

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Tinjauan Turbin Uap

Penelitian dilakukan pada pembangkit listrik tenaga uap, dengan boiler superkritikal, dan *turbogenerator* (turbin uap, dan generator) serta peralatan penunjang terkait. Unit ini dirancang untuk menghasilkan kapasitas beban sebesar 1.000MW pada tegangan 27kV dari generator dan kemudian dinaikkan oleh *generator step up transformer* (GSUT) yang terhubung menuju jaringan Jamali PLN 500kV. Boiler dengan tipe *sliding pressure*, superkritikal, *once through* (tidak memiliki *steam drum* saat melayani normal operasi), berbahan bakar batu bara, serta dirancang sebagai unit yang melayani beban dasar (*base load*). Suplai uap utama (*main steam*) yang menuju HP (*high pressure*) Turbin didesain pada 25 MPa (g) dan 570°C, dan dengan suhu uap pemanasan ulang keluaran boiler (*Hot Reheat*) hingga 595°C (*ultra supercritical*) pada BMCR (*Boiler Maximum Continuous Rating*). Bagian turbin terdiri dari empat silinder (HP, IP dan dua aliran ganda LP) *tandem compound* (steam turboset/semua turbin terkopel dalam satu poros dengan generator dan exciter), quadruple exhausts (empat jalur keluaran)(anonymous, 2018).

Jalur masukan HP Turbin dilengkapi dengan empat *mainsteam stop valve* MSV (Katup Henti utama), yang masing-masingnya melayani satu *Governor Valve* GV (katup Kontrol) sedangkan untuk masukan IP turbin terdiri dari dua katup RSV (*Reheater Stop Valve*), yang mana setiap satu katup RSV akan melayani dua katup interseptor ICV (*Interceptor Control Valve*) untuk pemasukan uap ke turbin IP. Uap buang dari turbin IP mengalir ke dua turbin LP aliran ganda melalui pipa cross over (Anonymous, 2022).

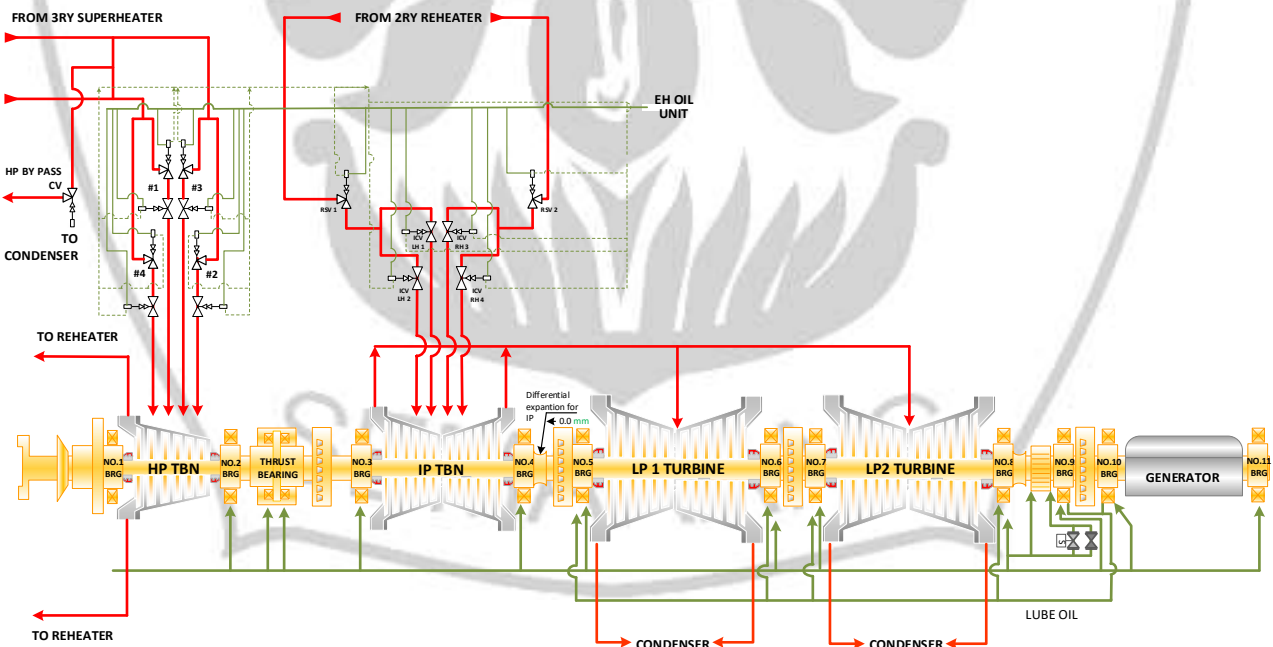
Turbin adalah peralatan konversi energi yang berputar pada kecepatan tinggi yang memanfaatkan uap bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi yang didapatkan dari proses perpindahan panas melalui pembakaran bahan bakar di boiler. Pada pembangkit listrik, putaran turbin dikontrol pada nilai tertentu, dan saat sudah bergabung (tersinkronisasi) dengan jaringan praktis putaran turbin akan terimbas dengan jaringan dan jumlah energi steam yang masuk akan menentukan jumlah beban listrik yang dibangkitkan oleh generator. Pengaturan jumlah uap yang masuk dilakukan oleh modul-modul katup kontrol (GV dan RSV), fungsi ini sangat penting, tidak hanya sebagai pengatur pembangkitan beban, beberapa modul kontrol tertentu bertugas untuk

mengendalikan uap saat turbin mengalami fluktuasi beban generator atau karena perubahan tekanan dan aliran secara tiba-tiba sebagai gangguan dari dalam sistem itu sendiri.

Untuk perlindungan sistem, mengingat besarnya beban dan kompleksitas sistem kontrol, maka katup pemasukan uap memiliki modul kontrol secara otomatis mereaksi terhadap perubahan baik dari internal sistem maupun eksternal, bahkan didesain minimal interaksi dari operator karena perubahan yang sangat cepat. Kontrol otomatis pada GV dan RSV ini diperlukan sebagai perlindungan terhadap sistem besar turbogenerator untuk mencegah kerusakan yang bisa berakibat fatal pada peralatan.

Katup masuk uap MSVGV dioperasikan oleh aktuator hidrolik agar memiliki respons yang efisien dan cepat baik saat sistem berjalan dengan normal dan merespon kebutuhan jaringan maupun saat bereaksi pada perubahan mendadak yang merupakan persyaratan utama untuk keselamatan pengoperasian turbin.

Gambar II.1 menunjukkan *layout* HP Turbin yang dilayani oleh empat set katup MSVGV sebagai masukan uap yang berasal dari boiler. Selain itu, jalur uap menuju turbin juga dilengkapi dengan katup kontrol *bypass* yang berfungsi sebagai jalur darurat jika terjadi pengalihan uap agar tidak melewati turbin. Uap keluaran dari HP turbin yang telah mengalami penurunan tekanan dan temperatur, *cold reheat*, akan mengalami pemanasan ulang di boiler hingga memenuhi syarat menjadi uap *hot reheat* dan masuk ke dalam IP turbin melalui katup RSV-ICV.



**Gambar 0.1. Lay Out Mainsteam Stop Valve - Governor Valve, Reheatersteam Stop Valve –
Interceptor Control Valve**

1.2 Persamaan Kesenjangan Aliran pada Sistem

Secara umum metode untuk melakukan analisa efisiensi suatu sistem adalah dimulai dengan perhitungan kesetimbangan masa dan energi. Pada sistem turbin uap dimana aliran uap masuk turbin, yang memiliki parameter tekanan dan temperatur tertentu, yang diatur oleh GV dan RSV, GV mengatur aliran uap utama untuk HP turbin dan RSV mengatur aliran uap *hotreheat* menuju IP dan LP turbin. Dengan membandingkan besar total kandungan energi yang dimiliki oleh uap sebelum masuk sistem dan setelah keluar sistem maka akan diperoleh efisiensi sistem yang diukur.

Katup GV dipergunakan untuk mengatur aliran massa fluida uap sebelum masuk HP turbin bersama dengan besaran tekanan dan temperatur yang diatur oleh kontrol boiler dan sistem pompa *feedwater*. Pengaturan aliran ini dimulai dari input setpoint beban (*load demand*) oleh operator unit dan didistribusikan pada kontroler boiler dan kontroler turbin. Kontroler turbin memberi tugas pada GV untuk mengatur jumlah uap yang mengandung energi agar dapat di konversi menjadi energi listrik sejumlah yang ditargetkan. Aliran uap *mainsteam* yang masuk dari *inlet turbine*, sesuai arah aliran, akan memiliki tekanan lebih besar daripada tekanan yang keluar melalui diffuser GV sebelum akhirnya mencapai nosel dan sudu turbin.

Untuk menganalisa katup dan proses, maka kesetimbangan energi dan massa (material) digunakan untuk dapat mengetahui apa yang terjadi saat uap masuk ke dalam proses dan uap keluar dari proses yang dianalisa. Pada desain MSV dan GV tidak ada persinggungan dengan sumber panas, sehingga tidak terjadi penambahan jumlah energi, dan jumlah masa uap yang masuk sama dengan jumlah masa yang keluar dari sistem.

Fluida pada temperatur dan tekanan di atas temperatur kritikal dan tekanan kritikal dapat dipertimbangkan sebagai fluida kompresibel. Pada fluida superkritikal ini kehilangan perbedaan fisik antara bentuk cair dan uap. Meski fluida superkritikal dapat diberlakukan sebagai fluida yang bersifat kompresibel namun pada titik di dekat titik kritikalnya ia menyimpang dari aturan gas sempurna. Sehingga penting untuk dipertimbangkan berapa aktual berat spesifiknya (densitas masa) dari tabel termodinamika dan rasio aktual panas spesifik. Aplikasi katup dengan fluida

superkritikal adalah tidak jauh berbeda, dalam perhitungan digunakan persamaan aliran kompresibel dengan laju aliran masa (Hughes, Baker, 2022).

1.2.1 Keseimbangan Masa pada Aliran Uap

Pengendalian yang tepat pada katup kontrol membantu pengaturan laju aliran uap yang masuk menuju turbin. Ketika uap superheated mengalir melalui katup kontrol, terjadi beberapa perubahan parameter yang mengakibatkan sejumlah energi terdisipasi. Dengan demikian, analisa konservasi masa penting untuk menghitung jumlah efektif masa yang masuk HP turbin yang nantinya berlanjut mengalami konversi energi menjadi energi yang bermanfaat. Namun demikian pada aktualnya tidak semua massa yang masuk melalui katup akan seluruhnya menjadi mass yang keluar HP turbin. Dengan besarnya tekanan uap superkritikal maka beberapa massa bocor (*leakoff steam*) menjadi tidak bisa dihindari dan diantisipasi untuk dimanfaatkan pada fungsi lain.

Keseimbangan material atau keseimbangan masa dapat ditulis (Smith et al., 2013),

$$\text{Material Balance} \quad \frac{dM}{dt} = \underbrace{\sum_{i=1}^{\text{number of streams}} \dot{m}_i}_{\substack{\text{Mass flow rate of each stream} \\ \text{In: + ; Out: -}}} \dots\dots\dots (0.1)$$

Change of system Mass M with time

Dimana M merujuk pada sistem masa dan \dot{m} merujuk pada laju aliran masa berdasar waktu pada setiap jalur alir dan persamaan diferensial menunjukkan sejumlah masa pada waktu tertentu. Jika massa yang mengalir ke dalam sistem adalah sama dengan jumlah massa yang keluar sistem maka sistem di sebut dalam keadaan sistem yang *steady*, dan persamaan II.1 sebelah kiri sama dengan nol (Smith et al., 2013).

1.2.2 Keseimbangan Energi

Keseimbangan energi, sebagaimana keseimbangan material, pada umumnya dikaitkan dengan massa. Pada sistem dimana uap sebagai fluida yang melalui katup maka jumlah energi yang terkandung dalam fluida, adalah sesuai dengan jumlah massa yang mengalir. Energi aliran terdiri dari entalpi aliran, energi kinetik aliran, dan energi potensial aliran. Entalpi aliran mencakup energi yang terkait dengan pergerakan fluida, yang direpresentasikan sebagai PV, dan didefinisikan sebagai ($H = U + PV$). Untuk tujuan praktis, lebih mudah menggunakan entalpi spesifik, yang dilambangkan sebagai (\hat{H}_i), dan mengalikan energi dengan laju aliran massa, (\dot{m}_i). Dalam proses fluida, perubahan energi kinetik dan potensial biasanya jauh lebih kecil dibandingkan dengan

perubahan entalpi aliran, sehingga sering kali tidak diperhitungkan dalam perhitungan (Smith, Peters, & Inomata, 2013).

Persamaan differensial untuk kesetimbangan energi ditunjukkan pada persamaan diferensial d/dt , Persamaan II.2, dimana sebelah kanan merujuk pada sistem dan sebelah kiri merujuk pada aliran (stream), perpindahan panas, dan kerja yang terjadi antara sistem dengan lingkungannya. Persamaan tersebut merupakan turunan matematis kesetimbangan massa terhadap waktu yang berarti sejumlah energi yang mengalir masuk ke sistem akan mengakibatkan akumulasi energi dan saat keadaan *steady state* maka perbedaan energi sama dengan nol (Smith et al., 2013).

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \left(U + \frac{Kinetik}{\frac{1}{2}M \cdot v^2} + \frac{Potential}{M \cdot g \cdot h} \right)}_{\substack{\text{Change of system internal (U) and external} \\ \text{(kinetik+potential) energy with time}}} = \underbrace{\sum_{i=1}^{no \text{ stream}} \dot{m}_i \cdot \left(\hat{H}_i + \frac{1}{2} \cdot v_i^2 + g \cdot h_i \right)}_{\substack{\text{Rate of energy and leaving the system via} \\ \text{internal energy and flow energy, enthalpy} \\ \text{(H=U+PV), kinetik and potential energy}}} + \underbrace{\dot{Q}}_{\substack{\text{rate of heat} \\ \text{transfer to or} \\ \text{from system}}} + \underbrace{\dot{W}}_{\substack{\text{rate of work} \\ \text{required or} \\ \text{produced by} \\ \text{the system}}} \quad (0.2)$$

1.2.3 Entalpi dan Neraca Entropi

Perhitungan efisiensi pada sistem turbin uap akan melibatkan entalpi dan entropi. Entalpi adalah ukuran energi total dalam sistem termodinamika, termasuk energi internal dan energi yang dibutuhkan dalam ruang bagi sistem pada tekanan dan volume tertentu. Dalam konteks katup kontrol, entalpi sangat penting untuk menentukan perubahan energi dalam fluida saat mengalir melalui katup. Saat fluida bertekanan tinggi melewati katup kontrol, ia mengalami penurunan tekanan, yang menyebabkan perubahan entalpi. Perubahan ini penting untuk menghitung jumlah energi yang hilang atau diperoleh selama proses pengaturan aliran.

Entropi merepresentasikan energi termal dari suatu sistem. Pada katup kontrol, perubahan entropi terjadi karena proses pencekikan/*throttling*, di mana tekanan fluida berkurang tanpa pertukaran panas yang signifikan. Proses ini sangat *irreversible* dan selalu menghasilkan peningkatan entropi, yang menunjukkan disipasi energi dalam bentuk lain. Pada kalkulasi kesetimbangan neraca entropi ada tambahan istilah \dot{S}_{gen} yang mengacu pada gesekan, rugi-rugi panas residu (kehilangan panas pada lingkungan sekitar), rugi desain peralatan dan hal-hal lain (Smith et al., 2013). Pada analisa MSVGV nilai perubahan entropi dari masing-masing anggota

sistem dapat dibandingkan sehingga diketahui bagian yang paling memberikan kontribusi rugi-rugi. Persamaan differensial ini dapat ditulis sebagai

$$\begin{array}{l}
 \text{Entropy} \\
 \text{Balance}
 \end{array}
 \quad
 \underbrace{\frac{dS}{dt}}_{\substack{\text{Change of} \\ \text{system} \\ \text{Entropy } S \\ \text{with time}}}
 =
 \underbrace{\sum_{i=1}^{\text{number of}}}_{\substack{\text{Entropy of each} \\ \text{stream:} \\ \text{In: +out: -}}}
 \underbrace{\dot{m}_i \hat{S}_i}_{\text{Entropy of each stream}}
 +
 \underbrace{\sum_{\text{all sources}} \frac{\dot{Q}}{T}}_{\substack{\text{Summation of all heat} \\ \text{transfer between the system} \\ \text{and the surroundings}}}
 +
 \underbrace{\dot{S}_{gen}}_{\substack{\text{Entropy generation} \\ \text{term due to friction,} \\ \text{viscosity, device} \\ \text{practical performance}}}
 \quad (0.3)$$

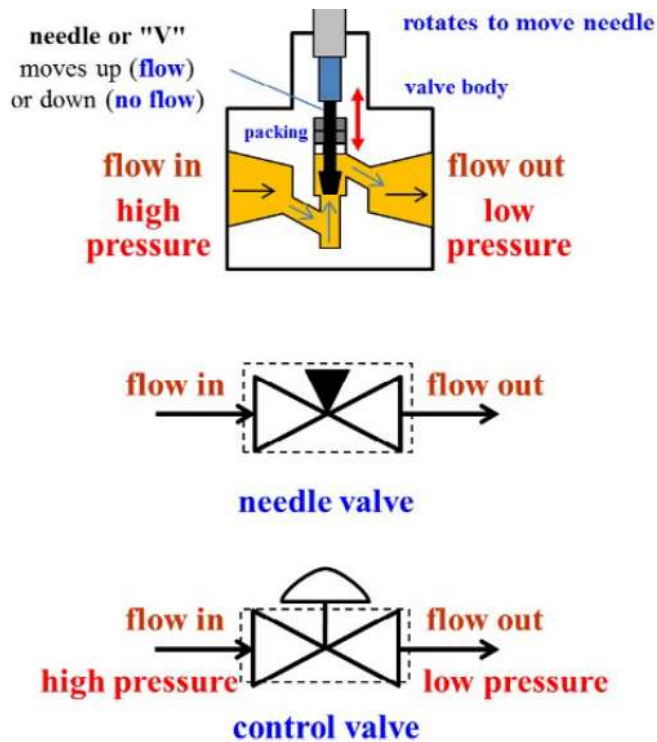
Sebagaimana Persamaan 0.1, pada MSV dan GV tidak lagi terjadi penambahan energi, (\dot{Q}), karena proses penambahan panas telah dilakukan pada boiler, disamping itu kerugian kehilangan panas akan diabaikan karena adanya lapisan insulasi tambahan pada badan katup. Begitu juga tidak ada kerja (\dot{W}) yang diterima ataupun dilakukan oleh katup saat aliran fluida pada kondisi stabil (*steady*). Sehingga energi yang dimiliki fluida akan hanya menurun karena rugi-rugi yang dialami di sepanjang jalur uap MSVGV menuju sudu turbin (*steam admission*).

Gambar II.3 menunjukkan diagram skematik bagaimana aliran fluida yang melewati katup diasosiasikan dengan kesetimbangan massa, energi dan entropi sehingga dapat diambil kesimpulan sebagai berikut,:

$$0 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \dots\dots\dots (0.4)$$

$$0 = \dot{m}_1 \hat{H}_1 - \dot{m}_2 \hat{H}_2 \dots\dots\dots (0.5)$$

$$0 = \dot{m}_1 \hat{S}_1 - \dot{m}_2 \hat{S}_2 + \dot{S}_{gen} \dots\dots\dots (0.6)$$



Material balance

$$\frac{dM}{dt} = \sum_{i=1}^{no\ streams} \dot{m}_i$$

steady-state 0

Energy balance

$$\frac{d}{dt} \left(U + \frac{1}{2} M \cdot v^2 + M \cdot g \cdot h \right) = \sum_{i=1}^{no\ streams} \dot{m}_i \cdot \left(\hat{H}_i + \frac{1}{2} v_i^2 + g \cdot h_i \right) + \dot{Q} + \dot{W}$$

steady-state 0

adiabatic 0 0 no work

Entropy balance

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{i=1}^{number\ of\ streams} \dot{m}_i \hat{S}_i + \sum_{all\ sources} \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

steady-state 0

adiabatic 0

Gambar 0.2. Diagram skematik katup dan kesetimbangan massa, energi dan entropi (Smith et al., 2013)

Secara umum di dalam katup tidak ada perpindahan panas dan tidak ada kerja oleh katup saat aliran fluida dalam kondisi *steady-state*. Aliran uap yang melalui katup akan mengalami *drop* tekanan yang bergantung pada luasan area pengecilan, yang memiliki konsekuensi turunnya densitas fluida dan peningkatan energi kinetik, namun peningkatan energi kinetik ini sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Kesimpulan dari penjelasan di atas maka persamaan kesetimbangan massa, energi dan entropi pada katup kontrol adalah

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \dots\dots\dots (0.7)$$

$$\hat{H}_1(T_1, P_1) = \hat{H}_2(T_2, P_2) \text{ valve} \dots\dots\dots (0.8)$$

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m} \cdot \left(\hat{S}_2(T_2, P_2) - \hat{S}_1(T_1, P_1) \right) \dots\dots\dots (0.9)$$

1.3 Analisa Rugi-rugi *Throttling* pada Katup MSVGV

1.3.1 Analisa Eksergi

Penerapan prinsip neraca eksergi pada suatu volume atur yang meliputi set MSVGV yang beroperasi dalam kondisi tunak dilakukan dengan mengacu pada asumsi-asumsi yang telah

ditetapkan dalam bab 2.2 di atas, bahwa tidak ada interaksi kerja ($W = 0$) maupun perpindahan panas ($Q = 0$) dengan lingkungan sekitar, kontribusi energi kinetik dan energi potensial aliran fluida diabaikan karena dianggap relatif kecil dan tidak signifikan terhadap analisis yang dilakukan.

Persamaan neraca eksergi diberikan dalam persamaan (II.10) dengan mempertimbangkan aliran eksergi masuk ($E_{x,in}$), keluar ($E_{x,out}$), dan destruksi eksergi ($E_{x,dest}$) di dalam volume kontrol akibat ireversibilitas. Formulasi matematis dari neraca eksergi untuk volume atur yang ditinjau disajikan dalam persamaan (II.10), yang mempertimbangkan tiga aspek fundamental terkait dengan eksergi: laju aliran eksergi yang memasuki batas volume atur (E_{in}), laju aliran eksergi yang meninggalkan batas volume atur (E_{out}), dan laju destruksi eksergi (E_{dest}) yang terjadi di dalam volume atur sebagai konsekuensi dari proses-proses ireversibel yang berlangsung.

$$E_{x,in} - E_{x,out} - E_{x,dest} = 0 \dots\dots\dots (0.10)$$

Laju aliran eksergi spesifik per unit massa fluida pada suatu titik dapat dinyatakan sebagai persamaan (II.15)(Mrzljak et al., 2017), di mana h_o adalah entalpi, s_o entropi, dan T_o temperatur (dalam Kelvin) fluida pada kondisi mati (tidak bisa terjadi interaksi dengan lingkungan lagi).

$$\varepsilon_x = (h - h_o) - T_o(s - s_o) + \frac{v_i^2}{2} + gh_i \dots\dots\dots (0.11)$$

Mengingat bahwa efek kecepatan aliran dan perbedaan elevasi dianggap tidak signifikan dalam konteks analisis ini, maka persamaan umum untuk menghitung eksergi fisik per unit massa fluida dapat disederhanakan menjadi bentuk yang lebih ringkas dan praktis untuk diterapkan.:

$$\varepsilon_x = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \dots\dots\dots (0.12)$$

Besaran daya eksergi destruksi sebagai akibat dari fenomena penerataran (*throttling*) aliran uap yang melewati MSVGV dapat dikuantifikasi dengan persamaan (Agrež et al., 2020):

$$E_{dest} = \varepsilon_x \cdot \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \dots\dots\dots (0.13)$$

Dan sesuai dengan persamaan sebelumnya, di mana \dot{m} adalah laju aliran massa, maka laju destruksi eksergi yang secara langsung mencerminkan energi yang tidak dapat lagi dimanfaatkan untuk menghasilkan kerja yang berguna akibat proses penyekatan yang bersifat ireversibel, dapat dihitung menggunakan formulasi berikut :

$$\dot{E}_{x,dest} = \dot{m}(\varepsilon_{x,1} - \varepsilon_{x,2}) = \dot{m}[(h_1 - h_o) - T_o(s_1 - s_o) - (h_2 - h_o) + T_o(s_2 - s_o)] \dots\dots\dots (II.14)$$

$$\dot{E}_{x,dest} = \dot{m}[(h_1 - h_2) - T_o(s_1 - s_2)] \dots\dots\dots (II.15)$$

Persamaan (II.14) ini merepresentasikan perhitungan laju destruksi eksergi ($\dot{E}_{x,dest}$) (Adibhatla & Kaushik, 2014), yang menunjukkan bahwa besarnya destruksi eksergi berbanding lurus dengan laju aliran massa fluida (\dot{m}), temperatur lingkungan referensi (T_0), dan selisih antara entropi spesifik pada kondisi keluar (s_1) dan kondisi masuk (s_2) dari volume kontrol yang ditinjau:

$$\dot{E}_{x,dest} = \dot{m}[-T_0(s_1 - s_2)] \dots\dots\dots (0.14)$$

Besaran destruksi eksergi secara kuantitatif merepresentasikan jumlah energi yang secara termodinamika "hilang" atau tidak dapat lagi dikonversi menjadi kerja mekanik yang bermanfaat akibat adanya proses penceratan yang bersifat ireversibel dalam sistem.

Untuk keperluan analisis termodinamika yang berkaitan dengan eksergi, perlu didefinisikan suatu kondisi referensi lingkungan yang dikenal sebagai "kondisi mati" (dead state). Kondisi ini merepresentasikan keadaan di mana sistem berada dalam kesetimbangan termal dan mekanik dengan lingkungannya.

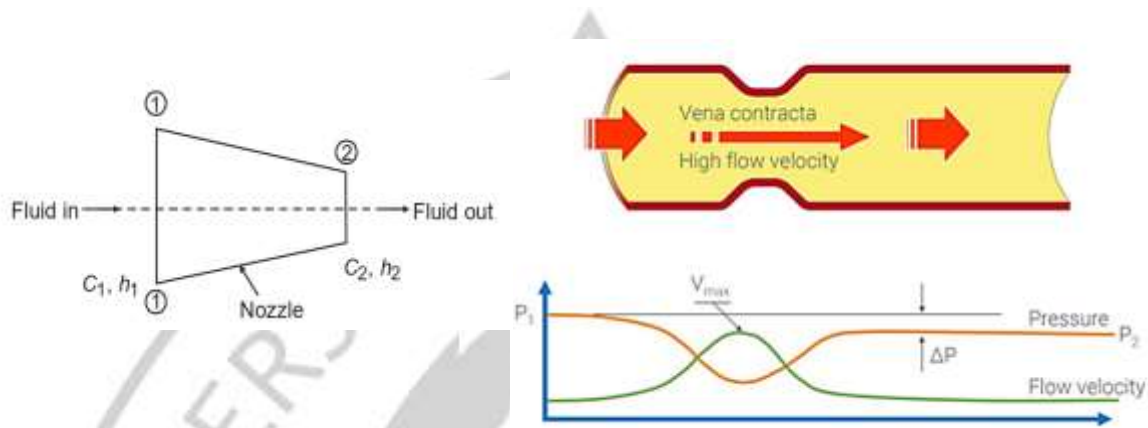
1.3.2 Tekanan Jatuh (*Drop Pressure*) pada katup MSVGV

Katup adalah alat yang didesain untuk mengontrol aliran fluida menuju suatu sistem. Pada kerja nominalnya, yaitu diatas beban minimum pada pembangkit *base load*, katup MSV merupakan katup *on-off* yang memiliki fungsi pengaman reaksi cepat untuk keselamatan sistem turbin. Sedangkan katup GV lebih berfungsi sebagai pengontrol aliran uap agar dapat memenuhi kebutuhan kontrol terhadap kecepatan putaran poros dan bekerja sama dengan generatot untuk memenuhi target beban.

Pengaturan aliran pada valve/katup pada umumnya dilakukan dengan mengubah area pencekikan saat poros/*stem* katup digerakkan, lihat Gambar II.6, dalam hal ini adalah membuat luasan penampang efektifnya berubah sesuai kebutuhan aliran masa fluida melalui pergerakan batang poros (*stem*) MSV dan GV. Saat fluida bergerak dari pipa lubang masuk katup kemudian mengalami penyempitan akibat luas penampang yang lebih kecil maka kecepatannya meningkat untuk memungkinkan aliran massa melalui katup yang konstan.

Efek *Throttling* pada katup kontrol mengacu pada aliran fluida yang melalui pengurangan geometri dalam kondisi isenthalpik, yaitu tidak mengalami perpindahan panas dan juga tidak memberikan kerja, atau proses *isenthalphy*. Pada Gambar II.6 menunjukkan fluida yang melewati pencekikan dari sisi 1 ke sisi 2 dan mengalami penurunan tekanan dan peningkatan volume, tetapi

selama aliran ini entalpi tetap konstan, sehingga $h_1 = h_2$ (Bhowmik et al., 2023). sebagaimana Persamaan II.15.



Gambar 0.3. Proses Throttling pada katup kontrol fluida dapat diibaratkan sebagai nosel dan penggambaran vena contracta (Bhowmik et al., 2023)

Penting untuk dipahami bagaimana kondisi hubungan perubahan tekanan-kecepatan ketika fluida melalui restriksi, yang dijabarkan dalam persamaan kontinuitas, dimana V adalah kecepatan rata-rata dan A adalah luasan aliran fluida. Notasi 1 adalah merujuk pada kondisi hulu dan notasi 2 adalah kondisi hilir. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa kecepatan dan tekanan dapat diubah dengan menyesuaikan bukaan katup (luas) lintasan.

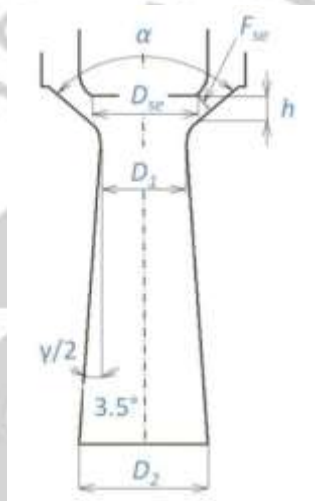
$$\rho_1 \cdot V_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot A_2 \dots\dots\dots (0.15)$$

Energi yang dibutuhkan untuk meningkatkan kecepatan sebagai efek penyempitan diperoleh dengan mengorbankan tekanan, sehingga titik kecepatan tertinggi juga merupakan titik tekanan terendah (penampang terkecil). Titik di mana tekanan berada pada titik terendah disebut "vena contracta", Gambar II.4. Ini terjadi karena penyempitan area aliran di dalam katup, yang menyebabkan peningkatan kecepatan fluida sesuai dengan prinsip konservasi masa dan konservasi energi. Titik vena contracta biasanya terletak sedikit di hilir dari orifis katup (Bhatia). Pada titik ini, tekanan fluida berada pada level terendah pada sistem yang di analisis namun aliran akan mencapai kecepatan tinggi, dan terjadi turbulensi sehingga kehilangan energi dengan ΔP yang tidak bisa dihindari. Jika kecepatan terlalu tinggi akibat pengecilan yang terlalu sempit akan menyebabkan aliran tinggi dan semakin tinggi resiko kerusakan pada material.

Persamaan untuk menghitung *drop* tekanan yang terjadi sepanjang titik saluran dalam hal ini pada saluran masuk, MSV, saluran pengatur, GV, dengan masih berdasar kekekalan massa dapat dihitung dengan persamaan

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{A_v}{A_p}\right)^2\right) \dots\dots\dots (0.16)$$

Geometri dasar katup kontrol sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II.7. Dimana $\Delta p =$ Drop pressure pada katup, $\rho =$ Densitas fluida uap, $v =$ Kecepatan fluida, $A_v =$ Luasan area katup, $A_p =$ Luasan area pipa



Gambar 0.4. Geometri dasar katup kontrol (Mrózek et al., 2021a)

Derajat sudut dari perpanjangan leher difuser adalah konstan. Sudut dari perpanjangan katup adalah proporsional berdasar kenaikan pentul katup (*cone lift*). Corong katup membentuk sudut sebesar α (Mrózek et al., 2021b), sehingga luas area dapat dihitung dengan persamaan:

$$A_v = \pi \left(D_{se} + h \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right) h \sin \frac{\alpha}{2} \dots\dots\dots (0.17)$$

Dengan pengetahuan luasan area yang dilewati fluida maka dapat dihitung rasionya terhadap luasan area pada pipa masuk sebelum katup kontrol, dan juga pada leher difuser dan akhir difuser yang akan memberi gambaran pencekikan yang dialami fluida pada katup agar diperoleh aliran yang dikehendaki.

1.4 Analisa Numerik dengan Pemodelan CFD untuk MSV dan GV

Tujuan dari analisa numerik dengan pemodelan katup MSVGV melalui metode Komputasi fluida dinamis (Computational Fluid Dynamics, CFD) pada kasus yang dibahas ini adalah untuk memperoleh variabel-variabel yang diperlukan untuk menganalisa modifikasi yang dilakukan sehingga didapatkan data yang diperlukan, seperti distribusi tekanan, variasi temperatur dan profil kecepatan dalam katup, agar dapat dilakukan analisa lebih lanjut sebelum modifikasi diterapkan

secara riil. Hasil data tersebut akan menjadi dasar pengambilan keputusan bagi pemangku kepentingan sebelum penerapannya

CFD adalah salah satu metode penyelesaian mekanika fluida yang menggunakan analisis numerik dan algoritma untuk memecahkan dan menganalisis masalah yang melibatkan aliran fluida. Proses analisa melalui CFD biasanya dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu mengetahui Permasalahan fisikal agar mendapat model matematis yang sesuai, kemudian menerapkan jejaring elemen (*mesh*) sesuai pada model yang telah dibuat atau biasa disebut tahap pre-proses. Tahap ketiga adalah menentukan tipe analisis yang tepat, kemudian memberi masukan properti fluida dan kondisi batas. Tahap kelima menentukan skema numerik, yaitu bagaimana skema sistem penyelesaian persamaan dan interpolasinya. Tahap ke enam adalah tahap pasca-proses, yaitu mengkoleksi hasil kalkulasi(ANSYS, 2021)

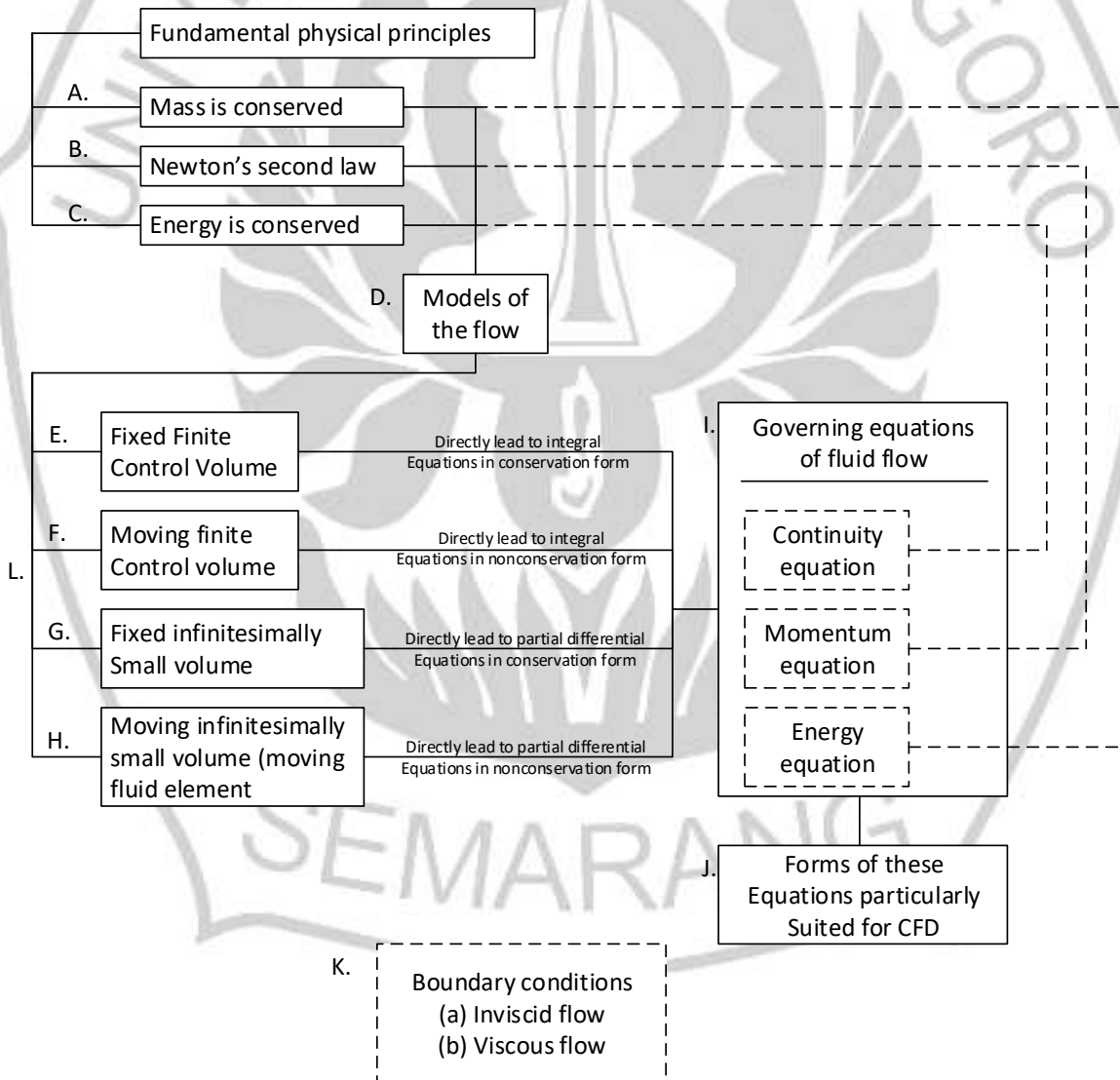
Proses penggunaan metode ini dimulai dengan membuat representasi digital dari bentuk fisik geometri dan beberapa parameter penting lain yang perlu dibuat seakurat mungkin. Geometri yang kontinyu ini kemudian dibagi menjadi jaring (*mesh*) elemen atau sel kecil. Persamaan yang mengatur aliran fluida, terutama persamaan Navier-Stokes, diterapkan pada sel-sel ini untuk mensimulasikan perilaku fluida. Dengan menerapkan persamaan ini, CFD dapat memprediksi berbagai sifat fluida, seperti kecepatan, tekanan, dan suhu, dalam kondisi yang berbeda-beda sesuai kebutuhan penelitian.

Ansys Fluent merupakan perangkat lunak CFD terkemuka, menyempurnakan proses ini dengan menyediakan kemampuan pemodelan fisik dengan tingkat akurasi yang bisa diterima. Ansys Fluent memungkinkan pengguna untuk membuat atau mengimpor geometri, membuat *mesh*, dan menerapkan kondisi batas dengan mudah. Pemecahan masalah yang handal pada perangkat lunak ini dapat menangani simulasi yang kompleks, termasuk aliran turbulen dan multifasa. Pengguna dapat menyiapkan simulasi, menjalankan, dan menganalisis hasilnya dalam lingkungan Ansys Workbench yang terintegrasi. Integrasi ini menyederhanakan proses dan cukup memudahkan terutama terkait kompatibilitas antar perangkat lunak, sehingga lebih mudah untuk mengoptimalkan desain dan mendapatkan hasil yang bisa mendekati riil. Ansys Fluent membantu penelitian membuat keputusan yang tepat, yang mengarah pada keputusan yang lebih baik dan lebih efisien.

1.4.1 Model Matematis dalam Komputasi Fluida Dinamis

Pada semua komputasi fluida dinamis, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), dalam satu bentuk atau bentuk yang lain, memiliki rujukan yang sama melalui persamaan fundamental yang mengatur dinamika fluida, yaitu kesinambungan (*continuity*), momentum dan persamaan energi. Semua persamaan yang terlibat adalah tentang persamaan fisika. Persamaan tersebut merupakan pernyataan matematis dari 3 fundamental prinsip fisik dasar dari dinamika fluida (Anderson, 1995), yaitu :

- a. Kekekalan massa.
- b. Hukum kedua Newton, $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.
- c. Kekekalan energi.



Gambar 0.5. Alur dari penerapan persamaan untuk penerapan pada CFD (Anderson, 1995)

Gagasan dari komputasi fluida dinamis adalah dengan membuat model alirannya dan menerapkan ketiga prinsip fisikal fundamental di atas. Prinsip-prinsip tersebut (*A, B, C*) kemudian diterapkan pada model aliran yang kemudian akan menghasilkan pernyataan matematis untuk setiap prinsip yang terlibat, yaitu kontinuitas, momentum dan persamaan energi. Prinsip metode komputasi fluida dinamis ditunjukkan melalui gambar II.9. Beberapa pemodelan aliran (*D*) yang ditunjukkan pada gambar II.9, (*E, F, G, H*), akan secara langsung menghasilkan pernyataan matematis masing-masing, dengan beberapa dalam bentuk prinsip konservasi dan lainnya dalam bentuk nonkonservasi.

Setelah persamaan kontinuitas, momentum dan persamaan energi didapatkan, dimana pada gambar II.9, ditunjukkan melalui kotak persamaan yang mengatur aliran fluida(*I*), maka bentuk tersebut sudah bisa diterapkan untuk merumuskan penyelesaian melalui CFD (*J*). Langkah selanjutnya adalah menetapkan kondisi batas fisikal (*K*) dan membuat pernyataan matematis yang tepat. Kemudian persamaan pengatur aliran fluida tersebut harus di selesaikan dengan menerapkan kondisi batas yang telah ditetapkan (*K*). Aspek fisikal kondisi batas merupakan variable independen sehingga pada gambar II.9 digambarkan secara terpisah.

Persamaan Kontinuitas

Prinsip penting untuk menjabarkan kontinuitas adalah:

Prinsip Fisikal : Konservasi massa (Kekekalan massa)

Prinsip ini berlaku pada semua model aliran sesuai Gambar II.3. Bentuk persamaan differensial parsial dari persamaan kontinuitas dalam bentuk konservasi diberikan pada Persamaan 0.18 (Anderson, 1995). Dimana ρ adalah densitas dari fluida; x, y, z merupakan komponen kecepatan; $dx/dt = u, dy/dt = v, dz/dt = w$.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (0.18)$$

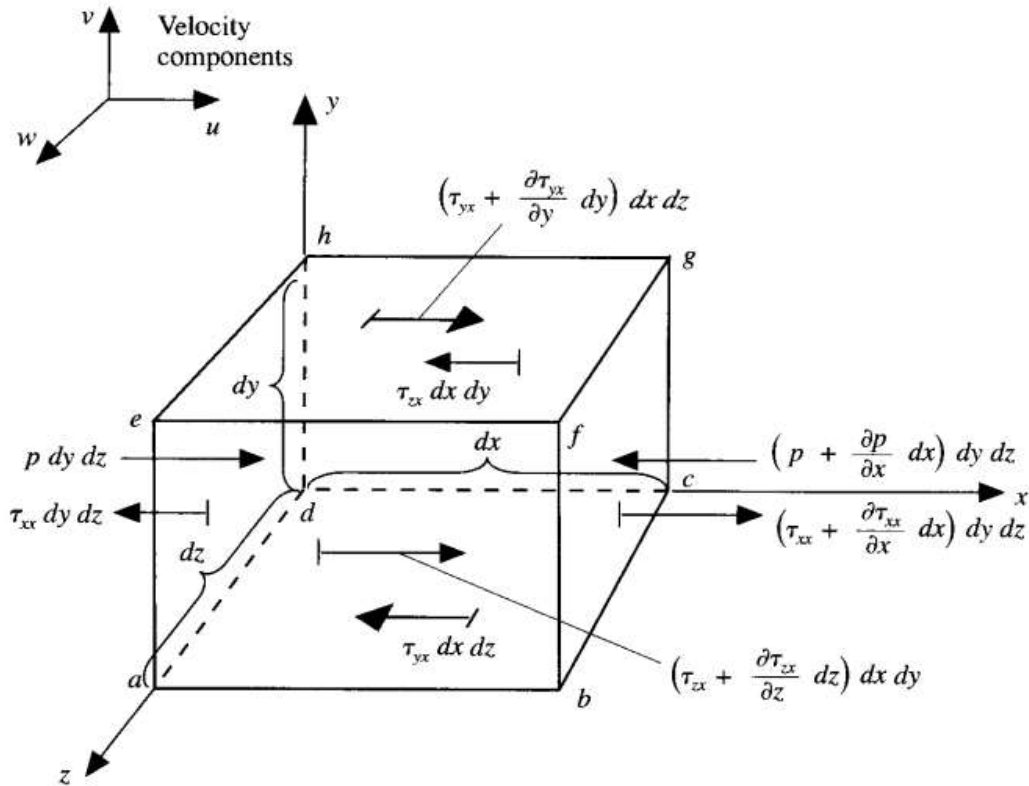
Persamaan Momentum

Prinsip penting fisikal kedua yang diterapkan pada model aliran adalah:

Prinsip Fisikal: F = ma (hukum kedua Newton) (0.19)

yang akan menghasilkan persamaan momentum. Pada model aliran yang berlaku adalah model elemen fluida bergerak karena akan dapat memenuhi persamaan momentum dan persamaan energi, sehingga pada arah sumbu x : $F_x = ma_x$. Gaya yang dialami benda (gravitasi) dan gaya permukaan

(tekanan dan viskositas) yang dialami per unit massa pada elemen fluida adalah \mathbf{f} , dengan f_x pada komponen x , dan volume dari elemen fluida ($dx dy dz$). Tegangan normal, τ_{xx} , dan tegangan geser, τ_{xy} , yang dialami fluida terhadap waktu yang mengakibatkan deformasi pada elemen fluida pada bidang xy ditunjukkan Gambar II.10. Gaya yang di alami oleh elemen fluida pada arah x



Gaya yang di alami oleh elemen fluida pada arah $x = \rho f_x(dx dy dz)$ (0.20)

Gambar 0.6. Elemen fluida yang bergerak dan sangat kecil, hanya gaya pada arah sumbu x yang ditunjukkan untuk penurunan persamaan momentum untuk komponen x .

Dengan $m = \rho dx dy dz$ dan $a_x = \frac{Du}{Dt}$ maka di dapatkan persamaan *Navier-Stokes* bentuk nonkonservasi pada arah x :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \dots\dots\dots (0.21)$$

dalam bentuk substansial derivativ dan $\mathbf{V} \cdot \nabla$ adalah laju waktu perubahan volume dari element fluida yang bergerak tiap unit volume maka persamaan menjadi

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \mathbf{V} \cdot \nabla u \dots\dots\dots (0.22)$$

dan subsitusi persamaan dengan persamaan berikut, dimana μ adalah koefisien viskositas molekular, λ adalah koefisien viskositas kedua (dimana Stokes memiliki hipotesis $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$).

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} \dots\dots\dots (0.23)$$

$$\tau_{xx} = \lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (0.24)$$

Maka persamaan momentum lengkap pada arah x, y, z Navier-Stokes dalam bentuk konservasi ditunjukkan pada Persamaan 0.2, nama persamaan ini diambil dari nama dua ilmuwan yaitu G. Stokes orang Inggris dan M. Navier orang Prancis yang secara independen menyusun persamaannya pada awal abad 19 (Anderson, 1995).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho f_z \end{aligned} \dots\dots\dots (0.25)$$

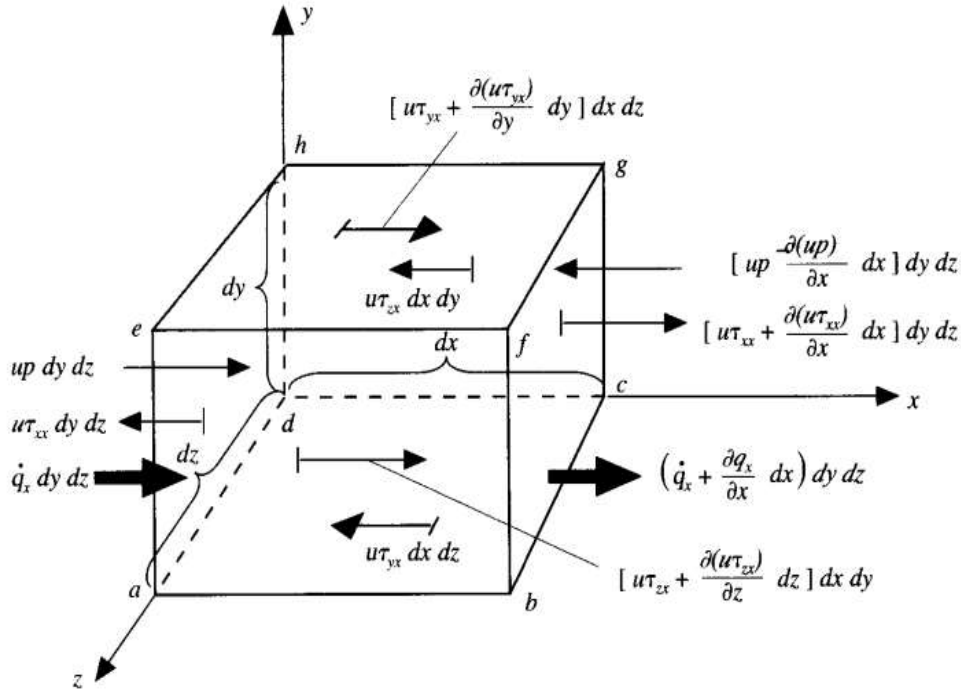
Persamaan Energy

Prinsip ketiga adalah terkait energi yang dimiliki fluida yang bergerak:

Prinsip fisikal : Konservasi Energi (Kekekalan energi)

Dengan model aliran yang bergerak untuk elemen fluida yang sangat kecil maka prinsip yang dibahas adalah hukum termodinamika I yang bekerja padanya, yaitu:

laju perubahan Energi dalam pada elemen fluida	=	fluks Panas bersih pada fluida	+	laju Kerja yang dialami oleh elemen karena gaya benda dan gaya permukaan
A	=	B	+	C



Gambar 0.7. Fluks energi pada sumbu x yang diasosiasikan pada elemen sangat kecil dari fluida yang bergerak.

Kerja yang dilakukan gaya yang dimiliki elemen fluida yang bergerak dengan kecepatan \mathbf{V} adalah : $\rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} (dx dy dz)$. Dengan mempertimbangkan gaya permukaan (tekanan plus tegangan geser dan tegangan normal), maka kerja yang terjadi sederhananya merupakan komponen kecepatan dikalikan gaya. Untuk mendapatkan laku kerja bersih yang bekerja pada elemen fluida yang bergerak adalah jumlah dari kontribusi gaya pada semua permukaan dari semua arah.

$$C = - \left[\left(\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(wp)}{\partial z} \right) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zz})}{\partial z} \right] dx dy dz + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} dx dy dz \dots \dots \dots 0 \quad (0.26)$$

Fluks panas pada elemen fluida yang disebabkan oleh pemanasan volumetrik yaitu penyerapan atau emisi radiasi dan perpindahan panas melalui permukaan karena temperatur gradien (konduksi). Panas bersih yang dipindahkan oleh konduksi, dengan k adalah konduktivitas termal adalah

$$B = \left[\rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial(T)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial(T)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial(T)}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \dots \dots \dots (0.27)$$

Bagian A adalah laju perubahan energi dalam yang dimiliki oleh elemen fluida, dalam hal ini adalah adalah energi yang dimiliki sistem gas dari setiap gerak acak molekul atau atom, e (setiap unit massa), dan energi kinetik karea pergerakan translasi elemen fluida yaitu $V^2/2$. Sehingga untuk bentuk konservasi bagian A dapat di dirumuskan:

$$A = \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \mathbf{V} \right] \dots \dots \dots (0.28)$$

Maka persamaan energi lengkap, sesuai Persamaan 0.3, dapat disusun untuk bentuk konservasi dapat di susun sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \mathbf{V} \right] = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial(T)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial(T)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial(T)}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial(u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} + \frac{\partial(w\rho)}{\partial z} \right) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V}$$

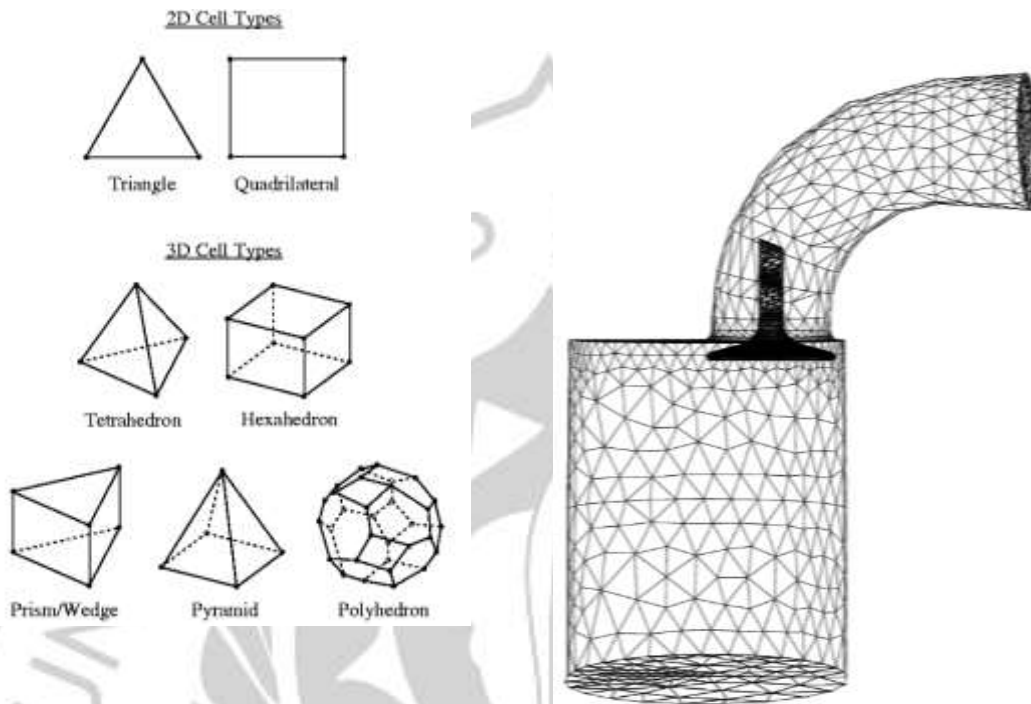
(0.29)

1.4.2 Pemodelan MSVGV

Dasar dari CFD adalah menerapkan prinsip persamaan di atas pada pada sistem yang di selidiki dengan cara membagi-bagi fluida menjadi potongan sangat kecil elemen fluida yang bergerak kemudian menerapkan persamaan tersebut, diskritisasi, agar di dapat nilai dari parameter yang dibutuhkan. Karena begitu masifnya elemen yang diperlukan dan kompleksitas persamaan maka proses ini memerlukan bantuan peralatan komputasi dan perangkat lunak yang teruji(Ansys Inc., 2018).

Proses diskritisasi menjadi penting agar hasil yang didapatkan dapat semakin akurat. Untuk sistem yang semakin besar dan kompleks maka kebutuhan ukuran dari pembagian elemen fluida akan semakin kecil, dan hal ini membutuhkan sumber daya komputasi yang semakin besar. Sehingga perlu diperhatikan ukuran dan model diskritisasi elemen yang tepat agar didapatkan hasil yang mendekati akurat dengan proses yang efisien sesuai sumber daya komputasi yang dimiliki.

Pembangunan Jejaring (Meshing)



Gambar 0.8. Bentuk sel 3 dimensi yang umum adalah bentuk tetrahedron, piramida, balok dan prisma segitiga (Ansys Fluent User's Guide, 2010)

Bentuk jejaring elemen fluida dapat di generate dalam beberapa bentuk sesuai fasilitas yang disediakan oleh perangkat lunak. Untuk sel dua dimensi biasanya berbentuk segitiga atau segiempat. Sedangkan bentuk sel 3 dimensi yang umum adalah bentuk tetrahedron, piramida, balok dan prisma segitiga, sebagaimana ditunjukkan Gambar II.12. Jejaring elemen fluida yang dimunculkan juga bergantung pada geometri yang diteliti, dan dipilih, yaitu jejaring terstruktur, jejaring tidak terstruktur dan hybrid.

Penentuan tipe analisis yang tepat,

Ide dasar dari komputasi fluida dinamis adalah bagaimana menerapkan berbagai persamaan differensial yang diuraikan di sub bab 2.4.1, yaitu terkait persamaan-persamaan dengan prinsip kontinuitas, momentum dan energi menjadi persamaan aljabar yang kemudian akan diterapkan dan dikalkulasikan satu-persatu pada setiap node elemen yang telah mengalami diskritisasi (*meshing*).

Properti Fluida dan Kondisi Batas

Pada tahap pemrosesan maka ditentukan kondisi batas dan metode inisiasinya. Penentuan kondisi batas meliputi masukan pada kondisi inlet yaitu kecepatan inlet (jika digunakan analisa unntuk aliran inkompresibel. aliran massa inlet : termasuk didalamnya temperatur fluida (jika persamaan energi akan digunakan dalam proses analisa), arah aliran dan besaran turbulensi. Tekanan inlet akan dimasukkan dengan tekanan total (absolute). Pada kondisi batas sisi outlet maka aliran keluar akan diekstrapolasi dari data yang ada sebelum mencapai sisi keluar.

Cell zone fluid adalah zona fluida yaitu domain simulasi analisa fluida untuk mengatur properti fluida seperti densitas, viskositas, dan lainnya. Pengaturan zona sel fluida digunakan untuk memodelkan berbagai fenomena aliran fluida, seperti aliran melalui pipa, aliran di sekitar sayap pesawat, atau aliran dalam ruang tertutup, dengan fungsi tambahan digunakan untuk mengatur sumber panas, sumber momentum, atau media berpori dalam simulasi.

Cell zone solid didefinisikan sebagai zona padat yaitu bagian dari domain simulasi yang digunakan untuk mengatur properti material padat seperti konduktivitas termal, kapasitas panas, sumber panas dan distribusi panas (Ansys Fluent User's Guide, 2010).

Skema numerik sistem penyelesaian persamaan dan interpolasinya.

Untuk menyelesaikan komputasi maka ada beberapa solusi numerik untuk mode diskritisasi aliran yang berbeda

Metode finite difference: Metode beda hingga menggunakan grid untuk mendiskretisasi persamaan diferensial yang mengatur aliran fluida (kecepatan, tekanan, aliran dan sebagainya). Pendekatan ini menggantikan turunan parsial dengan aproksimasi dalam bentuk nilai-nilai pada node grid, menghasilkan sistem persamaan aljabar linear. Metode ini sederhana dan efektif untuk masalah dengan geometri sederhana dan grid terstruktur.

Metode finite element: Metode elemen hingga melibatkan pembagian elemen yang modelkan menjadi elemen-elemen kecil yang saling berhubungan dengan memberlakukan prinsip kekekalan massa, momentum, dan energi. Setiap elemen diwakili oleh fungsi basis yang mendekati solusi dalam elemen tersebut dengan penyusunan dalam persamaan aljabar dan memecahkannya melalui penyelesain matriks. Metode ini sangat fleksibel dan dapat menangani geometri kompleks serta kondisi batas yang rumit². Metode elemen hingga sering digunakan dalam analisis struktur dan masalah multifisika karena kemampuannya untuk menangani berbagai jenis elemen dan material.

Metode *finite volume*: Metode volume hingga mendiskretisasi domain menjadi volume kontrol kecil dan menerapkan hukum konservasi (massa, momentum, energi) pada setiap volume kontrol. Metode ini secara alami memastikan konservasi pada skala lokal dan global. Metode volume hingga sangat populer dalam CFD karena kemampuannya untuk menangani aliran fluida dengan geometri kompleks dan grid tidak terstruktur. Metode ini juga cocok untuk masalah yang melibatkan perpindahan panas.

Pasca-proses, yaitu mengkoleksi hasil kalkulasi

Pasca-proses dalam analisis CFD melibatkan pengumpulan dan visualisasi hasil kalkulasi untuk memahami perilaku fluida secara mendalam. Langkah pertama adalah ekstraksi data dari simulasi, yang mencakup parameter seperti kecepatan, tekanan, dan suhu. Data ini kemudian diolah menjadi berbagai format visual seperti grafik, animasi, dan gambar untuk memudahkan interpretasi. Visualisasi ini membantu mengidentifikasi fenomena dinamika fluida yang kompleks dan memberikan gambaran tentang aliran fluida dalam berbagai kondisi.

Langkah berikutnya adalah analisis kuantitatif dan kualitatif dari data yang telah diekstraksi. Ini melibatkan pembuatan plot kontur, plot vektor, dan garis aliran untuk menunjukkan distribusi parameter di seluruh domain simulasi. Selain itu, nilai rata-rata area dan massa, tekanan temperatur juga diberikan pada berbagai posisi yang diinginkan. Analisis ini memungkinkan identifikasi area dengan efisiensi rendah dan melakukan optimasi yang diperlukan untuk meningkatkan desain.

Hasil pasca-proses digunakan untuk komunikasi (presentasi) dan pelaporan. Visualisasi yang dihasilkan dapat digunakan untuk membuat laporan yang mudah dipahami oleh pemangku kepentingan yang bisa jadi mungkin tidak memiliki latar belakang teknis. Grafik dan gambar membantu menjelaskan manfaat dan potensi kelemahan dari desain atau produk tertentu. Dengan demikian, pasca-proses dalam CFD tidak hanya membantu dalam memahami perilaku fluida tetapi juga dalam mengkomunikasikan hasil secara efektif untuk membantu pengambilan keputusan yang lebih baik.

1.5 Verification dan Validasi Model

Verifikasi dan validasi merupakan langkah penting dalam komputasi fluida dinamis, yaitu untuk memastikan keakuratan dan keandalan hasil CFD berkualitas tinggi. Verifikasi adalah proses untuk memastikan bahwa metode numerik yang digunakan dalam simulasi CFD telah menerapkan

model matematika yang digunakan dengan benar. Ini berarti memeriksa apakah kode dan algoritma yang digunakan dalam perangkat lunak CFD bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Verifikasi biasanya melibatkan: Pengujian kode: Memastikan bahwa tidak ada kesalahan dalam kode yang dapat mempengaruhi hasil simulasi. Pengujian solusi: Memastikan bahwa solusi numerik mendekati solusi analitis atau solusi yang diketahui dari masalah yang disederhanakan (Roy & Oberkampf, 2016).

Verifikasi dilakukan saat CFD dikembangkan pada suatu software yang dibangun. Pada software dengan penggunaan luas untuk kasus yang mirip, maka verifikasi kode software pada umumnya telah dilakukan oleh pengembang untuk meningkatkan kehandalan softwarena. Namun ternyata masih ada aspek penting yaitu terkait error dan ketidakpastian yang tak terhindarkan yang terasosiasikan dengan CFD, sehingga untuk pengguna CFD dapat mengikuti *CFD-Guideline* yang ditulis oleh praktisi berpengalaman pada pengkhususan dibidangnya. “*Best Practice Guidelines*” from the ERCOFTAC Special Interest Group on *Quality and Trust in Industrial CFD* mengungkapkan bahwa dengan penerapan panduan pengaturan umum penting akan dapat melayani sekitar 80% permasalahan dengan batasan proses satu fasa, kompresible atau inkompresibel, steady atau unsteady, turbulen atau laminar dengan atau tanpa perpindahan panas. Namun panduan umum tersebut akan tidak mengkaver proses pembakaran, aliran dua fasa, aliran dengan radiasi, fluida *non newtonian*, aliran supersonik dan hipersonik dengan *shock* dan aliran kompleks yang lain. Panduan akan relevam untuk berbagai mekanikal, aeronautik, otomotif, pembangkit, lingkungan dan aplikasi rekayasa proses (Herwig, 2006).

Validasi adalah proses untuk memastikan bahwa hasil simulasi CFD sesuai dengan data eksperimental atau realitas fisik. Ini berarti membandingkan hasil simulasi dengan hasil dari eksperimen atau pengukuran nyata untuk memastikan bahwa model yang digunakan dalam simulasi benar-benar mencerminkan fenomena fisik yang sedang dipelajari. Validasi biasanya melibatkan: Pengumpulan data eksperimental: Mengumpulkan data dari eksperimen yang relevan untuk dibandingkan dengan hasil simulasi. Dan Perbandingan hasil: Membandingkan hasil simulasi dengan data eksperimental untuk menilai kesesuaian model (Groves et al., 2013).

Pada beberapa penelitian sebelumnya proses validasi biasa dilakukan dengan perbandingan berdasar metode eksperimental dengan membuat model dengan skala lebih kecil dengan metode numerik melalui CFD dan juga dibandingkan dengan analisa fisik, sehingga dapat diukur seberapa besar penyimpangan dari beberapa metoda yang dianalisa. Proses validasi CFD

yang paling baik adalah perbandingan hasil modeling numerik dengan melakukan percobaan pada peralatan secara langsung. Untuk mengantisipasi hal ini mengingat resiko percobaan, maka validasi pada peralatan yang sudah beroperasi secara komersial dilakukan dengan membandingkan analisa numerik CFD untuk konfigurasi 4 MSVGV saat normal operasi juga dengan 4 MSVGV. Proses validasi ini adalah untuk memberi keyakinan bahwa parameter inputan untuk software, yaitu geometri, parameter inputan dari properti uap masuk, inputan kondisi batas dan beberapa asumsi inputan model memberi hasil yang dapat diterima dan dengan perulangan untuk beberapa tingkat beban yang merupakan operasi normal.

Parameter inputan ini akan menjadi basis simulasi analisa numerik untuk konfigurasi 2 MSVGV dengan variasi beberapa tingkat beban. Dengan adanya verifikasi dan melakukan validasi, kita dapat meningkatkan kepercayaan terhadap hasil simulasi CFD dan memastikan bahwa model yang digunakan benar-benar mencerminkan fenomena fisik yang sedang diteliti.

