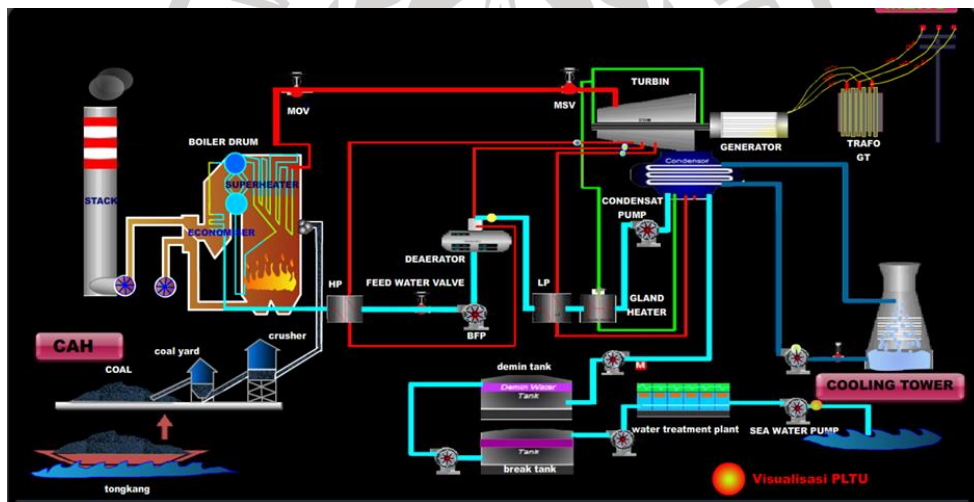


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PLTU Stocker

PLTU stoker adalah pembangkit uap yang menggunakan stoker boiler yaitu pembakaran batubara padat berlangsung di atas grate (jeruji/grate bergerak) dan suplai udara pembakaran disalurkan dari bawah atau samping untuk menopang pembakaran (Hidayat, Cahyadi and Nugroho, 2017). Sistem ini umumnya memakai batubara ukuran lebih besar (tidak *dipulverize*). Dalam hal ini, stoker berperan mengatur laju suplai bahan bakar ke ruang bakar, menjaga ketebalan bed bahan bakar, dan membantu distribusi udara sehingga pembakaran berlangsung stabil dan efisien. Performa stokers sangat berpengaruh terhadap distribusi suhu, efisiensi pembakaran, dan emisi (partikulat, CO, NO_x) (Guo *et al.*, 2019).

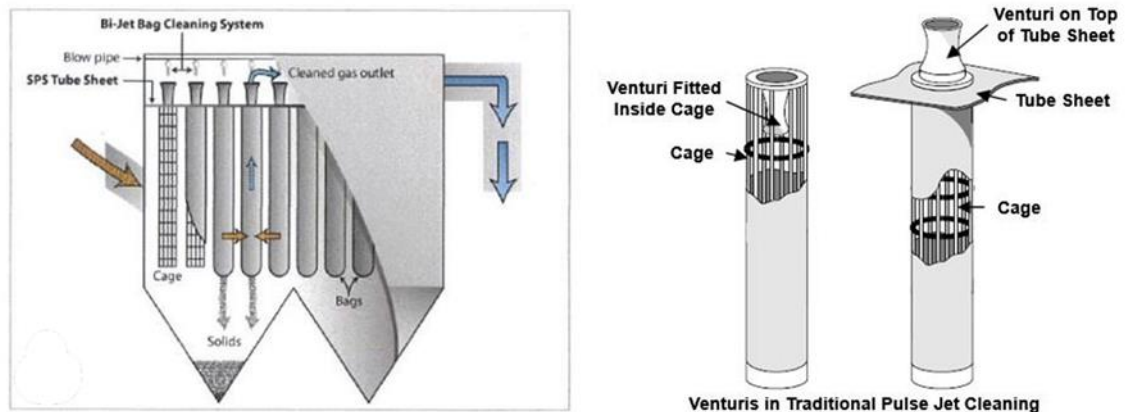


Gambar 2.1 Skematik siklus PLTU stoker (Buku PLTU)

2.2 Bag House Filter / Cloth Bag Filter

Bag filter merupakan alat untuk memisahkan partikel kering dari gas (udara) pembawanya. Di dalam bag filter, aliran partikel gas yang kotor akan masuk ke dalam beberapa longsongan filter (disebut juga kantong atau *filter cloth*) yang berjajar secara paralel dan meninggalkan debu filter tersebut (Sparks and Chase, 2020). Aliran debu dan gas dalam bag filter dapat melewati kain (*fabric*) ke segala

arah. Partikel debu bertahan di sisi kotor kain, sedangkan gas bersih akan melewati sisi bersih kain. Debu secara periodik dibersihkan dari kantong dengan menggunakan aliran udara terbalik (Miller, 2011).

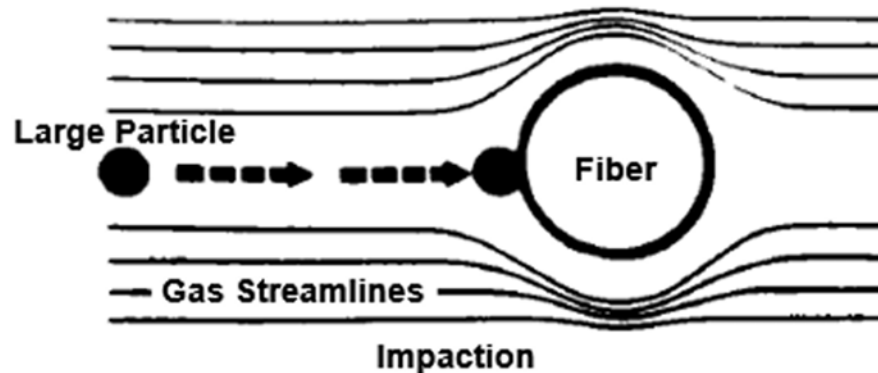


Gambar 2.2 Cara kerja bag house filter (Buku PLTU)

2.3 Prinsip Kerja Cloth Bag Filter

Berdasarkan K.P.Shah, *Working Design Considerations Maintenance Of Bag Type Fabric Filters* (2017), *Filter Cloth* memanfaatkan ukuran dari partikel debu yang lebih besar dari molekul gas. Oleh karena itu, ketika gas kotor disaring melalui *Filter Cloth*, partikel-partikel tersebut ditangkap pada filter sementara gas bersih keluar. Partikel debu pada umumnya mengapung di sepanjang aliran gas, jadi jika diletakkan sesuatu pada aliran tersebut, maka partikel debu akan menabraknya dan akan bertahan disana (Peng *et al.*, 2024). Karena filter memiliki pori-pori kecil di dalamnya, ini memungkinkan molekul gas mengalir melewatinya. Molekul-molekul ini membuat aliran terus menerus di sekitar serat dalam filter. Filter Cloth beroperasi melalui beberapa mekanisme penangkapan partikel, mekanisme tersebut meliputi *straining*, *Impaction*, *Direct Interception*, dan *Diffusion* seperti pada penjelasan berikut :

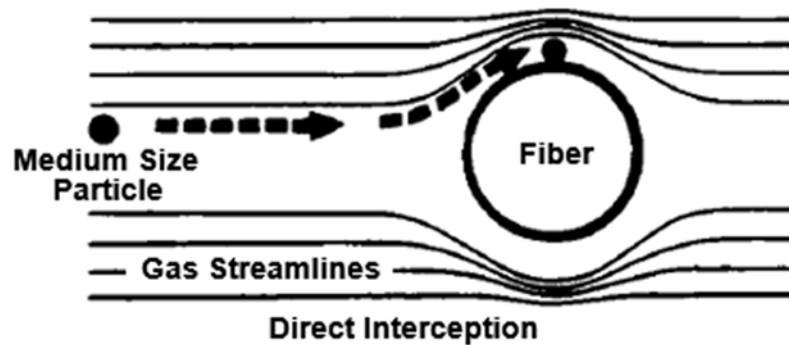
1. Partikel besar dihilangkan dengan mekanisme *Impaction* seperti pada gambar dibawah,



Gambar 2.3 *Impaction* (Buku PLTU)

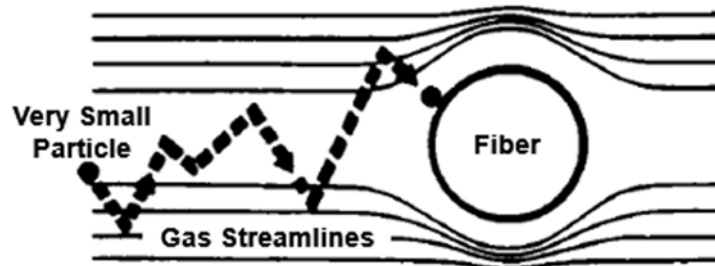
Partikel besar karena terlalu banyak kelembaman, mereka tidak dapat memutar serat Filter Cloth dan terus berjalan lurus sampai menabrak permukaan serat dan tetap di sana seperti yang ditunjukkan pada gambar di atas.

2. Partikel berukuran sedang dihilangkan dengan Direct Interception seperti pada gambar dibawah,



Gambar 2.4 *Direct Interception* (Buku PLTU)

3. Partikel berukuran sangat kecil dihilangkan dengan Diffusion seperti pada gambar di bawah ini,



Gambar 2.5 *Diffusion* (Buku PLTU)

Filter kain juga dapat mengumpulkan partikel yang sangat kecil, dengan diameter kurang dari 1 μm . Partikel ini sangat kecil dan tidak terbawa oleh aliran gas, partikel tersebut hanya memantul dan membelok sedikit saat tertahan oleh molekul gas. Gerakan individu atau acak ini menyebabkan partikel tersebut didistribusikan ke seluruh aliran gas seperti yang ditunjukkan pada gambar di atas dan dikenal sebagai *brownian Diffusion*. Partikel mungkin memiliki kecepatan yang berbeda dari aliran gas dan pada titik tertentu dapat bersentuhan dengan serat Filter Cloth dan menempel.

2.4 Indikator Kinerja Pembangkit (EAF, MOH, dan SOF)

1. Pengantar

Kinerja operasional Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sangat dipengaruhi oleh ketersediaan (*availability*) dan keandalan (*reliability*) sistem pendukung seperti boiler, fan, dan bag house filter. Untuk memantau performa ini, digunakan sejumlah indikator yang terstandarisasi oleh IEEE Std 762 dan juga digunakan oleh PT PLN (Persero) dalam evaluasi kinerja unit pembangkit, yaitu :

a. EAF (*Equivalent Availability Factor*)

EAF adalah ukuran kesiapan pembangkit dengan mempertimbangkan derating pembangkit tersebut terhadap jumlah jam dalam satu periode tertentu (Devi and Putu, 2020).

b. MOH (*Maintenance Outage Hours*)

MOH adalah jumlah jam unit tidak dapat beroperasi sebagai akibat dari keluar pemeliharaan karena *Maintenance Outages* (MO) + *Maintenance Outage Extensions* (MEH) dari *Maintenance Outages* (MO).

c. SOF (*Scheduled Outage Factor*)

SOF adalah rasio dari jumlah jam unit pembangkit keluar terencana (*planned outage* dan *maintenance outage*) terhadap jumlah jam dalam satu periode. Besaran ini menunjukkan prosentase kondisi unit pembangkit akibat pelaksanaan pemeliharaan, inspeksi dan overhaul pada suatu periode tertentu. Ketiga parameter ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai seberapa lama pembangkit siap beroperasi, berapa lama unit berhenti karena pemeliharaan, dan berapa besar proporsi waktu yang digunakan untuk perawatan terencana.

2. Equivalent Availability Factor

EAF adalah parameter utama yang menggambarkan persentase ketersediaan unit pembangkit untuk beroperasi menghasilkan daya listrik dalam periode tertentu, dengan mempertimbangkan gangguan (*outage*) baik terencana maupun tidak terencana. Cara menghitung *Equivalent Availability Factor* (*ANSI/IEEE Std 762-1987 (R2002) – Definitions for Reporting Electric Generating Unit Reliability, Availability, and Productivity*) :

$$EAF = \frac{EUT - (EFOH + ESOH)}{EUT} \times 100\% \dots\dots\dots(2.1)$$

Atau dapat ditulis :

$$EAF = \frac{\text{Total waktu unit siap beroperasi}}{\text{Total waktu kalender}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan:

- | | |
|---|---|
| EUT (<i>Equivalent Unit Time</i>) | : total waktu pengamatan (jam dalam periode tertentu) |
| EFOH (<i>Equivalent Forced Outage Hours</i>) | : jam gangguan tidak terencana |
| ESOH (<i>Equivalent Scheduled Outage Hours</i>) | : jam penghentian karena perawatan terencana. |

Semakin tinggi nilai EAF, semakin tinggi pula tingkat kesiapan unit dalam memenuhi permintaan beban listrik.

3. Maintenance Outage Hours (MOH)

MOH menunjukkan jumlah waktu total (jam) yang digunakan untuk kegiatan pemeliharaan sistem pembangkit, baik yang bersifat terencana maupun tidak terencana.

MOH dapat dibedakan menjadi :

1. Scheduled Maintenance Outage → waktu perawatan rutin yang telah dijadwalkan.
2. Unscheduled Maintenance Outage → waktu perawatan yang muncul akibat gangguan mendadak (corrective maintenance).

Dimana :

$$MOH = ESOH + EFOH \dots \dots \dots (2.2)$$

4. Scheduled Outage Factor (SOF)

SOF menunjukkan persentase waktu unit pembangkit dihentikan karena kegiatan perawatan yang terencana dibandingkan dengan total waktu kalender pada periode pengamatan.

Dimana :

$$SOF = \frac{ESOH}{EUT} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

5. Pressure Drop

Aliran fluida dalam saluran tertutup seperti pipa atau duct selalu mengalami penurunan tekanan sepanjang lintasannya akibat adanya gesekan antara lapisan fluida dengan dinding saluran, serta adanya gangguan aliran yang timbul karena perubahan bentuk geometri seperti belokan, percabangan, atau sambungan. Penurunan tekanan ini dikenal dengan istilah pressure loss atau pressure drop (Çengel & Cimbala, 2018).

Secara umum, kehilangan tekanan total (ΔP_{total}) dalam sistem fluida dapat dibedakan menjadi dua komponen utama, yaitu :

1. Kehilangan tekanan akibat gesekan sepanjang saluran (major loss), dan
2. Kehilangan tekanan lokal akibat fitting seperti elbow, tee, reducer, atau damper (minor loss).

Dengan rumus sebagai berikut :

$$\Delta P_{total} = \Delta P_f + \sum \Delta P_m \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan :

$$\Delta P_f = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \text{ dan } \Delta P_m = K \frac{\rho v^2}{2} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

f = faktor gesekan (Major loss),

L = panjang saluran (m),

D = diameter ekuivalen duct (m),

ρ = densitas fluida (kg/m³),

v = kecepatan rata-rata aliran (m/s), dan

K = koefisien kehilangan lokal pada fitting.

Nilai faktor gesekan f sangat bergantung pada kondisi aliran fluida, yang ditunjukkan oleh bilangan Reynolds (Re) dan kekasaran relatif permukaan saluran (ϵ/D).

Bilangan Reynolds dirumuskan sebagai :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan μ adalah viskositas dinamis fluida (Pa·s). Nilai Re menentukan apakah aliran bersifat laminar, transisi, atau turbulen. Pada sistem duct udara dan flue gas di PLTU, nilai Re umumnya jauh di atas 10⁵, sehingga dapat dikategorikan sebagai aliran turbulen penuh (fully developed turbulent flow). Hubungan antara faktor gesekan, bilangan Reynolds, dan kekasaran relatif pertama kali dirumuskan secara empiris oleh Lewis F. Moody (1944) dalam bentuk Diagram Moody. Diagram ini memperlihatkan variasi faktor gesekan terhadap bilangan Reynolds untuk berbagai tingkat kekasaran relatif (ϵ/D). Dalam kondisi aliran turbulen penuh, nilai f menjadi relatif konstan terhadap perubahan Re dan terutama dipengaruhi oleh kekasaran dinding duct (Moody, 1944; Pirozzoli, 2018). Persamaan Darcy-Weisbach, yang menjadi dasar perhitungan rugi tekanan akibat gesekan, dinyatakan sebagai :

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \dots \dots \dots (2.7)$$

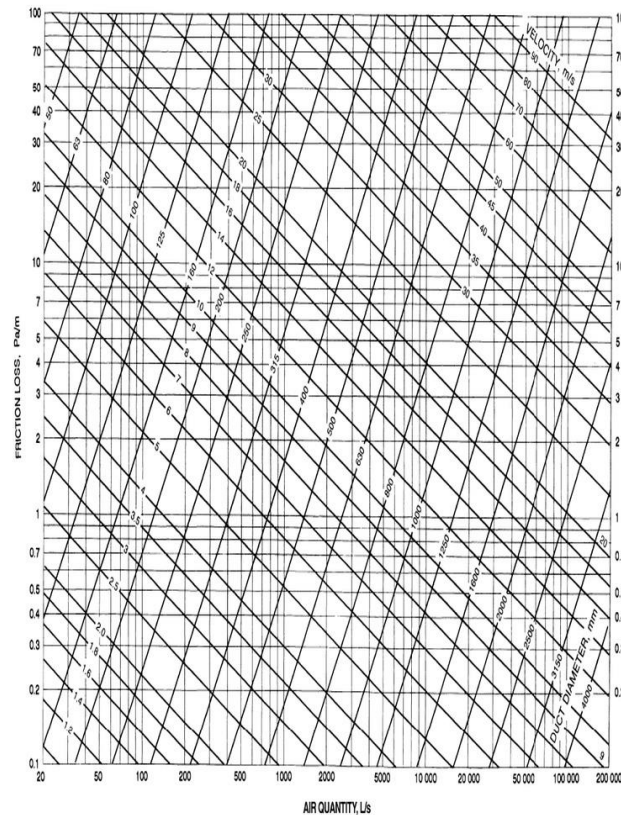
Persamaan ini berlaku umum untuk fluida inkompresibel, baik cair maupun gas, dan digunakan secara luas dalam perhitungan sistem perpipaan maupun duct udara industri (White, 2011). Untuk mendapatkan nilai f , biasanya digunakan diagram Moody, atau pendekatan empiris seperti persamaan Persamaan ini berlaku umum untuk fluida inkompresibel, baik cair maupun gas, dan digunakan secara luas dalam perhitungan sistem perpipaan maupun duct udara industri (White, 2011). Untuk mendapatkan nilai f , biasanya digunakan diagram Moody, atau pendekatan empiris seperti persamaan Colebrook–White dan Swamee–Jain yang dikembangkan dari data eksperimental.

6. Duct friction loss chart

Menurut Cengel & Cimbala (2018), *duct friction loss chart* adalah alat bantu grafis yang digunakan untuk menentukan kerugian tekanan akibat gesekan pada aliran fluida (udara atau gas) yang melewati saluran tertutup (duct). Diagram ini menyajikan hubungan antara debit aliran, kecepatan udara, dimensi duct, dan kehilangan tekanan per satuan panjang.

Dalam praktik perancangan sistem saluran udara atau gas buang (*flue gas ducting*), penggunaan diagram Moody sering kali dianggap kurang praktis karena memerlukan perhitungan manual terhadap bilangan Reynolds, kekasaran relatif, dan faktor gesekan f untuk setiap variasi ukuran duct dan debit udara.

Untuk menyederhanakan proses tersebut, berbagai lembaga teknik seperti ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) dan SMACNA (*Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association*) mengembangkan grafik rugi tekan duct (duct friction loss chart) yang merupakan turunan langsung dari persamaan Darcy–Weisbach dan diagram Moody.



Gambar 2.6 ASHRAE Duct Friction Loss Chart (SI) Cengel & Cimbala (2018)

Grafik ini menyajikan hubungan antara debit aliran (Q), kecepatan udara (v), ukuran duct (D atau $W \times H$), dan rugi tekan per panjang saluran ($\Delta P/m$) dalam satu lembar diagram. Dengan demikian, nilai f dan rugi tekan dapat diperoleh secara langsung hanya dengan mengetahui dua parameter utama, yaitu debit udara dan dimensi duct.

Menurut ASHRAE Duct System Design Guide (2013), grafik rugi tekan tersebut dibuat berdasarkan hasil eksperimen pada duct baja galvanis standar dengan permukaan relatif halus dan diasumsikan bekerja dalam regime turbulen penuh ($Re > 10^5$). Setiap kurva pada grafik menunjukkan rugi tekanan akibat gesekan (*friction loss*) dalam satuan Pascal per meter (Pa/m) atau inch of water gauge per 100 ft (in.wg/100 ft) pada densitas udara standar ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$).

Sementara itu, SMACNA HVAC Systems Duct Design Manual (2020) menegaskan bahwa grafik rugi tekan ini dikembangkan dengan prinsip yang sama seperti *Moody diagram*, namun telah dikalibrasi menggunakan data eksperimen spesifik untuk duct HVAC dan sistem transportasi udara industri. Dengan menggunakan grafik ini, nilai rugi tekan ($\Delta P/m$) sudah mencakup pengaruh Reynolds number, kekasaran relatif, serta karakteristik turbulensi fluida dalam duct, sehingga tidak perlu lagi dilakukan perhitungan ulang terhadap f untuk setiap variasi dimensi.

Dalam The Fundamentals of Duct System Design (McGill AirFlow, 2018) dijelaskan bahwa *duct friction loss chart* memudahkan perancang untuk menyeimbangkan sistem distribusi udara dengan cepat dan efisien tanpa menghitung ulang faktor gesekan secara iteratif. Grafik ini juga telah diintegrasikan ke dalam perangkat lunak perancangan sistem ventilasi modern, yang menggunakan algoritma berbasis persamaan Darcy–Weisbach dan tabel empiris dari ASHRAE serta SMACNA sebagai acuan.

Secara matematis, bentuk umum hubungan antara rugi tekan, kecepatan, dan dimensi duct dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\Delta P = K_d \frac{v^2}{2} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana K_d merupakan konstanta gesekan saluran (*duct resistance coefficient*) yang telah ditentukan berdasarkan hasil pengujian empiris. Nilai K_d inilah yang direpresentasikan dalam *duct friction chart*, dan bervariasi terhadap dimensi saluran serta kecepatan udara yang mengalir di dalamnya.

7. Minor Losses

Menurut Reddy & Reddy (2017), *minor losses* atau kerugian tekanan minor adalah kehilangan energi fluida yang terjadi akibat adanya gangguan aliran di titik-titik tertentu dari sistem pipa atau duct. Dalam perusahaan utilitas seperti PLTU, *minor losses* berkontribusi terhadap peningkatan *pressure drop* total, sehingga harus diperhitungkan dalam analisis efisiensi sistem *duct* dan *bag filter*. Selain kehilangan tekanan akibat gesekan sepanjang saluran

(*friction loss*), sistem aliran fluida juga mengalami kehilangan tekanan tambahan akibat perubahan geometri saluran atau adanya komponen yang menyebabkan gangguan aliran. Kehilangan tekanan jenis ini disebut kehilangan tekanan lokal (*minor losses*).

Kehilangan tekanan lokal terjadi pada elemen-elemen seperti elbow, tee, reducer/expander, damper, filter, serta valve yang menyebabkan perubahan arah, percepatan, perlambatan, atau turbulensi pada aliran fluida (Çengel & Cimbala, 2018). Besar kehilangan tekanan lokal (ΔP_m) secara umum dihitung dengan persamaan :

$$\Delta P_m = K \frac{\rho v^2}{2} \dots \dots \dots (2.9)$$

dimana:

K = koefisien kehilangan lokal (*dimensionless*),

ρ = densitas fluida (kg/m^3), dan

v = kecepatan rata-rata aliran fluida (m/s).

Nilai koefisien kehilangan lokal (K) bergantung pada bentuk geometri komponen, sudut perubahan arah, dan karakteristik aliran di sekitar fitting tersebut. Sebagai contoh, nilai K untuk elbow dengan radius besar (*long radius elbow*) biasanya lebih kecil dibandingkan elbow dengan radius pendek (*mitered elbow*), karena perubahan arah aliran lebih halus sehingga turbulensi lebih kecil.

Tabel empiris nilai K untuk berbagai jenis fitting telah dipublikasikan dalam standar internasional seperti ASHRAE Standard 120 dan SMACNA HVAC Systems Duct Design Manual (2020), yang hasilnya diperoleh dari pengujian eksperimental di laboratorium fluida (ASHRAE, 2013; SMACNA, 2020).

Penelitian oleh Liu et al. (2012) menunjukkan bahwa nilai koefisien kehilangan lokal dapat bervariasi tergantung pada rasio antara luas penampang saluran masuk dan keluar, serta sudut perubahan arah aliran. Semakin besar perbedaan penampang atau sudut belokan, semakin tinggi pula nilai K yang dihasilkan. Sementara itu, Ai et al. (2013) meneliti rugi tekan

gabungan pada beberapa fitting yang dipasang secara seri (*multiple fittings*) dalam sistem ventilasi, dan menemukan bahwa interaksi antar fitting dapat menyebabkan nilai rugi tekan total sedikit lebih besar daripada hasil penjumlahan individual tiap fitting.

Untuk perhitungan praktis, nilai K dari setiap fitting umumnya diubah menjadi total pressure loss (TP) dalam satuan Pascal (Pa) dengan rumus :

$$TP = C \times V_p \dots \dots \dots (2.10)$$

di mana C adalah *duct fitting loss coefficient* dan V_p adalah *velocity pressure* yang dihitung menggunakan :

$$V_p = 0.602 v^2 \dots \dots \dots (2.11)$$

8. CFD (Computational Fluid Dynamics)

Metode Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan pendekatan numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku aliran fluida secara tiga dimensi dengan menyelesaikan persamaan dasar mekanika fluida, yaitu persamaan kontinuitas, momentum (Navier–Stokes), dan energi (Versteeg & Malalasekera, 2007). Dengan bantuan perangkat lunak berbasis *finite volume method (FVM)* seperti ANSYS Fluent atau SolidWorks Flow Simulation, distribusi tekanan, kecepatan, dan temperatur di seluruh geometri sistem ducting dapat dianalisis secara visual dan kuantitatif.

Pada sistem bag filter dan ducting PLTU, metode CFD digunakan untuk memvalidasi hasil perhitungan manual pressure loss serta memastikan bahwa aliran flue gas di dalam saluran tidak mengalami gangguan signifikan seperti *vortex*, *recirculation zone*, atau *backflow* yang dapat meningkatkan rugi tekan. Selain itu, simulasi CFD memberikan gambaran nyata tentang distribusi tekanan statis (*static pressure*), kecepatan (*velocity field*), dan temperatur (*temperature field*) pada setiap segmen duct, sehingga memungkinkan evaluasi lebih akurat terhadap desain geometri saluran, posisi elbow, dan koneksi antarbag filter.

Hasil simulasi CFD menghasilkan distribusi kontur tekanan, kecepatan, dan temperatur di sepanjang saluran duct. Nilai penurunan tekanan total dari inlet hingga outlet dibandingkan dengan hasil perhitungan manual

untuk menentukan tingkat kesesuaian. Apabila hasil simulasi menunjukkan selisih kurang dari 10–15% terhadap hasil perhitungan manual, maka model perhitungan dapat dianggap valid (Versteeg & Malalasekera, 2007). Selain itu, pola distribusi kecepatan dan tekanan dari CFD juga memberikan informasi tambahan, seperti:

1. Area belokan 90° (elbow) menunjukkan peningkatan tekanan statis di sisi luar radius akibat gaya sentrifugal.
2. Area percabangan (tee) menimbulkan penurunan tekanan mendadak dan peningkatan turbulensi.
3. Outlet bag filter menunjukkan penurunan tekanan signifikan akibat perubahan arah aliran dari ruang plenum ke duct utama.

