeeb, "A review on the plastic hinge characteristics of beam-column joints in RC moment resisting frames," in *Proc. International Web Conference in Civil Engineering for a Sustainable Planet*, 2021, pp. 1–8.
10. A. M. H. Fares, "Nonlinear behavior of fiber reinforced concrete beam-column connections under seismic loading," Ph.D. dissertation, Dept. Civil Eng., 2025.
11. F. Abdillah, "Analisis kinerja bangunan menggunakan metode analisis pushover terhadap struktur bangunan bertingkat banyak sesuai standar SNI-03-1726-2019 dan ATC-40 (Studi Kasus: Teaching Industry Learning Center)," Tugas Akhir, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2024.
12. M. Firoj, A. Bahuguna, A. Kanth, and R. Agrahari, "Effect of nonlinear soil-structure interaction and lateral stiffness on seismic performance of mid-rise RC building," *Journal of Building Engineering*, vol. 59, p. 105096, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.105096.
13. S. S. Golafshani and A. Akhtarpoor, "A study on the near and far-field earthquake response of a low and mid-rise building resting on soft soil considering soil-structure interaction (SSI)," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 24, no. 4, pp. 919–935, Jun. 2023.
14. M. A. Prasetya, I. Wirakusum, and G. Sarya, "Kinerja struktur gedung perkuliahan 10 lantai berdasarkan analisis nonlinier pushover dan ATC-40 (Studi Kasus: Graha Wiyata UNTAG Surabaya)," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 19, pp. 35–45, 2022.
15. M. Zameeruddin, R. B. Somwanshi, and K. K. Sangle, "Performance-based seismic evaluation of RCMRFs," *The IUP Journal of Structural Engineering*, vol. IX, no. 3, pp. 34–43, Jul. 2016.
16. Applied Technology Council, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40)*. Redwood City, CA: ATC, 1996.
17. M. Zihni, R. Suwondo, and M. Suangga, "Pushover analysis of multi-storey concrete structures," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1169, p. 012005, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1169/1/012005.

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.9413>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

18. N. Aulia, "Evaluasi kinerja struktur gedung Bank NTB Syariah Mataram dengan pushover analysis," *Jurnal Teknik Sipil*, 2025.
19. D. Sephanie, R. Anggraini, and D. Setyowulan, "Structural behavior and performance level of reinforced concrete under the cyclic loads," *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA (JPPIPA)*, vol. 11, no. 3, pp. 1–12, Mar. 2025, doi: 10.29303/jppipa.v11i3.10447.
20. Zaidir and S. Wardi, "Pushover analysis of RC frames with substandard beam-column joints," *International Journal of GEOMATE*, vol. 24, no. 106, pp. 85–92, Jun. 2023, doi: 10.21660/2023.106.s8611.
21. K. Shakeri, V. Akrami, H. R. Shokrgozar, and A. Arden, "Comparing responses of special and intermediate moment frames under repeated earthquakes," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, vol. 174, no. 1, pp. 1–14, Jan. 2021, doi: 10.1680/jstbu.20.00051.