

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Untuk memahami perilaku struktur balok yang telah diperkuat, dilakukan pengujian eksperimental dengan pendekatan pembebanan monotonik. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan beban terpusat di tengah bentang balok. Pembebanan monotonik dilakukan untuk mengevaluasi respons lentur dari balok, kapasitas geser yang dihasilkan oleh penambahan tulangan *FRP string* dan baja serta pola keruntuhan dan defleksi balok di bawah pembebanan terpusat.

Selain uji eksperimental, digunakan pemodelan elemen hingga untuk memahami aspek mikrostruktur dari material yang digunakan dan untuk mengevaluasi performa perkuatan dalam kondisi yang sulit diuji secara eksperimental. Pemodelan elemen hingga memungkinkan simulasi lebih detail mengenai distribusi tegangan dan deformasi pada balok, serta memberikan prediksi yang lebih akurat mengenai kapasitas *ultimate* balok dan faktor-faktor keruntuhan yang tidak dapat diamati langsung selama pengujian laboratorium. Metode elemen hingga juga memungkinkan evaluasi variasi parameter material dan geometri, sehingga dapat memberikan hasil yang lebih mendalam untuk desain perkuatan di masa depan. Penelitian ini diawali dengan uji material yang bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik material yang akan digunakan pada benda uji. Pengujian ini penting untuk memverifikasi kualitas material yang digunakan, serta untuk memastikan bahwa hasil pengujian laboratorium sesuai dengan spesifikasi desain yang telah direncanakan.

3.2 Penelitian Dasar

Penelitian dasar digunakan sebagai pendukung uji balok beton dengan skala penuh. Pada penelitian dasar ini mencakup uji sifat mekanik baja tulangan, sifat mekanik beton konvensional dan sifat mekanik beton geopolimer.

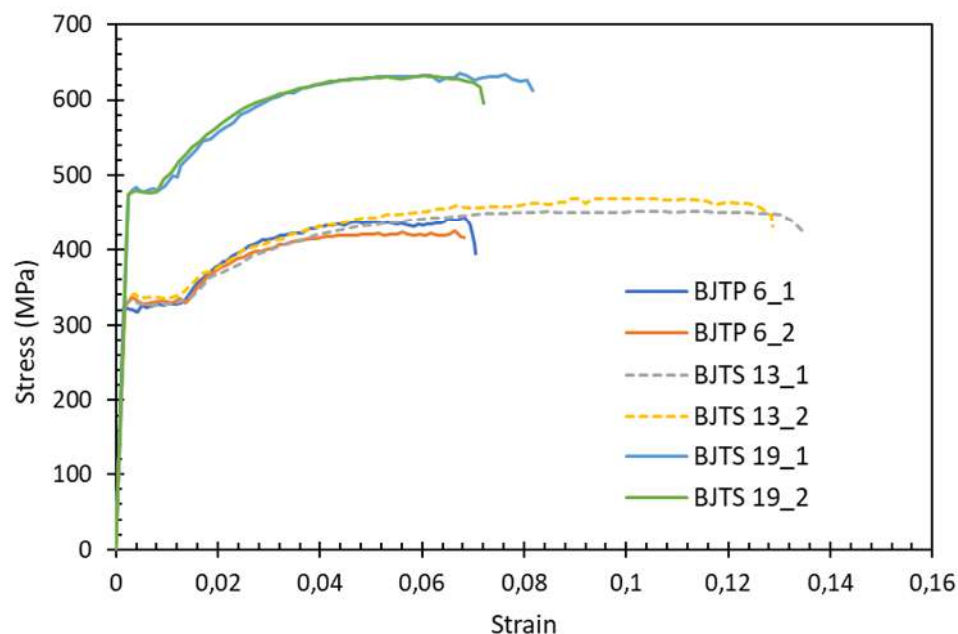
3.2.1 Baja Tulangan

Tulangan longitudinal pada penelitian ini menggunakan baja tulangan sirip (BJTS) dengan diameter 13 mm dan 19 mm, sedangkan tulangan geser (sengkang) menggunakan

baja tulangan polos (BJTP) dengan diameter 6 mm. Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* pada Laboraturium Penguji Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Semarang. Hasil pengujian sifat mekanik besi tulangan disajikan pada Tabel 3.1 sedangkan grafik hubungan *stress-strain* besi tulangan disajikan pada Gambar 3.1. Berdasarkan data hasil uji tarik tarik tersebut, semua benda uji memenuhi syarat menurut SNI 2052-2017 (Nasional, 2017).

Tabel 3.1. Data hasil uji tarik baja tulangan

Benda Uji	No	f_y (MPa)	ϵ_y	ϵ_{sh}	f_u (MPa)	ϵ_u	ϵ_{sh}/ϵ_y	ϵ_u/ϵ_y
BJTP 6	1	325,058	0,002	0,014	425,534	0,066	8,322	40,870
	2	331,457	0,002	0,015	453,280	0,105	9,086	63,552
	Rerata	328,257			439,407			
BJTS 13	1	331,457	0,002	0,015	453,280	0,105	9,086	63,552
	2	336,546	0,002	0,013	469,710	0,106	7,943	62,745
	Rerata	334,001			461,495			
BJTS 19	1	472,261	0,002	0,012	635,328	0,067	5,087	28,527
	2	474,698	0,002	0,008	631,572	0,060	3,380	25,310
	Rerata	473,480			633,450			



Gambar 3.1. Diagram Tegangan Regangan Baja Tulangan

3.2.2 CFRP String

Carbon Fiber Reinforced Polymer (FRP) merupakan bahan yang ringan, kuat, anti magnetik dan tahan terhadap korosi. Pada penelitian ini akan digunakan *CFRP string* dari *SikaWrap® FX-50 C* yang berbentuk serat karbon searah yang akan digunakan sebagai bahan perkuatan struktur balok beton bertulang yang akan diaplikasikan dengan metode pananaman dangkal (*near surface mounted/NSM*). Berdasarkan dari data produk Sika (Sheet, 2017) dapat diketahui informasi sifat fisik dan mekaniknya seperti pada Tabel 3.2 sedangkan bahan *CFRP string* dan *resin* yang digunakan disajikan pada Gambar 3.2.

Tabel 3.2. Sifat fisik dan mekanik *CFRP String*

<i>Fibre type</i>	<i>NSM-CFRP</i>
<i>Weight</i>	≥ 50 g/m (<i>carbon fiber content</i>)
<i>Fiber cross-section</i>	≥ 28 mm ² (<i>based on carbon fiber</i>)
<i>Fiber density</i>	1.82 g/cm ²
<i>Dry fiber properties in the longitudinal direction of the fibers</i>	
<i>Tensile modulus, minimum</i>	2.4×10^5 MPa
<i>Tensile strength, minimum</i>	4000 MPa
<i>Strain at break</i>	≥ 0.016
<i>Composite properties according to ASTM D4018</i>	
<i>Tensile modulus</i>	2.3×10^5 MPa
<i>Tensile strength</i>	2000 MPa
<i>Composite cross-section</i>	64.526 mm ²



Gambar 3.2. *CFRP String Sika Wrap FX dan Resin Sikadur 752*

3.2.3 Beton Geopolimer

Beton geopolimer merupakan inovasi material konstruksi yang mengedepankan penggunaan bahan alam dan bahan limbah industri sebagai pengikat alami. Beton ini menggunakan material yang kaya akan oksida silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) sebagai bahan utama, pada limbah industri seperti *fly ash*, metakaolin, atau terak (Davidovits, 1994). Material utama tersebut digunakan dalam beton geopolimer adalah *fly ash* kelas F, yang memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi. Aktivasi material ini dilakukan dengan *alkali activator* (AA), yang tersusun dari kombinasi natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) atau kalium hidroksida (KOH) dan kalium silikat (K_2SiO_3). Aktivator ini membantu memulai proses polimerisasi, yaitu proses pembentukan ikatan kimia baru antara silika dan alumina yang menghasilkan struktur tiga dimensi yang kuat dan tahan lama.

Salah satu jenis beton geopolimer yang digunakan dalam penelitian dan aplikasi modern adalah *Self-Compacting Geopolymer Concrete (SCGC)*. *SCGC* adalah beton geopolimer yang memiliki kemampuan untuk memadat sendiri tanpa bantuan pemadatan mekanis. Untuk mencapai workabilitas yang optimal, penting untuk menyeimbangkan komposisi campuran dengan proporsi yang tepat antara *extra water*, *extra cement*, dan *superplasticizer*. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan air dan *superplasticizer* yang sesuai dapat meningkatkan kemampuan pemadatan sendiri dari beton geopolimer. Berdasarkan standar (EFNARC, 2005), beton geopolimer tipe *SCGC* yang ideal memiliki nilai slump flow antara 550-800 mm. Penelitian yang dilakukan oleh (Gumalang, Anwar, et al., 2016) menemukan bahwa rasio optimal antara *extra water* dan *fly ash* untuk mencapai slump flow ini adalah 0,30.

3.2.3.1 Fly ash

Fly Ash atau yang dikenal dengan abu terbang, merupakan residu halus yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). *Fly ash* terangkut oleh gas buang dari zona pembakaran dan tersusun atas partikel-partikel halus yang sangat mirip dengan semen Portland dalam sifat fisik dan kimia. Menurut ASTM, (2010) mendefinisikan *fly ash* sebagai material residu yang berasal dari pembakaran batu bara, yang banyak digunakan sebagai bahan tambahan atau pengganti semen dalam campuran beton.

Dari segi fisik, *fly ash* memiliki butiran yang sangat halus, mirip dengan semen, dengan ukuran partikel yang dapat lolos ayakan no. 235 ($45\ \mu\text{m}$) sebanyak 5-27% dan memiliki *specific gravity* antara 2,15 hingga 2,6. Butiran halus ini memungkinkan *fly ash* berperan baik dalam mengisi rongga antar agregat dalam campuran beton, sehingga meningkatkan kepadatannya. Warna abu-abu kehitaman dari *fly ash* juga menyerupai semen, yang semakin mendukung penggunaannya sebagai pengganti sebagian semen.

Secara kimia, *fly ash* terdiri dari silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3) yang mencapai 80% dari total komposisinya. Kandungan kimia ini memberikan sifat pozzolanik, di mana material ini dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) dalam beton untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang merupakan komponen utama yang memberikan kekuatan pada beton. Hal ini memungkinkan *fly ash* berfungsi sebagai bahan pengikat dalam campuran beton.

Berdasarkan ASTM, (2010) *fly ash* dapat dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu :

1. Kelas C *Fly Ash*

- a) Mengandung CaO (kalsium oksida) lebih dari 10%.
- b) Dihasilkan dari pembakaran *lignite* atau *sub-bitumen*, yang merupakan jenis batubara muda.
- c) Memiliki kadar $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ lebih dari 50%.
- d) Kelas C *fly ash* cenderung memiliki sifat semen lebih tinggi, yang memungkinkannya berfungsi sebagai pengganti sebagian besar semen dalam campuran beton tanpa memerlukan aktivator tambahan.

2. Kelas F *Fly Ash*:

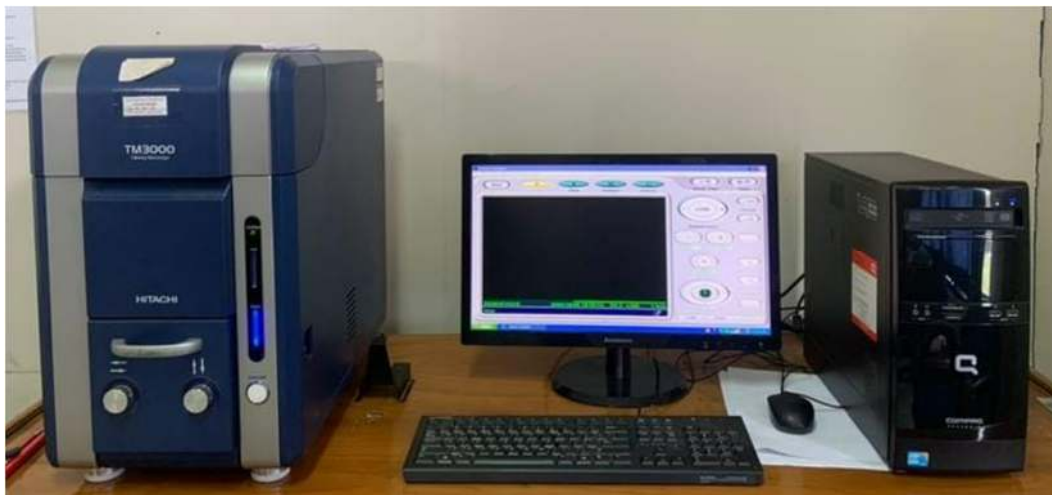
- a) Mengandung CaO lebih kecil dari 10%.
- b) Dihasilkan dari pembakaran bitumen atau antrasit, jenis batubara yang lebih matang.
- c) Memiliki kadar $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ lebih dari 70%.
- d) Kelas F *fly ash* memiliki sifat pozzolanik yang dominan, sehingga memerlukan aktivator untuk memaksimalkan reaksi pozzolaniknya.

3. Kelas N *Fly Ash*:

- a) Diperoleh dari material alamiah, bukan limbah pembakaran batu bara.
- b) Memiliki kadar total $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ lebih dari 70%.

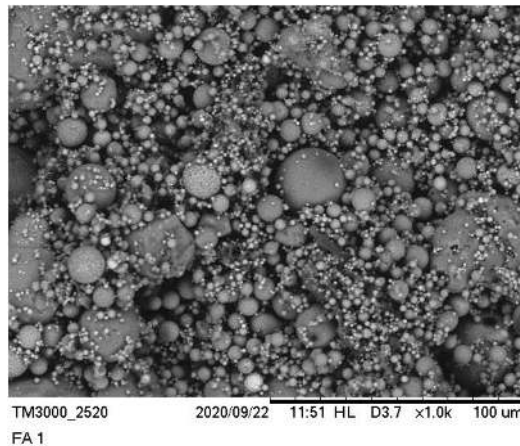
- c) Material ini jarang digunakan dalam penelitian terkait beton geopolimer, tetapi tetap berpotensi sebagai material pozzolanik.

Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari limbah PLTU Tanjung Jati B Jepara, yang merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga uap berbasis batu bara. *Fly ash* dari PLTU ini dianalisis menggunakan metode *Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDX)* untuk mengamati morfologi dan komposisi kimia dari partikel *fly ash* tersebut. Analisis ini dilakukan di Laboratorium Teknik Geologi Universitas Jenderal Soedirman dengan menggunakan alat *SEM* tipe TM 3000. Penggunaan *SEM-EDX* memungkinkan observasi yang mendetail terhadap ukuran partikel, bentuk, serta distribusi oksida penyusun dari *fly ash*. Alat uji *SEM* yang digunakan disajikan pada Gambar 3.3.

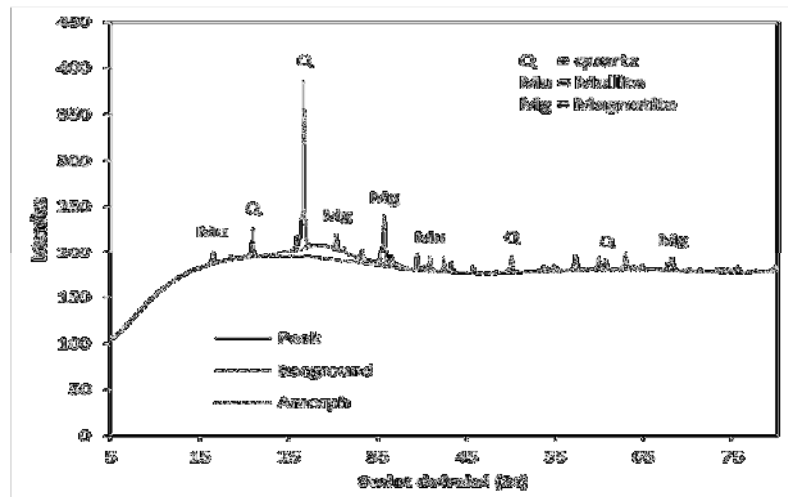


Gambar 3.3. Alat uji *SEM*

Morfologi dan ikatan *fly ash* yang akan digunakan sebagai bahan dasar dalam menyintesis beton geopolimer yang diaktivasi dengan larutan *alkaline activator* dapat diketahui dengan pengujian *Scanning Electron Microscopy (SEM)*, hasil uji *SEM* dengan skala perbesaran 1000x disajikan pada Gambar 3.4. Berdasarkan dari pengujian tersebut diketahui bahwa partikel *fly ash* berbentuk bola bulat (*spherical*). Bentuk bulatan *fly ash* tampak heterogen dan memiliki jarak antar partikel yang bervariasi karena perbedaan diameter partikel yang besar.



Gambar 3.4. Hasil *Scanning electron microscopy (SEM)* fly ash



Gambar 3.5. Analisis *XRD* fly ash PLTU Tanjung Jati B Jepara

Berdasarkan Gambar 3.5. diperoleh hasil analisis XRD yang menunjukkan bahwa kadar amorphous dalam *fly ash* ini adalah 38,10%, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar material memiliki struktur yang tidak teratur atau amorf. Struktur *amorf* ini penting karena lebih reaktif terhadap aktivator alkali dalam proses polimerisasi, yang berarti *fly ash* jenis ini sangat cocok digunakan dalam pembuatan beton geopolimer.

Tabel 3.3. Unsur-unsur utama hasil pengujian XRF pada *fly ash*

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	(SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)
51%	29%	11%	5%	2%	91%

Hasil pengujian *X-Ray Fluorescence (XRF)* yang disajikan pada Tabel 3.3 menunjukkan kandungan kimia utama dari *fly ash* PLTU Tanjung Jati B Jepara. Berdasarkan data yang diperoleh, SiO_2 (silika) merupakan unsur kimia dengan kandungan terbanyak, yang mendominasi komposisi kimia *fly ash*. Kandungan SiO_2 yang tinggi merupakan karakteristik utama dari *fly ash* kelas F, yang memiliki sifat pozzolanik dan berfungsi sebagai pengganti sebagian semen dalam beton.

Selain itu, kandungan CaO (kalsium oksida) dalam *fly ash* ini adalah 5%, yang menunjukkan bahwa *fly ash* ini termasuk dalam kelas F menurut klasifikasi ASTM C618-12a. *Fly ash* kelas F yang dihasilkan dari pembakaran batubara *bitumen* atau *antrasit* dan memiliki kandungan CaO kurang dari 10%. *Fly ash* tipe ini memiliki sifat pozzolanik yang memerlukan aktivator alkali untuk memicu proses polimerisasi dalam beton geopolimer. *Fly ash* tipe F sering digunakan dalam beton geopolimer karena kandungan silika dan alumina yang tinggi, yang sangat reaktif terhadap aktivator alkali seperti NaOH dan Na_2SiO_3 .

3.2.3.2 Proses Pembuatan Larutan Alkali Aktivator

Pada proses pembuatan beton geopolimer, alkali aktivator berfungsi sebagai binder yang menginisiasi proses geopolimerisasi, yang merupakan reaksi kimia utama dalam pembentukan beton geopolimer. Proses ini mengakibatkan pembentukan struktur tiga dimensi yang kuat dari material aluminosilikat, seperti *fly ash*, yang digunakan sebagai bahan dasar beton geopolimer. Alkali aktivator adalah salah satu komponen kunci yang mempengaruhi kekuatan mekanik dan durabilitas dari beton geopolimer.

Dalam penelitian ini, digunakan kombinasi NaOH dan Na_2SiO_3 sebagai aktivator. Sodium hidroksida (NaOH) dipilih karena lebih ekonomis, mudah tersedia, dan memiliki viskositas rendah, yang memudahkan pencampuran dalam campuran beton geopolimer. Sementara itu, sodium silikat (Na_2SiO_3) berfungsi untuk meningkatkan kekuatan pasta dan membentuk ikatan kuat dalam struktur beton. Konsentrasi molar (M) yang digunakan adalah 12 molar, langkah yang dilakukan adalah:

1. Menghitung massa NaOH yang dibutuhkan:
 - a. Mr (massa molekul relatif) dari NaOH = 40 gram/mol.
 - b. Untuk membuat 1 liter larutan NaOH 12 M, dibutuhkan 12 mol NaOH .

c. Massa NaOH yang diperlukan dihitung dengan rumus:

Massa NaOH = $n \times Mr$, di mana n adalah jumlah mol, sehingga:

Massa NaOH = $12 \text{ mol} \times 40 \text{ gram/mol} = 480 \text{ gram}$.

2. Proses pencampuran:

a. Menimbang sebesar 480 gram NaOH padat kemudian ditambahkan ke dalam air bersih hingga volume total mencapai 1 liter.

b. Mengaduk larutan hingga semua kristal NaOH larut dalam air.

Setelah larutan NaOH 12 M selesai dibuat, langkah selanjutnya adalah membuat larutan alkali aktivator. Proses ini melibatkan pencampuran larutan NaOH dengan Natrium Silikat (Na_2SiO_3). Dalam penelitian ini, digunakan Natrium Silikat tipe Be52, yang memiliki kandungan Na_2O sebesar 14,55% dan kandungan SiO_2 sebesar 33,76%.

Untuk membuat larutan alkali aktivator, langkah yang dilakukan adalah:

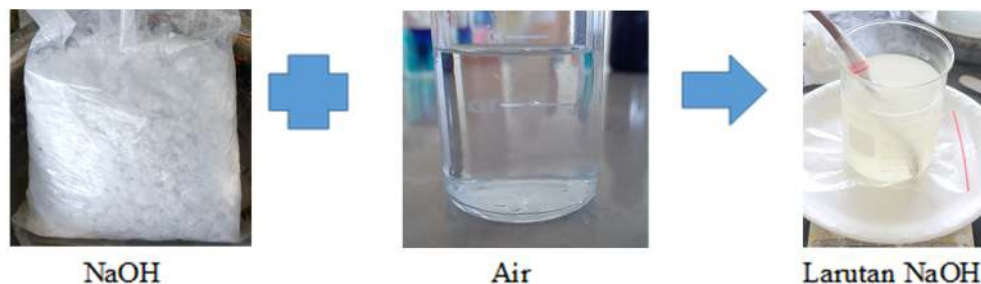
1. Perbandingan pencampuran

Larutan NaOH 12 M dicampur dengan Natrium Silikat Be52 dengan perbandingan 1 : 2,5 (Ekaputri, 2013).

2. Proses pencampuran

Larutan NaOH 12 M dan Natrium Silikat Be52 dicampur secara perlahan sambil diaduk untuk memastikan homogenitas campuran. Campuran ini akan digunakan sebagai alkali aktivator dalam beton geopolimer.

Proses pembuatan larutan NaOH dan larutan alkali disajikan pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7.



Gambar 3.6. Proses pembuatan larutan NaOH



Gambar 3.7. Proses pembuatan larutan Alkali

3.2.4 Mix Design Beton Konvensional dan Beton Geopolimer

Mutu beton yang direncanakan pada penelitian ini adalah 25 MPa, untuk beton konvensional menggunakan beton ready mix dari Sambas Beton. Beton geopolimer yang digunakan adalah jenis *SCGC* dengan proporsi campuran bahan penyusun beton geopolimer yang terdiri dari *fly ash*, *alkaline activator*, agregat halus (pasir), agregat kasar, *extra cement*, *extra water* dan bahan *additive* (*superplasticizer*), Semua bahan material yang digunakan merupakan bahan material lokal yang memenuhi persyaratan sebagai bahan penyusun beton. Proporsi material hasil mix desain untuk beton konvensional disajikan pada Tabel 3.4, sedangkan proporsi mix desain untuk beton geopolimer disajikan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.4. Mix Design Beton Konvensional per m³

No	Bahan Beton Konvensional	Berat (kg)
1	Kerikil	1060
2	Pasir	792
3	Semen	386
4	Air	205
5	Admixture (Consol SG)	1.25

Tabel 3.5. Mix design Beton Geopolimer

No	Bahan Beton Geopolimer	Komposisi
1	Agregat : Binder (<i>Fly Ash</i> + <i>Alkaline Activator</i>)	70% : 30%
2	Agregat kasar : Agregat Halus	60% : 40%
3	<i>Fly Ash</i> (FA) : <i>Alkaline Activator</i> (AA)	65% : 35%
4	Na ₂ SiO ₃ Be-52 : NaOH (12 Molar)	2.5 : 1.0
5	<i>Extra water</i> (sebagai trigger)	11.70% x Binder (FA + AA)
6	<i>Extra cement</i> (sebagai trigger)	5.63% x Binder (FA + AA)
7	<i>Superplasticizer</i>	2.00% x FA

Proses pencampuran beton geopolimer SCGC (*Self-Compacting Geopolymer Concrete*) merupakan tahapan penting dalam menghasilkan beton yang tidak hanya memiliki kemampuan mengalir sendiri tanpa getaran, tetapi juga memenuhi kriteria kekuatan struktural. Tahapan pertama dimulai dengan pencampuran kering agregat kasar dengan binder geopolimer yang terdiri dari *fly ash*. Dalam tahap ini, ditambahkan pula sejumlah kecil semen sebagai *extra cement* yang berfungsi sebagai pemicu reaksi aditif dalam *binder*. Pencampuran kering ini dilakukan hingga seluruh material menyatu dan distribusi partikel homogen.

Setelah tercapai homogenitas awal, ke dalam campuran tersebut dituangkan larutan *alkaline activator*, air tambahan (*extra water*), dan superplasticizer. Larutan *alkaline activator* berfungsi untuk mengaktifkan reaksi geopolimerisasi pada *fly ash*. Air tambahan berperan dalam membantu pelarutan dan aktivasi semen sebagai pemicu reaksi kimia lanjutan. Kombinasi semen dan *extra water* sangat penting karena mampu mengaktifkan kerja superplasticizer, yang bertugas meningkatkan workability dari adonan beton. Pada tahap ini, campuran beton dibiarkan selama beberapa menit agar seluruh komponen tercampur sempurna dan terlapisi oleh larutan aktivator, dengan ciri khas permukaan campuran yang mulai tampak mengkilap.

Langkah selanjutnya adalah penambahan agregat halus berupa pasir. Penambahan ini dilakukan secara bertahap untuk memastikan distribusi partikel yang baik dan mencegah terbentuknya gumpalan. Setelah pasir ditambahkan, seluruh campuran kembali diaduk hingga mencapai kondisi homogen. Kualitas hasil pencampuran sangat menentukan karakteristik beton SCGC, terutama dalam hal kelecakan dan kekuatan tekan. Jika proses ini dilakukan sesuai metode, maka beton SCGC yang dihasilkan akan memenuhi kriteria standar beton *self-compacting* sesuai EFNARC (2005), yaitu memiliki nilai *slump flow* horizontal antara 550 mm hingga 800 mm. Selain itu, waktu alir (*flow time*) untuk mencapai diameter 50 cm (T50) tidak boleh melebihi 6 detik. Hal ini menandakan bahwa beton tidak hanya memiliki kemampuan mengalir secara mandiri ke dalam cetakan atau rongga tanpa pemadatan mekanik, tetapi juga tetap memiliki kohesi dan homogenitas yang baik untuk menjamin kualitas struktural. Pelaksanaan uji *slump flow* disajikan pada Gambar 3.9, sedangkan untuk beton konvensional dilakukan uji test dan diperoleh nilai slumpnya adalah 12 cm. Pada Gambar 3.9. disajikan proses pelaksanaan pengujian slump test untuk beton konvensional.



Gambar 3.8. *Slump flow time* beton geopolimer



Gambar 3.9. Proses uji *slump test* beton konvensional

3.2.5 Uji Kuat Tekan Beton

Benda uji untuk pengujian kuat tekan beton adalah silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pengujian kuat tekan dilaksanakan bersamaan dengan pelaksanaan pengujian balok beton perkuatan. Perbandingan kuat tekan antara beton konvensional dan beton geopolimer menunjukkan karakteristik performa material yang berbeda, terutama berkaitan dengan umur beton saat pengujian. Beton konvensional yang diuji pada umur 353 hari memiliki nilai kuat tekan rata-rata sebesar 28,00 MPa, sedangkan beton geopolimer yang diuji pada umur 263 hari menunjukkan kuat tekan rata-rata sebesar 26,97 MPa. Perbedaan umur beton sebesar 90 hari ini memberikan keuntungan bagi beton konvensional karena umur yang lebih panjang umumnya berkorelasi dengan perkembangan kekuatan yang lebih tinggi. Namun, beton geopolimer mampu menunjukkan nilai kekuatan tekan yang sangat mendekati beton konvensional, dengan selisih hanya sekitar 1,03 MPa atau sekitar 3,7%, meskipun dengan umur yang

lebih pendek. Fenomena ini mengindikasikan bahwa beton geopolimer memiliki laju perkembangan kekuatan yang lebih cepat dibandingkan beton konvensional. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Davidovits (1994) yang menyatakan bahwa beton geopolimer, terutama yang berbasis *fly ash* atau *slag*, dapat mencapai kekuatan tekan tinggi dalam waktu yang lebih singkat karena reaksi polimerisasi yang cepat pada suhu kamar maupun suhu tinggi.

Selain itu, kedua jenis beton berada dalam kategori mutu beton sedang (20–35 MPa) sesuai dengan SNI 2847:2019, yang berarti keduanya layak digunakan untuk aplikasi struktural umum. Beton konvensional tetap menjadi acuan karena kestabilan dan data historis penggunaannya yang luas, namun beton geopolimer menunjukkan potensi yang sangat baik sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan. Dengan kinerja mekanik yang kompetitif dan umur pengujian yang lebih singkat, beton geopolimer berpotensi menjadi material konstruksi masa depan, mendukung upaya transisi menuju pembangunan berkelanjutan. Proses uji kuat tekan beton dan model kerusakan disajikan pada Gambar 3.10, sedangkan data lengkap hasil pengujian kuat tekan pada Tabel 3.6.



Gambar 3.10. Proses pengujian kuat tekan dan model kerusakan benda ujinya

Tabel 3.6. Hasil pengujian kuat tekan beton

No	Kode uji	Benda	Umur beton (hari)	Diameter D_{cl} (mm)	Tinggi h_{cl} (mm)	Luas Penampang A_{cl} (mm ²)	Beban P (N)	Kuat tekan f_c (MPa)	Kuat Tekan rerata (MPa)
1	BN Tekan 1		353	150	300	17678.6	475000	26,87	28,00
2	BN Tekan 2		353	150	300	17678.6	500000	28,29	
3	BN Tekan 3		353	150	300	17678.6	510000	28,85	
4	BG Tekan 1		263	150	300	17678.6	490000	27,72	26,97
5	BG Tekan 2		263	150	300	17678.6	490000	27,72	
6	BG Tekan 3		263	150	300	17678.6	450000	25,46	

3.2.6 Uji Kuat Tarik Tak Langsung (*Split Tensile Test*)

Benda uji untuk pengujian kuat tekan beton adalah silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pengujian kuat tekan dilaksanakan bersamaam dengan pelaksanaan pengujian balok beton perkuatan. Umur benda uji beton konvensional saat pengujian adalah 353 hari, sedangkan umur benda uji beton geopolimer adalah 263 hari. Beton konvensional menunjukkan nilai kuat tarik rata-rata sebesar 2,736 MPa, sementara beton geopolimer menunjukkan kuat tarik rata-rata sebesar 2,406 MPa. Hasil ini memperlihatkan bahwa kuat tarik beton konvensional sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan beton geopolimer, yang dapat dijelaskan oleh umur beton dan karakteristik komposisi material masing-masing jenis beton. Beton konvensional menggunakan semen Portland, yang memiliki sifat pengikatan yang sangat kuat pada aplikasi tarik. Beton geopolimer masih menunjukkan hasil yang kompetitif dalam hal kuat tarik, terutama dengan mempertimbangkan bahwa beton ini menggunakan *fly ash* sebagai pengganti semen dan diuji pada umur yang lebih muda. Proses uji kuat tekan beton dan model kerusakan disajikan pada Gambar 3.11, sedangkan data lengkap hasil pengujian kuat tekan pada Tabel 3.7.



Gambar 3.11. Proses Uji tarik tak langsung dan model kerusakan benda uji

Tabel 3.7. Hasil pengujian kuat tarik beton

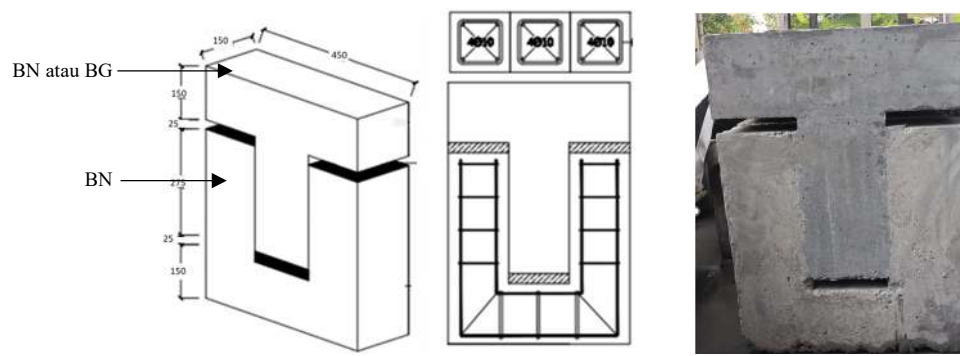
No	Kode Benda uji	Umur beton (hari)	Diameter D_{cl} (mm)	Tinggi h_{cl} (mm)	Luas Penampang A_{cl} (mm ²)	Beban P (N)	Kuat Tarik f_c (MPa)	Kuat Tarik rerata (MPa)
1	BN Tarik 1	353	150	300	17678.6	190	2,69	2,736
2	BN Tarik 2	353	150	300	17678.6	200	2,83	
3	BN Tarik 3	353	150	300	17678.6	190	2,69	
4	BG Tarik 1	263	150	300	17678.6	150	2,12	2,406
5	BG Tarik 2	263	150	300	17678.6	190	2,69	

3.2.7 Uji Geser *Interface*

Kuat geser *interface* adalah parameter penting dalam menentukan kualitas sambungan antara beton lama dan beton baru. Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan geser *interface* antara beton konvensional dengan beton konvensional, serta antara beton konvensional dengan beton geopolimer. Penelitian ini bertujuan untuk melihat bagaimana beton geopolimer berperan dalam sambungan beton dan apakah memberikan performa yang lebih baik dibandingkan beton konvensional. Benda uji yang digunakan berbentuk huruf U dan T, dimodifikasi dari bentuk *double L* untuk menguji kekuatan geser pada *interface* beton. Benda uji *double-L* terdiri dari dua segmen beton berbentuk huruf "L" yang disusun saling berhadapan, membentuk bidang geser horizontal di antara keduanya. Gaya tekan vertikal diberikan pada bagian atas, menyebabkan gaya geser bekerja pada bidang kontak. Konfigurasi ini memungkinkan uji geser murni, namun rentan terhadap rotasi dan *slip* karena rendahnya kekangan lateral. Modifikasi bentuk U–T terdiri atas bagian bawah berbentuk huruf "U", yang menyangga elemen atas berbentuk huruf "T". Desain ini menciptakan kekangan lateral alami pada bidang geser horizontal, mengurangi efek rotasi dan distribusi tegangan yang tidak merata. Kombinasi geometri U–T dengan variabel kekasaran, tekanan normal, *shear key*, perkuatan, dan mutu beton tinggi menciptakan sistem antarmuka yang lebih stabil dan meningkatkan nilai kekuatan geser hingga 60% lebih tinggi dibanding pengujian menggunakan bentuk *double-L*. Benda uji geser *interface* disajikan pada Gambar 3.12.

Berdasarkan Tabel 3.8 dan Tabel 3.9, diperoleh hasil pengujian geser *interface* antara beton normal terhadap beton normal serta beton normal terhadap beton geopolimer. Uji geser ini dilakukan dengan memperhatikan gaya maksimum (P_{max}) dan luas bidang geser yang tetap, yaitu 82.500 mm². Pada pengujian beton normal terhadap beton normal, nilai kuat geser *interface* berkisar antara 1,38 MPa hingga 2,53 MPa, dengan nilai rata-rata sebesar 1,91 MPa. Sementara itu, pada pengujian beton normal terhadap beton geopolimer, kuat geser *interface* berkisar antara 1,61 MPa hingga 2,33 MPa, dengan rata-rata sebesar 2,02 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi variasi pada tiap benda uji, ikatan antarmuka antara beton normal dan beton geopolimer justru memberikan rerata kekuatan geser yang sedikit lebih tinggi dibandingkan ikatan sesama beton normal.

Jika dibandingkan dengan referensi standar ACI 318-19 atau AASHTO LRFD (misalnya untuk kekuatan geser antarmuka beton tuang di tempat pada permukaan rata tanpa pengasaran), nilai acuan kuat geser minimum berkisar 1,0 MPa hingga 1,4 MPa, tergantung kondisi permukaan dan jenis sambungan. Maka, seluruh hasil uji pada kedua tabel ini masih berada di atas nilai minimum standar tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa baik sambungan beton normal terhadap beton normal maupun terhadap beton geopolimer telah memenuhi persyaratan kekuatan geser *interface* secara struktural.



Gambar 3.12. Model Benda Uji Geser *Interface*

Tabel 3.8. Hasil pengujian geser *Interface* Beton normal dengan Beton Normal

No	Benda Uji	Pmax (N)	Luas bidang geser (mm ²)	Kuat geser <i>Interface</i> (MPa)
1	BN_BN1	149.961,85	82.500	1,82
2	BN_BN2	114.162,04	82.500	1,38
3	BN_BN3	209.160,21	82.500	2,53
Rerata				1,91

Tabel 3.9. Hasil pengujian geser *Interface* Beton normal dengan Beton Geopolimer

No	Benda Uji	Pmax (N)	Luas bidang geser (mm ²)	Kuat geser <i>Interface</i> (MPa)
1	BN_BG1	175.180,50	82.500	2,12
2	BN_BG2	133.232,66	82.500	1,61
3	BN_BG3	192.027,99	82.500	2,33
Rerata				2,02

3.3 Metode Penelitian Balok Beton Bertulang

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium sebagai pendekatan utama untuk menganalisis dan mengevaluasi kekuatan geser balok beton bertulang menggunakan *CFRP string* dan beton geopolimer. Eksperimen dilakukan secara sistematis, mulai dari kajian teori, pengujian material, hingga pengujian elemen struktur penuh. Data-data yang dihasilkan dalam penelitian ini akan diolah secara kuantitatif dan statistik untuk memvalidasi hasil dan menguji hipotesis yang telah diajukan.

Tahapan penelitian diuraikan sebagai berikut:

1. Studi pustaka dan pengembangan teori

Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan literatur terkait kekuatan geser balok beton menggunakan *CFRP string* dan beton geopolimer. Studi pustaka ini bertujuan untuk memperkuat dasar teori dan memahami pendekatan yang sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Fokus utama adalah pada hubungan *interface* beton lama dengan beton baru dan efektivitas kekuatan menggunakan *CFRP string* dalam meningkatkan kapasitas beban dan daktilitas.

2. Pengintegrasian ide dan konsep

Pada tahap ini, dilakukan proses pengembangan konsep kekuatan elemen balok dengan mengintegrasikan *CFRP string* dan dibandingkan dengan baja tulangan sebagai sengkang serta beton geopolimer sebagai elemen tambahan untuk meningkatkan dimensi penampang balok. Penggunaan kombinasi material ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas beban dan daktilitas balok beton.

3. Persiapan uji eksperimen

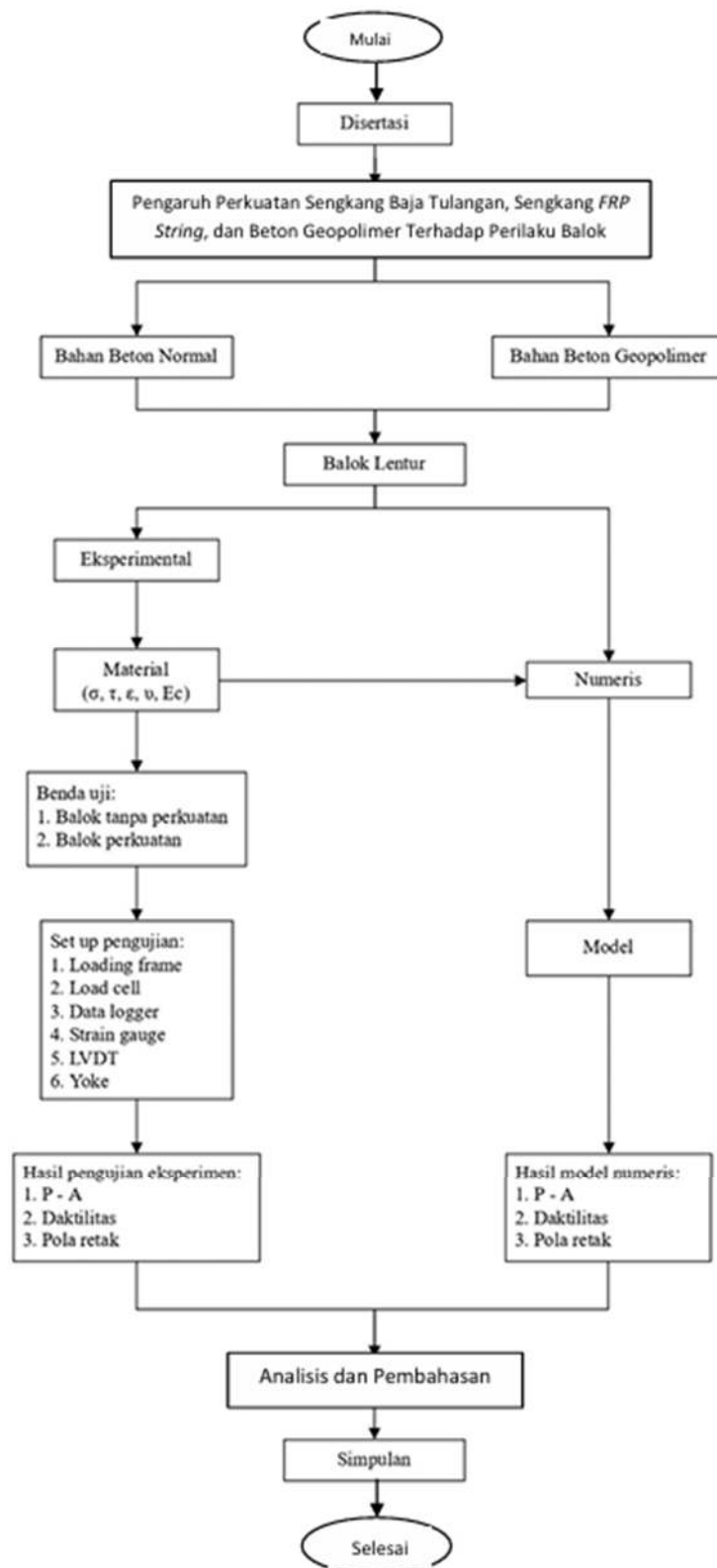
Sebelum eksperimen dilaksanakan, dilakukan persiapan uji material dengan merancang campuran beton (*mix design*) untuk beton konvensional dan beton geopolimer. Analisis dilakukan untuk memastikan bahwa kapasitas alat uji yang digunakan cukup untuk mengakomodasi pembebanan lentur yang direncanakan.

4. Uji sifat-sifat fisik dan mekanik material

Pada tahap ini, dilakukan pengujian sifat fisik dan mekanik material penyusun beton dan baja tulangan. Pengujian meliputi:

- a) Kuat tekan dan kuat tarik beton menggunakan benda uji silinder.

- b) Kuat tarik baja tulangan untuk mengetahui kapasitas tarik baja yang digunakan. Data uji pendahuluan ini kemudian dianalisis untuk memastikan kualitas material yang akan digunakan pada pengujian elemen struktur.
5. Pengujian *full scale* elemen struktur balok
Pada tahap ini, dilakukan pengujian skala penuh pada elemen balok beton bertulang, baik untuk balok tanpa perkuatan maupun balok dengan perkuatan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan pembebanan monotonik pada balok dengan skema uji lentur. Hasil pengujian akan mencakup data mengenai tegangan-regangan, kapasitas momen, dan daktilitas balok yang diuji.
 6. Tahap analisis dan pembahasan
Setelah data pengujian diperoleh, dilakukan analisis kuantitatif untuk menghitung daktilitas dan kapasitas momen lentur balok akibat pembebanan monotonik. Selain itu, dilakukan analisis statistik untuk menguji hipotesis bahwa balok dengan perkuatan memiliki kapasitas dan daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan balok tanpa perkuatan. Pada tahap ini dilakukan analisis mengenai perbandingan hasil pemodelan balok perkuatan dan balok tanpa perkuatan menggunakan *software* DIANA dan analisis penampang dengan *software Response 2000* serta membandingkannya dengan hasil eksperimen untuk validasi dan akurasi metode perkuatan.
 7. Kesimpulan dan rekomendasi
Pada tahap akhir, hasil penelitian diintegrasikan ke dalam kesimpulan dan rekomendasi. Kesimpulan penelitian mencakup temuan utama terkait efektivitas metode perkuatan yang digunakan, sementara rekomendasi disusun dalam bentuk usulan formula analisis dan desain daktilitas serta kapasitas balok perkuatan. Secara garis besar, bagan alir penelitian dapat disajikan seperti pada Gambar 3.13.

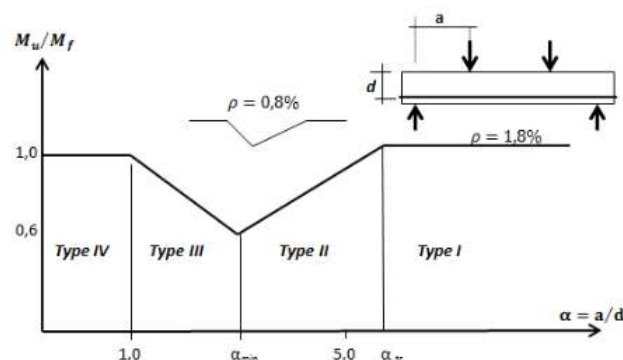


Gambar 3.13. Bagan alir penelitian

3.3.1 Desain Benda Uji Balok

Menurut (Kani, 1964) dalam penelitiannya yang dikenal dengan Kani's Valley menunjukkan bahwa momen lentur ultimit (M_u) dan model kegagalan tergantung pada perbandingan span geser dan tinggi efektif balok (a/d) seperti terlihat pada Gambar 3.14. Pengurangan dalam nilai ρ cenderung meningkatkan kapasitas lentur ultimit relatif (M_u / M_f) dan juga penurunan atau naiknya rasio a/d yang menandai titik transisi untuk tipe berbeda dari balok, sehingga membagi balok dalam empat kelompok, yaitu:

1. Tipe I (*Long Beams*), yaitu balok yang mencapai kapasitas lentur maksimum ($M_u = M_f$) dan gagal dalam lentur. Balok panjang dengan $a/d > 6,0$ dan nilai $\rho \simeq 1.8\%$ memiliki kapasitas geser yang lebih tinggi dari kapasitas lentur maksimumnya.
2. Tipe II (*Nomal Beams of Intermediate Length*), yaitu balok yang tidak bisa mencapai kapasitas lentur maksimumnya (M_f). Kapasitas lentur ultimitnya (M_u) sama dengan kapasitas retak diagonal. Pada balok normal dimana $2,5 < a/d \leq 6$ dan nilai $\rho \simeq 1.8\%$ rasio (M_u / M_f) menurun seperti penurunan rasio a/d untuk nilai minimum yang nilainya tergantung pada ρ . Nilai ini merupakan titik terendah dalam Kani's Valley.
3. Tipe III (*Short Beams*), yaitu balok yang tidak mencapai kapasitas lentur maksimumnya. Balok pendek dengan $1 < a/d \leq 2,5$ dan nilai $\rho \simeq 1.8\%$ memiliki kapasitas geser ultimit lebih tinggi dari kapasitas retak. Rasio M_u/M_f meningkat saat penurunan rasio a/d hingga tercapai $M_u = M_f$.
4. Tipe IV (*Deep Beams*), yaitu balok dengan $a/d \leq 1$ dan nilai $\rho \simeq 1.8\%$ memiliki kapasitas geser yang lebih tinggi dari kapasias lentur maksimumnya.



Gambar 3.14. Klasifikasi Balok menurut Kani's Valley

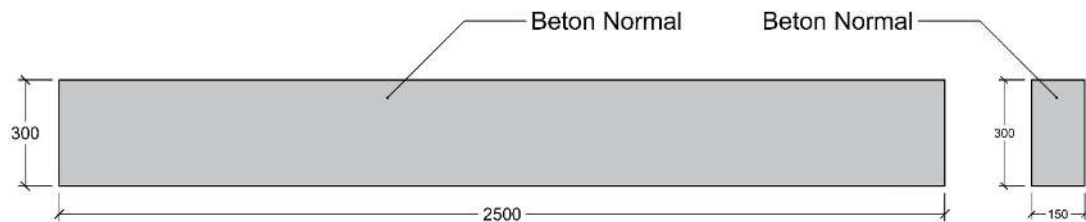
Benda uji pada penelitian ini direncanakan menggunakan balok type II (*normal beam*) dengan tujuan untuk mengetahui besarnya peningkatan kapasitas lentur dan kapaitas geser balok perkuatan. Pembebanan diberikan pada tengah bentang balok guna mendapatkan bidang momen dan geser terbesar pada area observasi dengan tumpuan berupa sendi-rol dengan jarak masing-masing 150 mm dari tepi balok tiap ujungnya. Dimensi benda uji balok 150 x 300 mm dengan panjang balok 2,50 m. Penggunaan tulangan polos pada penelitian ini dengan pertimbangan lebih mudah dilengkungkan dan dipasang, terutama dalam proyek rehabilitasi atau perkuatan struktur eksisting. Hal ini dapat menghemat waktu kerja di lapangan, terutama untuk struktur yang sulit diakses atau memerlukan perkuatan segera.

Tabel 3.10. Variasi Benda Uji Balok

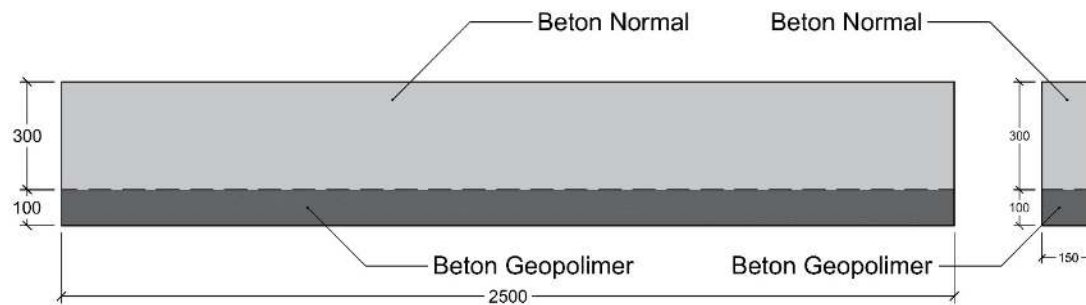
No	Benda Uji	Perlakuan	Dimensi Balok	Jumlah Sampel
1	Type 1 (BN)	Balok Kontrol (Tanpa Perkuatan)	150 x 300	3 buah
2	Type 2 (BGS)	Balok Perkuatan Sengkang Baja Tulangan dan Beton geopolimer	150 x 400	3 buah
3	Type 3 (BGC)	Balok Perkuatan Sengkang <i>CFRP String</i> dan Beton Geopolimer	150 x 400	3 buah

Pada Tabel 3.10 menyajikan variasi benda uji balok yang digunakan dalam penelitian, yang terdiri dari tiga tipe dengan perlakuan dan dimensi berbeda. Tipe pertama, yaitu Type 1 (BN), merupakan balok kontrol tanpa perkuatan tambahan dengan dimensi penampang 150 × 300 mm. Balok ini berfungsi sebagai acuan untuk mengevaluasi pengaruh perkuatan terhadap kekuatan dan perilaku struktur. Tipe kedua, yaitu Type 2 (BGS), merupakan balok yang diperkuat menggunakan sengkang baja tulangan yang dikombinasikan dengan tambahan lapisan beton geopolimer di bagian bawah penampang. Penambahan ini menyebabkan peningkatan dimensi balok menjadi 150 × 400 mm. Sementara itu, Type 3 (BGC) adalah balok perkuatan yang menggunakan material komposit CFRP string sebagai pengganti baja tulangan pada sengkang, dan juga dikombinasikan dengan beton geopolimer pada bagian bawah. Dimensi balok ini sama seperti tipe BGS, yaitu 150 × 400 mm. Masing-masing tipe balok diuji sebanyak tiga

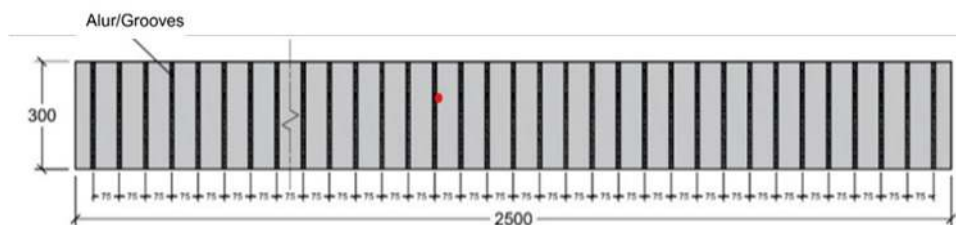
sampel, sehingga total terdapat sembilan benda uji. Variasi ini dirancang untuk membandingkan pengaruh jenis perkuatan dan penggunaan beton geopolimer terhadap performa struktural balok, baik dari segi kekuatan, daktilitas, maupun pola keruntuhannya. Gambar dimensi balok tanpa perkuatan (BN), dimensi balok perkuatan (BGS dan BGC), desain alur (*groove*) untuk balok perkuatan, desain penulangan balok tanpa perkuatan dan balok perkuatan disajikan pada Gambar 3.15 sampai Gambar 3.20.



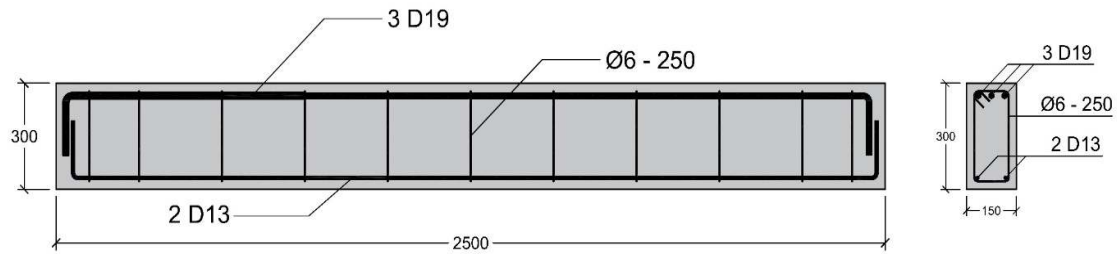
Gambar 3.15. Dimensi balok tanpa perkuatan (BN)



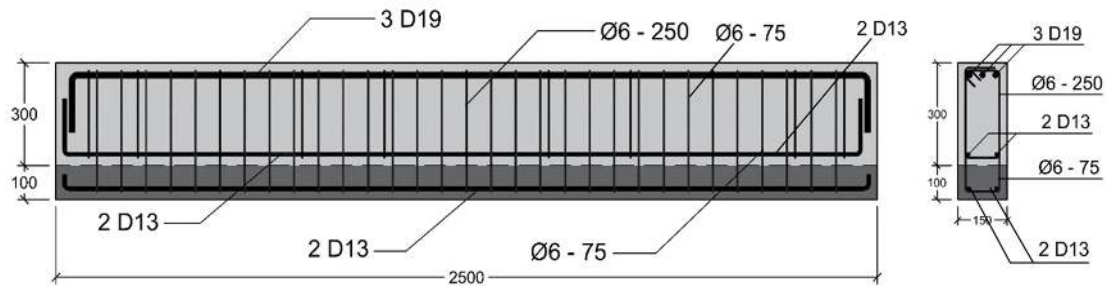
Gambar 3.16. Dimensi balok Perkuatan (BGS dan BGC)



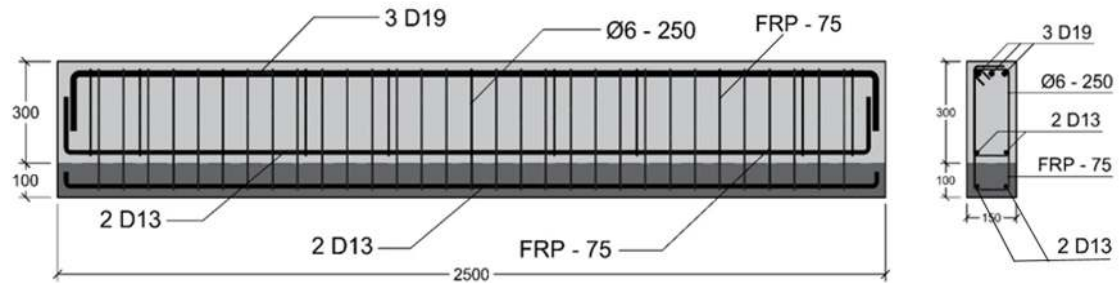
Gambar 3.17. Alur/*grooves* untuk pemasangan tulangan perkuatan geser



Gambar 3.18. Penulangan balok tanpa perkuatan (BN)



Gambar 3.19. Penulangan balok perkuatan dengan baja tulangan (BGS)



Gambar 3.20. Penulangan balok perkuatan dengan *CFRP string* (BGC)

Pada Gambar 3.18 sampai Gambar 3.20 diketahui data geometri dan gambar detail penulangan balok untuk ketiga jenis balok dalam penelitian ini. Benda uji balok tersebut dapat dikategorikan sebagai balok biasa (*slender beam*) berdasarkan rasio bentang terhadap tinggi (*span-to-depth ratio*). Dimensi bentang bersih balok adalah 2300 mm, sementara tinggi balok bervariasi antara 300 mm (BN) dan 400 mm (BGS dan BGC), sehingga rasio L/h untuk masing-masing balok adalah 7,67 untuk BN dan 5,75 untuk BGS dan BGC. Menurut ACI 318-19 suatu balok hanya dikategorikan sebagai deep beam jika $L/h < 2$, atau $< 2,5$ untuk balok konsol, maka seluruh spesimen dalam penelitian ini masih jauh dari batasan tersebut dan dengan demikian memiliki

karakteristik distribusi tegangan yang mengikuti mekanisme lentur (*beam action*), bukan mekanisme tekan diagonal seperti pada *deep beam*.

Meskipun begitu, perlu dicermati bahwa pada balok BGS dan BGC, terdapat modifikasi signifikan pada penampang dan sistem perkuatan. Kedua tipe balok perkuatan tersebut memiliki tambahan lapisan beton geopolimer setebal 100 mm di bagian bawah balok yang berfungsi sebagai penampang tekan tambahan. Penulangan geser juga dibuat lebih rapat di zona momen negatif atau di sekitar beban terpusat dan tumpuan, yaitu dengan jarak sengkang Ø6-75 pada BGS dan *CFRP string*-75 pada BGC. Perkuatan rapat ini secara efektif meningkatkan kapasitas balok terhadap gaya geser, namun juga berpotensi mengubah distribusi internal gaya menjadi lebih terkonsentrasi pada daerah tekan diagonal, yang jika tidak dikendalikan dapat mendorong perilaku balok menuju mekanisme *deep beam*. Namun hasil pengamatan terhadap pola retak dan distribusi regangan menunjukkan bahwa hal tersebut tidak terjadi. Retak awal muncul di tengah bentang dan berkembang vertikal, yang merupakan ciri khas dari keruntuhan lentur. Retak diagonal yang muncul di zona geser bersifat terbatas dan tidak menunjukkan dominasi jalur tekan langsung dari beban ke tumpuan seperti pada *deep beam*.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa meskipun terjadi penambahan perkuatan pada BGS dan BGC, distribusi tegangan dan deformasi pada balok tetap terkendali dalam koridor perilaku balok biasa, bukan *deep beam*. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan desain dan perkuatan yang digunakan masih relevan untuk struktur balok lentur. Justru, penambahan lapisan beton geopolimer dan material CFRP memberikan kontribusi signifikan terhadap kapasitas struktural tanpa mengubah karakteristik mekanika dasar dari balok tersebut.

3.3.2 Proses Pembuatan Benda Uji Balok

Proses pembuatan benda uji balok beton, baik yang tanpa perkuatan maupun yang menggunakan perkuatan baja tulangan dan *CFRP string* serta penambahan tebal dimensi balok dengan beton geopolimer, merupakan proses yang membutuhkan perhatian khusus pada setiap tahap. Tahap awal adalah mensetting penulangan balok berdasarkan hasil desain dengan konfigurasi penulangan yang digunakan adalah tulangan tekan 2D13, tulangan tarik 3D19 dan tulangan geser $\phi 6-250$, seperti pada Gambar 3.21 proses setting tulangan balok tanpa perkuatan.

Proses selanjutnya adalah pembuatan bekisting, proses ini sangat penting dalam pembuatan balok beton, karena bekisting akan menentukan bentuk dan dimensi akhir dari balok. Untuk balok beton tanpa perkuatan, bekisting cukup dibuat sesuai dengan ukuran dan bentuk yang direncanakan. Namun, untuk balok beton dengan perkuatan, bekisting juga harus mempersiapkan alur atau *groove* untuk penempatan baja tulangan atau *CFRP string*, yang memerlukan ketelitian lebih, seperti pada Gambar 3.22. Setelah bekisting dipasang, dipastikan semua dimensi dan posisi bekisting benar agar proses pengecoran berjalan dengan baik dan balok beton yang dihasilkan sesuai dengan yang direncanakan.



Gambar 3.21. Setting penulangan balok tanpa perkuatan



Gambar 3.22. Bekisting balok

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton, mutu beton konvensional yang digunakan pada penelitian ini adalah 28 MPa. Material yang digunakan adalah beton ready mix sesuai volume kebutuhan, dan disiapkan alat vibrator untuk proses pemadatan. Sebelum pengecoran, bekisting diperiksa untuk memastikan kokoh, tidak bocor, dan bersih, sementara tulangan dicek posisinya sesuai gambar rencana dengan jarak dan selimut beton yang sesuai standar. Uji slump dilakukan untuk memverifikasi workability beton dan diperoleh nilai slump testnya adalah 12 cm, sesuai dengan yang direncanakan. Proses pelaksanaan pengecoran beton disajikan pada Gambar 3.23 dan hasil benda uji balok beton tanpa perkuatan (BN), setelah dibongkar bekistingnya disajikan pada Gambar 3.24



Gambar 3.23. Pelaksanaan pengecoran balok



Gambar 3.24. Hasil pengecoran balok tanpa perkuatan (BN)

Setelah proses pengecoran dan pembukaan bekisting, pembuatan benda uji balok beton perkuatan (BGS dan BGC) dilanjutkan beberapa tahapan tambahan untuk memastikan pemasangan elemen perkuatan berjalan sesuai dengan perencanaan. Langkah pertama adalah penyiapan alur (*grooves*), dimensi alur dalam metode *near surface mounted (NSM)* dirancang dengan mempertimbangkan dimensi tulangan, kebutuhan selimut beton, dan interaksi material untuk memastikan kinerja optimal sistem perkuatan. Lebar dan kedalaman alur adalah 1.5–2 kali diameter tulangan (Soudki and Alkhrdaji, 2005), dengan jarak antar alur adalah 75 mm. Proses pembuatan alur disajikan pada Gambar 3.25 dan pada Gambar 3.26 menunjukkan alur untuk benda uji balok perkuatan sudah siap untuk dipasang baja tulangan perkuatan atau *CFRP string*.



Gambar 3.25. Proses pembuatan alur pada balok perkuatan



Gambar 3.26. Alur untuk pemasangan baja tulangan perkuatan atau *CFRP string*

Pada balok perkuatan BGS, baja tulangan perkuatan yang digunakan adalah $\phi 6$, penggunaan tulangan polos pada penelitian ini dengan pertimbangan lebih mudah dilengkungkan dan dipasang, terutama dalam proyek rehabilitasi atau perkuatan struktur eksisting. Hal ini dapat menghemat waktu kerja di lapangan, terutama untuk struktur yang sulit diakses atau memerlukan perkuatan segera. Pada Gambar 3.27, menunjukkan pemasangan baja tulangan perkuatan pada benda uji balok BGS.



Gambar 3.27. Pemasangan baja tulangan perkuatan pada balok BGS

Pada balok perkuatan BGC, perkuatan geser dengan *CFRP String Sika Wrap FX* dan *Resin Sikadur 752* yang digunakan untuk mengaplikasikan *CFRP string* tersebut pada alur yang sudah disiapkan. Resin sikadur 752 terdiri dari dua komponen, yaitu komponen A dan komponen B, untuk mengaplikasikan resin tersebut digunakan rasio campuran 2:1 berdasarkan perbandingan volume (SIKA, 2016), proses pencampuran resin sikadur 752 disajikan pada Gambar 3.28. *CFRP string* yang dipasang pada setiap alur berdiameter 3,52 mm. Proses pemasangan *CFRP string* pada balok BGC disajikan pada Gambar 3.29. Setelah baja tulangan perkuatan dan *CFRP string* terpasang semuanya, maka alur tersebut kemudian diisi dengan *sika grout* supaya permukaan balok beton perkuatan kembali rata. Tahapan terakhir adalah pengecoran beton geopolimer pada sisi bawah balok beton konvensional. Permukaan beton konvensional yang akan berhubungan dengan beton geopolimer dibersihkan untuk memastikan adhesi optimal antara kedua

jenis beton. Beton geopolimer kemudian dicor secara bertahap dan dipadatkan untuk menghindari rongga udara. Setelah curing selesai, benda uji balok beton perkuatan BGC siap untuk diuji. Hasil akhir balok perkuatan setelah pemasangan tulangan perkuatan dan pengecoran beton geopolimer disajikan pada Gambar 3.28 sampai Gambar 3.30.



Gambar 3.28. Proses pencampuran resin sikadur 752



Gambar 3.29. Pemasangan tulangan perkuatan *CFRP string*



Gambar 3.30. Hasil pengecoran beton geopolimer pada balok beton perkuatan

3.3.3 Set Up Pengujian Balok

Pengujian balok lentur merupakan salah satu metode penting untuk mengevaluasi kekuatan dan perilaku struktural balok beton bertulang. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengetahui kapasitas lentur balok, distribusi tegangan, deformasi, dan pola retak akibat pembebanan lentur. Pengujian ini sangat relevan dalam studi terkait performa material inovatif seperti beton geopolimer dan perkuatan menggunakan *FRP* (*Fiber Reinforced Polymer*).

Peralatan yang digunakan dalam pengujian balok lentur di laboratorium meliputi beberapa instrumen penting untuk mendukung akurasi pengukuran, antara lain:

1. *Loading Test System*

Sistem yang digunakan untuk memberikan beban pada balok secara bertahap. Beban diterapkan secara monotonik menggunakan hydraulic jack dengan kontrol yang presisi.

2. *Load Cell*

Alat ini digunakan untuk mengukur gaya atau beban yang diberikan pada balok selama pengujian. *Load cell* ini dipasang pada titik penerapan beban agar data yang diperoleh akurat dan kapasitas *load cell* pada penelitian ini adalah 500 kN.

3. *LVDT (Linear Variable Displacement Transducer)*

LVDT yang dipasang pada penelitian ini adalah *LVDT* vertikal dan *LVDT* horizontal, dipasang 2 buah *LVDT* untuk masing-masing jenis. *LVDT* yang vertikal yang dipasang di tengah bentang pada balok untuk mengukur deformasi atau perpindahan vertikal pada balok yang diuji. Pemasangan *LVDT* dilakukan di bagian bawah balok untuk mengukur defleksi maksimum yang terjadi akibat pembebanan. Jumlah dan lokasi pemasangan *LVDT* disajikan pada Tabel 3.11.

4. *Strain Gauge*

Alat ini digunakan untuk mengukur regangan yang terjadi baik pada baja tulangan maupun pada beton. *Strain gauge* dipasang pada tulangan baja sebelum pengecoran beton, serta pada permukaan beton setelah balok mengeras, khususnya di sisi tekan balok. Pemasangan *strain gauge* besi (tipe YFLA-5 dengan *gauge length* = 5 mm dan *gauge resistance* = 120 Ω), *strain gauge* beton (tipe PL 60-11, panjang pengukur 60 mm dan *gauge resistance* = 120 Ω) untuk mendeteksi regangan yang terjadi. Jumlah dan lokasi pemasangan *strain gauge* disajikan pada Tabel 3.11.

5. Data Logger

Sistem perekaman data otomatis yang akan mencatat seluruh parameter pengujian, termasuk regangan, perpindahan, dan beban. *Data logger* ini terhubung dengan *strain gauge*, *LVDT*, dan *load cell* untuk mengumpulkan data selama pengujian berlangsung.

Tabel 3.11. Jumlah Kebutuhan *Strain gauge*, *LVDT*, dan *Load Cell*

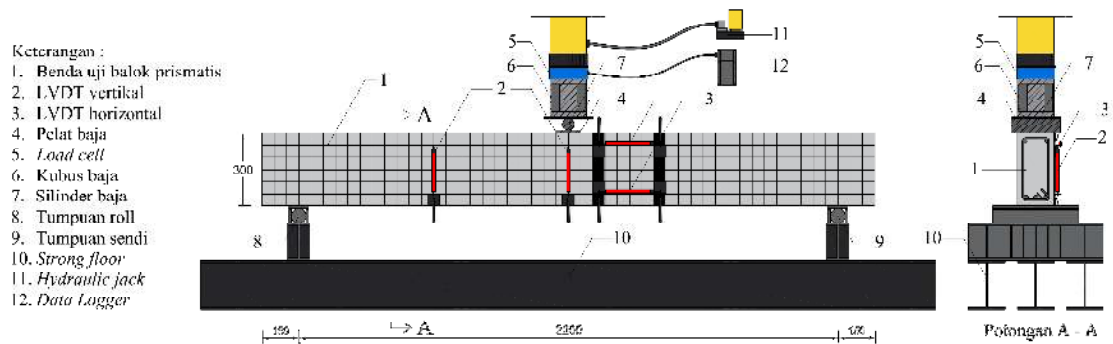
Kode Benda Uji	Jumlah <i>strain gauge</i>							<i>LVDT</i>	<i>Load cell</i>
	Tulangan Memanjang			Tulangan geser			Beton		
	Tarik	Tekan	Perkuatan	Eksisting	<i>CFRP String</i>	Baja tulangan			
BN	2	2		2			2	4	1
BGS	2	2	2	2		2	2	4	1
BGC	2	2	2	2	2		2	4	1

Pengujian balok dilakukan dengan memberikan beban terpusat pada balok yang ditempatkan secara horizontal di atas dua tumpuan. Beban lentur diterapkan di tengah bentang balok untuk mendapatkan distribusi momen lentur yang terbesar pada bagian tengah balok. Skema pembebanan ini disesuaikan dengan metode pengujian yang dianjurkan oleh standar pengujian struktural (ACI Committee 318, 2014). Dalam penelitian ini, metode pembebanan pada pengujian eksperimental dilakukan secara *load control*, dengan peningkatan beban bertahap sebesar 120 kN/s menggunakan *hydraulic jack*, sementara itu, pada pemodelan numerik menggunakan *software* DIANA. Pendekatan dengan *software* DIANA adalah *displacement control* untuk memperoleh kurva respon penuh dan stabil secara numerik. Pembebanan diberikan secara bertahap dengan *displacement increment* sebesar 0.1 mm per *step*, sehingga memungkinkan pemodelan perilaku nonlinier material, retak awal, leleh tulangan, hingga keruntuhan total secara lebih akurat dan konvergen

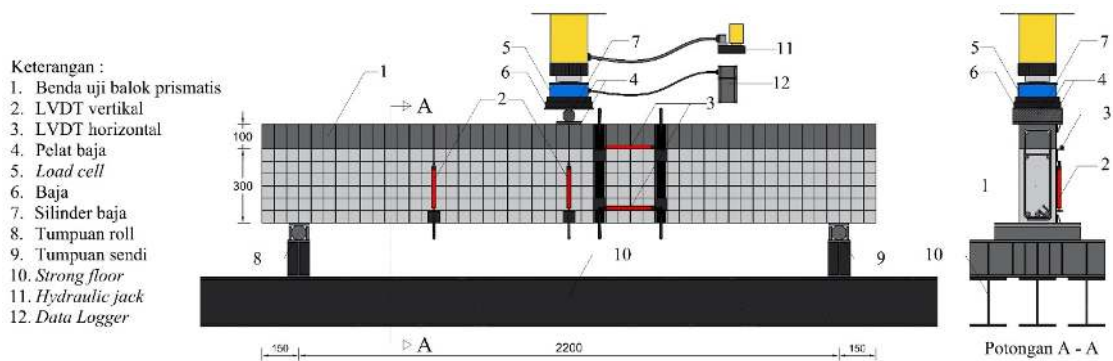
Proses pengujian dilakukan secara bertahap dengan peningkatan beban secara perlahan, dan data yang terkait dengan beban, defleksi, serta regangan pada balok dicatat secara otomatis oleh *data logger*. Beban diberikan hingga balok mengalami kegagalan lentur, dan selama proses pengujian, pola retak serta kegagalan pada balok diamati dan dicatat secara visual. Pemilihan beban terpusat di tengah bentang (*three-point bending*) dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan untuk melokalisasi gaya lentur dan

geser secara simultan pada satu titik, yaitu di tengah bentang balok. Meskipun pengujian *four-point bending* sering digunakan untuk menghasilkan zona momen konstan, namun dalam penelitian ini digunakan sistem pembebanan tiga titik secara sengaja agar konsentrasi tegangan lentur dan geser dapat terjadi secara bersamaan pada area yang terbatas. Pendekatan ini lebih merepresentasikan kondisi nyata di lapangan, khususnya pada zona tumpuan balok menerus, di mana konsentrasi tegangan seringkali terjadi akibat kombinasi momen negatif dan gaya geser.

Pelaksanaan pengujian balok dilakukan di Laboratorium Bahan Bangunan Jurusan Teknik Sipil Universitas Jenderal Soedirman. *Setting* pengujian balok tersebut disajikan pada Gambar 3.31 dan Gambar 3.32.



Gambar 3.31. *Setting* pengujian balok tanpa perkuatan



Gambar 3.32. *Setting* pengujian balok perkuatan

3.4 Pemodelan Balok

Pemodelan struktur menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis - FEA*) merupakan salah satu teknik yang sangat efektif dalam mengevaluasi perilaku struktur sebelum diuji secara fisik di laboratorium. Salah satu perangkat lunak yang populer digunakan untuk *FEA* adalah DIANA, yang mampu melakukan simulasi dan

analisis pada berbagai jenis struktur dengan tingkat akurasi yang tinggi. Pada penelitian ini, pemodelan balok dilakukan dengan menggunakan DIANA untuk memahami lebih lanjut perilaku balok yang diperkuat dengan beton geopolimer dan *FRP (Fiber Reinforced Polymer)*.

3.4.1 Perilaku Material

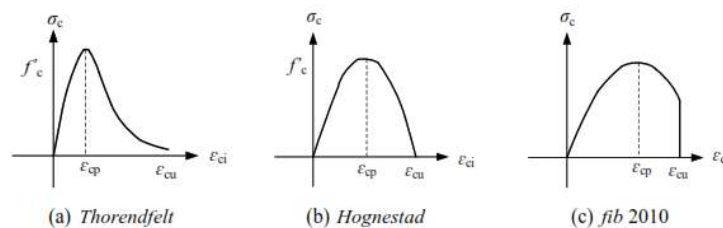
Perilaku material pada balok beton bertulang menjadi salah satu aspek penting dalam pemodelan FEA. Respons material terhadap pembebanan yang menghasilkan deformasi dinyatakan dalam hubungan tegangan-regangan. Perangkat lunak DIANA memungkinkan penginputan berbagai model tegangan-regangan yang mencerminkan perilaku material yang realistis selama proses pembebanan.

3.4.2 Perilaku Beton

Beton pada kondisi tekan dan tarik memiliki model tegangan-regangan yang berbeda, dan pemodelan ini penting untuk merepresentasikan perilaku sebenarnya dari beton. Dalam *FEA*, model tegangan-regangan beton dapat diperoleh dari hasil pengujian atau melalui persamaan matematis yang sering disebut sebagai model tegangan-regangan.

3.4.2.1 Model Tegangan -Regangan Tekan

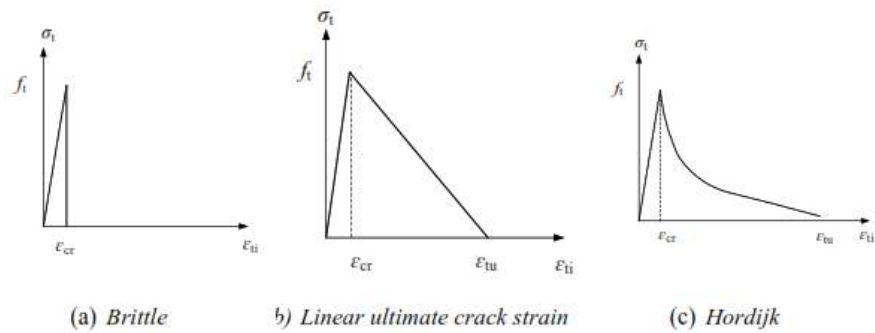
Terdapat beberapa model tegangan-regangan tekan beton yang umum digunakan dalam pemodelan, di antaranya adalah model Thorendfelt, Hognestad, dan fib 2010 yang masing-masing memberikan pendekatan yang berbeda dalam menentukan perilaku tekan beton. Gambar 3.33 menunjukkan berbagai model tegangan-regangan beton tekan yang dapat digunakan dalam perangkat lunak DIANA.



Gambar 3.33. Model Tegangan-regangan beton tekan

3.4.2.2 Model Tegangan -Regangan Tarik

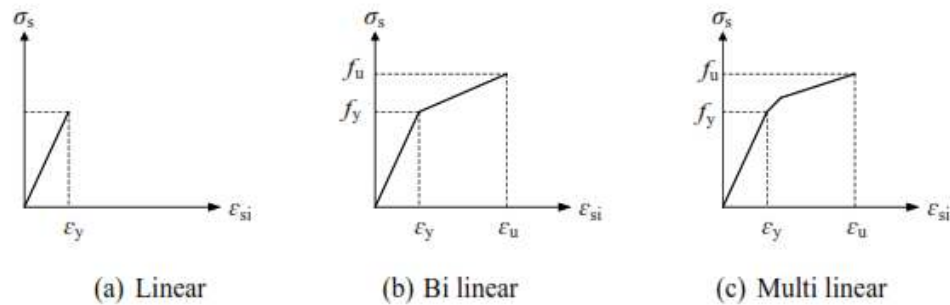
Pada kondisi tarik, beton cenderung rapuh dan mengalami retak pada regangan yang rendah. Model tegangan-regangan tarik beton yang umum digunakan meliputi model *brittle*, *linear ultimate crack strain*, dan *model Hordijk*. Gambar 3.34 menggambarkan hubungan tegangan-regangan tarik yang diimplementasikan dalam pemodelan .



Gambar 3.34. Tegangan-regangan Tarik beton

3.4.2.3 Perilaku Baja Tulangan

Baja tulangan dalam pemodelan FEA dimodelkan menggunakan kurva tegangan-regangan linier atau multi-linier. Perilaku elastis-plastis dari baja tulangan direpresentasikan dengan hubungan tegangan-regangan yang terdiri dari fase elastis dan fase plastis. Gambar 3.35 memperlihatkan model tegangan-regangan baja tulangan yang umum digunakan dalam pemodelan.



Gambar 3.35. Tegangan-regangan Baja Tulangan

3.4.2.4 Perilaku Interaksi antar dua elemen

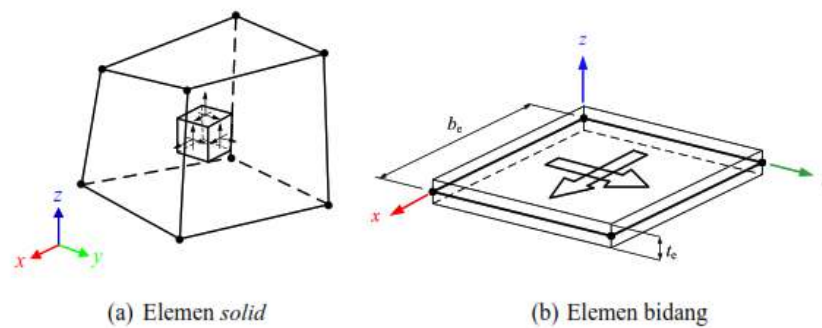
Dalam pemodelan struktur komposit seperti balok beton bertulang yang diperkuat dengan *FRP*, interaksi antar elemen sangat penting. Hubungan antara dua elemen seperti beton dengan baja tulangan dan beton dengan *FRP* didefinisikan melalui *interface*, yang dapat berupa:

1. *Embedded Interface*: tidak terjadi *slip* antara dua elemen yang berinteraksi.
2. *Bond Slip Interface*: terjadi *slip* atau perbedaan regangan antara elemen-elemen yang berinteraksi.

Hubungan antara tulangan baja dengan beton, *FRP* dengan beton, dan antara beton konvensional dengan beton geopolimer dimodelkan dengan menggunakan metode *embedded interface* untuk merepresentasikan perilaku yang realistis.

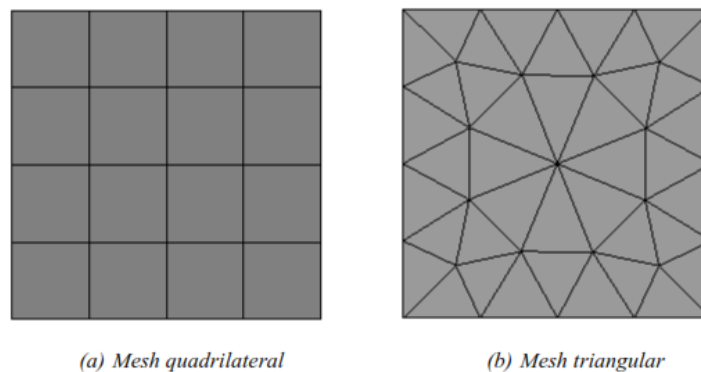
3.4.3 Elemen

Dalam perangkat lunak DIANA, pemodelan balok dapat dilakukan dengan menggunakan elemen bidang (*plane stress*) atau elemen *solid*. Elemen *solid* digunakan untuk pemodelan 3D, sedangkan elemen bidang digunakan untuk pemodelan 2D. Pada Gambar 3.36 menunjukkan perbedaan antara elemen solid dan elemen bidang.



Gambar 3.36. Tipe elemen solid dan elemen bidang dalam FEA

Pemilihan tipe dan ukuran mesh sangat penting untuk mendapatkan hasil simulasi yang akurat. *Mesh quadrilateral* lebih sering digunakan untuk bentuk yang teratur, sedangkan *mesh triangular* digunakan untuk bentuk yang tidak teratur. Gambar 3.37 memperlihatkan contoh tipe mesh yang digunakan dalam pemodelan FEA.



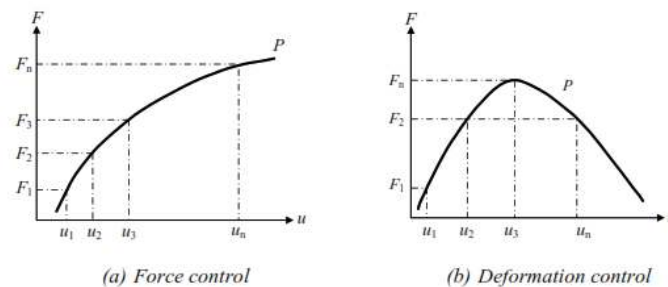
Gambar 3.37. Tipe *mesh quadrilateral* dan *mesh triangular* dalam FEA

3.4.4 Constraints dan Beban

Constraints atau kondisi batas menentukan elemen-elemen yang diasumsikan tidak mengalami perpindahan atau rotasi. Pembebanan pada model balok dalam perangkat lunak DIANA dapat berupa:

1. *Force Control*, beban diberikan berdasarkan kontrol gaya.
2. *Deformation Control*, beban diberikan berdasarkan kontrol deformasi.

Pada pengujian balok lentur, kedua tipe pembebanan ini diterapkan secara bertahap untuk memastikan hasil yang mendekati kondisi eksperimen di laboratorium. Gambar 3.38 menunjukkan ilustrasi tipe pembebanan yang digunakan dalam pemodelan *FEA*. Dalam penelitian ini, metode pembebanan pada pengujian eksperimental dilakukan secara *load control*, dengan peningkatan beban bertahap sebesar 120 kN/s menggunakan *hydraulic jack*, sebagaimana dijelaskan pada bagian *testing setup*. Sementara itu, pada pemodelan numerik menggunakan *software* DIANA, pendekatan yang digunakan adalah *displacement control* untuk memperoleh kurva respon penuh dan stabil secara numerik. Pembebanan diberikan secara bertahap dengan *displacement increment* sebesar 0.1 mm per *step*, sehingga memungkinkan pemodelan perilaku nonlinier material, retak awal, leleh tulangan, hingga keruntuhan total secara lebih akurat dan konvergen



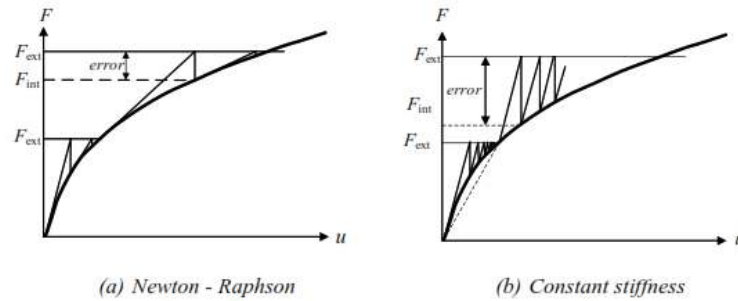
Gambar 3.38. Tipe pembebanan *Force Control* dan *Deformation Control* dalam FEA

3.4.5 Analisis

Perangkat lunak DIANA menyediakan analisis linier dan non-linier. Pada analisis linier, digunakan untuk deformasi kecil, sedangkan analisis non-linier lebih cocok untuk struktur yang mengalami deformasi besar atau mencapai keruntuhan. Dua metode yang dapat digunakan untuk mencapai konvergensi adalah:

1. *Newton-Raphson*, cepat namun tidak stabil.
2. *Constant Stiffness*, lebih stabil namun memerlukan waktu lebih lama.

Proses iterasi dilakukan hingga mencapai konvergensi, yang umumnya ditentukan berdasarkan kriteria deformasi, gaya, dan energi. Pada Gambar 3.39 menunjukkan ilustrasi proses iterasi pada metode *Newton-Raphson* dan *constant stiffness*.



Gambar 3.39. Iterasi dengan *Newton – Raphson* dan *constant stiffness*.