

Pengaruh Rasio Tulangan Longitudinal terhadap Respons Momen–Kurvatur Kolom Beton Bertulang dengan Beban Aksial Rendah

I Gusti Agung Arie Krismayanti^{1*}, Putu Ryan Priyatna¹, I Putu Pandu Rusmana¹, Sagung Istri Pramitari Wima Devi¹, Putu Ogi Suryadinata¹

¹Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bali

Email: *ariekrismayanti@pnb.ac.id

Abstract

Reinforced concrete columns are structural elements subjected to combined axial load and bending moment. The performance of a column section is influenced by various parameters, one of which is the longitudinal reinforcement ratio. This study investigates the effect of variations in longitudinal reinforcement ratio on the moment–curvature relationship of reinforced concrete columns under a constant axial load ratio of 0.10Agf'c. The analysis was conducted numerically using XTRACT based on a nonlinear section analysis approach, which considers the nonlinear behavior of both concrete and reinforcing steel. The model consists of a square column cross-section with dimensions of 300 mm × 300 mm, using a concrete compressive strength of 25 MPa and a steel yield strength of 420 MPa. The longitudinal reinforcement configurations considered are 8D16, 12D16, and 16D16. The results show that increasing the reinforcement ratio consistently enhances the ultimate moment capacity from 93.82 kNm to 117.40 kNm and 143.70 kNm, respectively, and improves the initial stiffness of the section. In addition, the reinforcement ratio influences the shape of the moment–curvature curve, particularly in the post-yield stage, where sections with higher reinforcement ratios tend to exhibit a stiffer response with reduced deformation capacity. These findings indicate that the longitudinal reinforcement ratio has an important role in determining the flexural behavior of reinforced concrete columns subjected to combined axial load and bending moment.

Keywords: Moment–Curvature, Nonlinear Section Analysis, Reinforced Concrete Column, Reinforcement Ratio

Abstrak

Kolom beton bertulang merupakan elemen struktur yang mengalami kombinasi gaya aksial dan momen lentur. Kinerja penampang kolom dipengaruhi oleh berbagai parameter, salah satunya adalah rasio tulangan longitudinal. Penelitian ini membahas pengaruh rasio tulangan longitudinal terhadap respons momen–kurvatur kolom beton bertulang dengan beban aksial rendah. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak XTRACT melalui pendekatan nonlinear section analysis untuk memperoleh hubungan antara momen dan kurvatur penampang. Model yang dianalisis berupa kolom beton bertulang berukuran 300 mm × 300 mm dengan mutu beton 25 MPa dan mutu baja 420 MPa. Variasi tulangan longitudinal yang digunakan terdiri dari 8D16, 12D16, dan 16D16 pada kondisi beban aksial sebesar 0.10Agf'c. Hasil analisis memperlihatkan bahwa peningkatan rasio tulangan menyebabkan kapasitas momen ultimit dan kekakuan awal penampang meningkat. Kapasitas momen bertambah dari 93,82 kNm pada variasi 8D16 menjadi 143,70 kNm pada variasi 16D16. Selain itu, penampang dengan rasio tulangan lebih besar menunjukkan respons pasca-leleh yang lebih kaku dengan kemampuan deformasi yang lebih terbatas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio tulangan longitudinal berpengaruh terhadap kapasitas lentur, kekakuan, dan karakteristik deformasi kolom beton bertulang.

Keywords: Kolom Beton Bertulang, Momen–Kurvatur, Nonlinear Section Analysis, Rasio Tulangan

1. Pendahuluan

Kolom beton bertulang merupakan elemen vertikal utama dalam struktur bangunan yang berfungsi meneruskan beban dari lantai dan atap ke fondasi. Selain menahan gaya aksial, kolom juga mengalami momen lentur akibat eksentrisitas beban maupun pengaruh beban lateral. Kombinasi pembebanan tersebut menyebabkan perilaku penampang menjadi nonlinier, terutama ketika beton pada daerah tarik mulai retak dan tulangan baja menunjukkan perilaku plastis [1][2][3].

Salah satu faktor utama yang memengaruhi kinerja kolom adalah rasio tulangan longitudinal. Besarnya rasio tulangan menentukan kontribusi baja dalam menahan momen lentur. Peningkatan rasio tulangan umumnya meningkatkan kapasitas momen penampang, namun juga memengaruhi kekakuan dan karakteristik deformasi kolom [4][5].

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk mengevaluasi perilaku lentur kolom beton bertulang adalah analisis momen–kurvatur, karena metode ini mampu menggambarkan perubahan respons penampang dari kondisi elastis hingga mencapai kondisi ultimit. Kurva ini memungkinkan identifikasi parameter penting seperti kekakuan awal, momen maksimum, dan perilaku pasca-leleh [6][7]. Penentuan yield curvature dan failure curvature merupakan aspek penting dalam memahami respons nonlinier penampang beton bertulang, khususnya dalam mengevaluasi kapasitas deformasi dan perilaku ultimit struktur [8]. Beberapa penelitian pada balok beton bertulang juga menggunakan pendekatan serupa untuk memahami pengaruh rasio tulangan terhadap kapasitas lentur dan daktilitas [9], sehingga dapat menjadi perbandingan metodologi dengan kolom.

Perilaku momen–kurvatur berkaitan erat dengan daktilitas penampang, yang dipengaruhi oleh karakteristik material dan kondisi pembebanan, termasuk pengaruh gaya aksial pada kolom beton bertulang [10]. Variasi rasio tulangan lentur mempengaruhi hubungan daktilitas kurvatur pada elemen beton bertulang, di mana peningkatan rasio tulangan cenderung meningkatkan kapasitas kekuatan namun mengurangi kemampuan deformasi penampang. Oleh karena itu, evaluasi hubungan momen–kurvatur menjadi penting untuk memahami keseimbangan antara kapasitas kekuatan dan daktilitas struktur [11].

Kemajuan analisis numerik memungkinkan perilaku beton dan baja dimodelkan secara lebih rinci melalui pendekatan nonlinear section analysis, sehingga respons penampang dapat direpresentasikan mendekati kondisi aktual. Pendekatan ini mempertimbangkan hubungan tegangan–regangan nonlinier pada seluruh penampang, termasuk penggunaan model beton terkekang yang umum diterapkan dalam analisis kolom untuk meningkatkan akurasi hasil [5][12].

Beberapa studi menunjukkan bahwa variasi rasio tulangan longitudinal berkontribusi terhadap perubahan kapasitas momen dan karakteristik kurva momen–kurvatur kolom [6][4][8]. Meskipun analisis momen–kurvatur kolom beton bertulang telah banyak dibahas pada penelitian sebelumnya, kajian parametrik yang secara khusus mengevaluasi pengaruh variasi rasio tulangan longitudinal terhadap perubahan karakteristik kurva momen–kurvatur, kapasitas momen ultimit, kekakuan awal, dan respons pasca-leleh kolom beton bertulang pada kondisi beban aksial rendah masih terbatas. Selain itu, interaksi antara gaya aksial dan momen lentur juga mempengaruhi distribusi tegangan dan respons penampang kolom beton bertulang secara keseluruhan [1][13].

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi rasio tulangan longitudinal terhadap respons momen–kurvatur kolom beton bertulang, kapasitas momen ultimit, kekakuan awal, dan karakteristik deformasi penampang dengan mempertimbangkan beban aksial konstan sebesar $0.10A_g f_c$. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih sistematis mengenai pengaruh rasio tulangan longitudinal terhadap perilaku kolom beton bertulang melalui pendekatan nonlinear section analysis.

2. Metode

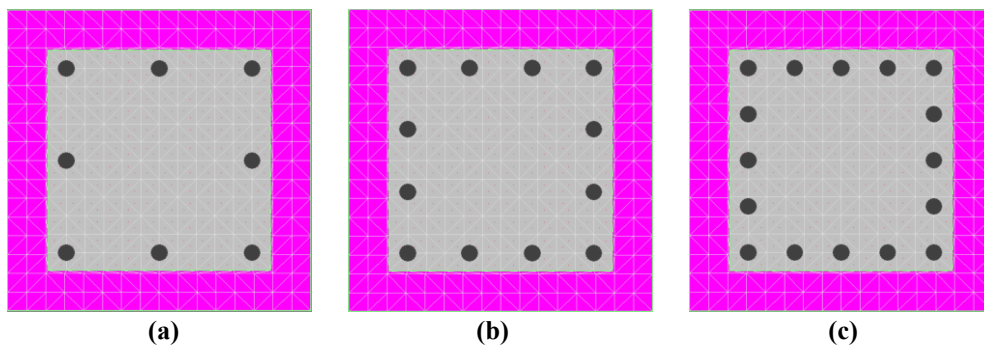
Metodologi dalam penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi pengaruh variasi rasio tulangan longitudinal terhadap perilaku momen–kurvatur pada kolom beton bertulang. Analisis dilakukan secara numerik dengan memanfaatkan perangkat lunak XTRACT melalui pendekatan nonlinear section analysis. Pemodelan difokuskan pada penampang kolom dengan berbagai konfigurasi tulangan longitudinal yang dianalisis pada kondisi beban aksial konstan sebesar $0.10A_g f_c$

untuk memperoleh hubungan antara momen dan kurvatur. Penelitian ini merupakan studi parametrik numerik yang dilakukan untuk mengevaluasi perubahan respons penampang akibat variasi rasio tulangan longitudinal pada kondisi beban aksial rendah yang konstan.

2.1. Pemodelan Penampang

Pemodelan dilakukan pada kolom beton bertulang dengan penampang berbentuk persegi berukuran 300 mm × 300 mm. Material yang digunakan meliputi beton dengan kuat tekan 25 MPa serta baja tulangan dengan tegangan leleh 420 MPa. Penampang dianalisis menggunakan pendekatan *nonlinear section analysis* melalui perangkat lunak XTRACT, sehingga perilaku nonlinier dari beton dan baja dapat disimulasikan secara lebih representatif.

Susunan tulangan longitudinal ditempatkan secara simetris pada keempat sisi penampang guna menghasilkan distribusi tegangan yang seimbang. Dalam penelitian ini, penampang dianalisis dengan mempertimbangkan beban aksial tekan konstan sebesar 0.10Agf'c untuk merepresentasikan kondisi aktual kolom yang mengalami kombinasi gaya aksial dan momen lentur. Berdasarkan dimensi penampang dan mutu beton yang digunakan, besar beban aksial tekan yang diterapkan sebesar 0.10Agf'c. Model penampang yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Model penampang kolom beton bertulang untuk variasi (a) 8D16, (b) 12D16, dan (c) 16D16

2.2. Variasi Parameter

Parameter yang ditinjau dalam penelitian ini difokuskan pada variasi rasio tulangan longitudinal. Konfigurasi tulangan yang digunakan terdiri dari 8D16, 12D16, dan 16D16, sehingga menghasilkan perbedaan rasio tulangan pada masing-masing model penampang. Nilai rasio tulangan dihitung berdasarkan perbandingan antara luas total tulangan terhadap luas penampang bruto kolom. Variasi tersebut digunakan untuk mengkaji pengaruh jumlah tulangan terhadap karakteristik respons penampang pada kondisi kombinasi gaya aksial dan momen lentur.

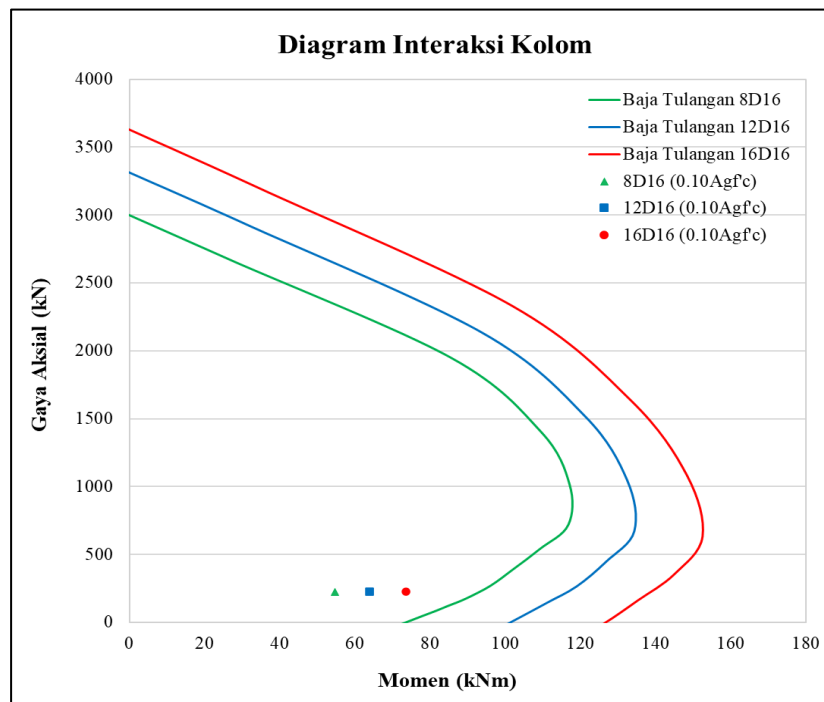
2.3. Prosedur Analisis

Proses analisis dimulai dengan penentuan parameter material dan konfigurasi tulangan, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan penampang pada XTRACT untuk memperoleh kurva hubungan momen–kurvatur pada tiap variasi tulangan. Selanjutnya, analisis momen–kurvatur dilakukan menggunakan perangkat lunak XTRACT untuk memperoleh hubungan antara momen dan kurvatur pada setiap model penampang dengan beban aksial konstan sebesar 0.10Agf'c. Hasil yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi karakteristik respons penampang. Parameter yang dievaluasi meliputi kapasitas momen ultimit, kekakuan awal yang ditunjukkan oleh kemiringan kurva pada tahap elastis, serta bentuk kurva momen–kurvatur yang merepresentasikan perilaku penampang dari kondisi elastis hingga tahap pasca-leleh.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Diagram Interaksi Kolom

Gambar 2 menunjukkan diagram interaksi aksial–momen kolom beton bertulang untuk variasi tulangan longitudinal 8D16, 12D16, dan 16D16. Diagram tersebut menggambarkan hubungan antara kapasitas gaya aksial dan kapasitas momen penampang berdasarkan hasil analisis nonlinear section menggunakan XTRACT. Selain itu, titik pembebanan dengan rasio beban aksial sebesar $0.10Agf'c$ juga ditunjukkan pada masing-masing kurva.



Gambar 2. Diagram Interaksi Kolom

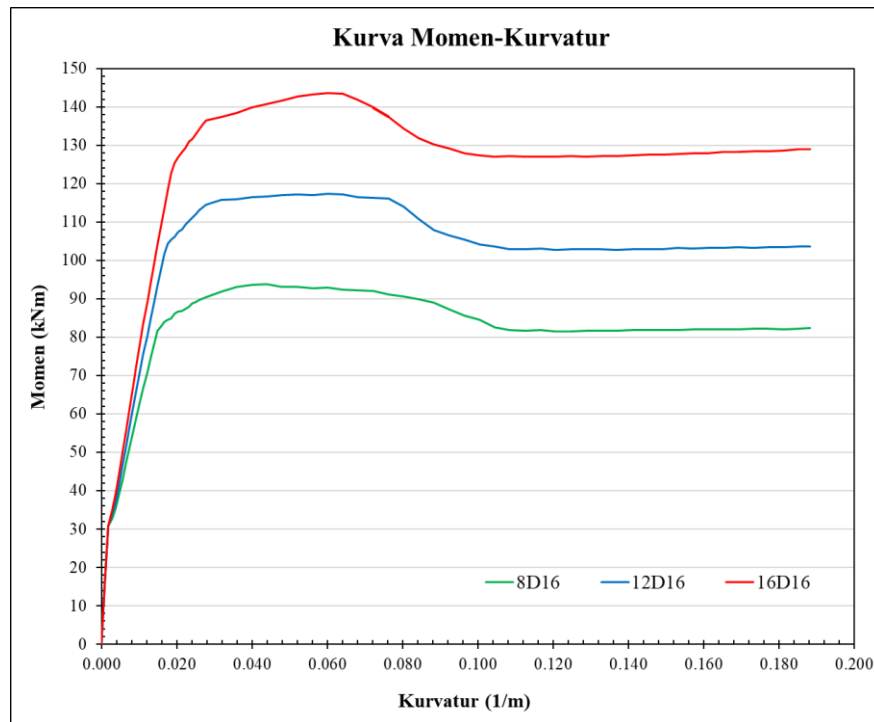
Berdasarkan hasil analisis, peningkatan rasio tulangan longitudinal memberikan kapasitas interaksi aksial–momen lebih besar pada setiap variasi penampang. Variasi tulangan 16D16 menghasilkan kapasitas momen paling besar dibandingkan variasi 12D16 dan 8D16. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar jumlah tulangan longitudinal, maka kemampuan penampang dalam menahan kombinasi gaya aksial dan momen lentur juga semakin meningkat.

Pada pembebanan aksial sebesar $0.10Agf'c$, seluruh penampang masih menunjukkan perilaku yang didominasi oleh lentur. Akan tetapi, adanya gaya aksial tekan membuat beton pada daerah tekan bekerja lebih efektif sehingga kapasitas penampang menjadi lebih besar dibandingkan kondisi lentur murni. Dengan adanya kombinasi gaya aksial dan momen lentur, distribusi tegangan pada penampang juga menjadi lebih kompleks. Selain mempengaruhi kapasitas momen, peningkatan rasio tulangan longitudinal turut mempengaruhi bentuk diagram interaksi. Penampang dengan jumlah tulangan yang lebih besar memiliki daerah interaksi yang lebih luas, yang menunjukkan peningkatan kemampuan penampang dalam memikul kombinasi pembebanan. Kondisi ini terjadi karena kontribusi tulangan baja terhadap tahanan tarik dan tekan menjadi lebih besar seiring bertambahnya rasio tulangan.

Secara keseluruhan, hasil diagram interaksi menunjukkan bahwa rasio tulangan longitudinal memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap kapasitas dan respons kolom beton bertulang pada kondisi kombinasi gaya aksial dan momen lentur.

3.2. Kurva Momen–Kurvatur

Gambar 3 menunjukkan hubungan momen–kurvatur kolom beton bertulang dengan variasi rasio tulangan longitudinal pada kondisi beban aksial konstan sebesar $0.10A_gf_c$. Secara umum, seluruh kurva memperlihatkan perilaku nonlinier yang terdiri atas tahap elastis, tahap setelah retak, tahap mendekati kapasitas ultimit, dan tahap pasca-leleh.



Gambar 3. Kurva Hubungan Momen–Kurvatur Kolom Beton Bertulang untuk Variasi Rasio Tulangan Longitudinal

Pada tahap awal pembebanan, hubungan antara momen dan kurvatur masih menunjukkan pola yang hampir linier. Ketiga variasi tulangan memiliki kecenderungan respons yang hampir sama, tetapi penampang dengan rasio tulangan lebih besar menunjukkan kemiringan kurva yang lebih tinggi. Hal ini menandakan bahwa penambahan rasio tulangan longitudinal menyebabkan kekakuan awal penampang meningkat. Ketika beton pada daerah tarik mulai mengalami retak, kekakuan penampang mulai menurun dan kurva berubah menjadi nonlinier. Pada kondisi ini, perbedaan respons antar variasi tulangan mulai terlihat lebih jelas. Variasi 16D16 mampu mempertahankan kapasitas momen yang lebih besar dibandingkan variasi 12D16 dan 8D16. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa semakin besar jumlah tulangan longitudinal, maka kontribusi baja dalam menahan gaya tarik akibat momen lentur juga semakin besar.

Hasil analisis menunjukkan bahwa variasi 8D16 menghasilkan kapasitas momen maksimum sekitar 93 kNm, sedangkan variasi 12D16 dan 16D16 masing-masing mencapai sekitar 117 kNm dan 144 kNm. Kenaikan kapasitas tersebut memperlihatkan bahwa rasio tulangan longitudinal berpengaruh terhadap kemampuan penampang dalam menahan kombinasi gaya aksial dan momen lentur. Setelah mencapai kapasitas maksimum, seluruh kurva mulai mengalami penurunan kapasitas yang menunjukkan terjadinya kondisi pasca-leleh. Penurunan ini dipengaruhi oleh berkurangnya kemampuan beton tekan serta berkembangnya perilaku plastis pada tulangan longitudinal. Penampang dengan rasio tulangan yang lebih tinggi cenderung memiliki respons pasca-leleh yang lebih kaku dengan penurunan kapasitas yang lebih cepat dibandingkan penampang dengan rasio tulangan lebih rendah.

Selain itu, adanya beban aksial tekan sebesar $0.10A_g f_c$ membuat beton pada daerah tekan bekerja lebih efektif sehingga kapasitas momen penampang meningkat dibandingkan kondisi tanpa beban aksial. Dengan demikian, respons yang dihasilkan menjadi lebih mendekati kondisi aktual kolom beton bertulang yang mengalami kombinasi gaya aksial dan momen lentur. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan rasio tulangan longitudinal tidak hanya meningkatkan kapasitas momen ultimit dan kekakuan awal penampang, tetapi juga mempengaruhi karakteristik deformasi serta perilaku pasca-leleh kolom beton bertulang.

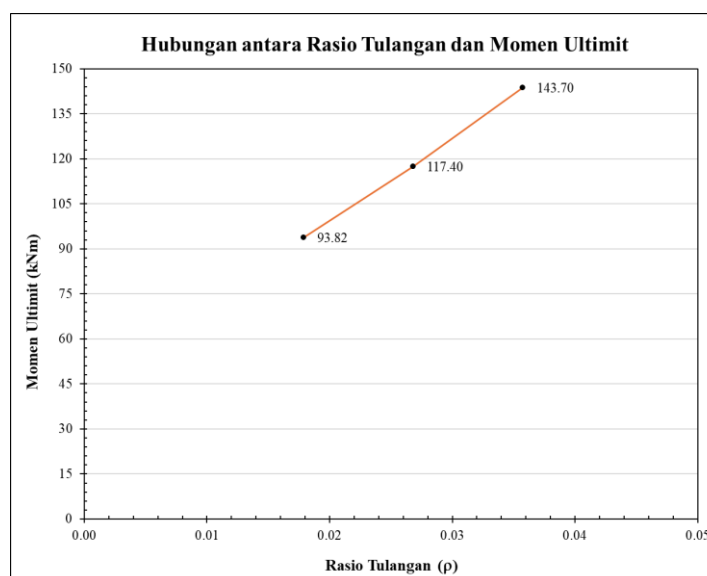
3.3. Kapasitas Momen Ultimit dan Pengaruh Rasio Tulangan

Tabel 1 menyajikan hasil perhitungan kapasitas momen ultimit pada masing-masing variasi tulangan longitudinal yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Kapasitas Momen Setiap Variasi Tulangan Longitudinal

Tulangan	Rasio Tulangan (ρ)	Momen Ultimit (kNm)
8D16	0.018	93.82
12D16	0.027	117.40
16D16	0.036	143.70

Tabel 1 menunjukkan bahwa peningkatan rasio tulangan longitudinal diikuti oleh kenaikan kapasitas momen ultimit pada setiap variasi penampang. Variasi 8D16 menghasilkan kapasitas momen sebesar 93,82 kNm, kemudian meningkat menjadi 117,40 kNm pada variasi 12D16, dan mencapai 143,70 kNm pada variasi 16D16. Kenaikan tersebut menunjukkan bahwa penambahan jumlah tulangan longitudinal memberikan kontribusi yang lebih besar dalam menahan gaya tarik akibat momen lentur. Semakin besar rasio tulangan yang digunakan, semakin besar pula kemampuan penampang dalam menahan kombinasi gaya aksial dan momen lentur. Selain dipengaruhi oleh jumlah tulangan, kondisi beban aksial tekan sebesar $0.10A_g f_c$ juga menyebabkan beton pada daerah tekan bekerja lebih efektif sehingga kapasitas penampang meningkat. Hubungan antara rasio tulangan longitudinal dan kapasitas momen ultimit dapat dilihat pada Gambar 4, yang memperlihatkan kecenderungan peningkatan kapasitas momen seiring bertambahnya rasio tulangan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rasio tulangan longitudinal memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap kapasitas lentur kolom beton bertulang.



Gambar 4. Hubungan antara Rasio Tulangan dan Momen Ultimit

Gambar 4 memperlihatkan adanya hubungan yang meningkat antara rasio tulangan longitudinal dan kapasitas momen ultimit kolom beton bertulang pada kondisi beban aksial sebesar $0.10Agf^c$. Penampang dengan rasio tulangan lebih besar menghasilkan kapasitas momen yang lebih tinggi dibandingkan penampang dengan rasio tulangan lebih kecil. Variasi 16D16 memberikan kapasitas momen tertinggi, sedangkan variasi 8D16 menghasilkan kapasitas paling rendah. Peningkatan kapasitas tersebut terjadi karena bertambahnya luas tulangan longitudinal yang berperan dalam menahan tegangan tarik akibat momen lentur. Selain meningkatkan kapasitas momen ultimit, penambahan rasio tulangan juga mempengaruhi kekakuan awal penampang. Hal ini terlihat dari kurva momen–kurvatur, di mana penampang dengan jumlah tulangan lebih besar memiliki kemiringan kurva yang lebih tinggi pada tahap elastis.

Di sisi lain, penampang dengan rasio tulangan yang lebih besar menunjukkan kemampuan deformasi pasca-leleh yang lebih terbatas. Setelah mencapai kapasitas maksimum, penurunan kapasitas pada kurva terjadi lebih cepat dibandingkan penampang dengan rasio tulangan yang lebih rendah. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas kekuatan tidak selalu diikuti oleh peningkatan kemampuan deformasi penampang. Secara umum, hasil analisis menunjukkan bahwa rasio tulangan longitudinal berpengaruh terhadap kapasitas momen, kekakuan awal, dan karakteristik deformasi kolom beton bertulang.

4. Kesimpulan

Kolom beton bertulang dengan rasio tulangan longitudinal yang berbeda menunjukkan respons momen–kurvatur yang tidak sama pada kondisi beban aksial sebesar $0.10Agf^c$. Dari hasil analisis terlihat bahwa penambahan jumlah tulangan longitudinal menyebabkan perubahan pada bentuk kurva momen–kurvatur, terutama pada tahap awal pembebanan. Penampang dengan rasio tulangan lebih besar memiliki kemiringan kurva yang lebih tinggi sehingga menunjukkan kekakuan awal yang lebih besar dibandingkan variasi lainnya.

Peningkatan rasio tulangan juga diikuti oleh kenaikan kapasitas momen ultimit pada setiap variasi penampang. Variasi 8D16 menghasilkan kapasitas momen sebesar 93,82 kNm, kemudian meningkat menjadi 117,40 kNm pada variasi 12D16 dan mencapai 143,70 kNm pada variasi 16D16. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa bertambahnya luas tulangan longitudinal meningkatkan kemampuan penampang dalam menahan pengaruh lentur pada saat menerima kombinasi gaya aksial dan momen. Selain mempengaruhi kapasitas kekuatan, rasio tulangan longitudinal turut mempengaruhi perilaku deformasi penampang setelah melewati kondisi leleh. Penampang dengan jumlah tulangan lebih besar cenderung memberikan respons yang lebih kaku, namun kemampuan deformasinya menjadi lebih terbatas dibandingkan penampang dengan rasio tulangan yang lebih kecil. Dengan demikian, peningkatan kapasitas penampang tidak selalu sejalan dengan peningkatan kemampuan deformasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio tulangan longitudinal mempunyai peranan penting terhadap kapasitas momen, kekakuan awal, dan respons deformasi kolom beton bertulang. Oleh sebab itu, penentuan rasio tulangan perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan dan kemampuan deformasi agar kinerja struktur yang dihasilkan menjadi lebih optimal.

Penelitian ini masih terbatas pada analisis numerik penampang menggunakan pendekatan nonlinear section analysis melalui perangkat lunak XTRACT dan belum mencakup validasi eksperimental maupun analisis elemen struktur secara menyeluruh. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan verifikasi eksperimental serta mempertimbangkan variasi tingkat beban aksial, mutu material, dan konfigurasi penulangan untuk memperoleh evaluasi perilaku kolom beton bertulang yang lebih komprehensif.

Referensi

- [1] T. R. S. Mullapudi and A. Ayoub, “Analysis of reinforced concrete columns subjected to combined axial, flexure, shear and torsional loads,” [Online]. Available: <http://openaccess.city.ac.uk/publications@city.ac.uk>
 - [2] ACI Committee, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*, 2019.
 - [3] SNI 2847-2019, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, 2019.
 - [4] U. Hasgul, “Investigation of parameters affecting the equivalent yield curvature of reinforced concrete columns,” *Materials*, vol. 13, no. 7, Apr. 2020, doi: 10.3390/ma13071594.
 - [5] S. Foroughi and B. Yüksel, “Investigation of nonlinear behavior of the reinforced concrete columns for different confined concrete models,” *Politeknik Dergisi*, vol. 25, no. 4, pp. 1447–1462, Dec. 2022, doi: 10.2339/politeknik.930774.
 - [6] S. Foroughi and S. B. Yüksel, “Investigation of moment-curvature and effective section stiffness of reinforced concrete columns,” *Challenge Journal of Structural Mechanics*, vol. 7, no. 3, p. 135, Sep. 2021, doi: 10.20528/cjsmec.2021.03.003.
 - [7] G. Dok, H. Ozturk, and A. Demir, “Determining moment-curvature relationship of reinforced concrete columns,” 2017, [Online]. Available: www.isres.org
 - [8] J. Bellos and A. Konstantinidis, “Systematic Calculation of Yield and Failure Curvatures of Reinforced Concrete Cross-Sections,” *Buildings*, vol. 14, no. 3, p. 826, 2024, doi: 10.3390/buildings14030826
 - [9] S. Foroughi and B. Yüksel, “Moment-curvature and effective section stiffness of reinforced concrete beams,” *Politeknik Dergisi*, vol. 26, no. 1, pp. 169–177, Mar. 2023, doi: 10.2339/politeknik.945426.
 - [10] T. K. Al-Azawi, R. K. Al-Azawi, and T. H. Ibrahim, “Curvature ductility of reinforced concrete column sections under different strain rates,” 2006.
 - [11] T. Z. Masulili, W. Susanto, and I. G. A. A. Krismayanti, “Kajian Hubungan Daktilitas Kurvatur terhadap Berbagai Rasio Tulangan Lentur pada Beton Konvensional & Glass Fiber,” *Racic: Rab Construction Research*, vol. 9, no. 2, 2024, doi: 10.36341/racic.v9i2.4487.
 - [12] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, “Theoretical stress-strain model for confined concrete,” 1988.
 - [13] J. K. Wight, *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, 7th ed., Global Edition.
-