



KAJIAN HUBUNGAN DAKTILITAS KURVATUR TERHADAP BERBAGAI RASIO TULANGAN LENTUR PADA BETON KONVENSIONAL & GLASS FIBER

Taris Zulqisthi Masulili^{1*}, Willy Susanto², I Gusti Agung Arie Krismayanti³

^{1*,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132
Telp. (022) 2500935

Alamat E-mail: 25022038@mahasiswa.itb.ac.id

Info Artikel

Abstrak

Sejarah Artikel:

Diterima: Maret 2024
Disetujui: April 2024
Dipublikasikan: Des 2024

Keywords:

Curvature, Ductility,
Earthquake Structure

Perencanaan struktur bangunan terhadap gempa sangat penting untuk memastikan keruntuhan inelastis terbatas pada sendi plastis dalam balok-balok. Daktilitas dan kapasitas deformasi inelastis yang cukup diperlukan, terutama dalam struktur beton bertulang, di mana ketahanan terhadap kegagalan getas penting untuk integritas struktural. Dalam zona seismik, desain struktur dengan perilaku daktail diperlukan, dengan kekuatan deformasi yang melampaui elastisitas tanpa kehilangan kemampuan operasional. Perhitungan daktilitas kurvatur penampang pada sendi plastis diperlukan untuk menentukan faktor jenis struktur. Analisis menunjukkan bahwa rasio tulangan lentur, jenis material, dan geometri penampang mempengaruhi daktilitas. Rasio tulangan lentur yang besar meningkatkan kapasitas penampang untuk menahan momen, tetapi tidak signifikan meningkatkan kapasitas kurvatur. Penggunaan beton *fiber* meningkatkan regangan, namun beton konvensional memiliki nilai daktilitas kurvatur yang lebih baik. Penampang persegi cenderung memiliki daktilitas lebih baik daripada penampang lingkaran dengan luas yang hampir sama. Penentuan rasio tulangan lentur yang efektif penting untuk meningkatkan kemampuan elemen struktur menahan gaya-gaya gempa.

Kata Kunci: daktilitas, kurvatur, struktur gempa

Abstract

Earthquake resistance structural design is essential to ensure that inelastic collapse is limited to plastic joints in beams. Sufficient ductility and inelastic deformation capacity are required, especially in reinforced concrete structures, where resistance to brittle failure is important for structural integrity. Reinforced concrete columns must be designed to prevent complete collapse during an earthquake. Calculation of the ductility of the cross-section curvature at plastic joints is required to determine the type factor of the structure. The analysis shows that the flexural reinforcement ratio, material type, and cross-section geometry affect the ductility. A large flexural reinforcement ratio increases the capacity of the section to resist moments, but does not significantly increase the curvature capacity. The use of fiber concrete increases strain, but conventional concrete has better curvature ductility values. Square sections tend to have better ductility than circular sections of similar area. Determination of effective flexural reinforcement ratio is important to improve the ability of structural elements to resist earthquake forces.

✉ Alamat korespondensi:

ISSN 2527-7073

Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota
Bandung, Jawa Barat 40132
E-mail: 25022038@mahasiswa.itb.ac.id

PENDAHULUAN

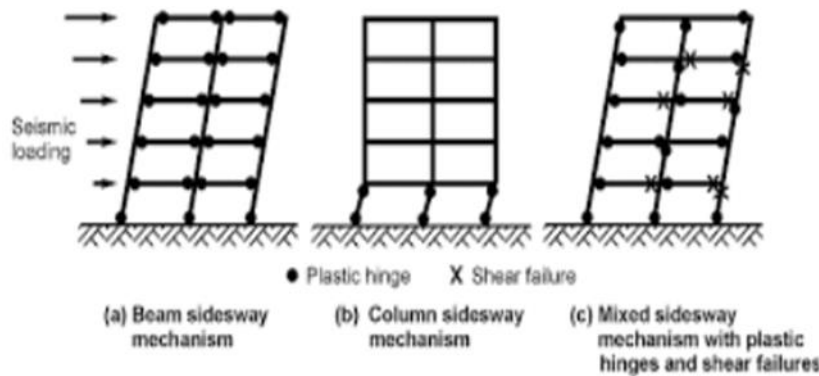
Pada umumnya perencanaan struktur bangunan terhadap gempa yang didasarkan pada cara “Fully Elastic” tidaklah ekonomis. Dalam rangka mengatasi hal tersebut, harus dapat dijamin bahwa keruntuhan inelastis yang terjadi selama gempa terbatas pada daerah sendi plastis daktail dalam balok-balok. Hal ini dapat dicapai jika struktur mempunyai daktilitas dan kapasitas deformasi inelastis yang cukup. Daktilitas struktur beton bertulang adalah sifat yang diinginkan di mana ketahanan terhadap kegagalan getas selama lentur diperlukan untuk memastikan integritas struktural. Dalam struktur beton bertulang, kolom beton bertulang adalah salah satu elemen yang paling penting elemen yang paling krusial di bawah beban gempa. Mekanisme kolom sangat penting untuk mencegah keruntuhan total pada saat terjadi gempa bumi. Pada zona seismik, penting untuk mendesain struktur, dengan kekuatan deformasi yang melampaui deformasi elastis tanpa kehilangan kemampuannya untuk tetap beroperasi, dengan kata lain mendesain struktur dengan perilaku daktail. Berdasarkan hal tersebut, maka perlu dihitung daktilitas kurvatur penampang struktur beton pada sendi-sendi plastis pada elemen struktur. Hal ini dimaksudkan untuk memperoleh nilai daktilitas *displacement* struktur tertentu yang nantinya akan digunakan untuk mendapatkan faktor jenis struktur K yang akan dipakai dalam desain dan perencanaan struktur.

TINJAUAN PUSTAKA

Pengaruh Daktilitas Pada Elemen Struktur

Daktilitas didefinisikan kemampuan material untuk menahan deformasi yang besar tanpa adanya runtuh sebelum mengalami kegagalan. Kemampuan suatu struktur untuk mengalami simpangan plastis secara berulang setelah mencapai leleh pertama sambil mempertahankan sebagian besar kemampuan awalnya dalam memikul beban dinyatakan sebagai rasio antara perubahan bentuk inelastisitas total dari struktur sebelum runtuh dan perubahan bentuk pada batas elastis. Dalam kasus gempa, daktilitas memungkinkan struktur tetap bertahan meskipun mendekati ambang keruntuhan. Untuk mencapai hal ini, penting bahwa keruntuhan terjadi pada balok dan bukan pada kolom, dengan prinsip *Strong Column Weak Beam*. Selain itu, keruntuhan

balok harus bersifat lentur (*ductile*) daripada geser (*brittle*), sehingga penghuni dapat memperoleh peringatan melalui deformasi sebelum keruntuhan total terjadi, memungkinkan waktu untuk evakuasi.



Gambar 1 Diagram a) *Beam sidesway mechanism*, b) *Column sidesway mechanism* dan c) *Mixed sidesway mechanism with plastic hinges and shear failures* [4]

Curvature Ductility adalah kemampuan struktur untuk mengalami deformasi inelastis dalam bentuk rotasi pada sambungan plastis, yang biasanya menjadi sumber utama lendutan struktur inelastis. Daktilitas lengkungan maksimum diukur dengan membandingkan lengkungan maksimum yang terjadi pada struktur dengan lengkungan pada saat struktur mencapai titik leleh.

$$\mu_{\varphi} = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} \quad (1)$$

Faktor-faktor yang mempengaruhi *curvature ductility* meliputi regangan tekan *ultimate*, gaya aksial, kuat tekan beton, dan kuat leleh tulangan. *Curvature ductility* ini merupakan hasil dari penulangan struktur.

Pengertian dan Sifat *Fiber Concrete*

Fiber Concrete, termasuk serat baja, serat kaca, serat sintetis, atau serat alami, meningkatkan kinerja beton dengan penyerapan energi lebih baik, mengendalikan retak, dan meningkatkan daktilitas serta kekuatan beton. Namun, penambahan serat berlebihan dapat mengurangi kelecakan dan kekuatan beton, serta menyebabkan pembentukan bola berongga. Interaksi antara serat dan matriks beton mempengaruhi perilaku FRC, di mana *debonding* dan pembentukan retakan terjadi saat terbebani, tetapi juga memberikan daktilitas pasca-keretakan dengan menahan retakan pada matriks. Perilaku dari *Fiber Reinforced Concrete* (FRC) dalam hal ini sangat dipengaruhi dari interaksi atau mekanisme ikatan antara serat dan matriks beton baik dari adhesi fisik dan kimiawi serta friksi dan *mechanical anchorage* yang berasal dari geometri serat yang kompleks. Ketika FRC terbebani, umumnya terjadi transfer tegangan elastik dari serat dan matriks. Lalu, perbedaan modulus elastisitas pada kedua material tersebut menyebabkan

pembentukan tegangan geser pada *interface* matriks/serat. Ketika kuat geser pada *interface* sudah berlebih, maka mekanisme *debonding* akan mulai terjadi dan retak akan terbentuk. Namun demikian, sifat dari FRC yang dapat memberikan daktilitas pasca keretakan dengan menjadi pen jembatan antar retak pada matriks dinilai menguntungkan dan meningkatkan kinerja dari FRC.

Aplikasi XTRACT

XTRACT dimulai sebagai alat akademis dan penelitian di *University of California* di Berkeley sebagai sebuah program yang diberi nama *UCFyber*. Pada masa pertumbuhannya, *UCFyber* adalah program berbasis *Microsoft Windows* interaktif pertama yang melakukan analisis kelengkungan momen untuk penampang beton bertulang. Program ini memiliki kemampuan untuk melakukan analisis realistis penampang melintang yang menggabungkan efek peningkatan kekuatan dan daktilitas beton bertulang serta perilaku baja nonlinier dalam lingkungan grafis. XTRACT telah menjadi instrumen yang sangat berharga untuk penelitian beton dalam bidang teknik gempa, dan juga telah berkembang menjadi alat bantu produksi untuk analisis dan desain sistem beton di kantor-kantor desain di seluruh dunia. XTRACT adalah alat penting untuk analisis rekayasa gempa ketika diperlukan penilaian realistis terhadap kapasitas momen dan kelengkungan penampang melintang.

Karena desain rekayasa gempa beralih ke metodologi desain berbasis perpindahan, penilaian realistis terhadap perilaku nonlinier sistem sangat diperlukan. Kondisi batas yang sangat penting untuk komponen beton bertulang yang mengalami tuntutan deformasi inelastis adalah kelengkungan ultimit. Kelengkungan ultimit inilah yang menentukan rotasi ultimit dan juga kapasitas perpindahan ultimit. Untuk menentukan nilai ini untuk beban aksial yang berbeda, serangkaian analisis kelengkungan momen biasanya dilakukan dan titik terakhir yang dihitung dalam hubungan kelengkungan momen diambil sebagai kelengkungan ultimit yang sesuai dengan beban aksial tertentu. Dengan menggunakan analisis interaksi gaya aksial dalam XTRACT dengan regangan target yang diatur ke nilai ultimit, diagram kelengkungan ultimit gaya aksial dapat dibuat. Diagram tersebut menunjukkan variasi beban aksial dengan kelengkungan yang sesuai, tetapi analisis dilakukan tanpa iterasi. Konstruksi cepat kurva ini dapat dilakukan di XTRACT untuk penentuan kapasitas kelengkungan ultimit; yang pada akhirnya, dapat dibandingkan dengan kebutuhan kelengkungan yang diakibatkan oleh eksitasi gempa.

PRELIMINARY DESIGN

Section Properties

Section properties yang digunakan berupa penampang persegi ukuran 500 x 500 mm dan lingkaran diameter 565 mm dengan *sample* NC-K sebagai *Normal Concrete* penampang persegi, NC-C sebagai *Normal Concrete* penampang lingkaran, GFRC-K sebagai *Glass Fiber Reinforced Concrete* penampang persegi, dan GFRC-C sebagai *Glass Fiber Reinforced Concrete* penampang

lingkaran. Dalam analisa, tulangan transversal tidak berubah dengan menggunakan tulangan D12-100 mm, sedangkan tulangan longitudinal berubah dengan menggunakan tulangan D20, D22, D24, D26, D28, dan D30 sesuai dengan referensi yang digunakan seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Section Properties

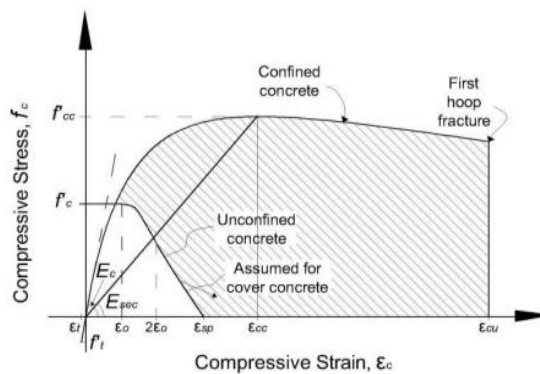
Cross-sectional dimensions (mm)										Longitudinal Reinforcement	Transversal Reinforcement	
Conventional Concrete					Glass Fiber Concrete						Diameter (mm)	Spacing (mm)
Square			Circular		Square			Circular				
Sample	b	h	Sample	D	Sample	b	h	Sample	D			
NC-K-1	500	500	NC-C-1	565	GFRC-K-1	500	500	GFRC-C-1	565	D20	D12	100
NC-K-2			NC-C-2		GFRC-K-2			GFRC-C-2		D22		
NC-K-3			NC-C-3		GFRC-K-3			GFRC-C-3		D24		
NC-K-4			NC-C-4		GFRC-K-4			GFRC-C-4		D26		
NC-K-5			NC-C-5		GFRC-K-5			GFRC-C-5		D28		
NC-K-6			NC-C-6		GFRC-K-6			GFRC-C-6		D30		



Gambar 2 Penampang Kolom

Material Properties Beton Standar

Definisi sifat-sifat material beton pada aplikasi XTRACT terbagi menjadi dua: beton *unconfined* dan beton *confined* dengan mutu beton yang digunakan sebesar 45 MPa. Untuk hubungan tegangan-regangan, model Popovics [11] digunakan, terutama untuk tulangan berbentuk lingkaran dan persegi panjang. Perilaku tegangan-regangan selimut beton di luar beton inti didasarkan pada garis lurus hingga tegangan nol pada regangan *spalling* [5].



Gambar Error! No text of specified style in document. Hubungan Tegangan-Regangan Beton Terkekang (*confined*) dan Tidak Terkekang (*unconfined*) [5]

Material Properties Beton Fiber

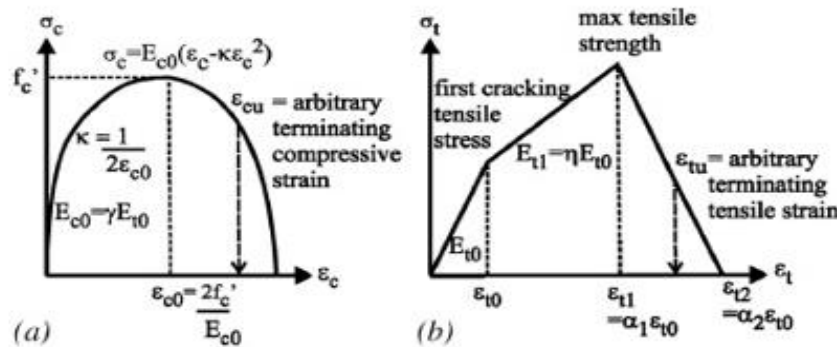
Pendefinisian sifat-sifat material beton serat pada aplikasi XTRACT terbagi menjadi dua bagian: beton *unconfined* dan beton *confined* dengan mutu beton yang digunakan sebesar 45 MPa. Model hubungan tegangan-regangan untuk beton *fiber* mengacu pada Gambar 4 yang diusulkan oleh Soranakom & Mobasher [12], dengan parameter-parameter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 *Material Properties Fiber Concrete*

Composite specimens	Section			Material parameters								Additional information			
	b, mm (in.)	d, mm (in.)	L, mm (in.)	μ	ϵ_{r0}	E_f , MPa (ksi)	η	α_1	α_2	γ	κ	E_c , MPa (ksi)	f'_c , MPa (ksi)	ϵ_{c0}	ϵ_{cu}
FRC	100 (4)	25 (1)	300 (12)	1.38	0.0005	10,600 (1537)	0.0008	70	72	2.71	136	28,695 (4161)	52.9 (7.67)	0.0037	0.0060
TRC	76 (3)	10 (0.4)	254 (10)	1.25	0.0006	5167 (749)	0.0416	14	226	1.47	42	7579 (1099)	45.0 (6.53)	0.0119	0.0070
GFRC	50 (2)	10 (0.4)	200 (8)	1.33	0.0010	7500 (1088)	0.0417	21	49	2.02	84	15,120 (2192)	45.0 (6.53)	0.0060	0.0080

Notes: FRC: ferrocement; TRC: textile-reinforced cement (28 days water curing); GFRC: glass fiber-reinforced cement (28 days moist curing).

Sumber: (Soranakom and Mobasher 2007)



Gambar 4 Grafik hubungan tegangan-regangan beton *fiber* [9]

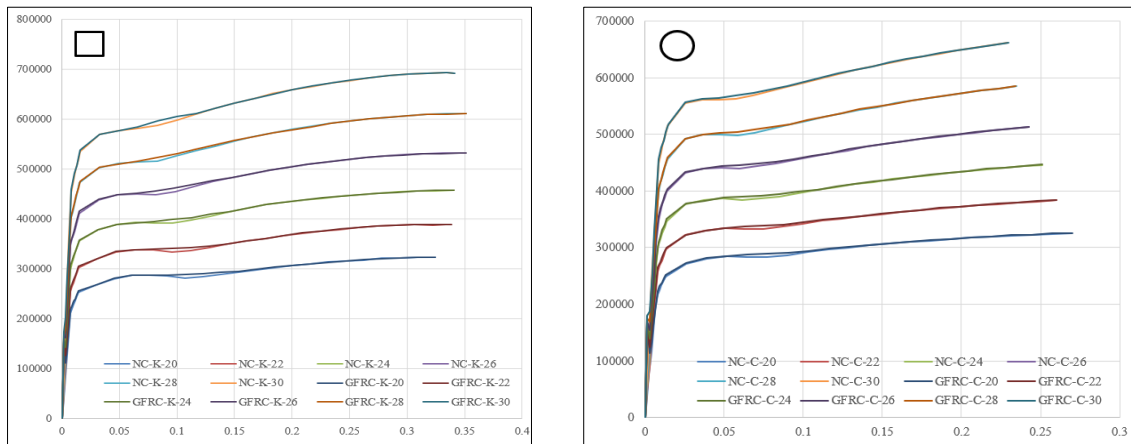
Material Properties Baja Tulangan

Material tulangan baja pada aplikasi XTRACT dimodelkan dengan perilaku *Strain Hardening* saat melebihi batas elastis, menggunakan kualitas tulangan baja standar A706 dengan mutu tulangan sebesar 482,6 MPa.

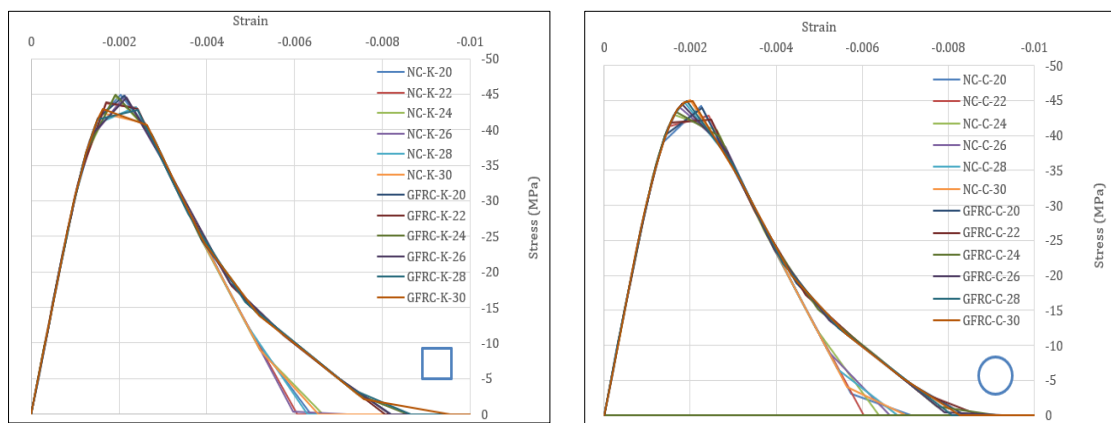
PEMBAHASAN

Berdasarkan analisa penampang yang dilakukan diketahui bahwa rasio tulangan yang digunakan memengaruhi kurva hubungan *moment-curvature*. Semakin besar rasio tulangan, *moment-curvature* yang dihasilkan juga semakin besar, yang pada akhirnya memengaruhi kemampuan elemen struktur untuk menahan momen. Namun, perbedaan jenis material tidak secara signifikan mempengaruhi kurva hubungan *moment-curvature*. Beton *glass fiber* menunjukkan sedikit peningkatan kemampuan menahan momen dibandingkan dengan beton konvensional hanya sampai tahap leleh pertama. Setelah tahap tersebut, hubungan *moment-curvature* mirip dengan beton konvensional, terlepas dari rasio tulangan yang digunakan seperti

terlihat pada Gambar 5. Dari segi material yang digunakan pada saat kondisi *unconfined*, penggunaan beton *fiber* memiliki pengaruh terhadap kurva tegangan-regangan yang dihasilkan dibandingkan dengan beton konvensional. Meskipun beton *fiber* dan beton konvensional memberikan nilai yang hampir serupa pada awalnya, perbedaan muncul saat regangan melebihi regangan leleh. Pada titik ini, beton *fiber* mampu memberikan regangan yang lebih baik daripada beton konvensional, dan hal ini berlaku untuk semua rasio tulangan yang dianalisis seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 5 Kurva *Moment-Curvature* Hasil Analisa XTRACT *Square Section* dan *Rectangular Section* Beton Normal dan Fiber



Gambar 6 Perbandingan Kurva Tegangan-Regangan *Unconfined Concrete* Beton Konvensional vs Beton *Fiber* pada *Square Section* dan *Rectangular Section*

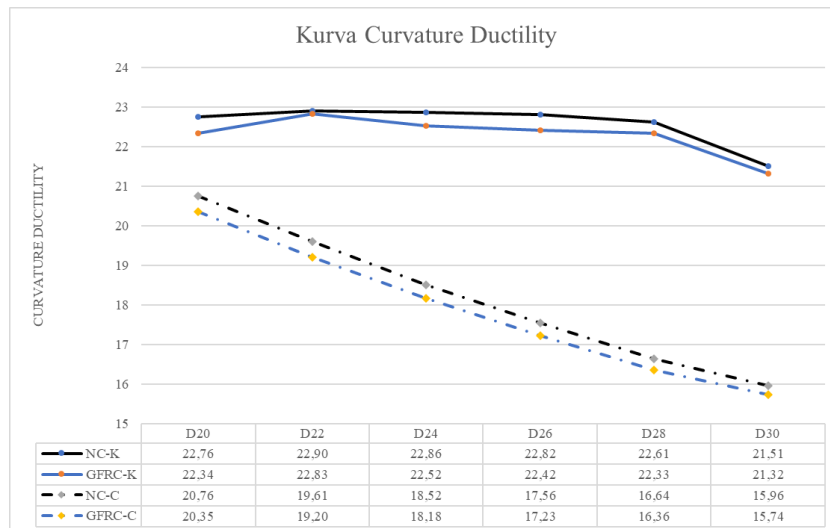
Berdasarkan hasil analisa seperti terlihat pada Tabel 3 dan Gambar 7, dari segi geometri penampang persegi dengan berbagai rasio tulangan menunjukkan variasi nilai daktilitas, di mana tulangan D22 memberikan nilai daktilitas yang lebih tinggi. Namun, pada penampang lingkaran, penampang dengan rasio tulangan D20 menunjukkan peningkatan nilai daktilitas yang linear. Secara umum, penampang persegi memberikan daktilitas yang lebih baik daripada penampang lingkaran. Dari segi material, perbandingan antara beton *fiber* dan beton konvensional tidak

menunjukkan perbedaan yang signifikan. Penampang persegi dengan tulangan D22 memberikan nilai daktilitas yang lebih tinggi, sedangkan pada penampang lingkaran, penggunaan rasio tulangan D20 menghasilkan nilai daktilitas tertinggi. Meskipun tidak signifikan, beton konvensional cenderung memiliki *curvature ductility* yang lebih baik daripada beton *fiber*. Secara keseluruhan, penentuan rasio tulangan memberikan pengaruh pada daktilitas yang dihasilkan. Penentuan rasio tulangan yang efektif penting untuk meningkatkan kemampuan elemen struktur dalam menahan gaya yang terjadi.

Tabel 3 Analisa Curvature Ductility

Longitudinal Reinforcement	Conventional Concrete							
	Square				Circular			
	Sample	ϕ_y	ϕ_u	μ_ϕ	Sample	ϕ_y	ϕ_u	μ_ϕ
D20	NC-K-1	0,014	0,324	22,76	NC-C-1	0,013	0,270	20,76
D22	NC-K-2	0,015	0,333	22,90	NC-C-2	0,013	0,260	19,61
D24	NC-K-3	0,015	0,341	22,86	NC-C-3	0,014	0,251	18,52
D26	NC-K-4	0,015	0,347	22,82	NC-C-4	0,014	0,243	17,56
D28	NC-K-5	0,016	0,351	22,61	NC-C-5	0,014	0,235	16,64
D30	NC-K-6	0,016	0,341	21,51	NC-C-6	0,014	0,229	15,96

Longitudinal Reinforcement	Glass Fiber Concrete							
	Square				Circular			
	Sample	ϕ_y	ϕ_u	μ_ϕ	Sample	ϕ_y	ϕ_u	μ_ϕ
D20	GFRC-K-1	0,015	0,324	22,34	GFRC-C-1	0,013	0,270	20,35
D22	GFRC-K-2	0,015	0,338	22,83	GFRC-C-2	0,014	0,260	19,20
D24	GFRC-K-3	0,015	0,341	22,52	GFRC-C-3	0,014	0,251	18,18
D26	GFRC-K-4	0,015	0,346	22,42	GFRC-C-4	0,014	0,243	17,23
D28	GFRC-K-5	0,016	0,351	22,33	GFRC-C-5	0,014	0,235	16,36
D30	GFRC-K-6	0,016	0,342	21,32	GFRC-C-6	0,015	0,230	15,74



Gambar 7 Kurva Curvature Ductility

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Semakin besar rasio tulangan lentur yang digunakan, kapasitas penampang untuk menahan momen meningkat, meskipun tidak secara signifikan meningkatkan kapasitas *curvature* penampang.
2. Meskipun tidak signifikan, beton *fiber* mampu memberikan regangan yang lebih baik daripada beton konvensional karena serat-serat *fiber* memberikan bantuan regangan tarik pada penampang.
3. Meskipun elemen dengan beton *fiber* meregang lebih baik, pengecekan terhadap *curvature ductility* menunjukkan bahwa beton konvensional memiliki nilai yang lebih baik.
4. Dari segi geometri penampang, penampang persegi cenderung memberikan daktilitas yang lebih baik daripada penampang lingkaran, meskipun memiliki luas penampang yang hampir sama.
5. Penentuan rasio tulangan lentur yang efektif penting untuk meningkatkan daktilitas elemen struktur dalam menahan gaya-gaya yang terjadi.
6. Dapat dilakukan analisa lebih lanjut dengan memasukkan rasio tulangan transversal terhadap momen kurvatur dan daktilitas yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

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

DAFTAR PUSTAKA

1. Dok, Gokhan, Hakan Ozturk, and Aydin Demir. "Determining Moment-Curvature Relationship Of Reinforced Concrete Columns." *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, Vol. 1, 2017: 52-58.
2. Foroughi, Saeid, and Süleyman Bahadır Yüksel. "Analytical Investigation of Curvature Ductility of Reinforced Concrete Columns." *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, Vol. 25, No. 1, 2020: 27-38.
3. Foroughi, Saeid, and Süleyman Bahadır Yüksel. "Investigation of The Moment–Curvature Relationship for Reinforced Concrete Square Columns." *Turkish Journal of Engineering (TUJE)* Vol. 4, Issue 1, 2020: 36-46.
4. Lupoi, G., G. M. Calvi, A. Lupoi, and P. E. Pinto. "Comparison of Different Approaches for Seismic Assessment of Existing Buildings." *Journal of Earthquake Engineering* Vol. 08, No. 1, 2004.

5. Mander, J. B., M. J. N. Priestley, R. Park, and Fellow ASCE. "Theoretical Stress-Strain Model For Concnfined Concrete." *Journal of Structural Engineering Vol. 114, No. 8*, 1988: 1804-1826.
6. Ojha, P. N., Sumit Kumar, Puneet Kaura, Brijesh Singh, and Pranay Singh. "Experimental Investigation on Effect of Corrosion on Curvature-Ductility Relationship of RCC Member in Flexure." *J. Build. Mater. Struct. Vol. 9*, 2022: 74-86.
7. Sheikh, M. Neaz , H. H. Tsang, T. J. McCarthy, and N. T. K. Lam. "Yield Curvature for Seismic Design of Circular Reinforced Concrete Columns." *Magazine of Concrete Research, Vol. 62, No. 10*, 2010: 741-748.
8. Silva, Flávio de Andrade, Barzin Mobasher, and Romildo Dias Toledo Filho. "Cracking Mechanisms in Durable Sisal Fiber Reinforced Cement Composites." *Elsevier Cement & Concrete Composites*, 2009.
9. Soranakom, Chote, and Barzin Mobasher. "Closed-Form Moment-Curvature Expressions for Homogenized Fiber-Reinforced Concrete." *ACI Materials Journal Technical Paper Title no. 104-M39*, 2007: 351-359.
10. Volpatti, Giovanni, Jesús A. Martínez, Jorge C. Diaz, and Davide Zampini. "Advanced Closed-Form Moment-Curvature Formulation For Fiber-Reinforced Concrete Members." *Elsevier Composite Structures*, 2022.
11. Popovic, Sandor. "A Numerical Approach to The Complete Stress-Strain Curve of Concrete." *Cement and Concrete Research. Vol. 3*, pp. 583-599, 1973.
12. Soranakom, Chote, and Barzin Mobasher. "Correlation of Tensile and Flexural Responses of Strain Softening and Strain Hardening Cement Compccites." *Cement & Concrete Composites 30* , 2008: 465-477.