

**ANALISIS PENGARUH *CARBON FIBER REINFORCED
POLYMER (CFRP) BARS* TERHADAP KAPASITAS LENTUR
DAN GESER BALOK BETON BERTULANG SEBAGAI
PENGANTI TULANGAN BAJA**

(Skripsi)

Oleh

SITI NURHALIZA

NPM 2215011045



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**ANALISIS PENGARUH *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER*
(CFRP) BARS TERHADAP KAPASITAS LENTUR DAN GESER BALOK
BETON BERTULANG SEBAGAI PENGGANTI TULANGAN BAJA**

Oleh:

SITI NURHALIZA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2026

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER* (CFRP) BARS TERHADAP KAPASITAS LENTUR DAN GESER BALOK BETON BERTULANG SEBAGAI PENGGANTI TULANGAN BAJA

Oleh

Siti Nurhaliza

Masalah korosi pada tulangan baja konvensional dan kebutuhan struktur yang lebih ringan serta tahan lama mendorong penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) bars sebagai alternatif pengganti tulangan baja pada balok beton bertulang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara teoritis dan numerik pengaruh penggantian tulangan baja dengan CFRP bars terhadap kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang, serta membandingkan mode keruntuhan yang terjadi. Analisis dilakukan pada balok sederhana dengan variasi dimensi penampang (350×500 mm, 400×550 mm, 450×600 mm, 500×650 mm, dan 550×700 mm) serta variasi diameter tulangan longitudinal (Ø10 mm, Ø16 mm, dan Ø22 mm). Perhitungan kapasitas lentur dan geser balok bertulangan baja mengacu pada SNI 2847:2019, sedangkan balok bertulangan CFRP menggunakan ACI 440.1R-15. Evaluasi juga mencakup identifikasi mode kegagalan dan perbandingan implikasi desain.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan CFRP bars meningkatkan kapasitas lentur secara signifikan, yaitu dari kisaran 73,34–171,33 kNm pada balok bertulangan baja menjadi 162,77–582,40 kNm pada balok bertulangan CFRP, atau naik 76,14% hingga 408,52%. Peningkatan kapasitas geser lebih moderat, yaitu dari 131,78–233,57 kN menjadi 189,43–323,81 kN (kenaikan 15,73%–69,39%). Balok CFRP dirancang sebagai *over-reinforced* sehingga kegagalan lentur didominasi oleh *concrete crushing* (lebih dapat diprediksi), berbeda dengan balok baja yang bersifat *tension-controlled* dan lebih daktil. Pengaruh CFRP terhadap kapasitas lentur jauh lebih dominan dibandingkan terhadap kapasitas geser. Penelitian ini menyimpulkan bahwa CFRP bars merupakan alternatif tulangan yang sangat potensial, khususnya untuk struktur yang memerlukan ketahanan korosi tinggi dan kapasitas lentur besar. Namun, diperlukan pendekatan desain yang berbeda karena sifat linier-elastik CFRP hingga rupture.

Kata kunci: CFRP bars, kapasitas lentur, kapasitas geser, balok beton bertulang, SNI 2847:2019, ACI 440.1R-15.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) BARS ON THE FLEXURAL AND SHEAR CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE BEAM AS A STEEL REINFORCING SUBSTITUTE

By

Siti Nurhaliza

Corrosion problems in conventional steel reinforcement and the need for lighter and more durable structures encourage the use of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) bars as an alternative to steel reinforcement in reinforced concrete beams. This study aims to analyze theoretically and numerically the effect of replacing steel reinforcement with CFRP bars on the flexural and shear capacity of reinforced concrete beams, as well as to compare the failure modes that occur. The analysis was carried out on simple beams with various cross-sectional dimensions (350×500 mm, 400×550 mm, 450×600 mm, 500×650 mm, and 550×700 mm) and variations in longitudinal reinforcement diameters (Ø10 mm, Ø16 mm, and Ø22 mm). The calculation of the flexural and shear capacity of steel-reinforced beams refers to SNI 2847:2019, while CFRP-reinforced beams use ACI 440.1R-15. The evaluation also includes the identification of failure modes and a comparison of design implications.

The results showed that the use of CFRP bars significantly increased the flexural capacity, from 73.34–171.33 kNm (steel reinforced beams) to 162.77–582.40 kNm CFRP reinforced beams, or an increase of 76.14% to 408.52%. The increase in shear capacity was more moderate, from 131.78–233.57 kN to 189.43–323.81 kN (an increase of 15.73%–69.39%). CFRP beams were designed as over-reinforced so that flexural failure was dominated by concrete crushing (more predictable), in contrast to steel beams which are tension-controlled and more ductile. The effect of CFRP on flexural capacity was much more dominant than on shear capacity. This study concluded that CFRP bars are a very potential alternative reinforcement, especially for structures requiring high corrosion resistance and large flexural capacity. However, a different design approach is required due to the linear-elastic nature of CFRP until rupture.

Keywords: CFRP bars, flexural capacity, shear capacity, reinforced concrete beams, SNI 2847:2019, ACI 440.1R-15.

Judul Skripsi

: **ANALISIS PENGARUH *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) BARS* TERHADAP KAPASITAS LENTUR DAN GESER BALOK BETON BERTULANG SEBAGAI PENGGANTI TULANGAN BAJA**

Nama Mahasiswa

: **Siti Nurhaliza**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215011045


Program Studi

: Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik

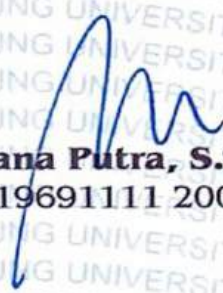




Dr. Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225 200501 1 003


Hasti Riakara Husni, S.T., M.T.
NIP 19740530 200012 2 001

Ketua Jurusan Teknik Sipil

Ketua Prodi Teknik Sipil


Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002


Dr. Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225 200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Dr. Suyadi, S.T., M.T.



Sekretaris

: Hasti Riakara Husni, S.T., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing

: Dr. Eng. Mohd Isneini, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 29 April 2026

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, pada tanggal 7 Desember 2003. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Marjuni Usman dan Ibu Mila Anggeraini, serta memiliki satu saudara perempuan yang bernama Aliza Nurfadila, serta memiliki satu saudara laki-laki yang bernama Muhammad Khaidir Ali.

Penulis menempuh pendidikan di TK Ar-Raudah yang diselesaikan pada tahun 2010, lalu dilanjutkan Pendidikan Tingkat Dasar di SD Global Suyra yang diselesaikan pada tahun 2016, lalu dilanjutkan Pendidikan Tingkat Pertama di SMP Negeri 2 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2019, dan dilanjutkan Pendidikan Menengah Atas di SMA Negeri 2 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2022.

Penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri) pada tahun 2022. Selama menjadi mahasiswa, penulis berperan aktif di dalam organisasi HIMATEKS UNILA (Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung) sebagai Anggota Departemen Sumber Daya Manusia pada periode 2023- 2024 dan 2024-2025. Pada tahun 2025 penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode I di Desa Kelawi, Kecamatan Bakauheni, Kabupaten Lampung Selatan selama 30 hari, yaitu pada Januari-Februari 2025. Kemudian, penulis juga melaksanakan Kerja Praktik (KP) pada Proyek Pembangunan Masjid Nuurul Atsar II Bandar Lampung selama 3 bulan terhitung sejak Mei – Agustus 2025. Mulai pada tahun 2025 juga, penulis melakukan penelitian yang berjudul “Analisis Pengaruh *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Bars* Terhadap Kapasitas Lentur Dan Geser Balok Beton Bertulang Sebagai Pengganti Tulangan Baja” sebagai tugas akhir dan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil'alamin dengan ridho-Mu ya Allah Akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan. Semoga dengan terselesainya skripsi ini dapat menjadikanku insan yang berguna dan bermanfaat.

Ku persembahkan skripsi ini untuk:

Kedua orang tuaku tercinta, Bapak Marjuni Usman dan Ibu Mila Anggeraini, yang selalu mendoakan, mendukung, dan memberikan kasih sayang tanpa henti. Terima kasih atas segala pengorbanan dan doa yang tak pernah putus.

Untuk adik-adikku, Aliza Nurfadila dan Muhammad Khaidir Ali.

Untuk Niyai, Almh. Nurlela serta seluruh keluarga yang senantiasa memberikan semangat dan dukungan.

Untuk Bapak dan Ibu dosen pembimbing serta penguji atas bimbingan dan ilmu yang telah diberikan.

Serta untuk sahabat dan rekan seperjuangan Teknik Sipil Angkatan 2022 yang telah bersama-sama melewati masa perkuliahan dengan penuh kebersamaan.

MOTTO

“There’s always a loophole”

“ $6+3=9$ but so does $5+4$. The way you do things is not always the only way to do them. Respect other people’s way of thinking”

“Trust His timing. Trust Him.”

“Qué Será, Será”

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT karena atas rahmat dan karunianya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyelesaikan skripsi ini.

Skripsi dengan judul “Analisis Pengaruh *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) *Bars* Terhadap Kapasitas Lentur Dan Geser Balok Beton Bertulang Sebagai Pengganti Tulangan Baja” adalah syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah penulis, panutan hidup penulis dan alasan penulis berada di titik ini, Bapak Marjuni Usman. *The one who will move mountains for me*. Terima kasih atas segala pengorbanan dan dedikasi yang telah Ayah berikan untuk keluarga, serta atas rasa aman yang selalu Ayah hadirkan dalam hidup penulis. Berkat itu, penulis tumbuh dengan keyakinan bahwa penulis mampu menghadapi dan menaklukkan setiap tantangan yang datang karena penulis anak perempuan ayah. *I am proud to have you as my father. Ayah, this degree is solely for you.*
2. Bunda penulis, *the anchor of my existence and my heaven*, Ibu Mila Anggeraini. Terima kasih karena selalu percaya kepada penulis. Bunda adalah ketenangan di tengah setiap kekacauan dan solusi dalam setiap permasalahan. Setiap langkah yang penulis tempuh tidak akan mungkin terjadi tanpa dukungan Bunda. *I am blessed to have you as my mother. Bunda, my life will always be dedicated to you.*
3. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M, selaku Rektor Universitas Lampung sekaligus Dosen Teknik Sipil.
4. Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

5. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, sekaligus Dosen Pembimbing Akademik dan Dosen Pembimbing I yang sudah meluangkan waktunya dalam memberikan bimbingan dan arahan selama masa perkuliahan dan dalam proses penyelesaian skripsi. Saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas kebaikan hati, kesabaran, pengetahuan, ide, inspirasi, dan petunjuk yang sangat berharga, khususnya dalam proses penyelesaian skripsi ini. Saya berharap semua kebaikan yang telah Bapak berikan akan selalu membawa berkah bagi Bapak sekeluarga.
7. Ibu Hasti Riakara Husni, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II, terima kasih atas kebaikan hati, waktu, arahan, bimbingan, dan dukungan yang telah Ibu berikan sepanjang penyusunan skripsi ini.
8. Bapak Dr. Eng. Mohd Isneini, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji atas kesediaannya memberikan saran dan kritik, arahan, dan dukungan dalam pengerjaan skripsi ini.
9. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Sipil atas bekal dan ilmu pengetahuan yang telah diberikan.
10. Adik perempuan penulis, sahabat seumur hidup sekaligus yang selalu dapat penulis andalkan, Aliza Nurfadila. Terima kasih karena telah menjadi anak perempuan yang sempurna sehingga penulis tidak harus melakukannya. *I am lucky to have you as the yin to my yang. Or the Alex to my Haley.*
11. Adik laki-laki penulis, sumber kebahagiaan sekaligus teman dalam banyak hal keren, Muhammad Khaidir Ali. Terima kasih telah menjadi kepingan *puzzle* terakhir dalam keluarga. *You complete us. I am grateful to have you as my brother.*
12. Sahabat penulis, *my sagi partner*, Elsa Aliyyah Hidayat. Terima kasih telah membuat hidup penulis terasa lebih ringan. Dukungan dan kepercayaanmu kepada penulis telah menyelamatkan penulis lebih banyak kali daripada yang dapat penulis hitung. *Els, I am glad we crossed path almost a decade ago.*

13. Sahabat penulis, *my go to person*, Yessa Rahmadini Putri. Terima kasih atas setiap tawa, cerita-cerita seru, dan keputusan spontan; hidup terasa lebih menyenangkan bersamamu. Perjalanan kita, baik ke kafe maupun ke luar kota, adalah hal-hal yang membuat penulis tetap bertahan saat berada di titik terendah. Lay, *I am glad we were chairmates back in Smanda*.
14. Victoria Vanco, Rian, Elsa, Tisa, Karisya, Anisya, Adira, Regina, dan Nia. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan hidup penulis sejak SMP, untuk setiap kenangan yang kita ciptakan, dan karena telah mengajarkan penulis arti persahabatan yang sesungguhnya.
15. IMYTSYSM, Yessa, Salsa, dan Rian. Yang telah kebersamai penulis sejak SMA. Meskipun terpisah jarak, terima kasih atas setiap obrolan, tawa, dan energi positif yang membuat penulis bisa melewati setiap semester.
16. PONG for pdd, Helen, Rina, dan Daffa. Terima kasih telah menjadi bagian penting dalam kehidupan kampus penulis, untuk setiap kenangan yang kita buat di antara kelas dan kegiatan kampus, dan untuk setiap nasihat dan bantuan sehingga penulis dapat bertahan dan menyelesaikan gelar ini.
17. Teman kampus penulis, Amau, Bapet, King, Acayo, Mahathir, Adhen, dan seluruh TEGAS 22. Terima kasih atas segala kebaikan, canda tawa, kepedulian, dan bantuan selama masa perkuliahan.
18. *For the most important thank you, I would like to dedicate it to myself*, Siti Nurhaliza. *I know you will, congratulations*.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, besar harapan semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat dalam bidang teknik sipil.

Bandar Lampung, 09 April 2026

Penulis,

Siti Nurhaliza
NPM. 2215011045

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Balok Beton Bertulang	6
2.1.1 Perilaku Balok Beton Bertulang Terhadap Lentur.....	6
2.1.2 Perilaku Balok Beton Bertulang Terhadap Geser	7
2.1.3 Peran Tulangan Baja Dalam Menahan Gaya Tarik.....	7
2.1.4 Peran Tulangan Baja Dalam Menahan Gaya Geser.....	8
2.2 CFRP Bars	8
2.2.1 Komposisi	9
2.2.2 Sifat Mekanik	10
2.2.3 Keunggulan dan Keterbatasan.....	10
2.2.4 Perbandingan Sifat Mekanik CFRP dan Baja	11
2.2.5 Ikatan antara CFRP dan beton.....	13
2.3 Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang	14
2.3.1 Mekanika Lentur	14
2.3.2 Teori dasar Perhitungan Lentur.....	16
2.3.3 Faktor Reduksi Kekuatan Lentur	19
2.4 Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang	19
2.4.1 Mekanika Geser	19
2.4.2 Teori Dasar Perhitungan Geser	22
2.4.3 Faktor Reduksi Kekuatan Geser.....	24
2.5 Kerangka teori dan konsep analitis	25
3.5.1 Persamaan Beban Terfaktor dan Gaya Dalam	25
2.5.2 Rumus Dasar Regangan dan Keseimbangan Gaya	27

2.5.3	Asumsi Dasar Analisis	32
2.5.4	Persamaan Momen Nominal, Geser Nominal, Rasio Tulangan Seimbang, dan Regangan Batas	33
III.	METODOLOGI PENELITIAN	40
3.1	Jenis dan Pendekatan Penelitian	40
3.2	Variabel Penelitian	41
3.2.1	Variabel Bebas (<i>Independent Variables</i>)	41
3.2.2	Variabel Terikat (<i>Dependent Variables</i>)	41
3.2.3	Variabel Kendali (<i>Control Variables</i>)	42
3.3	Lokasi dan Waktu Penelitian	43
3.4	Alat dan Bahan	43
3.4.1	Alat	43
3.4.2	Bahan	43
3.5	Metode Pengumpulan Data	44
3.5.1	Studi Literatur	44
3.5.2	Ekstraksi Data Material	44
3.6	Prosedur Penelitian	44
3.6.1	Pemodelan Penampang	44
3.6.2	Analisis Kapasitas Lentur	46
3.6.3	Analisis Kapasitas Geser	47
3.6.4	Identifikasi Mode Kegagalan	48
3.7	Komparasi Hasil Dengan Literatur	49
3.8	Diagram Alir	50
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	51
4.1	Data dan Parameter Analisis	51
4.2	Analisis Kapasitas Lentur	54
4.3	Analisis Kapasitas Geser	67
4.4	Pembahasan Hasil Analisis	82
4.4.1	Pengaruh Jenis Tulangan dan Dimensi Balok terhadap Kapasitas Lentur	82
4.4.2	Pengaruh Jenis Tulangan dan Dimensi Balok terhadap Kapasitas Geser	87
4.4.3	Evaluasi Mode Keruntuhan sebagai Dasar Pendekatan Desain Balok Bertulangan CFRP	92
4.4.4	Perbandingan Dalam Implikasi Desain	93
V.	PENUTUP	95
5.1	Kesimpulan	95
5.2	Saran	96
	DAFTAR PUSTAKA	97

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Sifat Mekanis Polimer Yang Diperkuat Serat (FRP)	10
2. Sifat tarik khas batang tulangan	12
3. Tipikal Densitas Batang Tulangan, lb/ft ³ (g/cm ³)	12
4. Faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial	19
5. Data Geometri Balok.....	52
6. Data Material untuk Beton, Baja, dan CFRP <i>Bars</i>	53
7. Data Beban Balok	53
8. Jumlah batang untuk perhitungan kapasitas lentur balok beton bertulangan baja.....	56
9. Hasil Perhitungan Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulangan Baja.....	60
10. Jumlah batang untuk menghitung kapasitas lentur balok beton bertulangan CFRP.....	62
11. Hasil Perhitungan Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulangan CFRP	66
12. Hasil Perhitungan Kapasitas Geser Balok Bertulangan Baja.....	73
13. Hasil Perhitungan Kapasitas Geser Balok Bertulangan CFRP	81
14. Deviasi Kapasitas Lentur Balok Bertulangan CFRP Terhadap Balok Bertulangan Baja Bentang 6 m	86
15. Deviasi Kapasitas Geser Balok Bertulangan CFRP Terhadap Balok Bertulangan Baja Bentang 6 m	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Jenis-Jenis FRP Bars	2
2. Proses pembuatan <i>Carbon Fiber Reinforced Bars</i>	9
3. CFRP <i>rebar</i>	9
4. Komponen CFRP <i>Bars</i>	9
5. Perbandingan antara FRP (kurva tegangan-regangan) dan baja konvensional .	13
6. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Balok	14
7. Kurva redistribusi beban versus momen untuk balok dengan berbagai jenis tulangan	15
8. Diagram regangan dan tegangan penampang persegi panjang FRP	18
9. Permodelan Balok Beton Bertulang	45
10. Permodelan Penampang Balok Beton Bertulang	45
11. Diagram Alir Penelitian	50
12. Skema Balok Beton Bertulang dan Distribusi Tegangan.....	51
13. Skema Distribusi Tulangan Longitudinal Baja	59
14. Skema Distribusi Tulangan Longitudinal CFRP	65
15. Skema Distribusi Sengkang	72
16. Skema Distribusi Sengkang	80
17. Hubungan Σ Tulangan Terhadap Kapasitas Lentur Pada Balok 350 x 500	82
18. Hubungan Σ Tulangan Terhadap Kapasitas Lentur Pada Balok 400 x 550	83
19. Hubungan Σ Tulangan Terhadap Kapasitas Lentur Pada Balok 450 x 600	83
20. Hubungan Σ Tulangan Terhadap Kapasitas Lentur Pada Balok 500 x 650	84
21. Hubungan Σ Tulangan Terhadap Kapasitas Lentur Pada Balok 550 x 700	84
22. Hubungan Σ Tulangan Terhadap Kapasitas Geser Pada Balok 350 x 500	87
23. Hubungan Σ Tulangan Terhadap Kapasitas Geser Pada Balok 400 x 550	88
24. Hubungan Σ Tulangan Terhadap Kapasitas Geser Pada Balok 450 x 600	88
25. Hubungan Σ Tulangan Terhadap Kapasitas Geser Balok Pada 500 x 650	89
26. Hubungan Σ Tulangan Terhadap Kapasitas Geser Pada Balok 550 x 700	89

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton bertulang banyak digunakan karena fleksibilitas dan kemudahan konstruksinya, namun masalah korosi pada batang baja dan berat jenis beton yang tinggi dapat menurunkan kinerja jangka panjang serta meningkatkan beban mati struktur, terutama pada bentang panjang (Pramudhita & Buwono, 2019; Rady et al., 2022; Zhao et al., 2022). Kondisi tersebut mendorong kebutuhan material alternatif yang lebih ringan, kuat, dan tahan korosi untuk meningkatkan efisiensi dan umur layanan struktur.

Dalam beberapa dekade terakhir, berbagai jenis *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) yang dapat dilihat pada Gambar 1—seperti *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP), *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), *Aramid Fiber Reinforced Polymer* (AFRP), dan *Basalt Fiber Reinforced Polymer* (BFRP)—dikembangkan sebagai pengganti tulangan baja karena sifatnya yang tahan korosi, ringan, dan memiliki kekuatan tarik tinggi (Karayannis et al., 2018). Serat kaca merupakan salah satu jenis yang paling umum digunakan dan bersifat isotropik, dengan beberapa variasi populer seperti E-Glass, S-Glass, C-Glass, dan AR-Glass yang masing-masing memiliki keunggulan tertentu sesuai kebutuhan aplikasi. Berbeda dengan serat kaca, serat karbon bersifat anisotropik secara alami dan diproduksi melalui proses pemanasan pada suhu tinggi sekitar 1300 °C, sehingga memiliki kekuatan dan kekakuan yang tinggi. Serat aramid juga bersifat anisotropik dan umumnya berwarna kuning, serta lebih dikenal di pasaran dengan nama Kevlar karena ketahanannya terhadap gaya tarik dan impact. Selain itu, terdapat serat basal yang berasal dari batuan beku hasil pendinginan cepat

lava di permukaan bumi dan digunakan sebagai alternatif material komposit karena memiliki ketahanan yang baik terhadap suhu dan lingkungan agresif. (Shakir Abbood et al., 2021).



Gambar 1. Jenis-Jenis FRP Bars
(Sumber: Shakir Abbood et al., 2021)

CFRP menjadi yang paling unggul karena kekuatan tarik dan kinerja fatik tinggi, densitas rendah, serta modulus elastisitas yang relatif mendekati beton. Komposit CFRP bahkan mampu mencapai kekuatan tarik hingga 3,9 GPa dan modulus 784 GPa, serta sangat tahan terhadap lingkungan kimia, sehingga memiliki potensi besar sebagai pengganti baja (Bakar et al., 2022; Tran et al., 2025; Zhao et al., 2022).

Penelitian global dan lokal menunjukkan bahwa penggunaan CFRP pada beton bertulang dapat meningkatkan kapasitas lentur balok, yaitu kemampuan maksimum penampang menahan momen sebelum gagal, yang dipengaruhi oleh kuat tekan beton, jenis dan jumlah tulangan, serta posisi garis netral. Namun, beberapa hasil eksperimen melampaui prediksi standar seperti ACI 440.1R-15 dan CSA S806-12 yang dianggap konservatif (Bakar et al., 2022; Layang & Eliatun, 2024; Rada & Aptiyasa, 2025).

Pada aspek geser, yaitu kemampuan elemen menahan gaya yang dapat menyebabkan retak diagonal, balok dengan tulangan CFRP menunjukkan

mekanisme berbeda dari baja karena modulus elastisitasnya berada di antara GFRP/BFRP dan baja, sehingga lebih rentan terhadap retak geser dini jika pengekangan tidak memadai. Selain itu, kualitas ikatan CFRP–beton sangat memengaruhi distribusi tegangan, lebar retak, dan kapasitas geser keseluruhan (Dziomdziora & Smarzewski, 2025; Evan C et al., 2006; Muttoni & Fernández Ruiz, 2019; Tran & Nguyen-Thoi, 2025; Zhang et al., 2024).

Di Indonesia, SNI 2847:2019 masih berfokus pada tulangan baja konvensional dan belum mengatur penggunaan CFRP secara rinci. Meskipun SNI 8970:2021 mulai mengakomodasi FRP, standar ini belum menyediakan metode perhitungan yang komprehensif untuk kapasitas lentur maupun geser. Oleh karena itu, penelitian mengenai balok beton bertulangan CFRP dianalisis menggunakan SNI 2847:2019 dan ACI 440.1R-15 untuk menilai kelayakan penggantian baja sekaligus mengisi kekosongan regulasi nasional. Evaluasi dilakukan untuk menghasilkan dasar ilmiah yang akurat dan rekomendasi desain yang aman, sehingga dapat mendukung pembaruan standar nasional menuju struktur beton yang lebih efisien, inovatif, dan tahan degradasi jangka panjang.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kapasitas lentur dan geser balok beton bertulangan dengan tulangan CFRP dibandingkan dengan balok beton bertulangan baja berdasarkan ketentuan perencanaan yang berlaku?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan tulangan CFRP sebagai pengganti tulangan baja terhadap nilai kapasitas momen nominal, kapasitas geser, dan mode keruntuhan balok beton bertulangan?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang dengan tulangan baja berdasarkan SNI 2847:2019 serta balok beton bertulangan CFRP berdasarkan ACI 440.1R-15 sesuai standar keamanan yang ada di Indonesia.
2. Menganalisis pengaruh penggunaan tulangan CFRP sebagai pengganti tulangan baja terhadap kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang.
3. Membandingkan kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang baja dan balok beton bertulangan CFRP untuk mengetahui perbedaan perilaku dan mode keruntuhan yang terjadi.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi agar fokus dan terarah pada aspek tertentu. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis CFRP yang dikaji adalah batang CFRP (*internal reinforcement*), bukan lembar atau perkuatan eksternal.
2. Analisis dilakukan pada balok sederhana dengan variasi rasio tulangan berbeda.
3. Perhitungan dan evaluasi desain mengacu pada SNI 2847:2019, dengan modifikasi bila data CFRP belum tercantum dalam SNI.
4. Sifat mekanik CFRP (modulus elastis, regangan ultimit, sifat ikatan) diasumsikan berdasarkan data literatur bila data lokal tidak tersedia.
5. Tidak dilakukan pengujian laboratorium, seluruh perhitungan bersifat teoritis dan numerik.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Diharapkan menambah literatur dan pengetahuan mengenai analisis beton bertulang dengan tulangan alternatif berdasarkan standar nasional.
2. Diharapkan memberikan pemahaman tentang pendekatan perhitungan lentur dan geser menggunakan material nonkonvensional.
3. Diharapkan memberikan referensi bagi praktisi teknik sipil mengenai potensi penggunaan tulangan komposit dalam struktur beton.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang landasan teori sebagai penunjang penelitian yang akan dilakukan.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi uraian mengenai gambaran umum dan metode yang akan digunakan untuk memperoleh data – data yang dibutuhkan.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil pengumpulan data, pengolahan data, analisis serta pembahasan data berdasarkan teori yang ada.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang merupakan hasil dari pembahasan yang didapat dari pengolahan data dan saran dari hasil tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Balok Beton Bertulang

Beton bertulang adalah material komposit dari beton dan baja tulangan, biasanya berupa baja polos (BJTP) atau baja ulir (BJTD). Beton menanggung gaya tekan, sedangkan kelemahan tariknya diatasi oleh baja tulangan yang memiliki kuat tarik tinggi, sehingga keduanya bekerja secara bersamaan (Putra et al., 2020; Solehudin & Walujodjati, 2021). Dalam konstruksi, balok beton bertulang berfungsi menyalurkan beban dari pelat lantai ke kolom sebagai penyangga vertikal (Karyanto & Sabariman, 2022).

2.1.1 Perilaku Balok Beton Bertulang Terhadap Lentur

Beton bertulang populer karena kekuatan, daya tahan, dan efisiensi biaya, namun kerusakan ikatan baja–beton akibat beban berlebih, korosi, atau kelelahan dapat menurunkan kinerja lentur (R. Li & Aboutaha, 2025). Variasi jumlah tulangan dapat menyebabkan keruntuhan tarik, tekan, atau seimbang (Andrean et al., 2015). Kapasitas lentur balok dipengaruhi dimensi penampang dan jumlah tulangan, karena balok menahan momen lentur dan gaya geser (Muaja et al., 2018). Lentur terjadi akibat regangan dari beban luar yang menimbulkan deformasi dan retak sepanjang bentang, dengan kekuatan lentur nominal tercapai saat regangan beton tepi tekan $\epsilon_{cu} = 0,003$ (Frans, 2019; Karyanto & Sabariman, 2022).

2.1.2 Perilaku Balok Beton Bertulang Terhadap Geser

Gaya geser pada balok beton bertulang timbul akibat kombinasi gaya lintang dan momen yang bekerja secara bersamaan. Pada kondisi pembebanan, tegangan geser menyebabkan terbentuknya retak diagonal, biasanya pada daerah antara tumpuan dan beban terdekat. Menurut SNI 2847:2019, mekanisme geser pada balok melibatkan interaksi antara beton, tulangan longitudinal, dan tulangan geser (sengkang), yang bekerja bersama untuk menahan gaya lintang (BSN, 2019).

Penelitian Megalooikonomou & Beligiannis, 2025 menunjukkan bahwa retak geser terjadi sebagai respons terhadap distribusi tegangan utama yang miring, dan perilaku geser sangat dipengaruhi oleh kekuatan tekan beton, jumlah tulangan longitudinal, serta tingkat kekangan internal.

2.1.3 Peran Tulangan Baja Dalam Menahan Gaya Tarik

Beton memiliki kuat tekan tinggi namun kuat tarik rendah dan bersifat getas, sehingga diperlukan tulangan baja untuk menahan gaya tarik yang tidak dapat ditahan beton (Karyanto & Sabariman, 2022). Tulangan baja berperan menahan gaya tarik dan sebagian gaya tekan dalam beton bertulang (Putra et al., 2020). Saat beton mengalami pembebanan lentur, bagian bawah penampang menahan tarik oleh baja dan bagian atas menahan tekan oleh beton (Zeybek et al., 2022). Setelah retak awal, gaya tarik berpindah dari beton ke baja melalui ikatan (*bond*), yang efektivitasnya dipengaruhi oleh kekuatan dan panjang ikatan, *cover* beton, serta konfigurasi tulangan (Shunmuga Vembu & Ammasi, 2023).

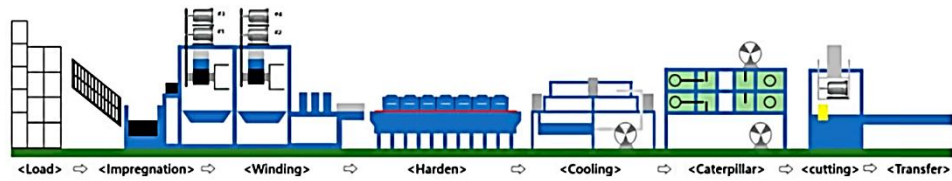
2.1.4 Peran Tulangan Baja Dalam Menahan Gaya Geser

Pada elemen beton bertulang, gaya geser tidak sepenuhnya dapat ditahan oleh beton karena sifat beton yang getas dan tidak mampu menahan tegangan tarik diagonal secara signifikan. SNI 2847:2019 menetapkan bahwa tulangan geser (stirrup) dari baja berfungsi untuk menahan tegangan tarik diagonal, membatasi lebar retak geser, serta meningkatkan daktilitas dan kapasitas *post-cracking* dari balok. Menurut SNI, kontribusi geser total balok terdiri dari kontribusi beton (V_c) dan kontribusi tulangan geser baja (V_s), di mana V_s dihitung berdasarkan mekanisme truss model, yakni tulangan baja bekerja untuk menyekang retak miring sehingga mampu membawa gaya tarik diagonal secara berulang (BSN, 2019).

2.2 CFRP Bars

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) bars seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3 adalah material komposit terdiri dari resin dan serat karbon (Z. Wang et al., 2024). Berdasarkan ACI 440.1R-15, CFRP bersifat anisotropik, memiliki kekuatan tarik tinggi (1.200–2.400 MPa), modulus elastisitas besar (150–300 GPa), dan regangan ultimit rendah (± 1 –1,7%), dengan perilaku linier-elastik hingga putus tanpa fase leleh (American Concrete Institute, 2015).

Karena biaya produksinya tinggi (\$5–15/m untuk $\varnothing 10$ mm) akibat proses serat karbon yang kompleks seperti yang terlihat pada Gambar 2, penggunaannya terbatas pada proyek khusus seperti jembatan atau struktur di lingkungan agresif (Dziomdziora & Smarzewski, 2025). Selain itu, beton bertulang CFRP efektif mengatasi interferensi elektromagnetik sehingga cocok untuk ruang MRI dan fasilitas penelitian (Bakar et al., 2022).



Gambar 2. Proses pembuatan *Carbon Fiber Reinforced Bars*
(Sumber: Kim et al., 2022)

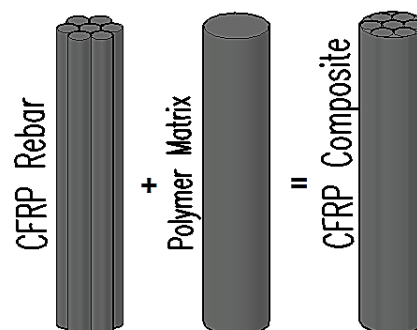


Gambar 3. CFRP rebar

(Sumber: <https://www.rhinocarbonfiber.com/composite-rebar>)

2.2.1 Komposisi

Batang CFRP umumnya terdiri dari serat karbon kontinu yang tertanam dalam matriks polimer seperti epoksi atau vinil ester (Dziomdziora & Smarzewski, 2025) seperti pada Gambar 4. Serat karbon sendiri memiliki harga sekitar \$20–33/kg dan dikenal ringan, sangat kuat, serta tahan korosi, sehingga dianggap sebagai pengganti baja yang menjanjikan (L. Wang et al., 2020).



Gambar 4. Komponen CFRP Bars

(Sumber: <https://www.rhinocarbonfiber.com/composite-rebar>)

Batang CFRP umumnya memiliki rasio serat terhadap resin yang tinggi, sehingga menghasilkan kekakuan dan kekuatan tarik yang sangat baik (Dziomdziora & Smarzewski, 2025).

2.2.2 Sifat Mekanik

Batang CFRP memiliki kekuatan tarik tinggi, kinerja fatik baik, densitas rendah, serta modulus elastisitas yang mendekati beton, menjadikannya material dengan potensi aplikasi struktural yang besar (Zhao et al., 2022). Sifat-sifat mekanis batang polimer yang diperkuat serat (FRP) dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Mekanis Polimer Yang Diperkuat Serat (FRP)

Type of Bars	Density (kg/m ³)	Tensile Strength (MPa)	Young Modulus (GPa)	Price (USD/kg)	Melting Point (°C)	Number of Specimens
GFRP	1250 - 2500	483 - 4890	35 - 86.9	1.75	880	67 (72%)
CFRP	1500 - 2100	600 - 3900	37 - 784	11.7	1600	22 (23.7%)
BFRP	2630 - 2800	Up to 4840	40 - 110	7.6	1500 - 1700	2 (2.15%)
AFRP	1250 - 1450	1700 - 3600	41 - 175	-	500	2 (2.15%)
Steel	7850	250 - 690	200	0.6	1300- 1600	-

(Sumber: Tran et al., 2025)

2.2.3 Keunggulan dan Keterbatasan

Batang *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) banyak digunakan dalam konstruksi karena kekuatan tarik tinggi, bobot ringan, dan ketahanan korosi, sehingga menjadi alternatif tulangan yang lebih tahan lama dibanding baja konvensional (Angeli et al., 2024). CFRP juga diaplikasikan di industri kedirgantaraan, otomotif, dan robotik karena

modulus elastisitas tinggi serta rasio kekuatan terhadap berat yang besar (Tran et al., 2025). Namun, penggunaannya masih terbatas akibat biaya material tinggi dan emisi karbon besar dibanding baja atau FRP lainnya (Dziomdziora & Smarzewski, 2025). Jika kendala ini teratasi, CFRP berpotensi menjadi material konstruksi masa depan yang efisien, kuat, dan tahan lama (Tran et al., 2025).

2.2.4 Perbandingan Sifat Mekanik CFRP dan Baja

A. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas CFRP lebih rendah dari baja, tetapi tiga hingga empat kali lebih tinggi dari GFRP dan memiliki kekuatan jauh lebih besar dibanding GFRP maupun AFRP (Karayannis et al., 2018). Karena modulus elastisitas BFRP dan GFRP jauh lebih rendah dari baja, ketahanan deformasinya juga lebih rendah, sehingga CFRP dengan modulus yang mendekati baja dianggap lebih ideal (Deng et al., 2023). Sesuai ACI 440.1R-15, modulus elastisitas desain FRP ditetapkan sama dengan nilai rata-rata yang dilaporkan oleh produsen (American Concrete Institute, 2015). Nilai modulus elastisitas tulangan dapat dilihat pada Tabel 2.

B. Kekuatan tarik

Berdasarkan ACI 440.1R-15, kekuatan tarik (*tensile strength*) batang CFRP berkisar antara 600–3.690 MPa, jauh lebih tinggi dibandingkan baja konvensional yang hanya 483–690 MPa, bahkan dapat mencapai 4 sampai 6 kali lipat tergantung jenis dan orientasi seratnya. Temuan ini konsisten dengan Dziomdziora & Smarzewski (2025) yang melaporkan kekuatan tarik CFRP hingga 2.700 MPa, sekitar empat kali lebih tinggi dari baja (≈ 600 MPa), menjadikannya sangat potensial sebagai tulangan alternatif pada

lingkungan berkondisi korosif (Dziomdziora & Smarzewski, 2025). Nilai kuat tarik batang tulangan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat tarik khas batang tulangan

	Steel	GFRP	CFRP	AFRP
Nominal yield stress, ksi (MPa)	40 to 75 (276 to 517)	NA	NA	NA
Tensile strength, ksi (MPa)	70 to 100 (483 to 1600)	70 to 230 (483 to 690)	87 to 535 (600 to 3690)	250 to 368 (1720 to 2540)
Elastic modulus, x 10 ³ ksi (GPa)	29.0 (200.0)	5.1 to 7.4 (35.0 to 51.0)	15.9 to 84.0 (120.0 to 580.0)	6.0 to 18.2 (41.0 to 125.0)
Yield strain, percent	0.14 to 0.25	NA	NA	NA
Rupture strain, percent	6.0 to 12.0	1.2 to 3.1	0.5 to 1.7	1.9 to 4.4

(Sumber: American Concrete Institute, 2015)

C. Densitas

Batang polimer berpenguat serat memiliki densitas 77,8–131,3 lb/ft³ (1,25–2,1 g/cm³), yaitu hanya seperenam hingga seperempat dari densitas baja, sehingga lebih ringan, mengurangi biaya transportasi, dan mempermudah penanganan di lapangan (American Concrete Institute, 2015). Nilai densitas dapat dilihat pada Tabel 3.

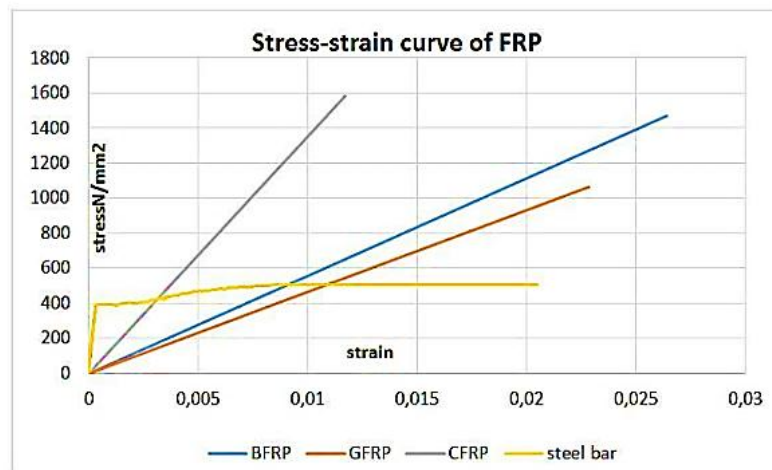
Tabel 3. Tipikal Densitas Batang Tulangan, lb/ft³ (g/cm³)

Steel	GFRP	CFRP	AFRP
439.00 (7.90)	77.8 to 131.00 (1.25 to 2.10)	93.3 to 100.00 (1.50 to 1.60)	77.80 to 88.10 (1.25 to 1.40)

(Sumber: American Concrete Institute, 2015)

D. Daktilitas

Daktilitas dinilai berdasarkan kemampuan material mengalami regangan besar sebelum kehilangan kekuatannya. Gambar 5 menunjukkan bahwa baja bersifat daktil dengan kurva tegangan–regangan yang memiliki daerah plastis sebelum patah, sedangkan FRP (CFRP, GFRP, BFRP) bersifat getas karena kurvanya linier hingga patah. Pada beton bertulang baja, luluhnya baja memberi daktilitas dan peringatan kegagalan, sedangkan pada FRP yang tidak daktil, diperlukan pendekatan desain berbeda (American Concrete Institute, 2015).



Gambar 5. Perbandingan antara FRP (kurva tegangan-regangan) dan baja konvensional (Sumber: Ghobashy et al., 2023)

2.2.5 Ikatan antara CFRP dan beton

Ikatan antara beton dan batang FRP sangat penting dalam pemindahan beban dan perilaku balok FRP-RC, yang dijelaskan melalui hubungan tegangan–slip (sm), di mana kekuatan ikatan dipengaruhi oleh diameter batang, selimut beton, kuat tekan beton, panjang ikatan, dan kondisi permukaan (Tran et al., 2025). Pada balok CFRP, kekuatan ikatan menjadi faktor penentu kapasitas lentur maksimum, namun belum

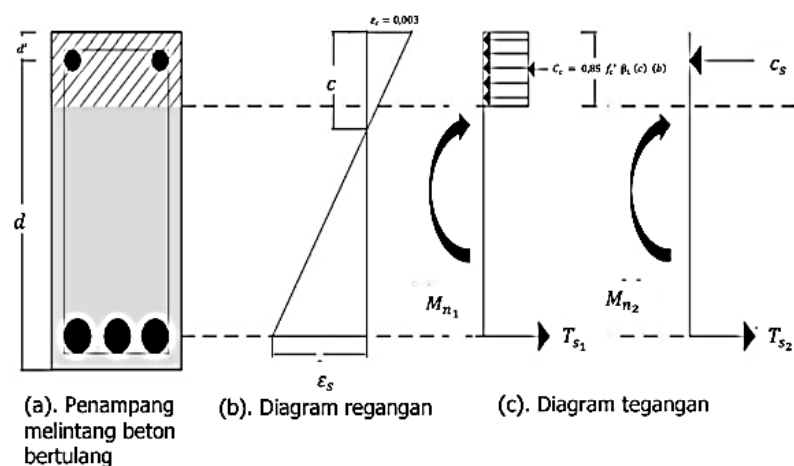
tersedia model terpadu untuk menentukan kebutuhan minimum kekuatan ikatan (Bakar et al., 2022), sementara perlakuan permukaan seperti *ribbing* atau pelapisan pasir terbukti meningkatkan kekuatan ikatan dan efisiensi perpindahan beban (Dziomdziora & Smarzewski, 2025).

2.3 Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang

2.3.1 Mekanika Lentur

A. Tegangan-Regangan

Hubungan tegangan–regangan menjelaskan respons material terhadap beban hingga kegagalan. Beton bersifat nonlinier pada tekan, dengan tegangan maksimum pada regangan $\pm 0,002$ dan hancur pada 0,003, sedangkan kekuatannya kecil dan diabaikan; untuk penyederhanaan digunakan blok tegangan persegi panjang Whitney yang dapat dilihat pada Gambar 6. dengan asumsi bidang tetap datar setelah pembebanan (Zhou et al., 2014; BSN, 2019).

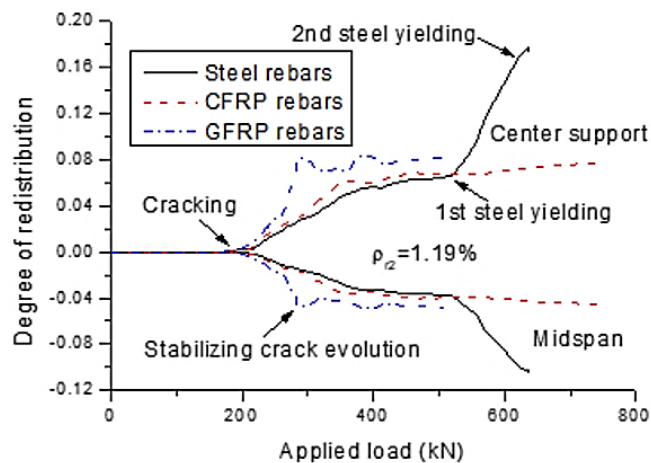


Gambar 6. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Balok

(Sumber: Khrisna et al., 2015)

B. Redistribusi Momen

Redistribusi momen dipengaruhi oleh daktilitas penampang kritis yang ditentukan oleh rasio kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman efektif sesuai sifat material dan geometri (L. Li et al., 2019). Fenomena ini terjadi setelah retak awal, meningkat hingga jenuh, kemudian stabil hingga kegagalan; pada balok baja redistribusi meningkat cepat setelah baja luluh, sedangkan pada balok FRP tidak diperbolehkan karena perilaku materialnya linier-elastik hingga putus tanpa pembentukan sendi plastis (American Concrete Institute, 2015; Lou et al., 2021). Kurva redistribusi momen dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva redistribusi beban versus momen untuk balok dengan berbagai jenis tulangan (Sumber: Lou et al., 2021)

C. Kegagalan Beton-Baja

Perilaku kegagalan elemen beton bertulang dipengaruhi oleh geometri, konfigurasi tulangan, efektivitas kekangan, dan riwayat pembebanan (Megalooikonomou & Beligiannis, 2025), dengan beton yang getas dan tulangan baja yang daktil karena mengalami leleh sebelum gagal (Karyanto & Sabariman, 2022). Kegagalan

umumnya terbagi menjadi keruntuhan lentur dan geser (Andreas et al., 2015).

keruntuhan lentur diklasifikasikan menjadi *under-reinforced*, *balanced*, dan *over-reinforced*, di mana *under-reinforced* ($\rho < \rho_b$) memberi daktilitas karena baja leleh lebih dulu, sedangkan *over-reinforced* ($\rho > \rho_b$) menyebabkan beton hancur duluan dan bersifat getas, sementara *balanced failure* ($\rho = \rho_b$) terjadi saat regangan baja dan beton mencapai batas secara bersamaan (Khrisna et al., 2015; Karyanto & Sabariman, 2022; Andreas et al., 2015).

2.3.2 Teori dasar Perhitungan Lentur

A. Kompabilitas Regangan

Kompabilitas regangan menuntut bahwa regangan pada beton dan tulangan harus konsisten sepanjang penampang saat menghitung kekuatan nominal, di mana SNI 2847:2019 menetapkan regangan tekan maksimum beton sekitar 0,003–0,004 namun dapat mencapai lebih dari 0,008 berdasarkan kondisi material (BSN, 2019). Perbedaan perilaku material juga memengaruhi kompatibilitas ini: tulangan baja bersifat elastis-plastis dan daktil, sedangkan FRP/CFRP berperilaku linier-elastik hingga *rupture* dengan regangan ultimit rendah sekitar 1–1,7%, menjadikannya kuat namun getas (American Concrete Institute, 2015).

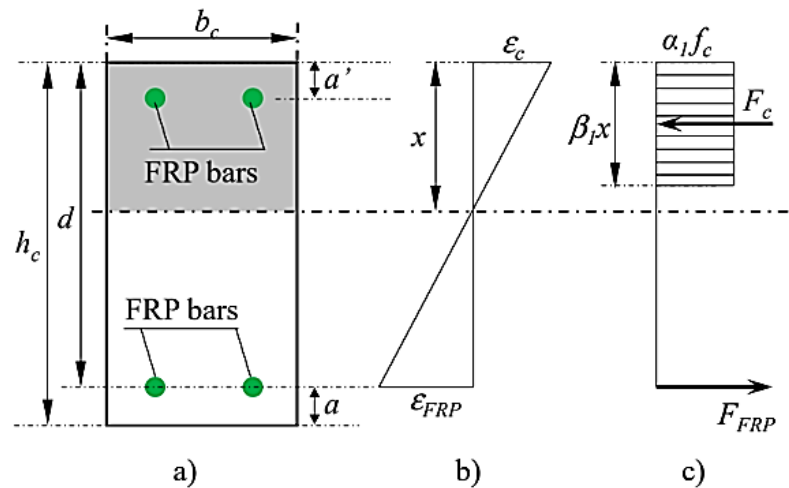
B. Keseimbangan Gaya

Keseimbangan gaya menjadi dasar perhitungan kapasitas lentur, di mana gaya tekan beton harus seimbang dengan gaya tarik tulangan agar penampang mencapai kondisi setimbang sebelum momen nominal. SNI 2847:2019 menyederhanakan distribusi tegangan

tekan beton dengan blok tegangan persegi panjang (*Whitney stress block*) untuk menentukan resultan gaya tekan dan kedalaman sumbu netral (BSN, 2019). ACI 440.1R-15 menerapkan prinsip serupa pada tulangan FRP/CFRP yang bersifat linier-elastik hingga *rupture*, dengan tegangan tarik dihitung dari modulus elastisitas dan regangan aktual, bukan tegangan leleh. Keseimbangan gaya ini menentukan posisi garis netral dan mode kegagalan—baik *crushing* beton maupun *rupture* FRP—tergantung pada rasio tulangan dan sifat material (American Concrete Institute, 2015).

C. Blok Tegangan

Distribusi tegangan tekan beton disederhanakan menggunakan blok tegangan Whitney, di mana SNI 2847:2019 menetapkan tegangan tekan rata-rata $0,85f_c$ dengan tinggi blok $a = \beta_1 c$, dan nilai β_1 menurun dari 0,85 untuk beton ≤ 28 MPa hingga 0,65 untuk > 56 MPa; gaya tekan bekerja pada $a/2$ dari serat tekan terluar dan harus seimbang dengan gaya tarik tulangan (BSN, 2019). Pada beton bertulang CFRP, ACI 440.1R-15 menerapkan konsep serupa tetapi mempertimbangkan sifat FRP yang elastis tinggi dan tidak daktil, sehingga posisi garis netral dan mode kegagalan—*crushing* beton atau *rupture* FRP—dipengaruhi oleh rasio tulangan dan kekakuan material; berbeda dengan baja yang tegangannya ditentukan oleh leleh, CFRP mengalami peningkatan tegangan linier hingga *rupture* (American Concrete Institute, 2015). Diagram tegangan FRP dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram regangan dan tegangan penampang persegi panjang FRP: (a) dimensi penampang; (b) distribusi regangan; (c) tegangan dan gaya penampang (ACI 440.1R)

(Sumber: (Tran & Nguyen-Thoi, 2025))

D. Kapasitas Momen Nominal (M_n)

Kapasitas momen nominal (M_n) ditentukan dari keseimbangan gaya tekan beton dan gaya tarik tulangan dengan asumsi distribusi regangan linier dan penggunaan blok tegangan persegi panjang Whitney (BSN, 2019). Pada baja, tegangan tarik mencapai f_y karena sifatnya yang daktil, sedangkan pada FRP/CFRP, tegangan dihitung sebagai $E_f \times \varepsilon_f$ dan dibatasi oleh ε_{fu} karena perilaku linier-elastik hingga *rupture* (American Concrete Institute, 2015). M_n dihitung dari gaya tekan atau tarik dikalikan lengan momennya, dengan mode kegagalan berupa *crushing* beton atau *rupture* FRP tergantung rasio tulangan. FRP menggunakan faktor reduksi kekuatan (ϕ) lebih rendah karena sifat getas materialnya. Walaupun prinsip analisis gaya dan kompatibilitas regangan sama, perbedaan perilaku material baja dan FRP menghasilkan variasi posisi garis netral, mode kegagalan, dan nilai ϕ (BSN, 2019; American Concrete Institute, 2015).

2.3.3 Faktor Reduksi Kekuatan Lentur

Menurut SNI 2847:2019, faktor reduksi ditentukan berdasarkan regangan tarik baja dan jenis tulangan seperti yang tertera pada Tabel 4.

Tabel 4. Faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial

Regangan tarik netto (ϵ_t)	Klasifikasi	ϕ	
		Jenis tulangan transversal	
		Spiral sesuai 25.7.3	Tulangan lainnya
$\epsilon_t \leq \epsilon_{ty}$	Tekanan terkontrol	0.75	0.65
$\epsilon_{ty} < \epsilon_t < 0,005$	Transisi	$0.75 + 0.15 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{0.005 - \epsilon_{ty}}$	$0.75 + 0.15 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{0.005 - \epsilon_{ty}}$
$\epsilon_t \geq 0,005$	Tegangan terkontrol	0.90	0.90

(Sumber: BSN, 2019)

Sedangkan pada ACI 440.1R-15, karena sifat getas FRP faktor reduksi dapat dihitung dengan persamaan (Tran & Nguyen-Tho, 2025):

$$\phi = \begin{cases} 0.55 & \text{for } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0.3 + 0.25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{for } \rho_{fb} < \rho_f < 1.4 \rho_{fb} \\ 0.65 & \text{for } \rho_f \geq 1.4 \rho_{fb} \end{cases}$$

Di mana ρ_f adalah rasio tulangan dan ρ_{fb} adalah rasio tulangan seimbang.

2.4 Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang

2.4.1 Mekanika Geser

A. Tegangan Geser

Pada balok beton bertulang, gaya geser menimbulkan tegangan geser yang bekerja bersamaan dengan tegangan lentur, sehingga respons

balok tidak hanya ditentukan oleh kapasitas lentur, tetapi juga oleh kemampuan mentransfer geser setelah retak terbentuk (Huber et al., 2019; Liang et al., 2023; Moussa et al., 2025).

Secara mekanistik, transfer geser terjadi melalui kombinasi kontribusi zona tekan beton yang belum retak, interlock agregat, tegangan tarik residual/bridging, aksi dowel tulangan memanjang, serta—jika ada—tulangan geser dan arching action pada rasio a/d kecil (Huber et al., 2019; Liang et al., 2023; Moussa et al., 2025; Zhao et al., 2024).

Pada balok bertulangan baja, daktilitas dan kekakuan aksial yang lebih tinggi membantu membatasi pelebaran retak sehingga interlock agregat dan aksi dowel tetap efektif setelah retak terbentuk (Huber et al., 2019; Zhao et al., 2024). Sebaliknya, pada balok bertulangan CFRP/FRP, modulus elastisitas yang lebih rendah dan kekuatan lateral yang lebih kecil cenderung menghasilkan retak lebih lebar dan deformasi lebih besar, sehingga kontribusi interlock agregat, tegangan tarik residual, dan terutama aksi dowel dapat berkurang (Liang et al., 2023; Moussa et al., 2025).

Meskipun komponen dasar mekanisme geser pada balok FRP tetap sama, perubahan sifat mekanik FRP menyebabkan redistribusi kontribusi antar-mekanisme dan meningkatkan sensitivitas terhadap parameter seperti rasio a/d , rasio tulangan memanjang, dan efek ukuran (Liang et al., 2023; Moussa et al., 2025; Zhao et al., 2024).

B. Pola Retak Geser

Pada balok beton bertulang, retak geser umumnya muncul setelah retak lentur dan berkembang menjadi retak diagonal ketika

kombinasi tegangan normal dan geser melampaui kapasitas beton pasca-retak (Huber et al., 2019; Liang et al., 2023).

Pada balok bertulangan baja dengan sengkang, sengkang membatasi pembukaan retak diagonal sehingga retak lebih tersebar dan kegagalan dapat bergeser dari mode geser getas menuju perilaku yang lebih duktail (Huber et al., 2019; Zhao et al., 2024).

Sebaliknya, pada balok bertulangan FRP/CFRP, retak cenderung lebih sedikit namun lebih lebar akibat kekakuan aksial yang lebih rendah, yang mempercepat degradasi mekanisme transfer geser berbasis interlock agregat dan tegangan tarik residual (Liang et al., 2023). Pada balok dengan sengkang FRP, retak diagonal tetap terjadi, tetapi kontrol lebarnya sangat dipengaruhi kekakuan sengkang dan detail penempatan, sementara prediksi desain sering bersifat konservatif karena kompleksitas mekanisme pasca-retak (Liang et al., 2023; Zhao et al., 2024).

C. Mode Keruntuhan Geser

Kegagalan geser pada balok beton bertulang umumnya tidak diinginkan karena bersifat cepat dan getas, dengan mode yang diklasifikasikan sebagai diagonal tension failure, shear-compression failure, atau kombinasi retak diagonal dan kerusakan zona tekan (Liang et al., 2023; Zhao et al., 2024).

Pada balok FRP, klasifikasi mode kegagalan secara konsep serupa dengan balok baja, namun probabilitas dan tingkat kegetasannya meningkat karena FRP tidak luluh dan retak diagonal cenderung lebih lebar (Liang et al., 2023; Moussa et al., 2025).

Untuk balok dengan sengkang FRP, dua mode dominan yang dilaporkan adalah putusnya sengkang FRP dan hancurnya beton di zona tekan dekat titik pembebanan atau ujung retak diagonal, menunjukkan bahwa kegagalan dapat dikendalikan oleh beton maupun elemen FRP tergantung pada konfigurasi (Liang et al., 2023; Zhao et al., 2024).

2.4.2 Teori Dasar Perhitungan Geser

A. Kontribusi Beton Terhadap Geser

Menurut SNI 2847:2019 Pasal 22.5, beton memiliki kemampuan inherent menahan sebagian gaya geser melalui interlock agregat, aksi dowel tulangan longitudinal, dan residual tensile strength beton (SNI 2847:2019, 2019). Kontribusi ini tidak hanya berasal dari tegangan geser elastis, tetapi merupakan hasil interaksi mekanisme pasca-retak setelah terbentuk retak diagonal (Jayasinghe et al., 2022).

Setelah retak geser terjadi, distribusi tegangan berubah dan gaya ditransfer melalui kombinasi interlock agregat, aksi dowel, serta zona tekan beton yang masih utuh (Nadir et al., 2018). Pada balok dengan tulangan FRP/CFRP, modulus elastisitas yang berbeda dari baja dapat menghasilkan retak lebih lebar sehingga kontribusi interlock agregat terhadap kapasitas geser relatif menurun dibandingkan balok bertulangan baja (Gao & Zhang, 2020).

B. Kontribusi Tulangan Geser (Sengkang)

Tulangan geser atau sengkang berfungsi menahan gaya tarik diagonal setelah retak geser terbentuk, karena beton tidak lagi mampu sepenuhnya memikul geser. Dalam mekanisme rangka

batang internal, sengkang berperan sebagai elemen tarik yang bekerja bersama strut tekan beton (Jayasinghe et al., 2022).

Pada balok bertulangan baja, sengkang dapat mengalami leleh sebelum runtuh sehingga memberikan perilaku daktail dan redistribusi tegangan yang lebih stabil, dengan efektivitas dipengaruhi oleh spasi dan rasio tulangan geser (Mohamed et al., 2023).

Sebaliknya, sengkang FRP/CFRP bersifat linier elastis hingga putus tanpa fase leleh, sehingga kegagalannya lebih tiba-tiba dan getas. Tegangan efektifnya sering dibatasi oleh faktor yang mempertimbangkan konsentrasi tegangan dan detail penjangkaran, dan meskipun peningkatan rasio atau pengurangan spasi sengkang FRP dapat menaikkan kapasitas geser, peningkatannya tidak selalu proporsional akibat keterbatasan deformasi dan karakter fraktur material FRP (Zhao et al., 2024).

C. Prinsip Desain Geser

Prinsip desain geser menyatakan bahwa kapasitas elemen harus mampu menahan gaya geser terfaktor dengan tingkat keandalan memadai, karena kegagalan geser bersifat getas dan dapat terjadi tanpa deformasi awal signifikan (Jayasinghe et al., 2022). Berbeda dengan lentur yang didahului pelelehan tulangan, kegagalan geser berkembang cepat setelah retak diagonal kritis terbentuk, sehingga diperlukan margin keamanan terhadap runtuh mendadak (Mohamed et al., 2023).

Pendekatan desain modern umumnya menggunakan model rangka batang (*truss analogy*) dan *compression field theory*, yang menekankan keseimbangan strut tekan beton dan elemen tarik

tulangan geser serta kompatibilitas regangan pasca-retak (Nadir et al., 2018). Pada balok bertulangan FRP/CFRP, perhatian tambahan diperlukan karena material tidak mengalami leleh dan lebih getas; penggunaan formulasi baja secara langsung dapat menghasilkan prediksi yang kurang akurat jika tidak mempertimbangkan modulus elastisitas FRP, rasio tulangan, dan perilaku retak aktual (Gao & Zhang, 2020).

2.4.3 Faktor Reduksi Kekuatan Geser

Untuk elemen beton bertulang non-prategang yang mengalami geser dan torsi, SNI 2847:2019 menetapkan:

$$\phi = 0,75$$

Nilai ini digunakan untuk geser dan torsi karena kegagalan geser bersifat relatif getas dibandingkan lentur (di mana ϕ lentur dapat lebih besar pada kondisi tarik terkendali) (SNI 2847:2019, 2019).

Untuk elemen beton bertulang dengan tulangan FRP internal (termasuk CFRP bar), ketentuan faktor reduksi kekuatan diatur dalam ACI 440.11-22. Karena FRP tidak mengalami leleh dan memiliki perilaku linier-elastis hingga putus, nilai ϕ berbeda dari sistem baja konvensional. ACI 440.11-22 menetapkan nilai ϕ untuk geser yang lebih konservatif dibandingkan baja, yaitu:

$$\phi = 0,75$$

Meskipun demikian, perlu ditegaskan bahwa ACI 440.11-22 merupakan ketentuan untuk beton bertulang dengan batang GFRP sehingga pendekatan desain tetap mengacu pada ACI 440.1R-15.

2.5 Kerangka teori dan konsep analitis

3.5.1 Persamaan Beban Terfaktor dan Gaya Dalam

Sebelum dilakukan analisis kapasitas lentur dan geser penampang, terlebih dahulu perlu ditentukan beban terfaktor serta gaya dalam ultimit yang bekerja pada balok. Dalam penelitian ini, balok diasumsikan sebagai balok sederhana dengan pembebanan merata sepanjang bentang. Besarnya beban ultimit digunakan sebagai dasar untuk menentukan momen ultimit dan gaya geser ultimit yang kemudian dibandingkan dengan kapasitas rencana penampang.

Berat sendiri balok per meter panjang dihitung berdasarkan luas penampang dan berat jenis beton. Persamaan berat sendiri balok dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$w_s = b \times h \times \gamma_{\text{beton}} \dots \dots \dots (1)$$

Di mana:

- w_s : berat sendiri balok per meter panjang (kN/m)
- b : lebar penampang balok (m atau mm)
- h : tinggi penampang balok (m atau mm)
- γ_{beton} : berat jenis beton (kN/m³)

Total beban mati yang bekerja pada balok merupakan penjumlahan antara berat sendiri balok dan beban mati tambahan. Persamaan total beban mati dinyatakan sebagai berikut:

$$w_D = w_s + DL \dots \dots \dots (2)$$

Di mana:

- w_D : total beban mati (kN/m)
- LD : beban mati tambahan (kN/m)

Beban terfaktor dihitung berdasarkan kombinasi beban ultimit untuk beban mati dan beban hidup. Dalam penelitian ini digunakan kombinasi pembebanan sebagai berikut:

$$w_u = 1,2w_D + 1,6LL \dots \dots \dots (3)$$

Di mana:

w_u : beban terfaktor (kN/m)

LL : beban hidup (kN/m)

Setelah beban terfaktor diperoleh, momen ultimit pada balok sederhana dengan beban merata dapat dihitung. Nilai momen ultimit ini digunakan sebagai momen rujukan yang harus dipikul oleh penampang. Persamaan momen ultimit dinyatakan sebagai berikut:

$$M_u = \frac{w_u L^2}{8} \dots \dots \dots (4)$$

Di mana:

M_u : momen ultimit pada bentang balok (kN.m)

L : panjang bentang balok (m)

Selain momen ultimit, gaya geser ultimit maksimum juga perlu dihitung karena menjadi dasar dalam evaluasi kapasitas geser balok. Untuk balok sederhana dengan beban merata, gaya geser ultimit maksimum terjadi pada daerah tumpuan dan dapat dihitung dengan persamaan:

$$V_{u,support} = \frac{w_u L}{2} \dots \dots \dots (5)$$

Di mana:

$V_{u,support}$: gaya geser ultimit maksimum di tumpuan (kN)

Pada perencanaan kapasitas geser, penampang kritis umumnya ditinjau pada jarak d dari muka tumpuan. Oleh karena itu, gaya geser ultimit pada penampang kritis dapat dihitung dengan mengurangi gaya geser maksimum terhadap beban merata pada jarak tersebut, yaitu:

$$V_u = V_{u, \text{support}} - w_u d \dots \dots \dots (6)$$

Di mana:

V_u : gaya geser ultimit pada penampang kritis (kN)

d : tinggi efektif balok (m)

Persamaan-persamaan beban terfaktor dan gaya dalam ultimit tersebut menjadi dasar analisis pada tahap berikutnya, yaitu evaluasi kapasitas lentur dan kapasitas geser penampang. Nilai M_u dibandingkan dengan kapasitas momen rencana, sedangkan nilai $V_{u, \text{support}}$ atau V_u dibandingkan dengan kapasitas geser rencana untuk menilai keamanan balok terhadap kondisi ultimit.

2.5.2 Rumus Dasar Regangan dan Keseimbangan Gaya

A. Regangan

Dalam teori lentur beton bertulang, SNI 2847:2019 dan ACI 440.1R-15 menetapkan bahwa kekuatan penampang ditentukan oleh keseimbangan regangan dan keseimbangan gaya (BSN, 2019; American Concrete Institute, 2015). Asumsi *plane sections remain plane* menyatakan bahwa bidang penampang tetap datar setelah pembebanan, sehingga distribusi regangan linier terhadap jarak dari sumbu netral, dengan regangan tekan maksimum beton 0,003 dan regangan tulangan sebanding jaraknya dari sumbu netral sesuai dengan persamaan berikut (BSN, 2019):

$$\frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_s}{d-c} = \frac{\epsilon_f}{d-c} \dots \dots \dots (7)$$

Di mana:

- ϵ_c : regangan beton di serat tekan terluar
- ϵ_s : regangan tulangan baja
- ϵ_f : regangan tulangan FRP
- c : jarak dari serat tekan terluar ke sumbu netral
- d : tinggi efektif penampang

Menurut ACI 440.1R-15, tulangan FRP/CFRP memiliki hubungan tegangan–regangan yang bersifat elastis linier hingga mencapai regangan *rupture* sebagaimana dirumuskan berikut (American Concrete Institute, 2015):

$$f_f = E_f \epsilon_f \text{ dengan } f \leq \epsilon_{fu} \dots \dots \dots (8)$$

Pada analisis praktis sesuai ACI 440.1R-15, tegangan CFRP juga dapat dihitung menggunakan bentuk persamaan hasil eliminasi kompatibilitas regangan sebagai berikut:

$$f_f = \sqrt{\left(\frac{E_f \epsilon_{cu}}{2}\right)^2 + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} (E_f \epsilon_{cu})} - \frac{E_f \epsilon_{cu}}{2} \dots \dots \dots (9)$$

Di mana:

- f_f = tegangan CFRP pada kondisi ultimit (MPa)
- E_f = modulus elastisitas CFRP (MPa)
- ϵ_{cu} = regangan tekan ultimit beton

Tegangan desain sengkang untuk CFRP dihitung dengan persamaan berikut:

$$f_{fv} = 0,004 E_f \leq f_{fb} \dots \dots \dots (10)$$

B. Keseimbangan Gaya

Prinsip keseimbangan gaya menyatakan bahwa jumlah gaya tekan pada beton (C) harus sama dengan jumlah gaya tarik (T) pada tulangan ketika penampang berada dalam kondisi seimbang.

$$C = T \dots\dots\dots(11)$$

Dalam model perhitungan menurut SNI 2847:2019, gaya tekan beton disederhanakan dengan model blok tegangan persegi panjang Whitney, yang bernilai (BSN, 2019);

$$C = 0,85f_c b a \dots\dots\dots(12)$$

di mana b adalah lebar penampang, a merupakan tinggi blok tekan, dan β_1 adalah faktor reduksi tinggi blok tekan yang bergantung pada kuat tekan beton.

Sementara itu, gaya tarik tulangan baja dihitung dengan persamaan berikut:

$$T_s = A_s f_y \dots\dots\dots (13)$$

Sedangkan untuk tulangan FRP/CFRP digunakan hubungan sebagai berikut:

$$T_f = A_f f_f = A_f E_f \epsilon_f \dots\dots\dots(14)$$

Kondisi kesetimbangan ini memastikan bahwa gaya tekan total yang terjadi pada beton sama dengan gaya tarik total pada tulangan, baik baja maupun FRP, tergantung jenis material penguat yang digunakan. seperti persamaan berikut:

$$0.85f_c b a = A_s f_y \text{ (untuk baja)} \dots\dots\dots(15)$$

$$0.85f_c b a = A_f E_f \epsilon_f \text{ (untuk FRP)} \dots\dots\dots(16)$$

C. Gaya Geser Beton

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 22.5, beton memiliki kemampuan *inherent* menahan sebagian gaya geser melalui mekanisme *interlock* agregat, *dowel action* tulangan longitudinal, dan *residual tensile strength* beton. Nilai kapasitas geser beton diberikan dengan persamaan (BSN, 2019):

$$V_c = 0,17\lambda f_c b w d \dots\dots\dots(17)$$

Faktor λ memperhitungkan jenis beton (normal atau ringan). Penelitian Karyanto & Sabariman (2022) menegaskan bahwa kontribusi beton terhadap geser menurun signifikan ketika retak diagonal berkembang (Karyanto & Sabariman, 2022).

Menurut ACI 440.1R-15, kapasitas geser beton untuk FRP-RC dihitung lebih konservatif karena FRP memberikan *dowel action* yang lebih kecil dibanding baja. Persamaan kapasitas geser beton adalah sebagai berikut (American Concrete Institute, 2015):

$$V_c = \frac{2}{5} k \sqrt{f_c} b d \dots\dots\dots(18)$$

dengan parameter k dihitung menggunakan:

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \dots\dots\dots(19)$$

Di mana:

V_c : kontribusi beton terhadap kapasitas geser (kN)

k : faktor pengaruh rasio tulangan longitudinal CFRP dan modulus elastisitas

ρ_f : rasio tulangan longitudinal CFRP

- A_f : luas tulangan longitudinal CFRP (mm²)
 n_f : rasio modulus elastisitas CFRP terhadap beton

D. Gaya Geser Tulangan Baja (V_s)

Tulangan geser (senggang atau *shear reinforcement*) dirancang untuk menahan sisa gaya geser yang tidak dapat ditahan oleh beton. Menurut SNI 2847:2019 Pasal 22.5.9, gaya geser tulangan dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_s = V_{n,req} - V_c \dots \dots \dots (20)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \dots \dots \dots (21)$$

di mana A_v adalah luas tulangan geser, f_y kekuatan leleh, dan s jarak senggang (BSN, 2019).

E. Gaya Geser Tulangan CFRP (V_f)

Jika balok menggunakan *stirrup* FRP, kontribusi geser dihitung dengan *truss model* sebagai berikut:

$$V_f \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \dots \dots \dots (22)$$

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d}{s} \cot \theta \dots \dots \dots (23)$$

Di mana:

- A_{fv} : luas total tulangan FRP per jarak s (mm²)
 f_{fe} : tegangan FRP efektif pada saat geser (MPa)
 s : jarak antar *stirrup* (mm)
 d : tinggi efektif (mm)
 θ : sudut retak geser (umumnya $45^\circ \rightarrow \cot \theta = 1$)

Penelitian oleh Bakar et al. (2022) dan El-Mogy, El-Ragaby & El-Salakawy (2010) menunjukkan bahwa balok dengan CFRP bars cenderung mengalami retak geser lebih awal karena kekakuan aksial yang lebih rendah.

2.5.3 Asumsi Dasar Analisis

Analisis kekuatan lentur beton bertulang CFRP mengikuti asumsi SNI 2847:2019 dan ACI 440.1R-15, yakni distribusi regangan linier (*plane sections remain plane*) hingga mendekati kekuatan nominal, dengan seluruh gaya tarik ditahan tulangan karena kekuatan tarik beton hanya 10–15% dari kuat tekan (BSN, 2019). Tulangan CFRP bersifat elastis linier hingga *rupture* tanpa fase luluh, dengan asumsi ikatan sempurna antara beton dan tulangan sehingga regangannya sama. Analisis penampang didasarkan pada keseimbangan regangan, tegangan, dan gaya dalam kondisi batas (American Concrete Institute, 2015).

Pada analisis geser, mekanisme tahanan geser diasumsikan mengikuti konsep analogi rangka batang (*truss analogy*), di mana beton berperan sebagai strut tekan diagonal dan tulangan geser sebagai elemen tarik. Kuat geser nominal diasumsikan merupakan kombinasi kontribusi beton dan kontribusi tulangan geser. Untuk balok bertulangan baja, kontribusi tulangan geser dikembangkan hingga mencapai tegangan leleh. Sedangkan pada balok bertulangan CFRP, tegangan tulangan geser dibatasi oleh regangan efektif sesuai ketentuan ACI 440.1R-15 untuk menghindari kegagalan getas akibat *rupture* atau kegagalan ikatan (American Concrete Institute, 2015; SNI 2847:2019, 2019).

2.5.4 Persamaan Momen Nominal, Geser Nominal, Rasio Tulangan Seimbang, dan Regangan Batas

A. Momen Nominal

Menurut SNI 2847:2019, kapasitas momen nominal ditentukan berdasarkan keseimbangan antara gaya tekan beton dan gaya tarik tulangan baja menggunakan model blok tegangan persegi panjang (*Whitney stress block*) (BSN, 2019) yang dapat dihitung dengan:

$$M_n = T_s \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots(24)$$

Menurut ACI 440.1R-15, tulangan FRP/CFRP berperilaku elastis linier hingga *rupture*, sehingga gaya tarik ditentukan berdasarkan hubungan linier antara tegangan dan regangan, bukan tegangan leleh sehingga didapatkan persamaan (American Concrete Institute, 2015):

$$M_n = T_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots(25)$$

Di mana:

- M_n : momen nominal
- T : gaya tarik
- d : tinggi efektif (mm)
- a : tinggi blok tekan beton (mm)

B. Geser Nominal

Berdasarkan SNI 2847:2019 tentang *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, kapasitas geser nominal balok beton bertulang ditentukan sebagai hasil kontribusi beton dan tulangan geser. Ketentuan ini didasarkan pada konsep keseimbangan

mekanisme rangka batang internal (*truss analogy*), di mana beton berperan sebagai elemen tekan diagonal dan tulangan geser sebagai elemen tarik. Secara umum, kuat geser nominal balok beton bertulang dinyatakan sebagai berikut:

$$V_n = V_c + V_s \dots \dots \dots (26)$$

SNI 2847:2019 tidak memiliki ketentuan spesifik untuk tulangan longitudinal FRP, sehingga perhitungan geser untuk balok CFRP lebih banyak mengacu pada ACI 440.1R-15. Kapasitas geser total dihitung sebagai:

$$V_n = V_{cf} + V_f \dots \dots \dots (27)$$

Namun, ACI menetapkan batasan bahwa gaya geser maksimum tidak boleh melampaui nilai kapasitas geser beton untuk memastikan mode kegagalan yang aman.

Dalam perencanaan tulangan geser, setelah kapasitas geser penampang dihitung, perlu dilakukan penentuan detailing sengkang agar tulangan yang dipasang memenuhi kebutuhan kekuatan sekaligus ketentuan jarak maksimum. Pada balok bertulangan baja, kebutuhan minimum tulangan geser dinyatakan sebagai berikut:

$$\left(\frac{A_v}{s}\right)_{\min} = 0,062 \frac{\sqrt{f_c} b}{f_y} \dots \dots \dots (28)$$

Kebutuhan tulangan geser CFRP dinyatakan dengan:

$$\left(\frac{A_{fv}}{s}\right)_{\min} = \frac{(V_u - \phi V_c) 1000}{\phi f_{fv} d} \dots \dots \dots (29)$$

Di mana:

$$\left(\frac{A_v}{s}\right)_{\min} : \text{kebutuhan minimum luas tulangan geser (mm}^2\text{/mm)}$$

- $\left(\frac{A_{fv}}{s}\right)_{\min}$: kebutuhan minimum luas tulangan geser (mm^2/mm)
 A_v : luas total tulangan geser dalam satu penampang (mm^2)
 s : spasi sengkang (mm)
 f_{fv} : tegangan efektif tulangan geser CFRP (MPa)

Luas satu batang sengkang untuk baja maupun CFRP dihitung dengan persamaan:

$$A_{\emptyset_{\text{sengkang}}} = \frac{\pi \emptyset^2}{4} \dots \dots \dots (30)$$

Untuk sengkang dua kaki, luas total tulangan geser menjadi:

$$A_v = 2 \times A_{\emptyset_{\text{sengkang}}} \dots \dots \dots (31)$$

Di mana:

- $A_{\emptyset_{\text{sengkang}}}$: luas satu batang sengkang (mm^2)
 $\emptyset_{\text{sengkang}}$: diameter batang sengkang (mm)

Spasi sengkang ditentukan berdasarkan kebutuhan tulangan geser yang diperlukan, yaitu:

$$s \leq \frac{A_v}{\left(\frac{A_v}{s}\right)_{\min}} \dots \dots \dots (32)$$

Spasi sengkang CFRP kemudian dihitung dengan:

$$s \leq \frac{A_{fv}}{\left(\frac{A_{fv}}{s}\right)_{\text{req}}} \dots \dots \dots (33)$$

Apabila gaya geser ultimit lebih besar dari kontribusi beton, spasi sengkang dapat ditentukan dari kontribusi tulangan geser yang dibutuhkan dengan persamaan:

$$s \leq \frac{A_v f_y d}{V_s} \dots \dots \dots (34)$$

Selain itu, *minimum shear reinforcement* menurut ACI 440 dinyatakan sebagai:

$$s \leq \frac{A_{fv} f_{fv}}{0,35b} \dots \dots \dots (35)$$

Batas spasi maksimum sengkang baja maupun CFRP mengikuti ketentuan SNI dan ACI, yaitu:

$$s_{\max} \leq \min\left(\frac{d}{2}, 600\right) \dots \dots \dots (36)$$

Di mana:

s_{\max} : spasi maksimum sengkang yang diizinkan (mm)

C. Tulangan rasio seimbang

Menurut SNI 2847:2019, rasio tulangan seimbang ditentukan dari keseimbangan regangan dan gaya pada kondisi ultimit dengan asumsi penampang tetap planar serta kuat tarik beton diabaikan (BSN, 2019). Rasio tulangan seimbang dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\rho_b = \frac{0,85\beta_1 f_c}{f_y} \frac{600}{600+f_y} \dots \dots \dots (37)$$

Di mana:

ρ_b : rasio tulangan seimbang

f_c : kuat tekan beton (MPa)

f_y : kuat leleh tulangan baja (MPa)

β_1 : faktor blok tegangan beton

Kapasitas lentur elemen bertulangan FRP ditentukan oleh mode kegagalan, yaitu *crushing* beton atau *rupture* FRP. Kondisi batasnya ditentukan dengan membandingkan rasio tulangan FRP terhadap rasio seimbang, yakni saat kedua kegagalan terjadi bersamaan. Karena FRP tidak mengalami leleh, rasio seimbang dihitung berdasarkan kekuatan tarik desain FRP (American Concrete Institute, 2015). Umumnya, balok beton bertulang CFRP dirancang sebagai penampang *over-reinforced*, dengan rasio tulangan lebih besar dari rasio seimbang (Bakar et al., 2022). Rasio tulangan FRP didapatkan dengan persamaan:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \dots\dots\dots(38)$$

ρ_f merupakan rasio tulangan, dengan A_f sebagai luas batang CFRP (mm^2), b lebar penampang (mm), dan d jarak dari serat tekan terluar ke pusat massa batang CFRP (mm) (Bakar et al., 2022).

$$\rho_{fb} = \alpha_1 \beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \dots\dots\dots(39)$$

ρ_{fb} adalah rasio tulangan seimbang, f_c kuat tekan beton (MPa), f_{fu} kuat tarik ultimit CFRP dengan faktor reduksi lingkungan (MPa), E_f modulus elastisitas CFRP (MPa), dan ϵ_{cu} regangan ultimit beton (0,003–0,0035). Nilai α_1 dan β_1 dihitung sesuai persamaan yang ditetapkan Bakar et al., (2022) sebagai berikut:

$$\alpha_1 = 0,85 \dots\dots\dots(40)$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left(\frac{f_c - 28}{7} \right) \geq 0,65 \dots\dots\dots(41)$$

Sedangkan rasio modulus elastisitas dinyatakan sebagai:

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \dots\dots\dots(42)$$

Modulus elastisitas beton dihitung dengan:

$$E_c = 4700\sqrt{f_c} \dots \dots \dots (43)$$

Di mana:

n_f : rasio modulus elastisitas CFRP terhadap beton

E_f : modulus elastisitas CFRP (MPa)

E_c : modulus elastisitas beton (MPa)

D. Regangan batas

Dalam SNI 2847:2019, regangan beton maksimum pada serat tekan terluar ditetapkan sebesar (BSN, 2019):

$$\varepsilon_{cu} = 0,003 \dots \dots \dots (44)$$

Regangan batas tekan beton menunjukkan kondisi saat beton mencapai kekuatan maksimum sebelum keruntuhan getas. Asumsi ini berlaku untuk tulangan baja maupun komposit, dengan regangan tarik baja ε_y ditentukan dari perilaku plastis saat leleh yang dapat dihitung dengan persamaan (BSN, 2019):

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_f} \dots \dots \dots (45)$$

Dengan $E_f = 200.000$ MPa, bila regangan tulangan baja melebihi batas leleh, penampang dikategorikan *under-reinforced*, kondisi yang diinginkan untuk kegagalan daktil (BSN, 2019).

Pada elemen bertulangan FRP/CFRP, material berperilaku elastis linier hingga *rupture* tanpa fase plastis, sehingga regangan tarik dibatasi oleh regangan ultimit yang didapatkan dari persamaan (American Concrete Institute, 2015):

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f} \dots\dots\dots(46)$$

Pada balok bertulangan CFRP, kuat tarik desain tulangan ditentukan dengan memperhitungkan faktor lingkungan. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$f_{fu} = CE \times f^*fu \dots\dots\dots(47)$$

Pada balok bertulangan CFRP, setelah kontribusi beton terhadap kapasitas geser dihitung, kebutuhan tulangan geser CFRP dinyatakan dalam bentuk luas tulangan geser per satuan panjang. Tegangan efektif tulangan geser CFRP dibatasi untuk menghindari kegagalan getas, sehingga dapat ditentukan dengan persamaan:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \dots\dots\dots(48)$$

$$\varepsilon_{fe} = \min(400, 0,75\varepsilon_{fu}) \dots\dots\dots(49)$$

Di mana:

ε_{fu} : regangan ultimit FRP

f_{fu} : tegangan tarik ultimit FRP (MPa)

f^*fu : kuat tarik ultimit nominal CFRP (MPa)

f_{fe} : tegangan tarik efektif FRP (MPa)

ε_{fe} : regangan efektif FRP

E_f : modulus elastisitas FRP (MPa)

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif analitis melalui pemodelan teoretis yang didasarkan pada prinsip-prinsip mekanika struktur untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) bars* sebagai pengganti tulangan baja konvensional pada balok beton bertulang. Fokus utama penelitian adalah menilai perubahan kapasitas lentur dan geser yang terjadi akibat perbedaan karakteristik mekanis antara tulangan CFRP dan baja.

Penelitian ini tidak melibatkan pengujian eksperimental di laboratorium, melainkan menggunakan metode analisis perhitungan (*analytical modelling*), di mana berbagai data numerik dan parameter mekanis penampang dianalisis secara sistematis menggunakan persamaan-persamaan desain yang mengacu pada ketentuan standar yang berlaku. Perhitungan balok bertulangan baja mengacu pada SNI 2847:2019, sedangkan perhitungan balok bertulangan CFRP mengacu pada ACI 440.1R-15. SNI 8970:2021 digunakan sebagai acuan spesifikasi/persyaratan material FRP (misalnya parameter material dan ketentuan penggunaan), sehingga parameter CFRP yang digunakan pada analisis mengikuti data standar dan literatur yang relevan.

Hasil analisis dari masing-masing standar kemudian dibandingkan untuk mengidentifikasi perbedaan respons dan performa struktural balok beton bertulang, khususnya dalam hal kapasitas lentur dan geser, sehingga

dapat memberikan gambaran teoretis mengenai efektivitas penggunaan CFRP bars sebagai alternatif pengganti tulangan baja dalam perencanaan struktur beton.

3.2 Variabel Penelitian

3.2.1 Variabel Bebas (*Independent Variables*)

Variabel bebas mencakup semua parameter yang memengaruhi perilaku lentur dan geser balok, yaitu:

1. Jenis tulangan longitudinal: baja dan CFRP bars.
 - a. Diameter tulangan longitudinal: $\varnothing 10$ mm, $\varnothing 16$ mm, dan $\varnothing 22$ mm.
 - b. Dimensi penampang balok ($b \times h$): 350×500 ; 400×550 ; 450×600 ; 500×650 ; dan 550×700 (mm).
2. Jumlah batang terpasang serta rasio tulangan (A_s/A_f) ditentukan melalui perhitungan sesuai ketentuan SNI 2847:2019 (baja) dan ACI 440.1R-15 (CFRP), sehingga menjadi hasil proses desain dan bukan variabel yang ditetapkan di awal.

3.2.2 Variabel Terikat (*Dependent Variables*)

Variabel terikat adalah hasil utama dari analisis yang telah dilakukan, yaitu:

1. Kapasitas lentur: momen nominal (M_n) dan momen rencana (φM_n).
2. Kapasitas geser: geser nominal (V_n) dan geser rencana (φV_n).
3. Komponen geser: kontribusi beton dan kontribusi tulangan geser, yaitu V_c dan V_s untuk balok beton bertulangan baja, serta V_{cf} dan V_{vf} untuk balok beton bertulangan CFRP.
4. Rasio keamanan: $\varphi M_n/M_u$ dan $\varphi V_n/V_u$.

5. Posisi garis netral (c) serta profil regangan dan tegangan penampang.
6. Mode kegagalan: *yielding* baja, *crushing beton*, *rupture CFRP*, atau kegagalan geser (*diagonal tension/shear-compression*).

3.2.3 Variabel Kendali (*Control Variables*)

Variabel kendali adalah variabel yang dijaga tetap agar tidak memengaruhi hasil, yaitu:

1. Bentuk penampang balok (*rectangular section*)
2. Kondisi pengekangan sama
3. Beban statis monoton (bukan *cyclic*)
4. Tidak mempertimbangkan durabilitas jangka panjang (*creep, fatigue*)
5. Mutu beton ditetapkan $f'_c = 25$ MPa dengan regangan ultimit beton $\epsilon_{cu} = 0,003$, faktor blok tekan $\beta_1 = 0,85$, dan berat jenis beton $\gamma_{beton} = 24$ kN/m³.
6. Mutu baja tulangan longitudinal ditetapkan $f_y = 400$ MPa dan modulus elastisitas $E_s = 200.000$ MPa.
7. Parameter CFRP bars ditetapkan $E_f = 150.000$ MPa, kuat tarik desain $f^*f_u = 2.000$ MPa, dan faktor lingkungan $CE = 0,95$ digunakan karena CFRP dalam penelitian ini diasumsikan berada pada kondisi lingkungan yang tidak agresif. (mengacu ACI 440.1R-15 dan literatur pendukung).
8. Bentang balok ditetapkan $L = 6$ m.
9. Beban terdistribusi ditetapkan $DL = 2$ kN/m dan $LL = 5$ kN/m
10. Selimut beton ditetapkan $cover = 40$ mm.
11. Tulangan geser ditetapkan berdiameter $\emptyset 10$ mm dengan spasi $s = 200$ mm (kondisi terpasang) untuk seluruh variasi penampang dan diameter tulangan longitudinal. Pada balok beton bertulangan baja digunakan sengkang baja $\emptyset 10$ mm, sedangkan pada balok beton bertulangan CFRP digunakan sengkang CFRP $\emptyset 10$ mm.

12. Faktor reduksi kekuatan yang digunakan: ϕ lentur baja = 0,90; ϕ lentur CFRP = 0,65; dan ϕ geser baja maupun CFRP = 0,75.
13. Asumsi analisis: penampang tetap datar setelah pembebanan, lekatan beton–tulangan dianggap sempurna, dan pengaruh susut serta rangkai diabaikan.

3.3 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui *desk study* tanpa eksperimen fisik. Pengolahan data, pemodelan penampang, dan penyusunan laporan dilakukan di lingkungan akademik Universitas Lampung dalam periode penelitian Januari-Maret 2026.

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat

Dalam penelitian ini, alat yang digunakan berperan untuk menunjang proses analisis dan pengolahan data. Adapun alat yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Komputer/laptop untuk komputasi numerik
2. Microsoft Excel
3. Referensi standar:
 - a. SNI 2847:2019
 - b. ACI 440.1R-15

3.4.2 Bahan

Seluruh bahan diperoleh dari standar, jurnal ilmiah, dan data teknis pendukung yang terdiri dari:

1. Parameter mekanis CFRP dari jurnal
2. Parameter baja tulangan

3. Data kuat tekan beton
4. Dimensi dan rasio penulangan balok

3.5 Metode Pengumpulan Data

3.5.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh dasar teoritis dan informasi ilmiah yang melibatkan penelusuran:

1. Standar desain beton dan FRP (SNI dan ACI)
2. Jurnal ilmiah 10 tahun terakhir mengenai:
 - a. Kapasitas lentur balok CFRP
 - b. Kapasitas geser balok CFRP
 - c. Kegagalan struktur FRP-RC
 - d. *Bond behavior* CFRP–beton
 - e. Perbandingan baja dan FRP dalam RC beams

3.5.2 Ekstraksi Data Material

Semua data diambil dari standar nasional dan internasional, serta *database* jurnal terpercaya seperti Elsevier, Springer, ASCE Library, MDPI, dan ResearchGate sebagai berikut:

1. E_f , f_{fu} , ϵ_{fu} CFRP
2. f_y , E_s baja
3. f'_c beton
4. Dimensi balok dan rasio tulangan

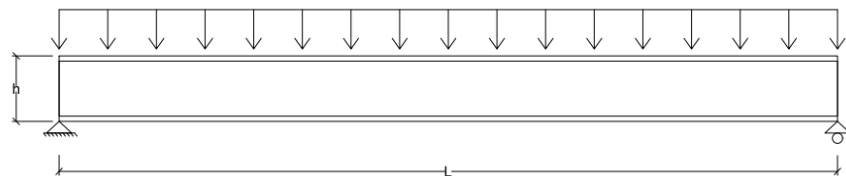
3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Pemodelan Penampang

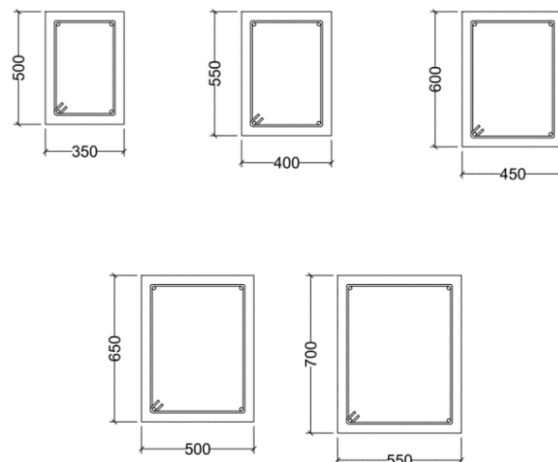
Permodelan penampang dilakukan untuk menentukan karakteristik geometris dan kebutuhan tulangan yang mencakup:

1. Permodelan penampang dilakukan untuk merepresentasikan kondisi geometris balok beton bertulang sebagai dasar analisis kapasitas lentur dan geser. Berdasarkan Gambar 9, balok dengan panjang sama yaitu 6 m dimodelkan sebagai elemen dengan tumpuan sederhana yang menerima beban terdistribusi, di mana pembebanan yang diberikan dibuat sama untuk seluruh variasi balok agar hasil analisis dapat dibandingkan secara konsisten.

Gambar 10 menunjukkan penampang balok berbentuk persegi panjang yang terdiri dari beton dan tulangan geser (sengkang) dua kaki. Variasi dimensi balok yang digunakan adalah 350×500 mm, 400×550 mm, 450×600 mm, 500×650 mm, 550×700 mm, dengan selimut beton 40 mm, serta sengkang Ø10 mm.



Gambar 9. Permodelan Balok Beton Bertulang



Gambar 10. Permodelan Penampang Balok Beton Bertulang

2. Menentukan jumlah batang tulangan baja dan CFRP untuk tiap dimensi berdasarkan variasi diameter Ø10, Ø16, dan Ø22 agar

memenuhi syarat desain (terutama $\phi M_n \geq M_u$) serta ketentuan minimum; Menurut ACI 440.1R-15 (Section 7.2), kegagalan lentur pada elemen beton bertulang FRP dapat terjadi akibat putusnya tulangan FRP atau hancurnya beton tekan. Karena FRP tidak mengalami leleh dan bersifat getas, kegagalan yang dikontrol oleh hancurnya beton (*compression-controlled*) lebih diinginkan dibandingkan kegagalan akibat rupture FRP. Sehingga untuk CFRP diarahkan pada kondisi *over-reinforced* (*crushing beton*).

3. Menghitung luas tulangan (A_s/A_f), kedalaman efektif (d), dan parameter penampang lainnya untuk tiap variasi.

3.6.2 Analisis Kapasitas Lentur

Analisis kapasitas lentur bertujuan untuk menentukan kemampuan maksimum balok dalam menahan momen internal sebelum mencapai kondisi batas yang mencakup parameter sebagai berikut:

1. Balok Bertulangan Baja (SNI 2847:2019)
 - a. Menggunakan blok tegangan Whitney ($0.85f_c$)
 - b. Menentukan kedalaman blok tegangan ($a = \beta_1 c$)
 - c. Menentukan gaya tekan beton (C)
 - d. Menentukan gaya tarik baja ($T = A_s f_y$)
 - e. Menentukan momen nominal $M_n = T \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$
 - f. Menentukan faktor reduksi $\phi = 0,65 - 0,90$
 - g. Menyajikan hasil dalam tabel rekapitulasi serta kurva hubungan diameter tulangan terhadap kapasitas lentur (ϕM_n) untuk tiap dimensi balok.
2. Balok Bertulangan CFRP (ACI 440.1R-15)
3. Balok Bertulangan CFRP (ACI 440.1R-15; parameter material merujuk SNI 8970:2021 dan literatur)

- a. Menghitung luas tulangan minimum $A_{f,min}$ dan menentukan jumlah batang CFRP terpasang sehingga $\rho_f \geq \rho_{f,min}$ dan $\rho_f > \rho_{fb}$ (*over-reinforced*).
- b. Melakukan kompatibilitas regangan untuk memperoleh regangan CFRP (ϵ_f) dan regangan beton (ϵ_c) pada kondisi ultimit.
- c. Menghitung tegangan CFRP ($f_f = E_f \epsilon_f$) dan membatasi agar tidak melebihi kuat tarik desain (f_{fu} desain).
- d. Menentukan keseimbangan gaya ($C = T$) serta kedalaman garis netral (c) dan tinggi blok tekan (a).
- e. Menghitung momen nominal (M_n) dan momen rencana (ϕM_n) sesuai ACI 440.1R-15.
- f. Menyajikan hasil dalam tabel rekapitulasi serta kurva hubungan diameter tulangan terhadap kapasitas lentur (ϕM_n) untuk tiap dimensi balok.

3.6.3 Analisis Kapasitas Geser

Analisis kapasitas geser dilakukan untuk menentukan kemampuan penampang dalam menahan gaya geser ultimit dengan mempertimbangkan kontribusi beton dan kontribusi tulangan geser sesuai jenis material yang digunakan.

1. Kontribusi beton terhadap geser
 - a. Pada balok beton bertulangan baja, kontribusi beton terhadap geser dihitung berdasarkan SNI 2847:2019 sehingga diperoleh nilai V_c .
 - b. Pada balok beton bertulangan CFRP, kontribusi beton terhadap geser dihitung berdasarkan ACI 440.1R-15 sehingga diperoleh nilai V_{cf} , dengan pendekatan yang lebih konservatif karena perbedaan sifat mekanik CFRP terhadap baja.

2. Kontribusi tulangan geser

Tulangan geser ditetapkan berdiameter $\varnothing 10$ mm dengan spasi $s = 200$ mm (kondisi terpasang) untuk seluruh variasi penampang.

a. Pada balok beton bertulangan baja, kontribusi tulangan geser dinyatakan sebagai V_s dan dihitung menggunakan *truss model* berdasarkan kuat leleh sengkang baja.

b. Pada balok beton bertulangan CFRP, kontribusi tulangan geser dinyatakan sebagai V_f dan dihitung menggunakan *truss model* berdasarkan tegangan efektif sengkang CFRP sesuai ketentuan ACI 440.1R-15, dengan mempertimbangkan batas regangan efektif untuk menghindari kegagalan getas.

3. Kapasitas geser nominal dan rencana

a. Pada balok beton bertulangan baja, kapasitas geser nominal dihitung sebagai: $V_n = V_c + V_s$

b. Pada balok beton bertulangan CFRP, kapasitas geser nominal dihitung sebagai: $V_n = V_{cf} + V_f$

c. Kapasitas geser rencana diperoleh dari:

$\phi V_n = \phi(V_c + V_s)$ untuk balok bertulangan baja, dan
 $\phi V_n = \phi(V_{cf} + V_f)$ untuk balok bertulangan CFRP.

4. Evaluasi keamanan

Nilai kapasitas geser rencana kemudian dibandingkan dengan gaya geser ultimit V_u . Penampang dinyatakan aman apabila memenuhi syarat: $\phi V_n \geq V_u$

5. Penyajian hasil

Hasil analisis kapasitas geser disajikan dalam bentuk tabel rekapitulasi dan kurva hubungan variasi tulangan terhadap kapasitas geser untuk masing-masing dimensi balok.

3.6.4 Identifikasi Mode Kegagalan

Mode kegagalan yang berpotensi terjadi pada balok diklasifikasikan berdasarkan hasil analisis sebagai berikut:

1. Kegagalan lentur dominan:
 - a. *Yielding* baja
 - b. *Rupture* CFRP
 - c. *Crushing* beton
2. Kegagalan geser:
 - a. *Diagonal tension failure*
 - b. *Shear-compression failure*

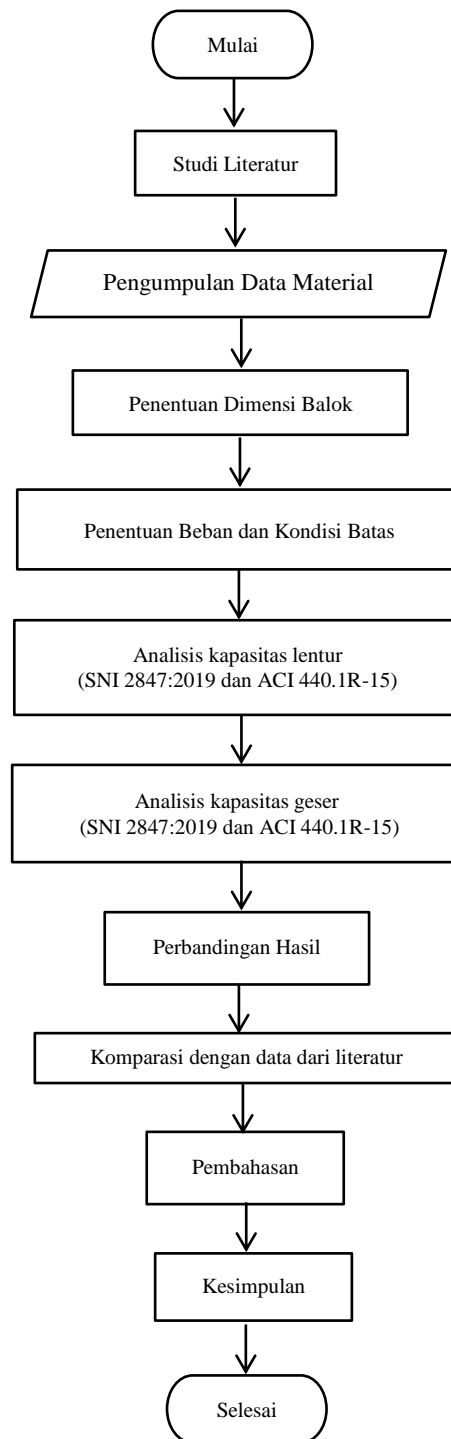
3.7 Komparasi Hasil Dengan Literatur

Hasil analisis kemudian dibandingkan secara internal antara balok bertulangan baja dan CFRP, serta didiskusikan dengan temuan literatur.

1. Perbandingan internal: tren perubahan ϕM_n dan ϕV_n terhadap variasi jumlah tulangan dan diameter tulangan.
2. Perbandingan terhadap ketentuan standar: SNI 2847:2019 (baja) dan ACI 440.1R-15 (CFRP); SNI 8970:2021 digunakan sebagai acuan spesifikasi material FRP.
3. Perbandingan dengan literatur dilakukan secara kualitatif (*trend-based*) terhadap penelitian eksperimen yang relevan, khususnya terkait kecenderungan kapasitas lentur dan karakter geser pada balok FRP-RC.

3.8 Diagram Alir

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram Alir Penelitian

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Kapasitas lentur dan geser balok beton bertulangan baja maupun CFRP telah berhasil dianalisis sesuai standar yang digunakan, yaitu SNI 2847:2019 untuk baja dan ACI 440.1R-15 untuk CFRP. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh variasi balok memenuhi persyaratan keamanan karena kapasitas rencana lebih besar daripada gaya dalam ultimit yang bekerja.
2. Penggunaan tulangan CFRP sebagai pengganti baja terbukti meningkatkan kapasitas lentur dan kapasitas geser balok beton bertulang. Pada seluruh variasi dimensi penampang, kapasitas lentur meningkat dari 73,34–171,33 kNm menjadi 162,77–582,40 kNm (kenaikan $\pm 76,14\%$ – $408,52\%$). Hal yang sama juga terjadi pada kapasitas geser, di mana kapasitas geser meningkat dari 131,78–233,57 kN menjadi 189,43–323,81 kN (kenaikan $\pm 15,73\%$ – $69,39\%$).
3. Balok bertulangan baja dan CFRP memiliki perilaku dan mode keruntuhan yang berbeda. Balok baja lebih daktail karena tulangan dapat leleh sebelum runtuh, sedangkan balok CFRP lebih getas karena bersifat linier-elastis hingga putus. Dalam penelitian ini, balok CFRP dirancang *over-reinforced* sehingga keruntuhan lentur cenderung berupa *crushing* beton, sedangkan balok baja cenderung *tension-controlled*. Pada geser, sengkang CFRP meningkatkan kapasitas, tetapi karakter kegagalannya tetap lebih getas.

Karena itu, CFRP *bars* berpotensi menjadi alternatif pengganti tulangan baja, terutama untuk struktur yang memerlukan kapasitas tinggi dan ketahanan korosi, namun desainnya harus lebih cermat dengan memperhatikan kontrol regangan dan mode keruntuhan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya perlu dilengkapi dengan pengujian eksperimental agar hasil analisis teoritis dan numerik dapat divalidasi terhadap perilaku aktual balok beton bertulang CFRP, terutama terkait pola retak, lendutan, dan mode keruntuhan.
2. Penelitian berikutnya dapat memperluas parameter kajian, seperti mutu beton, rasio tulangan, panjang bentang, spasi sengkang, serta jenis FRP lain, agar diperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh tentang perilaku balok dengan material nonkonvensional.
3. Perlu dikaji lebih lanjut pengaruh peningkatan mutu atau kekangan beton pada balok CFRP yang dirancang *over-reinforced*, untuk melihat apakah dapat menghasilkan keruntuhan tekan beton yang lebih aman dan terkendali, serta dibandingkan dengan kondisi *under-reinforced* yang berpotensi mengalami *rupture* CFRP.
4. Kajian lanjutan perlu mencakup aspek layan seperti lendutan, lebar retak, daktilitas, dan perilaku jangka panjang, karena peningkatan kapasitas nominal CFRP belum tentu diikuti performa deformasi yang setara dengan tulangan baja. Selain itu, perlu dikaji efisiensi ekonomi dan penerapan praktis di lapangan, agar penggunaan CFRP bars dapat dinilai dari sisi biaya, kemudahan pelaksanaan, dan kelayakan penerapannya dalam konstruksi di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- American Concrete Institute. (2015). *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer FRP bars*. American Concrete Institute.
- Andrean, S., Sumajouw, M. D. J., & Windah, R. S. (2015). Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Variasi Ratio Tulangan Tarik. *Jurnal Sipil Statik*, 3(3), 175–182.
- Angeli, G. M., Naoum, M. C., Papadopoulos, N. A., Kosmidou, P. M. K., Sapidis, G. M., Karayannis, C. G., & Chalioris, C. E. (2024). Advanced Structural Technologies Implementation in Designing and Constructing RC Elements with C-FRP Bars, Protected Through SHM Assessment. *Fibers*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/fib12120108>
- Bakar, M. B. C., Muhammad Rashid, R. S., Amran, M., Saleh Jaafar, M., Vatin, N. I., & Fediuk, R. (2022). Flexural Strength of Concrete Beam Reinforced with CFRP Bars: A Review. In *Materials* (Vol. 15, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15031144>
- Deng, J., Pan, Z., Mai, G., Long, Y., Kuang, B., Zhu, J., Guo, Q., Liang, J., Huang, F., Qiao, S., Li, X., & Liu, F. (2023). Fatigue Behaviour of CFRP Bar-Reinforced Seawater Sea Sand Concrete Beams: Deformation Analysis and Prediction. *Buildings*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/buildings13092273>
- Dziomdziora, P., & Smarzewski, P. (2025). Reinforced Concrete Beams with FRP and Hybrid Steel–FRP Composite Bars: Load–Deflection Response, Failure Mechanisms, and Design Implications. In *Materials* (Vol. 18, Issue 18). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ma18184381>

- Evan C, Bentz, Frank J. Vecchio, & Michael P. Collins. (2006). Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements. *ACI Structural Journal*, 103(4), 614.
- Frans, P. (2019). Analisis Momen Tulangan Sistem Rangka Terhadap Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang. 9(2).
- Gao, D., & Zhang, C. (2020). Shear strength calculating model of FRP bar reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*, 221, 111025. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111025>
- Huber, T., Huber, P., & Kollegger, J. (2019). Influence of aggregate interlock on the shear resistance of reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*, 186, 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.074>
- Jayasinghe, T., Gunawardena, T., & Mendis, P. (2022). Assessment of shear strength of reinforced concrete beams without shear reinforcement: A comparative study between codes of practice and artificial neural network. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01102. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01102>
- Karayannis, C. G., Kosmidou, P. M. K., & Chalioris, C. E. (2018). Reinforced concrete beams with carbon-fiber-reinforced polymer bars-Experimental study. *Fibers*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/fib6040099>
- Karyanto, I., & Sabariman, B. (2022). Pengaruh Rasio Tulangan Tarik Terhadap Kekuatan Balok Lentur.
- Khrisna, D., Hazairin, & Herbudiman, B. (2015). Kajian Perilaku Lentur Perbaikan Balok Beton Bertulang dengan Metode External Prestressing. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 1, 12–19.
- Kim, J., Jeong, S., Kim, H., Kim, Y., & Park, S. (2022). Bond Strength Properties of GFRP and CFRP according to Concrete Strength. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(20). <https://doi.org/10.3390/app122010611>

- Layang, S., & Eliatun. (2024). Kekuatan Lentur Balok Beton dengan Penambahan Serat Karbon (Carbon Fiber Reinforced Polymer). *Buletin Profesi Insinyur*, 7(2), 64–70. <https://doi.org/10.20527/bpi.v7i2.243>
- Li, L., Zheng, W., & Wang, Y. (2019). Prediction of moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete structures using artificial neural network and support vector regression. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/app9010028>
- Li, R., & Aboutaha, R. S. (2025). Analytical Investigation of CFRP- and Steel Plate-Strengthened RC Beams with Partially Unbonded Reinforcement. *Buildings*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/buildings15203665>
- Liang, X., Peng, J., & Ren, R. (2023). A state-of-the-art review: Shear performance of the concrete beams reinforced with FRP bars. *Construction and Building Materials*, 364, 129996. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129996>
- Lou, T., Li, Z., & Pang, M. (2021). Moment redistribution in continuous externally CFRP prestressed beams with steel and FRP rebars. *Polymers*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/polym13081181>
- Megalooikonomou, K. G., & Beligiannis, G. N. (2025). Application of Supervised Neural Networks to Classify Failure Modes in Reinforced Concrete Columns Using Basic Structural Data. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/app151810175>
- Moussa, A. M. A., Said, H. O. A., Khodary, F., & Hassanean, Y. A. (2025). Shear behavior of high-strength concrete beams reinforced with carbon fiber-reinforced polymer bars. *Engineering Structures*, 325, 119411. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119411>
- Muaja, F. F., Sumajouw, M. D. J., & Pandaleke, R. E. (2018). Redistribusi Momen Pada Balok Menerus Beton Bertulang. *Jurnal Sipil Statik*, 6(8), 619–628.
- Muttoni, A., & Fernández Ruiz, M. (2019). From experimental evidence to

- mechanical modeling and design expressions: The Critical Shear Crack Theory for shear design. *Structural Concrete*, 20(4), 1464–1480. <https://doi.org/10.1002/suco.201900193>
- Nadir, W., Dhahir, M. K., & Naser, F. H. (2018). A compression field based model to assess the shear strength of concrete slender beams without web reinforcement. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00210. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00210>
- Pramudhita, G., & Buwono, H. (2019). *Analisis Nonlinier Static Pushover Struktur Gedung Bertingkatsoft Story Dengan Menggunakan Material Beton Bertulang Danbeton Prategang Pada Balok Bentang Panjang.*
- Putra, A., Noorhidana, V., & Isneini, M. (2020). *Pengaruh Penambahan Serat Baja Terhadap Kuat Lentur Balok Beton Bertulangpada Beton Mutu Normal.*
- Rada, S., & Aptiyasa, P. A. A. (2025). *Pemodelan Metode Elemen Hingga Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) yang Dikenai Lentur dan Geser.* 4(1), 49–55.
- Rady, M., Mahfouz, S. Y., & Taher, S. E. D. F. (2022). Optimal Design of Reinforced Concrete Materials in Construction. *Materials*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/ma15072625>
- Shakir Abbood, I., Odaa, S. aldeen, Hasan, K. F., & Jasim, M. A. (2021). Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures – A review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1003–1008. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.636>
- Shunmuga Vembu, P. R., & Ammasi, A. K. (2023). A Comprehensive Review on the Factors Affecting Bond Strength in Concrete. *Buildings*, 13(3), 577. <https://doi.org/10.3390/buildings13030577>
- SNI 2847:2019. (2019). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan penjelasan.*
- Solehudin, D. Y., & Walujodjati, E. (2021). *Analisis Lentur dan Geser Balok Beton Bertulang Profil Baja Canai Dingin.* <http://jurnal.itg.ac.id/>

- Tran, H., & Nguyen-Thoi, T. (2025). Flexural Behavior of Beams Reinforced with FRP Bars: Test Database, Design Guideline Assessment, and Reliability Evaluation. *Buildings*, *15*(18). <https://doi.org/10.3390/buildings15183373>
- Tran, H., Nguyen-Thoi, T., & Dinh, H. B. (2025). State-of-the-Art Review of Studies on the Flexural Behavior and Design of FRP-Reinforced Concrete Beams. In *Materials* (Vol. 18, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ma18143295>
- Wang, L., Zhang, J., Huang, C., & Fu, F. (2020). Comparative study of steel-FRP, FRP and steel-reinforced coral concrete beams in their flexural performance. *Materials*, *13*(9). <https://doi.org/10.3390/ma13092097>
- Wang, Z., Yang, Y., Song, M., Zhang, J., & Wang, Z. (2024). Comparison of Fracture Behavior in Single-Edge Notched Beams Reinforced with Steel Bars or CFRP Bars. *Materials*, *17*(10). <https://doi.org/10.3390/ma17102216>
- Zeybek, Ö., Özkılıç, Y. O., Çelik, A. İ., Deifalla, A. F., Ahmad, M., & Sabri Sabri, M. M. (2022). Performance evaluation of fiber-reinforced concrete produced with steel fibers extracted from waste tire. *Frontiers in Materials*, *9*. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1057128>
- Zhang, W., Shao, W., & Nie, Y. (2024). An Analysis of the Flexural Stiffness and Horizontal Bearing Capacity of CFRP Composite Pipe Piles in Marine Environments. *Journal of Marine Science and Engineering*, *12*(10). <https://doi.org/10.3390/jmse12101870>
- Zhao, J., Pan, H., Wang, Z., & Li, G. (2022). Experimental and Theoretical Study on Flexural Behavior of GFRP- and CFRP-Reinforced Concrete Beams after High-Temperature Exposure. *Polymers*, *14*(19). <https://doi.org/10.3390/polym14194002>