



ARTICLE

Analisis Elemen Hingga Terhadap Perilaku Balok Beton Bertulang Yang Diperkuat Dengan Menggunakan Metode Deep Embedment

Muhammad Anwar, Ridwan,^{*} and Enno Yuniarto

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Riau Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas KM 12.5, Pekanbaru 28293

^{*}Corresponding author. Email: ridwan@eng.unri.ac.id

(Received 2 January 2023; revised 16 Maret 2023; accepted 5 April 2023; first published online 12 April 2023)

Abstract

Bridges are infrastructure buildings that are affected by technological developments. Beam structures on bridges often experience a decrease in strength, one of which is shear strength. Sometimes the shear capacity of reinforced concrete beam structures cannot meet the requirements at this time. This can be caused by increased loads, inadequate shear provisions in the initial design and material damage due to natural factors. Reinforcement methods by means of externally bonded (EB) and near-surfaced mounted (NSM) are methods that have been carried out to overcome the decrease in shear strength in beam structures. Shear reinforcement using the EB and NSM methods in practice only relies on epoxy bonding and concrete covers, this makes it susceptible to structural failure. Reinforcement method deep embedment (DE) can be used as a suggestion as shear reinforcement in reinforced concrete beams to overcome the previous problems. Reinforcement using the DE method is shear reinforcement which is reinforced at the core of reinforced concrete beams. The aim of this research is to analyze the behaviour of reinforced concrete beams resulting from finite element modelling using ABAQUS software. This research was carried out by embedding 20 bars vertically with a distance of 100 mm along the shear span. The results of finite element modelling with ABAQUS software show that the maximum load obtained is 28,12 kN and the maximum deflection that occurs is 14,10 mm. The final result of the beam failure model is flexural failure. This is indicated by the initial crack pattern that occurs vertically in the middle of the beam span. The crack continues to propagate towards the compression area of the beam until the beam collapses.

Keywords: reinforced concrete beam, shear strengthened, deep embedment method, ABAQUS, shear capacity

1. Pendahuluan

Teknologi yang semakin maju dan berkembang sangat berpengaruh di berbagai bidang termasuk di sektor pembangunan infrastruktur jembatan. Pembangunan fisik konstruksi jembatan menjadi salah satu yang terdampak dari perkembangan teknologi. Jembatan merupakan bangunan infrastruktur transportasi yang berfungsi menghubungkan suatu daerah ke daerah lain guna meningkatkan aktifitas perekonomian. Pada daerah yang mulai berkembang di sektor industri, aktifitas lalu lintas semakin sibuk membuat terhambatnya kelancaran aktifitas lalu lintas. Peningkatan beban lalu lintas,

lingkungan yang ekstrem dan desain awal konstruksi jembatan yang kurang baik, menyebabkan balok pada jembatan mengalami penurunan kekuatan, salah satunya kekuatan geser. Kapasitas geser yang ada pada struktur balok beton bertulang terkadang tidak dapat memenuhi persyaratan saat ini. Hal ini dapat disebabkan oleh peningkatan beban, ketentuan geser yang tidak memadai dalam desain awal dan kerusakan material akibat faktor alam (Valerio, Ibell, and Darby 2009).

Metode perkuatan dengan cara externally bonded (EB) dan near-surface mounted (NSM) adalah metode yang telah dilakukan untuk mengatasi penurunan kekuatan geser pada struktur balok beton bertulang. Metode EB merupakan metode perkuatan geser dengan cara melibatkan penggunaan pelat baja atau lembaran fiber reinforced polymer (FRP) secara eksternal ke permukaan beton. Metode NSM merupakan metode perkuatan geser dengan cara menancapkan tambahan tulangan atau menambahkan lembaran FRP ke dalam alur yang telah disiapkan pada selimut beton di sisi muka balok beton bertulang (Chaallal *et al.* 2011). Perkuatan geser menggunakan metode EB dan NSM dalam pelaksanaannya hanya mengandalkan lekatan epoksi dan selimut beton, hal ini yang dapat menyebabkan rentan terjadinya kegagalan struktur. Metode perkuatan deep embedment (DE) dapat dijadikan usulan sebagai perkuatan geser pada balok beton bertulang untuk mengatasi masalah di atas. Perkuatan dengan menggunakan metode DE merupakan perkuatan geser yang diperkuat di inti balok beton bertulang dengan cara menanamkan tulangan secara vertikal di sepanjang bentang geser pada penampang beton (Chandra, Ridwan, and Ikhsan 2019).

Analisis komputer dengan pemodelan elemen hingga menjadi salah satu cara simulasi numerik untuk mengetahui gambaran teoritis dan prediksi perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan metode DE. Pada penelitian ini akan menjelaskan mengenai perilaku dari penambahan tulangan yang ditanam secara vertikal disepanjang bentang geser balok beton bertulang melalui pemodelan elemen hingga menggunakan software ABAQUS.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Perilaku Geser Balok Beton Bertulang

Balok beton bertulang merupakan komponen struktur material komposit kombinasi material beton dan baja tulangan yang digabungkan menjadi satu kesatuan konstruksi. Kuat geser balok beton bertulang akan bertambah dengan dipasangnya tulangan geser. Sebelum terjadinya retak diagonal, tulangan geser memberikan kontribusi yang kecil terhadap kuat geser beton. Namun setelah terbentuknya retak diagonal, tulangan geser memberikan kontribusi terhadap kuat geser beton dan redistribusi gaya internal terjadi pada daerah penampang yang retak. Bila jumlah tulangan geser kecil, maka kegagalan yang terjadi diakibatkan oleh lelehnya tulangan geser. Sedangkan bila luas tulangan geser yang digunakan cukup besar, maka ada kemungkinan terjadinya kegagalan geser-tekan yang bersifat daktail dan harus dihindari (Setiawan 2016).

Perilaku balok beton bertulang pada keadaan runtuh karena geser sangat berbeda dengan pada keadaan runtuh karena lentur. Balok tersebut langsung hancur tanpa adanya peringatan terlebih dahulu. Pada keadaan runtuh karena geser juga retak diagonalnya jauh lebih lebar dibandingkan dengan keadaan runtuh karena lentur. Geser juga merupakan parameter yang sangat berarti pada perilaku braket (brackets), korbil (corbel), dan balok tinggi (Nawy 2010).

Retak miring akibat geser di badan balok beton bertulang dapat terjadi tanpa disertai retak akibat lentur di sekitarnya, atau dapat juga sebagai kelanjutan proses retak lentur yang telah mendahuluinya. Retak miring pada balok yang sebelumnya tidak mengalami retak lentur dinamakan sebagai retak geser badan. Retak geser badan juga dapat terjadi di sekitar titik balik lendutan atau pada tempat dimana terjadi penghentian tulangan balok struktur bentang menerus. Retak miring yang terjadi sebagai proses kelanjutan dari retak lentur yang telah timbul dari sebelumnya dinamakan sebagai retak geser lentur. Proses terjadinya retak geser lentur umumnya cenderung merambat dimulai dari tepi masuk ke dalam balok dengan arah hampir vertikal (Dipohusodo 1996).

Distribusi tegangan lentur dan tegangan geser sesuai teori elastisitas untuk balok homogen

ditunjukkan dalam Gambar 1. Tegangan lentur dihitung dari persamaan lentur $f = \frac{M \times c}{I}$, sedangkan tegangan geser maksimum terjadi pada sumbu netral yang besarnya sama dengan $1,5\tau$ (tegangan geser rata-rata) dengan $\tau_a = \frac{V}{bh}$.

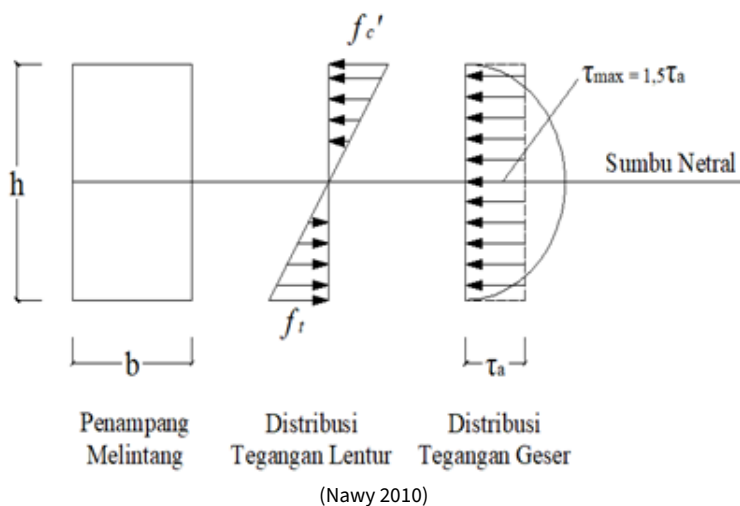


Figure 1. Distribusi Tegangan Lentur pada Balok Persergi

Kegagalan geser pada balok beton bertulang biasanya terjadi pada lokasi terjadinya gaya geser maksimum, yang umumnya terletak pada daerah dekat tumpuan balok. Tanda utama terjadinya kegagalan geser adalah munculnya retak dalam arah diagonal (Setiawan 2016).

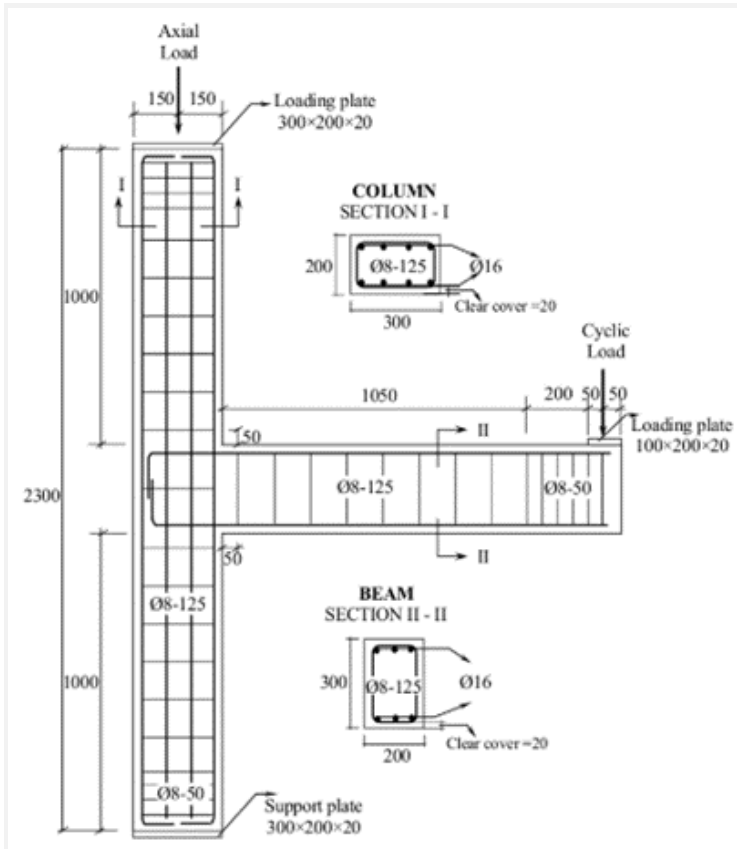
2.2 Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Metode Deep Embedment (DE)

Perkuatan geser dengan metode deep embedment (DE) adalah perkuatan dengan tulangan baja tertanam di dalam lubang balok yang telah disiapkan secara vertikal untuk memperkuat kapasitas geser balok beton bertulang. Teknik perkuatan DE ini memberikan efektifitas perkuatan yang lebih tinggi, karena teknik ini mengandalkan transfer langsung tegangan dari tulangan baja ke inti beton, tidak seperti perkuatan geser dengan metode externally bonded (EB) dan near-surface mounted (NSM). Selain itu, persiapan permukaan beton terhadap perlindungan api dan vandalisme tidak diperlukan (Rahman et al. 2018).

Rahman et al (2018) pernah melakukan penelitian mengenai teknik perkuatan geser dengan metode DE. Enam sambungan balok kolom beton bertulang (BCJs) Eksterior dibuat dan diuji di bawah beban siklik. Detail benda uji balok kolom bertulang (BCJs) dapat dilihat pada Gambar 2.

Diantara lima spesimen, empat diantaranya diperkuat dengan metode DE, dirancang dengan sambungan geser sesuai dengan kode bangunan pra 1980-an. Spesimen yang tersisa dirancang secara memadai sesuai dengan ACI 352R-02. Semua spesimen memiliki dimensi dan konfigurasi penulangan yang sama. Untuk mempelajari pengaruh jenis tulangan, tulangan baja atau CFRP digunakan sebagai tulangan geser tambahan. Jumlah tulangan geser yang ditambahkan juga bervariasi untuk mempelajari pengaruh rasio tulangan tambahan.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah metode perkuatan DE menunjukkan bahwa benda uji tanpa perkuatan mengalami keruntuhan geser sambungan berupa retak diagonal. Benda uji yang diperkuat dengan metode DE menunjukkan kegagalan getas yang lebih sedikit, dimana kerusakan terjadi di daerah balok pada tahap awal pembebanan, menunjukkan permulaan mekanisme engsel balok. Selain itu, spesimen yang diperkuat menunjukkan peningkatan kekuatan geser sambungan,



(Rahman et al. 2018)

Figure 2. Detail Benda Uji Balok-Kolom Beton Bertulang

daktilitas, energi yang hilang dan kekakuan masing-masing 6-21%, 6-93%, 10-54% dan 2-35% dibandingkan dengan spesimen kontrol.

2.3 Perangkat Lunak Elemen Hingga

Metode elemen hingga atau Finite Element Analysis (FEA) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menentukan stress, deformasi dan analisis teknik lainnya. Metode elemen hingga menghasilkan sistem linier dan non linier, karena metode ini menggunakan beberapa konsep matematika didalamnya. Metode elemen hingga menggunakan pendekatan diskretisasi dalam penyelesaian masalah untuk menemukan perpindahan titik simpul (joint) dan gaya-gaya struktur. Diskretisasi yang dilakukan dapat menggunakan elemen satu dimensi (garis), dua dimensi (bidang) dan tiga dimensi (solid). Adapun beberapa model elemen hingga yang biasanya digunakan untuk memudahkan proses menyelesaikan sebuah pemodelan, seperti Vector2, Diana dan ABAQUS (Rahman et al. 2018).

ABAQUS merupakan salah satu perangkat lunak dengan program bertujuan untuk menganalisis elemen hingga yang memfokuskan pada pemodelan sebuah elemen. Program ini menyediakan pemodelan dan visualisasi lingkungan yang lengkap serta input model material yang cukup lengkap. ABAQUS juga menyediakan program yang digunakan untuk memodelkan benda yang akan dianalisis yaitu ABAQUS Computer Aided Engineering (CAE). Keunggulan ABAQUS dibanding perangkat lunak lain yang sejenis adalah lengkapnya menu yang tersedia pada part module (Hastomo 2009).

Selain itu, ABAQUS juga memiliki beberapa fasilitas, salah satu fasilitas yang dapat memfungsikan program ini menjadi program analisis elastis dan plastis. Kemampuan analisis Multiphysics yang dimiliki ABAQUS dapat digunakan dalam berbagai bidang sesuai dengan kebutuhan penelitian. Pengembangan bahasa program dalam ABAQUS memungkinkan para peneliti lebih mudah dalam memilih metode yang digunakan dalam melakukan proses simulasi dan analisis (ABAQUS 2014).

2.4 Model dan Perilaku Material pada ABAQUS

ABAQUS memiliki beberapa model konstitutif untuk menggambarkan perilaku beton yang mengalami berbagai kondisi pembebanan. Beberapa model yang ada pada ABAQUS yaitu model Smeared Crack, model Brittle Cracking dan model Concrete Damage Plasticity (CDP). Model Concrete Damage Plasticity (CDP) dapat digunakan untuk mensimulasikan respons beban siklik beton ketika ada kerusakan pada tegangan dan tekanan. Model ini juga digunakan dalam memodelkan perilaku plastis dari beton. Model ini mengasumsikan mekanisme kegagalan utama dari beton yaitu retak akibat tekan dan tarik. Model ini menggunakan mekanisme leleh dengan persamaan yang dikembangkan sesuai fungsi hasil yang disarankan oleh (Lubliner et al. 1989) dan dimodifikasi oleh (Lee and Fenves 1998). Model ini untuk mendapatkan perilaku non-linier untuk menganalisis beban tekan sampai kuat tekan ultimit dari benda uji.

Parameter-parameter utama yang perlu didefinisikan dalam model CDP yaitu sudut dilatasi (ψ), eksentrisitas (ϵ), nilai K, perbandingan kuat tekan satu arah (f_{b0}/f_{c0}) dan viskositas (μ). Danesh et al (2008) melakukan kajian terhadap nilai parameter CDP tersebut dan menunjukkan bahwa nilai parameter tersebut memiliki nilai yang sesuai dengan karakteristik beton. Namun, dari hasil penelitian mendapatkan nilai rentangan tertentu dari parameter-parameter tersebut. Adapun rentang nilai parameter CDP yang memberikan hasil mendekati hasil uji eksperimen dapat dilihat pada Tabel 1.

Table 1. Rekomendasi Nilai Parameter Concrete Damaged Plasticity (CDP)

Sudut dilatasi (ψ)	Eksentrisitas (ϵ)	K	Perbandingan kuat tekan (f_{b0}/f_{c0})	Viskositas (μ)
25° s/d 40°	0,1	2/3	1,16	0,00001 s/d 0,001

Kriteria leleh hasil Von Mises dalam hubungannya dengan respon isotropic hardening respon digunakan untuk menggambarkan respon material baja tulangan di luar titik lelehnya. Sehingga menghasilkan, baja dengan asumsi linier elastis dengan modulus elastisitas sama dengan 200.000 MPa, poisson rasio sama dengan 0,3. Propertis perkuatan yaitu tegangan leleh, tegangan ultimit dan modulus elastisitas ditentukan dari tegangan-regangan pengujian tarik baja tulangan dan kurva tegangan-regangan teknik trilinear (elastic-plastic-linier) hardening (Chandra, Ridwan, and Ikhsan 2019). Model tegangan-regangan baja tulangan yang disiapkan untuk model ABAQUS dapat dilihat pada Gambar 3.

2.5 Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang Menurut SNI 2847-2019

Persamaan-persamaan untuk kekuatan geser menurut SNI 2847-2019 sebagai berikut:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (1)$$

atau

$$\phi (V_c + V_s) \geq V_u \quad (2)$$

dengan V_u adalah gaya geser terfaktor (kN), V_c adalah kuat geser yang disumbangkan oleh beton (kN), V_s adalah kuat geser yang disumbangkan oleh tulangan (kN), ϕ faktor reduksi dan V_c adalah kuat geser nominal (kN).

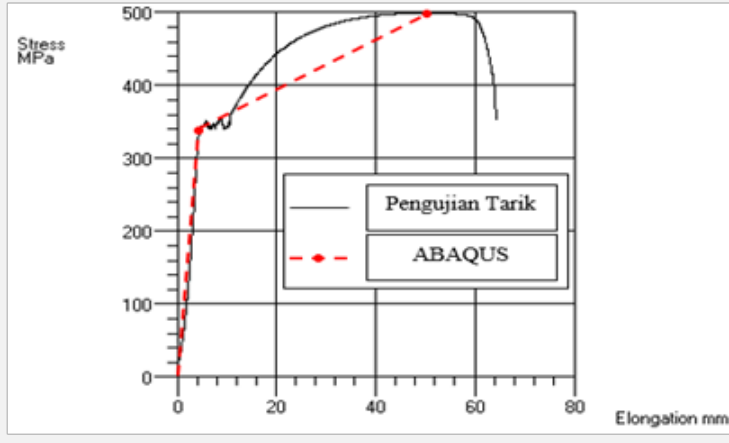


Figure 3. Model Tegangan-Regangan Baja Tulangan yang Disiapkan untuk ABAQUS

Nilai V_c untuk komponen non prategang tanpa gaya aksial, Nilai V_c dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{c(1)} = 0,17 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (3)$$

$$V_{c(2)} = \left(0,16 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) \times b_w \times d \quad (4)$$

$$V_{c(3)} = \left(0,16 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} + 17\rho_w \right) \times b_w \times d \quad (5)$$

$$V_{c(4)} = 0,29 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (6)$$

Untuk menentukan kekuatan geser beton dapat digunakan nilai V_c yang paling kecil dari persamaan di atas. Nilai V_s pada komponen non prategang tulangan geser (sengkan) tertutup yang tegak lurus terhadap sumbu longitudinal komponen dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_s = \frac{A_v \times f_{yt} \times d}{s} \quad (7)$$

dengan V_s adalah kuat geser yang disumbangkan oleh tulangan (kN), s adalah Jarak pusat ke batang tulangan geser ke arah sejajar tulangan pokok penampang (mm), f_{yt} adalah Kuat leleh tulangan geser (MPa), dan d adalah tinggi efektif balok (mm).

2.5.1 Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Menurut SNI 2847-2019

Persamaan-persamaan untuk kekuatan lentur menurut SNI 2847-2019 sebagai berikut:

$$\phi M_n \geq M_u \quad (8)$$

atau

$$\phi M_n \left[C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d_c) \right] > M_u \quad (9)$$

dengan M_u adalah gaya lentur terfaktor (kNm), M_n adalah gaya lentur nominal (kNm), ϕ faktor reduksi, d adalah jarak dari serat tekan penampang balok menuju ke tengah tulangan tarik (mm), d_c adalah Jjarak dari serat tekan penampang balok menuju ke tengah tulangan tekan (mm), a adalah jarak dari serat tekan penampang balok menuju ke garis netral (mm), C_c adalah Resultan gaya tekan pada beton (kN), dan C_s adalah resultan gaya tekan pada tulangan (kN).

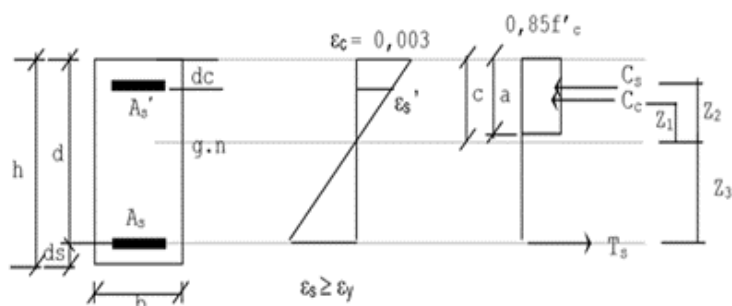


Figure 4. Distribusi Tegangan Lentur pada Penampang Balok Bertulangan Rangkap

3. Metodologi Penelitian

3.1 Deskripsi Benda Uji Balok Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Metode deep embedment (DE)

Benda uji balok beton bertulang yang digunakan didesain sedemikian rupa sehingga akan mendapatkan hasil dari kapasitas geser. Oleh karena itu dengan kapasitas geser kecil maka benda uji balok beton bertulang akan mengalami keruntuhan geser. Benda uji yang akan dianalisis menggunakan kuat tekan beton rencana 18 MPa. Benda uji memiliki ukuran penampang 150 mm x 250 mm dengan panjang total balok adalah 2000 mm. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari dua tulangan longitudinal atas dengan diameter 6 mm dan dua tulangan longitudinal bawah dengan diameter 12 mm. Untuk menghindari kerusakan geser akibat konsentrasi tegangan, maka pada tumpuan dan posisi beban titik diberikan tulangan geser dengan diameter 6 mm.

Benda uji balok beton bertulang pada penelitian ini diperkuat dengan menggunakan metode deep embedment (DE). Metode ini dilakukan dengan cara memasukkan tulangan polos diameter 8 mm secara vertikal disepanjang bentang geser pada balok beton bertulang. Jumlah tulangan perkuatan yang ditanamkan sebanyak 20 tulangan dan dipasang dengan jarak 100 mm antar tulangan perkuatan. Detail dimensi balok beton bertulang dan posisi pemasangan tulangan perkuatan dengan metode deep embedment (DE) dapat dilihat pada Gambar 5.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Analisis Beban dan Lendutan Balok Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Metode DE Menggunakan Elemen Hingga

Hasil yang didapatkan dari analisis menggunakan elemen hingga dengan software ABAQUS yaitu hubungan antara beban (kN) dan lendutan (mm) pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan metode deep embedment (DE) dapat dilihat pada Gambar 6.

Pemodelan balok beton bertulang pada elemen hingga menggunakan mesh 50 mm. Hasil analisis balok beton bertulang yang diperkuat dengan metode deep embedment (DE) pada ABAQUS diperoleh beban maksimum sebesar 28,12 kN dan lendutan yang terjadi sebesar 9,53 mm. Balok mengalami keruntuhan pada saat balok telah mencapai beban maksimum yang ditandai dengan

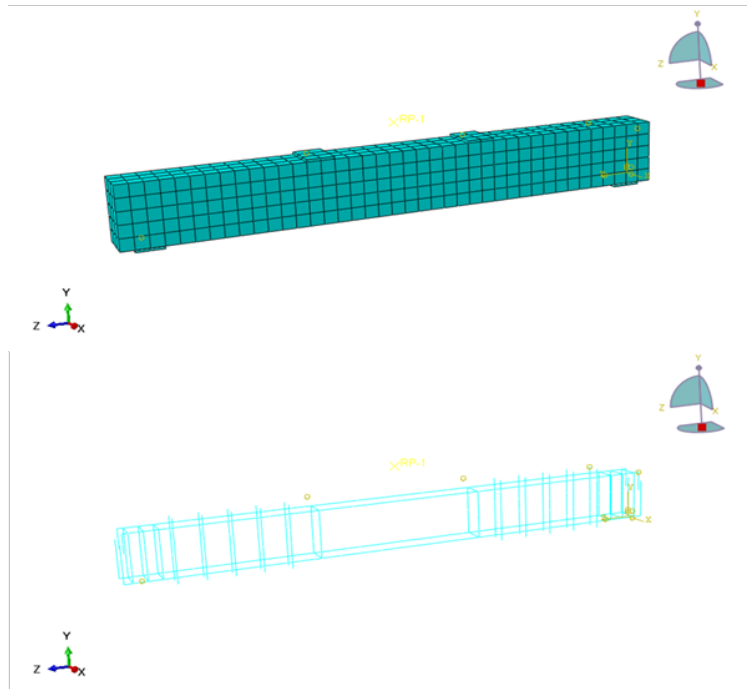


Figure 5. Pemodelan Benda Uji Balok Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Menggunakan Metode DE pada ABAQUS

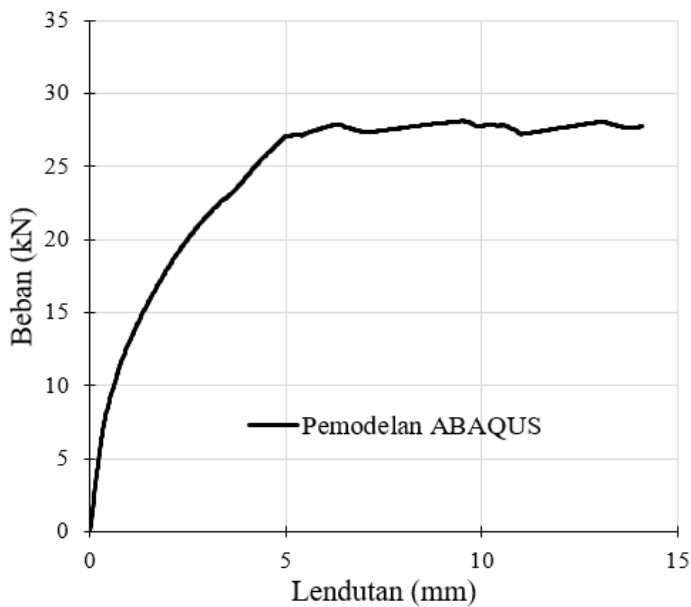


Figure 6. Grafik Hubungan Beban dan Lendutan Hasil Analisis Elemen Hingga dengan Software ABAQUS pada Balok Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Menggunakan Metode deep embedment (DE)

berhentinya perhitungan dalam analisis di ABAQUS. Kondisi akhir dari analisis elemen hingga pada ABAQUS diperoleh beban sebesar 27,73 kN dan lendutan yang terjadi sebesar 14,10 mm.

4.2 Hasil Analisis Pola Retak Balok Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Metode DE Menggunakan Elemen Hingga

Concrete Damage Plasticity (CDP) adalah model material beton yang digunakan dalam analisis elemen hingga dengan software ABAQUS pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan metode deep embedment (DE). Pada model CDP pola retak balok dapat dilihat pada Gambar 7. Pemodelan elemen hingga yang dilakukan dapat memprediksi dengan baik pola retak yang terjadi pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan metode DE.

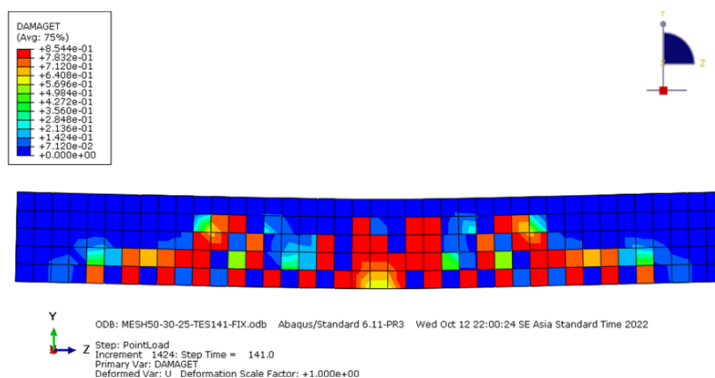


Figure 7. Pola Retak Balok Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Software ABAQUS (Primary Variable, DAMAGE)

Hasil analisis elemen hingga dengan software ABAQUS diperoleh beban saat retak pertama sebesar 7,72 kN dan lendutan yang terjadi sebesar 0,38 mm. Pola retak diawali pada saat balok diberikan beban dan tampak adanya retak halus pertama di daerah tengah bentang. Meningkatnya beban menyebabkan terjadinya lendutan sehingga retak lain juga muncul di tengah bentang balok. Retak yang terjadi akan terus merambat secara vertikal menuju daerah tekan balok sampai balok mengalami keruntuhan.

Hasil akhir dari keruntuhan balok, terlihat bahwa konsentrasi regangan tarik yang terjadi di bentang geser tidak signifikan. Balok juga sudah mulai terbentuk retak vertikal yang mengindikasikan terjadinya keruntuhan lentur. Sehingga dapat dikatakan bahwa model keruntuhan balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan metode deep embedment (DE) mengalami keruntuhan lentur.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari hasil analisis mengenai perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan metode deep embedment (DE) pada elemen hingga dengan software ABAQUS sebagai berikut: Hasil pemodelan menggunakan mesh 50 mm menunjukkan bahwa beban maksimum yang diperoleh sebesar 28,12 kN dan lendutan maksimum yang terjadi sebesar 14,10 mm. Hasil akhir dari model keruntuhan balok mengalami keruntuhan lentur. Hal ini ditandai dengan pola retak awal yang terjadi secara vertikal di daerah tengah bentang balok. Retak terus merambat menuju daerah tekan balok sampai balok mengalami keruntuhan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diharapkan dapat dilanjutkan oleh peneliti lain dengan memperhatikan beberapa saran sebagai berikut: Sebaiknya dilakukan analisis lebih lanjut mengenai perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan metode deep embedment (DE) melalui program elemen hingga dengan software ABAQUS.

Pemodelan balok beton bertulang dengan elemen hingga menggunakan software ABAQUS sangat berguna dalam menganalisis perilaku balok beton bertulang dengan menunjukkan hasil yang cukup akurat.

References

- ABAQUS. 2014. *Analysis user's manual, version 6.14*. Dassault Systemes Simulia, Inc.
- Chaallal, O., A. Mofidi, B. Benmokrane, and K. Neale. 2011. Embedded through-section frp rod method for shear strengthening of rc beams: performance and comparison with existing techniques. *Journal of Composites for Construction* 15 (3): 374–383. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000174](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000174).
- Chandra, Nurman, Ridwan Ridwan, and Muhammad Ikhsan. 2019. Finite element modelling of reinforced concrete beam strengthened with embedded steel reinforcement bars. *Journal of Applied Materials and Technology* 1 (1): 38–45. <https://doi.org/10.31258/Jamt.1.1.38-45>.
- Dipohusodo, Istimawan. 1996. *Struktur beton bertulang*. Jakarta: Gramedia Pustaka. Utama.
- Hastomo, Budi. 2009. Analisis pengaruh sifat mekanik material terhadap distribusi tegangan pada proses deep drawing produk end cup hub body maker dengan menggunakan software abaqus 6.5-1. Skripsi, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Lee, Jeeho, and Gregory L. Fenves. 1998. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 27 (9): 937–956. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199809\)27:9<937::AID-EQE764>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199809)27:9<937::AID-EQE764>3.0.CO;2-5).
- Lubliner, J. J. Oliver, S. Oller, and E. Oñate. 1989. A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures* 25 (3): 299–326. ISSN: 0020-7683. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4).
- Nawy, Edward G. 2010. *Beton bertulang : suatu pendekatan dasar*. Bandung: Refika Aditama.
- Rahman, Ridwan, Samir Dirar, Yaser Jemaa, Marios Theofanous, and Mohammed Elshafie. 2018. Experimental behavior and design of exterior reinforced concrete beam-column joints strengthened with embedded bars. *Journal of Composites for Construction* 22 (6): 04018047. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000883](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000883).
- Setiawan, Agustinus Agus. 2016. *Perancangan struktur beton bertulang*. Edited by Lameda Simarmata. Surabaya: Erlangga.
- Valerio, P., T. J. Ibell, and A. P. Darby. 2009. Deep embedment of frp for concrete shear strengthening. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* 162 (5): 311–321. <https://doi.org/10.1680/stbu.2009.162.5.311>.