

Perancangan Posisi Pemasangan *Butterfly Valve* pada Pipa Venting Hood Berdasarkan Analisis *Pressure Drop* pada Air Slide 4D2-AS1

Hanif Wahdan Fauzi¹, Budi Yuwono^{2*}, Rosidi³ dan Puji Sunarto⁴

¹Program Studi D3 Teknik Mesin, Konsentrasi Rekayasa Industri Semen, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. Dr. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

³Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

⁴PT Solusi Bangun Indonesia Tbk, Pabrik Cilacap, Jl. Ir. H. Juanda, Karangtalun, Cilacap Utara, Cilacap, Jawa Tengah, 53234

*Corresponding author E-mail address: budi.yuwono@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Air slide merupakan alat transportasi material serbuk yang bekerja dengan memanfaatkan udara fluidisasi dan gaya gravitasi. Pada unit Air Slide 4D2-AS1 di PT Solusi Bangun Indonesia Tbk Pabrik Cilacap, aliran Cement Kiln Dust (CKD) menuju kiln feed sering terganggu oleh penyumbatan akibat tarikan udara Venting Hood yang berlebihan menuju Bag Filter, dengan frekuensi gangguan tercatat 9 kejadian dalam satu periode pengamatan. Penambahan butterfly valve dilakukan untuk membatasi tarikan udara tersebut, namun efektivitasnya bergantung pada ketepatan lokasi pemasangan. Penelitian ini bertujuan menentukan posisi pemasangan butterfly valve berdasarkan perhitungan *pressure drop* dengan membandingkan dua alternatif lokasi, yaitu sebelum dan sesudah elbow pada pipa venting berdiameter 4 inci. Metode yang digunakan adalah analisis kuantitatif mekanika fluida terhadap data operasi lapangan, meliputi massa jenis udara, kecepatan aliran, bilangan Reynolds, faktor gesekan dari diagram Moody, serta kerugian tekanan mayor dan minor. Hasil perhitungan menunjukkan penurunan tekanan total sebesar 5.645,05 Pa pada posisi sebelum elbow dan 11.820,15 Pa pada posisi sesudah elbow, atau 109,4% lebih besar. Implementasi di lapangan pada posisi sebelum elbow menurunkan frekuensi blocking pipa venting dari 9 kejadian menjadi 1 kejadian atau turun 88,9%, sekaligus menghilangkan fenomena kembang-kempis pada casing Air Slide. Posisi sebelum elbow karena itu direkomendasikan sebagai lokasi pemasangan butterfly valve, dan penentuan lokasi katup pengatur pada jalur venting sejenis disarankan didasarkan pada perhitungan *pressure drop* sebelum pekerjaan fabrikasi dilaksanakan.

Kata-kata kunci: Air Slide, Butterfly Valve, Pressure Drop, Venting Hood, Cement Kiln Dust

Abstract

An air slide is a powder-material conveyor that operates using fluidization air and gravity. On the Air Slide 4D2-AS1 unit at PT Solusi Bangun Indonesia Tbk Cilacap Plant, the flow of Cement Kiln Dust (CKD) toward the kiln feed is often disrupted by blocking caused by excessive air suction from the Venting Hood toward the Bag Filter, with nine blocking events recorded within a single observation period. A butterfly valve was added to limit this suction, but its effectiveness depends on the accuracy of the mounting location. This study aims to determine the butterfly valve mounting position based on a pressure-drop calculation by comparing two candidate locations, namely upstream and downstream of an elbow on the 4-inch venting pipe. The method applied is a quantitative fluid-mechanics analysis of field operating data, covering air density, flow velocity, Reynolds number, the friction factor from the Moody chart, and the major and minor pressure losses. The results show a total pressure drop of 5,645.05 Pa at the upstream position and 11,820.15 Pa at the downstream



position, which is 109.4% higher. Field implementation at the upstream position reduced the frequency of venting-pipe blocking from nine events to one, a decrease of 88.9%, and eliminated the pulsating deformation of the Air Slide casing. The upstream position is therefore recommended as the butterfly valve mounting location, and the selection of control-valve locations on similar venting lines is recommended to be based on a pressure-drop calculation before fabrication work is carried out.

Keywords: *Air Slide, Butterfly Valve, Pressure Drop, Venting Hood, Cement Kiln Dust*

1. PENDAHULUAN

PT Solusi Bangun Indonesia Tbk (SBI) merupakan perusahaan publik yang bergerak di bidang industri bahan bangunan dan mayoritas sahamnya dimiliki oleh PT Semen Indonesia (Persero) Tbk (SIG). SBI mengoperasikan empat pabrik semen terintegrasi di Narogong, Cilacap, Tuban, dan Lhoknga dengan total kapasitas produksi sekitar 14,8 juta ton semen per tahun [1]. Selain berfokus pada efisiensi operasional dan kualitas produk, PT Solusi Bangun Indonesia Tbk juga menerapkan prinsip keberlanjutan melalui pemanfaatan kembali *Cement Kiln Dust* sebagai material hasil samping proses produksi. *Cement Kiln Dust* (CKD) adalah produk sampingan dari proses pembuatan semen dan secara tradisional dianggap sebagai produk limbah industri [2].

Cement Kiln Dust (CKD) merupakan material berbentuk serbuk halus yang dihasilkan sebagai produk samping pada proses pembuatan *clinker* di industri semen [3]. Salah satu pemanfaatan utama *Cement Kiln Dust* yaitu sebagai material koreksi pada *kiln feed*. Berdasarkan data penggunaan selama 28 hari, rata-rata pemakaian *kiln dust* mencapai sekitar 360 ton per hari [4]. Kelancaran penyaluran CKD menuju *kiln feed* sangat bergantung pada keandalan sistem transportasi material. Di PT Solusi Bangun Indonesia Tbk Plant Cilacap, material tersebut ditransportasikan menggunakan *Air Slide* 4D2-AS1 yang bekerja berdasarkan prinsip fluidisasi, yaitu udara aerasi dialirkan melalui media *canvas* sehingga material dapat mengalir mengikuti kemiringan saluran [5]. Oleh karena itu, kinerja *Air Slide* menjadi faktor penting dalam menjaga kontinuitas suplai CKD dan kestabilan proses produksi semen.

Di ujung *air slide* terpasang *Venting Hood* yang berfungsi memisahkan udara dari material sebelum udara dialirkan menuju *Bag Filter* [5]. Pada *Air Slide* 4D2-AS1, tarikan udara di *Venting Hood* terlalu kuat sehingga sebagian udara aerasi yang seharusnya menopang fluidisasi justru ikut terhisap menuju *Bag Filter*. Akibatnya, udara untuk mengangkat material berkurang, aliran CKD menjadi tidak stabil, dan material mudah mengendap hingga menimbulkan penyumbatan (*blocking*), terlebih ketika CKD dalam kondisi lembap dan mudah menggumpal. Gangguan ini menurunkan kontinuitas suplai material koreksi dan berisiko mengganggu kestabilan komposisi *clinker*.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dipasang *butterfly valve* pada pipa *Venting Hood* sebagai pengatur laju udara hisap menuju *Bag Filter* sehingga keseimbangan udara di dalam *Air Slide* dapat dipertahankan [10]. Namun, efektivitas *butterfly valve* tidak hanya dipengaruhi oleh bukaan katup, tetapi juga oleh posisi pemasangannya pada sistem perpipaan. Pemasangan katup pada lokasi yang kurang tepat dapat meningkatkan kehilangan tekanan (*pressure drop*) akibat gesekan aliran maupun perubahan arah aliran, sehingga pengaturan debit udara menjadi kurang optimal.

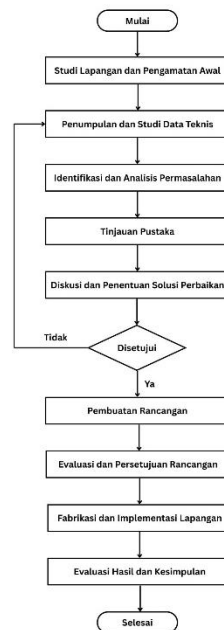
Pressure drop pada sistem perpipaan dipengaruhi oleh kehilangan tekanan akibat gesekan pada pipa lurus (*major loss*) dan kehilangan tekanan akibat komponen perpipaan seperti *elbow* dan katup (*minor loss*) [6], [11]. Kajian mengenai pengaruh *elbow* dan bukaan katup terhadap *pressure drop* sejauh ini banyak dilakukan pada fluida cair dengan pendekatan simulasi numerik [6], sedangkan penerapannya pada jalur *venting* udara bertekanan rendah di industri semen masih jarang dibahas. Di sisi lain, penentuan lokasi pemasangan katup di lapangan umumnya didasarkan pada kemudahan fabrikasi dan aksesibilitas, bukan pada besarnya kehilangan tekanan yang ditimbulkan. Celah tersebut menjadi ruang kajian pada penelitian ini, yaitu penggunaan analisis *pressure drop* sebagai dasar kuantitatif pemilihan posisi pemasangan katup sebelum pekerjaan modifikasi dilaksanakan. Oleh karena itu, analisis *pressure drop* diperlukan untuk menentukan posisi pemasangan *butterfly valve* yang menghasilkan kehilangan tekanan paling kecil dan kondisi aliran yang lebih stabil.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menghitung karakteristik aliran udara pada pipa *Venting Hood Air Slide* 4D2-AS1 yang meliputi massa jenis, kecepatan aliran, bilangan *Reynolds*, dan faktor gesekan; (2) menghitung serta membandingkan *pressure drop* total pada dua alternatif posisi pemasangan *butterfly valve*, yaitu sebelum dan sesudah *elbow*; dan (3) menentukan posisi pemasangan terpilih serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap frekuensi *blocking* setelah diimplementasikan di lapangan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan teknis dalam menentukan lokasi katup pengatur pada jalur *venting* sejenis di industri semen.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Tahapan dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan sesuai tahapan pada Gambar 1. Proses diawali dengan studi lapangan dan pengamatan awal, dilanjutkan pengumpulan data teknis, identifikasi dan analisis permasalahan, serta tinjauan pustaka sebagai dasar penyusunan solusi perbaikan. Solusi yang telah disetujui kemudian dilanjutkan dengan pembuatan rancangan, evaluasi rancangan, fabrikasi dan implementasi di lapangan, serta evaluasi hasil untuk menentukan posisi pemasangan *butterfly valve* pada pipa *Venting Hood* berdasarkan hasil analisis *pressure drop*.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dilakukan pada *Air Slide 4D2-AS1* di area *Dust Bin* PT Solusi Bangun Indonesia Tbk Pabrik Cilacap, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Unit ini berfungsi menyalurkan *Cement Kiln Dust* dari *Dust Bin* menuju jalur *kiln feed* dan dilengkapi *Venting Hood* pada sisi ujung yang terhubung ke *Bag Filter* melalui



Gambar 2 Air Slide 4D2 – AS1

jalur pipa berdiameter 4 inci. Data operasi dan spesifikasi jalur pipa *Venting Hood* diperoleh melalui pengamatan langsung di lapangan, pengukuran dimensi jalur pipa, serta data teknis perusahaan yang tercatat pada *Technical Information System (TIS)* [4]. Data frekuensi *blocking* dihimpun dari laporan harian operasi pada periode sebelum dan sesudah pemasangan katup dengan rentang pengamatan yang sama.

2.2 Alternatif Posisi Pemasangan Valve

Jalur pipa *Venting Hood* menuju *Bag Filter* memiliki diameter 4 inci dan terdiri atas satu komponen *elbow*. Pada penelitian ini dikaji dua alternatif posisi pemasangan *butterfly valve*, yaitu pada segmen pipa lurus sebelum *elbow* dan sesudah *elbow*. Kedua segmen tersebut dipilih karena merupakan bagian pipa lurus yang tersedia pada jalur eksisting, sehingga katup dapat dipasang tanpa mengubah diameter maupun tata letak jalur pipa *venting*. Kedua alternatif dianalisis berdasarkan nilai *pressure drop* untuk menentukan lokasi pemasangan yang menghasilkan kehilangan tekanan paling kecil. Karena jenis dan spesifikasi *butterfly valve* yang digunakan pada kedua alternatif adalah sama, perbedaan nilai *pressure drop* dipengaruhi oleh konfigurasi perpipaan, khususnya keberadaan *elbow* dan panjang segmen pipa pada masing-masing posisi pemasangan.

2.3 Parameter dan Persamaan Analisis

Penentuan posisi pemasangan *butterfly valve* pada pipa *Venting Hood* dilakukan melalui analisis *pressure drop*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui besarnya kehilangan tekanan yang terjadi pada setiap alternatif posisi pemasangan sehingga dapat dipilih lokasi yang menghasilkan aliran udara paling efektif. Perhitungan dilakukan secara bertahap dengan menentukan parameter-parameter yang memengaruhi karakteristik aliran udara, meliputi massa jenis udara, luas penampang pipa, kecepatan aliran, bilangan Reynolds, *friction factor*, serta *pressure drop major* dan *pressure drop minor*. Hasil dari setiap tahapan digunakan untuk menentukan *pressure drop total* sebagai dasar pemilihan posisi pemasangan *butterfly valve*.

1. Massa Jenis

Massa jenis merupakan sifat fisis yang menyatakan perbandingan antara massa dan volume suatu zat. Pada fluida gas, massa jenis dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur. Dalam penelitian ini, massa jenis udara dihitung menggunakan persamaan gas ideal karena digunakan sebagai parameter dalam perhitungan bilangan Reynolds dan *pressure drop* pada sistem perpipaan [7].

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (1)$$

Keterangan:

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

P = tekanan absolut (Pa)

R = konstanta gas udara ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)

T = temperatur (K)

2. Luas Penampang

Luas penampang pipa digunakan untuk menentukan kecepatan aliran udara. Besarnya luas penampang dipengaruhi oleh diameter pipa, sehingga perubahan diameter akan memengaruhi kecepatan aliran dan kehilangan tekanan pada sistem perpipaan [8].

$$A = \pi r^2 \quad (2)$$

Keterangan:

A = luas penampang pipa (m^2)

r = jari-jari pipa (m)

3. Kecepatan Aliran

Kecepatan aliran udara diperoleh dari hubungan antara debit aliran dan luas penampang pipa. Nilai kecepatan menjadi salah satu parameter utama dalam analisis karakteristik aliran dan perhitungan *pressure drop* [8].

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

Keterangan:

V = kecepatan aliran (m/s)

Q = debit aliran (m³/s)

A = luas penampang pipa (m²)

4. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds digunakan untuk menentukan karakteristik aliran fluida, yaitu laminar, transisi, atau turbulen. Selain itu, nilai Reynolds digunakan sebagai dasar dalam menentukan *friction factor* melalui Diagram Moody [9], [8].

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4)$$

Keterangan:

Re = bilangan Reynolds

ρ = massa jenis udara (kg/m³)

V = kecepatan aliran (m/s)

D = diameter pipa (m)

μ = viskositas dinamik udara (N·s/m²)

5. Friction Factor

Friction factor merupakan faktor yang digunakan dalam perhitungan kehilangan tekanan akibat gesekan pada pipa lurus. Nilainya ditentukan menggunakan Diagram Moody berdasarkan bilangan Reynolds dan nilai kekasaran relatif (*relative roughness*) pipa [8].

$$\text{Relative Roughness} = \frac{\varepsilon}{D} \quad (5)$$

Keterangan:

ε = kekasaran absolut pipa

D = diameter pipa

6. Pressure Drop Mayor

Pressure drop mayor merupakan kehilangan tekanan akibat gesekan antara aliran udara dengan dinding bagian dalam pipa lurus. Besarnya kehilangan tekanan dipengaruhi oleh faktor gesekan, panjang pipa, diameter pipa, massa jenis, dan kecepatan aliran [8].

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (6)$$

Keterangan:

ΔP = kehilangan tekanan mayor (Pa)

f = friction factor

L = panjang pipa (m)

D = diameter pipa (m)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

V = kecepatan aliran (m/s)

7. Pressure Drop Minor

Pressure drop minor merupakan kehilangan tekanan akibat adanya komponen perpipaan seperti *elbow*, *valve*, *tee*, dan *fitting* lainnya yang menyebabkan perubahan arah atau gangguan aliran. Pada penelitian ini, *minor loss* dihitung untuk komponen *elbow*, sedangkan kehilangan tekanan akibat *butterfly valve* dianggap konstan karena spesifikasi katup pada kedua alternatif pemasangan sama [8].

$$\Delta P = K \frac{\rho V^2}{2} \quad (7)$$

Keterangan:

ΔP = kehilangan tekanan minor (Pa)

K = koefisien kehilangan tekanan

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

V = kecepatan aliran (m/s)

8. Pressure Drop Total

Pressure drop total pada suatu segmen jalur pipa merupakan penjumlahan seluruh kerugian tekanan mayor dan kerugian tekanan minor yang terjadi di sepanjang segmen tersebut. Nilai inilah yang dijadikan perbandingan antara kedua alternatif posisi pemasangan katup [11].

$$\Delta P_{total} = \Sigma \Delta P_{mayor} + \Sigma \Delta P_{minor} \quad (8)$$

Keterangan:

ΔP_{total} = penurunan tekanan total pada segmen yang ditinjau (Pa)

$\Sigma \Delta P_{mayor}$ = jumlah kerugian tekanan mayor (Pa)

$\Sigma \Delta P_{minor}$ = jumlah kerugian tekanan minor (Pa)

2.4 Asumsi dan Batasan Analisis

Agar hasil perhitungan dapat ditafsirkan secara tepat, analisis pada penelitian ini dibatasi oleh sejumlah asumsi. Pertama, aliran udara pada pipa *venting* dianggap tunak (*steady*) dan satu dimensi, dengan sifat fluida dievaluasi pada temperatur operasi 70 °C. Kedua, udara diperlakukan sebagai fluida tak mampu mampat; bilangan *Mach* aliran berada pada kisaran 0,35 sehingga masih mendekati batas lazim asumsi tersebut, dan karena kedua alternatif dihitung dengan asumsi yang identik, penyimpangan yang ditimbulkan tidak mengubah urutan hasil perbandingan [11]. Ketiga, debit udara total dari *Venting Hood* dianggap terbagi merata ke enam cabang pipa yang memiliki diameter dan panjang jalur sebanding.

Keempat, kerugian tekanan pada *butterfly valve* itu sendiri tidak diikutsertakan dalam perbandingan karena jenis, ukuran, dan derajat bukaan katup pada kedua alternatif adalah sama sehingga nilainya saling meniadakan; dengan demikian selisih *pressure drop* yang diperoleh murni bersumber dari konfigurasi perpipaan. Kelima, pipa dianggap sebagai baja komersial dengan kekasaran absolut 0,046 mm dan dinding dalam tanpa penumpukan material. Analisis juga dibatasi pada dua posisi yang secara fisik memungkinkan untuk difabrikasi pada jalur eksisting, tanpa perubahan diameter maupun tata letak jalur pipa *venting*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Aliran Udara

Data operasi dan spesifikasi pipa *Venting Hood* yang menjadi dasar perhitungan disajikan pada Tabel 1. Tekanan absolut diperoleh dengan menambahkan tekanan *venting* terukur 351 mmwg (3.442 Pa) terhadap tekanan atmosfer (100.000 Pa), sedangkan viskositas dinamik udara diambil pada temperatur operasi 70 °C [4].

Tabel 1. Data operasi dan spesifikasi pipa *Venting Hood*

Parameter	Nilai
Tekanan <i>inlet</i> (terukur)	351 mmwg (3.442 Pa)
Tekanan absolut, P	103.442 Pa
Debit aliran total, Q	6,42 m ³ /s
Jumlah cabang pipa	6
Diameter pipa, D	4 inci (0,102 m)
Temperatur operasi, T	70 °C (343 K)
Viskositas dinamik, μ	$2,052 \times 10^{-5}$ N·s/m ²
Konstanta gas udara, R	287 J/kg·K

Massa jenis udara dihitung menggunakan Persamaan (1) berdasarkan tekanan absolut dan temperatur operasi :

$$\rho = \frac{103442}{287 \times 343} = 1,0508 \text{ kg/m}^3$$

Luas penampang pipa dihitung dari jari-jari dalam pipa 0,051 m dengan Persamaan (2):

$$A = \pi(0,051)^2 = 0,00817 \text{ m}^2$$

Debit total dibagi rata ke enam cabang pipa sehingga setiap cabang mengalirkan 1,07 m³/s. Kecepatan aliran pada tiap cabang diperoleh melalui Persamaan (3):

$$V = \frac{1,07}{0,00817} = 130,96 \text{ m/s}$$

Jenis aliran ditentukan dengan bilangan *Reynolds* pada Persamaan (4), menggunakan viskositas dinamik udara $2,052 \times 10^{-5}$ N·s/m²:

$$Re = \frac{1,0508 \times 130,96 \times 0,102}{2,052 \times 10^{-5}} = 684.040$$

Nilai bilangan *Reynolds* sebesar 684.040 (jauh di atas 10⁴) menunjukkan bahwa aliran tergolong *turbulen*. Kekasaran relatif pipa baja komersial dengan kekasaran absolut 0,046 mm dan diameter 101,6 mm, dihitung dengan Persamaan (5), menghasilkan $\varepsilon/D = 0,046/101,6 \approx 0,000453$. Berdasarkan nilai bilangan *Reynolds* dan kekasaran relatif tersebut, faktor gesekan yang dibaca dari diagram *Moody* [12] adalah $f = 0,18$. Karena kedua alternatif posisi pemasangan berada pada jalur pipa yang sama, nilai massa jenis, kecepatan aliran, bilangan *Reynolds*, dan faktor gesekan berlaku identik untuk keduanya. Dengan demikian perbedaan *pressure drop* antar-alternatif sepenuhnya ditentukan oleh panjang segmen pipa lurus dan ada tidaknya *elbow* pada segmen tersebut. Rangkuman seluruh parameter aliran disajikan pada Tabel 2.

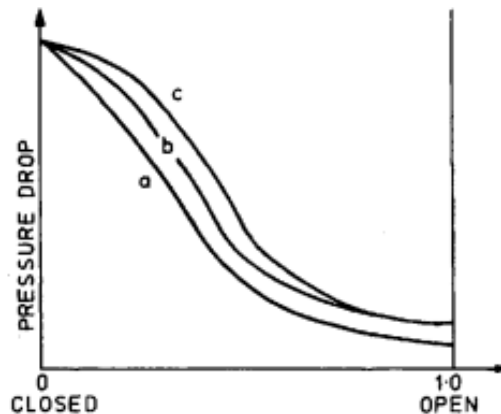
Tabel 2. Hasil perhitungan parameter aliran udara

Parameter	Simbol	Nilai
Massa jenis udara	ρ	1,0508 kg/m ³
Luas penampang pipa	A	0,00817 m ²
Debit Udara	Q	1,07 m ³ /s
Kecepatan aliran	V	130,96 m/s
Bilangan Reynolds	Re	684.040 (<i>turbulen</i>)
Kekasaran relatif	ε/D	0,000453

Faktor gesekan (Moody)	f	0,18
------------------------	-----	------

3.2 Pengaruh Buka-an Katup terhadap Pressure Drop

Sebelum menetapkan lokasi pemasangan, perlu dipahami hubungan antara derajat bukaan *butterfly valve* dan penurunan tekanan. Gambar 3 menampilkan karakteristik *pressure drop* terhadap posisi bukaan katup, dari kondisi tertutup hingga terbuka penuh. Ketika katup hampir tertutup, luas aliran yang tersisa sangat kecil sehingga hambatan dan penurunan tekanan menjadi besar [10]. Seiring bertambahnya bukaan, hambatan menurun dan *pressure drop* ikut mengecil hingga mencapai nilai terkecil pada kondisi terbuka penuh. Karakteristik ini menjadi dasar dalam menentukan persentase bukaan yang sesuai untuk mengatur tarikan udara *venting* tanpa menimbulkan kerugian tekanan berlebih. Dalam penelitian ini, derajat bukaan katup diperlakukan sebagai variabel operasi yang sama untuk kedua alternatif posisi. Konsekuensinya, kerugian tekanan yang ditimbulkan oleh katup bernilai identik pada keduanya dan tidak memengaruhi hasil perbandingan, sehingga analisis pada Subbab 3.3 difokuskan pada kerugian tekanan yang bersumber dari konfigurasi perpipaan.



Gambar 3. Karakteristik *pressure drop* terhadap posisi bukaan *butterfly valve*

3.3 Perhitungan Pressure Drop pada Dua Alternatif Posisi

Dua alternatif lokasi pemasangan ditinjau pada jalur pipa *Venting Hood*. Alternatif pertama berada pada segmen pipa lurus sebelum *elbow* dengan panjang 0,355 m, sedangkan alternatif kedua berada pada segmen pipa lurus sesudah *elbow* dengan panjang 0,63 m. Rencana kedua posisi tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Rencana posisi pemasangan *butterfly valve*: (a) sebelum *elbow*; (b) sesudah *elbow*

Pada alternatif sebelum *elbow*, aliran hanya mengalami kerugian tekanan mayor sepanjang pipa lurus karena belum melewati belokan. Dengan Persamaan (6), faktor gesekan 0,18, dan panjang pipa 0,355 m diperoleh:

$$\Delta P_{mayor} = 0,18 \left(\frac{0,355}{0,102} \right) \left(\frac{1,0508 \times 130,96^2}{2} \right) = 5.645,05 \text{ Pa}$$

Karena pada lokasi ini tidak terdapat kerugian minor, penurunan tekanan total pada alternatif sebelum *elbow* sama dengan kerugian mayornya, yaitu 5.645,05 Pa.

Pada alternatif sesudah *elbow*, aliran mengalami kerugian mayor pada segmen pipa yang lebih panjang (0,63 m) dan kerugian minor akibat belokan. Kerugian mayor dihitung dengan Persamaan (6):

$$\Delta P_{mayor} = 0,18 \left(\frac{0,63}{0,102} \right) \left(\frac{1,0508 \times 130,96^2}{2} \right) = 10.017,98 \text{ Pa}$$

Kerugian minor akibat *elbow* 90° dengan koefisien kerugian $K = 0,2$ [13] dihitung dengan Persamaan (7):

$$\Delta P_{minor} = 0,2 \left(\frac{1,0508 \times 130,96^2}{2} \right) = 1.802,17 \text{ Pa}$$

Penurunan tekanan total pada alternatif sesudah *elbow* merupakan penjumlahan kerugian mayor dan minor sesuai Persamaan (8):

$$\Delta P_{total} = 10.017,98 + 1.802,17 = 11.820,15 \text{ Pa}$$

Rangkuman hasil perhitungan kedua alternatif disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan *pressure drop* pada dua alternatif posisi pemasangan

Komponen Kerugian	Sebelum <i>Elbow</i>	Sesudah <i>Elbow</i>
Panjang segmen pipa lurus, L (m)	0,355	0,63
Kerugian mayor, ΔP	5.645,05 Pa	10.017,98 Pa
Kerugian minor (<i>elbow</i>), ΔP	–	1.802,17 Pa
Penurunan tekanan total, ΔP	5.645,05 Pa	11.820,15 Pa

3.4 Penentuan Posisi Pemasangan

Berdasarkan Tabel 3, penurunan tekanan pada alternatif sesudah *elbow* sebesar 11.820,15 Pa, lebih dari dua kali lipat atau 109,4% lebih besar dibandingkan alternatif sebelum *elbow* sebesar 5.645,05 Pa. Perbedaan ini disebabkan oleh kerugian tekanan mayor akibat panjang pipa yang lebih besar (0,63 m berbanding 0,355 m, atau 77,5% lebih panjang) dan kerugian tekanan minor akibat perubahan arah aliran pada *elbow* yang menyumbang 1.802,17 Pa atau 15,2% dari total kerugian pada alternatif tersebut. Selain meningkatkan kehilangan tekanan, aliran setelah *elbow* membawa aliran sekunder dan profil kecepatan yang belum berkembang penuh, sehingga kestabilan aliran yang masuk ke *butterfly valve* berkurang dan pengaturan debit menjadi kurang optimal [13], [14]. Kondisi ini membuat hubungan antara derajat bukaan katup dan debit udara yang dihasilkan menjadi kurang berulang (*repeatable*), sehingga penyetelan bukaan di lapangan lebih sulit dipertahankan pada titik kerja yang diinginkan.

Berdasarkan hasil tersebut, *butterfly valve* dipasang pada pipa lurus sebelum *elbow* karena menghasilkan penurunan tekanan yang lebih kecil dan kondisi aliran yang lebih stabil. Posisi ini memungkinkan katup mengatur debit udara hisap menuju *Bag Filter* dengan lebih akurat, sehingga keseimbangan aliran antara

Venting Hood dan *Air Slide* dapat dipertahankan serta risiko *blocking* material dapat diminimalkan. Hasil pemasangan *butterfly valve* pada pipa *Venting Hood* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil pemasangan *butterfly valve* pada pipa *Venting Hood* pada posisi sebelum *elbow*

3.5 Evaluasi Hasil Implementasi

Setelah *butterfly valve* dipasang pada posisi terpilih, dilakukan pemantauan terhadap kinerja jalur *venting* dan kondisi aliran material pada *Air Slide* 4D2-AS1. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan catatan gangguan operasi pada periode sebelum dan sesudah pemasangan dengan rentang pengamatan yang sama. Rangkuman hasil evaluasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan kinerja jalur venting sebelum dan sesudah pemasangan *butterfly valve*

Parameter Evaluasi	Sebelum Pemasangan	Sesudah Pemasangan
Frekuensi <i>blocking</i> pipa <i>venting</i> (kejadian)	9	1
Penurunan frekuensi <i>blocking</i>	—	88,9%
Fenomena kembang–kempis pada <i>casing Air Slide</i>	Teramati	Tidak teramati
Pengaturan tarikan udara <i>venting</i>	Tidak tersedia	Dapat diatur melalui bukaan katup

Berdasarkan Tabel 4, frekuensi *blocking* pada pipa *venting* menurun dari 9 kejadian menjadi 1 kejadian, atau berkurang sebesar 88,9%. Penurunan ini menunjukkan bahwa pembatasan tarikan udara *Venting Hood* berhasil menahan sebagian besar udara aerasi tetap berada di dalam *casing Air Slide*, sehingga material CKD tetap terfluidisasi dan tidak mudah mengendap pada jalur *venting*. Hilangnya fenomena kembang–kempis pada *casing* memperkuat indikasi tersebut, karena gejala itu sebelumnya muncul akibat ketidakseimbangan antara udara aerasi yang masuk dan udara yang terhisap keluar melalui *Venting Hood*.

Satu kejadian *blocking* yang masih tercatat setelah pemasangan menunjukkan bahwa penyumbatan tidak sepenuhnya dapat dihilangkan hanya melalui pengaturan udara *venting*. Faktor lain, seperti kelembapan CKD dan kestabilan pasokan material dari *Dust Bin*, diperkirakan masih berkontribusi terhadap terjadinya penggumpalan. Meskipun demikian, hasil ini memperlihatkan bahwa penentuan posisi pemasangan katup berdasarkan analisis *pressure drop* memberikan dampak yang terukur terhadap kinerja operasi, tidak sekadar perbaikan yang bersifat kualitatif.

4. KESIMPULAN

Analisis *pressure drop* pada pipa *Venting Hood Air Slide* 4D2-AS1 menghasilkan tiga kesimpulan berikut. Pertama, aliran udara pada pipa *venting* berdiameter 4 inci bersifat turbulen dengan bilangan *Reynolds* 684.040, kecepatan aliran 130,96 m/s, dan massa jenis udara 1,0508 kg/m³ pada temperatur operasi 70 °C. Kedua, penurunan tekanan total pada posisi sebelum *elbow* sebesar 5.645,05 Pa, sedangkan pada posisi sesudah *elbow* sebesar 11.820,15 Pa atau 109,4% lebih besar, karena segmen pipa yang lebih panjang sekaligus adanya kerugian minor akibat belokan. Ketiga, posisi pemasangan *butterfly valve* yang paling efektif adalah pada segmen pipa lurus sebelum *elbow* karena menghasilkan kehilangan tekanan paling kecil dan kondisi aliran yang lebih stabil, sehingga katup dapat mengatur tarikan udara *venting* secara lebih akurat dan risiko *blocking* material *kiln dust* dapat ditekan.

Hasil implementasi di lapangan mendukung kesimpulan tersebut. Frekuensi *blocking* pada pipa *venting* menurun dari 9 kejadian sebelum pemasangan menjadi 1 kejadian setelah pemasangan atau turun 88,9%, disertai hilangnya fenomena kembang-kempis pada *casing Air Slide*. Dengan demikian, penggunaan analisis *pressure drop* sebagai dasar penentuan lokasi pemasangan katup pengatur terbukti dapat diterapkan dan direkomendasikan sebagai langkah awal sebelum pekerjaan fabrikasi pada jalur *venting* sejenis di industri semen.

5. SARAN

Beberapa saran berikut diajukan untuk penerapan dan pengembangan lebih lanjut. Pertama, disarankan memasang alat ukur tekanan dan laju aliran udara pada jalur *venting* agar kondisi operasi dapat dipantau secara *real-time* dan pengaturan aliran udara menjadi lebih optimal. Kedua, derajat bukaan *butterfly valve* perlu ditetapkan dan didokumentasikan sebagai parameter operasi standar serta diverifikasi ulang secara berkala, mengingat adanya potensi penumpukan material pada dinding dalam pipa *venting*. Ketiga, hasil perhitungan analitik ini dapat divalidasi melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) atau pengukuran langsung *pressure drop* pada kedua alternatif posisi untuk memperoleh gambaran distribusi kecepatan dan pola aliran di sekitar katup. Keempat, pendekatan yang sama disarankan diterapkan pada jalur *venting* unit *Air Slide* lain di area *Dust Bin* yang memiliki riwayat *blocking* serupa.

REFERENSI

- [1] Solusibangunindonesia.com, “PT Solusi Bangun Indonesia Tbk,” 2020, *PT Solusi Bangun Indonesia Tbk, Jakarta*. [Online]. Available: <https://solusibangunindonesia.com/profil-perusahaan/>
- [2] M. Seo, S. Y. Lee, C. Lee, and S. S. Cho, “Recycling of cement kiln dust as a raw material for cement,” *Environ. - MDPI*, vol. 6, no. 10, 2019, doi: 10.3390/environments6100113.
- [3] H. Rahim, M. M. Basir, and S. Diana, “Analisis Kadar Cao Bebas Dan Lime Saturation Factor (Lsf) Pada Klinker Di Pt. Semen Bosowa Maros,” *J. Teknol. Kim. Miner.*, vol. 2, no. 1, pp. 7–10, 2023, doi: 10.61844/jtkm.v2i1.389.
- [4] PT Solusi Bangun Indonesia Tbk, “Technical Information System (TIS),” data teknis internal perusahaan, Pabrik Cilacap, Indonesia.
- [5] F. Werner and K. Robert, “Transport and dust collecting manual: Air-slides,” vol. 8, pp. 4–20.
- [6] Y. L. Sialla, “Pengaruh variasi elbow dan bukaan katup terhadap perubahan kecepatan dan pressure drop pada pipa dengan pendekatan CFD,” Skripsi, 2023.
- [7] M. T. Dr. Diharyo, S.T. et al., *Mekanika Fluida*, ISBN: 978-., vol. 2. Indonesia: Lingkar Edukasi Indonesia, 2025.
- [8] S. Imam and C. Damis, “Pengaruh variasi material terhadap penurunan tekanan pada gooseneck pipa kompresor udara secara analitik,” pp. 941–949, 2025.
- [9] F. M. White, *Fluid Mechanics Eight Edition*, vol. 11, no. 3. 2017.
- [10] R. W. Zappe, *Valve selection handbook : engineering fundamentals for selecting manual valves, check valves, pressure relief valves, and rupture discs*. 1999.
- [11] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2018.
- [12] L. F. Moody, “Friction factors for pipe flow,” *Trans. ASME*, vol. 66, no. 8, pp. 671–684, 1944.
- [13] Crane Co., *Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe*, Technical Paper No. 410. Stamford, CT, USA: Crane Co., 2013.
- [14] B. R. Munson, A. P. Rothmayer, T. H. Okiishi, and W. W. Huebsch, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013.

