



PERBANDINGAN *BACKBONE CURVE* KOLOM MENGGUNAKAN METODE PENDEKATAN PERILAKU MEKANIS, XTRACT, DAN ASCE 41-17 TERHADAP HASIL EKSPERIMEN

Nisrina Luthfiyah^{1*}, William Ansel², Wilnando³, Faza Muhammad Izbik Fika Mumtaz⁴

^{1*,2,3,4}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10, Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia
(022) 2500935

Alamat E-mail: nisrina.luthfiyah.105@gmail.com

Info Artikel

Abstrak

Sejarah Artikel:

Diterima: Juli 2024
Disetujui: Agt 2024
Dipublikasikan: Des 2024

Keywords:

backbone curve, analytical approach method, XTRACT method, ASCE 41-17 method

Perilaku inelastik bangunan tahan gempa diharapkan mampu menahan beban siklik yang terjadi akibat beban gempa. Perilaku inelastik bangunan dapat dilihat dari kurva gaya-perpindahan. Kurva tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan beberapa metode pendekatan, tetapi dalam setiap metode pendekatan dapat memberikan nilai yang berbeda-beda. Pada penelitian ini, akan dibangun *backbone curve* dengan menggunakan tiga pendekatan, yaitu pendekatan analitik, *software* XTRACT, dan metode ASCE 41-17. Spesimen yang ditinjau adalah kolom segi empat dengan konfigurasi pengujian *single cantilever*. Parameter tinjauan yang ditinjau adalah jenis, jarak, dan luas tulangan serta rasio gaya aksial. *Backbone curve* yang didapat dibandingkan dengan *backbone curve* hasil eksperimen. Berdasarkan hasil analisis didapati bahwa metode paling konservatif adalah ASCE 41-17. Evaluasi dilakukan terhadap ketiga pendekatan yang digunakan dan parameter tinjauan.

Kata Kunci: *backbone curve*, metode pendekatan analitik, metode XTRACT, metode ASCE 41-17.

Abstract

The inelastic behavior of earthquake-resistant buildings is expected to be able to withstand the cyclic loads that occur due to earthquake loads. The inelastic behavior of a building can be seen from the force-displacement curve. The curve can be obtained using several approaches, but each approach can provide different values. In this study, a backbone curve will be constructed using three approaches, namely the analytical approach, XTRACT software, and the ASCE 41-17 method. The specimen under review is a rectangular column with a single cantilever test configuration. The review parameters were the type, spacing, and area of reinforcement as well as the axial force ratio. The backbone curve obtained is compared with the experimental backbone curve. Based on the analysis, it was found that the most conservative method was ASCE 41-17. Evaluation was conducted on the three approaches used and the parameters reviewed.

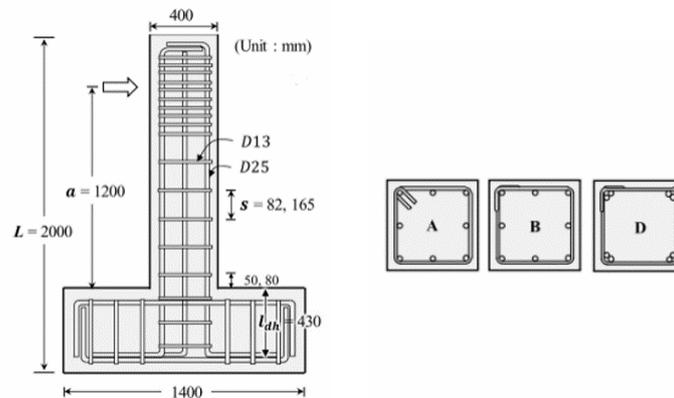
PENDAHULUAN

Kinerja struktur bangunan tahan gempa sangat mengandalkan nilai daktilitas dan kapasitas deformasi. Kegagalan tiba-tiba pada kegagalan geser tidak diharapkan terjadi selama struktur digunakan. Oleh karena itu, mekanisme kegagalan diharapkan terjadi pada mekanisme kegagalan lentur. Dalam situasi gempa, struktur dihadapkan pada beban siklik yang berpotensi menyebabkan degradasi cepat pada kapasitas geser. Struktur diharapkan memiliki perilaku inelastik yang mampu menahan beban gempa yang terjadi. Pendekatan untuk memahami perilaku inelastik struktur akibat beban siklik melibatkan penelitian terhadap parameter-parameter kritis seperti mutu material, diameter tulangan, rasio beban aksial, dan rasio tulangan pengekang, dan sebagainya. Perilaku inelastik bangunan salah satunya dapat dilihat melalui kurva *backbone curve* yang dapat diperoleh dengan menggunakan beberapa metode pendekatan seperti, perhitungan berdasarkan pendekatan perilaku mekanis, software XTRACT, dan metode ASCE 41-17. Hasil dari ketiga metode tersebut kemudian akan dibandingkan dengan data eksperimental untuk mengukur sejauh mana ketepatan prediksi yang dihasilkan oleh masing-masing metode.

TINJAUAN PUSTAKA

Pada penelitian ini spesimen yang digunakan bersumber dari penelitian Kim, dkk (2019). Kim, dkk (2019) melakukan pengujian siklik pada kolom dengan detail tulangan ikat terbatas. Pengujian dilakukan dengan memberikan gaya siklik lateral pada kolom yang diberikan gaya aksial uniform. Gaya aksial dijaga tetap selama pembebanan lateral siklik. Terdapat 6 spesimen yang uji pada penelitian Kim dkk (2019). Pada penelitian ini dilakukan peninjauan terhadap 5 spesimen, yaitu spesimen A, B, C, D, dan E. Dimensi dan detail tulangan dari spesimen ditunjukkan pada Gambar 1. Parameter tinjauan yang ditinjau adalah jenis, jarak, dan luas tulangan serta rasio gaya aksial. Dimensi penampang kolom adalah 400 mm × 400 mm dengan tinggi bersih kolom adalah 1200 mm. Ilustrasi terhadap tiga tipe penampang dijelaskan pada Gambar 1. Penjelasan detailing setiap spesimen tinjauan dijelaskan pada Tabel 1.

Berdasarkan hasil pengujian, mutu beton memiliki kekuatan tekan rata-rata $f_c' = 32$ MPa. Kekuatan leleh dari tulangan diagonal D25 adalah $f_y = 571$ MPa, masing-masing. Kekuatan leleh dari tulangan transversal D13 yang digunakan untuk tulangan transversal adalah $f_{yt} = 500$ MPa. Dari hasil pengujian eksperimen yang dilakukan diperoleh kurva *backbone curve*. *Backbone curve* ini selanjutnya akan dibandingkan dengan tiga pendekatan yang dilakukan.



Gambar 1 Spesimen Uji

Tabel 1 Detailing Senggang dan Beban Aksial Spesimen

Spesimen	Tipe Penampang	Spasi (mm)	Ratio Tulangan Senggang	Rasio Beban Aksial
A	A	165	0.39	0.17
B	B	165	0.39	0.17
C	B	82	0.77	0.17
D	D	165	0.39	0.10
E	D	82	0.77	0.17

Pendekatan

Metode ini mengikuti konsep pendekatan menggunakan hubungan antara tegangan-regangan dan analisis penampang untuk memperhitungkan nilai momen yang terjadi. Referensi utama dalam pendekatan perhitungan adalah Buku *Jack Moehle – Seismic Design of Reinforce Concrete Buildings* (20xx).

Pendefinisian tegangan material beton sebelum retak adalah konstan sebesar $0.85f_c'$ setelah melewati regangan 0.001 dengan regangan maksimum 0.004. Setelah material retak, nilai tegangan akan mengalami degradasi kekuatan seiring bertambahnya regangan. Untuk material baja, nilai $f_{y,expected} = 571 \text{ MPa}$ dengan tegangan nominal diasumsikan $f_u = 1.5f_y$.

Unconfined concrete

$$f_c' = \begin{cases} 0.85f_c' \left(\frac{\varepsilon}{0.001} \right) & 0 < \varepsilon < 0.001 \\ 0.85f_c' & 0.001 < \varepsilon < 0.004 \end{cases} \quad (1)$$

Confined concrete

$$f'_c = \begin{cases} Kf'_c \left(\frac{\varepsilon}{0.002K} \right) & 0 < \varepsilon < 0.002K \\ \left(\frac{\varepsilon - 0.002K}{\varepsilon_{20c} - 0.002K} \right) (-0.8Kf'_c) + Kf'_c & 0.002K < \varepsilon < 0.2Kf'_c \end{cases} \quad (2)$$

Steel

$$f_y = \begin{cases} E_s \varepsilon & 0 < \varepsilon < \frac{f_y}{E_s} \\ f_y & \frac{f_y}{E_s} < \varepsilon < 0.01 \\ 376093\varepsilon^3 - 122201\varepsilon^2 + 12331\varepsilon + 460 & 0.01 < \varepsilon < 0.08 \end{cases} \quad (3)$$

Nilai momen yang akan dicari memiliki beberapa fase yaitu *cracking*, *yielding*, *spalling*, dan *post-spalling*. Prinsip yang digunakan adalah kesetimbangan antara gaya tarik dan tekan pada penampang yang ditinjau. Untuk gaya tarik akan diberikan oleh tulangan tarik

$$\varepsilon_{tarik} = \frac{\varepsilon_c}{c} (d - c) \quad (4)$$

$$f_{tarik} = E \varepsilon_{tarik} \quad (5)$$

$$T = f_{tarik} A_s \quad (6)$$

Untuk gaya tekan akan diberikan oleh tulangan tekan dan beton

$$\varepsilon_{tekan} = \frac{\varepsilon_c}{c} (c - d') \quad (7)$$

$$f_{tekan} = E \varepsilon_{tekan} \quad (8)$$

$$C_s = f_{tekan} A'_s \quad (9)$$

$$C_c = \text{luas penampang} \times b_{beton} \quad (10)$$

Kesetimbangan harus dicapai yaitu $\Sigma H = 0$. Nilai momen bisa didapatkan dengan perjumlahan dari perkalian gaya terhadap jarak ke titik tulangan tarik. Setelah mendapatkan nilai momen, dapat dihitung nilai kurvatur setiap tahap dengan membagikan regangan, ε , terhadap tinggi ke garis netral, y , sehingga $\varphi = \frac{\varepsilon}{y}$.

Konversi momen-kurvatur menjadi $P - \Delta$ menggunakan pembagian momen terhadap panjang dari titik pembebanan untuk mendapatkan nilai geser maksimum dan perhitungan defleksi yang memperhitungkan *cracking*, $\delta_{cr} = \frac{\varphi l^2}{3}$ dengan penambahan defleksi akibat *slip* untuk *yielding* dan defleksi pada sendi plastis untuk *spalling*.

Xtract

Salah satu perangkat lunak yang dapat digunakan untuk mendapatkan perilaku non-linear elemen struktur balok dan kolom adalah XTRACT. Pada penelitian ini XTRACT akan digunakan untuk mendapatkan kurva momen-kurvatur yang kemudian akan dihitung nilai P- Δ dengan

perhitungan manual. Adapun tahapan yang dilakukan untuk mendapatkan momen-kurvatur adalah sebagai berikut.

$$\Delta = \begin{cases} \left(\frac{1}{2}L\phi\right)\left(\frac{2}{3}L\right), \phi \leq \phi_y \\ \left(\frac{1}{2}L\phi_y\right)\left(\frac{2}{3}L\right) + ((\phi - \phi_y)L_p)\left(L - \frac{L_p}{2}\right), \phi_u > \phi > \phi_y \end{cases} \quad (11)$$

Panjang sendi plastis dihitng dengan menggunakan persamaan yang diusulkan oleh Paulay dan Priestley (1992)

$$L_p = 0,08l + 0,022d_b f_y \text{ (MPa)} \quad (12)$$

Spesimen yang diteliti adalah kolom kantilever, sehingga hubungan antara P dan M mengikuti persamaan berikut

$$P = \frac{M}{L} \quad (13)$$

ASCE 41-17

Berdasarkan code ASCE 41-17 dapat dibuat *backbone curve* seperti pada Gambar 8 dengan menghitung *modelling parameter* yaitu nilai a, b, dan c dengan rumus yang sudah disediakan oleh ASCE 41-17 pada tabel 10-8 sebagai berikut

$$a = \left(0,042 - 0,043 \frac{N}{A_g f'_c} + 0,63\rho_t - 0,023 \frac{V_y}{V_{col}}\right) \geq 0 \quad (14)$$

$$b = \frac{0,5}{5 + \frac{N}{0,8A_g f'_c} \frac{1}{\rho_t} \frac{f'_c}{f_{yt}}} - 0,01 \geq a \quad (15)$$

$$c = 0,24 - 0,4 \frac{N}{A_g f'_c} \geq 0 \quad (16)$$

Dengan:

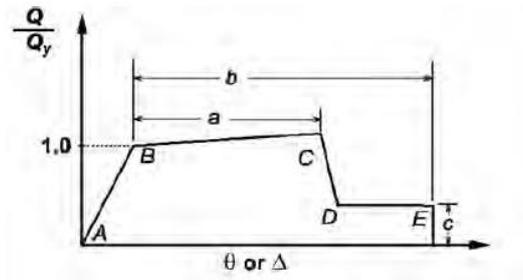
N = Beban aksial pada kolom

ρ_t = Rasio luas tulangan transversal ($\rho_t = \frac{A_v}{bd}$)

V_y = Kekuatan leleh struktur (diambil dari hasil perhitungan manual)

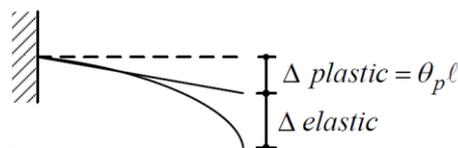
$$V_{col} = \alpha_{col} \left(\frac{A_v f_{yt} d}{s}\right) + \lambda \left(\frac{0,5\sqrt{f'_c}}{\frac{M_u}{V_u} d} \sqrt{1 + \frac{N}{0,5A_g \sqrt{f'_c}}}\right) 0,8A_g \quad (17)$$

Dimana $\lambda = 1$ untuk beton normal dan α_{col} adalah koefisien efektivitas tulangan geser menahan gaya geser. $\alpha_{col} = 1$ untuk $\frac{s}{d} < 0,75$ dan nilainya 0 untuk $\frac{s}{d} > 1$. Dan nilainya bervariasi linear untuk $\frac{s}{d}$ antara 0,75 sampai 1



Gambar 2 Backbone Curve berdasarkan ASCE 41-17

Terdapat suatu catatan bahwa rumus untuk mendapatkan *modelling parameter* sesuai dengan ASCE 41-17 tidak berlaku jika nilai $\rho_t < 0,0005$. Sehingga untuk memodelkan specimen B, C, D, dan E dimana menggunakan kait 90° dan dianggap tidak ada tulangan transversal yang bekerja, nilai ρ_t tidak diambil 0 tapi diambil $\rho_t = 0,0005$ supaya rumus ASCE 41-17 dapat tetap berlaku. Pada ASCE 41-17 ini hanya dapat menghitung deformasi yang dapat dicapai suatu kolom (θ atau Δ) dan tidak dapat dihitung gaya yang dapat dipikul (Q) sehingga untuk menghasilkan kurva P- Δ digunakan nilai P berdasarkan hasil dari XTRACT. Nilai deformasi yang diperoleh dari rumus ASCE 41-17 tersebut masih berupa rotasi plastic (θ_p), sehingga untuk menghitung defleksi total (Δ) harus dihitung dengan memperhitungkan defleksi plastis dan defleksi elastis sebagai berikut.



Gambar 3 Ilustrasi Defleksi yang Terjadi

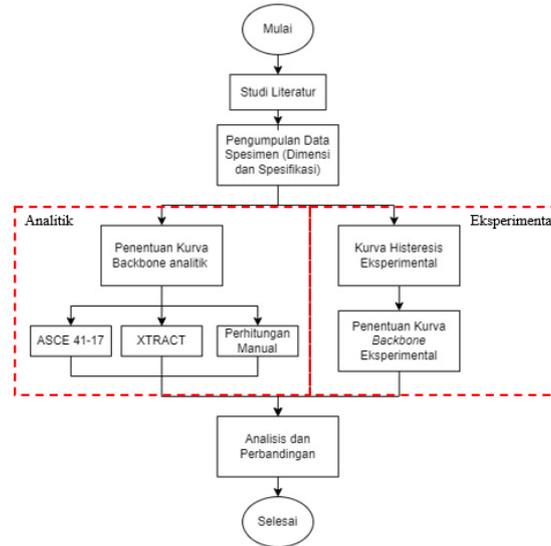
$$\Delta_{plastic} = \theta_p l \quad (18)$$

$$\Delta_{elastic} = \frac{\phi_y l^2}{3} \quad (19)$$

Dimana l adalah panjang kolom dan ϕ_y adalah kurvatur leleh yang nilainya diambil dari perhitungan dengan metode pendekatan.

METODE

Metode penelitian berisi detail pelaksanaan penelitian mulai dari persiapan data atau sampel sampai analisa dan pengujian yang dilakukan. Metodologi yang dilakukan dalam studi ini mengikuti diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 4.

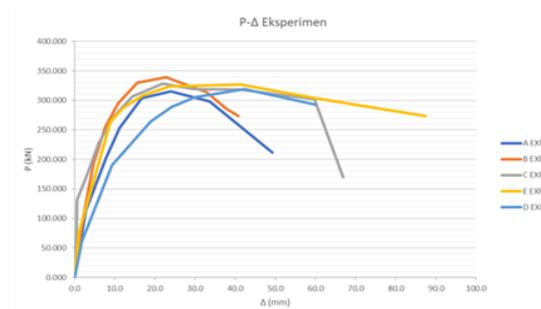


Gambar 4 Diagram Alir Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan melakukan kajian literatur mengenai perilaku inelastik elemen balok dan kolom pada kondisi pembebanan siklik. Perilaku inelastik yang ditinjau utamanya adalah hubungan antara *load-deflection* yang terjadi. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian-penelitian terdahulu. Data yang dikumpulkan adalah data mengenai *property material*, properti penampang, konfigurasi tulangan longitudinal, transversal, tulangan ikat, serta perilaku siklik hasil pengujian spesimen. Data yang didapat akan dimodelkan dan dilakukan perhitungan dengan tiga metode untuk mendapatkan nilai $P-\Delta$. Tiga metode tersebut adalah pendekatan perilaku mekanik, XTRACT, dan ASCE 41-17. Selanjutnya hasil yang didapatkan dengan menggunakan tiga metode tersebut akan dibandingkan dengan hasil eksperimen. Selanjutnya akan dilakukan analisis dan pembahasan dari hasil setiap metode yang dilakukan dan perbandingan pengaruh sudut kait sengkang, spasi, dan tulangan *bundle*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dilakukan perbandingan pengaruh sudut kait sengkang, spasi sengkang, dan tulangan longitudinal *bundle* terhadap perilaku dari elemen kolom ketika dikenakan beban lateral. Berikut ditampilkan pengaruh dari setiap parameter tersebut berdasarkan hasil dari eksperimen.



Gambar 5 Backbone Curve Eksperimen

Berdasarkan grafik tersebut maka diperoleh hasil sebagai berikut

- Pengaruh sudut kait

Pengaruh sudut kait dapat dilihat dengan membandingkan kurva specimen A (kait 135°) dan specimen B (kait 90°). Diperoleh bahwa kolom dengan kait seismik 135° memiliki daktilitas yang lebih besar yaitu sekitar 28% dan kekuatan yang kurang lebih sama dibandingkan dengan kolom dengan kait 90°. Hal ini dikarenakan kait 135° lebih mengikat dan dapat memberikan efek kekangan pada inti beton.

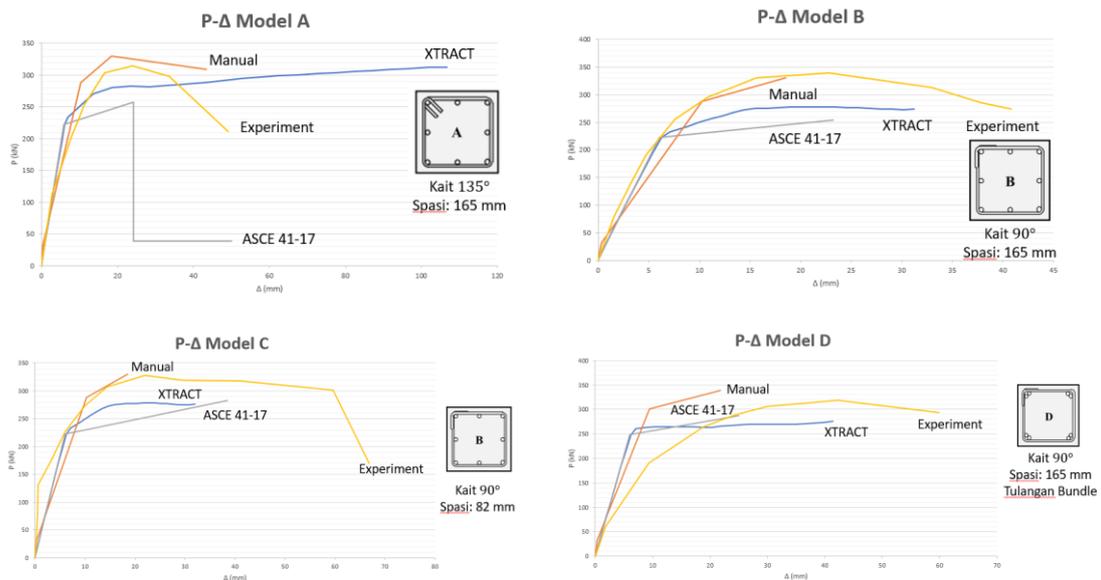
- Pengaruh spasi sengkang

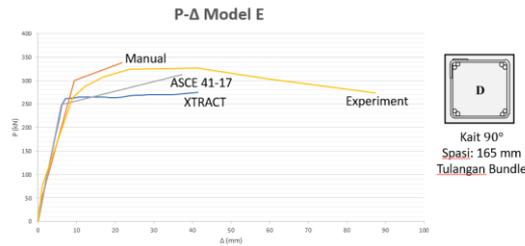
Pengaruh spasi sengkang dapat dilihat dengan membandingkan kurva specimen B (spasi 165 mm) dan specimen C (spasi 82 mm). Diperoleh bahwa kolom dengan sengkang yang lebih rapat memiliki daktilitas lebih besar yaitu sekitar 39% dan kekuatan yang kurang lebih sama. Hal ini karena dengan spasi yang kecil, pengaruh *arching* akan lebih kecil juga.

- Pengaruh tulangan *bundle*

Pengaruh tulangan *bundle* dapat dilihat dengan membandingkan kurva specimen C (tidak menggunakan tulangan *bundle*) dan specimen E (menggunakan tulangan *bundle*). Diperoleh bahwa kolom dengan menggunakan tulangan *bundle* memiliki daktilitas lebih besar yaitu sekitar 23% dan kekuatan yang kurang lebih sama. Hal ini dikarenakan dengan adanya tulangan *bundle* akan memperkecil zona kompresi (c) sehingga membuat kurvatur semakin besar dan berdampak pada defleksi yang lebih besar juga

Kemudian dilakukan perbandingan hasil kurva P-Δ dari perhitungan manual, metode XTRACT, dan metode ASCE 41-17 terhadap hasil dari *experiment* dan diperoleh hasil sebagai berikut.





Gambar 6 Backbone Curve Setiap Spesimen

Diperoleh perbandingan dari ketiga metode yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Dibandingkan juga nilai V_{max} dan $\Delta_{ultimate}$ dari masing masing metode seperti pada Tabel 4. Secara umum metode yang paling konservatif adalah metode ASCE 41-17 dikarenakan selalu diperoleh nilai V_{max} dan $\Delta_{ultimate}$ yang jauh lebih kecil dibandingkan hasil aktual pada eksperimen

Tabel 2 Perbandingan Ketiga Metode

<u>Pendekatan Perilaku Mekanis</u>	XTRACT	ASCE 41-17
<p><u>Kelebihan</u></p> <p>1. Dapat memperhitungkan beban dan defleksi disetiap kondisi sebelum <i>hoop fracture</i></p> <p><u>Kekurangan</u></p> <p>1. Tidak memperhitungkan kontribusi beban aksial kolom</p> <p>2. Setelah <i>hoop fracture</i>, dianggap komponen langsung runtuh, tidak ada deformasi tambahan lagi</p> <p>3. Kontribusi transversal hanya berpengaruh pada pendefinisian <i>confined concrete</i> dan tidak mempertimbangkan sudut kait</p>	<p><u>Kelebihan</u></p> <p>1. Konservatif, karena grafiknya selalu berada dibawah grafik experimental</p> <p>2. Dapat memperhitungkan beban dan defleksi disetiap kondisi sebelum <i>hoop fracture</i></p> <p><u>Kekurangan</u></p> <p>3. Setelah <i>hoop fracture</i>, dianggap komponen langsung runtuh, tidak ada deformasi tambahan lagi</p>	<p><u>Kelebihan:</u></p> <p>1. Konservatif, karena grafiknya berada dibawah grafik experimental</p> <p>2. Mempertimbangkan kontribusi beban aksial kolom yang bekerja.</p> <p>3. Dapat memperhitungkan P-Δ setelah <i>hoop fracture</i></p> <p><u>Kekurangan</u></p> <p>1. Tidak dapat menghitung gaya yang bekerja, slope. Hanya memperhitungkan kapasitas rotasi atau defleksi.</p> <p>2. Hanya dapat digunakan jika $\rho_t > 0,0005$</p>

Tabel 3 Perbandingan nilai V_{max} dan $\Delta_{ultimate}$

Spesimen	Hasil Analisis Kapasitas Geser Maksimum (V_{max}) dan Perpindahan Ultimate ($\Delta_{ultimate}$) Tiap Metode							
	Eksperimen		Pendekatan ASCE		Pendekatan XTRACT		Pendekatan Analitik	
	$V_{max,exp}$ (kN)	$\Delta_{ult,exp}$ (mm)	$V_{max,ASCE}$ (kN)	$\Delta_{ult,ASCE}$ (mm)	$V_{max,XTRACT}$ (kN)	$\Delta_{ult,XTRACT}$ (mm)	$V_{max,analitik}$ (kN)	$\Delta_{ult,analitik}$ (mm)
A	315.00	49.20	257.34	50.07	312.83	106.94	330.52	41.59
B	339.00	40.80	254.35	23.24	278.00	31.26	330.52	18.54
C	328.00	66.82	282.50	38.49	278.33	32.00	330.52	18.54
D	319.00	59.91	287.17	25.06	275.42	41.40	338.29	21.78
E	327.00	87.37	312.31	37.35	275.42	41.40	338.29	21.78

Tabel 4 Perbandingan Tiap Metode terhadap Eksperimen

Perbandingan Kapasitas Geser Maksimum (V_{max}) dan Perpindahan Ultimate ($\Delta_{ultimate}$) terhadap Hasil Eksperimen								
Spesimen	Metode Eksperimen		Pendekatan ASCE		Pendekatan XTRACT		Pendekatan Analitik	
	$V_{max,exp.}$ (kN)	$\Delta_{ult,exp}$ (mm)	$V_{max,ASCE}/V_{exp.}$	$\Delta_{ult,ASCE}/\Delta_{exp.}$	$V_{max,XTRACT}/V_{exp.}$	$\Delta_{ult,XTRACT}/\Delta_{exp.}$	$V_{max,analitik}/V_{exp.}$	$\Delta_{ult,analitik}/\Delta_{exp.}$
A	315.00	49.20	0.82	1.02	0.99	2.17	1.05	0.85
B	339.00	40.80	0.75	0.57	0.82	0.77	0.97	0.45
C	328.00	66.82	0.86	0.58	0.85	0.48	1.01	0.28
D	319.00	59.91	0.90	0.42	0.86	0.69	1.06	0.36
E	327.00	87.37	0.96	0.43	0.84	0.47	1.03	0.25
Rata-rata			0.86	0.60	0.87	0.92	1.03	0.44
CoV			0.08	0.28	0.05	0.56	0.01	0.36

Berdasarkan pada Tabel 5 yaitu nilai perbandingan terhadap hasil eksperimen didapatkan gaya maksimum yang paling mendekati hasil eksperimen adalah metode pendekatan mekanis. Sedangkan nilai defleksi maksimum yang paling mendekati eksperimen adalah metode ASCE 41-17.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Metode pendekatan yang paling konservatif adalah berdasarkan ASCE 41-17.
2. XTRACT tidak dapat menangkap perilaku elemen yang mengalami kegagalan geser.
3. Pada XTRACT yang biasa diambil adalah nilai gayanya sedangkan pada nilai deformasinya biasanya terlalu *overshot*. Sehingga untuk deformasi lebih baik menggunakan ASCE 41-17.
4. Untuk gaya aksial kecil, kait sengkang tidak terlalu berpengaruh, yang berpengaruh adalah spasi sengkang (karena *arching* pada spasi lebih kecil akan lebih kecil juga)

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada pihak terkait yang telah membantu dan bekerjasama demi kelancaran penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. ASCE 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings
2. Biskinis, D. E., Roupakias, G. K., & Fardis, M. N. (2004). Degradation of Shear Strength of RC Members with Inelastic Cyclic Displacements. ACI Structural.
3. Choi, M.-H. & Lee, C.H. (2022). Seismic Behavior of Existing Reinforced Concrete Columns with Non-Seismic Details under Low Axial Loads.
4. Kim, C.-G., Park, H.-G., & Eom, T.-S. (2019). Cyclic Load Test and Shear Strength Degradation Model for Columns with Limited Ductility Tie Details. Journal of Structural Engineering, 145(2).

5. Li, Y.-A., & Hwang, S.-J. (2017). Prediction of Lateral Load Displacement Curves for Reinforced Concrete Short Columns Failed in Shear. *Journal of Structural Engineering*, 143(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001656](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001656)
6. (n.d.). *Jack Moehle - Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings* McGraw-Hill Professional (2014).
7. Narayanan, S. & Elmenhawi, A. (2009). Plastic Hinge Length of Reinforced Concrete Columns Discussion Effect of angle stiffeners on the strength and stiffness of CFS beams View project Sustainable design View project.
8. Pokhrel, Mandeep & Bandelt, Matthew. (2019). Plastic Hinge Behavior and Rotation Capacity in Reinforced Ductile Concrete Flexural Members. *Engineering Structures*. 200. 109699. [10.1016/j.engstruct.2019.109699](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109699).
9. Wang, J., Yang, J., & Cheng, J. (2018). Experimental Study of Seismic Behavior of High-Strength RC Columns Strengthened with CFRP Subjected to Cyclic Loading.
10. Zhao, X., Wu, Y., Leung, A., & Lam, H. (2011). Plastic hinge length in reinforced concrete flexural members.