

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini, beton telah menjadi material kebutuhan utama masyarakat modern. Berdasarkan data laju konsumsi semen yang merupakan bahan dasar pembentuk beton, semakin meningkat seiring peningkatan *Gross Domestic Product* dan peningkatan populasi masyarakat (Global Bulk Technologies S.L., 2020).

Dipengaruhi kemajuan teknologi maka penggunaan beton dituntut untuk semakin meningkat dari segi kualitas maupun kuantitas, dari sisi kualitas dibutuhkan alternatif-alternatif untuk meningkatkan performa kekuatan beton.

Sistem *Fiber Reinforced Polymer* telah dikembangkan sebagai salah satu alternatif daripada perkuatan yang menggunakan plat baja dengan tujuan meningkatkan kapasitas beban dan mereduksi defleksi. Pengikatan plat baja pada bagian tarik balok dengan ikatan/lem resin menunjukkan sebagai salah satu metode yang memadai dalam meningkatkan kekuatan lentur (Fleming and King., 1967).

Metode ini telah digunakan untuk meningkatkan kekuatan jembatan dan gedung di seluruh dunia. Namun karena plat baja dapat mengalami korosi yang dapat menurunkan ikatan antara baja dan beton, serta metode pemasangan *Steel Plate Bonding* sangat sulit dan membutuhkan penggunaan alat berat, sehingga para peneliti berupaya menggunakan material FRP sebagai alternatif perkuatan pada elemen baja atau beton.

Berbagai penelitian eksperimental terhadap penggunaan FRP telah dilakukan oleh akademisi, profesional, dan produsen-produsen FRP sehingga dibutuhkan kombinasi simulasi analisis numerik lebih lanjut terhadap penggunaan sistem FRP sebagai bagian untuk memvalidasi hasil analisis agar performa sistem FRP terhadap beton dapat dioptimalkan.

Analisis numerik sistem FRP dapat menggunakan produk *Computer Aided Engineering* (CAE) atau perangkat lunak komputer yang digunakan untuk membantu penyelesaian analisis keteknikan, terdapat berbagai perangkat lunak CAE yang dikembangkan oleh berbagai perusahaan di bidang *Multiphysics Simulation*, diantaranya ABAQUS Inc., ADINA R & D Inc, Autodesk Inc, ANSYS Inc, Dassault Systemes.

Perangkat lunak ini mencakup analisis elemen hingga FEA (*Finite Element Analysis*), Dinamika Fluida Komputasi atau CFD (*Computational Fluid Dynamics*), Dinamika Multibody atau MBD (*Multibody Dynamics*), dan optimalisasi.

Perangkat lunak ini digunakan untuk menganalisis ketahanan, kinerja komponen dan perakitan. Kondisi ini mencakup simulasi, validasi, dan optimalisasi produk dan alat manufaktur. Diharapkan di masa yang akan datang, sistem CAE akan menjadi penyedia informasi utama untuk membantu dalam proses desain sehingga pengambilan keputusan dapat dilakukan lebih cepat.

Kombinasi penelitian eksperimental dengan analisis elemen hingga memberikan manfaat yang signifikan terhadap proses optimasi dan validasi model. Hasil analisis numerik menjadi lebih andal karena data dari pengujian eksperimental digunakan untuk memverifikasi keakuratan prediksi simulasi. Hal ini memastikan bahwa model FEA dapat mewakili perilaku struktural material secara tepat.

Selain itu, pendekatan ini dapat meningkatkan keandalan desain dengan memberikan informasi mendalam tentang distribusi regangan, perambatan retak,

dan mode kegagalan, yang berkontribusi pada pengembangan struktur yang lebih efisien dan aman. Pendekatan ini juga memungkinkan optimasi penggunaan material dan konfigurasi struktur lanjutan secara lebih efisien melalui simulasi, sehingga menghemat waktu dan biaya dalam proses desain dan implementasi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka disusunlah penelitian dengan judul ***Pemodelan Perkuatan Balok Beton Bertulang dengan Fiber Reinforced Polymer berbasis Metode Elemen Hingga***, dengan proses analisis dan simulasi menggunakan CAE yang kemudian dilakukan komparasi dengan penelitian eksperimental sebelumnya untuk menilai dan memvalidasi tingkat keakuratan simulasi.

1.2. Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk menjawab permasalahan terkait perkuatan balok beton bertulang dengan Fiber Reinforced Polymer (FRP). Rumusan masalah yang ingin diselesaikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- 1) Bagaimana efektifitas peningkatan kapasitas lentur balok beton bertulang menggunakan sistem Fiber Reinforced Polymer (FRP) ?
- 2) Bagaimana kemampuan simulasi analisis numerik ANSYS dalam memprediksi performa sistem FRP yang diterapkan pada balok beton bertulang?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut Penelitian ini memiliki tujuan utama untuk mengembangkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai perkuatan balok beton bertulang menggunakan sistem Fiber Reinforced Polymer (FRP). Adapun tujuan-tujuan spesifik dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis efektivitas penerapan sistem Fiber Reinforced Polymer (FRP) dalam peningkatan kapasitas lentur balok beton bertulang.
2. Membandingkan hasil analisis numerik ANSYS dengan hasil penelitian eksperimental untuk menilai tingkat kesesuaian dan akurasi pemodelan ANSYS dalam memprediksi performa sistem FRP pada balok beton bertulang.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada tulisan ini adalah sebagai berikut :

- 1) Lingkup Perbandingan
Penelitian ini membatasi perbandingan antara hasil simulasi menggunakan software ANSYS dan hasil uji eksperimental fisik pada material dan struktur tertentu, yaitu balok beton bertulang perkuatan FRP dengan dimensi 150 x 200 x 3300 mm dan mutu beton f'_c 21 MPa. Dengan asumsi ikatan antara beton dengan lapisan FRP terikat dengan baik.
- 2) Metode Simulasi
Simulasi numerik akan dilakukan menggunakan ANSYS dengan pengaturan batasan dan kondisi awal yang konsisten, mencakup geometri balok, mutu beton, properti material FRP.
- 3) Metode Eksperimental
Hasil eksperimen yang digunakan untuk perbandingan berasal dari uji laboratorium yang dilaksanakan oleh Hidayat Mahmud, 2019.
- 4) Jenis Analisis yang diperbandingkan
Penelitian fokus pada perbandingan parameter tertentu, seperti defleksi balok, tegangan, dan beban maksimum yang dapat diterima model hingga runtuh.

1.5. Sistematika Penulisan

Untuk penulisan penelitian ini, dilakukan pembagian kerangka sistematika penulisan dalam bab dan subbab berikut :

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini menyajikan gambaran umum mengenai latar belakang pemilihan judul, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi uraian dasar teori yang berkaitan dengan penelitian.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menyajikan bahasan mengenai tahapan, pengumpulan data bahan penelitian, dan pengujian yang dilakukan.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang diperoleh.

BAB V. PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan dari hasil analisis masalah dan disertai dengan saran-saran yang diusulkan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian terdahulu mengenai Perkuatan Balok dan *Fiber Reinforced Polymer*

Pasca Perang Dunia II berakhir, para produsen material di AS mulai memproduksi FRP dengan resin poliester sebagai matriksnya dan *Glass Fiber* sebagai penguatnya untuk aplikasi lambung perahu dan radome (kubah radar). Pada industri otomotif, FRP pertama kali dipergunakan sebagai badan kendaraan di awal tahun 1950-an. Karena sifat-sifat FRP yang sangat diinginkan, sehingga pada perkembangannya banyak penelitian ditekankan pada ilmu material FRP dan proses manufakturnya. Beberapa penelitian terkait FRP yang telah terpublikasi, diantaranya:

Ramana et al., (2000) mempublikasikan hasil studi eksperimental dan analisis mengenai perkuatan lentur balok beton bertulang dengan penguatan eksternal CFRP yang memiliki kekuatan tinggi dan ringan pada bagian tarik balok. Empat set balok, tiga dengan jumlah tulangan CFRPC yang berbeda dengan mengubah lebar lapisan CFRP. Hasilnya, menunjukkan bahwa kekuatan lentur balok meningkat signifikan dengan meningkatnya lebar lapisan CFRP. Analisis teoritis menggunakan program komputer berdasarkan kompatibilitas regangan kemudian dilakukan untuk mengetahui kekuatan ultimit dan perilaku momen-defleksi balok. Perbandingan hasil pengujian dengan nilai teoritis juga dilakukan, bersama dengan penelaahan bentuk kegagalan balok.

Metwally, (2017) menyajikan investigasi numerik dari dua belas balok tinggi beton skala besar yang diperkuat secara internal dengan tulangan GFRP tanpa tulangan badan gagal dalam geser yang diuji secara eksperimental dan dikumpulkan dari literatur. Spesimen yang dikumpulkan mencakup beberapa parameter yang biasanya mempengaruhi kekuatan dan perilaku balok dalam seperti rasio bentang geser/kedalaman, rasio tulangan, kedalaman efektif, dan kekuatan beton. Balok dalam beton umumnya dianalisis menggunakan metode konvensional seperti persamaan empiris atau model *strut and tie*. Namun metode ini tidak memperhitungkan redistribusi gaya yang dihasilkan dari perilaku material *non-linier*. Untuk mengatasi masalah ini, analisis elemen hingga non-linier yang menggabungkan perilaku material non-linier sebagai digunakan.

Hasil pengujian eksperimental kemudian dibandingkan dengan hasil analisis elemen hingga (FEA) menggunakan ABAQUS untuk mengevaluasi keakuratan dan konsistensi prediksi model numerik terhadap perilaku aktual balok di bawah pembebanan. Kesimpulan dari analisis ini menunjukkan bahwa simulasi menggunakan ABAQUS dapat secara akurat memprediksi bentuk dan perambatan retak pada balok hingga mencapai kegagalan, dengan hasil yang konsisten dengan pengamatan eksperimental

(Adam et al., 2015) menyajikan studi eksperimental, numerik dan analitik tentang perilaku lentur balok beton yang diperkuat dengan batang polimer yang diperkuat serat gelas (GFRP) yang diproduksi secara lokal. Sebanyak sepuluh balok, berukuran lebar 120 mm, dalam 300 mm dan panjang 2800 mm, dicor dan diuji hingga gagal di bawah tekukan empat titik. Parameter utamanya adalah jenis bahan tulangan (GFRP dan baja), kuat tekan beton dan rasio tulangan. Lendutan bentang tengah, lebar retak dan regangan tulangan GFRP dari balok yang diuji dicatat dan dibandingkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa lebar retak dan

lendutan tengah bentang menurun secara signifikan dengan meningkatkan rasio tulangan. Beban ultimit bertambah 47% dan 97% seiring bertambahnya rasio tulangan. Regangan penguatan GFRP yang terekam mencapai 90% dari regangan ultimate. Analisis elemen hingga non-linear (NLFEA) dibangun untuk mensimulasikan perilaku lentur balok yang diuji dalam hal pola retak dan perilaku defleksi beban.

(Hidayat et al., 2019) menyajikan studi eksperimental tentang kapasitas balok beton bertulang pasca tulangan meleleh dengan perkuatan lembar FRP, Penelitian ini merupakan eksperimen terhadap balok beton bertulang yang menggunakan perkuatan eksternal dari serat gelas (GFRP) dan serat karbon (CFRP) setelah terjadinya pelelehan pada tulangan. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis dampak dari penambahan lebar sabuk serta jumlah lapisan FRP pada kekuatan balok.

Pengujian dilakukan pada balok dengan panjang 3,3 m dan dimensi penampang 150 mm x 200 mm. Spesimen terdiri dari tiga balok normal dan dua belas balok yang diperkuat dengan lembar FRP. Lembaran FRP ditempelkan pada permukaan bawah balok, sedangkan sabuk FRP dari GFRP dipasang di kedua ujung balok.

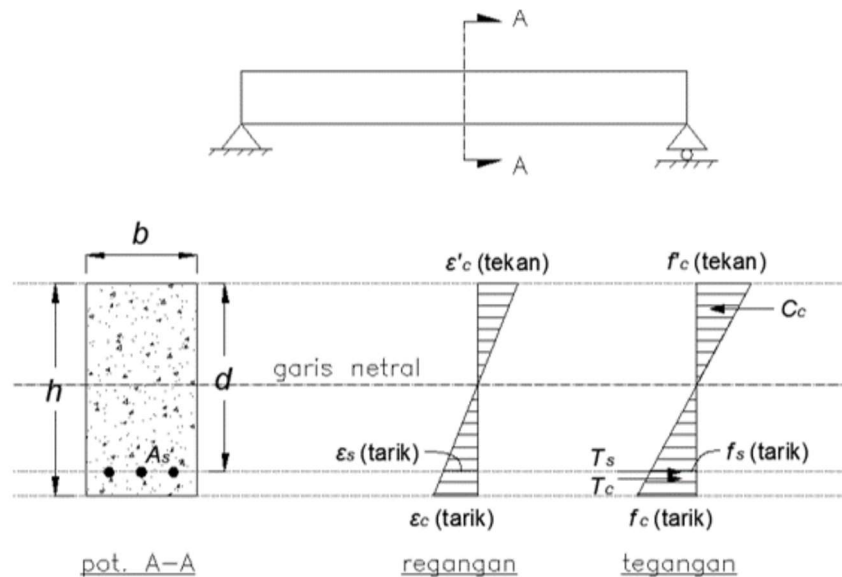
Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kapasitas lentur balok sebesar 17,66% ketika diperkuat dengan satu lapis GFRP, 75,45% dengan satu lapis CFRP, dan 109,14% dengan dua lapis CFRP jika dibandingkan dengan balok yang tidak diperkuat. Temuan penelitian ini memberikan wawasan mengenai pemilihan jenis FRP yang dapat digunakan untuk memperkuat struktur yang mengalami pelelehan pada tulangan, serta hubungan antara jumlah lapisan dan jenis FRP yang tepat untuk digunakan. Balok yang diperkuat dengan FRP mengalami kegagalan debonding, yang ditandai oleh terlepasnya lem FRP dari balok, disertai dengan retak lentur yang terjadi di tengah bentang balok.

2.2 Analisa Lentur pada Balok Beton Bertulang

(McCormac, 2003) bahwa sebuah beban melintang diletakkan pada balok beton yang dilengkapi dengan tulangan tarik dan beban tersebut ditingkatkan secara bertahap sampai balok mengalami runtuh. Ketika hal ini terjadi, diasumsikan bahwa balok tersebut telah mengalami tiga tahap yang berbeda sebelum keruntuhan terjadi. Tahap-tahap tersebut adalah (1) tahap beton tanpa retak, (2) tahap beton mulai retak-tegangan elastis dan (3) tahap tegangan ultimit.

2.5.1 Tahap beton tanpa retak

Pada beban-beban yang kecil ketika tegangan-tegangan tarik masih lebih rendah daripada modulus keruntuhan (tegangan tarik lentur dengan tekan pada saat beton mulai retak), seluruh penampang melintang balok menahan lentur dengan tekan pada satu sisi dan tarik pada sisi lainnya. Gambar 1. Kondisi beton tanpa retak menunjukkan variasi tegangan dan regangan untuk beban-beban kecil ini,

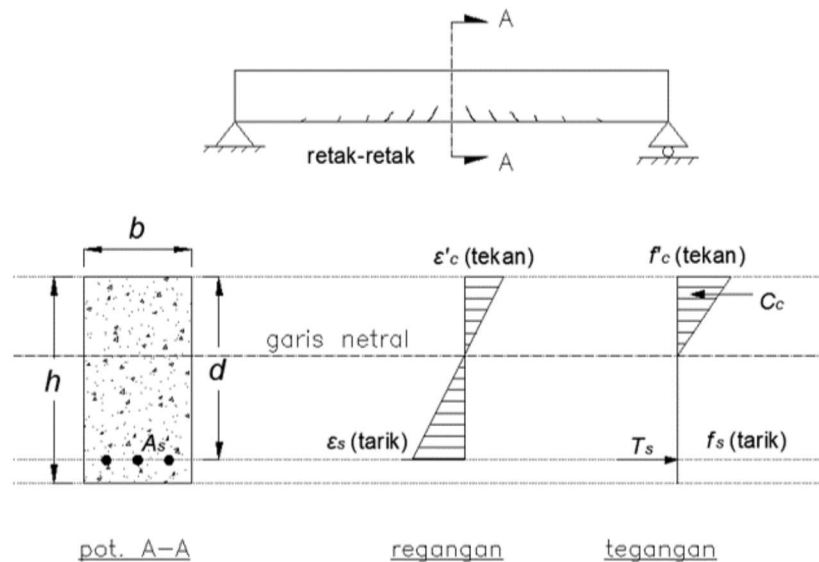


Gambar 1. Kondisi beton tanpa retak

2.5.2 Tahap beton mulai retak – Tegangan Elastis

Karena beban terus ditingkatkan melampaui modulus keruntuhan balok, retak mulai terjadi di bagian bawah balok. Momen pada saat retak ini mulai terbentuk yaitu ketika tegangan tarik di bagian bawah balok sama dengan modulus keruntuhan disebut momen retak M_{cr} . Jika beban terus ditingkatkan, retak ini mulai menyebar mendekati sumbu netral. Retak terjadi pada tempat-tempat di sepanjang balok dimana momen aktualnya lebih besar daripada momen retak, seperti yang diperlihatkan dalam

Karena sekarang bagian bawah balok sudah retak, terjadilah tahap selanjutnya karena beton pada daerah yang mengalami retak tersebut jelas tidak dapat menahan tegangan tarik – bawalah yang harus melakukannya. Tahap ini akan terus berlanjut selama tegangan tekan pada serat bagian atas lebih kecil daripada setengah dari kuat tekan beton f'_c dan selama tegangan baja lebih kecil daripada titik lelehnya. Tegangan dan regangan pada kisaran ini ditunjukkan pada Gambar 2. Kondisi beton mulai retak - Tahap Tegangan Elastis. Pada tahap ini tegangan tekan berubah-ubah secara linear terhadap jarak dari sumbu netral atau sebagai sebuah garis lurus.

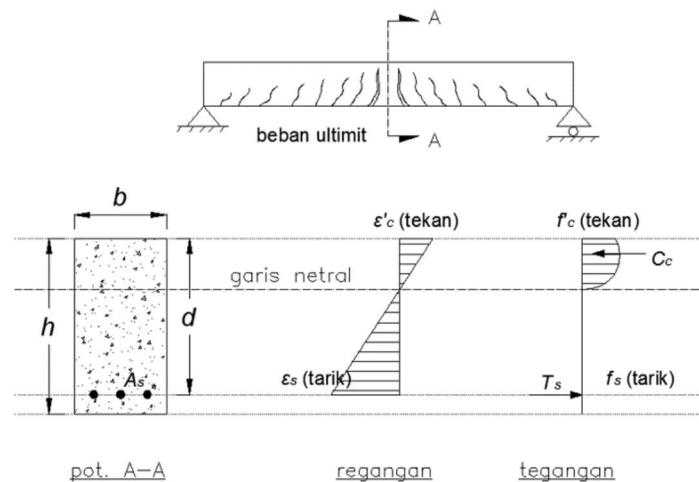


Gambar 2. Kondisi beton mulai retak - Tahap Tegangan Elastis.

Variasi tegangan-regangan garis-lurus biasanya terjadi pada balok beton bertulang pada kondisi-kondisi beban-layan normal karena pada tingkat beban tersebut tegangan yang terjadi biasanya lebih kecil daripada $0,5f'_c$. Untuk menghitung tegangan beton dan baja pada kisaran ini, digunakan metode luasan-transformasi. Beban layan atau beban kerja adalah beban-beban yang diasumsikan sesungguhnya terjadi ketika sebuah struktur digunakan atau melakukan fungsi layanannya. Ketika menerima beban-beban ini, momen-momen yang terjadi lebih besar daripada momen retak. Sehingga sisi balok yang mengalami tarik akan retak.

2.5.3 Tahap Tegangan Ultimit

Ketika beban terus ditambah sampai tegangan tekannya lebih besar daripada setengah f'_c , retak tarik akan merambat lebih ke atas, demikian pula sumbu netral, sehingga tegangan beton tidak berbentuk garis lurus lagi. Untuk pembicaraan awal ini, diasumsikan bahwa batang-batang tulangan telah leleh. Variasi tegangan yang terjadi adalah seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Kondisi tahap Tegangan Ultimit.



Gambar 3. Kondisi tahap Tegangan Ultimit.

2.3 Material *Fiber Reinforced Polymer*

Fiber Reinforced Polymer pada awalnya dipergunakan dalam industri kemiliteran. Sejak abad ke 20 permintaan pasar terhadap pemenuhan *Fiber Reinforced Polymer* semakin meningkat, sehingga perusahaan-perusahaan berusaha bekerja untuk membuat *Fiber Reinforced Polymer* lebih ekonomis sehingga memungkinkan sampai penggunaan pada proyek-proyek konstruksi.

Fiber Reinforced Polymer atau juga dikenal sebagai Fiber Reinforced Plastic adalah salah satu jenis material komposit yang terdiri atas matrik resin polimer yang diperkuat dengan serat gelas atau serat karbon. *Fiber Reinforced Polymer* menjadi salah satu inovasi dalam perkuatan struktur bangunan yang cukup populer karena mampu menghilangkan sifat beton yang getas menjadi struktur yang elastis atau ductile.

Fiber Reinforced Polymer adalah salah satu jenis material komposit yang terdiri atas matrik resin polimer yang diperkuat dengan serat gelas atau serat karbon. *Fiber Reinforced Polymer* banyak digunakan sebagai komponen struktur pada elemen pesawat terbang, otomotif, perkuatan (retrofit), dan struktur lain termasuk jembatan. Kelebihan material *Fiber Reinforced Polymer* dibandingkan dengan material lainnya adalah tahan korosi (*corrosion resistance*), memiliki kekuatan tinggi, bobotnya ringan, memiliki stabilitas dimensi, mengurangi penggunaan alat produksi, memiliki karakteristik insulasi listrik/non konduktif, tidak memerlukan proses finishing yang besar.

Sebagai penguatan eksternal, FRP tipe lembaran digunakan untuk:

1. Perbaikan balok dan slab beton yang rusak, dengan asumsi bahwa debonding antara FRP dan beton tidak menyebabkan kegagalan elemen struktur.
2. Mengatasi penambahan lebar retakan akibat beban layanan.
3. Meningkatkan kekuatan lentur akibat peningkatan beban seperti beban gempa dan beban lalu lintas.
4. Merencanakan beton baru yang memiliki daktilitas tinggi.
5. Perbaikan struktur akibat kesalahan desain atau konstruksi.
6. Meningkatkan kemampuan geser beton.
7. Meningkatkan kemampuan pengekangan kolom beton.
8. Perbaikan struktur lama dan bersejarah.

2.5.1 GFRP

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) adalah serat polimer yang terbuat dari matriks plastik diperkuat oleh serat halus dari kaca. GFRP merupakan jenis perkuatan yang memiliki kekuatan yang sangat besar, dan bahan yang ringan. Meskipun sifat kekuatan yang agak lebih rendah dari serat karbon dan kurang kaku, bahan yang biasanya jauh lebih sedikit rapuh, dan bahan baku jauh lebih murah.

Kekuatan massal dan sifat berat badan juga sangat menguntungkan bila dibandingkan dengan logam, dan dapat dengan mudah dibentuk dengan menggunakan proses pencetakan. Penggunaan GFRP biasanya digunakan untuk perkuatan balok, kolom, dan struktur bangunan lainnya. Selain untuk perkuatan GFRP, juga dapat digunakan untuk interior maupun eksterior ruangan, karena GFRP merupakan bahan yang tahan akan segala jenis cuaca, tahan dengan air yang mengandung garam seperti air laut, dan lainnya. (Jenova, 2013)

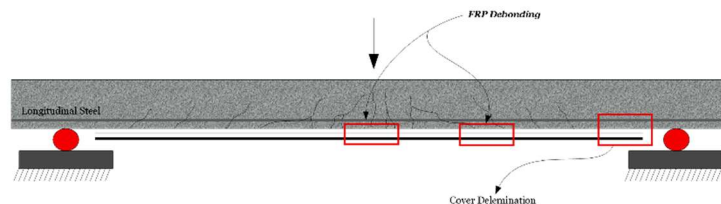
2.3.2 CFRP

CFRP adalah aplikasi lanjutan atau perkembangan dari FRP. *Carbon Fiber Reinforced Polymer* digunakan pada konstruksi struktur bangunan yang harus diperbaiki. Teknik perkuatan seperti ini dapat dibuat efisien, tidak menyebabkan karat seperti plat baja eksternal. Fungsi perkuatan dengan sistem komposit CFRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, aksial dan daktilitas, atau berbagai kombinasi diantaranya. Daya tahan CFRP yang tinggi lebih ekonomis digunakan pada lingkungan korosif dimana baja akan mudah berkarat.

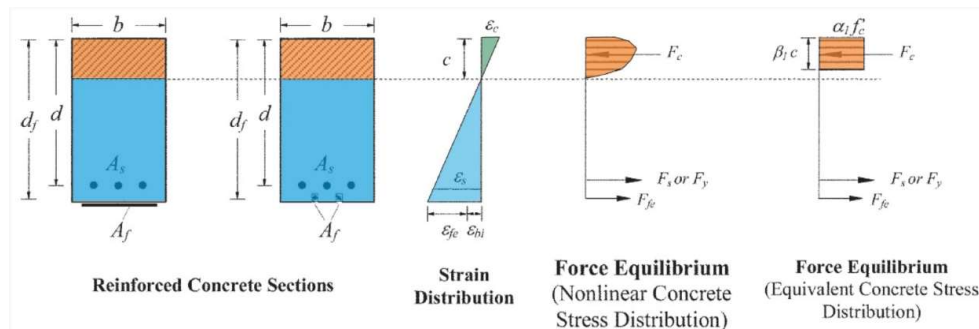
Penggunaan CFRP lebih populer mengingat banyaknya keuntungan yang dapat diperoleh seperti bobot unit yang kecil, mudah diaplikasikan dan ditangani, biaya instalasi dan pemeliharaan yang rendah. Kerugian yang paling prinsip penggunaan CFRP sebagai sistem perkuatan adalah harga material yang relatif lebih mahal. (Meier, 1997).

2.4 Kuat lentur beton dengan perkuatan FRP

Saat *Fiber Reinforced Polymer* digunakan sebagai material perkuatan, rasio kekuatan dengan kekakuan menjadi lebih besar daripada beton, sehingga kedalaman garis netral kesetimbangan lebih dekat dengan kuat tekan akhir. Sehingga, didapatkan regangan tekan yang lebih tinggi daripada baja penampang beton dengan dimensi balok yang sama.



Gambar 4. FRP pada perkuatan struktur beton.



Gambar 5. Regangan dan tegangan lentur balok kondisi ultimit. (ACI, 2017).

Kuat lentur nominal dengan perkuatan eksternal FRP dapat dihitung dengan menambahkan faktor reduksi untuk FRP, sebagai bagian perhitungan kekuatan lentur dari perkuatan FRP. Nilai yang direkomendasikan adalah 0,85. Nilai tersebut merupakan faktor reduksi dari kekuatan FRP, nilai ini diperoleh berdasarkan statistik pengujian kuat lentur. (Okeil, 2017)

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \phi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

dimana

M_n = kekuatan lentur nominal

ϕ_f = faktor reduksi kekuatan FRP

A_s = luas penampang tulangan baja non-prestressed

A_f = luas penampang penguat eksternal FRP

d_f = kedalaman efektif penguat lentur FRP

d = jarak dari serat tekan ekstrem ke titik pusat tulangan tarik

f_{fe} = tegangan efektif dalam FRP

β_1 = rasio kedalaman blok tegangan persegi panjang ekuivalen terhadap kedalaman sumbu netral

c = jarak dari serat tekan ekstrem ke sumbu netral

Menurut ACI 440 rekomendasi desain adalah berdasarkan pendekatan desain kondisi kekuatan limit. Pendekatan ini menetapkan tingkat keamanan yang dapat diterima pada batas kondisi layan yang terjadi, batas kemampuan layan (kelebihan defleksi dan keretakan) dan kekuatan ultimit (keruntuhan, *stress rupture*, dan *fatigue*).

Dalam menentukan kemampuan nominal, mode kegagalan yang dapat terjadi dan regangan dan tegangan masing-masing material harus dapat dinilai. Untuk mengevaluasi kemampuan layannya, berdasarkan prinsip keteknikan, termasuk perhitungan perubahan bentuk dapat menggunakan Modular ratio.

Untuk menghitung kapasitas rekatan FRP-S maka perlu dihitung terlebih dahulu nilai lengan momen z . Nilai lengan momen ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2). Namun nilai c dalam persamaan (3) belum diketahui sehingga nilai c ini perlu dihitung terlebih dahulu.

Untuk memperoleh nilai c dalam persamaan (2) maka digunakan persamaan (3) 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-S ultimit untuk menghitung kapasitas tarik ultimit yang terjadi.

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

$$z = \frac{\varepsilon_c h}{\varepsilon_f + \varepsilon_c} \dots\dots\dots (3)$$

dimana :

z = lengan momen

h = tinggi balok

c = tinggi blok tegangan ekuivalen

ε_c = regangan beton

ε_f = regangan FRP

Kapasitas tarik ultimit T_u dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4). Nilai kapasitas tarik ultimit T_u sendiri diperoleh dengan cara membagi nilai momen ultimit M_u dengan lengan momen z sesuai dengan prinsip kesetimbangan gaya.

$$T_u = \frac{M_u}{\left(h - \frac{1}{2}c\right)} \dots\dots\dots (4)$$

dimana :

T_u = Kapasitas Tarik Ultimit

h = tinggi balok

c = tinggi blok tegangan ekuivalen

M_u = Momen ultimit

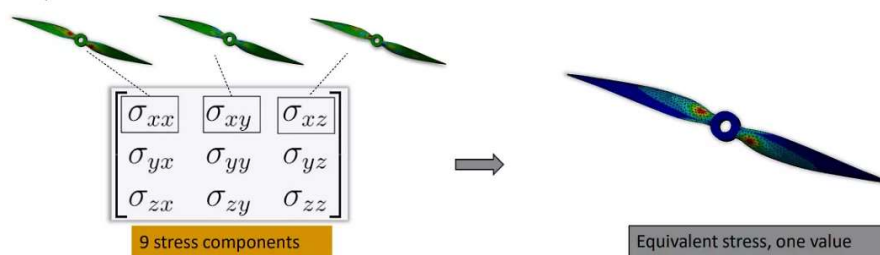
2.5 FEM menggunakan ANSYS

ANSYS, Inc. adalah perusahaan publik Amerika yang berbasis di Canonsburg, Pennsylvania. Perusahaan ini mengembangkan dan memasarkan produk perangkat lunak simulasi teknik. Perangkat lunak ANSYS digunakan untuk merancang dan menganalisis desain produk dan semikonduktor, serta melakukan simulasi uji kemampuan daya tahan produk, distribusi suhu, pergerakan fluida, dan sifat elektromagnetik. ANSYS mengembangkan dan memasarkan perangkat lunak analisis elemen hingga yang digunakan untuk mensimulasikan masalah teknik. Perangkat lunak ini membuat model struktur komputer yang disimulasikan, elektronik, atau komponen mesin untuk mensimulasikan kekuatan, ketangguhan, elastisitas, distribusi suhu, elektromagnetik, aliran fluida, dan lainnya.

ANSYS digunakan untuk menentukan bagaimana suatu produk atau model akan berfungsi dengan spesifikasi yang berbeda, tanpa membuat produk uji atau melakukan uji hancur. Sebagian besar simulasi ANSYS dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Workbench*, yang merupakan salah satu produk bawaan utama perusahaan. Biasanya pengguna ANSYS memecah struktur yang lebih besar menjadi komponen kecil yang masing-masing dimodelkan dan diuji secara individual. Pengguna ANSYS dapat memulai dengan mendefinisikan dimensi suatu objek, dan kemudian menambahkan berat, tekanan, suhu, beserta sifat-sifat fisik lainnya. Lalu, perangkat lunak ANSYS akan mensimulasikan dan menganalisis pergerakan, kelelahan, aliran fluida, distribusi suhu, efisiensi elektromagnetik, dan efek lainnya dari step ke step. Pada penelitian kali ini, digunakan ANSYS *Workbench* untuk menyelesaikan simulasi struktural pada pemodelan balok dengan perkuatan lapisan FRP.

2.5.1 Tegangan Ekuivalen Von Mises

Menurut kriteria luluh von Mises, material tidak akan runtuh selama nilai maksimum dari energi distorsi tidak melebihi tegangan luluh dari energi distorsi berdasarkan hasil pengujian tarik material. Tegangan von Mises adalah nilai tegangan ekuivalen yang digunakan untuk menentukan apakah material akan mulai luluh, di mana material tertentu tidak akan luluh selama nilai tegangan von Mises maksimum tidak melebihi kekuatan luluh material.



Gambar 6. Konsep tegangan ekuivalen von mises pada program ANSYS.

Dalam perangkat lunak ANSYS, tegangan ekuivalen biasanya dihitung menggunakan teori tegangan von Mises, yang digunakan untuk menentukan apakah suatu material akan mengalami kegagalan plastis dibawah beban. Tegangan von Mises digunakan untuk menyederhanakan kondisi berbagai tegangan kompleks menjadi satu nilai yang dapat dibandingkan dengan tegangan leleh material. Berikut adalah rumus tegangan ekuivalen von Mises yang digunakan dalam ANSYS.

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)]} \dots\dots\dots(5)$$

dimana :

$\sigma_x \sigma_y \sigma_z$ = Komponen tegangan normal pada arah x,y,z yang bekerja tegak lurus pada bidang-bidang tersebut.

$\sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{zx}$ = Komponen tegangan geser yang bekerja pada bidang-bidang antara sumbu x,y,dan z.

σ_{vM} = Nilai tunggal yang mewakili kondisi tegangan pada titik tertentu di dalam material. Jika tegangan ini melebihi tegangan leleh material, maka material dianggap memasuki kondisi plastis atau gagal.

Dalam ANSYS, hasil analisis tegangan von Mises digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi desain atau komponen. *Contour Plot* tegangan ekuivalen von Mises dalam output simulasi elemen hingga dapat digunakan untuk melihat distribusi tegangan di seluruh bagian model. Kemudian, nilai ini dapat dibandingkan dengan tegangan leleh material untuk menentukan tingkat keamanan struktur atau komponen. Jika nilai tegangan ekuivalen von Mises di suatu titik melampaui tegangan leleh material (yang ditentukan dari data material di ANSYS), maka material di area tersebut dianggap akan mengalami deformasi plastis atau mungkin gagal.

2.5.2 Mesh

Mesh adalah pembagian geometris suatu objek atau struktur ke dalam elemen-elemen kecil. Proses ini dilakukan untuk memungkinkan perangkat lunak FEA seperti ANSYS menyelesaikan persamaan diferensial yang mendefinisikan perilaku fisik struktur. *Mesh* memungkinkan simulasi perilaku struktur secara numerik di bawah berbagai jenis beban, seperti gaya, tekanan, panas, dan lain-lain. *Mesh* adalah representasi diskret dari domain berkelanjutan yang dipecah menjadi sejumlah elemen kecil. Setiap elemen memiliki bentuk sederhana, seperti tetrahedron, hexahedron, atau segitiga (dalam 2D), dan didefinisikan oleh simpul-simpul (nodes) di sudut-sudutnya. Dengan membagi objek menjadi elemen kecil, solusi analitik dari persamaan diferensial dapat dihitung secara numerik pada setiap elemen dan kemudian digabungkan untuk menghasilkan solusi keseluruhan.

Pada ANSYS *Workbench*, salah satu cara untuk memeriksa apakah *mesh* cukup baik adalah melalui analisis konvergensi *mesh*. Ini dilakukan dengan

menjalankan simulasi menggunakan *mesh* yang lebih halus dan lebih kasar, kemudian memeriksa apakah hasil (seperti tegangan atau deformasi) telah stabil dengan perubahan *mesh*. Jika hasil tidak banyak berubah meskipun *mesh* diperkecil, maka *mesh* tersebut dianggap telah cukup akurat.

ANSYS menyediakan metode *mesh* otomatis di mana perangkat lunak menentukan jenis elemen dan ukuran *mesh* berdasarkan geometri model dan pengaturan yang telah diatur oleh pengguna. Ini berguna untuk geometri kompleks dan memungkinkan pemodelan cepat. Pengguna juga bisa mengontrol dan mengatur *mesh* secara manual, memilih jenis elemen, ukuran *mesh*, dan metode pemecahan yang diinginkan.

2.5.3 Iteration

Iterasi adalah suatu metode dalam matematika dan ilmu komputasi yang digunakan untuk menemukan solusi dari suatu persamaan atau sistem persamaan melalui pendekatan bertahap, atau melalui perbaikan solusi secara berulang hingga mencapai solusi yang mendekati nilai yang stabil. Dalam banyak kasus, solusi tidak bisa ditemukan secara langsung melalui metode analitik, terutama untuk persamaan non-linier atau sistem yang kompleks. Oleh karena itu, iterasi menjadi salah satu pendekatan untuk mendapatkan solusi numerik yang akurat.

Iterasi melibatkan pengulangan proses perhitungan berdasarkan perkiraan awal, di mana setiap langkah memperbaiki solusi yang dihasilkan dari langkah sebelumnya. Proses ini terus dilakukan hingga solusi memenuhi kriteria konvergensi yang telah ditentukan, yaitu ketika perbedaan antara dua solusi berturut-turut sangat kecil atau tidak signifikan.

Proses iterasi didasarkan pada fungsi iterasi yang menghasilkan solusi baru dengan menggunakan solusi sebelumnya. Fungsi iterasi ini bisa berbentuk persamaan matematis, algoritma, atau metode numerik tertentu.

Dalam konteks ANSYS, rumus metode iterasi yang umum digunakan adalah rumus untuk metode Newton-Raphson, yang digunakan untuk menyelesaikan sistem persamaan non-linier yang muncul dalam analisis elemen hingga.

$$\Delta u_{n+1} = \Delta u_n - K^{-1}(F) \dots\dots\dots(5)$$

Δu_{n+1} adalah perpindahan pada iterasi berikutnya

Δu_n adalah perpindahan pada iterasi saat ini

K^{-1} adalah invers dari matriks kekakuan

2.5.4 Material Model

Material model pada ANSYS merupakan elemen dalam simulasi numerik untuk memprediksi respons material terhadap kondisi pembebanan. Penentuan material model dilakukan mewakili perilaku pemodelan, tergantung pada sifat material dan jenis pembebanan yang diberikan. Berikut beberapa jenis material model yang umum digunakan dalam simulasi elemen hingga.

1. Linear Elastic

Model elastis linier mengikuti hukum Hooke yang menyatakan bahwa tegangan (*stress*) sebanding dengan regangan (*strain*), selama material beroperasi dalam batas elastisitasnya.

Material yang mengikuti hukum elastis linier akan kembali ke bentuk dan ukuran semula setelah beban dilepaskan, asalkan tidak melampaui batas elastisitas. Model ini digunakan untuk memodelkan material yang mengalami deformasi kecil dan memiliki respons yang proporsional terhadap beban.

Material elastis linier digunakan dalam analisis di mana deformasi kecil diharapkan, dan material tetap dalam batas elastis. Parameter utama yang

menentukan respons material elastis linier adalah modulus elastisitas (E) dan Poisson's ratio (ν). Poisson's ratio menggambarkan rasio antara perubahan regangan lateral dan regangan aksial.

2. Non-Linear Elastic

Model elastis non-linier menggambarkan material yang tidak memiliki hubungan linier antara tegangan dan regangan, tetapi masih bersifat elastis. Meskipun material menunjukkan respons non-linier terhadap beban, material tetap kembali ke bentuk asalnya setelah beban dilepaskan.

Material elastis non-linier diwakili oleh kurva tegangan-regangan yang tidak berbentuk garis lurus, dan berbeda tergantung pada sifat materialnya. Model elastis non-linier digunakan untuk material yang menunjukkan deformasi besar, tetapi tetap kembali ke bentuk awal ketika beban dihilangkan. Kurva tegangan-regangan digunakan sebagai parameter utama untuk mengkarakterisasi hubungan non-linier antara tegangan dan regangan.

3. Plastic

Model plastis digunakan untuk memodelkan material yang mengalami deformasi permanen setelah mencapai tegangan leleh (*yield strength*). Setelah tegangan ini tercapai, material tidak lagi berperilaku elastis dan mengalami deformasi plastis yang tidak bisa dikembalikan ke bentuk semula.