



Modifikasi Box Cleaning Menggunakan High Pressure Air-Flow pada Area Packing Plant PT. Solusi Bangun Andalas

Rajaul Akram^{1*}, Yuli Mafendro D.E.S², Fakhri Kamal³, Faishal Sulthan W⁴

¹Program Studi D3 Teknik Mesin Konsentrasi Rekayasa Industri Semen, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta - PT Solusi Bangun Indonesia, Narogong - Lhoknga

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

³PT. Solusi Bangun Andalas, Lhoknga, Aceh Besar

*Corresponding author E-mail address: rajaul.akram@stu.pnj.ac.id

Abstrak

Di *Packing Plant* PT. Solusi Bangun Andalas, *Box Cleaning*, digunakan untuk membersihkan *spillage* semen pada *bag* setelah pengepakan *Rotary Packer* #2, namun masih menyisakan debu yang mengganggu *bag coding* dan mutu produk. Penelitian ini memodifikasi *Box Cleaning* dengan sistem *High Pressure Air-Flow* (*ring blower*, pipa galvanis, *nozzle* bundar sudut 45°) guna meningkatkan efektivitas. Metode mencakup identifikasi masalah, studi literatur dan lapangan, pengumpulan data, perhitungan fluida (debit, kecepatan, bilangan *Reynolds*, *head loss mayor/minor*, *head total*), hingga modifikasi. Perhitungan menunjukkan kecepatan *nozzle* ~550 m/s (*choked*) dengan laju massa 0,002264 kg/s, total *head* 1583,78 m (18,1 kPa), dan daya *blower* 7,87 kW (15,0213 A). Pasca-modifikasi, kontaminasi *bag* turun dari 100% ke ≤30%, kehilangan semen dari 2 g/zak ke ≤0,5 g/zak (turun 75%), konsentrasi debu area kerja dari 2,453 g/m³ ke ≤0,613 g/m³, dan kualitas *coding* meningkat ≥90%. Modifikasi terbukti efektif membersihkan *bag*, mendukung keterbacaan kode, dan menurunkan risiko kesehatan akibat paparan debu.

Kata-kata kunci: Box Cleaning, High Pressure Air-Flow, Ring Blower, Spillage, Packing Plant.

Abstract

At PT. Solusi Bangun Andalas's *Packing Plant*, *Box Cleaning* is used to clean cement *spillage* on bags after the packaging process by *Rotary Packer* #2, but it still leaves residual dust that interferes with bag coding and product quality. This study modifies the *Box Cleaning* by implementing a *High Pressure Air-Flow* system (*ring blower*, galvanized pipes, and round nozzles at a 45° angle) to improve cleaning effectiveness. The methodology includes problem identification, literature and field studies, data collection, fluid flow calculations (flow rate, velocity, *Reynolds* number, major and minor head losses, and total head), and finally the modification implementation. Calculations show that the nozzle velocity reaches ~550 m/s (*choked* flow) with a mass flow rate of 0.002264 kg/s, a total head of 1583.78 m (18.1 kPa), and a blower power requirement of 7.87 kW (15.0213 A). After the modification, bag contamination dropped from 100% to ≤30%, cement material loss decreased from 2 g/bag to ≤0.5 g/bag (a 75% reduction), workplace dust concentration fell from 2.453 g/m³ to ≤0.613 g/m³, and coding quality improved to ≥90%. The modification proved effective in cleaning bags, supporting code readability, and reducing occupational health risks due to dust exposure.

Keywords: Box Cleaning, High Pressure Air-Flow, Ring Blower, Spillage, Packing Plant

1. PENDAHULUAN

PT. Solusi Bangun Indonesia (SBI) merupakan salah satu perusahaan semen terbesar di Indonesia dengan kapasitas produksi mencapai 15 juta ton semen per tahun, yang dioperasikan melalui empat pabrik, salah satunya di Lhoknga, Aceh, di bawah naungan PT Solusi Bangun Andalas (SBA).

Packing Plant atau *Pack House* merupakan area PT SBA yang berfungsi sebagai tempat pengepakan semen ke dalam kemasan *bag*, *jumbo bag*, maupun bentuk curah (*truck bulk*). Setelah keluar dari *Rotary Packer Machine*, semen dialirkan menuju *loading spout* melalui *belt conveyor*, dan pada tahap ini sering terjadi *spillage* (ceceran semen) yang menempel pada permukaan *bag*. *Box Cleaning* merupakan perangkat pengendali debu yang memanfaatkan angin bertekanan dari *blower* untuk menghembus *spillage* pada *bag* semen, sehingga debu yang berterbangan dapat dihisap oleh *bag filter* sebagai *dust collector* [1]. Pengendalian debu pada tahap pengepakan menjadi perhatian penting di industri semen mengingat kontribusinya terhadap emisi debu dan risiko kesehatan pekerja [1].

Kondisi aktual di lapangan menunjukkan bahwa semen yang telah melewati *Box Cleaning* pada *Packer Machine* #2 masih menyisakan ceceran debu pada permukaan *bag*. Kondisi ini mengganggu proses *bag coding*, yaitu pencetakan kode produksi (tanggal produksi, kode produk, dan nomor *batch*) pada permukaan *bag*, sehingga kualitas cetakan menurun dan berpotensi menimbulkan keluhan pelanggan. Oleh karena itu, diperlukan modifikasi pada *Box Cleaning* untuk meningkatkan efektivitas pembersihan *spillage* pada permukaan *bag* semen di area *Packing Plant*.

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana merancang dan memodifikasi *Box Cleaning* menggunakan sistem *High Pressure Air-Flow* pada *Packer Machine* #2 untuk meningkatkan efektivitas pembersihan *cement spillage* pada permukaan kantong semen di area *Packing Plant* PT Solusi Bangun Andalas. Tujuan umum penelitian ini adalah memberikan solusi teknis berupa modifikasi *Box Cleaning* menggunakan sistem *High Pressure Air-Flow* sehingga menurunkan tingkat debu pada *bag* semen sebesar 70% (dari 100% menjadi $\leq 30\%$) dan meningkatkan kualitas keterbacaan *bag coding* hingga $\geq 90\%$. Adapun tujuan khusus penelitian ini meliputi: (1) memodifikasi *Box Cleaning* menggunakan sistem *High-Pressure Air-Flow* untuk membersihkan *spillage* yang menempel pada *bag* semen; (2) meningkatkan efektivitas pembersihan debu sehingga kualitas *bag coding* terjaga dengan tingkat keterbacaan minimal 90%; dan (3) meminimalisir keluhan pelanggan dengan menurunkan tingkat kontaminasi produk serta mengurangi kehilangan material semen hingga $\leq 0,613$ g/zak.

Manfaat teknis dari penelitian ini meliputi peningkatan efektivitas pembersihan *spillage* pada permukaan kantong semen, pengurangan dampak penyebaran debu di area *Packing Plant* yang berisiko terhadap kesehatan pekerja, dukungan terhadap kinerja sistem *Bag Coding*, serta peningkatan keandalan dan efisiensi proses pengemasan. Dari sisi ekonomis, modifikasi ini berpotensi meningkatkan penghematan semen sebesar ± 2 g/zak. Penelitian dibatasi pada modifikasi *Box Cleaning* di *Packer Machine* #2 dan berfokus pada aspek mekanis proses aliran udara (*flow rate*), tanpa membahas faktor ekonomi, kontrol otomasi, instalasi kelistrikan, *bag filter*, *fan*, maupun simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Penelitian ini dilaksanakan di area *Packing Plant* PT Solusi Bangun Andalas, Pabrik Lhoknga, Aceh Besar, khususnya pada unit *Box Cleaning Packer Machine* #2 yang menangani proses pengepakan dan distribusi semen dalam kemasan *bag* untuk kebutuhan pasar domestik maupun ekspor. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada tingginya frekuensi keluhan terkait kebersihan kemasan serta gangguan pada proses *bag coding* pada unit tersebut, sehingga menjadikannya representatif untuk mengevaluasi efektivitas modifikasi sistem *High-Pressure Air-Flow* yang diusulkan. Data primer diperoleh melalui pengukuran dan pengamatan langsung di lapangan, sedangkan data sekunder diperoleh dari dokumentasi teknis dan riwayat operasional *Packing Plant*.

Box Cleaning merupakan perangkat pengendali debu yang bekerja dengan memanfaatkan udara bertekanan untuk membersihkan permukaan kantong semen setelah proses pengepakan. Aliran udara bertekanan dari *blower* mampu menghasilkan gaya dorong yang cukup besar untuk mengatasi gaya adhesi dan kohesif antara partikel debu dan permukaan *bag*, terutama pada lapisan debu (*dust cake*) yang menempel kuat [2].

Nozzle berperan memusatkan aliran udara agar menjadi lebih kuat, cepat, dan terarah sehingga mampu melepaskan *dust cake* pada permukaan *bag* [2]. Studi eksperimental pada sistem *pulse-jet filter bag cleaning* menunjukkan bahwa parameter operasi, seperti tekanan dan durasi hembusan udara, sangat memengaruhi efektivitas pelepasan debu dari media *filter* [2]. Penelitian lain mengenai mekanisme pembentukan aliran pembersih pada *pulse-jet fabric filter* menunjukkan bahwa kombinasi tekanan impuls, kecepatan aliran balik (*reverse airflow*), dan percepatan permukaan *filter* merupakan faktor utama keberhasilan pelepasan debu [3]. Penempatan *nozzle* pada sudut 45° dipilih untuk mengarahkan aliran udara menyapu dan mendorong debu menjauh, sekaligus meminimalkan *dead zone* dan kehilangan tekanan akibat turbulensi.

Penelitian sejenis mengenai pembersihan debu bertekanan tinggi telah banyak dilakukan, di antaranya kajian parameter operasi sistem pembersihan *pulse-jet filter* [2] serta analisis mekanisme pembentukan aliran udara pembersih pada *pulse-jet fabric filter* [3], yang keduanya berfokus pada regenerasi media *filter* (*dust collector*)

menggunakan hembusan udara bertekanan singkat dan periodik. Penelitian tersebut belum membahas penerapan sistem aliran udara bertekanan tinggi secara kontinu untuk membersihkan *spillage* pada permukaan kemasan (*bag*) di industri semen, khususnya pada tahap pasca-pengepakan. Kesenjangan (*gap*) inilah yang menjadi dasar penelitian ini, yaitu memodifikasi *Box Cleaning* menggunakan sistem *ring blower* bertekanan tinggi yang dirancang khusus untuk kebutuhan pembersihan *bag* semen di *Packing Plant*, sekaligus melengkapi kajian mekanika fluida sistem perpipaan yang belum banyak diulas pada penelitian-penelitian sejenis sebelumnya.

High-pressure air flow menggunakan *ring blower* (*regenerative blower*) adalah aliran udara yang dihasilkan melalui proses percepatan udara berulang di dalam *impeller*, sehingga menghasilkan tekanan tinggi dengan debit aliran yang stabil untuk keperluan peniupan dan pembersihan [4]. Pada prinsip kerjanya, udara dialirkan masuk ke saluran samping (*side channel*), kemudian *impeller* berputar mempercepat aliran udara mengikuti arah rotasi sehingga timbul gaya sentrifugal yang meningkatkan tekanan udara sebelum keluar melalui *outlet blower* [4]. Bagian yang berputar pada *ring blower* tidak menyentuh dinding rumah *blower*, sehingga tidak timbul gesekan dan proses peningkatan tekanan berlangsung tanpa oli.

Secara umum, *blower* dapat diklasifikasikan menjadi *blower* sentrifugal yang memanfaatkan gaya sentrifugal dari *impeller* berputar untuk mengubah energi kinetis menjadi energi potensial [5], *blower* aksial yang menghasilkan kapasitas aliran besar dengan *head* relatif rendah pada tingkat daya yang sama [6], serta *blower* tipe *roots* berprinsip perpindahan positif (*positive displacement*) yang tidak mengalami kompresi internal karena volume ruang kerjanya tetap konstan [7]. Unjuk kerja *blower* ditentukan oleh *impeller*, yang memegang peranan utama dalam meningkatkan tekanan statis fluida di dalam rumah *volute* [8].

Sistem perpipaan yang diterapkan menggunakan pipa galvanis, yaitu pipa yang dilapisi unsur *zinc* untuk melindungi material dari korosi sehingga proses kerja pipa dapat berlangsung optimal dan sesuai prinsip mekanisme aliran fluida [9]. Beberapa komponen *fitting* yang digunakan meliputi *elbow* untuk mengubah arah aliran fluida [10], *tee* untuk membagi aliran ke arah cabang tertentu [10], *reducer* untuk menghubungkan pipa dengan diameter berbeda [10], serta *water* mur (*union*) yang memudahkan proses pemasangan dan pembongkaran pipa tanpa harus memotong ataupun menggeser posisi pipa. Komponen utama *ring blower* terdiri atas *casing* yang menahan tekanan udara selama operasi [8], *impeller* yang menyalurkan energi dari motor dengan mempercepat aliran udara [11], serta *shaft* yang meneruskan momen puntir dan menjadi tumpuan bagian yang berputar [12].

Debu merupakan partikel padat berukuran sekitar 0,1–500 mikron yang terbentuk akibat proses mekanis seperti penghancuran, penghalusan, atau pengepakan dengan kecepatan tinggi. Paparan debu di lingkungan kerja, termasuk debu semen, dapat menimbulkan gangguan kesehatan pada sistem pernapasan pekerja, baik bersifat akut maupun kronis, yang dipengaruhi oleh karakteristik debu (ukuran partikel, konsentrasi, dan lama paparan) serta kondisi anatomi dan fisiologi saluran pernapasan individu [1]. Studi mengenai kadar debu respirabel menunjukkan adanya hubungan antara tingginya konsentrasi debu di area kerja dengan keluhan kesehatan pekerja, sehingga pengendalian konsentrasi debu di bawah nilai ambang batas menjadi aspek penting dalam menjaga keselamatan dan kesehatan kerja [1]. Semen sendiri merupakan material yang bersifat adhesif dan kohesif sehingga berfungsi sebagai bahan perekat (*bonding material*) pada industri konstruksi [13].

Karakteristik aliran fluida diklasifikasikan menjadi aliran laminar ($Re < 2000$), transisi ($2300 < Re < 4000$), dan turbulen ($Re > 4000$) berdasarkan bilangan Reynolds [14]. Pada sistem yang menggunakan *nozzle* berdiameter kecil dengan tekanan tinggi, kecepatan aliran dapat melebihi kecepatan suara sehingga terjadi kondisi *choked flow*, yaitu kondisi ketika laju aliran massa telah mencapai nilai maksimum yang ditentukan oleh tekanan hulu, sehingga penurunan tekanan di sisi hilir tidak lagi meningkatkan laju aliran. Fenomena ini umum dijumpai pada sistem *blower* tipe *roots* maupun sistem bertekanan tinggi lainnya, sehingga perhitungan laju aliran massa aktual perlu menggunakan pendekatan aliran kompresibel, bukan hanya persamaan kontinuitas sederhana [7].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif-kuantitatif yang dilaksanakan di PT. Solusi Bangun Andalas, Pabrik Lhoknga, dengan tahapan identifikasi masalah, perumusan masalah, studi literatur dan studi lapangan, pengumpulan dan pengolahan data, modifikasi, hingga penarikan kesimpulan dan saran. Identifikasi masalah dilakukan dengan mengamati isu *safety*, frekuensi *failure/breakdown*, dan tingkat kerugian pada *Box Cleaning* di *Packer Machine* #2. Analisis penyebab masalah dilakukan dengan metode *Root Cause Analysis* (RCA), kemudian dirancang penyelesaian masalah dengan mempertimbangkan aspek biaya dan manfaat yang diperoleh. Pengambilan keputusan modifikasi dilakukan berdasarkan hasil diskusi dengan *Packing Plant Engineer* serta pengalaman *Superintendent Packing Plant Mechanical* untuk membandingkan dan menyempurnakan data desain. Modifikasi dilaksanakan dengan mengganti konfigurasi pemipaan dan menambahkan *nozzle round type* pada *Box Cleaning Packer Machine* #2, kemudian

dilakukan pengujian dan pengamatan langsung terhadap kondisi *bag* semen sebelum dan sesudah modifikasi sebagai indikator keberhasilan.

Tahapan penelitian mengikuti diagram alir yang terdiri atas: (1) penentuan judul dan penyusunan proposal; (2) identifikasi masalah dan tujuan penelitian berdasarkan isu *safety*, frekuensi *failure/breakdown*, dan tingkat kerugian di lapangan; (3) perumusan masalah secara rinci untuk memperoleh pokok permasalahan yang tepat; (4) studi literatur berupa kajian jurnal penelitian dan *manual book* pabrik, serta studi lapangan berupa pengamatan langsung terhadap komponen, alur proses, dan performa *equipment* di lokasi pengepakan semen; (5) pengumpulan, analisis, dan pengolahan data menggunakan metode *Root Cause Analysis (RCA)*; (6) perancangan dan pelaksanaan modifikasi; hingga (7) penarikan kesimpulan dan saran berdasarkan hasil pengamatan uji coba. Setiap tahapan dilaksanakan secara berurutan agar hasil modifikasi dapat dipertanggungjawabkan secara teknis maupun ilmiah.

Sistem *High-Pressure Air-Flow* yang diterapkan menggunakan *ring blower* RB 15-15, pipa galvanis berdiameter 4 inci dan 2 inci, *fitting elbow*, *tee*, *water mur (union)*, *reducer*, serta *nozzle round type* berdiameter 6 mm yang menghasilkan delapan lubang aliran udara terpusat. Spesifikasi lengkap sistem disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi Sistem *High-Pressure Air-Flow*

Komponen	Dimensi/Kapasitas
<i>Ring blower</i> RB 15-15 (60 Hz)	0,317 m ³ /s (19 m ³ /menit)
Daya & arus nominal <i>blower</i>	11 kW / 21 A
Tekanan maksimum <i>blower</i>	15 kPa (15.000 Pa)
Pipa galvanis 4 inci	Ø 97,5 mm (0,0975 m)
Pipa galvanis 2 inci	Ø 53,10 mm (0,0531 m)
<i>Nozzle round type</i>	Ø 6 mm, 8 lubang
Tabung (<i>flat duct</i>)	460 mm × 1,5 mm

Perhitungan sistem mengacu pada persamaan debit aliran $Q = v \times A$ [15], bilangan *Reynolds* $Re = \rho V D / \mu$ untuk menentukan jenis aliran [14], *head loss mayor* menggunakan persamaan *Darcy-Weisbach* $H_l = f(L/D)(V^2/2g)$ [16], *head loss minor* $H = K(V^2/2g)$ berdasarkan koefisien tahanan komponen *fitting* [16], *head* kecepatan $H_v = (v_1^2 - v_2^2)/2g$, serta *head* total $H_{tot} = Z + \Delta h_p + H_l + H_v$ [15]. Untuk aliran pada *nozzle* yang melebihi kecepatan suara, digunakan persamaan laju massa aliran *choked* berikut:

$$\dot{m} = C_d A P_o \sqrt{\frac{\gamma}{RT}} \times \left(1 - \frac{2}{\gamma-1} M^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (1)$$

dengan C_d adalah koefisien *discharge*, A luas penampang *nozzle* (m²), P_o tekanan stagnasi (Pa), γ rasio kalor spesifik udara, R konstanta gas spesifik, T temperatur absolut (K), dan M bilangan *Mach*. Perhitungan daya aktual *blower* dilakukan dengan pendekatan rasio debit aktual terhadap debit katalog:

$$\frac{P_{\text{aktual}}}{P_{\text{katalog}}} = \frac{Q_{\text{aktual}}}{Q_{\text{katalog}}} \times \frac{\Delta P_{\text{aktual}}}{\Delta P_{\text{katalog}}} \quad (2)$$

Konsentrasi debu di area kerja dihitung menggunakan persamaan $C = m/Q$, dengan m adalah laju massa debu (g/jam) dan Q adalah debit aliran udara di area *packing plant* (m³/jam).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan lapangan menunjukkan perbaikan signifikan pada kondisi *bag* semen setelah modifikasi *Box Cleaning* diterapkan. Pada kondisi sebelum modifikasi, permukaan *bag* masih terkontaminasi partikel debu semen (*spillage*) yang melekat selama proses pengisian, sedangkan setelah modifikasi dengan sistem *High-Pressure Air-Flow*, residu debu pada permukaan *bag* mengalami penurunan signifikan karena semburan udara bertekanan tinggi meningkatkan gaya geser (*shear force*) sehingga partikel debu lebih mudah terlepas. Perbandingan parameter sebelum dan sesudah modifikasi disajikan pada Tabel 2.

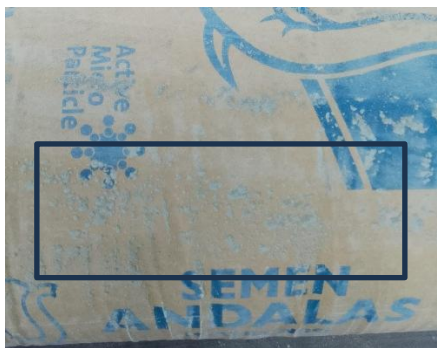
Tabel 2 Perbandingan *Output Box Cleaning* Sebelum dan Sesudah Modifikasi

Parameter	Sebelum	Sesudah	Perubahan
Persentase <i>bag</i> terkontaminasi	100%	≤30%	↓70%
Kehilangan material	2 g/zak	≤0,5 g/zak	↓75%

Konsentrasi debu	2,453 g/m ³	≤0,613 g/m ³	↓75%
Kualitas <i>bag coding</i>	–	≥90%	↑≥90%

Sebelum

Sesudah

Gambar 1. Perbandingan *before* dan *after* modifikasi

Berdasarkan kapasitas *ring blower* sesuai katalog sebesar 0,317 m³/s, dilakukan analisis kecepatan aliran pada setiap segmen perpipaan. Kecepatan aliran pada pipa 4 inci mencapai 42,436 m/s, kemudian meningkat menjadi 143,439 m/s setelah melewati *reducer* menuju pipa 2 inci. Setelah aliran terbagi melalui sambungan *Tee (Y)* menuju dua *packer*, kecepatan turun menjadi 71,719 m/s, dan setelah melewati *Cross Junction* yang membagi aliran ke empat cabang *nozzle* dan tabung, kecepatan menjadi 17,930 m/s. Perhitungan kecepatan teoritis pada *nozzle* berdiameter 6 mm menggunakan persamaan kontinuitas menghasilkan nilai melebihi 700 m/s, yang melampaui kecepatan suara (343 m/s, $Ma = 2,016$), sehingga aliran mengalami *choked flow*. Dengan pendekatan aliran kompresibel pada Persamaan (1), diperoleh laju massa $\dot{m} = 0,001534$ kg/s dan kecepatan aktual pada *nozzle* sebesar 50,985 m/s.

Total *head loss* mayor berdasarkan katalog mencapai 1.825,732 m, didominasi oleh kerugian pada pipa 2 inci sepanjang jalur distribusi, sedangkan *head loss* minor mencapai 818,504 m yang sebagian besar berasal dari sambungan *reducer* dan *tee*. Dengan memperhitungkan *head* elevasi (2,008 m) dan *head* kecepatan (−75,40 m), diperoleh total *head* kebutuhan sistem sebesar 2.570,844 m. Nilai ini lebih besar dibandingkan dengan *head* maksimum yang mampu dihasilkan *blower* (1.312,5 m), sehingga secara teoritis *blower* tidak mampu mempertahankan debit penuh sesuai katalog dan perlu dianalisis lebih lanjut menggunakan pendekatan debit aktual.

Berdasarkan tekanan aktual *blower* sebesar 15.000 Pa, *head blower* aktual dihitung sebesar 1.312,5 m. Dengan membandingkan *head* kebutuhan sistem terhadap *head blower*, diperoleh debit aktual sebesar 0,24935 m³/s, lebih rendah dibandingkan dengan debit katalog. Kecepatan aliran aktual pada pipa 4 inci sebesar 33,380 m/s, pada pipa 2 inci setelah *reducer* sebesar 112,828 m/s, setelah *tee* sebesar 56,414 m/s untuk masing-masing *packer*, dan setelah *cross junction* sebesar 14,104 m/s menuju *nozzle* dan tabung.

Pada *nozzle* berdiameter 6 mm, kecepatan aliran teoritis mencapai 550,530 m/s, melebihi kecepatan suara (343 m/s), sehingga terjadi kondisi aliran *choked*. Perhitungan laju massa aliran *choked* pada *nozzle* menggunakan Persamaan (1) menghasilkan $\dot{m} = 0,002264$ kg/s, setara dengan debit aktual 0,001943 m³/s dan kecepatan aliran terkoreksi sebesar 68,657 m/s. Hasil ini menunjukkan bahwa keterbatasan luas penampang *nozzle* menjadi faktor pembatas utama (*choking*) pada sistem aliran udara bertekanan tinggi ini. Kecepatan pada tabung pembersih dihitung sebesar 38,051 m/s.

Total *head loss* mayor aktual sebesar 955,953 m dan *head loss* minor aktual sebesar 431,451 m, sehingga total *head loss* aktual sebesar 1.387,405 m. Dengan *head* elevasi 2,008 m dan *head* kecepatan -46,651 m, diperoleh total *head* aktual sistem sebesar 1.583,782 m, setara dengan tekanan sistem sebesar 18,1 kPa. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem beroperasi pada kondisi yang realistis dan sesuai dengan kemampuan aktual *blower* di lapangan.

Verifikasi rezim aliran dilakukan dengan menghitung bilangan *Reynolds* pada setiap segmen perpipaan menggunakan kecepatan aliran aktual. Pada pipa 4 inci diperoleh $Re = 185.165$, pada pipa 2 inci setelah *reducer* $Re = 340.866$, setelah *tee* $Re = 177.668$, dan setelah *cross junction* menuju *nozzle* dan tabung $Re = 42.604$. Seluruh nilai tersebut jauh melebihi ambang $Re = 4.000$, sehingga aliran pada setiap segmen perpipaan dipastikan berada pada rezim *turbulen* [14]. Kondisi aliran *turbulen* ini konsisten dengan penggunaan koefisien gesek (f) yang diperoleh melalui pendekatan Diagram *Moody* dalam perhitungan *head loss* mayor pada bagian sebelumnya, sehingga hasil perhitungan *head* total sistem dapat dipertanggungjawabkan secara teoretis.

Distribusi debit aliran pada delapan *nozzle* dihitung sebesar $8 \times 0,0000283 \text{ m}^3 \times 68,657 \text{ m/s} = 0,015544 \text{ m}^3/\text{s}$, sedangkan distribusi pada empat tabung sebesar $4 \times 0,000744 \text{ m}^3 \times 38,051 \text{ m/s} = 0,113696 \text{ m}^3/\text{s}$. Kombinasi semburan *nozzle* berkecepatan tinggi dan aliran datar (*flat*) dari tabung menciptakan efek pembersihan ganda: *nozzle* untuk serangan titik (*point attack*) pada area yang sulit dijangkau, sedangkan tabung untuk menyapu area permukaan yang lebih luas, sehingga distribusi aliran udara memadai untuk menjangkau seluruh area pembersihan *bag* semen.



Gambar 2. Spesifikasi *Blower*

Perhitungan daya aktual *blower* menggunakan rasio debit aktual terhadap debit katalog (Persamaan 2) menghasilkan daya aktual sebesar 7,87 kW dengan arus aktual sebesar 15,0213 A, lebih rendah dibandingkan daya nominal katalog sebesar 11 kW. Hal ini menunjukkan bahwa sistem modifikasi *Box Cleaning* bekerja pada kondisi pembebanan yang efisien dan masih berada jauh di bawah rating maksimum *blower* (11 kW/21 A), sehingga memiliki faktor keamanan (*safety factor*) yang cukup besar dan tidak membebani motor secara berlebihan.

Berdasarkan data output *Packing Plant* tahun 2025 sebesar 5.776.033 *bag*, penurunan kehilangan material semen dari 2 *g/bag* menjadi 0,5 *g/bag* menghasilkan penghematan material sebesar 8.664.049,5 gram atau setara dengan 8,664 ton semen per tahun. Adapun konsentrasi debu di area kerja dihitung menggunakan persamaan $C = m/Q$ dengan debit aliran udara di area kerja sebesar 815,4 m^3/jam . Sebelum modifikasi, laju massa debu sebesar 2.000 *g/jam* (2 *g/bag* $\times$ 1.000 *bag/jam*) menghasilkan konsentrasi debu $C = 2.000/815,4 = 2,453 \text{ g/m}^3$. Setelah modifikasi, laju massa debu turun menjadi 500 *g/jam* sehingga konsentrasi debu menjadi $C = 500/815,4 = 0,613 \text{ g/m}^3$, atau mengalami penurunan sebesar 75%. Penurunan ini mendukung terciptanya lingkungan kerja yang lebih bersih serta menurunkan risiko kesehatan pekerja akibat paparan debu semen [1].

Total biaya yang dikeluarkan untuk modifikasi *Box Cleaning* menggunakan *High-Pressure Air-Flow* adalah sebesar Rp14.918.500,00, dengan komponen biaya terbesar berasal dari pengadaan pipa galvanis 2 inci (Rp3.924.000 untuk empat batang), *nozzle round type* (Rp2.400.000 untuk delapan unit), pipa galvanis 4 inci (Rp2.170.000), serta biaya fabrikasi dan pemasangan sebesar Rp1.500.000 untuk sepuluh pekerja. Nilai investasi ini relatif kecil dibandingkan dengan potensi penghematan material semen sebesar 8,664 ton per tahun serta manfaat nonfinansial berupa penurunan risiko kesehatan kerja dan potensi keluhan pelanggan.

4. KESIMPULAN

Modifikasi *Box Cleaning* menggunakan sistem *High Pressure Air-Flow* pada *Area Packing Plant* PT. Solusi Bangun Andalas berhasil meningkatkan kinerja sistem pembersihan kantong semen. Tingkat kontaminasi debu pada *bag* berhasil diturunkan dari 100% menjadi $\leq 30\%$ ($\downarrow 70\%$), kehilangan material semen berkurang dari 2 g/zak menjadi $\leq 0,5$ g/zak ($\downarrow 75\%$), dan konsentrasi debu di area kerja menurun dari $2,453 \text{ g/m}^3$ menjadi $\leq 0,613 \text{ g/m}^3$ ($\downarrow 75\%$), sesuai nilai ambang batas yang dipersyaratkan [1]. Kualitas *bag coding* meningkat hingga $\geq 90\%$, mendukung keterbacaan kode produksi dan mengurangi potensi keluhan pelanggan.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sistem bekerja pada kondisi *choked flow* di *nozzle* dengan total *head* aktual 1.583,782 m (setara 18,1 kPa) dan konsumsi daya aktual sebesar 7,87 kW (15,0213 A), jauh di bawah kapasitas maksimum *blower* (11 kW/21 A), sehingga memiliki faktor keamanan yang baik. Modifikasi ini juga menghasilkan penghematan material semen sebesar 8,664 ton per tahun dengan total investasi sebesar Rp14.918.500,00. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan dilakukan monitoring berkala terhadap posisi tabung dan *nozzle* setiap awal *shift*, perawatan *nozzle* harian untuk mencegah penyumbatan akibat partikel semen, serta optimalisasi sistem *dust collector* pada *Box Cleaning*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Solusi Bangun Andalas atas kesempatan dan dukungan fasilitas dalam pelaksanaan penelitian ini, serta kepada Bapak Fakhri Kamal selaku pembimbing *Manager Finish Mill & Dispatch* dan Spesialisasi, Bapak Firman Tarigan selaku *Area Owner Packing Plant*, Bapak Faishal Sulthan selaku pembimbing Tugas Akhir dan Bapak Yuli Mafendro Dedet, M.T. selaku Dosen pembimbing yang telah memberi pencerahan Tugas Akhir saya.

REFERENSI

1. S. Sunaryo dan M. N. Rhomadhoni, "Analisis kadar debu respirabel terhadap keluhan kesehatan pada pekerja," *Kesehatan Masyarakat Khatulistiwa*, vol. 8, no. 2, pp. 63–71, 2021.
2. E. Kim, Y. Byun, H. S. Bak, and D. J. Koh, "Experimental study on the operating parameters of a pulse-jet filter bag cleaning system," *Sustainability*, vol. 14, no. 12, 2022.
3. J. Cai, W. Hao, C. Zhang, J. Yu, and T. Wang, "On the forming mechanism of the cleaning airflow of pulse-jet fabric filters," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 67, no. 12, pp. 1273–1287, 2017.
4. Everest Blowers Private Limited, *Side Channel Blowers: Everest Innovative Engineering Solutions*, 2020.
5. I. Siregar and S. Lubis, "Analisa pengaruh sudut sudu impeller pada unjuk kerja blower sentrifugal," *J. Mesil (Mesin, Elektro, Sipil)*, vol. 1, no. 1, 2020.
6. G. M. D. P. Dananjaya, A. A. A. Suryawan, and I. G. K. Sukadana, "Pengaruh variasi jumlah sudu pada blower aksial terhadap tekanan dinamis," *J. Ilmiah Tek. Desain Mekanika*, vol. 10, no. 1, 2021.
7. S. H. Sun, A. Kovacevic, C. Bruecker, A. Leto, G. Singh, and M. Ghavami, "Numerical and experimental analysis of transient flow in roots blower," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 425, no. 1, 2018.
8. S. H. Suganda, "Analisis pengaruh jumlah sudu impeller terhadap kecepatan dan tekanan udara blower," *Skripsi, Universitas Islam Sumatera Utara*, 2025.
9. A. P. Aji, "Optimalisasi sistem pemipaan di KM. Mutiara Timur 1 PT. Atosim Lampung Pelayaran Jakarta," *Karya Tulis, Universitas Maritim AMNI*, 2020.
10. J. A. Faturahman, "Analisa variasi diameter dan jumlah elbow dari sistem pemipaan pada pompa Shimizu PS-135 E terhadap daya, head dan kecepatan aliran," *Skripsi, Universitas Islam Sumatera Utara*, 2024.
11. E. N. M. Yusuf, "Analisis terjadinya kavitasi pada pompa sentrifugal di kapal KM. Dharma Kencana VII," *Skripsi*, 2022.
12. D. Darianto, F. A. Kurniawan, Z. Zulfikar, I. Iswandi, and N. S. Hutasoit, "Analisa unjuk kerja blower sentrifugal pada mesin turbo chopper jerami padi sebagai pakan ternak alternatif," *IRA J. Tek. Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, vol. 2, no. 3, pp. 9–12, 2023.
13. G. Marino and Y. D. Setiyarto, "Penggunaan tanah liat untuk mengurangi jumlah semen pada beton geopolimer," *CRANE: Civil Engineering Research Journal*, vol. 1, 2020.
14. A. F. Ghazali, E. Santoso, A. Sa'diyah, A. Desyandria, and Z. Imanda, "Analisis kavitasi pada redesain sistem perpipaan pompa sentrifugal di graving dock," vol. 6, no. 2, 2023.

15. Ubaedilah, “Analisa kebutuhan jenis dan spesifikasi pompa untuk suplai air bersih di gedung kantin berlantai 3 PT Astra Daihatsu Motor,” J. Tek. Mesin (JTM), vol. 5, no. 3, 2016.
16. P. Cantona, M. A. Stevanie Dwi, C. Slamet Abadi, and M. Syujak, “Analisis head loss dan kavitasi dari rangkaian pompa sentrifugal Ebara di PT. PBI,” Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta, pp. 87–93, 2019.