

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkuatan Geser Balok dengan *FRP*

Fiber Reinforced Polymer (FRP) telah menjadi salah satu material perkuatan yang paling populer dalam perbaikan dan rehabilitasi struktur beton bertulang. *FRP* merupakan komposit serat sintetik, seperti *glass*, *aramid*, atau *carbon*, yang diperkuat dengan matriks seperti epoksi atau poliester. *FRP* menawarkan berbagai keunggulan, termasuk kuat tarik yang tinggi, bobot yang ringan, ketahanan terhadap korosi, dan kemudahan instalasi, menjadikannya solusi yang ideal untuk perkuatan struktur (Committee, A.C.I., 2008). Berdasarkan jenis serat yang digunakan, *FRP* terbagi menjadi tiga kategori utama: *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*, *Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP)*, dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*. Setiap jenis *FRP* memiliki karakteristik mekanik yang berbeda, yang dapat dipilih berdasarkan kebutuhan perkuatan struktural.

Selain variasi jenis serat, *FRP* juga hadir dalam berbagai bentuk, termasuk *sheet* (lembaran), *rods* (batang), *strips*, *string*, dan *grid*, yang memberikan fleksibilitas dalam penerapan pada berbagai elemen struktur. Untuk perkuatan geser balok beton bertulang, bentuk *FRP* yang umum digunakan adalah *sheet*, yang diterapkan pada kedua sisi balok atau secara melingkar dengan metode perkuatan *U-wrap* atau *continuous wrap* (Belarbi and Acun, 2013). Metode lain yang juga efektif untuk perkuatan geser adalah penggunaan *FRP rods*, *strips*, atau *string*, yang diterapkan dengan metode *Near Surface Mounted (NSM)*, di mana *FRP* ditanamkan dalam alur yang dibuat pada permukaan balok (De Lorenzis and Teng, 2007).

Metode *External Bonded Reinforcement (EBR)* merupakan teknik yang paling umum digunakan untuk aplikasi *FRP*, di mana *FRP* direkatkan pada permukaan luar beton menggunakan epoksi. Meskipun *EBR* cukup efektif, metode ini sering mengalami kegagalan prematur akibat *debonding*, yaitu lepasnya ikatan antara *FRP* dan beton, yang menyebabkan kegagalan getas dan menurunkan efektivitas perkuatan (Kotynia et al., 2008). Beberapa studi, seperti yang dilakukan oleh Shomali *et al.*, (2020) dan Saribiyik *et al.*, (2020), telah mencoba mengoptimalkan kinerja *EBR* dengan mengubah orientasi

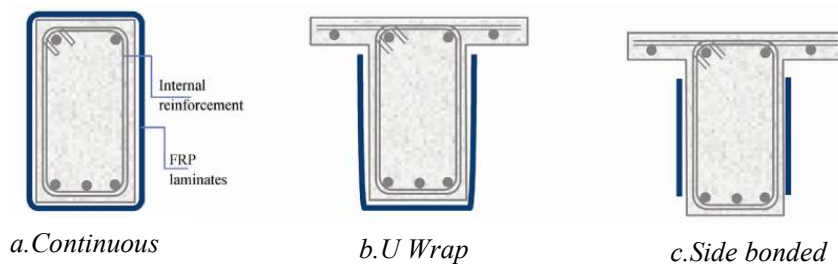
pemasangan *FRP*, seperti membuat sudut tertentu terhadap sumbu horizontal balok. Namun, masalah *debonding* tetap menjadi tantangan utama.

Untuk mengatasi kelemahan *EBR*, metode *Near Surface Mounted (NSM)* diperkenalkan. Pada metode ini, *FRP rods* atau *strips* ditanamkan ke dalam alur dangkal pada permukaan beton dan direkatkan dengan epoksi, yang secara signifikan meningkatkan luas bidang ikatan antara *FRP* dan beton. Penelitian yang dilakukan oleh (Ceroni, 2010) menunjukkan bahwa *NSM* lebih efektif daripada *EBR* karena *FRP* terikat lebih kuat pada beton, sehingga kekuatan tarik *FRP* dapat dioptimalkan, dan risiko *debonding* berkurang. Hasil studi ini didukung oleh De Lorenzis and Teng, (2007) yang menemukan bahwa *NSM* dapat meningkatkan kapasitas geser balok beton hingga 50% lebih tinggi dibandingkan metode *EBR*.

2.1.1 Perkuatan Geser Balok dengan *FRP Wrap*

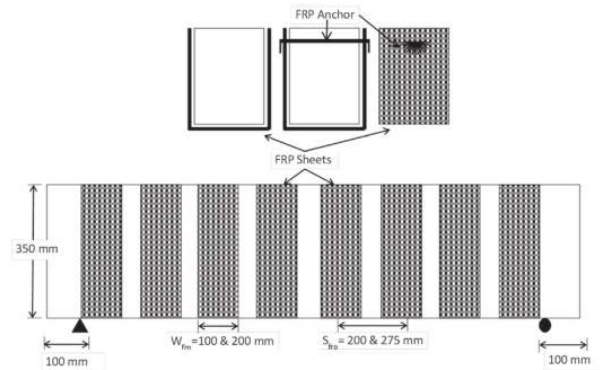
Fiber Reinforced Polymer (FRP) Wrap telah banyak digunakan dalam perkuatan geser balok beton bertulang karena sifatnya yang fleksibel dan mudah diaplikasikan dalam berbagai konfigurasi. Penggunaan *FRP wrap* memungkinkan perkuatan geser pada balok dengan cara yang lebih efektif dibandingkan metode tradisional, terutama pada lingkungan yang rentan terhadap korosi atau dalam situasi di mana akses untuk instalasi perkuatan sangat terbatas.

FRP wrap dapat dipasang dengan berbagai model perkuatan, termasuk *side bonded* (pemasangan pada kedua sisi samping balok), *U-wrap* (pemasangan pada tiga sisi balok), dan *continuous wrap* (pemasangan melingkar pada keempat sisi balok). Berdasarkan penelitian Belarbi and Acun, (2013) konfigurasi pemasangan *FRP* sangat mempengaruhi mode kegagalan yang terjadi. Pada model *side bonded* dan *U-wrap*, mode kegagalan yang paling umum adalah *debonding*, di mana *FRP* terlepas dari permukaan beton sebelum mencapai kapasitas maksimumnya. Sebaliknya, pemasangan *continuous wrap* mengurangi kemungkinan *debonding* dan mengalihkan kegagalan pada *FRP* itu sendiri, yang menunjukkan efisiensi perkuatan yang lebih tinggi, seperti pada Gambar 2.1.



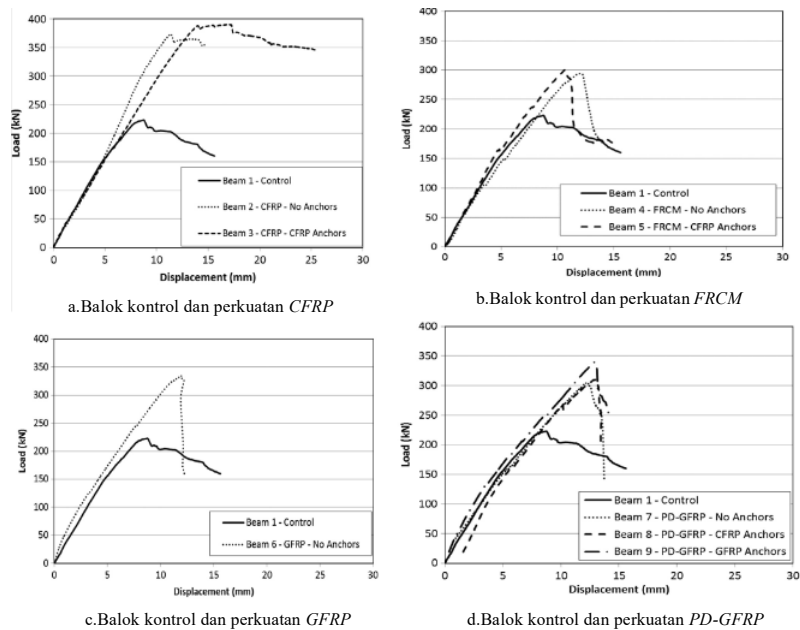
Gambar 2.1. Model pemasangan *FRP Wrap* (Belarbi and Acun, 2013)

Penggunaan *anchor FRP* dalam perkuatan geser juga telah diteliti oleh Baggio et al., (2014). Dalam penelitian tersebut, penggunaan *CFRP* dan *GFRP* dengan tambahan *anchor FRP* menunjukkan peningkatan kapasitas geser dan keuletan kegagalan yang signifikan. Konfigurasi dengan *anchor* membantu mengatasi masalah *debonding*, karena *anchor* meningkatkan daya tahan *FRP* pada titik-titik kritis. Pemasangan *anchor FRP* juga memungkinkan distribusi tegangan yang lebih merata sepanjang balok, mengurangi konsentrasi tegangan yang dapat menyebabkan kegagalan. Gambar 2.2 menunjukkan model *U Wrap* dan *Anchor* yang dilakukan oleh Baggio et al., (2014).



Gambar 2.2. Model perkuatan *U Wrap* dan *Anchor* (Baggio et al., 2014).

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Baggio et al., (2014) diperoleh grafik hubungan antara beban dan *displacement* untuk masing-masing kelompok benda uji, seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Grafik Hubungan antara beban dan *displacement* (Baggio et al., 2014)

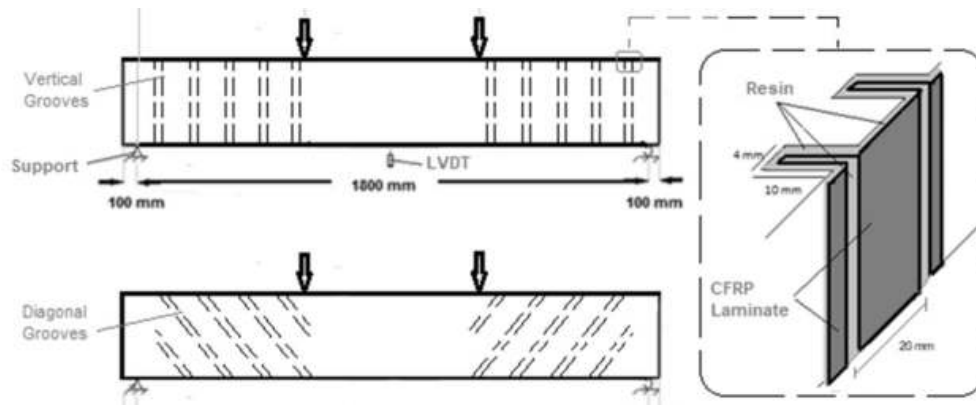
Berdasarkan grafik tersebut, dapat diketahui bahwa seluruh jenis balok perkuatan mengalami peningkatan beban *ultimate* (P_u) dan *displacement*nya, sedangkan Tabel 2.1 menyajikan data hasil peningkatan tersebut dan jenis keruntuhan yang terjadi.

Tabel 2.1. Hasil Pengujian Balok (Baggio et al., 2014).

No	Jenis Benda Uji	Beban <i>Ultimate</i> (kN)	Lendutan (mm)	Peningkatan (%)	Jenis keruntuhan
1	<i>Beam 1-control</i>	223	8.80	-	Geser
2	<i>Beam 2-CFRP-no anchors</i>	373	11.4	67.5	Lentur
3	<i>Beam 3- CFRP- anchors</i>	390	16.9	75.1	Lentur
4	<i>Beam 4- FRCM-no anchors</i>	294	12.0	12.0	Geser
5	<i>Beam 5- FRCM- anchors</i>	300	10.7	34.7	Geser
6	<i>Beam 6- GFRP-no anchors</i>	334	13.7	50.1	Geser-debonding
7	<i>Beam 7- PD-GFRP-no anchors</i>	305	12.0	36.8	Geser-debonding
8	<i>Beam 8- PD-GFRP-C anchors</i>	310	14.2	39.2	Geser-tekan
9	<i>Beam 9- PD-GFRP-G anchors</i>	339	13.7	52.2	Geser-tekan

Selain metode pemasangan tradisional, penelitian oleh Shomali et al., (2020) mengeksplorasi penggunaan *Externally Bonded Reinforcement in Groove (EBRIG)* sebagai inovasi dalam perkuatan geser. Metode ini melibatkan pembuatan alur pada permukaan beton untuk menanam sebagian *FRP wrap*, yang kemudian berfungsi sebagai

anchor alami. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok yang diperkuat dengan model *EBRIG* mengalami peningkatan kapasitas geser yang lebih baik dibandingkan metode perkuatan *externally bonded reinforcement (EBR)* konvensional. Selain itu, penggunaan alur diagonal dalam pemasangan *EBRIG* terbukti lebih efektif dibandingkan dengan alur vertikal, karena dapat menahan deformasi yang lebih baik dan meningkatkan daya rekat *FRP* dengan beton. Tidak ada kegagalan *debonding* yang dilaporkan dalam metode ini, yang menjadikannya salah satu solusi yang menjanjikan untuk perkuatan geser, seperti pada Gambar 2.4.

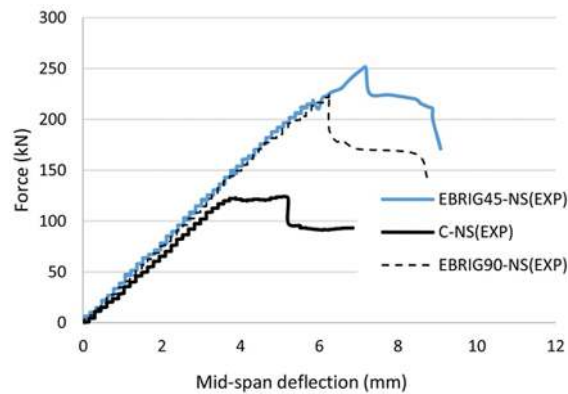


Gambar 2.4. Model perkuatan *Side Bonded* dengan metode *EBRIG* (Shomali et al., 2020)

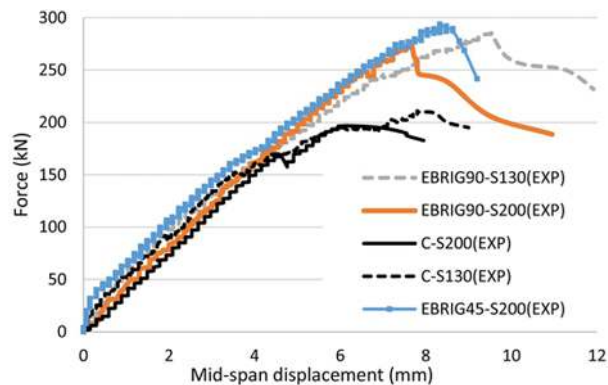
Pada penelitian ini dibuat delapan benda uji balok persegi panjang dengan dimensi 200 x 300 x 2000 mm, benda uji tersebut dibuat menjadi 2 kelompok dan memenuhi persyaratan *code ACI 318-14* untuk menjamin kerusakan geser (Soudki and Alkhrdaji, 2005). Berdasarkan hasil penelitian tersebut diperoleh diagram *load deflection* pada tengah bentang pada kelompok benda uji 1 dan kelompok benda uji 2 seperti pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6, sedangkan pada Tabel 2.2 menyajikan nilai kapasitas geser, lendutan maksimum, daktilitas dan jenis kerusakan yang terjadi.

Tabel 2.2. Hasil Pengujian Balok (Shomali et al., 2020)

No	Kode Benda uji	Kapasitas Geser	Lendutan Maksimum	Daktilitas	Jenis kerusakan
1	C-NS	128	5.1	2.2	Shear failure
	EBRIG90-NS	219	6.1	1.9	CFRP rupture
	EBRIG45-NS	250	7.4	2.1	CFRP rupture
2	C-S130	212	8.0	2.3	Shear failure
	C-S200	181	5.6	1.7	Shear failure
	EBRIG90-S130	280	9.5	2.4	CFRP rupture
	EBRIG90-S200	260	7.8	2.0	CFRP rupture
	EBRIG45-S200	290	9.0	1.9	CFRP rupture



Gambar 2.5. Diagram *Load Deflection* Kelompok Benda Uji 1(Shomali et al., 2020)



Gambar 2.6. Diagram *Load Deflection* Kelompok Benda Uji 2 (Shomali et al., 2020)

Penelitian yang dilakukan oleh Moradi et al., (2020) mengeksplorasi tujuh konfigurasi berbeda pemasangan *CFRP wrap*, termasuk pemasangan eksternal dan *embedded* (ditanam sebagian dalam beton). Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok yang diperkuat dengan *CFRP wrap* yang ditanam dalam beton memiliki kinerja yang sama atau lebih baik dibandingkan dengan balok yang diperkuat secara eksternal. Hal ini menunjukkan bahwa metode *embedded* dapat menjadi alternatif yang efektif untuk mengatasi masalah *debonding* pada metode *side bonded*. Dalam penelitian tersebut, konfigurasi perkuatan dengan FRP tertanam berbentuk T (model INO) memberikan kapasitas geser tertinggi, menunjukkan bahwa konfigurasi geometri pemasangan *CFRP* pada benda uji dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kekuatan geser, seperti Gambar 2.7.



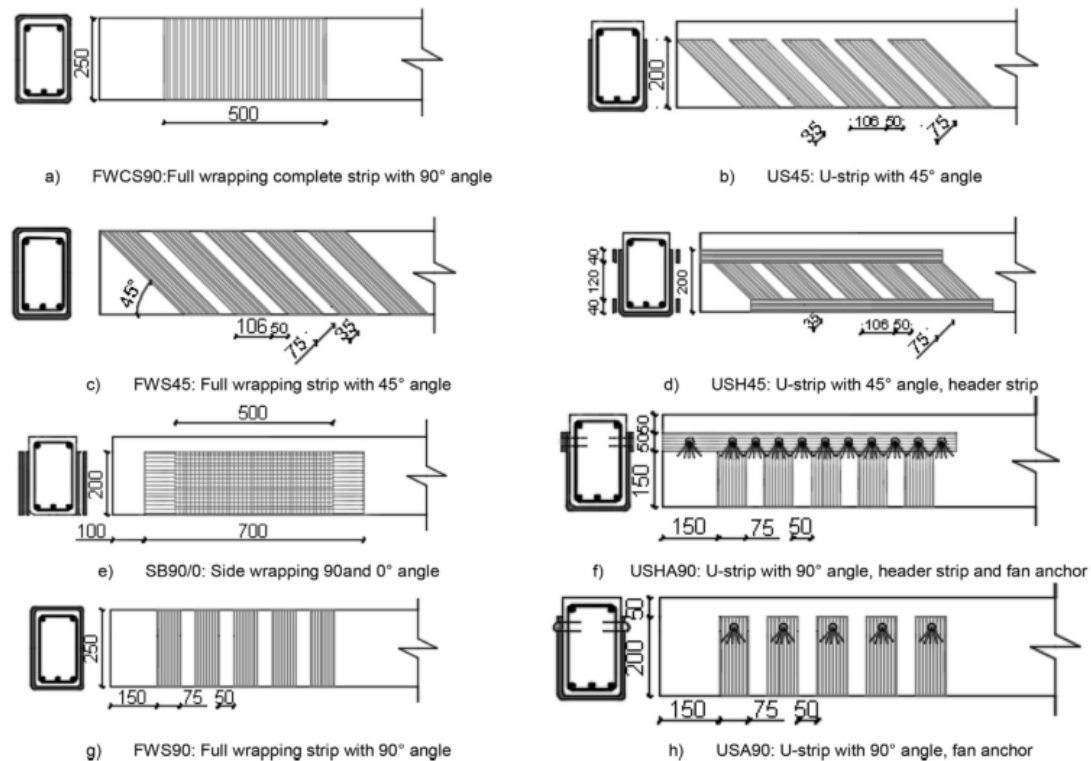
Gambar 2.7. Konfigurasi model benda uji perkuatan geser (Moradi et al., 2020)

Dalam perkuatan elemen beton bertulang terhadap gaya geser, penggunaan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* menjadi salah satu metode yang efektif dan umum digunakan. Pedoman ACI 440.2R memberikan pendekatan analitis untuk menghitung kontribusi *FRP* terhadap kapasitas geser total elemen beton bertulang. Kapasitas geser yang diperoleh merupakan hasil kontribusi dari beton, tulangan geser internal, dan material *FRP* itu sendiri.

2.1.2 Perkuatan Geser Balok dengan *FRP Strips*

Penelitian oleh Saribiyik et al., (2020) mengkaji perkuatan geser dengan *FRP strips*, dengan menggunakan delapan konfigurasi pemasangan *FRP* dan satu balok kontrol tanpa perkuatan. Dalam penelitian tersebut, komposit *Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP)* digunakan sebagai material utama, yang dipilih karena sifatnya yang unggul dalam kekuatan tarik dan ketahanan terhadap suhu tinggi, serta ketersediaannya yang lebih ekonomis dibandingkan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*. Gambar

2.8 menyajikan konfigurasi pemasangan *FRP strips* yang dilakukan oleh Saribiyik et al., (2020).



Gambar 2.8. Konfigurasi perkuatan dengan *FRP strip* (Saribiyik et al., 2020)

Berdasarkan hasil eksperimen, kapasitas geser balok yang diperkuat dengan *FRP strips* menunjukkan peningkatan yang signifikan, antara 43% hingga 100% dibandingkan balok kontrol. Konfigurasi *FRP strips* yang dipasang penuh pada permukaan balok memberikan hasil yang paling optimal, dengan peningkatan kapasitas geser maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa luas bidang kontak antara *FRP* dan permukaan beton berperan penting dalam meningkatkan efektivitas perkuatan geser. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa semakin luas kontak *FRP* dengan beton, semakin besar kontribusi *FRP* dalam menahan gaya geser (De Lorenzis and Teng, 2007); (Kotynia et al., 2008).

Studi yang dilakukan oleh Saribiyik et al., (2020) menunjukkan bahwa mode kegagalan yang terjadi pada balok yang diperkuat *FRP strips* bervariasi tergantung pada konfigurasi pemasangan. Pada konfigurasi pemasangan penuh (*fully wrapped*), mode kegagalan terjadi pada material *FRP* itu sendiri, yang menunjukkan bahwa perkuatan

tersebut berhasil meningkatkan kapasitas geser hingga mencapai batas kekuatan material *FRP*. Sebaliknya, pada konfigurasi parsial (pemasangan sebagian pada sisi balok), kegagalan cenderung terjadi akibat *debonding*, yaitu lepasnya ikatan antara *FRP* dan beton, yang menyebabkan kegagalan prematur sebelum kapasitas maksimal tercapai. Kegagalan *debonding* ini terutama disebabkan oleh konsentrasi tegangan yang tinggi pada ujung *FRP strips*, yang melemahkan daya rekat epoksi.

Penelitian Altin et al., (2010) juga mendukung temuan ini, dengan menekankan bahwa *anchor* atau metode pengikatan tambahan dapat membantu mengurangi risiko *debonding* pada konfigurasi parsial, sehingga memperpanjang umur perkuatan dan meningkatkan kapasitas geser. Penambahan *anchor FRP* memberikan distribusi tegangan yang lebih merata, terutama pada titik kritis seperti ujung *FRP strips*, di mana tegangan geser terkonsentrasi.

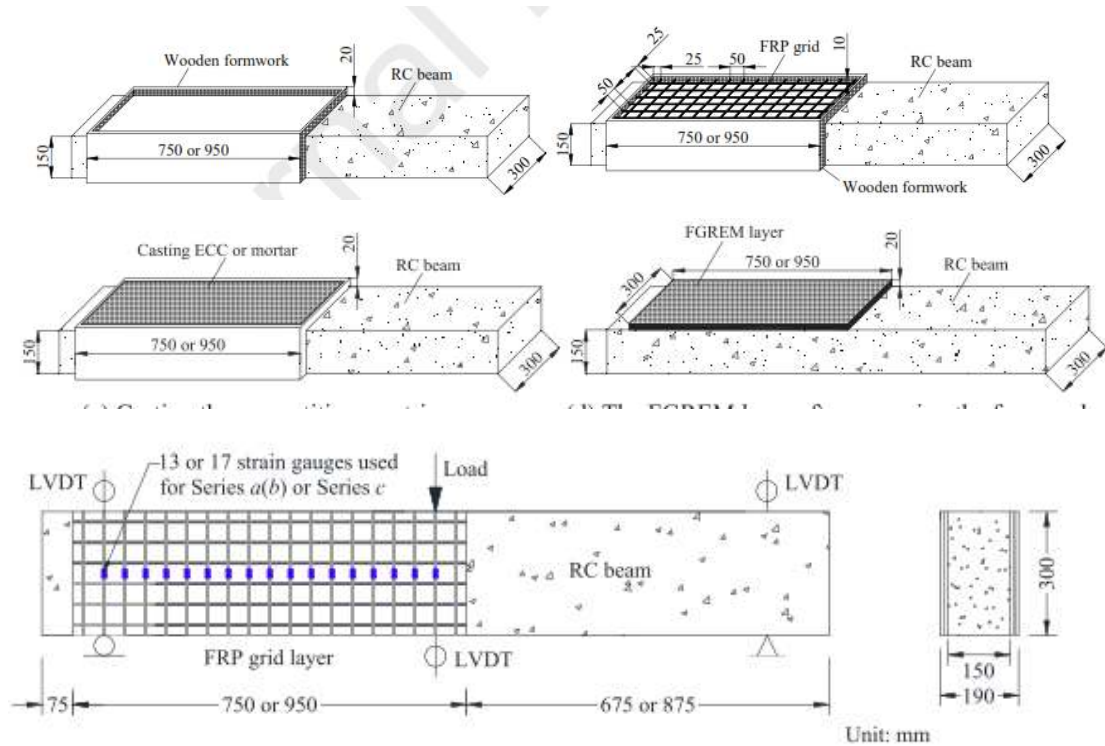
Selain konfigurasi pemasangan, metode pemasangan *FRP strips* juga menjadi faktor penting dalam meningkatkan efektivitas perkuatan geser. Konfigurasi *embedded* juga terbukti meningkatkan ketahanan struktur terhadap deformasi lateral, yang sering menjadi penyebab utama kegagalan geser pada balok yang diperkuat dengan *FRP* secara eksternal. Penelitian oleh Zhou et al., (2020) mendukung temuan ini, dengan menunjukkan bahwa metode *embedded* mengurangi konsentrasi tegangan pada titik-titik kritis dan meningkatkan kapasitas geser hingga 150% dibandingkan metode eksternal.

2.1.3 Perkuatan Geser Balok dengan *FRP Grid*

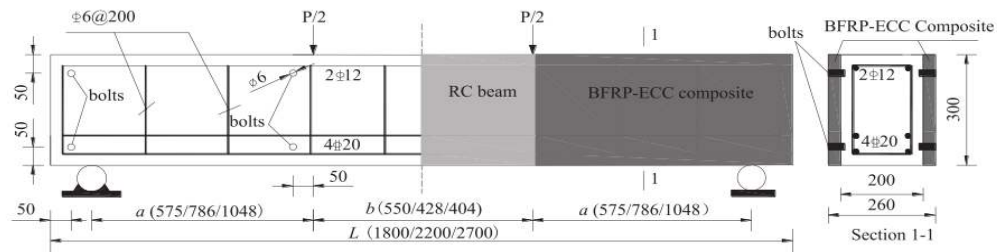
Penggunaan *Fiber Reinforced Polymer (FRP) grid* dalam perkuatan geser balok beton bertulang telah menjadi topik penelitian yang menarik perhatian dalam beberapa tahun terakhir, terutama karena sifat unik *grid* yang dapat memberikan distribusi tegangan yang lebih merata dibandingkan *FRP* lembaran atau *strip*. *FRP grid* adalah material komposit yang tersusun dari jaringan serat yang saling berpotongan dan material sering digunakan adalah *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* atau *Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP)*. *FRP grid* ini sering digunakan pada kombinasi dengan bahan pengikat seperti *engineered cementitious composites (ECC)* atau *polymer modified mortar (PMM)* untuk meningkatkan kapasitas geser dan mengatasi kelemahan umum pada metode perkuatan konvensional.

Penelitian oleh Yang et al., (2020) mengeksplorasi dua variasi utama dalam perkuatan geser balok menggunakan *FRP grid*, yaitu variasi jenis material *FRP* (*CFRP* dan *BFRP*) dan variasi bahan pengikat (*ECC* dan *PMM*). Penggunaan bahan pengikat ini merupakan alternatif resin epoksi yang umumnya digunakan sebagai perekat *FRP*. Resin epoksi memiliki kelemahan seperti sensitivitas terhadap panas (api) dan kelembapan, sehingga penggunaan bahan pengikat berbasis semen dan polimer seperti *ECC* dan *PMM* dapat memberikan solusi yang lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Dari penelitian tersebut, diketahui bahwa perkuatan geser menggunakan *FRP grid* dapat meningkatkan kapasitas geser balok hingga 51% sampai 160,9%, tergantung pada kombinasi material dan metode pemasangan yang digunakan. Namun, karena biaya *BFRP* lebih rendah dibandingkan *CFRP*, kombinasi *BFRP* dan *PMM* masih menjadi pilihan yang layak dari segi ekonomi, terutama untuk aplikasi pada proyek dengan anggaran terbatas (Zhou et al., 2020).

Keunggulan utama dari *FRP grid* dibandingkan dengan *FRP* lembaran atau *strip* adalah kemampuannya untuk mendistribusikan tegangan dengan lebih merata pada permukaan beton. Jaringan serat yang berpotongan menciptakan jalur distribusi gaya yang lebih efektif, sehingga meningkatkan kemampuan balok beton untuk menahan gaya geser yang lebih besar. Selain itu, *FRP grid* juga lebih fleksibel dalam aplikasi karena dapat dipasang dengan berbagai orientasi dan konfigurasi sesuai kebutuhan spesifik elemen struktur (Zheng et al., 2020). Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa konfigurasi dan metode pemasangan *FRP grid* memainkan peran penting dalam menentukan efektivitas perkuatan. Menurut Yang et al., (2020) dan Zheng et al., (2020) meneliti berbagai konfigurasi pemasangan *FRP grid*, termasuk pemasangan pada kedua sisi balok, pemasangan melingkar (*continuous*), dan kombinasi *grid* dengan *anchor*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan *continuous wrap* dengan *FRP grid* memberikan distribusi tegangan yang lebih baik, yang pada akhirnya meningkatkan kapasitas geser balok secara signifikan. *Anchor* yang digunakan pada beberapa konfigurasi juga membantu meningkatkan daya tahan ikatan antara *FRP grid* dan permukaan beton, yang mengurangi risiko *debonding* atau kegagalan prematur pada titik kritis. Model benda uji perkuatan yang dilakukan oleh (Yang et al., 2020) disajikan pada Gambar 2.8, sedangkan model benda uji dari (Zheng et al., 2020) disajikan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Model perkuatan Geser dengan *FRP Grid* (Yang et al., 2020)



Gambar 2.10. Model perkuatan Geser dengan *BFRP Grid* dan *Bolt* (Zheng et al., 2020)

Tabel 2.3 menyajikan ringkasan penelitian terdahulu yang membahas penggunaan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* dalam perkuatan geser pada elemen struktur beton, khususnya balok. Setiap penelitian diklasifikasikan berdasarkan jenis benda uji yang digunakan (balok persegi atau balok T), jenis bahan *FRP* (*CFRP*, *GFRP* atau *BFRP*), bentuk *FRP* (*sheet*, *grid*, *string* atau *strip*), model perkuatan (*side bonded*, *U-wrap*, *continuous* atau gabungan), teknik pemasangan (*Externally Bonded Reinforcement/EBR*, *Near-Surface Mounted/NSM*, atau kombinasi), serta mode keruntuhan yang terjadi (*concrete crushing*, *FRP failure* atau *debonding*).

Tabel 2.3. Penelitian terdahulu tentang FRP yang digunakan untuk perkuatan geser

No	Peneliti	Benda Uji		Bahan FRP			Bentuk FRP				Model Perkuatan				Teknik Pemasangan			Mode Keruntuhan		
		Balok Persegi	Balok T	CFRP	GFRP	BFRP	Sheet	Grid	String	Strip	Side Bonded	U Wrap	Continuous	Gabungan	EBR	NSM	Kombinasi	Concrete Crushing	FRP Failure	Debonding
1	(Täljsten, 2003)																			
2	(Bousselham and Chaallal, 2008)																			
3	(Siddiqui, 2009)																			
4	(Sundarraja and Rajamohan, 2009)																			
5	(Altin et al., 2010)																			
6	(A. et al., 2010)																			
7	(Bukhari et al., 2010)																			
8	(Nikopour and Nehdi, 2011)																			
9	(Amir et al., 2012)																			
10	(Ferreira et al., 2013)																			
11	(Belarbi and Acun, 2013)																			
12	(Baggio et al., 2014a)																			
13	(Li, 2016)																			
14	(Chen et al., 2016)																			
15	(Azam et al., 2017)																			
16	(Gonzalez-Libreros et al., 2017)																			
17	(Akroush et al., 2017)																			
18	(Mhanna et al., 2019)																			
19	(Spinella et al., 2019)																			
20	(Sayed, 2020)																			
21	(Zheng et al., 2020)																			
22	(Shomali et al., 2020)																			
23	(Zhou et al., 2020)																			
24	(Saribiyik et al., 2021)																			
25	(Guo et al., 2021)																			

Berdasarkan data pada tabel tersebut, dapat diketahui bahwa *CFRP* merupakan bahan *FRP* yang paling banyak digunakan dalam penelitian. Bentuk *FRP sheet* juga paling banyak digunakan, sedangkan *FRP* jenis *string* yang paling jarang digunakan untuk perkuatan geser. Teknik pemasangan yang paling sering dilakukan adalah *FRP* diaplikasikan langsung pada permukaan balok beton atau menggunakan teknik *EBR*. Kelemahan dari aplikasi perkuatan *FRP* dengan *EBR* adalah masih terjadi *debonding*, sehingga *FRP* tidak bekerja maksimal. Berdasarkan kondisi tersebut, maka diperlukan pengembangan penelitian *FRP* jenis *string* dan menggunakan teknik pemasangan *NSM* untuk mengatasi kemungkinan terjadinya *debonding*.

2.2 Penelitian Beton Geopolimer

Geopolimer adalah material yang dihasilkan dari polimerisasi material aluminosilikat seperti *fly ash*, metakaolin, slag, dan berbagai limbah industri, yang diaktivasi dengan larutan basa seperti *natrium hidroksida* (NaOH) dan *natrium silikat* (Na₂SiO₃). Material ini telah muncul sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan *Ordinary Portland Cement (OPC)* karena proses produksinya

menghasilkan lebih sedikit emisi karbon dan memanfaatkan material limbah yang berlimpah.

Penelitian awal yang dilakukan oleh Duxson et al., (2007) menunjukkan bahwa efisiensi proses pembuatan geopolimer sangat dipengaruhi oleh jenis material aluminosilikat yang digunakan dan komposisi larutan aktivatornya. Karena faktor ini, banyak penelitian yang kemudian berfokus pada optimasi bahan dasar dan larutan aktivator untuk menghasilkan beton geopolimer dengan sifat mekanik dan durabilitas yang lebih baik.

2.2.1 Alkali Aktifator

Dalam pembuatan beton geopolimer, alkali aktivator berperan penting sebagai katalis dalam proses geopolimerisasi yang menggantikan peran air dalam beton konvensional. Aktivator alkali terdiri dari kombinasi antara natrium hidroksida (NaOH) dengan natrium silikat (Na_2SiO_3) atau kalium hidroksida (KOH) dengan kalium silikat (K_2SiO_3) (Davidovits, 2008). Aktivator alkali membantu dalam memecah struktur material aluminosilikat, seperti *fly ash* atau metakaolin, untuk membentuk gel aluminosilikat yang berkontribusi terhadap kekuatan mekanik dan durabilitas beton geopolimer.

Menurut Hardjito and Rangan, (2005), natrium hidroksida (NaOH) lebih efektif sebagai aktivator alkali dibandingkan kalium hidroksida (KOH) dalam proses pembuatan geopolimer. NaOH lebih banyak digunakan karena beberapa alasan: harganya yang lebih murah, viskositasnya yang rendah, dan ketersediaannya yang melimpah. Penelitian oleh Zuhua et al., (2009) menegaskan bahwa konsentrasi NaOH sangat mempengaruhi proses pembentukan mikrostruktur geopolimer. Pada molaritas NaOH yang lebih tinggi (sekitar 10-14 M), proses pelarutan silika dan alumina dari *fly ash* berlangsung lebih cepat, yang menghasilkan pembentukan gel aluminosilikat yang lebih padat. Namun, penelitian ini juga menemukan bahwa molaritas yang terlalu tinggi dapat menurunkan workabilitas dan meningkatkan porositas, yang berdampak negatif pada durabilitas jangka panjang.

Penelitian oleh Ekaputri, (2013) menunjukkan bahwa peningkatan rasio Na_2SiO_3 terhadap NaOH tidak selalu menghasilkan peningkatan kuat tekan. Dalam penelitiannya, ditemukan bahwa pada rasio tertentu, penambahan natrium silikat malah bisa menurunkan kuat tekan karena menyebabkan pengerasan yang terlalu cepat dan

meningkatkan porositas pada struktur mikro beton. Oleh karena itu, penting untuk menemukan keseimbangan optimal antara NaOH dan Na₂SiO₃ dalam campuran geopolimer untuk mendapatkan kekuatan tekan dan durabilitas yang optimal.

Penelitian lebih lanjut oleh Ekaputri, (2013); Loekito and Wardhono, (2018) mengungkapkan bahwa molaritas NaOH optimal berkisar antara 8 hingga 12 M untuk memastikan pelarutan yang efisien tanpa menyebabkan peningkatan porositas yang signifikan. Penelitian tersebut juga menemukan bahwa kombinasi NaOH dengan natrium silikat pada rasio 2,5:1 menghasilkan kekuatan tekan dan durabilitas terbaik, terutama pada campuran yang mengandung *fly ash* berkalium tinggi.

2.2.2 Penelitian Mikrostruktur Beton Geopolimer

Penelitian mengenai mikrostruktur beton geopolimer memberikan wawasan mendalam tentang bagaimana struktur material terbentuk pada skala mikroskopis dan bagaimana hal itu mempengaruhi kinerja makroskopis seperti kekuatan mekanik, durabilitas, dan ketahanan terhadap lingkungan agresif. Dengan memahami interaksi antara bahan dasar, aktivator, dan kondisi curing, untuk lebih mengoptimalkan penggunaan geopolimer sebagai material konstruksi yang berkelanjutan dan tahan lama.

Beberapa teknik karakterisasi mikrostruktur yang sering digunakan dalam penelitian beton geopolimer meliputi *Scanning Electron Microscopy (SEM)*, *Energy Dispersive X-Ray (EDS)*, dan *X-Ray Diffraction (XRD)*. Penelitian *Scanning Electron Microscopy (SEM)*, digunakan untuk mengamati morfologi beton geopolimer pada skala mikroskopis. *SEM* memberikan gambar rinci tentang struktur pori, densitas material, dan kepadatan mikrostruktur. Pengamatan *SEM* menunjukkan bahwa mikrostruktur beton geopolimer cenderung lebih padat dibandingkan dengan beton berbasis *OPC*, yang berkontribusi langsung pada peningkatan durabilitas dan kekuatan tekan (Al-majidi et al., 2016).

Penelitian *Energy Dispersive X-Ray (EDS)*, digunakan untuk menganalisis komposisi kimia dari material geopolimer, termasuk identifikasi unsur-unsur seperti silika (Si), alumina (Al), kalsium (Ca), dan natrium (Na) yang merupakan komponen penting dalam pembentukan gel aluminosilikat. Kombinasi antara *fly ash* berkalsium tinggi dan natrium hidroksida sebagai aktivator menghasilkan peningkatan pembentukan gel C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) dan N-A-S-H (*Sodium Aluminosilicate Hydrate*), yang memperkuat material (Duxson et al., 2007).

Penelitian *X-Ray Diffraction (XRD)* memungkinkan identifikasi fase kristal yang terbentuk selama proses polimerisasi dalam beton geopolimer. Hasil *XRD* menunjukkan bahwa fase kristal zeolit dan quartz dapat ditemukan pada beton geopolimer berbasis *fly ash*, yang berperan penting dalam peningkatan kekuatan material dan stabilitas jangka Panjang (Bernal et al., 2013).

2.2.3 Durabilitas Beton Geopolimer

Durabilitas adalah salah satu aspek terpenting yang menjadi fokus dalam penelitian beton geopolimer, terutama dalam kaitannya dengan kinerja material ini di bawah kondisi lingkungan yang agresif. Lingkungan seperti paparan sulfat, karbonasi, siklus pembekuan-pencairan, dan paparan klorida merupakan tantangan utama dalam banyak aplikasi teknik sipil, terutama di infrastruktur pesisir dan perkotaan. Penelitian oleh Pasupathy et al., (2017) mengungkapkan bahwa beton geopolimer memiliki penyusutan yang lebih rendah dan kekuatan awal yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton berbasis *Ordinary Portland Cement (OPC)*. Kondisi ini membuat beton geopolimer ideal untuk digunakan di wilayah dengan lingkungan ekstrem, di mana penyusutan yang rendah dan ketahanan terhadap lingkungan agresif sangat penting.

Salah satu tantangan yang sering dihadapi oleh struktur beton di lingkungan agresif adalah serangan sulfat. Beton geopolimer telah terbukti memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap serangan sulfat dibandingkan dengan beton berbasis *OPC*. Hal ini disebabkan oleh komposisi kimia geopolimer yang menghasilkan gel aluminosilikat yang lebih tahan terhadap pengaruh korosif dari sulfat. Penelitian oleh Kumaravel and Girija, (2013) melaporkan bahwa geopolimer berbasis *fly ash*, terutama dengan kandungan kalsium yang tinggi, menunjukkan resistensi yang sangat baik terhadap sulfat, sedangkan Yang et al., (2022) juga mengkonfirmasi bahwa struktur mikro yang dihasilkan dari reaksi antara aluminosilikat dan aktivator alkali menghasilkan fase yang lebih tahan terhadap intrusi sulfat. Selain itu, menurut Jiao et al., (2023) mencatat bahwa penggunaan *fly ash* dengan kandungan tipe C yang lebih tinggi menghasilkan waktu setting awal dan akhir yang lebih cepat serta kuat tekan yang lebih tinggi.

Beton geopolimer berbasis *fly ash* juga menunjukkan ketahanan yang sangat baik terhadap karbonasi, yang merupakan proses di mana karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer meresap ke dalam pori-pori beton dan menurunkan pH, mempercepat korosi tulangan baja.

Penelitian oleh Karthik et al., (2017) menunjukkan bahwa karbonasi pada beton geopolimer lebih lambat dibandingkan beton konvensional, terutama pada campuran dengan *fly ash* berkalsium tinggi. Ini menjadikannya solusi yang sangat baik untuk bangunan di area perkotaan dengan paparan CO₂ tinggi.

Penelitian yang dilakukan oleh Mehta and Siddique, (2017b) melaporkan bahwa beton geopolimer memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap penetrasi klorida, yang merupakan faktor utama dalam korosi tulangan pada beton yang terpapar air asin, terutama di lingkungan pesisir. Klorida dapat meresap ke dalam beton dan menurunkan resistansi terhadap korosi, yang menjadi masalah besar pada struktur beton bertulang di daerah pantai. Beton geopolimer, dengan porositas yang lebih rendah dan fase aluminosilikat yang stabil, secara efektif menahan penetrasi ion klorida, mengurangi risiko korosi pada tulangan baja. Penelitian oleh Verma et al., (2020), menegaskan bahwa beton geopolimer dengan campuran slag dan *fly ash* menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap klorida dibandingkan dengan beton *OPC*, terutama dalam lingkungan dengan paparan air laut. Hal ini membuat geopolimer menjadi solusi yang menarik untuk struktur pelabuhan, jembatan, dan bangunan pesisir.

2.2.4 Sifat Mekanik Beton Geopolimer

Kekuatan mekanik beton geopolimer telah menjadi fokus utama dalam berbagai penelitian karena material ini memiliki potensi yang signifikan sebagai alternatif ramah lingkungan terhadap beton berbasis semen Portland. Beton geopolimer, khususnya yang berbasis *fly ash* dengan kadar kalsium tinggi (*Class C fly ash*), telah terbukti memiliki kuat tekan dan kuat tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton konvensional. Berdasarkan penelitian Mehta and Siddique, (2017a) serta Nath and Sarker, (2017) mengonfirmasi bahwa beton geopolimer dengan *fly ash* berkalium tinggi mencapai kekuatan mekanik yang optimal, terutama setelah proses *curing termal* yang tepat. Penambahan slag sebagai bahan campuran juga terbukti meningkatkan kekuatan awal dan umur panjang beton geopolimer (Zhuang et al., 2019).

Berdasarkan penelitian dari Tanyildizi and Yonar, (2016) juga menemukan bahwa beton geopolimer dapat mencapai kekuatan tekan yang lebih tinggi pada tahap awal dibandingkan beton konvensional. Hal ini menjadikannya sangat bermanfaat dalam proyek-proyek yang membutuhkan pengerasan cepat, seperti konstruksi prefabrikasi atau

perbaikan jalan. Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi antara *fly ash* dan material tambahan seperti slag tidak hanya meningkatkan kekuatan tekan, tetapi juga memberikan keuntungan ekonomi dan lingkungan.

Meskipun beton geopolimer memiliki keunggulan dalam hal kekuatan mekanik, salah satu tantangan utamanya adalah *workabilitas* yang lebih rendah dibandingkan dengan beton berbasis *OPC*. Beton geopolimer umumnya memiliki waktu ikat yang lebih cepat, yang dapat mengurangi fleksibilitas dalam aplikasi di lapangan. Untuk mengatasi masalah ini, penelitian telah difokuskan pada pengembangan *self-compacting geopolymer concrete (SCGC)*.

Penelitian oleh Demie et al., (2013); Patel and Shah, (2018) mengeksplorasi penggunaan bahan tambahan seperti *superplasticizer* untuk meningkatkan *workabilitas* beton geopolimer. Penggunaan *superplasticizer* memungkinkan pengurangan viskositas campuran beton tanpa mengorbankan kekuatan mekanik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *superplasticizer* dalam beton geopolimer meningkatkan *flowability*, sehingga memungkinkan beton memadat sendiri tanpa perlu proses pemadatan manual. Hal ini sangat menguntungkan dalam aplikasi yang memerlukan proses pemasangan yang cepat dan efisien.

Penelitian yang dilakukan oleh Huseien et al., (2020) menunjukkan bahwa kombinasi bahan tambahan seperti nano-silica dengan *superplasticizer* dapat meningkatkan *flowability* dan kekuatan tekan *SCGC*. Nano-silica juga berperan dalam meningkatkan densitas mikrostruktur beton, sehingga mengurangi porositas dan meningkatkan durabilitasnya. Selain itu, Verma et al., (2020) menemukan bahwa beton geopolimer yang memadat sendiri dengan tambahan *superplasticizer* mencapai kekuatan tekan yang lebih tinggi pada usia 28 hari dibandingkan dengan beton konvensional, sambil tetap mempertahankan performa yang baik dalam hal ketahanan terhadap lingkungan agresif.

2.2.5 Aplikasi Beton Geopolimer pada Struktur Balok

Aplikasi beton geopolimer dalam elemen struktur seperti balok, kolom, dan pelat telah menjadi fokus penelitian yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Beton geopolimer, yang dihasilkan melalui polimerisasi bahan aluminosilikat seperti *fly ash* atau metakaolin, menawarkan alternatif ramah lingkungan dibandingkan dengan beton berbasis *Ordinary Portland Cement (OPC)*. Penelitian-penelitian menunjukkan bahwa beton

geopolimer memiliki performa mekanik dan durabilitas yang setara atau bahkan lebih baik dibandingkan dengan beton konvensional, terutama dalam kondisi lingkungan yang agresif.

Penelitian beton geopolimer pada elemen balok dilakukan dengan beberapa variabel melihat pengaruhnya pada peningkatan kinerja struktural balok tersebut. Salah satu variabel yang diteliti adalah rasio tulangan, yang memiliki pengaruh penting dalam menentukan kapasitas lentur dan daktilitas balok dengan beton geopolimer. Semakin tinggi rasio tulangan, semakin besar kapasitas beban balok, yang perilakunya mirip dengan balok beton konvensional (Sumajouw and Rangan, 2005).; (Yost, Radlinska, et al., 2013). Selain itu, kuat tekan beton juga berperan langsung terhadap kinerja lentur balok. Balok dengan beton geopolimer dengan kuat tekan yang lebih tinggi menunjukkan kapasitas beban yang lebih besar (Dattatreya et al., 2011).

Penelitian lanjutan oleh (Hutagi and Khadiranaikar, 2016b) mengungkapkan bahwa balok dengan beton geopolimer dapat menahan beban struktural yang setara dengan balok konvensional, dengan tambahan keuntungan berupa durabilitas yang lebih tinggi. Penelitian oleh Verma et al., (2020) juga mendukung temuan tersebut, di mana balok dengan beton geopolimer yang dihasilkan dari *fly ash* berkalsium tinggi menunjukkan ketahanan yang sangat baik terhadap serangan klorida, yang merupakan penyebab utama korosi pada tulangan baja di dalam beton. Temuan ini memperkuat argumen bahwa beton geopolimer sangat cocok untuk digunakan di infrastruktur pesisir atau lingkungan dengan paparan air laut yang intensif.

Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Yacob et al., (2019), menemukan bahwa balok beton geopolimer menunjukkan kekuatan geser yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton konvensional. Temuan ini menunjukkan bahwa geopolimer tidak hanya mampu menahan beban lentur dengan baik, tetapi juga unggul dalam menahan gaya geser, yang membuatnya ideal untuk digunakan pada struktur yang memerlukan ketahanan terhadap geser. Yost, Radlińska, et al., (2013), melaporkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan dalam perilaku geser antara balok beton geopolimer dan balok beton konvensional. Meskipun begitu, hasil ini mengindikasikan bahwa beton geopolimer setidaknya sebanding dengan beton konvensional dalam hal kapasitas geser, yang mendukung penerapannya sebagai material alternatif untuk struktur beton bertulang.

Variabel lainnya adalah rasio *fly ash* (*FA*) dan *slag* (*SG*), yang merupakan bahan baku utama dalam pembuatan beton geopolimer. Rasio ini memengaruhi sifat mekanik balok,

khususnya dalam hal ketahanan jangka panjang dan pembentukan mikrostruktur yang lebih baik (Ng et al., 2013; Visintin et al., 2017). Konfigurasi tulangan juga menunjukkan dampak signifikan terhadap kapasitas beban dan pola keruntuhan balok geopolimer. Penyesuaian dalam konfigurasi tulangan dapat memperbaiki kapasitas struktural balok dan mengurangi kemungkinan keruntuhan prematur (Mourougane, Sivakumar, et al., 2012; Srinivasan et al., 2014).

Penggunaan serat kaca pada balok geopolimer merupakan pendekatan lain yang berhasil meningkatkan ketahanan terhadap keretakan serta memperkuat kekuatan tarik balok (Andalib, Lim, et al., 2014; Kathirvel and Kaliyaperumal, 2016b). Selain itu, rasio jarak tumpu dan penggunaan agregat daur ulang juga memengaruhi kinerja balok, terutama dalam aspek ketahanan terhadap geser dan deformasi (Devika and Deepthi, 2015b). Secara keseluruhan, berbagai kombinasi variabel ini menunjukkan potensi yang besar dalam meningkatkan kinerja struktural balok geopolimer, sehingga menjadikannya pilihan material yang menarik untuk aplikasi struktural.

2.3 Balok Beton Bertulang

2.3.1 Perencanaan Balok

Dalam perencanaan elemen balok pada struktur beton bertulang, perhitungan kekuatan lentur dan geser dilakukan berdasarkan prinsip-prinsip keseimbangan gaya dan diagram tegangan-regangan yang telah diatur dalam SNI 2847 tentang Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Selain itu, untuk balok yang diperkuat dengan bahan komposit seperti *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*, perhitungan tambahan yang merujuk pada SNI CFRP diperlukan untuk memastikan bahwa kekuatan tambahan yang diberikan oleh material perkuatan diperhitungkan secara akurat. Dengan menggunakan prinsip keseimbangan antar gaya tarik (T) dan gaya tekan (C) yang terjadi pada beton disajikan pada Gambar 2.11, maka nilai gaya-gaya tersebut adalah:

$$T_s = C_c + C_s - T_s \quad (2.1)$$

dimana:

$$C_c = 0.85 f'_c \times a \times b \quad (2.2)$$

$$C_s = A'_s \times f'_s \quad (2.3)$$

$$T_s = A_s \times f_y \quad (2.4)$$

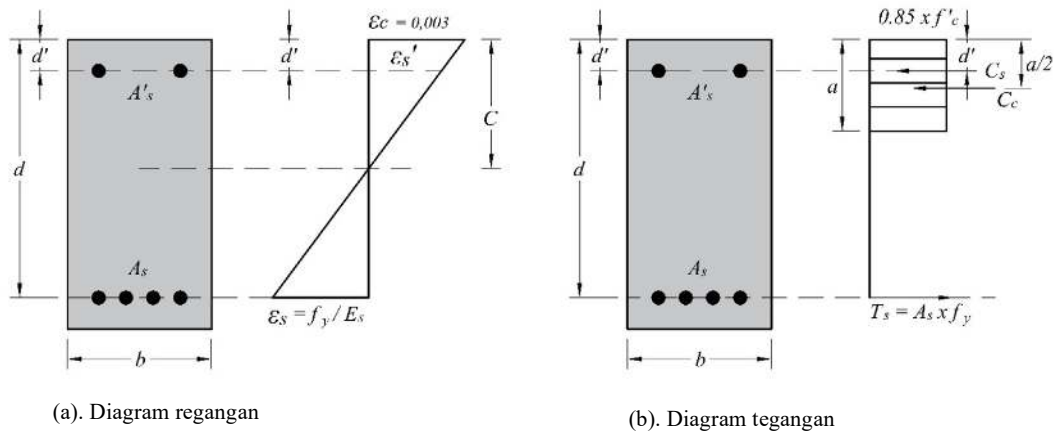
Perencanaan geser untuk komponen-komponen struktur terlentur didasarkan pada anggapan bahwa beton menahan sebagian dari gaya geser, sedangkan kelebihan atau kekuatan geser di atas kemampuan beton untuk menahannya dilimpahkan kepada tulangan baja geser. Untuk komponen-komponen struktur yang menahan geser dan lentur, memberikan kapasitas kemampuan beton (tanpa penulangan geser) untuk menahan gaya geser adalah V_c , yang besarnya adalah:

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.5)$$

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2.6)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.7)$$

$$V_s = \frac{A_s f_y d}{s} \quad (2.8)$$



Gambar 2.11. Diagram Tegangan Regangan Balok

Penelitian terdahulu mengenai perilaku lentur balok beton geopolimer memberikan dasar untuk mengadaptasi metode perhitungan balok beton berbasis beton konvensional. Meskipun prinsip dasar perhitungan tetap merujuk pada keseimbangan gaya dan regangan, karakteristik mekanis beton geopolimer memerlukan penyesuaian pada parameter desain. Penelitian oleh Hardjito and Rangan, (2005) menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki kekuatan tekan yang baik, tetapi sifat tarik dan regangannya lebih rendah dibandingkan beton konvensional, yang memengaruhi parameter seperti faktor reduksi tegangan (β_1) dan regangan tekan maksimum. Pada analisis lentur, distribusi tegangan di zona tekan beton geopolimer cenderung lebih tajam, sehingga nilai β_1 direkomendasikan 0.75 pada beton dengan mutu dibawah 40 MPa dan regangan tekan maksimum adalah 0.0020 – 0.0025.

2.3.2 Daktilitas Balok

Daktilitas adalah kemampuan suatu elemen struktur, seperti balok beton bertulang, untuk mengalami deformasi plastis yang besar sebelum mengalami keruntuhan. Daktilitas penting dalam desain struktur karena memungkinkan elemen struktur untuk menyerap energi deformasi dalam jumlah besar tanpa kegagalan mendadak. Ini memberikan waktu peringatan sebelum kegagalan, sehingga memungkinkan adanya redistribusi gaya dan meningkatkan keamanan struktur (Park and Paulay, 1975; Priestley et al., 2007). Daktilitas dibedakan menjadi dua, yaitu daktilitas penampang (*curvature ductility*) dan *displacement ductility*. Daktilitas penampang mengacu pada kemampuan elemen struktur untuk menahan deformasi sebelum mengalami keruntuhan total, merupakan rasio antara kurvatur *ultimate* (ϕ_u) dan kurvatur *yield* (ϕ_y) pada penampang balok (Priestley et al., 1996).

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (2.9)$$

dimana:

ϕ_u = kurvatur *ultimate*, yaitu kurvatur maksimum sebelum elemen mengalami keruntuhan

ϕ_y = kurvatur *yield*, yaitu kurvatur saat tulangan mulai leleh atau *yield*

μ_ϕ = daktilitas kurvatur (*curvature ductility*)

Daktilitas *displacement* dihitung sebagai perbandingan antara defleksi *ultimate* dan defleksi *yield*. Daktilitas ini menunjukkan kemampuan balok untuk mengalami deformasi besar setelah tulangan mulai meleleh. Daktilitas *ultimate* digunakan untuk menilai seberapa jauh deformasi plastis yang terjadi sebelum struktur mencapai kapasitas maksimum (*ultimate strength*) (Chopra, 2019), perhitungan daktilitas *ultimate*:

$$\mu_d = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2.10)$$

dimana:

Δ_u = defleksi maksimum pada kondisi *ultimate*

Δ_y = defleksi saat leleh (*yield*)

Daktilitas *failure* menggambarkan kemampuan balok untuk menahan deformasi hingga mencapai keruntuhan penuh. Ini mengukur sejauh mana struktur dapat terus mengalami

deformasi setelah melewati titik leleh (*yield*) hingga mengalami kegagalan total (*failure*) (Fardis, 2009), perhitungan daktilitas *failure* adalah :

$$\mu_f = \frac{\Delta_f}{\Delta_y} \quad (2.11)$$

dimana:

Δ_f = defleksi maksimum saat keruntuhan total (*failure*)

Δ_y = defleksi saat leleh (*yield*)

2.4 Pemodelan Balok dengan *Software* DIANA

Pada penelitian ini, pemodelan balok dilakukan menggunakan perangkat lunak DIANA untuk mempelajari perilaku balok yang diperkuat dengan beton geopolimer dan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Teknologi *Finite Element Analysis (FEA)* memungkinkan untuk mengevaluasi kinerja struktur dengan tingkat akurasi tinggi dan memberikan wawasan tentang perilaku struktur dengan berbagai kondisi pembebanan. Perangkat lunak DIANA menawarkan pendekatan numerik yang dapat memodelkan material-material kompleks seperti beton geopolimer dan *FRP* dengan mempertimbangkan interaksi antara bahan dan pembebanan yang diterima oleh struktur tersebut.

Perangkat lunak DIANA menggunakan elemen *hexahedral* atau *prismatik* untuk beton geopolimer, yang memungkinkan representasi yang lebih akurat dari geometri dan distribusi tegangan dalam balok. Untuk FRP, elemen *shell* digunakan untuk memodelkan lapisan komposit yang terikat pada beton, sementara elemen *beam* digunakan untuk mewakili balok beton secara keseluruhan. Dengan cara ini, perangkat lunak DIANA dapat menangani interaksi kompleks antara material yang berbeda dengan baik, serta menghitung distribusi tegangan yang terjadi di dalam balok selama pembebanan (Kong and Hsu, 2018).

Dalam konteks penelitian ini, pemodelan tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai kondisi pembebanan yang umum ditemukan dalam desain struktur, seperti pembebanan aksial, lentur dan geser. Perangkat lunak DIANA memungkinkan simulasi yang sangat realistis mengenai perilaku struktur beton yang diperkuat dengan material komposit, mengingat kemampuan program untuk menangani material non-linear dan interaksi antar material yang rumit. Hal ini dapat untuk memprediksi secara lebih tepat bagaimana balok akan berperilaku, sebelum dilakukan

pengujian fisik yang lebih mahal dan waktu yang memakan banyak waktu (Ismail and Shukor, 2018).

2.5 Analisis Penampang Balok dengan *Response 2000*

Response 2000 adalah sebuah program perangkat lunak yang dikembangkan berdasarkan teori *Modified Compression Field Theory (MCFT)* untuk menganalisis elemen beton bertulang prismatik. *MCFT* sendiri adalah suatu teori yang dikembangkan untuk menggambarkan perilaku beton bertulang di bawah kondisi pembebanan geser yang kompleks. Teori ini mengintegrasikan interaksi antara beton dan baja tulangan dalam kondisi pembebanan geser yang tinggi, serta mekanisme distribusi tegangan di dalam elemen beton bertulang (Hsu and Mo, 2004). *MCFT* memperhitungkan distribusi tegangan dan deformasi dalam elemen beton bertulang yang terkena geser, momen, dan beban aksial (Ma and Hsu, 2002).

Program *Response 2000* memungkinkan untuk melakukan analisis terhadap elemen beton bertulang yang dikenai beban aksial, momen, geser, atau kombinasi dari ketiganya. Program ini sangat berguna dalam merancang dan memeriksa daya dukung elemen beton bertulang, baik dalam kondisi pembebanan tunggal maupun kombinasi pembebanan yang lebih kompleks. Dengan menggunakan *Response 2000*, respon beban-lendutan dari elemen beton bertulang dapat diprediksi, dan kekuatan maksimum elemen tersebut dapat dihitung berdasarkan berbagai parameter pembebanan yang diterapkan.

Dalam prakteknya, *Response 2000* mengimplementasikan prinsip-prinsip *MCFT* dengan menghitung distribusi tegangan dan deformasi dalam elemen beton bertulang yang terkena geser, momen, dan beban aksial. Program ini mempertimbangkan berbagai faktor seperti rasio tulangan, kualitas material beton, dan geometri elemen dalam menghasilkan prediksi yang akurat tentang kekuatan dan perilaku struktural elemen tersebut. Salah satu keuntungan utama dari *Response 2000* adalah kemampuannya untuk menganalisis elemen beton bertulang dalam kondisi di luar jangkauan pendekatan tradisional yang lebih sederhana, seperti pendekatan teori lentur atau pendekatan geser murni (Bentz, 2000b).

Pada program *Response 2000*, karakteristik nonlinier dan hubungan tegangan-regangan material beton yang mengalami tekan dinyatakan dalam persamaan 2.12

hingga persamaan 2.14 merupakan formula yang dikembangkan oleh Popovics, (1973) dengan modifikasi oleh Porasz, (1989).

$$f_c = -\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right) f'_c \frac{n}{n-1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_{co})^{nk}} \quad (2.12)$$

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{17} \quad (2.13)$$

$$k = \begin{cases} 1.0 & \text{jika } \varepsilon_c/\varepsilon_{co} < 1.0 \\ 0.67 + \frac{f'_c}{62} & \text{jika } \varepsilon_c/\varepsilon_{co} > 1.0 \end{cases} \quad (2.14)$$

Persamaan 2.15 menunjukkan bahwa program *Response* 2000 menggunakan model yang dikembangkan oleh (Bentz, 2000a) untuk karakteristi material beton yang mengalami tarik.

$$f_t = 0.45(f'_c)^{0.4} \quad (2.15)$$

Hubungan tegangan-regangan material baja tulangan umumnya memiliki tiga komponen yaitu; (1) fase linier-elastis pada bagian awal, (2) fase leleh, dan (3) fase pengerasan regangan yang bersifat linier atau non-linier hingga putus. Program Respon 2000 mengadopsi perilaku histeresis material baja pada bagian kurva *backbone*, sebagaimana diusulkan oleh Emilio, (1973) dan Seckin, (1981) melalui persamaan 2.16 untuk memodelkan hubungan tegangan-regangan baja akibat pembenanan monotonik.

$$f_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \text{untuk } \varepsilon_s < \varepsilon_y \\ f_y & \text{untuk } \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \\ f_u + (f_y - f_u) \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon_s}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)^P & \text{untuk } \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u \\ 0 & \text{untuk } \varepsilon_u < \varepsilon_s \end{cases} \quad (2.16)$$

Berdasarkan persamaan 2.36, menunjukkan nilai regangan baja ($\varepsilon_s = |\varepsilon_s|$), ε_y adalah regangan leleh baja, ε_{sh} adalah regangan baja pada bagian awal pengerasan regangan, ε_u adalah regangan ultimit baja, E_s adalah modulus elastis baja, f_y adalah tegangan leleh baja, f_u adalah tegangan ultimit baja, dan P adalah parameter pengerasan regangan. Fase pengerasan regangan setelah titik leleh berpotensi menjadi linier

(triliniar, $P = 1$) atau nonlinier ($P = 4$). Hubungan tegangan-regangan dengan model elastis sempurna dihasilkan melalui opsi triliniar untuk material CFRP. Modulus pengerasan regangan, jika akan digunakan, ditunjukkan dalam Persamaan 2.17.

$$E_{sh} = \left(\frac{f_u - f_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right) \quad (2.17)$$

2.6 Kerangka Berpikir

Struktur bangunan bertingkat pada umumnya didesain untuk mampu menahan beban-beban yang bekerja baik dalam arah vertikal (gaya aksial dan lentur) maupun horizontal (gaya geser akibat gempa atau angin). Dalam sistem rangka beton bertulang, balok muka kolom merupakan salah satu elemen struktural yang paling kritis, karena menerima kombinasi beban momen lentur dan gaya geser terbesar terutama saat terjadi peristiwa ekstrem seperti gempa. Ketahanan dan kekuatan elemen ini sangat menentukan kinerja keseluruhan struktur, sehingga dibutuhkan strategi perkuatan yang tepat guna meningkatkan kapasitas serta daktilitas elemen tersebut.

Salah satu metode perkuatan yang berkembang saat ini adalah penggunaan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*. *FRP* merupakan material komposit ringan yang memiliki kuat tarik sangat tinggi, tahan korosi, serta mudah diaplikasikan pada struktur yang telah ada. Dalam penelitian-penelitian sebelumnya, aplikasi *FRP string* umumnya difokuskan pada perkuatan lentur, di mana FRP ditempatkan pada daerah tarik balok untuk meningkatkan kapasitas momen. Penelitian ini hadir dengan pendekatan baru, yaitu mengkaji aplikasi *FRP string* sebagai elemen sengkang untuk perkuatan terhadap gaya geser pada balok beton bertulang berbasis beton geopolimer. Beton geopolimer dipilih karena sifatnya yang lebih ramah lingkungan dibanding beton konvensional, namun tetap memiliki karakteristik mekanik yang baik.

Inovasi utama dalam penelitian ini adalah penggunaan *FRP string* sebagai sengkang yang bertujuan untuk memberikan pengekangan (*confinement*) pada elemen balok beton bertulang. Pengekangan ini penting karena dapat menunda pecahnya beton pada saat pembebanan, yang pada akhirnya meningkatkan daktilitas struktur, mengurangi lebar retak dan meningkatkan ketahanan struktur terhadap deformasi.