

TESIS

**STUDI PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG
PASCA KOROSI DENGAN GROUTING DAN GFRP SHEET**

*Study Strengthening Reinforced Concrete Beams Post Corrosion
with Grouting and GFRP Sheet*

SUGIRA SAID

D012211004



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

TESIS

**STUDI PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG
PASCA KOROSI DENGAN GROUTING DAN GFRP SHEET**

*Study Strengthening Reinforced Concrete Beams Post Corrosion
with Grouting and GFRP Sheet*

SUGIRA SAID

D012211004



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

PENGAJUAN TESIS

STUDI PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG PASCA KOROSI DENGAN GROUTING DAN GFRP SHEET

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

ttd

SUGIRA SAID

D012211004

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

GOWA

2023

TESIS

STUDI PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG PASCA KOROSI DENGAN GROUTING DAN GFRP SHEET

SUGIRA SAID
D012211004

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 30 Januari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Eng. H. Rudy Djamaluddin, S.T., M.Eng
NIP. 197011081994121001

Pembimbing Pendamping

Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M. T
NIP. 197206192000122001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST. MT. IPM
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



Dr. M. Asad Abdurrahman, ST. MEng.PM
NIP. 197303061998021001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Sugira Said

Nomor Mahasiswa : D012211004


Program Studi : Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Korosi Dengan Grouting dan GFRP Sheet” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr.Eng. H. Rudy Djameluddin., S.T., M.Eng dan Dr.Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty., S.T., M.T. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Redaksi Jurnal KONSTRUKSIA Volume 14 Nomer 2 ISSN cetak : 2086-7352, ISSN online 2443-308X sebagai artikel dengan judul “Pengaruh Penambahan Sika Grout pada Balok Beton Bertulang dengan Kondisi Spalling”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 30 Januari 2023

Yang menyatakan



Sugira Said

KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan kehadirat ALLAH SWT karena atas Rahmat dan Hidayah- Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan judul “**Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Korosi Dengan Grouting Dan GFRP Sheet**” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi magister pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa selesainya tesis ini adalah berkat bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, dengan segala kerendahan hati dan teriring doa penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua tercinta yaitu ayahanda **Ir. Muh Said Pasang** dan ibunda **Ajirah., S.Pd** atas doa, kasih sayang tanpa batas, segala dukungan dan kebaikan selama penulis hidup baik spiritual maupun material. Penulis juga merasa sangat berterima kasih kepada **Center for Education Financial Services** dan **Indonesia Endowment Funds for Education** yang membuktikan bahwa keputusan saya untuk bersekolah di Universitas Hasanuddin tidak salah. Sekali lagi, terima kasih yang tak terhingga.


Bapak **Prof. Dr. Eng. H. Rudy Djamaluddin., ST., M.Eng** selaku pembimbing utama serta Ibu **Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty., ST., MT** selaku pembimbing pendamping yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penyusunan hingga terselesainya tesis ini.

Seluruh **Bapak dan Ibu Dosen Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin** yang telah membantu saya melalui proses pembelajaran selama di Universitas Hasanuddin. Saya telah belajar keterampilan penting dari Bapak dan Ibu Dosen yang membantu saya secara akademis dan pribadi. Serta seluruh **Staf dan Karyawan Universitas Hasanuddin** yang telah berdedikasi demi segala keperluan tesis ini. Saudara kandung penulis **Hasbi, Dhana, Firman** yang selalu ada selama penulis menyelesaikan tesis ini. Saudara-saudari seperjuangan mahasiswa Teknik Sipil Universitas Hasanuddin **Herlina, Alfina, Misel, Ryan, Joey, Fajar, Nasrul, Yuqni, Fitri** terima kasih untuk warna yang begitu indah selama penyusunan tesis ini, kebersamaan kita tidak akan terlupakan dan akan tetap terkenang sepanjang

hayat. Seluruh **Rekan-rekan mahasiswa Teknik Sipil Universitas Hasanuddin** dan **Semua Pihak** yang telah banyak membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyusunan tesis ini.

Saya berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi kita semua terutama dalam bidang Teknik Sipil, walaupun disadari bahwa tesis ini masih memiliki banyak kekurangan, tetapi saran dan kritikan sangat diharapkan demi menyempurnakan tesis ini.

Makassar, 30 Januari 2023

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'S. H. H.', written on a light-colored rectangular background.

Penulis

ABSTRAK

SUGIRA SAID. *Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Korosi Dengan Grouting dan GFRP Sheet* (dibimbing oleh **Rudy Djamaluddin** dan **Rita Irmawaty**)

Banyak ide kreatif dan unik pada desain konstruksi, khususnya pada konstruksi beton bertulang yang pada kenyataannya banyak sekali konstruksi bangunan yang menunjukkan penurunan kekuatan struktur, salah satunya adalah korosi pada tulangan. Korosi menyebabkan beton mengalami pengelupasan (*spalling*) dan pengurangan luasan tulangan. Untuk mengatasi berbagai kerusakan yang terjadi maka diperlukan metode perbaikan dan perkuatan yang tepat. Grouting merupakan metode perbaikan kerusakan struktur yang sering kali digunakan saat ini karena memenuhi persyaratan standar *corps of engineering* CDR C-621 dan ASTM C-1107. Grouting adalah proses memberikan campuran air dan sika grout 215 karena memiliki karakteristik tidak menyusut, tidak korosif, dan dapat mengalir dengan baik sehingga dapat dengan mudah mengisi bagian-bagian kecil pada beton. *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* sebagai material yang mempunyai kuat tarik yang tinggi, superior dalam daktilitas, bobotnya yang ringan sehingga mudah dalam mobilisasi, menjadikan *GFRP* sebagai pilihan untuk perbaikan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku lentur serta pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan grouting dan *GFRP Sheet*. Metode penelitian yaitu pengujian kuat tekan mortar grouting dan pengujian lentur balok beton bertulang. Pengujian kuat tekan mortar grouting menggunakan sampel silinder 50 mm x 100 mm, diuji pada umur 28 hari. Sementara itu, pengujian lentur balok menggunakan sampel balok dengan dimensi 150 mm x 200 mm x 3300 mm sebanyak sembilan buah yang terdiri dari balok kontrol (BK), balok dengan perbaikan grouting (BGR), dan balok dengan perkuatan mortar grouting dan *GFRP Sheet* (BGRS). Hasil penelitian menunjukkan penggunaan mortar grouting dan *GFRP sheet* sebagai material perbaikan dan perkuatan mampu meningkatkan beban maksimum balok beton bertulang. Sementara itu, balok BGR memiliki perilaku yang lebih daktil dibandingkan semua benda uji. Dari mode kegagalan sambungan, balok dengan perkuatan mortar grouting mengalami kegagalan debonding sedangkan balok dengan perkuatan grouting dan *GFRP sheet* mengalami kegagalan delaminasi dan kegagalan debonding pada lekatan *GFRP*.

Kata kunci: Balok Beton Bertulang, Korosi, Grouting, *GFRP Sheet*.

ABSTRACT

SUGIRA SAID. *Study of Reinforcement of Reinforced Concrete Beams Post Corrosion Using Grouting and GFRP Sheet* (supervised by **Rudy Djamaluddin** and **Rita Irmawaty**)

There are many creative and unique ideas in construction design, especially in reinforced concrete construction where in reality a lot of building constructions show a decrease in structural strength, one of which is corrosion of the reinforcement. Corrosion causes concrete to experience spalling and a reduction in the area of reinforcement. To overcome the various damages that occur, proper repair and strengthening methods are needed. Grouting is a structural damage repair method that is often used today because it meets the requirements of the Corps of Engineering CDR C-621 and ASTM C-1107 standards. Grouting is the process of adding a mixture of water and Sika grout 215 because it has the characteristics of not shrinking, not corrosive, and can flow well so that it can easily fill small parts in concrete. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) as a material that has high tensile strength, superior ductility, light weight so it is easy to mobilize, makes GFRP an option for structural repairs. This study aims to analyze the flexural behavior as well as crack patterns and failure modes of reinforced concrete beams reinforced with grouting and GFRP Sheet. The research method is testing the compressive strength of grouting mortar and flexural testing of reinforced concrete beams. Testing the compressive strength of grouting mortar using a cylindrical sample of 50 mm x 100 mm, tested at 28 days of age. Meanwhile, the bending test of beams used beam samples with dimensions of 150 mm x 200 mm x 3300 mm consisting of nine beams consisting of control beams (BK), beams with repair grouting (BGR), and beams with grouted mortar reinforcement and GFRP Sheet (BGRS). The results showed that the use of grouting mortar and GFRP sheet as repair and reinforcement materials can increase the maximum load of reinforced concrete beams. Meanwhile, the BGR beam has a more ductile behavior than all the test objects. From the connection failure mode, beams with mortar grouting reinforcement experience debonding failure while beams with grout reinforcement and GFRP sheet experience delamination failure and debonding failure at GFRP attachment.

Keywords: Reinforced Concrete Beams, Corrosion, Grouting, GFRP Sheet.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL DEPAN	i
HALAMAN SAMPUL DALAM	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	6
1.6 Sistematika Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Penelitian Terdahulu	9
2.2 Perilaku Beton Bertulang	12

2.3	Degradasi Struktur Akibat Korosi.....	18
2.4	Metode Perbaikan Dan Perkuatan Struktur	20
2.4.1	Grouting Pada Beton Bertulang.....	20
2.4.2	Fiber Reinforced Polymer (FRP)	21
2.5	Model Kegagalan	30
BAB III METODE PENELITIAN.....		32
3.1	Rancangan Penelitian	32
3.2	Waktu Dan Lokasi Penelitian	33
3.3	Alat Dan Bahan Penelitian	33
3.4	Pengujian Properti Material.....	34
3.4.1	Pengujian Kuat Tarik Baja	34
3.4.2	Pengujian Bahan beton.....	35
3.4.3	Perbaikan dengan Grouting.....	37
3.4.4	Pemasangan GFRP	39
3.5	Desain Penelitian	42
3.6	Pengujian Lentur Balok.....	44
3.7	Perhitungan Analitik Dimensi Balok	46
3.8	Analisis Data.....	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		48
4.1.	Hasil Pengujian Sifat-Sifat Bahan	48
4.1.1	Karakteristik Tulangan Baja	48
4.1.2	Karakteristik Beton	49
4.1.3	Karakteristik Mortar Grouting	51
4.1.4	Karakteristik GFRP-S.....	53
4.2.	Hasil Analisa Balok Beton Bertulang	53
4.2.1	Kapasitas Beban dan Momen.....	53

4.2.2 Hubungan Beban dan Lendutan.....	55
4.2.3 Hubungan Beban dan Regangan Beton.....	62
4.2.4 Hubungan Beban dan Regangan Baja.....	65
4.2.5 Hubungan Beban dan Regangan GFRP-S.....	67
4.2.6 Pola Retak dan Mode Keruntuhan	68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	74
5.1 Kesimpulan.....	74
5.2 Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN	79

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
Tabel. 1 Karakteristik GFRP-s (Glass Fiber Reinforced Polymer)	28
Tabel. 2 Karakteristik Material Resin Epoxy	30
Tabel. 3 Variasi benda uji properti mekanis FRP	42
Tabel. 4 Hasil pengujian tarik tulangan baja	48
Tabel. 5 Hasil pengujian kuat tekan beton	50
Tabel. 6 Hasil pengujian kuat tarik belah beton	50
Tabel. 7 Hasil pengujian kuat lentur beton.....	50
Tabel. 8 Hasil pengujian kuat tekan grouting.....	52
Tabel. 9 Karakteristik <i>Glass Fiber Reinforced Polymer - Sheet</i>	53
Tabel. 10 Kapasitas beban dan momen berdasarkan analisa teoritis dan hasil pengujian balok.....	54

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
Gambar 1 Kerusakan konstruksi beton	1
Gambar 2 Proses kerusakan bangunan beton akibat korosi baja tulangan.....	2
Gambar 3 Spalling pada Beton	3
Gambar 4 Sika Grout 215	4
Gambar 5 GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer).....	4
Gambar 6 Foto Model Kegagalan Balok (Djamaluddin & Irmawaty, 2017).....	10
Gambar 7 Korosi Pada Balok Beton (Mardani, 2017).....	10
Gambar 8 Pengecoran Beton	13
Gambar 9 Proses Penuangan <i>Ready Mix</i>	13
Gambar 10 Konstruksi beton bertulang.....	14
Gambar 11 Kurva tegangan-regangan.....	16
Gambar 12 Distribusi regangan dan tegangan pada balok	17
Gambar 13 Tegangan Balok FRP	23
Gambar 14 Model analisis regangan FRP	25
Gambar 15 GFRP-S Tyfo SEH-51A.....	27
Gambar 16 <i>Epoxy Resin</i> Tyfo S.....	28
Gambar 17 Putusnya FRP dan hancurnya beton pada sisi tekan.....	30
Gambar 18 Diagram alir rancangan penelitian	32
Gambar 19 Strain Gauges.....	35
Gambar 20 Pencampuran Mortar Grouting	38
Gambar 21 Pengolesan Bonding Agent	39
Gambar 22 Pengecoran Mortar Grouting	39
Gambar 23 Meratakan Permukaan Benda Uji	40
Gambar 24 Memotong Lembaran GFRP	41
Gambar 25 Mengoleskan Epoxy Resin.....	41
Gambar 26 Mengoleskan perekat tahap kedua	41
Gambar 27 Mendinginkan Benda Uji.....	42
Gambar 28 Balok Normal.....	43
Gambar 29 Balok Normal + Grouting.....	43
Gambar 30 Balok Normal + Grouting + GFRP Selebar Balok	44

Gambar 31 Persiapan Benda Uji.....	45
Gambar 32 Pengujian Balok Hingga Tulangan Tarik Meleleh	45
Gambar 33 Hasil pengujian tarik tulangan baja.....	49
Gambar 34 Hasil <i>slump test</i>	49
Gambar 35 Pengujian karakteristik mekanis beton.....	51
Gambar 36 Karakteristik Mortar Grouting.....	51
Gambar 37 Uji kuat tekan mortar.....	52
Gambar 38 Rata-rata beban ultimit benda uji.....	54
Gambar 39 Hubungan beban lendutan balok kontrol (BK).....	56
Gambar 40 Balok Kontrol (BK - 01)	57
Gambar 41 Hubungan beban lendutan balok grouting (BGR)	58
Gambar 42 Balok Grouting (BGR - 01).....	59
Gambar 43 Hubungan beban lendutan balok grouting (BGRS).....	60
Gambar 44 Balok Grouting + GFRP <i>Sheet</i> (BGRS – 02)	61
Gambar 45 Hubungan beban lendutan balok BK, BGR, BGRS.....	61
Gambar 46 Hubungan Beban-Regangan Beton BK.....	62
Gambar 47 Hubungan Beban-Regangan Beton BGR	62
Gambar 48 Hubungan Beban-Regangan Beton BGRS.....	63
Gambar 49 Diagram Regangan Benda Uji BK.....	64
Gambar 50 Diagram Regangan Benda Uji BGR.....	64
Gambar 51 Diagram Regangan Benda Uji BGRS.....	65
Gambar 52 Hubungan Beban-Regangan Baja BK.....	65
Gambar 53 Hubungan Beban-Regangan Baja BGR	66
Gambar 54 Hubungan Beban-Regangan Baja BGRS	66
Gambar 55 Hubungan Beban-Regangan GFRP Pada Balok BGRS.....	67
Gambar 56 Pola Retak Pada Balok Kontrol (BK)	68
Gambar 57 Retak Awal Balok BK.....	68
Gambar 58 Kehancuran Sisi Tekan Pada Balok BK.....	69
Gambar 59 Pola Retak Pada Balok Grouting (BGR).....	69
Gambar 60 Retak Awal Pada Balok BGR.....	70
Gambar 61 <i>Micro-crack</i> Pada Sambungan.....	70
Gambar 62 Pengukuran Lebar Retak Balok BGR	71

Gambar 63 <i>Debonding</i> Antara Beton Normal Dan Mortar Grouting	71
Gambar 64 Pola Retak Pada Balok Grouting Dan GFRP <i>Sheet</i> (BGRS)	71
Gambar 65 Retak Awal Pada Balok BGRF-S	72
Gambar 66 Pengukuran Lebar Retak Balok BGRF-S.....	72
Gambar 67 <i>Micro-Crack</i> Pada Sambungan.....	72
Gambar 68 Delaminasi Antara Beton Normal Dan Mortar Grouting.....	73
Gambar 69 <i>Debonding</i> Antara Beton Grouting Dan GFRP	73

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Log Book Penelitian.....	79
Lampiran 2. Perhitungan Kapasitas Momen - Balok Kontrol (BK).....	114
Lampiran 3. Perhitungan Kapasitas Momen - Balok Grouting (BGR).....	121
Lampiran 4. Perhitungan Kapasitas Momen - Balok Grouting GFRP (BGRS)	128

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang / Singkatan	Arti dan keterangan
$f'c$	= Kuat Tekan Beton (MPa)
%	= Persen
P	= Beban (N)
A	= Luas Area Penampang (mm ²)
L	= Panjang Benda Uji
D	= Diameter Benda Uji
ϵ_c	= Regangan Tekan Beton
ϵ_s	= Modulus Elastisitas
ϵ_{cr}	= Regangan Crack
ϵ_y	= Regangan Yield
ϵ_{ult}	= Regangan Ultimit
C	= Resultan Gaya
T_s	= Resultan Gaya Tarik Dari Baja
FRP	= <i>Fiber Reinforced Polymer</i>
ACI	= American Concrete Institute
SNI	= Standar Nasional Indonesia
ASTM	= American Standard Testing and Material
UTM	= Universal Testing Machine
\emptyset	= Faktor Reduksi
Mn	= Momen Nominal (N/mm)
Mu	= Momen Ultimit (N/mm)

Lambang / Singkatan	Arti dan keterangan
k_m	= Koefisien Lekatan FRP
ϵ_{fu}	= Regangan Ultimit FRP
n	= Jumlah Lapis FRP
E_f	= Elastisitas FRP (Mpa)
t_f	= Tebal FRP (mm)
ϵ_{fe}	= Regangan yang terjadi pada FRP
ϵ_{fu}	= Regangan Ultimit Beton
h	= Tinggi Balok
c	= Tinggi Balok Tegangan Ekuivalen
ϵ_{bi}	= Regangan Beton
f_{fe}	= Tegangan yang terjadi pada FRP
z	= Lengan Momen
ϵ_f	= Regangan FRP
GFRP	= <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
ΔL	= Perpendekan Beton (mm)
T	= Tension / Daerah Lentur
F_y	= Tegangan Leleh
A_s	= Luas Area Penampang Tulangan Lentur
A_s'	= Luas Area Penampang Tulangan Tekan
d	= Tinggi Efektif Penampang
d'	= Tinggi Selimut Beton (mm)
Gpa	= Gigapascal

Lambang / Singkatan	Arti dan keterangan
Mpa	= Megapascal
mm	= millimeter
cm	= centimeter
FLKB-2-11-5LJC-F	= Alat Ukur Regangan Baja Tulangan
FLAB-2-11-5LJCF	= Alat Ukur Regangan FRP
PL-60-11-5LJC-F	= Alat Ukur Regangan Beton
LVDT	= <i>Linear Variable Displacement Transducer</i>
kN	= kiloNewton
kg	= kilogram
Ø8	= Besi Polos Diameter 8
D13	= Besi Ulir Diameter 13
BK	= Balok Kontrol
BGR	= Mortar Grouting Komersial
BGRS	= Mortar Grouting + GFRP Sheet
SGC	= Strain Gauge pada Beton
SGS	= Strain Gauge pada Baja
SGF	= Strain Gauge pada GFRP
LVDT	= Linear Variable Displacement Transducer
BJTP	= Baja Tulangan Beton Polos
BJTS	= Baja Tulangan Beton Sirip
$\mu\varepsilon$	= <i>micro strain</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

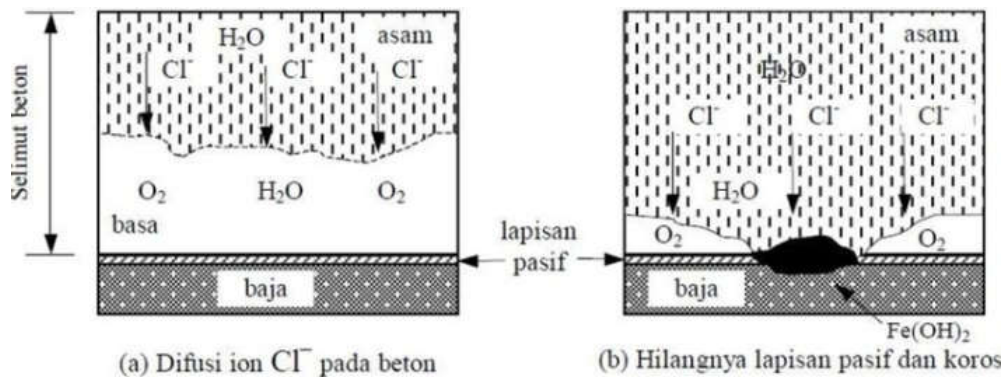
Perkembangan pembangunan di Indonesia sudah banyak mengalami kemajuan yang sangat pesat. Dalam dunia konstruksi, beton memiliki peran penting sebagai material utama yang umum digunakan. Hal ini disebabkan oleh kelebihan dari beton itu sendiri, antara lain kemudahan dalam pengerjaannya, kuat tekan yang tinggi serta memiliki nilai ekonomis dalam pembuatan dan perawatannya.



Sumber: Google

Gambar 1 Kerusakan konstruksi beton

Banyak ide kreatif dan unik pada desain konstruksi, khususnya pada konstruksi beton bertulang. Namun demikian pada kenyataannya banyak sekali konstruksi bangunan yang menunjukkan kelemahannya pada saat operasi awalnya. Seperti pada **Gambar 1** Adanya retak-retak yang berlebihan, korosi pada tulangan beton akibat serangan zat-zat yang dapat berakibat pada menurunnya daya dukung komponen struktur terhadap beban-beban yang bekerja.



Sumber: Google

Gambar 2 Proses kerusakan bangunan beton akibat korosi baja tulangan

Beton merupakan material serbaguna dalam konstruksi. Bahan ini digunakan untuk dinding, lantai, pondasi, dermaga, balkon, tangga, atap, dan banyak komponen bangunan struktural serupa lainnya. Bangunan beton mengandalkan kerangka internal dari batang baja atau mesh untuk tulangan agar bekerja dengan baik dalam kapasitas struktural. Setiap paparan udara atau air menciptakan asam karbonat yang dapat menyebabkan baja terkorosi. Pada **Gambar 2** memperlihatkan proses kerusakan bangunan beton akibat korosi baja tulangan dimana proses oksidasi menyebabkan volume baja tulangan mengembang sehingga menyebabkan retak-retak pada permukaan tulangan hingga ke permukaan beton, akibatnya memberikan lebih banyak ruang bagi air untuk masuk ke struktur internal, meretakkan beton dan memperburuk kondisi. Korosi tulangan baja yang tertanam dalam beton dapat menyebabkan spalling beton.

Pada **Gambar 3** terlihat spalling Beton dimana spalling beton adalah masalah umum pada struktur beton yang sudah tua. Jika dibiarkan tidak terdiagnosis dan tidak diproteksi, maka pengelupasan beton dapat menyebabkan kondisi berbahaya. Alkalinitas, mekanisme korosi normal, menyebabkan batang baja yang dimasukkan ke dalam beton mengalami korosi seiring waktu. Kinerja struktur beton bertulang akan memburuk dari waktu ke waktu karena berbagai

alasan, seperti perubahan kondisi lingkungan, beban desain, dan sifat material, serta kesalahan desain struktural dan konstruksi yang rusak.



Sumber: Google

Gambar 3 Spalling pada Beton

Struktur beton sesuai dengan umur rencananya akan mengalami penurunan kekuatan bahkan mengalami kerusakan. Selain itu pengaruh lingkungan, perubahan fungsi struktur atau perubahan beban pelaksanaan yang tidak sesuai dengan rencana desain awal juga mengakibatkan kerusakan struktur (Shen et al., 2021). Korosi baja pada beton akan cepat terjadi di lingkungan yang keras, seperti daerah pesisir, tropis, atau gurun di mana kadar garam yang tinggi dan suhu ekstrim mempercepat laju pembusukannya. Akibatnya, seluruh struktur runtuh karena penurunan kinerja struktural yang parah. Beton yang telah terkelupas harus diperbaiki, dengan cara mengidentifikasi dan mencari akar penyebabnya terlebih dahulu untuk memastikan bahwa struktur tidak berbahaya bagi pengguna (Luckai, 2011).

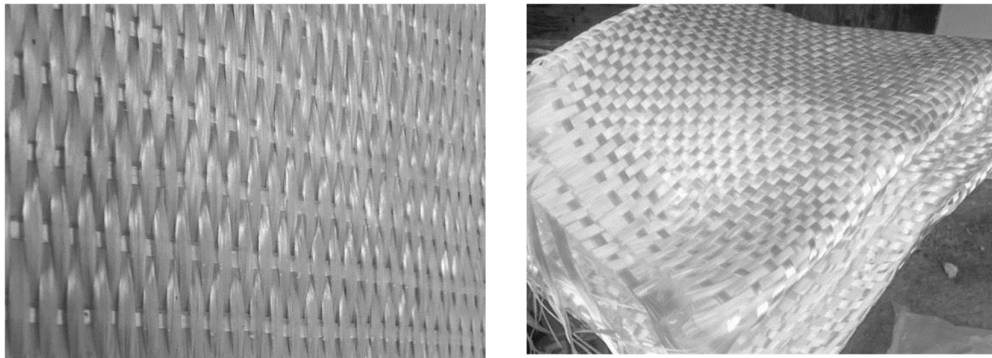
Jika hal itu terjadi, ada dua hal yang dapat dilakukan, yaitu membongkar struktur lama atau struktur yang telah rusak tersebut lalu mengganti dengan struktur baru, atau memberikan perbaikan beton yang umum dilakukan pasca kondisi spalling dengan cara grouting. Grouting adalah metode perbaikan beton dengan menggunakan material semen grout. Kelebihan dari material semen grout ini adalah tidak menyusut dan memiliki mutu yang tinggi yang terlihat pada **Gambar 4**. Penelitian Minh et al., (2007) grouting yang tepat dapat melindungi tendon prategang dari korosi pada balok. Perbaikan dengan cara grouting akan memiliki efek yang berbeda pada perilaku retak, kurva defleksi beban, dan mode kegagalan balok (Wang et al., 2014).



Sumber: Lab.Teknik Sipil Unhas

Gambar 4 Sika Grout 215

FRP merupakan material perkuatan dan perbaikan struktur yang telah digunakan secara meluas. Salah satu jenis FRP yang biasa digunakan sebagai perkuatan struktur adalah GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer). Dimana beberapa keunggulannya antara lain sebagai bahan non korosi, netral terhadap gaya magnet jika dibandingkan terhadap baja, punya kuat tarik lebih besar dan modulus elastisitas kecil.



Sumber: Lab.Teknik Sipil Unhas

Gambar 5 GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer)

Beberapa hasil penelitian telah membuktikan bahwa GFRP yang terlihat pada **Gambar 5** berhasil membatasi retak dan spalling karena menyebarnya korosi pada tulangan beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan lembaran GFRP untuk memperkuat balok beton bertulang adalah teknik yang efisien yang

dapat menjaga integritas struktural dan meningkatkan perilaku balok (Pantelides et al., 2008). Istilah GFRP adalah singkatan dari *Glass Fiber Reinforced Polymer*. Bahan ini mengandung kaca sebagai komponen penguat matriks polimer. Dibandingkan dengan bentuk FRP lainnya, Polymer yang diperkuat serat gelas memiliki kepadatan yang tinggi dan berat sedang. GFRP juga merupakan bahan yang kuat, lebih murah, yang memungkinkan menggunakan bahan ini dalam banyak aplikasi. Pada umumnya GFRP diletakan pada bagian struktur yang mulai menunjukkan penurunan kinerja, yaitu dengan cara menempelkan ataupun melilitkan GFRP pada bagian yang lemah, sehingga GFRP tersebut mampu menyokong struktur untuk tetap bertahan pada posisi yang diharapkan.

Berdasarkan hal-hal yang telah diuraikan diatas maka peneliti tertarik untuk melakukan pengujian tentang perilaku lentur balok beton bertulang dengan asumsi kondisi balok pasca korosi maka dilakukan perkuatan dengan sistem grouting untuk mengganti selimut beton yang telah spalling dan perkuatan GFRP untuk meningkatkan kekuatan tarik karena adanya pengurangan volume pada tulangan akibat korosi. Adapun penelitian ini berjudul “**Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Korosi Dengan Grouting Dan GFRP Sheet**”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka rumusan masalahnya adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku lentur balok beton bertulang dalam kondisi normal yang dibandingkan dengan balok beton bertulang pasca korosi dengan perbaikan grouting dan perkuatan GFRP.
2. Bagaimana perilaku retak dan mode keruntuhan pada balok beton bertulang dengan perbaikan grouting dan perkuatan GFRP.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengevaluasi perilaku lentur balok beton bertulang dalam kondisi normal yang dibandingkan dengan balok beton bertulang pasca korosi dengan perbaikan grouting dan perkuatan GFRP.
2. Untuk mengevaluasi perilaku retak dan mode keruntuhan balok beton bertulang dengan perbaikan grouting dan perkuatan GFRP.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini baik untuk aplikasi lapangan maupun untuk menambah referensi teoritis adalah sebagai berikut :

1. Memberikan pemahaman informasi mengenai kondisi balok beton bertulang pasca korosi dengan perbaikan menggunakan grouting dan perkuatan GFRP sheet.
2. Memberikan pemahaman sebagai referensi untuk penelitian lanjutan mengenai perlakuan balok pasca korosi.
3. Sebagai referensi dan alternatif perbaikan perkuatan struktur yang mengalami kerusakan dan kegagalan pasca korosi.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

1. Dimensi benda uji balok beton bertulang 150x200x3300 mm dengan jarak tumpuan ke tumpuan 3000 mm.
2. Membuat 9 (sembilan) benda uji balok beton bertulang, yang terdiri dari:
 - a. 3 (tiga) buah balok beton bertulang sebagai balok kontrol.
 - b. 3 (tiga) jenis balok uji, dengan asumsi telah mengalami penyusutan akibat kondisi pasca spalling (korosi) sehingga tulangan tarik pada beton dari 3D13 berubah menjadi tulangan beton yang terdiri dari 3D8 mm kemudian dilakukan perbaikan grouting.
 - c. 3 (tiga) jenis balok uji, pasca korosi yang dilakukan perbaikan grouting, perkuatan balok pada bagian bawah selebar balok menggunakan GFRP.

3. Digunakan beton ready mix dengan mutu $f'c$ 20 MPa.
4. Melakukan uji lentur terhadap seluruh varian balok menggunakan beban statis.
5. Bahan untuk grouting digunakan SIKA GROUT 215.
6. Untuk perkuatan lentur balok digunakan GFRP dari Fyfo.Co LLC.
7. Pengamatan terhadap korosi tulangan tidak dilakukan. (Pengaruh korosi tulangan dengan mengganti tulangan dari D13 menjadi D8

1.6 Sistematika Penelitian

Dalam tesis ini, penulisan dibagi atas 5 Bab, yang secara sistematis diuraikan sebagai berikut:

Bab I. Pendahuluan

Sebagai bagian awal, bab ini berisi latar belakang penelitian termasuk penelitian sebelumnya yang berkaitan, selanjutnya diringkas dalam bentuk rumusan masalah, dilanjutkan dengan tujuan penelitian yang akan dicapai, manfaat penelitian, ruang lingkup dan batasan penelitian mencakup rambu-rambu pelaksanaan penelitian, sistematika penulisan.

Bab II. Tinjauan Pustaka

Pada bab ini diuraikan mengenai hal-hal yang berkaitan dan menunjang penelitian ini, dimulai dengan penelitian sebelumnya mengenai balok beton bertulang pasca korosi, grouting, GFRP sheet, kerangka pikir, serta teori - teori yang menunjang pelaksanaan dan penyelesaian masalah.

Bab III. Metode Penelitian

Bab ini merupakan konsep pelaksanaan penelitian, diawali dengan jenis penelitian, lokasi dan waktu pelaksanaan penelitian, pengujian karakteristik material dasar, rancangan penelitian berupa penentuan dimensi balok, perhitungan teoritis momen dan gaya lintang setiap varian balok uji, perhitungan teoritis kapasitas balok normal termasuk penggunaan dan penempatan strain gauge tulangan dan beton, jumlah dan titik penempatan LVDT, variabel dan notasi benda uji. Selanjutnya dibuat bagan alir penelitian, dan uraian mengenai tahapan penelitian, serta metode analisis.

Bab IV. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian awal dari bab ini dikemukakan mengenai hasil pengujian yang telah dilakukan pada setiap varian balok beton bertulang, selanjutnya dilakukan analisis dan pembahasan terhadap hasil pengujian yang menunjang tujuan penelitian yang ingin dicapai.

Bab V. Kesimpulan dan Saran

Bagian ini merupakan bagian akhir dari penulisan, dilakukan dengan membuat kesimpulan yang disinkronkan dengan tujuan penelitian, selanjutnya diajukan saran untuk perbaikan dan kelanjutan penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Andi Safirah Annisa Marwiji, (2021) melakukan penelitian tentang Analisis Pola Kegagalan Balok Beton Bertulang Yang Diperkuat Dengan material Grouting dan serat PVA. Tujuan Penelitian ini untuk menganalisis pola retak balok beton bertulang yang diperkuat dengan material grouting dan serat PVA. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen yaitu dengan cara melakukan perkuatan pada beton dengan metode grouting dan serat PVA. Adapun kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini adalah analisis pola retak yang terjadi pada balok kontrol (BK), balok diperkuat grouting (GR), dan balok diperkuat grouting dan serat PVA (GR-V) menunjukkan bahwa ketiga benda uji mengalami retak lentur yang ditandai dengan munculnya retak pada sisi tarik merambat dan merambat ke sisi tekan balok. Jumlah retak balok GR lebih banyak daripada balok BK dan GR-V. Penambahan serat PVA pada balok GR-V mampu memberikan *bridging effect* yang dapat menghambat lebar dan laju perkembangan retak. Mode kegagalan yang terjadi pada ketiga benda uji merupakan kegagalan *under-reinforced* ditandai dengan lelehnya tulangan sebelum hancurnya beton. Pada Balok GR-V ditemukan adanya kegagalan *debonding* akibat tidak sempurnanya lekatan pada daerah sambungan beton normal dan mortar grouting.

B. S. Wang et al., (2011) melakukan simulasi korosi baja secara artifisial dan kemudian diperkuat dengan bahan grouting untuk mempelajari efek penguatan bahan grouting dengan uji lentur beton bertulang dalam kondisi berkarat. Hasilnya menunjukkan bahwa penguatan material grouting dapat secara nyata meningkatkan kuat dan kapasitas pendukung, sementara itu memperbesar kekakuan struktural untuk menunda munculnya retakan dan menghambat ekspansi dan perpanjangan retakan. Hasil penelitian ini sangat berharga dalam desain praktis.

Djamaluddin & Irmawaty, (2017) melakukan riset berkaitan efek paparan air laut terhadap kapasitas saat penguatan balok beton menggunakan lembaran GFRP untuk mengetahui hubungan kapasitas momen beton bertulang diperkuat menggunakan lembaran FRP dengan rendaman air laut. Berdasarkan data

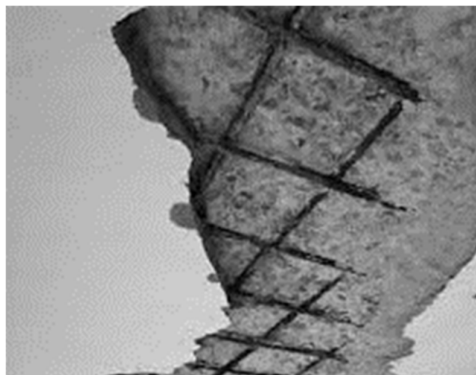
eksperimental, model hubungan efek durasi paparan air laut dengan kapasitas saat itu dikembangkan. Model yang dikembangkan dapat digunakan untuk memprediksi efek paparan air laut terhadap kapasitas saat lembar GFRP dipergunakan dalam beton bertulang. Adapun pada **Gambar 6** terlihat foto model kegagalan balok pada penelitian ini.



Gambar 6 Foto Model Kegagalan Balok (Djamaluddin & Irmawaty, 2017)

Tata et al., (2018) melakukan riset dengan penggunaan GFRP pada balok dengan rendaman air laut meningkatkan kapasitas uji lentur serta penurunan kapasitas lembaran GFRP yang dipengaruhi oleh perendaman air laut. Kegagalan yang terjadi pada balok uji lentur didahului oleh kegagalan di pusat beban (pertengahan bentang) hingga terjadinya *debonding*.

Mardani, (2017) melakukan percepatan korosi pada balok beton yang terlihat pada **Gambar 7** dengan tulangan. Hasil pengujian kuat lentur pada beton bertulang yang menggunakan air laut dan pasir laut memiliki kapasitas lentur yang hampir sama dengan beton normal yang diakselerasi korosi (Nacc), sehingga 16 besi coating dapat digunakan sebagai alternatif pada beton yang menggunakan air laut dan pasir laut.



Gambar 7 Korosi Pada Balok Beton (Mardani, 2017)

Idris et al., (2019) menggunakan lembaran GFRP pada beton bertulang untuk kegagalan geser dengan model U-wrapping (BGP-1), U-strip lebar vertikal 75 mm (BGP-2), U-strip lebar vertikal 100 mm (BGP-3), U-cenderung strip 450 lebar 75 mm (BGP-4), U-cenderung strip 450 lebar 100 mm (BGP-5). Penguatan U-strip lebar vertikal 100 mm (BGP-3) lebih efisien (luas lembaran GFRP 0,225m²) dan metode implementasinya lebih sederhana jika dibandingkan dengan balok BGP-2, BGP-4 dan BGP-5. Berdasarkan kapasitas momen maksimum (ultimate), maka balok dengan U-wrapping (BGP-1), yang paling cocok untuk digunakan hanya membutuhkan area GFRP yang kurang efisien (area GFRP 0,425 m²).

Machmud et al., (2019) Studi eksperimental dari balok beton bertulang menggunakan perkuatan eksternal dari serat gelas (GFRP) dan serat karbon (CFRP) pasca tulangan meleleh. Studi ini juga menganalisis pengaruh penambahan lebar sabuk dan penambahan jumlah lapisan FRP pada balok terhadap kekuatan balok. Balok dengan perkuatan FRP mengalami kegagalan debonding berupa terlepasnya rekatan FRP dari 17 balok dengan retak lentur di tengah bentang balok.

Djamaluddin et al., (2019) penelitian eksperimental laboratorium pada balok beton bertulang yang menggunakan perkuatan eksternal Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). Data yang diamati yaitu kapasitas beban lendutan, regangan beton, regangan GFRP dan mode keruntuhan balok. Hasil penelitian menunjukkan bahwa GFRP mengalami debonding sebelum mencapai regangan putus sebesar 11.200 $\mu\epsilon$, sehingga dapat direkomendasikan bahwa pada perkuatan lentur balok beton bertulang dengan menggunakan GFRP, penggunaan lembar GFRP sebaiknya dilakukan pada daerah momen maksimum yaitu sepanjang setengah bentang tengah balok.

Arief Eko Supriyadi, (2015) dalam penelitian ini dianalisa kuat lentur beton yang dihasilkan perbaikan keropos menggunakan Sika Grout (215) New dan Sikaclim, dibandingkan dengan beton dalam kondisi normal dan dengan beton dalam kondisi keropos. Target mutu beton yang ingin di capai adalah Kuat Tekan K 225, dan target slump adalah 6 ± 2 cm. Dari hasil penelitian didapatkan tegangan lentur rata-rata beton untuk benda uji balok dalam keadaan normal adalah sebesar 0,483 Mpa, sedangkan untuk benda uji balok dalam keadaan keropos di dapat tegangan lentur rata-rata 0,400 Mpa dan untuk benda uji balok dalam keadaan

perbaikan dengan Grouting tegangan lentur yang didapat adalah 0,433 Mpa. Untuk perbandingan tegangan lentur antara benda uji balok dalam akibat keropos terhadap benda uji dalam kondisi normal mengalami penurunan sebesar 17,24 %, sedangkan dengan kondisi perbaikan dengan grouting terhadap benda uji balok dalam kondisi normal mengalami penurunan sebesar 10,34 % dan untuk benda uji balok dengan perbaikan grouting terhadap benda uji balok mengalami peningkatan sebesar 6,9 %.

Djamaluddin et., al (2011) dalam penelitiannya yaitu kapasitas lentur perkuatan balok beton bertulang yang telah meleleh dengan menggunakan lembaran GFRP. Bahan uji berupa balok dengan dimensi 15 cm x 20 cm x 270 cm. Bahan uji terdiri dari bahan uji tanpa retak yang tidak diperkuat sebagai bahan uji kontrol dan bahan uji yang telah di perkuat dengan lembaran GFRP dengan variasi jumlah lapisan dan panjang lembaran. Sebelum dilakukan perkuatan, balok beton bertulang dibebani hingga mencapai batas leleh tulangan tarik. Hasil menunjukkan bahwa kapasitas bahan uji dengan 1 lapis penuh sepanjang bentang balok (type FH-1) dan bahan uji dengan 2 lapis penuh (FH-2) adalah masing-masing 26 kN dan 35 kN. Pada bahan uji FH-12 dengan 1 lapisan penuh sepanjang bentang ditambah dengan lapisan sepanjang setengah bentang yang di tempel pada titik tengah balok memiliki kapasitas lentur 30 kN. Kemudian, untuk bahan uji FH-32 dengan 3 lapis penuh sepanjang bentang ditambah dengan 2 lapis dengan panjang setengah bentang balok yang ditempel pada titik tengah balok memiliki kapasitas 42 kN. Sebagai pembanding, hasil pengujian pada balok tanpa perkuatan memiliki kapasitas lentur sebesar 16.5 kN. Sehingga dapat di simpulkan bahwa perkuatan menggunakan lembaran GFRP pada balok beton bertulang yang telah terbebani hingga leleh tulangan memiliki kapasitas lentur yang lebih tinggi dari balok aslinya.

2.2 Perilaku Beton Bertulang

Menurut SNI-03-2847-2002, beton adalah campuran antara semen Portland atau semen hidraulik lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk masa padat. Biasanya dipercayai bahwa beton mengering setelah pencampuran dan peletakan. Seiring dengan penambahan umur, beton akan semakin mengeras dan akan mencapai kekuatan rencana (f^c) pada usia 28 hari. Sebenarnya, beton tidak menjadi padat karena air menguap, tetapi

semen berhidrasi, mengemulsi komponen lainnya bersama dan akhirnya membentuk material seperti-batu.



Sumber: Google

Gambar 8 Pengecoran Beton

Pengecoran Beton pada **Gambar 8** digunakan untuk membuat perkerasan jalan, struktur bangunan, fondasi, jalan, jembatan penyeberangan, struktur parkir, dasar untuk pagar/gerbang, dan semen dalam bata atau tembok blok. Nama lama untuk beton adalah batu cair. Dalam perkembangannya banyak ditemukan beton baru hasil modifikasi, seperti beton ringan, beton semprot (eng: shotcrete), beton fiber, beton berkekuatan tinggi, beton berkekuatan sangat tinggi, beton mampat sendiri (eng: *self-compacted concrete*) dll. Saat ini beton merupakan bahan bangunan yang paling banyak dipakai di dunia.



Sumber: Google

Gambar 9 Proses Penuangan *Ready Mix*

Beton terdiri dari $\pm 15\%$ semen, $\pm 8\%$ air, $\pm 3\%$ udara dan selebihnya pasir dan kerikil kemudian menjadi *Ready Mix* seperti yang terlihat pada **Gambar 9**.

Setelah mengeras campuran tersebut mempunyai sifat yang berbeda-beda, tergantung pada cara pembuatannya. Perbandingan campuran, cara pencampuran, cara mengangkut, cara mencetak, cara memadatkan, dan sebagainya akan mempengaruhi sifat-sifat beton (Wuryati, 2001). Beton memiliki kelemahan yaitu kuat Tarik yang rendah oleh karena itu perlu diberikan tulangan.



Sumber: Google

Gambar 10 Konstruksi beton bertulang

Menurut SNI 03-2847-2002 pasal 3.13 yang terlihat pada **Gambar 10** mendefinisikan konstruksi beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua bahan tersebut bekerja sama dalam memikul gaya-gaya. Beton bertulang terbuat dari gabungan antara beton dan tulangan baja. Oleh karena itu, beton bertulang memiliki sifat yang sama seperti bahan-bahan penyusunnya yaitu sangat kuat terhadap beban tekan dan beban tarik.

Beton umumnya mempunyai kekuatan tekan yang tinggi tetapi tidak tahan terhadap tarik atau memiliki tarik yang rendah, baja tulangan pada beton dapat memberikan kekuatan tarik yang tinggi atau untuk menahan gaya tarik yang cukup besar pada serat-serat balok bagian tepi bawah, maka pada daerah beton yang tertarik diberi tulangan yang berguna untuk meningkatkan kekuatan pada beton bertulang.

Beberapa asumsi yang digunakan dalam perencanaan beton bertulang adalah:

- lekatan (bonding) antara tulangan baja dengan beton harus sempurna,
- beton yang mengelilingi tulangan bersifat kedap sehingga mampu melindungi dan mencegah terjadinya karat, dan
- angka muai kedua bahan hampir sama. Kegagalan pada balok beton bertulang pada dasarnya dipengaruhi oleh melelehnya tulangan baja dan hancurnya beton bertulang.

Ada 3 kondisi rasio tulangan balok beton bertulang yaitu:

a. Kondisi Balanced Reinforced

Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan.

$$\text{Kondisi regangan : } \epsilon_c = 0.003 \text{ dan } \epsilon_s = \frac{fy}{Es}$$

$$\text{Pada kondisi ini berlaku : } \rho = \rho_{balanced} \text{ dan } \epsilon_s = \epsilon_y$$

b. Kondisi Over-Reinforced

Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan dalam keadaan balanced. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya penampang beton terlebih dahulu sebelum tulangan baja meleleh.

$$\text{Pada kondisi ini berlaku: } \rho > \rho_{balanced} \text{ dan } \epsilon_s < \epsilon_y$$

c. Kondisi Under-Reinforced

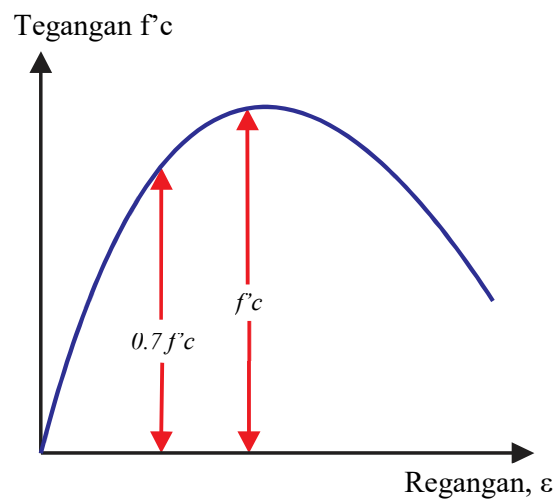
Kondisi ini terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi balanced. Keruntuhan ditandai dengan lelehnya tulangan baja terlebih dahulu dari betonnya.

$$\text{Pada kondisi ini berlaku: } \rho < 75\% \rho_{balanced} \text{ dan } \epsilon_s < \epsilon_y$$

Kekuatan tekan beton tergantung pada tipe campuran, waktu dan kualitas perawatan. Kekuatan tekan diperoleh berdasarkan hasil uji tekan laboratorium

terhadap benda uji baik silinder ataupun kubus pada saat umur beton 28 hari. Mengenai frekuensi pengetesan dianggap memuaskan jika: (1) rata-rata semua set dari tiga tes kekuatan yang berurutan sama atau melebihi kuat tekan yang disyaratkan. (2) tidak ada tes kekuatan individual (rata-rata dua silinder yang jatuh dibawah kuat tekan yang disyaratkan). Pada dasarnya kuat tekan desain seharusnya bukanlah kekuatan silinder rata-rata. Harga desain haruslah dipilih sebagai kekuatan silinder minimum yang mungkin.

1. Kurva Tegangan-Regangan

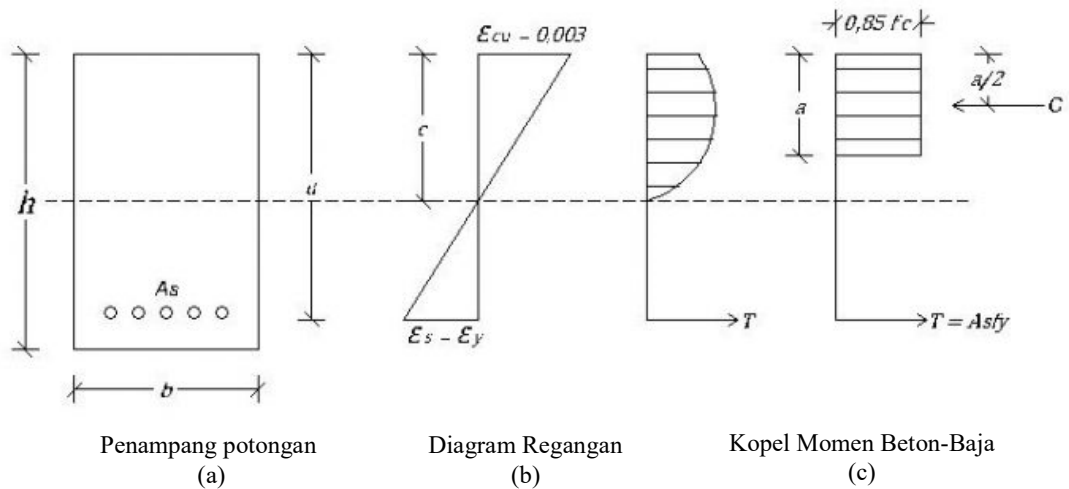


Gambar 11 Kurva tegangan-regangan

Kurva tegangan regangan tipikal yang diperoleh dari hasil penelitian menggunakan spesimen beton silinder yang dibebani tekan uniaksial selama beberapa menit. Bagian utama kurva sampai 40% dari kekuatan ultimat $f'c$ pada dasarnya dapat dianggap linier untuk semua penggunaan- penggunaan praktis. Setelah kira-kira 70% dari tegangan kegagalan, material kehilangan sebagian besar kekakuannya, dengan demikian meningkatkan kelurusan-kelengkungan diagram. Pada saat beban ultimate, retak-retak yang paralel terhadap arah pembebanan menjadi dapat dilihat dengan jelas, dan beton gagal segera sesudahnya.

Gambar 11 menunjukkan kurva tegangan-regangan pada beton dengan berbagai kekuatan. Dari gambar tersebut diperoleh:

- Semakin rendah kekuatan beton, semakin tinggi regangan kegagalan
- Panjang dari bagian awal yang relatif linear meningkat dengan meningkatnya kekuatan tekan beton. Adanya penurunan daktilitas yang nyata dengan kekuatan yang bertambah.



Gambar 12 Distribusi regangan dan tegangan pada balok

Pada **Gambar 12**, dapat dilihat bahwa C adalah resultan gaya tekan dalam, T merupakan resultan seluruh gaya tekan pada daerah diatas garis netral. Sedangkan T adalah resultan gaya tarik dalam, yaitu jumlah seluruh gaya tarik yang diperhitungkan untuk daerah di bawah garis netral. Kedua gaya ini mempunyai arah garis kerja sejajar, sama besar, tetapi berlawanan arah dan dipisahkan dengan jarak z , sehingga membentuk kopel momen tahanan dalam dimana nilai maksimalnya disebut kuat lentur atau momen tahanan penampang komponen struktur tersebut. Kopel tegangan antara C dan T juga bisa disebut dengan keseimbangan gaya. Teori kekuatan batas (*ultimate*) memberikan syarat yaitu baja tulangan tarik pada kondisi mencapai tegangan leleh ($f_s = f_y$) dan beton tekan mencapai kondisi regangan maksimum sebesar $\epsilon'c = 0,003$. Momen tahanan dalam tersebut akan menahan momen lentur rencana aktual yang disebabkan oleh beban luar. Oleh karena itu, dalam merencanakan dimensi suatu balok, jumlah serta luas baja tulangan harus sedemikian rupa sehingga dapat menimbulkan momen tahanan yang paling tidak sama dengan momen lentur maksimum yang dihasilkan oleh beban luar.

Balok terlentur, beban-beban yang bekerja pada suatu struktur menyebabkan adanya lentur dan deformasi pada elemen struktur tersebut. Beban-beban yang dimaksud bisa berupa beban gravitasi, beban kerja, beban susut, beban karena perubahan suhu, dan lain-lain. Balok sebagai sistem dari sebuah struktur yang menahan lentur harus terjamin stabilitasnya, agar tegangan tarik dan tekan dapat ditahan oleh balok tersebut. Pada suatu gelagar bisa terjadi momen lentur positif dan momen lentur negatif. Saat suatu gelagar yang terkena beban menimbulkan momen positif, maka regangan tekan akan terjadi di bagian atas penampang, sedangkan regangan tarik akan terjadi di bagian bawah penampang. Tegangan-tegangan lentur merupakan hasil dari momen lentur luar. Tegangan ini akan mempengaruhi dimensi penampang balok. Proses desain yang mencakup penentuan dan analisis penampang biasanya dimulai dengan persyaratan terhadap lentur. Setelah itu faktor-faktor lain seperti geser, defleksi, retak, dan panjang penyaluran tulangan sampai memenuhi syarat. (Nawy, 1990)

Rumus - rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$C = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \dots\dots\dots (1)$$

$$Ts = As \cdot fys$$

$$C = T$$

$$0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b = As \cdot fys \dots\dots\dots (2)$$

Dengan Ts adalah resultan gaya tarik dari baja dan bertambahnya resultan gaya tarik pasti berpengaruh terhadap kekuatan lentur dari beton tersebut.

2.3 Degradasi Struktur Akibat Korosi

Korosi adalah kerusakan atau kehancuran material akibat adanya reaksi kimia di sekitar lingkungannya. Secara umum, korosi dibedakan menjadi korosi basah dan korosi kering. Korosi disebabkan adanya faktor kimia fisika, metalurgi, elektrokimia dan termodinamika. Korosi dapat digolongkan menjadi delapan, yaitu korosi umum, korosi galvanik, korosi celah, korosi sumur, korosi batas butir, korosi selektif, korosi erosi, dan korosi tegangan. Dalam bahasa sehari-hari, korosi disebut perkaratan. Contoh korosi yang paling lazim adalah perkaratan besi. Pada peristiwa korosi, logam mengalami oksidasi, sedangkan oksigen (udara)

mengalami reduksi. Karat logam umumnya adalah berupa oksida atau karbonat. Rumus kimia karat besi adalah $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, suatu zat padat yang berwarna coklat-merah.

Faktor-faktor yang mempengaruhi korosi Berikut ini adalah faktor-faktor yang dapat mempercepat terjadinya korosi:

- a. Kontak langsung logam dengan oksigen dan air Korosi besi terjadi apabila terdapat oksigen dan air. Semakin banyak jumlah oksigen dan air yang kontak dengan logam, maka korosi akan semakin cepat terjadi.
- b. Keberadaan zat pengotor Contoh zat pengotor yang bisa mempengaruhi korosi adalah debu karbon hasil pembakaran. Semakin banyak zat pengotor pada permukaan logam, maka korosi lebih mudah terjadi.
Baca juga: Logam Misterius Ditemukan di Gurun yang Terpencil
- c. Keberadaan elektrolit Jika suatu lingkungan mengandung elektrolit tinggi, ini akan mempercepat terjadinya korosi. Contohnya pada lingkungan air laut yang membuat kapal karam mengalami korosi.
- d. Suhu Suhu panas akan meningkatkan energi kinetik partikel yang memicu terjadinya korosi. Contoh korosi akibat suhu tinggi adalah knalpot kendaraan bermotor. Suhu jarang mempengaruhi logam yang ada di lingkungan rumah, karena butuh suhu yang sangat tinggi untuk menghasilkan korosi akibat suhu.
- e. pH Larutan asam atau yang memiliki pH lebih kecil dari 7 mampu membuat korosi lebih cepat terjadi dibandingkan larutan yang tidak asam.
- f. Mikroba Terdapat beberapa jenis mikroba yang bisa menyebabkan korosi jika terdapat di permukaan logam, contohnya *Thiobacillus thiooxidans* dan *Thiobacillus ferrooxidans*.
- g. Jenis logam Logam murni biasanya lebih tahan korosi dibandingkan dengan logam campuran. Logam campuran yang paling tahan korosi adalah stainless steel. Stainless steel banyak digunakan sebagai peralatan sehari-hari, mulai dari peralatan memasak, hingga peralatan medis.

2.4 Metode Perbaikan Dan Perkuatan Struktur

2.4.1 Grouting Pada Beton Bertulang

Grouting adalah salah satu proses sementasi untuk meningkatkan stabilitas pada bangunan dan tanah/batuan. Teknik grouting dilakukan dengan cara menginjeksikan bahan grouting (semen) ke dalam lubang hasil mesin bor atau retakan suatu konstruksi/tanah/batuan yang tidak stabil, dengan begitu pori-pori konstruksi/tanah/batuan akan terisi dengan bahan grouting. Pengisian pori-pori tanah dengan bahan grouting akan membatasi daya lolos air dalam tanah (permeabilitas) dan memperbaiki faktor-faktor kompresibilitas dan kekuatan tanah.

Grouting dapat dibedakan menjadi 6 jenis, yaitu

- **Permeation Grouting atau Sementasi Penembusan**

Permeation grouting disebut juga penetration grouting merupakan pengisian retakan, rekahan atau kerusakan pada batuan, dan rongga pada sistem pori-pori tanah dengan tanpa merubah formasi serta konfigurasi maupun volume rongga. Grouting jenis ini dapat meningkatkan kohesi tanah.

- **Compaction Grouting atau Sementasi Pemadatan**

Compaction Grouting merupakan mekanisme perbaikan tanah yang dilakukan dengan cara menginjeksi material grouting sangat kaku (stiff) pada tekanan tinggi ke dalam tanah. Grouting jenis ini ditujukan untuk meningkatkan daya dukung tanah. Grouting dengan metode pemadatan ini tidak serta merta dapat sepenuhnya mencegah terjadinya rembesan. Akan tetapi, grouting jenis ini mampu meningkatkan beban tanah karena tanah telah mengalami pemadatan.

- **Fracture Grouting atau Sementasi Rekahan**

Fracture Grouting dilakukan pada rekahan hidrolik yang terdapat pada tanah dengan fluida suspensi atau material grouting slurry. Grouting ini bertujuan untuk menghasilkan hubungan antar lensa grouting dan memberikan penguatan kembali (reinforcement). Umumnya fracture

grouting digunakan pada tanah dengan permeabilitas rendah, misalnya pada tanah lempung.

- **Mixing/ Jet Grouting atau Sementasi Campuran**

Sesuai dengan namanya, grouting jet ini dilakukan dengan memadukan dua perlakuan, yaitu mengikis tanah menggunakan jet bertekanan tinggi dan dilakukan injeksi serentak ke dalam tanah yang terganggu dengan jet monitor. Grouting tipe ini dapat dimanfaatkan untuk melakukan penyemenan di sekeliling tiang atau pondasi.

- **Fill Grouting atau Sementasi Isi**

Sementasi isi atau fill grouting ini dilakukan dengan menggunakan peralatan khusus yang diberi campuran concrete atau mortar. Rongga atau retakan yang dihasilkan secara alami maupun buatan akan dilakukan pengisian bahan grouting dan kemudian dilakukan penutupan.

- **Vacuum Grouting atau Sementasi Vakum**

Sementasi vakum adalah teknik sementasi dengan cara menyedot material grouting untuk masuk ke dalam bagian yang mengalami kerusakan. Sebelumnya kerusakan tersebut harus diisolasi dari tekanan barometrik terlebih dahulu, sehingga dengan kondisi yang vakum, material grouting akan tersedot dengan aman dan lancar untuk masuk atau tertarik ke dalam kerusakan tersebut.

2.4.2 Fiber Reinforced Polymer (FRP)

Bahan komposit FRP terdiri dari serat kontinu berkekuatan tinggi, seperti kaca, karbon, atau kabel baja, yang tertanam dalam matriks polimer. Serat menyediakan elemen penguat utama sementara matriks polimer (resin epoksi) bertindak sebagai pengikat, melindungi serat, dan mentransfer beban ke dan di antara serat. Terdapat beberapa jenis material pembentuk FRP seperti karbon, kaca, kevlar dan material alami lainnya seperti goni. Produk FRP yang terbuat dari kaca lebih dikenal dengan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). GFRP terbuat dari kaca cair yang dipanaskan sekitar 2300°F dan dipintal dengan bantuan Bushing Platinumrhodium pada kecepatan 200 mph, dan yang terbuat dari karbon dikenal dengan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Penggunaan FRP untuk

penguatan dan retrofit semakin populer di kalangan profesional desain dibandingkan teknik penguatan konvensional, seperti pemasangan rangka dan elemen baja struktural tambahan.

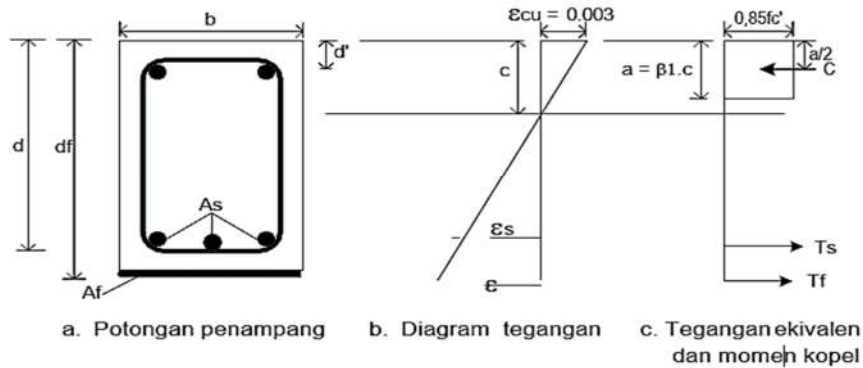
Menurut Rocca et al., (2009), beberapa mode kegagalan yang sering terjadi pada struktur yang menggunakan FRP yaitu:

- a. Rusaknya FRP setelah tulangan tarik meleleh (rupture failure of FRP)
- b. Lepasnya ikatan antara FRP dan beton (debonding failure)
- c. Kegagalan tekan beton

Sebagai perkuatan geser balok, lembaran FRP dapat direkatkan pada sisi balok untuk meningkatkan daktilitas dan kekuatan pada balok tersebut. Sebagai penguatan eksternal, FRP tipe lembaran digunakan untuk:

- a. Perbaiki balok dan slab beton yang rusak, dengan asumsi bahwa debonding antara FRP dan beton tidak menyebabkan kegagalan elemen struktur.
- b. Mengatasi penambahan lebar retakan akibat beban layanan.
- c. Meningkatkan kekuatan lentur akibat peningkatan beban seperti beban gempa dan beban lalu lintas.
- d. Merencanakan beton baru yang memiliki daktilitas tinggi.
- e. Perbaiki struktur akibat kesalahan desain atau konstruksi.
- f. Meningkatkan kemampuan geser beton.
- g. Meningkatkan kemampuan pengekangan kolom beton.
- h. Perbaiki struktur lama dan bersejarah.

1. Perilaku Kapasitas Lentur Balok Bertulang Perkuatan FRP



Gambar 13 Tegangan Balok FRP

Pada Gambar 13 terlihat Tegangan balok FRP dimana perhitungan desain kuat lentur balok FRP mengacu pada standar ACI 440.2R-08. Tahapan perhitungan tersebut disajikan dalam rumus- rumus berikut.

Dalam mendesain kekuatan lentur diperlukan faktor reduksi terhadap momen yang terjadi.

$$\phi M_n \geq M_u \dots\dots\dots (3)$$

dimana:

- ϕ = faktor reduksi
- M_n = momen nominal (Nmm)
- M_u = momen ultimit (Nmm)

Untuk melindungi kemampuan lekatan FRP diberikan persamaan untuk menghitung koefisien lekatan yaitu :

$$k_m = \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000} \right) \leq 0.9 \text{ untuk } nE_f t_f \leq 180000 \dots\dots\dots (4)$$

dimana:

- k_m = koefisien lekatan FRP
- ϵ_{fu} = regangan ultimit FRP
- n = jumlah lapis FRP
- E_f = elastisitas FRP (Mpa)
- t_f = tebal FRP (mm)

Dengan memberikan asumsi bahwa nilai regangan maksimum pada beton sebesar 0,003, maka regangan yang terjadi pada FRP dapat dihitung dengan persamaan (5).

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq k_m \epsilon_{fu} \dots\dots\dots (5)$$

dimana:

- ϵ_{fe} = regangan yang terjadi pada FRP
- ϵ_{fu} = regangan ultimit beton
- h = tinggi balok
- c = tinggi balok tegangan ekivalen
- ϵ_{bi} = regangan beton

Nilai tegangan pada FRP dapat dihitung dengan persamaan (6)

$$f_{fe} = E_{fe} \epsilon_{fe} \dots\dots\dots (6)$$

dimana:

- f_{fe} = tegangan yang terjadi pada FRP

Dengan menggunakan persamaan Daktilitas regangan adalah perbandingan antara regangan maksimum dan regangan leleh pada balok yang dibebani aksial tekan-tarik.

$$\mu_\epsilon = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_v} \dots\dots\dots (7)$$

Dan persamaan Daktilitas kelengkungan adalah perbandingan antara sudut kelengkungan (putaran sudut perunit panjang) maksimum dengan kelengkungan leleh dari suatu elemen struktur akibat momen lentur. Persamaan matematik daktilitas kelengkungan sebagai berikut:

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_v} \dots\dots\dots (8)$$

Nilai regangan dan nilai tegangan pada tulangan dapat dihitung. Setelah diketahui nilai regangan dan tegangan pada tulangan dan FRP, posisi garis netral dapat dicek berdasarkan gaya dalam yang terjadi dengan menggunakan persamaan daktilitas perpindahan adalah perbandingan struktur maksimum terhadap perpindahan struktur pada saat leleh persamaan (9).

$$\mu_{\delta} = \frac{\delta_u}{\delta_v} \dots\dots\dots(9)$$

Nilai regangan dan tegangan pada tulangan dan FRP

$$\epsilon_s = \epsilon_{fe} + \epsilon_{bi} \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \dots\dots\dots(10)$$

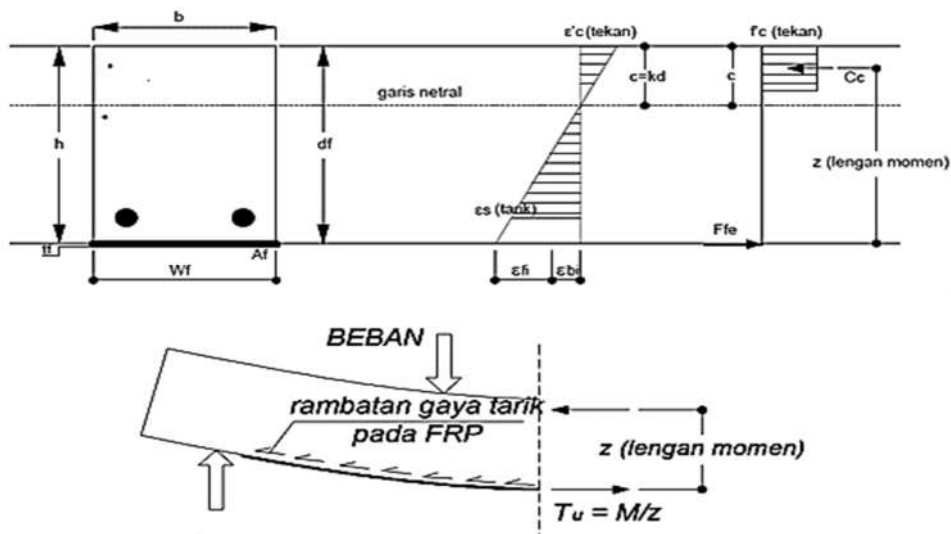
$$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \dots\dots\dots(11)$$

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c \beta_1 b} \dots\dots\dots(12)$$

Kapasitas momen nominal perkuatan lentur dengan menggunakan FRP dapat dihitung dengan persamaan (13). Untuk perkuatan lentur ACI committee 440.2R-08 merekomendasikan nilai faktor reduksi untuk FRP (ψ_f) sebesar 0,85.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots\dots\dots(13)$$

Gambar 14 menunjukkan model analisis regangan FRP yang digunakan. Model analisis ini dapat dilihat sebagai referensi dalam desain balok dengan perkuatan FRP. Sebelumnya telah diuraikan persamaan- persamaan yang digunakan dalam mendesain balok dengan perkuatan FRP, namun tentunya diperlukan suatu analisis terhadap hasil olahan data eksperimen sebagai kondisi nyata dari pengujian yang dilakukan.



Gambar 14 Model analisis regangan FRP

Persamaan-persamaan di atas dimulai dari persamaan (3) hingga persamaan (13) hanya digunakan dalam mendesain benda uji sebelum melakukan pengujian eksperimen yang sebenarnya. Selanjutnya setelah melakukan pengujian eksperimen maka data hasil eksperimen ini akan digunakan dalam persamaan-persamaan berikut untuk menghitung nilai kapasitas rekatan yang terjadi.

Untuk menghitung kapasitas rekatan FRP maka perlu dihitung terlebih dahulu nilai lengan momen z . Nilai lengan momen ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (14). Namun nilai c dalam persamaan (15) belum diketahui sehingga nilai c ini perlu dihitung terlebih dahulu.

Untuk memperoleh nilai c dalam persamaan (14) maka digunakan persamaan (16) di mana dalam persamaan ini digunakan nilai regangan hasil eksperimen. Adapun nilai regangan yang digunakan merupakan hasil eksperimen yang diperoleh yaitu berupa kondisi regangan beton ultimit dan regangan FRP ultimit untuk menghitung kapasitas rekatan ultimit yang terjadi.

$$z = \left(h - \frac{1}{2}c\right) \dots\dots\dots(14)$$

$$c = \frac{\varepsilon_c h}{(\varepsilon_f + \varepsilon_c)} \dots\dots\dots(15)$$

dimana:

- z = lengan momen
- h = tinggi balok
- c = tinggi blok tegangan ekivalen
- ε_c = regangan beton
- ε_f = regangan FRP

Kapasitas rekatan ultimit T_u dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (16). Nilai kapasitas rekatan ultimit T_u sendiri diperoleh dengan cara membagi nilai momen ultimit M_u dengan lengan momen z sesuai dengan prinsip kesetimbangan gaya. Dengan demikian maka dapat diperoleh nilai kapasitas rekatan ultimit GFRP-S dengan menggunakan data hasil eksperimen yang telah dilakukan.

$$T_u = \frac{M_u}{(h - 0.5c)} \dots\dots\dots(16)$$

2. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)



Sumber: Google

Gambar 15 GFRP-S Tyfo SEH-51A

Glass Fiber Reinforced Polymer (GRFP) pada **Gambar 15** merupakan salah satu jenis FRP-GRFP serat polimer yang terbuat dari matriks plastik diperkuat oleh serat halus dari kaca. (Esmaeeli et al., 2017) Material GFRP yang sangat laku dipasaran adalah dalam bentuk lembaran, dimana keuntungan yang diperoleh dari GFRP tipe lembaran adalah kemudahan dalam aplikasi yaitu lembaran GFRP ini dapat ditempelkan dengan mudah pada bagian permukaan anggota struktur yang rusak dengan bantuan perekat (resin), biaya yang relatif murah dibandingkan FRP dengan bahan yang lain, kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan yang tinggi terhadap kimia, memiliki sifat isolasi yang baik (Wu et al., 2005).

Lembaran GFRP adalah tipe lembaran yang mudah ditempelkan pada bagian permukaan struktur yang akan diperkuat dengan bantuan perekat berupa *epoxy*. Adapun Karakteristik GFRP-s (Glass Fiber Reinforced Polymer) type SHE-51A yang terlihat pada **Tabel 1** dan biasanya proses penempelan sangat berperan penting terhadap struktur dengan perkuatan lapisan grouting yang disebabkan karena seringnya dijumpai permasalahan *debonding* yang terjadi pada struktur tersebut. Atas dasar hal tersebut maka digunakan GFRP dalam penelitian ini.

Tabel. 1 Karakteristik GFRP-s (Glass Fiber Reinforced Polymer) type SHE-51A

SIFAT MATERIAL GFRP			
KEADAAN LEPAS		KEADAAN KOMPOSIT	
SIFAT MATERIAL	NILAI TEST	SIFAT MATERIAL	NILAI TEST
Tegangan Tarik	3, 24 Gpa	Tegangan Tarik ultimate	575 Mpa
Modulus Tarik	72,4 Gpa	Modulus Tarik	26,1Gpa
Regangan maks	4,50%	Regangan	2,20%
Kerapatan	2,55 g/cm ²		
Berat per luasan	915 g/m ²		
Tebal Fiber	0,36 mm	Tebal Komposit	1,3 mm

Sumber : Fyfo.Co.LLC

3. Epoxy (Perekat)



Gambar 16 Epoxy Resin Tyfo S

Dalam penggunaannya, GFRP digabungkan dengan suatu bahan perekat (Epoxy Resin) yang terlihat pada **Gambar 16** yang akan merekatkan lembaran fiber pada beton. Bahan perekat yang akan digunakan pada penelitian ini berupa Epoxy dengan nama Tyfo SEH52 yang merupakan produk dari Fyfe. Co terdiri dari 2 (dua) komponen yaitu komponen A (resin) dan komponen B (hardener). Perbandingan

campuran antara bagian A: bagian B = 2:1. Pada penelitian ini GFRP yang digunakan adalah type SEH51A.

Resin epoksi adalah larutan yang digunakan untuk merekatkan serat fiber pada beton atau objek yang ingin diperkuat. Campuran resin epoksi terdiri dari bahan padat dan cair yang saling larut. Campuran dengan resin epoksi yang lain dapat digunakan untuk mencapai kinerja tertentu dengan sifat yang diinginkan. Resin epoksi yang paling banyak digunakan adalah Bisphenol A Eter Diglisidil. Resin epoksi dikeringkan dengan menambahkan anhidrida atau pengeras amina. Setiap pengeras menghasilkan profil larutan yang berbeda dan sifat yang diinginkan untuk produk jadinya. Kecepatan pengeringan dapat dikendalikan melalui seleksi yang tepat dari pengeras atau katalis untuk memenuhi persyaratan proses. Kelemahan resin epoksi adalah biaya yang relatif mahal dan proses pengeringan yang relatif lama.

Menurut Rocca et al., (2009), beberapa mode kegagalan yang sering terjadi pada struktur yang menggunakan FRP yaitu:

- a. Rusaknya FRP setelah tulangan tarik meleleh (rupture failure of FRP)
- b. Lepasnya ikatan antara FRP dan beton (debonding failure)
- c. Kegagalan tekan beton

Beberapa keuntungan resin epoksi sebagai berikut:

- a. Berbagai sifat mekanis memungkinkan pilihan yang lebih banyak
- b. Tidak ada penguapan selama proses pengeringan
- c. Rendahnya penyusutan selama proses pengeringan
- d. Ketahanan yang baik terhadap bahan kimia
- e. Memiliki sifat adhesi yang baik terhadap berbagai macam pengisi.

Kelemahan resin epoksi adalah biaya yang relative mahal dan proses pengeringan yang relatif lama.

FRP direkatkan pada permukaan elemen struktur secara kimiawi dengan perekat. Perekatan secara kimiawi sangat praktis karena tidak menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan, lebih mudah dilaksanakan dibandingkan dengan perekat mekanis dan tidak menyebabkan kerusakan pada material dasar atau material kompositnya. Perekat yang paling cocok digunakan pada material komposit adalah perekat yang mempunyai bahan dasar *epoxy resin*. Perekat ini

dibuat dari campuran 2 komponen. Komponen utamanya adalah cairan organik yang diisikan kedalam kelompok *epoxy*. Permukaan yang akan dilekatkan harus dipersiapkan untuk mendapatkan lekatan yang efektif. Permukaan harus bersih dan kering, bebas dari oksida, oli, minyak dan debu. Bahan perekat yang digunakan dalam penelitian ini juga merupakan produk dari Fyfe Co dengan nama Tyfo S komponen A dan komponen B. Untuk proses pencampuran antara komponen A dan komponen B digunakan perbandingan 2:1. Adapun karakteristik material resin epoxy yang terlihat pada **Tabel 2**.

Tabel. 2 Karakteristik Material Resin Epoxy

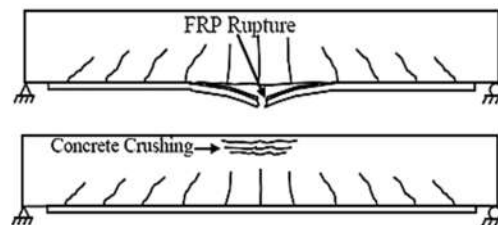
SIFAT MATERIAL EPOXY		
Waktu pengeringan : 72 Jam (Suhu ruang 60°C)		
SIFAT MATERIAL	METODE ASTM	NILAI TEST
Kekuatan Tarik	ASTM D-638	72.4 Mpa
Modulus Tarik		3.18 Gpa
Persen Regangan	ASTM D-638	5%
Kekuatan Lentur	ASTM D-790	123.4 Mpa
Modulus Lentur	ASTM D-790	3.12 Gpa

Sumber: *Fyfo.Co.LLC*

2.5 Model Kegagalan

Beberapa mode kegagalan yang sering terjadi pada balok yang diperkuat dengan FRP yaitu:

- Rusaknya FRP setelah tulangan tarik meleleh.
- Hancurnya beton sekunder setelah tulangan tarik meleleh.
- Inti beton rusak karena tekanan sebelum tulangan tarik meleleh.
- Lepasnya ikatan antara FRP dan beton (*debonding*).



Gambar 17 Putusnya FRP dan hancurnya beton pada sisi tekan

Gambar 17 secara berurutan menunjukkan mode kegagalan berupa putusnya lapisan FRP yang terjadi setelah melelehnya tulangan dan hancurnya beton pada sisi tekan. Hancurnya beton pada sisi tekan terjadi sebelum tulangan tarik meleleh sehingga kondisi ini identik dengan kondisi *over-reinforced*.