

STUDI PERILAKU KOLOM PENDEK BETON BERTULANG TERKEKANG AKIBAT BEBAN AKSIAL DENGAN VARIASI BENTUK SENGGANG MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nada Sukma¹, Nadia Umi Kulstum², Sumirin³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang,
nadasukma200703@gmail.com, nadiaumiik@gmail.com

ABSTRAK

Perilaku kolom pendek beton bertulang terhadap beban aksial dipengaruhi oleh sistem pengekangan melalui tulangan transversal. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi bentuk sengkang terhadap kapasitas aksial, daktilitas, serta hubungan tegangan-regangan pada kolom pendek menggunakan simulasi numerik berbasis metode elemen hingga. Pemodelan dilakukan pada enam variasi kolom dengan penampang 500×500 mm dan tinggi 1500 mm, yaitu tanpa sengkang (unconfined), sengkang biasa, crosstie, double crosstie, diamond, dan lingkaran. Beton dimodelkan menggunakan pendekatan *Concrete Damage Plasticity* (CDP) untuk menggambarkan perilaku nonlinier akibat retak tarik dan kerusakan tekan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi sengkang berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kapasitas aksial dan daktilitas kolom. Konfigurasi double crosstie memberikan kapasitas beban dan daktilitas tertinggi, sedangkan kolom tanpa sengkang memiliki performa terendah. Temuan ini menegaskan pentingnya konfigurasi sengkang dalam meningkatkan ketahanan kolom beton bertulang terhadap beban aksial.

Kata kunci : kolom pendek, beton bertulang, variasi sengkang, daktilitas, kapasitas aksial

Penerbit : Fakultas Teknik Universitas Pasifik Morotai

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton bertulang banyak digunakan dalam konstruksi karena kekuatannya, dengan kolom sebagai elemen utama penahan beban aksial maupun lateral. Pada kolom pendek, pengekangan melalui variasi bentuk sengkang berperan penting dalam meningkatkan kapasitas, daktilitas, dan ketahanan struktur. Namun, kajian mengenai pengaruh variasi tersebut masih relatif terbatas. Uji eksperimental untuk tujuan ini membutuhkan biaya dan waktu yang besar, sehingga analisis numerik berbasis metode elemen hingga menjadi alternatif yang lebih efisien. Dalam penelitian ini digunakan model *Concrete Damage Plasticity* (CDP) untuk memodelkan perilaku nonlinier beton dan mengevaluasi pengaruh variasi bentuk sengkang terhadap kolom pendek di bawah beban aksial, dengan harapan dapat memberikan kontribusi pada pemahaman mekanisme pengekangan serta optimalisasi desain kolom beton bertulang.

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kolom Beton Bertulang

Kolom adalah elemen struktural vertikal yang berfungsi menyalurkan beban dari struktur atas ke fondasi. Kolom beton bertulang terdiri atas beton sebagai penahan gaya tekan dan baja tulangan sebagai penahan gaya tarik. Sengkang sebagai tulangan transversal berfungsi memberikan pengekangan lateral pada inti beton sehingga mampu meningkatkan kapasitas tekan serta daktilitas kolom

2.2 Variasi bentuk Sengkang

Sengkang merupakan tulangan transversal yang berfungsi memberikan pengekangan lateral pada inti beton, menjaga stabilitas tulangan longitudinal, serta meningkatkan kapasitas geser kolom. Bentuk yang umum digunakan meliputi persegi, crosstie, double crosstie, diamond, dan lingkaran, dengan efektivitas yang berbeda dalam memberikan *confinement*. Sengkang diamond memberikan kinerja terbaik pada kolom persegi karena distribusi konfinemennya lebih merata dan mampu meningkatkan kapasitas aksial secara signifikan [2]. Hal ini menegaskan bahwa pemilihan bentuk sengkang merupakan bagian penting dari strategi desain kolom beton bertulang.

2.3 Kolom Pendek dan Beban Aksial

Kolom pendek memiliki rasio kelangsingan ($\lambda \leq 22$) sesuai SNI 2847:2019, dengan kegagalan dominan berupa remuk beton atau luluhnya tulangan baja. Berbeda dengan kolom langsing yang dipengaruhi tekuk, kolom pendek banyak digunakan pada struktur bangunan bertingkat rendah hingga menengah karena kapasitas beban aksialnya yang tinggi. Beban aksial yang bekerja sejajar sumbu kolom berasal dari beban mati maupun hidup, dan sangat menentukan kapasitas tekan serta stabilitas kolom. Pada kondisi pembebanan tinggi, sengkang berperan penting dalam meningkatkan konfinemen inti beton dan menunda kegagalan.

2.4 Daktilitas

Daktilitas merupakan kemampuan kolom untuk mengalami deformasi plastis tanpa kehilangan kekuatan secara tiba-tiba. Faktor ini dipengaruhi oleh mutu material, rasio tulangan, serta efektivitas pengekangan lateral dari sengkang. Secara sederhana, daktilitas didefinisikan sebagai perbandingan antara simpangan ultimit (Δu) dengan simpangan saat leleh (Δy) :

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1)$$

dengan,

μ = faktor daktilitas

Δu = simpangan ultimit

Δy = simpangan saat leleh.

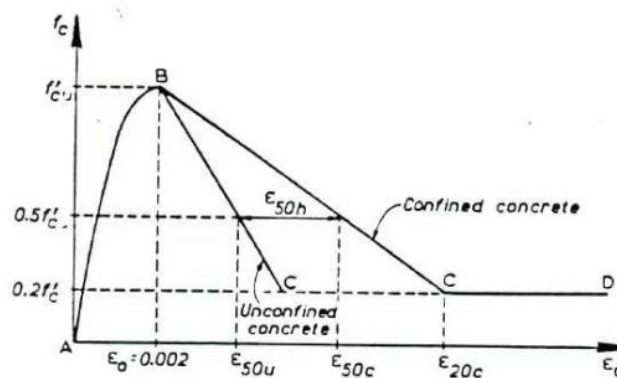
Nilai μ yang lebih tinggi menunjukkan bahwa kolom memiliki kapasitas deformasi plastis lebih baik, sehingga lebih andal menghadapi beban aksial maupun gempa.

2.5 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku struktur dengan cara mendiskritisasi model menjadi elemen-elemen kecil. Pendekatan ini memungkinkan analisis detail terhadap distribusi tegangan, regangan, dan perpindahan pada struktur yang kompleks. FEM banyak digunakan dalam bidang teknik sipil untuk mempelajari perilaku nonlinier beton bertulang, termasuk interaksi antara beton dan tulangan baja.

2.6 Hubungan Tegangan-Regangan Beton

Perilaku tegangan-regangan beton bersifat nonlinier, ditandai oleh kemampuan menahan tekan yang relatif tinggi namun lemah terhadap tarik. Salah satu model yang banyak dijadikan acuan adalah Kent dan Park (1971), yang menggambarkan perbedaan respons beton tak terkekang dan beton dengan pengekekangan lateral. Secara matematis, model ini dirumuskan sebagai berikut :



Gambar 1. Kurva Tegangan-Regangan Model Kent & Park (1971)

Model persamaan Kent & Park (1971) dijelaskan sebagai berikut :

Daerah A – B : $\varepsilon_0 < 0,002$

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{0,002} - \left(\frac{\varepsilon_c}{0,002} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Daerah B – C : $0,002 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{20c}$

$$f_c = f'_c [1 - Z(\varepsilon_c - 0,002)] \quad (3)$$

Dimana :

$$Z = \frac{0,5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - 0,002} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002 f'_c}{f'_c - 1000} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b^m}{s_h}} \quad (6)$$

Daerah C – D : $\varepsilon_c \geq \varepsilon_{20c}$

$$f_c = 0,2 f'_c \quad (7)$$

3 METODE PENELITIAN

3.1 Data Penelitian

Data penelitian yang digunakan pada penelitian meliputi data geometri kolom dan data properti kolom beton bertulang . Data geometri terdiri dari 6 (enam) kolom persegi dengan variasi bentuk sengkang. Data bahan dan material mencakup massa jenis, modulus elastisitas, dan angka Poisson

1) Data Material

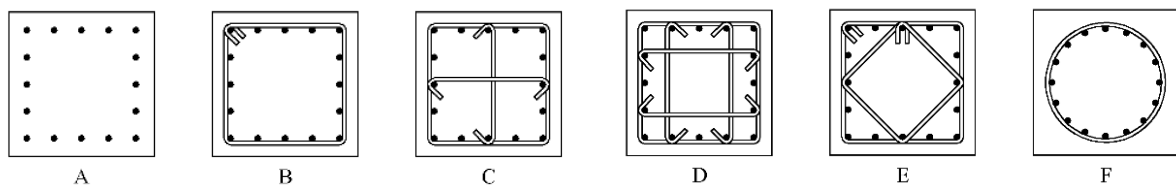
- Tegangan putus beton, $f'c$ = 29,1 MPa
- Tegangan leleh tulangan pokok (f_yl) = 420 MPa
- Tegangan leleh tulangan sengkang (f_yv) = 420 MPa
- Modulus Elastisitas Beton, E_c = 20111 MPa
- Modulus Elastisitas Baja, E_s = 200.000 MPa
- Berat isi Beton, γ_c = 2400 kg/m²
- Berat isi Baja, γ_s = 7850 kg/m²
- Angka Poisson Beton, μ_c = 0,2
- Angka Poisson Baja, μ_s = 0,3

2) Data Geometri

- Dimensi kolom = 500 × 500 mm
- Tinggi Kolom = 1500 mm

Tabel 1. Model Variasi Konfigurasi Sengkang Kolom

Model Kolom	Dimensi Penampang (mm)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Transversal	Deskripsi Bentuk Sengkang
A	500 x 500	16D22	-	Tanpa Sengkang
B	500 x 500	16D22	D13-100	Sengkang Biasa
C	500 x 500	16D22	D13-100	Sengkang Luar + 1 <i>Crosstie</i>
D	500 x 500	16D22	D13-100	Sengkang Luar + 2 <i>Crosstie</i>
E	500 x 500	16D22	D13-100	Sengkang Luar + <i>Diamond</i>
F	500 x 500	16D22	D13-100	Sengkang Luar Lingkaran/ <i>Circular</i>

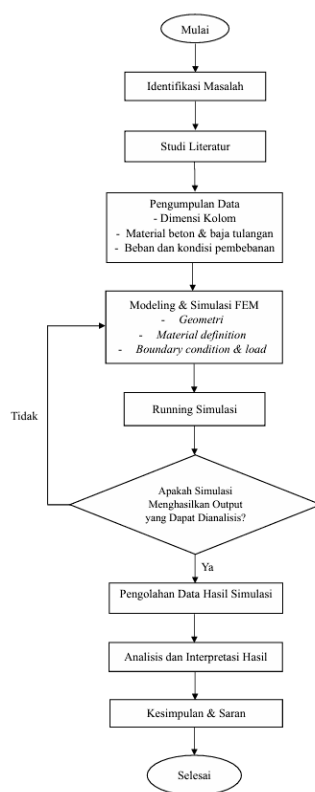


Gambar 2. Variasi Konfigurasi Sengkang

3.2 Metode dan Tahapan Penelitian

Penelitian ini diawali dengan kajian terhadap studi-studi sebelumnya mengenai kolom beton bertulang, variasi bentuk sengkang, serta penerapan *Finite Element Method* (FEM) Analisis dengan metode elemen hingga bertujuan untuk memperoleh pendekatan yang lebih akurat terhadap distribusi tegangan dan perpindahan (*displacement*) pada suatu struktur. Penentuan data geometri dan sifat material juga mengacu pada hasil penelitian terdahulu. Selanjutnya, analisis dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu menggunakan metode elemen hingga

3.3 Bagan Alir Penelitian



Gambar 3. Bagan Alir Penelitian

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi bentuk sengkang terhadap perilaku kolom pendek beton bertulang di bawah beban aksial. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga berbasis perangkat lunak dengan memodelkan enam variasi kolom, yaitu tanpa sengkang, sengkang biasa, *crossstie*, *double crossstie*, *diamond*, dan lingkaran. Hasil simulasi menunjukkan adanya perbedaan kapasitas aksial, daktilitas, serta hubungan tegangan-regangan pada masing-masing model. Perbandingan dilakukan untuk mengidentifikasi efektivitas sistem pengekangan dalam meningkatkan ketahanan kolom, sekaligus memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai peran variasi sengkang terhadap distribusi tegangan dan deformasi plastis beton.

4.1 Analisis Variasi Bentuk Senggang dengan Metode Numerik

1) Analisis Hubungan Gaya Aksial dan *Displacement*

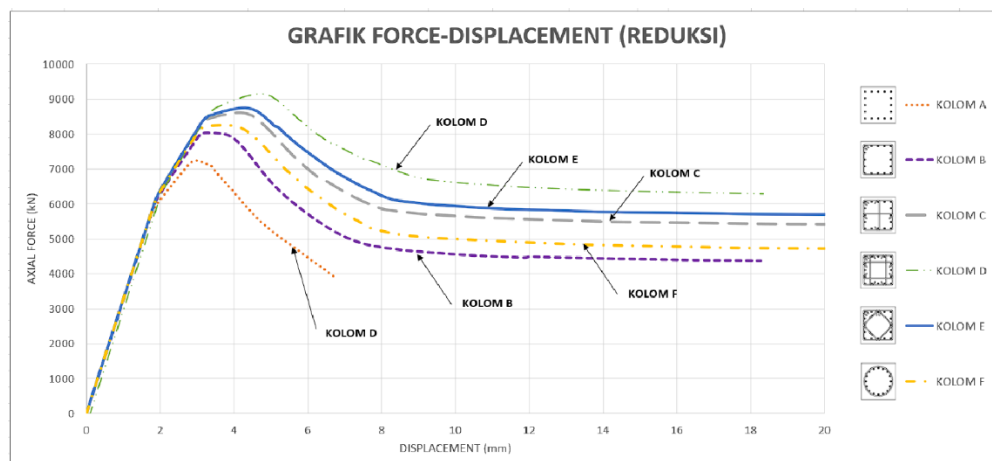
Output hubungan aksial *force* terhadap *displacement* ditunjukkan pada Tabel 2 ,Tabel 3 ,dan Gambar 4.

Tabel 2. Hasil *Output* Gaya Aksial Pada *Displacement*

<i>Displacement</i> uy (mm)	Gaya Aksial (kN)					
	Model Kolom A	Model Kolom B	Model Kolom C	Model Kolom D	Model Kolom E	Model Kolom F
0	0	0	0	0	0	0
2	7643	7868	7972	8040	7993	7951
4	9052	10034	10763	11437	10947	10298
6	5581	7133	8753	10152	9354	8047
8	4439	5947	7333	8843	7803	6538
10	4208	5696	7072	8257	7432	6249
12	4098	5610	6955	8086	7304	6135
14	4022	5546	6872	7983	7224	6035
16	3978	5496	6831	7916	7184	5979
18	3938	5467	6796	7866	7147	5932
20	-	-	6778	-	7131	5909

Tabel 3. Hasil Reduksi *Output* Gaya Aksial Pada *Displacement*

<i>Displacement</i> uy (mm)	Gaya Aksial (kN)					
	Model Kolom A	Model Kolom B	Model Kolom C	Model Kolom D	Model Kolom E	Model Kolom F
0	0	0	0	0	0	0
2	6115	6293	6378	6432	6395	6361
4	7242	8027	8610	9150	8758	8238
6	4464	5706	7002	8122	7483	6437
8	3551	4758	5866	7074	6242	5230
10	3367	4556	5658	6606	5945	4999
12	3278	4488	5564	6469	5844	4900
14	3218	4437	5497	6386	5779	4828
16	3182	4397	5465	6333	5747	4783
18	3150	4374	5437	6293	5718	4745
20	-	-	5422	-	5705	4727



Gambar 4. Grafik *Force-Displacement* Enam Model Kolom

Gambar 4. menunjukkan bahwa seluruh model kolom mengalami peningkatan gaya aksial hingga mencapai puncak, kemudian menurun pada fase pasca-puncak. Kolom D (*double crosstie*) mencapai gaya maksimum tertinggi sebesar 9150 kN, sedangkan kolom A (tanpa sengkang) terendah yaitu 7242 kN. Kolom E (*diamond*) dan C (*crosstie*) berada pada kisaran menengah dengan performa cukup baik. Hal ini menegaskan bahwa variasi sengkang berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kapasitas aksial kolom. Untuk memperjelas hasil tersebut, nilai gaya maksimum dan *displacement* puncak tiap model ditabulasikan pada Tabel 4, sedangkan nilai daktilitasnya dirangkum pada Tabel 5.

Tabel 4. Hasil Gaya dan *Displacement* Maksimum Enam Model Kolom

Model Kolom	Gaya Maksimum (kN)	<i>Displacement</i> Saat Gaya Maksimum (mm)
A	7242	3
B	8027	3,3
C	8610	4,2
D	9150	4,6
E	8758	4,3
F	8238	4

Tabel 5. Hasil Nilai Daktilitas Enam Model Kolom

Model Kolom	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas ($\mu = \Delta u / \Delta y$)
A	4,4	1,7	2,59
B	5,2	1,8	2,89
C	6,1	2	3,05
D	7,3	2,2	3,32
E	6,6	2,1	3,14
F	5,8	1,9	3,05

Berdasarkan hasil analisis, kolom D mencatat daktilitas tertinggi yaitu 3,32, menunjukkan kemampuan optimal dalam menahan deformasi besar sebelum kehilangan kekuatan secara tiba-tiba. Disusul oleh kolom E dengan nilai daktilitas 3,14 yang memiliki performa hampir setara dengan kolom D, cocok untuk struktur yang membutuhkan ketahanan deformasi. Kolom F menyusul dengan nilai daktilitas 3,05 berada pada kisaran menengah ke atas, cukup baik dalam menyerap deformasi plastis. Kolom C dengan nilai 3,05 juga menunjukkan fleksibilitas tinggi terhadap beban. Sedangkan Kolom B dengan nilai daktilitas 2,89 memiliki kemampuan deformasi lebih baik dibanding kolom dengan daktilitas terendah. Terakhir, kolom A memiliki nilai daktilitas paling rendah sebesar 2,59, menandakan keterbatasan dalam mengalami deformasi plastis sebelum mengalami kegagalan.

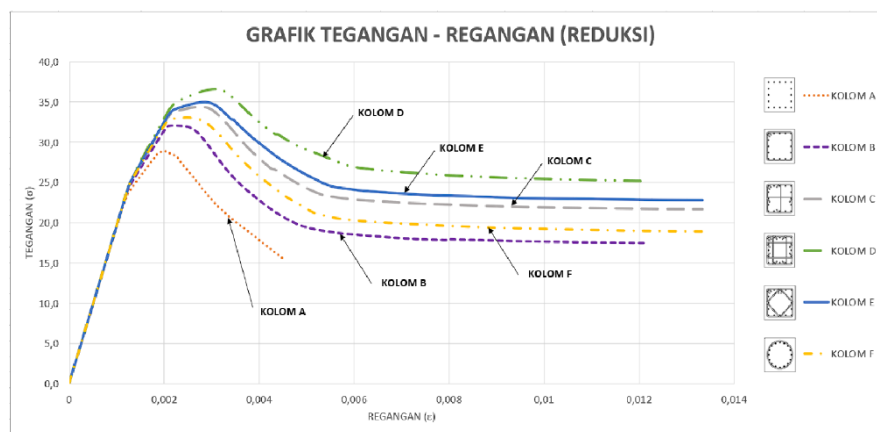
Tabel 6. Perbandingan Gaya Aksial Tekan (*Axial Force*)

Model Kolom	Kuat Tekan (kN)	Peningkatan terhadap Kuat Tekan Kolom A (%)	Besar Peningkatan (%)
A	7242	100	-
B	8027	10,85	10,85
C	8610	118,9	18,9
D	9150	126,35	26,35
E	8758	120,93	20,93
F	8238	113,76	13,76

Pada Tabel 6 menunjukkan bahwa variasi bentuk sengkang berpengaruh terhadap kapasitas tekan kolom. Kolom A (tanpa sengkang) memiliki kapasitas terendah. Saat menggunakan sengkang, kapasitas meningkat, terutama pada model D (*double crosstie*) yang mencapai peningkatan tertinggi sebesar 26,35% dibanding kolom A (tanpa sengkang). Model lain seperti kolom B (sengkang biasa), kolom C (*crosstie*), kolom E (*diamond*), dan kolom F (*circular*) juga menunjukkan performa yang lebih baik dibanding kolom A (tanpa sengkang).

2) Analisis Hubungan Tegangan dan Regangan

Analisis hubungan tegangan–regangan digunakan untuk menilai pengaruh variasi bentuk sengkang terhadap perilaku deformasi kolom. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Tegangan-Regangan (Reduksi)

Berdasarkan grafik diatas, dapat diambil nilai tegangan maksimum dan nilai regangan saat terjadi tegangan maksimum dapat dilihat pada Tabel 7 berikut:

Tabel 7. Tegangan Maksimum Tiap Model Kolom

Model Kolom	Tegangan Maksimum (MPa)	Peningkatan terhadap Tegangan Kolom A (%)	Besar Peningkatan (%)
A	29	100	-
B	32,1	100,85	10,85
C	34,4	118,9	18,9
D	36,6	126,35	26,35
E	35	120,93	20,93
F	33	113,76	13,76

Tabel 7 memperlihatkan perbandingan nilai tegangan maksimum masing-masing model kolom dengan Kolom A sebagai acuan. Kolom D (*double crosstie*) memberikan peningkatan paling signifikan, yaitu 26,35%, diikuti Kolom E (*diamond*) sebesar 20,93% dan Kolom C (*crosstie*) sebesar 18,9%. Sementara itu, Kolom B (sengkang biasa) dan Kolom F (*circular*) hanya menunjukkan peningkatan relatif lebih kecil, yakni 13,76% dan 10,85%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kompleks konfigurasi sengkang, semakin besar kontribusinya terhadap peningkatan kapasitas tegangan kolom, dengan *double crosstie* terbukti sebagai konfigurasi paling unggul.

Tabel 8. Regangan Saat Terjadi Tegangan Maksimum

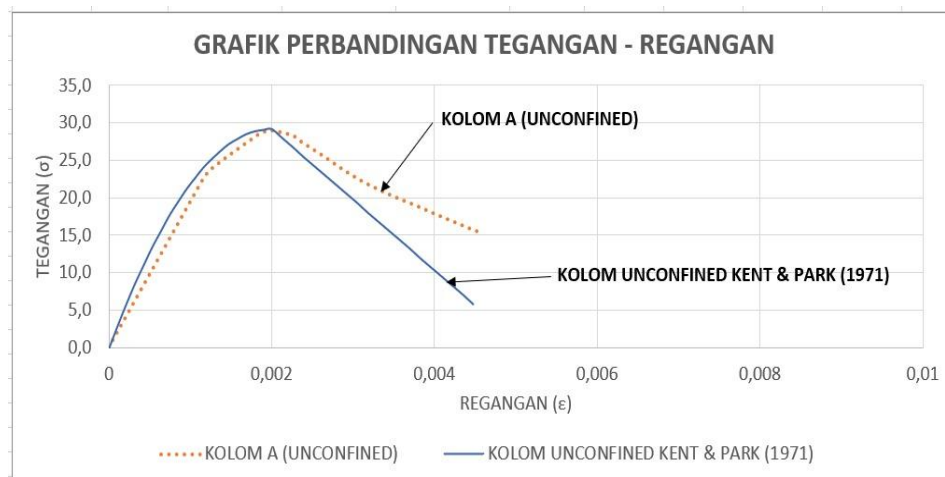
Model Kolom	Regangan pada Tegangan Maksimum (MPa)	Peningkatan terhadap Tegangan Kolom A (%)	Besar Peningkatan (%)
A	0,002	100	-
B	0,0022	110	10
C	0,0028	140	40
D	0,0031	153,3	53,3
E	0,0029	143,3	43,3
F	0,0027	133,3	33,3

Tabel 8 menunjukkan nilai regangan pada saat terjadi tegangan maksimum untuk masing-masing model kolom serta peningkatan tegangan maksimum dibandingkan dengan kolom A sebagai acuan. Dari tabel terlihat bahwa kolom D memiliki regangan tertinggi sebesar 0,0031, yang menghasilkan peningkatan tegangan maksimum sebesar 53,3%. Kolom E dan F juga menunjukkan peningkatan signifikan masing-masing 43,3% dan 33,3%. Sementara itu, kolom C dan B mengalami peningkatan lebih kecil, yaitu 40% dan 10%.

4.2 Perbandingan Analisis Numerik dengan Model Kent & Park (1971)

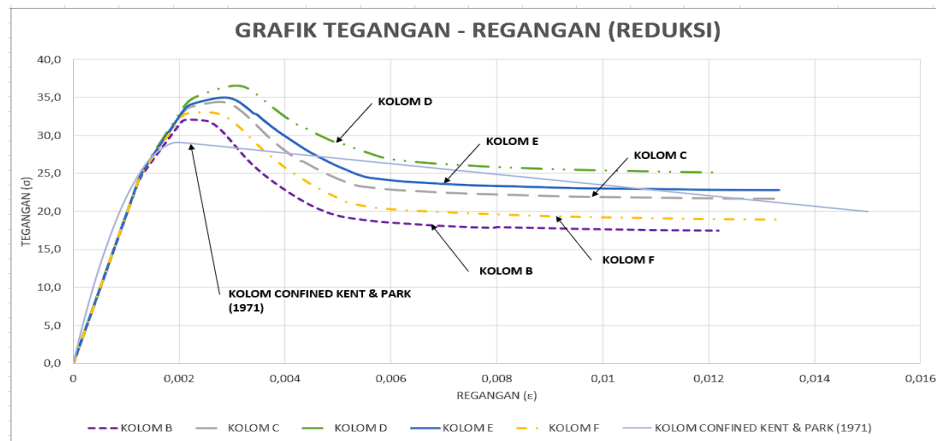
Perbandingan dilakukan menggunakan rumus Kent & Park yang disesuaikan dengan parameter beton kolom. Grafik tegangan-regangan *unconfined* dan *confined* dibandingkan dengan analisis numerik untuk menilai akurasi dan pengaruh konfigurasi sengkang, seperti ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

1) Kolom *Unconfined*



Gambar 6. Grafik Perbandingan Tegangan-Regangan Kolom *Unconfined*

2) Kolom *Confined*



Gambar 7. Grafik Perbandingan Tegangan-Regangan Kolom Confined

Tabel 9. Perbandingan Tegangan Maksimum Analisis Numerik dengan Model Kent & Park (1971)

Model Kolom	Tegangan Maksimum Numerik (MPa)	Tegangan Maksimum Kent & Park (1971) (MPa)	Selisih Tegangan Maksimum (MPa)	Selisih Tegangan Maksimum (%)
A	29	29,1	0,1	0,34
B	32,1	29,1	3	10,31
C	34,4	29,1	5,3	18,21
D	36,6	29,1	7,5	25,77
E	35	29,1	5,9	20,27
F	33	29,1	3,9	13,4

Tabel 10. Perbandingan Regangan Maksimum Analisis Numerik dengan Model Kent & Park (1971)

Model Kolom	Regangan Maksimum Numerik (MPa)	Regangan Maksimum Kent & Park (1971) (MPa)	Selisih Regangan Maksimum (MPa)	Selisih Regangan Maksimum (%)
A	0,0020	0,002	0	0
B	0,0022	0,002	0,0002	10
C	0,0028	0,002	0,0008	40
D	0,0031	0,002	0,0011	55
E	0,0029	0,002	0,0009	45
F	0,0027	0,002	0,0007	35

Berdasarkan hasil perbandingan antara hasil model numerik dan model Kent & Park (1971), diperoleh kesimpulan yaitu seluruh model kolom numerik menunjukkan tegangan maksimum yang lebih tinggi dibandingkan dengan model Kent & Park, yang tetap berada di angka 29,1 MPa. Selisih tertinggi terjadi pada Kolom D (senggang *double crosstie*), yaitu 7,5 MPa atau 25,77% lebih tinggi. Dari sisi regangan maksimum, semua model numerik juga menunjukkan peningkatan dibandingkan model Kent & Park (0,002). Peningkatan terbesar ditunjukkan oleh Kolom D (0,0031), yaitu +0,0011 atau +55% lebih besar. Sementara itu, Kolom A yang memiliki konfigurasi paling sederhana, menunjukkan nilai tegangan dan regangan yang identik atau mendekati model Kent & Park, menandakan kontribusi *confinement* minimum.

5 KESIMPULAN

Variasi bentuk sengkang terbukti berpengaruh besar terhadap peningkatan kapasitas aksial kolom beton bertulang. Besar peningkatan kapasitas model *double crosstie* mencapai 26,35%, sedangkan model dengan sengkang *diamond* dan *crosstie* masing-masing sebesar 20,93% dan 18,9% dari kolom tanpa pengekangan. Selain itu, model dengan pengekangan yang lebih efektif juga menghasilkan tegangan maksimum beton yang lebih tinggi, seperti pada model *double crosstie* yang mencapai 36,6 MPa dengan regangan puncak 0,0031 dibandingkan 35 MPa dengan regangan puncak 0,0028 pada model *diamond*. Hasil ini menegaskan bahwa bentuk sengkang yang lebih optimal membantu meningkatkan kekuatan tekan dan memperlambat kerusakan struktural. Dengan demikian, penggunaan bentuk seperti *double crosstie* dan *diamond* sangat direkomendasikan dalam desain struktur yang membutuhkan kapasitas aksial tinggi dan daya tahan yang besar.

Variasi bentuk sengkang juga memberikan pengaruh terhadap kemampuan deformasi dan daktilitas kolom beton bertulang. Kolom dengan sengkang *double crosstie* memiliki nilai daktilitas 3,32 lebih besar dibandingkan sengkang *diamond* yang memiliki nilai daktilitas sebesar 3,14. Sementara itu, kolom dengan sengkang *crosstie* dan sengkang *circular*/lingkaran memiliki nilai daktilitas yang sama yaitu sebesar 3,05. Kemudian, kolom dengan sengkang biasa dan kolom tanpa sengkang masing-masing hanya mencatat daktilitas sebesar 2,89 dan 2,59. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa semakin efektif pengekangan lateral yang diberikan oleh bentuk sengkang, semakin besar pula daktilitas dan kemampuan struktur dalam menghadapi deformasi plastis. Dengan demikian, model *double crosstie* dan *diamond* direkomendasikan untuk desain struktur yang memerlukan daktilitas tinggi dan ketahanan terhadap beban aksial dinamis seperti gempa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Allen, E., & Iano, J. (2008). *Fundamentals of building construction: Materials and methods* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- [2] Anam, M. K., Amir, F., & Sutrisno, M. (2024). Perbandingan kapasitas kolom beton bertulang berdasarkan variasi bentuk sengkang dengan analisis Finite Element Method. *Rekonstruksi Tadulako: Civil Engineering Journal on Research and Development*, 5(1), 9–16. <https://new.jurnal.untad.ac.id/index.php/renstra>.
- [3] ATC-24. *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1992.
- [4] Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019: Tata cara perencanaan struktur beton untuk bangunan gedung. Badan Standardisasi Nasional.
- [5] Bathe, K. J. (1996). *Finite element procedures*. Prentice Hall.
- [6] Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2001). *Concepts and applications of finite element analysis* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [7] Kent, D. C., & Park, R. (1971). *Flexural members with confined concrete*. *Journal of the Structural Division*, 97(7), 1969–1990.
- [8] Lee, J., & Fenves, G. L. (1998). *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures*. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), 892–900. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- [9] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Oñate, E. (1989). *A plastic-damage model for concrete*. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299–326. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- [10] McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2014). *Design of reinforced concrete* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- [11] P. Park and T. Paulay, *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York, 1975.
- [12] Reddy, J. N. (2006). *An introduction to the finite element method* (3rd ed.). McGraw-Hill.

- [13] Silaban, R. S., Tjitradi, D., & Taufik, S. (2020). Permodelan pengekangan kolom pada beton mutu normal dengan metode elemen hingga 3-D. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 8(2), 104–115. <https://doi.org/10.33084/mits.v8i2.1408>
- [14] Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The finite element method: Volume 1: The basis* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.