

# Studi Penggunaan Tulangan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) sebagai Substitusi Tulangan Baja Konvensional pada Model Bangunan Gedung 8 Lantai

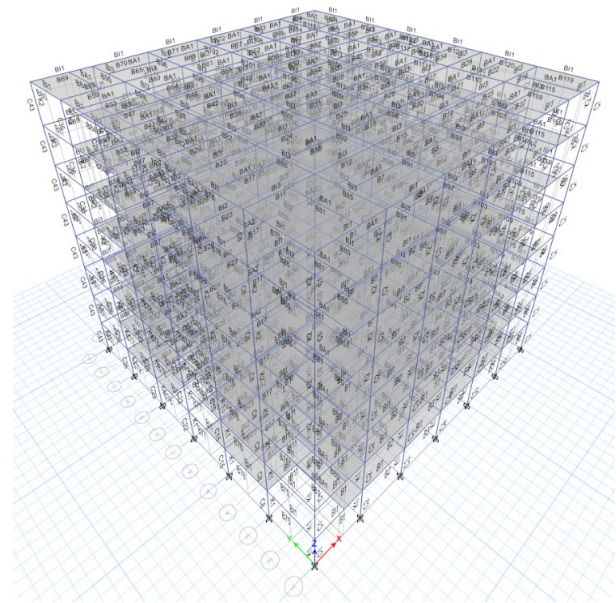
Wildan Pramadistya Rifliansah, Tavio, dan Data Iranata  
Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail:* tavio@ce.its.ac.id

**Abstrak**—Dalam dua dekade terakhir, tulangan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) telah banyak digunakan sebagai pengganti tulangan baja konvensional pada perkuatan struktur beton. Tulangan GFRP memiliki kelebihan yakni kuat tarik yang tinggi, berat jenis yang relatif ringan dan durabilitas yang baik terhadap korosi. Beberapa negara seperti Amerika Serikat, Canada, China, Jepang, dan Jerman telah membuat pedoman dan berhasil dalam mengaplikasikan tulangan GFRP sebagai perkuatan pada struktur bangunannya. Di Indonesia, Standar Nasional Indonesia (SNI) baru mengeluarkan peraturan terkait panduan perancangan dan pelaksanaan beton struktural bertulangan batang serat berpolimer yang diatur dalam SNI 8970:2021. Dengan adanya SNI tersebut dan menimbang kelebihan GFRP, maka diperlukan persiapan dan studi untuk membuktikan kelayakan penerapan teknologi perkuatan tulangan GFRP di Indonesia. Pada studi ini, dilakukan komparasi desain elemen struktur beton dengan perkuatan tulangan baja dan tulangan GFRP dari aspek batas kekuatan, aspek batas kelayakan, dan efisiensi pada model bangunan gedung 8 lantai dengan pembebanan dan dimensi profil elemen struktur yang sama. Tujuan studi ini adalah untuk mengetahui efisiensi dari penggunaan tulangan GFRP sebagai substitusi tulangan baja konvensional untuk perkuatan pada elemen struktur beton. Dari hasil komparasi disimpulkan bahwa meskipun tulangan GFRP memiliki kuat tarik yang lebih tinggi sampai 2 kali dan berat jenis yang lebih rendah sampai 4 kali dibanding tulangan baja, akan tetapi penggunaan tulangan baja masih lebih efisien hingga 41% aspek kebutuhan panjang total tulangan dan 64% biaya total material tulangan dibandingkan dengan penggunaan tulangan GFRP. Namun pada aspek berat total tulangan, struktur bertulangan GFRP lebih efisien sampai 61% dibanding struktur bertulangan baja. Mayoritas desain elemen struktur beton terkontrol oleh batas kelayakan khususnya lebar retak dibandingkan kontrol batas kekuatan. Syarat detailing pada tulangan GFRP juga lebih kritis dibandingkan dengan detailing pada tulangan baja. Hal tersebut yang mengakibatkan tulangan GFRP tidak lebih efisien dibandingkan tulangan baja sebagai perkuatan pada struktur beton.

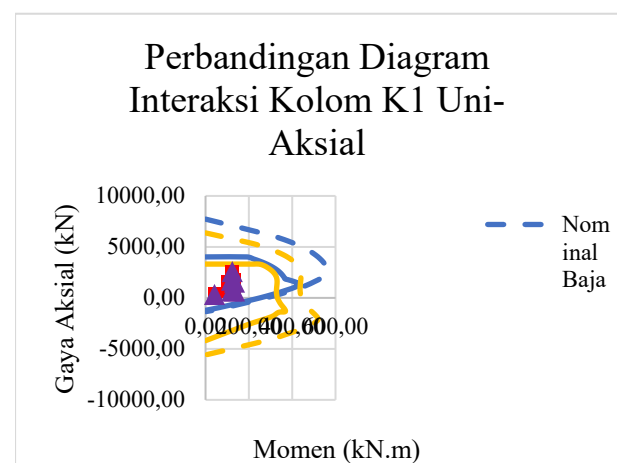
**Kata Kunci**—Efisiensi, Glass Fiber Reinforced Polymer, Perkuatan, Tulangan.

## I. PENDAHULUAN

**B**ETON merupakan material yang kuat terhadap beban tekan akan tetapi sangat rentan terhadap beban tarik. Pada suatu elemen struktur, beton harus didesain secara komposit dengan perkuatan tulangan untuk dapat bekerja sama dalam menahan beban tekan dan tarik. Saat ini, mayoritas dari bangunan gedung beton bertulangan masih menggunakan tulangan baja sebagai elemen perkuatan pada struktur beton. Belakangan ini, terdapat riset terkait teknologi



Gambar 1. Pemodelan struktur model bangunan pada program bantu analisa struktur.



Gambar 2. Perbandingan diagram interaksi P-M kolom.

perkuatan beton terbaru yang terbuat dari bahan non-logam sebagai pengganti perkuatan tulangan baja pada beton. Teknologi perkuatan beton tersebut yakni tulangan yang terbuat dari serat polimer atau Fiber Reinforced Polymer (FRP). Salah satu dari tulangan serat polimer yang sering digunakan yakni tulangan polimer dengan bahan serat kaca atau yang lebih dikenal dengan tulangan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP).

Dalam dua dekade terakhir, tulangan GFRP telah banyak digunakan sebagai pengganti tulangan baja konvensional [1].

Tabel 1.

Data material tulangan longitudinal GFRP TUF-Bar							
Properti	Satuan	D10	D13	D15	D20	D22	D25
Diameter	mm	10	13	15	20	22	25
Kuat Tarik Ultimate	MPa	1200	1175	1150	1150	1100	1000
Modulus Elastisitas	GPa	63,7	61,1	62,6	62,7	61,2	61,7
Regangan Ultimate	%	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9

Tabel 2.

Data material tulangan geser GFRP TUF-Bar							
Properti	Satuan	D10	D13	D15	D20	D22	D25
Diameter	mm	10	13	15	20	20	25
Kuat Tarik Ultimate	MPa	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Modulus Elastisitas	GPa	50	50	50	50	50	50

Tabel 3.

Hasil preliminary design elemen struktur						
Elemen	Tipe	Dimensi (mm)			Lokasi	
		Panjang	Lebar Profil	Tinggi Profil		
Pelat	PL1	5000	2500	120	Semua lantai	
Balok Anak	BA1	5000	300	400	Semua lantai	
Balok Anak	BA2	5000	300	400	Semua lantai	
Balok Induk	BI1	5000	400	600	Semua lantai	
Balok Induk	BI2	5000	400	600	Semua lantai	
Balok Induk	BI3	5000	400	600	Semua lantai	
Kolom	K1	5000	500	500	Semua lantai	

Tabel 4.

Desain elemen struktur pelat				
Pelat Bertulangan Baja				
Tipe	Konfigurasi Tulangan Longitudinal			
	Atas Lapis 1 (Lx)	Atas Lapis 2 (Ly)	Bawah Lapis 1 (Lx)	Bawah Lapis 2 (Lx)
PL1	D10-300	D10-300	D10-300	D10-300
Tangga	D16-350	D16-450	D16-125	D16-300
Bordes	D16-150	D16-450	D16-125	D16-300
Pelat Bertulangan GFRP				
Tipe	Konfigurasi Tulangan Longitudinal			
	Atas Lapis 1 (Lx)	Atas Lapis 2 (Ly)	Bawah Lapis 1 (Lx)	Bawah Lapis 2 (Lx)
PL1	D13-200	D13-200	D13-200	D13-200
Tangga	D20-125	D20-450	D20-100	D20-200
Bordes	D15-100	D15-450	D15-100	D15-100

Tulangan GFRP memiliki kelebihan yakni berat jenis tulangan GFRP lebih rendah dari berat jenis tulangan baja dan kuat tarik yang relatif lebih tinggi dibandingkan tulangan baja [2]. Balok beton bertulangan GFRP yang dibebani beban momen menunjukkan perilaku yang sama seperti tulangan baja namun memberikan kuat lentur yang lebih tinggi [3]. Kapasitas momen nominal lentur pada balok GFRP meningkat seiring dengan bertambahnya rasio tulangan GFRP pada struktur beton [4]. Salah satu kelebihan lain dari tulangan GFRP adalah durabilitas tulangan GFRP yang cukup tinggi terhadap korosi [5]. Meskipun demikian, tulangan GFRP juga memiliki kelemahan yakni kuat tekan dan modulus elastisitas yang relatif rendah dibandingkan dengan tulangan baja [2]. Akibatnya, pada elemen balok beton dengan perkuatan tulangan GFRP menunjukkan retak yang lebih lebar dan defleksi yang lebih besar dibandingkan dengan tulangan baja pada rasio perkuatan yang sama [5]. Oleh sebab itu, kontrol defleksi dan retak adalah parameter yang paling kritis untuk batas layan pada elemen struktur beton dengan perkuatan tulangan GFRP, sehingga elemen struktur beton dengan tulangan GFRP cenderung didesain berdasarkan batas layan daripada batas kuat ultimit [1]. Bangunan yang diperkuat dengan tulangan GFRP bisa jadi

Tabel 5.

Desain elemen struktur balok anak						
Balok Anak Bertulangan Baja						
Tipe	Dimensi Profil (mm)	Tulangan Longitudinal			Tulangan Sengkang	
		Lokasi	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
BA1	300 x 400	Atas	2D16	2D16	2D10-150	2D10-150
		Tengah	-	-		
		Bawah	2D16	2D16		
BA2	300 x 400	Atas	2D16	2D16	2D10-150	2D10-150
		Tengah	-	-		
		Bawah	2D16	2D16		
Balok Anak Bertulangan GFRP						
Tipe	Dimensi Profil (mm)	Tulangan Longitudinal			Tulangan Sengkang	
		Lokasi	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
BA1	300 x 400	Atas	2D15	2D15	2D10-150	2D10-150
		Tengah	-	-		
		Bawah	2D15	2D15		
BA2	300 x 400	Atas	2D13	2D13	2D10-150	2D10-150
		Tengah	-	-		
		Bawah	3D13	3D13		
Pelat Bertulangan Baja						
Tipe	Konfigurasi Tulangan Longitudinal					
	Atas Lapis 1 (Lx)	Atas Lapis 2 (Ly)	Bawah Lapis 1 (Lx)	Bawah Lapis 2 (Lx)		
PL1	D10-300	D10-300	D10-300	D10-300		
Tangga	D16-350	D16-450	D16-125	D16-300		
Bordes	D16-150	D16-450	D16-125	D16-300		
Pelat Bertulangan GFRP						
Tipe	Konfigurasi Tulangan Longitudinal					
	Atas Lapis 1 (Lx)	Atas Lapis 2 (Ly)	Bawah Lapis 1 (Lx)	Bawah Lapis 2 (Lx)		
PL1	D13-200	D13-200	D13-200	D13-200		
Tangga	D20-125	D20-450	D20-100	D20-200		
Bordes	D15-100	D15-450	D15-100	D15-100		

memiliki biaya yang lebih mahal dibandingkan bangunan yang diperkuat oleh tulangan baja dikarenakan harga tulangan GFRP yang lebih mahal dibandingkan tulangan baja dan pemenuhan kriteria batas layan dapat menyebabkan banyaknya kebutuhan tulangan GFRP [1]. Namun, meskipun harga tulangan GFRP lebih mahal daripada tulangan baja, akan tetapi dengan berat tulangan GFRP yang jauh lebih ringan dari tulangan baja dapat menyebabkan harga untuk mobilisasi dan pengerjaan di lapangan menjadi lebih murah [6].

Beberapa negara seperti Amerika Serikat, Canada, China, Jepang, dan Jerman telah membuat pedoman dan berhasil dalam mengaplikasikan tulangan FRP sebagai perkuatan pada struktur bangunannya [7]. Di Indonesia, Standar Nasional Indonesia (SNI) baru saja mengeluarkan peraturan terkait panduan perancangan dan pelaksanaan beton struktural bertulangan batang serat berpolimer yang diatur dalam SNI 8970:2021. Dengan adanya SNI tersebut dan menimbang beberapa kelebihan dari tulangan FRP khususnya GFRP, maka diperlukan persiapan dan studi untuk membuktikan kelayakan penerapan teknologi perkuatan tulangan FRP di Indonesia.

Pada studi ini, akan didesain model bangunan gedung 8 lantai dengan menggunakan perkuatan tulangan baja konvensional dan tulangan GFRP dengan mengacu pada SNI 1726:2019, SNI 2847:2019, dan SNI 8970:2021. Kemudian dari 2 desain model bangunan gedung tersebut akan dilakukan studi komparasi dari desain strukturnya berdasarkan aspek batas kekuatan, aspek batas kelayakan,

Tabel 6.  
Desain elemen struktur balok induk

Balok Induk Bertulangan Baja						
Tipe	Dimensi Profil (mm)	Tulangan Longitudinal			Tulangan Sengkang	
		Lokasi	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
BI1	400 x 600	Atas	3D19	2D16	2D10-125	2D10-200
		Tengah	4D19	4D19		
		Bawah	3D19	2D16		
BI2	400 x 600	Atas	3D19	2D16	2D10-125	2D10-200
		Tengah	4D19	4D19		
		Bawah	3D19	3D19		
BI3	400 x 600	Atas	3D19	2D16	2D10-125	2D10-250
		Tengah	2D10	2D10		
		Bawah	3D19	3D19		

Balok Induk Bertulangan GFRP						
Tipe	Dimensi Profil (mm)	Tulangan Longitudinal			Tulangan Sengkang	
		Lokasi	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
BI1	400 x 600	Atas	2D20	2D20	2D13-100	2D13-200
		Tengah	2D20	2D20		
		Bawah	2D20	2D20		
BI2	400 x 600	Atas	2D22	2D22	2D13-100	2D13-150
		Tengah	2D20	2D20		
		Bawah	3D22	3D22		
BI3	400 x 600	Atas	2D20	2D20	2D13-100	2D13-250
		Tengah	2D10	2D10		
		Bawah	3D20	3D20		

Tabel 7.  
Desain elemen struktur kolom

Kolom Bertulangan Baja					
Tipe	Dimensi (mm)	Tulangan Longitudinal		Tulangan Sengkang	
		Arah	Jumlah	Tump.	Lap.
K1	500 x 500	X	5D16	3D13-125	3D13-200
		Y	5D16	3D13-125	3D13-200

Kolom Bertulangan Baja					
Tipe	Dimensi (mm)	Tulangan Longitudinal		Tulangan Sengkang	
		Arah	Jumlah	Tump.	Lap.
K1	500 x 500	X	5D16	3D13-125	3D13-200
		Y	5D16	3D13-125	3D13-200

Tabel 8.  
Rekapitulasi kontrol kuat lentur pada pelat bertulangan baja

Tipe Pelat		PL1	
Keterangan	Satuan	Daerah Tumpuan	Daerah Lapangan
Tul. Utama	mm	D10-300	D10-300
As	mm <sup>2</sup>	261,8	261,8
Mn	kN.m	10,21	10,21
Ø		0,9	0,9
ØMn	kN.m	9,19	9,19
Mu	kN.m	6,88	4,73
Mu/ØMn		0,75	0,52

Tabel 9.  
Rekapitulasi kontrol kuat lentur pada pelat bertulangan GFRP

Tipe Pelat		PL1	
Keterangan	Satuan	Daerah Tumpuan	Daerah Lapangan
Tul. Utama	mm	D13-200	D13-200
Af	mm <sup>2</sup>	663,66	663,66
Mn	kN.m	36,72	36,72
Ø		0,65	0,65
ØMn	kN.m	23,87	23,87
Mu	kN.m	6,88	4,73
Mu/ØMn		0,29	0,20

dan efisiensi dari penggunaan material perkuatan dengan tulangan baja dan tulangan GFRP. Studi ini dilakukan untuk

Tabel 10.  
Rekapitulasi kontrol defleksi pada pelat bertulangan baja

Tipe Pelat		PL1	
Keterangan	Satuan	Daerah Tumpuan	Daerah Lapangan
Mcr	kN.m	8,15	
Icr	mm <sup>4</sup>	1,4 x 10 <sup>7</sup>	
Ms (D)	kN.m	2,11	1,45
Cek Retak		Tdk Retak	Tdk Retak
Ms (D+L)	kN.m	4,83	3,32
Cek Retak		Tdk Retak	Tdk Retak
Δ <sub>i,L</sub>	mm	0,233	
Δ <sub>i,L(max)</sub>	mm	6,944	
Cek Lendutan		OK	
Δ <sub>i,tot</sub>	mm	0,960	
Δ <sub>i,tot(max)</sub>	mm	10,417	
Cek Lendutan		OK	

Tabel 11.  
Rekapitulasi kontrol defleksi pada pelat bertulangan GFRP

Tipe Pelat		PL1	
Keterangan	Satuan	Daerah Tumpuan	Daerah Lapangan
Mcr	kN.m	8,15	
Icr	mm <sup>4</sup>	1,4 x 10 <sup>7</sup>	
Ms (D)	kN.m	2,11	1,45
Cek Retak		Tdk Retak	Tdk Retak
Ms (D+L)	kN.m	4,83	3,32
Cek Retak		Tdk Retak	Tdk Retak
Δ <sub>i,L</sub>	mm	0,233	
Δ <sub>i,L(max)</sub>	mm	6,944	
Cek Lendutan		OK	
Δ <sub>i,tot</sub>	mm	0,960	
Δ <sub>i,tot(max)</sub>	mm	10,417	
Cek Lendutan		OK	

Tabel 12.  
Rekapitulasi kontrol retak pada pelat bertulangan baja

Tipe Pelat		PL1	
Keterangan	Satuan	Daerah Tumpuan	Daerah Lapangan
Spasi Max	mm	300	
Spasi Tul. Utama Bawah	mm	300	300
Cek Spasi		OK	OK
Spasi Tul. Susut Bawah	mm	300	300
Cek Spasi		OK	OK
Lebar Retak Aktual	mm	0,26	
Lebar Retak Max	mm	0,40	
Cek Lebar Retak		OK	

Tabel 13.  
Rekapitulasi kontrol retak pada pelat bertulangan GFRP

Tipe Pelat		PL1	
Keterangan	Satuan	Daerah Tumpuan	Daerah Lapangan
Spasi Max	mm	239,27	
Spasi Tul. Utama Bawah	mm	200	200
Cek Spasi		OK	OK
Spasi Tul. Susut Bawah	mm	200	200
Cek Spasi		OK	OK

mengetahui efisiensi dari penggunaan tulangan GFRP sebagai pengganti tulangan baja konvensional pada perkuatan struktur bangunan beton.

## II. MATERIAL DAN METODE

### A. Tulangan GRP

Tulangan GFRP yang dipakai merupakan produk dari TUF-Bar. Spesifikasi tulangan longitudinal GFRP berdasarkan katalog TUF-Bar dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 14.  
Rekapitulasi kontrol kuat lentur pada pelat bertulangan baja

Keterangan	Satuan	Tump. (-)	Tump. (+)	Lap. (+)	Lap. (-)
Tipe BA1					
Tul. Atas	mm			2D16	
Tul. Bawah	mm			2D16	
As (Atas)	mm <sup>2</sup>			402,12	
As (Bawah)	mm <sup>2</sup>			402,12	
Mn	kN.m	58,75	58,75	58,75	58,75
Ø		0,9	0,9	0,9	0,9
ØMn	kN.m	52,87	52,87	52,87	52,87
Mu	kN.m	20,2	-	18,2	-
Mu/ØMn		0,38	-	0,34	-
Tipe BA2					
Tul. Atas	mm			2D16	
Tul. Bawah	mm			2D16	
As (Atas)	mm <sup>2</sup>			402,12	
As (Bawah)	mm <sup>2</sup>			402,12	
Mn	kN.m	58,75	58,75	58,75	58,75
Ø		0,9	0,9	0,9	0,9
ØMn	kN.m	52,87	52,87	52,87	52,87
Mu	kN.m	40,95	-	30,1	-
Mu/ØMn		0,77	-	0,57	-
Tipe B11					
Tul. Atas	mm			3D19	
Tul. Bawah	mm			3D19	
As (Atas)	mm <sup>2</sup>			850,59	
As (Bawah)	mm <sup>2</sup>			850,59	
Mn	kN.m	188,49	188,49	188,49	188,49
Ø		0,9	0,9	0,9	0,9
ØMn	kN.m	169,64	169,64	169,64	169,64
Mu	kN.m	138,84	94,53	72,99	63,57
Mu/ØMn		0,82	0,56	0,43	0,37
Tipe B12					
Tul. Atas	mm			3D19	
Tul. Bawah	mm			3D19	
As (Atas)	mm <sup>2</sup>			850,59	
As (Bawah)	mm <sup>2</sup>			850,59	
Mn	kN.m	188,49	188,49	188,49	188,49
Ø		0,9	0,9	0,9	0,9
ØMn	kN.m	169,64	169,64	169,64	169,64
Mu	kN.m	147,53	56,55	85,49	44,42
Mu/ØMn		0,87	0,33	0,50	0,26
Tipe B13					
Tul. Atas	mm			3D19	
Tul. Bawah	mm			3D19	
As (Atas)	mm <sup>2</sup>			850,59	
As (Bawah)	mm <sup>2</sup>			850,59	
Mn	kN.m	188,49	188,49	188,49	188,49
Ø		0,9	0,9	0,9	0,9
ØMn	kN.m	169,64	169,64	169,64	169,64
Mu	kN.m	114,00	56,55	49,02	46,43
Mu/ØMn		0,67	0,33	0,29	0,27

**B. Metode Studi**

Metode studi yang dilakukan dimulai dengan membuat denah arsitektur dan struktural model bangunan gedung 8 lantai. Kemudian dilakukan penentuan dimensi *preliminary design* elemen struktur. Setelah itu dibuat pemodelan 2 model bangunan gedung 8 lantai dengan perkuatan tulangan baja dan tulangan GFRP menggunakan program bantu analisa struktur. Lalu dari program bantu tersebut didapatkan gaya dalam sehingga dapat dilanjutkan mendesain elemen struktur. Selanjutnya dilakukan pemodelan penulangan pada program bantu untuk mendapatkan kebutuhan total tulangan pada masing-masing model bangunan gedung. Kemudian dilakukan studi komparasi dari aspek batas kekuatan struktur, batas kelayakan, dan efisiensi material. Struktur model bangunan didesain dengan mengacu pada SNI 2847:2019 dan SNI 8970:2021 serta buku “*Reinforced Concrete with FRP*

*Bars Mechanic and Design* 2014” oleh Nanni et al.

**C. Data Model Bangunan**

Model bangunan gedung direncanakan berupa gedung apartemen 8 lantai dengan ukuran 30x30 m. Tinggi antar lantai direncanakan 3,5 m sehingga tinggi total bangunan yakni 28 m. Gedung direncanakan berlokasi di Kota Pontianak dengan kelas situs tanah SD. Material beton direncanakan memiliki kuat tekan sebesar sebesar 30 MPa, sedangkan material tulangan baja direncanakan menggunakan tulangan baja ulir dengan kuat leleh 420 Mpa.

**D. Pembebanan Model Bangunan**

Pembebanan model bangunan mengacu pada SNI 1727:2020 untuk pembebanan beban hidup dan beban mati dan SNI 1726:2019 untuk pembebanan gempa.

Tabel 15.  
Rekapitulasi kontrol kuat lentur pada balok bertulangan GFRP

Keterangan	Satuan	Tump. (-)	Tump. (+)	Lap. (+)	Lap. (-)
Tipe					
Tul. Atas	mm			BA1 2D15	
Tul. Bawah	mm			2D15	
Af (Atas)	mm <sup>2</sup>			353,43	
Af (Bawah)	mm <sup>2</sup>			353,43	
Mn	kN.m	104,46	104,46	104,46	104,46
Ø		0,55	0,55	0,55	0,55
ØMn	kN.m	57,45	57,45	57,45	57,45
Mu	kN.m	20,2	-	18,2	-
Mu/ØMn		0,35	-	0,32	-
Tipe					
Tul. Atas	mm			BA2 2D13	
Tul. Bawah	mm			3D13	
Af (Atas)	mm <sup>2</sup>			265,46	
Af (Bawah)	mm <sup>2</sup>			398,20	
Mn	kN.m	81,65	115,94	115,94	81,65
Ø		0,55	0,55	0,55	0,55
ØMn	kN.m	44,91	65,52	65,52	44,91
Mu	kN.m	40,95	-	30,1	-
Mu/ØMn		0,91	-	0,46	-
Tipe					
Tul. Atas	mm			BI1 2D20	
Tul. Bawah	mm			2D20	
Af (Atas)	mm <sup>2</sup>			628,32	
Af (Bawah)	mm <sup>2</sup>			628,32	
Mn	kN.m	294,03	294,03	294,03	294,03
Ø		0,55	0,55	0,55	0,55
ØMn	kN.m	161,72	161,72	161,72	161,72
Mu	kN.m	138,84	94,53	72,99	63,57
Mu/ØMn		0,86	0,58	0,45	0,39
Tipe					
Tul. Atas	mm			BI2 2D22	
Tul. Bawah	mm			3D22	
Af (Atas)	mm <sup>2</sup>			760,27	
Af (Bawah)	mm <sup>2</sup>			1140,40	
Mn	kN.m	336,66	429,77	429,77	336,66
Ø		0,55	0,55	0,55	0,55
ØMn	kN.m	185,16	267,90	267,90	185,16
Mu	kN.m	147,53	56,55	85,49	44,42
Mu/ØMn		0,80	0,23	0,32	0,29
Tipe					
Tul. Atas	mm			BI3 2D20	
Tul. Bawah	mm			3D20	
As (Atas)	mm <sup>2</sup>			628,32	
As (Bawah)	mm <sup>2</sup>			942,48	
Mn	kN.m	294,03	398,45	398,45	294,03
Ø		0,55	0,55	0,55	0,55
ØMn	kN.m	161,72	234,84	234,84	161,72
Mu	kN.m	114,00	56,55	49,02	46,43
Mu/ØMn		0,70	0,24	0,21	0,29

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Hasil Preliminary Design

Sebelum mendesain tulangan diperlukan preliminary design untuk menentukan dimensi penampang pada setiap elemen struktur. Rekapitulasi hasil preliminary design elemen struktur dapat dilihat pada Tabel 3.

#### B. Desain Elemen Struktur Sekunder

Dengan dimensi penampang elemen struktur yang telah didesain pada preliminary design dapat dilakukan desain konfigurasi penulangan yang diperlukan. Elemen struktur sekunder yang direncanakan meliputi struktur pelat, balok anak, dan tangga. Berikut hasil desain elemen struktur sekunder dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

#### C. Pemodelan Analisa Struktur Model Bangunan

Model bangunan gedung apartemen 8 lantai dimodelkan dengan menggunakan program bantu analisa struktur. Bentuk pemodelan model bangunan gedung apartemen 8 lantai pada program bantu dapat dilihat pada Gambar 1. Pada pemodelan tersebut juga dilakukan validasi pemodelan dan analisa struktur terhadap gempa. Validasi pemodelan yang dilakukan antara lain validasi berat struktur, kontrol partisipasi massa, dan kontrol periode fundamental struktur. Analisa struktur terhadap gempa yang dilakukan antara lain kontrol simpangan antar lantai dan kontrol P-Delta. Hasil validasi pemodelan dan analisa struktur terhadap gempa dinyatakan sudah valid dan memenuhi batasan respon struktur terhadap gempa.

Tabel 16.  
Rekapitulasi kontrol defleksi pada balok bertulangan baja

Keterangan	Satuan	Tipe									
		BA1		BA2		BI1		BI2		BI3	
		Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
Mcr	kN.m	27,17		27,17		81,50		81,50		81,50	
Icr	mm <sup>4</sup>	2,65 x 10 <sup>8</sup>		2,65 x 10 <sup>8</sup>		1,42 x 10 <sup>9</sup>		1,42 x 10 <sup>9</sup>		1,42 x 10 <sup>9</sup>	
Ms (D)	kN.m	11,20	9,73	15,84	10,16	20,10	20,50	34,93	35,11	23,82	18,17
Cek Retak		Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk
Ms (D+L)	kN.m	15,42	13,81	29,54	21,33	22,27	21,73	55,16	62,19	33,54	24,44
Cek Retak		Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk
		Retak	Retak	Retak	Retak	Retak	Retak	Retak	Retak	Retak	Retak
$\Delta_{i,L}$	mm	0,173		0,500		0,009		0,262		0,049	
$\Delta_{i,L(max)}$	mm	12,778		12,778		12,500		12,500		12,500	
Cek Lendutan		OK		OK		OK		OK		OK	
$\Delta_{i,tot}$	mm	1,132		1,961		0,338		1,235		0,386	
$\Delta_{i,tot(max)}$	mm	19,167		19,167		18,750		18,750		18,750	
Cek Lendutan		OK		OK		OK		OK		OK	

Tabel 17.  
Rekapitulasi kontrol defleksi pada balok bertulangan GFRP

Keterangan	Satuan	Tipe									
		BA1		BA2		BI1		BI2		BI3	
		Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
Mcr	kN.m	27,17		27,17		81,50		81,50		81,50	
Icr	mm <sup>4</sup>	8,18 x 10 <sup>7</sup>		6,32 x 10 <sup>7</sup>		3,62 x 10 <sup>8</sup>		6,21 x 10 <sup>8</sup>		5,25 x 10 <sup>8</sup>	
Ms (D)	kN.m	11,20	9,73	15,84	10,16	20,10	20,50	34,93	35,11	23,82	18,17
Cek Retak		Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk
Ms (D+L)	kN.m	15,42	13,81	29,54	21,33	22,27	21,73	55,16	62,19	33,54	24,44
Cek Retak		Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk	Tdk
		Retak	Retak	Retak	Retak	Retak	Retak	Retak	Retak	Retak	Retak
$\Delta_{i,L}$	mm	0,173		0,563		0,009		0,262		0,049	
$\Delta_{i,L(max)}$	mm	12,778		12,778		12,500		12,500		12,500	
Cek Lendutan		OK		OK		OK		OK		OK	
$\Delta_{i,tot}$	mm	1,320		2,437		0,402		1,427		0,453	
$\Delta_{i,tot(max)}$	mm	19,167		19,167		18,750		18,750		18,750	
Cek Lendutan		OK		OK		OK		OK		OK	

Tabel 18.  
Rekapitulasi kontrol retak pada balok bertulangan baja

Keterangan	Satuan	Tipe Balok				
		BA1	BA2	BI1	BI2	BI3
Spasi Max	mm	255	255	255	255	255
Spasi Pakai Tump.	mm	168	168	121,5	121,5	121,5
Cek Spasi		OK	OK	OK	OK	OK
Spasi Pakai Lap.	mm	168	168	121,5	121,5	121,5
Cek Spasi		OK	OK	OK	OK	OK
Lebar Retak Aktual	mm	0,38	0,38	0,34	0,34	0,34
Lebar Retak Max	mm	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Cek Lebar Retak		OK	OK	OK	OK	OK

Tabel 19.  
Rekapitulasi kontrol retak pada balok bertulangan GFRP

Keterangan	Satuan	Tipe Balok				
		BA1	BA2	BI1	BI2	BI3
Spasi Max	mm	190,51	112,0	259,65	159,83	255,35
Spasi Pakai Tump.	mm	170,0	80,5	254,0	114,0	117,0
Cek Spasi		OK	OK	OK	OK	OK
Spasi Pakai Lap.	mm	170,0	80,5	254,0	114,0	117,0
Cek Spasi		OK	OK	OK	OK	OK

D. Desain Elemen Struktur Primer

Dengan dimensi penampang elemen struktur yang telah didesain pada preliminary design dapat dilakukan desain konfigurasi penulangan yang diperlukan. Elemen struktur sekunder yang direncanakan meliputi struktur pelat, balok anak, dan tangga. Berikut hasil desain elemen struktur sekunder dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

E. Perbandingan Desain pada Struktur Pelat

Pada Tabel 8 - 13 dapat dilihat bahwa dari aspek kuat lentur semua desain penulangan kurang efisien, hal ini dikarenakan

pada desain pelat kontrol yang lebih menentukan yakni kontrol spasi maksimum untuk memenuhi batas retak.

F. Perbandingan Desain pada Struktur Balok

Pada Tabel 14 dan Tabel 15 dapat dilihat bahwa dengan dimensi penampang dan beban ultimate yang sama, tulangan lentur untuk balok bertulangan baja memerlukan diameter yang lebih kecil namun dengan jumlah yang lebih banyak dibandingkan balok bertulangan GFRP akan tetapi untuk luasan tulangan yang diperlukan balok bertulangan GFRP lebih kecil daripada balok bertulangan baja. Hal ini sudah

Tabel 20.

Rekapitulasi kontrol retak pada balok bertulangan baja						
Batas Kuat Aksial-Lentur Kolom Bertulangan Baja						
Kondisi	Pu kN	Mux kN.m	Muy kN.m	$\rho$ %	$\phi M_n$ kN.m	Mu/ $\phi M_n$
P Max	2580,24	122,32	123,46	1,29	338,82	0,36
P Min	-329,10	41,48	40,98		308,07	0,13
Mx Max	-675,68	130,21	120,17		361,13	0,36
Mx Min	-	-	-		388,36	0,34
My Max	-677,36	105,26	133,73		361,39	0,29
My Min	-	-	-		415,74	0,25
Batas Kuat Aksial-Lentur Kolom Bertulangan GFRP						
Kondisi	Pu kN	Mux kN.m	Muy kN.m	$\rho$ %	$\phi M_n$ kN.m	Mu/ $\phi M_n$
P Max	2580,24	122,32	123,46	2,43	309,61	0,40
P Min	-329,10	41,48	40,98		328,59	0,13
Mx Max	-675,68	130,21	120,17		327,53	0,40
Mx Min	-	-	-		329,87	0,39
My Max	-677,36	105,26	133,73		327,53	0,32
My Min	-	-	-		330,15	0,32

sepentasnya berlaku demikian karena kuat tarik dari tulangan GFRP sekitar 2 kali lebih besar dari tulangan baja, namun dalam beberapa kondisi tertentu balok bertulangan baja diharuskan memenuhi persyaratan luas minimum tulangan meskipun kapasitas momen nominal sudah cukup untuk menahan beban momen ultimate. Pada Tabel 16 dan Tabel 17 dapat dilihat bahwa dengan dimensi penampang dan beban ultimate yang sama, defleksi yang terjadi hampir sama dikarenakan pada kondisi beban layan hampir semua penampang balok belum retak. Namun jika dinilai dari momen inersia penampang retak, momen inersia penampang retak pada balok bertulangan baja bernilai lebih besar hampir 3 kali lipat dari momen inersia penampang retak balok bertulangan GFRP. Pada Tabel 18 dan Tabel 19 dapat dilihat bahwa dengan dimensi penampang dan beban ultimate yang sama, syarat spasi maksimum untuk lebar retak pada balok bertulangan GFRP lebih kritis nilainya dibandingkan dengan balok bertulangan baja. Hal ini dikarenakan pada balok bertulangan GFRP keretakan dapat menyebabkan keruntuhan rangkai sehingga pembatasan pada lebar retak lebih konservatif.

G. Perbandingan Desain pada Struktur Kolom

Pada kondisi kontrol kekuatan pada kolom, pada kolom bertulangan baja maupun GFRP dapat terhitung *over strength* karena rasio beban terhadap kapasitas lenturnya mayoritas kurang dari 50% seperti yang terlihat pada Tabel 20. Hal tersebut dikarenakan pemenuhan kontrol SCWB dan rasio tulangan minimum pada kolom yakni 1-3%. Pada Gambar 2 juga dapat dilihat bahwa meskipun rasio tulangan pada kolom tulangan GFRP lebih besar sekitar 2 kali lipat rasio tulangan pada kolom tulangan baja, namun secara kapasitas kuat tekannya tetap lebih besar dari kolom tulangan GFRP. Hal ini disebabkan pada analisa kuat interaksi P-M pada tulangan

Tabel 21.

Rekapitulasi kebutuhan tulangan baja pada model bangunan					
Model Bangunan Bertulangan Baja					
Dia.	Berat per m	Harga per m	Total Panjang Perlu	Berat Total	Harga Total
mm	kg	IDR	m	ton	IDR
10	0,617	7.333,33	213424,83	131,68	1.565.115.420,00
13	1,042	12.483,33	20623,68	21,49	257.452.272,00
16	1,578	18.966,67	44808,30	70,71	849.864.090,00
19	2,226	26.983,33	45896,58	102,17	1.238.442.717,00
22	2,984	36.708,33	0,00	0,00	-
25	3,853	47.358,33	0,00	0,00	-
Total			324753,39	326,05	3.910.874.499,00

Tabel 22.

Rekapitulasi kebutuhan tulangan GFRP pada model bangunan					
Model Bangunan Bertulangan GFRP					
Dia.	Berat per m	Harga per m	Total Panjang Perlu	Berat Total	Harga Total
mm	kg	IDR	m	ton	IDR
10	0,195	5.000,00	22244,16	4,34	111.220.800,00
13	0,339	11.500,00	337003,52	114,24	3.875.540.480,00
15	0,526	14.500,00	7159,68	3,77	103.815.360,00
20	0,742	21.750,00	41281,44	30,63	897.871.320,00
22	0,990	28.250,00	50076,64	49,58	1.414.665.080,00
25	1,309	39.500,00	0,00	0,00	-
Total			457765,44	202,55	6.403.113.040,00

GFRP, kuat tekan dari tulangan GFRP diabaikan dikarenakan tulangan GFRP tidak kuat terhadap gaya aksial tekan.

H. Perbandingan Efisiensi

Dengan menggunakan program bantu, dapat dimodelkan penulangan pada seluruh elemen struktur baik itu dengan tulangan baja maupun tulangan GFRP. Dari output program bantu dapat diketahui total kebutuhan tulangan berdasarkan diameter seperti yang tertera pada Tabel 21 dan Tabel 22. Selanjutnya, berdasarkan data tersebut akan dihitung efisiensi kebutuhan tulangan total untuk model bangunan dengan tulangan baja dan GFRP. Pada aspek kebutuhan panjang total material tulangan dapat disimpulkan bahwa dari aspek kebutuhan total panjang tulangan, penggunaan tulangan GFRP pada model bangunan gedung 8 lantai lebih boros sampai 41% dibanding penggunaan tulangan baja. Pada aspek berat total material tulangan dapat disimpulkan bahwa dari aspek kebutuhan total berat tulangan, penggunaan tulangan GFRP pada model bangunan gedung 8 lantai lebih ringan sampai 61% dibanding penggunaan tulangan baja. Pada aspek estimasi biaya total material tulangan disimpulkan bahwa dari aspek estimasi kebutuhan biaya total untuk material tulangan, penggunaan tulangan GFRP pada model bangunan gedung 8 lantai lebih mahal sampai 64% dibanding penggunaan tulangan baja.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan studi yang dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut: (1) Pada kondisi batas kekuatan, dengan dimensi penampang elemen struktur yang sama dapat disimpulkan bahwa kekuatan lentur nominal elemen struktur pada balok dan pelat bertulangan GFRP memiliki nilai yang lebih besar sampai 2 kali lipat daripada nilai kuat lentur nominal pada elemen struktur bertulangan baja. Kebutuhan tulangan geser pada elemen struktur bertulangan GFRP lebih kritis dibandingkan pada elemen

struktur bertulangan baja. (2) Pada kondisi batas layan, dengan dimensi penampang elemen struktur yang sama dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada momen inersia penampang kondisi retak. Pada elemen struktur bertulangan GFRP nilai momen inersia penampang kondisi retak hampir 1/3 dari nilai momen inersia penampang kondisi retak pada elemen struktur bertulangan baja sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai lendutan pada elemen struktur bertulangan GFRP akan lebih besar sampai 3 kali lipat daripada elemen struktur bertulangan baja. Secara keseluruhan, desain elemen struktur pada balok dan pelat dipengaruhi oleh kontrol kelayakan terhadap keretakan. Hal ini menyebabkan desain tidak efisien baik dari aspek efisiensi kebutuhan material maupun dari aspek efisiensi kapasitas lentur elemen struktur. Syarat spasi maksimum antar tulangan GFRP lebih kritis dibandingkan syarat spasi maksimum antar tulangan baja. (3) Pada aspek efisiensi kebutuhan panjang tulangan total, dapat diketahui bahwa penggunaan tulangan GFRP lebih boros hingga 41% dibanding tulangan baja. Hal ini disebabkan oleh syarat detailing tulangan GFRP yang lebih kritis dimana dengan diameter tulangan yang sama, kebutuhan panjang detailing pada tulangan GFRP dapat mencapai 1,5 – 3 kali lipat dari kebutuhan panjang detailing pada tulangan baja. Pada aspek efisiensi berat total kebutuhan tulangan, dapat diketahui bahwa penggunaan tulangan GFRP lebih hemat hingga 61% dibanding tulangan baja. Hal ini sejalan dengan berat jenis tulangan GFRP yang lebih ringan sampai 4 kali lipat dari tulangan baja. Pada aspek efisiensi biaya total kebutuhan tulangan, dapat diketahui bahwa

penggunaan tulangan GFRP lebih boros hingga 64% dibanding tulangan baja. Hal ini dikarenakan kebutuhan total panjang tulangan GFRP lebih besar sampai 41% yang disebabkan oleh persyaratan detailing pada tulangan GFRP yang lebih kritis dibandingkan dengan persyaratan detailing pada tulangan baja.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. El-Nemr, E. A. Ahmed, A. El-Safy & B. Benmokrane, "Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars," *Engineering Structures*, vol. 173, pp. 606-619, 2018. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.089.
- [2] M. Rafani, A. Suhardjono, Wisnumurti, A. Wibowo & Tavio, "A Theoretical Study of GFRP RC Beams Deflection," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1477, p. 52047, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1477/5/052047.
- [3] S. A. A. Jabbar & S. B. H. Farid, "Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures," *Karbala International Journal of Modern Science*, vol. 4, no. 2, pp. 216–227, 2018. doi: 10.1016/j.kijoms.2018.02.002.
- [4] Tavio, M. Rafani, I. G. P. Raka & V. Ratnasari, "Flexural capacity predictions and comparisons of gfrp reinforced beams," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1477, no. 5, p. 52049, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1477/5/052049.
- [5] A. M. M. Khorasani, M. R. Esfahani & J. Sabzi, "The effect of transverse and flexural reinforcement on deflection and cracking of GFRP bar reinforced concrete beams," *Journal Composites Part B: Engineering*, vol. 161, pp. 530–546, 2019. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.12.127.
- [6] A. F. Al-Khafaji, J. J. Myers & H. H. Alghazali, "Evaluation of bond performance of glass fiber rebars embedded in sustainable concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 282, p. 124516, 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124516.
- [7] Nanni et al, *Reinforced Concrete with FRP Bars Mechanic and Design*. London: CRC Press, 2014.