

Analisis Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang Geopolymer Menggunakan Metode Elemen Hingga

Reynaldo J. Sela^{1*}, Dody M. J. Sumajouw², Mielke R I A Josep Mondoringin³

¹⁻³ Universitas Sam Ratulangi, Indonesia

Alamat: Kampus UNSRAT Manado 95115

Korespondensi penulis: sela.jreynaldo@gmail.com

Abstract. This study analyzes the flexural behavior of reinforced geopolymer concrete beams through numerical simulation based on the Finite Element Method (FEM) using ANSYS software, comparing it with conventional reinforced concrete beams. The background of this research focuses on the need for environmentally friendly construction materials, considering the high CO₂ emissions from Portland cement production. The numerical model was developed based on parameters and loading schemes from previous experimental studies, utilizing SOLID65 elements for concrete, LINK180 for steel reinforcement, and SOLID185 for supports. Simulation results show that the flexural behaviour of geopolymer beams is comparable to conventional beams in terms of load-deflection relationships, flexural capacity, and crack patterns, with deviations from experimental data generally below 10%. The patterns and propagation of cracks also exhibited similarities, starting from the tensile zone at mid-span. Furthermore, the analysis demonstrates consistency with the analytical approach based on SNI 2847:2019. This research supports the validity of using geopolymer concrete as a sustainable structural material alternative and shows that the FEM numerical method is effective in evaluating the flexural performance of concrete structural elements.

Keywords: Flexural Behavior, Reinforced Concrete Beam, Ordinary Portland Cement Concrete, Geopolymer Concrete, Finite Element Method.

Abstrak. Penelitian ini menganalisis perilaku lentur balok beton bertulang geopolymer melalui simulasi numerik berbasis Metode Elemen Hingga (FEM) menggunakan perangkat lunak ANSYS, dan membandingkannya dengan balok beton bertulang konvensional. Latar belakang penelitian ini berfokus pada kebutuhan material konstruksi yang ramah lingkungan, mengingat tingginya emisi CO₂ dari produksi semen Portland. Model numerik dikembangkan berdasarkan parameter dan skema pembebanan dari studi eksperimen terdahulu, menggunakan elemen SOLID65 untuk beton, LINK180 untuk baja tulangan, dan SOLID185 untuk tumpuan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perilaku lentur balok geopolymer sebanding dengan balok konvensional dalam hubungan beban-lendutan, kapasitas lentur, dan pola retak, dengan deviasi terhadap data eksperimen umumnya di bawah 10%. Pola dan propagasi retak juga menunjukkan kesamaan, dimulai dari zona tarik di tengah bentang. Selain itu, analisis menunjukkan konsistensi dengan pendekatan analitis berdasarkan SNI 2847:2019. Penelitian ini mendukung validitas penggunaan beton geopolymer sebagai alternatif material struktural berkelanjutan dan menunjukkan bahwa metode numerik FEM efektif untuk mengevaluasi kinerja lentur elemen struktur beton.

Kata kunci: Perilaku Lentur, Balok Beton Bertulang, Beton Konvensional, Beton Geopolymer, Metode Elemen Hingga.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi konstruksi, kebutuhan mendesak untuk menciptakan material yang ramah lingkungan dan berkelanjutan telah muncul, dipicu oleh kekhawatiran yang meningkat terhadap dampak lingkungan dari produksi semen Portland, yang secara signifikan menyumbang emisi CO₂. Menurut Andrew (2018), produksi semen Portland global mencapai 4,1 miliar ton per tahun pada tahun 2017, dengan proyeksi menunjukkan bahwa pada tahun 2050, konsumsi semen dapat meningkat menjadi 4,83 miliar ton per tahun, yang akan

menghasilkan sekitar 4,83 miliar ton emisi CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer. Situasi ini menyoroti perlunya material alternatif yang dapat mengurangi jejak karbon. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah pemanfaatan beton geopolymer, yang menggunakan abu terbang sebagai pengikat alternatif untuk menggantikan semen konvensional. Beton geopolymer dianggap memiliki potensi besar dalam mendukung konstruksi struktural yang berkelanjutan karena kemampuannya untuk secara signifikan mengurangi emisi CO₂.

Perkembangan teknologi beton juga telah melihat munculnya beton bertulang, yaitu material komposit yang menggabungkan beton dengan tulangan baja. Kombinasi ini sangat penting untuk elemen struktural seperti balok, kolom, pelat, dan pondasi, yang memiliki peran esensial dalam menahan beban, termasuk beban gravitasi dan gaya lain yang dapat menyebabkan lenturan, deformasi, atau ketidakstabilan keseluruhan dari komponen struktur (Sumajouw dan Dapas, 2013). Lenturan pada balok terjadi sebagai akibat dari deformasi akibat beban yang diterapkan, yang memengaruhi kinerja keseluruhan sistem struktur. Untuk mencegah keruntuhan tekan yang bersifat tiba-tiba atau getas, sangat penting agar tulangan tarik dalam desain lentur memenuhi kriteria daktilitas, sehingga memastikan perilaku keruntuhan yang bersifat daktil.

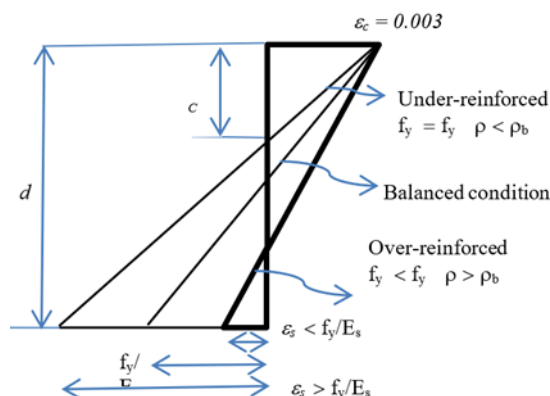
Dengan masih terbatasnya studi tentang perilaku lentur balok beton bertulang *geopolymer* secara menyeluruh dengan beton konvensional sebagai pembandingan. Penelitian ini menawarkan kebaruan melalui penerapan Metode Elemen Hingga (FEM) menggunakan perangkat lunak ANSYS. Analisis ini bertujuan untuk memberikan pemodelan yang lebih mendetail terkait distribusi tegangan, deformasi, dan respons lentur dari balok. Selain itu, perhitungan analitis mengenai beban maksimum berdasarkan SNI 2847:2019 akan dilakukan untuk memvalidasi hasil yang diperoleh dari model numerik. Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang kinerja lentur beton geopolymer, tetapi juga untuk meningkatkan potensi penerapannya dalam praktik konstruksi yang berkelanjutan, serta menjawab kekurangan pengetahuan yang ada terkait kinerja komparatif kedua material tersebut.

2. KAJIAN TEORITIS

Balok mengalami deformasi dan regangan tambahan sebagai akibat dari peningkatan beban, yang menyebabkan munculnya atau meningkatnya retak lentur di sepanjang bentang. Pada akhirnya, elemen struktur dapat gagal ketika beban eksternal mencapai batas kapasitas elemen. Tahap pembebanan ini disebut sebagai kondisi batas kegagalan pada lentur (Nawy, 1990).

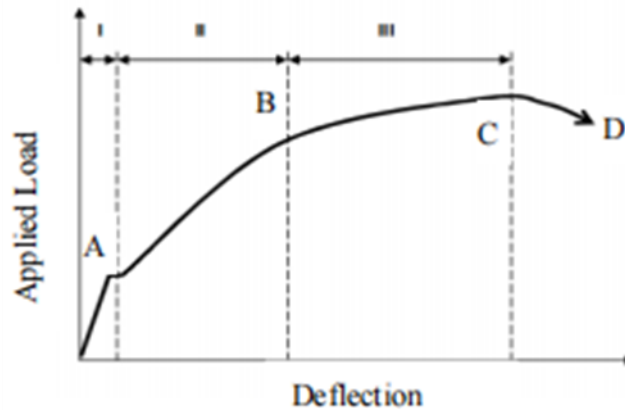
Distribusi tegangan di area tekan balok, terutama saat mendekati kondisi ultimit, mengikuti bentuk lengkung non-linier dari kurva tegangan-regangan beton. Dalam konteks perhitungan desain, pendekatan Whitney menggunakan blok tegangan ekuivalen segiempat dengan tinggi efektif a dan tegangan tekan rata-rata sebesar $0,85f'_c$ menjadi metode yang lebih praktis dibandingkan pendekatan parabolik, tanpa mengorbankan akurasi analitis. Nilai kekuatan lentur nominal penampang, setelah dikalikan dengan faktor reduksi sesuai SNI 2847:2019, digunakan untuk menilai kapasitas desain terhadap momen ultimit yang mungkin terjadi di lapangan.

Berdasarkan jenis keruntuhan, keruntuhan yang terjadi pada balok dapat dikelompokkan menjadi 3 kelompok: *balanced*, *overreinforced*, dan *under-reinforced*. Pada kondisi *balanced*, beton dan baja mencapai regangan ultimit secara bersamaan. Kondisi *over-reinforced* terjadi saat beton gagal sebelum tulangan baja mengalami leleh, sedangkan pada *under-reinforced*, tulangan baja leleh terlebih dahulu, memberikan perilaku struktur yang lebih duktail dan aman karena memberikan tanda-tanda sebelum keruntuhan.



Gambar 1. Distribusi Penampang Balok (Nawy, 2009)

Hubungan antara beban dan defleksi dapat direpresentasikan dengan kurva trilinear. Kurva ini menggambarkan perubahan defleksi yang dialami balok seiring bertambahnya beban, dengan tiga fase utama yaitu tahap praretak, beban pascaretak dan retak *pasca-serviceability* seperti pada diagram Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan antara beban dan lendutan (Warner et al. 1999)

Jenis keruntuhan yang terjadi pada elemen struktur balok bergantung pada kekakuan penampang (EI) balok tersebut. Terdapat tiga jenis kegagalan utama pada balok beton bertulang, (Nawy, 1998). Keruntuhan lentur (*flexural failure*), merupakan jenis keruntuhan yang terjadi pada balok dengan rasio a/d lebih besar dari 5,5. Keruntuhan tarik diagonal (*diagonal tension failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi ketika balok memiliki rasio a/d sekitar 2,5 hingga 5,5. Keruntuhan geser tekan (*shear compression failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi pada balok dengan rasio a/d antara 1,0 hingga 2,5.

Lendutan untuk balok yang ditumpu oleh tumpuan sederhana dengan beban terpusat di tengah bentang adalah:

$$\delta = v_{max} = \frac{PL^3}{48 EI} \quad (1)$$

Sementara besarnya lendutan akibat beban merata (q) dan beban terpusat (P) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\delta = \frac{5}{384} q \frac{L^4}{EI} + \frac{Pa}{48EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (2)$$

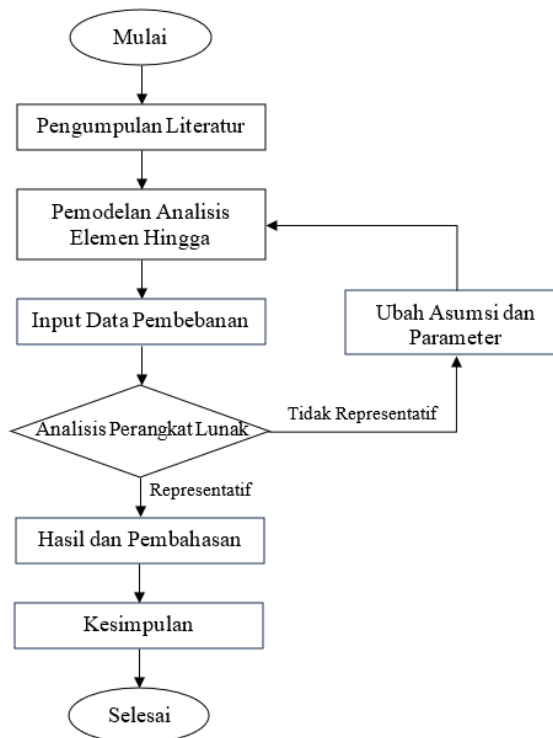
Mengingat kompleksitas perilaku struktur beton bertulang, pendekatan numerik melalui Metode Elemen Hingga (MEH) menjadi sangat penting. MEH memungkinkan model diskrit dari struktur kontinu melalui proses diskretisasi yang membagi geometri menjadi elemen- elemen kecil dan menghubungkannya melalui node.

3. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian yang digunakan dalam penulisan ini adalah simulasi numerik berbasis data eksperimental dari studi literatur. Penelitian ini berfokus pada tinjauan perilaku lentur balok beton bertulang geopolymer yang dibandingkan dengan beton bertulang konvensional. Data pemodelan diperoleh melalui pengumpulan literatur yang didasarkan pada

hasil eksperimen. Pemodelan numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS 2024 R1 yang merupakan salah satu perangkat lunak berbasis elemen hingga.

Tahapan penelitian meliputi kajian literatur terhadap studi-studi sebelumnya, seperti penelitian Abraham et al. 2013, Dattatreya et al. 2011, dan Ojha et al. 2022, setelah itu dilakukan pemodelan dengan analisis elemen hingga, input data pembebanan, simulasi numerik, serta verifikasi antara data eksperimen dan hasil pemodelan serta standar yang berlaku, sehingga dapat diuraikan setiap parameter yang menjadi tinjauan dan penarikan kesimpulan.



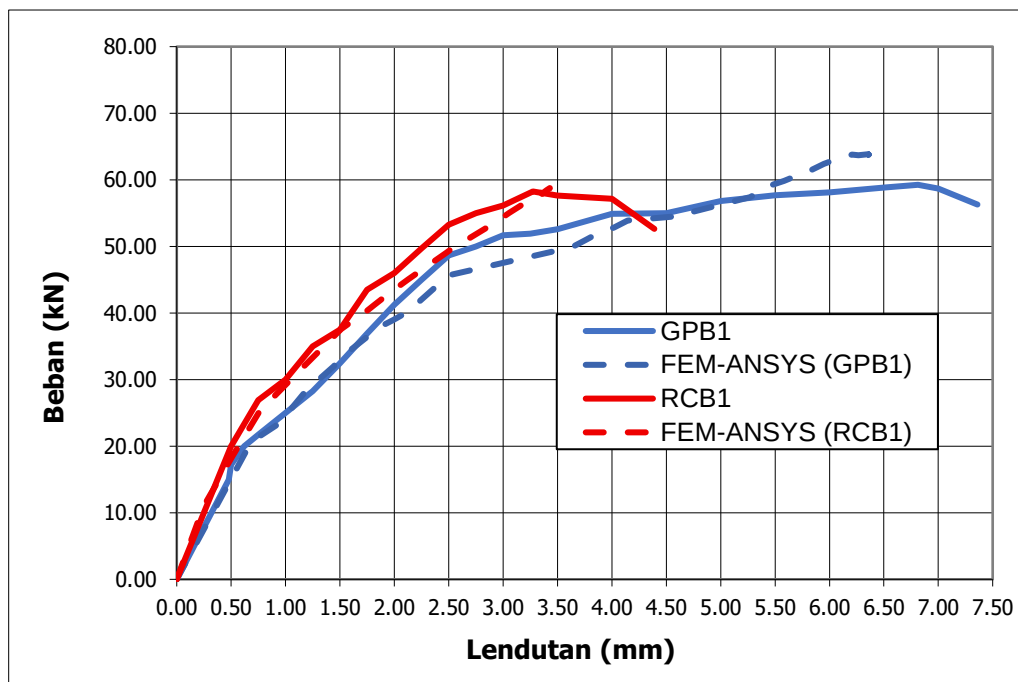
Gambar 3. Bagan Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi berdasarkan Literatur

Hasil analisis perilaku lentur balok beton bertulang geopolimer dan beton bertulang konvensional disajikan pada bagian ini berdasarkan pemodelan numerik menggunakan metode elemen hingga (FEM). Simulasi dilakukan dengan perangkat lunak ANSYS, dengan mengacu pada parameter geometri, material, dan skema pembebanan dari beberapa studi eksperimen terdahulu.

Simulasi numerik yang didasarkan pada studi Abraham et al. (2013) dilakukan dengan menggunakan parameter geometri dan material hasil eksperimen untuk memodelkan perilaku lentur balok beton bertulang geopolymer dan beton konvensional melalui metode elemen hingga (FEM). Hasil simulasi seperti yang disajikan pada Gambar 4. menunjukkan bahwa model numerik menunjukkan perilaku lentur secara umum dengan cukup baik; beban maksimum simulasi sedikit lebih besar. Karena nilai modulus elastisitas yang digunakan dalam simulasi telah dikalibrasi dari hasil eksperimen, perbedaan lendutan yang masih ada mungkin disebabkan oleh faktor-faktor seperti retak mikro, susut maupun rangkai, dan perubahan volume yang disebabkan oleh suhu tidak diperhitungkan.



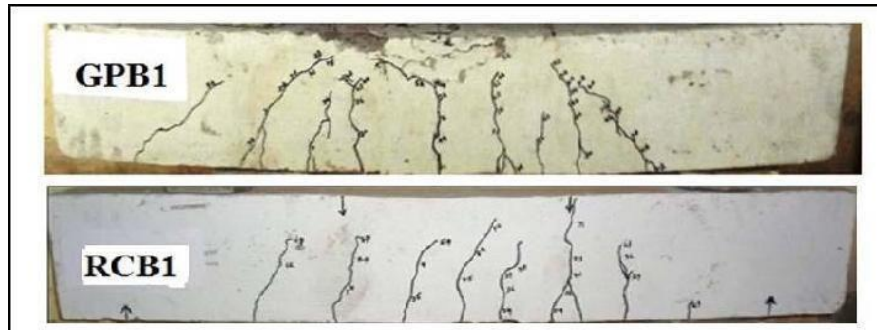
Gambar 4. Hubungan Beban–Lendutan Simulasi Numerik dan Eksperimen oleh Abraham et al. 2013

Kapasitas lentur balok beton bertulang *geopolymer* dan balok beton bertulang konvensional yang diperoleh dari hasil pengujian dan hasil pemodelan numerik dengan metode elemen hingga (FEM) ditunjukkan pada Tabel 1. Tabel tersebut menyajikan nilai beban maksimum dan lendutan maksimum, baik berdasarkan hasil eksperimen maupun hasil simulasi FEM.

Tabel 1. Perbandingan Kapasitas Lentur Balok (Abraham et al. 2013)

Spesimen Benda Uji	Beban Runtuh (kN)		Defleksi (mm)	
	Eksperimen	FEM-ANSYS	Eksperimen	FEM-ANSYS
GPB1	59.25	63.84	6.814	6.360
RCB1	58.25	58.76	3.273	3.429

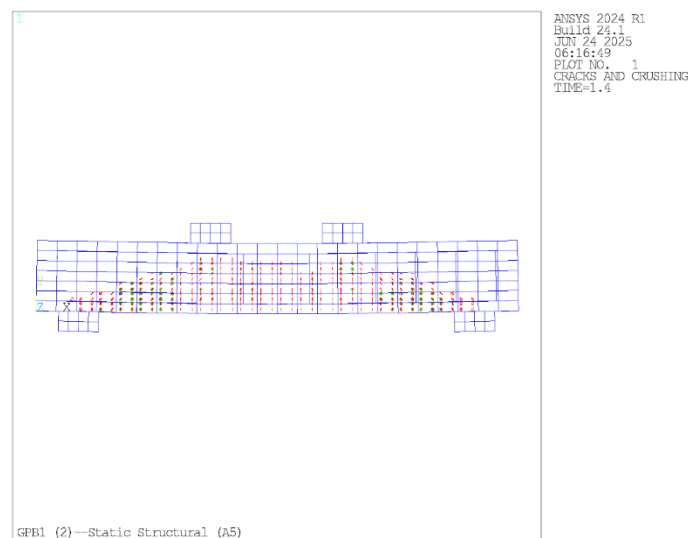
Seperti yang diharapkan, hasil eksperimen menunjukkan bahwa retak awal yang terjadi pada balok terlentur dimulai pada daerah tengah bentang. Dengan bertambahnya beban, retakan merambat dan berkembang sepanjang bentang. Secara keseluruhan, pola retak yang terjadi antara beton *geopolymer* dan beton konvensional memiliki kesamaan.

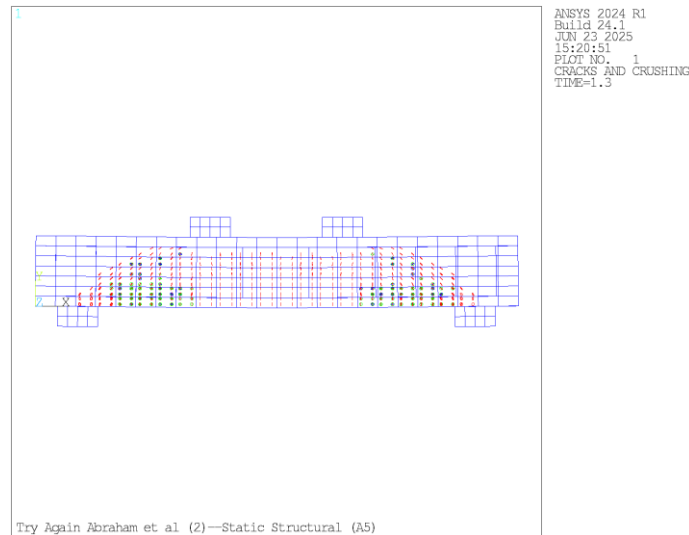


Gambar 5. Pola retak beton bertulang geopolymer dan konvensional

Abraham et al. 2013

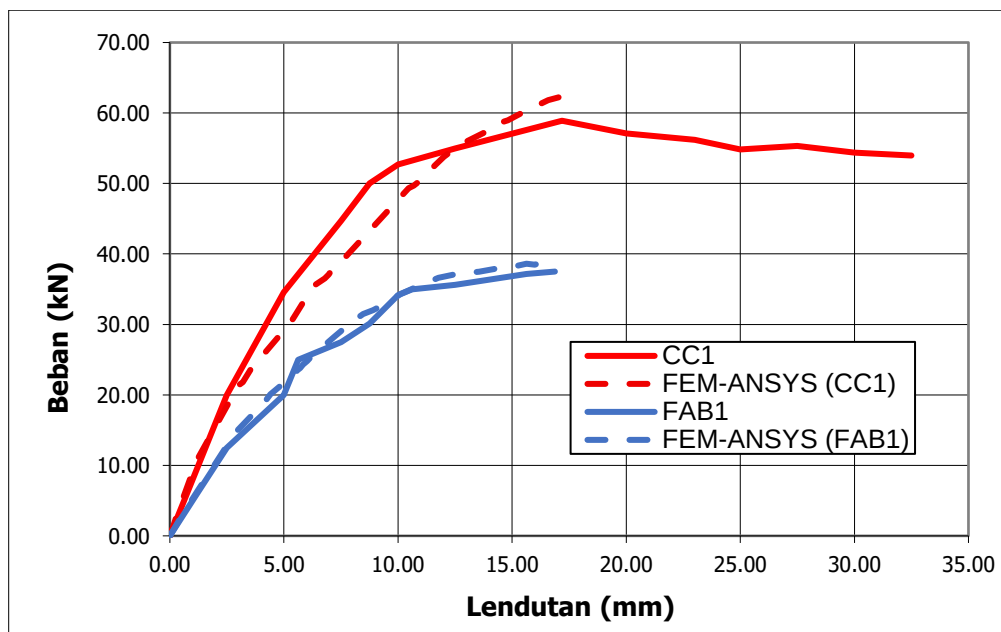
Pola retak balok beton bertulang *geopolymer* dan balok beton bertulang konvensional berdasarkan hasil simulasi metode elemen hingga menggunakan ANSYS ditampilkan pada Gambar 6. Retakan awal teridentifikasi muncul pada bagian tengah bentang balok yang merupakan zona momen maksimum dan seiring bertambahnya beban, retakan merambat ke atas serta memunculkan retak tambahan. Pada tahap lanjut, tulangan tarik mengalami leleh.





Gambar 6. Simulasi pola retak balok RGB1 dan RCB1 (FEM–ANSYS) berdasarkan eksperimen Abraham et al. 2013

Simulasi numerik pada bagian ini didasarkan pada data eksperimen dari Dattatreya, et al. 2011, dengan parameter geometri dan material yang telah digunakan dalam pemodelan FEM. Hasil simulasi seperti yang disajikan pada Gambar 7. menunjukkan bahwa model numerik menunjukkan bahwa hasil simulasi menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan data eksperimen. Kedua kurva hampir berhimpit, terutama pada rentang elastis hingga mendekati beban maksimum, yang menunjukkan bahwa pendekatan numerik mampu merepresentasikan perilaku lentur balok geopolymer secara akurat.



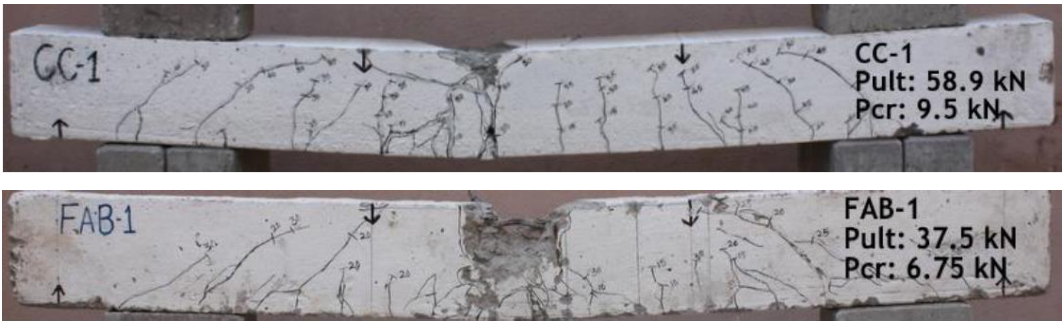
Gambar 7. Hubungan Beban–Lendutan Simulasi Numerik dan Eksperimen oleh Dattatreya et al. 2011

Tabel 2 menunjukkan kapasitas lentur antara balok beton bertulang geopolymer dan balok beton bertulang konvensional, berdasarkan hasil pengujian dan hasil pemodelan numerik metode elemen hingga (FEM). Nilai beban runtuh dan lendutan maksimum kedua jenis balok disajikan berdasarkan hasil eksperimen dan simulasi FEM.

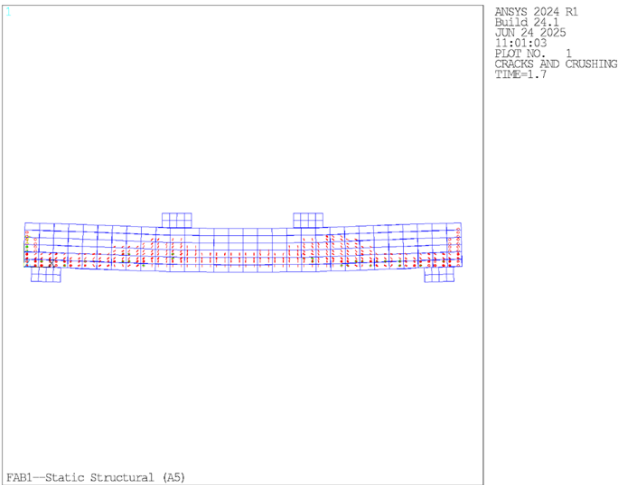
Tabel 2. Perbandingan Kapasitas Lentur Balok (Dattatreya et al. 2011)

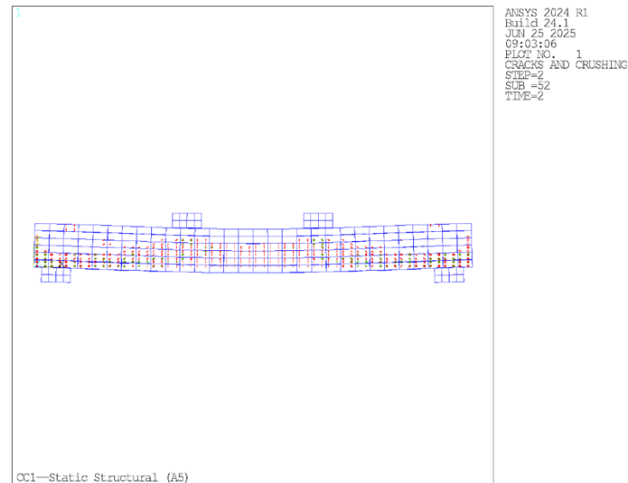
Spesimen Benda Uji	Beban Runtuh (kN)		Defleksi (mm)	
	Eksperimen	FEM-ANSYS	Eksperimen	FEM-ANSYS
FAB1	37.50	38.76	16.92	15.88
CC1	58.90	62.61	17.19	17.44

Seperti yang diharapkan, hasil penelitian menunjukkan bahwa retakan awal terjadi pada daerah zona lentur. Ketika beban meningkat, retakan menyebar dan berkembang sepanjang bentang. Dengan peningkatan beban, retakan menyebar dan berkembang secara vertikal ke arah serat tekan dan menyebar sepanjang bentang balok. Pola retak yang terjadi antara beton *geopolymer* dan beton konvensional yang diamati memiliki kesamaan baik dalam lokasi retakan awal maupun arah perambatannya.



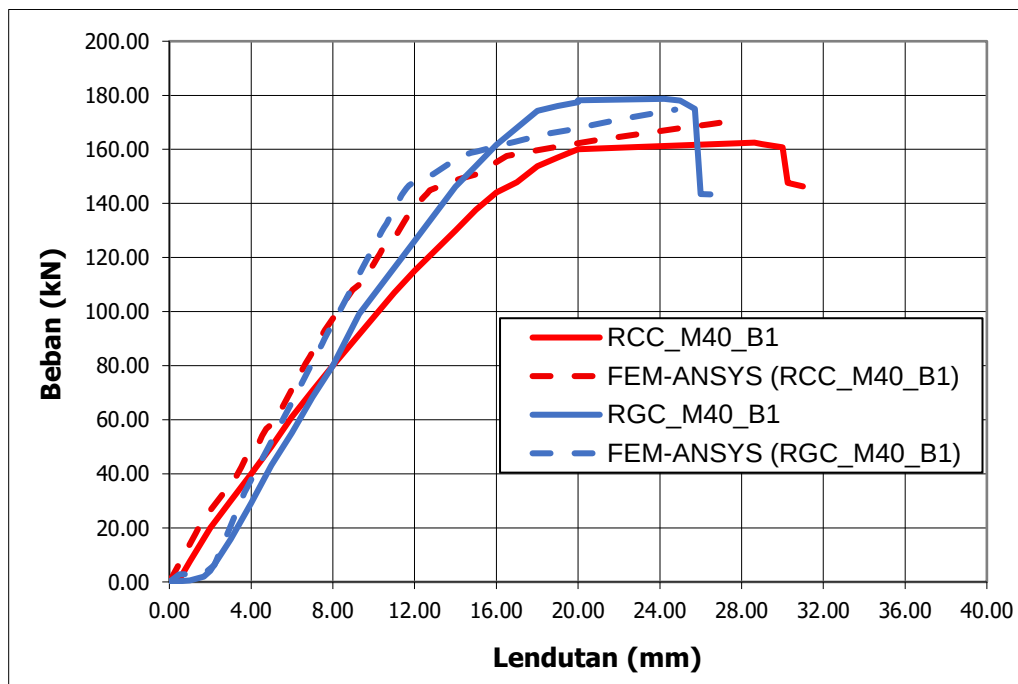
Gambar 8. Pola retak beton bertulang geopolymer dan konvensional
Dattatreya et al. 2011





Gambar 9. Simulasi pola retak balok FAB1 dan CC1 (FEM–ANSYS) berdasarkan eksperimen Dattatreya et al. 2011

Dengan parameter geometri dan material yang digunakan dalam pemodelan FEM, simulasi numerik pada bagian ini didasarkan pada data eksperimen dari Ojha, et al. 2022. Hasil simulasi cenderung cukup mendekati data eksperimen, terutama pada tahap awal pembebanan hingga mencapai beban maksimum seperti yang disajikan pada Gambar 10.



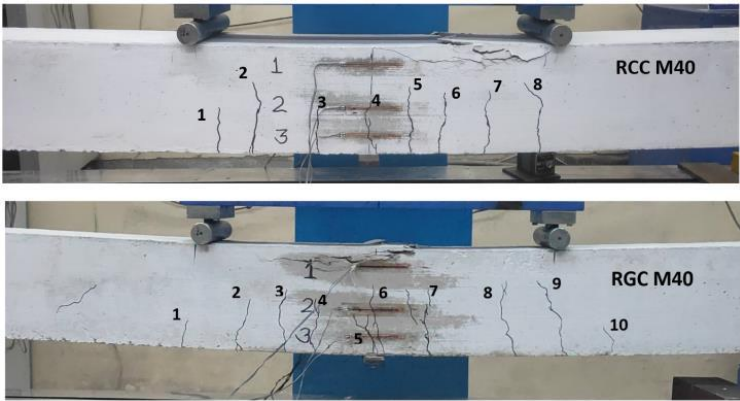
Gambar 10. Hubungan Beban–Lendutan Simulasi Numerik dan Eksperimen oleh Ojha et al. 2022

Tabel 3 menyajikan hasil perbandingan perilaku lentur antara balok beton bertulang geopolymer dan beton konvensional, berdasarkan data hasil uji eksperimen dan hasil simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga. Parameter yang ditampilkan mencakup nilai beban runtuh dan lendutan maksimum dari masing-masing jenis balok. Sejauh mana

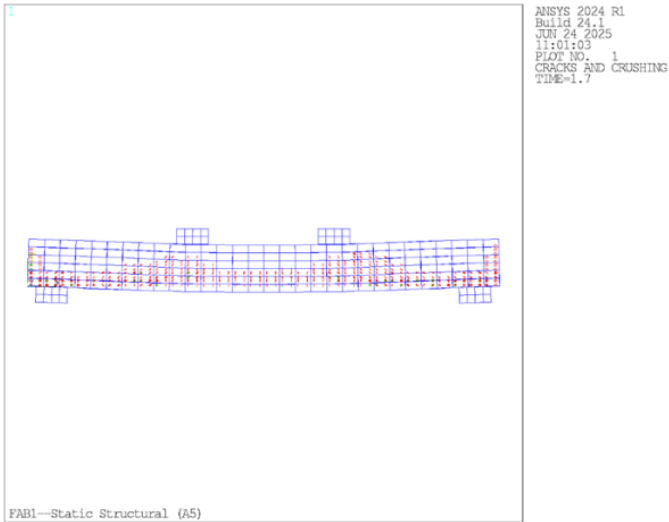
pemodelan numerik mampu menunjukkan respons balok sebenarnya terhadap pembebanan lentur adalah tujuan penyajian ini.

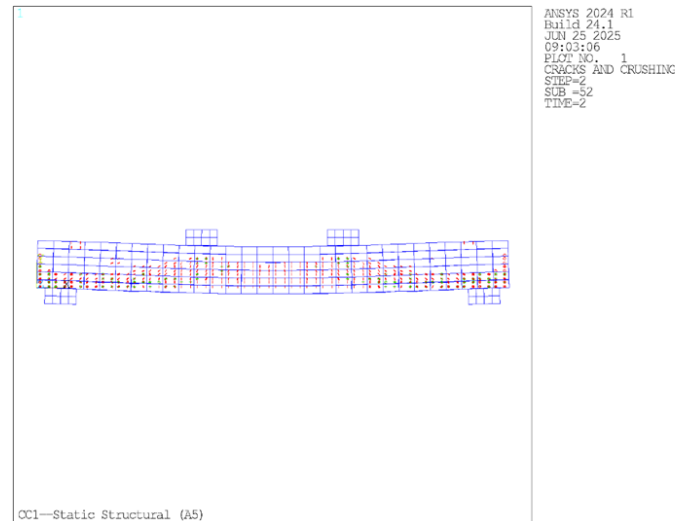
Tabel 3. Perbandingan Kapasitas Lentur Balok (Ojha et al. 2011)

Spesimen Benda Uji	Beban Runtuh (kN)		Defleksi (mm)	
	Eksperimen	FEM-ANSYS	Eksperimen	FEM-ANSYS
M40 RGC BEAM 1	178.70	174.70	24.76	24.21
M40 RCC BEAM 1	162.50	170.85	28.62	27.81



Gambar 11. Pola retak beton bertulang geopolymer dan konvensional Ojha et al. 2011





Gambar 12. Simulasi pola retak balok RGC1 dan RCC1 (FEM–ANSYS) berdasarkan eksperimen Ojha et al. 2022

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola retak pada beton *geopolymer* dan beton konvensional memiliki kesamaan. Retak awal muncul pada zona tarik di tengah bentang, tepat di bawah titik pembebanan, yang merupakan daerah dengan momen lentur maksimum. Seiring peningkatan beban, retakan berkembang secara vertikal dari bagian sisi tarik menuju zona tekan. Retak halus terus merambat sepanjang lebar balok dan cenderung menuju titik pembebanan. Pola ini menunjukkan bahwa sifat perambatan retak beton *geopolymer* sebanding dengan perilaku beton biasa.

Komparasi Kinerja Beton Geopolymer dan Konvensional

Berdasarkan hasil simulasi metode elemen hingga (FEM) terhadap studi literatur, hubungan beban-lendutan pada balok beton bertulang *geopolymer* dan konvensional menunjukkan pola perilaku lentur yang serupa, Kedua jenis balok menunjukkan respons elastis linier pada tahap awal pembebanan sebelum lendutan meningkat seiring dengan bertambahnya beban.

Hubungan beban dan lendutan menjadi indikasi terhadap tahapan-tahapan penting yang berlangsung selama dilakukannya pengujian. Dimana titik awal, balok beton mengalami retakan. Seiring dengan peningkatan beban, tulangan baja mulai meleleh menandakan *yield strength* tulangan telah dicapai. Tahap selanjutnya menandakan hancurnya beton yang ditandai dengan terlepasnya selimut beton. Dan tahapan terakhir, menunjukkan terjadinya penurunan kurva yang menandakan bahwa beban batas telah tercapai (Sumajouw dan Rangan, 2006).

Hasil simulasi dan data eksperimen antara balok beton bertulang *geopolymer* maupun konvensional menunjukkan pola inisiasi retak yang serupa, yaitu muncul pada zona tarik di tengah bentang, tepat di bawah titik beban. Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa metode elemen hingga menggunakan ANSYS mampu merepresentasikan pola distribusi dan propagasi retak secara realistis pada kedua jenis material

Validasi Model Metode Elemen Hingga

Parameter yang ditinjau dalam validasi ini meliputi nilai beban maksimum dan lendutan maksimum. Persentase *error* dihitung untuk mengetahui tingkat deviasi antara data eksperimen dan hasil simulasi. Selain itu, perhitungan juga dilakukan secara analitis sesuai dengan SNI 2847:2019 untuk parameter beban maksimum.

Tabel 4 dan 5 menunjukkan perbandingan nilai lendutan dan beban maksimum antara hasil eksperimen berdasarkan data pengujian dari Abraham, et al. 2013 dan simulasi metode elemen hingga (FEM) untuk dua jenis balok, yaitu beton *geopolymer* (RGB1) dan beton konvensional (RCB1).

Tabel 4. Validasi lendutan maksimum berdasarkan data eksperimen
Abraham, et al. 2013

Spesimen Benda Uji	Defleksi (mm)		Persentase <i>Error</i> (%)
	Eksperimen	FEM-ANSYS	
GPB1	6.814	6.814	4.78
RCB1	3.273	3.273	6.67

Tabel 5. Validasi beban maksimum berdasarkan data eksperimen
Abraham, et al. 2013

Spesimen Benda Uji	Beban Runtuh (kN)			Persentase <i>Error</i> (%)	
	Eksperimen	FEM-ANSYS	SNI 2847:2019	FEM-ANSYS	SNI 2847:2019
GPB1	59.25	63.84	61.55	7.75	3.89
RCB1	58.25	58.76	61.60	0.88	5.75

Berdasarkan data kedua tabel tersebut, terlihat bahwa deviasi antara hasil simulasi dan data eksperimen tergolong kecil, dengan rata-rata *error* sebesar 5.72% untuk nilai defleksi dan 4.31% untuk beban maksimum.

Tabel 6 dan 7 menunjukkan perbandingan nilai lendutan dan beban maksimum antara hasil eksperimen berdasarkan data pengujian dari Dattatreya, et al. 2011 dan simulasi metode elemen hingga (FEM) untuk dua jenis balok, yaitu beton *geopolymer* (FAB1) dan beton konvensional (CC1).

Tabel 6. Validasi lendutan maksimum berdasarkan data eksperimen

Dattatreya, et al. 2011

Spesimen Benda Uji	Defleksi (mm)		Persentase <i>Error</i> (%)
	Eksperimen	FEM-ANSYS	
FAB1	16.92	15.88	6.12
CC1	17.19	17.44	1.43

Tabel 7. Validasi beban maksimum berdasarkan data eksperimen

Dattatreya, et al. 2011

Spesimen Benda Uji	Beban Runtuh (kN)			Persentase <i>Error</i> (%)	
	Eksperimen	FEM-ANSYS	SNI 2847:2019	FEM-ANSYS	SNI 2847:2019
FAB1	37.50	38.76	35.24	3.37	6.01
CC1	58.90	62.61	63.14	6.29	7.21

Berdasarkan data kedua tabel tersebut, terlihat bahwa deviasi antara hasil simulasi dan data eksperimen tergolong kecil, dengan rata-rata *error* sebesar 3.78% untuk nilai defleksi dan 4.83% untuk beban maksimum. Selain itu, hasil perhitungan teoritis yang didasarkan pada SNI 2847:2019 menunjukkan bahwa data eksperimen konsisten secara signifikan. Ini menunjukkan bahwa model numerik yang digunakan benar.

Tabel 8 dan 9 menunjukkan perbandingan nilai lendutan dan beban maksimum antara hasil eksperimen berdasarkan data pengujian dari Ojha, et al. 2022 dan simulasi metode elemen hingga (FEM) untuk dua jenis balok, yaitu beton *geopolymer* (M40 RGC B-1) dan beton konvensional (M40 RCC B-1).

Tabel 8. Validasi lendutan maksimum berdasarkan data eksperimen

Ojha, et al. 2022

Spesimen Benda Uji	Defleksi (mm)		Persentase <i>Error</i> (%)
	Eksperimen	FEM-ANSYS	
M40 RGC B-1	24.76	24.21	2.83
M40 RCC B-1	28.62	27.81	2.21

Tabel 9. Validasi beban maksimum berdasarkan data eksperimen

Ojha, et al. 2022

Spesimen Benda Uji	Beban Runtuh (kN)			Persentase <i>Error</i> (%)	
	Eksperimen	FEM-ANSYS	SNI 2847:2019	FEM-ANSYS	SNI 2847:2019
M40 RGC B-1	178.70	174.70	168.52	2.24	5.69
M40 RCC B-1	162.50	170.85	171.78	5.14	5.71

Berdasarkan hasil pada kedua tabel, dapat disimpulkan bahwa deviasi antara hasil simulasi metode elemen hingga dan data eksperimen berada pada kisaran yang relatif kecil, dengan rata-rata *error* sebesar 2,13% untuk lendutan maksimum dan 3,69% untuk beban runtuh. Hasil ini menunjukkan bahwa, berdasarkan parameter yang ditinjau, model metode elemen hingga yang digunakan dapat memodelkan respons struktural balok beton dari kedua jenis material dengan tingkat akurasi yang tinggi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil evaluasi numerik yang dilakukan menggunakan metode elemen hingga, diperoleh bahwa balok beton bertulang berbasis *geopolymer* menunjukkan perilaku lentur yang sebanding dengan beton bertulang konvensional, baik dari segi beban runtuh, lendutan, maupun pola retak. Simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS dengan elemen SOLID65, LINK180, dan SOLID185 mampu merepresentasikan perilaku lentur secara akurat, dengan deviasi rata-rata di bawah 10% terhadap data eksperimen. Validasi terhadap hasil teoritis berdasarkan SNI 2847:2019 menunjukkan konsistensi dan memperkuat keandalan model simulasi yang digunakan.

Perilaku lentur baik beton bertulang *geopolymer* maupun konvensional dalam hubungan beban dan lendutan menunjukkan kesamaan yang tipikal terhadap penggambaran tahapan penting saat pengujian berlangsung. Hal ini menunjukkan bahwa beton *geopolymer* memiliki respons struktural yang dapat diterima dan mengikuti pola dasar desain elemen lentur. sehingga standar yang berlaku untuk beton konvensional dapat diterapkan juga untuk beton *geopolymer*.

Untuk mendukung hasil temuan ini, penelitian lanjutan disarankan untuk dilakukan mencakup pengujian eksperimental dengan jenis beban lebih variatif, seperti beban siklik atau kombinasi lentur dan geser. Selain itu, perlu dikembangkan pemodelan numerik nonlinier dengan mempertimbangkan efek rangkai dan susut untuk prediksi jangka panjang. Perbandingan antara uji laboratorium, analisis elemen hingga dan perhitungan SNI 2847:2019

pada tinjauan defleksi maksimum menunjukkan perbedaan yang cukup besar dan perlu diperhatikan untuk penelitian lebih lanjut.

DAFTAR REFERENSI

- Abraham, R., Raj, D. S., & Abraham, V. (2013). Strength and behaviour of geopolymer concrete beams. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2, 159–166.
- Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195–217.
- Celik, A. I., Ozbayrak, A., Sener, A., & Acar, M. C. (2022). Numerical analysis of flexural and shear behaviors of geopolymer concrete beams. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(2), 70–80. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1116561>
- Dattatreya, J. K., Rajamane, N. P., Sabitha, D., & Nataraja, M. C. (2011). Flexural behaviour of reinforced geopolymer concrete beams. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(1), 138–159.
- Felippa, C. A. (2016). *Introduction to finite element methods (ASEN5007)* [Course material].
- Irmawaty, R., Fakhruddin, & Gosal, A. O. (2021). Perkuatan lentur balok beton bertulang dengan mortar geopolimer. *Prosiding KoNTekS 15*, Semarang.
- Kumaravel, S., Thirugnanasambandam, S., & Jeyasehar, C. A. (2013). Flexural behaviour of low calcium fly ash based geopolymer concrete beams. *International Journal of Engineering & Applied Sciences*, 5(1), 24–31.
- Nawy, E. G. (1998). *Beton bertulang: Suatu pendekatan dasar*. Bandung: PT Refika Aditama.
- Nawy, E. G. (2009). *Reinforced concrete: A fundamental approach* (6th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Ojha, P. N., Singh, B., Trivedi, A., Singh, P., Singh, A., & Pedde, C. (2023). Short-term mechanical performance and flexural behavior of reinforced slag-fly ash-based geopolymer concrete beams in comparison to OPC-based concrete beams. *Research on Engineering Structures and Materials*, 9(1), 31–51. <https://doi.org/10.17515/resm2022.515me0902>
- Park, R., & Pauley, T. (1974). *Reinforced concrete structures*. New York: John Wiley & Sons.
- SNI 2847:2013. (2013). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Sonief, A. (2005). *Diktat metode elemen hingga*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Sumajouw, D. M. J., & Dapas, S. O. (2013). *Elemen struktur beton bertulang geopolymer*. Yogyakarta: Penerbit ANDI.

- Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2006). *Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Reinforced beams and columns* (Ph.D. thesis). Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Tjitradi, D., Eliatun, E., & Taufik, T. (2017). 3D ANSYS numerical modeling of reinforced concrete beam behavior under different collapsed mechanisms. *International Journal of Mechanics and Applications*, 7(1), 14–23. <https://doi.org/10.5923/j.mechanics.20170701.02>
- Warner, R. F., Rangan, B. V., Hall, A. S., & Faulkes, K. A. (1999). *Concrete structures*. Melbourne: Longman.
- Whitney, C. S. (1937). Design of reinforced concrete members under flexure or combined flexure and direct compression. *ACI Journal* (March–April). Reprinted in: Jirsa, J. O. (2004). Landmark series. *Concrete International* (May).
- Wibowo, Y. N., Piscesa, B., & Tajunnisa, Y. (2022). Numerical investigation of geopolymer reinforced concrete beams under flexural loading using finite element analysis. *Journal of Civil Engineering*, 37(1), 27–32.
- Wong, F. T. (2021). *Pengantar metode elemen hingga untuk analisis struktur: Teori, perumusan, implementasi komputer, dan aplikasi* (Ed. 1, Cet. 1). Depok: Rajawali Pers.