

RANCANG BANGUN *STEPPING CHUTE* PADA *VIBRATING SCREEN 546-VS1* DI AREA *FINISH* *MILL NAR 2*

Raka Aditya Rasyid¹, Muslimin^{2*}, Iwan Setiawan³, dan Hidayat Arif Abadi³

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

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

³Production Finish Mill Narogong 2, PT Solusi Bangun Indonesia Tbk, Narogong Plant

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

Abstrak

Pada proses penggilingan semen, material clinker hasil pemisahan pada Vibrating Screen 546-VS1 ditransportasikan menuju Belt Conveyor (BC) 6. Sistem transport yang digunakan sebelumnya berupa air slide sering mengalami plugging akibat ukuran material clinker yang masih kasar, sehingga mengganggu kelancaran produksi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan rancang bangun stepping chute sebagai sistem transport material berbasis gravitasi. Perancangan dilakukan berdasarkan kapasitas material, kondisi layout, karakteristik clinker, dan dimensi area pemasangan. Hasil perancangan menunjukkan bahwa stepping chute memiliki luas penampang aliran sebesar 0,165 m² dengan kapasitas teoritis 1.069,2 ton/jam serta sudut kemiringan yang memenuhi syarat aliran gravitasi. Penggunaan stepping chute diharapkan dapat mengurangi potensi plugging dan meningkatkan kelancaran aliran material menuju BC 6.

Kata kunci: clinker, material handling, plugging, stepping chute, vibrating screen.

Abstract

In the cement grinding process, clinker material separated by Vibrating Screen 546-VS1 is transported to Belt Conveyor (BC) 6 for further processing. The previously used air slide transportation system frequently experienced plugging due to the coarse size of clinker particles, which disrupted the production process. To overcome this issue, a stepping chute was designed as a gravity-based material handling system. The design was developed based on material capacity, site layout conditions, clinker characteristics, and installation dimensions. The results showed that the stepping chute has a flow cross-sectional area of 0.165 m² with a theoretical capacity of 1,069.2 tons/hour and an inclination angle that meets the requirements for gravity-driven clinker flow. The implementation of the stepping chute is expected to reduce the potential for plugging and improve the continuity of material flow to BC 6.

Keywords: clinker, material handling, plugging, stepping chute, vibrating screen.

1. PENDAHULUAN

Industri semen merupakan salah satu industri yang sangat bergantung pada kelancaran sistem material *handling*, terutama pada tahapan penggilingan (*finish mill*). Proses penggilingan *clinker* di area *Finish Mill NAR 2 PT. Solusi Bangun Indonesia* melibatkan penggunaan *vibrating screen 536-VSI* untuk klasifikasi material berdasarkan ukuran partikel [1]. Material halus dialirkan langsung menuju *ball mill*, sedangkan material kasar diarahkan ke unit *pre-grinder*. Sistem *transport* material dari keluaran *vibrating screen* sebelumnya menggunakan *air slide 536-ASI* yang bekerja berdasarkan prinsip fluidisasi udara [2].

Permasalahan utama yang terjadi adalah *plug up* (penyumbatan) berulang pada *air slide* akibat karakteristik *clinker* yang relatif kasar dengan nilai *blaine* rendah (797 cm²/gr) dan *moisture content* 0,29%. Kondisi ini menyebabkan gangguan pada kontinuitas aliran material dan peningkatan *downtime* sistem. Berdasarkan analisis akar penyebab masalah menggunakan *fishbone* diagram, ditemukan bahwa sistem *air slide* tidak kompatibel dengan karakteristik material *clinker* yang dihasilkan pada kondisi operasional tersebut [3].

Sebagai solusi, direncanakan penggantian *air slide* dengan *stepping chute* yang memanfaatkan prinsip aliran gravitasi [1]. *Stepping chute* merupakan sistem *transport* berbasis gravitasi yang mampu mengalirkan material curah tanpa energi tambahan, relatif sederhana dalam konstruksi, dan lebih tahan terhadap material kasar [2]. Industri semen merupakan salah satu industri yang sangat bergantung pada kelancaran sistem material *handling*, terutama pada tahapan penggilingan (*finish mill*). Proses penggilingan *clinker* di area *Finish Mill NAR 2 PT. Solusi Bangun Indonesia* melibatkan penggunaan *vibrating screen 536-VSI* untuk klasifikasi material berdasarkan ukuran partikel [1]. Material halus dialirkan langsung menuju *ball mill*, sedangkan material kasar diarahkan ke unit *pre-grinder*. Sistem *transport* material dari keluaran *vibrating screen* sebelumnya menggunakan *air slide 536-ASI* yang bekerja berdasarkan prinsip fluidisasi udara [2].

Permasalahan utama yang terjadi adalah *plug up* (penyumbatan) berulang pada *air slide* akibat karakteristik *clinker* yang relatif kasar dengan nilai *blaine* rendah (797 cm²/gr) dan *moisture content* 0,29%. Kondisi ini menyebabkan gangguan pada kontinuitas aliran material dan peningkatan *downtime* sistem. Ditemukan bahwa sistem *air slide* tidak kompatibel dengan karakteristik material *clinker* yang dihasilkan pada kondisi operasional tersebut [3].

Sebagai solusi, direncanakan penggantian *air slide* dengan *stepping chute* yang memanfaatkan prinsip aliran gravitasi [1]. *Stepping chute* merupakan sistem *transport* berbasis gravitasi yang mampu mengalirkan material curah tanpa energi tambahan, relatif sederhana dalam konstruksi, dan lebih tahan terhadap material kasar [2]. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan spesifikasi teknis *stepping chute* yang meliputi dimensi, sudut kemiringan, material konstruksi, dan sistem sambungan sesuai kebutuhan operasional di lapangan.

2. METODOLOGI

Penelitian ini diawali dengan identifikasi masalah melalui observasi lapangan dan pengumpulan data operasional pada area *Finish Mill NAR 2 PT Solusi Bangun Indonesia* untuk mengetahui kondisi aktual sistem *transport material clinker*. Selanjutnya dilakukan studi literatur sebagai dasar dalam memahami teori *material handling*, karakteristik material curah, perancangan *chute*, pemilihan material konstruksi, serta standar yang digunakan dalam proses perancangan [1]–[3].

Berdasarkan hasil observasi dan studi literatur, dilakukan perancangan *stepping chute* dengan mempertimbangkan kapasitas material, dimensi area pemasangan, sudut kemiringan, jumlah *step*, material konstruksi, serta sistem sambungan. Hasil perancangan kemudian dievaluasi untuk memastikan kesesuaiannya dengan kebutuhan operasional. Apabila hasil evaluasi belum memenuhi kriteria yang ditetapkan, maka dilakukan perbaikan desain hingga diperoleh rancangan yang sesuai [1], [3], [9].

Setelah desain dinyatakan memenuhi persyaratan, dilakukan proses fabrikasi dan pemasangan *stepping chute* pada jalur *transport material* dari *Vibrating Screen 546-VS1* menuju *Belt Conveyor 6*. Tahap selanjutnya adalah uji coba dan pengamatan untuk mengevaluasi kinerja *stepping chute* selama proses operasi [3], [7].

Data kapasitas operasional BC 6 sebesar 270 ton/jam dijadikan acuan utama dalam menentukan kapasitas aliran minimum *stepping chute*. Seluruh perhitungan teknis mengacu pada teori perancangan *chute*, karakteristik material curah, perancangan elemen mesin, dan standar mekanis yang relevan [1]–[3], [9], [14].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Material Clinker sebagai Dasar Perancangan

Pengujian karakteristik clinker dari vibrating screen 546-VS1 menjadi dasar dalam menentukan dimensi, sudut kemiringan, dan material konstruksi stepping chute. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik material clinker dari vibrating screen 546-VS1

Parameter	Nilai	Satuan
Bulk density	1.200	kg/m ³
Diameter partikel dominan	< 0,3 (49,18%)	mm
Diameter partikel maksimum	4,75	mm
Nilai blaine	997	cm ² /gr
Moisture content	0,29	%
Angle of repose	40	°
C ₃ S (alite)	56,64	%
Alite sum (XRD)	66,85	%

(Sumber: Laboratorium PQC dan Laboratorium Fisika PT. Solusi Bangun Indonesia Nar)

Tingginya kandungan alite (66,85%) mengindikasikan clinker memiliki sifat keras dan abrasif sehingga berpotensi menyebabkan keausan pada permukaan chute apabila tidak dilindungi dengan material yang tepat [8]. Nilai angle of repose sebesar 40° menjadi acuan utama dalam penentuan sudut kemiringan chute, sedangkan moisture content 0,29% menunjukkan kecenderungan material untuk menggumpal pada kondisi kelembaban tinggi [1].

3.2 Analisis Dimensi Stepping Chute

Lebar chute ditetapkan sebesar 550 mm sesuai lebar outlet vibrating screen untuk memastikan seluruh material dapat masuk ke chute tanpa tumpahan (spillage). Tinggi chute ditetapkan sebesar 6.500 mm berdasarkan jarak vertikal antara outlet vibrating screen dan BC 6 hasil pengukuran lapangan [3]. Luas penampang aliran dihitung menggunakan persamaan (1):

$$A = B \times H(1)$$

dengan lebar chute, $B = 0,55$ m dan tinggi aliran material, $H = 0,30$ m, sehingga diperoleh luas penampang, $A = 0,165$ m². Kapasitas aliran kemudian dihitung dengan persamaan (2):

$$Q = \rho \times A \times V(2)$$

dengan bulk density clinker, $\rho = 1.200$ kg/m³, luas area, $A = 0,165$ m², dan kecepatan aliran, $V = 1,5$ m/s, menghasilkan $Q = 297$ kg/s atau setara 1.069,2 ton/jam. Nilai ini jauh melebihi kebutuhan operasional BC 6 sebesar 270 ton/jam, sehingga desain memiliki faktor keamanan kapasitas sebesar 3,96 [3].

Analisis kecepatan jatuh material juga dilakukan untuk membandingkan chute vertikal dengan stepping chute. Pada chute vertikal dengan tinggi jatuh 6,5 m, kecepatan material saat mencapai dasar dihitung dengan persamaan (3):

$$v = \sqrt{2 \times g \times h}(3)$$

menghasilkan $v = 11,29$ m/s. Sementara itu, pada stepping chute dengan tinggi tiap step 0,3 m, kecepatan material pada setiap step hanya sekitar 2,43 m/s, atau turun sebesar 78,48% dibandingkan chute vertikal. Penurunan kecepatan ini mengurangi energi tumbukan material terhadap permukaan chute serta menurunkan tingkat keausan dan risiko kerusakan struktur [4].

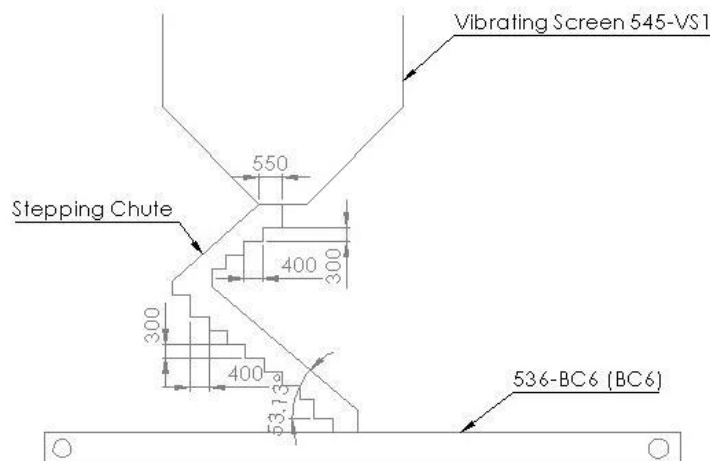
3.3 Analisis Sudut Kemiringan dan Konfigurasi Step

Agar material dapat mengalir tanpa penumpukan, sudut kemiringan chute harus melebihi angle of repose material [1]. Dengan angle of repose clinker sebesar 40° dan faktor keamanan tambahan 10° , sudut minimum yang direkomendasikan adalah 50° .

Berdasarkan geometri step di lapangan dengan tinggi step $h = 300$ mm dan panjang horizontal $L = 400$ mm, sudut kemiringan tiap step terhadap bidang horizontal dihitung menggunakan persamaan (4):

$$\tan \theta = h / L = 300 / 400 = 0,75(4)$$

sehingga diperoleh $\theta = \arctan(0,75) = 36,87^\circ$ terhadap garis horizontal, atau $53,13^\circ$ terhadap garis vertikal. Meskipun nilai $36,87^\circ$ berada di bawah angle of repose, konfigurasi stepping memberikan impuls gravitasi tambahan pada setiap step sehingga efektivitas aliran material tetap terjaga [2]. Skematik penempatan stepping chute pada jalur transport material ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skematik penempatan stepping chute antara vibrating screen 546-VS1 dan BC 6

Panjang satu step (L_s) dihitung menggunakan Teorema Pythagoras pada persamaan (5):

$$L_s = \sqrt{(h^2 + L^2)} = \sqrt{(300^2 + 400^2)}(5)$$

dengan hasil $L_s = 500$ mm. Jumlah step (n) ditentukan dari tinggi total chute (H) dibagi panjang satu step, sebagaimana persamaan (6):

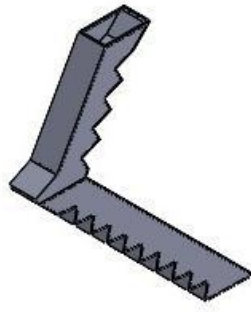
$$n = H / L_s = 6.500 / 500(6)$$

dengan hasil $n = 13$ step. Konfigurasi 13 step ini berfungsi mengontrol kecepatan jatuh material sehingga material tidak mengalami percepatan berlebihan yang dapat menyebabkan tumpahan pada BC 6 [3].

3.4 Analisis Pemilihan Material Konstruksi

Pemilihan material konstruksi mempertimbangkan empat aspek utama: (1) kekuatan mekanik terhadap beban material dan beban dinamis, (2) ketahanan terhadap keausan akibat gesekan clinker yang abrasif, (3) kemudahan fabrikasi dan pengelasan, serta (4) ketersediaan dan biaya material di pasaran [9]. Berdasarkan pertimbangan tersebut, material konstruksi yang dipilih adalah Dual Plate Hardfacing Overlay Plate 6+4 dengan tebal total 10 mm, terdiri atas base plate baja karbon (Q235/SS400) setebal 4 mm yang berfungsi sebagai struktur penopang, serta wear plate dengan kekerasan 700–800 HBN setebal 6 mm yang berfungsi melindungi permukaan dari keausan abrasif [7].

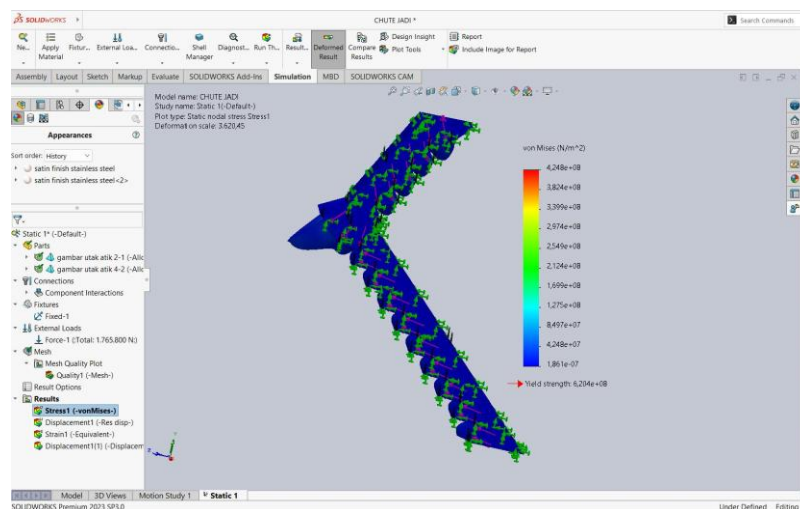
Desain stepping chute hasil perhitungan teknis diwujudkan dalam model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak SolidWorks, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Model ini menjadi dasar dalam proses fabrikasi serta input geometri untuk simulasi kekuatan struktur.



Gambar 2. Hasil rancangan stepping chute pada SolidWorks

3.5 Analisis Simulasi Kekuatan Struktur

Untuk memastikan material dan konstruksi stepping chute mampu menahan beban kerja yang direncanakan, dilakukan analisis kekuatan menggunakan SolidWorks Simulation. Simulasi statik dilakukan dengan memberikan pembebanan sebesar 1.765.800 N, yang merupakan beban ekuivalen dari kapasitas material sebesar 180 ton, dengan kondisi tumpuan (fixture) ditempatkan pada titik dudukan struktur sesuai kondisi pemasangan aktual di lapangan [4].



Gambar 3. Distribusi tegangan von Mises hasil simulasi SolidWorks Simulation

Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh nilai tegangan von Mises maksimum sebesar $4,248 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ atau 424,8 MPa. Nilai tegangan tersebut masih berada di bawah tegangan luluh (yield strength) material sebesar 620,4 MPa, sehingga material dan konstruksi stepping chute mampu menahan beban yang bekerja tanpa mengalami deformasi permanen. Distribusi tegangan menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada area sambungan dan tumpuan struktur, sedangkan pada bagian lainnya tegangan yang terjadi relatif lebih rendah. Faktor keamanan struktur dihitung menggunakan persamaan (10):

$$SF = \sigma_y / \sigma_{maks}(10)$$

dengan $\sigma_y = 620,4 \text{ MPa}$ (tegangan luluh) dan $\sigma_{maks} = 424,8 \text{ MPa}$ (tegangan von Mises maksimum hasil simulasi), sehingga diperoleh $SF = 1,46$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa desain stepping chute berada dalam kondisi aman dan memenuhi persyaratan kekuatan untuk kondisi operasi yang direncanakan, sehingga material Dual Plate Hardfacing Overlay Plate 6+4 tebal 10 mm dinilai sesuai untuk diaplikasikan pada konstruksi stepping chute [4].

3.6 Analisis Sistem Sambungan

Sistem sambungan pada stepping chute menggunakan sambungan las sudut (fillet weld) dengan elektroda E7018 sebagai sambungan permanen pada struktur utama, mengingat sambungan las memberikan kekuatan struktural tinggi dan mampu menahan beban dinamis selama proses aliran material [10]. Pengelasan dilakukan pada bagian backing plate dari material Dual Plate dengan ketebalan baja lunak 4 mm. Tebal efektif las dihitung menggunakan persamaan (7):

$$te = 0,707 \times w(7)$$

dengan $w = 4$ mm, diperoleh $te = 2,83$ mm. Dengan panjang sambungan sepanjang lebar chute ($L = 550$ mm), luas penampang efektif las dihitung dengan persamaan (8):

$$A = te \times L(8)$$

dengan hasil $A = 1.556,5$ mm². Kekuatan sambungan las dihitung dengan persamaan (9):

$$P = \tau \times A(9)$$

dengan menggunakan tegangan geser ijin elektroda E7018 $\tau = 100$ MPa, sehingga $P = 155.650$ N atau 155,65 kN [9][15]. Beban total yang bekerja pada konstruksi diperoleh dari akumulasi berat material clinker dalam chute (berdasarkan kapasitas 108 ton/jam, kecepatan aliran 1,5 m/s, dan panjang chute 11 m) ditambah estimasi berat konstruksi, yaitu $Wt = 5,16$ kN. Faktor keamanan sambungan las dihitung dengan persamaan (11):

$$SF = P / Wt(11)$$

sehingga diperoleh $SF = 155,65 / 5,16 = 30,17$. Nilai ini jauh lebih besar dibandingkan faktor keamanan minimum konstruksi statis (2–4) [9], sehingga sambungan las yang dirancang dinyatakan aman untuk menahan beban operasional stepping chute.

3.7 Rekapitulasi Hasil Perancangan dan Kelayakan Operasional

Hasil analisis perancangan stepping chute secara keseluruhan dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi hasil perancangan stepping chute

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Lebar chute	550	mm
2	Tinggi chute (total)	6.500	mm
3	Luas penampang aliran	0,165	m ²
4	Sudut kemiringan (dari vertikal)	53,13	°
5	Jumlah step	13	buah
6	Kapasitas aliran (tercapai)	1.069,2	ton/jam
7	Kebutuhan kapasitas operasional	270	ton/jam
8	Material konstruksi	Dual Plate 6+4	mm
9	Tegangan von Mises maksimum	424,8	MPa
10	Tegangan luluh material	620,4	MPa
11	Faktor keamanan struktur (simulasi)	1,46	-
12	Sistem sambungan utama	Las E7018	-
13	Faktor keamanan sambungan las	30,17	-

Berdasarkan rekapitulasi pada Tabel 2, seluruh parameter perancangan memenuhi persyaratan operasional. Kapasitas aliran yang dapat dicapai (1.069,2 ton/jam) memberikan faktor keamanan kapasitas sebesar 3,96 terhadap kebutuhan operasional (270 ton/jam). Sudut kemiringan dan konfigurasi 13 step memastikan aliran material berlangsung secara kontinu dan stabil dengan energi tumbukan yang terkendali. Material Dual Plate Hardfacing Overlay Plate 6+4 memberikan ketahanan terhadap sifat abrasif clinker, sementara hasil simulasi kekuatan menunjukkan faktor keamanan struktur 1,46 dan faktor keamanan sambungan las 30,17, keduanya berada pada rentang aman untuk konstruksi statis. Secara keseluruhan, hasil

analisis ini menunjukkan bahwa rancangan stepping chute layak secara operasional untuk diterapkan sebagai pengganti sistem air slide pada jalur transport material clinker menuju BC 6.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh spesifikasi teknis *stepping chute* yang sesuai untuk menggantikan *air slide* 536-AS1 pada sistem transport material *clinker* di area *Finish Mill* NAR 2. Hasil perancangan menunjukkan bahwa *stepping chute* memiliki lebar 550 mm yang disesuaikan dengan dimensi *outlet vibrating screen*, tinggi total 6.500 mm sesuai dengan kondisi *layout* pemasangan, serta luas penampang aliran sebesar 0,165 m². Dimensi tersebut mampu mengakomodasi kapasitas aliran teoritis sebesar 1.069,2 ton/jam, sehingga telah melampaui kebutuhan kapasitas operasional *Belt Conveyor* (BC) 6 sebesar 270 ton/jam. Berdasarkan analisis geometri, sudut kemiringan *stepping chute* sebesar 53,13° terhadap garis vertikal (36,87° terhadap garis horizontal) dengan konfigurasi 13 *step* berukuran 300 mm × 400 mm dan panjang *hipotenusa* 500 mm dinilai mampu mendukung aliran material secara gravitasi sesuai karakteristik *clinker*. Dari aspek pemilihan material, penggunaan baja struktural yang dipadukan dengan lapisan *wear-resistant liner* dinilai mampu meningkatkan ketahanan terhadap keausan akibat sifat *clinker* yang abrasif. Selain itu, sistem sambungan yang menggunakan kombinasi sambungan las permanen pada struktur utama dan sambungan baut pada komponen yang memerlukan pembongkaran telah memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan teori perancangan mesin dan standar yang digunakan. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa rancangan *stepping chute* layak diterapkan sebagai pengganti *air slide* karena mampu memenuhi kebutuhan kapasitas, mendukung kelancaran aliran material, serta memiliki kekuatan struktur yang memadai untuk kondisi operasional di area *Finish Mill* NAR 2.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta serta PT Solusi Bangun Indonesia Tbk, khususnya area *Production Finish Mill* Narogong 2, atas dukungan data, fasilitas, dan bimbingan teknis selama penelitian ini berlangsung.

REFERENSI

- [1] A. W. Jenike, *Storage and Flow of Solids*, Bulletin No. 123. Salt Lake City, UT: Utah Engineering Experiment Station, University of Utah, 1964.
- [2] A. W. Roberts, "Chute performance and design for rapid flow conditions," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 77, no. A7, pp. 597–608, 1999.
- [3] CEMA, *Belt Conveyors for Bulk Materials*, 7th ed. Naples, FL: Conveyor Equipment Manufacturers Association, 2014.
- [4] P. W. Cleary and M. L. Sawley, "DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge," *Appl. Math. Model.*, vol. 26, no. 2, pp. 89–111, 2002.
- [5] G. Shen, Z. Xu, F. Dong, et al., "Effect of particle size distribution on screening efficiency of vibrating screen," *Sci. Rep.*, vol. 15, 2025.
- [6] Z. Zhang et al., "Variable elliptical vibrating screen: Particles kinematics and industrial application," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 5, pp. 761–770, 2021.
- [7] N. Rupa and A. Zohari, "Modifikasi rancang bangun chute untuk mengurangi batu bara tumpah," *J. Tek. Mesin*, 2023.
- [8] A. I. Putra, "Metode penanggulangan residu clinker pada main deck di MV. KT05," Tugas Akhir, Politeknik Negeri Jakarta, 2021.
- [9] R. S. Khurmi and J. K. Gupta, *A Textbook of Machine Design*. New Delhi, India: Eurasia Publishing House, 2005.
- [10] H. Nurdin, Ambiyar, and Waskito, *Perencanaan Elemen Mesin (Elemen Sambungan dan Penumpu)*. Padang, Indonesia: Universitas Negeri Padang, 2018.
- [11] Universitas Lampung, *Mesin Pemindahan Bahan*. Lampung, Indonesia: Universitas Lampung, 2010.

- [12] K. Semara, T. Mesin, and G. Tunggal, “Perancangan desain chute pada transfer conveyor ABC,” 2024.
- [13] B. A. Wills and J. Finch, *Wills’ Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*, 8th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2016.
- [14] ISO 898-1, *Mechanical Properties of Fasteners Made of Carbon Steel and Alloy Steel – Part 1: Bolts, Screws and Studs with Specified Property Classes*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2013.
- [15] J. W. Marinelli and J. W. Carson, “Solve solids flow problems in bins, hoppers, and feeders,” *Chem. Eng. Prog.*, vol. 88, no. 5, pp. 22–28, 1992.