

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

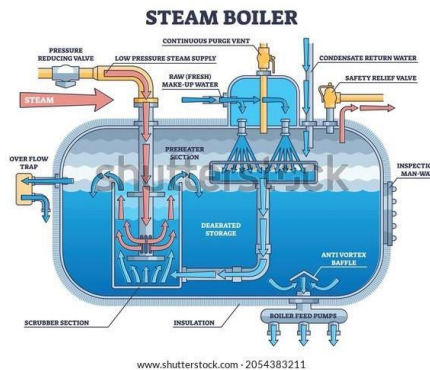
Boiler merupakan bejana tertutup yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap, dengan proses pemanasan yang dilakukan dengan menggunakan bahan bakar seperti padat, cair, dan gas. *Boiler* adalah alat yang digunakan sebagai pengering atau pengubah konsentrasi molekul air menjadi molekul uap air, yang akan digunakan dalam berbagai kegiatan sehari-hari maupun industri.

2.1 Pengertian dan Prinsip Kerja *Boiler*

Boiler merupakan alat yang berbentuk bejana tertutup yang terbuat dari baja yang digunakan menghasilkan uap. Uap yang diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar. Prinsip kerja *boiler* melibatkan perpindahan kalor dari sumber pembakaran, yang biasanya berupa bahan bakar ke air yang berada di dalam *boiler*. Akibat pemanasan ini, air menjadi panas dan berubah wujud menjadi uap. Proses ini melibatkan perubahan berat jenis air di dalam *boiler*, dimana air menjadi lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dan cenderung naik, sedangkan air yang lebih dingin dengan berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar. Proses ini memungkinkan terjadinya sirkulasi air dan distribusi panas yang efisien di dalam *boiler* (Situmorang, 2021).

Boiler berfungsi untuk menghasilkan uap yang akan digunakan untuk kebutuhan proses industri, membangkitkan listrik untuk kebutuhan pabrik, atau disalurkan ke perumahan karyawan di sekitar pabrik. Efisiensi termal boiler

didefinisikan sebagai persen energi (panas) masuk yang digunakan secara efektif pada uap yang dihasilkan. Efisiensi *boiler* dinyatakan sebagai perbandingan panas sebenarnya yang digunakan untuk memanaskan air dan pembentukan uap terhadap panas hasil pembakaran bahan bakar di dalam dapur (Situmorang, 2021).



Gambar 2.1 Prinsip kerja *boiler*

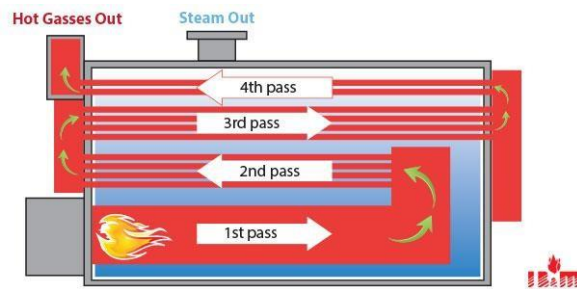
2.2 Klasifikasi *Boiler*

Boiler merupakan peralatan yang penting dalam industri dan pembangkit listrik untuk menghasilkan uap yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. Berdasarkan konstruksi dan prinsip kerjanya, *boiler* dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama yaitu diantaranya : *boiler* pipa api, pipa air, dan combi.

2.2.1 *Boiler* Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Boiler pipa api yaitu jenis *boiler* dimana gas panas melewati satu atau beberapa tabung yang berisi air disekelilingnya. Panas dari gas tersebut ditransfer melalui dinding tabung ke air, menghasilkan uap. *Boiler* pipa api umumnya digunakan untuk operasi dengan tekanan uap rendah hingga sedang. Kelebihan dari *boiler* pipa api termasuk kemudahan pengoperasian, perawatan yang mudah dan murah, serta biaya awal yang lebih rendah dibandingkan dengan *boiler* pipa air. Namun, *boiler* ini memiliki efisiensi perpindahan panas yang lebih rendah dan waktu yang lebih lama

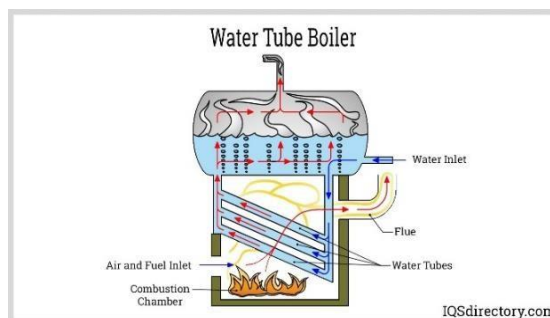
untuk meningkatkan suhu dan tekanan air.



Gambar 2.2 *Boiler Pipa Api*

2.2.2 *Boiler Pipa Air (Water Tube Boiler)*

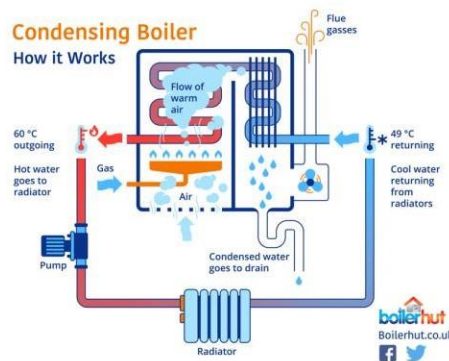
Berbeda dengan *boiler* pipa api, pada *boiler* pipa air, air mengalir di dalam tabung-tabung yang dikelilingi oleh gas panas. Hal ini memungkinkan *boiler* pipa air beroperasi pada tekanan uap yang lebih tinggi dan menghasilkan uap dengan volume yang lebih besar. *Boiler* pipa air lebih disukai untuk aplikasi yang membutuhkan kapasitas uap besar dan tekanan tinggi, seperti di pembangkit listrik tenaga uap. Kelebihan utama dari *boiler* pipa air adalah efisiensi perpindahan panas yang tinggi dan waktu respons yang lebih cepat terhadap perubahan beban. Namun, *boiler* ini memiliki biaya awal yang lebih tinggi dan membutuhkan perawatan yang lebih kompleks dibandingkan dengan *boiler* pipa api.



Gambar 2.3 *Boiler Pipa Air*

2.2.3 *Boiler Combi (Combi Boiler)*

Boiler combi yaitu kombinasi dari *boiler* pipa api dan pipa air, menggabungkan kelebihan dari kedua jenis *boiler* tersebut. *Boiler* ini biasanya memiliki bagian pipa api untuk pemanasan awal air dan bagian pipa air untuk menghasilkan uap pada tekanan yang lebih tinggi. *Boiler* combi menawarkan fleksibilitas dalam operasi dengan efisiensi yang tinggi dan kemampuan untuk merespons dengan cepat terhadap perubahan beban. *Boiler* jenis ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan efisiensi tinggi dan fleksibilitas operasional.



Gambar 2.4 *Combi Boiler*

2.3 Perhitungan Konstruksi *Boiler*

2.3.1 Tebal Plat

Drum Ketel Jenis *boiler* yang dipilih dari jenis *boiler* pipa api (fire tube). *Boiler* pipa api (fire tube *boiler*) bekerja dengan pipa-pipa api yang berada di dalam silinder tabung. Pemanasan dihasilkan dari pembakaran menggunakan bahan bakar gas di ruang bakar dan menyalurkan panas dengan pipa api. Air berada disekitar permukaan pipa api selanjutnya temperatur air naik dan menghasilkan uap air yang disalurkan ke tempat perebusan. *Boiler* yang akan dirancang merupakan *boiler* dengan kapasitas kecil, sehingga material-material dalam merencanakan *boiler* ini disesuaikan dengan kebutuhan. Badan *boiler* bekerja dengan mendapatkan tekanan dari dalam (Parts Under

Internal Pressure), perhitungan dengan rumus :

Tebal Plat Badan Ketel (t) [ASME Section IV]

$$t = \frac{P \times R}{S \times E - 0,6P} + CA \quad (2.1)$$

Keterangan :

t = Tebal dinding silinder yang dibutuhkan (inch)

P = Tekanan perancangan (design pressure)

S = Kekuatan tegangan maksimum material (psi)

R = Radius dalam silinder (inch)

E = Efisiensi sambungan pada silinder (E = 0.85)

CA = Corrosion Allowance (inch)

(sumber : *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IV, 2023*)

2.3.2 Top Head

Top head merupakan bagian penutup atas dari sebuah bejana tekan yang berfungsi untuk menahan tekanan internal. Perhitungan untuk menentukan ketebalan minimum yang aman pada top head ini mengacu pada metode standar ASME BPVC (Boiler and Pressure Vessel Code). Berdasarkan data parameter yang telah ditetapkan, perhitungan ketebalannya adalah sebagai berikut:

$$t = \frac{P \times R}{(SE \times T - 0,2P)} \quad (2.2)$$

Keterangan :

P = Tekanan operasi (MPa)

R = Jari-jari shell (m)

SE = Kekuatan luluh material (mpa)

T = Efisiensi sambungan las

(sumber : *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IV, 2023*)

2.3.3 Bottom Head

Bottom head adalah bagian penutup bawah pada bejana tekan yang sama seperti top head, berfungsi untuk menahan tekanan internal. Oleh karena itu, perhitungan ketebalan minimum yang dibutuhkan juga menggunakan metode dan parameter yang sama sesuai standar ASME BPVC (Boiler and Pressure Vessel Code). Rumus yang digunakan dalam perhitungan ini adalah sebagai berikut:

$$t = \frac{P \times R}{(SE \times T - 0,2P)} \quad (2.3)$$

Keterangan :

P = Tekanan operasi (MPa)

R = Jari-jari shell (m)

SE = Kekuatan luluh material (mpa)

T = Efisiensi sambungan las

(sumber : *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IV, 2023*)

2.4 Tegangan (*Stress*)

Tegangan merupakan salah satu konsep dalam mekanika bahan yang berhubungan erat dengan analisis struktur, terutama dalam konteks desain dan kekuatan bahan. Tegangan didefinisikan sebagai gaya per satuan luas yang bekerja pada suatu material. Pada *boiler*, salah satu sumber dari tegangan yaitu termasuk tekanan internal dari uap yang dihasilkan. Tegangan dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

Keterangan :

σ : Tegangan (N/m²)

F : Gaya Tarik (N)

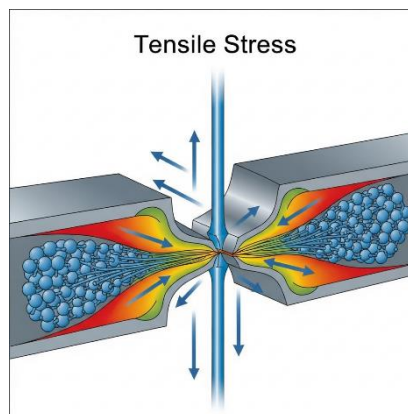
A : Luas Penampang (m^2)

Tegangan dapat dibedakan dalam beberapa jenis, diantaranya :

2.4.1 Tegangan Tarik (*Tensile Stress*)

Tegangan tarik adalah kondisi tegangan yang terjadi ketika gaya eksternal yang bekerja pada suatu material cenderung meregangkan atau memanjangkan material tersebut. Gaya ini bekerja secara aksial (segaris dengan sumbu) dan menarik partikel-partikel material menjauh satu sama lain. Akibatnya, material akan mengalami perpanjangan ke arah gaya yang diterapkan.

Efek pada material yang mengalami tegangan tarik yang diberikan secara terus meningkat, material akan merenggang hingga melewati batas elastisnya (deformasi permanen) dan pada akhirnya akan mencapai titik patah (*fracture*).



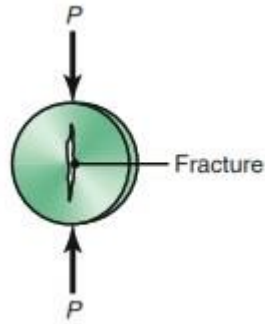
Gambar 2.5 Tegangan Tarik (*Tensile Stress*)

2.4.2 Tegangan Tekan (*Compressive Stress*)

Tegangan tekan adalah kebalikan dari tegangan tarik. Tegangan ini terjadi ketika gaya eksternal yang bekerja pada material cenderung menekan dan memendekkan material tersebut. Gaya ini juga bekerja secara aksial (segaris dengan sumbu), namun arahnya

menekan partikel-partikel material agar saling mendekat.

Efek pada material yang mengalami tegangan tekan akan memendek. Pada material yang ramping, tegangan tekan yang berlebih dapat menyebabkan fenomena tekuk, dimana material melengkung secara tiba-tiba jauh sebelum mencapai kekuatan tekannya.

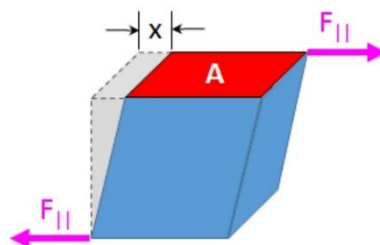


Gambar 2.6 Tegangan Tekan (*Compressive Stress*)

2.4.3 Tegangan Geser (*Shear Stress*)

Tegangan geser terjadi ketika gaya yang bekerja pada material sejajar atau tangensial terhadap permukaan penampang material. Berbeda dengan tegangan tarik dan tekan yang gayanya tegak lurus, gaya geser menyebabkan lapisan-lapisan material bergeser atau meluncur relatif satu sama lain.

Efek pada material yang mengalami tegangan geser yaitu menyebabkan deformasi sudut pada material dan mengubah bentuk.



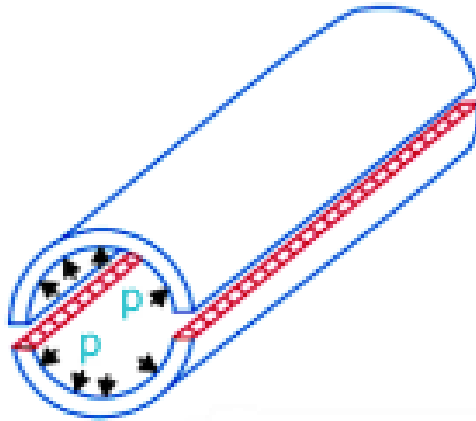
Shear Stress

Gambar 2.7 Tegangan Geser (*Shear Stress*)

2.4.4 Tegangan Lingkaran (*Hoop Stress*)

Tegangan lingkaran juga dikenal sebagai tegangan keliling adalah tegangan yang terjadi pada dinding dalam sebuah objek silinder akibat adanya tekanan internal dari fluida (cairan atau gas) di dalamnya. Tegangan ini bekerja secara tangensial atau sepanjang keliling dinding silinder, tegak lurus terhadap sumbu panjangnya.

Efek pada material yang mengalami tegangan lingkaran menyebabkan dinding bejana mengembang secara radial sehingga terjadi penambahan diameter. Apabila terjadi secara terus menerus, kegagalan yang paling umum adalah robekan atau pecah memanjang sejajar dengan sumbu silinder.



Gambar 2.8 Tegangan Lingkaran (*Hoop Stress*)

Untuk bejana tekan berdinding tipis, tegangan lingkaran dapat dihitung menggunakan rumus matematis sederhana. Rumus ini mengasumsikan bahwa tegangan terdistribusi secara merata di seluruh ketebalan dinding. Rumus yang digunakan untuk menghitung tegangan lingkaran adalah sebagai berikut :

$$\sigma_h = \frac{P \times D}{2t} \quad (2.5)$$

Keterangan :

σ_h = Tegangan lingkar (MPa)

P = Tekanan internal (MPa)

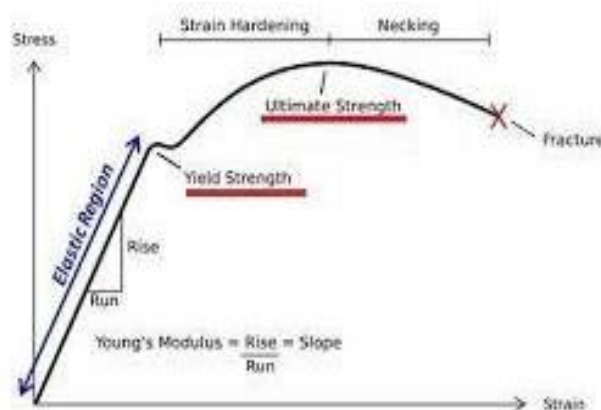
D = Diameter dalam silinder (mm)

t = Tebal dinding silinder (mm)

2.5 Kekuatan Luluh (*Yield Strength*) dan Kekuatan Tarik Maksimum (*Ultimate Tensile Strength*)

Pada material memiliki kekuatan material yang berbeda tergantung pada jenis material yang digunakan. Kekuatan material merupakan kemampuan suatu bahan untuk menahan tegangan tanpa mengalami kerusakan. Setiap material memiliki nilai maksimum tegangan yang dikenal sebagai *yield strength* dan *ultimate tensile strength*.

Yield strength dan *ultimate tensile strength* merupakan dua parameter yang digunakan dalam analisis kekuatan bahan. Dua parameter ini berfungsi untuk menentukan batas aman untuk penggunaan material dan batas maksimum beban yang dapat diberikan sebelum terjadi kerusakan.



Gambar 2.9 Kurva Strength

2.5.1 *Yield Strength* (Kekuatan Luluh)

Merupakan tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh suatu material tanpa mengalami deformasi permanen. Setelah mencapai titik ini, material akan mulai mengalami deformasi plastis. Deformasi plastis merupakan suatu kondisi ketika material tidak akan kembali ke bentuk aslinya. Definisi lain dari *yield strength* yaitu merupakan nilai batas sifat elastis dari suatu material.

2.5.2 *Ultimate Tensile Strength* (Kekuatan Tarik Maksimum)

Merupakan tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh suatu material sebelum mengalami patah atau kerusakan total. Setelah mencapai titik ini, material akan mengalami patah atau kerusakan pada material. Definisi lain dari *ultimate tensile strength* yaitu merupakan nilai batas maksimum beban yang diterima oleh material sebelum mengalami kegagalan.

2.6 Deformasi

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau ukuran pada suatu objek. Dalam mekanika benda padat melibatkan transformasi yang tidak dapat mempertahankan isometri. Deformasi dapat menyebabkan penyusutan, deformasi sudut, tekuk dan deformasi longitudinal. Faktor-faktor yang mempengaruhi deformasi meliputi panas, koefisien ekspansi termal, dan laju konduksi panas. Deformasi plastis, perubahan bentuk permanen, dapat diinduksi melalui penempatan manual.

Deformasi yang terjadi pada *boiler* dapat terjadi karena kebocoran tabung yang sering kali disebabkan oleh panas berlebih dalam jangka pendek dan gangguan aliran uap. Struktur rangka dapat mengalami deformasi, sehingga perlu dilakukan desain ulang dan optimasi material untuk menahan tekanan operasional. Faktor-faktor seperti korosi,

tekanan yang tinggi, serta suhu yang terlalu tinggi dapat mempengaruhi nilai deformasi.

2.7 Persamaan Nilai Tekanan

Pressure atau tekanan merupakan definisi dari gaya normal per satuan luas. Dalam persamaannya, *pressure* memiliki satuan. Satuan SI yang digunakan pada persamaan *pressure* yaitu pascal, dimana 1 pascal = 1 Pa = N/m².

Volume fluida dalam *boiler* adalah hasil perkalian antara luas permukaan *boiler* dengan tinggi fluida dalam *boiler*. Persamaan tekanan hidrostatik dalam *boiler* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$p_h = \frac{\rho(A \cdot h)g}{A} = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.6)$$

Keterangan :

P_h : Tekanan Hidrostatik (N/m²)

ρ : Massa jenis (kg/m³)

A : Luas Permukaan (m²)

g : Gravitasi (m/s²)

h : Ketinggian Air (m)

2.8 Factor Of Safety (FOS)

Factor Of Safety (FOS) merupakan rasio antara beban maksimum yang dapat ditahan oleh suatu struktur atau material sebelum mengalami kegagalan dan beban yang sebenarnya diterapkan pada suatu struktur. FOS didefinisikan pada persamaan sebagai berikut :

$$\text{Factor of safety} = \frac{\text{yield stress}}{\text{working stress}} \quad (2.7)$$

Dalam persamaan tersebut dapat didefinisikan bahwa semakin tinggi angka FOS, maka semakin aman struktur dari produk tersebut. Angka $FOS = 1$ menunjukkan bahwa struktur dari komponen tersebut mengalami kegagalan ketika tercapainya beban desain dan tidak mampu menopang apabila terdapat penambahan beban. Apabila nilai $FOS < 1$ maka keamanan dan nilai FOS dianggap kurang dari ketentuan standar dan tidak dapat diterima dikarenakan dapat mengakibatkan konsekuensi kegagalan. Untuk tipe *boiler*, nilai FOS yang disarankan yaitu rentan nilai 3 – 6. Beberapa faktor yang mempengaruhi nilai FOS diantaranya jenis material yang digunakan, tipe beban yang diberikan kepada suatu material, kondisi lingkungan, dan proses manufaktur.

2.9 Simulasi *Finite Element Analysis* (FEA)

Metode elemen hingga atau dikenal juga sebagai *Finite Element Analysis* (FEA), merupakan metode komputasi numerik yang digunakan untuk memprediksi bagaimana sebuah benda atau produk bereaksi terhadap kekuatan di kondisi nyata, seperti tekanan, getaran, atau efek fisik lainnya (Azeem et al., 2024). Dalam metode elemen hingga, langkah pertama dalam membagi struktur yang akan dianalisis menjadi bagian-bagian kecil yang disebut elemen. Elemen-elemen ini dapat berupa balok, plat, atau elemen tiga dimensi lainnya. Proses pembagian ini disebut diskritisasi. Dengan membagi struktur menjadi elemen-elemen, kita dapat mendefinisikan persamaan matematis untuk setiap elemen dan kemudian menyusunnya menjadi sistem persamaan yang lebih besar untuk seluruh struktur.

Analisis metode elemen hingga menunjukkan suatu produk akan mengalami titik pecah, mengalami keausan, serta akan memprediksi yang akan terjadi pada suatu produk ketika digunakan. Penggunaan FEA dalam analisis desain dapat bermanfaat

dalam evaluasi desain, kekuatan struktural, deformasi, dan faktor keamanan yang dapat berdampak positif pada peningkatan kekuatan bahan, optimalisasi desain, dan pengurangan biaya riset. Proses pengerjaan FEA secara umum terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu : *pre-processing*, *solving*, dan *post-processing*.

2.9.1 *Pre-processing*

Tahap *pre-processing* merupakan langkah awal dalam membuat dan menganalisis sebuah model FEA. Dalam tahap ini, model dan semua parameter simulasi dipersiapkan. Tahapan ini meliputi sebagai berikut :

2.9.1.1 Pembuatan Geometri

Pembuatan model 3D dilakukan langsung pada perangkat eksternal SolidWorks yang kemudian diimpor ke dalam perangkat Ansys. Model 3D tersebut juga dapat dibuat langsung atau disempurnakan dalam lingkup Ansys menggunakan tool seperti SpaceClaim atau DesignModeler.

2.9.1.2 Definisi Material

Definisi material pada perangkat Ansys merupakan langkah untuk menganalisis reaksi material *boiler* ketika diberi beban. Beberapa properti kunci yang digunakan dalam mendefinisikan material yaitu *Modulus Young* (Modulus Elastisitas) yang mendefinisikan kekuatan material yang secara langsung menghubungkan tegangan dengan regangan dan sangat mempengaruhi seberapa besar deformasi akan terjadi. Lalu *Rasio Poisson* yang menjelaskan mengenai material yang akan menyempit di arah melintang ketika ditarik dan penting untuk perhitungan tegangan multi-aksial yang akurat. Kemudian *Yield Strength* (Kekuatan Luluh) yang merupakan batas tegangan di mana material mulai mengalami deformasi plastis. Nilai ini menjadi acuan utama dalam menghitung *Factor Of Safety* (FOS).

2.9.1.3 Meshing

Meshing merupakan proses diskritisasi yaitu geometri dibagi menjadi ribuan atau jutaan elemen geometris sederhana. Ukuran elemen menentukan tingkat detail yang bisa ditangkap. Area dengan perubahan geometri yang tajam atau gradien tegangan yang tinggi seperti di sekitar sambungan atau lubang, memerlukan mesh yang lebih halus dengan elemen yang lebih kecil untuk hasil yang semakin mendekati akurat. Akan tetapi, untuk mendapatkan ukuran mesh yang semakin halus membutuhkan waktu komputasi yang semakin lama.

2.9.1.4 Boundary Conditions (Kondisi Batas)

Boundary conditions atau kondisi batas dapat mendefinisikan interaksi model dengan lingkungannya. Cara untuk menahan model pada simulasi Ansys untuk mencegahnya bergerak bebas (*rigid body motion*) yang dapat menyebabkan error yaitu dengan menambah tumpuan (*supports*) pada geometri. Jenis tumpuan yang diterapkan disesuaikan dengan kondisi fisik yang berbeda diantaranya, *Fixed Support* merupakan tumpuan paling kaku yang mengunci semua pergerakan dan rotasi yang berguna untuk merepresentasikan pondasi. Lalu *Frictionless Support* yang mencegah gerakan tegak lurus, namun mengizinkan pergerakan paralel (menggeser) yang berguna untuk kondisi simetri atau kontak yang licin. Kemudian *Displacement* untuk memberikan kontrol penuh pada pergerakan di sumbu X, Y, atau Z yang berguna untuk memberikan tumpuan minimal yang cukup untuk menstabilkan model tanpa membuat kaku.

Pada *Boundary Conditions* juga ditentukan beban (*loads*) yang digunakan sebagai input gaya eksternal yang bekerja pada model simulasi. Salah satu yang digunakan pada *boiler* yaitu beban *Pressure* (tekanan) yang merupakan gaya yang didistribusikan secara merata dan bekerja tegak lurus pada suatu permukaan. Beban

lain yang umumnya digunakan pada simulasi yaitu dapat berupa *Force* (gaya terpusat), *Moment* (torsi), dan *Thermal Condition* (suhu)

2.9.2 Solving

Pada tahap ini, komputer akan menyelesaikan matriks persamaan matematis yang kompleks untuk setiap elemen berdasarkan input yang telah didefinisikan pada tahap *pre-processing*. Komputer akan menghitung nilai-nilai seperti perpindahan (*displacement*), tegangan (*stress*), dan *Factor of Safety* (FOS) diseluruh bagian model. Proses ini dianggap selesai ketika solusi telah menunjukkan bahwa hasil numerik sudah stabil dan mendekati kondisi nyata.

2.9.3 Post-processing

Tahap *post-processing* merupakan langkah terakhir pada analisis FEA. Data hasil simulasi diolah dan disajikan agar mudah diinterpretasikan. Hasil ini dapat ditampilkan dalam berbagai bentuk seperti kontur warna untuk visualisasi distribusi tegangan, grafik, atau tabel data numerik. Pada tahap ini, analisis dilakukan untuk menarik kesimpulan seperti menentukan nilai tegangan maksimum, lokasi titik kritis, dan nilai faktor keamanan (FOS).

2.10 Penelitian Terdahulu

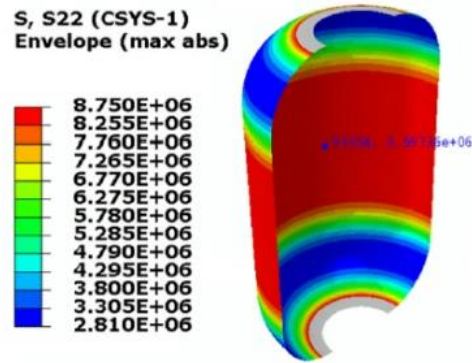
Pembahasan pada analisis kekuatan struktur bejana tekan (*pressure vessel*) dapat ditemukan di beberapa jurnal penelitian yang telah dilakukan terdahulu. Penggunaan metode elemen hingga atau *Finite Element Analysis* (FEA) telah menjadi pendekatan standar untuk mengevaluasi integritas struktural, menganalisis distribusi tegangan dan mengoptimalkan desain bejana tekan. Pada penelitian sebelumnya, proses FEA yang dilakukan memiliki alur yang relatif sama, meliputi pemodelan

geometri, *meshing*, aplikasi kondisi batas, dan analisis hasil. Meski tahapan yang dilakukan sama, parameter yang digunakan bervariasi, menyesuaikan tujuan penelitian, jenis material yaitu logam atau komposit, dan kondisi operasional yang disimulasikan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Sukarman et al., 2021) berfokus pada evaluasi desain bejana tekan untuk sistem pendingin radiator dengan material baja karbon rendah SPCC-SD. Penelitian ini menggunakan metode analitik berbasis standar ASME untuk menghitung parameter desain krusial seperti ketebalan dinding minimum dan tekanan kerja maksimum yang diizinkan (MAWP). Validasi dari desain yang dihitung kemudian dilakukan melalui uji eksperimental hidrostatik untuk memastikan keamanan struktur. Hasilnya menunjukkan bahwa desain bejana tekan tersebut memenuhi persyaratan keamanan operasional yang disyaratkan.

Berbeda dengan pendekatan eksperimental, penelitian yang menggunakan FEA untuk membandingkan hasil perhitungan matematis juga ditemukan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Azeem et al., 2024) menggunakan FEA untuk menyelidiki pengaruh sudut lilitan serat terhadap tegangan lingkaran (*hoop stress*) pada bejana tekan komposit. Meskipun material yang digunakan berbeda, metodologi yang diterapkan sangat relevan. Salah satu kunci dalam penelitian keduanya adalah proses validasi model simulasi. Sebelum melakukan analisis utama, kedua penelitian tersebut melakukan simulasi sederhana pada bagian *liner* yang bersifat isotropik serupa dengan baja dan membandingkan hasilnya dengan perhitungan matematis. Hasil simulasi untuk tegangan lingkaran yaitu sebesar 8,75 MPa yang menunjukkan kesesuaian yang sangat baik (*good agreement*) dengan perhitungan analitik sebesar 8,46 MPa. Proses ini menjadi pedoman dalam melakukan validasi anatara hasil numerik (analitik) dan

hasil simulasi (FEA) untuk memastikan akurasi.



$$\text{Hoop stress, } \sigma_h = \frac{Pd}{2t} = \frac{0.5 * 220}{2 * 6.5} = 8.46 \text{ MPa; from equation (1)}$$

Gambar 2.10 Membandingkan Hasil Analitik dengan Simulasi

(Sumber : Azeem et al., 2024)

Aplikasi FEA untuk studi parametrik juga ditunjukkan dalam penelitian oleh (Rusyandi et al., 2025) yang menganalisis pengaruh variasi jumlah lapisan pada bejana tekan komposit Tipe IV. Simulasi dilakukan dengan memberikan tekanan internal sebesar 25 MPa pada model dengan jumlah lapisan yang berbeda-beda yaitu 5,10,15 dan 20 lapisan. Dari FEA tersebut diperoleh hasil bahwa penambahan jumlah lapisan secara signifikan menurunkan tegangan lingkaran dan deformasi total pada struktur.

Setiap penelitian tersebut memiliki fokus tertentu sesuai dengan tujuan dalam penelitian. Tegangan khususnya *hoop stress* (tegangan lingkaran), deformasi, dan faktor keamanan (FOS) umumnya menjadi parameter utama yang diperhatikan dalam analisis kekuatan struktur bejana tekan. Penelitian yang dilakukan sebelumnya dapat memberikan referensi dan acuan dalam melakukan penelitian pada *boiler laundry* dengan memberikan landasan perhitungan analitik hingga metodologi validasi.