

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kerusakan struktural sering ditemukan pada bangunan yang telah berdiri lama, terutama pada bangunan yang tidak lagi memenuhi standar desain modern (Hidayat et al., 2019; Haryanto et al., 2021; Haryanto et al., 2023). Kerusakan ini menjadi perhatian utama karena banyak bangunan lama dirancang dengan mengutamakan kekuatan struktur terhadap beban statis, tanpa mempertimbangkan daktilitas, yang kini diakui secara luas sebagai elemen penting dalam menjaga kinerja struktur terhadap gempa bumi (Madotto et al., 2021). Daktilitas memungkinkan bangunan untuk menahan deformasi signifikan akibat beban luar tanpa mengalami keruntuhan total, aspek yang sangat penting untuk keselamatan.

Indonesia, sebagai salah satu negara dengan aktivitas seismik tinggi, telah mengalami banyak kerusakan bangunan akibat gempa dalam beberapa dekade terakhir, baik pada bangunan tua maupun yang baru. Hal ini menyoroti kelemahan dalam desain yang tidak memenuhi standar ketahanan gempa terbaru (Pribadi et al., 2021). Kerentanan ini menuntut adanya upaya serius dalam perkuatan struktur yang ada. Perkuatan struktur menjadi solusi penting, namun tantangan utama terletak pada pengembangan metode yang efektif, ekonomis, dan mudah diterapkan. Penggunaan teknologi material modern, seperti komposit polimer yang ringan, tahan lama, dan ramah lingkungan, menawarkan alternatif praktis dan berkelanjutan dibandingkan metode konvensional. Oleh karena itu, pengembangan metode perkuatan yang inovatif sangat dibutuhkan untuk mengurangi kerusakan akibat gempa di masa mendatang sekaligus memastikan keselamatan bangunan dan penghuninya.

Upaya berkelanjutan untuk menyempurnakan metode perkuatan sangatlah penting, terutama dalam menjaga kinerja bangunan dan menciptakan lingkungan yang lebih aman bagi penghuninya (Haryanto, et.al., 2019). Salah satu metode perkuatan yang umum diterapkan pada balok beton bertulang yang memiliki detail tulangan kurang memadai atau mengalami kerusakan adalah penggunaan *steel jacketing* atau *concrete jacketing* (Ferrotto et al., 2018; Salah et al., 2022; Ibrahim et al., 2023) Meskipun metode

ini terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan struktural, kelemahan signifikan tidak dapat dihindari. Penambahan material meningkatkan beban mati bangunan, yang dapat mempengaruhi performa keseluruhan, terutama pada bangunan tua yang tidak dirancang untuk beban tambahan. Selain itu, risiko korosi pada baja juga muncul, terutama di lingkungan lembab atau korosif, yang tidak hanya mengurangi kekuatan baja tetapi juga merusak beton di sekitarnya. Dengan kelemahan ini, ada kebutuhan mendesak untuk mengembangkan metode perkuatan alternatif yang lebih ringan, lebih tahan lama, dan lebih tahan terhadap korosi, seperti penggunaan material komposit modern yang lebih efisien secara teknis, ekonomis, dan ramah lingkungan.

Saat ini, penggunaan bahan ramah lingkungan dalam perbaikan struktur beton bertulang semakin dianjurkan, mengingat pentingnya aspek keberlanjutan dalam industri konstruksi modern. Material seperti geopolimer tidak hanya lebih aman bagi lingkungan, tetapi juga menawarkan keunggulan teknis yang signifikan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa material ini memiliki perilaku ikatan yang baik dengan beton, yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan durabilitas elemen yang diperbaiki (Aldahdooh et al., 2016; Peng et al., 2022; Peng et al., 2023). Kemampuan material perkuatan untuk membentuk ikatan yang kuat dengan beton asli merupakan faktor kunci keberhasilan perkuatan struktur. Selain itu, material yang digunakan harus kompatibel secara mekanis dan kimiawi dengan beton, terutama dalam hal daya ikat dan ketahanannya (Albidah et al., 2020) dan menurut Zailani et al., (2020) menemukan bahwa matriks geopolimer berbasis abu terbang (*fly ash*) mampu membentuk ikatan yang kuat dengan beton, dengan kerapatan lebih tinggi dan pori-pori lebih sedikit dibandingkan material konvensional. Penggunaan geopolimer berkalsium tinggi juga ditemukan mampu meningkatkan kekuatan mekanik dan daya ikat, sekaligus meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan yang dapat menyebabkan degradasi, menjadikannya solusi yang unggul dalam perbaikan beton bertulang.

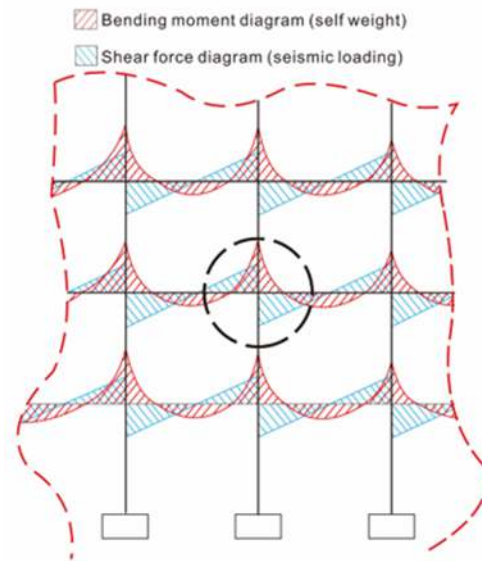
Beton geopolimer sebagai material semen inovatif dan berkelanjutan, telah menarik perhatian besar dalam industri konstruksi modern. Material ini terbentuk melalui proses polimerisasi, di mana silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) bereaksi dalam kondisi alkali untuk membentuk material amorf yang memiliki kekuatan struktural sangat baik. Karakteristik mekanik beton geopolimer unggul, seperti kekuatan tekan yang tinggi, ketahanan terhadap serangan kimia, dan ketahanan suhu ekstrem,

menjadikan beton geopolimer sebagai material yang ideal untuk proyek perkuatan struktur. Selain itu, beton geopolimer memiliki sifat yang memungkinkan aplikasi yang lebih mudah pada struktur yang memerlukan perkuatan, di mana material ini dapat berubah menjadi lebih cair saat diaduk dan mengeras kembali ketika dibiarkan. Berdasarkan Pacheco-Torgal et al., (2012) meninjau potensi beton geopolimer dalam perkuatan beton, menunjukkan bahwa material ini memberikan solusi yang lebih berkelanjutan dengan dampak lingkungan lebih rendah, menjadikannya material masa depan yang potensial untuk menggantikan semen portland tradisional.

Selama beberapa dekade terakhir, material komposit berbasis polimer yang diperkuat serat (*fiber-reinforced polymer, FRP*) juga telah mengalami perkembangan pesat dalam bidang perkuatan struktur. *FRP* menawarkan alternatif yang sangat praktis dibandingkan metode konvensional yang cenderung lebih berat dan kurang efisien. Material ini fleksibel dan dapat diaplikasikan pada berbagai jenis material, termasuk beton (Haryanto et al., 2021; Lie et al., 2022; Nugroho et al., 2023), baja (Tafsirojjaman et al., 2022; Tahar et al., 2022), kayu (Huang et al., 2023; Lee et al., 2023) dan pasangan bata (D'Altri dan de Miranda, 2020; Napoli dan Realfonzo, 2021). *FRP* memiliki sifat mekanik yang unggul, seperti ringan, tahan lama, dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan material baja tulangan, membuatnya ideal untuk digunakan di lingkungan yang rentan terhadap degradasi material. Selain itu, *FRP* memungkinkan perkuatan yang lebih *diskrit* dan minimal invasif, menjaga tampilan dan desain asli bangunan. Hal ini sangat penting untuk bangunan bersejarah atau bernilai arsitektural tinggi, di mana perbaikan struktural harus dilakukan tanpa merusak integritas visual dan budaya bangunan tersebut (Yoshitake et al., 2020).

Gambar 1.1 menunjukkan diagram gaya dalam pada daerah sambungan antara balok dan kolom dalam struktur rangka bangunan bertingkat, terjadi interaksi gaya dalam yang kompleks akibat kombinasi beban gravitasi dan beban gempa. Gaya-gaya dalam yang bekerja pada sambungan ini meliputi momen lentur, gaya geser, dan gaya aksial yang harus diperhitungkan secara cermat dalam perancangan struktur. Momen lentur pada sambungan balok-kolom berasal dari dua sumber utama, yaitu beban gravitasi dan beban gempa. Beban dari berat sendiri struktur menyebabkan balok mengalami momen negatif pada daerah tumpuan, di mana serat atas balok mengalami tarik dan serat bawah mengalami tekan. Sementara itu, beban lateral akibat gempa menyebabkan perubahan

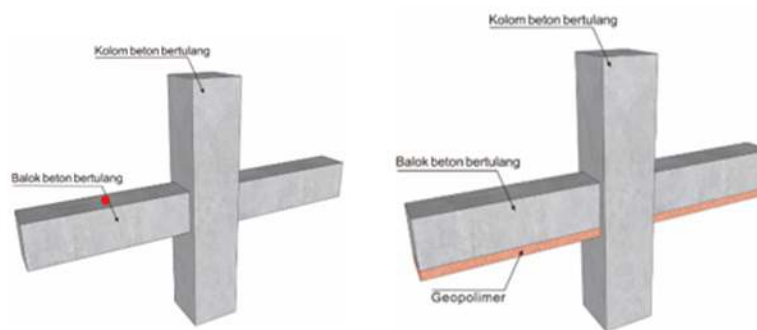
arah momen pada kolom dan balok secara bolak-balik, sehingga desain sambungan harus mampu menahan gaya siklik yang dapat menyebabkan kelelahan material (Priestley et al., 2007).



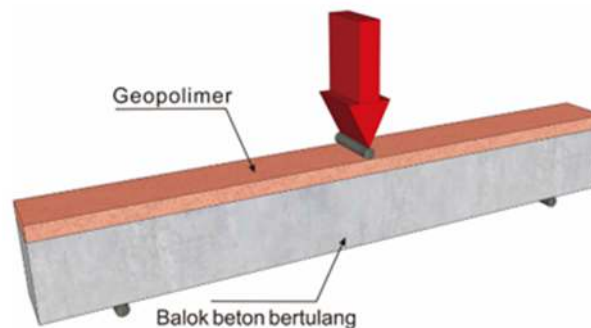
Gambar 1.1. Ilustrasi diagram gaya dalam pada struktur rangka

Selain itu, gaya geser pada sambungan terjadi akibat transfer beban dari balok ke kolom. Gaya geser akibat beban gravitasi muncul karena beban lantai atau atap diteruskan ke kolom melalui balok, sementara gaya geser akibat beban gempa lebih dominan pada bagian bawah struktur karena akumulasi gaya lateral dari lantai atas ke bawah (Paulay, T.; Priestly, 1992). Jika sambungan tidak cukup kuat dalam menahan gaya geser, kegagalan geser dapat terjadi sebelum elemen mencapai kapasitas lenturnya, yang dapat menyebabkan mekanisme keruntuhan prematur pada struktur. Selain itu, gaya aksial juga bekerja pada sambungan balok-kolom, terutama dalam bentuk gaya aksial tekan akibat transfer beban gravitasi dari lantai atas ke bawah melalui kolom. Karena sambungan balok-kolom merupakan titik kritis dalam struktur, perancangannya harus memperhitungkan interaksi simultan dari ketiga jenis gaya dalam tersebut. Oleh karena itu, diperlukan detail perkuatan seperti pelat baja tambahan (*stiffener*), sambungan kaku (*rigid joint*), atau penguatan tulangan pada beton bertulang untuk memastikan ketahanan terhadap berbagai beban yang bekerja. Dengan memahami gaya-gaya dalam yang terjadi pada sambungan balok-kolom dan menerapkan perancangan yang tepat, struktur dapat memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap beban gravitasi

maupun gempa, serta mencegah kegagalan struktural yang dapat berakibat fatal, untuk mengurangi resiko tersebut akan dilakukan perkuatan pada balok, sedangkan pada Gambar 1.2 memperlihatkan kondisi awal balok beton bertulang sebelum perkuatan dan kondisi balok setelah perkuatan dengan penambahan lapisan beton geopolimer di bagian bawah, yang berfungsi meningkatkan kapasitas lentur dan ketahanan terhadap retak akibat momen negatif pada daerah tumpuan. Rencana pengujian monotonik pada balok yang sudah diperkuat dengan geopolimer, di mana beban diberikan secara bertahap untuk menguji kekuatan dan respon deformasi balok disajikan pada Gambar 1.3.



Gambar 1.2. Ilustrasi balok sebelum perkuatan dan posisi beton geopolimer pada balok perkuatan



Gambar 1.3. Ilustrasi pengujian monotonik pada balok

Tabel 1.1 menyajikan *state of the art* penelitian terkait dan kebaruan (*novelty*) penelitian ini dan Tabel A terlampir, terbukti bahwa sudah banyak penelitian tentang properties material beton geopolimer dan aplikasi beton geopolimer pada balok prismatis sedangkan aplikasi beton geopolimer pada perkuatan balok masih sedikit. Demikian juga penelitian perkuatan geser menggunakan *FRP* pada balok sudah banyak dilakukan, tetapi penelitian jenis *FRP string* untuk perkuatan geser masih sedikit.

Tabel 1.1. *State of the Art* penelitian yang terkait dan kebaruan (*novelty*) penelitian

Peneliti	Properties Material Beton Geopolimer	Balok Prismatis Dengan Beton Geopolimer	Beton Geopolimer Untuk Perkuatan Balok	FRP Untuk Perkuatan Geser Pada Balok
(Sanni and Khadiranaikar, 2014; Gumalang, Wallah, et al., 2016; Karakoç et al., 2016; Pouhet and Cyr, 2016; Prabhu et al., 2016; Shehab et al., 2016; Tanyildizi and Yonar, 2016; Albitar et al., 2017; Mehta and Siddique, 2017a, 2017b; Muttashar et al., 2017; Ramujee and PothaRaju, 2017; Ukesh Praveen and Srinivasan, 2017; Pham et al., 2021; Rameshwaran and Madhavi, 2021; T. Naresh et al., 2021; Li et al., 2022; Thumrongvut et al., 2022)	Penelitian beton geopolymer tentang mikrostruktur yang berhubungan dengan porositas dan karakteristik kimia, <i>fresh properties</i> beton geopolymer, sifat durability beton geopolymer dan mechanical properties meliputi kuat tekan dan kuat tarik beton geopolymer.			
(Sumajouw et al., 2005; M. D.J. Sumajouw and Rangan, 2006; Mourougane, Puttappa, et al., 2012; Ng et al., 2013; Yost, Radlińska, et al., 2013; Andalib, Warid Hussin, et al., 2014; Sanni and Khadiranaikar, 2014; Srinivasan et al., 2014; Devika and Deepthi, 2015a; Hutagi and Khadiranaikar, 2016a; Kathirvel and		Penelitian balok struktur beton geopolymer dengan variabel penelitian rasio tulangan, variasi jarak tulangan geser, penambahan serat baja, rasio <i>fly ash – slag</i> . Pengaruh rasio tulangan pada balok beton geopolimer hampir sama atau serupa dengan balok beton konvensional dalam hal kapasitas lentur dan daktilitas.		

<p>Kaliyaperumal, 2016a; Visintin et al., 2017; Pham et al., 2021; Thumrongvut et al., 2022)</p>	
<p>(Täljsten, 2003; Boussselham and Chaallal, 2008; A. et al., 2010; Bukhari et al., 2010; Baggio et al., 2014; Azam et al., 2017; Zheng et al., 2020; Moradi et al., 2020b; Sayed, 2020; Shomali et al., 2020; Guo et al., 2021; Saribiyik et al., 2021)</p>	
<p>(Purwanto, 2021)</p>	<p><i>Self Compacting Geopolymer Concrete (SCGC) Haunch</i> Sebagai Perkuatan Balok Lentur di Zona Dekat Muka Kolom</p>
<p>(Sudibyoy, 2023)</p>	<p>Beton Geopolimer untuk Perkuatan daerah tekan pada struktur balok beton bertulang</p> <p>Perilaku FRP Sengkang String pada balok beton perkuatan</p>

Dalam dunia teknik sipil, khususnya bidang rekayasa struktur, pengujian eksperimental memiliki peran penting dalam memahami perilaku elemen struktural seperti balok beton bertulang dengan berbagai kondisi pembebanan. Namun, hasil eksperimental sering kali membutuhkan verifikasi dan kontrol perhitungan untuk memastikan keandalan data, konsistensi hasil, serta penerapan yang aman. Penggunaan *software* seperti ANSYS, ABAQUS, DIANA, SAP2000, Response 2000 atau ETABS memungkinkan analisis lebih mendalam terhadap perilaku struktur, baik pada balok perkuatan maupun tanpa perkuatan. Dengan kemampuan simulasi non-linear, *software* ini dapat memodelkan fenomena kompleks, termasuk interaksi antara beton, tulangan, dan material perkuatan seperti *CFRP* atau sengkang tambahan. Simulasi numerik juga dapat memperluas cakupan analisis dengan memvariasikan parameter desain seperti penambahan ketebalan beton pada balok perkuatan.

Pada balok tanpa perkuatan, *software* struktur digunakan untuk memverifikasi kapasitas lentur dan geser berdasarkan standar desain seperti ACI 318 atau SNI 2847. Hasil simulasi membantu mengidentifikasi mekanisme kegagalan dominan, seperti lentur atau geser, serta membandingkan kapasitas beban dengan hasil eksperimen. Sementara itu, pada balok perkuatan, *software* membantu menganalisis efek material perkuatan terhadap kapasitas beban dan deformasi, memvalidasi peningkatan kinerja struktural yang dihasilkan dari perkuatan. Hasil simulasi, seperti pola retakan, distribusi tegangan, dan kapasitas beban maksimum, memberikan gambaran rinci yang tidak selalu dapat diamati dalam eksperimen fisik. Dengan demikian, *software* struktur tidak hanya membantu memverifikasi hasil eksperimen tetapi juga menjadi alat penting dalam optimasi desain dan pengembangan panduan perkuatan yang lebih efektif.

Berdasarkan penelitian dari Foster and Bisby, (2005), menunjukkan bahwa simulasi menggunakan ABAQUS pada balok yang diperkuat dengan *CFRP* memberikan validasi akurat terhadap hasil pengujian eksperimental, sedangkan menurut penelitian Kachlakev dan McCurry, (2000) memanfaatkan ANSYS untuk memodelkan perilaku balok yang diperkuat laminasi *FRP*, menemukan kesesuaian yang baik antara hasil eksperimen dan simulasi. Bhatt et al., (2014) mengilustrasikan penggunaan SAP2000 dalam analisis balok beton bertulang untuk memastikan hasil eksperimen memenuhi prediksi teoretis. Penelitian oleh Abdulrahman et al., (2018) menggunakan *software* DIANA untuk mengevaluasi perilaku non-linear balok yang diperkuat dengan *CFRP*.

Hasilnya *software* DIANA mampu memodelkan interaksi antara beton, tulangan baja, dan *CFRP* dengan akurasi tinggi, serta memberikan visualisasi pola retakan yang konsisten dengan hasil eksperimen. Penelitian lainnya oleh Singh et al., (2020) memanfaatkan *software* DIANA untuk menganalisis balok beton geopolimer. Hasilnya menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki pola retakan yang lebih getas dibandingkan beton konvensional, dengan kapasitas lentur yang lebih rendah sebesar 15-20%. Sementara itu, Response 2000 telah digunakan untuk menganalisis penampang balok beton bertulang. McGregor and Bentz, (2005) memanfaatkan Response 2000 untuk mengevaluasi perilaku lentur dan geser balok beton bertulang, dengan hasil simulasi yang memiliki deviasi maksimum kurang dari 5% dibandingkan hasil eksperimen. Perangkat lunak ini juga mampu memprediksi distribusi tegangan dan regangan pada penampang balok, termasuk kontribusi tulangan sengkang terhadap peningkatan kapasitas geser. Penelitian lain oleh Rahman et al., (2017) menggunakan Response 2000 untuk mengevaluasi balok beton bertulang yang diperkuat dengan laminasi *FRP*. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan *FRP* meningkatkan kapasitas lentur balok hingga 40%, dengan simulasi yang berhasil memprediksi pola distribusi tegangan dan potensi kegagalan akibat delamination. Dengan penghematan waktu dan biaya yang ditawarkan oleh simulasi numerik, *software* struktur menjadi bagian integral dari proses penelitian, validasi, dan penerapan praktis pada elemen struktural seperti balok beton bertulang tanpa perkuatan dan balok beton dengan perkuatan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan dari latar belakang tersebut dapat diidentifikasi permasalahan pada penelitian ini adalah:

1. Material beton geopolimer, meskipun memiliki potensi yang besar sebagai bahan perkuatan struktural, belum banyak diaplikasikan pada elemen-elemen struktur bangunan, terutama sebagai perkuatan pada balok beton bertulang.
2. Jenis *CFRP string*, belum banyak diteliti dan diaplikasikan sebagai bahan perkuatan geser pada balok beton bertulang, sehingga memerlukan kajian lebih lanjut dibandingkan dengan baja tulangan yang lebih umum digunakan.

3. Banyak bangunan lama di Indonesia yang tidak memenuhi standar perancangan terbaru, sehingga memerlukan metode perkuatan yang lebih efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk mengurangi kerusakan yang mungkin terjadi.
4. Perlu dilakukan analisis pemodelan balok dengan perkuatan dan balok tanpa perkuatan menggunakan *software* analisis struktur dan membandingkan dengan hasil eksperimen.
5. Menjelaskan pola retak pada balok tanpa perkuatan dan balok dengan perkuatan.

1.3 Perumusan Masalah

Berdasarkan dari identifikasi masalah tersebut, maka dapat dirumuskan permasalahan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil pemodelan balok perkuatan dan balok tanpa perkuatan menggunakan alat bantu *software* DIANA dibandingkan dengan hasil eksperimen?
2. Bagaimana pengaruh perkuatan terhadap kapasitas beban balok tanpa perkuatan dan balok perkuatan?
3. Bagaimana pengaruh perkuatan terhadap daktilitas balok tanpa perkuatan dan balok perkuatan?
4. Bagaimana tegangan geser pada bidang *interface* antara beton konvensional dan beton geopolimer
5. Bagaimana pola retak (*crack pattern*) balok tanpa perkuatan dan balok perkuatan akibat beban monotonik?

1.4 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dan tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pemodelan balok tanpa perkuatan dan balok perkuatan dengan menggunakan alat bantu *software* DIANA dan memvalidasi dengan hasil eksperimen.
2. Menganalisis kapasitas beban dari balok tanpa perkuatan dan balok perkuatan.
3. Menganalisis daktilitas dari balok tanpa perkuatan terhadap balok perkuatan.
4. Menganalisis tegangan geser pada bidang *interface* antara beton konvensional dan beton geopolimer
5. Menjelaskan pola retak (*crack pattern*) pada balok tanpa perkuatan dan balok perkuatan.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah diperlukan sehingga permasalahan yang dibahas dapat dikaji lebih dalam dan tidak melebar pada permasalahan-permasalahan lain yang mungkin dapat terjadi. Penelitian ini hanya membatasi pada:

1. Batasan penelitian pada uji eksperimental skala laboratorium dengan benda uji elemen struktur balok beton bertulang dengan beban monotonik.
2. Mutu beton konvensional yang digunakan pada penelitian ini adalah $f'c = 25.00$ MPa
3. *CFRP String* yang digunakan adalah produk *SIKA Type Sikawrap FX 50* yang mempunyai sifat fisik: berat ≥ 50 g/m, luas penampang ≥ 28 mm² dan berat jenisnya 1.82 g/cm².
4. Epoxy yang digunakan adalah produk Sika dengan type Sikadur 752 yang mempunyai modulus elastisitas (min) 2.4×10^5 MPa dan kuat tarik (min): 4000 MPa.
5. Data sifat komposit *CFRP* dengan epoxy yang digunakan untuk perhitungan adalah kuat tarik: 2000 MPa, modulus elastisitas: 2.3×10^5 MPa dan luas penampang: 64.526 mm² dengan asumsi lekatanya adalah *perfect bond*.
6. Beton geopolimer dengan bahan dasar *fly ash* yang berasal dari PLTU Tanjung Jati Jepara.
7. Berat sendiri struktur balok tidak diperhitungkan baik pada uji eksperimental maupun pada model.
8. *Software* yang digunakan untuk analisis struktur adalah *software* DIANA dan *Response 2000*.

1.6 Kontribusi dan Kebaruan (Noveltis) Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan ilmu teknik sipil, khususnya pada aplikasi perkuatan balok beton bertulang menggunakan kombinasi material beton geopolimer dan *CFRP string*. Salah satu kontribusi utama dari penelitian ini adalah pemanfaatan beton geopolimer sebagai elemen perkuatan struktural. Beton geopolimer merupakan material ramah lingkungan dengan kekuatan tekan yang tinggi dan daya tahan yang baik, namun penggunaannya pada perkuatan balok beton bertulang masih sangat

terbatas. Melalui penelitian ini, beton geopolimer diharapkan dapat menjadi alternatif material berkelanjutan dibandingkan material konvensional

Selain itu, penelitian ini menghadirkan inovasi baru dengan menggunakan *CFRP string* sebagai sengkang tertutup pada balok beton bertulang. *CFRP string* memiliki kuat tarik yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan baja, yang umumnya digunakan dalam perkuatan geser. Dengan kemampuan memberikan pengekangan yang lebih efektif, *CFRP string* berpotensi meningkatkan daktilitas beton dan menunda kegagalan geser pada balok. Ini merupakan kebaruan yang signifikan, karena metode perkuatan geser dengan *CFRP string* belum banyak dikaji secara mendalam sebelumnya.

Kebaruan lain yang ditawarkan dalam penelitian ini adalah penggunaan metode *Near Surface Mounted (NSM)* pada pemasangan tulangan perkuatan. Pemasangan tulangan sengkang perkuatan secara menerus/tertutup ini dirancang untuk mengatasi permasalahan kegagalan prematur, seperti *debonding*, yang sering terjadi pada metode *External Bonded Reinforcement (EBR)*. Selain itu, *CFRP string* juga dikombinasikan dengan beton geopolimer pada sisi bawah balok, memberikan perkuatan yang lebih optimal pada kedua elemen tersebut, sehingga meningkatkan kekuatan geser dan lekatan antara beton geopolimer dengan beton eksisting. Penelitian ini juga berkontribusi dalam memberikan pemahaman baru terkait perilaku balok beton bertulang di daerah tumpuan. Pada daerah tumpuan, momen lentur negatif menyebabkan serat beton di bagian atas balok mengalami tarik, sementara bagian bawah mengalami tekan. Hal ini berlawanan dengan kondisi pada lapangan tengah balok yang mengalami momen positif. Dalam kondisi tersebut, tulangan tarik utama berada bagian atas balok, sehingga perencanaan dan penempatan tulangan menjadi lebih kompleks. Selain itu, gaya geser yang tinggi di dekat tumpuan menambah tantangan dalam menjamin integritas struktural balok, karena risiko terjadinya retak geser miring yang dapat berkembang dengan cepat jika tidak ditangani dengan penulangan geser yang memadai. Kombinasi kedua efek ini menuntut pendekatan desain yang lebih rinci, termasuk perhatian terhadap panjang penyaluran tulangan, penyediaan tulangan transversal (sengkang), dan kontrol terhadap retak-retak awal. Oleh karena itu, pemahaman lebih mendalam mengenai respons material dan perilaku struktur di daerah tumpuan menjadi krusial dalam meningkatkan keamanan dan kinerja balok beton bertulang secara keseluruhan.