

PARAMETER STRUKTURAL GIRDER JEMBATAN BETON BERTULANG BERBASIS SIMULASI FEM

Arman Setiawan^{a*}, Rudy Djamaluddin^b, Rusdi Usman Latief^b, Vera Syafirah^c dan Andi Besse Magfira^c

^a Mahasiswa Program Doktor Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia, e-mail : arman.rafif.setiawan@gmail.com

^b Dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

^c Mahasiswa Program Sarjana Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

ABSTRAK

Struktur beton bertulang merupakan elemen penting dalam pembangunan infrastruktur karena ketahanannya, namun sering menghadapi risiko kerusakan akibat beban berlebih, degradasi material, maupun kejadian ekstrem. Evaluasi perilaku balok beton bertulang diperlukan untuk memahami respons mekanik dan memprediksi kapasitas struktur secara akurat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis parameter lentur balok beton bertulang melalui perbandingan antara perhitungan teoritis dan simulasi numerik berbasis Finite Element Method (FEM). Tiga variasi balok dengan dimensi $150 \times 250 \times 3300$ mm dan mutu beton f'_c 30 MPa dan mutu baja f_y 420 MPa dianalisis menggunakan perangkat lunak LUSAS, masing-masing dengan variasi jumlah dan diameter tulangan tarik. Metode penelitian meliputi analisis momen retak, kapasitas ultimit, hubungan beban–lendutan, serta regangan beton dan baja. Hasil simulasi FEM menunjukkan kapasitas beban yang lebih tinggi dibandingkan hasil perhitungan teoritis, dengan perbedaan disebabkan oleh sifat konservatif analisis manual. Balok dengan jumlah dan diameter tulangan lebih besar memperlihatkan peningkatan signifikan dalam kapasitas lentur, kekakuan, dan daktilitas. Selain itu, pola retak dan mode kegagalan memperlihatkan perbedaan karakteristik antar variasi, di mana balok dengan tulangan kecil lebih daktil sementara tulangan besar lebih kaku namun cepat mengalami keruntuhan. Evaluasi kinerja mekanik kemudian diklasifikasikan ke dalam enam level pembebanan, mulai dari kondisi elastis hingga keruntuhan, yang divalidasi dengan SNI 2847:2019. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan FEM efektif untuk mengevaluasi perilaku struktural balok beton bertulang dan dapat menjadi dasar dalam asesmen kondisi jembatan serta perencanaan rehabilitasi.

Kata kunci : Balok beton bertulang, Finite Element Method (FEM), Kapasitas lentur, pola retak, kinerja struktural

3. PENDAHULUAN

Struktur beton bertulang adalah jenis konstruksi yang paling umum digunakan karena hemat biaya dan daya tahannya. Namun, pembangunan infrastruktur yang besar, terutama yang harus dibongkar, dapat berdampak buruk pada lingkungan. Beton menghasilkan alkalin yang sangat basa dengan sering. Lebih dari 50% limbah padat yang dibuang ke tempat pembuangan akhir di Eropa berasal dari konstruksi, bahkan di negara maju seperti Amerika Serikat. (Djamaluddin et al., 2024). Jembatan jalan raya merupakan sistem struktur yang kompleks, dan proses desain serta konstruksinya memerlukan pengetahuan, keahlian, dan pengalaman tingkat tinggi. Prosedur untuk desain, konstruksi, dan pemeliharaan jembatan ditetapkan dengan serangkaian kode dan pedoman desain, dan penerapannya yang berhasil dan tepat menjamin ketahanan dan keamanan jembatan selama masa pakai yang diharapkan.

Penyebab utama kegagalan jembatan umumnya dapat dikategorikan ke dalam lima kelompok besar, yaitu kurangnya keahlian dalam desain maupun konstruksi yang berpotensi menimbulkan kesalahan perhitungan, pemilihan material yang tidak tepat, atau pelaksanaan teknis yang buruk; beban hidup berlebihan akibat lalu lintas yang melampaui kapasitas desain sehingga memicu kerusakan bertahap atau tiba-tiba; peristiwa ekstrem seperti banjir, kebakaran, dan gempa bumi yang memberikan beban tambahan tak terduga pada struktur; kerusakan material bawaan, misalnya korosi atau retak mikro pada beton bertulang yang berkembang menjadi kerusakan serius seiring waktu; serta peristiwa lalu lintas ekstrem, seperti tabrakan kapal atau kendaraan dengan elemen jembatan, yang dapat menimbulkan kerusakan signifikan hingga kegagalan total struktur.

Finite Element Method (FEM) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku struktur maupun material dalam berbagai kondisi secara lebih detail dan efisien. Dalam konteks pengujian lapangan maupun laboratorium, FEM berperan penting untuk memodelkan, memprediksi, sekaligus memvalidasi hasil pengujian fisik. Melalui simulasi, FEM dapat mengidentifikasi potensi masalah atau kegagalan struktur sebelum pengujian dilakukan, sehingga membantu merancang eksperimen yang lebih efektif. Selain itu, hasil simulasi FEM dapat dibandingkan dengan data eksperimen untuk memastikan akurasi model dan memahami pengaruh variasi kondisi lapangan terhadap kinerja struktur. (Zienkiewicz, O. C., & Taylor, 2005) (Jaspart, J. P., & Picaut, 2003) (Oñate, 2009).

Metode elemen hingga (FEM) telah berkembang pesat dalam analisis balok beton bertulang karena mampu menangani perilaku nonlinier dan geometri kompleks. FEM efektif memprediksi respons lentur, geser, pola retak, hingga titik luluh baja dengan akurasi tinggi, serta mampu memodelkan pengaruh kuat tekan beton, mutu tulangan, maupun

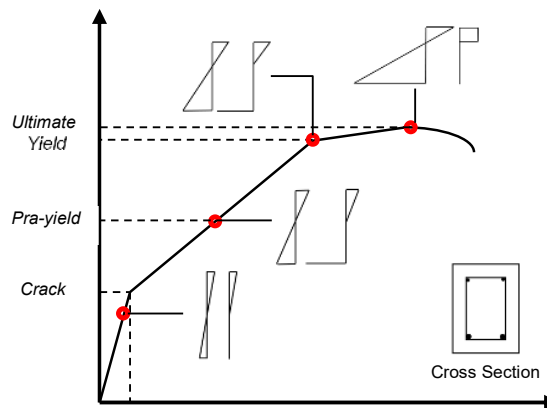
material inovatif seperti aluminium dan ECC yang meningkatkan kapasitas lentur signifikan. Selain itu, FEM juga membuktikan sifat konservatif standar ACI 318-14 pada balok tanpa tulangan transversal. Temuan-temuan ini menegaskan bahwa FEM merupakan alat analisis yang fleksibel dan andal untuk memahami perilaku balok beton bertulang. (Mo dkk. 2023)

Oleh karena itu, pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga (FEM) digunakan untuk memodelkan perilaku struktur beton bertulang dalam berbagai kondisi pembebanan dan degradasi material. Tujuan pemodelan ini adalah untuk mengevaluasi kinerja struktur secara menyeluruh. FEM memungkinkan analisis mendalam terhadap respons struktur terhadap beban statik dan dinamik, termasuk distribusi tegangan dan regangan, identifikasi titik kritis, dan simulasi inisiasi dan propagasi retak.

Berdasarkan dari uraian sebelumnya, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan parameter lentur balok beton bertulang yang diprediksi melalui perhitungan teoritis dengan pemodelan simulasi berbasis FEM, serta mengevaluasi bagaimana pengaruh pola retak dan keruntuhan untuk memperoleh parameter kinerja struktural balok beton bertulang berdasarkan klasifikasi level pembebanan.

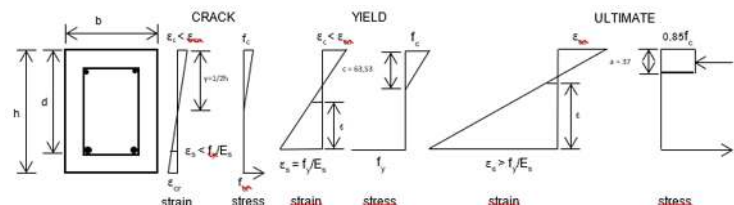
4. PENDEKATAN TEORI

Balok beton bertulang mengalami perubahan perilaku lentur seiring dengan peningkatan beban yang diterapkan, mulai dari retak awal hingga deformasi plastis pada tulangan baja.



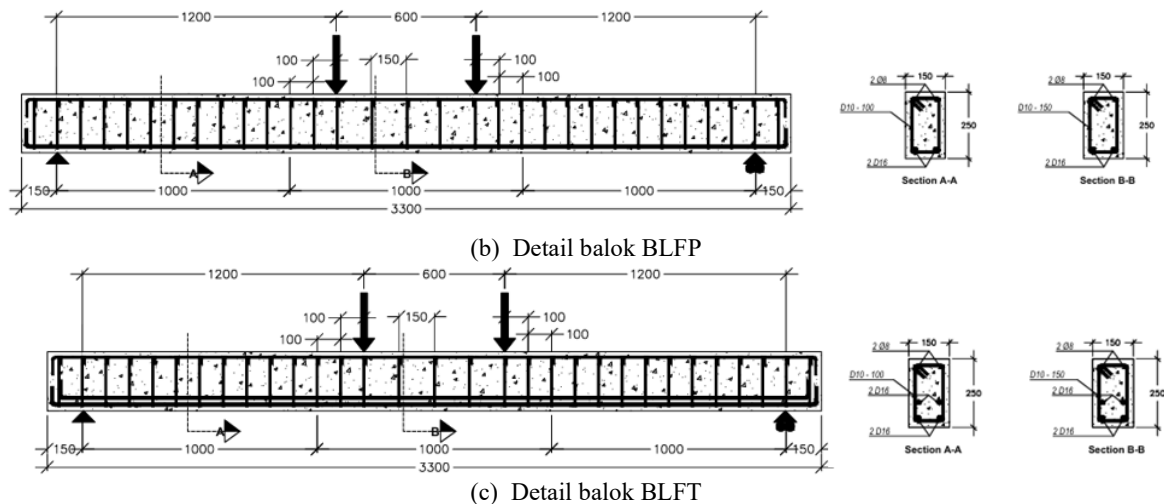
Gambar 1. Kurva Hubungan Tegangan–Regangan dengan Identifikasi Tahap Crack, Pra-Yield, Yield, dan Ultimate

Gambar 1 menunjukkan kurva empat tahap utama perilaku material. Pada tahap retak awal, beton mulai kehilangan kemampuan tariknya sehingga muncul retakan pertama di serat tarik. Selanjutnya, pada tahap pra-yield terjadi redistribusi tegangan, di mana tulangan baja semakin dominan menahan gaya tarik sementara beton di zona tekan masih bekerja efektif. Memasuki tahap yield, baja mencapai kondisi luluh dan berperan besar dalam deformasi, sedangkan beton tekan mulai mendekati kapasitas maksimumnya. Tahap terakhir adalah ultimate, saat beban puncak struktur tercapai sebelum kapasitas menurun dan kekuatan balok berangsur melemah hingga keruntuhan. Perubahan distribusi tegangan–regangan sepanjang proses ini menggambarkan mekanisme kerja komposit beton dan baja, serta memperlihatkan pengaruh penulangan terhadap respons keseluruhan struktur. Momen retak (M_{cr}) menandai retak lentur pertama, momen deformasi plastis menunjukkan deformasi plastis tulangan dengan defleksi besar, dan momen ultimate mewakili kapasitas lentur maksimum sebelum kegagalan. (M.Rohman et al., 2024) (A.Charif et al., 2016) (B. Piątek et al., 2022)



Gambar 2. Distribusi Regangan dan Tegangan Tahap Crack, Pra-Yield, Yield, dan Ultimate

Perhitungan teoretis dilakukan untuk mengevaluasi respons lentur balok beton bertulang, menghasilkan momen karakteristik utama retak, batas leleh, dan batas ultimate yang menentukan kapasitas beban progresif dari retak awal hingga kegagalan. Parameter tambahan seperti defleksi, regangan tulangan, dan regangan tekan beton juga ditentukan.

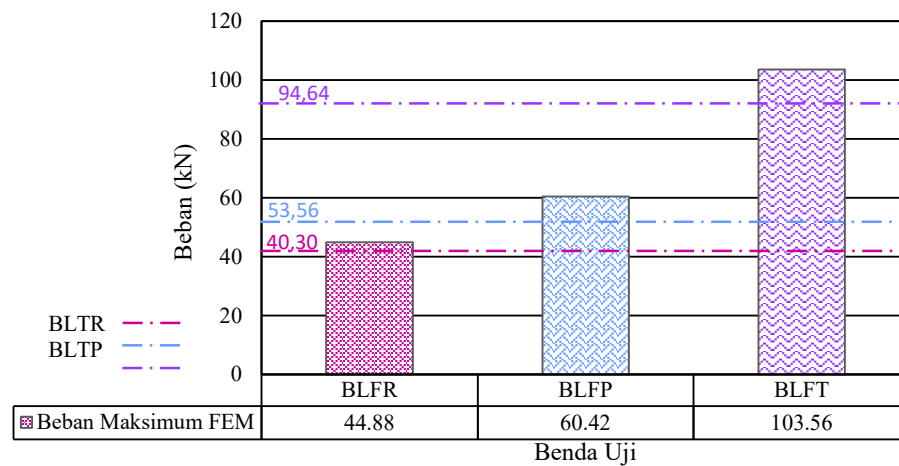


Gambar 4. Detail balok penelitian

6. HASIL DAN PEMBAHASAN

Beban maksimum

Analisis beban maksimum balok lentur penting untuk mengetahui kapasitas hingga kondisi ultimit. Variasi jumlah dan diameter tulangan tarik berpengaruh signifikan karena berfungsi menahan gaya tarik akibat momen lentur. Perbandingan hasil FEM dan perhitungan teoritis memberikan gambaran sejauh mana kedua metode merepresentasikan kapasitas balok, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

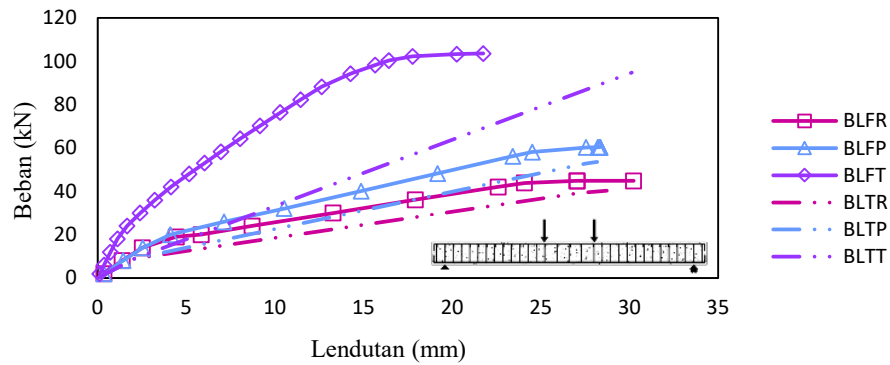


Gambar 5. Beban maksimum balok lentur

Gambar 5 menunjukkan bahwa kapasitas beban maksimum hasil FEM selalu lebih tinggi dibandingkan perhitungan teoritis pada setiap variasi balok. Balok dengan tulangan kecil memiliki kapasitas terendah, sedangkan penambahan jumlah dan diameter tulangan meningkatkan kemampuan menahan beban. Perbedaan ini terjadi karena analisis teoritis bersifat konservatif, sedangkan FEM lebih detail dalam menggambarkan interaksi beton dan tulangan sehingga kapasitas yang diperoleh lebih realistis.

Hubungan beban dan lendutan

Gambar 6 menunjukkan bahwa seluruh balok mengalami kenaikan beban secara progresif seiring bertambahnya lendutan, hingga mencapai titik maksimum sebelum mengalami penurunan atau pelandaian kapasitas.



Gambar 6. Hubungan beban-lendutan

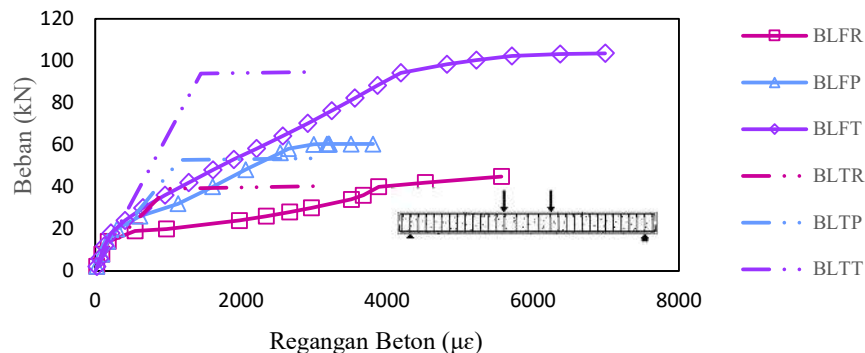
Analisis beban–lendutan menunjukkan bahwa kapasitas balok hasil FEM lebih besar dibandingkan teori. Peningkatan jumlah dan diameter tulangan tarik meningkatkan kemampuan menahan beban, terlihat lebih jelas pada FEM. Dari sisi lendutan, FEM menghasilkan lendutan kritis lebih kecil sehingga balok tampak lebih kaku pada tahap awal, sedangkan pada lendutan ultimit hasilnya sebanding dengan teori. Grafik FEM bersifat non-linier sesuai perilaku material, sementara teori linier dan konservatif karena menggunakan asumsi linear-elastis serta penyederhanaan. Sebaliknya, FEM memodelkan non-linieritas material dan interaksi beton–tulangan lebih detail, termasuk redistribusi tegangan setelah retak. Rekapitulasi hubungan beban–lendutan kedua metode ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi nilai hubungan beban – lendutan hasil FEM dan hasil teoritis

Uraian	Benda Uji	Beban (kN)		Lendutan (mm)	
		P_{cr}	P_{ult}	Δ_{cr}	Δ_{ult}
Hasil FEM	BLFR	8,20	44,88	1,42	30,25
	BLFP	9,00	60,42	1,60	28,35
	BLFT	10,00	103,56	1,94	21,75
Hasil Teoritis	BLTR	8,99	40,30	2,09	28,71
	BLTP	8,99	53,56	2,09	28,18
	BLTT	8,99	94,64	2,09	30,13

Hubungan beban dan regangan beton

Pada gambar 7, analisis hubungan beban–regangan beton menunjukkan bahwa penambahan jumlah serta diameter tulangan tarik berpengaruh besar terhadap kapasitas beban dan regangan ultimit. Pada hasil FEM, balok dengan tulangan lebih besar (BLFT) memiliki kapasitas beban dan regangan maksimum tertinggi dibandingkan BLFR dan BLFP. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan tulangan tidak hanya meningkatkan kekuatan balok, tetapi juga memungkinkan regangan beton berkembang lebih besar sebelum terjadi keruntuhan. Sebaliknya, balok dengan tulangan lebih kecil hanya mencapai regangan ultimit lebih rendah pada beban maksimum, sehingga menunjukkan perilaku yang lebih cepat menuju keruntuhan.



Gambar 7. Hubungan beban-regangan beton

Dibandingkan hasil teoritis, FEM menghasilkan kapasitas beban dan regangan ultimit lebih tinggi. Perbedaan ini

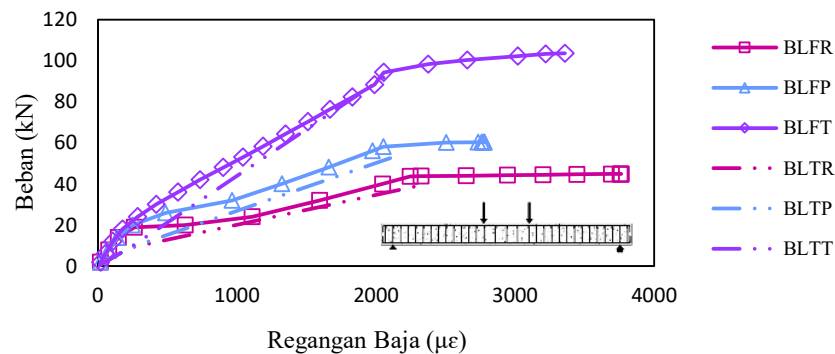
terjadi karena teori menggunakan asumsi linear-elastis dan penyederhanaan regangan beton sehingga konservatif, sedangkan FEM mampu memodelkan non-linieritas material, redistribusi tegangan, serta interaksi beton–tulangan secara lebih detail. Akibatnya, grafik FEM menunjukkan kurva non-linier yang lebih realistis dibandingkan kurva teoritis yang cenderung kaku. Rekapitulasi hubungan beban–regangan beton ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3 . Rekapitulasi nilai beban - regangan beton hasil FEM dan hasil teoritis

Uraian	Benda Uji	Beban (kN)		Regangan Beton ($\mu\epsilon$)	
		P_{cr}	P_{ult}	ϵ_{cr}	ϵ_{ult}
Hasil FEM	BLFR	8,20	44,88	96	5565
	BLFP	9,00	60,42	105	3807
	BLFT	10,00	103,56	108	6987
Hasil Teoritis	BLTR	8,99	40,30	134	3000
	BLTP	8,99	53,56	134	3000
	BLTT	8,99	94,64	134	3000

Hubungan beban dan regangan baja

Dari gambar 8, hasil analisis FEM hubungan beban terhadap regangan baja menunjukkan bahwa balok dengan tulangan lebih besar (BLFT) mampu menahan beban tertinggi dengan regangan baja lebih besar sebelum kapasitas maksimum, sedangkan BLFR dan BLFP memiliki kapasitas lebih rendah; semakin besar penampang tulangan, semakin besar pula kemampuan baja berdeformasi dan menyerap energi sebelum keruntuhan.



Gambar 8. Hubungan beban-regangan baja

Dibandingkan teori, regangan baja hasil FEM lebih besar, sedangkan nilai teoritis lebih rendah dan konservatif. Hal ini karena teori menggunakan asumsi batas leleh baja yang ideal dan linier, sementara FEM mempertimbangkan perilaku non-linier serta interaksi baja–beton. Grafik Gambar 8 menunjukkan kurva FEM berkembang lebih gradual hingga ultimit, sedangkan teori lebih kaku dan berhenti pada titik leleh. Dengan demikian, FEM menggambarkan perilaku baja lebih realistis, sedangkan teori berfungsi sebagai batas aman. Rekapitulasi hubungan beban–regangan baja ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi nilai beban - Regangan Baja hasil FEM dan hasil teoritis

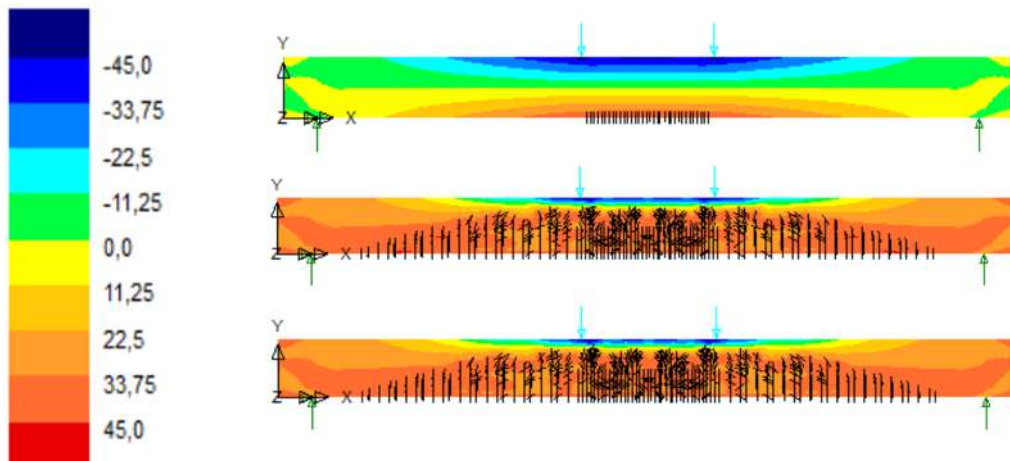
Hasil FEM					Hasil Teoritis			
Benda Uji	Beban (kN)		Regangan Baja ($\mu\epsilon$)		Benda Uji	Beban (kN)		Regangan Baja ($\mu\epsilon$)
	P_{cr}	P_{ult}	ϵ_{cr}	ϵ_{ult}		P_{cr}	P_y	ϵ_{cr} ϵ_{cy}
BLFR	8,20	44,88	79	3761	BLTR	8,99	40,30	229 2306
BLFP	9,00	60,42	86	2776	BLTP	8,99	53,56	229 2105
BLFT	10,00	103,56	88	3358	BLTT	8,99	94,64	229 2105

Pola retak dan mode kegagalan

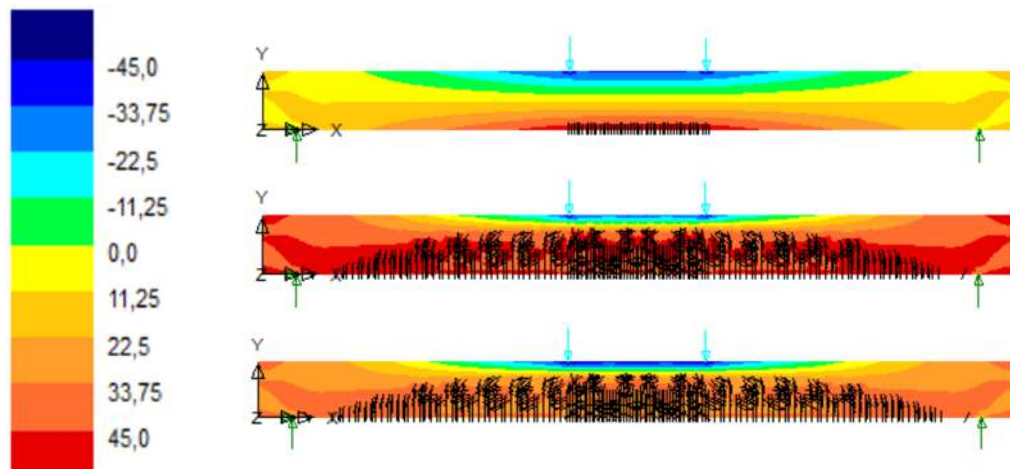
Pola retak diawali oleh retak lentur di tengah bawah balok akibat tarik, lalu berkembang ke atas hingga muncul retak geser diagonal dekat tumpuan, terutama pada sengkang jarang. Balok dengan tulangan kecil lebih daktail, sedangkan tulangan besar lebih kaku dan cepat gagal, sehingga konfigurasi tulangan memengaruhi pola retak, kekakuan, dan karakteristik kegagalan. Rekapitulasi panjang dan luas retak hasil FEM ditampilkan pada Tabel 4, sedangkan pola retak balok terlihat pada Gambar 9.

Tabel 9. Panjang retak dan luas retak pada hasil analisis FEM Balok lentur

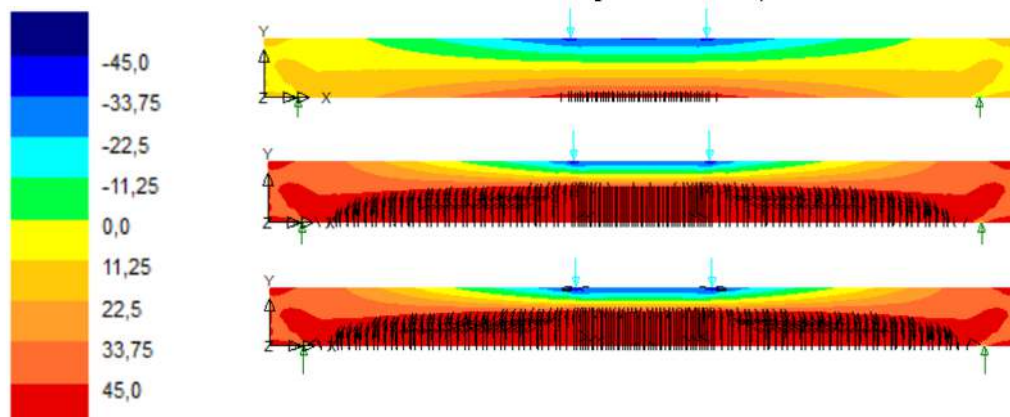
BENDA UJI		PANJANG RETAK (mm)		ZONA RETAK (mm ²)	
		Crack	Ultimate	Crack	Ultimate
BLF	BLFR	27	205	13185	383066
	BLFP	29	210	17962	385085
	BLFT	32	220	34921	492281



Gambar 9a. Pola retak balok BLFR pada saat *crack*, *yield*, dan *ultimate*



Gambar 9b. Pola retak balok BLFP pada saat *crack*, *yield*, dan *ultimate*

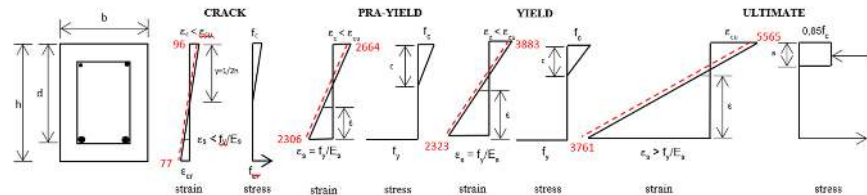


Gambar 9c. Pola retak balok BLFT pada saat *crack*, *yield*, dan *ultimate*

1) BLFR

Balok BLFR dengan tulangan tarik 2D13 (Gambar 10a) memiliki kapasitas lentur terendah. Retak awal muncul lebih

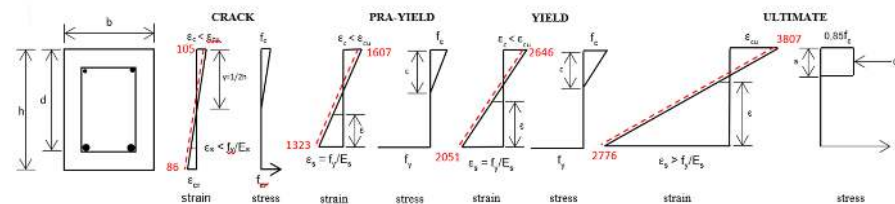
cepat dan tulangan baja belum berkontribusi maksimal, sehingga beton serat tekan lebih cepat mencapai regangan ultimit. Konfigurasi 2D13 ini menunjukkan keterbatasan BLFR dalam menahan beban lentur serta perilaku deformasi yang kurang daktail dibandingkan balok dengan tulangan lebih besar.



Gambar 10a. Distribusi tegangan-regangan BLFR

2) BLFP

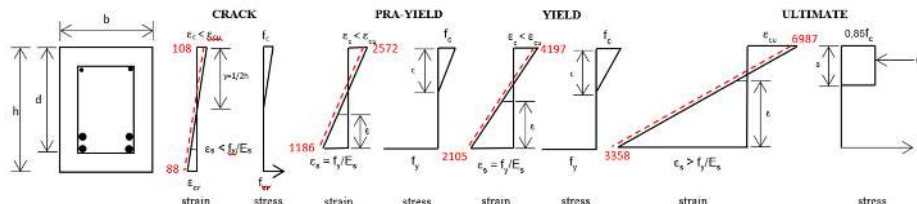
Balok BLFP dengan tulangan tarik 2D16 (Gambar 10b) menunjukkan kapasitas lentur lebih tinggi dibandingkan BLFR berkat penambahan luas tulangan. Distribusi tegangan–regangan memperlihatkan kontribusi signifikan tulangan baja setelah retak awal, sementara beton serat tekan tetap efektif hingga mendekati ultimit. Dengan konfigurasi 2D16, balok memiliki kapasitas lebih besar dan perilaku deformasi lebih daktail dibandingkan BLFR



Gambar 10b. Distribusi tegangan-regangan BLFP

3) BLFT

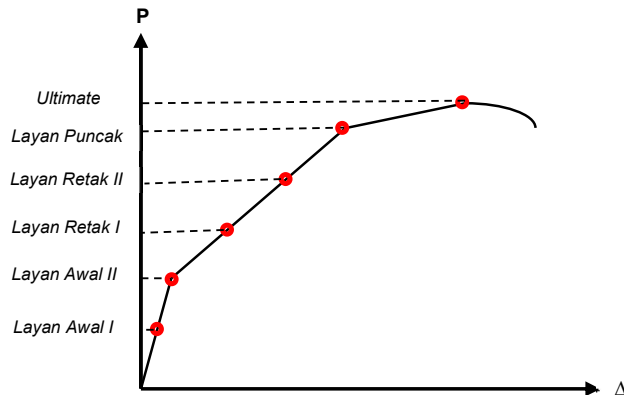
Balok BLFT dengan tulangan tarik 4D16 (Gambar 10a) memiliki kapasitas lentur tertinggi di antara seluruh variasi. Setelah retak awal, baja tulangan berperan dominan menahan beban, sementara beton serat tekan tetap bekerja optimal hingga ultimit. Dengan konfigurasi ini, BLFT menunjukkan ketahanan beban yang jauh lebih besar serta deformasi lebih daktail dibandingkan BLFR dan BLFP, menegaskan bahwa penambahan jumlah dan diameter tulangan tarik secara signifikan meningkatkan kapasitas lentur dan stabilitas distribusi tegangan–regangan.



Gambar 10c. Distribusi tegangan-regangan BLFT

Parameter kinerja mekanik

Evaluasi parameter kinerja mekanik struktur jembatan beton bertulang secara umum dilakukan dengan mengacu pada kurva hubungan beban dan lendutan sebagai indikator utama perilaku struktur terhadap pembebanan. Kurva ini mencerminkan respon progresif material terhadap beban, yang terbagi ke dalam enam level kerusakan mulai beban Layan Awal I, Layan Awal II, Layan Retak I, Layan Retak II, Layan Puncak, dan Ultimate. Masing-masing tahap menunjukkan pergeseran perilaku mekanik, seperti inisiasi regangan, pembentukan retak awal, peningkatan regangan baja dan beton, hingga penurunan kekakuan dan kapasitas struktur secara keseluruhan. Dalam konteks lapangan, tahapan ini berguna untuk menginterpretasikan kondisi aktual jembatan berdasarkan gejala deformasi dan retakan yang terukur, sementara melalui pendekatan *Finite Element Method* (FEM), perilaku tersebut dapat disimulasikan secara numerik untuk mengidentifikasi batas plastis dan ultimate berdasarkan parameter material yang dimasukkan. Penggunaan gabungan data lapangan dan FEM memungkinkan penilaian lebih objektif dan akurat terhadap sisa kapasitas struktur, serta mempermudah pengambilan keputusan teknis untuk pemeliharaan atau rehabilitasi.



Gambar 11. Kurva hubungan beban-lendutan dan level kerusakan balok beton bertulang

Pada gambar 11, dimulai dari kondisi awal struktur (*pra-crack*) hingga mencapai titik *ultimate* (keruntuhan), dengan memperhatikan interaksi antara parameter gaya, deformasi, dan sifat material.

a) Layan Awal I (*Prelinear Service*)

Balok masih berperilaku elastis murni. Tidak ada retakan atau deformasi permanen. Hubungan beban dan deformasi masih linier. Kinerja jembatan berada pada kondisi optimal dan aman.

b) Layan Awal II (*Crack Initiation*)

Terjadi retakan awal pada beton tarik. Lendutan dan regangan mulai meningkat nonlinier. Meskipun belum memasuki zona yield, struktur mulai menunjukkan penurunan kekakuan awal.

c) Layan Retak I (*Progressive Cracking*)

Retakan meluas, dan sebagian besar tulangan mulai bekerja efektif. Beton tekan mengalami mikroretak. Terjadi redistribusi gaya internal. Tahap ini kritis untuk pemantauan performa jangka panjang.

d) Layan Retak II (*Pre-Yield Transition*)

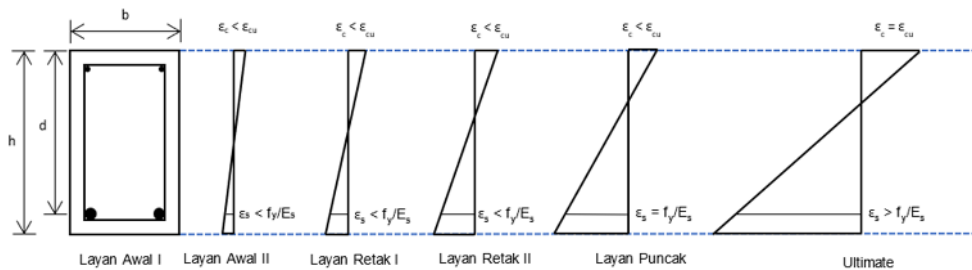
Struktur memasuki zona plastis. Regangan tulangan sudah mendekati yield standar baja ($\sim 2000 \mu$). Beton mulai mengalami konsentrasi tekanan. Deformasi makin meningkat meskipun kenaikan beban tidak signifikan.

e) Layan Puncak (*Yield Plateau*)

Struktur sepenuhnya berada dalam perilaku plastis. Baja melampaui regangan leleh. Retakan pada beton berkembang luas. Lendutan tinggi dan cenderung bertambah cepat. Potensi keruntuhan lokal meningkat.

f) Ultimate (Keruntuhan Maksimum)

Tahap ini identik dengan kondisi berbahaya dan mendekati keruntuhan struktural. Bila jembatan menunjukkan parameter aktual yang mendekati nilai ini, tindakan penguatan atau pelarangan beban harus segera dilakukan.



Gambar 12. Distribusi resgangan terhadap level pembebanan

Gambar 12 menunjukkan distribusi regangan balok beton bertulang dari kondisi elastis hingga keruntuhan. Pada tahap awal (Layan Awal I & II), beton dan baja masih elastis hingga beton mulai retak akibat regangan tarik. Memasuki fase Layan Retak I & II, baja dominan menahan tarik, sumbu netral bergeser ke bawah, dan blok tegangan beton semakin nyata. Pada tahap ini, beton menahan tekan maksimum sementara baja mendekati atau melewati leleh. Selanjutnya, pada Layan Puncak hingga Ultimate, baja bekerja plastis dan beton mencapai regangan maksimum ($\epsilon_c = 0,003$). Kapasitas momen maksimum tercapai dengan distribusi regangan tetap linier, sedangkan tegangan sangat nonlinier. Pada kondisi ultimate, terjadi redistribusi gaya internal hingga keruntuhan, yang menandai batas deformasi dan daya dukung balok beton bertulang.

Interpretasi Parameter Kinerja Struktural pada Setiap Level Deformasi

Rentang nilai tiap parameter diambil dari hasil simulasi metode elemen hingga (FEM), yang memungkinkan pemetaan progresif dari kondisi pra-crack hingga ultimate secara numerik. Analisis ini memberikan dasar untuk menghubungkan hasil FEM dengan indikator kinerja jembatan, seperti batas lendutan dan kapasitas regangan, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam evaluasi kondisi struktural dan peringatan dini kegagalan. Berdasarkan parameter terukur seperti beban, lendutan, regangan baja, dan regangan beton. Hal ini dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Kriteria kuantitatif

Parameter	Zona Aman	Zona Waspada	Zona Bahaya
Beban (kN)	< 30% kapasitas ult.	30–80% kapasitas ult.	> 80–90% kapasitas ult.
Lendutan (mm)	< 50% Δ maks desain	50–80% Δ maks desain	> 80% Δ maks atau > Δ izin SNI
Reg. Baja (μ)	< 1000 (elastis)	1000–2000 (transisi)	> 2000 μ (yield / plastis)
Reg. Beton (μ)	< 1000	1000–2500	> 3000 (zona pasca-retak)

Berdasarkan hasil evaluasi parameter kinerja struktural menggunakan pendekatan metode elemen hingga (FEM), serta dikombinasikan dengan batas-batas kuantitatif performa pada Tabel 5, maka seluruh tahap deformasi dapat dikelompokkan menjadi enam zona perilaku struktural yang merepresentasikan tingkat kerusakan dan respon material terhadap beban yang disajikan pada tabel 6 dan tabel 7.

Tabel 6. Evaluasi Analisis Parameter Kinerja Struktural Balok Lentur Jembatan Beton Bertulang

LEVEL PEMBEBANAN	BALOK LENTUR (kN)			PANJANG RETAK (cm)	ZONA RETAK (cm ²)	
	BLF 1	BLF 2	BLF 3		Vertikal	Diagonal
Layan Awal I (<i>Prelinear Service</i>)	0 – 8	0 – 9	0 – 10	0 – 3	0 – 90	–
Layan Awal II (<i>Crack Initiation</i>)	8 – 20	9 – 29	10 – 47	23 – 29	80 – 1200	–
Layan Retak I (<i>Progressive Cracking</i>)	20 – 25	29 – 34	47 – 52	29 – 210	1000 – 2500	–
Layan Retak II (Pre-Yield Transition)	25 – 30	34 – 40	52 – 80	210 – 220	2200 – 3000	–
Layan Puncak (Yield Plateau)	30 – 45	40 – 61	80 – 104	220	3000	1651 – 1923
Ultimate (<i>Keruntuhan Maksimum</i>)	45	61	104	>220	> 3000	> 1923

Tabel 7. Klasifikasi Level Pembebanan Kinerja Mekanik Jembatan Beton Bertulang

LEVEL PEMBEBANAN	BEBAN BLF (%)	PANJANG RETAK (%)	ZONA RETAK (%)		PARAMETER KINERJA STRUKTUR	RESPON MATERIAL (BAJA & BETON)	EVALUASI STRUKTURAL GABUNGAN
			Vertikal	Diagonal			
Layan Awal I (<i>Prelinear Service</i>)	0 – 9	0 – 3	0 – 2	–	Struktur belum retak	Regangan mulai muncul di baja tarik (zona bawah); beton masih dalam batas elastis	Struktur lentur dan geser masih bekerja baik; belum tampak kerusakan visual
Layan Awal II (<i>Crack Initiation</i>)	10 – 19	4 – 22	3 – 4	–	Muncul Retak awal	Retakan awal di zona tarik bawah; beton zona geser belum aktif	Awal kerusakan lentur; balok geser belum menunjukkan gejala struktural

LEVEL PEMBEBANAN	BEBAN BLF (%)	PANJANG RETAK (%)	ZONA RETAK (%)		PARAMETER KINERJA STRUKTUR	RESPON MATERIAL (BAJA & BETON)	EVALUASI STRUKTURAL GABUNGAN
			Vertikal	Diagonal			
Layan Retak I (<i>Progressive Cracking</i>)	20 – 40	23 – 30	5 – 12	–	Perkembangan retak terukur	Regangan meningkat di baja tarik (tulangan bawah); beton geser mulai menunjukkan deformasi ringan	Retakan menjalar ke atas; deformasi mulai tampak di web
Layan Retak II (<i>Pre-Yield Transition</i>)	41 – 96	31 – 50	13 – 35	–	Penurunan kekakuan struktur	Baja tarik bawah bekerja penuh; regangan meningkat; beton mulai melemah di zona tekan & web	Struktur menunjukkan perilaku nonlinier; area lemah mulai menyebar
Layan Puncak (<i>Yield Plateau</i>)	91 – 99	73 – 93	42 – 54	0 – 28	Deformasi signifikan terlihat	Regangan plastis dominan di baja tarik bawah; regangan geser dominan terjadi pada tulangan sengkang (baja geser); beton dan web mengalami kerusakan akibat gaya geser	Retakan vertikal dan geser berkembang bersamaan; penyatuan deformasi di web dan tumpuan
Ultimate (<i>Keruntuhan Maksimum</i>)	100	100	60	>28	Keruntuhan struktur	Regangan maksimum di baja tarik bawah dan tulangan geser; keruntuhan akibat kombinasi geser dan lentur tidak terhindarkan	Struktur mencapai ambang keruntuhan lokal; deformasi tidak dapat dibalikkan; zona geser hancur

Hasil simulasi *Finite Element Method* (FEM) pada balok beton bertulang menghasilkan enam level kinerja, yaitu **Layan Awal I, Layan Awal II, Layan Retak I, Layan Retak II, Layan Puncak, dan Ultimate**. Hasil simulasi ini divalidasi dengan standar desain yang tercantum dalam SNI 2847:2019 (ACI 318-14), sehingga dapat diketahui tingkat kesesuaian antara perilaku struktur hasil analisis dengan regulasi yang berlaku. Dalam SNI 2847:2019, evaluasi struktur dibagi ke dalam dua kategori utama, yaitu:

1. **Serviceability Limit State (SLS)**, yang menekankan aspek **fungsi dan kenyamanan** struktur, seperti kontrol lendutan dan kontrol retak.
2. **Ultimate Limit State (ULS)**, yang menekankan aspek **kekuatan dan keamanan** struktur, meliputi kapasitas nominal, daktilitas, serta mekanisme keruntuhan yang diizinkan.

Dengan adanya validasi ini, klasifikasi level kinerja hasil penelitian pada tabel 8 dapat dipetakan sesuai standar desain, sehingga memperkuat relevansi metode FEM dalam mengevaluasi perilaku balok beton bertulang.

Tabel 8. Kesesuaian Level Kinerja Balok Beton Bertulang terhadap SNI 2847:2019

Level Pembebanan	Parameter Kinerja Struktur	Respon Material	Evaluasi Struktural	Pasal SNI 2847:2019	Limit State
Layan Awal I	Beban kecil, lendutan awal	Baja & beton elastis	Struktur masih baik	Pasal 24.2.2 & 24.2.3 (kontrol lendutan)	SLS
Layan Awal II	Retak mikro awal	Retak pada baja tarik bawah	Awal kerusakan lentur	Pasal 24.3.2.4 (kontrol lebar retak)	SLS
Layan Retak I	Kekakuan berkurang, lendutan meningkat	Regangan baja naik, beton geser mulai aktif	Retakan menjalar	Pasal 24.2.3 (lendutan jangka panjang)	SLS → ULS
Layan Retak II	Kehilangan kekakuan signifikan	Baja tarik penuh, beton web melemah	Struktur nonlinier	Pasal 22.2.1.2 ($\phi M_n \geq M_u$, $\phi V_n \geq V_u$)	ULS
Layan Puncak	Kapasitas hampir tercapai	Baja tarik plastis, kerusakan geser dominan	Retakan lentur & geser berkembang	Pasal 21.2.2 (syarat daktilitas)	ULS
Ultimate	Keruntuhan total	ϵ_c beton $\approx 0,003$, ϵ_s baja $\geq 0,004$	Struktur gagal total	Pasal 22.2.2.4 (ϵ_c), Pasal 22.3.2.1 (ϵ_s)	ULS

7. KESIMPULAN

Pengaplikasian karakteristik retak yang terkait dengan parameter kinerja mekanis dapat digunakan untuk memprediksi tingkat kinerja struktural dengan lebih akurat. Pendekatan ini memberikan dasar yang kuat untuk evaluasi berbasis retak sambil mendukung deteksi kerusakan yang lebih efisien dan mengurangi ketergantungan pada pengamatan manual jembatan. Dengan metode ini dapat berkontribusi pada peningkatan efektivitas pemeliharaan dan memastikan keamanan jembatan. Klasifikasi Kinerja – Perilaku balok beton bertulang dapat diklasifikasikan ke dalam enam tahap yang berbeda: Beban Layanan Awal I & II, Beban Retak Awal I & II, Platau Yield, dan Beban Ultimate, mencakup respons penuh dari fase elastis hingga kegagalan.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Charif, S. M. Mourad, and M. I. Khan, "Flexural behavior of beams reinforced with steel bars exceeding the nominal yield strength," *Latin Am. J. Solids Struct.*, vol. 13, no. 6, pp. 945–958, Feb. 2016, <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78251683>
- Anonim. *Lusas Example Manual version 14.0*.
- Anonim. *Lusas Example Help version 14.0*.
- American Concrete Institute. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. ACI.
- American Concrete Institute. (2001). *ACI 224R-01: Control of cracking in concrete structures*. <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=224R01>
- B. Piątek and T. Siwowski, "Experimental study on flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with passive and active CFRP strips using a novel anchorage system," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 22, Art. no. 45, Jan. 2022, <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00364-7>
- Bazant, Z. P., & Oh, B.-H. (1983). Crack band theory for fracture of concrete. *Materials and Structures*, 16(93), 155–177. <https://doi.org/10.1007/BF02486267>
- Djamaluddin, R., Irmawaty, R., Fakhruddin, & Yamaguchi, K. (2024). Flexural Behavior of Repaired Reinforced Concrete Beams Due to Corrosion of Steel Reinforcement Using Grouting and FRP Sheet Strengthening. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 10(1), 222–233. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-01-014>
- Effendi, MK (2020). Analisis Elemen Hingga Non-Linear Balok Beton Bertulang Lentur Menggunakan Embedded Reinforcement Modeling. *Jurnal Sipil*. <https://doi.org/10.221>
- Gilbert, R. I. (1990). *Time effects in concrete structures*. Elsevier Applied Science.
- Ismail, E., Issa, M. S., & Elbadry, K. (2021). Finite element analysis of reinforced concrete deep beam with large opening. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s43088-021-00079-5>

- Jaspart, J. P., & Picaut, J. (2003). Finite element analysis for structural engineering and laboratory tests. *Journal of Structural Engineering*, 129(3), 397–404.
- M. Rohman, I. Purwanto, H. Kurniawan, dan R. A. Saptaji, "Flexural Behavior of High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete Beams to Normal Concrete Beams," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 14, no. 6, pp. 17792-17797, 2024
- Misra, A., Singh, VK, & Sharma, R. (2018). "Penilaian kondisi jembatan di bawah beban lingkungan dan lalu lintas." *Jurnal Internasional Teknik Struktur*, 9(2), 189–201.
- Mo, C., Huang, J., Huang, J., & Tan, J. (2023). Analisis elemen hingga pada kinerja lentur kapasitas lentur untuk balok beton yang diperkuat dengan ECC dan batang paduan aluminium. *Sorotan dalam Sains, Teknik dan Teknologi*, 62, 22. <https://doi.org/10.54097/hset.v>
- Nilson, A. H., Darwin, D., & Dolan, C. W. (2010). *Design of Concrete Structures* (14th ed.). McGraw-Hill.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (4th ed.). Longman.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Nawy, E. G. (2003).** *Reinforced concrete: A fundamental approach* (5th ed.). Prentice Hall.
- Nawy, E. G. (2009).** *Reinforced concrete: A fundamental approach* (6th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Oñate, E. (2009). *Structural analysis with the finite element method: Linear statics*. Springer Series in Computational Mechanics.
- Ponnada, MR, Geddada, Y., & P., P. (2023). Pemodelan elemen hingga nonlinier dan analisis parametrik balok beton bertulang yang komprehensif. *Jurnal Teknik Dunia*, 20(1), <https://doi.org/10.1108/WJE-04-2021-0212>
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 1725:2016 – Beban minimum untuk perencanaan jembatan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2019 – Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Tanika, AN, & Leman, S. (2023). Analisis Kekuatan Geser Beton Bertulang Tanpa Tulangan Transversal Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Internasional Aplikasi pada Sains, Teknologi dan Rekayasa*, 5. <https://journal.untar.ac.id/index.php/ijaste/artikel/>
- Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (1986). The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Journal*, 83(2), 219–231. <https://doi.org/10.14359/10416>
- Wight, J. K. (2015). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design* (7th ed.). Pearson Education.
- Yusof, M. Z. (2015). *Finite element studies on the behavior of reinforced concrete beams using LUSAS*. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(11), 369–373. Retrieved from <https://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2015/April/369-373.pdf>
- Yeon, Y.-M., Lee, W., & Hong, K.-N. (2022). Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams Prestressed by Fe-Based Shape Memory Alloy Bars. *Applied Sciences*, 12(7), 3525. <https://doi.org/10.3390/app12073525>
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The finite element method: Volume 1: The basis*. Butterworth-Heinemann.
- Zhu, Y., Li, H., Wang, J., & Chen, Z. (2020). *Shear behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate*. *Construction and Building Materials*, 250, 118878. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118878>