

STUDI KAPASITAS DAN DAKTILITAS KOLOM BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT BAJA SIKU DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

¹⁾Lisyana Junelin Restu, ^{2*)} Ruddy Kurniawan, ³⁾ Rendy Thamrin, ⁴⁾ Eka Juliafad

^{1,2,3)} Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

⁴⁾ Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

¹⁾ 2320922038_lisyana@student.unand.ac.id; lisyanajunelinrestu@gmail.com,

²⁾ ruddykurniawan@eng.unand.ac.id, ³⁾ rendythamrin@eng.unand.ac.id,

⁴⁾ ekajuliafad@ft.unp.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel :

Diterima : 3 Juli 2026

Disetujui : 22 Juli 2026

Kata Kunci :

Kolom Beton Bertulang, Baja Siku, Metode Elemen Hingga, Daktilitas, Tekan Aksial

ABSTRAK

Kolom merupakan elemen struktur yang berfungsi memikul beban tekan vertikal dari balok, pelat, dan elemen struktur di atasnya. Kegagalan kolom dapat menyebabkan keruntuhan bangunan secara progresif sehingga perkuatan diperlukan apabila terjadi penurunan kapasitas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh baja siku sebagai perkuatan eksternal terhadap perilaku kolom beton bertulang. Analisis dilakukan secara numerik menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak ATENA 3D. Model kolom berukuran 150×150 mm dengan tulangan utama 4D12 mm, tulangan sengkang Ø6-150 mm, dan tebal selimut beton 20 mm. Perkuatan dipasang pada keempat sudut kolom menggunakan baja siku berukuran 20×20×3 mm, 30×30×3 mm, dan 40×40×3 mm yang diikat dengan baja *strap* berukuran 19×0,8 mm pada jarak 150 mm. Model numerik divalidasi terhadap hasil eksperimen penelitian sebelumnya dan menunjukkan kesesuaian yang baik, dengan perbedaan kapasitas beban maksimum sebesar 3,93% pada kolom kontrol dan 4,77% pada kolom yang diperkuat. Hasil analisis menunjukkan bahwa perkuatan baja siku meningkatkan kapasitas tekan aksial, kapasitas deformasi, kekakuan, dan daktilitas kolom beton bertulang. Kapasitas tekan meningkat sebesar 31,69%, 39,03%, dan 48,34% pada model KBS20, KBS30, dan KBS40, sedangkan kekakuan dan daktilitas meningkat hingga masing-masing 24% dan 58% dibandingkan kolom kontrol. Dengan demikian, baja siku sebagai perkuatan eksternal terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja struktural kolom beton bertulang terhadap beban aksial tekan. Meskipun demikian, karena penelitian ini merupakan studi numerik parametrik, efektivitas penerapan baja siku berukuran 20×20×3 mm dan 40×40×3 mm masih memerlukan verifikasi melalui pengujian eksperimental.

ARTICLE INFO

Article History :

Received : Jul 3, 2026

Accepted : Jul 22, 2026

Keywords:

RC Column, Angle Steel, Finite Element Method, Ductility, Axial Compression

ABSTRACT

Columns are critical structural elements designed to carry vertical compressive loads transferred from beams, slabs, and other structural components. RC columns failure may trigger progressive structural collapse, therefore strengthening is required when their load-carrying capacity decreases. This study investigates the effect of angle steel as external reinforcement on the structural behavior of reinforced concrete columns. A numerical analysis was conducted using the finite element method implemented in ATENA 3D. The column model had a

cross-sectional dimension of 150×150 mm, reinforced with four D12 mm longitudinal bars, Ø6-150 mm transverse reinforcement, and a 20 mm concrete cover. External strengthening was applied by installing angle steel of 20×20×3 mm, 30×30×3 mm, and 40×40×3 mm at the four corners of the column, which were confined using steel straps measuring 19×0.8 mm at 150 mm spacing. The numerical model was validated against previously published experimental results and demonstrated good agreement, with differences in the maximum load capacity of 3.93% for the control column and 4.77% for the strengthened column. The analysis results indicate that angle steel reinforcement improves the axial compressive capacity, deformation capacity, stiffness, and ductility of reinforced concrete columns. The axial compressive capacity increased by 31.69%, 39.03%, and 48.34% for the KBS20, KBS30, and KBS40 models, respectively, while stiffness and ductility increased by up to 24% and 58%, respectively, compared with the control column. These findings demonstrate that angle steel is an effective external strengthening system for enhancing the structural performance of reinforced concrete columns subjected to axial compression. However, because this research is a parametric numerical study, the effectiveness of applying angle steel measuring 20×20×3 mm and 40×40×3 mm still requires verification through experimental testing.

1. PENDAHULUAN

Kolom merupakan elemen struktur yang memikul beban tekan vertikal dari balok, pelat dan beban lain di atasnya. Kegagalan kolom akibat gaya normal tekan bersifat getas sehingga dapat menyebabkan keruntuhan bangunan secara progresif. Oleh karena itu, kolom perlu diberikan kekuatan cadangan yang lebih tinggi daripada balok, pelat dan elemen struktural horizontal lainnya (Khoeri, 2020; Khedmatgozar Dolati, Matamoros and Ghannoum, 2024; Mousa and Zaidee, 2026).

Perkuatan kolom beton bertulang eksisting seringkali dibutuhkan karena berbagai kondisi, seperti peningkatan beban hidup akibat perubahan fungsi bangunan atau perubahan penggunaan fasilitas, kerusakan struktural akibat gempa, kebakaran, korosi baja tulangan, perbedaan kualitas material di spesifikasi dengan di lapangan, penurunan kapasitas dalam fungsi waktu, dan lainnya (Yuhazri, Zulfikar and Ginting, 2020; Juliafad, 2021; Aminulaili *et al.*, 2023).

Beberapa studi tentang perkuatan kolom telah dilakukan sebelumnya, seperti perkuatan kolom dengan *reinforced concrete jacketing*, *steel jacketing*, *fiber reinforced polymer (FRP) wrapping* dan *textile reinforced concrete (TRC)*

(Zaiter and Lau, 2021; Gonilha and Martins, 2022; Xu *et al.*, 2025; Avcil *et al.*, 2026). Masing – masing metode perkuatan memiliki keunggulan dan keterbatasan, seperti *reinforced concrete jacketing* yang memiliki keunggulan mampu meningkatkan kapasitas tekan dan kekakuan kolom secara signifikan, namun karena dimensi penampang yang semakin besar menambah berat sendiri struktur. Metode perkuatan dengan FRP dan TRC menawarkan keunggulan berupa berat yang lebih ringan, ketahanan terhadap korosi, serta kemudahan pemasangan, tetapi keterbatasannya adalah biaya material yang relatif tinggi. Oleh karena itu, para peneliti masih terus mencari dan mengembangkan metode perkuatan yang tidak hanya efektif dalam memberikan efek pengekanan, tetapi juga memperhatikan kemudahan konstruksi serta efisiensi penggunaan material.

Pengujian eksperimental dan numerik dari Ngo *et al.*, 2020 menunjukkan perkuatan kolom jaket *carbon textile reinforced concrete (CTRC)* cukup efektif meningkatkan daktilitas dan kekuatan kolom. Kekuatan benda uji yang diperkuat dengan satu dan dua lapis CTRC masing-masing meningkat sebesar 31,82% dan 44,96% dibandingkan dengan benda uji normal.

Kegagalan seluruh tulangan kolom disertai dengan robeknya tulangan tekstil pada sudut-sudut kolom. Kegagalan benda uji disebabkan oleh besarnya tegangan tekan transversal yang terkonsentrasi pada beton pada sudut-sudut benda uji. Model elemen hingga kolom dengan perkuatan CTCRC dari program bantu ATENA cukup valid ketika dibandingkan dengan hasil eksperimen.

Studi eksperimental Zaiter dan Lau (2021) pada kolom dengan perkuatan jaket beton bertulang (*RC Jackets*) menunjukkan jaket dengan tinggi $\frac{1}{4}h$ dan $\frac{1}{2}h$ masing-masing dapat meningkatkan kapasitas lateral kolom sebesar 35% dan 97%. Namun, peningkatan kekakuan akibat bertambahnya tinggi jaket dari $\frac{1}{4}h$ menjadi $\frac{1}{2}h$ menyebabkan tingkat kerusakan yang lebih tinggi serta meningkatkan sudut retak geser diagonal. Efek kolom pendek juga menjadi meningkat sehingga daktilitas menurun akibat keruntuhan geser lebih dominan terjadi pada benda uji dengan jaket $\frac{1}{2}h$.

Penggunaan jaket baja pada kolom beton bertulang juga telah diteliti melalui pendekatan numerik oleh Abd-el-nabi *et al.*, (2024), menggunakan perangkat lunak ABAQUS menunjukkan bahwa jaket baja yang terdiri dari dua profil C dapat meningkatkan kapasitas tekan kolom sebesar 21,46%. Sementara itu, konfigurasi jaket baja yang membentuk penampang tertutup (*full box*) mampu meningkatkan kapasitas tekan hingga 75,92%. Selain itu, penambahan jumlah *batten plate* terbukti memberikan efek pengekangan yang lebih besar, sehingga kapasitas beban dan daktilitas kolom pun meningkat. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas sistem perkuatan baja tidak hanya ditentukan oleh jenis material, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh konfigurasi perkuatan yang digunakan.

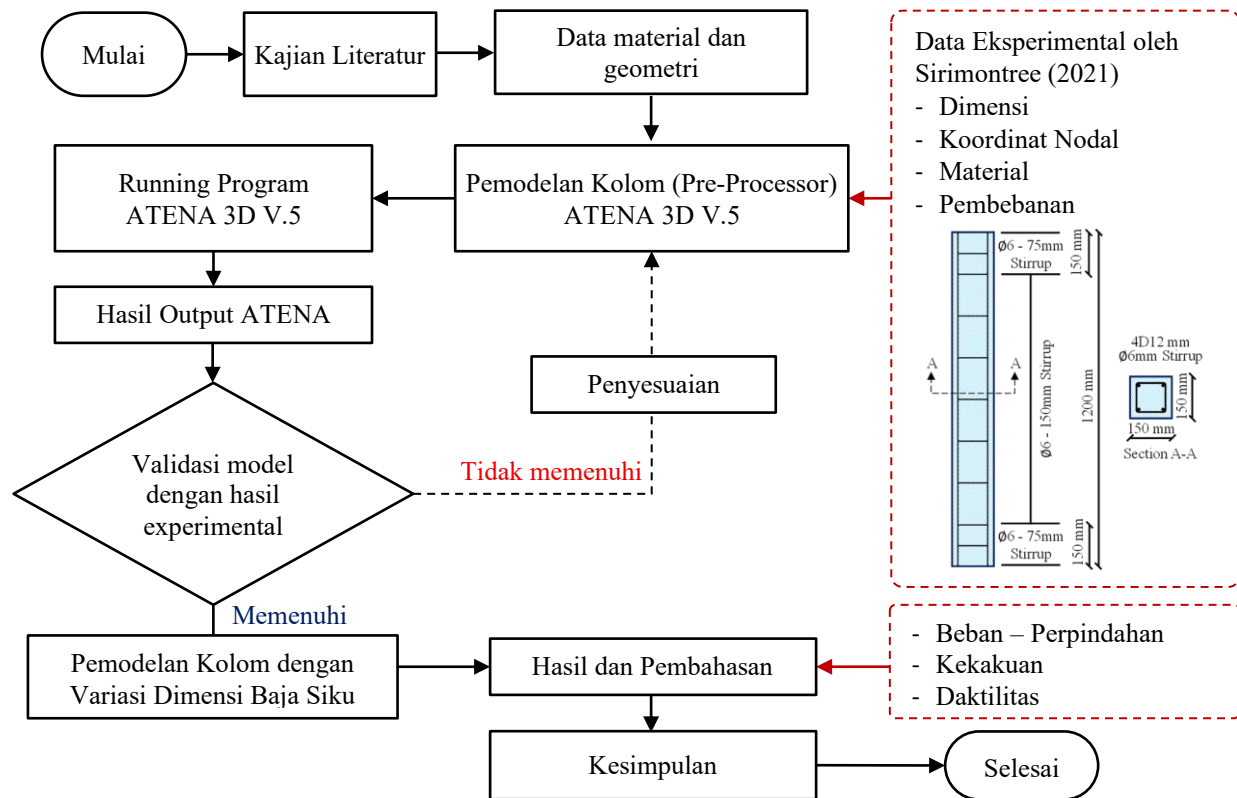
Sirimontree *et.al* (2021) melakukan pengujian eksperimental pada kolom beton bertulang dengan perkuatan baja siku. Benda uji terdiri dari 3 jenis, yaitu kolom beton bertulang

tanpa perkuatan, kolom beton bertulang yang diperkuat baja siku yang dikekang dengan baja *strap*, dan kolom beton bertulangan yang diperkuat baja siku dan dilapisi *ferro-cement* di sekitar kolom. Hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan kapasitas dan daktilitas yang sangat signifikan dari kolom beton bertulang yang diperkuat dibandingkan dengan yang tanpa perkuatan, yaitu masing-masing sebesar 40% dan 144% untuk kolom dengan baja siku yang dikekang baja *strap*, serta 95% dan 50% untuk kolom yang diperkuat dengan baja siku dan *ferro-cement*.

Penelitian terdahulu telah mengkaji penggunaan baja siku sebagai perkuatan eksternal pada kolom beton bertulang. Namun, penelitian tersebut hanya mengevaluasi konfigurasi perkuatan tertentu melalui pengujian eksperimental dan belum menganalisis pengaruh variasi dimensi baja siku terhadap kapasitas tekan, kekakuan, dan daktilitas kolom beton bertulang menggunakan analisis elemen hingga nonlinier. Oleh karena itu, penelitian ini dikembangkan untuk mengevaluasi pengaruh variasi dimensi baja siku sebagai perkuatan eksternal terhadap kapasitas tekan, kekakuan, dan daktilitas kolom beton bertulang melalui metode elemen hingga nonlinier. Metode Elemen hingga nonlinier telah terbukti dapat mengatasi masalah rekayasa dengan geometri kompleks, beban, dan sifat-sifat bahan yang rumit yang tidak dapat diselesaikan dengan metode analitik (Juliafad *et al.*, 2019; Kosasih, 2012).

2. METODE

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak analisis elemen hingga ATENA 3D v.5 untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan baja siku sebagai perkuatan eksternal pada kolom beton bertulang. Tujuan penelitian ini untuk menganalisis perilaku struktur yang meliputi kapasitas tekan aksial, kekakuan, dan daktilitas. Tahapan penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Alur Penelitian

2.1. Model dan Spesifikasi Benda Uji

Pemodelan numerik mengacu pada data pengujian eksperimental yang dilakukan oleh Sirimontree *et al.* (2021) sebagai dasar validasi model. Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah 2 spesimen dari 3 spesimen pada penelitian Sirimontree *et al.* (2021), yaitu spesimen kolom beton bertulang tanpa perkuatan (CC) dan spesimen kolom beton bertulang dengan perkuatan baja siku (CSA). Gambar 2 menunjukkan konfigurasi perkuatan, dan Tabel 1 menyajikan hasil pengujian eksperimental oleh Sirimontree *et al.* (2021) yang digunakan sebagai acuan validasi model numerik.

Ukuran kolom 150 x 150 mm dengan tulangan utama 4D12mm dan tulangan sengkang Ø6mm dengan jarak 150 mm, tebal selimut beton adalah 20 mm. Lalu pada kolom beton

bertulang yang diperkuat pada setiap sudutnya diberi baja siku dengan ukuran 30 x 30 x 3 mm dan kemudian diikat dengan baja *strap* berukuran 19 x 0.8 mm yang mempunyai jarak 150 mm. Celah antara baja siku dan elemen beton pada kolom diisi menggunakan material plester (Sirimontree *et al.*, 2021).



Gambar 2. Benda Uji Eksperimental dengan Perkuatan Baja Siku (Sirimontree *et al.*, 2021)

Tabel 1. Hasil penelitian eksperimen

Spesimen	Ukuran Baja Siku (mm)	Ukuran <i>strap</i> (mm)	Jarak <i>Strap</i> (mm)	Beban Maksimum (kN)	Deformasi (mm)
CC-1	30x30x3	19x0.8	150	600	2.22
CC-2				630	2.46
CSA-1				825	6.55
CSA-2				900	4.89

Sumber : (Sirimontree *et al.*, 2021)

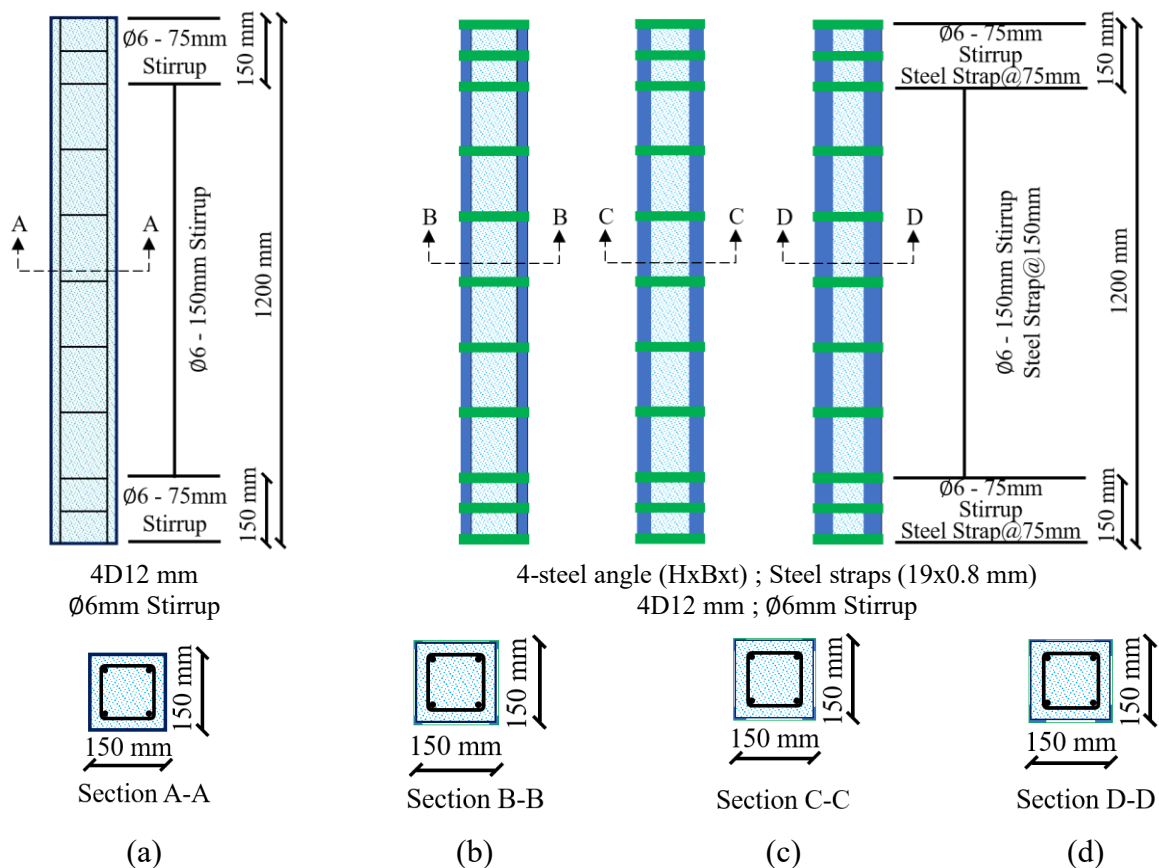
Pada penelitian Sirimontree *et al.* (2021), kuat tekan rata-rata mortar dan beton yang diperoleh dari pengujian tiga benda uji ($\varnothing 150 \times 300$ mm) pada umur 28 hari adalah 23 MPa. Rata-rata kekuatan leleh dan kekuatan ultimit tulangan utama D12 mm berturut-turut adalah 586 dan 717 MPa. Kekuatan leleh rata-rata dan kekuatan ultimit tulangan Senggang $\varnothing 6$ mm masing-masing adalah 423 dan 538 MPa. Kekuatan leleh baja siku adalah 240 MPa. Hasil rata-rata kuat leleh dan kuat ultimit *strap* baja masing-masing adalah 466 dan 520 MPa.

Pada penelitian ini, ukuran baja siku divariasikan yaitu baja siku $20 \times 20 \times 3$ mm,

$30 \times 30 \times 3$ mm (sesuai dengan eksperimental oleh Sirimontree), dan $40 \times 40 \times 3$ mm. Setiap model diberi kode nama sesuai dengan variabel, untuk kolom kontrol tanpa perkuatan diberi kode nama sebagai KK. Kolom yang diperkuat diberi kode berdasarkan dimensi baja siku dan jarak *strap* baja. Model dengan baja siku berukuran $20 \times 20 \times 3$ mm, $30 \times 30 \times 3$ mm, dan $40 \times 40 \times 3$ mm dengan jarak *strap* 150 mm masing-masing diberi kode KBS20-150, KBS30-150, dan KBS40-150. Spesifikasi setiap model disajikan pada Tabel 2, sedangkan konfigurasi model kolom ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 2. Spesifikasi Model Kolom

Model Uji	Ukuran Baja Siku (mm)	Luas Penampang Baja Siku (mm ²)	Jarak Strap (s) (mm)	Keterangan
KK (Kontrol)	-	-	-	Hasil ekperimen tersedia Sirimontree <i>et al.</i> (2021)
KBS20-150	20x20x3	111	150	-
KBS30-150	30x30x3	171	150	Hasil ekperimen tersedia Sirimontree <i>et al.</i> (2021)
KBS40-150	40x40x3	231	150	-



Gambar 3. Konfigurasi model kolom; (a) KK, (b) KBS20-150, (c) KBS30-150, dan (d) KBS40-150

2.2. Prosedur Analisis Numerik

Prosedur analisis numerik merupakan serangkaian tahapan yang dilakukan untuk memperoleh respons struktur kolom beton bertulang menggunakan perangkat lunak ATENA 3D. Tahapan tersebut meliputi pendefinisian material, pemodelan geometri, penentuan kondisi batas dan pembebanan, proses analisis, serta evaluasi hasil simulasi.

Pendefinisian Material pada ATENA 3D

Tahap ini meliputi pendefinisian sifat material melalui input parameter material ke dalam perangkat lunak ATENA 3D. Seluruh parameter material diadopsi dari data hasil pengujian eksperimental oleh Sirimontree *et al.* (2021). Material yang digunakan dalam pemodelan terdiri atas beton, tulangan, pelat baja, baja siku, dan baja *strap* pratekan (*prestressed steel strap*).

Material Beton

Material beton dimodelkan menggunakan model konstitutif *SBETA* yang tersedia pada ATENA 3D. Model ini mampu merepresentasikan perilaku nonlinier beton melalui konsep keruntuhan biaksial (*biaxial failure*), sehingga dapat menggambarkan perkembangan kerusakan material akibat pembebanan monotonik (Červenka, Jendele and Červenka, 2021; Khedmatgozar Dolati, Matamoros and Ghannoum, 2024). Secara rinci, parameter material beton dicantumkan dalam Tabel 3.

Material Baja Tulangan

Pada material tulangan dimodelkan menggunakan *Bilinear Law* berdasarkan hubungan tegangan–regangan. Pada daerah elastis digunakan modulus elastisitas (E_s) sebesar 200000 MPa, sedangkan setelah mencapai tegangan leleh (f_y), material diasumsikan berperilaku plastis sempurna. Dalam pemodelan ini, nilai tegangan ultimit (f_u) diasumsikan sama dengan tegangan leleh (f_y) sehingga pengaruh *strain hardening* diabaikan sebagai bentuk penyederhanaan model. Tegangan leleh (f_y) tulangan utama dan tulangan sengkang masing-masing sebesar 586 MPa dan 423 MPa.

Tabel 3. Input material beton pada ATENA 3D

Parameter	Formula	Input	
Kuat Tekan	f'_c	23	MPa
Kuat Tarik	$f'_t = 0.24 \cdot f'_c{}^{\frac{2}{3}}$	1.941	MPa
Modulus Elastisitas	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$	22540.408	MPa
Poisson's ratio	$\nu = 0.2$	0.2	
Softening compression	$w_d = -0.0002$	-0.0002	mm
Type of tension softening	<i>I - Exponential based on Gf</i>		
Fracture energy, Gf	$G_f = 0.000025 \cdot f'_t{}^{ref}$	4.85E-05	MPa

Pelat Baja (Bearing Plate)

Pada pelat baja digunakan hubungan tegangan–regangan linear, dimana regangan berbanding lurus dengan tegangan, atau disebut dengan bahan elastis linear, yang memiliki modulus elastisitas yang konstan. Pelat baja digunakan untuk mendistribusikan gaya.

Material Baja Siku dan Material Baja Strap

Material baja siku dimodelkan menggunakan kriteria luluh Von Mises dengan hubungan tegangan–regangan bilinear. Model ini menyederhanakan perilaku material menjadi dua tahap, yaitu elastis dan plastis, tanpa mempertimbangkan pengaruh laju regangan maupun pengerasan regangan (*strain hardening*). Tegangan leleh (*yield strength*) baja siku ditetapkan sebesar 240 MPa. Sementara itu, baja *strap* dimodelkan sebagai elemen tulangan (*reinforcement*) dengan model material bilinear berdasarkan hubungan tegangan–regangan, menggunakan nilai kuat leleh rata-rata sebesar 466 MPa.

Pemodelan Geometri

Geometri struktur dimodelkan sesuai dengan dimensi aktual dari eksperimen oleh Sirimontree *et al.* (2021). Komponen-komponen seperti pelat baja, beton, tulangan, baja siku, dan *prestressed steel strap* digambarkan secara rinci mengikuti konfigurasi pada penelitian Sirimontree *et al.*, (2021). Geometri beton kolom dibentuk secara bersegmen, seperti ditunjukkan pada Gambar 4, guna memungkinkan pendefinisian tulangan

senggang sebagai *smeared reinforcement*. Dimensi segmen terkecil adalah 30 mm.

Penggambaran tulangan pada kolom dapat dilakukan dengan dua cara yaitu, *discrete* pada tulangan utama dan *smeared* untuk tulangan sengkang. Pada model, tulangan geser dimodelkan dengan pendekatan *smeared*, dengan memasukkan rasio tulangan geser pada kolom. Rasio tulangan dihitung dengan menggunakan formula 1 berikut (Červenka, Jendele and Červenka, 2021).

$$\rho = \frac{A_{si}}{A_c} \quad (1)$$

Dengan :

A_{si} = Luas penampang tulangan

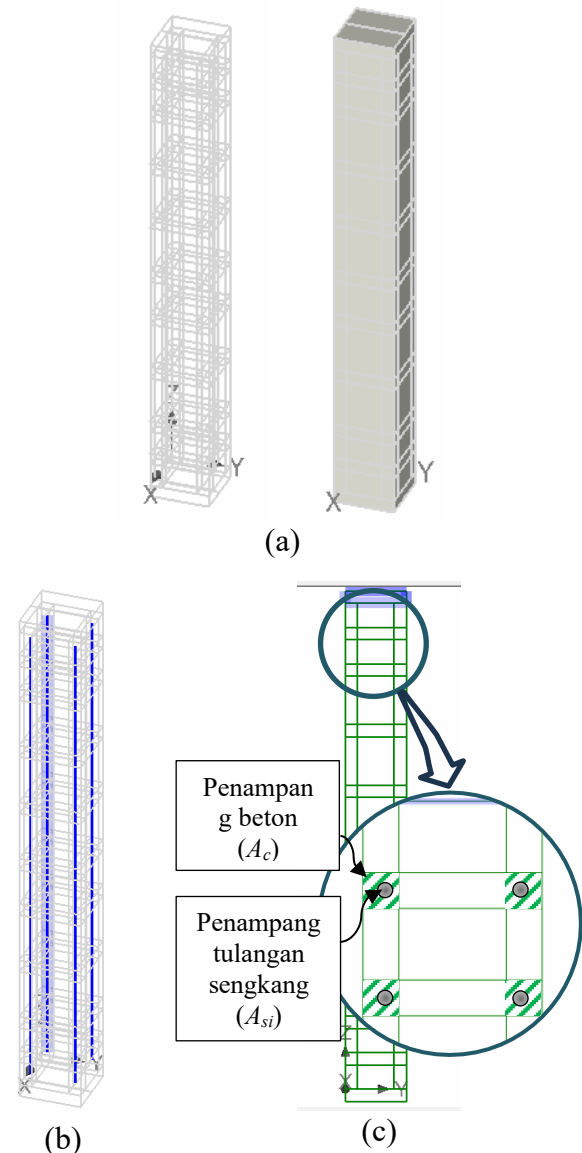
A_c = Luas penampang inti beton

Dalam pemodelan ini, kolom dibagi menjadi beberapa segmen yang disesuaikan dengan jarak tulangan geser sehingga rasio tulangan geser dapat didefinisikan pada setiap segmen. Nilai rasio tulangan geser dihitung berdasarkan perbandingan luas penampang tulangan geser terhadap luas penampang beton pada segmen yang dimodelkan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.c. Ukuran setiap segmen disesuaikan dengan ukuran *mesh* global, yaitu 30×30 mm, sehingga luas penampang beton yang digunakan dalam perhitungan adalah 900 mm². Luas penampang tulangan sengkang Ø6 mm diperoleh sebesar 28,29 mm², sehingga setelah dihitung menggunakan formula 1 diperoleh rasio tulangan geser sebesar 3,14. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai parameter input pada model *smeared reinforcement* di ATENA 3D untuk setiap segmen yang terdapat tulangan sengkang.

Model Baja Siku dan Strap

Baja siku dimodelkan sebagai *macroelement* pada setiap sisi kolom (Gambar 5.a). Karena keterbatasan ATENA 3D dalam memodelkan *macroelement* dengan ketebalan yang sangat tipis, baja *strap* dimodelkan sebagai elemen tulangan (*reinforcement*) dengan luas penampang sebesar 19 mm × 0,8 mm (Gambar 5.b). Pendekatan ini merupakan penyederhanaan model sehingga perilaku aktual baja *strap* sebagai pengikat eksternal, seperti interaksi

kontak, *slip*, dan mekanisme *confinement*, belum sepenuhnya dapat direpresentasikan.

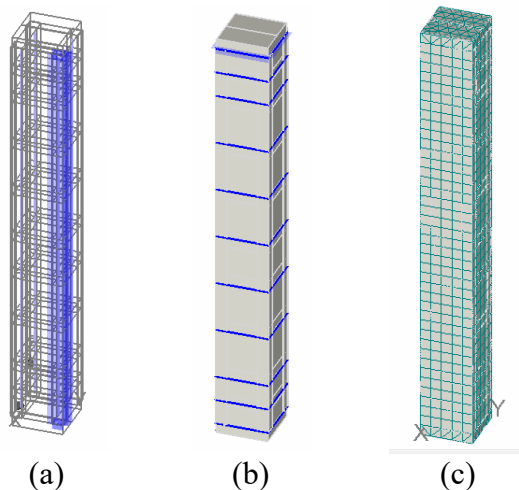


Gambar 4. Model Geometri; (a) Model Geometri Kolom, (b) Model Tulangan Utama, dan (c) Model *Smeared* Tulangan Geser

Meshing

Selanjutnya, model dibagi menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*) untuk analisis numerik dengan ukuran *mesh* global sebesar 30 mm (Gambar 5.c). Sebelum penentuan ukuran *mesh*, dilakukan uji sensitivitas menggunakan variasi ukuran *mesh* 20 mm, 30 mm, dan 40 mm. Pada model kolom kontrol, *mesh* 30 mm memberikan keseimbangan antara ketelitian hasil dan efisiensi komputasi. Sementara itu, pada model kolom dengan *mesh* 20 mm, proses analisis tidak dapat diselesaikan karena keterbatasan memori perangkat (*out of memory*). Adapun pada model

dengan *mesh* 40 mm, konektivitas antara elemen kolom dan baja siku tidak dapat terbentuk dengan baik sehingga proses analisis tidak dapat dijalankan. Oleh karena itu, ukuran *mesh* global 30 mm dipilih sebagai ukuran *mesh* yang paling sesuai untuk seluruh model dalam penelitian ini karena mampu menghasilkan model yang dapat membentuk konektivitas yang baik antara kolom beton dan baja siku.



Gambar 5. Model Geometri; (a) Model Baja Siku, (b) Model Strap Baja, dan (c) Meshing

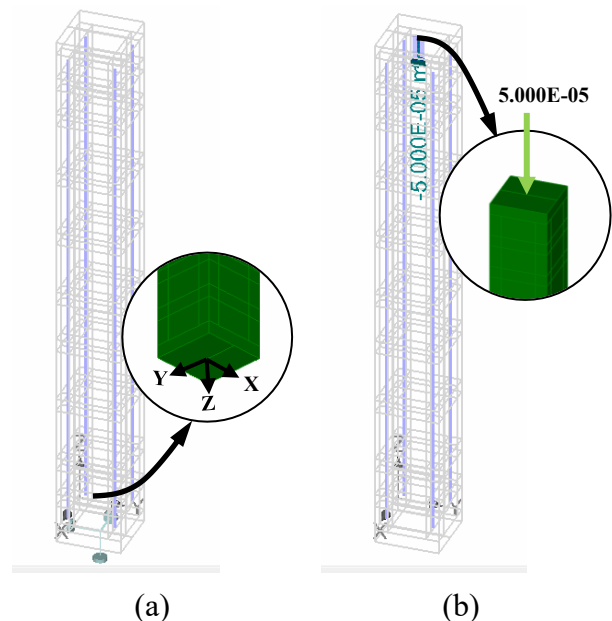
Penentuan Kontak

Kontak antara beton dan tulangan, serta antara beton dan baja siku, diasumsikan sebagai lekatan sempurna (*perfect bond*). Pada tulangan, asumsi ini didasarkan pada mekanisme ikatan yang dihasilkan oleh permukaan ulir terhadap beton. Sementara itu, pada *interface* baja siku dan beton, asumsi *perfect bond* diterapkan karena celah di antara keduanya diisi dengan material plester. Penggunaan asumsi ini juga didukung oleh penelitian terdahulu oleh Fauzan *et al.*, (2018) dan Thamrin *et al.*, (2023) yang menunjukkan bahwa *perfect bond* mampu merepresentasikan perilaku struktur dengan cukup baik. Meskipun demikian, pendekatan ini merupakan penyederhanaan model karena belum mempertimbangkan mekanisme *bond-slip*, kontak gesek (*frictional contact*), maupun *cohesive interface* pada interaksi beton dan baja. Penyederhanaan tersebut diperkirakan dapat memengaruhi prediksi respons model numerik, terutama pada respons perpindahan. Namun, asumsi *perfect bond* dipilih pada penelitian ini karena keterbatasan data parameter *interface*

yang diperlukan untuk pemodelan yang lebih kompleks.

Defenisi Reaksi Perletakan dan Pembebanan

Pada tahap ini dilakukan pendefinisian tumpuan (*supports*) dan pembebanan (*loads*). Tumpuan didefinisikan sebagai tumpuan jepit, sehingga pergerakan pada sumbu X, Y, dan Z dibatasi (*fixed*) (Gambar 6.a). Pembebanan diterapkan dengan metode *displacement control* dengan *displacement increment* sebesar 5×10^{-5} m (0,05 mm). Untuk mendistribusikan beban secara merata, pelat baja ditempatkan di bagian atas kolom. Beban aksial diberikan di tengah pelat, dengan arah vertikal ke bawah sejajar sumbu Z (Gambar 6.b). Beban ditingkatkan secara monotonik hingga struktur mencapai kondisi ultimit.

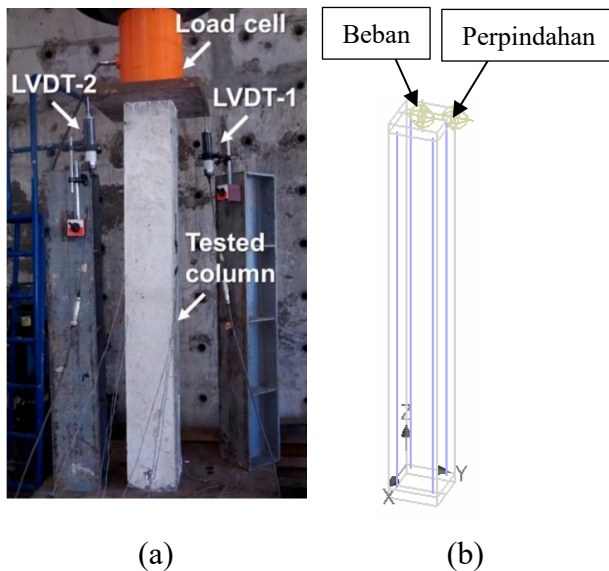


Gambar 6. Penentuan Kondisi Batas; (a) Model Tumpuan, dan (b) Model Pembebanan

Monitoring Point

Monitoring point pada ATENA 3D ditentukan sesuai dengan titik pengamatan pada pengujian eksperimental (Gambar 7), untuk memantau hubungan beban–perpindahan selama proses pembebanan. Penyelesaian persamaan nonlinier menggunakan metode Newton–Raphson dengan parameter solusi berupa *maximum number of iterations* sebanyak 40 iterasi pada setiap *load step* dan *displacement error tolerance* sebesar 0,01. Untuk memperoleh

respons struktur hingga kondisi runtuh, analisis awal dilakukan menggunakan 100 *load step*.



Gambar 7. *Monitoring Point*; (a) Eksperimental, dan (b) Numerik

2.3. Validasi Model

Setelah dilakukan *running* program, hasil analisis elemen hingga ATENA 3D divalidasi terhadap data eksperimen Sirimontree et al. (2021) untuk menilai kesesuaian dan reliabilitas model. Apabila hasil belum sesuai, dilakukan *tuning* model hingga diperoleh kesesuaian yang memadai. Selanjutnya, dilakukan variasi dimensi baja siku untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kinerja kolom beton bertulang.

2.4. Kekakuan dan Daktilitas

Perhitungan kekakuan memerlukan data beban dan perpindahan saat leleh, sedangkan daktilitas ditentukan berdasarkan perpindahan leleh dan ultimit. Titik leleh model ditetapkan menggunakan metode sistem elasto-plastik ekuivalen dengan disipasi energi yang sama, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8. Perpindahan ultimit ditentukan pada saat kapasitas beban mengalami penurunan sebesar 15% dari beban puncak.

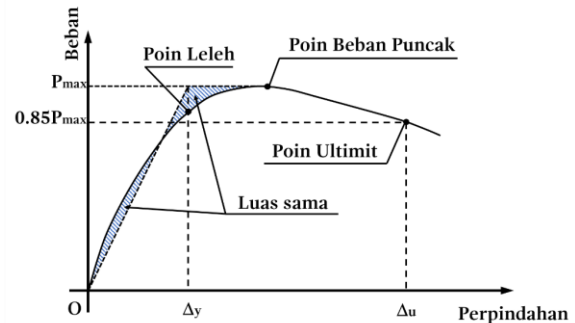
Kekakuan

Kekakuan material dapat diukur dengan modulusnya, yang dihitung dengan membagi tegangan atau beban yang dapat diserap material dengan deformasi yang dialaminya seperti yang

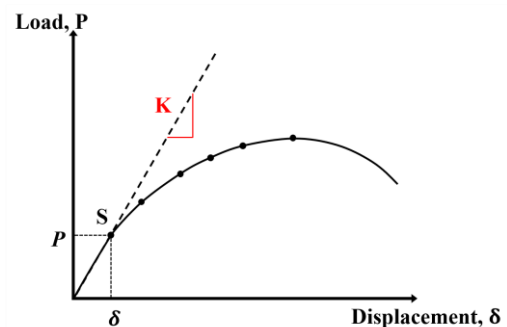
diilustrasikan pada Gambar 9. Rumus kekakuan disajikan dalam persamaan 2 (Sarhan and Raslan, 2020).

$$K = \frac{P}{\delta} \quad (2)$$

Dengan, K adalah Kekakuan, P adalah Beban leleh pertama, dan δ adalah Deformasi leleh pertama.



Gambar 8. Titik karakteristik pada kurva beban-perpindahan (Huang, Guo and Kuang, 2016)



Gambar 9. Kekakuan pada grafik beban vs perpindahan dari struktur (Sarhan and Raslan, 2020)

Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan struktur pasca-elastis untuk mengalami deformasi berkali-kali dan bolak-balik akibat guncangan, sambil tetap mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup agar tetap berdiri dalam kondisi runtuh, yang menyebabkan terjadinya *yielding* awal. Ketika gempa terjadi, daktilitas pada struktur menyebabkan terbentuknya sendi plastis secara bertahap. Sendi plastis ini berfungsi untuk menahan beban gempa yang signifikan, karena energi kinetik akibat gerakan tanah yang diterima akan diserap oleh sendi plastis tersebut (Rochman et al., 2020; Nuraga et al., 2021).

Daktilitas juga mencerminkan kemampuan struktur untuk menyerap energi selama proses pembebanan. Semakin tinggi nilai daktilitas pada suatu struktur beton bertulang, maka semakin besar kemampuan struktur tersebut untuk menyerap energi selama proses pembebanan berlangsung (Juliafad, 2021). Faktor daktilitas (μ) adalah rasio antara defleksi maksimum struktur (δ_u) saat mendekati titik runtuh dan defleksi struktur pada saat *yielding* awal (δ_y) (Rochman *et al.*, 2020; Nuraga *et al.*, 2021). Titik leleh spesimen ditentukan sesuai dengan titik leleh sistem elasto-plastik ekuivalen dengan disipasi energi yang sama, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 8, sedangkan perpindahan ultimit sesuai dengan hilangnya 15% beban puncak spesimen (Huang, Guo and Kuang, 2016; Mousa and Al, 2026).

Faktor daktilitas perpindahan dapat dihitung dengan formula 3 berikut (Thamrin, Zaidir and Iwanda, 2022).

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3)$$

μ adalah faktor daktilitas, Δ_u adalah perpindahan ultimit sesuai dengan hilangnya 15% beban puncak (P_{max}), dan Δ_y adalah perpindahan saat terjadi leleh.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil analisis elemen hingga nonlinier pada kolom beton bertulang, baik tanpa perkuatan maupun dengan perkuatan, menggunakan perangkat lunak ATENA 3D v.5. Analisis mencakup hubungan beban dan perpindahan, kekakuan, dan daktilitas. Hasil tersebut disajikan dalam bentuk kurva, dan tabel, berdasarkan pengujian dengan beban aksial tekan monotonik.

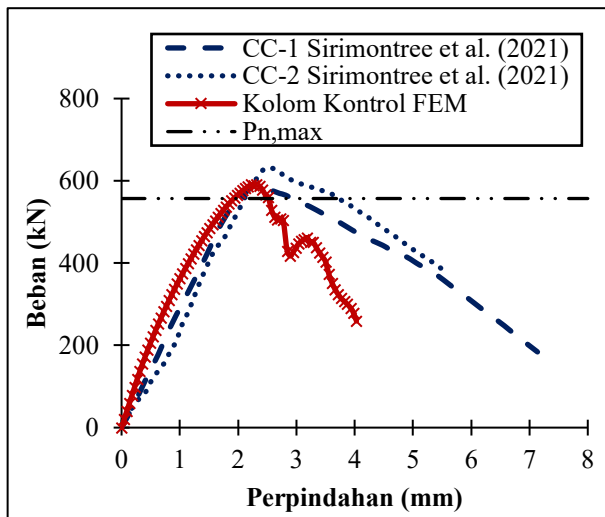
3.1. Perbandingan Hasil Pemodelan Elemen Hingga dengan Eksperimental

Hasil analisis numerik menggunakan ATENA 3D divalidasi terhadap hasil pengujian eksperimental yang dilakukan oleh Sirimontree *et al.*, (2021) melalui perbandingan hubungan beban–perpindahan. Validasi dilakukan pada model kolom kontrol (KK) dan kolom yang diperkuat dengan baja siku 30×30×3 mm (KBS30). Perbandingan antara hasil eksperimen dan analisis elemen hingga disajikan pada Tabel 4.

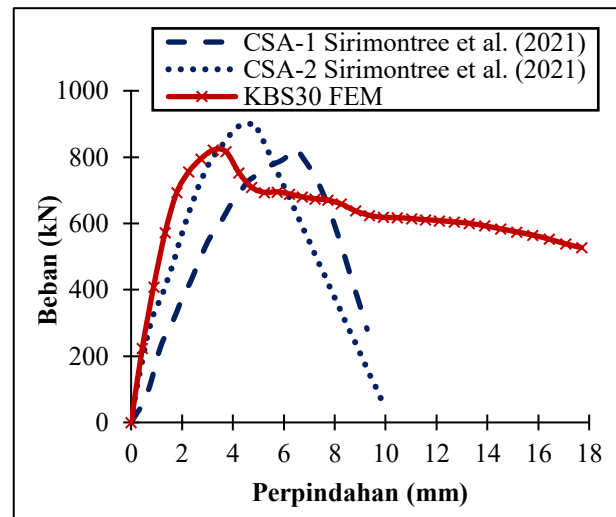
Pada spesimen KK, hasil FEM menunjukkan perpindahan sebesar 2,221 mm dan beban sebesar 590,8 kN, sedangkan hasil eksperimen menghasilkan rata - rata perpindahan 2,34 mm dan rata – rata beban 615 kN. Perbedaan perpindahan hanya 5,09% dan perbedaan beban sebesar 3,93%, yang menunjukkan bahwa model FEM mampu merepresentasikan respons struktur dengan cukup baik. Selain itu, hasil perhitungan teoritis kapasitas aksial kolom juga diplotkan pada kurva beban – perpindahan Gambar 10. Nilai kapasitas aksial nominal maksimum ($P_{n,max}$) dari perhitungan teoritis adalah 557 kN. Jika dibandingkan dengan model elemen hingga KK, selisih kapasitas aksialnya hanya 6%. Hasil ini menunjukkan bahwa model elemen hingga Kolom Kontrol dapat mewakili perilaku kolom kontrol hasil eksperimen baik kapasitas maupun perpindahan. Selanjutnya model kolom kontrol tersebut digunakan sebagai referensi untuk memodelkan kolom dengan perkuatan baja siku, dengan konfigurasi yang sama dengan benda uji eksperimental oleh Sirimontree *et al.*, (2021), yaitu kolom dengan baja siku ukuran 30 x 30 x 3 mm, jarak *prestressed steel strap* 150 mm.

Tabel 4. Perbandingan nilai eksperimental dan numerik menggunakan FEM

Tipe	Pengujian	Perpindahan	Beban	Persentase Perpindahan	Persentase Beban
		mm	kN		
KK	Eksperimental	2.22	600		
		2.46	630		
	Rata - rata	2.34	615	-5.09%	-3.93%
	FEM	2.22	590.8		
KBS30	Eksperimental	6.55	825		
		4.89	900		
	Rata - rata	5.72	862.5	-43.53%	-4.77%
	FEM	3.23	821.4		



Gambar 10. Perbandingan Kurva Beban – Perpindahan Kolom Kontrol Hasil Pemodelan Elemen Hingga dengan Ekperimental



Gambar 11. Perbandingan Kurva Beban – Perpindahan Kolom Baja Siku Hasil Pemodelan Elemen Hingga dengan Ekperimental

Pada spesimen KBS30, hasil pengujian eksperimental menunjukkan beban maksimum rata – rata sebesar 862,5 kN dengan rata – rata perpindahan 5,72 mm (Gambar 11). Sementara itu, model elemen hingga KBS30 menghasilkan beban maksimum sebesar 821,4 kN dengan perpindahan 3,23 mm. Perbedaan kapasitas beban sebesar 4,77% masih berada dalam rentang yang dapat diterima untuk validasi model numerik. Namun, perbedaan perpindahan mencapai 43,53%, yang menunjukkan bahwa model elemen hingga memprediksi deformasi yang lebih kecil dibandingkan hasil pengujian eksperimental. Dengan demikian, model numerik menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup baik dalam memprediksi kapasitas beban maksimum, tetapi masih memiliki keterbatasan dalam memprediksi deformasi, khususnya pada respons pascapuncak kolom yang diperkuat.

Perbedaan perpindahan yang relatif besar pada spesimen KBS30 diduga dipengaruhi oleh penyederhanaan asumsi dalam pemodelan, seperti penggunaan asumsi lekatan sempurna (*perfect bond*) pada *interface* beton–baja siku, homogenitas material, serta idealisasi kondisi batas. Selain itu, faktor-faktor yang terjadi pada pengujian eksperimental, seperti gesekan pada tumpuan, eksentrisitas pembebanan, dan rotasi lokal, sulit direpresentasikan secara penuh dalam model elemen hingga. Akibatnya, model numerik cenderung menghasilkan respons

deformasi yang lebih kaku dibandingkan hasil eksperimen. Meskipun demikian, selisih kapasitas beban maksimum yang kurang dari 10% menunjukkan bahwa model elemen hingga memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dan layak digunakan untuk analisis parametrik pada penelitian ini.

3.2. Hasil Analisis Kapasitas Tekan dan Perpindahan

Empat model kolom beton bertulang yang terdiri atas kolom kontrol tanpa perkuatan (KK) dan tiga model kolom dengan variasi ukuran baja siku (KBS) dengan jarak *strap* tetap sebesar 150 mm. Hasil analisis disajikan pada Tabel 5 dan kurva pada Gambar 12. Hasil simulasi elemen hingga menunjukkan bahwa penerapan perkuatan dengan baja siku secara signifikan meningkatkan kapasitas aksial kolom. Kolom kontrol (KK) menahan beban sebesar 590,8 kN, setelah diberi perkuatan beban maksimum meningkat menjadi 778,0 kN (KBS20), 821,4 kN (KBS30), dan 876,4 kN (KBS40). Persentase kenaikan berturut-turut dari model tersebut adalah sebesar 31,69%, 39,03%, dan 48,34% dibandingkan dengan model KK. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar dimensi profil baja siku yang digunakan, semakin besar kontribusinya terhadap peningkatan kapasitas tekan aksial kolom. Peningkatan tersebut disebabkan oleh bertambahnya luas penampang

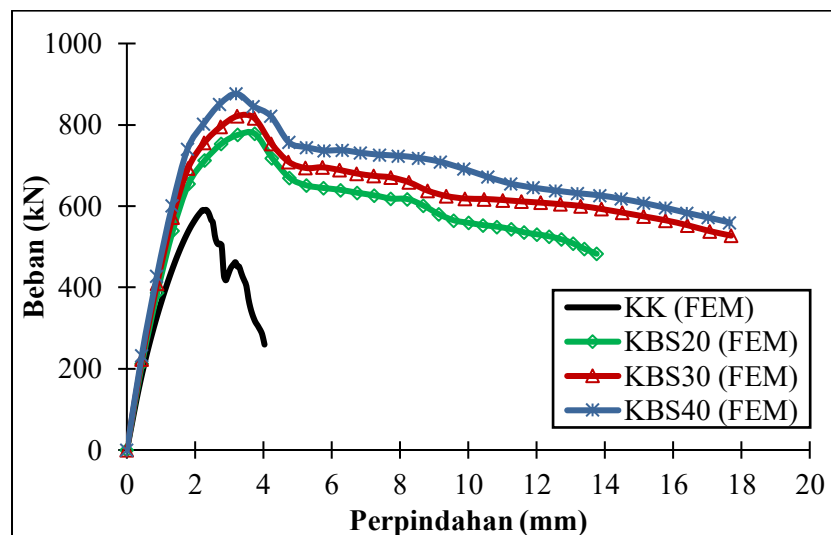
baja yang berkontribusi dalam menahan beban aksial, serta efek pengekangan (*confinement*) yang dihasilkan oleh sistem baja siku dan baja *strap* terhadap beton inti. Pengekangan lateral tersebut membatasi ekspansi beton selama pembebanan tekan, sehingga menunda perkembangan retak dan keruntuhan beton inti serta meningkatkan kapasitas tekan aksial kolom.

Dari sisi perpindahan, seluruh model dengan perkuatan menunjukkan perpindahan maksimum yang lebih besar dibandingkan kolom kontrol (KK). Perpindahan KK sebesar 2,22 mm, sementara pada model KBS20, KBS30, dan KBS40 berturut-turut meningkat menjadi 3,25 mm, 3,23 mm, dan 3,21 mm. Persentase kenaikan berturut-turut adalah 46,33%, 45,52%, dan 44,39% dibandingkan KK.

Namun, nilai perpindahan maksimum tidak meningkat seiring bertambahnya dimensi baja siku. Setelah mencapai nilai tertinggi pada model KBS20, perpindahan maksimum sedikit menurun pada model KBS30 dan KBS40. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan profil baja siku yang lebih besar meningkatkan kekakuan sistem perkuatan, tetapi tidak selalu diikuti oleh peningkatan deformasi maksimum. Meskipun demikian, seluruh model dengan perkuatan tetap menunjukkan kemampuan deformasi yang lebih baik dibandingkan kolom kontrol (KK). Oleh karena itu, penggunaan baja siku sebagai perkuatan eksternal perkuatan baja siku mampu meningkatkan kapasitas tekan sekaligus mempertahankan kemampuan deformasi struktur.

Tabel 5. Perbandingan Beban – Perpindahan Model Elemen Hingga Kolom Kontrol dan Kolom Baja Siku dengan Variasi Dimensi Baja Siku

Model Uji	Beban Maksimum	Perpindahan	Persentase Beban	Persentase Perpindahan
	kN	mm		
KK (Kontrol)	590,8	2,22	0,00%	0,00%
KBS20	778,0	3,25	31,69%	46,33%
KBS30	821,4	3,23	39,03%	45,52%
KBS40	876,4	3,21	48,34%	44,39%



Gambar 12. Perbandingan Beban – Perpindahan Model Elemen Hingga KK dan KBS dengan Variasi Dimensi Baja Siku

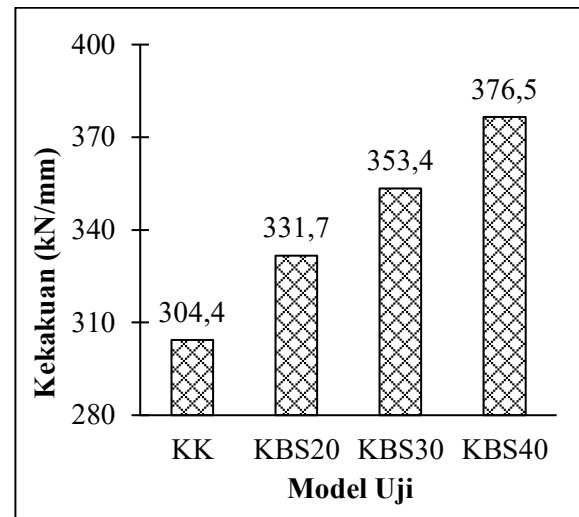
3.3. Hasil Analisis Kekakuan

Tabel 6 dan Gambar 13 menyajikan nilai kekakuan model elemen hingga kolom tanpa perkuatan (KK) maupun dengan perkuatan baja siku (KBS) dengan jarak strap tetap 150 mm dan

variasi ukuran profil baja siku. Model kontrol (KK) memiliki nilai kekakuan sebesar 304,4 kN/mm, yang digunakan sebagai nilai acuan. Ketiga model perkuatan menunjukkan peningkatan kekakuan, KBS20 sebesar 331,7

kN/mm dengan kenaikan 9%, model KBS30 memiliki nilai kekakuan sebesar 353,4 kN/mm dengan kenaikan 16%, dan KBS40 dengan kekakuan 376,5 kN/mm dan kenaikan 24% dibandingkan kolom KK.

Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar dimensi baja siku yang digunakan, semakin tinggi kekakuan struktur. Peningkatan tersebut dipengaruhi oleh bertambahnya kontribusi baja siku dalam menahan beban aksial serta meningkatnya efek pengekanan terhadap beton inti sehingga deformasi kolom menjadi lebih terkendali. Namun demikian, peningkatan kekakuan yang semakin besar tidak selalu diikuti oleh peningkatan kemampuan deformasi.



Gambar 13. Perbandingan kekakuan KK dan KBS dengan variasi ukuran profil

Tabel 6. Perbandingan kekakuan KK dan KBS dengan variasi ukuran profil

Model Uji	Δy	P_y	Kekakuan	Persentase Kekakuan
	(mm)	(kN)	(kN/mm)	
KK	1,73	525,18	304,4	0%
KBS20	2,07	686,78	331,7	9%
KBS30	2,06	728,73	353,4	16%
KBS40	2,07	779,16	376,5	24%

3.4 Hasil Analisis Daktilitas

Pada Tabel 7 ditampilkan nilai daktilitas hasil analisis elemen hingga, hasil daktilitas diplot pada Gambar 14. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa model KK memiliki nilai daktilitas sebesar 1,61. Model KBS20 menunjukkan peningkatan daktilitas menjadi 2,44 atau naik sebesar 52% dibandingkan model KK. Selanjutnya, model KBS30 memiliki nilai daktilitas sebesar 2,47 dengan peningkatan 54%, sedangkan model KBS40 menunjukkan nilai tertinggi, yaitu 2,54 atau meningkat 58% dibandingkan model kontrol.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan baja siku sebagai perkuatan eksternal mampu meningkatkan daktilitas kolom beton bertulang sehingga kolom memiliki kemampuan deformasi inelastik yang lebih baik sebelum mengalami keruntuhan. Namun, perbedaan nilai daktilitas antara model KBS20, KBS30, dan KBS40 relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan daktilitas lebih dipengaruhi oleh keberadaan sistem perkuatan baja siku dibandingkan oleh variasi dimensi profil yang digunakan.

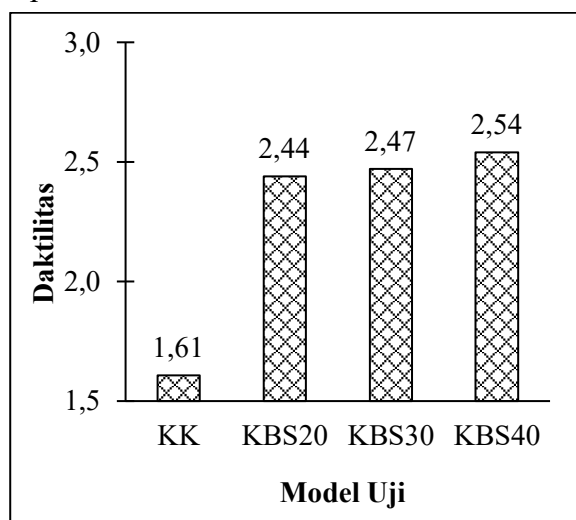
Tabel 7. Perbandingan daktilitas KK dan KBS dengan variasi ukuran profil

Model Uji	Δu	Δy	Daktilitas	Persentase Daktilitas
	(mm)	(mm)		
KK	2,78	1,73	1,61	0%
KBS20	5,05	2,07	2,44	52%
KBS30	5,09	2,06	2,47	54%
KBS40	5,26	2,07	2,54	58%

Selain itu, perbedaan deformasi pada kolom yang diperkuat masih memiliki keterbatasan,

sehingga dapat memengaruhi hasil daktilitas. Meskipun begitu, hasil daktilitas dalam

penelitian ini lebih ditujukan untuk membandingkan kecenderungan perilaku antarvariasi model daripada sebagai nilai absolut yang sepenuhnya merepresentasikan kondisi eksperimental.



Gambar 14. Perbandingan daktilitas KK dan KBS dengan variasi ukuran profil

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan baja siku sebagai sistem perkuatan eksternal mampu meningkatkan kapasitas tekan sekaligus mempertahankan kemampuan deformasi kolom beton bertulang. Peningkatan kapasitas tekan terjadi seiring bertambahnya dimensi baja siku, sejalan dengan penelitian numerik Abd-el-nabi *et al.* (2024) yang melaporkan peningkatan kapasitas hingga 52,45% pada sistem *steel jacket* dengan dua profil C dan hingga 75,92% pada konfigurasi full box. Kesamaan hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin efektif sistem perkuatan memberikan pengekanan pada beton inti, semakin besar kapasitas tekan yang dapat dicapai.

Selain meningkatkan kapasitas tekan, kedua penelitian menunjukkan bahwa sistem perkuatan baja tetap mampu mempertahankan respons deformasi hingga kondisi ultimit. Pada penelitian ini, perpindahan ultimit meningkat sebesar 46%, 45,5%, dan 44% dibandingkan kolom kontrol, meskipun perbedaannya antarvariasi baja siku relatif kecil. Sementara itu, Abd-el-nabi *et al.* (2024) melaporkan bahwa peningkatan kapasitas tekan tidak diikuti perubahan perpindahan ultimit yang signifikan. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa

konfigurasi sistem perkuatan memengaruhi respons deformasi kolom. Sistem *steel jacket* memberikan pengekanan yang lebih merata, sedangkan baja siku yang dikekang *steel strap* tetap menghasilkan pengekanan yang efektif dengan deformasi yang relatif lebih besar.

Secara keseluruhan, kedua penelitian menegaskan bahwa efektivitas pengekanan merupakan faktor utama dalam meningkatkan kinerja kolom beton bertulang. Penelitian ini menunjukkan bahwa selain konfigurasi perkuatan, optimasi dimensi baja siku juga berperan dalam meningkatkan kapasitas tekan, kekakuan, dan daktilitas kolom. Namun demikian, temuan ini masih memerlukan validasi melalui pengujian eksperimental pada penelitian selanjutnya.

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Hasil analisis elemen hingga menunjukkan bahwa penggunaan baja siku sebagai sistem perkuatan mampu meningkatkan kinerja kolom beton bertulang secara signifikan. Peningkatan kapasitas beban aksial terjadi seiring bertambahnya dimensi baja siku yang digunakan, dimana model KBS20, KBS30, dan KBS40 mengalami peningkatan kapasitas masing-masing sebesar 31,69%, 39,03%, dan 48,34% dibandingkan kolom kontrol. Kapasitas tertinggi dicapai oleh model KBS40 dengan beban maksimum sebesar 876,4 kN. Selain itu, kolom yang diperkuat menunjukkan peningkatan kemampuan deformasi dibandingkan kolom kontrol, meskipun persentase peningkatannya cenderung menurun dengan bertambahnya dimensi baja siku. Model KBS20, KBS30, dan KBS40 mengalami peningkatan perpindahan masing-masing sebesar 46%, 45,5%, dan 44%, dengan peningkatan tertinggi diperoleh pada model KBS20.

Penggunaan baja siku juga berkontribusi terhadap peningkatan kekakuan dan daktilitas kolom. Kekakuan tertinggi dicapai oleh model KBS40 dengan peningkatan sebesar 24%, sedangkan nilai daktilitas maksimum sebesar 2,54 diperoleh pada model yang sama dengan peningkatan sebesar 58% dibandingkan kolom kontrol. Temuan ini menunjukkan bahwa perkuatan menggunakan baja siku efektif dalam

meningkatkan kapasitas, kekakuan, dan daktilitas kolom beton bertulang. Namun, penelitian ini merupakan studi numerik parametrik berbasis metode elemen hingga dengan beberapa penyederhanaan dalam pemodelan, seperti asumsi ikatan sempurna (*perfect bond*) antara beton dan elemen baja serta perilaku material direpresentasikan berdasarkan model konstitutif tertentu. Kondisi ini menyebabkan keterbatasan dalam memprediksi respons deformasi secara akurat.

4.2. Saran

Pengembangan penelitian lanjutan melalui pengujian eksperimental pada variasi dimensi baja siku 20x20x3 mm dan 40x40x3 mm untuk mengonfirmasi perilaku aktual kolom. Meningkatkan keandalan model numerik melalui penyempurnaan parameter pemodelan, seperti penerapan model material yang lebih merepresentasikan karakteristik beton bertulang dan elemen perkuatan, serta pemodelan *interface* yang lebih rinci dengan mempertimbangkan pengaruh gesekan (*friction contact*) dan *slip* pada interaksi antara beton, tulangan, dan baja siku. Selain itu, analisis dinamik dapat dilakukan untuk mengevaluasi respons kolom yang diperkuat terhadap pembebanan gempa sehingga memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kinerja struktur. Penelitian lanjutan juga dapat mengkaji pengaruh variasi jarak *strap* dan besarnya gaya *prestress* pada *strap* terhadap efektivitas sistem perkuatan. Kajian numerik menggunakan perangkat lunak elemen hingga lain seperti ABAQUS, ANSYS, atau SeismoStruct juga dapat dilakukan untuk membandingkan konsistensi hasil simulasi serta mengevaluasi pengaruh perbedaan formulasi elemen dan model material terhadap respons struktur.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abd-el-nabi, E., Zahran, F. and Selouma, T. (2024) 'Numerical Analysis of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Steel Jacket', *Fayoum University Faculty of Engineering*, 7(2), pp. 21–30. Available at: <https://doi.org/10.21608/fuje.2024.343760>.
- Aminulai, H.O. *et al.* (2023) 'Nonlinear behaviour of corrosion damaged low-strength short reinforced concrete columns under compressive axial cyclic loading', *Engineering Structures*, 289(January), p. 116245. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116245>.
- Avcil, F. *et al.* (2026) 'Effectiveness of FRP Strengthening on RC Columns with Multiple Structural Deficiencies: A Numerical Investigation', *Buildings*, 16(12), pp. 1–27. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings16122372>.
- Červenka, V., Jendele, L. and Červenka, J. (2021) *ATENA Program Documentation Part 1: Theory*, Červenka Consulting. Červenka Consulting.
- Fauzan, Kurniawan, R. and Al Jauhari, Z. (2018) 'Finite element analysis of EWECs columns with varying shear span ratio', *International Journal of GEOMATE*, 14(43), pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.21660/2018.43.3530>.
- Gonilha, J.A. and Martins, D. (2022) 'Numerical simulation of the damage progression of pultruded GFRP beam-to-column connections under monotonic and cyclic loads', *Composite Structures*, 300(February). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116180>.
- Huang, Q., Guo, Z. and Kuang, J.S. (2016) 'Designing infilled reinforced concrete frames with the "strong frame-weak infill" principle', *Engineering Structures*, 123, pp. 341–353. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.05.024>.
- Juliafad, E. (2021) *Metode Elemen Hingga Non-Linear Studi Kasus: Beton Bertulang Pasca-Bakar dengan Perkuatan Caron Fiber Strip*. Padang: UNP Press.
- Khedmatgozar Dolati, S.S., Matamoros, A. and Ghannoum, W. (2024) 'Guidelines for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Columns with Various Types of Degradation Subjected to Seismic Loading', *Infrastructures*, 9(12). Available at: <https://doi.org/10.3390/infrastructures9120227>.
- Khoeri, H. (2020) 'Pemilihan Metode Perbaikan

- Dan Perkuatan Struktur Akibat Gempa (Studi Kasus Pada Bank Sulteng Palu)', *Konstruksia*, 12(1), pp. 93–104.
- Kosasih, P.B. (2012) *Teori dan Aplikasi Metode Elemen Hingga*. Penerbit ANDI Yogyakarta.
- Mousa, A.M. and Al, S.R. (2026) 'Experimental Performance of CFRP strengthened square RC columns with inadequate interior ties: Effects of slenderness and load eccentricity', *Research on Engineering Structures & Materials*, pp. 1–21. Available at: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17515/rem2026-1702ma0523rs>.
- Mousa, A.M. and Zaidee, S.R. Al (2026) 'Numerical Study of CFRP-Strengthened Square RC Columns under Axial Compression with Initial Geometric Imperfections', *Journal of Engineering*, 32(5), pp. 93–115. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.31026/j.eng.2026.05.05>.
- Nuraga, K. *et al.* (2021) 'Analisis Daktilitas Struktur Gedung Rangka Beton Bertulang Dengan Metode Analisis Pushover (Studi: Gedung Tugu Reasuransi Indonesia Jakarta)', *Jurnal Ilmiah TELSINAS*, 4(2), pp. 34–41. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.38043/telsinas.v4i2.3342>.
- Rochman, T. *et al.* (2020) 'The effect of columns configuration on high-rise building using performance-based design', *Civil Engineering and Architecture*, 8(6), pp. 1144–1166. Available at: <https://doi.org/10.13189/cea.2020.080601>.
- Sarhan, O. and Raslan, M. (2020) 'Study of the elastic stiffness factor of steel structures with different lateral load resisting systems', *International Journal of Advanced Engineering, Sciences and Applications*, 1(2), pp. 6–11. Available at: <https://doi.org/10.47346/ijaesa.v1i2.26>.
- Sirimontree, S. *et al.* (2021) 'Experimental Investigations on Strengthened Reinforced Concrete Columns under Monotonic Axial Loading', *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 34(5), pp. 1124–1131. Available at: <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.05b.06>.
- Thamrin, R., Zaidir and Wahyuni, A. (2023) 'Shear capacity of reinforced concrete beams strengthened with web bonded steel bars or steel plates', *Results in Engineering*, 17(December 2022), p. 100953. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100953>.
- Thamrin, R., Zaidir, Z. and Iwanda, D. (2022) 'Ductility Estimation for Flexural Concrete Beams Longitudinally Reinforced with Hybrid FRP–Steel Bars', *Polymers*, 14(5). Available at: <https://doi.org/10.3390/polym14051017>.
- Xu, L. *et al.* (2025) 'Concentric Axial Load Test for Square CFST Columns Strengthened with Steel Jackets', *Journal of Constructional Steel Research*, 229, p. 109481. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109481>.
- Yuhazri, M.Y., Zulfikar, A.J. and Ginting, A. (2020) 'Fiber Reinforced Polymer Composite as a Strengthening of Concrete Structures: A Review', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1003(1). Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1003/1/012135>.
- Zaiter, A. and Lau, T.L. (2021) 'Experimental study of jacket height and reinforcement effects on seismic retrofitting of concrete columns', *Structures*, 31(September 2020), pp. 1084–1095. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.020>.