

ANALISIS MODEL FIBER BALOK BETON MEMADAT MANDIRI

Mahmud Kori Effendi¹, Novi Rahmayanti²

^{1,2} Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

email: kori.effendi@uii.ac.id, novi.rahmayanti@uii.ac.id

Diterima : 17 April 2021
Direvisi : 23 September 2021

Disetujui : 20 Oktober 2021
Diterbitkan : 26 November 2021

Abstract: The main aspect in the design of reinforced concrete buildings is to implement a "strong column weak beam" system in which the gradual collapse of the beam or slab until the column. One of the nonlinear analysis of reinforced concrete beams using fiber plastic hinges. This article describes the use of fiber analysis, to analyze the behavior of self-compacting concrete beams under static loads. The roller-joint support beam was compared between experiments and with fiber analysis. The beams are divided vertically and horizontally as small as possible. Concrete model and reinforcing steel model are modeled with nonlinear model. The results of the analysis show the same load-deflection curves at elastic range. After the elastic range is exceeded, there is a difference in the load-deflection curve between by experiment and by the fiber model analysis, but the ultimate loads are greater than the ultimate load of ACI. The stress-strain curve of tensile reinforcing steel has reached a nonlinear condition, but the stress-strain curve of compressive reinforcing steel has not reached a nonlinear condition. The stress-strain curve of concrete under compressive conditions reaches nonlinear conditions.

Keywords: self-compacting concrete, beam, finite element, fiber model, nonlinear.

Abstrak: Aspek utama dalam desain bangunan beton bertulang adalah menerapkan sistem "strong column weak beam" dimana keruntuhan berangsur-angsur dari balok atau pelat ke kolom. Salah satu analisis nonlinier balok beton bertulang memakai sendi plastis fiber. Artikel ini menguraikan tentang penggunaan analisis fiber, untuk menganalisis perilaku balok beton memadat sendiri dengan beban statik. Balok tumpuan sendi-rol dibandingkan antara eksperimen dengan analisis fiber. Balok beton dibagi vertikal dan horisontal sekecil mungkin. Model beton dan model baja tulangan dimodelkan dengan model nonlinier. Hasil analisis menghasilkan kurva beban-lendutan bagian elastik yang sama. Setelah elastik terlampaui, terjadi perbedaan kurva beban-lendutan antara eksperimen dan hasil analisis model fiber, tetapi beban ultimanya lebih besar dari beban ulimit ACI. Kurva tegangan-regangan baja tulangan tarik sudah mencapai kondisi nonlinier akan tetapi kurva tegangan-regangan baja tulangan tekan belum mencapai kondisi nonlinier. Kurva tegangan-regangan beton pada kondisi tekan mencapai kondisi nonlinier.

Kata kunci: beton memadat sendiri, balok, elemen hingga, model fiber, nonlinier.

1. PENDAHULUAN

Bangunan dengan material beton bertulang mampu bertahan terhadap gempa-gempa akibat zona subduksi selatan Jawa. Salah satu aspek utama dalam desain struktur bangunan adalah menerapkan sistem "Strong Column and Weak Beam", atau yang dapat disebut SCWB. Dengan diterapkannya sistem ini, maka

skenario keruntuhan pada bangunan dapat didesain dalam skema gradual (berangsur) melalui balok-pelat selanjutnya bagian kolom yang dapat mengalami kegagalan.

Salah satu perkembangan beton adalah beton memadat sendiri. Beton ini mempunyai kemampuan untuk mengalir sendiri ke lokasi yang sulit untuk dipadatkan

secara manual. Balok dengan beton memadat sendiri / *self compaction concrete* (SCC) dan beton mutu tinggi dengan pemadatan konvensional / *conventional vibrated concrete* (VC). Kekuatan lentur dan geser balok SCC dan balok VC tidak terlalu besar perbedaannya [1].

Analisis struktur menggunakan pendekatan metode elemen hingga menjadi salah satu cara untuk mengamati dan meneliti perilaku struktur bangunan ataupun elemen-elemennya. Secara umum, software ETABS banyak digunakan untuk analisis frame beton bertulang [2]. Analisis mendetil mengenai perilaku nonlinier material beton bertulang adalah dengan pemodelan analisis struktur memakai sendi plastis fiber. Metode analisis ini digunakan oleh banyak peneliti [3], [4]. Selain itu, metode ini juga diterapkan di dalam software OpenSees [5], [6].

Program komputer berbahasa fortran analisis nonlinier berbasis model fiber elemen dapat dilakukan untuk analisis statik dan dinamik [7]. Program ini menggunakan *beam element* dan dapat digunakan untuk memodelkan elemen baja, tabung baja diisi beton dan beton bertulang. Program ini sudah digunakan untuk menganalisis material tabung baja diisi beton yang terkena beban dinamik [8], [9], [10] juga digunakan untuk material baja terkena beban dinamik [11] dan juga digunakan untuk material beton bertulang terkena beban dinamik [12].

Artikel ini menguraikan tentang penggunaan analisis fiber [7], untuk menganalisis perilaku balok beton memadat sendiri dengan beban statik. Elemen balok berupa balok tumpuan sederhana dengan tumpuan sendi-rol. Beban berupa kontrol lendutan.

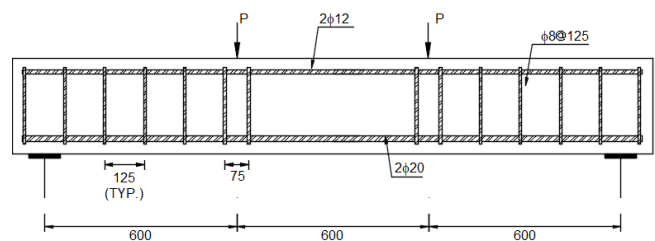
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini adalah memvalidasi penelitian balok beton memadat mandiri yang telah dilakukan oleh Harkous [1] di Laboratorium Struktur, American University of Beirut, Lebanon. Balok beton memadat mandiri diuji menggunakan mesin servo-hydraulic loop tertutup MTS (*Material Testing System*) yang mempunyai kapasitas 1000 kN. Penampang balok tersebut memiliki lebar 200 mm dan tinggi 300 mm. Selimut beton bersih sebesar 30 mm. Dimensi balok ditunjukkan pada **Gambar 1**. Panjang bentang dari as tumpuan adalah 1800 mm.

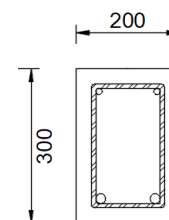
Setting-up Pengujian

Benda uji berjumlah 2 buah seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**. Balok dibuat dengan beton memadat mandiri dengan tulangan baja longitudinal dan sengkang seperti pada **Gambar 2**. Tumpuan balok adalah sendi-rol. Pembebanan dilakukan pada dua titik. Tulangan longitudinal daerah tarik berjumlah $2\phi 20$ dan daerah tekan $2\phi 12$, sedangkan untuk tulangan sengkang berupa $\phi 8$ dengan jarak pusat ke pusat 125 mm. Cam-

puran beton dirancang berdasar metode University College London (UCL) [13] dan dapat dilihat pada **Tabel 2**. Karakteristik konsolidasi campuran beton memadat mandiri diberikan oleh generasi ketiga *superplasticizer* yaitu Poly-Carboxylate Ether (PCE). Dosis curah *superplasticizer* PCE berdasarkan berat semen sebesar 1,6%. Campuran beton segar memadat mandiri mempunyai tes alir penyebaran / *Spread flow test* sebesar 790 mm.



Gambar 1. Sketsa Balok Eksperimen (satuan dalam mm)



Gambar 2. Sketsa Balok Eksperimen (satuan dalam mm)

Hasil Pengujian

Benda uji tekan berupa silinder standar 150x300 mm diambil dari campuran beton memadat mandiri yang diproduksi di pabrik *ready-mix*. Benda uji beton dites pada umur 28 hari. Tulangan tarik berjumlah 2 buah berdiameter 20 mm dan tulangan tekan berjumlah 2 buah berdiameter 12 mm. Tulangan sengkang berdiameter 8 mm berjarak pusat ke pusat 125 mm. Semua tulangan dites memenuhi ASTM Grade 60 A615M [14]. Data sifat mekanika tulangan baja dan beton dapat dilihat pada **Tabel 3**.

3. ANALISIS ELEMEN FIBER /FIBER

Pada penelitian ini, software berdasarkan analisis fiber [7], akan digunakan untuk analisis beton memadat sendiri dengan beban statik. Elemen balok berupa balok tumpuan sederhana dengan tumpuan sendi-rol. Beban berupa kontrol lendutan.

Tegangan dan regangan pada fiber

Dengan asumsi bidang pada **Gambar 3(a)** membuat elemen memenuhi **Persamaan 1**.

$$\varepsilon = \varepsilon_o - y\kappa \quad (1)$$

Penampang dibagi menjadi beberapa lapisan yang terdiri dari fiber tegangan dan kekakuan penampang terintegrasi secara numerik. Tegangan pada fiber ke- j ditentukan oleh regangan elasto-plastis sebagai **Persamaan 2**.

$$\sigma_j = \sigma_j(\varepsilon_{epj}) \quad (2)$$

Tabel 1. Notasi balok uji

Notasi Balok	Adukan beton
SCC-F-B1	Beton Memadat Mandiri
SCC-F-B2	Beton Memadat Mandiri

Sumber: [1]

Tabel 2. Campuran Beton

Komponen Material	Proporsi campuran
Semen (kg/m ³)	575
Pasir Alam 0-1,18 mm (kg/m ³)	453
Pasir Pecah 0-4 mm (kg/m ³)	371
Kerikil 4-10 mm (kg/m ³)	807
Air (kg/m ³)	194
Dosis curah superplasticizer PCE berdasarkan berat semen (%)	1,6%
Superplasticizer PCE (kg/m ³)	9,2

Sumber: [1]

Tabel 3. Sifat Mekanik Beton dan Baja

Bahan	Properti Bahan
Beton	Memadat Mandiri
	E_c 35133 MPa
	f_c 62,4 MPa
Tulangan Baja	Lentur Bawah (2 ϕ 20)
	E_s 200000 MPa
	σ_y 632 MPa
	σ_u 743 MPa
	Lentur Atas (2 ϕ 12)
	E_s 290000 MPa
	σ_y 557 MPa
	σ_u 667 MPa

Sumber: [1]

Dimana, σ_j adalah tegangan fiber ke- j , dan $\sigma_j(\varepsilon_{epj})$ adalah hubungan tegangan-regangan untuk fiber ke- j pada bagian tersebut. Sehubungan dengan ε_{epj} , tegangan elasto-plastis fiber ke- j , adalah menggabungkan tiga komponen (yaitu regangan elasto-

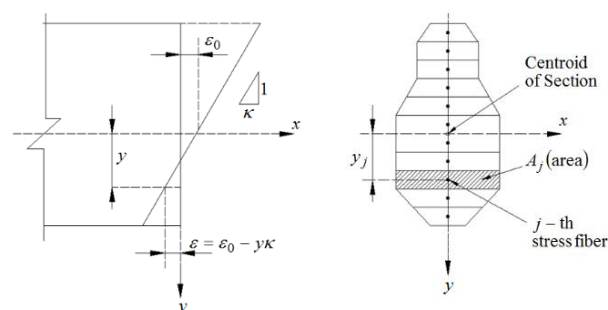
plastis ε_{ep} , regangan rangkai ε_{cr} dan regangan susut ε_{sh}). Efek penyusutan dan rangkai diabaikan, oleh karena itu, hanya mencakup sebagai **Persamaan 3**.

$$\varepsilon_{epj} = \varepsilon_o - y_j\kappa \quad (3)$$

Tegangan pada semua fiber dijumlahkan secara numerik untuk menghasilkan resultan tegangan sebagai **Persamaan 4**.

$$S = \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_j A_j \sigma_j \\ - \sum_j A_j y_j \sigma_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

Di mana, N adalah gaya aksial, M adalah momen lentur, dan A_j luas fiber ke- j . S adalah vektor tegangan umum. Asumsi tegangan penampang akhirnya terkonsentrasi pada titik sentroid seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1 (b)**.



(a) Distribusi regangan

(b) Diskretisasi penampang

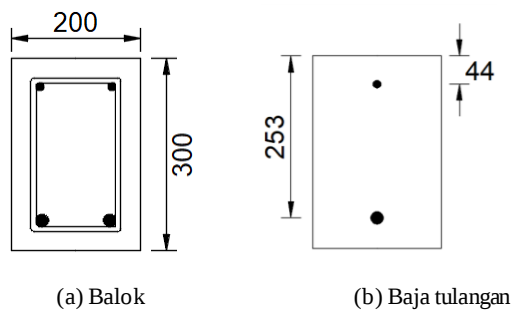
Gambar 3. Regangan dan tegangan fiber elemen [7]

Rumus Lagrangian yang diperbarui (*updated Lagrangian*) dengan sumbu koordinat lokal bersama dengan elemen dalam sistem koordinat global, digunakan untuk menghitung efek nonlinier geometris. Integral Gaussian tiga titik digunakan untuk mengevaluasi kekakuan elemen.

Diskretisasi fiber

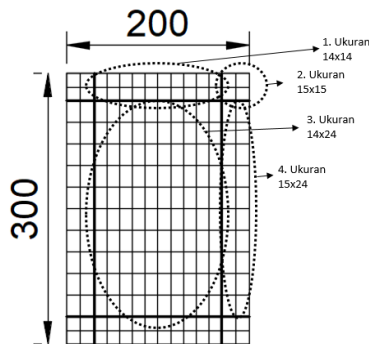
Diskretisasi fiber elemen lateral dapat dilihat pada Gambar 4. Balok beton bertulang pada **Gambar 4(a)** dimodelkan menjadi dua bagian, yaitu beton dan baja tulangan. Baja tulangan dimodelkan dengan menggunakan penampang terkonsentrasi seperti ditunjukkan pada **Gambar 4(b)**. Untuk baja tulangan atas luas baja tulangan terkonsentrasi di jarak 44 mm dari sisi atas, untuk tulangan bawah 253 mm dari sisi atas.

Untuk diskretisasi beton dibuat sekecil mungkin dan dapat dilihat pada **Gambar 4(c)**. Selimut beton dibatasi oleh garis tebal. Untuk horizontal dibagi 2 fiber dibagian atas dan bawah, dan 10 fiber dibagian dalam. Untuk sisi samping dibagi 10 fiber untuk sisi horizontal dan 2 fiber untuk sisi vertikal. Untuk beton bagian inti, bagian sisi vertikal dan sisi horizontal dibagi 10 fiber. Ukuran fiber dapat dilihat pada **Gambar 4(c)**, pada bagian ujung-ujung berukuran 15x15 mm. Pada bagian sisi luar dalam berukuran 14x14 mm. Pada bagian sisi luar tinggi berukuran 15x24 mm. Pada bagian dalam beton berukuran 14x24 mm.



(a) Balok

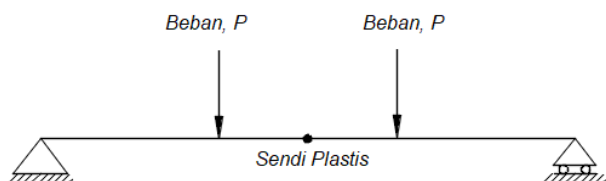
(b) Baja tulangan



(c) Beton

Gambar 4 . Diskretisasi vertikal fiber

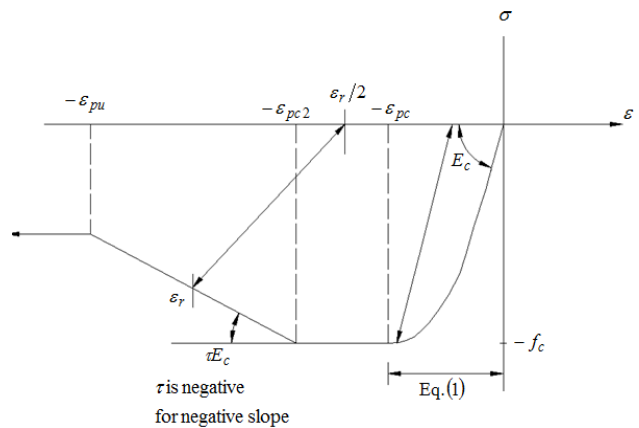
Diskretisasi elemen longitudinal dapat dilihat pada **Gambar 5**. Deformasi plastis mungkin diperkirakan terkonsentrasi pada bentang tengah balok. Beban dilakukan dengan pendekatan kontrol perpindahan/*displacement control*.



Gambar 5 . Diskretisasi longitudinal fiber

Model tegangan-regangan beton

Kurva kerangka untuk tegangan-regangan beton ditunjukkan pada **Gambar 6** [15]. Terdiri dari tiga cabang, yaitu garis lengkung pra-puncak menaik, garis lurus untuk kerusakan pasca-puncak, dan garis lurus bercahaya untuk kekuatan sisa setelahnya. menyelesaikan kerusakan. Kedua garis lurus tersebut untuk menjaga kesederhanaan dengan akurasi tertentu.



Gambar 6 . Kurva tegangan-regangan beton

$$\sigma = f_c \frac{r_c (\epsilon / \epsilon_{pc})}{r_c - 1 + (\epsilon / \epsilon_{pc})^c} \quad (5)$$

$$r_c = \frac{E_c}{E_c - E_{sc}} \quad (6)$$

$$E_{sc} = \frac{f_c}{\epsilon_{pc}} \quad (7)$$

E_c = Modulus Young beton (35133 MPa)

f_c = Tegangan maksimum kondisi tekan (62,4 MPa)

ϵ_{pc} = Regangan pada awal tegangan tekan maksimum (0,00216)

ϵ_{pc2} = Regangan pada akhir tegangan tekan maksimum (0,00217)

τE_c = gradien setelah tegangan puncak (-1760,74 MPa)

ϵ_{pu} = batas regangan (0,0176)

Model tegangan-regangan baja

Sehubungan dengan model tegangan-regangan komponen tabung baja, Menegotto-Pinto, dilambangkan sebagai model *M-P* [16], digunakan dalam pemodelan baja. Dalam analisis ini masih menggunakan rumus yang lama, walaupun sudah ada modifikasi dari model ini [17]. Rumus model *M-P*

dinyatakan dengan **Persamaan 8**.

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{\left(1 - \frac{E_{s,\infty}}{E_s}\right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}\right)}{\left(1 + \left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}\right]^R\right)^{\frac{1}{R}}} + \left(1 - \frac{E_{s,\infty}}{E_s}\right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}\right) \quad (8)$$

Dimana;

E_s = Modulus Young baja

E_s = 290000 MPa (tulangan atas) dan 200000 MPa (tulangan bawah)

σ_y = Tegangan leleh (tegangan pada perpotongan antara kurva kerangka dan garis dengan kekakuan $E_c/2$ yang hampir sama dengan nilai offset 0,2%)

σ_y = 557 MPa (tulangan atas) dan 632 MPa (tulangan bawah)

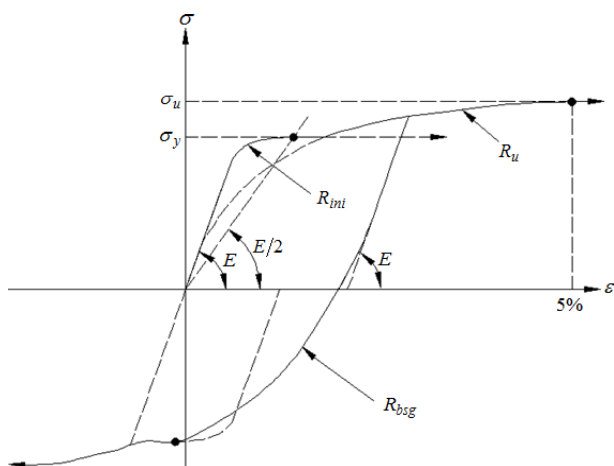
$R_{ini} = R$ untuk kurva $M\&P$ pertama dari kurva kerangka, diasumsikan memiliki nilai sebesar 10

σ_u = Tegangan maksimum (tegangan pada regangan 5% pada kurva $M\&P$ kedua dari kurva kerangka)

σ_u = 667 MPa (tulangan atas) dan 743 MPa (tulangan bawah)

$R_u = R$ untuk kurva $M\&P$ kedua dari kurva kerangka, diasumsikan memiliki nilai 0,9

Gambar 7 menunjukkan bentuk tegangan sampai tegangan leleh dan peningkatan tegangan setelah kuat leleh komponen baja tercapai. Itu dapat dicapai berdasarkan Persamaan. 8 yang merupakan kombinasi dari dua kurva kerangka $M\&P$ yang diskalakan oleh masing-masing kekuatan leleh (σ_y) dan kekuatan ultimit (σ_u).

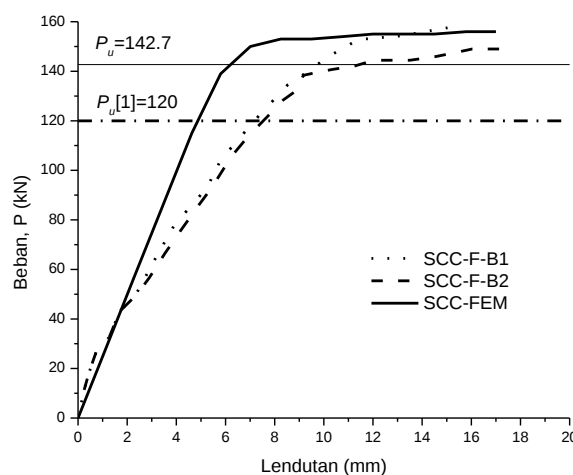


Gambar 7 . Kurva tegangan-regangan baja

4. HASIL dan PEMBAHASAN

Respon Beban-Lendutan

Gambar 8 menunjukkan perbandingan antara hasil pengujian eksperimen (SCC-F-B1, SCC-F-B2) [1] dan hasil yang diperoleh dari analisis elemen hingga (SCC-FEM), dari aspek hubungan antara beban dan lendutan. Secara umum, kurva beban-lendutan yang diperoleh dari model elemen hingga menunjukkan tren yang sama dengan kurva yang diperoleh secara eksperimental. Perbedaan kurva setelah bagian linier atau elastik terlampaui terjadi dikarenakan dalam pemodelan dengan 1D *beam element*, tulangan sengkang tidak dimodelkan sehingga kemungkinan hasilnya menjadi lebih kecil atau lebih rendah dari hasil eksperimen. Selain itu juga dalam pemodelan beton tidak memperhitungkan model beton pada daerah tarik. Menurut penelitian Halahla [18], umumnya respon balok beton bertulang akibat beban lentur itu berbentuk trilinear. Linier awal sampai beton retak, linier yang kedua dari beton mulai retak sampai tulangan mulai leleh, dan linier ketiga dimulai dari tulangan leleh sampai balok runtuh. Pada Tabel 4 terlihat bahwa hasil beban ultimit teoritis yang telah dihitung oleh Harkouss, $P_u=120$ kN [1], terletak dibawah beban ultimit hasil eksperimen dan hasil model fiber. Berdasarkan Apendik 1, didapatkan hasil $P_u=142.7$ kN dan berbeda dengan hasil Harkouss, $P_u=120$ kN [1]. Hal ini kemungkinan perbedaan nilai faktor reduksi kekuatan dimana dalam Apendik 1 menggunakan $\phi = 0.9$ dan kemungkinan dalam perhitungan Harkouss, $P_u=120$ kN [1] menggunakan $\phi = 0.8$.



Gambar 8. Kurva beban-lendutan balok

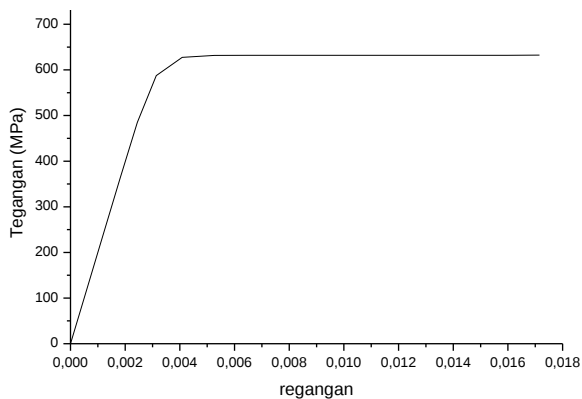
Tegangan-regangan baja tulangan tarik dan tekan

Kurva tegangan-regangan pada tulangan tarik bersifat nonlinier seperti dilihat pada Gambar 9. Terlihat respon tegangan-regangan hampir seperti

bi-linier. Pada **Gambar 9** terlihat bahwa pada linier yang pertama tegangan linier sampai mencapai tegangan 587 MPa dengan tegangan 0,00314. Nilai regangan ini kemudian bertambah sedikit hingga mencapai linier yang kedua yaitu mencapai regangan sebesar 0,00409 dengan tegangan sebesar 632 MPa. Tegangan ini kemudian tidak bertambah hingga mencapai regangan sebesar 0,018.

Tabel 4. Notasi balok uji

Notasi Balok	SCC-F-B1	SCC-F-B2	SCC-FEM
$P_{ultimit} (FEM)$	158 kN	150 kN	156 kN
$P_{ultimit} [1]$	120 kN	120 kN	
$P_{ultimit} (Apendik 1)$	142.7 kN	142.7 kN	

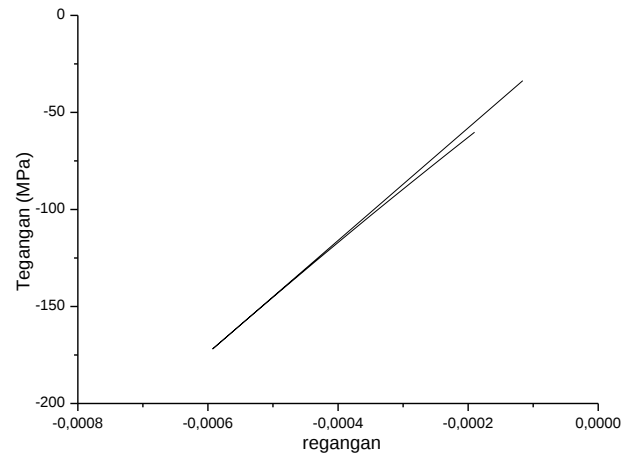


Gambar 9. Tegangan-regangan baja tulangan tarik

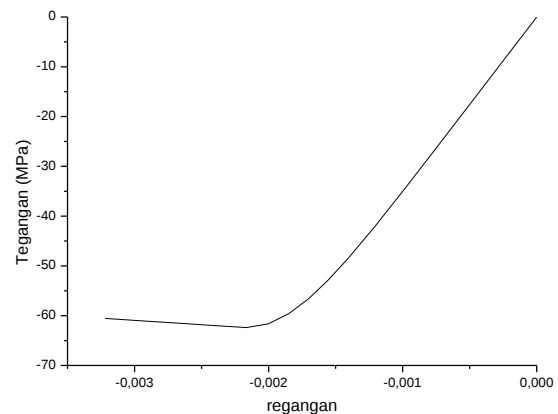
Tegangan-regangan tekan pada tulangan tekan dapat dilihat pada **Gambar 10**. Pada tulangan tekan kurvanya masih linier. Pada Gambar terlihat bahwa pada saat regangan sebesar -0,00055 dan tegangan sebesar -171,883 MPa terjadi pembalikan regangan-tegangan dimana regangan-tegangan mengecil hingga regangan-tegangan akhir sebesar -0,00019 dan -60,21 MPa, berturut-turut.

Tegangan tekan pada daerah tekan beton

Gambar 11 menunjukkan tegangan-regangan pada fiber/fiber tekan di lokasi tengah bentang balok. Pada Gambar 11 terlihat bahwa kurva berupa nonlinier. Tegangan ultimit beton terlihat sebesar 62,4 MPa pada regangan sekitar 0,002. Tegangan beton pada daerah tarik tidak ada dikarenakan dalam pemodelan beton daerah tarik tidak dimodelkan.



Gambar 10. Tegangan-regangan baja tulangan tekan



Gambar 11. Sketsa Balok Eksperimen (satuan dalam mm)

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Analisis nonlinier balok beton memadat mandiri dengan tulangan lentur menggunakan sendi-plastis dengan pemodelan analisis struktur memakai sendi plastis fiber menghasilkan kurva beban lendutan yang mempunyai trend yang hampir sama di daerah elastik. Kurva pasca elastik, terjadi perbedaan dengan kurva balok eksperimen, hal ini dikarenakan pada pemodelan tulangan sengkang tidak dimodelkan. Program komputer masih belum dapat memodelkan tulangan sengkang. Beban maksimum analisis dan eksperimen masih diatas beban ultimit, P_u teoritis. Kurva tegangan-regangan tulangan tarik bersifat nonlinier sedangkan kurva tegangan-regangan tulangan tekan bersifat linier. Tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan leleh. Pada daerah fiber tekan beton menunjukkan kurva tegangan-regangan nonlinier. Tegangan ultimit beton, f'_c , tercapai pada daerah serat tekan beton tersebut.

Saran

Penelitian ini membandingkan balok lentur eksperimen dengan pendekan nonlinier sendi plastis fiber. Penelitian ini masih menggunakan sedikit balok pembandingnya. Studi parameter pengaruh jenis tumpuan, kekuatan tekan beton, kekuatan leleh baja tulangan, dimensi balok, panjang bentang balok dan posisi beban.

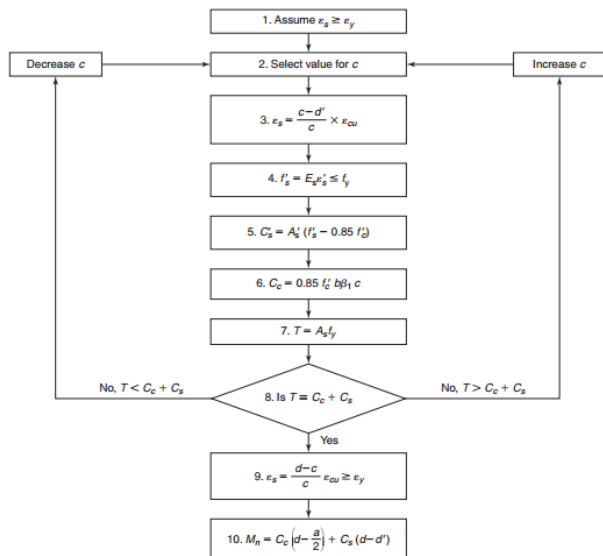
6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. H. Harkouss and B. S. Hamad, "Performance of high strength self-compacting concrete beams under different modes of failure," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 9, no. 1, pp. 69–88, 2015.
- [2] A. W. Zebua, "Analisis Gaya Gempa Pada Bangunan Rumah Tinggal Di Wilayah Gempa Tinggi," *J. Tek Sipil*, vol. 7, no. 2, pp. 57–64, 2018.
- [3] L.-Z. Yao and G. Wu, "Fiber-element modeling for seismic performance of square RC bridge columns retrofitted with NSM BFRP bars and/or BFRP sheet confinement," *J. Compos. Constr.*, vol. 20, no. 4, p. 4016001, 2016.
- [4] X. Chen, J. Duan, and Y. Li, "Plastic hinge of reinforced concrete beam based on fiber element model," in *2017 6th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017)*, 2017, pp. 46–50.
- [5] N. K. Psyras and A. G. Sextos, "Build-x: Expert system for seismic analysis and assessment of 3d buildings using openses," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 116, pp. 23–35, 2018.
- [6] C. Liu, C. Lv, C. Wang, G. Yang, D. Huang, and Y. Zhang, "Numerical Study on Biaxial Seismic Performance of Reinforced Concrete Box Piers Based on OpenSees," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 280, no. 1, p. 12002.
- [7] A. Kawano, "Nonlinear analysis of the time-dependent behaviour of reinforced concrete frames," *Res. Rep.*, vol. 125, 1995.
- [8] Y. Bai, A. Kawano, K. Odawara, and S. Matsuo, "Constitutive models for hollow steel tubes and concrete filled steel tubes considering the strength deterioration," *J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 77, no. 677, pp. 1141–1150, 2012.
- [9] B. Mou, Y. Bai, and V. Patel, "Post-local buckling failure of slender and over-design circular CFT columns with high-strength materials," *Eng. Struct.*, vol. 210, p. 110197, 2020.
- [10] M. K. Effendi and N. H. A. Hamid, "Nonlinear finite element and fiber element analysis of concrete filled square steel tubular (cfst) under static loading," in *MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 258, p. 5025.
- [11] Y. Bai, Y. Shi, and K. Deng, "Collapse analysis of high-rise steel moment frames incorporating deterioration effects of column axial force–bending moment interaction," *Eng. Struct.*, vol. 127, pp. 402–415, 2016.
- [12] Y. Bai, S. Guan, X. Lin, and B. Mou, "Seismic collapse analysis of high-rise reinforced concrete frames under long-period ground motions," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 28, no. 1, p. e1566, 2019.
- [13] P. Domone, "Proportioning of self-compacting concrete—the UCL method," 2009.
- [14] S. ASTM, "Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement," *ASTM A615/A615M-09b*, 2009.
- [15] K. Sakino, H. Nakahara, S. Morino, and I. Nishiyama, "Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns," *J. Struct. Eng.*, vol. 130, no. 2, pp. 180–188, 2004.
- [16] M. Menegotto, "Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending," in *Proc. of IABSE symposium on resistance and ultimate deformability of structures acted on by well defined repeated loads*, 1973, pp. 15–22.
- [17] M. Bosco, E. Ferrara, A. Ghersi, E. M. Marino, and P. P. Rossi, "Improvement of the model proposed by Menegotto and Pinto for steel," *Eng. Struct.*, vol. 124, pp. 442–456, 2016.
- [18] A. Halahla, "Identification of Crack in Reinforced Concrete Beam Subjected to Static Load Using Non-linear Finite Element Analysis," *Civ. Eng. J.*, vol. 5, no. 7, pp. 1631–1646, 2019.

Apendik 1

Kekuatan Ultimit Balok

Dalam menghitung kekuatan ultimit balok digunakan diagram alir dibawah ini



Gambar 1.1. Diagram Alir Perancangan Balok Tulangan Rangkap [20]

Regangan beton sebesar $\epsilon_u = 0.003$

Untuk menghitung blok persegi tegangan faktor β_1

Menurut SNI 2847:2013 10.2.7.3 for $f'_c > 28\text{MPa}$

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7}$$

$$= 0.85 - \frac{0.05(62.4 - 28)}{7} = 0.78 \geq 0.65$$

Asumsi $c=47.8\text{ mm}$

$$\epsilon'_s = \epsilon_u \frac{c - d'}{c} \Rightarrow$$

$$\epsilon'_s = 0.003 \frac{47.8 - 44}{50.36} = 0.00023 < \epsilon_y = \frac{632}{200000} = 0.003$$

$$f'_s = \epsilon'_s E = 0.00023 \times 200000 = 47.8 < f_y = 632$$

Tulangan tekan belum leleh --- OK

$$C_s = A'_s (f'_s - 0.85 f'_c)$$

$$C_s = 226.1(47.8 - 0.85 \times 63.2) = -1.169 \text{ kN}$$

$$C_c = 0.85 f'_c b a = 0.85 \times 63.2 \times 200 \times 37.5 = 398.2 \text{ kN}$$

$$T = A_s f_y = 628.31 \times 632 = 397.097 \text{ kN}$$

$$T \approx C_s + C_c$$

$$397.097 \approx -1.169 + 398.2 \Rightarrow \text{OK}$$

$$\epsilon_s = \epsilon_u \frac{d - c}{c} \Rightarrow$$

$$\epsilon_s = 0.003 \frac{252 - 47.6}{47.6} = 0.012 \geq \epsilon_y = \frac{632}{200000} = 0.0031$$

-- Tulangan tarik leleh sesuai asumsi

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') = 95.1 \text{ kNm}$$

ϕ ditentukan sebesar 0.9

$$\text{Jadi, } \phi M_n = 85.6 \text{ kNm}$$

Berdasarkan analisis struktur balok dengan 2 beban dan diasumsikan bahwa berat sendiri struktur diabaikan

Beban maksimum,

$$\phi M_n = M_u = P_u \times 0.9 - P_u \times 0.3$$

$$\Rightarrow P_u = \frac{\phi M_n}{0.6} = 142.7 \text{ kN}$$

Berdasarkan hasil hitungan $P_u = 142.7 \text{ kN}$ berbeda dengan hasil hitungan Harkouss [1], $P_u = 120 \text{ kN}$