

IMPLEMENTASI RETROFIT PADA KERUSAKAN STRUKTUR BETON BERTULANG

**Ndaru Sukmono Aji^{1*}, Luluk Kristanto², Nur Khamid³, Januari Tarigan⁴,
Mara Muda Siregar⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Prodi Teknik Sipil Pertahanan Kordos Akmil, Jl. Gatot Subroto No 1
Magelang

¹ndarusukmono@gmail.com, ²mrluke.014@gmail.com,

³hamidbenteng@gmail.com, ⁴jantarigan8@gmail.com,

⁵regarmaramuda@gmail.com.

ABSTRAK

Tidak semua bangunan yang telah mengalami kerusakan tidak dapat digunakan lagi (*demolished*). Tetapi masih dapat digunakan lagi setelah dilakukan dengan penilaian (*assessment*). Dari hasil *assessment*, selanjutnya dapat dilakukan penggantian elemen struktur (*replacement*) dan perkuatan struktur (*retrofitting*). Penulisan disajikan secara literasi untuk memberikan gambaran penerapan retrofit pada struktur beton bertulang serta peningkatan karakteristik struktur yang mampu diberikan sebagai salah satu teknik perbaikan dan peningkatan kinerja struktur. Berdasarkan hasil dari beberapa kajian penelitian, metode Retrofit terbukti dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan tekan dari struktur beton bertulang normal yang mengalami kerusakan. Retrofit dapat diimplementasikan dengan baik pada struktur beton bertulang bangunan gedung dan bangunan daerah pantai sesuai standar acuan.

Kata-kunci: Retrofit; Struktur Beton Bertulang.

ABSTRACT

In this case, not all damaged buildings are useless (demolished). But it can still be used again after an assessment has been carried out. From the results of the assessment, structural elements could be replaced (replacement) and structural strengthening (retrofitting). This writing is presented by literate method to provide an overview of the retrofit application to reinforced concrete structures as well as the improvement in structural characteristics that can be provided as a technique for repairing and increasing structural performance. Based on the results of several research studies, the retrofit method is proven to be able to increase the flexural, shear and compressive capacity of damaged reinforced concrete structures. Retrofit can be implemented properly in reinforced concrete structures of buildings and coastal area buildings according to reference standards.

Keywords: Reinforced concrete structures, Retrofit.

PENDAHULUAN

Tidak semua bangunan yang telah mengalami kerusakan tidak dapat digunakan lagi (*demolished*). Tetapi masih dapat digunakan lagi setelah dilakukan dengan penilaian (*assessment*). Setelah didapatkan

hasilnya, dapat dilakukan, yaitu penggantian elemen struktur (*replacement*) dan perkuatan struktur (*retrofitting*). Tujuan dari upaya dilakukannya *retrofitting* yaitu untuk meningkatkan kekakuan/kekuatan, meningkatkan daktilitas, memperbaiki energi disipasi struktur,

serta meningkatkan fungsi layan bangunan (Boen, 2009, dalam Rahman dkk, 2023).

Ada dua jenis perbaikan yang dapat dilakukan dalam pekerjaan *retrofitting* yaitu *repairing* dan *strengthening*. Istilah *repairing* diterapkan pada bangunan yang sudah rusak, dimana telah terjadi penurunan kekuatan, untuk dikembalikan seperti semula. Sedangkan *strengthening* adalah suatu tindakan modifikasi struktur, mungkin belum terjadi kerusakan, dengan tujuan untuk menaikkan kekuatan atau kemampuan bangunan untuk memikul beban-beban yang lebih besar akibat perubahan fungsi bangunan dan stabilitas (Khoeri, 2021).

Perkuatan diterapkan pada struktur atau komponen struktur yang belum rusak agar didapatkan kapasitas yang lebih besar dalam mendukung beban baru akibat penambahan beban (Christiawan, 1998 dalam Trisnawathy 2021).

Salah satu teknik perbaikan elemen-elemen struktur berupa perkuatan diperlukan apabila terjadi degradasi bahan yang berakibat tidak terpenuhi lagi persyaratan-persyaratan yang bersifat teknik yaitu: kekakuan (*stiffnes*), kekuatan (*strength*), stabilitas (*stability*) dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan (*durability*) (Jamal dkk, 2015 dalam Kristanto, 2023). Perbaikan struktur ada beberapa jenis yaitu perkuatan menggunakan baja profil, perkuatan menggunakan Carbon Fiber Reinforce Polymer, perkuatan menggunakan metode Near Surface Mounted, perkuatan menggunakan metode Jaketing (Hadi dkk, 2021).

METODE

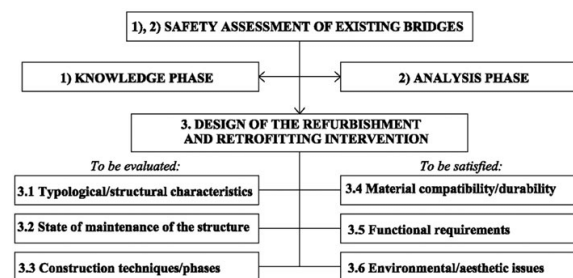
Penulisan disajikan secara literasi untuk memberikan gambaran penerapan retrofit pada struktur beton bertulang serta peningkatan karakteristik struktur yang mampu diberikan sebagai salah satu teknik perbaikan dan peningkatan kinerja struktur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahapan Desain dan Aplikasi

Kerusakan pada beton biasanya berupa lendutan berlebih, retak-retak dan pengelupasan lapisan selimut beton. Penyebab kerusakan meliputi: kelebihan tegangan akibat beban yang bekerja lebih besar dari kemampuan beton, beton yang belum cukup umur untuk menerima beban, peralihan fungsi bangunan, kejadian alam (seperti gempa bumi, longsor terpaan angin kencang, dll) (Herlambang, 2018).

Tahapan Desain dan Penerapan Retrofit Struktur Beton Bertulang:



Gambar 1. Diagram Alur Metodologi Operasi Penilaian dan Retrofit. (Sumber: Modena dkk, 2015)

Perbaikan struktur dilakukan setelah dilalui serangkaian assessment, diantaranya dengan alat DT dan NDT, guna mencari parameter kegagalan dan informasi rancangan retrofit.

Seiring dengan kemajuan teknologi material konstruksi yang

lebih bersifat ringan dan kuat, maka metode perbaikan secara konvensional secara perlahan mulai bergeser ke metode yang lebih modern. Hal ini untuk lebih mengefisienkan tenaga, biaya, dan waktu sehingga diperlukan perkuatan atau perbaikan struktur (Derianto dkk, 2022).

Injeksi Epoxy

Pada kerusakan berupa retak hingga ke dalam inti struktur, dan bila mungkin terjadi pelupasan permukaan (*spalling*). Upaya perbaikan keretakan beton dapat dilakukan dengan jalan injeksi epoxy untuk mengisi celah-celah keretakan hingga tertutup keseluruhan dan menyatukan bagian-bagian beton yang terpisah. Cara ini dapat digabungkan dengan cara lainnya yaitu penggantian selimut beton jika diketahui retak hanya sampai selimut beton dan membungkus elemen yang retak dengan bahan yang lebih daktail seperti jaring kawat, CRFD, dll. Penggabungan semua cara itu ternyata mampu meningkatkan kapasitas beban ultimit namun kekakuan meturun (Herlambang dkk, 2018).



Gambar 2. Metode Injeksi pada Keretakan Struktur Beton Bertulang
(Sumber: Kristanto dkk, 2023)

Perbaikan dilakukan dengan cara diinjeksi pada retak yang terjadi. Keandalan metode injeksi ini sangat

tergantung pada tingkat viskositas dari epoxy yang dipergunakan. Pada uji kuat tekan beton, epoxy resin juga mampu memberikan hasil yang baik. Hal ini terbukti dengan naiknya nilai kuat tekan kubus beton 150x150x150 mm setelah dilakukan injeksi epoxy resin. Uji kuat tekan beton ini dilakukan pada umur beton 7, 14 dan 21 hari (Herlambang dkk, 2018).

Proses injeksi epoxy sangat berperan besar dalam keberhasilan perbaikan beton yang mengalami retak. Hal-hal yang sangat perlu diberi perhatian pada proses injeksi adalah viskositas, tekanan injeksi dan upaya memastikan semua retak terisi epoxy (Herlambang dkk, 2018).

Tabel 1. Resume Uji Pembebanan Balok Sebelum dan Setelah Injeksi

Tabel 1. Resumen Uji Pembebanan Balok sebelum dan Setelah Injeksi

Umur Benda Uji (Hari)	No. Benda Uji	Beban Retak Kondisi Initial, P0 (kN)	Beban Retak Setelah Injeksi, P1 (kN)	Selisih Beban (kN)	Persentase Selisih (%)	Persentase Selisih Rata-rata (%)
3	1	16	8	-8	50.0	48.9
	2	16	8	-8	50.0	
	3	15	8	-7	46.7	
	4	20	6	-14	70.0	
6	5	16	8	-8	50.0	66.7
	6	20	4	-16	80.0	
	7	16	12	-4	25.0	
9	8	12	8	-4	33.3	32.8
	9	20	12	-8	40.0	

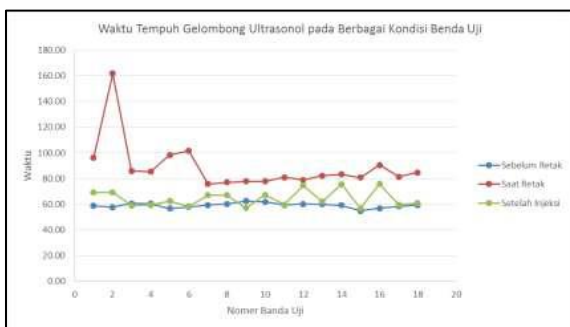
(Sumber: Herlambang dkk, 2018)

Injeksi epoxy mampu memperbaiki kondisi kekuatan balok setelah retak. Namun perbaikan ini tidak mampu mencapai kondisi awal sebelum retak. Pada umur injeksi 3 hari, 6 hari dan 9 hari kondisi tidak banyak berubah. Umur injeksi epoxy 6 dan 9 hari tidak membuat kemampuan perbaikan meningkat malah cenderung tidak stabil. Hal ini dapat berarti cukup 3 hari bagi epoxy untuk mencapai kinerjanya. Artinya jika terjadi keretakan struktur dan perbaikan dilakukan dengan injeksi epoxy, maka pada umur 3 hari struktur sudah dapat dibebani.

Perbaikan yang mampu dicapai oleh injeksi epoxy tidak melebihi dari 50% kondisi semula. Hal ini perlu diketahui agar pembebanan yang diberikan kepada struktur yang rusak dapat dibatasi (Herlambang dkk, 2018).



Gambar 3. Kecepatan Rambat Gelombang Ultrasonik dalam Uji UPV (Sumber: Herlambang, 2018)



Gambar 4. Waktu Rambat Gelombang Ultrasonik dalam Uji UPV (Sumber: Herlambang, 2018)

Uji kecepatan rambat gelombang dengan UPV dilakukan pada kondisi: sebelum dilakukan uji beban hingga retak (UPV0). Setelah balok mengalami uji lentur dan diperoleh nilai beban retak, dipisahkan oleh retak dan jarak actual menjadi lebih besar (UPV1). Retakan kemudian diinjeksi untuk mengisi celah retak yang terbentuk sekaligus menyatukan benda uji kembali (UPV2).

Berdasarkan uji UPV, injeksi epoxy mampu mengisi retak yang terjadi pada benda uji balok beton

ditandai dengan meningkatnya kecepatan gelombang ultrasonik pada benda uji yang telah diinjeksi dibandingkan saat retak belum diinjeksi namun injeksi tersebut tidak dapat memenuhi seluruh area retak dengan sempurna yang ditandai dengan nilai kecepatan rambat gelombang yang lebih kecil dibandingkan saat benda uji belum mengalami retak (Herlambang, 2018).

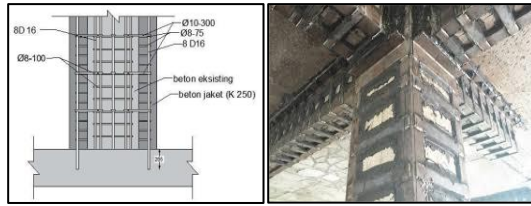
Concrete Jacketing

1. Pada Balok Beton Bertulang

Retrofit beton normal dengan tulangan luar baja menjadi pilihan tersendiri bagi penulis karena pertimbangan kekuatan, kemudahan dalam memperoleh bahan dan kemudahan pengerjaan. Menurut Nawy dalam Anggi R., hal penting dalam baja tulangan adalah Modulus Young (E_s), kekuatan leleh (f_y), kekuatan batas (f_u), mutu baja yang ditentukan ukuran atau diameter batang atau kawat (Trisnawathy 2021).

Menurut Khoeri (2021), metode jaket beton (*concrete jacketing construction*) adalah salah satu metode perbaikan pada struktur beton bertulang untuk meningkatkan daya dukung beban setelah modifikasi desain struktural atau untuk mengembalikan integritas desain struktur karena kegagalan pada struktur.





Gambar 5. Concrete Jacketing dengan Steel Bar (Khoeri, 2021) serta Steel Plate (Satar, 2022)

Balok diperkuat untuk menahan beban dengan cara menempelkan tulangan transversal dan longitudinal yang dilapisi beton normal pada daerah lentur, daerah geser dan atau pada daerah kombinasi lentur dan geser balok. Penambahan ini bertujuan meningkatkan kemampuan balok dalam menahan beban. Hasil penelitian Trisnawathy, 2021 yakni:

Tabel 2. Kapasitas Geser Sampel

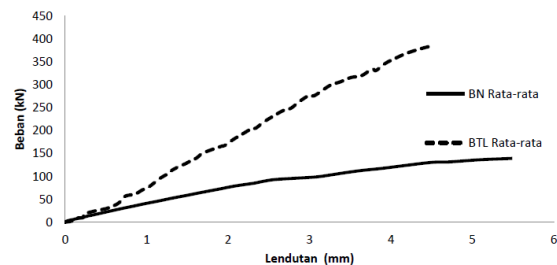
Sampel	Per (kN)	Per Rata-Rata (kN)	Py (kN)	Py Rata-Rata (kN)	Pu (kN)	Pu Rata-Rata (kN)	Vu Rata-Rata (kN)
BN - 1	10.662	10.745	81.967	83.300	153.105	144.942	72.471
BN - 2	10.829		84.633		136.779		
BTL - 1	37.674	36.007	171.701	173.535	412.749	429.419	214.710
BTL - 2	34.340		175.368		446.089		

(Sumber: Trisnawathy, 2021)

Tabel 2 menunjukkan bahwa dari pengujian beton normal diperoleh retak awal terjadi pada beban rata-rata 10,745 kN. Seiring dengan kenaikan beban, beton normal mengalami leleh pada beban rata-rata 83,300 kN. Beton normal mencapai maksimum pada pembebanan 144,942 kN. Pada beton retrofit, retak awal terjadi pada beban rata-rata 36,007 kN. Seiring dengan kenaikan beban, beton normal mengalami leleh pada beban rata-rata 173,535 kN. Beton normal mencapai maksimum pada pembebanan 429,419 kN. Beton retrofit memiliki kapasitas geser yang lebih besar dibandingkan beton normal tanpa retrofit. Peningkatan kekuatan

sebesar 284,477 kN (naik 196,27 %), sehingga penambahan retrofit dengan menggunakan tulangan luar menaikkan kapasitas geser hampir 3 kali lebih besar dibandingkan tanpa retrofit.

Pada Gambar 6 bahwa terjadi peningkatan kapasitas beban dengan penambahan retrofit karena penebalan akibat tulangan dan selimut beton sebesar 284,477 kN atau setara dengan peningkatan hampir 3x lipat dari beton normal tanpa retrofit.



Gambar 4. Grafik perbandingan hubungan beban dan lendutan balok normal dan balok retrofit

Gambar 6. Grafik Perbandingan Hubungan Beban dan Lendutan Balok Normal dan Balok Retrofit (Sumber: Trisnawathy, 2021)

Tabel 3. Nilai Lendutan, Kekakuan dan Daktilitas Sampel

Sampel	Beban (kN)			Lendutan (mm)			K (kN/mm) Pu/Δu	Δu/ Δy
	Per	Py	Pu	Δcr	Δy	Δu		
BN - 1	10.662	81.967	153.105	0.130	2.145	5.620	27.243	2.160
BN - 2	10.829	84.633	136.779	0.325	2.345	6.165	22.186	2.629
BN Rata2	10.746	83.300	144.94	0.228	2.245	5.893	24.715	2.625
BTL - 1	37.674	171.701	412.749	0.415	1.945	5.045	81.813	2.594
BTL - 2	34.340	175.368	446.089	0.550	1.915	5.745	77.648	3.000
BTL Rata2	36.007	173.535	429.419	0.483	1.930	5.395	79.731	2.797

(Sumber: Trisnawathy, 2021)

Tabel 3 menunjukkan bahwa untuk beton normal, kekakuan rata-rata sebesar 24,715 kN/mm dengan daktilitas rata-rata sebesar 2,625. Sedangkan untuk beton retrofit diperoleh kekakuan rata-rata sebesar 79,731 kN/mm dengan nilai daktilitas rata-rata 2,797.

2. Pada Kolom Beton Bertulang

Konsep dasar metode ini adalah pembesaran dimensi dan penambahan tulangan pada elemen struktur untuk meningkatkan kinerja elemen tersebut. Pengganti dari bahan beton telah terbukti sebagai solusi perkuatan yang efektif untuk meningkatkan kinerja seismik kolom. Keuntungan utama dari metode ini adalah memberikan peningkatan dan pertambahan batas daripada kekuatan dan duktilitas beton, dan keuntungan kedua, bahwasannya *jacket* dalam melindungi dari kerusakan *fragment* dan struktur yang diperbaiki memiliki kemampuan dalam menerima beban, karena *jacket* dapat mengurangi kegagalan geser langsung (*direct shear*), namun dapat juga menyediakan peningkatan kapasitas struktur itu sendiri (Kaontole dkk, 2015).

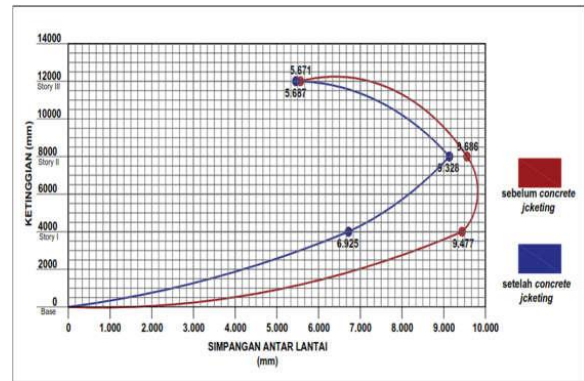
Hasil Penelitian Rahman dkk, 2023, terhadap kolom beton bertulang perkuatan concrete jacketing yakni:

Tabel 4. Perbandingan Gaya Geser Dasar Maksimum

No.	Pemodelan	Gaya Geser Dasar Maksimum (kN)	
		Arah X	Arah Y
1	Sebelum Kolom Diperkuat	8738.09	8672.85
2	Setelah Kolom Diperkuat	11802.24	12674.36

(Sumber: Rahman dkk, 2023)

Dari hasil Tabel 4, dapat dilihat bahwa nilai gaya geser dasar tertinggi untuk arah x terjadi pada permodelan kolom setelah diperkuat yaitu sebesar 11082,24 kN dan untuk arah y terjadi pada permodelan kolom setelah diperkuat yaitu sebesar 12674,36 kN. Adanya perkuatan pada kolom lantai 1 dapat menambah nilai gaya geser dasar pada struktur dan kekakuan yang lebih besar dari pada sebelumnya.



Gambar 7. Grafik Gabungan Simpangan Antar Lantai
(Sumber: Rahman dkk, 2023)

Gambar 7, nilai simpangan antar lantai (*drift*) tertinggi yaitu pada permodelan gedung sebelum kolom diperkuat yaitu sebesar 9,477 mm berada pada lantai I (ketinggian 4 meter) dan nilai *drift* terendah yaitu pada kolom yang setelah diperkuat sebesar 5,687 mm berada pada lantai III (ketinggian 12 meter), dengan demikian semakin rendah simpangan antar lantai maka bangunan struktur gedung semakin kokoh, perkuatan kolom yang dilakukan hanya pada kolom lantai 1 tidak terlalu berpengaruh terhadap kekakuan lantai 2 dan 3 yang tidak diperkuat.

Tabel 5. Momen Maksimum Kolom

Titik Tinjauan	Penampang	Momen Maks		Persentase Peningkatan (%)
		Sebelum Perbaikan (kN)	Setelah Perbaikan (kN)	
a	b	c	d	e
1	K1E	4.339	9.723	12%
2	K2C	4.807	15.804	23%
3	K3B	3.819	12.505	23%
4	K4C	3.814	10.615	18%
5	K4B	4.242	8.851	11%
6	K5B	3.942	11.164	18%
7	K7D	3.82	8.319	12%
8	K8B	3.961	10.125	16%
9	K10B	4.532	8.791	9%
10	K10D	4.358	9.524	12%
11	K12C	4.251	16.104	28%
12	K13C	3.93	10.0442	16%
13	K14B	3.89	16.038	31%
14	K14D	3.844	11.757	21%

(Sumber: Rahman dkk, 2023)

Tabel 5 terlihat bahwa nilai momen maksimum terbesar terjadi pada kolom tinjauan 13 sebesar

16,038 kN dan momen maksimum yang terjadi pada kolom sebelum diperkuat sebesar 3,890 kN, sehingga persentase peningkatan yang terjadi sebelum dan setelah kolom diperkuat sebesar 31%.

Kapasitas penampang kolom dianalisis dari SNI 2847-2019, yakni kemampuan atau daya dukung suatu penampang kolom dalam menerima beban pada struktur bangunan yang dapat dipikul.

Tabel 6, metode *jacketing* dapat meningkatkan kapasitas penampang kolom dengan nilai yang paling besar yaitu 2x lipat dari kapasitas kolom sebelum *jacketing*. Kapasitas penampang kolom sebesar 3257,3 kN dari kapasitas kolom yang sebelum diperbaiki sebesar 1299,54 kN, sehingga selisih peningkatan yang terjadi pada sebelum dan setelah kolom diperkuat dengan *jacketing* sebesar 1957,76 kN.

Tabel 6. Kapasitas Penampang Kolom

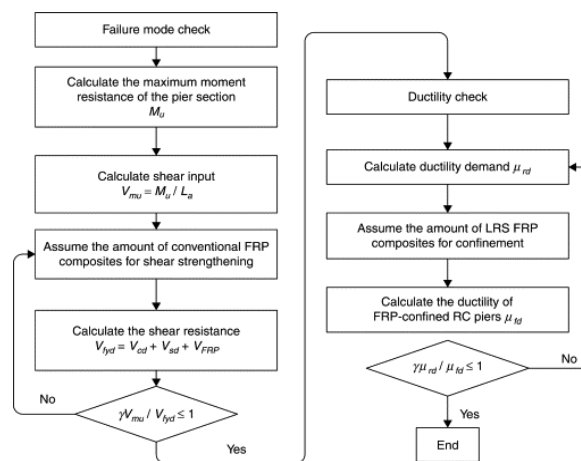
Titik Tinjauan	Kolom	Kapasitas Kolom		Selisih Peningkatan (kN)
		Sebelum Jacketing (kN)	Setelah Jacketing (kN)	
a	b	c	d	e
1	K1E	1299.54	3257.3	1957.76
2	K2C	1299.54	3257.3	1957.76
3	K3B	1299.54	3257.3	1957.76
4	K4C	1299.54	3257.3	1957.76
5	K4B	1299.54	3257.3	1957.76
6	K5B	1299.54	3257.3	1957.76
7	K7D	1299.54	3257.3	1957.76
8	K8B	1299.54	3257.3	1957.76
9	K10B	1299.54	3257.3	1957.76
10	K10D	1299.54	3257.3	1957.76
11	K12C	1299.54	3257.3	1957.76
12	K13C	1299.54	3257.3	1957.76
13	K14B	1299.54	3257.3	1957.76
14	K14D	1299.54	3257.3	1957.76

(Sumber: Rahman dkk, 2023)

Fiber Reinforced Polymer (FRP)

Fiber Reinforced Polymer adalah produk yang terdiri dari resin, bahan penguat fiberglass dan additive yang

digabung dan diproses agar dapat performance yang spesifik dan sesuai kebutuhan. FRP memiliki kelebihan tidak korosi, berat per volumenya yang lebih rendah dari baja, mudah pengaplikasiannya, dan biaya maintenance yang rendah. Dalam balok yang diperkuat secara internal dengan baja dan eksternal dengan FRP, biasanya ada kapasitas cadangan pada saat kondisi leleh baja. Setelah perkuatan baja pada kondisi leleh, balok masih dapat menerima tambahan beban, meskipun pada tingkat yang lebih rendah. Perilaku yang biasa terjadi adalah setelah perkuatan baja pada kondisi leleh, FRP bertahan pada perilaku elastis hingga akhirnya kegagalan terjadi secara mendadak. Hingga saat ini, FRP sebagai kekuatan struktur sudah dibuktikan dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan tekan dari struktur oleh berbagai penelitian (Hidayat dkk, 2018).

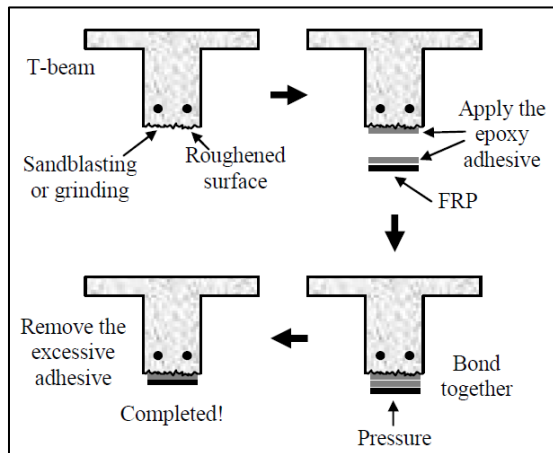


Gambar 8. Flowchart Perhitungan Retrofit Bahan FRP

(Sumber: Kristanto dkk, 2023)

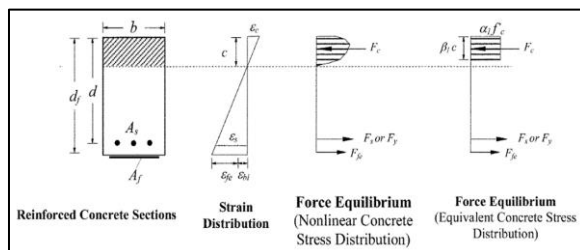
Terdapat beberapa macam jenis FRP yang diaplikasikan sesuai komposisi desain dan kerusakan struktur yang diaplikasikan pada

bagian luar permukaan struktur (External Bonded Technique/EB).



Gambar 9. Prosedur Teknik EB (Sumber: Soror dkk 2019)

Nawy, 2008, apabila beban bertambah maka pada balok akan terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan retak lentur di sepanjang bentang balok hingga terjadi keruntuhan elemen struktur. Apabila kekuatan tarik beton telah terlampaui, maka beton mengalami retak rambut. Oleh karena itu beton tidak dapat meneruskan gaya tarik pada daerah retak, sehingga seluruh gaya tarik yang timbul ditahan baja tulangan (Kristanto dkk, 2023).



Gambar 10. Diagram Regangan Tegangan Untuk Perkuatan FRP (Sumber: ACI-440.2R-08,2008)

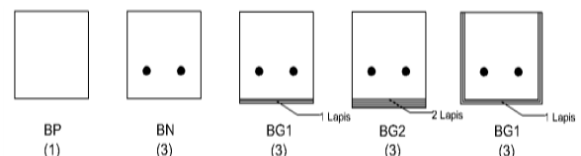
Penambahan FRP menyebabkan bertambahnya gaya tarik pada balok. Bertambahnya resultan gaya tarik akan berpengaruh terhadap kuat lentur dari beton bertulang tersebut.

Penambahan perkuatan FRP pada bagian tarik di sepanjang balok akan meningkatkan kuat lentur balok tersebut. (ACI-440.2R- 08,2008).

FRP memiliki kelebihan seperti massa jenis yang ringan, tidak mudah berkarat, modulus elastisitas yang mendekati baja tulangan, dan memiliki kekuatan tarik yang sangat tinggi. Pengaplikasian FRP pada konstruksi bangunan juga mengurangi jumlah tenaga dan meningkatkan keamanan kerja. Proses pelaksanaan juga cenderung *sustainable* dan cukup menekan biaya (Hidayat dkk, 2018).

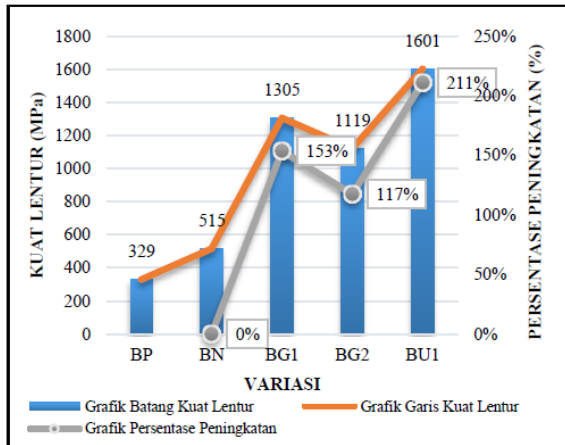
1. Bangunan Gedung

Selain jenis Carbon (CFRP), metode lainnya adalah menggunakan lembaran FRP jenis Glass (GFRP). Penggunaan GFRP-S sebagai perkuatan pada elemen struktur adalah inovasi perkuatan dengan menggunakan material komposit. Jenis material ini banyak digunakan sebagai perkuatan eksternal tambahan pada struktur karena sifatnya setelah dipasang pada struktur beton mampu menghilangkan kekurangan beton yang getas menjadi struktur duktail (Djamaluddin, 2018).



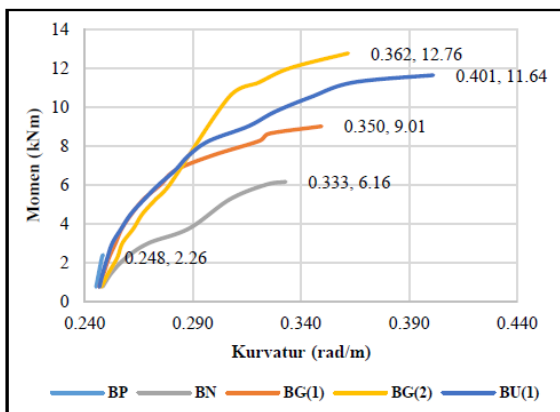
Gambar 11. Variasi Pola Pemasangan Perkuatan GFRP (Sumber Luastika dkk, 2019)

Hasil penelitian Luastika dkk, 2019, dimana balok beton bertulang eksperimental yang dilapisi GFRP yakni:



Gambar 12. Grafik Persentase Kenaikan Perkuatan Lentur Maksimum (Sumber Luastika dkk, 2019)

Hasil uji kuat lentur balok beton umur 28 hari dengan berbagai variasi, beton dengan perkuatan *U-wrap* GFRP 1 lapisan memiliki kuat lentur yang lebih tinggi di bandingkan perkuatan GFRP bagian bawah balok saja dengan persentase kenaikan 211% terhadap balok normal. kuat tekan benda uji yaitu 37,093 MPa telah memenuhi kuat tekan rencana $f_c' = 25$ MPa.



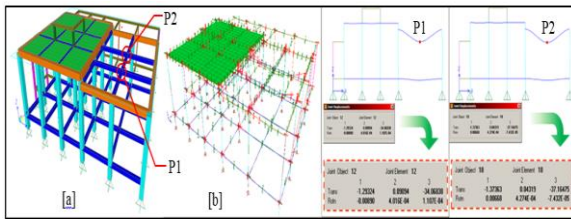
Gambar 13. Momen-kurvatur (Sumber Luastika dkk, 2019)

Dari hubungan momen-kurvatur, balok mengalami deformasi yang besar sebelum runtuh, meningkatkan kekakuan dan kemampuan balok berdeformasi (daktilitas). Adanya peningkatan ketebalan pada daerah perkuatan

sehingga meningkatkan kekakuan balok. Semakin landai kurva, maka balok beton semakin berkurang kekakuan lenturnya (EI balok).

Pada peningkatan kuat lentur balok, variasi I balok dengan GFRP 1 lapisan bagian bawah (BG1) diperoleh kuat lentur rata-rata 1304,99 MPa (perkuatan lentur 153%). Variasi II balok dengan GFRP 2 lapisan bagian bawah (BG2) diperoleh kuat lentur rata-rata 1119,05 MPa (perkuatan lentur sebesar 117%). Variasi III balok dengan GFRP 1 lapisan *U-wrap* (BU1) diperoleh kuat lentur rata-rata 1601,46 MPa (perkuatan lentur sebesar 211%).

Penerapan GFRP pada bangunan gedung salah satunya hasil penelitian Kristanto dkk, 2023, pada kerusakan balok beton bertulang bangunan Masjid di Magelang, dimana Hasil *Hammer Test* balok *existing* $h_{lap} (270 \text{ mm}) < h_{min} (286 \text{ mm})$, mutu beton terkecil K.408 belum mencerminkan perilaku daktail balok *existing* pada kondisi retak dan lendutan melebihi ijin. Kerusakan belum menyebabkan keruntuhan, dimana hasil uji tarik nilai f_y rata-rata 348,47 MPa dan f_u rata-rata 491,32 MPa masih melebihi batas minimum sehingga BjTP 12 terpasang berkontribusi maksimal pada daktilitas balok. Kemiripan nilai lendutan hasil analisis teoritis dan SAP 2000, maka permodelan SAP 2000 digunakan dalam desain FRP, dimana tipe *StrongGlass* E450 jumlah 1 lapis, lebar 200 mm sepanjang 3 balok uji memenuhi syarat kuat lentur ($\phi Mn \geq Mu$) dan kuat geser ($\phi Vn \geq Vu$) dengan lendutan max. 10,519 mm pada Balok F25 Ln 9.000 mm, tidak melampaui lendutan ijin 24,375 mm.

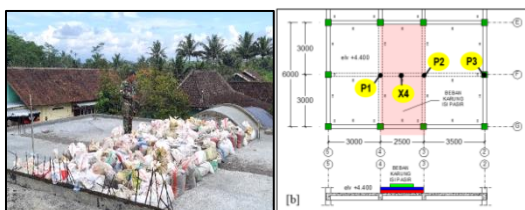


Gambar 14. Permodelan Struktur [a] dan Distribusi Momen [b] Bangunan Uji pada SAP 2000
(Sumber: Kristanto dkk, 2023)

Pasca uji pembebanan dengan beban pasir seberat 4200 Kg (meningkat 25,98 %) dalam 3 tahap, kuat tarik balok *retrofit* meningkat 23,879 % (117,325 MPa) dan regangan max. 0,00154 mengindikasikan balok belum mencapai luluh. Kerapatan balok pasca injeksi turut mempengaruhi kekakuan balok terhadap lendutan, saat pra retrofit $\Delta P1$ (-34 mm) dan $\Delta P2$ (-37 mm), serta pasca retrofit $\Delta P1$ (-30,8 mm) dan $\Delta P2$ (-34,2 mm).



Gambar 15. Proses Injeksi dan Pemasangan FRP *StrongGlass* E450
(Sumber: Kristanto dkk, 2023)



Gambar 16. Pemeriksaan Beban Karung Isi Pasir dan Posisi Pembebanan Muka Lantai Elv +4.400
(Sumber: Kristanto dkk, 2023)

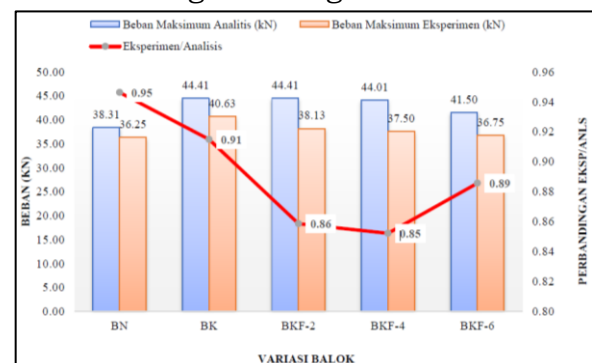
2. Bangunan Daerah Pantai

Struktur beton bertulang yang tidak dilindungi atau dekat dengan laut mungkin dipengaruhi oleh korosi, jika tidak ada tindakan pemeliharaan dan pencegahan dapat

menyebabkan keruntuhan (Djamaluddin, 2019).

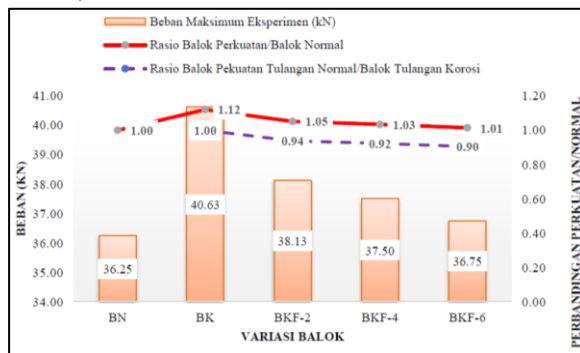
Tulangan korosi merupakan salah satu penyebab utama kerusakan struktur dan mekanisme degradasi yang paling dominan pada struktur beton bertulang yakni fenomena karbonasi atau penetrasi klorida, yang umumnya menginduksi pada bagian struktur. Korosi baja pada beton menyebabkan kerusakan pada elemen beton bertulang, karena hilangnya area baja dan pembentukan produk korosi ekspansif. Ketika korosi tulangan berkembang secara signifikan, produk korosif berkembang menerus dan menghasilkan tekanan internal pada beton di sekitar batang baja. Proses korosi tulangan yang terus menerus tidak hanya pada kemampuan layan struktur dengan retak, atau bahkan pengelupasan penutup beton, tetapi juga berdampak serius pada keselamatan struktur, dengan menurunkan daya dukung beban. Efek fisik lain, hilangnya luas baja, hilangnya kekuatan ikatan antara tulangan baja dan beton, dan berkurangnya kekuatan beton akibat keretakan (Ridwan, 2022).

Ridwan dkk, 2022, penelitian balok eksperimental perkuatan GFRP-S dengan tulangan terkorosi:



Gambar 17. Perbandingan Kapasitas Balok Eksperimen dan Analisis
(Sumber: Ridwan dkk, 2022)

Gambar 17, rasio perbandingan kapasitas balok eksperimental dengan analitis untuk balok tulangan normal, balok tulangan normal dengan perkuatan dan balok perkuatan dengan tulangan terkorosi 2 minggu, 4 minggu dan 6 minggu adalah 0,95; 0,91; 0,86; 0,85 dan 0,89 (Ridwan, 2022).



Gambar 18. Rasio perbandingan balok normal perkuatan GFRP-S dan balok perkuatan GFRP-S (Sumber: Ridwan dkk, 2022)

Balok normal yang diberi perkuatan akan meningkatkan kapasitas sebesar 12,07%. Balok perkuatan tulangan terkorosi selama 2, 4 dan 6 minggu peningkatan kapasitas yakni 5,17%; 3,45% dan 1,38% dibandingkan dengan balok normal. Penggunaan GFRP-S mengindikasikan peningkatkan kapasitas balok dibandingkan balok normal tanpa perkuatan.

Persentase penurunan kapasitas balok perkuatan dengan tulangan terkorosi 2 minggu, 4 minggu dan 6 minggu terhadap balok perkuatan tulangan normal adalah 6,15%, 7,69% dan 9,54%. Maka tulangan terkorosi dapat menurunkan kapasitas balok dalam menerima beban lentur, karena tegangan leleh dari baja tersebut menurun. Penurunan kapasitas

balok perkuatan <10% karena masih ada gaya tarik yang disumbangkan oleh GFRP-S sebagai perkuatan (Ridwan, 2022).

KESIMPULAN

1. Metode Retrofit terbukti dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan tekan dari struktur beton bertulang normal yang mengalami kerusakan.
2. Retrofit dapat diimplementasikan dengan baik pada struktur beton bertulang bangunan gedung dan bangunan daerah pantai sesuai standar acuan yang ditetapkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada pihak yang telah mendukung terlaksananya kegiatan Penelitian sehingga dapat berjalan sesuai tujuan yang ditetapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Herlambang, F.S., Setyono, E.Y., 2018. Analisis Injeksi Epoxy Pada Perbaikan Retak Beton Terhadap Beban Lentur. Wahana Teknik Sipil Vol. 23 No. 2, Desember 2018: 47 – 55.
- Hidayat, K.E., Purnomo, S., Tjandra, D., Wijaya, G.B., 2018. Pengaruh Rasio Kekakuan Balok dan Lapisan FRP Terhadap Perilaku Balok Beton Bertulang yang Diperkuat FRP.

- Luastika, G.N., Lingga, A.A., & Lestyowati, Y., 2019. Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan Glass Fiber Reinforced Polymer. FT-Untan: 1-7.
- Modena, C., Tecchio, G., Pellegrino, C., Porto, F., Dona, M., Zampieri, P., Zanini, M.A., 2015. Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 11, No. 4, 2015: 415–442.
- Rahman, A., Samsunan, Refiyanni, M., Faisal, R., Shaskia, N., Soksen, S.P., 2023. Analisis Kekuatan Kolom Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Metode *Concrete Jacketing* (Studi Kasus Gedung Mess Korem 012/Tu Ujong Karang). Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan 6(1), Maret 2023: 53-64.
- Ridwan, A.R., Sultan, M.A., & Gaus, A., 2022. Efek Perkuatan Glass Fiber Reinforce Polymer Sheet pada Balok Beton Bertulang dengan Tulangan Korosi. *Teras Jurnal*, Vol. 12 No. 1. Maret 2022: 103-116.
- Soror, A.T., Tayel, M.A., Heiza, K.M., 2019. State of The Art Review: Flexural Strengthening of Reinforced and Pre-stressed Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymers. Engineering Research Journal, Vol. 42, No. 2, April 2019: 115-124.
- Trisnawathy, 2021. Peningkatan Kekuatan Geser Balok Beton Bertulang dengan Tulangan Luar Retrofit. Jurnal Teknik Sipil Macca, Vol. 6 No.1, Februari 2021: 11-17.
- Yusfar. (2018). Analisa Pengaruh Perkuatan dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* pada Struktur Balok Beton Bertulang, Universitas Islam Riau. pp: 1-57.