



OPTIMASI BIAYA MATERIAL BALOK BETON BERTULANG BERDASARKAN RASIO TULANGAN DAN KUAT LENTUR

Wachid Hasyim^{1*}

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Wiralodra, Kecamatan Indramayu

* wachidhasyim@unwir.ac.id

ABSTRACT

The structural performance of reinforced concrete beams is significantly influenced by the presence of tensile reinforcement, where the amount of reinforcement used is determined by the reinforcement ratio (ρ). Selecting an appropriate reinforcement ratio is a key factor in defining the beam's capacity to resist bending moments and affects both the stiffness and ductility of the structural element. This study aims to optimize the reinforcement ratio (ρ) in reinforced concrete beams by considering both technical and economic aspects. The analysis was conducted on three beams (B1, B2, B3) from a three-story academic building, each with different dimensions and loading conditions, using the GRG Nonlinear method in Excel Solver. The results indicate an optimal ρ range of 0.0035–0.01707, complying with SNI 2847:2019, with minimum nominal moments (M_n) of 169.48 kNm (B1), 68.10 kNm (B2), and 49.19 kNm (B3) at the minimum ρ values. Cost optimization yielded significant savings: Rp313,417.13/m (B1), Rp167,902.03/m (B2), and Rp140,283.86/m (B3), with optimal ρ values of 0.0035 (B1–B2) and 0.0044 (B3). A key finding reveals that increasing the reinforcement ratio does not always proportionally increase structural strength, but has a substantial impact on material costs. The GRG Nonlinear approach proved effective in balancing strength requirements ($M_n \geq M_u$) with cost efficiency, and validation confirmed that all designs satisfy balanced failure criteria. This study offers practical recommendations for cost-effective structural design through reinforcement ratio optimization, particularly for multi-story building projects.

Keywords: reinforcement ratio, GRG Nonlinear method, optimal product cost

ABSTRAK

Kinerja struktural balok beton bertulang sangat dipengaruhi oleh keberadaan tulangan tarik, di mana jumlah tulangan yang digunakan ditentukan oleh besarnya rasio tulangan (ρ). Pemilihan rasio tulangan yang tepat menjadi faktor kunci dalam menentukan kapasitas balok dalam menahan momen lentur, serta berpengaruh terhadap tingkat kekakuan dan daktilitas elemen struktur tersebut. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan rasio tulangan (ρ) pada balok beton bertulang dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomi. Analisis dilakukan pada tiga balok (B1, B2, B3) gedung perkuliahan 3 lantai dengan dimensi dan beban berbeda, menggunakan metode GRG Nonlinear dalam Excel Solver. Hasil menunjukkan rentang ρ optimal 0.0035–0.01707 sesuai SNI 2847:2019, dengan momen nominal (M_n) minimal 169.48 kNm (B1), 68.10 kNm (B2), dan 49.19 kNm (B3) pada ρ minimum. Optimasi biaya menghasilkan penghematan signifikan: Rp313,417.13/m (B1), Rp167,902.03/m (B2), dan Rp140,283.86/m (B3) dengan ρ 0.0035 (B1–B2) dan 0.0044 (B3). Temuan kunci mengungkap bahwa peningkatan ρ tidak selalu meningkatkan kekuatan secara proporsional, tetapi berdampak besar pada biaya material. Pendekatan GRG Nonlinear terbukti efektif menyeimbangkan kriteria kekuatan ($M_n \geq M_u$) dan efisiensi biaya, dengan validasi menunjukkan seluruh desain memenuhi syarat keruntuhan seimbang. Penelitian ini memberikan rekomendasi praktis untuk desain struktur ekonomis berbasis optimasi ρ , khususnya pada proyek gedung bertingkat.

Kata kunci: rasio tulangan, metode GRG Nonlinear, Biaya produksi optimal



1. PENDAHULUAN

Balok beton bertulang merupakan salah satu elemen struktural yang berfungsi sebagai penahan beban lentur yang timbul akibat beban mati maupun beban hidup. Kinerja balok ini didukung oleh tulangan tarik dimana jumlah tulangan terpasang sangat bergantung pada rasio tulangan (ρ), yaitu perbandingan luas tulangan tarik terhadap luas efektif penampang beton. Rasio tulangan yang tepat menentukan kemampuan balok dalam menahan momen lentur, kekakuan, serta daktilitasnya. Jika ρ terlalu rendah, balok dapat mengalami kegagalan getas yang berbahaya, sementara ρ yang berlebihan akan mengurangi daktilitas struktur selain juga akan meningkatkan biaya material. Oleh karena itu, pemilihan ρ yang optimal tidak hanya memastikan keamanan dan kinerja struktural, tetapi juga efisiensi biaya dalam pembangunan.

Pemilihan rasio tulangan (ρ) yang tidak optimal pada balok beton bertulang dapat menimbulkan konsekuensi ekonomi yang signifikan. Jika ρ terlalu tinggi, terjadi pemborosan material berupa penggunaan baja berlebih yang tidak efisien. Sebaliknya, jika ρ terlalu rendah, risiko kegagalan struktur meningkat sehingga berpotensi menimbulkan biaya perbaikan atau bahkan keruntuhan yang jauh lebih mahal. Selain itu, desain yang tidak optimal juga dapat memperpanjang waktu pelaksanaan proyek akibat revisi desain atau perbaikan di tengah konstruksi. Dengan demikian, ketidaktepatan dalam menentukan ρ tidak hanya memengaruhi anggaran material, tetapi juga berpotensi meningkatkan biaya tidak langsung seperti penundaan proyek dan biaya mitigasi risiko. Oleh karena itu, pendekatan optimasi ρ berbasis analisis kuat lentur dan biaya material menjadi penting untuk mencapai efisiensi konstruksi tanpa mengorbankan keandalan struktur.

Pentingnya pendekatan gabungan antara analisis teknis kuat lentur dan evaluasi ekonomi biaya material dalam perancangan balok beton bertulang tidak dapat diabaikan. Analisis teknis semata yang hanya berfokus pada persyaratan kekuatan struktur seringkali mengabaikan aspek efisiensi biaya, sementara pendekatan ekonomi yang terlalu ketat dapat mengorbankan keamanan struktur. Integrasi kedua aspek ini menjadi krusial untuk menghasilkan desain yang tidak hanya memenuhi persyaratan kekuatan dan daktilitas, tetapi juga optimal secara finansial. Pendekatan holistik ini memungkinkan insinyur untuk menentukan rasio tulangan (ρ) yang mencapai titik optimal dimana peningkatan kekuatan sebanding dengan penambahan biaya, sebelum mencapai zona dimana penambahan tulangan tidak lagi memberikan manfaat struktural yang signifikan tetapi justru meningkatkan biaya secara tidak proporsional. Dengan demikian, kombinasi analisis teknik dan ekonomi ini menjadi landasan untuk praktik desain yang berkelanjutan dan efisien dalam konstruksi modern.

Beberapa penelitian dilakukan terkait pengaruh rasio atau jumlah tulangan terhadap kuat lentur, seperti penelitian yang dilakukan oleh [1], bahwa penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jumlah tulangan terhadap kekuatan lentur dan daktilitas balok beton bertulang. Tiga variasi tulangan digunakan (2D16, 3D16, 4D16) pada balok berukuran 20×20×60 cm, dengan mutu beton f'_c 25 MPa dan tulangan f_y 400 MPa. Pengujian lentur dilakukan dengan beban satu arah dan perletakan sendi-rol, sementara data diambil pada fase *crack*, *yield*, dan *ultimate*. Hasil menunjukkan peningkatan momen dan tegangan lentur sebesar 44,71% dari 2D16 ke 3D16, namun menurun 0,5% dari 3D16 ke 4D16. Daktilitas terbaik diperoleh pada konfigurasi 3D16 dengan rasio 0,0141, baik secara eksperimental maupun teoritis. Temuan ini



menunjukkan bahwa penambahan tulangan secara optimal dapat meningkatkan daktilitas dan menghindari keruntuhan mendadak pada struktur. Penelitian lainnya dilakukan oleh [2], dimana tujuan penelitiannya berupa untuk menganalisis pengaruh variasi rasio tulangan tarik terhadap kekuatan lentur dan pola keruntuhan balok beton bertulang. Mengingat balok lemah terhadap gaya tarik, penambahan tulangan menjadi faktor penting untuk meningkatkan kapasitas lentur. Dalam studi ini, analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 berdasarkan data gambar kerja dan pembebanan struktur. Nilai momen ultimit (M_u) yang dihasilkan menjadi dasar perhitungan desain tulangan, lalu dilakukan variasi rasio tulangan tarik pada balok bertulangan rangkap. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan rasio tulangan tarik meningkatkan kapasitas momen maksimum balok. Seluruh variasi rasio menunjukkan pola keruntuhan tarik (*under-reinforced*), dan desain terbaik ditunjukkan oleh Balok B1 Desain 1 dengan rasio 0,0071 menggunakan 8 tulangan tarik, karena mampu memenuhi beban layan yang direncanakan. Sementara itu, [3] melakukan penelitian dengan tujuan untuk mengevaluasi akurasi prediksi kuat lentur beton menggunakan berbagai pendekatan persamaan eksisting, khususnya terhadap beton dengan bahan penyusun yang lebih bervariasi dari beton konvensional. Hal ini penting mengingat kuat lentur merupakan sifat mekanik utama pada elemen balok beton yang menerima beban lentur, sementara persamaan umum yang tersedia umumnya berbasis pada beton konvensional. Sebanyak 72 data uji laboratorium dikaji dan dibandingkan dengan hasil prediksi dari beberapa persamaan serta simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Response-2000. Hasil menunjukkan bahwa model Response-2000 memberikan korelasi kuat dengan data laboratorium sebesar $R^2 = 0,8207$, sedangkan pendekatan substitusi kuat tekan menghasilkan rata-rata korelasi R^2 sebesar 0,8246. Ini menunjukkan bahwa pendekatan yang digunakan cukup akurat untuk memperkirakan kuat lentur beton dengan material penyusun yang beragam. Selain itu, menurut [4], bahwa balok beton gradasi merupakan inovasi dalam dunia konstruksi yang bertujuan mengurangi penggunaan semen tanpa mengorbankan kekakuan struktural, sejalan dengan prinsip *green building*. Konsep gradasi mutu dilakukan dengan menempatkan beton mutu rendah pada serat tarik dan mutu tinggi pada serat tekan, berdasarkan asumsi bahwa beton tidak menahan gaya tarik. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh dimensi penampang melintang dan rasio tulangan lentur terhadap kapasitas beban balok beton gradasi. Metode penelitian bersifat eksperimental dengan pembuatan spesimen uji dan kontrol sebagai pembanding. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan rasio penampang dan rasio tulangan dapat meningkatkan ketahanan balok terhadap retak. Namun demikian, evaluasi ulang terhadap desain penampang diperlukan untuk memastikan kesetaraan kinerja antar spesimen.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan menentukan rasio tulangan (ρ) yang optimal pada balok beton bertulang dengan mempertimbangkan dua aspek utama, yaitu kinerja struktural dan efisiensi biaya. Secara khusus, tujuan penelitian meliputi: (1) mengevaluasi pengaruh variasi rasio tulangan terhadap kuat lentur balok berdasarkan standar SNI dan ACI, (2) menganalisis dampak pemilihan rasio tulangan terhadap biaya material beton dan baja, serta (3) merumuskan rekomendasi rasio tulangan optimal yang mampu memenuhi kriteria kekuatan struktural sekaligus meminimalkan biaya material. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan panduan praktis bagi insinyur dan perancang struktur dalam mengambil keputusan desain yang efisien dan ekonomis, tanpa mengorbankan aspek keamanan dan kinerja struktur. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan pedoman desain yang lebih terintegrasi antara aspek teknis dan ekonomi.



2. METODE PENELITIAN

Rasio tulangan (ρ) merupakan parameter fundamental dalam perancangan balok beton bertulang yang didefinisikan sebagai perbandingan luas penampang tulangan tarik (A_s) terhadap luas efektif penampang beton ($b \times d$). Secara matematis rasio tulangan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$\rho = \frac{A_s}{(b \times d)} \quad (1)$$

Atau

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad (2)$$

Nilai ρ ini memainkan peran kritis dalam menentukan perilaku struktural balok karena secara langsung mempengaruhi kapasitas lentur, kekakuan, dan mode keruntuhan. Standar SNI 2847:2019 [5] dan ACI 318-19 [6] menetapkan batas-batas rasio tulangan berupa $\rho_{\min}$ (minimum) yang menjamin pencegahan keruntuhan getas tiba-tiba, dan $\rho_{\max}$ (maksimum) yang mencegah keruntuhan tekan yang tidak daktail. Rasio tulangan yang berada di antara $\rho_{\min}$ dan $\rho_{\max}$ akan menghasilkan perilaku *under-reinforced* yang ideal, dimana tulangan akan leleh terlebih dahulu sebelum beton mencapai regangan batasnya, sehingga memberikan peringatan visual berupa retak dan lendutan yang besar sebelum keruntuhan terjadi. Pemahaman mendalam tentang konsep ρ ini menjadi dasar penting dalam proses optimasi antara kinerja struktural dan efisiensi ekonomi.

Rasio tulangan (ρ) memiliki batasan nilai yang diatur dalam standar SNI 2847:2019 untuk menjamin keamanan dan kinerja struktur. $\rho_{\min}$ (rasio minimum) untuk mencegah keruntuhan getas akibat kapasitas tulangan yang kurang, sementara $\rho_{\max}$ (rasio maksimum) dibatasi hingga $0.75\rho_b$, di mana ρ_b adalah rasio tulangan pada kondisi balanced yang dihitung berdasarkan keseimbangan regangan beton (0.003) dan tulangan (0.002 untuk baja mutu 400 MPa). Nilai rasio tulangan pada kondisi seimbang (*balanced*) dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\rho_{\min} = \frac{1.4}{f_y} \quad (3)$$

$$\rho_b = 0.85 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (4)$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \cdot \rho_b \quad (5)$$

Sedangkan rasio tulangan yang diperlukan pada balok dapat dihitung menggunakan persamaan 6 berikut ini.

$$\rho_{\text{perlu}} = 0.85 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \beta_1 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot R_n}{0.85 \cdot f'_c}} \right) \quad (6)$$

Dengan nilai tahanan (R_n) dihitung menggunakan persamaan 7 berikut.

$$R_n = \frac{M_u}{b \cdot d^2} \quad (7)$$



Dimana

$\rho_{\min}$: rasio tulangan minimal
 ρ_b : rasio tulangan seimbang
 $\rho_{\max}$: rasio tulangan maksimal
 ρ_{perlu} : rasio tulangan perlu
 R_n : tahanan
 β_1 : koefisien tekan beton

Selanjutnya, batasan-batasan rasio tersebut bertujuan untuk memastikan perilaku keruntuhan beton, dimana diharapkan keruntuhan yang terjadi berupa tulangan mencapai leleh terlebih dahulu sebelum beton hancur. Hal tersebut ditunjukkan dengan munculnya tanda-tanda visual keruntuhan berupa retak dan lendutan yang besar sebelum balok mengalami keruntuhan. Dengan demikian, rasio tulangan (ρ) secara fundamental menentukan perilaku balok beton bertulang melalui tiga kategori utama, yaitu: keruntuhan tarik (*under-reinforced*), keruntuhan seimbang (*balanced*), dan keruntuhan tekan (*over-reinforced*). [7], [8]. Berdasarkan hal tersebut, maka keruntuhan yang menjadi acuan dalam desain berupa kondisi keruntuhan seimbang, dimana pada kondisi *balanced* ($\rho = \rho_b$), balok mencapai keruntuhan simultan ketika beton mencapai regangan batas 0.003 bersamaan dengan tulangan mencapai regangan leleh (f_y/E_s). Kondisi ini menjadi acuan teoritis dalam standar SNI 2847:2019 dan ACI 318.

Analisis Momen Nominal (M_n)

Kuat lentur balok beton bertulang dapat dihitung menggunakan persamaan momen nominal (M_n):

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (8)$$

Dengan

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (9)$$

Dimana

A_s : luas tulangan (mm²)
 f_y : kuat leleh baja (Mpa)
 f'_c : kuat tekan beton (Mpa)
 b : lebar balok (mm)
 d : tinggi efektif balok (mm)
 a : tinggi blok tekan (mm)

Parameter (a) merepresentasikan kedalaman blok tegangan tekan ekivalen beton, yang nilainya bergantung pada rasio tulangan (ρ). Semakin besar ρ , maka nilai tinggi blok tekan (a) akan meningkat, sehingga mengurangi lengan momen namun diimbangi dengan peningkatan kapasitas tarik tulangan. [9]. Analisis ini menjadi dasar dalam mengevaluasi apakah balok memenuhi syarat kuat lentur ($M_n \geq M_u$) sesuai beban terfaktor. Persamaan kapasitas momen tersebut dapat disederhanakan kembali dengan cara substitusi nilai rasio tulangan (ρ) dan tinggi blok tekan (a) terhadap M_n sehingga menjadi berikut ini.



$$M_n = \rho \cdot f_y \cdot b d^2 \cdot \left(1 - \frac{\rho \cdot f_y}{1.7 \cdot f_{rc}}\right) \quad (10)$$

Analisis Biaya Material Beton dan Baja

Dalam proses optimalisasi biaya pada elemen balok beton bertulang, pemilihan material menjadi aspek yang sangat menentukan. Beton dan baja tulangan, sebagai dua komponen utama dalam struktur ini, memiliki karakteristik biaya yang sangat berbeda. Secara umum, baja merupakan material yang jauh lebih mahal dibandingkan beton, sehingga penggunaannya perlu direncanakan secara cermat. Perbedaan nilai ekonomis antara kedua material ini menjadikan rasio tulangan (ρ) sebagai parameter yang sangat berpengaruh dalam pengendalian biaya. Rasio yang terlalu tinggi dapat meningkatkan kekuatan struktur, namun sering kali menyebabkan lonjakan biaya yang tidak sebanding dengan peningkatan kapasitas yang diperoleh. Oleh karena itu, perancangan balok beton bertulang memerlukan pendekatan yang seimbang antara kebutuhan teknis dan efisiensi ekonomis, dengan mempertimbangkan proporsi material yang digunakan secara optimal.

Biaya material pada struktur balok beton bertulang ditentukan oleh sejumlah faktor yang saling berinteraksi dan harus dipertimbangkan secara menyeluruh dalam proses perancangan. Salah satu faktor utama adalah ketidakstabilan harga baja tulangan yang dipengaruhi oleh kondisi pasar global. Di samping itu, volume baja tulangan dalam balok memiliki hubungan yang sebanding dengan nilai rasio tulangan (ρ). Peningkatan nilai ρ dapat secara signifikan meningkatkan total kebutuhan material tulangan, yang pada akhirnya berdampak langsung terhadap besarnya biaya konstruksi. Selain itu, dimensi penampang balok, yang terdiri dari lebar dan tinggi, turut menentukan volume beton yang digunakan serta panjang dan jumlah tulangan yang dibutuhkan. Kenaikan nilai ρ atau perubahan dimensi penampang tidak selalu menghasilkan peningkatan efisiensi struktural yang sebanding dengan tambahan biaya yang ditimbulkan. Oleh karena itu, diperlukan analisis teknis yang cermat dan komprehensif terhadap seluruh parameter perancangan untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan struktural dan efisiensi biaya, guna menghasilkan desain yang optimal secara teknis dan ekonomis. Biaya produksi balok beton bertulang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini.

$$Biaya = (V_{beton} \cdot H_{beton}) + (A_s \cdot L \cdot \gamma_{baja} \cdot H_{baja}) \quad (11)$$

Dimana

V_{beton} : volume beton

H_{beton} : harga beton per m³

A_s : luas tulangan

L : panjang balok

γ_{baja} : berat volume baja

H_{baja} : harga baja per kg

Metode GRG



Metode GRG (*Generalized Reduced Gradient*) nonlinier adalah metode optimasi yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi nonlinier, baik dengan fungsi tujuan nonlinier, kendala nonlinier, atau keduanya. Secara umum, metode ini melibatkan iterasi yang berulang-ulang untuk mendekati solusi optimal dengan mencari variabel keputusan yang meminimalkan atau memaksimalkan fungsi tujuan serta memenuhi kendala yang diberikan. [10], (unugiri) Selain itu, proses iterasi dilakukan hingga mencapai solusi yang tetap berada pada daerah *feasible* (layak) dari persamaan. (titi udjiani, 2009). Adapun analisis non linier metode GRG dapat dilakukan dengan mudah menggunakan *add in solver* di software *spreadsheet* Microsoft Excel.[10]

Jenis penelitian ini berupa analitik deskriptif dimana kapasitas kuat lentur balok beton didapatkan dengan cara analisis kuat lentur, sementara nilai rasio tulangan dan biaya produksi dihitung dengan pendekatan analitis. Adapun spesimen balok beton yang dianalisis memiliki variasi nilai rasio tulangan (ρ) antara nilai rasio minimal sampai maksimal ($\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$). Parameter-parameter lain pada beton disesuaikan dengan sampel dari elemen gedung yang ditinjau sebagai studi kasus penelitian, dimana gedung tersebut berfungsi sebagai gedung perkuliahan. Selain itu, harga material beton dan baja yang digunakan pada penelitian berupa harga yang sesuai dengan pelaksanaan di lapangan.

Secara analitis, analisis data pada penelitian ini diuraikan dalam beberapa langkah, diantaranya:

1. Tentukan nilai momen ultimit (M_u) yang bekerja pada balok berdasarkan hasil analisis struktur.
2. Hitung kuat lentur (M_n) untuk setiap variasi ρ .
3. Hitung biaya material (beton + baja) untuk setiap ρ .
4. Optimasi dengan model linier berupa metode GRG dengan batasan (*constrain*) berdasarkan biaya terendah yang memenuhi $M_n \geq M_u$.

Adapun tahapan pada penelitian dilakukan dalam beberapa langkah berupa:

1. Tahap perancangan, dimana pada tahapan ini, parameter balok dan variasi ρ didefinisikan.
2. Tahapan simulasi, dilakukan perhitungan M_n dan biaya untuk setiap ρ .
3. Tahapan optimasi, dimana dilakukan plot untuk hubungan ρ vs. biaya vs. kuat lentur untuk mendapatkan titik optimal dengan metode GRG non linier.
4. Tahapan validasi, dimana hasil analisis divalidasi dengan standar SNI/ACI.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Balok beton yang dianalisis berupa balok dari gedung dengan fungsi perkuliahan. Balok-balok tersebut digunakan pada bangunan gedung sebanyak 3 lantai, sehingga secara acak balok-balok tersebut memiliki dimensi penampang berupa lebar (b) dan tinggi efektif (d) yang dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Dimensi penampang balok

No	Balok	Ukuran (mm)
1	B1	350 x 600
2	B2	250 x 450
3	B3	250 x 350

Balok B1 memiliki dimensi penampang terbesar, selanjutnya balok B2 dan B3 yang memiliki dimensi lebih kecil dari balok B1. Selain dimensi penampang, balok-balok tersebut memiliki properti kuat material dalam kondisi eksisting diantaranya berupa kuat mutu beton (f'_c) dan kuat leleh baja tulangan (f_y) seperti terlihat pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Kuat mutu material

No	Material	Kuat mutu (Mpa)
1	Beton (f'_c)	21
2	Baja tulangan (f_y)	400

Selanjutnya, nilai momen ultimit balok berdasarkan hasil analisis struktur yang mempertimbangkan beban mati (D) dan hidup (L), dimana kombinasi pembebanan yang digunakan sebesar $1.2D + 1.6L$. hasil perhitungan momen ultimit dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Momen ultimit balok

No	Balok	Momen ultimit (kNm)
1	B1	51.36
2	B2	20.81
3	B3	9.30

Nilai kapasitas momen (M_n) dari masing-masing balok pada gedung dapat dihitung menggunakan persamaan 10. Nilai M_n pada balok B1 dengan variasi nilai rasio tulangan (ρ) dari nilai minimal dan maksimal (kenaikan setiap 0.15%) yang dihitung menurut persamaan 3 sampai 5 dapat dilihat pada tabel 4. Selain itu, beberapa parameter nilai ρ_{min} , ρ_b , dan ρ_{max} ditentukan dengan nilai f_y , f'_c , dan β masing-masing sebesar 400, 21, dan 0.85. Dengan demikian, nilai masing-masing rasio tulangan dapat dihitung sebagai berikut.

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} = \frac{1.4}{400} = 0.0035$$

Selanjutnya, nilai rasio tulangan seimbang dihitung seperti berikut.

$$\rho_b = 0.85 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \beta \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = 0.85 \cdot \frac{21}{400} \cdot 0.85 \cdot \left(\frac{600}{600 + 400} \right) = 0.022759$$

Sehingga

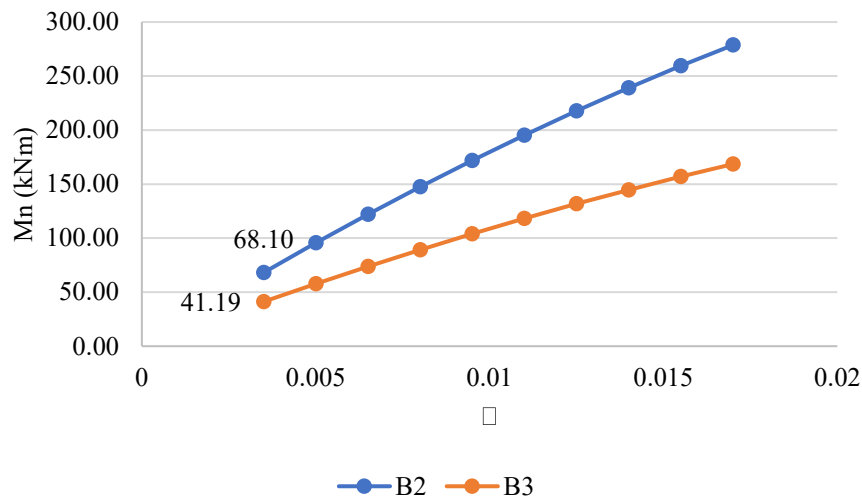
$$\rho_{max} = 0.75 \cdot \rho_b = 0.017069$$

Hasil perhitungan kapasitas lentur balok B1 memiliki nilai beragam. Adapun hasil perhitungan M_n dapat dilihat pada tabel 4 berikut.

Tabel 4. Nilai kapasitas lentur balok B1 (M_n)

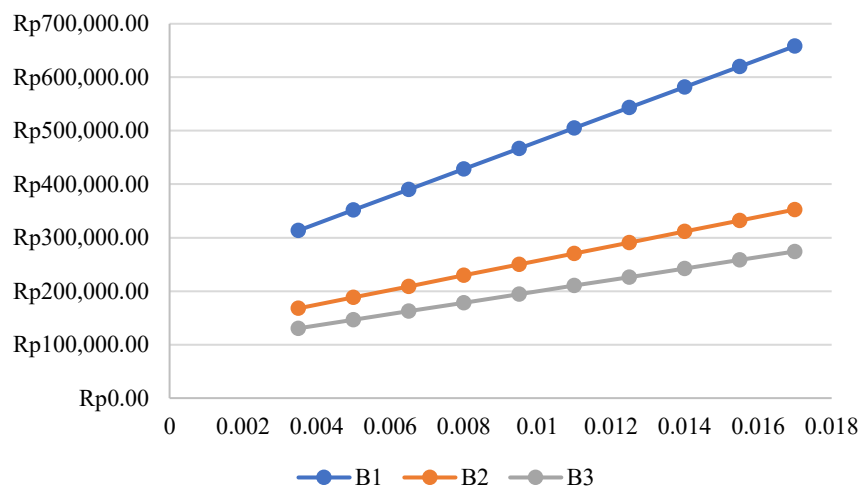
No	b (mm)	d (mm)	f'c (MPa)	fy (MPa)	p (rho)	Mn (kNm)
1	350	600	21	400	0.0035	169.48
2	350	600	21	400	0.005	237.88
3	350	600	21	400	0.0065	303.74
4	350	600	21	400	0.008	367.06
5	350	600	21	400	0.0095	427.84
6	350	600	21	400	0.011	486.07
7	350	600	21	400	0.0125	541.76
8	350	600	21	400	0.014	594.92
9	350	600	21	400	0.0155	645.53
10	350	600	21	400	0.017	693.60

Berdasarkan perhitungan, nilai M_n minimal sebesar 169.48 kNm dan maksimal sebesar 693.60 kNm. Adapun nilai M_n dari balok B2 dan B3 dari gedung dengan parameter balok seperti pada tabel 1 dan 2 dapat dilihat pada gambar 1 berikut ini.



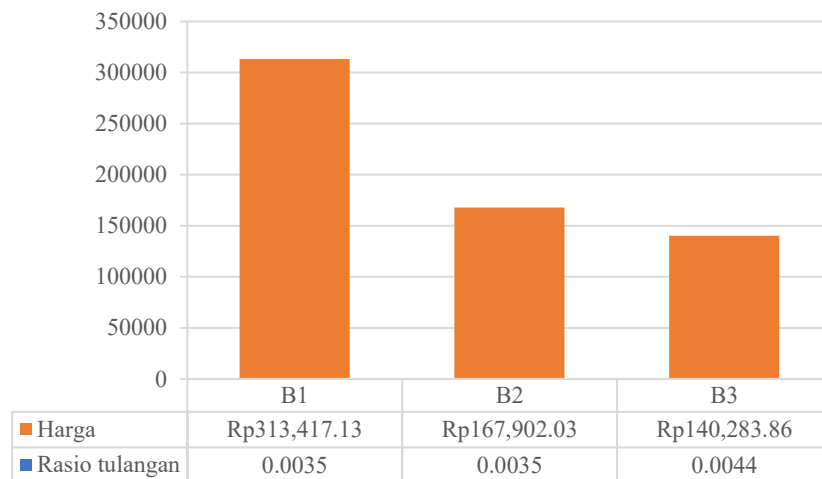
Gambar 1. Kapasitas momen (M_n) balok B2 dan B3

Berdasarkan nilai variasi rasio tulangan yang memiliki kenaikan sebesar 0.15% dari minimal hingga maksimal, maka dapat dihitung nilai biaya produksi balok beton masing-masing sepanjang 1 meter. Adapun harga beton per meter kubik yang menggunakan jenis campuran *Ready Mix* sebesar Rp. 1.066.000,- untuk beton dengan kuat mutu (f'_c) 21 Mpa. Selain itu, didapatkan harga baja tulangan per kilogram di pasaran sesuai harga satuan yaitu sebesar Rp. 15.500,-. Dengan demikian, biaya produksi masing-masing balok dapat dihitung untuk setiap rasio tulangan pada balok. Hasil perhitungan biaya dapat dilihat seperti pada gambar 2 berikut.



Gambar 2. Grafik rasio tulangan terhadap biaya

Selanjutnya dilakukan analisis dengan metode GRG non linier untuk mendapatkan nilai optimal biaya balok beton bertulang dengan syarat biaya minimal dan kapasitas momen melebihi momen ultimit. Hasil analisis dengan metode tersebut dapat dilihat pada gambar 3 berikut.



Gambar 3. Grafik rasio tulangan terhadap biaya optimal

Berdasarkan hasil analisis, nilai optimal biaya produksi balok masing-masing memiliki beda nilai rasio tulangan. Sebagai contoh, pada balok B1 nilai optimal biaya sebesar Rp. 313,417.13,- dengan rasio tulangan (ρ) sebesar 0.0035. Pada balok B2 nilai optimal biaya sebesar Rp. 167,902.03,- dengan nilai ρ sebesar 0.0035, sedangkan pada balok B3 nilai biaya dan rasio tulangan (ρ) masing-masing sebesar Rp. 140,283.86 dan 0.0044. Berdasarkan hasil tersebut, nilai optimal biaya produksi pada rasio tulangan minimal terdapat pada balok B1 dan B2.

Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis, nilai rasio tulangan minimal dan maksimal dari balok B1, B2, dan B3 adalah 0.0035 dan 0.01707. Nilai tersebut merupakan nilai balok dengan tulangan baja dengan mutu (f_y) 400 Mpa serta kuat tekan beton (f'_c) sebesar 21 Mpa. Berdasarkan hal tersebut, ketiga balok memiliki batasan luas tulangan yang diijinkan untuk dipasang pada balok sehingga bisa mencapai desain balok dengan model keruntuhan seimbang. Nilai ρ minimal sebesar 0.35% dari luas penampang bersih merupakan batasan dimana balok diharapkan tidak mengalami keruntuhan tarik. Hal tersebut terjadi apabila nilai rasio kurang dari nilai minimal sehingga akan mengalami keruntuhan tarik dominan.[11]. Sebaliknya, apabila luas tulangan terpasang melebihi nilai luas tulangan dengan rasio maksimal $\rho_{\max}$ sebesar 1.71% maka kemungkinan terjadi keruntuhan tekan. Keruntuhan tekan yang terjadi berupa keruntuhan tekan dominan. [11]. Selain itu, daktilitas balok akan berkurang seiring penambahan rasio tulangan melebihi nilai maksimal tersebut.[12]. Dari analisis, balok B1 dan B2 memiliki nilai ρ sebesar 0.0035 atau setara nilai $\rho_{\min}$ maka beton dianggap aman dalam menerima beban. Hal yang sama pula pada balok B3 dimana nilai ρ hasil analisis GRG didapatkan sebesar 0.0044 dimana nilai tersebut memiliki nilai lebih besar dari $\rho_{\min}$.

Selain dari nilai rasio minimal dan maksimal, nilai rasio perlu tulangan biasa digunakan sebagai dasar penentuan luas tulangan terpasang pada balok. Rasio tulangan perlu merupakan nilai rasio yang dihitung untuk dapat memenuhi luas tulangan terpasang dengan pendekatan desain dengan jenis keruntuhan



seimbang.[13], [14]. Selanjutnya nilai tersebut digunakan sebagai nilai desain untuk mendapatkan nilai kapasitas momen dari balok.

Nilai kapasitas lentur atau momen (M_n) memberikan gambaran kemampuan balok menerima beban dimana momen tersebut merupakan penjumlahan resultan tekan beton dan resultan tarik dari tulangan balok. Nilai momen (M_n) minimal pada balok B1, B2, dan B3 pada kondisi rasio tulangan minimal masing-masing bernilai sebesar 169.48 kNm, 68.10 kNm, dan 49.19 kNm. Nilai-nilai M_n tersebut pada kondisi rasio tulangan sebesar 0.0035, dengan demikian semakin tinggi nilai ρ maka nilai M_n akan semakin tinggi. Sebaliknya, nilai momen ultimit (M_u) merupakan nilai beban lentur yang bekerja pada balok dimana nilai M_u harus kurang dari nilai M_n sehingga balok dalam kondisi aman. [15]. Pada penelitian ini, seluruh balok dalam kondisi aman sehingga dapat dinyatakan $M_n \geq M_u$.

Dari hasil analisis, seluruh balok dalam kondisi aman atau $M_n \geq M_u$ sehingga pada analisis GRG, kondisi ini menjadi salahsatu syarat kekangan (*constraint*). Selain itu, nilai ρ minimal menjadi syarat *constraint* tambahan pada analisis GRG sehingga biaya optimal produksi balok beton dapat tercapai. Berdasarkan analisis, biaya produksi optimal pada balok B1, B2, dan B3 masing-masing sebesar Rp. 313,417.13,-, Rp.167,902.03,-, dan Rp. 140,283.86,-. Biaya tersebut didapatkan pada rasio tulangan sebesar 0.0035, 0.0035, dan 0.0044 masing-masing pada balok B1,B2, dan B3. Berdasarkan perhitungan nilai ρ perlu dari balok B1, B2, dan B3 masing-masing sebesar 0.00115, 0.00291 dan 0.00077 dimana pada nilai tersebut terdapat nilai kurang dari ρ minimal sehingga rasio yang digunakan adalah nilai ρ_{min} . Sementara itu, berdasarkan perhitungan biaya optimal, nilai-nilai hasil analisis GRG memberikan gambaran bahwa biaya balok pada nilai ρ lebih dari hasil hitungan hanya akan menambahkan biaya tanpa memberikan kekuatan lebih pada balok.

4. KESIMPULAN

Hasil analisis dalam penelitian ini mengungkap beberapa temuan kunci terkait optimasi rasio tulangan pada balok beton bertulang. Pertama, rentang rasio tulangan (ρ) yang valid untuk balok B1, B2, dan B3 berada antara nilai minimum 0.0035 hingga maksimum 0.01707 sesuai standar teknis. Dari segi kapasitas struktural, momen nominal (M_n) pada kondisi rasio tulangan minimal mencapai 169.48 kNm untuk B1, 68.10 kNm untuk B2, dan 49.19 kNm untuk B3, yang menunjukkan performa yang memadai. Aspek ekonomi produksi menunjukkan hasil optimasi yang signifikan, dimana biaya optimal tercapai pada Rp313,417.13 untuk B1, Rp167,902.03 untuk B2, dan Rp140,283.86 untuk B3. Efisiensi biaya ini diperoleh dengan penerapan rasio tulangan 0.0035 (B1 dan B2) serta 0.0044 (B3), membuktikan bahwa peningkatan rasio tulangan tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan yang signifikan. Pendekatan program linier dan non-linier yang digunakan dalam penelitian ini terbukti efektif untuk optimasi desain balok beton, baik dalam evaluasi maupun perancangan elemen struktur gedung. Metode ini tidak hanya menjamin keamanan struktur melalui pemenuhan persyaratan teknis, tetapi juga mengoptimalkan efisiensi biaya material konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Pertiwi and A. Hakiki, "Pengaruh Rasio Tulangan Pada Balok Ditinjau Dari Kurvatur Daktilitas Dengan Mutu Baja F_y 400 MPa," *Pros. Semin. Nas. Sains dan Teknol. Terap.*, vol. 1, no. 1, pp. 9–14, 2019, [Online]. Available: <http://ejurnal.itats.ac.id/sntekpan/article/view/555>



- [2] I. N. A. Karyanto, “Pengaruh Rasio Tulangan Tarik Terhadap Kekuatan Balok Lentur,” *REKATS*, vol. 10, no. 3, pp. 1–18, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/rekayasa-teknik-sipil/article/view/50217>
- [3] F. Monika, K. Muqorrobin, H. Prayuda, T. Zhafira, and L. Tiyani, “Prediksi Kuat Lentur Balok Beton dengan Menggunakan Program Response-2000 dan Persamaan Pendekatan,” *Media Komun. Tek. Sipil*, vol. 28, no. 1, pp. 40–48, 2022.
- [4] W. Damayanthi, K. Karyadi, D. M. Mirza, and A. Pratama, “Pengaruh Dimensi Penampang dan Rasio Pembesian Lentur terhadap Kapasitas Beban Balok Beton Bertulang Berbasis Gradasi Mutu,” *J. Bangunan*, vol. 27, no. 2, pp. 1–6, 2022.
- [5] Badan Standardisasi Nasional, “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung,” *Sni 2847-2019*, no. 8, p. 720, 2019.
- [6] A. ACI Committee, *ACI CODE-318-19(22): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022)*. ACI, 2019.
- [7] E. Bastian, “Analisis Pola Retak pada Struktur Balok Beton Bertulang dengan Perbandingan Bentang Geser,” *Vol. 1 No.2 Ed. 2 Januari 2019. Ensiklopedia J.* <http://jurnal.ensiklopediaku.org>, vol. 5, no. 2, pp. 404–411, 2023.
- [8] M. I. Wahid, “Pengaruh Rasio Tulangan Lentur Terhadap Perilaku Keruntuhan Balok Beton Bertulang,” Universitas Islam Indonesia, 2024.
- [9] A. Sugianto and A. M. Indriani, “Pengaruh Rasio Tinggi Blok Tegangan Tekan Dan Tinggi Efektif Terhadap Lentur Balok Bertulangan Tunggal,” *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 5, no. 1, pp. 100–107, 2017.
- [10] D. B. Nugroho, L. P. Panjaitan, D. Kurniawati, Z. Kholil, B. Susanto, and L. R. Sasongko, “GRG Non-Linear and ARWM Methods for Estimating the GARCH-M, GJR, and log-GARCH Models,” *JTAM (Jurnal Teor. dan Apl. Mat.)*, vol. 6, no. 2, p. 448, Apr. 2022, doi: 10.31764/jtam.v6i2.7694.
- [11] O. F. Nur, “Kajian Eksperimental Perilaku Balok Beton Tulangan Tunggal Berdasarkan Tipe Keruntuhan Balok,” *J. Rekayasa Sipil*, vol. 5, no. 2, p. 39, 2009, doi: 10.25077/jrs.5.2.39-52.2009.
- [12] H. Satriadi, Z. Djauhari, and R. Suryanita, “Simulasi Numerik Kurva Hubungan Momen dan Kurvatur Balok Beton Bertulang dengan Variasi Penampang,” *J. FTeknik*, vol. 3, no. 1, pp. 1–15, 2016.
- [13] N. D. Puspitasari and B. Aryaseta, “Metode Desain Balok Beton Bertulangan Tunggal di Atas Dua Perletakan Dengan Cara Grafis,” *J. Tek. Sipil*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2022, doi: 10.31284/j.jts.2022.v3i1.2936.
- [14] E. S. Romadhon, “Rasio Tulangan Optimum Pada Baja Tulangan Bjtp Dan Bjtd Balok Empat Persegi Panjang Tulangan Tunggal,” *J. Tek. Sipil-Arsitektur*, vol. 21, no. 1, pp. 111–117, 2022, doi: 10.54564/jtsa.v21i1.111.
- [15] R. Rifaldo and P. H. Wibowo, “Evaluasi Perhitungan Struktur Proyek Kaliban School 5 Lantai dengan ETABS,” *J. Civ. Eng. Plan.*, vol. 2, no. 2, pp. 107–119, 2021.