STUDI NUMERIKAL DISTRIBUSI TEGANGAN DAN REGANGAN TULANGAN LONGITUDINAL PADA BALOK BETON BERTULANG

Elias Piterson Poma Rasi[*], Mohammad Erfan[1] dan Vega Aditama [1]

[1]Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia*
Email: gersonrasi352@gmail.com

ABSTRACT

The stress and strain distribution in longitudinal reinforcement is a critical parameter for evaluating the structural behavior of reinforced concrete beams subjected to flexural loading. Understanding the evolution of reinforcement stress and strain provides insight into the load transfer mechanism between concrete and reinforcing steel from the elastic stage to yielding and plastic deformation. This study aims to investigate the stress and strain distribution of longitudinal reinforcement in reinforced concrete beams using the Finite Element Method (FEM) implemented in ABAQUS 2024. A three-dimensional beam model with dimensions of 200 × 300 × 3000 mm was developed using concrete with a compressive strength of 25 MPa, D16 longitudinal reinforcement with a yield strength of 420 MPa, and Ø10 stirrups with a yield strength of 280 MPa**.** Concrete was modeled using the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model with the compressive stress–strain relationship based on the Saenz (1964) constitutive model, while the reinforcing steel was modeled as an elastic–plastic material. The analysis was conducted under displacement-controlled loading of 6.405 mm**,** 50 mm, and 100 mm. The numerical results show that increasing displacement leads to a progressive increase in stress and strain in the longitudinal reinforcement, indicating the transition from the elastic stage to yielding and plastic behavior. The maximum reinforcement stress reached 421.74 MPa, while the maximum strain reached 0.056. The concrete compressive stress increased to 39.20 MPa, indicating nonlinear material behavior beyond the design compressive strength. The numerical model was validated against manual calculations, yielding an agreement of approximately 97.96%, demonstrating the reliability of the proposed finite element model. These results confirm that ABAQUS is capable of accurately predicting the stress and strain distribution of reinforcing steel and can be effectively applied to evaluate the mechanical behavior of reinforced concrete beams.

Keywords: ABAQUS, finite element method, longitudinal reinforcement, reinforced concrete beam, stress distribution, strain distribution.

ABSTRAK

Distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal merupakan parameter penting dalam mengevaluasi perilaku mekanis balok beton bertulang akibat pembebanan lentur. Perkembangan tegangan dan regangan pada tulangan menggambarkan mekanisme perpindahan gaya antara beton dan baja tulangan, mulai dari kondisi elastis hingga mencapai kondisi leleh dan deformasi plastis. Penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal balok beton bertulang menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) berbantuan perangkat lunak ABAQUS 2024. Model balok tiga dimensi berukuran 200 × 300 × 3000 mm dimodelkan menggunakan beton dengan kuat tekan 25 MPa, tulangan longitudinal D16 dengan kuat leleh 420 MPa, dan tulangan sengkang Ø10 dengan kuat leleh 280 MPa. Material beton dimodelkan menggunakan Concrete Damaged Plasticity (CDP) dengan hubungan tegangan–regangan berdasarkan model Saenz (1964), sedangkan baja tulangan dimodelkan sebagai material elastis–plastis. Analisis dilakukan menggunakan pembebanan displacement control sebesar 6,405 mm, 50 mm, dan 100 mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan displacement menyebabkan peningkatan distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal yang berkembang dari kondisi elastis menuju plastis. Tegangan maksimum tulangan longitudinal mencapai 421,74 MPa, sedangkan regangan maksimum mencapai 0,056. Tegangan tekan beton meningkat hingga 39,20 MPa, yang menunjukkan perilaku nonlinier material setelah melampaui kuat tekan rencana. Hasil validasi antara simulasi numerik dan perhitungan manual menunjukkan tingkat kesesuaian sekitar 97,96%, sehingga model elemen hingga yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi yang baik. Penelitian ini menunjukkan bahwa ABAQUS mampu merepresentasikan distribusi tegangan dan regangan pada tulangan secara rinci serta dapat digunakan sebagai pendekatan yang efektif untuk mengevaluasi perilaku mekanis balok beton bertulang.

Kata kunci: ABAQUS, metode elemen hingga, tulangan longitudinal, balok beton bertulang, distribusi tegangan, distribusi regangan.

1. PENDAHULUAN

Balok beton bertulang merupakan salah satu elemen struktur yang berfungsi menahan beban lentur melalui kerja sama antara beton sebagai material penahan gaya tekan dan baja tulangan sebagai material penahan gaya tarik. Dalam kondisi pembebanan, beton dan tulangan bekerja secara komposit sehingga terjadi distribusi tegangan dan regangan yang berubah secara bertahap seiring meningkatnya beban. Distribusi tersebut menjadi indikator penting dalam mengevaluasi perilaku struktur, karena menunjukkan mekanisme perpindahan gaya, tingkat pemanfaatan material, serta tahapan keruntuhan yang terjadi pada balok beton bertulang.

Tulangan longitudinal merupakan komponen utama yang berperan dalam menahan gaya tarik akibat momen lentur. Seiring bertambahnya pembebanan, distribusi tegangan dan regangan pada tulangan akan mengalami perubahan dari kondisi elastis hingga mencapai tegangan leleh (*yield stress*) dan deformasi plastis. Informasi mengenai distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal sangat penting karena dapat digunakan untuk mengevaluasi kapasitas lentur, kekakuan, daktilitas, serta respons struktur terhadap pembebanan. Namun, distribusi tersebut sulit diamati secara menyeluruh melalui pendekatan analitis maupun pengujian eksperimental karena umumnya hanya diperoleh pada titik-titik tertentu menggunakan *strain gauge*.

Perkembangan metode numerik, khususnya *Finite Element Method (FEM)*, memberikan alternatif yang efektif untuk menganalisis perilaku struktur beton bertulang secara lebih rinci. Metode ini mampu menggambarkan distribusi tegangan, regangan, deformasi, serta perkembangan kerusakan material pada setiap tahapan pembebanan. Salah satu perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang banyak digunakan adalah ABAQUS, karena memiliki kemampuan memodelkan perilaku nonlinier beton menggunakan Concrete Damaged Plasticity (CDP) dan perilaku baja tulangan sebagai material elastis–plastis. Kombinasi kedua model tersebut memungkinkan simulasi interaksi antara beton dan tulangan sehingga distribusi tegangan dan regangan pada tulangan dapat dianalisis secara lebih komprehensif.

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa pemodelan numerik menggunakan ABAQUS mampu memprediksi respons balok beton bertulang dengan tingkat akurasi yang baik, terutama dalam menentukan kapasitas lentur, hubungan beban–lendutan, dan pola kerusakan beton. Akan tetapi, sebagian besar penelitian masih berfokus pada respons global struktur, sedangkan pembahasan mengenai perkembangan distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal selama proses pembebanan belum dibahas secara mendalam. Padahal, informasi tersebut penting untuk menjelaskan mekanisme perpindahan gaya antara beton dan tulangan serta tahapan perilaku tulangan dari kondisi elastis hingga plastis.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal balok beton bertulang menggunakan metode elemen hingga berbasis ABAQUS 2024. Model balok tiga dimensi dimodelkan menggunakan beton dengan kuat tekan 25 MPa, tulangan longitudinal D16 dengan kuat leleh 420 MPa, dan tulangan sengkang Ø10 dengan kuat leleh 280 MPa. Material beton dimodelkan menggunakan *Concrete Damaged Plasticity (CDP)* dengan hubungan tegangan–regangan berdasarkan model Saenz (1964), sedangkan baja tulangan dimodelkan sebagai material *elastis–plastis*. Analisis dilakukan menggunakan pembebanan *displacement control* untuk mengevaluasi perkembangan distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal, tulangan sengkang, serta beton selama proses pembebanan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai perilaku mekanis tulangan pada balok beton bertulang serta menjadi referensi dalam pengembangan analisis numerik menggunakan metode elemen hingga.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Balok Beton Bertulang

Balok beton bertulang merupakan elemen struktur yang dirancang untuk menahan beban lentur melalui kerja sama antara beton dan baja tulangan. Beton memiliki kuat tekan yang tinggi, tetapi memiliki kuat tarik yang rendah, sehingga diperlukan tulangan baja untuk menahan gaya tarik yang timbul akibat pembebanan. Interaksi antara beton dan tulangan menghasilkan perilaku komposit yang memungkinkan balok memiliki kapasitas, kekakuan, dan daktilitas yang lebih baik dibandingkan beton tanpa tulangan. Pada saat menerima beban, distribusi tegangan dan regangan pada beton maupun tulangan akan berkembang secara bertahap hingga mencapai kondisi retak, leleh, dan akhirnya keruntuhan. Oleh karena itu, evaluasi distribusi tegangan dan regangan pada tulangan menjadi aspek penting dalam analisis perilaku balok beton bertulang.

Distribusi Tegangan dan Regangan pada Tulangan

Distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal dipengaruhi oleh besarnya pembebanan, sifat material, serta interaksi antara beton dan baja tulangan. Pada tahap awal pembebanan, tulangan masih berada pada kondisi elastis sehingga hubungan tegangan dan regangan mengikuti Hukum Hooke. Seiring meningkatnya beban, tegangan pada tulangan akan mencapai tegangan leleh (*yield stress*), kemudian

memasuki daerah plastis yang ditandai dengan peningkatan regangan yang lebih besar dibandingkan peningkatan tegangannya. Perubahan distribusi tegangan dan regangan tersebut menunjukkan mekanisme perpindahan gaya dari beton menuju tulangan serta menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kapasitas dan daktilitas balok beton bertulang.

Concrete Damaged Plasticity (CDP)

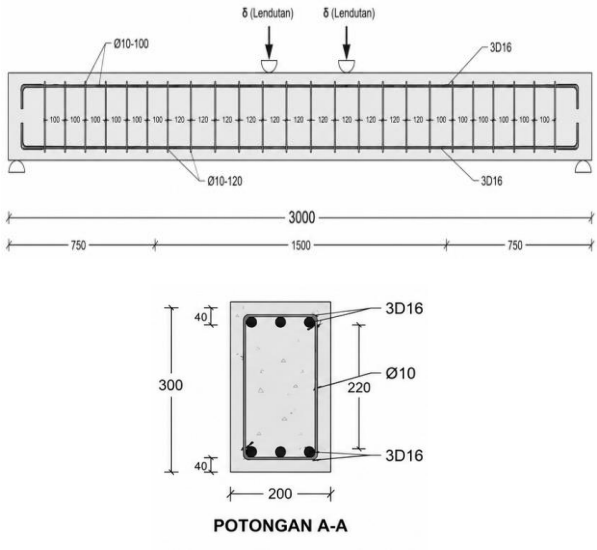
Concrete Damaged Plasticity (CDP) merupakan model konstitutif yang digunakan dalam ABAQUS untuk merepresentasikan perilaku nonlinier beton akibat pembebanan tekan dan tarik. Model ini mampu menggambarkan proses plastisitas, degradasi kekakuan, serta perkembangan kerusakan beton hingga mendekati kondisi runtuh. Pada penelitian ini, hubungan tegangan–regangan beton tekan dimodelkan menggunakan persamaan Saenz (1964), sedangkan perilaku tarik beton dimodelkan menggunakan pendekatan *tension stiffening*. Sementara itu, baja tulangan dimodelkan sebagai material elastis–plastis sehingga mampu merepresentasikan respons tulangan mulai dari kondisi elastis hingga mencapai kondisi leleh.

Metode elemen hingga (*finite element method*)

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan struktur melalui pembagian domain kontinu menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung. Dalam penelitian ini, ABAQUS 2024 digunakan untuk memodelkan balok beton bertulang secara tiga dimensi dengan mempertimbangkan geometri, sifat material, interaksi beton–tulangan, kondisi batas, dan pembebanan. Hasil analisis berupa distribusi tegangan (S11), distribusi regangan (LE11), serta deformasi digunakan untuk mengevaluasi perilaku tulangan longitudinal, tulangan sengkang, dan beton selama proses pembebanan.

3. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) berbantuan perangkat lunak ABAQUS 2024 untuk menganalisis distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal balok beton bertulang akibat pembebanan monotonik. Model yang dianalisis berupa balok beton bertulang sederhana (*simply supported beam*) dengan dimensi 3000 mm × 200 mm × 300 mm. Tulangan longitudinal menggunakan baja ulir D16 yang ditempatkan pada daerah tarik dan daerah tekan, sedangkan tulangan sengkang menggunakan baja Ø10. Pemodelan dilakukan secara tiga dimensi agar distribusi tegangan dan regangan pada setiap bagian tulangan dapat diamati secara lebih rinci selama proses pembebanan. Geometri balok, konfigurasi tulangan, serta posisi pembebanan disusun berdasarkan dimensi perencanaan yang digunakan pada penelitian. Model tersebut dikembangkan untuk menggambarkan perilaku aktual balok beton bertulang sehingga distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal dapat dievaluasi pada setiap tahapan pembebanan.



Gambar 1. Geometri dan Detail Penulangan Balok Beton Bertulang

Property Material

Material yang digunakan pada pemodelan numerik terdiri atas beton dan baja tulangan. Beton digunakan sebagai material penyusun balok, sedangkan baja tulangan terdiri atas tulangan longitudinal D16 dan tulangan sengkang Ø10. Sifat mekanik masing-masing material didefinisikan berdasarkan data material yang digunakan dalam penelitian sehingga model numerik dapat merepresentasikan respons struktur terhadap pembebanan. Baja tulangan dimodelkan sebagai material elastis–plastis berdasarkan hubungan tegangan–regangan hasil pengujian material, sedangkan beton dimodelkan menggunakan pendekatan *Concrete Damaged Plasticity (CDP)* untuk menggambarkan perilaku nonlinier selama proses pembebanan. Properti material yang digunakan dalam pemodelan disajikan pada Tabel 1.

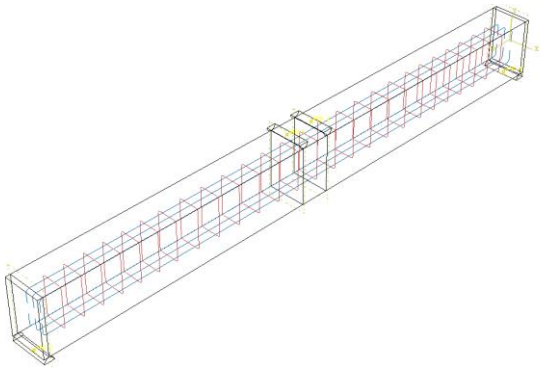
Tabel 1. Properti Material Beton dan Baja Tulangan

Material	Kuat Tekan / Leleh (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)	Poisson's Ratio	Massa Jenis (kg/m³)
Beton	25	23.500	0,2	2.400
Tulangan Longitudinal (D16)	420	200.000	0,3	7.850
Tulangan Sengkang (Ø10)	280	200.000	0,3	7.850

Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik dilakukan menggunakan ABAQUS 2024 dengan pendekatan tiga dimensi. Beton, tulangan longitudinal, dan tulangan sengkang dimodelkan sebagai elemen solid sehingga distribusi tegangan dan regangan pada setiap komponen dapat diamati secara lebih rinci. Interaksi antara beton dan tulangan menggunakan embedded region sehingga diasumsikan terjadi ikatan sempurna (*perfect bond*) selama proses pembebanan.

Model disusun berdasarkan dimensi balok dan konfigurasi penulangan yang telah direncanakan. Diskretisasi model dilakukan menggunakan elemen heksahedral (*structured mesh*) untuk memperoleh distribusi elemen yang seragam dan meningkatkan stabilitas analisis numerik. Model numerik yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.

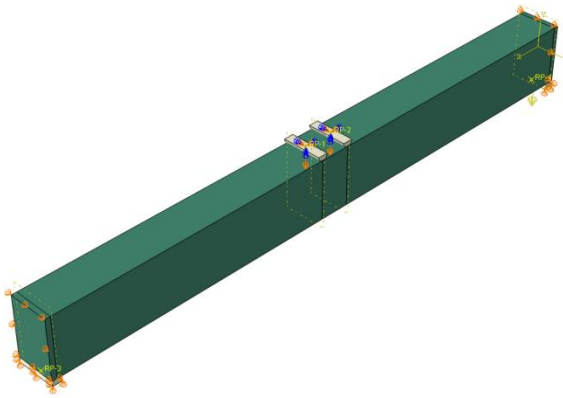


Gambar 2. Model Numerik Balok Beton Bertulang

Kondisi Batas dan Pembebanan

Kondisi batas diterapkan menggunakan tumpuan sendi pada salah satu ujung balok dan tumpuan rol pada ujung lainnya. Pada daerah tumpuan dan pembebanan digunakan pelat baja berbentuk setengah silinder untuk mendistribusikan beban secara merata serta mengurangi konsentrasi tegangan lokal. Pembebanan diberikan menggunakan metode displacement control pada dua titik pembebanan sehingga menghasilkan kondisi lentur pada daerah tengah bentang.

Variasi lendutan yang digunakan dalam penelitian adalah 6,405 mm, 50 mm, dan 100 mm. Ketiga variasi tersebut digunakan untuk mengevaluasi perkembangan distribusi tegangan dan regangan pada tulangan longitudinal mulai dari kondisi elastis, mencapai tegangan leleh, hingga memasuki daerah plastis.



Gambar 3. Kondisi Batas dan Pembebanan Model Balok Beton Bertulang

Parameter Analisis

Parameter utama yang dianalisis pada penelitian ini adalah distribusi tegangan (S11) dan distribusi regangan (LE11) pada tulangan longitudinal. Nilai S11 digunakan untuk mengevaluasi distribusi tegangan aksial sepanjang tulangan akibat pembebanan, sedangkan LE11 digunakan untuk mengidentifikasi perkembangan regangan dari kondisi elastis hingga plastis.

Selain tulangan longitudinal, distribusi tegangan dan regangan pada tulangan sengkang turut dianalisis sebagai parameter pendukung untuk menjelaskan mekanisme penyaluran gaya di dalam balok beton bertulang. Data hasil simulasi diekstraksi menggunakan fasilitas XY Data pada ABAQUS sehingga diperoleh hubungan tegangan–regangan pada setiap variasi lendutan. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan teoritis sebagai proses validasi model numerik untuk menilai tingkat kesesuaian model dalam merepresentasikan perilaku balok beton bertulang.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Tegangan Tulangan Longitudinal

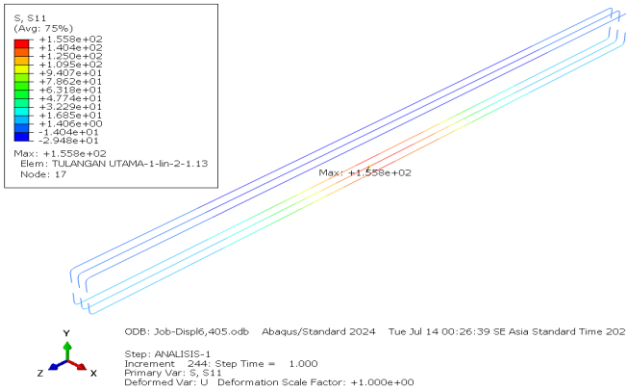
Distribusi tegangan pada tulangan longitudinal dianalisis menggunakan parameter S11 untuk mengetahui perkembangan tegangan akibat peningkatan *displacement*. Analisis dilakukan pada tiga variasi pembebanan, yaitu 6,405 mm, 50 mm, dan 100 mm. Ketiga variasi tersebut dipilih untuk menggambarkan perubahan perilaku tulangan mulai dari kondisi elastis, transisi menuju leleh, hingga memasuki daerah plastis.

Pada tahap awal pembebanan (*displacement* 6,405 mm), distribusi tegangan masih terkonsentrasi pada daerah tarik di tengah bentang. Tegangan maksimum

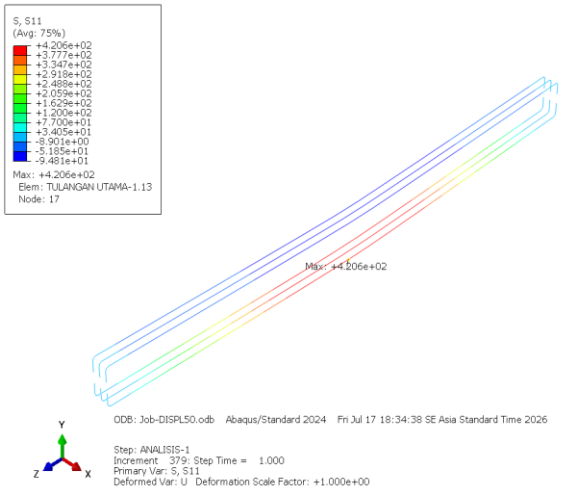
yang diperoleh sebesar 155,841 MPa, sehingga masih berada di bawah tegangan leleh baja tulangan (420 MPa). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tulangan longitudinal masih bekerja secara elastis dan seluruh deformasi yang terjadi masih bersifat sementara.

Seiring meningkatnya *displacement* menjadi 50 mm, distribusi tegangan berkembang pada daerah tarik dan nilai tegangan meningkat hingga 420,62 MPa. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tulangan longitudinal mulai mencapai tegangan leleh (*yield*), sehingga mekanisme penyaluran gaya berubah dari perilaku elastis menuju plastis. Pada kondisi ini, beton pada daerah tarik telah mengalami retak sehingga sebagian besar gaya tarik dipikul oleh tulangan longitudinal.

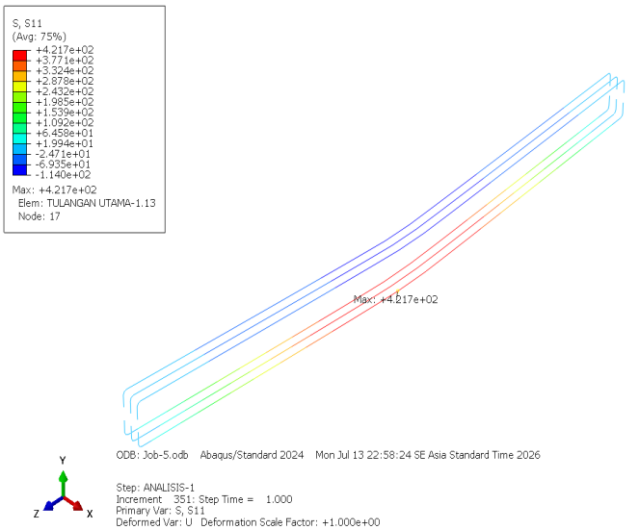
Pada *displacement* 100 mm, distribusi tegangan menunjukkan penyebaran daerah plastis yang semakin luas. Tegangan maksimum mencapai 421,74 MPa, namun peningkatan tegangan relatif kecil dibandingkan peningkatan deformasi yang terjadi. Kondisi ini menunjukkan bahwa setelah mencapai tegangan leleh, tulangan longitudinal lebih banyak mengalami peningkatan regangan daripada peningkatan tegangan, yang merupakan karakteristik perilaku plastis baja tulangan.



Gambar 4. Distribusi Tegangan Tulangan Longitudinal (*Displacement* 6,405 mm)



Gambar 5. Distribusi Tegangan Tulangan Longitudinal (*Displacement* 50 mm)

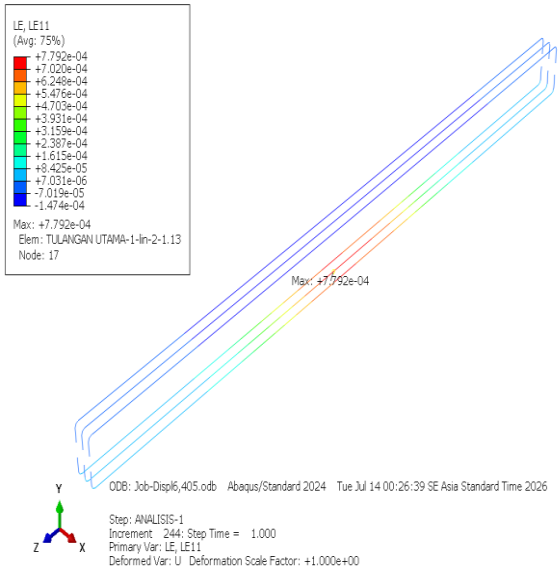


Gambar 6. Distribusi Tegangan Tulangan Longitudinal (*Displacement* 100 mm)

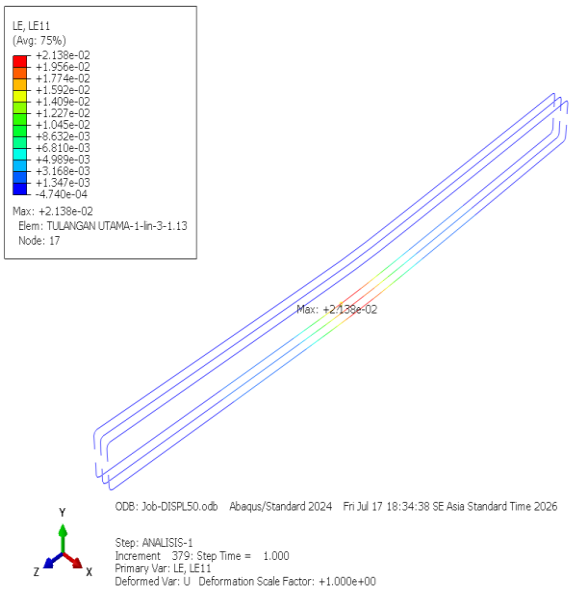
Distribusi Regangan Tulangan Longitudinal

Distribusi regangan tulangan longitudinal dianalisis menggunakan parameter LE11 untuk mengevaluasi perkembangan deformasi akibat peningkatan pembebanan. Regangan merupakan parameter penting karena mampu menunjukkan perubahan perilaku tulangan dari kondisi elastis menuju plastis.

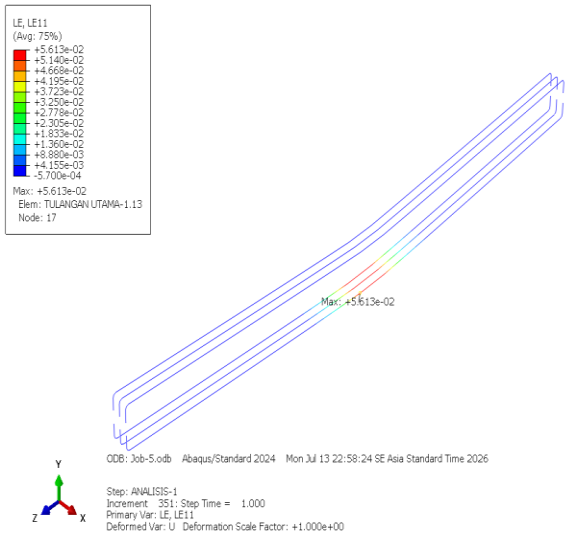
Pada *displacement* 6,405 mm, regangan maksimum sebesar 0,0007, yang masih jauh di bawah regangan leleh baja (0,0021). Ketika *displacement* meningkat menjadi 50 mm, regangan bertambah menjadi 0,021, sedangkan pada *displacement* 100 mm regangan meningkat hingga 0,056. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa deformasi tulangan berkembang secara signifikan setelah tulangan mencapai kondisi leleh.



Gambar 7. Distribusi ReganganTulangan Longitudinal (*Displacement* 6,405 mm)



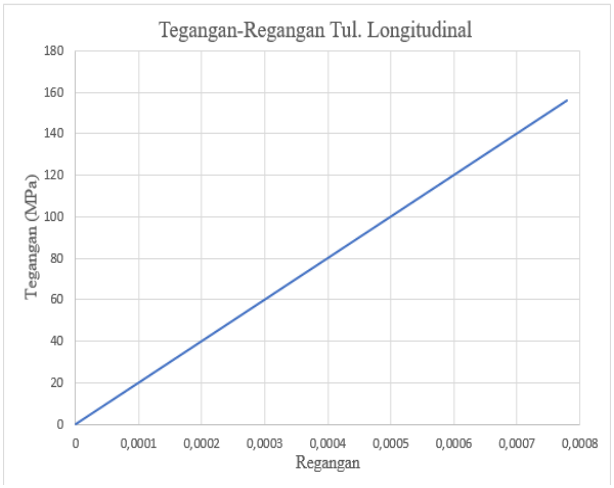
Gambar 8. Distribusi Regangan Tulangan Longitudinal (*Displacement* 50 mm)



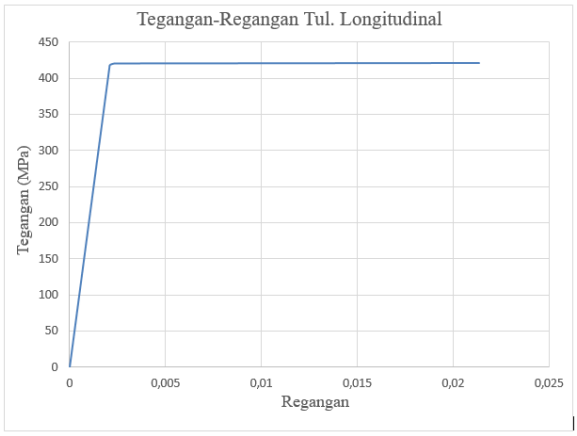
Gambar 9. Distribusi Regangan Tulangan Longitudinal (*Displacement* 100 mm)

Kurva Tegangan dan Regangan

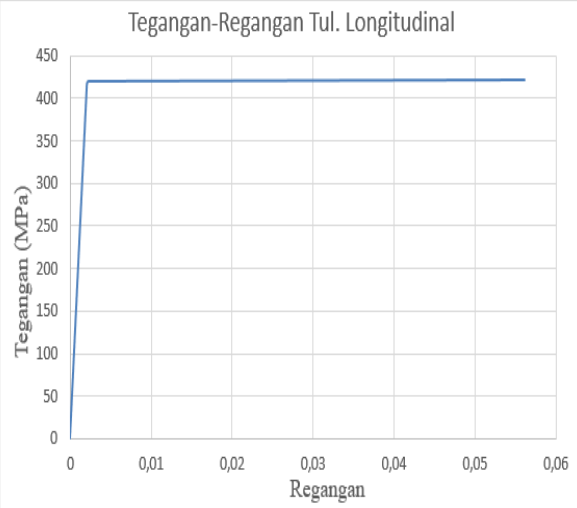
Hubungan tegangan dan regangan hasil analisis ABAQUS diperoleh melalui fasilitas XY Data. Kurva menunjukkan hubungan linier pada tahap awal pembebanan, kemudian membentuk daerah yield *plateau* setelah tegangan mencapai sekitar 420 MPa. Setelah kondisi tersebut tercapai, peningkatan pembebanan hanya menyebabkan bertambahnya regangan, sedangkan tegangan relatif konstan. Fenomena ini menunjukkan bahwa tulangan longitudinal telah memasuki daerah plastis. urva tegangan–regangan hasil ekstraksi XY Data menunjukkan bahwa model numerik mampu merepresentasikan perilaku mekanis tulangan longitudinal selama proses pembebanan. Pada tahap awal, kurva masih menunjukkan hubungan linier yang menandakan tulangan bekerja pada daerah elastis. Seiring bertambahnya *displacement*, tegangan meningkat hingga mencapai tegangan leleh sekitar 420 MPa, kemudian membentuk daerah *yield plateau* dengan peningkatan regangan yang signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa model ABAQUS berhasil menggambarkan transisi perilaku tulangan dari kondisi elastis menuju plastis sesuai dengan karakteristik material baja tulangan



Gambar 10. Kurva Tegangan Regangan Tulangan Longitudinal Displacement 6,405 mm)



Gambar 11. Kurva Tegangan Regangan Tulangan Longitudinal Displacement 6,405 mm)

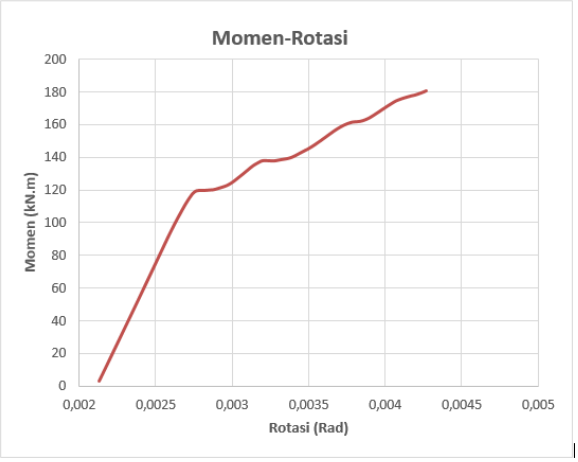


Gambar 12. Kurva Tegangan Regangan Tulangan Longitudinal Displacement 100 mm)

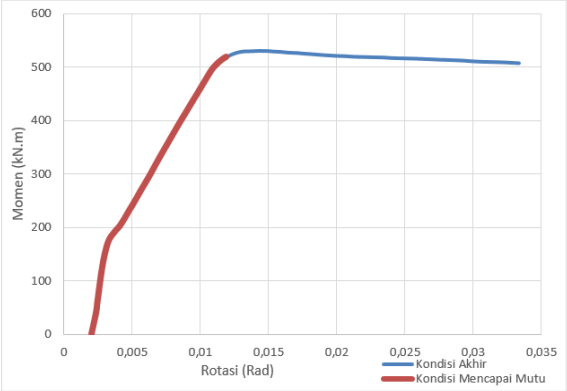
Kurva Momen-Rotasi

Kurva momen–rotasi digunakan untuk mengevaluasi perilaku lentur balok beton bertulang selama proses pembebanan. Hubungan antara momen dan rotasi memberikan informasi mengenai perubahan kekakuan struktur, kemampuan balok dalam menahan momen lentur, serta perkembangan kerusakan akibat peningkatan *displacement*. Pada penelitian ini, kurva momen–rotasi diperoleh dari hasil analisis numerik menggunakan ABAQUS pada tiga variasi *displacement*, yaitu 6,405 mm, 50 mm, dan 100 mm. Perubahan bentuk kurva pada setiap variasi pembebanan digunakan untuk mengidentifikasi transisi perilaku struktur dari kondisi elastis hingga plastis.

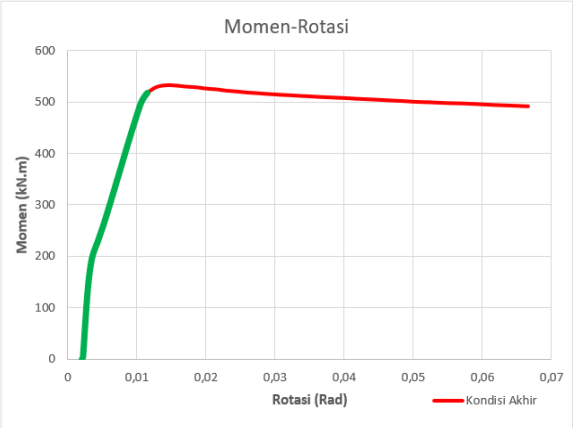
Pada *displacement* 6,405 mm, kurva menunjukkan hubungan yang hampir linier antara momen dan rotasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa balok masih memiliki kekakuan yang tinggi sehingga peningkatan rotasi diikuti oleh peningkatan kapasitas momen secara proporsional. Seiring bertambahnya pembebanan menjadi 50 mm, kurva mulai menunjukkan penurunan kemiringan yang mengindikasikan berkurangnya kekakuan struktur akibat berkembangnya retak pada beton dan mulai terjadinya leleh pada tulangan longitudinal. Ketika *displacement* ditingkatkan menjadi 100 mm, penurunan kekakuan terlihat semakin jelas. Walaupun rotasi terus meningkat, kapasitas momen tidak lagi mengalami peningkatan yang signifikan bahkan cenderung menurun. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur telah memasuki perilaku nonlinier akibat berkembangnya kerusakan beton pada zona tekan serta deformasi plastis pada tulangan longitudinal.



Gambar 13. Kurva Momen-Rotasi Model (Displacement 6,405)



Gambar 14. Kurva Momen-Rotasi Model (Displacement 50)



Gambar 15. Kurva Momen-Rotasi Model (Displacement 100)

Kurva momen–rotasi hasil simulasi ABAQUS menunjukkan bahwa peningkatan *displacement* menyebabkan rotasi balok semakin besar dan diikuti dengan penurunan kekakuan struktur. Meskipun demikian, balok masih mampu mempertahankan kapasitas momen melalui mekanisme redistribusi tegangan dari beton menuju tulangan longitudinal. Hasil ini menunjukkan bahwa model numerik mampu

menggambarkan perilaku lentur balok beton bertulang secara realistis, mulai dari kondisi elastis, transisi menuju leleh, hingga memasuki daerah plastis.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dengan perangkat lunak ABAQUS 2024 terhadap balok beton bertulang, menunjukkan bahwa peningkatan *displacement* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap distribusi tegangan dan regangan pada tulangan. Pada *displacement* 6,405 mm, tulangan longitudinal masih bekerja pada kondisi elastis dengan tegangan maksimum sebesar 155,841 MPa dan regangan sebesar 0,0007. Seiring meningkatnya *displacement* menjadi 50 mm, tegangan tulangan mencapai 420,62 MPa, yang menunjukkan bahwa tulangan mulai mengalami kondisi leleh (*yield*). Pada *displacement* 100 mm, tegangan maksimum tulangan longitudinal meningkat menjadi 421,74 MPa dengan regangan sebesar 0,056, sehingga menunjukkan bahwa tulangan telah memasuki daerah plastis. Sementara itu, tulangan sengkang juga mengalami peningkatan tegangan dan regangan hingga mencapai tegangan maksimum sebesar 280,17 MPa, yang menunjukkan bahwa kapasitas tulangan sengkang dalam menahan gaya geser telah termobilisasi pada tahap akhir pembebanan. Kurva tegangan–regangan dan kurva momen–rotasi hasil simulasi ABAQUS menunjukkan bahwa peningkatan *displacement* menyebabkan bertambahnya deformasi, berkembangnya daerah plastis pada tulangan, serta menurunnya kekakuan balok akibat kerusakan beton pada zona tekan. Meskipun demikian, tulangan longitudinal tetap mampu mempertahankan kapasitas lentur balok setelah beton mulai mengalami penurunan kemampuan menahan beban. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemodelan numerik menggunakan ABAQUS mampu memberikan gambaran yang rinci mengenai distribusi tegangan dan regangan pada tulangan, sehingga dapat digunakan sebagai metode yang efektif dalam mengevaluasi perilaku balok beton bertulang akibat pembebanan lentur.

DAFTAR PUSTAKA

American Concrete Institute. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

Dassault Systèmes. (2023). *Abaqus 2023 Documentation*. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp.

Hibbeler, R. C. (2020). *Structural Analysis* (10th ed.). Pearson Education.

Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2022). *Concrete Technology* (3rd ed.). Pearson Education Limited.

Nguyen, T. H., Tran, Q. D., & Pham, M. T. (2024). Numerical investigation of reinforced concrete beam behavior using the concrete damaged plasticity model. *Structures*, 62, 106021.

Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*. New York: John Wiley & Sons.

Saenz, L. P. (1964). Discussion of equation for the stress–strain curve of concrete. *ACI Journal Proceedings*, 61(9), 1229–1235.

Standar Nasional Indonesia. (2019). *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Standar Nasional Indonesia. (2024). *SNI 2052:2024 Baja Tulangan Beton*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Zhou, X., Zhang, Y., & Li, H. (2023). Finite element analysis of reinforced concrete beams under flexural loading using concrete damaged plasticity. *Engineering Structures*, 280, 115684.