

**PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG YANG
DIPERKUAT DENGAN VARIASI JARAK ANGKUR PADA
SAMBUNGAN**

*(Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Variation of
Anchor Spacing at the Concrete Joint)*

**MUHAMMAD ALI
D012221011**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT DENGAN VARIASI JARAK ANGKUR PADA SAMBUNGAN

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister Program
Studi Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

ttd

**MUHAMMAD ALI
D012221011**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS

PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT DENGAN VARIASI JARAK ANGKUR PADA SAMBUNGAN

MUHAMMAD ALI
D012221011

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 21 November 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng
NIP. 197011081994121001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ir. Rita Irmawaty, ST., MT
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 : Muhammad Ali
Nomor mahasiswa : D012221011
Program studi : Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Perilaku Lentur Perkuatan Balok Beton Bertulang dengan Variasi Jarak Angkur pada Sambungan” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST., MT sebagai Pembimbing Pendamping. 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 Jurnal Internasional (Key Engineering Materials, 10 halaman, <https://www.scientific.net/KEM>) sebagai artikel dengan judul Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Variation of Anchor Spacing at The Concrete joint)

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

Gowa, 21 November 2023
Yang menyatakan


Muhammad Ali

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmatnya sehingga tesis ini dapat diselesaikan.

Gagasan utama penelitian ini diharapkan bisa membantu proses perbaikan dan pemanfaatan kembali balok beton bertulang yang mengalami penurunan kapasitas, sehingga dengan perbaikan dan perkuatan tersebut dapat membantu mengurangi limbah konstruksi yang berasal dari bongkaran balok beton bertulang.

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan tesis, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka tesis ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng. sebagai pembimbing-1, dan Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST., MT sebagai pembimbing-2.
2. Prof. Dr. Ing. Herman Parung sebagai penguji-1, Dr. Eng. Muh. Akbar Caronge., ST., M.Eng sebagai penguji-2, dan Dr. Eng. Fakhruddin., ST., M.Eng sebagai penguji-3.
3. Rektor universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
4. Kepada kepala laboratorium riset dan perkuatan yang telah memberikan dukungan mengizinkan kami untuk melaksanakan penelitian di laboratorium.
5. Kepada kedua orang tua tercinta saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada kakak/adik atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.
6. Akhirnya, ucapan terima kasih kepada seluruh teman, kerabat, dan adik-adik yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Penulis
Muhammad Ali

ABSTRAK

MUHAMMAD ALI, *Perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan variasi jarak angkur pada sambungan* (dibimbing oleh **Rudy Djamaluddin, Rita Irmawaty**)

Beton menjadi pilihan utama komponen struktur, karena mudah didapat serta harga yang relatif murah dengan biaya pembuatan dan perawatan yang terjangkau. Tesis ini menyajikan studi eksperimental tentang perilaku lentur balok RC yang telah mengalami spalling akibat korosi, yang diperbaiki dengan cara mengganti beton yang mengalami spalling dengan menggunakan mortar yang di-grouting dan diperkuat dengan lembaran *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP). Keberhasilan perbaikan dengan grouting dan GFRP sangat dipengaruhi oleh ikatan antara beton eksisting dengan beton baru, sehingga tidak terjadi delaminasi pada balok RC saat memikul beban maksimum. Metode yang diusulkan untuk meningkatkan ikatan antara beton eksisting dengan beton baru adalah dengan menambahkan konektor atau angkur *dyna-bolt* pada daerah sambungan. Delapan buah balok RC dengan penampang 150 mm x 200 mm dan panjang 3300 mm disiapkan, yang terdiri dari dua buah balok eksisting (BE), dua buah balok dengan grouting dan lembaran GFRP (BGS), dua buah balok dengan grouting dan lembaran GFRP serta penambahan 4 buah angkur (BGS-DN4), dan yang terakhir dua buah balok dengan grouting dan lembaran GFRP serta penambahan 8 buah angkur (BGS-DN8). Area perbaikan memiliki panjang 2700 mm dan tebal 50 mm. Pengujian lentur dengan empat titik beban dilakukan untuk semua spesimen. Ditemukan bahwa balok RC yang diperbaiki dengan *mortar grouting* dan lembaran GFRP dengan penambahan 4 angkur *dyna-bolt* pada daerah sambungan (BGS-DN4), mampu meningkatkan beban maksimum sebesar 61% terhadap BE, meningkatkan ikatan antara beton eksisting dengan material perbaikan, serta mencegah delaminasi.

Kata kunci: *dynabolt* angkur, RC beam, GFRP, *strengthening*

ABSTRACT

MUHAMMAD ALI, *Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Variation of Anchor Spacing at The Concrete Joint* (Supervised by **Rudy Djamaluddin, Rita Irmawaty**)

Concrete is the main choice for structural components, due to its easy availability and relatively low price with affordable manufacturing and maintenance costs. This thesis presents an experimental study on the flexural behavior of RC beams that have experienced spalling due to corrosion, which are repaired by replacing the spalling concrete using grouted mortar and reinforced with *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) sheets. The success of the grouting and GFRP repair is greatly influenced by the bond between the existing concrete and the new concrete, so that no delamination occurs in the RC beams when carrying the maximum load. The proposed method to improve the bond between the existing concrete and the new concrete is to add dyna-bolt connectors or anchors at the joint area. Eight RC beams with a cross section of 150 mm x 200 mm and a length of 3300 mm were prepared, consisting of two existing beams (BE), two beams with grouting and GFRP sheets (BGS), two beams with grouting and GFRP sheets and the addition of 4 anchors (BGS-DN4), and finally two beams with grouting and GFRP sheets and the addition of 8 anchors (BGS-DN8). The repair area is 2700mm long and 50 mm thick. Flexural testing with four points loads was conducted for all specimens. It was found that RC beams repaired with mortar grouting and GFRP sheets with the addition of 4 dyna-bolt anchors in the connection area (BGS-DN4), were able to increase the maximum load by 61% to BE, improve the bond between the existing concrete and the repair material, as well as prevent delamination.

Keywords: dyna-bolt anchor, RC beam, GFRP, strengthening

DAFTAR ISI

	<u>Halaman</u>
KATA PENGANTAR.....	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah.....	8
1.3 Tujuan Penelitian.....	8
1.4 Batasan Masalah.....	9
1.5 Manfaat Penelitian.....	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1 Beton Bertulang.....	11
2.1.1 Tinjauan umum.....	11
2.1.2 Retak pada balok	17
2.1.3 Beton Komposit.....	18
2.1.4 Momen Inersia Penampang Retak.....	20
2.2 <i>Spalling</i> pada Beton Bertulang.....	20
2.3 Angkur	23
2.3.1 Sistem pengankuran.....	23
2.3.2 Perilaku kegagalan angkur akibat beban tarik	25
2.3.3 Kegagalan angkur tercabut (pull-out failure)	26
2.3.4 Angkur patah akibat gaya tarik (steel rupture)	27
2.4 <i>Grouting</i> pada Beton Bertulang.....	29
2.5 Fiber Reinforced Polymer	30
2.5.1 Glass Fiber Reinforced Polimer (GFRP).....	30
2.5.2 Model Kegagalan.....	32
2.6 Standar Pedoman Perencanaan.....	33
2.6.1 Kapasitas Balok Beton Bertulang.....	34

2.7 Lendutan Pada Beton.....	35
2.8 Kerangka Pikir	37
BAB III METODE PENELITIAN	38
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	38
3.2 Rancangan Penelitian	38
3.2.1 Pengujian property material.....	40
3.2.2 Pengujian Laboratorium	41
3.2.3 Perhitungan Analitis	41
3.3 Pengujian Properti Material.....	41
3.3.1 Uji kuat Tarik Baja	41
3.3.2 Uji Bahan Beton	43
3.3.3 Uji dan Pemasangan Angkur/ <i>Dyna-bolt</i>	45
3.3.4 Uji dan Perbaikan dengan Grouting	46
3.3.5 Pemasangan GFRP	47
3.3.6 Kuat Lentur Beton	47
3.4 Desain Penelitian	49
3.5 Alat dan Bahan Penelitian	53
3.5.1 Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah:.....	53
3.5.2 Metode pelaksanaan pengujian:.....	56
3.6 Analisis Data.....	57
3.6.1 Hubungan beban dan lendutan	57
3.6.2 Distribusi Regangan	57
3.6.3 Pola Retak.....	58
3.6.4 Analisis moda keruntuhan	58
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	59
4.1. Hasil Pengujian Sifat-Sifat Bahan	59
4.1.1 Karakteristik Tulangan Baja.....	59
4.1.2 Karakteristik Beton.....	60
4.1.3 Karakteristik Mortar Grouting.....	62
4.2. Hasil Analisa Balok Beton Bertulang.....	63
4.2.1 Kapasitas Beban dan Momen	63
4.2.2 Hubungan Beban dan Lendutan	67
4.2.3 Hubungan Beban dan Regangan Beton	75
4.2.4 Hubungan Beban dan Regangan Baja	80

4.2.5 Pola Retak dan Mode Keruntuhan.....	82
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	90
5.1 Kesimpulan.....	90
5.2 Saran	90
DAFTAR PUSTAKA.....	92

DAFTAR TABEL

Nomor	<u>Halaman</u>
Tabel 1 Sifat mekanis baja tulangan beton.....	11
Tabel 2 Spesifikasi dynabolt	25
Tabel 3 Spesifikasi GFRP <i>type MapeWrap G</i> dalam bentuk <i>dry sheet</i>	32
Tabel 4 Spesifikasi GFRP <i>type MapeWrap 31 SP</i> dalam bentuk <i>dry sheet</i>	32
Tabel 5 Hasil pengujian karakteristik baja tulangan	42
Tabel 6 Hasil pengujian karakteristik beton.....	43
Tabel 7 Hasil perhitungan kebutuhan dynabolt.....	45
Tabel 8 Hasil pengujian karakteristik grouting	46
Tabel 9 Variasi balok uji	49
Tabel 10 Rekap hasil analisis beban.....	57
Tabel 11 Rekap hasil analisis regangan.....	57
Tabel 12 Hasil pengujian tarik tulangan baja	59
Tabel 13 Data kuat tekan beton.....	61
Tabel 14 Data kuat tarik belah beton.....	61
Tabel 15 Hasil pengujian kuat tekan mortar grouting	62
Tabel 16 Perbandingan estimasi perhitungan analisa teoritis dengan hasil pengujian balok	64

DAFTAR GAMBAR

Nomor	<u>Halaman</u>
Gambar 1 Balok beton bertulang.....	1
Gambar 2 Proses terjadinya asam karbonat: (a) besi tulangan (b) beton (c) resapan air atau H ₂ O (d) karbon dioksida CO ₂	2
Gambar 3 Beton bertulang mengalami spalling	3
Gambar 4 Beton bertulang mengalami spalling	5
Gambar 5 Kegagalan lekatan beton lama dengan Grouting (a) Beton (b) Tulangan (c) Grouting (d) GFRP	6
Gambar 6 (a) Grouting (b) Angkur/dyna-bolt (c) GFRP.....	8
Gambar 7 Distribusi regangan penampang balok ultimit	14
Gambar 8 Perlaku lentur pada beban sebelum retak	14
Gambar 9 Perilaku lentur beton setelah retak.....	15
Gambar 10 Perilaku lentur pada beban ultimit.....	16
Gambar 11 Balok tegangan ekuivalen.....	17
Gambar 12 Jenis retakan pada beton	19
Gambar 13 Arah gaya geser pada balok beton	20
Gambar 14 Tahapan terjadinya retak dan spalling pada beton, (a)serangan klorida pada alkalinitas beton, (b) retak awal di sekeliling baja tulangan, (c)pertambahan panjang retak disekeliling baja tulangan, (d) spalling pada selimut beton	23
Gambar 15 Tahapan terjadinya spalling akibat korosi: (a) kondisi awal (b) tulangan mulai terkorosif (c) korosi membesar pada pertemuan beton dan tulangan (d) retak muncul pada selimut beton.....	24
Gambar 16 Angkur atau dynabolt	24
Gambar 17 Model kegagalan angkur akibat beban geser (a) kegagalan didahului spalling beton (b) beton terjungkit untuk angkur yang jauh dari ujung bebas.....	25
Gambar 18 Penghubung type geser stud	25
Gambar 19 Perilaku kegagalan angkur dalam pembebanan tarik (a) kegagalan pull-out danpull-through; (b) kegagalan concrete breakout; (c) kegagalan splitting; (d) kegagalan komponen baja angkur (Eligehausen, et al. ((2006)).	27
Gambar 20 Kegagalan pull-out angkur terhadap beton.....	28
Gambar 21 Kegagalan fraktur angkur terhadap tarik	29
Gambar 22 Kegagalan concrete cone breakout	29
Gambar 23 Perbaikan dan finishing dengan material Grouting	31
Gambar 24 Lembaran <i>glass fiber reinforced polimer</i>	32
Gambar 25 Putusnya FRP dan hancurnya beton pada sisi tekan.....	34
Gambar 26 Regangan untuk metode ACI 440-2R-08	35
Gambar 27 Hubungan beban-defleksi pada balok (E.G.Nawy: 1990)	36
Gambar 28 Kerangka pikir peneliti	38
Gambar 29 Perbaikan beton bertulang: (a) BjTS (b) BjTP (c) Beton (d) Angkur/Dynabolt (e) Grouting (f) GFRP.....	39
Gambar 30 Bagan alir penelitian	40
Gambar 31 Pengujian kuat tarik baja tulangan.....	41

Gambar 32 Pengujian kuat tekan beton.....	41
Gambar 33 Alat ukur regangan baja.....	43
Gambar 34 Ilustrasi pengukuran slump test	45
Gambar 35 Jenis hasil uji slump beton.....	45
Gambar 36 Pemasangan angkur atau <i>dynabolt</i> : (a) pengeboran lubang angkur (b) Mengisap debu beton dengan Vakum (c) Memasang angkur (d) Mengencangkan angkur.....	47
Gambar 37 Pembuatan pasta grouting: (a) kemasan grouting perzak 25kg	48
Gambar 38 Flowchart pemasangan GFRP	48
Gambar 39 Posisi <i>setup</i> benda uji pada <i>frame</i> uji: (a) <i>Loading frame</i> (b) <i>Load cell</i> (c) Balok uji (d) LVDT	50
Gambar 40 Detail benda uji – BK (balok kontrol)	50
Gambar 41 Detail benda uji – BE (balok existing)	50
Gambar 42 Detail benda uji – BGS (balok grouting diperkuat GFRP).....	51
Gambar 43 Detail benda uji – BGS-DN4 (Variasi jarak angkur 60 cm).....	51
Gambar 44 Detail benda uji – BGS-DN8 (Variasi jarang angkur 33 cm).....	52
Gambar 45 Titik pemasangan strain gauges beton.....	52
Gambar 46 Titik pemasangan strain gauges baja	53
Gambar 47 Titik pemasangan strain gauges GFRP	53
Gambar 48 Strain gauge	54
Gambar 49 Perekat yang digunakan dalam penelitian	54
Gambar 50 LVDT (Linear Variabel Displacement Transducer).....	54
Gambar 51 Data logger TDS-530.....	55
Gambar 52 Tahapan pengujian kuat lentur: (a) Pengecekan kondisi alat dan perlengkapan (b) Set-up balok uji pada loading frame (c) Pemasangan Strain Gauge (d) Proses pembebanan balok uji	56
Gambar 53 Distribusi regangan.....	57
Gambar 54 Pola retak	58
Gambar 55 Pengujian kuat tarik baja (a) baja tulangan di set-up pada alat (b) baja tulangan yang telah diuji	60
Gambar 56 Pengujian slump test.....	60
Gambar 57 Pengujian karakteristik beton, (a) kuat tarik belah beton (b) kuat tarikan beton.....	61
Gambar 58 Pengecoran balok uji dengan mortar grouting.....	62
Gambar 59 Uji kuat tekan mortar grouting	60
Gambar 60 Diagram batang beban benda uji	65
Gambar 61 Hubungan beban lendutan balok kontrol (BK).....	67
Gambar 62 Hubungan beban lendutan balok existing (BE).....	69
Gambar 63 Hubungan beban balok Normal (BK) dengan balok Existing (BE)	70
Gambar 64 Hubungan beban lendutan balok grouting (BGS)	71
Gambar 65 Hubungan beban lendutan balok grouting (BGS-DN4)	72
Gambar 66 Hubungan beban lendutan balok grouting (BGS-DN8)	73
Gambar 67 Hubungan beban lendutan semua balok uji	74
Gambar 68 Perbandingan kapasitas beban BE, BGS, BGS-DN4, BGS-DN8 ...	75
Gambar 69 Hubungan Beban-Regangan Beton BK.....	76

Gambar 70 Hubungan Beban-Regangan Beton BE	76
Gambar 71 Hubungan Beban-Regangan Beton BGS.....	76
Gambar 72 Hubungan Beban-Regangan Beton BGS-DN4.....	77
Gambar 73 Hubungan Beban-Regangan Beton BGS-DN8.....	77
Gambar 74 Hubungan beban-regangan beton semua balok uji.....	78
Gambar 75 Diagram Regangan Benda Uji BK	78
Gambar 76 Diagram Regangan Benda Uji BE.....	79
Gambar 77 Diagram Regangan Benda Uji BGS	79
Gambar 78 Diagram Regangan Benda Uji BGS-DN4	79
Gambar 79 Diagram Regangan Benda Uji BGS-DN8	<u>80</u>
Gambar 80 Hubungan Beban-Regangan Baja BE.....	80
Gambar 81 Hubungan Beban-Regangan Baja BGS	81
Gambar 82 Hubungan Beban-Regangan Baja BGS-DN4.....	81
Gambar 83 Hubungan Beban Regangan Baja BGS-DN8	81
Gambar 84 Pola Retak Balok Normal (BK).....	82
Gambar 85 Retak Awal Balok BK	83
Gambar 86 Kehancuran Sisi Tekan Pada Balok BK	83
Gambar 87 Pola Retak Pada Balok Existing (BE)	84
Gambar 88 Retak Awal Balok Be	84
Gambar 89 Kehancuran Sisi Tarik Pada Balok BE.....	84
Gambar 90 Pola Retak Pada Balok Grouting	85
Gambar 91 Retak Awal Balok Grouting	85
Gambar 92 Kehancuran Sisi Tarik Pada Balok Grouting.....	86
Gambar 93 Pola Retak Pada Balok BGS-DN4.....	<u>86</u>
Gambar 94 Retak Awal Pada Balok BGS-DN4	87
Gambar 95 Kehancuran Sisi Tarik Pada Balok BGS-DN4	87
Gambar 96 Pola Retak Pada Balok BGS-DN8.....	88
Gambar 97 Retak Awal Pada Balok BGS-DN8	88
Gambar 98 Kehancuran Sisi Tarik Pada Balok BGS-DN8	89

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Dalam kemajuan teknologi konstruksi serta perkembangan pembangunan yang pesat saat ini baik didunia maupun di Negara Indonesia pada khususnya, penggunaan beton sebagai komponen struktur baik untuk pembangunan gedung, jalan dan jembatan masih menjadi pilihan utama dikarenakan beton memiliki nilai ekonomis dalam pembuatan dan perawatannya, serta sifat utama beton adalah sangat kuat menahan beban tekan (kuat tekan tinggi) tetapi lemah di dalam menahan gaya tarik (Pratikto, 2009). Karena beton lemah didalam menahan gaya tarik sehingga sangat diperlukan penambahan baja tulangan di dalam beton yang berfungsi menahan gaya tarik yang bekerja pada balok beton bertulang.



Gambar 1 Balok beton bertulang

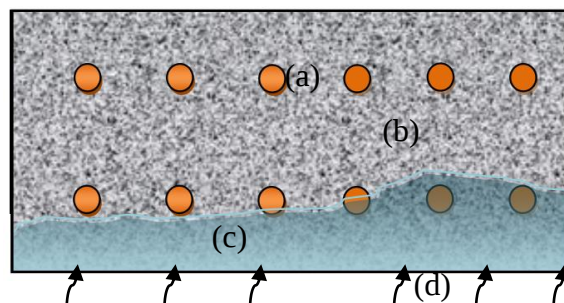
Penggunaan beton bertulang sebagai komponen struktur tentu saja berdampak pada peningkatan limbah struktur atau limbah konstruksi. Sampai saat ini Undang-Undang yang mengatur mengenai pengelolaan lingkungan hidup tertuang dalam UUD No. 32 Tahun 2009 dan UUD 18 Tahun 2008, tentang pengelolaan sampah secara umum, beserta standar Internasional ISO 14001 tentang sistem manajemen lingkungan bagi setiap perusahaan yang menerapkan standar tersebut.

Limbah struktur atau limbah konstruksi salah satunya dihasilkan dari bongkaran komponen struktur balok beton bertulang, dimana sesuai dengan umur rencana balok beton bertulang akan mengalami penurunan kekuatan bahkan

mengalami kerusakan akibat perubahan fungsi struktur atau perubahan beban pelaksanaan yang tidak sesuai dengan rencana desain awal. Selain itu Negara Indonesia merupakan salah satu Negara kepulauan terbesar didunia yang mana luas wilayah Indonesia 70% lautan dan 30% daratan sehingga serangan lingkungan terhadap struktur dan infrastruktur khususnya pada daerah-daerah pesisir pantai sangat berpotensi sebagai faktor utama penyebab kerusakan pada struktur balok beton bertulang.

Serangan faktor lingkungan dapat menyebabkan kerusakan pada baja tulangan atau terkorosi, yang terdapat pada struktur balok beton bertulang. 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. Korosi pada baja tulangan mengakibatkan berkurangnya penampang inti dari baja tulangan, sehingga beton mengalami keretakan atau terkelupas akibat desakan yang terjadi di sekeliling baja tulangan balok beton bertulang. Beton dengan kondisi terkelupas atau *spalling* merupakan kondisi dimana struktur beton bertulang mengalami penurunan kapasitas layan akibat terjadinya gempa bumi, kebakaran serta kerusakan baja tulangan akibat korosi pada baja tulangan.

Korosi pada baja tulangan merupakan reaksi yang terjadi antara karbon dioksida (CO_2) dibarengi dengan paparan air (H_2O) secara bergantian sehingga membentuk asam karbonat $Ca(OH)_2 + CO_2$, yang mengakibatkan terjadinya karbonasi pada selimut beton hingga *spalling*.



Gambar 2 Proses terjadinya asam karbonat: (a) besi tulangan (b) beton (c) resapan air atau H_2O (d) karbon dioksida CO_2

Proses inisiasi korosi pada beton bertulang akibat infiltrasi klorida dimulai Ketika klorida masuk ke dalam beton dan merusak lapisan pasif tulangan (Kolio et al., 2015). Kerusakan pada lapisan pasif terjadi akibat klorida yang ada pada

interface antara beton dan tulangan telah melebihi besarnya *critical chloride content (CCC)*. *CCC* adalah batas konsentrasi yang dibutuhkan untuk merusak lapisan pasif pada baja tulangan.



Gambar 3 Beton bertulang mengalami spalling

Spalling pada penutup beton merupakan fenomena kompleks yang mempengaruhi tidak hanya keadaan batas ultimit dari komponen struktur beton, tetapi juga respon layanan dan daya tahannya (Moccia, 2021). Di antara beberapa faktor penyebab terjadinya *Spalling* adalah terjadinya korosi, yang mempengaruhi komponen-komponen struktur beton bertulang dimana umur layan struktur menurun disertai kinerja struktural (Qiao et al., 2015).

Penelitian Zhang et al., (2021) menunjukkan bahwa *Spalling* penutup beton akibat korosi diawali dengan retak miring yang berakar dari tulangan baja yang terkorosi dan merambat secara diagonal ke permukaan, diikuti dengan retak tegak lurus yang merambat dari permukaan ke tulangan baja yang terkorosi. Retak *Spalling* menyebar dengan meningkatnya kehilangan korosi.

Jika dibiarkan maka *spalling* akan cenderung semakin cepat dan menyebar sehingga pada akhirnya struktur bisa menjadi tidak stabil (Zhu & François, 2014). Jika struktur dibiarkan memburuk maka nilai aset akan berkurang dan, lebih jauh lagi, biaya perawatan akan cenderung meningkat karena korosi dan *spalling* menjadi lebih luas (Zandi, 2015). Dengan kata lain komponen struktur yang telah mengalami kerusakan atau *Spalling* tentu saja kapasitas beban pikul juga berkurang dari yang direncanakan sehingga memicu terjadinya kerugian yang cukup besar baik terhadap lingkungan maupun terhadap masyarakat sekitar serta dampak terburuknya ialah dapat menyebabkan korban jiwa. Untuk daerah yang

rawan gempa kondisi *Spalling* pada bangunan merupakan ancaman besar yang bisa menimbulkan korban jiwa yang lebih banyak serta kerusakan konstruksi yang akan lebih banyak menimbulkan biaya kerugian (Jung et al.,2019).

Metode perbaikan yang umum digunakan adalah dengan melakukan penambalan kembali beton yang lepas menggunakan campuran beton sesuai dengan mutu beton yang direncanakan. Seiring perkembangan kemajuan teknologi bahan dimana telah dikembangkan suatu bahan pengganti beton dengan pengaplikasian yang mudah dan cepat, penggunaan semen *grout* sebagai metode perbaikan memberikan kemudahan serta bernilai ekonomis dalam pengaplikasiannya, selain itu bahan berupa semen *grout* memiliki daya susut yang rendah serta mutu yang tinggi sehingga diharapkan dapat menggantikan beton yang mengalami kerusakan. Semen *grout* memiliki karakteristik yang encer sehingga dapat dengan mudah mengisi bagian-bagian kecil yang mengalami kerusakan.

Fungsi utama dari penggunaan dari semen *grout* ialah untuk mengembalikan bentuk dan memperbaiki komponen struktur beton yang telah mengalami kerusakan setelah dilakukan perbaikan, serta mengembalikan mutu kuat tekan beton yang telah dilakukan perbaikan minimal sama dengan mutu kuat beton sebelum terjadi kerusakan.

Grouting dianggap metode yang paling mudah dan paling murah untuk dilaksanakan, selain itu bahan grouting berupa semen *grout* memiliki daya susut yang rendah serta mutu yang tinggi sehingga diharapkan dapat menggantikan beton yang mengalami *spalling*. Korosi pada balok yang dilakukan perbaikan dengan cara *grouting* akan memiliki efek yang berbeda pada perilaku retak, kurva defleksi beban, dan mode kegagalan balok (Wang et al., 2014).

Penelitian Minh et al., (2007) *grouting* yang tepat dapat melindungi tendon prategang dari korosi meskipun retakan lebih lebar akibat korosi yang terselubung. Beton yang telah terkelupas harus diperbaiki tidak hanya dengan memperbaiki tetapi dengan mengidentifikasi dan memperbaiki akar penyebabnya untuk memastikan bahwa struktur tidak berbahaya bagi pengguna (Luckai, 2011).

Struktur beton bertulang yang telah diperbaiki menggunakan semen *grout* tidak dapat mengembalikan kapasitas tarik dari balok beton bertulang, akibat baja

tulangan yang telah mengalami penyusutan atau terkorosi, sehingga untuk mengembalikan kapasitas tarik dari balok beton bertulang diperlukan metode perkuatan yang dapat meningkatkan kapasitas tariknya. Metode perkuatan struktur balok beton bertulang yang menggunakan teknologi modern pada bidang konstruksi ialah penggunaan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) sebagai material perkuatan, penambahan satu lapis *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) sebagai bahan untuk perkuatan balok dapat meningkatkan kekuatan balok (Yusfar *et al.*, 2019).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan lembaran FRP untuk memperkuat balok beton berkarat adalah teknik yang efisien yang dapat menjaga integritas struktural dan meningkatkan perilaku balok tersebut (Pantelides *et al.*, 2008). Lembar GFRP diterapkan secara eksternal dengan mengikatnya pada permukaan beton untuk diterapkan agar memperkuat struktur yang terus memburuk (Djamaluddin *et al.*, 2019).

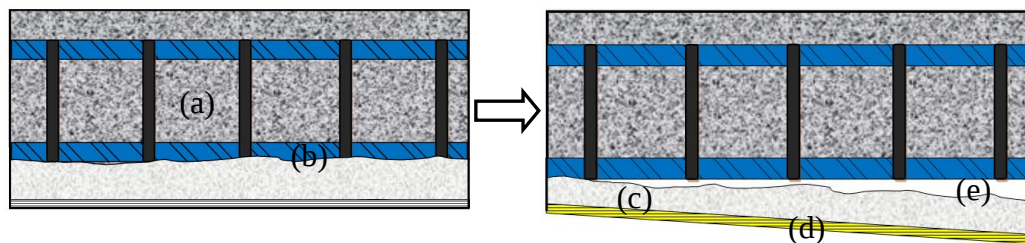


Gambar 4 Beton bertulang mengalami spalling

Dalam proses perbaikan komponen struktur beton bertulang khususnya pada struktur balok beton bertulang keberhasilan sangat ditunjang dari bahan yang digunakan serta metode yang diterapkan dalam perbaikan, karena bahan ataupun material dengan teknologi yang tinggi jika tidak ditopang dengan metode kerja yang tepat tentunya tidak dapat bekerja atau berkontribusi secara maksimal, sebagaimana kita ketahui dalam pengaplikasian bahan semen *grout* sebagai bahan perbaikan beton dan GFRP sebagai material perkuatan masih terdapat kendala pada lekatan antara beton eksisting dengan beton baru atau *grouting*, sehingga mengakibatkan terjadinya *debonding* ataupun *delaminasi* pada daerah penghubung antara beton eksisting dengan beton baru.

Penggunaan bahan GFRP sebagai bahan perkuatan sangat ditunjang oleh lekatan antara beton lama dengan beton baru atau *grouting*, dimana perbaikan dengan semen *grout* berpengaruh terhadap mode kegagalan balok, balok dengan perkuatan semen *grout* mengalami kegagalan *debonding*, sedangkan balok kontrol mengalami kegagalan lentur (Sugira Saidet *al.*, 2022).

Untuk itu sangat diperlukan metode pengaplikasian yang baik saat proses perbaikan elemen struktur balok beton bertulang. Metode yang sudah lazim dan sering digunakan untuk meningkatkan lekatan antara beton lama dengan beton baru dengan lem beton atau *bonding agent*. Akan tetapi penggunaan *bonding agent* pada *interface* atau pertemuan beton lama dan beton baru juga tidak signifikan terhadap peningkatan lekatan pada beton tersebut, dimana berdasarkan hasil pengujian kuat lentur balok beton yang tidak menggunakan bahan perekat atau *bonding agent* pada sambungan dan balok normal tanpa sambungan lebih kuat daripada balok beton yang menggunakan *bonding agent* pada sambungan (Seska Nicolaas *et al.*, 2021).



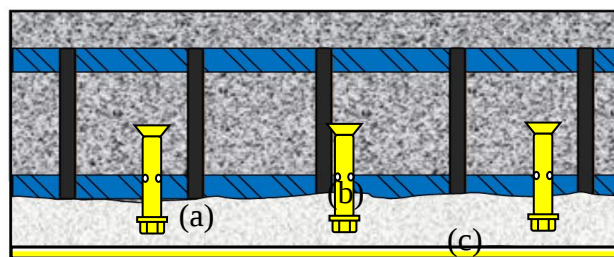
Gambar 5 Kegagalan lekatan beton lama dengan Grouting (a) Beton (b) Tulangan (c) Grouting (d) GFRP

Interface atau pertemuan beton lama dan beton baru merupakan bagian terlemah dalam struktur yang menyebabkan permasalahan pada lekatan antara beton lama dan beton baru. Adhesi *interface* antara dua lapis beton dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti ; a) kebersihan permukaan beton dari zat-zat kontaminan yang dapat menyebabkan licinnya permukaan beton dan terganggunya lekatan pada *interface*, b) kekasaran yang sangat ditentukan perlakuan terhadap permukaan beton, c) komposisi beton segar untuk material *overlay/concrete topping*, d) teknik pengecoran dan pemadatan *overlay/concrete topping*, dan e) perawatan beton.

Berdasarkan SNI 1729-2002 (2002) seluruh gaya geser horizontal pada bidang kontak beton dengan baja harus disalurkan menggunakan penghubung

geser. Penggunaan angkur atau *Dynabolt* dapat memaksimalkan kemampuan *Cold Form Steel* (CFS) untuk menahan gaya lentur (I Puluhulawa et. Al.2019). Angkur epoksi yang digunakan sebagai perkuatan eksternal balok beton bertulang memberikan efek kekangan yang lebih besar dibandingkan balok beton bertulang yang dibungkus *U-wrap* secara konvensional.

Angkur *bolt* jenis ini ditanam dalam struktur beton lama dengan melakukan pengeboran. Selongsong akan merekah saat mur diputar dan menekan selongsong hingga baut jadi tertanam kuat didalam beton. Kemudian baut yang muncul dipermukaan beton di tutup dengan beton baru, sehingga angkur *bolt* ini menjadi sambungan antara beton lama yang mengalami kerusakan dengan beton baru yaitu *grouting*. Terdapat dua jenis sistem pemasangan angkur yang beredar, antara lain sistem *cast in place* dan sistem *post installed*. Dimana masing-masing metode memberikan beberapa keunggulan. Sistem *cast in place* merupakan metode pemasangan angkur dipasang dan diposisikan sebelum dilakukan pengecoran / *grouting*, sehingga memberikan ikatan yang maksimum antara beton dengan angkur. Pada sistem pengankuran *post installed*, angkur dipasang dipasang pada beton ketika beton telah mengeras dengan cara melubangi permukaan beton menggunakan teknologi pengeboran, sehingga lebih efisien terhadap waktu, serta memberikan kemudahan saat pemasangan. Indryawan dan Apriyanto (2020) meneliti metode pemasangan angkur *cast-in place* dan *post installed*, untuk metode *cast-in place*, pemasangan angkur dilakukan ketika beton masih dalam fase setting, sedangkan untuk metode *post-installed*, pemasangan angkur dilakukan dengan cara pengeboran pada beton setelah beton berumur 28 hari. Pada metode *cast-in place* terdapat dua faktor yang mempengaruhi yaitu tegangan lekat beton dan faktor *interlocking* pada baut. Pada metode *post installed* hanya dipengaruhi oleh faktor *interlocking*.



Gambar 6 (a) Grouting (b) Angkur/dyna-bolt (c) GFRP

Oleh karenanya untuk meningkatkan interaksi atau lekatan antara beton lama dan beton baru, serta untuk meningkatkan kekuatan geser maka diperlukan penghubung atau *dyna bolt* seperti pada **Gambar 6**. Sehingga delaminasi pada area sambungan beton lama dan beton baru yang diperbaiki menggunakan semen *grout* dapat dihindari. Berdasarkan usulan alternatif metode perbaikan maka dapat diasumsikan bahwa dengan adanya konektor atau *dyna bolt* yang ditanam antara beton lama dengan beton baru atau *grouting* dapat meningkatkan kapasitas dari pada balok beton bertulang yang telah dilakukan perbaikan menggunakan *semen grout* dan diperkuat dengan dengan material GFRP. Sehingga kami tertarik untuk memberikan judul pada penelitian kami ini adalah **“Perilaku lentur balok beton bertulang diperkuat dengan variasi jarak angkur pada sambungan”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas maka dapat dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku lentur balok beton bertulang yang diperbaiki dengan material *grouting* dengan variasi jarak angkur dan diperkuat dengan lembar GFRP
2. Bagaimana pola retak dan mode keruntuhan beton bertulang yang diperbaiki menggunakan *grouting* dengan variasi jarak angkur atau *dynabolt* dan diperkuat dengan lembar GFRP

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka diperlukan adanya tujuan penelitian untuk menjawab rumusan masalah yang terjadi. Tujuan penelitian dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis perilaku lentur balok beton bertulang yang telah diperbaiki menggunakan *mortar grouting* yang diperkuat dengan lembar GFRP, dengan penambahan variasi jarak angkur pada sambungan beton existing dan *mortar grouting*.
2. Untuk mengevaluasi pola retak dan mode keruntuhan balok beton bertulang yang diperbaiki menggunakan *mortar grouting* yang

diperkuat dengan lembar GFRP, dengan penambahan variasi jarak angkur pada sambungan beton existing dan *mortar grouting*.

1.4 Batasan Masalah

Untuk mencapai tujuan penelitian dan menghindari pembahasan diluar dari konsep penelitian, maka pada penelitian ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Beton bertulang diasumsikan mengalami *spalling* akibat korosi pada baja tulangan
2. Bentuk penampang yang digunakan adalah persegi empat. dengan ukuran balok yang digunakan yaitu 150 mm x 200 mm x 3300 mm, dengan jarak tumpuan ke tumpuan 2700 mm.
3. Membuat 8 (delapan) buah benda uji balok beton bertulang, yang terdiri dari:
 - a. 2 (dua) buah balok beton bertulang dengan tulangan tarik 3D10 mm tanpa grouting (BE).
 - b. 2 (dua) buah balok beton bertulang dengan tulangan tarik 3D10 mm dengan grouting diperkuat GFRP (BGS).
 - c. 2 (dua) buah balok beton bertulang yang sama dengan point b kemudian dipasang *dyna-bolt* sebanyak 4 (empat) buah dengan interval jarak antar angkur atau *dyna-bolt* sebesar 60 cm pada posisi sambungan beton lama dengan grouting (BGS-DN4). Dan juga perkuatan GFRP pada dinding balok dekat tumpuan.
 - d. 2 (dua) buah balok beton bertulang yang sama dengan point b kemudian dipasang *dyna-bolt* sebanyak 8 (delapan) buah dengan interval jarak antar angkur atau *dyna-bolt* sebesar 33 cm pada posisi sambungan beton lama dengan grouting (BGS-DN8). Dan juga perkuatan GFRP pada dinding balok dekat tumpuan.
4. Beton yang digunakan berasal dari penyedia beton (ready mix) dengan mutu $f'_c = 25$ MPa.
5. Perkuatan menggunakan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) dari MAPEI.

6. Bahan *dyna-bolt* menggunakan model Hexagonal Head ukuran M10 dengan panjang anchor 10 cm.
7. Bahan untuk grouting menggunakan SIKA Grout 215 dengan kemasan 25 kg per zak.
8. Bahan untuk pengikat beton lama dengan SIKA Grout menggunakan SikaCim (bonding adhesive) dengan kemasan 900 ml per jerigen.
9. Elemen struktur yang dibahas adalah balok beton bertulang dengan perkuatan GFRP.
10. Perkuatan GFRP berupa perkuatan geser longitudinal pada sisi tarik balok.
11. Variabel yang akan diukur adalah perilaku lentur balok beton bertulang, perilaku lentur balok beton bertulang diperkuat GFRP serta penambahan angkur atau dina-bolt pada sambungan beton lama dengan grouting.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman karakteristik perilaku mekanik model perkuatan GFRP pada elemen balok beton bertulang.
2. Memberikan informasi kapasitas lentur balok beton bertulang kondisi eksisting, balok beton bertulang dengan menggunakan perkuatan GFRP serta penambahan variasi jarak dina-bolt pada sambungan beton lama dengan grouting.
3. Memberikan informasi pengaruh penambahan Dina-bolt pada sambungan beton lama dengan grouting terhadap perilaku lentur balok beton bertulang diperkuat dengan GFRP.
4. Memberikan informasi kepada masyarakat tentang kegunaan GFRP sebagai perkuatan pada struktur beton bertulang.
5. Memberikan informasi kepada masyarakat tentang kegunaan angkur atau *dyna-bolt* sebagai material pengaku pada struktur sambungan beton bertulang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton Bertulang

2.1.1 Tinjauan umum

Berdasarkan SNI-03-2847 pasal 3.13 (2019), 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 material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja. Adapun Sifat mekanis baja berdasarkan SNI 03-2052-2017 terdapat pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Sifat mekanis baja tulangan beton

Kelas baja tulangan	Uji Tarik			Uji lengkung		Rasio TS/YS (Hasil Uji)
	Kuat luluh/leleh (Y/S)	Kuat Tarik (TS)	Rengang dalam 200 mm, Min.	Sudut lengkung	Diameter pelengkung	
	Mpa	MPs	%		Mm	
BjTP 280	Min.280 Maks. 405	Min. 350	11 ($d \leq 10$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	Min. 1,25
			12 ($d \geq 12$ mm)	180°	5d ($d \geq 16$ mm)	
BjTS 280	Min.280 Maks. 405	Min. 350	11 ($d \leq 10$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	Min. 1,25
			12 ($d \geq 12$ mm)	180°	5d ($d \geq 19$ mm)	
BjTS 420A	Min.420 Maks. 545	Min. 525	9 ($d \leq 10$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	Min. 1,25
			8 ($22 \leq d \leq 25$)	180°	5d ($19 \leq d \leq 25$ mm)	
			7 ($d \leq 29$ mm)	180°	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)	
				90°	9 d ($d > 36$ mm)	
BjTS 420B	Min.420 Maks. 545	Min. 525	14 ($d \leq 19$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	Min. 1,25
			12 ($d \geq 36$ mm)	180°	5d ($16 \leq d \leq 25$ mm)	
			10 ($d \geq 36$ mm)	180°	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)	
				90°	9d ($d > 36$ mm)	
BjTS 520	Min.520 Maks. 645	Min. 650	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5d ($d \leq 25$ mm)	Min. 1,25
			6 ($d \geq 29$ mm)	180°	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)	
				90°	9d ($d > 36$ mm)	

Kelas baja tulangan	Uji Tarik			Uji lengkung		Rasio TS/YS (Hasil Uji)
	Kuat luluh/leleh (Y/S)	Kuat Tarik (TS)	Regang dalam 200 mm, Min.	Sudut lengkung	Diameter pelengkung	
	Mpa	MPs	%		Mm	
BjTS 550	Min.550 Maks. 675	Min. 687,5	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5d ($d \leq 25$ mm)	Min. 1,25
			6 ($d \geq 29$ mm)	180°	7d ($29 \leq d \leq 36$)	
				90°	9d ($d > 36$ mm)	
BjTS 700	Min.700 Maks. 825	Min. 805	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5d ($d \leq 25$ mm)	Min. 1,15
			6 ($d \geq 29$ mm)	180°	7d ($29 \leq d \leq 36$)	
				90°	9d ($d > 36$ mm)	

Kegagalan pada balok beton bertulang pada dasarnya dipengaruhi oleh melelehnya tulangan baja dan hancurnya beton bertulang. Ada 3 kemungkinan yang bisa terjadi yang menyebabkan kegagalan balok beton bertulang, yaitu:

a. Kondisi balanced reinforced

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

Kondisi regangan : $\epsilon_c = 0,003$ dan $\epsilon_s = f_y/E_s$

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

b. Kondisi Over-Reinforced

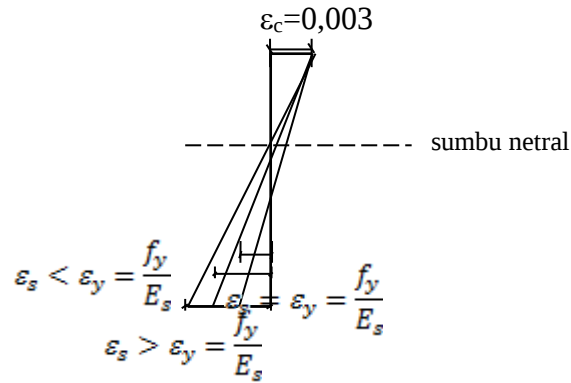
Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan dalam keadaan balanced. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya penampang beton terlebih dahulu sebelum tulangan baja meleleh. Pada kondisi ini berlaku: $\rho = \rho(\text{balanced})$ dan $\epsilon_s < \epsilon_y$

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.

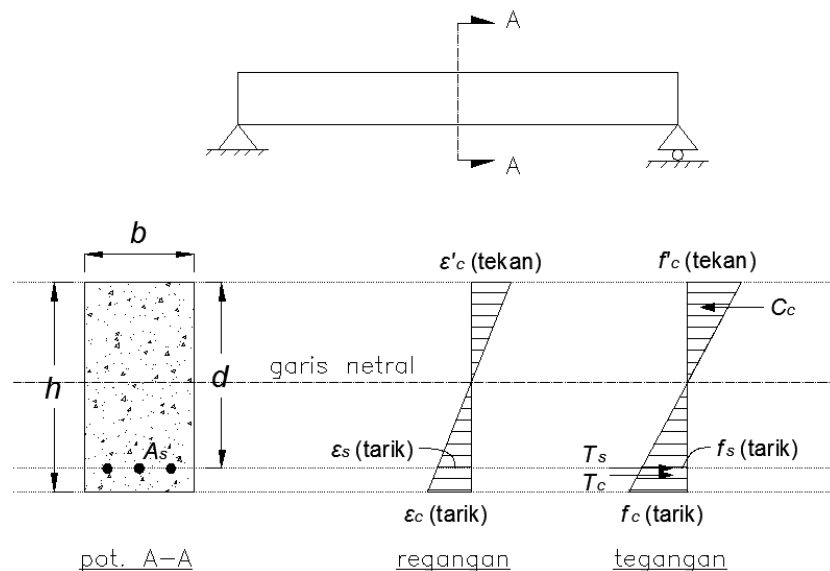
Pada kondisi ini berlaku: dan $\rho < 75\% \rho_{\text{balanced}}$ $\epsilon_s < \epsilon_y$

Dalam perencanaan elemen struktur, suatu elemen struktur harus direncanakan berada pada kondisi under-reinforced. Adapun gambar distribusi regangan dapat dilihat **pada Gambar 7.**



Gambar 7 Distribusi regangan penampang balok ultimit

Balok beton bertulang merupakan elemen struktur yang dominan menahan gaya lentur pada saat beban diberikan. Pada saat beban ditingkatkan maka nilai regangan dan defleksi balok akan semakin meningkat yang diiringi dengan timbulnya retak-retak lentur sepanjang bentang balok tersebut. Penambahan beban secara terus-menerus akan mengakibatkan kegagalan elemen struktural ketika beban eksternal telah melebihi kapasitas elemen balok tersebut.



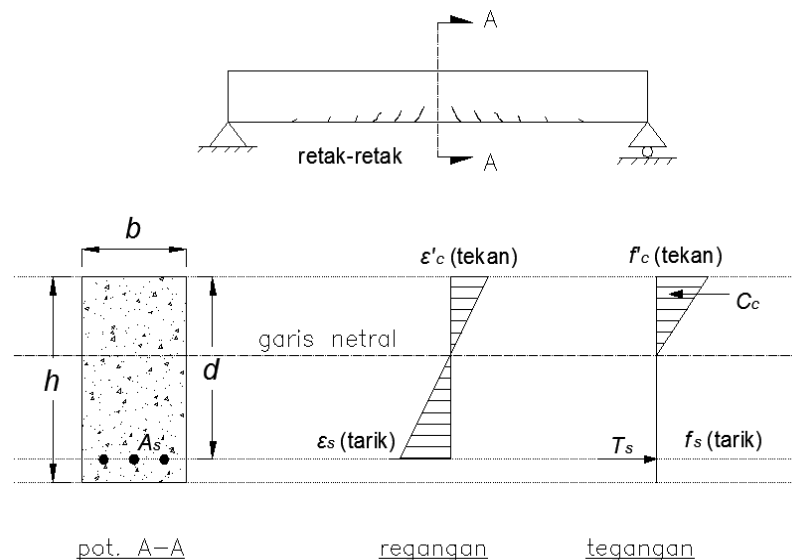
Gambar 8 Perilaku lentur pada beban sebelum retak

Untuk lebih memahami kondisi tegangan dan regangan beton pada saat dibebani maka akan diuraikan secara lebih terperinci mengenai hal tersebut. Nilai tegangan pada daerah tekan beton bersifat linear atau kira-kira sebanding dengan regangannya hanya sampai pada tingkat pembebanan tertentu pada kondisi $0.45 f'_c$. Pada tingkat pembebanan ini, apabila beban ditambah terus-menerus maka keadaan sebanding akan

lenyap dan diagram tegangan tekan pada penampang balok beton akan berbentuk seperti kurva tegangan-regangan beton.

Pada kondisi pembebanan sebelum terjadinya retak pada beton, beton dan baja tulangan secara bersama-sama bekerja dalam menahan gaya tarik yang bekerja sementara beton pada sisi tekan hanya menahan gaya tekan saja. Distribusi tegangan pada kondisi ini masih bersifat linear, bernilai nol pada garis netral dan sebanding dengan nilai regangan yang terjadi. Hal ini hanya dijumpai apabila tegangan maksimum yang timbul pada sisi tarik masih cukup rendah di mana nilainya masih berada di bawah nilai modulus keruntuhan (*rupture modulus*).

Pada kondisi pembebanan setelah retak di mana nilai pembebanan yang diberikan telah melebihi nilai pembebanan sebelum terjadinya retak pada beton, nilai kuat tarik beton telah dilampaui sehingga beton mulai mengalami retak rambut seperti tampak pada **Gambar 9**. Pada kondisi ini beton tidak dapat meneruskan gaya tarik melintasi daerah retak disebabkan karena kondisi lebar retak yang menyebabkan terputusnya aliran distribusi tegangan sepanjang sisi tarik beton.

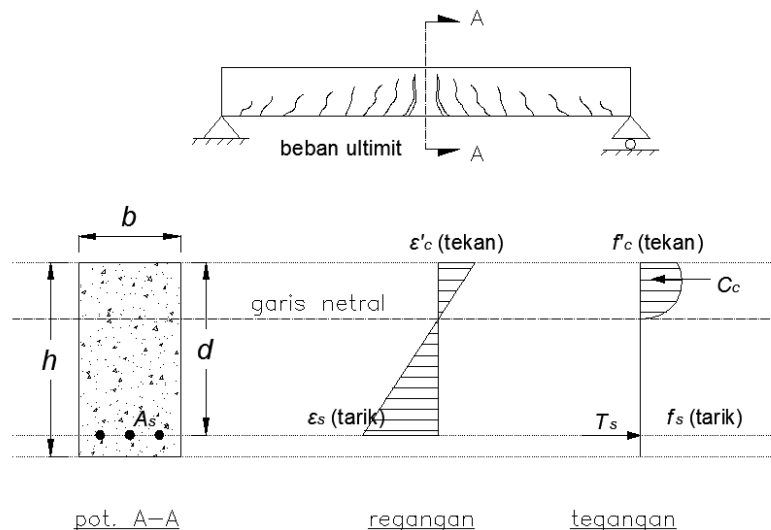


Gambar 9 Perilaku lentur beton setelah retak

Akibatnya maka distribusi tegangan tarik pada daerah beton yang retak akan terhenti dan kemudian selanjutnya diambil alih sepenuhnya oleh baja tulangan. Tulangan akan mulai meregang dan apabila nilai beban semakin ditingkatkan maka tulangan akan mencapai kondisi lelehnya.

Distribusi tegangan tarik pada tulangan ini terjadi hingga kondisi $0.5 f'_c$. Pada keadaan ini nilai tegangan beton tekan masih dianggap bernilai sebanding dengan nilai regangannya di mana model tegangan yang terjadi masih berbentuk blok segitiga seperti terlihat pada **Gambar 9**.

Apabila nilai beban diberikan lebih besar lagi maka nilai regangan serta tegangan tekan akan meningkat dan cenderung untuk tidak sebanding lagi antara keduanya, di mana tegangan tekan pada beton akan mulai membentuk kurva nonlinear.



Gambar 10 Perilaku lentur pada beban ultimit

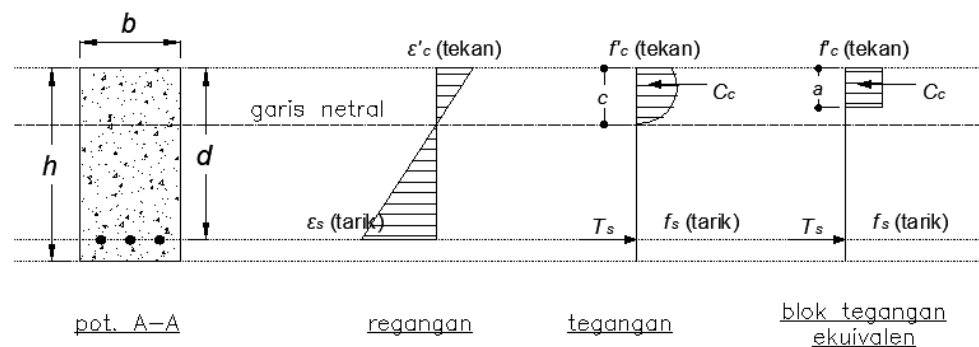
Kurva tegangan di atas garis netral penampang balok atau pada daerah tekan balok akan berbentuk sama dengan kurva tegangan-regangan beton seperti yang terlihat pada **Gambar 10**. Bentuk distribusi tegangan ini berupa garis lengkung dengan nilai nol pada garis netral.

Pada **Gambar 10** dapat dilihat model distribusi tegangan dan regangan yang timbul pada kondisi pembebanan mendekati pembebanan ultimit. Bentuk distribusi tegangan aktual yang melengkung ini tentunya menimbulkan kesulitan tersendiri dalam menghitung volume blok tegangan tekan.

Oleh karena itu, Whitney mengusulkan agar digunakan blok tegangan segiempat ekuivalen yang dapat digunakan untuk menghitung gaya tekan tanpa harus kehilangan ketelitiannya. Blok tegangan ekuivalen ini mempunyai tinggi a dan tegangan tekan rata-rata sebesar $0.85 f'_c$. Nilai

ini diperoleh berdasarkan hasil percobaan pada beton yang berumur lebih dari 28 hari.

Dengan menggunakan semua asumsi di atas maka perhitungan volume blok tegangan tekan dapat lebih mudah dilakukan dengan hanya menggunakan rumus volume balok sederhana. Bentuk blok tegangan ekuivalen ini dapat dilihat pada **Gambar 11**. Apabila kapasitas batas kekuatan beton pada daerah tekan telah terlampaui maka balok akan mengalami kehancuran. Sampai dengan tahap ini tampak bahwa tercapainya kapasitas ultimit merupakan proses yang tidak dapat berulang karena beton telah melewati kondisi elastisnya.



Gambar 11 Balok tegangan ekuivalen

Komponen struktur balok yang telah retak disertai dengan kondisi baja tulangan yang telah meleleh tentunya ditandai dengan nilai lendutan yang besar. Lendutan besar yang terjadi pada balok tidak akan kembali ke kondisinya yang semula dipengaruhi oleh kondisi baja tulangan yang telah meleleh. Berdasarkan penjelasan-penjelasan yang telah diuraikan sebelumnya maka dalam memperhitungkan kapasitas momen ultimit suatu komponen struktur, kuat tarik beton biasanya diabaikan (tidak diperhitungkan). Seluruh gaya tarik yang terjadi hanya dilimpahkan pada baja tulangan di daerah tarik.

Dengan demikian maka bentuk penampang beton pada daerah tarik tidaklah mempengaruhi kekuatan lentur. Tinggi penampang yang menentukan adalah tinggi efektif d , yaitu jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tarik. Nilai regangan beton tekan maksimum pada serat tekan terluar ditetapkan sebesar 0.003. Penetapan nilai tersebut

didasarkan atas hasil-hasil pengujian yang menunjukkan bahwa umumnya regangan beton hancur berada di antara nilai 0.003 dan 0.004.

2.1.2 Retak pada balok

Retak terjadi pada umumnya menunjukkan bahwa lebar celah retak sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada batang tulangan baja tarik dan beton pada ketebalan tertentu yang menyelimuti batang baja tersebut. Meskipun retak tidak dapat dicegah, namun ukurannya dapat dibatasi dengan cara menyebar atau mendistribusikan tulangan. Apabila struktur dibebani dengan suatu beban yang menimbulkan momen lentur masih lebih kecil dari momen retak maka tegangan yang timbul masih lebih kecil dari *modulus of rupture* beton $f_r = 0,70 \sqrt{f'_c}$. Apabila beban ditambah sehingga tegangan tarik mencapai f_r , maka retak kecil akan terjadi. Apabila tegangan tarik sudah lebih besar dari f_r , maka penampang akan retak.

Ada tiga kasus yang dipertimbangkan dalam masalah retak yaitu:

1. Ketika tegangan tarik $f_t < f_r$, maka penampang dipertimbangkan untuk tidak terjadi retak. Untuk kasus ini

$$I_g = 1/12 b \cdot h^3 \quad (1)$$

2. Ketika tegangan tarik $f_t = f_r$, maka retak mulai timbul. Momen yang timbul disebut momen retak dan dihitung sebagai berikut:

$$M_{cr} = f_r \frac{I_g}{c}, \text{ dimana } c = h/2 \quad (2)$$

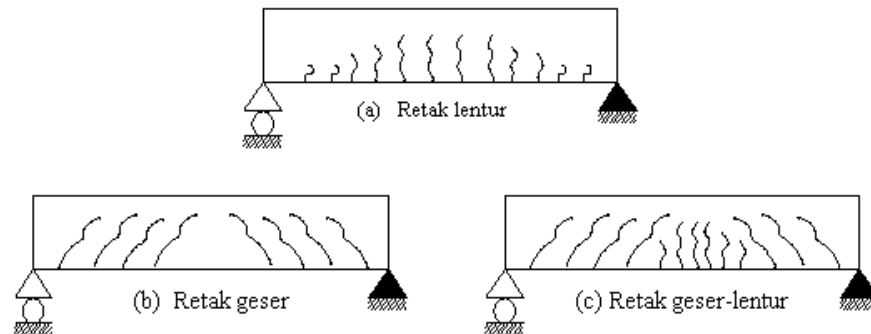
3. Apabila momen yang bekerja sudah lebih besar dari momen retak, maka retak penampang sudah meluas. Untuk perhitungan digunakan momen inersia retak (I_{cr}), transformasi balok beton yang tertekan dan transformasi dari tulangan $n \cdot A_s$.

Pada dasarnya ada tiga jenis keretakan pada balok, (Gilbert, 1990):

1. Retak lentur (*flexural crack*), terjadi di daerah yang mempunyai harga momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok (lihat **Gambar 12 (a)**).
2. Retak geser pada bagian balok (*web shear crack*), yaitu keretakan miring yang terjadi pada daerah garis netral penampang dimana gaya

geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil (lihat **Gambar 12 (b)**)

3. Retak geser-lentur (*flexural shear crack*), terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur. Retak geser lentur merupakan perambatan retak miring dari retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya (lihat **Gambar 12 (c)**).



Gambar 12 Jenis retakan pada beton

2.1.3 Beton Komposit

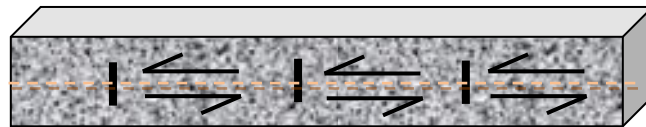
Struktur komposit adalah struktur yang terdiri dari dua material atau lebih dengan sifat bahan yang berbeda dan membentuk sebuah kesatuan sehingga menghasilkan sifat gabungan yang lebih baik dengan memanfaatkan karakteristik masing– masing bahan secara optimal (SNI 2847-2019). Beton komposit adalah elemen beton pracetak, beton cor di tempat, atau keduanya, yang dibangun dalam pengecoran yang terpisah tetapi saling berhubungan sedemikian sehingga semua elemen merespon terhadap beban sebagai sebuah unit. Menurut SNI 2847 2019 dijelaskan pula bahwa penggunaan komponen struktur keseluruhan atau bagian– bagiannya untuk menahan geser dan momen yang diizinkan. Elemen–elemen individu harus diperiksa untuk semua tahapan–tahapan kritis pembebanan.

Tulangan harus disediakan seperti yang diperlukan untuk meminimumkan retak dan untuk mencegah pemisahan elemen-elemen individu komponen komposit. Balok komposit biasa digunakan pada konstruksi gedung dan jembatan yang berupa baja dengan lantai beton dan lantai jembatan. Untuk menghubungkan baja dengan beton balok komposit digunakan *shear connectors*, sehingga beton dan baja dapat bekerja sama dalam menahan beban geser.

Struktur komposit adalah struktur yang terdiri dari dua material atau lebih dengan sifat bahan yang berbeda dan membentuk satu kesatuan sehingga menghasilkan sifat gabungan yang lebih baik dengan memanfaatkan karakteristik masing-masing bahan secara optimal (Evendy *et al*, 2013). Alfirdaus *et al.*, (2019) juga memberikan definisi Struktur Komposit yang menyatakan bahwa “Struktur komposit (*Composite*) merupakan struktur yang terdiri dari dua material atau lebih dengan sifat bahan yang berbeda dan membentuk satu kesatuan sehingga menghasilkan sifat gabungan yang lebih baik”. Pendapat lain juga dikemukakan oleh Giatmajaya *et al.*, (2021) bahwa “Struktur komposit merupakan struktur yang terdiri dari dua material atau lebih dengan sifat bahan yang berbeda dan membentuk satu kesatuan sehingga menghasilkan sifat gabungan yang lebih baik yaitu sama-sama memikul beban”.

Rumus tegangan geser adalah:

$$\tau = \frac{V.Q}{I.b} \quad (3)$$



Gambar 13 Arah gaya geser pada balok beton

Shear connectors yang digunakan cukup kaku agar tidak terjadi slip (pergeseran) antara baja dengan beton. Jika ditinjau dari besarnya momen inersia, balok komposit memiliki momen inersia yang lebih besar dibandingkan dengan dua balok biasa yang disusun tanpa adanya penghubung geser. Hal tersebut terjadi karena pada balok komposit, kedua balok dianggap sebagai satu kesatuan yang terhubung melalui penghubung geser.

Berdasarkan SNI baja 2002, komponen-komponen struktur komposit terdiri dari:

- a. Kolom komposit yang terbuat dari profil baja gilss atau baja tersusun atau baja pipa atau baja berongga dan beton yang bekerja bersama - sama dalam memikul beban.
- b. Balok baja yang memikul pelat beton bertulang dan bekerja bersama - sama denga pelat tersebut sebagai satu kesatuan dalam memikul lentur.

- c. Balok komposit sederhana atau menerus dengan penghubung geser, atau profil baja yang diberi selubung beton, baik yang dibangun dengan atau tanpa penumpu sementara (perancah).

2.1.4 Momen Inersia Penampang Retak

Kondisi beton bertulang sebelum beton retak (praretak) maka tulangan dan beton bekerja bersama-sama pada daerah tarik. Dengan demikian maka untuk menentukan nilai lendutan yang terjadi tentunya juga menggunakan nilai momen inersia penampang utuh dengan asumsi bahwa beton belum mengalami keretakan sehingga momen inersia penampang masih utuh sepenuhnya. Rumus perhitungan momen inersia penampang utuh dapat dilihat pada persamaan.

$$I_g = \frac{1}{12}bh^3 \quad (4)$$

Setelah beton mengalami retak maka beton akan memasuki daerah pascaretak di mana kondisi ini dimulai dengan munculnya retak pertama. Apabila telah terjadi retak lentur maka kontribusi kekuatan tarik beton dapat dikatakan sudah tidak ada lagi. Hal ini berarti pula bahwa kekakuan lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva hubungan beban-defleksi akan semakin landai dibandingkan dengan taraf praretak. Pada tahap ini digunakan nilai momen inersia penampang retak I_{cr} . Nilai I_{cr} ini dapat dihitung menggunakan persamaan (5).

$$I_{cr} = \frac{1}{3}bc^3 + \frac{E_s}{E_c}A_s(d - c)^2 \quad (5)$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}bc^3 + \frac{E_s}{E_c}A_s(d - c)^2 + \frac{E_f}{E_c}A_f(h - c)^2 \quad (6)$$

Bila dalam perhitungan balok beton menggunakan FRP maka persamaan (5) dapat diperluas menjadi persamaan (6) dengan memperhitungkan pengaruh kontribusi FRP.

2.2 *Spalling* pada Beton Bertulang

Spalling merupakan kondisi dimana permukaan beton mengalami pengelupasan. Penyebab *spalling* adalah terjadinya gempa bumi, kebakaran serta korosi pada baja tulangan. Kerusakan struktural yang terjadi berupa *spalling*,

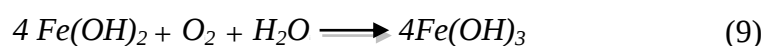
cracking, dan deflection konsisten dengan mede kerusakan yang biasa terjadi pada pasca kejadian kebakaran (Yuzuar afrizal., 2018), dan Proses inisiasi korosi pada beton bertulang akibat infiltrasi klorida dimulai Ketika klorida masuk ke dalam beton dan merusak lapisan pasif tulangan (Kolio et al., 2015). Kerusakan pada lapisan pasif terjadi akibat klorida yang ada pada interface antara beton dan tulangan telah melebihi besarnya *critical chloride content (CCC)*. CCC adalah batas konsentrasi yang dibutuhkan untuk merusak lapisan pasif pada baja tulangan.

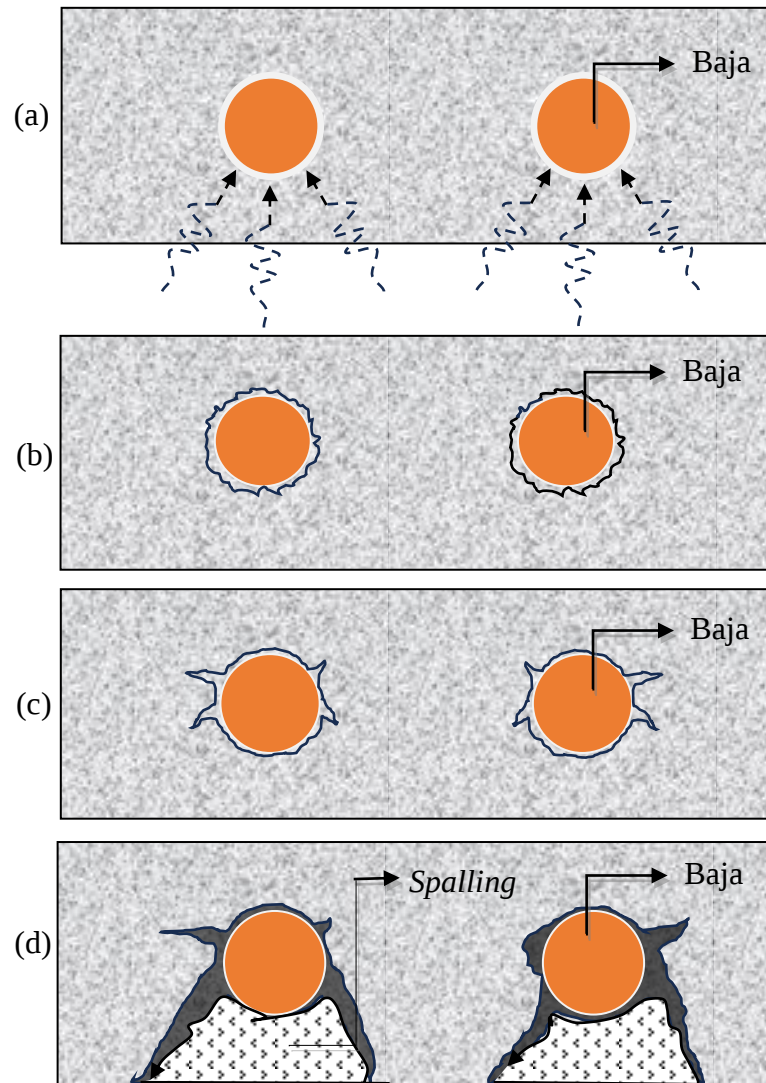
L. Wang et al., (2014) melakukan uji eksperimental dengan lima balok dengan kondisi grouting dan delapan balok yang dipercepat hingga terjadi korosi kemudian dilakukan uji lentur. Hasilnya menunjukkan bahwa perilaku retak balok sensitif terhadap ikatan antara kabel tendon dan grouting yang tidak mencukupi. Pola retak dan spalling secara keseluruhan tergantung pada diameter tulangan, jarak tulangan dan selimut beton (Zandi, 2015).

Lazimnya ada tiga tahapan terjadinya retak atau spalling pada beton akibat korosi seperti diperlihatkan pada **Gambar 14 dan Gambar 15**, yaitu tahapan terjadinya karat, tahapan terjadinya tegangan dan tahapan terjadinya retak pada selimut beton (Dai et al., 2015). Penelitian Qiao et al., (2015) menunjukkan bahwa pola retak internal yang berbeda dipengaruhi oleh dimensi tulangan serta pola distribusi korosi.

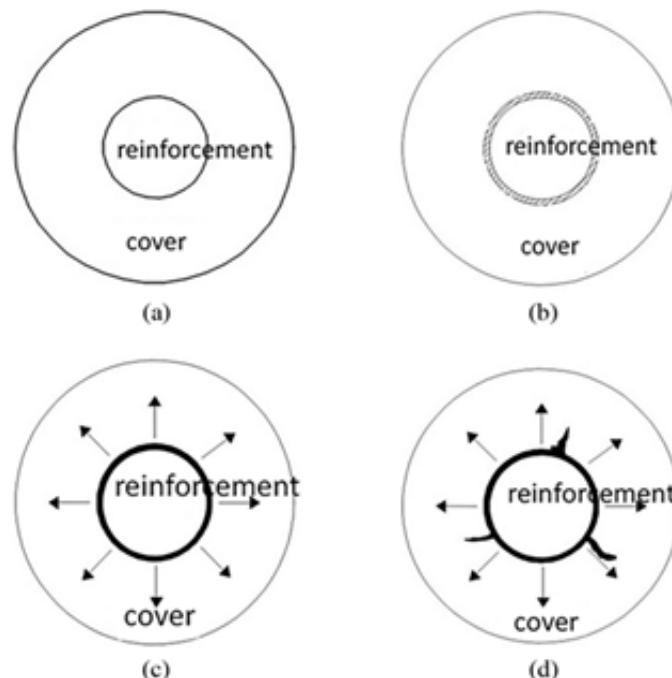
Mardani, (2017) melakukan percepatan korosi pada balok beton dengan tulangan. Hasil pengujian kuat lentur pada beton bertulang yang menggunakan air laut dan pasir laut memiliki kapasitas lentur yang hampir sama dengan beton normal yang diakselerasi korosi (Nacc). Sehingga besi coating dapat digunakan sebagai alternatif pada beton yang menggunakan air laut dan pasir laut. Herbert Uhlig (2000:582), menggambarkan proses korosi tulangan baja pada beton yang mengakibatkan *spalling* dengan persamaan reaksi

Reaksi Anoda:





Gambar 14 Tahapan terjadinya retak dan spalling pada beton, (a) serangan klorida pada alkalinitas beton, (b) retak awal di sekeliling baja tulangan, (c) penambahan panjang retak disekeliling baja tulangan, (d) spalling pada selimut beton



Gambar 15 Tahapan terjadinya spalling akibat korosi: (a) kondisi awal (b) tulangan mulai terkorosif (c) korosi membesar pada pertemuan beton dan tulangan (d) retak muncul pada selimut beton

2.3 Angkur

2.3.1 Sistem pengangkur

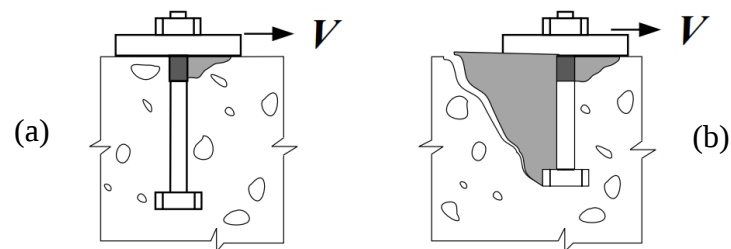
Angkur digunakan untuk menghubungkan elemen struktural dan non struktural kedalam beton. Angkur berfungsi untuk mentransfer gaya tarik dan gaya geser eksternal yang bekerja pada sambungan. Dika ananditya *et al.*, (2019) penambahan jumlah *shear connector* pada daerah tumpuan yang terkena gaya geser diperlukan untuk menopang gaya geser, serta penggunaan angkur sebagai *shear connector* berfungsi maksimal menahan gaya geser yang terjadi pada balok beton. Dan pada pengujian Balok Beton Komposit membuktikan bahwa angkur dengan *chemical anchor* yang digunakan sebagai *shear connector* berfungsi maksimal untuk menahan gaya geser. Jenis dynabolt yang umum dipasaran dapat dilihat pada **Gambar 16**.



Gambar 16 Angkur atau dynabolt

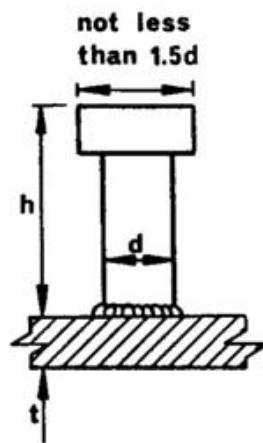
Terdapat dua jenis sistem pemasangan angkur yang beredar, antara lain sistem *cast in place* dan sistem *post installed*. Dimana masing-masing metode

memberikan beberapa keunggulan. Sistem cast in place merupakan metode pemasangan ankur dipasang dan diposisikan sebelum dilakukan pengecoran / grouting, sehingga memberikan ikatan yang maksimum antara beton dengan ankur. Pada sistem pengangkuran post installed, ankur dipasang pada beton ketika beton telah mengeras dengan cara melubangi permukaan beton menggunakan teknologi pengeboran, sehingga lebih efisien terhadap waktu, serta memberikan kemudahan saat pemasangan.



Gambar 17 Model kegagalan ankur akibat beban geser (a) kegagalan didahului spalling beton (b) beton terjurkit untuk ankur yang jauh dari ujung bebas

Penghubung geser yang sering digunakan adalah tipe *headed stud*. Rentang diameter *stud* adalah 6 mm sampai 12 mm, dengan panjang (h) dari 40 mm sampai 100 mm, meskipun kadang-kadang digunakan *stud* yang lebih panjang. Beberapa peraturan, seperti *Britishcode*, mensyaratkan kuat tarik ultimit *stud* tidak kurang dari 450 MPa dan elongasi tidak kurang dari 15%.



Gambar 18 Penghubung type geser stud

Kekuatan dari system penghubung geser dipengaruhi oleh beberapa hal seperti:

- Jumlah penghubung geser;
- tegangan longitudinal rata-rata dalam pelat beton disekeliling penghubung;

- c. ukuran, penataan dan kekuatan tulangan pelat disekitar penghubung;
- d. ketebalan beton disekeliling penghubung;
- e. derajat kebebasan dari setiap dasar pelat untuk bergerak secara lateral dan kemungkinan terjadinya gaya tarik keatas (*up lift force*) pada penghubung;
- f. daya lekat pada antar muka beton-baja;
- g. kekuatan pelat beton;
- h. tingkat kepadatan pada beton disekeliling pada setiap dasar penghubung.

Kuat geser rencana penghubung geser diambil dari nilai terendah yang didapat dari hubungan berikut:

$$P_{Rd} = \frac{\phi_v 0,8 f_u \pi d^2}{4} \quad (11)$$

Dan

$$P_{Rd} = \phi_v 0,29 d^2 \sqrt{f'_c E_{cm}} \quad (12)$$

Dengan pengertian:

- P_{Rd} : kuat geser rencana penghubung geser (N)
 ϕ_v : factor reduksi kekuatan geser (0,8)
 f_u : kuat Tarik ultimit baja (N/mm²)
 f'_c : kuat tekan beton silinder (N/mm²)
 E_{cm} : modulus elastisitas beton (N/mm²)
 d : diameter *stud* (mm)
 h : tinggi *stud* (mm)

Adapun spesifikasi produk dynabolt yang umum dipasaran sesuai dengan **Tabel 2**

Tabel 2 Spesifikasi dynabolt

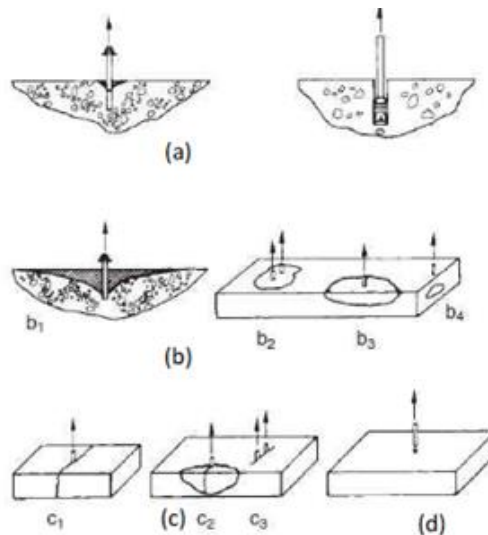
Hole/ Drill Diameter mm	Thread Size mm	Anc hor Leng th mm	Min. Hole Depth Mm	Max Fast. Thickness mm	Max. Save Working Loads KN	20 Mpa Concrete	Ultimate Tensile Loads KN 25 Mpa Concrete	35 Mpa Concrete	Ultimate Shear Loads KN 25 Mpa Concrete
6	M4.5	40	30	10	1.3	7.3	8.0	8.8	7.5
		60	30	30		9.9	10.8	11.6	7.8
8	M6	40	35	5	2.7	5.2	6.2	7.8	11.0
		65	35	30		9.0	10.2	11.4	11.8
		85	35	50		12.9	14.1	15.0	12.0
10	M8	50	40	10	3.0	13.2	14.7	17.4	18.7
		75	40	35		25.7	28.5	33.9	19.2
		100	40	60		36.2	40.2	48.3	19.2
12	M10	60	50	10	4.2	11.3	12.6	15.0	23.7
		75	50	25		18.1	20.1	23.1	23.8
		100	50	50		24.8	27.6	31.2	24.0

sumber: <http://surl.li/flwld>

2.3.2 Perilaku kegagalan angkur akibat beban tarik

Pada kondisi pembebanan tarik, angkur biasanya menunjukkan empat mode kegagalan yang mungkin selama terjadinya tegangan. Deformasi yang

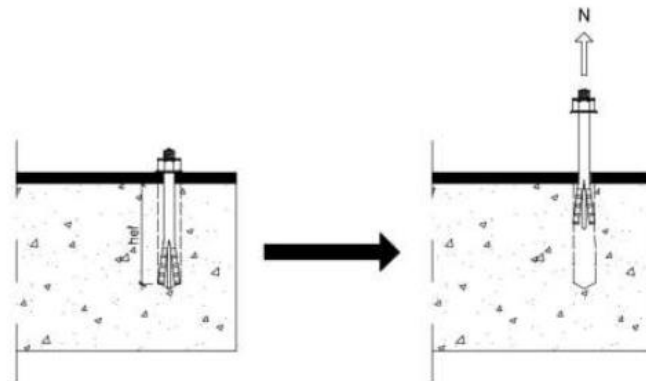
terjadi diukur pada permukaan beton yang terdiri dari deformasi angkur yang berhubungan dengan beton disekitarnya (slip), deformasi pada material beton ataupun material angkur. Berbagai jenis kegagalan dapat terjadi dalam kasus pembebanan seperti fraktur pada angkur hingga kerusakan kerucut beton. ACI 318M-11 mengembangkan model untuk menentukan perilaku angkur berdasarkan hasil eksperimen.



Gambar 19 Perilaku kegagalan angkur dalam pembebanan tarik (a) kegagalan pull-out dan pull-through; (b) kegagalan concrete breakout; (c) kegagalan splitting; (d) kegagalan komponen baja angkur (Eligehausen, et al. ((2006))).

2.3.3 Kegagalan angkur tercabut (pull-out failure)

Kegagalan *pull-out* dicirikan dengan angkur yang tertarik keluar dari lubang bor, dimana beberapa kasus ada kemungkinan terjadi kerusakan pada beton disekitar angkur atau bahkan tanpa adanya kerusakan pada beton. Kegagalan *pull-out* dapat terjadi jika mekanisme *interlock* tidak cukup memadai untuk menahan gaya tarik eksternal sehingga terjadi slip.



Gambar 20 Kegagalan pull-out angkur terhadap beton

Beberapa peraturan seperti pada *appendix D* ACI 318-14, tidak memberikan model untuk memprediksi kapasitas *pull-out* pada angkur ekspansi. Untuk itu beberapa penelitian pada dasarnya tergantung pada asumsi yang dibuat mengenai gaya normal yang dihasilkan di zona transfer beban (Eligehausen, 2005:98). Bagaimanapun kegagalan *pull-out* tetap perlu diperhitungkan untuk mengantisipasi adanya kemungkinan terjadinya kegagalan struktur. Kegagalan *pull-out* pada angkur dapat diasumsikan menggunakan pendekatan *bond slip* yang terjadi pada tulangan ulir. Pada tulangan ulir dimana mekanisme friksi, adhesi serta *interlock* pada *rib* tulangan berperan penting dalam aksi ikatan antara komponen besi dengan beton. Pada angkur ekspansi bagian kerucut memegang peran *interlock* mekanis untuk menahan gaya eksternal yang disalurkan ke dalam beton.

Cook (dalam Abolghasem, 2013:35) memberikan persamaan untuk menghitung kapasitas lekatan pada angkur:

$$N_p = \pi \cdot h_{ef} \cdot d_a \cdot \mu \quad (13)$$

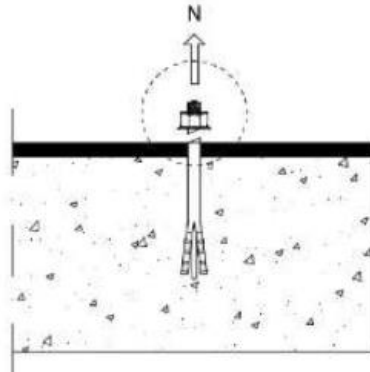
Dimana:

- N_p : kapasitas pull-out angkur (N)
- h_{ef} : kedalaman efektif pemasangan angkur (mm)
- d_a : kiameter angkur (mm)
- μ : tegangan lekat (MPa)

2.3.4 Angkur patah akibat gaya tarik (steel rupture)

Kegagalan ini terjadi akibat gaya tarik yang diberikan namun ikatan ke beton lebih besar daripada kekuatan komponen angkurnya akibat kedalaman pengangkuran yang dalam, sehingga angkur mengalami fraktur. Kegagalan yang terjadi adalah baut mengalami putus ketika

tegangan tarik mencapai kondisi ultimit yang tidak mampu ditahan oleh baut angkur. Kuat tarik rencana baut angkur ditentukan berdasarkan mutu bahan material dan dimensi fisik angkur (Dewobroto, 2015).



Gambar 21 Kegagalan fraktur angkur terhadap tarik

CI 318-14 memberikan model untuk memprediksi kuat tarik rencana angkur yang dihitung sebagai berikut:

Dimana:

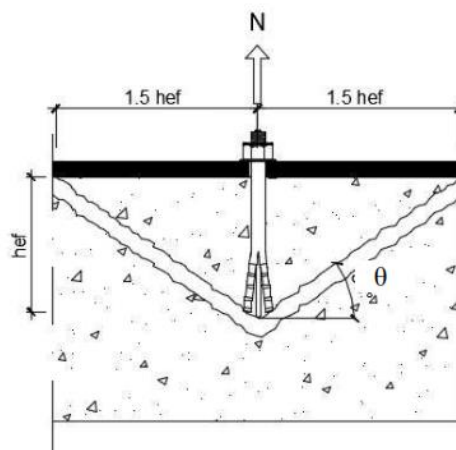
$$N_{sa} = A_{se} N \cdot f_{ua} \quad (14)$$

N_{sa} = Kuat tarik nominal angkur (N)

f_{ua} = Luas penampang efektif terhadap gaya tarik (mm^2)

f_{ua} = Kuat tarik baut angkur (Mpa)

Kegagalan jebol (Concrete breakout) pada beton terjadi jika kedalaman pemasangan angkur relatif kecil, mencabut angkur akan menyebabkan pengembangan permukaan gagal disekitar angkur dalam bentuk kerucut dengan sudut 35° dari bagian bawah angkur ke permukaan horizontal beton.



Gambar 22 Kegagalan concrete cone breakout

Eligehausen et.al (2006:275) memberikan persamaan untuk memprediksi kegagalan *concrete breakout* pada kelompok angkur.

$$N_{cbg} = \frac{NNc}{Nc0} \cdot Ncb \quad (15)$$

Nilai awal kekuatan karakteristik angkur dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Ncb = kc \cdot \lambda a \cdot ff_c \cdot h \quad (16)$$

Keterangan:

S1, S2 : jarak antar angkur (mm)

Cal : jarak angkur ke tepi beton (mm)

kc : koefisien nilainya diambil berdasarkan jenis pemasangan
(cast in place = 10; post installed = 7)

λa : faktor modifikasi untuk material beton ringan, untuk angkur cor di tempat
maka $\lambda a = \lambda$, Beton normal $\lambda = 1$, untuk beton ringan $\lambda = 0.75 \sim 0.85$

ANco : luas proyeksi maksimum kerusakan angkur tunggal (mm)

ANc : luas proyeksi kerusakan angkur kelompok (mm)

Ncbg : kuat angkur tunggal terhadap *concrete breakout* (N)

Ncb : kuat angkur kelompok terhadap *concrete breakout* (N)

2.4 Grouting pada Beton Bertulang

Grouting atau sementasi yang dituangkan ke dalam rongga beton yang mengalami retak atau keropos untuk mengembalikan bentuk dan kekuatan beton seperti semula, yang mana cairan tersebut dalam waktu tertentu akan menjadi padat secara fisika maupun kimiawi. Selain itu *grouting* merupakan jenis perbaikan injeksi semen dempul dan nat beton non-susut. Keunggulan dari penggunaan *grouting* antara lain ; Fluiditas dan fluiditas yang baik untuk memudahkan penuangan, kuat tekan tinggi, kekuatan lentur dan adhesi, bebas dari klorin yang mempengaruhi korosi, stabilitas bentuk yang baik bentuk yang baik, tidak berminyak, tidak beracun dan tidak menyebabkan karat.

Penggunaan *grouting* sebagai bahan perbaikan pada beton harus sangat diperhatikan baik dalam proses pembuatan mortar *grouting*nya maupun pada tahap pelaksanaan. Sugira Said *et al.*, (2022) penggunaan *grouting* pada balok yang mengalami kerusakan tidak mampu meningkatkan kapasitas kekuatan beton tetapi hanya berfungsi sebagai perbaikan untuk menutupi beton yang mengalami *spalling* agar bentuknya seperti semula.



Gambar 23 Perbaikan dan finishing dengan material Grouting

Sumber: <https://theconstructor.org/>

2.5 Fiber Reinforced Polymer

2.5.1 Glass Fiber Reinforced Polimer (GFRP)

GFRP adalah material yang terbuat dari *fiber* (serat) material sintetis seperti *glass*, *aramid* atau *carbon* yang disatukan oleh zat matrik, seperti epoksi atau polyester. Pengembangan penggunaan FRP pada rekayasa sipil terdiri dari dua bagian, pertama untuk rehabilitasi dan perbaikan struktur dan kedua untuk pembuatan konstruksi baru yang sepenuhnya menggunakan FRP ataupun komposit dengan beton.

Perkuatan lentur balok beton bertulang dengan GFRP terjadi peningkatan beban sampai dengan 75,13% (Fikri Alam, 2010). Penggunaan FRP dalam perkuatan struktur antara lain pada balok, pelat, jembatan. Djamaluddin et al., (2016) memanfaatkan lembaran GFRP sebagai perkuatan pada balok beton dengan kondisi ekstrem yaitu 800.000 waktu siklus ‘beban, hasilnya kapasitas lentur balok hanya menurun sekitar 60%. Djamaluddin et al., (2019) melakukan uji serangkaian balok beton diperkuat dengan lembaran GFRP di permukaan tegangan ekstrim disiapkan. Spesimen balok diberikan beban lentur pada empat titik uji secara bertahap hingga kapasitas ultimit. Hasil menunjukkan bahwa sebelum delaminasi akhir, terjadi delaminasi yang ditunjukkan dengan penurunan beban yang diberikan secara tiba-tiba. Delaminasi lembaran GFRP dapat dimulai oleh retak lentur yang terjadi pada balok.

Terdapat beberapa keuntungan menggunakan FRP sebagai bahan perkuatan struktur antara lain:

- a. Teknik yang digunakan dalam pemasangan tidak mengganggu penggunaan struktur oleh pihak lain.

- b. Meningkatkan kapasitas struktur dengan penambahan berat struktur sendiri adalah minimum.
- c. Teknik yang digunakan relatif cepat
- d. Material FRP lebih tipis dan lebih ringan daripada menggunakan perkuatan dari baja.
- e. Namun demikian perlu juga diperhatikan kelemahan-kelemahan pemakaian bahan ini, antara lain kurang tahan teradap suhu tinggi. Dengan suhu sekitar 700C bahan perekat *epoxy resin* akan berubah dari kondisi keras menjadi lunak, bersifat plastis sehingga daya lekatnya akan menurun. Selain itu bahan ini juga tidak tahan terhadap sinar ultra violet. Untuk mengatasi kelemahan ini perlu dilakukan proteksi, misalnya pelapisan atau penutupan dengan mortar.



Gambar 24 Lembaran *glass fiber reinforced polimer*

Dalam penggunaannya, FRP digabungkan dengan suatu bahan perekat (*Epoxy Impregnation Resin*) yang akan merekatkan lembaran fiber pada balok beton. Bahan perekat yang akan digunakan pada penelitian ini berupa Epoxy dengan nama MapeWrap 31 SP yang merupakan produk dari MAPEI terdiri dari 2 (dua) komponen yaitu komponen A merupakan resin dan komponen B merupakan hardener. Perbandingan campuran antara bagian A: bagian B = 3: 1. Untuk GFRP yang dipergunakan adalah type MapeWrap G UNI-AX.

Tabel 3 Spesifikasi GFRP *type MapeWrap G* dalam bentuk *dry sheet* (*Glass Fabrics*)

Sifat- Sifat Material MapeWrap G UNI-AX	
Sifat- Sifat	Nilai Test
Massa jenis	2.62 kg/dm ³
Kuat Tarik	$\geq 2,560$ Mpa
Regangan Tarik	3-4%
Berat	900 g/m ²
Lekatan Pada Beton	> 3 MPa (Kegagalan beton)
Modulus Elastisitas	80.7 Gpa

Untuk Bahan perekat yang digunakan dalam penelitian ini juga merupakan produk dari MAPEI dengan nama MapeWrap 31 SP yang terdiri dari 2 komponen yaitu komponen A (resin) dan komponen B (hardener). Untuk proses pencampuran antara komponen A dan komponen B digunakan perbandingan 3: 1. Adapun spesifikasi dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Spesifikasi GFRP *type MapeWrap 31 SP* dalam bentuk *dry sheet*

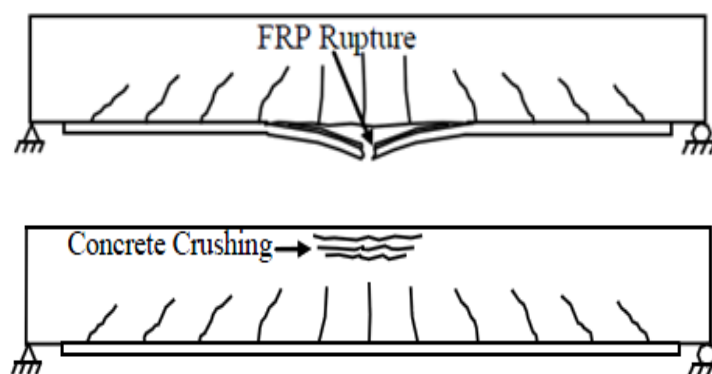
Sifat- Sifat Material MapeWrap 31 SP	
Sifat- Sifat	Nilai Test
Kuat Tarik	≥ 40 Mpa
Modulus Tarik	$\geq 2,500$ Mpa
Regangan Tarik	4,50%
Kuat Tekan	≥ 50 Mpa
Kuat Lentur	≥ 50 Mpa
Modulus Elastisitas Tekanan	$\geq 2,000$ Mpa

2.5.2 Model Kegagalan

Model kegagalan yang terjadi pada balok beton yang diperkuat dengan FRP secara umum dapat dibedakan atas tiga yaitu rusak atau putusnya FRP setelah tulangan tarik leleh (FRP *rupture*), hancurnya beton pada sisi tekan (*concrete crushing*) dan lepasnya ikatan antara beton dengan FRP (*debonding*).

Gambar 25 secara berurutan menunjukkan model 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*. Selain itu, terdapat pula kondisi di mana tulangan tarik telah meleleh namun disertai dengan hancurnya beton pada sisi tekan tanpa disertai putusnya FRP. Model kegagalan selanjutnya merupakan model kegagalan *debonding*.

GFRP memiliki mutu yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton dan baja sehingga apabila beton dan baja telah meleleh terlebih dahulu, maka reaksi komposit antara permukaan beton dengan GFRP berkurang sehingga GFRP terlepas dari beton atau disebut *debonding* (Achmad zultan et al.,). Model kegagalan *debonding* ini merupakan model kegagalan yang paling sering dijumpai pada balok yang diperkuat FRP. *Debonding* merupakan lepasnya ikatan antara beton dengan FRP. Tata et al., (2018) melakukan uji eksperimental dengan penggunaan GFRP pada balok dengan perendaman air laut untuk 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* atau pengelupasan.



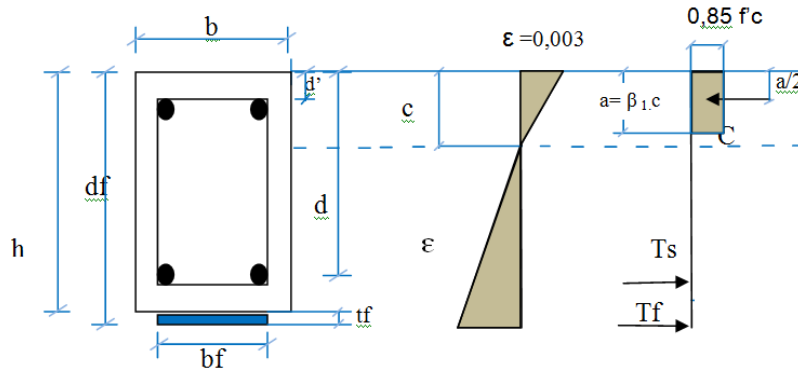
Gambar 25 Putusnya FRP dan hancurnya beton pada sisi tekan

2.6 Standar Pedoman Perencanaan

Standar “ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures digunakan sebagai pedoman perencanaan untuk FRP.

2.6.1 Kapasitas Balok Beton Bertulang

Untuk perkuatan lentur dengan FRP, perhitungan desain mengacu pada ACI committee 440.2R-08. Dalam mendesain balok dengan perkuatan GFRP, digunakan nilai regangan di bawah dari regangan putus GFRP-S, hal ini dimaksudkan agar nantinya tipe kegagalan yang terjadi pada balok adalah kegagalan debonding. Perhitungan tersebut disajikan pada **Gambar 26** dan dalam rumus-rumus berikut.



Gambar 26 Regangan untuk metode ACI 440-2R-08

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

$$\phi Mn \geq Mu \quad (17)$$

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

$$k_m = \frac{1}{60 \epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{n E_f t_f}{360.000} \right) \leq 0,90 \quad \text{untuk } n E_f t_f \leq 180.000 \quad (18)$$

Dengan memberikan asumsi bahwa nilai regangan maksimum pada beton sebesar 0,003, maka regangan yang terjadi pada FRP dapat dihitung dengan persamaan (25).

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq k_m \epsilon_{fu} \quad (19)$$

Setelah mendapatkan nilai regangan pada FRP, Nilai tegangan pada FRP dapat dihitung dengan persamaan (26)

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe} \quad (20)$$

Dengan menggunakan persamaan (19) dan (20) 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 (21).

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi} \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \quad (21)$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (22)$$

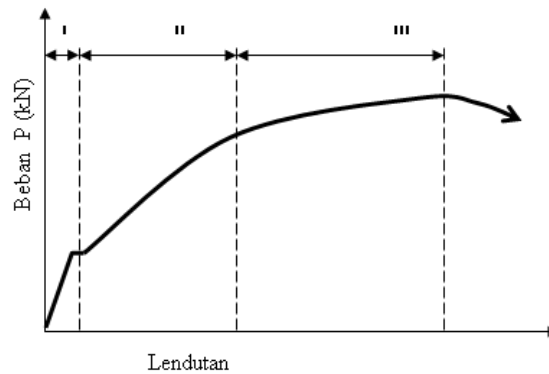
$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f'_c \beta_1 b} \quad (23)$$

Kapasitas momen nominal perkuatan lentur dengan menggunakan FRP dapat dihitung dengan persamaan (30). Untuk perkuatan lentur ACI committee 440 merekomendasikan nilai faktor reduksi untuk FRP (ψ) sebesar 0,85.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (24)$$

2.7 Lendutan Pada Beton

Hubungan beban-defleksi balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealisasikan menjadi bentuk trilinear sebelum terjadi ruptur seperti pada diagram **Gambar 27** (Edward G. Nawy, 1990):



Gambar 27 Hubungan beban-defleksi pada balok (E.G.Nawy: 1990)

Daerah I: *Taraf praretak*, dimana batang-batangnya strukturalnya bebas retak. Segmen praretak dari kurva beban-defleksi berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok lebih kecil dari kekuatannya akibat lentur atau lebih kecil dari modulus rupture (f_r) beton. Kekakuan lentur EI balok dapat diestimasi dengan

menggunakan modulus Young E_c dari beton, dan momen inersia penampang balok tak retak.

$$E_c = 0,043 w_c^{1,5} \cdot \sqrt{f_c} \quad (25)$$

Untuk beton normal

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c} \quad (26)$$

Modulus elastisitas baja

$$E_s = 2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)} \quad (27)$$

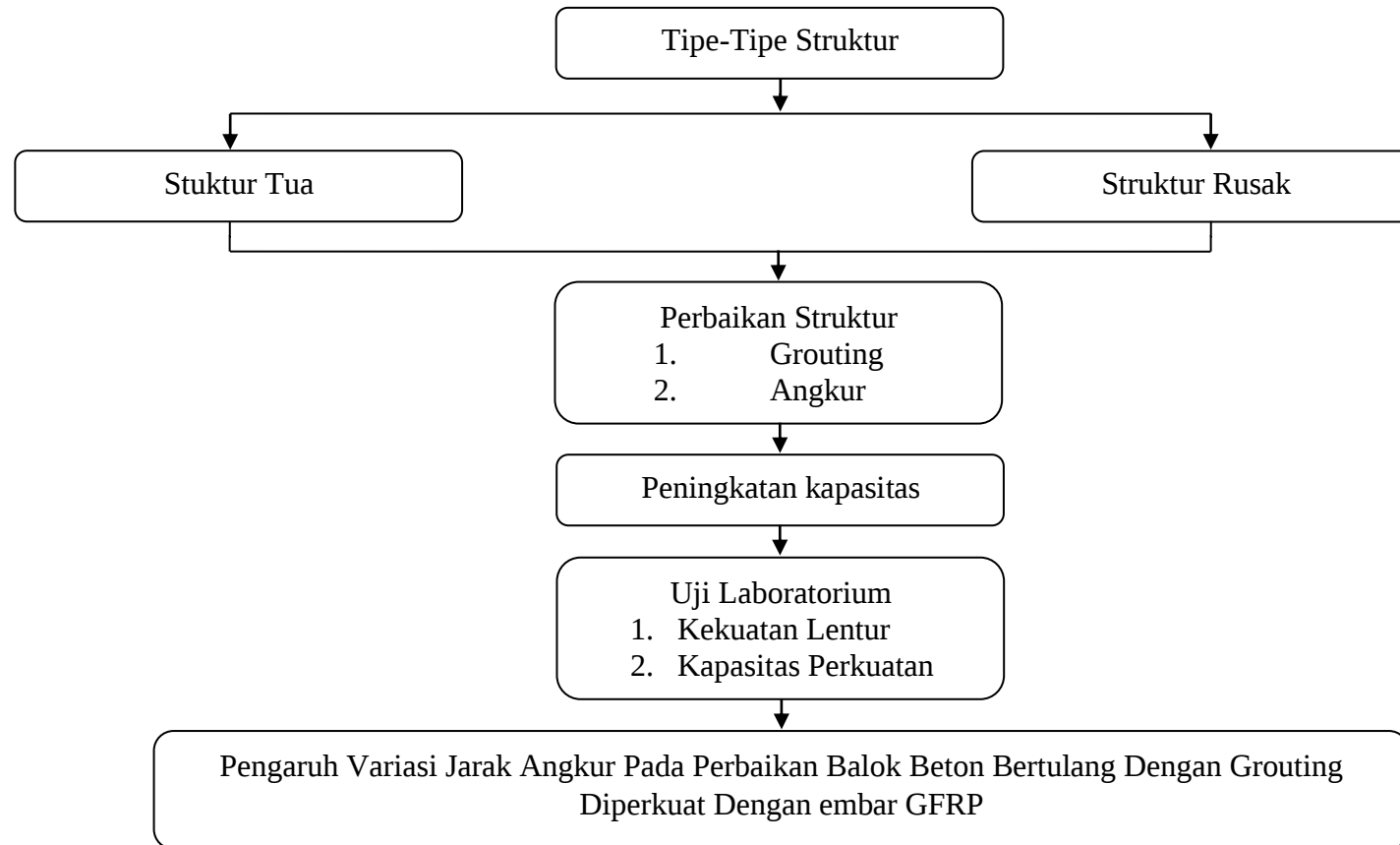
Untuk estimasi akurat momen inersia (I) memerlukan peninjauan kontribusi tulangan A_s . Ini dapat dilakukan dengan mengganti luas baja dengan luas beton ekivalen (E_s/E_c) A_s karena E_s lebih besar dari E_c .

Daerah II: *Taraf beban pascaretak*, dimana batang-batang struktural mengalami retak-retak terkontrol yang masih dapat diterima, baik distribusinya maupun lebarnya. Balok pada tumpuan sederhana retak akan terjadi semakin lebar pada daerah lapangan, sedangkan pada tumpuan hanya terjadi retak minor yang tidak lebar. Apabila sudah terjadi retak lentur maka kontribusi kekuatan tarik beton sudah dapat dikatakan tidak ada lagi. Ini berarti pula kekakuan lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva beban –defleksi di daerah ini akan semakin landai dibanding pada taraf praretak. Momen Inersia retak disebut I_{cr} .

Daerah III: *Taraf retak pasca-serviceability*, dimana tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya. Diagram beban defleksi daerah III jauh lebih datar dibanding daerah sebelumnya. Ini diakibatkan oleh hilangnya kekuatan penampang karena retak yang cukup banyak dan lebar sepanjang bentang. Jika beban terus ditambah, maka regangan ϵ_s pada tulangan sisi yang tertarik akan terus bertambah melebihi regangan lelehnya ϵ_y tanpa adanya tegangan tambahan. Balok yang tulangan tariknya telah leleh dikatakan telah runtuh secara struktural. Balok ini akan terus mengalami defleksi tanpa adanya penambahan beban dan retaknya semakin terbuka sehingga garis netral terus mendekati tepi yang tertekan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan sekunder yang mengakibatkan kehancuran total pada beton daerah momen maksimum dan segera diikuti dengan terjadinya rupture.

2.8 Kerangka Pikir

Pada penelitian ini adapun alur dari kerangka pikir dapat dilihat pada **Gambar 28**.



Gambar 28 Kerangka pikir peneliti