



Perancangan Sistem *Water Spray* untuk Mengurangi Emisi Partikulat pada *Kiln Stack* PT. Solusi Bangun Andalas

Muhammad Farhansyah^{1*}, Yuli Mafendro Dedet Eka S.², Ilham Syahputra³,
dan Nailus Sa'adah⁴

¹⁾ Program Studi Konsentrasi Rekayasa Industri, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok, 16424

²⁾ Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok, 16424

³⁾ PT Solusi Bangun Andalas, Jl. Meulaboh - Banda Aceh No.KM. 16.5, Mon Ikeun, Kec. Lhoknga, Kabupaten Aceh Besar, Aceh 23363

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

Abstrak

Emisi partikulat menjadi perhatian utama industri semen karena dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan. PT. Solusi Bangun Andalas telah menerapkan *bag filter*, namun data CEMS pada *kiln stack* 421-3K01 menunjukkan fluktuasi konsentrasi partikulat yang mendekati batas KPI dan baku mutu emisi. Penelitian ini bertujuan merancang sistem *water spray* sebagai pengendalian tambahan untuk menurunkan emisi partikulat pada *kiln stack* tersebut. Metode penelitian meliputi observasi lapangan, studi literatur, diskusi dengan pembimbing, analisis akar penyebab menggunakan *Fault Tree Analysis* (FTA), serta perancangan sistem berdasarkan perhitungan mekanika fluida. Hasil perancangan menghasilkan sistem dengan 4 *nozzle tipe full cone* berdebit total 4,8 L/menit, pipa galvanis diameter 2 inci, tangki air 8.000 liter, pompa *vertical multistage inline* Kirloskar KCIL-22 (5,5 HP, 3 phase), dan total *head* sistem 61,21 m. Sistem menangkap partikel debu menggunakan *droplet* air berbentuk kabut halus sehingga massa partikulat meningkat dan jatuh ke dasar *stack*, serta terintegrasi dengan CEMS melalui PLC agar beroperasi otomatis berdasarkan *set point* konsentrasi partikulat. Rancangan ini dinilai layak diterapkan sebagai pengendalian tambahan emisi partikulat pada *kiln stack* 421-3K01 dan diharapkan meningkatkan kepatuhan PT. Solusi Bangun Andalas terhadap baku mutu emisi yang berlaku.

Kata-kata kunci: emisi partikulat, *water spray*, *kiln stack*, CEMS, industri semen

Abstract

Particulate emissions are a major concern for the cement industry due to their impact on the environment and health. PT. Solusi Bangun Andalas has implemented a *bag filter*, but CEMS data on *kiln stack* 421-3K01 show particulate fluctuations approaching the KPI and emission standard limits. This study aims to design a *water spray* system as an additional control to reduce particulate emissions in the *kiln stack*. Methods include field observation, literature study, discussion with supervisors, root cause analysis using *Fault Tree Analysis* (FTA), and system design based on fluid mechanics calculations. The design results in a system with 4 *full-cone nozzles* at a total discharge of 4.8 L/min, a 2-inch galvanized pipe, an 8,000-liter water tank, a Kirloskar KCIL-22 *vertical multistage inline pump* (5.5 HP, 3 phase), and a total system head of 61.21 m. The system captures dust particles using fine water mist droplets, increasing particulate mass so it falls to the *stack* bottom, and is integrated with CEMS through a PLC for automatic operation based on the particulate *set point*. This design is considered feasible as an additional control for particulate emissions on *kiln stack* 421-3K01 and is expected to improve compliance with applicable emission standards.

Keywords: particulate emission, *water spray*, *kiln stack*, CEMS, cement industry

1. PENDAHULUAN

Industri semen memiliki peran krusial dalam mendukung pembangunan infrastruktur Indonesia. Namun, aktivitas produksi semen juga menimbulkan berbagai dampak lingkungan, salah satunya adalah emisi partikulat yang dibuang ke udara melalui cerobong (*stack*). Emisi partikulat yang tidak terkelola dengan baik dapat menyebabkan pencemaran udara, mengancam kesehatan masyarakat, serta membuat perusahaan tidak memenuhi standar emisi yang ditetapkan oleh pemerintah melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan [1].

PT. Solusi Bangun Andalas (PT. SBA) merupakan perusahaan semen yang berlokasi di Lhoknga, Aceh Besar dan merupakan bagian dari Semen Indonesia Group. Dalam proses produksinya, pembakaran bahan baku di dalam *rotary kiln* menghasilkan gas buang yang mengandung partikulat. Untuk mengendalikan emisi tersebut, PT. SBA telah memasang sistem bag filter sebelum gas buang dilepaskan melalui *kiln stack* 421-3K01. Pemantauan emisi dilakukan secara kontinyu menggunakan *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS) yang mencatat parameter partikulat, suhu, laju alir gas, serta parameter lain seperti CO, NO_x, dan SO₂ sesuai peraturan yang berlaku [2][3].

Berdasarkan data CEMS *kiln stack* 421-3K01 pada bulan April dan Mei 2025, terdapat fluktuasi konsentrasi *Particulate Matter* (PM) yang pada beberapa waktu mendekati batas baku mutu emisi berdasarkan Permen LHK Nomor 19 Tahun 2017 dan melampaui batas *Key Performance Indicator* (KPI) operasional perusahaan. Kondisi ini menunjukkan bahwa efektivitas pengendalian emisi partikulat masih perlu ditingkatkan. Analisis menggunakan *Fault Tree Analysis* (FTA) mengidentifikasi bahwa penyebab utama peningkatan emisi adalah penurunan efisiensi *bag filter* akibat kebocoran, sistem *pulse jet* yang tidak optimal, dan pelaksanaan *maintenance* yang belum efektif [4].

Salah satu solusi yang dapat diterapkan sebagai pengendalian tambahan adalah sistem *water spray* di dalam *kiln stack*. Sistem ini bekerja dengan menyemprotkan air dalam bentuk *droplet* kabut halus ke dalam aliran gas buang sehingga partikel debu tertangkap oleh *droplet*, massanya bertambah, dan mengendap ke dasar *stack* sebelum terlepas ke atmosfer. Penelitian ini bertujuan merancang sistem *water spray* yang optimal untuk mengurangi emisi partikulat pada *kiln stack* 421-3K01 PT. Solusi Bangun Andalas.

Beberapa penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitas sistem *water spray* dalam menurunkan konsentrasi partikulat. Fadhlurrahman [5] menerapkan sistem semprotan kabut air (*water mist spray*) di area produksi DMLZ PT Freeport Indonesia dan berhasil menurunkan konsentrasi debu dari 7,97 mg/m³ menjadi 0,77 mg/m³, dengan efektivitas penurunan mencapai 90%. Penelitian tersebut membuktikan bahwa *droplet* air berukuran halus mampu menangkap partikel debu secara signifikan. Namun, penerapan sistem tersebut dilakukan pada area produksi tambang terbuka dengan sumber debu yang bersifat *fugitive*, bukan pada cerobong (*stack*) dengan aliran gas panas bertekanan dan berkecepatan tinggi seperti pada *kiln* semen, sehingga parameter desainnya tidak dapat langsung diaplikasikan pada kondisi *kiln stack*.

Lee et al. [6] juga menunjukkan efektivitas penerapan teknologi *water mist generator* dan *sprinkler* konvensional dalam menekan emisi debu dari tumpukan bijih besi (*iron ore pile*) di kawasan penyimpanan bahan baku pabrik baja. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *water mist generator* mampu mencapai efisiensi penyisihan debu rata-rata sebesar 80,9% untuk TSP, 77,9% untuk PM₁₀, dan 76,9% untuk PM_{2,5}, sedangkan *sprinkler* konvensional menghasilkan efisiensi sebesar 76,4%, 72,9%, dan 72,7% untuk ketiga parameter yang sama. Efisiensi optimum pada sistem *mist* diperoleh pada kondisi kecepatan angin rendah, sudut semprot rendah, dan mode penyemprotan intermiten, sementara *sprinkler* konvensional justru optimal pada kecepatan angin rendah namun dengan sudut semprot tinggi dan mode intermiten. Penelitian ini menegaskan bahwa ukuran *droplet* yang halus (10–50 µm) pada sistem *mist* memungkinkan *droplet* tetap melayang lebih lama di udara, sehingga interaksi dengan partikel debu melalui mekanisme tumbukan inersia (*inertial impaction*), interception langsung, dan difusi menjadi lebih optimal, yang pada akhirnya meningkatkan massa partikel debu hingga mengendap akibat gravitasi. Selain itu, penambahan surfaktan pada air penyemprot dengan rasio tertentu terbukti mampu meningkatkan efisiensi penyisihan debu hingga di atas 89%, yang menegaskan pentingnya pemilihan agen pembasah yang tepat dalam meningkatkan kinerja sistem penyemprotan. Akan tetapi, penelitian tersebut dilakukan pada area penyimpanan bahan baku yang bersifat terbuka dengan sumber debu *fugitive* dari tumpukan material akibat erosi angin, bukan pada saluran gas buang (*stack*) tertutup dengan aliran gas panas bertekanan dan berkecepatan tinggi seperti pada *kiln* semen, sehingga parameter operasional yang diperoleh tidak dapat langsung diterapkan pada kondisi *kiln stack*.

Berdasarkan kedua penelitian tersebut, terlihat bahwa penerapan sistem *water spray* untuk pengendalian partikulat pada *kiln stack* industri semen yang terintegrasi secara otomatis dengan sistem CEMS melalui PLC masih belum banyak dikaji. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada aplikasi *water spray* di area tambang terbuka atau bawah tanah, sehingga belum mempertimbangkan karakteristik aliran gas panas bertekanan tinggi pada *stack* serta kebutuhan operasi otomatis berbasis set point konsentrasi partikulat secara real-time. Hal inilah yang menjadi celah penelitian (*research gap*) sekaligus kebaruan yang mendasari

penelitian ini, yaitu perancangan sistem *water spray* yang terintegrasi dengan CEMS melalui PLC untuk pengendalian emisi partikulat pada kiln stack industri semen.

Regulasi Emisi

PT. Solusi Bangun Andalas merupakan industri semen yang mulai beroperasi pada rentang tahun 1990 hingga 2013, sehingga baku mutu emisi yang berlaku merujuk pada golongan B sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 19 Tahun 2017 tentang Baku Mutu Emisi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Semen [7]. Ringkasan nilai baku mutu emisi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Baku mutu emisi industri semen berdasarkan PERMEN LHK No. 19 Tahun 2017 [7]

Parameter	Satuan	Golongan A	Golongan B	Golongan C
Partikulat (PM)	mg/Nm ³	75	70	65
Sulfur Dioksida (SO ₂)	mg/Nm ³	650	650	650
Nitrogen Oksida (NO _x)	mg/Nm ³	800	800	800
Karbon Monoksida (CO)	mg/Nm ³	3000	3000	3000

Selain baku mutu emisi, kewajiban pemantauan dan pelaporan emisi industri secara terus-menerus diatur dalam PERMEN LHK Nomor 13 Tahun 2021 tentang Sistem Informasi Pemantauan Emisi Industri Secara Terus-Menerus (SISPEK) yang mewajibkan integrasi data CEMS dengan sistem pemerintah secara real time [[8]. Aspek pengawasan dan sanksi administratif terhadap pelanggaran baku mutu emisi diatur dalam PERMEN LH/BPLH Nomor 6 Tahun 2026 [9], sedangkan evaluasi kinerja pengelolaan lingkungan perusahaan dilakukan melalui Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan (PROPER) sebagaimana diatur dalam PERMEN LH/BPLH Nomor 7 Tahun 2025 [2].

2. METODE PENELITIAN

Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode perancangan (*design*) yang dilaksanakan secara sistematis melalui beberapa tahapan. Tahapan diawali dengan identifikasi masalah untuk menelusuri akar penyebab fluktuasi emisi partikulat pada *kiln stack* 421-3K01. Selanjutnya dilakukan studi lapangan sekaligus observasi langsung terhadap kondisi aktual sistem dan equipment, meliputi ukuran cerobong, kondisi aliran gas buang, lokasi yang sesuai untuk pemasangan sistem *water spray*, serta komponen-komponen terkait seperti pipa, pompa, dan *nozzle*.

Tahap berikutnya adalah pengumpulan data, meliputi diameter cerobong, temperatur dan laju aliran gas buang, debit dan tekanan air, spesifikasi *nozzle*, serta regulasi-regulasi yang berlaku. Pengumpulan data dilengkapi dengan studi literatur mengenai teori sistem *water spray*, mekanika fluida, dan regulasi lingkungan, serta diskusi dengan pembimbing baik dari pihak perusahaan maupun dosen pembimbing terkait kesesuaian desain, keterbatasan area pemasangan, efisiensi penggunaan air, serta penentuan komponen-komponen yang akan digunakan.

Berdasarkan data, hasil studi literatur, dan hasil diskusi tersebut, dilakukan perancangan sistem yang meliputi penentuan jumlah dan tipe *nozzle*, ukuran pipa, spesifikasi pompa, kebutuhan debit, dan lokasi pemasangannya. Rancangan yang dihasilkan selanjutnya dievaluasi terhadap kesesuaian pola semprotan, efektivitas distribusi kabut air, dan efisiensi penggunaan air, sebelum disusun menjadi laporan hasil perancangan, perhitungan, kesimpulan, dan saran.

Variabel Penelitian

Penelitian ini melibatkan beberapa variabel yang menjadi dasar perancangan dan evaluasi sistem. Variabel bebas (*independent variable*) meliputi jumlah dan tipe *nozzle*, tekanan kerja *nozzle*, diameter dan panjang pipa distribusi, serta debit air yang disuplai ke sistem, yang ditentukan dalam proses perancangan. Variabel terikat (*dependent variable*) meliputi *head* total sistem, daya pompa, *Net Positive Suction Head Available* (NPSHa), serta konsentrasi partikulat pada *kiln stack*, yang merupakan hasil perhitungan dan evaluasi berdasarkan variabel bebas yang telah ditetapkan. Variabel kontrol dalam penelitian ini meliputi karakteristik gas buang (suhu dan laju aliran), dimensi *kiln stack* 421-3K01, kondisi operasional *kiln*, serta properti fisik air (massa jenis dan viskositas) pada temperatur operasi 30°C, yang dijaga tetap konstan selama proses perhitungan dan evaluasi rancangan.

Peralatan dan Perangkat Lunak Penelitian

Pengambilan data lapangan dilakukan menggunakan instrumen *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS) yang terpasang pada *kiln stack* 421-3K01, terdiri atas *Dust Hunter T100* untuk mengukur konsentrasi partikulat berbasis prinsip *transmittance*, MCS200HW sebagai *analyzer* gas multikomponen berbasis inframerah, dan *Flowsick100* sebagai pengukur kecepatan aliran gas berbasis *ultrasonic transit time*. Pengukuran dimensi dan elevasi di lapangan, seperti jarak antara pompa dan *nozzle* serta panjang jalur perpipaan, dilakukan menggunakan meteran. Perhitungan mekanika fluida, meliputi debit, kecepatan aliran, bilangan Reynolds, *head loss*, NPSHa, dan daya pompa, dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel, sedangkan desain jalur perpipaan sistem *water spray* digambar menggunakan perangkat lunak Solidwork.

Analisis Akar Penyebab

Analisis akar penyebab tingginya emisi partikulat dilakukan menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA), yaitu pendekatan *top-down* untuk menelusuri kemungkinan pemicu kesalahan pada sistem hingga ke akar permasalahan menggunakan gerbang logika *OR* dan *AND* [10]. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan penurunan kinerja bag filter sebagai sistem pengendalian emisi utama.

Hasil FTA menunjukkan bahwa akar penyebab tingginya emisi partikulat bersifat mekanis dan manajerial pada *bag filter*, yaitu kebocoran media *filter*, sistem *pulse jet* yang tidak optimal, dan pemeliharaan yang belum efektif, sehingga perbaikannya memerlukan waktu dan tidak dapat menjamin konsistensi kinerja *bag filter* dalam jangka pendek. Berdasarkan temuan tersebut, sistem *water spray* dirancang sebagai lapisan pengendalian tambahan yang bekerja independen terhadap kondisi *bag filter*, sehingga tetap dapat menurunkan konsentrasi partikulat meskipun efisiensi *bag filter* sedang menurun. Hasil FTA ini menjadi dasar penentuan lokasi pemasangan *nozzle*, yaitu pada bagian *kiln stack* setelah *bag filter*, agar sistem *water spray* dapat menangkap sisa partikulat yang lolos dari *bag filter* sebelum dilepaskan ke atmosfer. Pemilihan parameter perancangan, seperti tipe *nozzle full cone*, diameter *orifice* 5 mm, dan tekanan kerja 3 bar, didasarkan pada studi literatur mengenai efektivitas ukuran droplet dalam menangkap partikel debu [10], [11], yaitu ukuran *droplet* yang tidak terlalu besar agar tidak cepat jatuh sebelum menangkap partikel, namun juga tidak terlalu kecil agar tidak menguap sebelum sempat menangkap partikel, serta disesuaikan dengan dimensi penampang *kiln stack* agar seluruh aliran gas buang dapat tercakup oleh pola semprotan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kiln Stack dan Continuous Emission Monitoring System

Rotary Kiln merupakan tungku yang dibuat seperti ruangan, tempat membakar material yang membutuhkan suhu tinggi dan sebagai tempat proses pembakaran material sebelum menjadi klinker [11]. Cerobong atau *stack* adalah struktur vertikal yang berfungsi sebagai saluran pembuangan gas hasil pembakaran serta debu sisa proses produksi menuju atmosfer. Pada *kiln stack* 421-3K01, gas buang dipantau secara kontinu menggunakan *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS) yang terdiri atas beberapa sensor utama, yaitu *Dust Hunter T100* untuk mengukur konsentrasi partikulat berbasis prinsip *transmittance*, MCS200HW sebagai *analyzer* gas multikomponen berbasis inframerah, dan *Flowsick100* sebagai pengukur kecepatan aliran gas berbasis *ultrasonic transit time*. Data dari seluruh sensor tersebut diolah oleh *Monitoring Control Unit* (MCU) dan ditampilkan secara *real-time* dalam satuan mg/Nm^3 dan *opacity*.

Sistem *Water Spray* dan Mekanisme Penangkapan Partikulat

Sistem *water spray* merupakan metode pengendalian debu yang memanfaatkan penyemprotan air dalam bentuk kabut halus untuk menangkap partikel debu yang terbawa aliran gas buang [5]. *Nozzle* berfungsi mengubah energi tekanan air menjadi energi kinetik melalui *orifice* sehingga terbentuk *droplet* berukuran kecil. Ketika *droplet* bertumbukan dengan partikulat, massa *droplet* bertambah dan mengalami penggabungan dengan *droplet* lain hingga membentuk tetesan yang lebih besar, sehingga gaya gravitasi menjadi lebih dominan dibandingkan gaya dorong aliran gas dan tetesan jatuh ke dasar *stack*. Tipe *nozzle* yang digunakan adalah *full cone*, yang menghasilkan pola semprotan berbentuk lingkaran dengan sudut semprotan sekitar 90° . Ukuran *droplet* perlu dijaga agar tidak terlalu besar (cepat jatuh sebelum menangkap partikel) maupun terlalu kecil (menguap sebelum sempat menangkap partikel).

Identifikasi Fluktuasi Emisi Partikulat

Berdasarkan data CEMS pada bulan April dan Mei 2025, terlihat pola emisi partikulat yang fluktuatif. Pada bulan April, konsentrasi partikulat beberapa kali mengalami lonjakan tajam mendekati baku mutu lingkungan sebesar 70 mg/Nm³ dan secara konsisten berada di atas KPI internal perusahaan sebesar 40 mg/Nm³. Pada bulan Mei, terjadi lonjakan emisi yang tinggi di awal bulan, kemudian menurun drastis dan stabil di bawah 10 mg/Nm³ setelah unit produksi mengalami *shutdown*. Pola tersebut menunjukkan bahwa kinerja sistem pengendalian emisi belum optimal pada sebagian besar waktu operasional.

Penyebab Tingginya Emisi Partikulat

Hasil analisis FTA menunjukkan bahwa penurunan efisiensi penangkapan debu pada *bag filter* dipengaruhi oleh empat faktor utama, yaitu kebocoran pada *bag filter*, kurang optimalnya sistem pembersihan *pulse jet*, pelaksanaan pemeliharaan yang tidak efektif, serta aspek manajemen perawatan yang mencakup ketersediaan suku cadang dan kompetensi teknisi. Data pendukung menunjukkan jumlah penggantian *bag* pada bulan April 2025 sebanyak 197 pcs dan meningkat menjadi 366 pcs pada bulan Mei 2025, yang mengindikasikan kejenuhan media *filter* sehingga menurunkan efektivitasnya sebagai pengendali emisi utama.

Persamaan yang Digunakan

Perhitungan sistem dilakukan menggunakan beberapa persamaan dasar mekanika fluida sebagai berikut. Debit per *nozzle* dihitung dari debit total dibagi jumlah *nozzle*, dengan persamaan kontinuitas berikut.

$$Q_n = Q_{\text{total}} / n \quad (1)$$

Kecepatan keluar air pada *orifice nozzle* dihitung menggunakan persamaan kontinuitas berikut, dengan A merupakan luas penampang *orifice*.

$$V = Q_n / A \quad (2)$$

Head akibat tekanan kerja *nozzle* (H_{nozzle}) dihitung dari tekanan kerja pompa P yang dikonversi menjadi satuan *head* menggunakan persamaan berikut, dengan γ adalah berat jenis air.

$$H_{\text{nozzle}} = P / \gamma \quad (3)$$

Bilangan Reynolds digunakan untuk menentukan rezim aliran di dalam pipa, dihitung dengan persamaan berikut, dengan ρ adalah massa jenis air, V kecepatan aliran, D diameter dalam pipa, dan μ viskositas dinamik air.

$$Re = (\rho \times V \times D) / \mu \quad (4)$$

Head loss mayor akibat gesekan sepanjang pipa lurus dihitung menggunakan persamaan berikut, dengan f koefisien gesekan, L panjang pipa, D diameter pipa, dan V kecepatan aliran.

$$h_f = f \times (L/D) \times (V^2 / 2g) \quad (5)$$

Head loss minor akibat aksesoris perpipaan (elbow, valve, tee, dan lain-lain) dihitung dengan persamaan berikut, dengan Σf total koefisien tahanan aksesoris.

$$h_m = \Sigma f \times (V^2 / 2g) \quad (6)$$

Head total sistem merupakan penjumlahan *head* elevasi, *head* tekanan, *head loss* total, *head* kecepatan, dan *head nozzle*, sebagaimana persamaan berikut.

$$H_{\text{total}} = H_{\text{elevasi}} + \Delta h_p + H_{\text{l total}} + H_v + H_{\text{nozzle}} \quad (7)$$

Net Positive Suction Head Available (NPSHa) dihitung untuk memastikan pompa tidak mengalami kavitasi, menggunakan persamaan berikut, dengan P_a tekanan atmosfer, P_v tekanan uap jenuh air, γ berat jenis air, h_s head elevasi isap, dan h_l total head loss pada sisi isap.

$$NPSHa = (P_a - P_v) / \gamma - h_s - h_l \quad (8)$$

Daya pompa dan daya motor dihitung dengan persamaan berikut, dengan ρ massa jenis air, g percepatan gravitasi, Q debit aliran, H head total, dan η efisiensi pompa.

$$P = \rho \times g \times Q \times H \quad (9)$$

$$P_{\text{motor}} = P / \eta \quad (10)$$

Seluruh persamaan tersebut digunakan secara berurutan untuk menentukan spesifikasi *nozzle*, pipa, dan pompa pada sistem *water spray*, dengan hasil perhitungan disajikan secara rinci pada bagian Hasil dan Pembahasan.

Perhitungan Nozzle

Sistem dirancang menggunakan 4 buah *nozzle* dengan tekanan kerja $P_n = 3$ bar. Debit per *nozzle* dihitung menggunakan Persamaan (1) sebagai berikut.

$$Q_n = Q_{\text{total}} / n = 4,8 / 4 = 1,2 \text{ L/menit} = 2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Diameter *orifice nozzle* ditetapkan sebesar $D = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$, sehingga luas penampang *orifice* adalah:

$$A = (\pi/4) \times D^2 = (\pi/4) \times (0,005)^2 = 1,9635 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Kecepatan keluar air dihitung menggunakan Persamaan (2):

$$V = Q_n / A = (2 \times 10^{-5}) / (1,9635 \times 10^{-5}) = 1,02 \text{ m/s}$$

Head nozzle dihitung dari tekanan kerja 3 bar = 300.000 Pa menggunakan Persamaan (3), dengan berat jenis air $\gamma = 995,7 \times 9,81 \text{ N/m}^3$:

$$H_{\text{nozzle}} = 300.000 / (995,7 \times 9,81) = 30,71 \text{ m}$$

Perhitungan Kebutuhan Tangki Air (Toren)

Kebutuhan air per jam dan per hari dihitung berdasarkan debit total 4,8 L/menit sebagai berikut.

$$Q_{\text{jam}} = 4,8 \times 60 = 288 \text{ liter/jam}$$

$$Q_{\text{hari}} = 288 \times 24 = 6912 \text{ liter/hari} \approx 6,912 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Berdasarkan kebutuhan tersebut, dipilih tangki air (toren) custom berkapasitas 8000 liter untuk memastikan kecukupan air meskipun terjadi fluktuasi emisi partikulat selama operasional satu hari penuh.

Perhitungan Bilangan Reynolds dan Koefisien Gesekan

Air dialirkan melalui pipa galvanis berdiameter 2 inci dengan inside diameter $D = 0,05 \text{ m}$, sehingga luas penampang dalam pipa adalah:

$$A = (\pi/4) \times (0,05)^2 = 0,00196 \text{ m}^2$$

Dengan debit total $Q = 4,8 \text{ LPM} = 0,00008 \text{ m}^3/\text{s}$, kecepatan aliran dalam pipa adalah:

$$V = Q / A = 0,00008 / 0,00196 = 0,04 \text{ m/s}$$

Pada temperatur operasi 30°C , diperoleh massa jenis air $\rho = 995,7 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas dinamik $\mu = 0,798 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Bilangan Reynolds dihitung menggunakan Persamaan (4):

$$Re = (995,7 \times 0,04 \times 0,05) / (0,798 \times 10^{-3}) = 2495,5 \approx 2,50 \times 10^3 \text{ (Aliran Transisi)}$$

Nilai kekasaran relatif pipa diperoleh dari kekasaran absolut pipa galvanis 0,15 mm dibagi diameter dalam 50 mm, yaitu sebesar 0,003, sehingga dari diagram Moody diperoleh koefisien gesekan $f = 0,0257$.

Perhitungan Head Total

Head elevasi (Z) merupakan perbedaan ketinggian antara pompa dan *nozzle* pada *kiln stack*, yaitu sebesar $Z = 30,5 \text{ m}$. Karena sistem tidak menggunakan kompresor dan tekanan pada permukaan air di tangki sama dengan tekanan atmosfer, maka head tekanan $\Delta h_p = 0$.

Head kecepatan dihitung sebagai berikut:

$$H_v = V^2 / (2g) = (0,04)^2 / (2 \times 9,81) = 0,00008 \text{ m}$$

Head loss mayor sepanjang pipa ($L = 52,42 \text{ m}$) dihitung menggunakan Persamaan (5):

$$h_f = 0,0257 \times (52,42/0,05) \times (0,04)^2 / (2 \times 9,81) = 0,00220 \text{ m}$$

Head loss minor dihitung dari total koefisien tahanan aksesoris perpipaan (*flowmeter*, *elbow 90°*, *ball valve*, *check valve*, *adaptor*, *cross tee*, dan *tee*) sebesar $\Sigma f = 25,50$, menggunakan Persamaan (6):

$$h_m = 25,50 \times (0,04)^2 / (2 \times 9,81) = 0,00208 \text{ m}$$

Head loss total merupakan penjumlahan *head loss mayor* dan *minor*:

$$H_l \text{ total} = 0,00220 + 0,00208 = 0,00428 \text{ m}$$

Head total sistem dihitung menggunakan Persamaan (7):

$$H_{total} = 30,5 + 0 + 0,00428 + 0,00008 + 30,71 = 61,21 \text{ m}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa *head* total yang harus dipenuhi pompa adalah 61,21 m, sedangkan spesifikasi pompa Kirlskar KCIL-22 5,5 HP 3 Phase IE2 *Vertical Multistage Inline Pump* memiliki rentang *head* 97–150 m, sehingga kebutuhan *head* sistem dapat dipenuhi dengan aman.

Perhitungan NPSHa

Pada temperatur air operasional 30°C, diperoleh tekanan atmosfer $P_a = 101.300 \text{ N/m}^2$, tekanan uap jenuh $P_v = 4.250 \text{ N/m}^2$, berat jenis air $\gamma = 9.764 \text{ N/m}^3$, *head* elevasi isap $h_s = 1,9 \text{ m}$, dan *head loss* total sisi isap $h_l = 0,00011 \text{ m}$. Menggunakan Persamaan (8) diperoleh:

$$NPSHa = (101.300 - 4.250) / 9.764 - 1,9 - 0,00011 = 8,04 \text{ m}$$

Karena nilai NPSHa (8,04 m) lebih besar dibandingkan NPSHr pompa (2 m), maka pompa dapat beroperasi secara optimal tanpa risiko kavitasi.

Perhitungan Daya Pompa dan Daya Motor

Daya pompa dihitung menggunakan Persamaan (9), dengan $\rho = 995,7 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $Q = 0,00008 \text{ m}^3/\text{s}$, dan $H = 31,00 \text{ m}$ (*head* pada sisi discharge):

$$P = 995,7 \times 9,81 \times 0,00008 \times 31,00 = 24,23 \text{ Watt}$$

Dengan asumsi efisiensi pompa $\eta = 78\%$, daya motor dihitung menggunakan Persamaan (10):

$$P_{motor} = 24,23 / 0,78 = 31,06 \text{ Watt}$$

Rangkuman Hasil Perancangan

Seluruh hasil perhitungan di atas dirangkum pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Rangkuman hasil perhitungan sistem water spray

Parameter	Nilai
Jumlah dan tipe nozzle	4 pcs, full cone
Debit total	4,8 L/menit
Diameter pipa distribusi	2 inci (galvanis)
Bilangan Reynolds	$2,50 \times 10^3$
Head total	61,21 m
NPSHa	8,04 m (NPSHr = 2 m)
Daya pompa	24,23 Watt
Kapasitas tangki air	8000 Liter

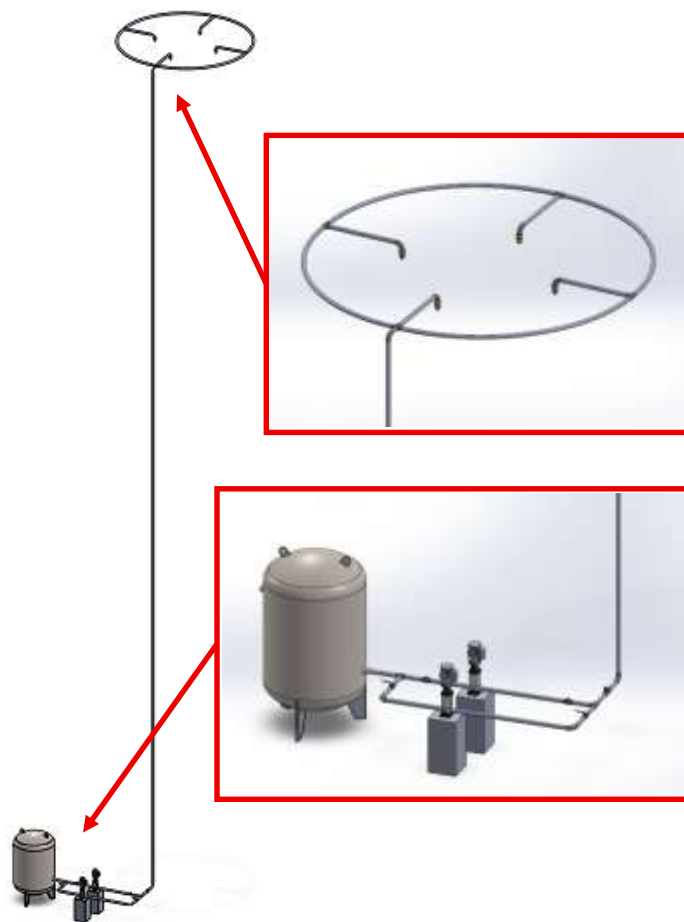
Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu dan Standar Desain

Hasil perancangan sistem water spray pada penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan prinsip-prinsip yang ditemukan pada penelitian terdahulu. Debit dan tekanan kerja *nozzle* yang dipilih (total 4,8 L/menit pada tekanan 3 bar) berada pada rentang yang sebanding dengan sistem *water mist spray* pada penelitian Fadhlurrahman [5], yang juga menggunakan tekanan kerja rendah hingga menengah untuk menghasilkan *droplet* berukuran halus tanpa menimbulkan pemakaian air berlebih. Prinsip penangkapan partikel melalui *droplet* air yang diterapkan pada penelitian ini juga sejalan dengan mekanisme yang dijelaskan oleh Lee et al, yaitu penggabungan (*agglomeration*) *droplet* dengan partikel debu yang meningkatkan massa partikel dan mempercepat pengendapan akibat gravitasi.

Dari sisi standar desain sistem perpipaan dan pompa, nilai NPSHa hasil perhitungan (8,04 m) memiliki margin keamanan yang cukup besar terhadap NPSHr pompa (2 m), sejalan dengan praktik umum desain sistem perpompaan yang mensyaratkan margin NPSHa terhadap NPSHr untuk menghindari risiko kavitasi, sebagaimana juga ditekankan pada penelitian mengenai *head loss* dan kavitasi pompa sentrifugal [4]. Nilai bilangan Reynolds sebesar $2,50 \times 10^3$ menunjukkan bahwa alirannya adalah transisi, yang umum dijumpai pada sistem perpipaan berdebit rendah dan tidak memengaruhi keandalan operasional sistem karena *head loss* yang dihasilkan tetap sangat kecil dibandingkan *head total* sistem. Dengan demikian, hasil perancangan pada penelitian ini secara umum sejalan dengan prinsip-prinsip yang telah dibuktikan efektif pada penelitian terdahulu maupun kaidah umum desain sistem perpompaan, meskipun penerapannya pada konteks *kiln stack* industri semen yang terintegrasi otomatis dengan CEMS merupakan pengembangan yang belum banyak dijumpai pada literatur sebelumnya.

Desain Perpipaan Sistem *Water Spray*

Berikut adalah desain jalur perpipaan dan komponen-komponen yang digunakan pada sistem *water spray*



Gambar 2 Desain Perpipaan Sistem *Water Spray*

Kebutuhan Material dan Rencana Anggaran Biaya

Kebutuhan material utama sistem *water spray* meliputi pompa, tangki air, pipa distribusi, *nozzle*, serta komponen perpipaan pendukung seperti *valve*, *flowmeter*, dan *fitting*, sebagaimana dirangkum pada Tabel 3 berikut beserta estimasi harganya.

Tabel 3. Rencana Anggaran Biaya (RAB) sistem *water spray*

No	Nama Barang	Spesifikasi	Qty	Harga (Rp)
1	Water Pump	Vertical Multistage Inline Pump, 5,5 HP, 3 Phase, head 97–150 m	2 Pcs	Rp 37.491.542
2	Toren	Kapasitas 8000 Liter	1 Pcs	Rp 25.300.000
3	Pipa	Galvanis Iron, 2 inci, tebal 3,6 mm	59 m	Rp 9.374.117
4	Spray Nozzle	Full Cone, 1/2", hole 5 mm	4 Pcs	Rp 680.000
5	Reducer Stainless	2 x 1/2 inch	4 Pcs	Rp 400.000
6	Check Valve	2 inch	1 Pcs	Rp 649.800
7	Ball Valve	2 inch	4 Pcs	Rp 3.000.000
8	Pressure Gauge	0–10 bar	1 Pcs	Rp 627.500
9	Flowmeter	2 inch	1 Pcs	Rp 1.425.000
10	Elbow 90°	2 inch	8 Pcs	Rp 586.000
11	Tee	2 inch	5 Pcs	Rp 495.500
12	Cross Tee	2 inch	1 Pcs	Rp 146.000
Total				Rp 78.947.958,67

Total Rencana Anggaran Biaya (RAB) untuk membangun sistem *water spray* pada *kiln stack* 421-3K01 adalah sebesar Rp78.947.958,67, yang telah mencakup seluruh komponen utama maupun pendukung sistem. Sistem *water spray* ini direncanakan terintegrasi dengan data pemantauan emisi dari CEMS melalui kontrol berbasis PLC, sehingga pompa dan *nozzle* dapat diaktifkan secara otomatis ketika konsentrasi partikulat mendekati nilai set point tertentu. Dengan demikian, pengendalian emisi dapat dilakukan secara cepat dan efisien tanpa pemakaian air yang berlebihan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa peningkatan emisi partikulat pada *kiln stack* 421-3K01 disebabkan oleh menurunnya efisiensi penangkapan debu pada *bag filter* akibat kebocoran, kurang optimalnya sistem pembersihan *pulse jet*, serta pemeliharaan yang belum efektif. Sebagai pengendalian tambahan, telah dirancang sistem *water spray* dengan 4 *nozzle* tipe *full cone* berdebit total 4,8 L/menit, pipa distribusi galvanis 2 inci, tangki air 8000 liter, dan pompa *vertical multistage* dengan *head* total 61,21 m serta NPSHa 8,04 m yang aman dari risiko kavitasi. Estimasi total biaya implementasi sistem ini adalah sebesar Rp78.947.958,67. Penerapan sistem *water spray* ini diharapkan dapat membantu menjaga konsentrasi partikulat tetap di bawah baku mutu yang berlaku serta mendukung kepatuhan PT. Solusi Bangun Andalas terhadap regulasi lingkungan.

Perlu ditegaskan bahwa hasil penelitian ini masih berupa desain konseptual (*conceptual design*) sistem *water spray* yang disusun berdasarkan perhitungan mekanika fluida dan studi literatur, sehingga besarnya penurunan konsentrasi emisi partikulat setelah sistem diterapkan belum dapat dipastikan secara kuantitatif karena penelitian ini hanya sampai pada tahap perancangan. Oleh karena itu, diperlukan tahap lanjutan berupa implementasi lapangan (uji coba) atau simulasi kinerja sistem, misalnya menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), untuk memvalidasi efektivitas aktual sistem *water spray* dalam menurunkan emisi partikulat pada *kiln stack* 421-3K01 sebelum diterapkan secara penuh pada skala operasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Solusi Bangun Andalas atas kesempatan dan dukungan data yang diberikan selama penelitian, serta kepada Politeknik Negeri Jakarta atas bimbingan akademik dalam penyelesaian penelitian ini.

REFERENSI

- [1] S. B. Asim, E. Noviani, and H. Helmi, "Pemodelan Aliran Fluida Bidang Miring pada Lapisan Tipis," *Jurnal Matematika Integratif*, vol. 19, no. 1, p. 127, Jun. 2023, doi: 10.24198/jmi.v19.n1.40855.125-136.
- [2] Badan Pengendalian Lingkungan Hidup, "PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP/BADAN PENGENDALIAN LINGKUNGAN HIDUP REPUBLIK INDONESIA NOMOR 7 TAHUN 2025," 2025.
- [3] N. A. Nasution, "ANALISIS KONSENTRASI PARTIKULAT, SO₂, NO_x, DAN CO PADA CEROBONG KILN BERBAHAN BAKAR CAMPURAN BATUBARA DAN BAHAN BAKAR ALTERNATIF DI PABRIK INDARUNG VI PT SEMEN PADANG," 2024.
- [4] P. Cantona, M. A. Stevanie Dwi, C. Slamet Abadi, and dan 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, [Online]. Available: <http://semnas.mesin.pnj.ac.id>
- [5] R. H. Fadhlurahman, "SKRIPSI ANALISIS EFEKTIVITAS WATER MIST SPRAY DALAM PENGENDALIAN DEBU DI AREA PRODUKSI DMLZ PT FREEPORT INDONESIA," 2024.
- [6] Y. Y. Lee *et al.*, "Suppression Efficiency for Dust from an Iron Ore Pile Using a Conventional Sprinkler and a Water Mist Generator," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 22, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.4209/AAQR.210320.
- [7] Menti Lingkungan Hidup & Kehutanan, "PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN NOMOR 19 TAHUN 2017," 2017.

- [8] Menti Lingkungan Hidup & Kehutanan, “PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN REPUBLIK INDONESIA NOMOR 13 TAHUN 2021,” 2021. [Online]. Available: www.peraturan.go.id
- [9] Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup, “PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP / BADAN PENGENDALIAN LINGKUNGAN HIDUP REPUBLIK INDONESIA NOMOR 6 TAHUN 2026,” 2026.
- [10] M. T. Sembiring, A. R. Sembiring Meliala, and M. Z. Harahap, “Analisis Permasalahan Menggunakan Cause and Effect Diagram, Fault Tree Analysis dan Afinity Diagram Proses Produksi Stasiun Persiapan Tulangan pada PT. X,” 2022, doi: 10.32734/ee.v5i2.1561.
- [11] A. Zahidin and L. Rubianto, “PERHITUNGAN NERACA MASSA, NERACA PANAS DAN EFISIENSI PADA ROTARY KILN UNIT KERJA RKC 3 PT SEMEN INDONESIA (PERSERO) Tbk,” vol. 2020, no. 2, pp. 309–315, 2020, [Online]. Available: <http://distilat.polinema.ac.id>