E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Pemodelan Elemen Hingga Balok Tinggi Beton Bertulang Berperkuat GFRP: Variasi Model Konstitutif Dan Antarmuka

Misdi[1], Risky Fajar Sundari[2]
[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Alwashliyah , misdijunaidi@gmail.com
[2]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Alwashliyah, riskyfajarsundari@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menyajikan analisis elemen hingga (AEH) balok beton bertulang tinggi ($l_n/h = 3{,}175$) yang diperkuat lembaran GFRP (Glass Fiber-Reinforced Polymer) secara eksternal dalam pengujian four-point bending. Enam model numerik progresif dikembangkan di Abaqus/CAE dengan memvariasikan model konstitutif GFRP (isotropik linear, anisotropik linear, dan kerusakan progresif Hashin), nonlinearitas beton melalui Concrete Damage Plasticity (CDP), serta model antarmuka GFRP-beton (tie constraint vs. cohesive zone model/CZM dengan mekanisme debonding intermediate crack/IC dan critical concrete cover separation/CCS). Asumsi isotropik GFRP melebih-estimasi kapasitas ultimit (298,532 kN) dibandingkan model anisotropik (284,269 kN). Balok kontrol tanpa GFRP (290,770 kN) mencatatkan kapasitas sedikit lebih tinggi dari model anisotropik berperkuat, membuktikan perkuatan lentur GFRP tidak efektif untuk balok tinggi yang dikuasai aksi busur (arch action). Pemodelan debonding CZM menurunkan kapasitas ultimit menjadi 250,568 kN (−12%) disertai penurunan beban katastropik pasca-puncak. Rasio daktilitas mendekati satu ($\mu \approx 0{,}81–1{,}07$) mengkonfirmasi kegagalan getas yang didominasi geser, konsisten dengan SNI 2847-2019.

Kata Kunci: *balok tinggi, GFRP, elemen hingga, cohesive zone model, kegagalan geser.*

Abstract

This study presents a finite element analysis (FEA) of reinforced concrete (RC) deep beams ($l_n/h = 3.175$) strengthened with externally bonded glass fiber-reinforced polymer (GFRP) sheets under four-point bending. Six progressive numerical models were developed in Abaqus/CAE, varying GFRP constitutive behavior (linear isotropic, linear anisotropic, Hashin progressive damage), concrete nonlinearity via Concrete Damage Plasticity (CDP), and the GFRP-concrete interface model (tie constraint vs. cohesive zone model/CZM incorporating intermediate crack/IC and critical concrete cover separation/CCS debonding). The isotropic GFRP assumption overestimates ultimate capacity (298.532 kN) relative to the anisotropic model (284.269 kN). Notably, the control beam without GFRP (290.770 kN) achieved marginally higher capacity than the GFRP-anisotropic model, confirming that flexural GFRP strengthening is ineffective for deep beams governed by arch action. The CZM debonding model reduced ultimate capacity to 250.568 kN (−12%) with a catastrophic post-peak load drop. Ductility ratios approaching unity ($\mu \approx 0.81–1.07$) across all models confirm brittle shear-dominant failure consistent with deep beam mechanics per SNI 2847-2019.

Keywords: *deep beam, GFRP, finite element analysis; cohesive zone model. shear failure.*

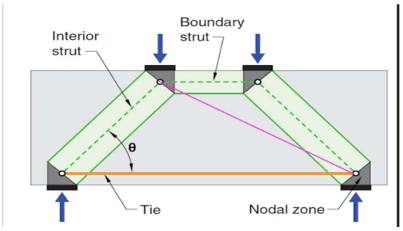
Corresponding Author:
Misdi

Universitas Alwashliyah , misdijunaidi@gmail.com

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

PENDAHULUAN

Balok tinggi (deep beam) adalah elemen struktural yang transfer bebannya didominasi aksi busur tekan (arch action) melalui mekanisme strut-and-tie, bukan distribusi tegangan geser Euler-Bernoulli. Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 9.9 dan ACI 318-19, balok diklasifikasikan sebagai balok tinggi apabila bentang bersih terhadap tinggi penampang $l_n/h \leq 4$, atau terdapat beban terpusat dalam jarak 2h dari muka tumpuan. Pada kondisi tersebut, transfer beban bersifat getas dan rentan terhadap kegagalan geser (brittle shear failure).



Gambar 1 Mekanisme Strut-and-Tie pada Balok Tinggi (ACI 318-19)

Perkuatan eksternal menggunakan lembaran Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) yang ditempel pada permukaan tarik (externally bonded, EB) telah menjadi solusi rehabilitasi struktur RC yang ringan, tahan korosi, dan efisien (Teng et al., 2002). Namun, mode kegagalan dominan pada sistem EB-FRP adalah debonding antarmuka, baik melalui *intermediate crack* (IC) *induced debonding* maupun *critical concrete cover separation* (CCS) di ujung pelat perkuatan (Al-Saawani et al., 2022; Lu et al., 2005). Efektivitas perkuatan lentur GFRP pada balok tinggi yang memiliki mekanisme transfer beban berbeda dari balok langsing masih memerlukan investigasi mendalam.

Penelitian ini bertujuan: (1) melakukan pemodelan FEA balok tinggi RC berperkuat GFRP di Abaqus/CAE dengan enam variasi model; (2) menganalisis pengaruh setiap parameter terhadap respons gaya-perpindahan; (3) mengidentifikasi mode kegagalan; dan (4) mengevaluasi efektivitas perkuatan GFRP pada kasus balok tinggi.

METODE

Spesimen dan Dimensi Balok

Spesimen adalah balok beton bertulang berpenampang persegi dengan tinggi h = 400 mm, lebar b = 200 mm, dan bentang bersih l_n = 1.270 mm (panjang total 1.470 mm). Rasio $l_n/h = 1.270/400 = 3{,}175 < 4$ sehingga memenuhi kriteria balok tinggi per SNI 2847-2019 Pasal 9.9. Konfigurasi pembebanan adalah four-point bending dengan dua titik beban simetris pada jarak L/3 = 423 mm dari pusat bentang. Tulangan lentur 2D12 (A_s = 113,097 mm²), sengkang D10 spasi 92 mm, dan selimut beton 25 mm. Lembaran GFRP tebal 2 mm lebar 127 mm ditempelkan di sisi tarik bawah sepanjang bentang.

Tabel 1. Parameter Material Pemodelan

Parameter	Nilai	Satuan	Sumber
F'c Beton	27	MPa	Ditentukan sendiri
F_y Tulangan	420	MPa	Ditentukan sendiri
E_s Baja	200.000	MPa	Ditentukan sendiri
E_1 GFRP (//serat)	20.000	MPa	Ditentukan sendiri
E_2 GFRP (⊥ serat)	7.000	MPa	Oregon DOT (2000)

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Nu_{12} GFRP	0,26	–	Oregon DOT (2000)
$G_{12} = G_{13}$ GFRP	1.520	MPa	Oregon DOT (2000)
G_{23} GFRP	2.650	MPa	Oregon DOT (2000)

Variasi Model Pemodelan

Enam model FEA dikembangkan secara hierarkis, masing-masing menambahkan satu mekanisme fisika pada model sebelumnya, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Matriks Konfigurasi Model FEA

Model	GFRP	Beton	*Interaction*	Tujuan
1	Linier Isotropik	Linier	*Tie Constraint*	Batas atas elastik
2	Linier Isotropik	CDP (NL)	*Tie Constraint*	Kapasitas ultimit — lekatan sempurna, isotropik
3A	Linier Anisotropik	CDP (NL)	*Tie Constraint*	Pengaruh anisotropi GFRP
3B	Tanpa GFRP	CDP (NL)	*Tie Constraint*	Balok kontrol (tanpa perkuatan)
4	Linier Anisotropik	CDP (NL)	CZM (IC+CCS)	Pengaruh debonding IC dan CCS
5	*Hashin Damage*	CDP (NL)	CZM (IC+CCS)	Kerusakan progresif material GFRP

Model Konstitutif Material

Beton nonlinear dimodelkan dengan Concrete Damage Plasticity (CDP) menggunakan konstitutif Kent-Park untuk perilaku tekan dan model softening eksponensial untuk perilaku tarik. Parameter CDP disajikan pada Tabel 3. Tulangan baja dimodelkan bilinear elastis-plastis (F_y = 420 MPa, F_u = 520 MPa diasumsikan). Parameter Hashin damage untuk Model 5 disajikan pada Tabel 4.

Tabel 3. Parameter Plastisitas CDP Beton

Dilation Angle	*Eccentricity*	f_{b0}/f_{c0}	K	*Viscosity*
30°	0,1	1,16	0,67	0,0001

Tabel 4. Parameter Hashin Damage GFRP

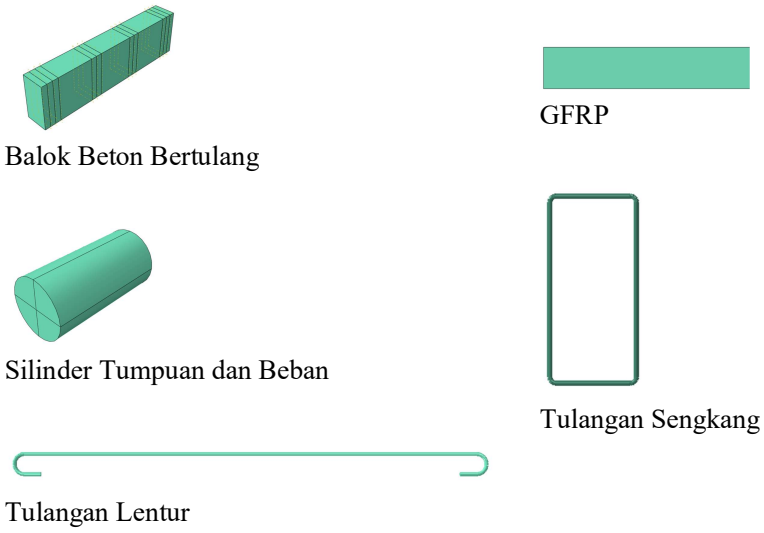
X_T	X_C	Y_T	Y_C	G_{FT}	G_{FC}	G_{MT}	G_{MC}
870	500	30	30	12	4,7	0,1	1,6

Keterangan: XT, XC, YT, YC dalam MPa; GFT, GFC, GMT, GMC dalam N/mm.

Tipe Elemen dan Mesh

Setiap part menggunakan elemen sesuai karakteristik mekanisnya. Balok beton menggunakan C3D8R (8-node brick, reduced integration). Tulangan longitudinal dan sengkang menggunakan T3D2 (2-node truss) yang di-embed dalam host beton. Lembaran GFRP menggunakan S4R (4-node shell) tebal 2 mm. Silinder tumpuan dan beban menggunakan C3D8R dengan rigid body constraint. Ukuran mesh seed pada Tabel 5.

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

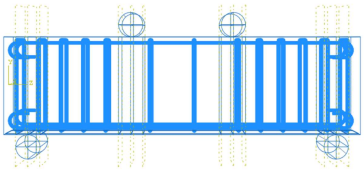


Gambar 2 Parts yang Dimodelkan

Tabel 5. Tipe Elemen dan Ukuran Mesh

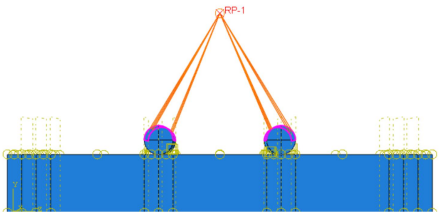
Part	Elemen	Mesh (mm)
Balok Beton	C3D8R	25
Silinder Tumpuan/Beban	C3D8R	15
GFRP	S4R	25
Tulangan Lentur	T3D2	20
Sengkang Geser	T3D2	20

Interaksi, Pembebanan, dan Kondisi Batas

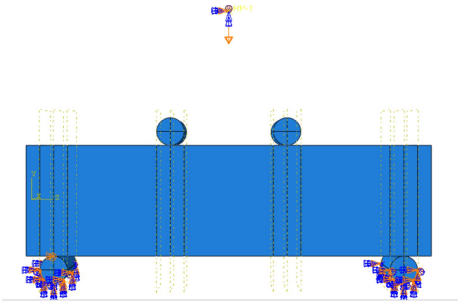


Gambar 3 Assembly Model Elemen Hingga dengan Tulangan Ter-embed

Interaksi beton–tulangan menggunakan *Embedded Region constraint* sedangkan interaksi GFRP–beton menggunakan *tie constraint* (Model 2, 3A, 3B) atau *cohesive zone model* (CZM) *traction-separation* (Model 4 dan 5). CZM-IC mengikuti pendekatan Lu (2005); CZM-CCS mengikuti Al-Saawani (2022) dengan selimut beton sisi tarik dipisahkan sebagai zona kohesif tambahan. Parameter CZM disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7.



E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X



Gambar 4 Kinematic Coupling Reference Point dan Kondisi Batas Pembebanan

Silinder tumpuan–balok menggunakan surface-to-surface contact (hard contact normal, friction penalty tangential). Reference Point (RP) dihubungkan ke silinder beban via kinematic coupling; RP diberi displacement control U2 = −60 mm. Tumpuan di-assign ENCASTRE pada dasar silinder. Analisis dijalankan dengan Nlgeom aktif dan stabilisasi otomatis.

Tabel 6. Parameter CZM – IC Debonding (Lu, 2005)

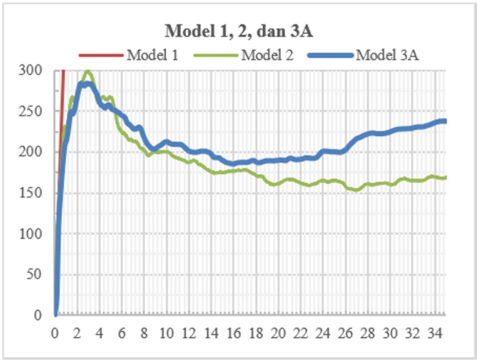
F_{ct} (MPa)	K_0 (MPa)	G_{cr} (N/mm)	τ_{max} (MPa)
2,381	76,923	0,345	2,380

Tabel 7. Parameter CZM – CCS Debonding (Al-Saawani, 2022)

G_c (MPa)	K_0 (MPa)	G_{cr} (N/mm)	τ_{max} (MPa)
10.175,8	10.175,8	0,289	1,714

HASIL DAN PEMBAHASAN

Batas Atas Teoretis dan Pengaruh Anisotropi GFRP



Gambar 5 Kurva Gaya-Perpindahan Model 1, 2, dan 3A

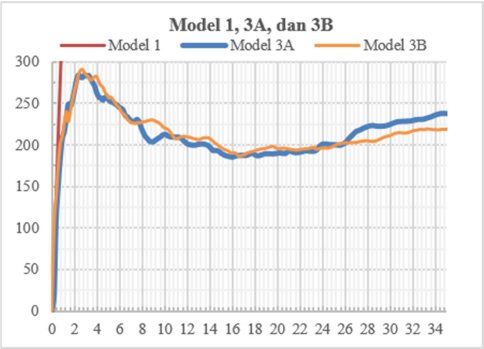
Kurva gaya-perpindahan Model 1 (linear elastik) berupa garis lurus tanpa pelunakan, mengkonfirmasi validitas geometri model (tidak ada error integrasi awal). Model ini berfungsi sebagai referensi kekakuan elastik. Model 2 (isotropik, CDP, tie) menghasilkan gaya ultimit tertinggi di antara model nonlinear, yaitu 298,532 kN. Penerapan sifat anisotropik pada Model 3A mereduksi kapasitas menjadi 284,269 kN (−4,79%), membuktikan asumsi isotropik menghasilkan over-estimate karena mengabaikan kelemahan mekanis GFRP di arah transversal (E_2 = 7.000 MPa << E_1 = 20.000 MPa). Pada perpindahan > 24 mm, Model 3A menunjukkan secondary hardening yang mengindikasikan orientasi serat longitudinal mampu memobilisasi tegangan tarik sisa secara lebih efektif setelah beton mengalami softening akibat retak diagonal.

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Tabel 8. Rekap Gaya-Perpindahan saat Leleh dan Ultimit

Model	F_{Leleh} (kN)	$F_{Ultimit}$ (kN)	Δ_{Leleh} (mm)	$\Delta_{Ultimit}$ (mm)	$\mu = \Delta u/\Delta y$
2	297,385	298,532	3,078	3,009	0,98
3A	284,228	284,269	2,880	2,340	0,81
3B	289,623	290,770	2,520	2,700	1,07
4	249,102	250,568	3,960	3,780	0,94

Efektivitas Perkuatan GFRP pada Balok Tinggi

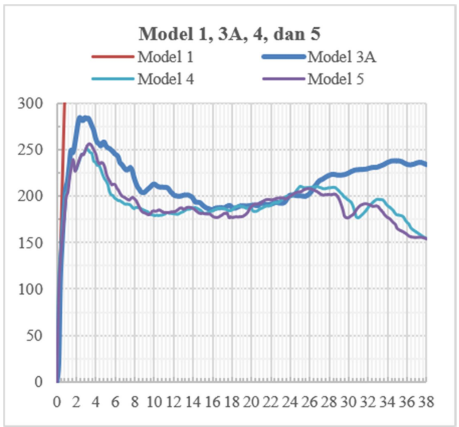


Gambar 6 Kurva Gaya-Perpindahan Model 1, 3A, dan 3B

Balok kontrol Model 3B (tanpa GFRP) mencatatkan gaya ultimit 290,770 kN, sedikit lebih tinggi dari Model 3A berperkuat GFRP (284,269 kN). Fenomena ini merupakan karakteristik inh eren balok tinggi, bukan anomali numerik: pemasangan GFRP dengan tie constraint meningkatkan kekakuan lokal serat tarik bawah secara drastis, memicu konsentrasi tegangan geser yang lebih tinggi pada badan balok. Akibatnya, elemen beton badan balok Model 3A mengalami strut crushing lebih awal dibanding balok kontrol yang distribusi retak-nya lebih fleksibel.

Kesimpulan kritis: perkuatan lentur GFRP pada sisi tarik bawah tidak efektif untuk balok tinggi yang transfer bebannya dikuasai arch action. Kontribusi perkuatan tarik bawah tidak meningkatkan kapasitas global, sebaliknya menimbulkan konsentrasi tegangan prematur yang mempercepat kegagalan geser getas. Temuan ini konsisten dengan Putri et al. (2022) yang menyatakan perkuatan lentur FRP lebih efektif pada balok langsing.

Pengaruh Debonding – Cohesive Zone Model

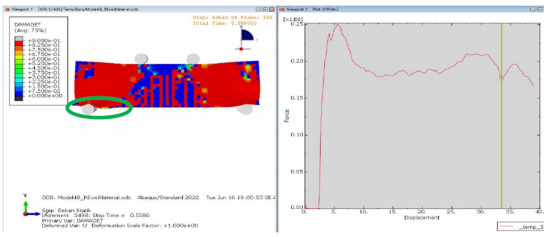


E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Gambar 7 Kurva Gaya-Perpindahan Model 1, 3A, 4, dan 5

Pada fase awal pembebanan (perpindahan 0–2 mm), kurva Model 4 berhimpit dengan Model 3A, memvalidasi parameter kekakuan CZM (Knn, Kss) sudah akurat tanpa menimbulkan premature slip. Setelah tegangan antarmuka melampaui kriteria inisiasi kerusakan, kapasitas ultimit Model 4 turun menjadi 250,568 kN (−11,8% dibanding Model 3A).

Perbedaan paling signifikan terjadi pada tahap pasca-puncak (perpindahan > 28 mm). Model 3A menunjukkan peningkatan kekuatan sisa kontinu (GFRP melekat permanen). Sebaliknya, Model 4 mengalami sudden drop menuju ~140 kN akibat propagasi retak geser diagonal kritis (CCS) yang merambat miring dari badan balok ke ujung lembaran, menciptakan peeling stress masif pada selimut beton. Begitu parameter damage evolution elemen kohesif mencapai 1,0 (rusak total), kontribusi perkuatan hilang sepenuhnya. Model 2 mewakili batas atas (298,532 kN) dan Model 4 batas bawah (250,568 kN) dengan selisih ~16%, menunjukkan kekritisan pemilihan model antarmuka.



Gambar 8 Kontur DAMAGET dan Kurva Gaya-Perpindahan pada Debonding CZM

Model 5 menyajikan pola peluruhan kekuatan sisa yang berjalan secara **progresif, melandai, dan kontinu (***progressive degradation***)** menuju akhir langkah pembebanan. Sifat penurunan kurva yang gradual ini terjadi karena solver Abaqus secara konvergen menghitung akumulasi kerusakan material komposit laminat secara bertahap seiring terjadinya gelincir (*slip*). Kerusakan tersebut mencakup degradasi mekanis pada empat modus kegagalan utama Hashin, yaitu putus serat akibat tarik (*fiber tension*), tekuk serat akibat tekan (*fiber compression*), retak matriks akibat tarik (*matrix cracking*), dan hancurnya matriks akibat tekan (*matrix crushing*).

Analisis Mode Kegagalan

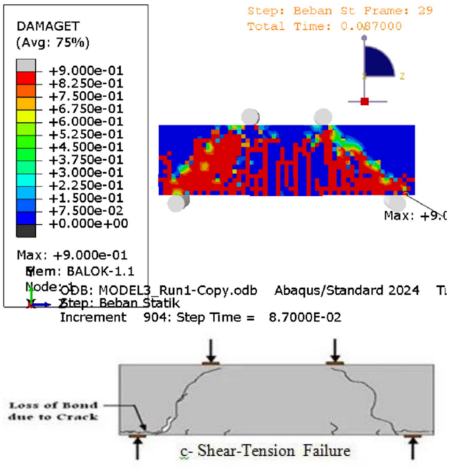
Mode kegagalan dominan adalah kegagalan geser getas (brittle shear failure), atau lebih spesifik Flexure-Shear Failure karena diawali retak lentur sebelum runtuh akibat geser. Empat bukti analitis mendukung kesimpulan ini:

(1) Klasifikasi balok tinggi

$l_n/h = 1.270/400 = 3{,}175 < 4$ per SNI 2847-2019 Pasal 9.9. Balok tinggi secara inheren dikuasai arch action dan rentan terhadap kegagalan geser getas.

(2) Kontur DAMAGET

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X



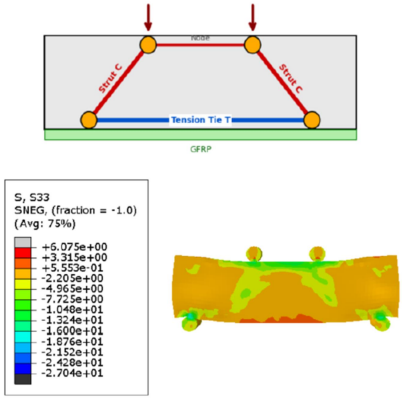
Gambar 9 Kontur DAMAGET Balok dan Pola Kegagalan Geser-Tarik

Pita merah akumulasi kerusakan tarik (DAMAGET > 0,90) menjalar diagonal dari tumpuan bawah ke titik beban atas, mencirikan kegagalan geser-tarik khas balok tinggi.

(3) Rasio daktilitas μ ≈ 1

Perpindahan saat ultimit hampir sama dengan saat leleh pada seluruh model (μ = 0,81–1,07, Tabel 8). Tidak ditemukan yielding plateau; kurva langsung drop mendadak — ciri khas kegagalan geser getas.

(4) Kontur tegangan S33:



Gambar 10 Skema Strut-and-Tie dengan Perkuatan GFRP dan Kontur Tegangan S33

Pola distribusi tegangan menyerupai mekanisme strut-and-tie dengan strut tekan diagonal dari titik beban menuju tumpuan, konsisten dengan teori deep beam.

SIMPULAN

Analisis elemen hingga enam variasi model balok tinggi RC berperkuat GFRP menghasilkan empat kesimpulan utama:

1. Asumsi isotropik GFRP menghasilkan over-estimate kapasitas ultimit sebesar 4,79% dibandingkan model anisotropik. Sifat ortotropik material komposit wajib diperhitungkan dalam pemodelan akurat sistem GFRP-RC.
2. Perkuatan lentur GFRP pada sisi tarik bawah tidak efektif untuk balok tinggi. Balok kontrol (3B, 290,770 kN) mencatat kapasitas lebih tinggi dari model berperkuat (3A, 284,269 kN) karena mekanisme arch action mendominasi

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

transfer beban dan perkuatan tarik bawah menimbulkan konsentrasi tegangan prematur.

3. Pemodelan debonding CZM menurunkan kapasitas 11,8% dari model tie constraint dan menghasilkan penurunan beban katastropik pasca-puncak akibat propagasi CCS debonding. Model antarmuka adalah parameter paling kritis dalam prediksi respons sistem EB-GFRP.
4. Mode kegagalan dominan adalah kegagalan geser getas, dikonfirmasi oleh $l_n/h = 3{,}175$, pola kontur DAMAGET diagonal, dan rasio daktilitas $\mu \approx 0{,}81–1{,}07$. Untuk perkuatan efektif balok tinggi, disarankan skema perkuatan diagonal atau U-wrap yang selaras dengan mekanisme strut-and-tie.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Saawani, M. A., Al-Negheimish, A., El-Sayed, A. K., & Alhozaimy, A. (2022). Finite Element Modeling of Debonding Failures in FRP-Strengthened Concrete Beams Using Cohesive Zone Model. ***Polymers***, 14(9), 1875.

Chen, J. F., & Teng, J. G. (2001). Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 127(7), 784–791.

Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., & Jiang, J. J. (2005). Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures*, 27(6), 920–937.

Oregon Department of Transportation. (2000). *Finite Element Modeling of RC Structures Strengthened with FRP Laminates.* Salem, OR: Oregon DOT.

Putri, E. E., Pramono, H., & Satyarno, I. (2022). Flexural Behavior of Secondary RC Beam Strengthened Using Glass Fiber Reinforced Polymer: Experimental Research. *Civil Engineering Journal*, 8(4), 789–802.

Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., & Lam, L. (2002). *FRP-Strengthened RC Structures.* Chichester: John Wiley & Sons.

Zhang, J., et al. (2021). An Enhanced Progressive Damage Model for Laminated Fiber-Reinforced Composites Using the 3D Hashin Failure Criterion. *Composite Structures*, 266, 113860.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019 — Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.* Jakarta: BS