

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Teknologi pengendalian emisi terbaru di dunia

Teknologi terbaru saat ini berfokus dalam perancangan secara signifikan dalam pengurangan polutan berbahaya yang di lepas ke lingkungan, dan lebih berfokus kepada transportasi dan industri. Fokus dalam pengembangan ini pada metode canggih seperti *Selective Catalytic Reduction* (SCR) di mana secara efektif menurunkan nitrogen oksida (Nox) dari mesin diesel. Dengan memanfaatkan katalis dan reaksi kimia, sistem ini berfokus kepada pengubahan NOx menjadi nitrogen dan uap air yang tidak berbahaya. Selain sistem penyaringan emisi pengembangan lainnya adalah mesin rendah emisi seperti *Clear fleam* yang memanfaatkan bahan bakar alternatif demi mencapai pengurangan emisi secara besar. Mesin ini dirancang beroperasi dengan efisien sekaligus meminimalisir pelepasan karbon dioksida dan polutan lainnya. Dengan teknologi ini mengatasi sekaligus menghemat biaya bagi industri[13]. Selain kemajuan mesin, peningkatan signifikan dalam teknologi terbaru ada dalam pengendalian pasca pembakaran. Sistem ini digunakan pada hilir proses pembakaran dan dirancang demi menangkap dan mengolah emisi sebelum dilepaskan ke lingkungan. Teknik seperti desulfurisasi gas buang dan filter partikel menjadi lebih canggih. Membuat efisiensi yang lebih tinggi dalam menghilangkan zat berbahaya. Integrasi teknologi digital dan sistem pemantauan secara langsung atau real-time meningkatkan efektivitas dalam strategi pengendalian emisi. Dengan memanfaatkan analisa data dan pembelajaran mesin, Industri dapat meoptimalisasi operasi untuk mengurai emisi. Kombinasi teknologi inovatif dan sistem pemantauan cerdas ini mewakili lompatan maju yang signifikan dalam upaya global memerangi polusi udara dan mitigasi perubahan iklim.

Dengan kemajuan teknologi ini pengendalian emisi berfokus pada solusi yang inovatif dan efisien pada pengurangan polutan dari berbagai sumber. Pasar global dalam masalah ini telah berkembang secara signifikan, dengan perkiraan USD 157,28 Billion [1], [2] atau sebesar IDR 2.535 Triliun pada tahun 2024

menjadi USD 169,28 Billion atau sebesar IDR 2.729 Triliun pada tahun 2025. Pengembangan ini mencakup sistem reduksi katalitik selektif dan mesin rendah emisi, di mana sudah di targetkan akan rendah emisi. Selain itu teknologi pengendalian pasca pembakaran dan sistem pemantau Real-time atau pengamatan secara langsung. Pasar Teknologi global ini juga mengalami pertumbuhan pesat dengan proyeksi sekitar USD 252,58 Billion[2] atau sebesar IDR 4.075 Triliun [2], [3] pada tahun 2024 menjadi USD 475,56 Billion atau sebesar IDR 7.673 Triliun pada tahun 2034, dengan angka ini mencerminkan compound annual growth rate (CAGR) sebesar 6,53 Persen [4] selama ini. Hal ini di dorong oleh peraturan ketat yang telah mengatur pengendalian emisi.



Gambar 1 2 Primary Research, Secondary Research, MRFR Database and Analyst Review

Source: <https://www.marketresearchfuture.com/> (10-01-2025)

2.1.1 Gas Buang dan sarana Penanggulangan

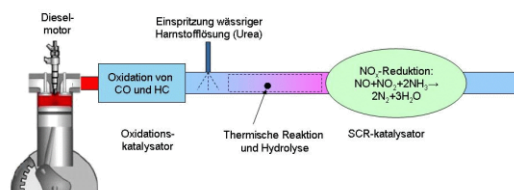
Gas buang merupakan hasil pembakaran mesin yang terdiri dari campuran gas dan partikel, seperti Karbon Dioksida (CO_2), Nitrogen oksida (NO_x), Sulfur Oksida (SO_x), Partikulat Halus (PM), Hidrokarbon Tidak Terbakar (HC), dan Karbon Monoksida (CO). Setiap komponen memiliki dampak spesifik terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. CO_2 adalah gas rumah kaca utama yang memperburuk perubahan iklim, sementara NO_x dan SO_x memicu hujan asam dan merusak ekosistem. Partikulat halus ($\text{PM}_{2.5}$) dapat menembus paru-paru dan aliran

darah, menyebabkan penyakit pernapasan dan kardiovaskular. Hidrokarbon tidak terbakar berkontribusi pada pembentukan kabut asap, dan karbon monoksida sangat beracun, mengganggu transportasi oksigen dalam darah. Gas buang juga mengalami reaksi kimia di atmosfer, seperti pembentukan ozon permukaan tanah yang berbahaya dan pengasaman laut akibat larutan CO_2 , yang semakin memperburuk dampak lingkungan [5].

Untuk mengurangi dampak tersebut, berbagai teknologi pengendalian emisi telah dikembangkan. *Selective Catalytic Reduction* (SCR) efektif mengurangi NO_x menjadi nitrogen dan air, sementara *Scrubber* digunakan untuk menangkap sulfur oksida pada kapal. *Carbon Capture and Storage* (CCS) menangkap CO_2 sebelum dilepaskan ke atmosfer untuk mencegah pemanasan global, dan *Diesel Particulate Filter* (DPF) menangkap partikel halus dari mesin diesel. Teknologi lain, seperti *Electrostatic Precipitator* (ESP), mampu menghilangkan debu dan partikel dari gas buang industri. Meskipun teknologi ini memiliki biaya tinggi dan tantangan operasional, inovasi terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi polusi udara, menciptakan lingkungan yang lebih bersih dan sehat [5].

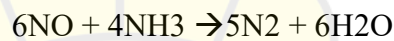
2.1.2 *Selective Catalytic Reduction* (SCR)

Teknologi terbaru ini memfokuskan pengurangan NO_x pada gas buang terlebihnya gas buang yang di buang oleh mesin disel. *Selective Catalytic Reduction* (SCR) memfokuskan pengurangan NO_x di karenakan NO_x adalah senyawa kimia yang menyebabkan kabut asap, hujan asam, dan masalah pernafasan pada makhluk hidup. Solusi untuk mengatasi NO_x sistem SCR menggunakan reaksi kimia untuk mengubah NO_x menjadi Nitrogen biasa dan Air. Reaksi kimia ini terjadi di lapisan katalis yang mana memiliki ruangan khusus yang memiliki kemampuan untuk mempercepat reaksinya [6].



Gambar 2 Skema SCR

Komponen utamanya adalah Reduktor, reduktor adalah kandungan kimia yang akan bereaksi dengan NO_x. Reduktor ini biasanya adalah cairan urea yang di mana di larutkan ke dalam air dan air ini akan di lepaskan di daerah katalis yang di lewati oleh NO_x. Proses yang di dilaksanakan adalah seperti ini melakukan injeksi urea cair tersebut ke aliran gas buang sebelum mencapai katalis, cairan urea akan larut dan berubah menjadi ammonia (NH₃) [7].

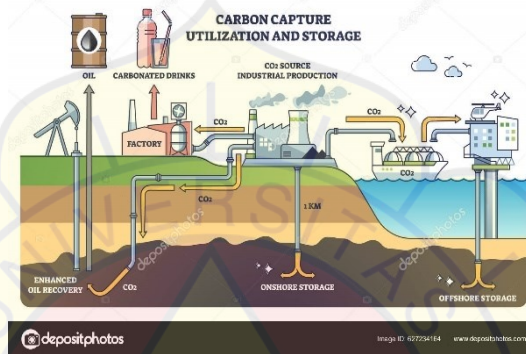


Ammonia (NH₃) akan bercampur dengan NO_x dan akan bereaksi. Saat mencapai katalis reaksi ammonia dan NO_x akan di percepat sampai mengubah menjadi nitrogen biasa dan air. Di saat reaksi berhasil Nitrogen dan Air itu akan di keluarkan dari sistem dan di buang keluar kapal. Keuntungan dalam penggunaan *Selective Catalytic Reduction* (SCR) ada pada efisiensi pengurangan NO_x yang bisa mencapai 95 Persen atau lebih tinggi. Walau keuntungan dalam penurunan emisi yang cukup tinggi tetap saja biaya pemasangan awal dan pengontrolan dalam kadar ammonia yang harus di awasi secara ketat, karena jika ammonia keluar ke atmosfer lepas bisa menyebabkan masalah pada kesehatan makhluk hidup [8].

2.1.3 *Carbon Capture and Storage* (CCS)

Selanjutnya teknologi yang berfokus kepada Karbon atau lebih fokusnya kepada Karbon Dioksida yang mana sebuah polutan yang paling di kenal. Karbon Dioksida atau CO₂ akan di lakukan proses penangkapan, setelah di tangkap CO₂ akan di alirkan ke *Storage* lalu akan di simpan dan dijaga untuk tidak keluar ke atmosfer. Lebih detailnya dalam Penangkapan dan *Storage* adalah dua proses yang tidak bisa di pisahkan di mana penangkapan berperan sebagai penangkapan CO₂

dengan metode tertentu ada metode *Direct Capture* dengan menangkap langsung CO₂ yang keluar dari mesin induk, kedua ada metode *Post-Combustion* penangkapan setelah bahan bakar fosil di lakukan dengan pelarut untuk pencucian gas buang, metode ketiga adalah *Pre-sumbustion* proses ini menghilangkan CO₂ sebelum pembakaran terjadi, metode terakhir adalah *Oxyfuel Combustion* dengan membakar bahan bakar dengan Oksigen murni untuk membuat gas buang CO₂ [9].

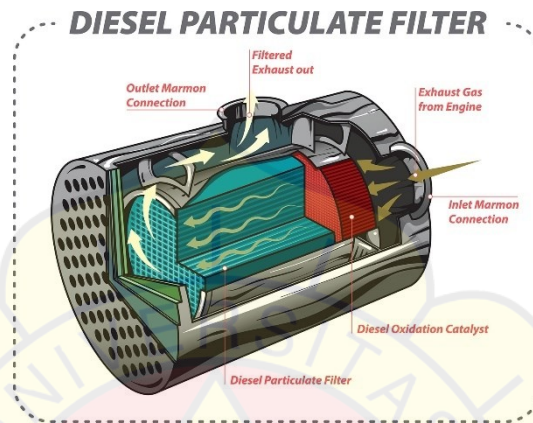


Gambar 3 Skema CCS

Storage adalah proses penyimpanan CO₂ dengan kondisi yang berada di bawah tanah namun proses ini memiliki prasyarat tersendiri, prasyaratnya adalah *Revoir Rock* batuan berpori yang bisa menahan CO₂. *Caprock* batuan tidak berpori yang dapat mencegah lepasnya CO₂. Untuk sejauh ini mulai dari tahun 2020 sudah ada sekitar 51 fasilitas yang global yang bergerak dan sudah sekitar 260 juta ton CO₂ yang tersimpan [10].

2.1.4 Diesel Particulate Filter (DPF)

Perangkat ini bekerja dengan menangkap jelaga serta partikel dari mesin induk lalu di bersihkan dengan proses ini bisa menurunkan emisi yang keluar dari mesin induk. Proses melibatkan penangkapan jelaga di dalam filter keramik lalu membakarnya secara berkala, proses pembakaran ini dinamai proses *regeneration* [11].



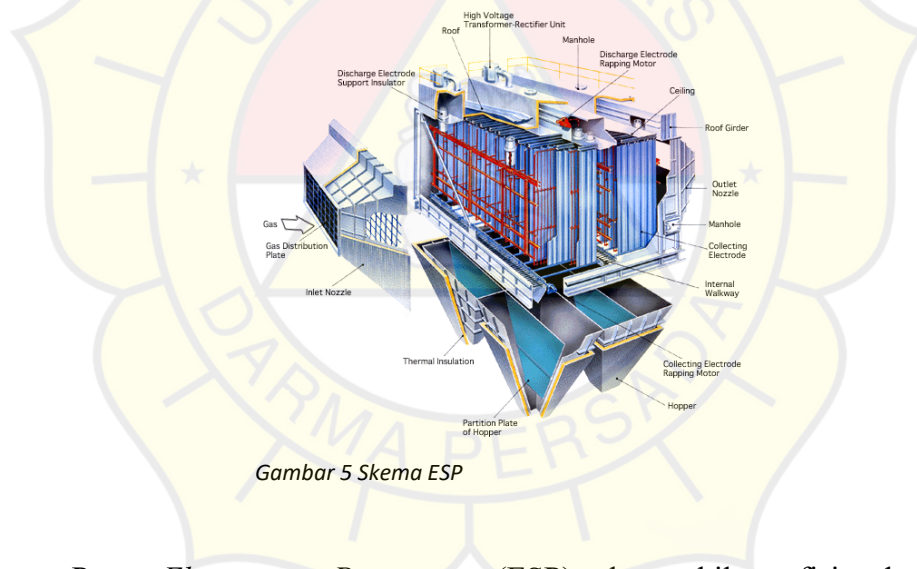
Gambar 4 Skema DPF

Diesel Particulate Filter (DPF) di desain sedemikian rupa untuk mengurangi emisi dengan pembakaran jelaga. Untuk tipe *Regeneration* sendiri memiliki tipe-tipe tertentu pertama *Passive regeneration* di mana pembakaran terjadi secara alami ketika suhu gas buang cukup tinggi namun tipe ini kurang baik untuk proses kerja pendek atau cuaca dingin. *Active Regeneration* diawali oleh *engine control unit* (ECU) saat *Diesel Particulate Filter* (DPF) mencapai titik saturasi yang dibutuhkan, saat di titik yang di tentukan penyuntikan bahan bakar tambahan akan meningkatkan suhu gas buang biasanya suhu di 600°C sampai 700°C ini syarat untuk membakar jelaga akumulasi. *Manual regeneration* proses ini di perlukan jika pada saat kecepatan yang memadai untuk melakukan *Automatic regeneration* dan di lakukan dengan alat pemindai untuk memulai proses pembersihan [11].

2.1.5 *Electrostatic Precipitator* (ESP)

Electrostatic Precipitator (ESP) adalah teknologi terbaru yang mengatasi emisi dengan cara mengontrol pencemaran udara menggunakan gaya listrik untuk menghilangkan partikel dan aliran gas. Dengan mengionisasi partikel

dan aliran gas lalu membuat menjadi padat dan dikumpulkan di plat bermuatan. Proses Ionisasi adalah proses memasukkan gas buang ke dalam *Electrostatic Precipitator* (ESP) lalu electrode tinggi akan menciptakan medan listrik untuk mengionisasi partikel dalam aliran gas sehingga memberikan muatan negatif. Setelah ionisasi aliran gas yang bermuatan negatif akan tertarik dengan plat yang bermuatan positif, Plat ini di pasang berjajar dan berongga sehingga aliran gas dapat lewat dan membuat aliran gas yang negatif akan tertangkap. Pada saat penangkapan partikel negatif dan positif akan bertabrakan dan membuat kehilangan muatannya di saat menempel pada plat dan membentuk lapisan debu yang mengumpul. Untuk mencegah penumpukan yang berlebihan di gunakan proses mekanisme rap di mana akan di guncangan secara berkala dan membuat debu berjatuhan, saat debu yang jatuh akan di kumpulkan dan baru di buang [12]



Gambar 5 Skema ESP

Proses *Electrostatic Precipitator* (ESP) cukup terbilang efisien dengan hasil dari inovasi dapat mengurangi emisi sebesar hampir mencapai 99 persen untuk partikel halus. Selain itu juga *Electrostatic Precipitator* (ESP) serbaguna di mana bisa di gunakan dalam volume besar dan efektif untuk berbagai macam ukuran partikel [13].

2.1.5.1 Scrubber

Scrubber adalah teknologi emisi yang berfokus untuk mengurangi SO_x, HCL, dan materi partikulat yang dapat merusak lingkungan. Proses operasi teknologi ini memiliki beberapa mekanisme, seperti penyerapan dan adsorpsi. Ada dua tipe dari *Scrubber* pertama ada *wet Scrubber* sesuai namanya dengan menggunakan air dan cairan kimia yang dapat mengurangi emisi untuk menangkap gas buang dan menghilangkan polutan dalam gas buang. Saat melewati *Scrubbing liquid*, di mana akan terkontaminasi larut atau bereaksi dengan cairan. Keduanya adalah *Dry Scrubber* tipe ini menggunakan sorben padat atau reagen kering untuk penangkapan polutan. Aliran gas buang akan melewati lapisan bahan kering yang beraksi dengan atau akan menyerap kontaminan. Untuk lebih spesifiknya gas buang akan memasuki sistem *Scrubber* melalui *inlet* pipa lalu untuk *wet Scrubber* gas buang akan terbawa menuju lapisan *Scrubbing liquid* yang akan disemprotkan air, untuk *Dry Scrubber* gas akan langsung melewati lapisan sorben. Saat melewati proses kontak pertama akan dilanjutkan dengan proses pembuangan polutan saat melewati media *Scrubber* polutan akan diserap, direaksikan, atau diserap ke dalam media. Proses ini melibatkan reaksi kimia seperti penetralan asam. Selanjutnya pembuangan gas yang sudah bersih melewati saluran pembuangan akhir, yang di mana gas buang sudah bersih dari polutan dan gas asam yang di awal [14].

2.2 *Scrubber System*

Scrubber adalah teknologi emisi yang berfokus untuk mengurangi SO_x, HCL, dan materi partikulat yang dapat merusak lingkungan. Dengan peraturan IMO 2020 batasan kandungan sulfur dalam bahan bakar transportasi laut di angka 0,5 Persen yang mana batas sebelumnya berada di angka 3,5 Persen [15]. Dengan menggunakan Sistem *Scrubber* memungkinkan untuk menurunkan kandungan sulfur dalam gas buang. Sistem *Scrubber* pada dasarnya suatu perangkat yang pengontrol polusi dengan membersihkan gas buang yang dihasilkan mesin induk. Cara kerjanya dengan menggunakan Cairan yang biasanya digunakan air laut atau cairan kimia yang dapat menyerap dan menetralkan polutan berbahaya, terutama Sulfur Oksida (SO_x). Gas buang yang telah dibersihkan dapat dilepaskan ke atmosfer, dan untuk polutan yang telah diserap oleh cairan akan diolah kembali

untuk dibuang. *Scrubber* memiliki dua jenis yaitu sistem basah (*wet*) dan sistem kering (*Dry*), kedua jenis ini memiliki perbedaan dalam proses penyaringan gas buang [14], [16].

2.2.1 *Wet Scrubber dan Dry Scrubber*

Menggunakan cairan khusus dalam penyerapan polutan berbahaya dari gas buang. ketika gas buang mengalir ke *Scrubber* akan di semprotkan dengan cairan tersebut akan beraksi dengan polutan dan akan larut lalu beraksi, atau tersuspensi dalam cairan. Setelah gas buang di bersihkan gas buang akan di buang keluar sedangkan larutan polutan akan diolah kembali dan baru di buang. Ada beberapa jenis untuk *Wet System Scrubber* Venturi dengan menggunakan nosel khusus untuk menciptakan aliran gas yang bergerak cepat yang memecah cairan pembersih menjadi tetesan kecil, di mana meningkatkan kontak gas dan cairan. Untuk *Scrubber* bed dikemas mengandung bahan yang dapat meningkatkan luas permukaan interaksi gas dan cairan, sehingga mempermudah pembuangan polutan dengan baik. Sekat *Scrubber* digunakan untuk menciptakan beberapa Tingkat kontak yang membantu meningkatkan efisiensi penghilangan polutan[16], [17].

Wet Scrubber sangat efektif untuk menghilangkan zat berbahaya dalam gas buang, dengan menangkap materi partikulat (Partikel Padat kecil), SO_x , SO_2 , HCL , Amonia, dan senyawa organik yang mudah menguap oleh karena itu penggunaan sistem ini cukup efisien. Dengan ke efisien penggunaannya masih ada beberapa hal yang harus di perhatikan seperti pasokan air dan cairan yang dibutuhkan dalam penyemprotan di sistem *Scrubber* yang mana membutuhkan jumlah besar yang dapat menambahkan biaya operasional. Selain itu juga proses ini dapat menghasilkan limbah cair yang aman maka di perlukan pengolahan ulang yang benar. Ada juga risiko korosi dan kerak pada sistem karena adanya air dan bahan kimia, yang seiring waktu dapat menyebabkan masalah pemeliharaan. *Dry Scrubber* Sistem ini menggunakan bahan kimia padat atau kering untuk menghilangkan polutan dari gas buang. Berbeda dengan *Wet Scrubber*, Sistem ini beroperasi dengan gas buang melewati lapisan bahan penyerapan padat. Sorben menangkap dan menetralsir melalui proses absorpsi, sistem ini berguna jika

penggunaan Jenis yang umum untuk *Dry Scrubber Fix bed Scrubber*, dalam sistem ini gas buang mengalir melalui lapisan stasioner yang terbuat dari bahan penyerap karbon aktif. Saat gas buang melawati lapisan atau permukaan maka polutan akan di tangkap sorben. Jenis ini cukup efektif untuk membersihkan gas seperti SO₂ dan senyawa asam lainnya. Desain lapisan yang tetap memungkinkan pengoperasian yang mudah di jalankan tetapi dengan hal ini juga perawatan untuk bahan penyerap harus di perhatikan dan di *maintenance* secara berkala [17], [18].

Jenis lainnya ada sistem yang terfluidasi dengan menggunakan lapisan partikel penyerap yang terjaga dalam kondisi terfluidasi oleh aliran gas ke atas. Desain ini meningkatkan kontak antara sorben dengan gas sehingga meningkatkan efisien penghilangan polutan. Sistem ini menangani volume gas yang lebih besar dan sangat efektif untuk menangkap partikel dan gas tipe halus. Variasi lainnya ada *Scrubber* semprot kering di mana sorben kering akan di suntikan ke dalam aliran gas buang. Saat gas memasuki *Scrbuer* sorben akan bereaksi dengan polutan dan membentuk polutan padat atau partikel padat yang dapat dikumpulkan di hilir aliran. Jenis ini lebih efisien untuk SO₂ dan gas asam lainnya namun keuntungannya terletak pada lahan yang tidak begitu besar dan dapat di integrasikan ke dalam sistem yang telah di terapkan. Selain memiliki dua jenis klarifikasi *Scrbuer* juga memiliki tipe-tipe ini memiliki karakteristik operasionalnya, tipe-tipe sebagai berikut.

Sistem *Scrubber* yang digunakan dalam sistem maritim memiliki dua jenis atau tipe yang digunakan. Pertama, sistem *Scrubber open loop* (loop terbuka) dan sistem *Scrubber Close loop* (loop tertutup). Sistem *Scrubber* loop terbuka adalah jenis sistem pembersihan gas buang (EGCS) yang di mana bertujuan untuk menghilangkan SO_x dari gas buang yang di hasilkan mesin induk. Sistem ini memanfaatkan air laut sebagai media untuk menyerap dan menetralkan SO_x. Sistem Loop terbuka memanfaatkan air laut untuk menyerap dan mentralisasikan Sulfur oksida. Untuk lebih detail sistem loop terbuka di mulai dengan gas buang masuk ke dalam sistem ini lalu air laut akan menjadi penggosok untuk pengikatan polutan. Proses *Scrubber* akan mencampur air laut atau cairan dengan gas buang dalam ruangan reaksi. Saat gas buang melewati cairan SO_x akan bereaksi dengan

cairan membentuk asam sulfat dan senyawa lainnya cairan akan menyerap polutan sehingga secara efektif mengurangi konsentrasi SO_x dalam gas buang. Setelah Gas buang dibersihkan, maka gas buang akan dilepaskan ke atmosfer, dan larutan polutan yang akan diolah kembali akan di buang [18], [19], [20].

Keuntungan dari loop terbuka ini adalah dengan menggunakan air laut sebagai sumber daya yang melimpah dan membuat biaya operasional yang hemat karena penggunaan yang tidak memerlukan bahan kimia yang cukup mahal. Selain itu, desain dan pengoperasian relatif mudah sehingga teknologi dan perawatan yang tidak terlalu rumit. Kemudahan ini dikombinasikan dengan efisiensi dalam menghilangkan jumlah besar sulfur oksida dari gas buang. Namun, penerapan memiliki kelemahan tersendiri khususnya terkait dampak pada lingkungan, pembuangan air yang sudah tercampur dengan polutan di mana larutan ini memiliki potensi merusak alam, termasuk logam berat dan zat bahaya lainnya. Selain itu, pembatasan peraturan di wilayah tertentu, khususnya di lingkungan laut yang sensitif atau dekat wilayah pesisir, mungkin melarang pembuangan air *Scrubber*, sehingga membatasi fleksibilitas operasional kapal yang dilengkapi dengan sistem ini. Efektivitas *Scrubber Open Loop* juga bergantung pada kualitas air laut yang digunakan; di area yang memiliki tingkat polusi tinggi atau pH rendah, efisiensi pembersihan mungkin terganggu [18].

Sistem *Scrubber Close loop* jenis pengendalian polusi yang menghilangkan kontaminan dari aliran gas buang. Berbeda dengan open loop, limbah buang dari sistem ini tidak memiliki efek yang besar dalam lingkungan sekitar. Komponen utama dari sistem ini adalah cairan *scrubbing*, Saluran gas masuk, Ruang *Scrubbing*, Penghilang kabut, Sistem resirkulasi, sistem pembuangan kontamin, dan sistem kontrol. Cairan pembersih biasanya hanya air namun tetap bereaksi dengan polutan dalam aliran gas. Gas masuk dari saluran masuk berinteraksi dengan cairan pembersih di dalam ruangan, tempat kontaminan dihilangkan. Setelah proses *Scrubbing* penghilang kabut memastikan gas bersih yang di keluarkan ke atmosfer sedangkan cairan yang berisi polutan akan di kumpulkan dan di sirkulasikan lagi untuk di gunakan kembali.[18]

Sistem ini sudah sering di gunakan dalam berbagai industri, termasuk manufaktur kimia, pengembang listrik, pengelolaan air limbah, pemrosesan makanan, dan penyelesaian akhir logam. Teknologi ini efektif dalam pengendalian emisi senyawa organik yang mudah menguap (VOC), SO₂ dan polutan udara lainnya. Dengan mengelola gas buang, Sistem ini membantu menjaga kualitas udara di sekitarnya, oleh karena itu menjadi salah satu keunggulan dalam penggunaan loop tertutup dengan minimalnya limbah yang di buang. Selain itu juga efisiensi biaya menurunkan kebutuhan air bersih dan mengurangi biaya pembuangan air limbah. Dengan kemampuan beradaptasi dengan berbagai kontaminan dan mengoptimalkan kinerja, *Scrubber Close Loop* adalah solusi fleksibel bagi industri yang ingin meningkatkan keberlanjutan dan kepatuhan terhadap peraturan lingkungan [19].

2.3 ***Back pressure* dalam Sistem gas buang**

Back peressure adalah suatu hambatan yang di alami oleh gas buang saat keluar dari mesin induk. Tekanan ini memiliki pengaruh besar dalam kinerja mesin, efisiensi bahan bakar, dan emisi. Peningkatan *Back pressure* dapat meningkatkan suhu ruang bakar, hidrokarbon yang tidak terbakar, dan produksi jelaga yang mana bisa mempengaruhi jangka waktu dari mesin dan efisiensi mesin. Desain pipa gas buang yang efisien sangat harus di perhatikan karena akan berpengaruh dengan *Backreasur* ini. Pengukuran *Back pressure* biasanya di lakukan di saluran keluar *manifold* atau *turbocharger*, ini merupakan faktor penting dalam kinerja mesin diesel laut, yang mempengaruhi efisiensi bahan bakar dan emisi [21]. Penyebab peningkatan dari *Back pressure* bisanya tercipta dari rancangan desain yang tidak efisien dengan tikungan berlebih, putaran yang panjang, atau diameter tidak memadai dapat meningkatkan *Back pressure*. Korosi dan penumpukan edapan mineral juga dapat membatasi aliran gas di mana dapat mempengaruhi *Back pressure*. knalpot dan pencampuran air pada *muffler* penambahan *muffler* dan tangki pencampuran dapat menciptakan hambatan tambahan. Filter buang Filter Partikulat Diesel (DPF) dapat juga tersumbat oleh jelaga juga, beberapa hal yang

sudah di jelaskan menjadi faktor-faktor yang menciptakan pengaruh besar terhadap perubahan *Back pressure* [21].

Peningkatan *Back pressure* dapat mengurangi tenaga dari mesin dan efisiensi mesin, dengan semakin tingginya *Back pressure* semakin besar kinerja mesin harus di keluarkan untuk gas buang. Dengan semakin besar kinerja mesin semakin besar juga konsumsi bahan bakar yang diperlukan. Dalam hal ini menyebabkan emisi yang meningkat, hidrokarbon dan partikel yang terbakar meningkat sehingga dapat menciptakan pencemaran jika di lepaskan sembarangan. Masalah *turbocharger* dengan *Back pressure* yang berlebihan dapat potensi kebocoran dan kegagalan oli ke sistem pembuangan. Untuk mengelola *Back pressure* di sangat penting dalam desain dan pemeliharaan gas buang, memastikan bahwa sistem pembuang di buat spesifikasi sesuai dengan standar yang di mulai dari diameter pipa yang sesuai dengan tikungan minimal. Pemeriksaan dan pembersihan komponen gas buang secara rutin di perlukan termasuk *Diesel Particulate Filter* (DPF), sangat penting demi pencegahan penumpukan endapan. Selain itu, menepatkan pipa knalpot di atas permukaan air sangat penting demi mencegah masuknya air ke dalam. Dalam kasus di mana tekanan balik masih dalam batas yang dapat diterima namun akumulasi jelaga tetap ada, pemasangan *Diesel Particulate Filter* (DPF) mungkin diperlukan untuk mengelola emisi partikulat secara efektif dan menjaga efisiensi sistem [21].

2.4 Dasar termodinamika dan perpindahan panas

Perpindahan Panas adalah proses fisik yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur atau suhu pada dua buah obyek atau lebih. Dalam sistem gas buang pada kapal, perpindahan panas terjadi karena perpindahan energi pada permukaan pipa gas buang dengan gas buang yang di mana lebih panas. Proses perpindahannya dapat ter jadi dengan tiga cara.

2.4.1 Aliran Gas dalam sistem pipa Gas buang

Aliran gas buang dalam sistem pipa merupakan subyek penting dalam hal industri, yang mana di tandai oleh pergerakan zat gas melalui jaringan pipa yang dirancang sedemikian rupa untuk memfasilitasi pengangkutan gas dalam bergerak secara aman dan efisien. Dinamika aliran gas di atur dengan prinsip dasar mekanika fluida, perbedaan tekanan, laju aliran, serta sifat fisik gas seperti densitas dan viskositas. Aliran gas bisa di klarifikasi menjadi dua tipe laminar dan turbulen, untuk bagaimana sistem laminar dan turbulen seperti berikut :

- a. Laminar : Aliran yang dicirikan oleh pergerakan fluida yang teratur dan halus serta paralel, dengan minimnya gangguan antar keduanya. Biasanya aliran ini terjadi dengan kecepatan dan angka *Reynolds* yang rendah, di mana viskositasnya mendominasi gaya inersia, aliran laminar mengikuti jalur yang mudah teridentifikasi sehingga pola aliran mudah di prediksi dan stabil. Jenis aliran ini biasanya berada di pipa berdiameter kecil atau pada laju aliran rendah dengan gerakan yang ramping meminimalkan kerugian gesekan dan meningkatkan efisiensi transportasi fluida. Kestabilan aliran laminar memudahkan pengendalian terhadap berbagai aplikasi, sehingga sangat menguntungkan dalam proses yang memerlukan laju aliran yang konsisten dan mengurangi turbulensi [22].
- b. Turbulen : Aliran turbulen dicirikan dengan gerakan fluida yang kacau dan tidak teratur, terbentuknya pusaran dan vortisitas yang menyebabkan pencampuran lapisan fluida. Turbulen terjadi pada aliran yang tinggi dan angka *Reynolds* yang tinggi juga, di mana inersia lebih besar daripada gaya viskos. Turbulen biasanya terjadi pada pipa yang berdiameter besar dan laju aliran yang deras, Hal ini dapat menyebabkan peningkatan kerugian gesekan yang mana menyebabkan pencampuran fluida. Sifat aliran turbulen tidak dapat di prediksi dengan mudah namun hal ini juga dapat membantu pengaplikasian terhadap aliran fluida yang butuh pencampuran cepat, pertukaran panas, seperti dalam proses industri, sistem HVAC, dan teknik lingkungan [22].

Desain sistem ini harus memperhatikan faktor-faktor khusus, Seperti diameter pipa, pemilihan material, dan keberadaan alat pelengkapan dan katup, yang mana hal-hal ini bisa menjadi kerugian terhadap gesekan dan mempengaruhi efisien. Selain itu perilaku aliran gas buang di pengaruhi oleh suhu dan perubahan ketinggian pipa, di mana dibutuhkan pemantauan dan pengendalian yang cermat untuk mencegah masalah-masalah bisa saja terjadi. Model dinamika fluida komputasi (CFD) tingkat lanjut sering digunakan untuk menyimulasikan dan mengoptimalkan aliran gas, dengan memastikan sistem pipa yang berfungsi normal dan efisien serta aman digunakan.

2.4.2 Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas melalui obyek tanpa adanya perpindahan massa dan sumbernya. Perpindahan ini terjadi dengan perbedaan suhu pada molekul yang bergerak lebih cepat dan memindahkan energi kinetik ke molekul lainnya. Pada sistem gas buang Konveksi terjadi karena adanya perpindahan energi pada gas buang dengan permukaan pipa yang menyebabkan perpindahan energi. Proses ini memiliki persamaan dan perhitungannya di mana :

$$q = -k \cdot A \cdot \Delta T / L \quad [23]$$

Di mana :

- q : Lajur aliran panas (W)
- k : Konduktivitas termal material pipa (W/m.K)
- A : Luas penampang
- ΔT : Perbedaan temperature antar dua titik (K)
- L : Panjang material

2.4.3 Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan panas melalui aliran fluid, seperti udara atau gas, fluida ini mengalir di atas atau di permukaan yang lebih panas. Pada sistem gas buang kapal hal ini terjadi antara gas buang yang bergerak di dalam pipa dan permukaan pipa yang bersentuhan langsung dengan gas tersebut. Selain itu konveksi sendiri memiliki perbedaan ada konveksi alami dan konveksi paksa namun dalam perhitungannya tetap sama dan memiliki persamaan seperti berikut :

$$q=h \cdot A \cdot \Delta T \text{ [23]}$$

Di mana :

- q : Laju aliran panas (W)
h : Koefisien perpindahan panas Konvektif (W/m.K)
A : Luas penampang
 ΔT : Perbedaan *temperature* antar dua titik (K)

2.4.4 Radiasi

Radiasi adalah perpindahan panas melalui gelombang electromagnetic tanpa adanya medium dalam perpindahan energinya. Dalam sistem gas buang sebagian panas yang di hasilkan oleh gas buang juga terpancar dalam bentuk inframerah atau radiasi ke lingkungan sekitarnya. Untuk radiasi ini persamaannya memiliki hukum sendiri di mana Hukum Stefan-Boltzmann digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas melalui radiasi sebagai berikut :

$$q=\epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4-T_{\infty}^4) \text{ [23]}$$

Di mana:

- q : Laju aliran panas akibat radiasi (W)
 ϵ : Emisivitas permukaan (tanpa satuan)
 σ : Konstanta Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

A : Luas permukaan yang memancarkan radiasi (m^2)
T : Temperatur permukaan (K)
 T_{∞} : Temperatur lingkungan (K)

2.4.1 Hukum perpindahan panas total

Hukum ini hanya sebagai penggabungan dan total dari semua teori yang ada. Di mana hukum ini menggabungkan analisa dan hasil dari Konduksi, Konveksi, dan Radiasi ketiga hukum ini di hitung dan dengan persamaan berikut :

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{Konduksi}} + Q_{\text{konveksi}} + Q_{\text{Radiasi}} \text{ [23]}$$

2.5 Sistem Gas Buang kapal

Sistem gas buang berfungsi sebagai jalur pembuangan untuk gas atau fluida yang di hasilkan oleh pembakaran mesin induk yang akan di buang keluar kapal. Sistem ini dirancang sedemikian rupa supaya gas buang yang memiliki suhu tinggi di mana bisa mencapai atau lebih dari 500°C [24], namun hal ini tergantung jenis mesin dan bahan operasional kapan. Sistem Pipa Gas Buang Sistem gas buang memiliki fungsi sebagai pengalir fluida hasil pembakaran mesin induk dari ruang mesin menuju keluar kapal proses ini bertujuan untuk mengurangi suhu dari gas buang kapal sebelum ke luar kapal. Sistem ini memiliki komponen utama Pipa utama, cerobong, Sistem penyejuk. Karakter dari gas buang terdiri dari berbagai polutan yang beragam termasuk CO_2 , CO , NO_x , dan uap air. Dikarenakan suhu dari gas buang yang tinggi menyebabkan adanya perubahan suhu pada permukaan pipa [24].

2.5.1 Aliran Gas Buang

Aliran gas buang sangat berpengaruh dalam proses perpindahan panasnya sebagaimana biasanya dalam aliran gas buang adalah turbolen, terutama pada aliran yang memiliki kecepatan yang tinggi. Pengaruhnya adalah *temperature* gas buang itu sendiri semakin tinggi panasnya maka akan semakin tinggi juga suhu permukaan pipanya. Terakhir faktor utamanya adalah pola dari pipa itu sendiri pola aliran

memiliki kondisi- kondisi yang berpengaruh besar misalnya diameter, Kecepatan aliran gas, serta banyaknya kelokan atau *elbow* yang di gunakan.

2.5.2 Faktor yang mempengaruhi suhu permukaan pipa

Dalam Sistem pipa gas buang ada juga suatu faktor yang menjadi pengaruh-pengaruh suhu gas buang seperti adanya temperatur gas buang yang di mana semakin tinggi suhu dari gas buang semakin besar juga suhu permukaan pipa. Koefisien perpindahan panas hal ini adalah perpindahan energi panas secara Konvektif dan terjadi pada Gas buang dan Permukaan pipa. Salah satu faktor pentingnya adalah material Pipa yang digunakan dalam sistemnya itu sendiri material seperti baja tahan karat atau paduan logam yang tahan terhadap suhu tinggi biasanya digunakan untuk menghindari kerusakan pada pipa. Isolasi Pipa: Pipa yang dilengkapi dengan lapisan isolasi termal dapat mengurangi kehilangan panas dari permukaan pipa dan menjaga agar suhu permukaan tetap lebih rendah daripada gas buang yang mengalir di dalam. Efek gradien suhu terdapat gradien suhu antara gas buang yang panas dan dinding pipa yang lebih dingin. Proses ini memengaruhi distribusi temperatur pada permukaan pipa. Gradien suhu ini juga menentukan kecepatan aliran panas dari gas ke permukaan pipa melalui konveksi dan konduksi. Pemantauan suhu sistem pemantauan suhu sering digunakan untuk mengontrol suhu permukaan pipa guna menghindari suhu yang terlalu tinggi yang dapat menyebabkan kerusakan pada pipa atau bahkan kebakaran. Alat pengukur suhu dapat dipasang di sepanjang pipa untuk memastikan suhu tetap dalam batas aman.

2.5.3 Perhitungan dan Simulasi Suhu Permukaan Pipa dengan CFD

Dalam penelitian ini, penggunaan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan untuk memodelkan aliran gas buang dan distribusi suhu di sepanjang pipa. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) memungkinkan simulasi interaksi antara aliran gas, perpindahan panas konvektif, dan efek termal pada permukaan pipa. Dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dapat dianalisis faktor-faktor seperti distribusi suhu sepanjang pipa. Efektivitas sistem pendingin (jika ada) dalam

menurunkan suhu gas buang. Pengaruh desain pipa (diameter, panjang, kelokan) terhadap aliran gas dan suhu permukaan pipa. Simulasi ini memberikan gambaran yang lebih detail mengenai bagaimana suhu pada permukaan pipa dapat bervariasi berdasarkan faktor-faktor operasional dan desain, serta membantu merancang sistem pipa yang lebih efisien dan aman untuk kapal kargo [25].

2.5.4 Fungsi aliran gas buang

Aliran gas buang memiliki fungsinya tersendiri di mana merupakan sebuah parameter yang penting dalam optimalisasi mesin induk kapal. Dengan fungsi aliran gas buang dapat di gunakan sebagai pengukur hubungan antara laju aliran masa gas buang dan perbedaan tekanan pada seluruh sistem pembuangan. Fungsi ini perlu memahami efisiensi evakuasi gas buang, yang bisa berdampak kepada kinerja mesin ,emisi, serta efisiensi bahan bakar. Fungsi aliran di pengaruhi oleh beberapa faktor antara lain manifold buang, diameter panjang knalpot, keberadaan komponen *catalytic converter* dan *muffler*, semua ini dapat mengakibatkan hambatan pada aliran gas buang. Ditambah lagi dengan pengaruh suhu, tekanan, dan komposisi juga memegang peran penting dalam menentukan karakteristik aliran gas buang. Dengan menggunakan model matematika dan simulasi dinamika fluida komputasi (CFD), dapat menganalisis fungsi aliran gas buang untuk mengoptimalkan desain sistem pembuangan, memastikan bahwa sistem tersebut memfasilitasi evakuasi gas yang efektif sekaligus meminimalkan tekanan balik dan meningkatkan efisiensi mesin secara keseluruhan [26], [27].

2.5.5 Fungsi komponen sistem gas buang

Sistem gas buang memiliki komponen-komponen yang berperan penting dalam pengoperasian sistem ini yang mana demi memastikan efisien dan keamanan saat sistem berjalan, komponen-komponen sistem gas buang:

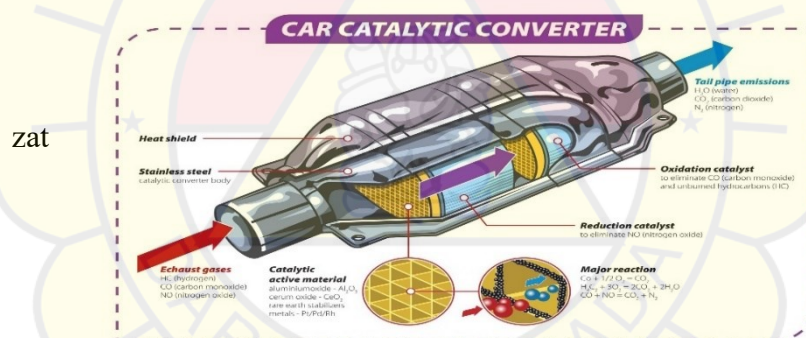
- A. ***Exhaust Manifold***: Komponen ini bertugas untuk mengumpulkan gas buang dari beberapa silinder dan mengarahkannya ke dalam satu pipa knalpot. Pemodelan desain sangat penting untuk meminimalkan *Back*

pressure dan mengoptimalkan aliran gas buang, sehingga meningkatkan kinerja dan efisiensi mesin [27].



Gambar 6 Manifold

- B. **Catalytic Converter:** Komponen ini memiliki peran dalam mengurangi emisi berbahaya dengan memfasilitasi reaksi kimia yang mengubah gas beracun, seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon, dan nitrogen oksida



Gambar 7 Catalic Converter

(NO_x)
menjadi
yang
tidak
terlalu

berbahaya seperti karbon dioksida (CO₂) dan nitrogen. *Catalytic Converter* mengandung logam mulia, seperti platina, paladium, dan rhodium, yang bertindak sebagai katalis dalam reaksi ini [26] .

- C. **Resonator:** komponen ini dirancang untuk menyempurnakan suara sistem pembuangan dengan menghilangkan frekuensi suara tertentu yang dihasilkan oleh mesin. Ini membantu menciptakan nada knalpot yang lebih lembut sekaligus berkontribusi terhadap efisiensi aliran knalpot secara keseluruhan [26].

- D. **Muffler/Knalpot:** Komponen ini bertanggung jawab untuk mengurangi kebisingan yang dihasilkan oleh gas buang mesin. Ini menggunakan serangkaian ruang dan tabung berlubang untuk menghilangkan gelombang suara, sehingga menurunkan tingkat kebisingan kendaraan secara keseluruhan sambil mempertahankan aliran gas buang yang optimal [26].

Gambar 8 Muffler

- E. **Sensor Oksigen:** Sensor ini memantau Kadar oksigen dalam gas buang memberikan umpan balik kepada unit kontrol mesin (ECU). Informasi ini sangat penting untuk mengoptimalkan rasio campuran udara dan bahan bakar, meningkatkan efisiensi pembakaran, dan memastikan emisi tetap berada dalam batas peraturan [26].
- F. **Exhaust Tip :** Meskipun utamanya merupakan fitur kosmetik, ujung knalpot dapat memengaruhi aliran gas buang dan suara keseluruhan sistem pembuangan. Hal ini juga dapat membantu mengarahkan gas keluar dari kendaraan, sehingga mengurangi risiko terhirup oleh penumpang [26].



2.6 Computational Fluid Dynamic (CFD)

Computational Fluid Dynamic (CFD) adalah metode yang di gunakan dengan menggunakan komputasi atau *computer* dalam memodelkan, menyimulasikan serta menganalisa aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena fisik yang mana melibatkan fluida juga. *Computational Fluid Dynamic* (CFD) memungkinkan simulasi aliran gas atau fluida cair dalam berbagai macam kondisi dan keadaan.

Computational Fluid Dynamic (CFD) memiliki prinsip dasar penggunaannya, *Computational Fluid Dynamic* (CFD) mengandalkan perhitungan dan persamaan fisika dalam perhitungan dikarenakan dasar yang di ambil tetap dinamika fluida yang mana utamanya adalah persamaan *Navier-Stokes* dan persamaan energi. Untuk persamaan *Navier-Stokes* memiliki bentuk seperti berikut :

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad [28]$$

Di mana:

$\partial \mathbf{u}$: kecepatan fluida (m/s)

T : waktu (s)

ρ : kerapatan fluida (kg/m³)

p : tekanan fluida (Pa)

ν : viskositas dinamis fluida (m²/s)

\mathbf{f} : gaya eksternal yang bekerja pada fluida (N)

Untuk perhitungan persamaan energi memiliki bentuk sebagai berikut :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T + \frac{q}{\rho c_p} \quad [25]$$

Di mana:

T : suhu fluida (K)

α : difusivitas termal (m²/s)

q : laju sumber panas (W/m³)

c_p : kapasitas panas jenis fluida (J/kg·K)

Computational Fluid Dynamic (CFD) juga memberikan pengaplikasian metode numerik untuk penyelesaian persamaan-persamaan diferensial yang menggambarkan aliran fluida dan perpindahan panas. Untuk melakukan proses ini ada langkah-langkah yang harus di ikuti di mulai dari diskritisasi atau proses pemecahan dan pembagian domain fisik menjadi *per grid* atau elemen-elemen kecil di mana yang di sebut *mesh* hal ini berguna untuk menghitung dalam bentuk variabel fisik untuk suhu dan kecepatan. Langkah selanjutnya penyelesaian *numerik* persamaan diferensial yang telah diskritisasi diselesaikan menggunakan teknik numerik, seperti metode elemen hingga (*Finite Element Method - FEM*) atau metode volume hingga (*Finite Volume Method - FVM*). Metode ini memungkinkan perhitungan distribusi kecepatan fluida, suhu, dan parameter lainnya dalam domain pipa secara interaktif. Dan terakhir iterasi Perhitungan dilakukan secara berulang untuk mencapai konvergensi, di mana hasil simulasi tidak berubah signifikan antar iterasi [25], [28], [29].

Dalam perhitungan dan aliran fluida di sekitar obyek biasanya akan berbentuk turbulen dalam hal ini cara penganalisannya menggunakan model-model turbulen oleh karena itu ada beberapa hal sebagai berikut :

- a) Model K- ϵ (K-Epsilon) model ini adalah model yang terumum di gunakan dalam pengaplikasian rekayasa. Model ini menghitung dua variabel yaitu energi Turbulen (K) dan laju disipasi energi Turbulen (ϵ).
- b) Model K- ω (K-Omega) Model ini lebih banyak digunakan dalam simulasi yang menggunakan gradien kecepatan tajam.
- c) *Large Eddy Simulation* dengan model ini pendekatan yang lebih canggih di mana dengan skala besar turbulensi secara langsung dan mengubah skala kecil turbulensi dan menjadi *sub-grid*.

Dalam penggunaan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) untuk sistem pipa gas buang analisa di lakukan simulasi aliran dalam pipa serta distribusi suhu sepanjang pipa. Beberapa tujuan spesifik penggunaan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) :

- a. Simulasi aliran gas : untuk mengetahui pola dan aliran dalam pipa dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) memungkinkan untuk distribusi kecepatan dan identifikasi potensi area stagnasi atau turbulensi yang bisa mempengaruhi aliran.
- b. Analisa Perpindahan panas : memungkinkan untuk menganalisa mekanisme perpindahan panas antara gas buang dan permukaan pipa yang telah mencakup konvensi antar gas dan permukaan pipa.
- c. Efisiensi Desain Pipa : desain pipa bisa di prediksi untuk menemukan bentuk yang paling efisien.
- d. Simulasi Thermal : dengan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dapat menganalisa dan menilai suhu permukaan pipa serta mengidentifikasi apa suhu dapat menyebabkan kerusakan atau kebocoran pipa.

Software untuk menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) ada berbagai macam namun untuk analisa kali ini menggunakan *Ansys Fluent*. *Ansys Fluent* adalah *software* yang umum digunakan dalam penggunaan untuk *Computational Fluid Dynamic* (CFD) *Ansys fluent* menawarkan berbagai macam model turbulensi dan teknik penyelesaian untuk berbagai jenis aliran. Dengan *ansys* bisa pengoptimisasi yang mudah dan visualisasi hasil yang sangat bisa di andalkan [25], [28], [29].

2.7 Material dan Interaksi dengan suhu

Material yang digunakan oleh gas buang menjadi salah satu patokan dalam pengukuran untuk analisa dan menjadi unsur utama di mana harus mampu menahan suhu tinggi, tekanan, dan pengaruh lingkungan korosif hasil dari gas buangan. Oleh karena itu pemilihan material sangat di utamakan untuk memastikan kendala dan umur panjang sistem pipa gas buang. Karakteristik untuk material memiliki prasyarat sebagai berikut Ketahanan pada suhu tinggi, Ketahanan pada terhadap Korosi, Konduksi termal, Kekuatan mekanis. Untuk memenuhi karakteristik tersebut ada beberapa bahan yang sudah sering di gunakan bahan-bahan tersebut adalah :

- a) Baja tahan karat (Stainless Steel):
Tahan terhadap suhu tinggi dan korosi. Komposisi umum paduan besi, kromium (Cr), dan nikel (Ni) Contoh: SS304, SS316 [30].
- b) Paduan nikel:
Memiliki ketahanan suhu tinggi dan korosi yang sangat baik Contoh: Inconel (Paduan berbasis nikel-kromium) [30].
- c) Baja karbon:
Digunakan untuk aplikasi suhu sedang, tetapi kurang tahan terhadap korosi dibandingkan baja tahan karat [30].
- d) Keramik atau material komposit:
Digunakan untuk aplikasi suhu ekstrem, biasanya sebagai lapisan tambahan pada pipa logam [30].
Interaksi dengan suhu bisa mempengaruhi sifat mekanik dan termal sebuah pipa sebagai perhatian ada beberapa hal yang harus di perhatikan sebagai berikut :

- a) Ekspansi Termal
Material akan memuai ketika terkena suhu tinggi. Ekspansi termal ini diukur dengan koefisien muai panas linier (α), yang dinyatakan dalam $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad [31]$$

Di mana:

ΔL : Perubahan panjang material (m)

α : Koefisien muai panas linier ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

L : Panjang awal material (m)

ΔT : Perubahan suhu ($^{\circ}\text{C}$)

Ekspansi termal yang tidak terkontrol dapat menyebabkan tegangan internal dalam material, yang dapat mengakibatkan retak atau deformasi.

- b) Penurunan Kekuatan Material

Pada suhu tinggi, material logam cenderung mengalami penurunan kekuatan mekanis, termasuk Tegangan luluh (*yield strength*): Nilai tegangan yang diperlukan untuk menyebabkan deformasi plastis. Kekuatan tarik (*tensile strength*): Nilai maksimum tegangan yang dapat ditahan oleh material sebelum patah. Sebagai contoh, baja karbon standar akan kehilangan hingga 50 persen kekuatannya pada suhu di atas 500°C [32].

c) Perubahan Struktur Mikro

Suhu tinggi dapat menyebabkan perubahan struktur mikro pada material, seperti Rekristalisasi pembentukan butir kristal baru, yang dapat mengurangi kekerasan material. Pertumbuhan butir: Butir kristal membesar, yang dapat menyebabkan material menjadi lebih rapuh. Oksidasi permukaan: Pada suhu tinggi, reaksi antara material dan oksigen di udara dapat menyebabkan pembentukan lapisan oksida, yang dapat mengurangi ketahanan material terhadap korosi [32].

d) Degradasi Akibat korosi

Gas buang dari mesin kapal mengandung senyawa korosif seperti sulfur oksida (SO_x) dan nitrogen oksida (NO_x). Pada suhu tinggi, reaksi kimia ini dapat mempercepat proses korosi, terutama jika material tidak dilindungi oleh lapisan pelindung atau jika kondensasi uap air terjadi di dalam sistem pipa [32].

2.8 Perlindungan material terhadap Suhu tinggi

Untuk mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh suhu tinggi dan korosi, berbagai metode perlindungan material diterapkan. Salah satunya adalah pelapisan termal, di mana lapisan pelindung seperti keramik atau material berbasis logam diterapkan pada permukaan pipa untuk meningkatkan ketahanan terhadap suhu ekstrem. Selain itu, isolasi termal juga digunakan, dengan memanfaatkan bahan isolasi seperti wol mineral atau bahan refraktori yang membungkus pipa, sehingga dapat mengurangi kehilangan panas dan menjaga suhu permukaan tetap dalam

batas aman. Penggunaan paduan khusus, seperti Inconel, juga menjadi pilihan, karena material ini dirancang khusus untuk menahan suhu tinggi dan korosi. Terakhir, pemeliharaan rutin yang mencakup inspeksi berkala dan pembersihan sangat penting untuk mencegah akumulasi endapan korosif pada permukaan pipa, sehingga memastikan kinerja dan umur panjang sistem.

2.9 Aplikasi Dalam CFD

Aplikasi simulasi Dinamika Fluida Komputasi (CFD) sistem komputasi canggih yang mana di gunakan dalam menganalisis dan mensimulasikan aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena terkait melalui metode dan alogaritma numerik. Aplikasi Dinamika Fluida Komputasi (CFD) telah mencakup berbagai jangkauan di dunia industri mulai dari kedirgantaraan, otomotif, teknik sipil, dan ilmu lingkungan. dalam alam kedirgantaraan, misalnya, CFD digunakan untuk mengoptimalkan kinerja aerodinamis pesawat terbang dan wahana antariksa dengan mensimulasikan aliran udara di berbagai permukaan. Hal ini memungkinkan dalam mengidentifikasi potensi masalah, seperti gaya hambat dan gaya angkat, membuat penyesuaian desain sebelum prototipe fisik dibuat, yang mana akan menghemat waktu dan membuat ke efisien dari sistem yang dibuat lebih baik [33].

Dalam industri otomotif, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan kinerja dan keselamatan kendaraan. Para memanfaatkan simulasi CFD untuk menganalisis aliran udara di sekitar kendaraan, yang membantu mengurangi hambatan dan meningkatkan efisiensi bahan bakar. Selain itu, CFD juga digunakan dalam pengelolaan suhu untuk memastikan bahwa mesin dan komponen lainnya beroperasi dalam batas suhu yang aman. Dengan mensimulasikan berbagai kondisi berkendara dan faktor lingkungan, produsen dapat merancang kendaraan yang tidak hanya lebih efisien, tetapi juga lebih nyaman bagi para penumpang.

Selain untuk transportasi, aplikasi ini belaku juga untuk rekayasa lingkungan untuk memodelkan penyebaran polutan di udara dan air. Dengan hal ini

di mungkinakan untuk menilai dampak apa saja yang terjadi jika polutan-polutan ini tersebar di lingkungan lepas, dengan aplikasi simulasi Dinamika Fluida Komputasi (CFD) di harapkan bisa mencegah dan memberikan langkah-langkah pengendalian polusi yang efektif. Misalnya, CFD dapat mensimulasikan bagaimana emisi dari pabrik menyebar di atmosfer, membantu regulator dan teknisi mengembangkan strategi untuk meminimalkan dampak lingkungan. Secara keseluruhan, fleksibilitas CFD menjadikannya alat yang sangat berharga di berbagai bidang, mendorong inovasi dan meningkatkan efisiensi dalam proses desain dan analisis. Dan ini adalah contoh untuk beberapa Aplikasi simulasi Dinamika Fluida Komputasi (CFD):

- a) ***Aerospace Engineering***: Digunakan secara luas dalam desain dan optimisasi pesawat terbang dan wahana antariksa. Dengan menyimulasikan aliran udara di sayap dan badan pesawat untuk menganalisis kinerja aerodinamis mengidentifikasi peluang pengurangan hambatan, dan meningkatkan karakteristik daya angkat [34].
- b) ***Automotive Industry*** : Dalam teknik otomotif, Dinamika Fluida Komputasi (CFD) digunakan untuk mempelajari aliran udara di sekitar kendaraan, yang membantu menurunkan hambatan aerodinamis dan meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar. Dinamika Fluida Komputasi (CFD) juga digunakan untuk menganalisis sistem manajemen termal, memastikan bahwa mesin dan komponen lainnya mempertahankan suhu pengoperasian yang optimal [35].
- c) ***HAVC System***: Dinamika Fluida Komputasi (CFD) digunakan dalam desain pengoptimalan sistem panas, ventilasi, pendingin ruangan (HAVC). Dengan simulasi ini aliran udara di dalam gedung, dapat menilai distribusi udara, gradien suhu, dan efisiensi energi [34] .
- d) ***Chemical Processing***: Dalam industri kimia, Dinamika Fluida Komputasi (CFD) diterapkan untuk memodelkan aliran dan pencampuran fluida dalam reaktor, separator, dan peralatan pemrosesan lainnya. Hal ini memungkinkan teknisi untuk mengoptimalkan kondisi reaksi dari kima yang di uji coba [36].

- e) ***Environmental Engineering:*** Dinamika Fluida Komputasi (CFD) digunakan untuk memodelkan penyebaran polutan di udara dan badan air. Aplikasi ini penting untuk menilai dampak lingkungan dari kegiatan industri, merancang langkah-langkah pengendalian polusi yang efektif, dan memastikan kepatuhan terhadap peraturan lingkungan. Dengan simulasi skenario, teknisi dapat mengembangkan strategi untuk mengurangi dampak kontaminan pada ekosistem dan kesehatan masyarakat [35].

