

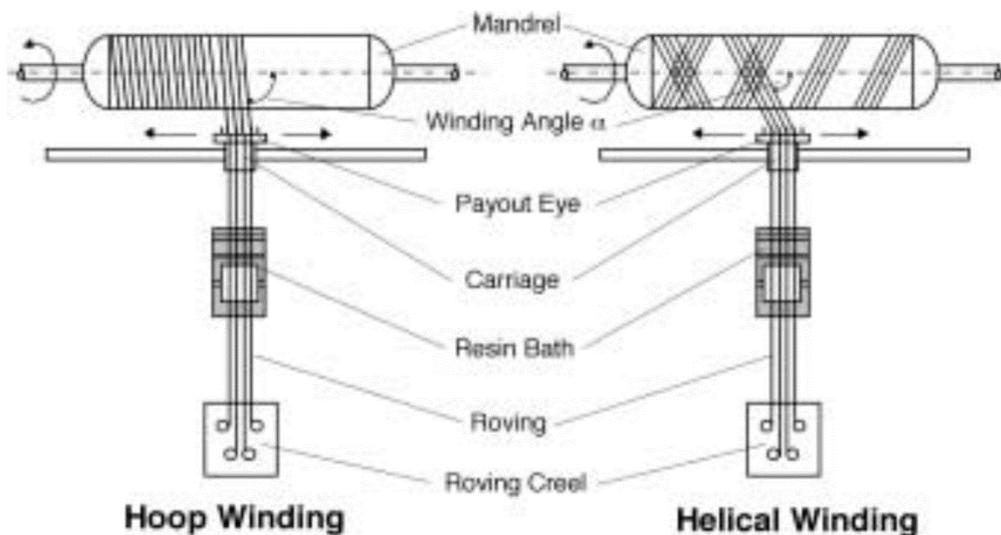
BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 *Composite Overwrapped Pressure Vessel (COPV)*

Composite overwrapped pressure vessel (COPV) merupakan sebuah bejana tekan yang dibalut atau dilapisi oleh serat komposit. COPV biasa digunakan sebagai tempat atau wadah fluida yang memiliki tekanan yang tinggi, seperti oksigen, gas alami terkompresi, gas helium, dan lain sebagainya. COPV terdiri dari dua lapisan, di mana lapisan pertama berfungsi mencegah kebocoran, sedangkan lapisan kedua berfungsi untuk menahan tekanan yang diterima oleh bejana tekan. Lapisan pertama biasanya terbuat dari logam, sedangkan lapisan kedua terbuat dari komposit. [7]

COPV diklasifikasikan menjadi dua tipe, pertama adalah tipe dimana komposit dililitkan atau dibalut hanya pada bagian silindernya saja dengan metode pembalutan *hoop winding*. Pada tipe kedua komposit dililitkan atau dibalut di seluruh permukaan tabung yang meliputi *cylinder* dan *dome* dengan metode pembalutan *helical winding* yang dapat dilihat pada gambar 2.1. Dari dua tipe tersebut, metode *helical winding* memiliki kelebihan dibandingkan metode *hoop winding* terutama dalam kekuatannya. Metode *helical winding* dapat menghasilkan kekuatan lebih besar dan bobot tabung yang lebih ringan dikarenakan seluruh bagian tabung terselimuti atau terbalut oleh komposit. Maka dari itu ketebalan dari *cylinder liner* atau lapisan pertama COPV yang terbuat dari logam akan semakin tipis ketebalannya, terutama pada bagian *dome*. [5]



Gambar 2.1 *Winding pattern* [5]

2.2 Material Komposit

Material komposit merupakan material yang terbentuk dari kombinasi antara dua atau lebih material pembentuknya melalui pencampuran yang tidak homogen, di mana sifat mekanik dari masing-masing material pembentuknya berbeda. Material komposit memiliki kelebihan dibanding dengan logam, yaitu :

- sifat mekanik yang lebih baik,
- kekuatan mampu atur yang tinggi (*tailorability*),
- kekuatan lelah (*fatigue*) yang baik,
- kekuatan jenis (*strength/weight*) dan kekakuan jenis (*modulus young/density*) yang lebih tinggi,
- tahan korosi,
- memiliki sifat isolator panas dan suara,
- dapat dijadikan sebagai penghambat listrik yang baik, dan
- dapat digunakan untuk menambal kerusakan akibat pembebanan dan korosi

Ada tiga faktor yang menentukan sifat-sifat dari material komposit, yaitu:

1. Material Pembentuk

Sifat-sifat intrinsik material pembentuk memegang peranan yang sangat penting terhadap pengaruh sifat kompositnya.

2. Susunan Struktural Komponen

Di mana bentuk serta orientasi dan ukuran tiap-tiap komponen penyusun struktur dan distribusinya merupakan faktor penting yang memberi kontribusi dalam penampilan komposit secara keseluruhan.

3. Interaksi antar Komponen

Karena komposit merupakan campuran atau kombinasi komponen-komponen yang berbeda baik dalam hal bahannya maupun bentuknya, maka sifat kombinasi yang diperoleh pasti akan berbeda.

Secara umum material komposit tersusun dari dua komponen utama yaitu *matrik* (bahan pengikat) dan *filler* (bahan pengisi). *Filler* adalah bahan pengisi yang digunakan dalam pembuatan komposit, biasanya berupa serat atau serbuk. Gibson (1984) mengatakan bahwa *matrik* dalam struktur komposit bisa berasal dari bahan polimer, logam, maupun keramik. *Matrik* secara umum berfungsi untuk mengikat serat menjadi satu struktur komposit. Berdasarkan bahan penguat, material komposit dapat diklasifikasikan menjadi komposit serat, komposit lamina, komposit partikel, dan komposit serpihan. [11]

2.2.1 Komposit Serat (*Fiber Composite*)

Komposit serat merupakan jenis komposit yang menggunakan serat sebagai penguat. Serat yang digunakan biasanya berupa serat gelas, serat karbon, serat aramid, dan sebagainya. Serat ini bisa disusun secara acak maupun dengan orientasi tertentu bahkan bisa juga dalam bentuk yang lebih kompleks seperti anyaman. Bila peningkatan kekuatan menjadi tujuan utama, komponen penguat harus mempunyai rasio aspek yang besar, yaitu rasio panjang terhadap diameter harus tinggi, agar beban ditransfer melewati titik yang mungkin terjadi perpatahan (Vlack L. H., 2004).

Tinggi rendahnya kekuatan komposit sangat tergantung dari serat yang digunakan, karena tegangan yang dikenakan pada komposit mulanya diterima oleh *matrik* akan diteruskan kepada serat, sehingga serat akan menahan beban sampai beban maksimum. Oleh karena itu serat harus mempunyai tegangan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada *matrik* penyusun komposit (Vlack L. H., 1985).

Komposit yang diperkuat dengan serat dapat digolongkan menjadi dua bagian yaitu:

a. Komposit Serat Pendek (*Short Fiber Composite*)

Berdasarkan arah orientasi material komposit yang diperkuat dengan serat pendek dapat dibagi lagi menjadi dua bagian yaitu serat acak (*inplane random orientasi*) dan serat satu arah. Tipe serat acak sering digunakan pada produksi dengan volume besar karena faktor biaya manufakturnya yang lebih murah. Kekurangan dari jenis serat acak adalah sifat mekanik yang masih dibawah dari penguatan dengan serat lurus pada jenis serat yang sama. [11]

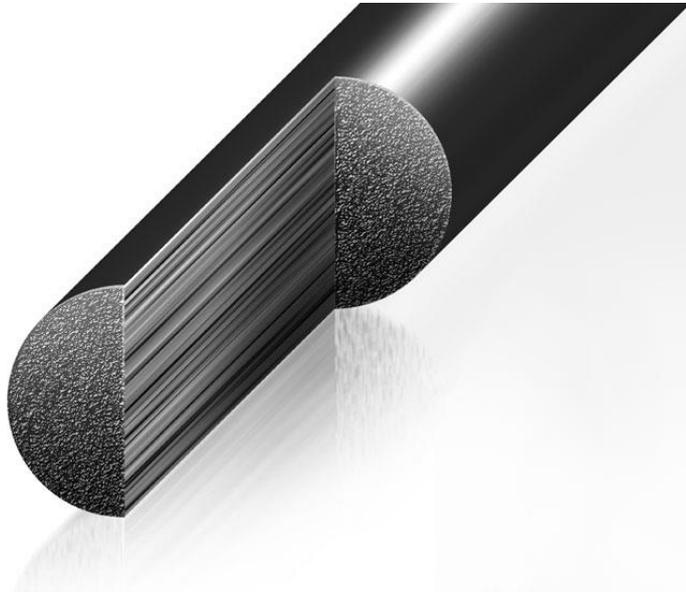


Gambar 2.2 *Short Fiber Composite* [13]

b. Komposit Serat Panjang (*Long Fiber Composite*)

Keistimewaan komposit serat panjang adalah lebih mudah diorientasikan, jika dibandingkan dengan serat pendek. Secara teoritis serat panjang dapat menyalurkan

pembebanan atau tegangan dari suatu titik pemakaiannya. Perbedaan serat panjang dan serat pendek yaitu serat pendek dibebani secara tidak langsung atau kelemahan *matriks* akan menentukan sifat dari produk komposit tersebut yakni jauh lebih kecil dibandingkan dengan besaran yang terdapat pada serat panjang. [11]



Gambar 2.3 *Long Fiber Composite* [13]

2.3 *Compressed Natural Gas (CNG)*

CNG adalah jenis bahan bakar yang berasal dari gas alam yang terkompresi pada tekanan penyimpanan 200-250 bar dan dapat digunakan sebagai bahan bakar pengganti LPG, solar dan bensin. Bahan bakar ini dianggap lebih ramah lingkungan walaupun masih mengeluarkan sedikit CO₂ sebagai hasil pembakarannya. Namun jika dibandingkan dengan solar dan bensin, bahan bakar ini lebih ramah lingkungan. Selanjutnya jika ditinjau dari segi harga, bahan bakar ini lebih ekonomis (murah) bila dibandingkan dengan bahan bakar lainnya. Proses pembuatan CNG dilakukan dengan cara mengkompresi metana (CH₄) yang diekstrak dengan gas alam. Dalam penyimpanan dan pendistribusiannya, CNG disimpan menggunakan bejana silinder yg bertekanan. [1]

CNG merupakan gas alam yang memiliki bobot yang lebih ringan dari pada udara sehingga jika ada kebocoran pada gas maka akan cepat menguap ke atas. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan CNG lebih aman dibandingkan BBM atau LPG, selain itu gas ini bentuknya murni gas bukan turunan dari minyak. Tabung yang digunakan untuk menyimpan CNG dalam kendaraan berbeda dengan tabung yang digunakan untuk VIGAS (LGV), karena perbedaan tekanan tabung yang digunakan harus mampu menahan tekanan

hingga 200–250 bar (*Working Pressure*). [8] Selain itu, harga CNG lebih menguntungkan dari pada bahan bakar yang lainnya, di antaranya :

1. Pembakaran lebih efisien karena proses pencampuran udara dengan CNG relatif lebih cepat terjadi karena kedua liquid tersebut berbentuk gas.
2. Tidak akan menimbulkan kerak pada mesin khususnya pada ruang pembakaran sehingga mesin menjadi lebih bersih.
3. Polusi yang dihasilkan lebih rendah.
4. Harga CNG lebih kompetitif dibandingkan dengan bahan bakar lainnya.
5. Kendaraan yang menggunakan bahan bakar CNG, proses perawatannya relatif lebih mudah jika dibandingkan dengan kendaraan yang menggunakan bahan bakar minyak.
6. CNG menggunakan *system sealing* yang baik, dalam hal mencegah kebocoran sehingga penyimpanannya lebih efisien karena kemungkinan *losses* sangat kecil.
7. Memperpanjang umur pelumas kendaraan (oli), karena CNG tidak akan mengkontaminasi oli mesin. [1]

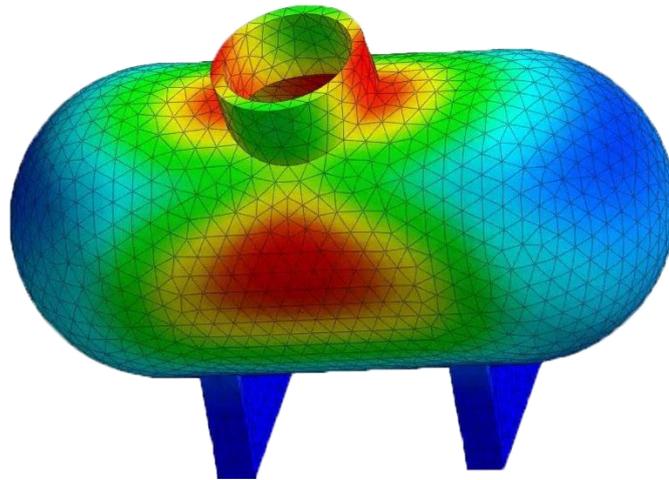
2.4 *Finite Element Method (FEM)*

2.4.1 Definisi

Finite Element adalah salah satu dari metode numerik yang memanfaatkan operasi *matrix* untuk menyelesaikan masalah-masalah fisik. Metode lainnya adalah metode analitik, untuk melakukannya diperlukan suatu persamaan matematik yang merupakan model dari perilaku fisik. Semakin rumit perilaku fisiknya (karena kerumitan bentuk geometri, banyaknya interaksi beban, *constrain*, sifat material, dan lain-lain) maka semakin sulit atau bahkan mustahil dibangun suatu model matematik yang bisa mewakili permasalahan tersebut. Alternatif metodenya adalah dengan cara membagi kasus tadi menjadi bagian-bagian kecil yang sederhana yang mana pada bagian kecil tersebut kita bisa membangun model matematik dengan lebih sederhana. Kemudian interaksi antar bagian kecil tersebut ditentukan berdasarkan fenomena fisik yang akan diselesaikan. Metode ini dikenal sebagai metode elemen hingga, karena kita membagi permasalahan menjadi sejumlah elemen tertentu (*finite*) untuk mewakili permasalahan yang sebenarnya jumlah elemennya adalah tidak berhingga (kontinum). [10]

Finite element analysis (FEA) adalah suatu cara atau metode numeris untuk mendapatkan penyelesaian dari persamaan diferensial maupun persamaan integral. Penyelesaian persamaan diferensial didasarkan pada penyederhanaan persamaan diferensial yang kompleks dan banyak menjadi persamaan diferensial biasa, kemudian diselesaikan dengan mengintegalkan secara numeris dengan menggunakan metode *Euler* atau *Runge-*

Kutta. Dalam FEA, obyek baik berupa luasan (2D) maupun volume (3D) dipecah menjadi elemen kecil-kecil kemudian dengan memasukan nilai batasan (biasanya pada permukaan) dan nilai awal (sebagai *trial and error*) pada rumus-rumus yang ada (misalnya persamaan diferensial). Perhitungan seperti itu dilakukan berulang-ulang (iterasi) sehingga diperoleh hasil yang tepat (masuk toleransi). Perhitungan ini bila dilakukan secara manual akan sulit dan memerlukan waktu yang lama, namun dengan bantuan sebuah computer, perhitungan menjadi mudah dan cepat. Dengan perkembangan computer yang pesat, maka bermunculan banyak *software* FEA untuk membantu merancang suatu komponen dan *system*. [4]



Gambar 2.4 *Finite elements of pressure vessel* [3]

Komponen mekanis dalam bentuk batang atau balok sederhana, dapat dianalisis dengan metode dasar mekanika. Namun kenyataannya sangat jarang komponen mekanis berbentuk sederhana, sehingga membutuhkan metode numerik yang lebih kompleks. Oleh sebab itulah tercipta metode elemen hingga. Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis dari suatu gejala phisis.

Metode elemen hingga membagi (*discretizes*) struktur menjadi kecil tetapi terbatas, yang didefinisikan dengan baik, substruktur elastis (elemen). Dengan menggunakan fungsi polinomial dan dengan operasi matriks, perilaku elastis setiap elemen terus menerus dikembangkan dalam hal material elemen dan sifat geometris. Beban dapat diterapkan dalam elemen (gravitasi, dinamis, termal, dll), pada permukaan elemen, atau di nodal elemen. Nodal elemen adalah yang mengatur dasar elemen, karena nodal di elemen menghubungkan elemen

unsur lain, di mana sifat elastis dari elemen yang akhirnya perlihatkan, jika kondisi batas yang ditetapkan, dan akhirnya diterapkan. Sebuah nodal memiliki derajat kebebasan (DOF).

Derajat kebebasan adalah gerak translasi dan rotasi independen yang ada di nodal. Sebagian besar, nodal dapat memiliki tiga gerak translasi dan tiga gerak rotasi dari derajat kebebasan. Setelah setiap elemen dalam struktur didefinisikan secara lokal dalam bentuk matriks, kemudian elemen di satukan secara global melalui nodal (DOF) mereka ke dalam sistem matriks secara keseluruhan. Kemudian penerapan beban dan kondisi batas ditentukan melalui operasi matriks, nilai dari semua perpindahan derajat kebebasan tidak diketahui sehingga harus ditentukan. Setelah hal itu dilakukan, hal ini menjadi masalah sederhana untuk menggunakan perpindahan dalam menentukan regangan dan tegangan didalam persamaan konstitutif melalui elastisitas. Metode elemen hingga adalah metode numerik domain diskritisasi dari struktur secara berkelanjutan sehingga kesalahan pun mungkin terjadi. Kesalahannya yaitu :

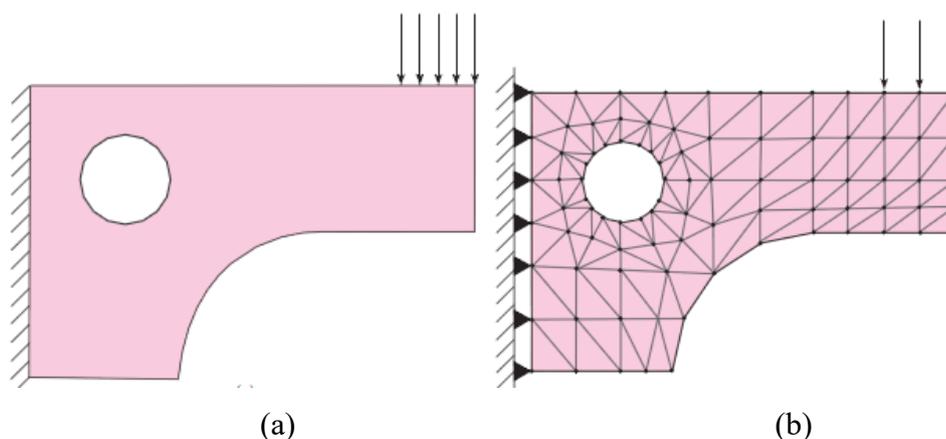
1. Kesalahan komputasi

Kesalahan ini adalah karena perhitungan komputer dan formulasi dari skema integrasi numerik yang digunakan. Untuk tujuan komersial kebanyakan kode batasan elemen adalah berkonsentrasi pada pengurangan dalam kesalahan ini dan akibatnya analisis umumnya berkaitan dengan diskritisasi faktor.

2. Kesalahan diskritisasi

Geometri dan distribusi perpindahan struktur yang sebenarnya terus menerus bervariasi. Menggunakan jumlah elemen terbatas untuk model struktur dapat menerangkan kesalahan dalam pencocokan geometri dan distribusi perpindahan karena keterbatasan matematika yang melekat pada elemen.

Berikut ini adalah contoh kesalahan dalam diskritisasi dengan ketebalan yang konstan pada struktur plat tipis ditunjukkan pada gambar 2.5a dan gambar 2.5b :



Gambar 2.5 (a) Pemberian Beban pada Suatu Plat; (b) Model Elemen Hingga [6]

Elemen struktur dimodelkan dengan elemen hingga dengan menerapkan tiga nodal, tegangan bidang, elemen segitiga sederhana. Tipe elemen tersebut memiliki lubang dengan dua masalah dasar. Elemen yang memiliki sisi lurus tetap lurus setelah deformasi. Regangan seluruh bidang (*plane stress*) elemen segitiga adalah konstan. Masalah pertama, geometri dimodelkan dengan kurva lengkung tepi. Catatan bahwa model permukaan dengan besar kelengkungan terlihat kurang dimodelkan, sedangkan permukaan lubang tampaknya cukup dimodelkan.

Masalah kedua, yang jauh lebih parah, adalah bahwa regangan di berbagai daerah struktur sebenarnya berubah dengan cepat, dan konstanta elemen regangan hanya akan memberikan perkiraan dari regangan rata-rata di tengah elemen. Jadi secara singkatnya, hasil diprediksi model ini akan sangat kurang. Hasilnya dapat ditingkatkan secara signifikan dengan meningkatkan jumlah elemen (kerapatan *mesh*) atau menggunakan elemen yang lebih baik, seperti segiempat delapan nodal, yang lebih cocok untuk aplikasi ini, sehingga akan memberikan peningkatan hasil. Karena interpolasi fungsi orde tinggi yaitu delapan nodal elemen segiempat dapat dimodelkan lengkung tepi dan menyediakan fungsi tingkat tinggi untuk distribusi regangan. [6]

2.4.2 Jenis-Jenis *Finite Element Method*

Secara umum ada beberapa jenis metode di dalam *Finite Element Method* (FEM) yang bisa digunakan untuk mengatasi masalah-masalah yang ada di dalam dunia teknik. Perluasan dari metode *finite element* tersebut memang banyak macamnya. Berikut beberapa perluasan dari *Finite Element Method* (FEM).

1. *hp*-FEM

hp- FEM adalah versi umum dari metode elemen hingga (FEM), sebuah numerik metode untuk memecahkan persamaan diferensial parsial berdasarkan perkiraan *piecewise*-polinomial menggunakan unsur-unsur variabel ukuran (h) dan derajat polinomial (p).

2. *Extended finite element method* (XFEM)

Extended finite element method (XFEM) adalah metode teknik numerik yang memperpanjang klasik metode elemen hingga (FEM) dengan pendekatan memperluas ruang untuk solusi-solusi untuk persamaan diferensial dengan fungsi kontinu.

3. *Spectral method*

Metode spektral adalah sebuah teknik yang digunakan dalam matematika terapan dan komputasi ilmiah tertentu untuk menyelesaikan secara numerik dengan menggunakan

persamaan diferensial parsial (PDEs), dan sering juga melibatkan penggunaan *fast fourier transform*. Metode spektral memiliki tingkat *error* yang sangat baik yang disebut dengan “*exponential convergen*” sehingga membuat metode ini menjadi yang tercepat.

4. *Meshfree method*

Metode *meshfree* merupakan kelas tertentu dari *numerical simulation algorithms* untuk mensimulasikan fenomena-fenomena yang berupa fisik. Simulasi algoritma tradisional mengandalkan pada *grid* atau *mesh* sedangkan metode *meshfree* menggunakan pendekatan simulasi geometri dalam penghitungannya. Hal ini menjadi salah satu kelebihan dari metode *meshfree* dibanding dengan metode konvensional.

5. *Discontinuous galerkin method*

Metode Galerkin diskontinu pertama kali diusulkan dan dianalisis pada awal 1970-an sebagai suatu teknik untuk menyelesaikan secara numerik persamaan diferensial parsial. Pada tahun 1973 Reed dan Hill memperkenalkan metode *Discontinuous Galerkin* untuk memecahkan persamaan transpor neutron hiperbolik. Metode ini digunakan untuk memecahkan persamaan diferensial parsial dengan menggabungkan fitur dari *finite element* dan *volume element*, dan berhasil diaplikasikan untuk ukuran seperti hiperbolik, elips dan parabola. [2]

Dengan demikian, untuk menghitung ketebalan tabung bejana tekan dan menghitung ketebalan serat kompositnya, akan sangat banyak persamaan yang digunakan dan metode perhitungan yang bervariasi, maka dari itu untuk mempermudah dan mempersingkat perhitungan digunakan metode elemen hingga (*finite element method*) dibantu dengan aplikasi. Langkah-langkah FEM dimulai dengan pemodelan desain dengan CAD dan diberikan variasi ketebalan untuk selanjutnya disimulasikan pada aplikasi dengan metode *finite element analysis* (FEA) untuk mengetahui nilai akhir dari setiap ketebalan yang beragam dengan ketentuan pemilihan hasil akhir yaitu tegangan struktur dibawah tegangan yang diizinkan.