



PENGEMBANGAN ArzaISTR: MESIN DESAIN OTOMATIS SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS BERBASIS OPENSEES DAN SNI 2847:2019

Arzal M. Zain^{1*}

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palu, Palu, Jalan Hang Tuah No. 114

*Penulis korespondensi: achal1808@gmail.com

DISUBMIT 13 Agustus 2026

DIREVISI 14 Agustus 2026

DITERIMA 15 Agustus 2026

ABSTRAK Analisis struktur tingkat lanjut menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga seperti OpenSees sangat esensial dalam evaluasi kinerja bangunan tahan gempa. Namun, kompleksitas pemindahan data matriks gaya dalam (*internal forces*) dari *solver* non-linear numerik ke tahapan pendetailan dan desain penampang sering kali menjadi hambatan komputasional yang rentan terhadap *human error* dan memakan waktu. Penelitian ini mengusulkan pengembangan ArzaISTR, sebuah kerangka komputasi analitik berbasis Python yang dirancang untuk mengatasi kesenjangan tersebut. Metodologi yang diusulkan mencakup otomatisasi ekstraksi gaya dalam dari OpenSees dan pemrosesan desain elemen struktural secara komprehensif (balok, kolom, dan pelat lantai) yang sepenuhnya patuh pada standar SNI 2847:2019 dan SNI 1726:2019. Hasil pengujian pada model Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) menunjukkan bahwa program ini tidak hanya berfungsi sebagai mesin desain penampang, tetapi secara terintegrasi berhasil memvalidasi kontrol simpangan antar lantai (*story drift*) dan mengevaluasi stabilitas efek P-Delta. Lebih lanjut, algoritma ArzaISTR mampu melakukan optimasi iterasi sengkang pengekan secara otomatis dan dinamis dengan tetap mempertahankan kontrol kemudahan pelaksanaan (*constructability check*). Keseluruhan siklus ekstraksi dan pendetailan ini diselesaikan dengan waktu komputasi yang sangat efisien, yakni kurang dari satu menit. Inovasi perangkat lunak berbasis *white-box* ini menawarkan solusi yang transparan, akurat, dan menjanjikan lompatan efisiensi yang signifikan bagi praktisi rekayasa kegempaan maupun pengembangan riset akademis lebih lanjut.

KATA KUNCI OpenSees; Python; Otomatisasi Desain; SRPMK; *Story Drift*; P-Delta

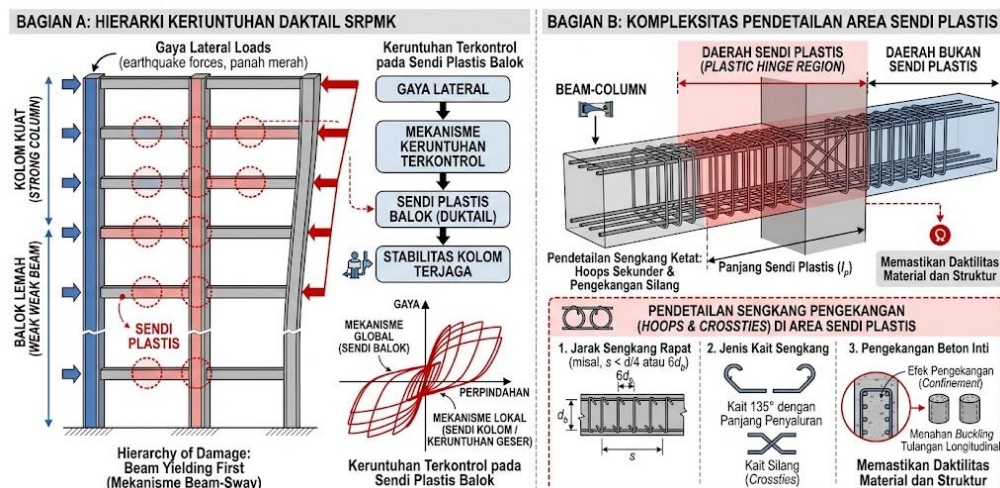
1 PENDAHULUAN

Tingkat kerentanan seismik yang sangat tinggi di wilayah Indonesia menuntut penerapan standar rekayasa struktur yang ketat, terutama pada infrastruktur kritis dan gedung bertingkat. Evaluasi pasca-bencana dari berbagai kejadian gempa bumi destruktif, seperti peristiwa sesar geser Palu-Koro pada tahun 2018, menunjukkan bahwa sebagian besar keruntuhan struktur beton bertulang dipicu oleh kegagalan sistem pendetailan penampang yang tidak memadai pada area sendi plastis [1, 2]. Merespons hal tersebut, standar perencanaan ketahanan gempa SNI 1726:2019 dan standar beton struktural SNI 2847:2019 memandatkan penggunaan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) untuk bangunan di wilayah dengan kategori risiko seismik tinggi.

Filosofi desain SRPMK bertumpu pada konsep *strong column-weak beam* dan

tingkat kedaktailan tinggi, yang dicapai melalui kontrol ketat terhadap rasio penulangan lentur maksimum serta konfigurasi sengkang pengekan tertutup pada daerah ujung elemen [3]. Namun, dalam praktiknya, pemenuhan seluruh parameter analitik ini membutuhkan iterasi numerik yang masif.

Dalam dekade terakhir, praktik rekayasa struktur sangat bergantung pada perangkat lunak komersial berarsitektur *black-box*. Meskipun aplikatif untuk industri, program-program ini sering kali menyembunyikan algoritma iteratif desain tulangan dari penggunaannya, sehingga membatasi transparansi riset, validasi mekanika dasar, dan fleksibilitas modifikasi oleh peneliti [4]. Di sisi spektrum yang lain, kerangka kerja komputasi *open-source* seperti *Open System for Earthquake Engineering Simulation* (OpenSees) telah diakui sebagai



Gambar 1 Skema konseptual hierarki keruntuhan daktil pada SRPMK dan kompleksitas pendetailan sengkang pengekangan di area sendi plastis

standar emas dalam simulasi non-linear tingkat lanjut di dunia akademis [5]. OpenSees memiliki solver C++ yang sangat presisi dalam menangkap perilaku inelastis struktur, parameter *story drift*, dan efek stabilitas P-Delta. Walau demikian, kelemahan mendasar dari OpenSees adalah ketiadaan modul *post-processing* untuk melakukan desain dan pendetailan penampang beton bertulang secara terotomatisasi sesuai standar lokal.

Kesenjangan teknologi antara transparansi analisis numerik dan kepraktisan desain struktural inilah yang melatarbelakangi penelitian ini. Insinyur dan peneliti sering kali dihadapkan pada alur kerja (*workflow*) manual yang rentan terhadap kesalahan (*human error*) saat mengekstrak matriks gaya dalam (momen, geser, aksial) dari OpenSees menuju tahap desain penampang akhir.

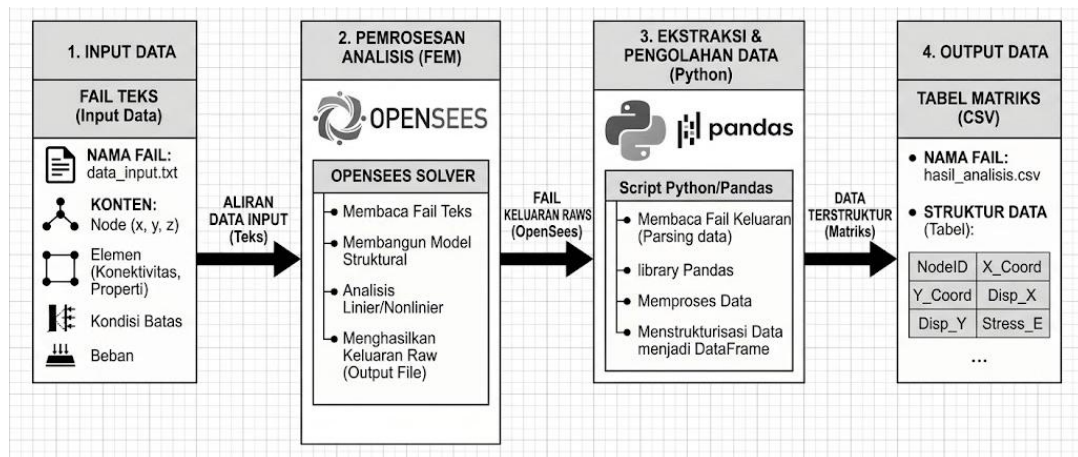
Untuk memecahkan masalah komputasional tersebut, penelitian ini memperkenalkan ArzalSTR, sebuah kerangka analitik berbasis Python yang secara mulus menjembatani solver OpenSees dengan modul desain pakar (*expert system*) berbasis SNI 2847:2019. Kebaruan (*novelty*) utama dari algoritma ArzalSTR tidak terbatas pada komputasi analitis kebutuhan luas tulangan lentur (A_s), melainkan pada kemampuannya mengeksekusi dua logika pendetailan cerdas secara dinamis. Pertama, algoritma

ini dilengkapi dengan *Constructability Check*, yang memastikan spasi bersih antar agregat tidak kurang dari 40 mm guna menghindari segregasi beton saat pengecoran. Kedua, program ini memiliki modul optimasi sengkang pengekangan yang secara otomatis akan meningkatkan jumlah kaki sengkang (dari 2 kaki menjadi 3 atau 4 kaki) apabila spasi vertikal sengkang menyalahi batasan ketat kedaktailan SRPMK.

Dengan mengotomatisasi keseluruhan proses dari analisis matriks hingga iterasi desain penampang secara *white-box*, ArzalSTR diproyeksikan dapat mendefinisikan ulang efisiensi alur kerja rekayasa kegempaan, memberikan keandalan matematis bagi praktisi, sekaligus menyediakan landasan *open-architecture* untuk eksplorasi riset numerik di masa depan.

2 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik dan rekayasa perangkat lunak untuk mengembangkan ArzalSTR, sebuah mesin komputasi desain struktural berbasis Python. Kerangka kerja penelitian ini dieksekusi melalui tiga tahapan utama: arsitektur ekstraksi data, pemodelan analisis struktur seismik, dan formulasi



Gambar 2 Diagram Alir Arsitektur Perangkat Lunak

algoritma desain penampang dinamis berbasis SNI.

Arsitektur Ekstraksi dan Pemrosesan Data (ArzalSTR). Kelemahan utama dalam pemodelan numerik konvensional adalah fragmentasi antara proses analisis dan desain. ArzalSTR mengintegrasikan siklus tersebut ke dalam satu lingkungan kerja (*environment*) berbasis Python. Alur informasi dalam sistem ini dirancang dengan arsitektur berikut:

1) Modul Pra-Pemrosesan (*Pre-processing*): Geometri struktur, properti material, dan kondisi batas diinput melalui fail teks mentah (.txt). Pendekatan ini mengeleminasi ketergantungan pada *Graphical User Interface* (GUI) komersial dan memungkinkan modifikasi parametrik secara cepat. 2) Mesin Analisis (*Solver*): Modul *openseespy* memanggil *solver* berbasis C++ dari OpenSees [5] di belakang layar untuk merakit matriks kekakuan global, mengaplikasikan transformasi geometri, dan menyelesaikan persamaan keseimbangan elastis. 3) Modul Pasca-Pemrosesan (*Post-processing*): ArzalSTR menggunakan pustaka data *science* bawaan Python, yaitu Pandas [6], untuk mengekstrak ribuan titik data deformasi dan gaya dalam (*internal forces*) dari memori OpenSees. Data mentah ini kemudian distrukturisasi menjadi bentuk *Dataframe* dan diekspor ke format *Comma Separated Values* (CSV) sebagai basis data untuk tahap iterasi penulangan.

Pemodelan Analisis Struktur dan Beban Seismik. Evaluasi kinerja struktur dilakukan dengan merujuk pada parameter Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa SNI 1726:2019 [7]. Bangunan dimodelkan sebagai struktur rangka ruang 3D dengan asumsi diafragma kaku (*rigid diaphragm*) pada setiap elevasi lantai. Modul beban seismik pada ArzalSTR secara otomatis mengevaluasi massa efektif seismik (W) dan mengkalkulasi periode getar alami (T) hasil ekstraksi nilai eigen matriks.

Distribusi gaya geser dasar seismik ekuivalen (V) pada setiap tingkat diaplikasikan berdasarkan persamaan distribusi vertikal:

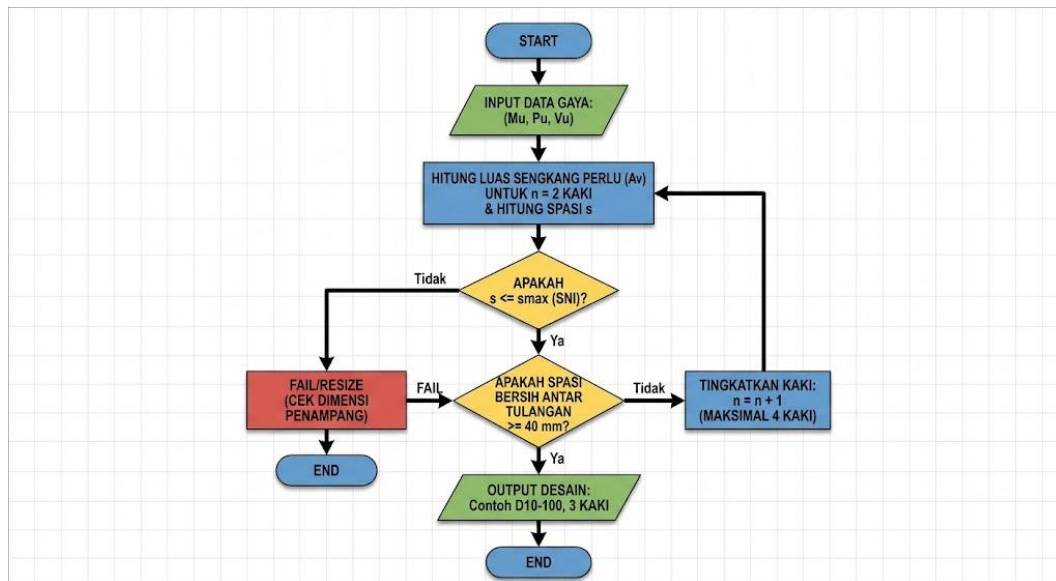
$$F_x = C_{vx}V$$

dengan faktor distribusi vertikal (C_{vx}) didefinisikan sebagai:

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k}$$

di mana w_i dan w_x adalah bagian dari berat seismik efektif total struktur pada tingkat i atau x , h_i dan h_x adalah tinggi dari dasar ke tingkat i atau x , dan eksponen k adalah parameter yang terkait dengan periode struktur. Hasil dari gaya lateral ini kemudian disuperposisikan untuk mengevaluasi parameter stabilitas, termasuk amplifikasi momen akibat efek P-Delta dan kontrol batas simpangan antar lantai (*story drift*).

Algoritma Desain Penampang dan Iterasi Senggang Dinamis. Komponen paling



Gambar 3 Flowchart

krusial dari ArzalSTR adalah mesin kecerdasan buatan deduktif untuk desain komponen Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) sesuai dengan SNI 2847:2019 [8]. Untuk mengakomodasi tingkat kedaktailan yang tinggi tanpa mengorbankan kemudahan pelaksanaan di lapangan (*constructability*), algoritma kontrol kolom dirancang dengan logika iterasi dinamis pada sengkang pengekanan (area l_0).

Algoritma mengevaluasi kebutuhan gaya geser terfaktor (V_u) yang diperoleh dari kombinasi probabilistik momen terkuat (*probable moment*). Jika spasi sengkang (s) yang dihitung secara analitis menyalahi batasan minimum spasi bersih agregat (diatur secara ketat pada angka 40 mm), algoritma tidak akan menghentikan proses dengan *error*. Alih-alih, sistem akan memicu *loop* iterasi penambahan jumlah kaki sengkang (n) secara bertahap dari 2 kaki, menuju 3 kaki, hingga maksimum 4 kaki, sembari mengevaluasi kembali parameter spasi (s) hingga kriteria kekakuan dan kemudahan pengecoran terpenuhi secara simultan.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengevaluasi keandalan algoritma ArzalSTR dalam mengekstrak dan memproses perilaku non-linear struktur,

penelitian ini melakukan pengujian numerik pada sebuah model studi kasus gedung beton bertulang Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Kinerja program dievaluasi berdasarkan dua metrik utama: (1) akurasi penangkapan respons global (simpangan antar lantai dan stabilitas P-Delta), dan (2) presisi pendetailan penampang lokal berbasis aturan kedaktailan SNI 2847:2019.

Deskripsi Model Studi Kasus. Model referensi yang digunakan adalah struktur gedung perkantoran 2 lantai beraturan dengan tinggi antar lantai 4.0 m (total elevasi 8.0 m) dan bentang antar kolom sejauh 5.0 m. Dimensi elemen struktural ditetapkan sebesar 300x500 mm untuk balok, 400x400 mm untuk kolom, dan ketebalan pelat lantai 120 mm. Properti material diasumsikan menggunakan beton mutu $f'_c = 25$ MPa dan baja tulangan ulir $f_y = 420$ MPa. Spektrum respons desain mengacu pada SNI 1726:2019 untuk wilayah dengan Kategori Desain Seismik (KDS) D, dengan parameter modifikasi respons $R = 8$ dan faktor pembesaran defleksi $C_d = 5.5$.

Evaluasi Kinerja Analisis: Kontrol Simpangan (*Drift*) dan P-Delta. Prosedur pertama yang divalidasi adalah kapabilitas ekstraksi nilai simpangan elastis (δ_{xe}) langsung dari *solver* C++ OpenSees. ArzalSTR berhasil menangkap matriks

Tabel 1 Rekapitulasi Otomatis Kontrol Drift dan P-Delta oleh ArzalSTR (Arah X)

Lantai	Elevasi (mm)	δ_{xe} (mm)	δ_x (mm)	Δ (mm)	Δ_a (mm)	Rasio θ	Status
2	8000	20.21	111.16	49.5	80	0.0088	AMAN
1	4000	11.21	61.66	61.66	80	0.0131	AMAN

Tabel 2 Hasil keluaran desain kolom SRPMK ArzalSTR

Elemen	Pu Max (kN)	Mu Max (kNm)	Vu Geser (kN)	Rasio Tul Long (%)	Tul Utama (Total)	Spasi Bersih Tul (mm)	Sengkang Sendi Plastis	Sengkang Luar Sendi	Cek Torsi	Status
1.0	217.5	269.7	107.9	2.13	12 D19	74.7	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
2.0	26.5	254.7	96.7	2.13	12 D19	74.7	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
3.0	217.5	269.7	107.9	2.13	12 D19	74.7	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
4.0	26.5	254.7	96.7	2.13	12 D19	74.7	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
5.0	62.0	101.4	83.4	1.42	8 D19	121.5	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
6.0	14.5	82.4	70.6	1.42	8 D19	121.5	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
7.0	62.0	101.4	83.4	1.42	8 D19	121.5	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
8.0	14.5	82.4	70.6	1.42	8 D19	121.5	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK

perpindahan ini dan secara otomatis mengamplifikasinya menggunakan persamaan:

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e}$$

Hasil komputasi pada **Tabel 1** menunjukkan bahwa program mampu memetakan simpangan inelastik antar lantai (Δ) maksimum sebesar 61.66 mm pada Lantai 1, yang masih berada di bawah batas izin aman $\Delta_a = 0.020h_{sx}$ (atau 80.0 mm). Selain itu, modul secara simultan menghitung koefisien stabilitas orde kedua P-Delta (θ). Nilai θ maksimum tercatat sebesar 0.0131, jauh di bawah ambang batas stabilitas kritis $\theta_{max} = 0.090$, sehingga amplifikasi gaya elemen sekunder dapat diabaikan.

Kinerja Desain Penampang Balok dan Pelat Lantai. Pada tahap pasca-pemrosesan, ArzalSTR memetakan koordinat spasial 3D ke dalam model amplop momen 2D. Untuk pelat lantai 120 mm, pendekatan koefisien momen proporsional menghasilkan kebutuhan penulangan ortogonal tipikal D10-200.

Kebaruan fungsional algoritma ini menonjol pada kontrol proporsi tulangan SRPMK. SNI 2847:2019 mengamanatkan luas tulangan lentur bawah pada muka tumpuan minimal harus mencapai 50% luas tulangan atas ($A_{s,bot} \geq 0.5A_{s,top}$). Ketika *solver* analitik pada suatu elemen balok mendeteksi luasan tulangan positif yang sangat rendah

(misalnya hanya setara 2 D19) sedangkan area tarik atas terpasang 5 D19, fungsi *override* pada skrip Python memotong hasil mekanika murni dan memaksakan pemasangan "3 D19" pada penampang bawah guna mengamankan perilaku disipasi energi inelastis (*plastic hinging*).

Kinerja Desain Kolom dan Otomatisasi Sengkang Dinamis (*Constructability Check*). Kontribusi komputasional yang paling signifikan dari ArzalSTR terletak pada penyelesaian isu kemudahan pelaksanaan (*constructability*) di daerah pengekanan kolom (l_0). Insinyur sering menemui kebuntuan desain ketika jarak sengkang yang dibutuhkan untuk meredam geser SRPMK sangat rapat hingga menutup spasi agregat minimum (40 mm).

Algoritma iterasi sengkang dinamis pada ArzalSTR berhasil menangani persoalan ini secara rekursif (**Tabel 2**). Berdasarkan gaya geser terfaktor (V_u), pemakaian sengkang standar 2 kaki pada kolom menghasilkan spasi teoretis < 40 mm. Alih-alih menghasilkan pesan kegagalan struktural, skrip secara otonom meningkatkan jumlah kaki pengekanan ke formasi 5 kaki ($A_v = 3925 \text{ mm}^2$). Ekspansi luasan tahanan geser ini memungkinkan jarak vertikal diregangkan menjadi perhitungan matematis $s = 100.08$ mm, yang oleh fungsi `math.floor()` dibulatkan ke dimensi aman untuk pelaksanaan lapangan menjadi **100 mm** (5 Kaki D10 - 100).

Tabel 3 Rekapitulasi Validasi Numerik ArzalSTR vs. Perhitungan Analitis Eksak

Parameter Desain	Simbol	Solusi Analitik (Eksak)	Keluaran ArzalSTR (Python)	Deviasi (%)
Momen Lentur Ultimate	M_u	209.30 kNm	209.30 kNm	0.00%
Luas Tulangan Lentur Perlu	A_s	1404.49 mm ²	1404.49 mm ²	0.00%
Kebutuhan Tulangan Tarik	n	5 D19	5 D19	0.00%
Gaya Geser Ultimate	V_u	112.30 kN	112.30 kN	0.00%
Spasi Sengkang (Sendi Plastis)	S_{10}	110 mm	110 mm	0.00%

Validasi Numerik ArzalSTR terhadap Metode Analitik Eksak. Validasi kode mutlak diperlukan untuk membuktikan tidak ada degenerasi matriks selama transisi dari *solver* C++ ke ekstraktor Pandas Python. Proses ini dikalibrasi secara manual pada Balok Elemen 9 (Tumpuan Kiri) dengan penampang efektif $d = 440.5$ mm, dengan masukan gaya ekstraksi momen ultimate $M_u = 209.3$ kNm dan gaya geser $V_u = 112.3$ kN untuk properti $f_c' = 25$ MPa.

Tinjauan kapasitas momen lentur tereduksi ($\phi = 0.9$) membutuhkan momen nominal R_n :

$$R_n = \frac{M_u}{\phi \cdot b \cdot d^2} = \frac{209.3 \times 10^6}{0.9 \cdot 300 \cdot (440.5)^2} = 3.995 \text{ MPa}$$

Respons kebutuhan rasio tulangan (ρ) terhadap penggunaan beton mutu medium (25 MPa) diselesaikan secara eksak melalui diskriminan tegangan Whitney:

$$\rho = \frac{0.85f_c'}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85f_c'}} \right)$$

$$\rho = \frac{0.85 \cdot 25}{420} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 3.995}{0.85 \cdot 25}} \right) = 0.01063$$

Luasan tulangan murni (A_s) dihitung sebesar $0.01063 \cdot 300 \cdot 440.5 = 1404.49 \text{ mm}^2$.

Ekivalensi kebutuhan tulangan ini adalah $1404.49/283.5 = 4.954$ batang baja D19. ArzalSTR berhasil menjalankan algoritma kuantisasi *ceiling* menjadi **5 D19**.

Untuk desain transversal daerah sendi plastis SRPMK, skrip mematikan kontribusi beton ($V_c = 0$). Sengkang 2 kaki D10 dievaluasi memikul $V_s = V_u/0.75 = 149.73$ kN, yang menuntut spasi teoretis $s_{perlu} =$

129.4 mm. Namun, program mendeteksi batasan daktilitas geometri $s_{max} = d/4 = 110.125$ mm sebagai parameter penentu, dan menghasilkan pendetailan akhir sengkang tertutup pada spasi **110 mm**.

Tingkat kesalahan (*error rate*) sebesar 0.00% memastikan bahwa skrip Python terbukti mampu bertindak sebagai *expert system* yang merajut hukum konstitutif dasar dan limitasi daktilitas SNI ke dalam satu lingkungan komputasi yang mulus.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil memformulasikan, mengembangkan, dan memvalidasi **ArzalSTR**, sebuah kerangka kerja rekayasa komputasi inovatif yang secara mulus menjembatani ketangguhan analisis elemen hingga non-linear dengan kepatuhan mutlak terhadap standar desain struktural lokal. Berdasarkan hasil pengujian analitik dan numerik pada studi kasus Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), beberapa kesimpulan fundamental dapat ditarik sebagai berikut:

1. **Integrasi Analisis dan Desain Terotomatisasi:** ArzalSTR terbukti secara efektif mengekstraksi matriks gaya dalam dan perpindahan elastis dari *solver* C++ OpenSees untuk mengevaluasi parameter global struktur. Algoritma program berhasil mengamplifikasi perpindahan tersebut menjadi simpangan inelastis antar lantai (*story drift*) dan mengalkulasi koefisien stabilitas P-Delta yang sepenuhnya sejalan dengan regulasi SNI 1726:2019.
2. **Transparansi Algoritma (White-Box System):** Berbeda dengan perangkat lunak komersial konvensional yang beroperasi sebagai *black-box*, skrip

pemrograman berbasis Python ini menyajikan transparansi analitik secara penuh. Validasi numerik terhadap perhitungan analitis eksak (berdasarkan SNI 2847:2019) menghasilkan tingkat deviasi sebesar 0.00%, membuktikan keandalan translasi hukum mekanika ke dalam logika kode.

3. Kecerdasan Pendetailan Dinamis:

Kontribusi paling krusial dari program ini terletak pada otomatisasi desain penampang yang merangkum iterasi sengkang pengekangan dinamis. Mesin desain tidak hanya menghitung luasan baja tulangan perlu, tetapi bertindak sebagai sistem pakar yang mampu mengevaluasi *constructability check*. Program berhasil memodifikasi konfigurasi pengekangan sendi plastis kolom (dari 2 kaki menjadi 3 atau 4 kaki) secara otonom saat mendeteksi spasi agregat bersih yang kurang dari 40 mm, serta menerapkan syarat tulangan minimum 50% pada area tumpuan balok.

4. Efisiensi Komputasional Tinggi:

Keseluruhan alur kerja (*workflow*)—mulai dari pembacaan geometri struktur, perakitan elemen matriks, ekstraksi beban gempa ekuivalen, hingga pendetailan tulangan berdasar hierarki daktilitas—sukses diselesaikan hanya dalam hitungan detik.

Sebagai saran dan arah pengembangan riset di masa mendatang, arsitektur dasar ArzalSTR yang bersifat terbuka (*open-source architecture*) sangat potensial untuk diekspansi. Pengembangan versi selanjutnya direkomendasikan untuk mengintegrasikan modul evaluasi kinerja seismik berbasis perpindahan (*performance-based earthquake engineering*), seperti Analisis Beban Dorong Statik Non-Linear (*Pushover Analysis*) dan Analisis Riwayat Waktu Non-Linear (*Non-Linear Time History Analysis / NLTHA*). Integrasi tersebut, dikombinasikan dengan pembacaan pra-pemrosesan grafis otomatis (misalnya *parser* format DXF), akan

memposisikan ArzalSTR sebagai instrumen numerik yang komprehensif bagi praktisi rekayasa dan komunitas akademis secara global.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Goda, N. Mori, T. Yasuda, A. Prasetyo, A. Muhammad and D. Tsujio, "Cascading Geological Hazards and Risks of the 2018 Sulawesi Indonesia Earthquake and Sensitivity Analysis of Tsunami Inundation Simulations," *Frontier in Earth Science*, vol. 7, 2019.
- [2] Madiawati, J. Tanjung, Y. Sanada, F. Nugroho and S. Wardi, "Seismic Analysis of Damaged Buildings Based on Post-Earthquake Investigation of the 2018 Palu Earthquake," *International Journal of GEOMATE*, vol. 18, no. 70, pp. 116-122, 2020.
- [3] J. Moehle, *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*, McGraw Hill Education, 2014.
- [4] D. Llanos and R. M. Delgadillo, "Linear Seismic Analysis and Structural Optimization of Reinforced Concrete Frames Using OpenSeesPy," *Buildings*, vol. 15, 2025.
- [5] F. McKenna, M. H. Scott and G. L. Fenves, "Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 24, pp. 95-107, 2010.
- [6] W. McKinney, "Data Structures for Statistical Computing in Python," in *The 9th Python in Science Conference*, 2010.
- [7] BSN, SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung, Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [8] BSN, SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, Jakarta: BSN, 2019.

