



Optimalisasi Sistem Pengumpanan *Fly Ash* pada *Cement Mill 2* Menggunakan Metode *Root Cause Analysis* untuk Meningkatkan Stabilitas *Feed Rate* di Pabrik Semen

Bambang Setyono¹, Lukmandono^{2*}, Iswanto Pamuji³

^{1,3}Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jl. Arif Rahman Hakim No. 100 Surabaya, 60117, Indonesia

²Jurusan Teknik Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jl. Arif Rahman Hakim No. 100 Surabaya, 60117, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Halaman:

67 - 79

Tanggal penyerahan:

11 Mei 2026

Tanggal diterima:

20 Agustus 2026

Tanggal terbit:

30 September 2026

EMAIL

¹bambang@itats.ac.id

²lukmandono@itats.ac.id*

³iswanto.pamuji.ip.1331@gmail.com

*) *Corresponding Author*

ABSTRACT

Fly ash is a coal combustion waste that can improve cement quality. The target of increasing the proportion of fly ash has increased to >10%, but it causes process instability in the fly ash feeding system and causes production disruption. This study aims to analyze the root causes of fly ash feeding instability using the Root Cause Analysis approach assisted by statistical data from the X-R control chart diagram. From the analysis results, several root causes were identified, one of which was the suboptimal surge bin filling control system because the sensors and actuators did not support the implementation of the PID control system. The implementation of the PID control system modification succeeded in stabilizing the output with an indication of the standard deviation from the statistical results of the X-R control chart, the standard deviation value decreased from 7.13 to 0.67. The results of this study can increase the fly ash feed rate, and directly impact the reduction of CF from >60% to 57.8% and generally improve process efficiency and production stability.

Keywords: *cement industry feed rate, fly ash, root cause analysis*

ABSTRAK

Fly ash merupakan limbah pembakaran batubara yang dapat meningkatkan kualitas semen. Target peningkatan proporsi fly ash mengalami peningkatan mencapai >10%, namun menimbulkan ketidakstabilan proses pada sistem pengumpanan fly ash dan menyebabkan gangguan produksi. Penelitian ini bertujuan menganalisa akar penyebab ketidakstabilan pengumpanan fly ash dengan pendekatan Root Cause Analysis dibantu dengan data statistik diagram peta kendali X-R. Dari hasil analisa mengidentifikasi beberapa akar masalah, salah satunya adalah belum optimalnya sistem kontrol pengisian surge bin karena sensor dan aktuator tidak mendukung untuk diterapkan sistem kontrol PID. Implementasi modifikasi sistem kontrol PID berhasil menstabilkan pengeluaran dengan indikasi standar deviasi dari hasil statistik peta kendali X-R, nilai standar deviasi menurun dari 7.13 menjadi 0.67. Hasil penelitian ini dapat meningkatkan feed rate fly ash, dan secara langsung berdampak pada penurunan CF dari >60% menjadi 57.8% dan secara umum meningkatkan efisiensi proses dan stabilitas produksi.

Kata kunci: *feed rate, fly ash, industri semen, root cause analysis*

PENDAHULUAN

Industri semen merupakan salah satu sektor industri strategis yang berperan penting dalam pembangunan infrastruktur nasional. Proses produksi semen melibatkan berbagai tahapan yang kompleks dan saling terintegrasi, mulai dari pengolahan bahan baku, pembakaran klinker, hingga proses penggilingan akhir pada unit cement mill. Dalam proses tersebut, kestabilan parameter

operasi menjadi faktor utama yang menentukan kualitas produk, efisiensi energi, dan kontinuitas produksi. Salah satu parameter penting pada unit *cement mill* adalah kestabilan feed rate material tambahan (*additive material*), khususnya *fly ash*, karena secara langsung mempengaruhi komposisi semen, performa grinding, serta produktivitas *mill*.

Fly ash merupakan material hasil samping pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang memiliki sifat pozzolanik dan banyak dimanfaatkan sebagai bahan campuran dalam industri semen dan beton. Kandungan silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3) pada *fly ash* menjadikannya material yang efektif untuk meningkatkan kualitas produk semen sekaligus mengurangi penggunaan klinker. Penggunaan *fly ash* juga mendukung konsep green industry karena mampu menekan emisi karbon dioksida (CO_2) dari proses produksi semen. *Fly ash* memiliki kemampuan bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen sehingga membentuk senyawa calcium silicate hydrate (C-S-H) yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan densitas material semen.[1]

Selain manfaat teknis, pemanfaatan *fly ash* juga memberikan dampak lingkungan dan ekonomi yang signifikan. Pemanfaatan *fly ash* mampu mengurangi limbah industri pembakaran batu bara serta menurunkan konsumsi semen konvensional yang memiliki tingkat emisi karbon tinggi. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki potensi besar sebagai material alternatif yang mendukung pembangunan berkelanjutan di sektor industri konstruksi dan semen.[2]

Dalam operasional *cement mill*, *fly ash* diumpankan melalui sistem *feeding* yang terdiri dari *hopper*, *screw conveyor*, *rotary feeder*, *air slide*, dan *weighing system*. Sistem ini harus mampu menjaga kestabilan feed rate agar proses grinding berjalan optimal. Namun dalam praktiknya, sistem pengumpanan *fly ash* sering mengalami gangguan berupa fluktuasi *feed rate*, *plugging material*, *bridging* pada *hopper*, ketidaksesuaian aliran material, hingga gangguan pada *weighing feeder*. Ketidakstabilan *feed rate* tersebut dapat menyebabkan variasi komposisi semen, peningkatan *Specific Power Consumption*, penurunan kapasitas produksi, serta meningkatnya vibrasi dan gangguan operasi pada *cement mill*. [3] Kondisi ini pada akhirnya berdampak terhadap kualitas produk dan efisiensi proses produksi secara keseluruhan seperti terlihat pada Gambar 1.

PRODUCTION							CONSUMPTION										
Sort Name	Cement Type	Run	Feed Rate		Prod (t/h)	Clinker Factor (%)	Specific Elec Energy (kWh/t)	Clinker		Gypsum			Limestone			Fly Ash	
			Wet (t/h)	Dry (t/h)				Dry (t/h)	(%)	Wet (t/h)	Dry (t/h)	(%)	Wet (t/h)	Dry (t/h)	(%)	Dry (t/h)	(%)
		(h)			Dry (t/h)	(%)	(kWh/t)										
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	233.2	228.8	228.6	60.13	29.2	137.5	58.9	12.8	5.5	5.5	63.1	27.0	58.7	58.7	8.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	233.2	228.8	228.8	59.88	29.4	137.0	58.7	12.8	5.5	5.5	63.2	27.1	58.8	25.7	8.8
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	232.4	227.7	227.7	59.94	29.9	136.5	58.7	12.7	5.5	5.5	63.0	27.1	58.6	25.7	8.7
ASTM 1157 GU	EzPro	0.88	196.9	170.6	170.6	61.39	34.4	104.7	60.2	9.7	5.5	5.5	46.2	26.3	42.9	26.2	7.7
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	226.2	226.2	226.2	58.86	29.2	133.1	58.9	12.4	5.5	5.5	61.3	27.1	61.3	27.1	8.6
ASTM 1157 GU	EzPro	0.67	197.8	131.9	131.9	61.51	32.3	79.9	62.7	7.3	5.7	5.7	32.7	25.6	32.7	24.8	7.6
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	224.6	224.6	224.6	59.58	29.0	133.8	59.6	12.4	5.5	5.5	58.8	26.2	58.8	26.2	8.7
ASTM 1157 GU	EzPro	0.88	181.6	160.4	160.4	65.02	32.9	104.3	65.0	9.6	6.0	6.0	42.8	26.7	42.8	26.7	2.3
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	231.4	231.4	231.4	54.73	27.3	126.6	59.0	11.8	5.5	5.5	57.6	26.8	57.6	24.9	8.7
ASTM 1157 GU	EzPro	0.73	219.0	160.6	160.6	59.18	30.1	94.0	61.9	8.7	5.8	5.8	38.4	25.3	38.4	23.9	7.0

Gambar 1. Data Penggunaan *Fly Ash* 2021-2023 di Unit Cement Mill 2 Pabrik Semen PT. XYZ
(Sumber : TIS/Technical Information System)

Karakteristik fisik *fly ash* menjadi salah satu faktor utama yang mempengaruhi kestabilan *feeding system*. Sifat material seperti ukuran partikel, *moisture content*, *bulk density*, *flowability*, dan tingkat kehalusan partikel sangat menentukan kemampuan material untuk mengalir secara stabil pada sistem pengumpanan. [4] Perubahan struktur permukaan *fly ash* akibat perlakuan mekanokimia dapat mempengaruhi sifat aliran, ukuran partikel, serta perilaku material selama proses transportasi dan pencampuran. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik permukaan *fly ash* sangat menentukan kestabilan proses industri berbasis semen. [5]

Fly ash memiliki karakteristik mekanik dan fisik yang sangat dipengaruhi oleh metode pengolahan serta struktur partikelnya. Penelitian tersebut menekankan pentingnya pengendalian

karakteristik *fly ash* dalam proses industri karena perubahan sifat material dapat mempengaruhi performa sistem produksi maupun kualitas produk akhir. [6].

Beberapa penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dapat meningkatkan performa material berbasis semen apabila dikendalikan secara optimal. Penambahan *fly ash* mampu meningkatkan sifat mekanik dan karakteristik fisik material semen komposit. [7] Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* yang tepat dapat meningkatkan densitas dan kekuatan material semen. Penambahan *fly ash* hingga 25% mampu meningkatkan kuat tarik belah beton porous secara signifikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik *fly ash* sangat mempengaruhi kualitas produk akhir dan memerlukan pengendalian komposisi yang baik untuk memperoleh performa optimal [6][8]

Penggunaan *fly ash* sebagai substitusi semen mampu meningkatkan daya tahan beton serta memperbaiki karakteristik material apabila proporsi campuran dikendalikan secara tepat. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki pengaruh besar terhadap sifat setting time dan kekuatan material semen [9][10]. Ketidakesesuaian parameter operasi menyebabkan vibrasi tinggi sehingga target *feed rate* tidak tercapai. Setelah dilakukan penyesuaian parameter sistem, *feed rate* meningkat dan vibrasi operasi dapat dikurangi. [11] Penelitian ini menunjukkan bahwa kestabilan *feed rate* merupakan parameter penting dalam menjaga performa cement mill. *Fly ash* memiliki potensi besar sebagai material komposit karena mampu meningkatkan sifat mekanik, ketahanan material, serta mendukung konsep material ramah lingkungan dan berkelanjutan. [12]

Fly ash memiliki potensi besar sebagai material substitusi semen karena mampu meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku sekaligus mengurangi dampak lingkungan akibat produksi semen Portland. [13] [14] Penggunaan *fly ash* pada mortar mempengaruhi kuat tekan dan karakteristik material secara signifikan. [14][15] Penelitian tersebut menunjukkan bahwa proporsi *fly ash* yang tidak sesuai dapat menyebabkan penurunan performa material. Kestabilan operasi *cement mill* sangat dipengaruhi oleh performa sistem mekanik dan parameter operasi. Gangguan pada sistem operasi dapat menyebabkan ketidakseimbangan proses penggilingan dan menurunkan efisiensi produksi semen.[15]

Pada sistem pengumpanan *fly ash* di Cement Mill 2 Pabrik XYZ, fluktuasi *feed rate* masih sering terjadi sehingga mengganggu kestabilan operasi mill. Ketidakstabilan tersebut diduga disebabkan oleh berbagai faktor seperti karakteristik *fly ash*, kondisi hopper, performa *rotary feeder*, sistem kontrol, maupun faktor operasional lainnya. Permasalahan ini perlu dianalisis secara menyeluruh menggunakan metode *root cause analysis* agar akar penyebab gangguan dapat diidentifikasi secara tepat dan solusi optimal dapat ditentukan.

Berdasarkan studi literatur dan penelitian terdahulu, diketahui bahwa penelitian mengenai *fly ash* sebagian besar masih berfokus pada pemanfaatannya sebagai bahan substitusi semen dan material campuran beton untuk meningkatkan sifat mekanik maupun mendukung konsep konstruksi ramah lingkungan. Penelitian yang dilakukan oleh beberapa peneliti lebih banyak membahas pengaruh *fly ash* terhadap karakteristik beton, kekuatan material, dan performa produk berbasis semen. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki potensi besar sebagai material tambahan pada industri semen, namun belum membahas secara spesifik mengenai kestabilan sistem pengumpanan *fly ash* pada proses produksi cement mill.

Penelitian mengenai metode *Root Cause Analysis* (RCA) di industri manufaktur juga telah banyak dilakukan untuk mengidentifikasi penyebab kerusakan dan gangguan sistem produksi. Namun penerapan metode RCA pada sistem pengumpanan *fly ash* di unit cement mill masih sangat terbatas, khususnya pada kondisi aktual industri semen di Indonesia. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menitikberatkan pada analisis kerusakan peralatan atau evaluasi kualitas produk, bukan pada optimalisasi kestabilan *feed rate* material additive seperti *fly ash*.

Dengan demikian, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) yaitu belum adanya penelitian yang secara komprehensif mengintegrasikan analisis akar penyebab gangguan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) dengan upaya optimalisasi sistem pengumpanan *fly ash* pada *Cement Mill 2* untuk meningkatkan kestabilan *feed rate*. Selain itu, penelitian mengenai hubungan faktor material, sistem mekanik feeding, dan parameter operasi terhadap kestabilan *feed rate fly ash* pada proses cement milling juga masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui analisis menyeluruh terhadap sistem pengumpanan *fly ash* pada *Cement Mill 2* di Pabrik XYZ

menggunakan metode RCA, sehingga dapat diperoleh solusi optimal dalam meningkatkan kestabilan *feed rate*, keandalan sistem feeding, efisiensi proses produksi, serta kualitas operasi cement mill secara berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan sistem pengumpanan fly ash pada *Cement Mill 2* di Pabrik XYZ guna meningkatkan kestabilan *feed rate* dalam proses produksi semen. Penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi kondisi aktual sistem pengumpanan fly ash serta menganalisis berbagai faktor yang menyebabkan terjadinya fluktuasi *feed rate* pada proses operasi cement mill. Melalui penerapan metode *Root Cause Analysis* (RCA), penelitian ini bertujuan untuk menemukan akar penyebab utama ketidakstabilan pengumpanan fly ash yang berkaitan dengan faktor material, kondisi peralatan, parameter operasi, maupun sistem kontrol yang digunakan. Hasil analisis tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan langkah-langkah perbaikan dan optimalisasi sistem pengumpanan agar aliran *fly ash* menjadi lebih stabil dan proses grinding pada *Cement Mill 2* dapat berlangsung secara optimal.

Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk meningkatkan efektivitas dan keandalan sistem *feeding fly ash* sehingga dapat mendukung peningkatan efisiensi proses produksi, menjaga kualitas produk semen, mengurangi gangguan operasional, serta menekan potensi downtime peralatan. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan mampu memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif bagi perusahaan dalam upaya meningkatkan stabilitas operasi *cement mill* dan mendukung terciptanya proses produksi semen yang lebih efisien, andal, dan berkelanjutan.

METODE

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksploratori dengan pendekatan studi kasus pada sistem pengumpanan *fly ash* di *Cement Mill 2* pada pabrik semen. Penelitian difokuskan pada identifikasi penyebab ketidakstabilan *feed rate fly ash* serta optimalisasi sistem pengumpanan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) untuk meningkatkan kestabilan proses produksi. Metode RCA digunakan karena mampu mengidentifikasi akar penyebab masalah secara sistematis sehingga tindakan perbaikan yang dilakukan dapat lebih efektif dan berkelanjutan.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada area *Cement Mill 2* di pabrik semen dengan keadaan lokasi terlihat seperti Gambar 2, khususnya pada sistem pengumpanan *fly ash* yang meliputi: *hopper fly ash*, *screw conveyor*, *rotary feeder*, *bucket elevator*, *belt conveyor*, sistem kontrol *feed rate*.



Gambar 2. Lokasi obyek penelitian

Waktu penelitian dilaksanakan selama periode pengambilan data operasional dan evaluasi sistem, meliputi:

1. Observasi lapangan
2. Pengambilan data produksi
3. Analisis gangguan
4. Implementasi perbaikan
5. Evaluasi hasil optimalisasi

Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Identifikasi Permasalahan
- b. Analisis *Fishbone Diagram*
- d. Analisis 5 Why
- e. Penentuan *Root Cause*.
- f. Implementasi Perbaikan
- g. Evaluasi Hasil

Tahapan Penelitian

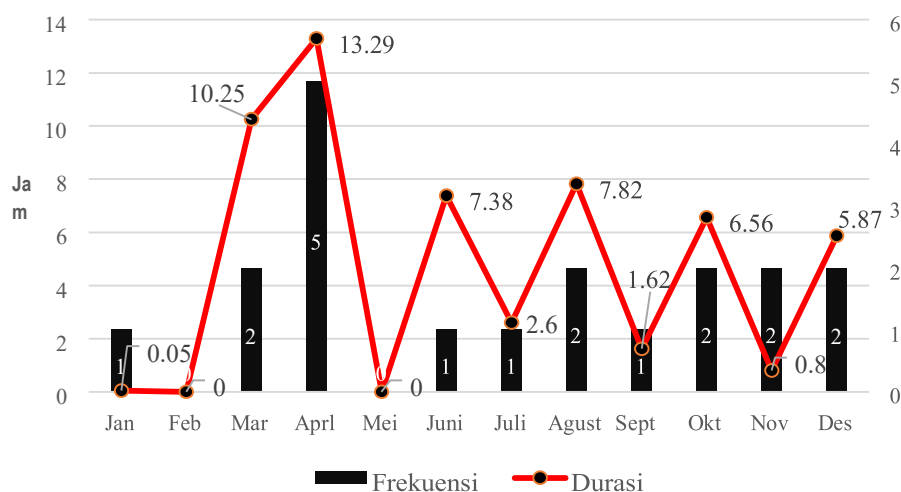
Tahapan penelitian yang dimulai dari identifikasi latar belakang penelitian, yaitu permasalahan fluktuasi *feed rate* fly ash pada sistem pengumpanan *Cement Mill*. Selanjutnya dilakukan uji nilai standar deviasi *feed rate* untuk mengetahui tingkat kestabilan proses. Tahap berikutnya adalah pemilihan dan pengumpulan data TIS berdasarkan populasi dan sampel yang ditentukan. Data kemudian dianalisis menggunakan diagram kendali X-Bar, R, serta uji variabilitas proses berdasarkan nilai standar deviasi. Hasil analisis digunakan untuk menentukan apakah nilai standar deviasi *feed rate* fly ash telah memenuhi batas yang ditetapkan, yaitu ≤ 3 ton/jam.

Apabila belum memenuhi standar, dilakukan identifikasi dan analisis masalah menggunakan metode *Why-Why Diagram*, dilanjutkan dengan *Root Cause Analysis* (RCA) untuk menemukan akar penyebab permasalahan. Berdasarkan hasil RCA, ditentukan solusi perbaikan, kemudian solusi tersebut diimplementasikan pada proses. Setelah implementasi, dilakukan monitoring hasil perbaikan untuk mengevaluasi efektivitasnya.

Apabila standar telah tercapai, data hasil perbaikan digunakan sebagai data pembandingan sebelum dan setelah RCA/perbaikan. Tahap akhir penelitian adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis dan evaluasi perbaikan yang telah dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data perusahaan dalam setahun, hampir setiap bulan selalu terjadi *breakdown* karena jalur transportasi *fly ash* mengalami kerusakan. Data sebaran frekuensi dan durasi terlihat pada Gambar 3 dibawah ini.



Gambar 3. Diagram data breakdown T92-FM1 Cement Mill 2

Berdasarkan gambar 4 terlihat bahwa pengumpanan *fly ash* kurang optimal, menyebabkan rasio CF tidak sesuai target dan terjadi beberapa masalah karena fluktuasi yang tinggi dari jalur transportasinya. Oleh karena itu perlu dilakukan optimalisasi pengumpanan *fly ash* di *Cement Mill* 2. Diperlukan uji nilai standar deviasi untuk mengetahui variabilitas. Uji nilai standar deviasi dan variabilitasnya dilakukan dengan peta kendali X-bar dan R chart.

Data Sampel diunduh dari data TIS dengan parameter *feed rate fly ash* aktual secara quarterly (rata-rata operasi setiap 15 menit) pada bulan Februari 2024. Jumlah total 240 sampel (data operasi kontinyu selama 60 jam) dibagi menjadi 4 sub data (Log data= T92-FM1.F1:SP_AVG). Target *dry product Fly Ash* 11.5 % (>29 ton/jam) saat sampling data. Satuan data ton/jam.

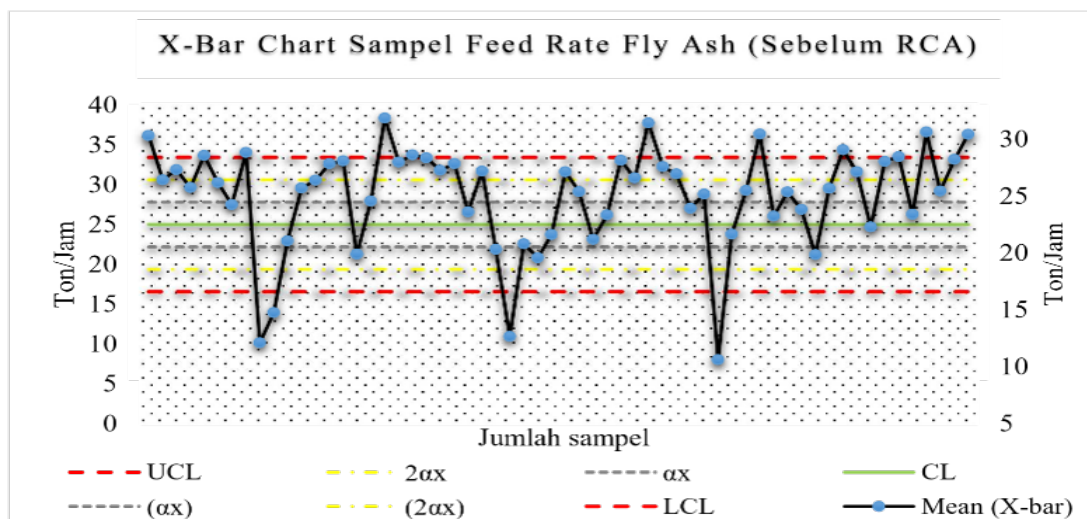
Data sampel dapat dirangkum sebagai berikut:

- Nilai rata-rata ($\bar{X}$) *feed rate fly ash* = 25.027 Ton/jam
- Nilai rata-rata Rentang ($\bar{R}$) = 11.555
- Varians (σ^2) = 50.90370
- Std Deviasi (σ) = 7.134 ton/jam

Diagram Kendali X-bar (X-Bar Chart) untuk Feed Rate

Jumlah $n = 4$, A_2 dengan $n = 4$ adalah 0,729. (Tabel pada Nilai Konstanta A_2 , D_2 , D_3 , dan D_4)

- $UCL = \bar{X} + A_2 \bar{R} = 25.027 + (0.729 \times 11.547) = 33.451$
- $CL = \bar{X} = 25.027$
- $LCL = \bar{X} - A_2 \bar{R} = 25.027 - (0.729 \times 11.547) = 16.603$
- $UWL\ 2\sigma = \bar{X} + 2\sigma = 30.64$ dan $LWL\ (2\sigma) = \bar{X} - 2\sigma = 19.41$



Gambar 4. X-bar Chart *Feed Rate Fly Ash* (Sebelum RCA)
(Sumber: Data TIS)

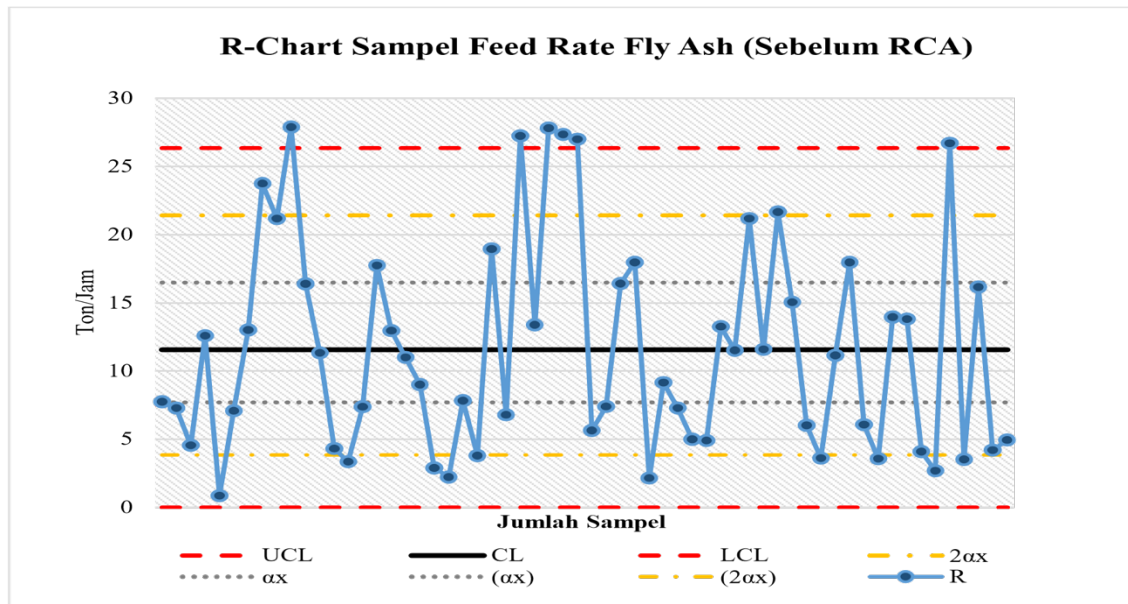
1. Ada 11 titik yang melewati batas UCL (*Upper Control Limit*)
2. Ada 4 titik yang melewati batas LCL (*Lower Control Limit*)
3. Ada lebih dari 36 titik yang melewati 2σ (WL= *Warning Limit*)

Peta kendali X-bar pada Gambar 4 menunjukkan proses mengalami ketidakstabilan karena ada 11 titik melampaui batas atas kontrol (UCL) dan 4 titik melewati batas bawah kontrol (LCL) serta ada lebih dari 36 titik melewati batas peringatan (WL) 2σ . Terjadi variasi signifikan terutama pada titik yang melebihi batas kontrol, menandakan ada faktor khusus atau perubahan dalam proses yang mempengaruhi variabilitas *feed rate*. Oleh karena itu, diperlukan investigasi untuk identifikasi penyebab dominan terjadinya variasi feed ini menemukan solusi.

Diagram Kendali R (R-Chart) untuk Feed Rate

Jumlah $n = 4$, Faktor kontrol limit $D_3 = 2,282$ dan $D_4 = 0$ (Tabel pada Nilai Konstanta A_2 , D_2 , D_3 , dan D_4)

- $UCL = D3 \times \bar{R} = 2.282 \times 11.547 = 26.346$
- $CL = \bar{R} = 11.555$
- $LCL = D4 \times \bar{R} = 0 \times 11.547 = 0$
- $UWL\ 2\sigma_x = 2/3 \times (UCL - CL) = 21.415$
- $LWL\ (2\sigma_x) = 2/3 \times (CL - LCL) = 3.851$



Gambar 5. R-Chart Feed Rate Fly Ash (Sebelum RCA)
(Sumber: Data TIS)

1. Ada 6 titik yang melewati batas UCL
2. Ada 19 titik yang melewati batas 2σ (*warning limit*)
3. 2 dari 3 titik sample berurutan yang pada sisi yang sama dan melewati 2σ

Berdasarkan peta kendali R-chart pada Gambar 5, terdapat beberapa indikasi fluktuasi pada proses. Ada 19 titik yang melewati 2σ (WL) dan 5 titik melampaui batas atas (UCL) menunjukkan tingkat variabilitas tinggi. Selain itu, kejadian dua dari tiga titik sampel berurutan pada sisi yang sama dan melewati 2σ menunjukkan pola tidak wajar, menegaskan perlu diadakan investigasi mendalam untuk mengidentifikasi penyebab dominan dan memperbaiki stabilitas proses.

Hasil analisis statistik membuktikan ketidakstabilan sistem pengumpanan *fly ash* memiliki dampak signifikan terhadap proses produksi, terutama terhadap kinerja proses secara keseluruhan di *Cement Mill 2*. Perlu di lakukan identifikasi guna mengurangi variasi dalam *feedrate fly ash*, sehingga mencapai standar deviasi yang di ijinakan sebesar < 3 Ton/jam.

Metode RCA untuk Mencari Akar Penyebab Permasalahan

Dilakukan RCA dengan melibatkan *Production Cement Mill Area Manager, mechanical enginer, electrical enginer, CCR enginer, plant patroller, mechanic cement mill area superitendent* dan *technical process enginer* dengan *brainstorming*.

Identifikasi Akar Penyebab Dominan

Dari hasil *brainstorming*, ada 2 penyebab dari fluktuasi *feeding fly ash* yaitu material suplai kurang lancar dan seal pneumatic pump bocor yang menyebabkan jalur transportasi tidak stabil. Selanjutnya ke 2 penyebab tersebut menjadi beberapa sub penyebab yang menjadi akar masalah dengan pendekatan *whys analysis*.

Penentuan Potensi Solusi Dengan Metode Pembobotan

Membuat tabel pembobotan setiap potensi solusi dengan 4 kriteria yaitu biaya, waktu pengerjaan, tingkat kesulitan, efek terhadap proses dengan rentang nilai low = 1, medium = 2, dan high = 3. Pilih beberapa solusi dengan bobot tertinggi yang berefek besar pada permasalahan utama yaitu fluktuasi pengumpanan *fly ash* seperti pada Tabel 1. Solusi terpilih kemudian harus disetujui oleh Area Manager untuk mendapat persetujuan.

Tabel 1. Tabel Pembobotan Solusi Final

Penyebab/Akar Masalah	Alternatif Solusi	Jumlah pembobotan	Rank
Level sensor bin mudah kotor dan masih dengan tipe stick on/off switch	Penggantian sensor level bin dengan type radar	11	2
	Buat PID Gate terintegrasi dengan level bin	12	1
	Buat schedule cleaning sensor	6	-
Belum ada SOP pengosongan	Buat SOP Baru	7	-
Kanvas air slide jenuh dan berlubang	Ganti chamber kanvas air slide	10	3
	Penambahan mesh di inlet air slide	4	-
	buat schedule flushing air chamber/shift	8	-
Seal gate aus	Penggantian seal gate	10	3
volume/pressure air seal kurang	Modifikasi pipa <i>air seal</i> menjadi lebih besar	10	3
	Penambahan pressure gauge	10	3
	monitor pressure air seal		
Bukaan gate tidak bisa proportional	Penggantian sensor gate dengan Potensiometer	11	2
(sensor tipe proximity)	Buat PID Gate terintegrasi dengan level bin	12	1

Menentukan Solusi Final, Risiko dan Mitigasi Risiko

Mitigasi risiko dibuat untuk mengantisipasi adanya kegagalan pada rencana perbaikan yang sudah dibuat. Mitigasi berisi beberapa alternatif solusi jika terjadi kegagalan pada risiko yang sudah diprediksi seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel Solusi, Risiko dan Mitigasi Risiko

Solusi	Risiko	Mitigasi Risiko
Penggantian sensor level bin dengan tipe radar	Sensor tipe radar belum siap	Pastikan sensor siap saat waktu pengerjaan
Penggantian sensor gate dengan Potensiometer	Sensor tipe potensio belum siap	Pastikan sensor siap saat waktu pengerjaan
Buat PID Gate terintegrasi dengan level bin	Potensi sistem PID gagal karena pengerjaan lama dan belum teruji	Membuat simulasi di control room dengan Automatic Engineer secepat mungkin, dan siap upload PID ke sistem
Ganti Chamber Canvas Air Slide	Spare original belum siap	TKDN dari vendor dalam negeri
Penggantian seal gate	Seal original spare part belum siap dan pengadaan lama	Buat seal sendiri sementara / TKDN dari vendor dalam negeri
Modifikasi pipa air sealing menjadi lebih besar	waktu pengerjaan lama, tidak selesai sesuai jadwal	Pekerjaan fabrikasi dimulai terlebih dahulu, saat stop perbaikan sudah siap assembly

Solusi	Risiko	Mitigasi Risiko
Penambahan pressure gauge pada jalur sealing air	waktu pengerjaan lama, tidak selesai sesuai jadwal	Pekerjaan fabrikasi dimulai terlebih dahulu, saat stop perbaikan sudah siap assembly

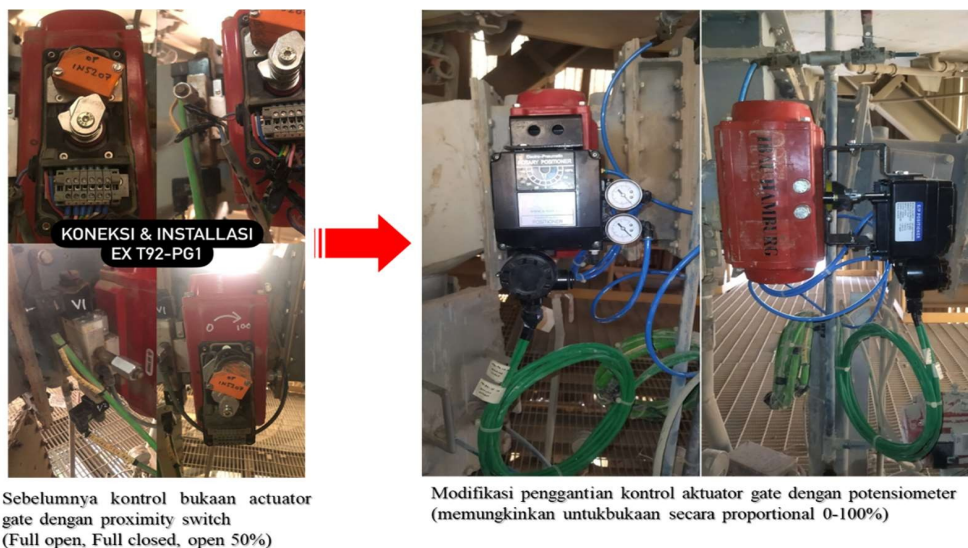
Implementasi Solusi

Setelah ditemukan akar permasalahan, maka dilakukan implementasi solusi yaitu dengan cara sensor level ditambah dengan tipe radar sebagai *feedback* pengukuran untuk kontrol PID baru. Indikasi sensor *switch on/off* L1H dan L2H masih terpasang dan digunakan sebagai double cek indikasi level (untuk konfirmasi jika terjadi *error* pada pembacaan sensor radar). Sensor indikasi pada aktuator gate diganti dengan potensiometer (*proportional gate*) sebagai *feedback* sinyal untuk kontrol PID pembukaan aktuator terhadap level surge bin.

Setelah semua sensor untuk sinyal *feedback* terpasang, dibuatkan PID kontrol bukaan *proportional gate* terhadap *level surge bin*. PID bertujuan untuk selalu menjaga surge bin selalu terisi (mencegah tekor ataupun overflow material). Pembuatan Kontrol PID secara penuh dilakukan oleh tim Automatic Control engineer.



Gambar 6. Modifikasi Penggantian Sensor Radar untuk level Pengukuran Bin
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)



Sebelumnya kontrol bukaan aktuator gate dengan proximity switch (Full open, Full closed, open 50%)

Modifikasi penggantian kontrol aktuator gate dengan potensiometer (memungkinkan untuk bukaan secara proportional 0-100%)

Gambar 7. Modifikasi Penggantian Aktuator Proportional Gate
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Selain modifikasi sensor radar dan penggantian kontrol aktuator (Gambar 6 dan 7), juga dilakukan modifikasi dengan menambah *pressure gage*, penggantian *chamber canvas air slide*, penggantian *seal gate* dan *seal pneumatic pump* (Gambar 8).



Gambar 8. Pressure gate, chamber canvas air slide, seal gate

Seal gate yang aus merupakan salah satu penyebab material *fly ash* terus keluar walaupun indikasi sudah menutup sempurna. Seluruh seal yang bocor dan aus dilakukan penggantian untuk menormalkan fungsi alat.

Setelah dilakukan implementasi solusi berdasarkan RCA maka berdasarkan data dari TIS (operasi 60 jam bulan April 2024) diketahui bahwa pemanfaatan *feed rate fly ash* telah menunjukkan peningkatan yang signifikan, dari rata-rata tahun 2023 sebesar 7,66 %, tahun 2024 setelah implementasi naik menjadi 11,36 %. Begitu juga rata-rata produksi tahun 2023 sebesar 199,08 ton/jam setelah implementasi naik menjadi 249,43 ton/jam sebagaimana disajikan Gambar 9 dibawah ini.

PRODUCTION							CONSUMPTION									
Sort Name	Cement Type	Run	Feed Rate		Clinker Factor (%)	Specific Elec Energy (kWh/t)	Clinker		Gypsum			Limestone			Fly Ash	
			Wet (t/h)	Dry (t/h)			Dry (t)	(%)	Wet (t)	Dry (t)	%	Wet (t)	Dry (t)	%	Dry (t)	%
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	272.4	263.8	59.75	25.7	157.6	57.5	10.4	3.8	10.2	75.7	27.6	65.4	30.5	11.1
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	267.1	256.8	59.45	26.1	149.8	56.1	9.9	3.7	9.7	78.1	29.3	67.5	29.0	10.9
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	259.4	248.7	58.77	26.9	146.2	55.5	9.7	3.7	9.5	74.6	28.8	64.5	25.4	11.0
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	247.5	237.7	57.62	28.3	136.6	55.2	9.1	3.7	8.9	75.0	30.3	64.8	26.8	10.8
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	248.9	237.7	57.78	26.3	147.3	55.4	9.1	3.7	9.3	74.6	30.1	64.5	27.0	10.9
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	252.3	242.1	58.00	27.8	140.4	55.6	9.2	3.6	9.0	73.9	29.3	63.9	28.8	11.4
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	257.5	247.2	58.01	27.1	143.4	55.7	9.3	3.6	9.2	75.3	29.2	65.1	29.6	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	261.1	250.5	58.83	26.8	147.6	55.5	9.5	3.6	9.3	74.0	28.3	64.0	30.0	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	263.8	253.2	58.90	26.5	149.2	56.6	9.6	3.6	9.4	74.4	28.2	64.3	30.4	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	262.7	252.6	58.82	26.5	148.5	56.5	9.5	3.6	9.4	74.5	28.3	64.4	30.2	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	260.2	250.7	59.27	26.7	148.6	57.0	9.5	3.6	9.3	72.8	27.9	62.9	25.9	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	259.1	249.5	59.85	26.8	149.3	57.6	9.4	3.6	9.3	70.8	27.3	61.2	29.7	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	261.4	251.6	59.80	26.6	150.4	57.5	9.5	3.6	9.3	71.3	27.3	61.6	30.2	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	256.9	246.5	59.76	27.1	147.5	57.5	9.3	3.6	9.2	70.1	27.3	60.6	29.6	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	259.9	249.5	59.75	27.3	149.3	57.5	9.4	3.6	9.3	71.0	27.3	61.3	30.0	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	260.0	251.0	59.66	26.8	149.7	57.4	9.5	3.6	9.3	71.8	27.5	62.0	30.0	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	260.6	250.5	59.84	26.8	149.9	57.6	9.5	3.6	9.3	71.0	27.3	61.3	30.0	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	260.1	250.1	59.32	26.8	148.3	57.0	9.4	3.6	9.3	72.4	27.8	62.6	29.9	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	257.4	247.6	58.02	27.2	143.3	55.7	9.4	3.6	9.2	75.1	29.2	64.9	26.6	11.5
ASTM 1157 GU	EzPro	1.00	251.2	251.2	63.30	27.7	140.4	55.8	9.1	3.6	9.0	72.2	30.1	63.3	30.0	11.5

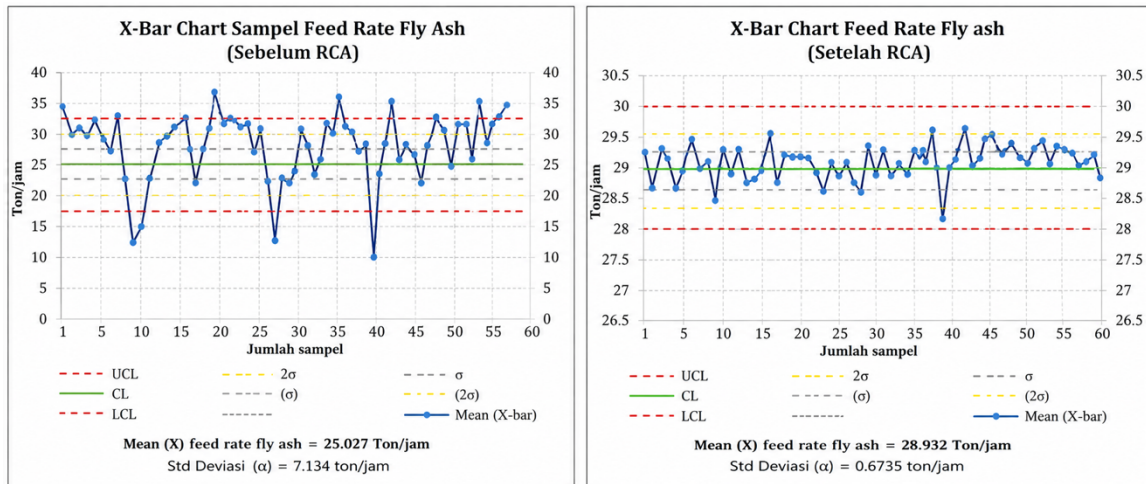
Total Produksi
(Prod Dry)

Clinker Factor (CF)

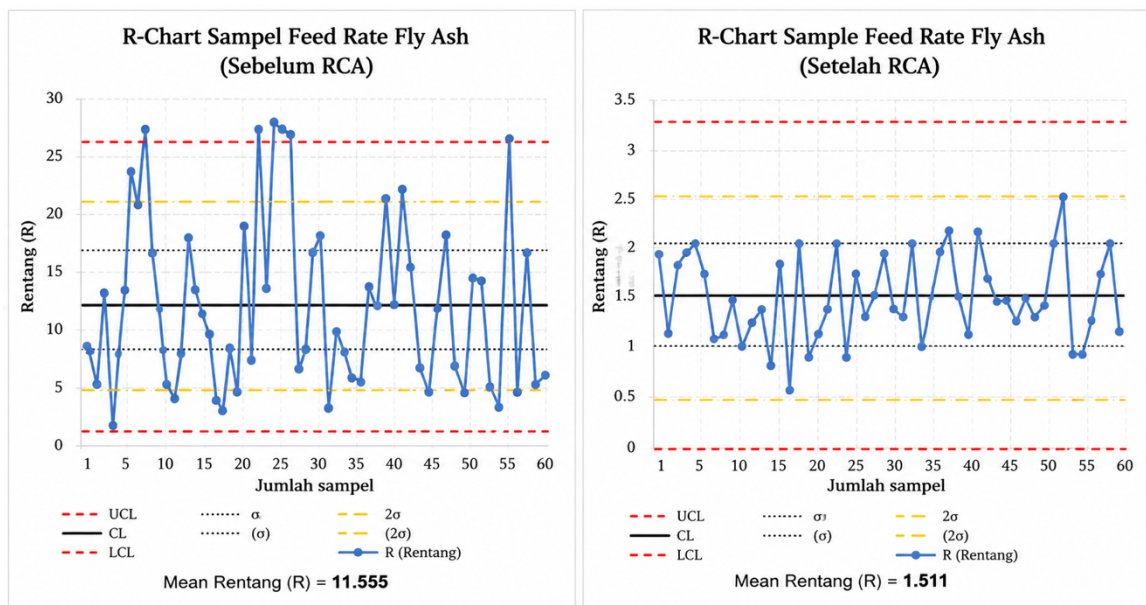
Fly Ash
(Dry)

Gambar 9. Data Produksi Cement Mill 2 April 2024 (setelah RCA)

Gambar 10 dan 11 berikut ini yang merupakan hasil pengolahan sampel data operasi 60 jam bulan April 2024 yaitu setelah implementasi solusi berdasarkan RCA menunjukkan bahwa nilai standar deviasi turun dari 7,134 ton/jam menjadi 0,67 ton/jam, jauh di bawah batas yang diizinkan sebesar 3 ton/jam. Dengan target 11,5 % proporsi *fly ash* sekitar 29 ton/jam, rata-rata *feed rate* meningkat dari 25,027 menjadi 28,932, dan rata-rata rentang (R) turun dari 11,5 menjadi 1,51, menunjukkan penurunan variasi pada proses. Perbaikan ini menunjukkan stabilitas dan konsistensi yang baik dalam proses produksi. Untuk mempertahankan dan meningkatkan hasil ini, diperlukan pemantauan dan penerapan standar perbaikan berkelanjutan.



Gambar 10. Grafik Perbandingan Uji Nilai X-bar Chart dan Standar Deviasi kondisi sebelum dan sesudah RCA



Gambar 11. Grafik Perbandingan Uji Nilai R Chart kondisi sebelum dan sesudah RCA

Analisis Hasil Implementasi Solusi Setelah RCA

Berdasarkan hasil implementasi solusi setelah dilakukan *Root Cause Analysis* (RCA), terjadi peningkatan kinerja pada sistem pengumpanan *fly ash Cement Mill 2*. Perbaikan dilakukan melalui pemasangan sensor level tipe radar sebagai *feedback* pengukuran, penggunaan potensiometer pada *proportional gate* sebagai *feedback* pembukaan aktuator, serta penggantian komponen yang mengalami keausan dan kebocoran, seperti *seal gate*. Sistem kontrol PID kemudian digunakan untuk menjaga level *surge bin* agar tetap stabil dan mencegah kondisi kekurangan maupun kelebihan material.

Hasil pengolahan data TIS menunjukkan bahwa implementasi solusi memberikan peningkatan pada penggunaan *fly ash*. Rata-rata penggunaan *fly ash* meningkat dari 7,66% pada tahun 2023 menjadi 11,36% setelah implementasi pada April 2024, atau meningkat sebesar 3,70 poin persentase (sekitar 48,3%). Peningkatan ini menunjukkan bahwa sistem pengumpanan setelah perbaikan mampu mempertahankan suplai *fly ash* yang lebih mendekati target penggunaan, yaitu sekitar 11,5%.

Dari sisi kapasitas produksi, rata-rata produksi *Cement Mill 2* meningkat dari 199,08 ton/jam menjadi 249,43 ton/jam, atau meningkat sekitar 25,3%. Peningkatan produksi tersebut berlangsung bersamaan dengan meningkatnya pemanfaatan *fly ash*, sehingga implementasi perbaikan tidak

hanya meningkatkan kestabilan pengumpanan tetapi juga mendukung peningkatan produktivitas *Cement Mill 2*.

Perubahan paling signifikan terlihat pada kestabilan *feed rate fly ash*. Nilai standar deviasi menurun dari 7,134 ton/jam sebelum RCA menjadi 0,67 ton/jam setelah RCA, atau mengalami penurunan sekitar 90,6%. Nilai tersebut juga telah berada jauh di bawah batas standar yang ditetapkan sebesar 3 ton/jam. Penurunan standar deviasi menunjukkan bahwa penyebaran data *feed rate* terhadap nilai rata-ratanya semakin kecil, sehingga proses pengumpanan menjadi lebih konsisten.

Hasil X-Bar Chart pada Gambar 10 memperkuat temuan tersebut. Sebelum RCA, nilai *feed rate* menunjukkan fluktuasi yang besar dengan rata-rata 25,027 ton/jam. Setelah RCA, rata-rata *feed rate* meningkat menjadi 28,932 ton/jam dan pola data menjadi jauh lebih rapat di sekitar nilai tengah. Dengan target penggunaan *fly ash* sebesar 11,5% atau sekitar 29 ton/jam, nilai rata-rata setelah perbaikan menunjukkan bahwa *feed rate* telah mendekati target operasi.

Sementara itu, hasil R-Chart pada Gambar 11 menunjukkan penurunan rata-rata rentang dari 11,555 menjadi 1,511 ton/jam, atau berkurang sekitar 86,9%. Penurunan nilai rentang menunjukkan bahwa perbedaan antara nilai maksimum dan minimum dalam setiap kelompok sampel menjadi jauh lebih kecil setelah implementasi RCA. Dengan demikian, proses pengumpanan *fly ash* menjadi lebih homogen dan stabil dibandingkan kondisi sebelum perbaikan.

Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa implementasi RCA dan modifikasi sistem kontrol berhasil meningkatkan stabilitas, konsistensi, dan kemampuan sistem dalam mempertahankan *feed rate fly ash* mendekati target. Peningkatan penggunaan *fly ash* dari 7,66% menjadi 11,36%, peningkatan produksi dari 199,08 menjadi 249,43 ton/jam, serta penurunan standar deviasi dari 7,134 menjadi 0,67 ton/jam memberikan indikasi kuat bahwa solusi yang diterapkan efektif. Oleh karena itu, sistem hasil perbaikan perlu dipertahankan melalui monitoring berkala, pemeliharaan sensor dan proportional gate, serta penerapan standar operasi dan perbaikan berkelanjutan agar kestabilan proses dapat dipertahankan dalam jangka panjang.

KESIMPULAN

Metode identifikasi permasalahan dengan RCA dengan pendekatan *Whys Analysis* dan *brainstorming* terbukti efektif dalam menentukan akar masalah dominan penyebab terjadinya ketidakstabilan pengumpanan *fly ash*. Ditemukan bahwa masalah utama adalah sistem suplai *fly ash* dari tangki/bin belum optimal sehingga sering terjadi suplai tidak konsisten yang menyebabkan beberapa masalah pada jalur transportasi karena overload saat *oversupply*.

Hasil analisis sampel data statistik indeks nilai standar deviasi sebelum dilakukan RCA adalah 7,134 ton/jam, setelah dilakukan perbaikan nilai standar deviasi menurun setelah dilakukan RCA menjadi 0,67 ton/jam. Nilai tersebut sudah dalam batas yang diizinkan oleh perusahaan yaitu <3 Ton/jam. Data tersebut didukung dengan analisa peta kendali Xbar - R chart yaitu adanya peningkatan rata-rata *feed fly ash* juga dari 25,027 ton/jam menjadi 28,932 ton/jam, variabilitas juga menurun dari 11,555 ton/jam menjadi 1,511 ton/jam. Data tersebut menunjukkan proses menjadi lebih stabil dengan tingkat variabilitas *feed rate* yang rendah.

Hasil evaluasi dari penerapan modifikasi sistem kontrol PID baru menunjukkan lebih mudah bagi operator di ruang CCR untuk mengatur maupun mengawasi level tangki/bin. Kondisi jalur transportasi *fly ash* juga terpantau tidak pernah terjadi penumpukan material saat stop produksi terencana. Kondisi air chamber *fly ash* dan jalur transportasi selalu bersih, serta meningkatkan performa perusahaan dengan tercapainya target CF pada produksi semen PCC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Nurhadi, "Pemanfaatan fly ash sebagai material pozzolanik pada industri semen dan beton," *Jurnal Engineering Technology and Science (JETS)*, vol. 3, no. 1, pp. 45–53, 2025.
- [2] M. Amal, "Pemanfaatan fly ash sebagai mineral admixture pada beton," *Journal of Sustainable Civil Engineering (JOSCE)*, vol. 5, no. 2, pp. 112–120, 2023.
- [3] R. Afriansyah, A. Nugroho, and D. Saputra, "Modifikasi design system penyaluran fly ash dan cement menggunakan metode root cause analysis," in *Proc. Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, vol. 8, no. 1, pp. 215–222, 2024.

- [4] Y. Cao, "Machine learning-based prediction of porosity for concrete containing supplementary cementitious materials," *arXiv preprint*, arXiv:2112.07353, 2021.
- [5] K. Kato, Y. Xin, T. Hitomi, and T. Shirai, "Surface modification of fly ash by mechano-chemical treatment," *arXiv preprint*, arXiv:2202.01779, 2022.
- [6] A. Maulana, H. Prasetyo, and R. Wijaya, "Pengaruh komposisi fly ash terhadap kuat tarik belah beton porous," *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, vol. 4, no. 2, pp. 85–92, 2020.
- [7] N. I. M. Nadzri, J. B. Shamsul, and M. N. Mazlee, "Development and properties of composite cement reinforced coconut fiber with the addition of fly ash," *arXiv preprint*, arXiv:1705.00179, 2017.
- [8] M. Setiawati, "Fly ash sebagai bahan pengganti semen pada beton," in *Proc. Seminar Nasional Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [9] M. Zahlim, R. Firdaus, and T. Hidayat, "Pengaruh penggunaan fly ash sebagai substitusi semen terhadap kuat tekan beton," in *Proc. Seminar Nasional Industri dan Teknologi*, vol. 3, no. 1, pp. 56–63, 2022.
- [10] M. Yusuf, "Pengaruh penggunaan fly ash dari berbagai sumber terhadap karakteristik semen OPC," *Jurnal Riset Kimia*, vol. 11, no. 2, pp. 120–128, 2020.
- [11] M. H. A. Nugraha, "Optimasi feed rate 150 T/H pada cement mill 562-RM1," in *Proc. Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, vol. 7, no. 1, pp. 144–151, 2023.
- [12] M. Saha, "Fly ash composites: A review," *arXiv preprint*, arXiv:2202.11167, 2022.
- [13] D. Karnailia, "Pengaruh substitusi fly ash pada semen dan penggunaan bottom ash pada mortar terhadap kuat tekan mortar," *Jurnal Teknik Sipil dan Infrastruktur*, vol. 7, no. 1, pp. 51–60, 2022.
- [14] A. Karmadi, "Pemanfaatan fly ash sebagai pengganti sebagian semen Portland pada beton ramah lingkungan," *Journal of Environmental Civil Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 33–41, 2024.
- [15] N. Sari, "Evaluasi kinerja alat mill fan di cement mill terhadap efisiensi produksi semen," *Bharasumba: Jurnal Teknik dan Sains*, vol. 3, no. 2, pp. 67–75, 2022.