



Implementasi Sistem *Interlock* Pengumpanan *Strength Enhancer* untuk Meningkatkan Stabilitas Operasi *Cement Mill* Berbasis *Vertical Roller Mill*

Ayu Setyaning Sayekti Poesoko^{1*}, Widya Budi Tanzah², Pratama Sandi Alala³

^{1,2}Prodi Teknik Mesin, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jl. Arief Rachman Hakim No. 100, Kota Surabaya, Jawa Timur

³Prodi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jl. Arief Rachman Hakim No. 100, Kota Surabaya, Jawa Timur

ARTICLE INFO

Keywords: *Vertical Roller Mill, cement mill, interlock system, strength enhancer, process capability.*

ABSTRACT

The operational stability of a Vertical Roller Mill (VRM) is strongly influenced by the continuity of the strength enhancer feeding system. Leakage in the feeding line may cause fluctuations in additive flow and increase mill vibration. This study aimed to evaluate the effect of implementing an automatic interlock system on the operational stability of a cement mill at XYZ Plant. A case study approach was employed using operational data collected before and after implementation. Root Cause Analysis (RCA) was applied to identify the primary cause of the disturbance, followed by the installation of an additional flow meter and development of an automatic interlock system for leakage detection. The effectiveness of the improvement was evaluated using $\bar{X}$ -R control charts and process capability analysis based on cement mill vibration data. The results showed that average vibration decreased from approximately 4.4 mm/s before implementation to 2.3–2.4 mm/s after implementation, while average process variation ($\bar{R}$) decreased from 3.2–3.8 mm/s to 0.5–0.6 mm/s. The percentage of out-of-control observations on both $\bar{X}$ and R control charts decreased to 0%, while Cpk increased from 0.97–1.16 to 3.28–3.60. These results indicate that the interlock system improved the reliability and operational stability of the cement mill.

*Corresponding author: ayusp@itats.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i2.12807>

Received 10 August 2026; Received in revised form 31 August 2026; Accepted 1 September 2026

Available online 5 September 2026

Pendahuluan

Industri semen merupakan salah satu sektor manufaktur yang dituntut untuk menjaga kontinuitas produksi, kualitas produk, dan efisiensi penggunaan energi secara bersamaan. Salah satu tahapan yang paling berpengaruh terhadap pencapaian target tersebut adalah proses penggilingan akhir (*finish grinding*) menggunakan *Vertical Roller Mill* (VRM). Dibandingkan *ball mill*, VRM memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi dan mampu menghasilkan distribusi ukuran partikel yang lebih seragam [1], [2]. *Vertical Roller Mill* (VRM) merupakan salah satu peralatan utama dalam proses penggilingan semen dan memiliki karakteristik operasi yang kompleks karena melibatkan berbagai parameter yang saling berinteraksi. Kondisi operasi tersebut berpengaruh terhadap kinerja dan konsumsi energi proses penggilingan [3]. Namun demikian, kestabilan operasi VRM sangat dipengaruhi oleh kondisi proses, terutama keseimbangan *material bed*, sistem pengumpanan material, serta parameter operasional lainnya. Gangguan pada salah satu parameter tersebut dapat meningkatkan vibrasi [4], mempercepat keausan komponen, bahkan menyebabkan penghentian operasi (*mill trip*) yang berdampak terhadap produktivitas pabrik [2].

Pada proses penggilingan semen, penggunaan *strength enhancer* atau *grinding aid* telah banyak diterapkan untuk meningkatkan efisiensi penggilingan sekaligus memperbaiki karakteristik produk semen [4] serta dapat membantu meningkatkan efisiensi proses dengan mengurangi kecenderungan aglomerasi partikel dan memperbaiki karakteristik aliran material. Bahan aditif ini bekerja dengan mengurangi gaya adhesi antarpartikel sehingga aliran material menjadi lebih baik dan proses penggilingan berlangsung lebih stabil. Selain meningkatkan kuat tekan awal semen, penggunaan *strength enhancer* juga berkontribusi terhadap penurunan konsumsi energi spesifik dan peningkatan kapasitas produksi. [5] Temuan tersebut menunjukkan bahwa konsistensi pengumpanan bahan aditif menjadi

salah satu aspek yang perlu diperhatikan agar manfaat *strength enhancer* dapat diperoleh secara optimal. Namun manfaat tersebut hanya dapat dicapai apabila sistem pengumpanan mampu mempertahankan laju aliran yang konsisten selama proses berlangsung. Ketidaksesuaian laju aliran akibat gangguan pada sistem pengumpanan dapat menyebabkan fluktuasi kondisi operasi dan meningkatkan vibrasi pada *Cement Mill*.

Berdasarkan kondisi operasional di Pabrik XYZ, ditemukan permasalahan berupa kebocoran pada sistem pengumpanan *strength enhancer* yang menyebabkan sebagian bahan aditif tidak masuk ke dalam *cement mill*. Kebocoran tersebut tidak dapat segera dideteksi karena sistem hanya menggunakan satu *flow meter*, sehingga operator baru mengetahui adanya gangguan setelah terjadi peningkatan vibrasi atau penghentian operasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa keandalan sistem instrumentasi memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan operasi, terutama untuk mendeteksi gangguan proses sebelum berkembang menjadi kegagalan operasi yang lebih besar. Permasalahan tersebut menjadi dasar perlunya pengembangan sistem pemantauan yang mampu memberikan deteksi dini secara otomatis terhadap ketidaksesuaian aliran *strength enhancer*.

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas optimasi operasi *Vertical Roller Mill* melalui pengaturan parameter operasi, optimasi grinding aid, maupun peningkatan efisiensi energi [2]. Penelitian lain juga melaporkan penerapan Statistical Process Control (SPC) sebagai metode untuk mengevaluasi kestabilan proses manufaktur [6], [3]. Adapula yang menunjukkan bahwa performa *vertical mill* sangat dipengaruhi oleh parameter operasi seperti tekanan penggilingan, kecepatan putaran, kadar air material, dan kondisi operasi lainnya. Paredes et al. [7] menunjukkan bahwa optimasi parameter tersebut dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi proses penggilingan. Namun, pendekatan tersebut berbeda dengan penelitian ini yang berfokus pada pengembangan sistem deteksi dini terhadap

gangguan pada sistem pengumpanan *strength enhancer*. Namun demikian, kajian mengenai implementasi sistem *Interlock* sebagai mekanisme pengendalian otomatis pada sistem pengumpanan *strength enhancer*, serta pengaruhnya terhadap kestabilan operasi *Cement Mill*, masih relatif terbatas. Selain itu, evaluasi peningkatan performa proses menggunakan kombinasi *Root Cause Analysis (RCA)*, diagram kendali $\bar{X}$ -R, dan analisis kapabilitas proses (Cp dan Cpk) belum banyak dilaporkan pada aplikasi industri semen[2],[8], [9].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penerapan sistem *interlock* pada pengumpanan *Strength Enhancer* terhadap kestabilan operasi *Cement Mill* berbasis *Vertical Roller Mill*. Identifikasi akar penyebab permasalahan dilakukan menggunakan *Root Cause Analysis (RCA)*, kemudian dilanjutkan dengan implementasi flow meter tambahan dan sistem *interlock* otomatis sebagai tindakan perbaikan. Efektivitas penerapan sistem dievaluasi menggunakan diagram kendali $\bar{X}$ -R dan analisis kapabilitas proses berdasarkan data vibrasi *Cement Mill* sebelum dan sesudah implementasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif solusi yang aplikatif dalam meningkatkan keandalan operasi *Cement Mill* serta menjadi referensi penerapan sistem pengendalian otomatis pada industri semen.

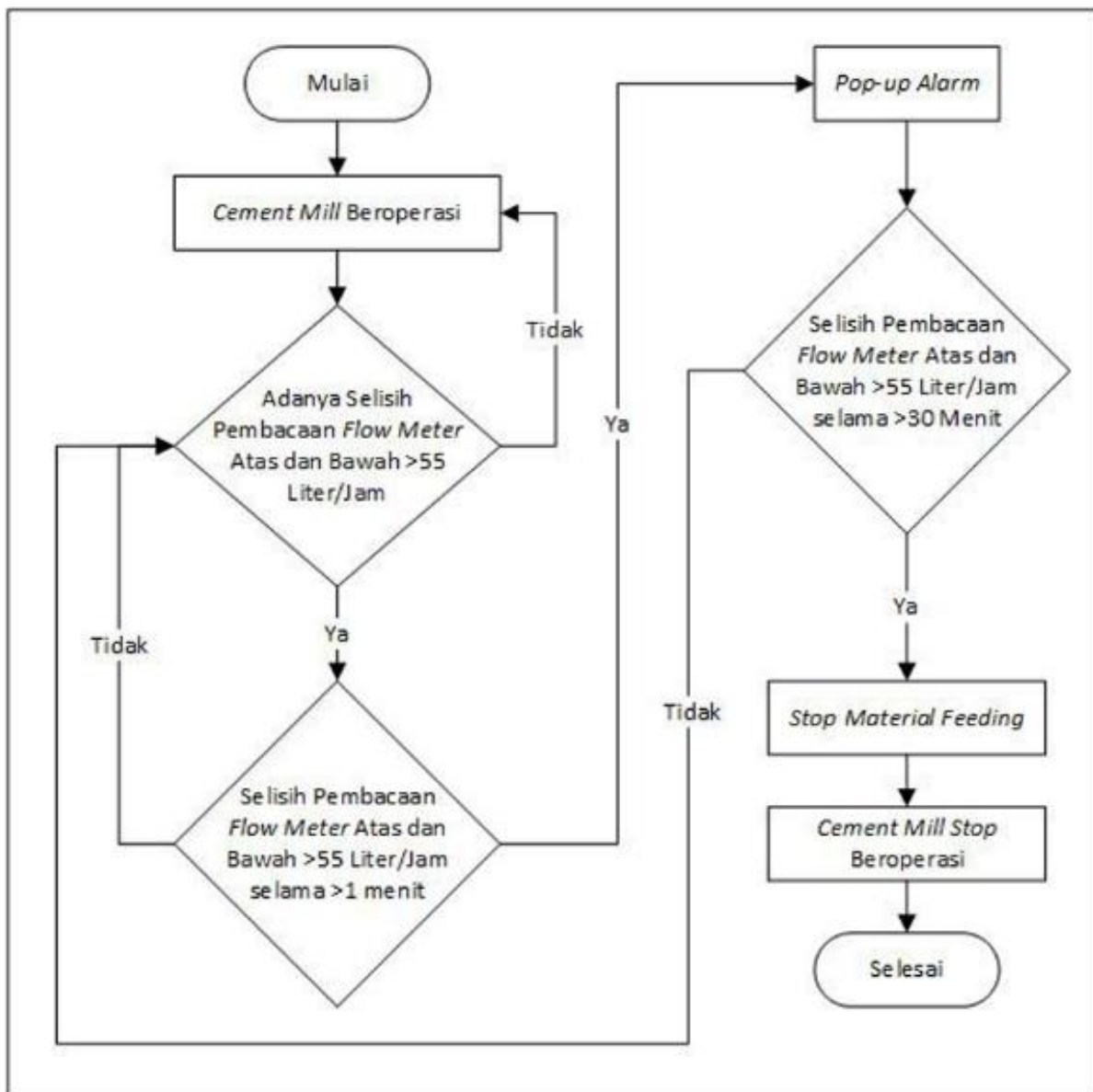
Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus (case study) pada sistem operasi *Vertical Roller Mill (VRM)* di unit *Cement Mill* Pabrik XYZ. Penelitian difokuskan pada evaluasi pengaruh penerapan sistem *Interlock* terhadap kestabilan operasi *Cement Mill* setelah ditemukannya

permasalahan kebocoran pada sistem pengumpanan *Strength Enhancer* [10]. Data yang digunakan merupakan data operasional aktual pabrik yang diperoleh dari Technical Information System (TIS), meliputi data vibrasi *Cement Mill*, data laju aliran *strength enhancer*, serta data penghentian operasi (stop log) sebelum dan sesudah implementasi sistem *Interlock*[9].

Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan menggunakan *Root Cause Analysis (RCA)* untuk menentukan penyebab utama meningkatnya vibrasi pada *Cement Mill*. Analisis dilakukan melalui pendekatan 5 Why Analysis yang dilanjutkan dengan penyusunan beberapa alternatif tindakan perbaikan. Setiap alternatif dievaluasi berdasarkan aspek efektivitas, kemudahan implementasi, biaya, dan keandalan sistem sehingga diperoleh solusi yang paling sesuai untuk diterapkan pada kondisi operasi di lapangan.

Tindakan perbaikan dilakukan dengan memasang flow meter tambahan pada jalur pengumpanan *Strength Enhancer* dan mengembangkan sistem *Interlock* otomatis pada ruang kontrol *Cement Mill*. Sistem yang ditinjau merupakan sistem pengumpanan *strength enhancer* dari tangki penyimpanan menuju *cement mill*. Pada kondisi awal, pengukuran laju aliran hanya dilakukan menggunakan flow meter utama yang berada di sisi hulu. Kondisi tersebut menyebabkan kebocoran pada jalur pengumpanan tidak dapat diketahui secara langsung. Oleh karena itu, ditambahkan flow meter kedua pada sisi hilir untuk membandingkan laju aliran sebelum dan setelah melewati jalur pengumpanan. Perbedaan pembacaan kedua flow meter digunakan sebagai parameter deteksi kondisi abnormal yang selanjutnya menjadi input bagi sistem automatic *interlock*.



Gambar 1. Diagram alir kerja sistem automatic interlock pada pengumpanan Strength Enhancer.

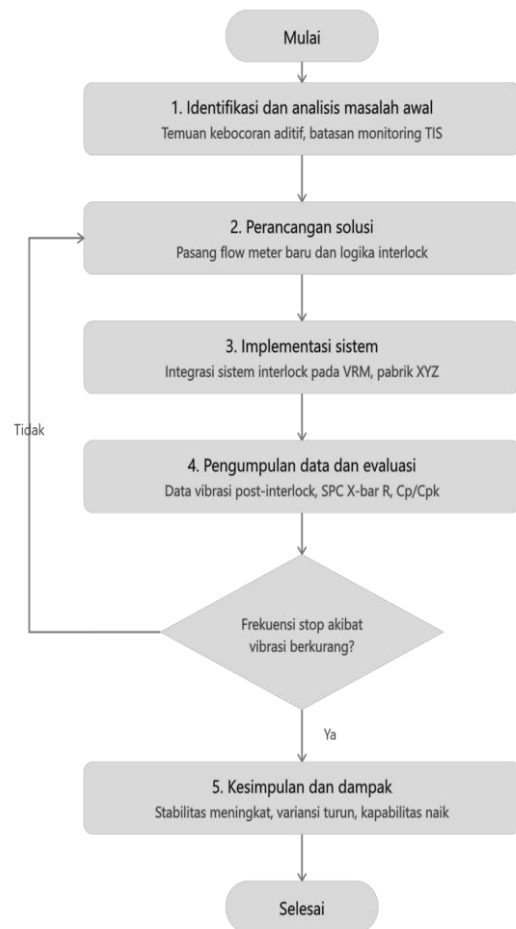
Gambar 1 menunjukkan konfigurasi sistem monitoring dan automatic interlock yang digunakan dalam penelitian. Sistem membandingkan pembacaan flow meter utama dan flow meter tambahan secara real-time. Selisih pembacaan yang melebihi batas toleransi 55 L/jam diidentifikasi sebagai indikasi kebocoran. Apabila kondisi abnormal bertahan sesuai waktu yang telah ditentukan, sistem memberikan alarm dan menjalankan fungsi interlock untuk menghentikan operasi cement mill.

Sistem tersebut dirancang untuk membandingkan pembacaan antara flow meter utama dan flow meter tambahan secara real-time. Apabila terjadi perbedaan laju aliran yang melebihi batas yang telah ditentukan dalam periode waktu tertentu, sistem akan memberikan alarm kepada operator. Apabila kondisi tersebut tetap berlangsung hingga batas waktu yang ditetapkan, sistem *Interlock* secara otomatis menghentikan operasi *Cement Mill* untuk mencegah gangguan operasi yang lebih besar akibat kebocoran pengumpanan strength enhancer.

Evaluasi terhadap efektivitas sistem dilakukan dengan membandingkan kondisi operasi sebelum dan sesudah implementasi *Interlock* [11], [10]. Parameter utama yang dianalisis adalah data vibrasi *Cement Mill* karena parameter tersebut merepresentasikan tingkat kestabilan operasi *Vertical Roller Mill*. Data vibrasi dikelompokkan ke dalam beberapa subgrup pengamatan sesuai metode $\bar{X}$ -R Control Chart untuk mengevaluasi kestabilan proses. Diagram kendali $\bar{X}$ digunakan untuk mengamati perubahan nilai rata-rata proses, sedangkan diagram kendali R digunakan untuk mengevaluasi variasi data dalam setiap subgrup pengamatan [6]. Hasil diagram kendali selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis kapabilitas proses.

Kapabilitas proses dievaluasi menggunakan indeks Cp dan Cpk. Nilai Cp digunakan untuk menggambarkan kemampuan proses berdasarkan penyebaran variasi data terhadap batas spesifikasi, sedangkan nilai Cpk digunakan untuk mengevaluasi kemampuan proses dengan mempertimbangkan posisi rata-rata proses terhadap batas spesifikasi. Perbandingan nilai Cp dan Cpk sebelum serta sesudah implementasi sistem *Interlock* digunakan untuk menilai peningkatan kestabilan operasi *Cement Mill* setelah dilakukan tindakan perbaikan [8].

Secara keseluruhan, tahapan penelitian dapat diringkas menjadi lima tahap utama, yaitu (1) identifikasi akar penyebab menggunakan *Root Cause Analysis*, (2) perancangan tindakan perbaikan melalui pemasangan *flow meter* tambahan dan pengembangan sistem *Interlock*, (3) implementasi sistem pada operasi *Cement Mill*, (4) pengumpulan data operasional sebelum dan sesudah implementasi, serta (5) evaluasi efektivitas sistem menggunakan diagram kendali $\bar{X}$ -R dan analisis kapabilitas proses. Tahapan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 2. Diagram tersebut menunjukkan urutan kegiatan mulai dari identifikasi dan analisis masalah, perancangan solusi, implementasi sistem, pengumpulan dan evaluasi data, hingga penarikan kesimpulan.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Karakteristik objek, lokasi penelitian, data yang digunakan, perangkat lunak, dan metode analisis yang diterapkan dalam penelitian ini dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi penelitian

Parameter	Nilai
Lokasi	<i>Cement Mill XYZ</i>
Objek	<i>Vertical Roller Mill</i>
Data	Vibrasi
Software	Minitab
Metode	RCA, X-R, Cp, Cpk

Hasil dan Pembahasan

Identifikasi Permasalahan Operasi *Cement Mill*

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi penyebab meningkatnya vibrasi pada *Vertical Roller Mill (VRM)*. Berdasarkan data operasional yang diperoleh dari *Technical Information System*

(TIS), peningkatan vibrasi sering diikuti oleh kondisi operasi yang tidak stabil dan beberapa kali menyebabkan penghentian operasi *Cement Mill*. Hasil observasi lapangan menunjukkan bahwa salah satu kondisi yang sering muncul sebelum terjadinya peningkatan vibrasi adalah ketidaksesuaian laju

aliran *Strength Enhancer* akibat kebocoran pada jalur pengumpanan [3]. Kondisi tersebut menyebabkan jumlah bahan aditif yang masuk ke dalam sistem penggilingan tidak sesuai dengan kebutuhan proses sehingga memengaruhi kestabilan material bed di dalam VRM.



Gambar 3. Tren Vibrasi Cement Mill pada Kondisi Kebocoran Strength Enhancer

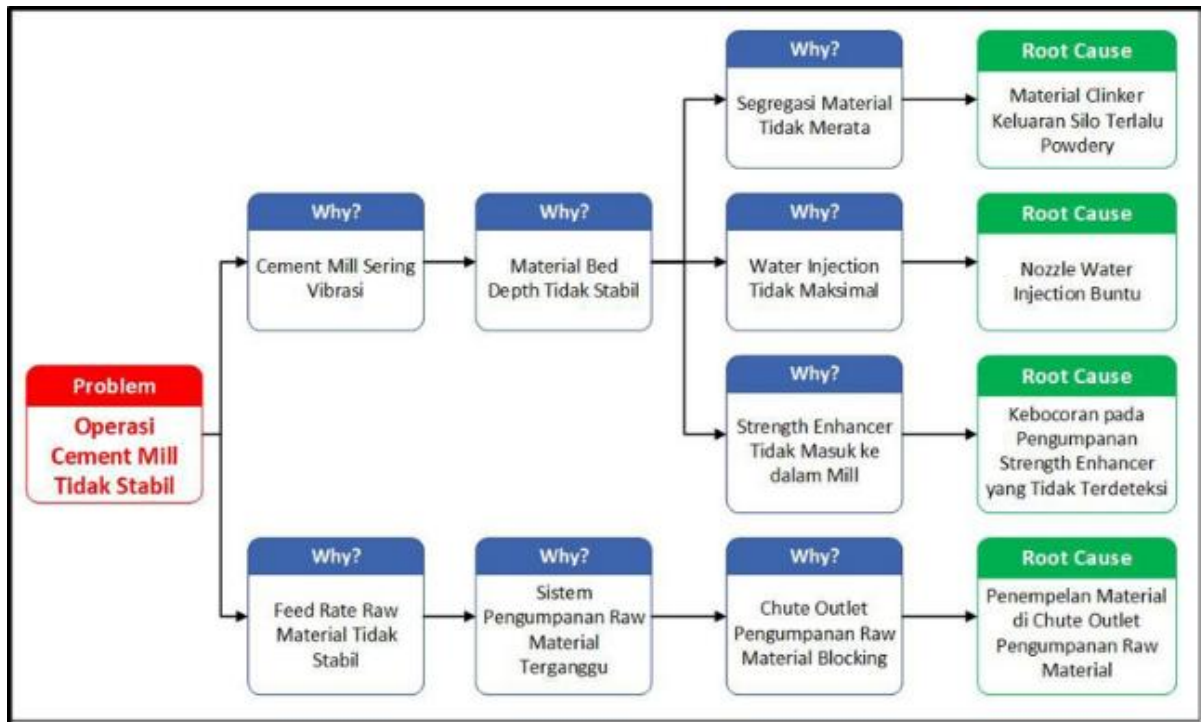
Gambar 3 menunjukkan bahwa peningkatan vibrasi terjadi pada periode ketika terjadi kebocoran pada jalur pengumpanan Strength Enhancer. Pola vibrasi yang berfluktuasi dan mencapai nilai tinggi menunjukkan bahwa kondisi operasi Cement Mill tidak stabil. Data tersebut diperkuat oleh catatan penghentian operasi (stop log) yang menunjukkan beberapa kejadian cement mill stop akibat vibrasi pada periode yang sama. Dengan demikian, identifikasi masalah tidak hanya didasarkan pada hasil observasi lapangan, tetapi juga didukung oleh data historis operasi yang terekam pada Technical Information System (TIS). Bukti yang digunakan dalam mengidentifikasi permasalahan operasi Cement Mill dirangkum pada Tabel 2.

Table 2 Identifikasi Permasalahan Operasi Cement Mill	
Kondisi	Evidence
Kebocoran Strength Enhancer	Terdeteksi pada jalur pengumpanan
Vibrasi meningkat	Tren vibrasi TIS menunjukkan fluktuasi tinggi
Cement Mill stop	Tercatat dalam stop log
Ketidaksesuaian flow	Perbedaan pembacaan dua flow meter

Berdasarkan bukti tersebut, identifikasi masalah tidak hanya didasarkan pada observasi lapangan, tetapi juga didukung oleh data historis operasi yang terekam pada Technical Information System (TIS). Untuk memastikan akar penyebab permasalahan, dilakukan analisis menggunakan Root Cause Analysis (RCA) dengan pendekatan 5 Why. Hasil analisis 5 Why ditunjukkan pada

Gambar 4. Analisis tersebut digunakan untuk menelusuri hubungan antara kebocoran Strength Enhancer, keterbatasan sistem pemantauan, keterlambatan deteksi gangguan, dan penghentian operasi Cement Mill. Selain menimbulkan kehilangan mate-

rial, kebocoran tersebut menyebabkan operator tidak dapat segera mengetahui adanya gangguan karena sistem sebelumnya hanya mengandalkan satu flow meter. Akibatnya, gangguan baru terdeteksi setelah vibrasi meningkat atau proses penggilingan mulai menunjukkan kondisi yang tidak stabil [4].



Gambar 4. Diagram Root Cause Analysis (5 Why)

Rangkuman permasalahan, penyebab, dan dampak yang diperoleh dari analisis RCA disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Root Cause Analysis

Permasalahan	Penyebab	Dampak
Kebocoran <i>strength enhancer</i>	Seal/pipa	Terdapat kondisi vibrasi tinggi pada periode kebocoran
Flow tidak terdeteksi	Hanya satu <i>flow meter</i>	Operator terlambat mengetahui gangguan
Tidak ada <i>Inter-lock</i>	Sistem manual	Cement Mill mengalami <i>stop/trip</i>

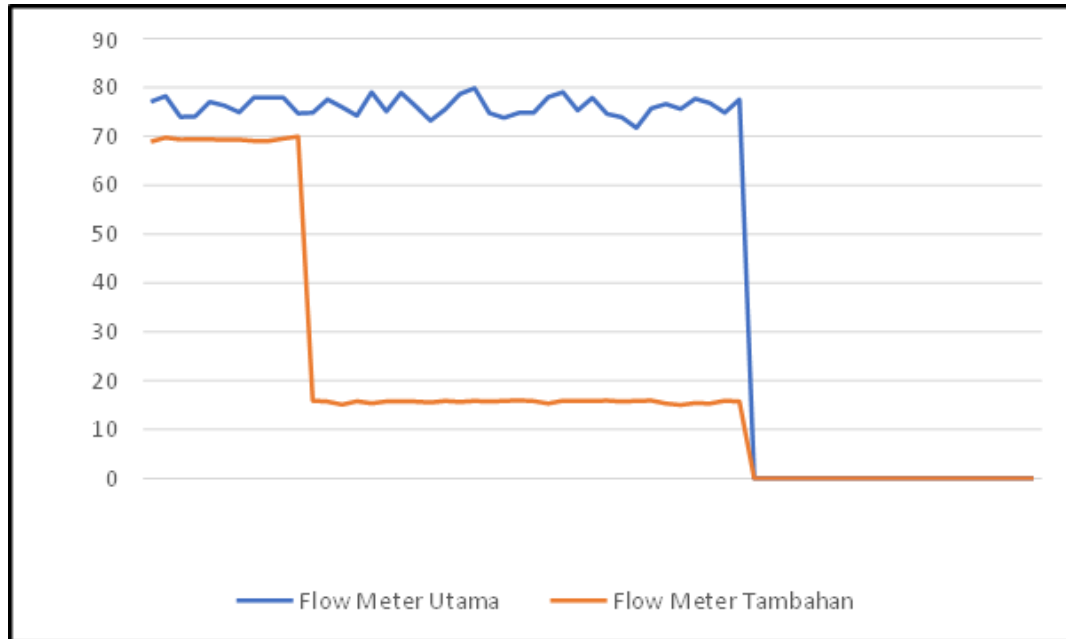
Hasil *Root Cause Analysis* (RCA) menunjukkan bahwa kebocoran pada sistem pengumpanan *Strength Enhancer* merupakan salah satu sumber gangguan utama pada

kontinuitas pengumpanan bahan aditif. Pada periode gangguan tersebut teramati vibrasi *Cement Mill* yang tinggi dan berfluktuasi, serta beberapa kejadian penghentian operasi. Kondisi ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menentukan tindakan perbaikan melalui penambahan flow meter dan penerapan sistem *Interlock*. Kebocoran tersebut mengakibatkan sebagian *Strength Enhancer* tidak masuk ke dalam sistem penggilingan sehingga laju pengumpanan bahan aditif menjadi tidak sesuai dengan kebutuhan proses. Kondisi ini menyebabkan distribusi material di dalam *Vertical Roller Mill* menjadi kurang seragam sehingga keseimbangan material bed terganggu. Ketidakseimbangan tersebut meningkatkan fluktuasi gaya kontak antara grinding roller dan grinding table, yang akhirnya tercermin sebagai peningkatan nilai vibrasi selama operasi.

Implementasi Sistem *Interlock*

Implementasi sistem *Interlock* mengubah mekanisme pengendalian proses dari bersifat reaktif menjadi preventif [10]. Pada sistem sebelumnya, operator baru mengetahui adanya kebocoran setelah terjadi peningkatan vibrasi atau gangguan operasi.

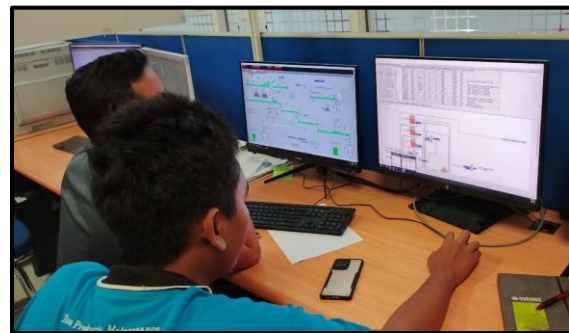
Setelah sistem *Interlock* diterapkan, perbedaan pembacaan antara dua flow meter dapat dideteksi secara real-time [12]. Kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 5, yang memperlihatkan perbedaan pembacaan flow meter utama dan flow meter tambahan pada saat terjadi kebocoran.



Gambar 5. Tren Flow Saat Kebocoran

Perbedaan pembacaan tersebut digunakan sebagai indikator awal untuk memberikan alarm kepada operator. Selain itu Alarm yang dihasilkan memberikan kesempatan kepada operator untuk melakukan tindakan korektif sebelum gangguan berkembang menjadi kondisi yang menyebabkan mill trip [9]. Apabila deviasi aliran tetap berlangsung, sistem secara otomatis menghentikan operasi sehingga kerusakan proses dapat dicegah pada tahap awal.

Implementasi sistem *Interlock* pada ruang kontrol Cement Mill ditunjukkan pada Gambar 6. Sistem tersebut diintegrasikan ke dalam sistem kontrol sehingga kondisi abnormal pada pengumpanan Strength Enhancer dapat dipantau dan ditindaklanjuti oleh operator.



Gambar 6. Implementasi Sistem *Interlock* pada Ruang Kontrol Cement Mill

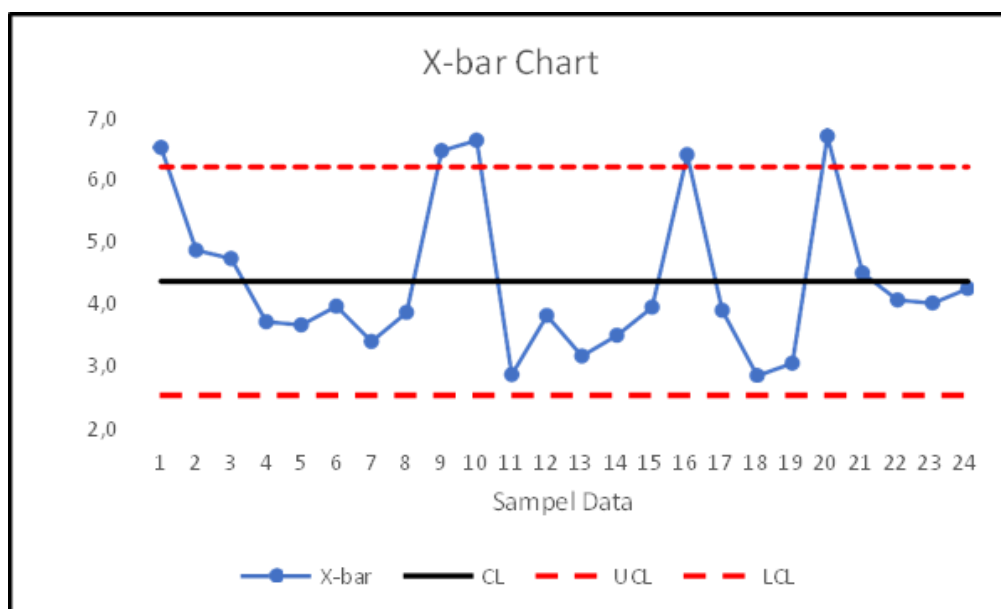
Pendekatan serupa juga diterapkan oleh Iqbal dan Nurahmawati [13] melalui penambahan program *interlock* pada *Distributed Control System* (DCS) *cement mill* untuk memberikan fungsi proteksi terhadap kondisi vibrasi tinggi. Sistem tersebut mampu melakukan penghentian otomatis ketika nilai vibrasi melewati batas yang ditentukan serta menyediakan monitoring secara *real-time*. Perbedaannya, penelitian

ini tidak menggunakan vibrasi sebagai parameter pemicu *interlock*, tetapi menggunakan deviasi laju aliran *strength enhancer* sebagai indikator awal terjadinya gangguan. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan berfungsi pada tahap deteksi yang lebih awal sebelum gangguan tersebut berkembang menjadi peningkatan vibrasi.

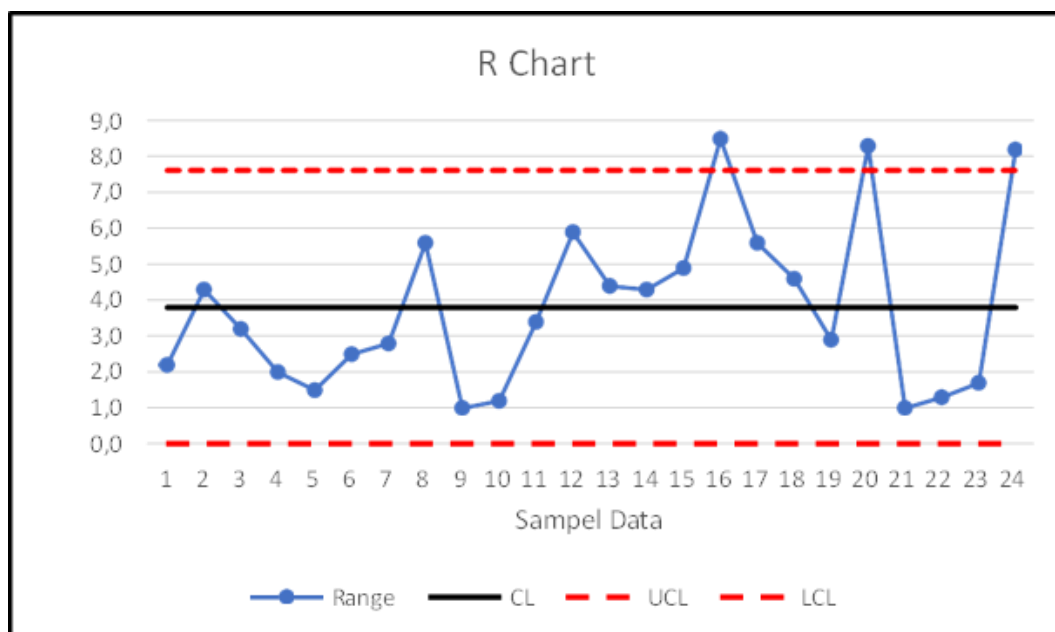
Dengan demikian, tindakan korektif dapat dilakukan sebelum gangguan berkembang menjadi kondisi yang menyebabkan penghentian operasi.

Evaluasi Kestabilan Proses Menggunakan Diagram Kendali

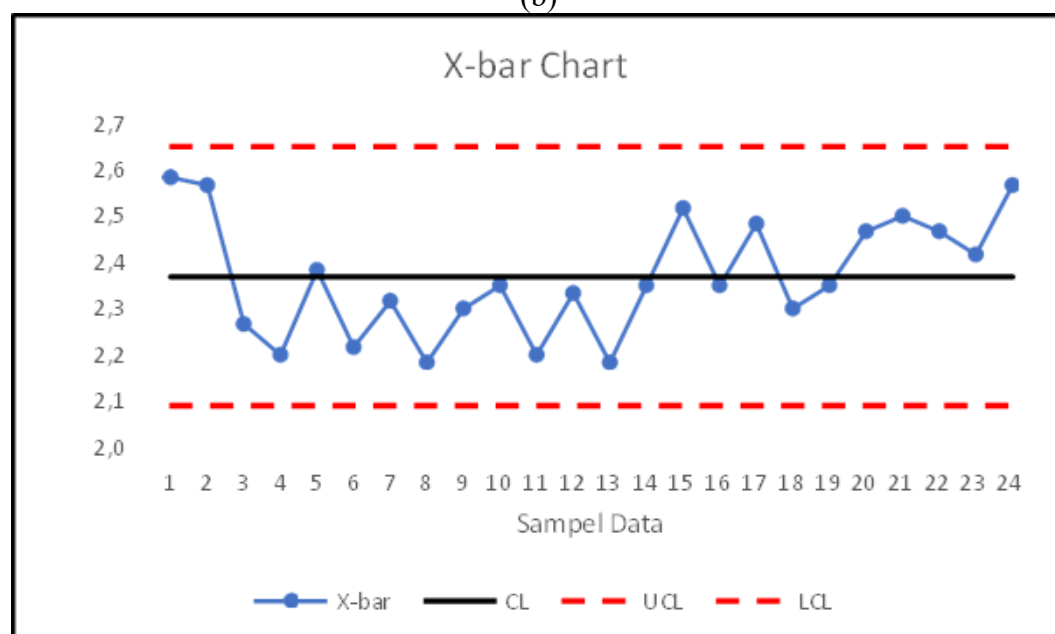
Efektivitas penerapan sistem *Interlock* dievaluasi menggunakan diagram kendali $\bar{X}$ -R berdasarkan data vibrasi *Cement Mill* sebelum dan sesudah implementasi. Pada kondisi sebelum perbaikan, diagram kendali menunjukkan adanya beberapa titik pengamatan yang berada di luar batas kendali. Selain itu, variasi antar subgrup relatif besar sehingga mengindikasikan bahwa proses belum berada dalam kondisi terkontrol secara statistik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa terdapat penyebab khusus (*special cause variation*) yang mempengaruhi kestabilan operasi *Cement Mill*.



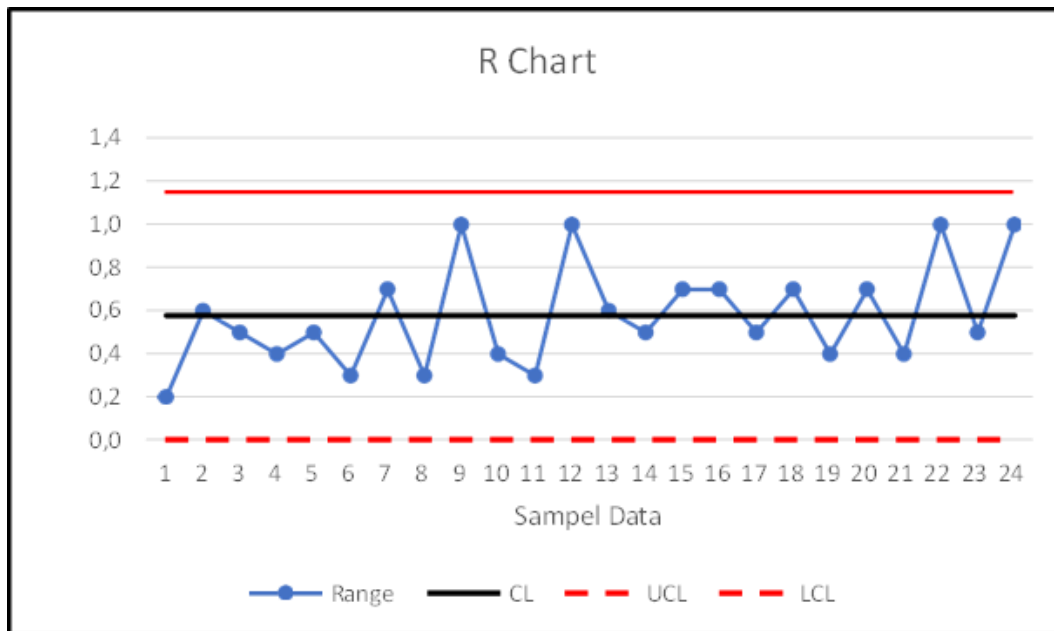
(a)



(b)



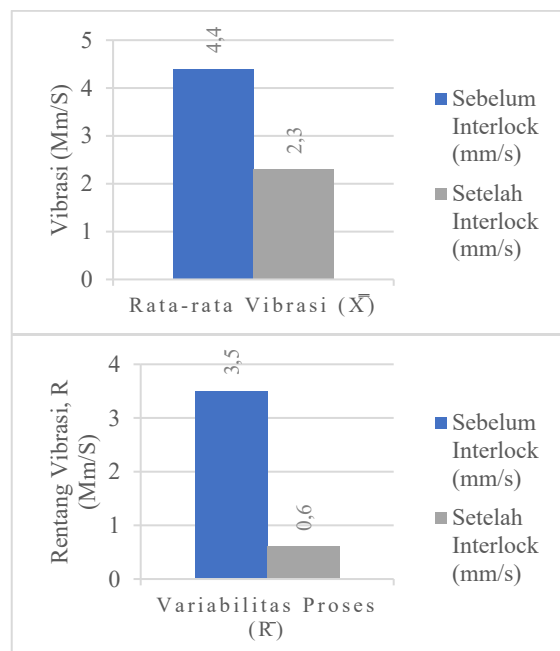
(c)

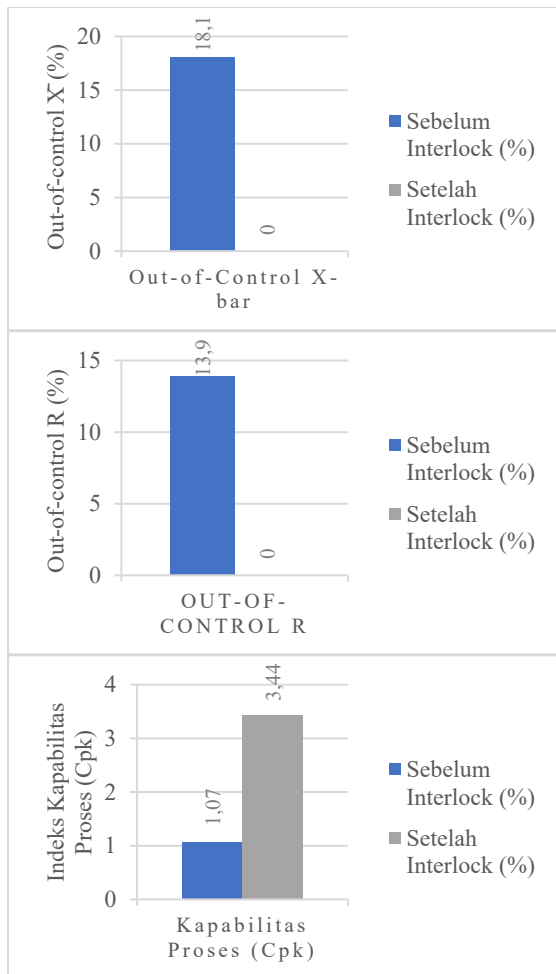


(d)

Gambar 7. (a) Diagram Kendali X-bar Variasi 1 Sebelum (b) Diagram Kendali R Variasi 1 Sebelum (c) Diagram Kendali X-bar Variasi 1 Setelah (d) Diagram Kendali R Variasi 1 Setelah

Gambar 7 memperlihatkan diagram kendali $\bar{X}$ dan R untuk data vibrasi Cement Mill sebelum dan setelah implementasi sistem Interlock. Pada kondisi sebelum implementasi, terdapat beberapa titik pengamatan yang berada di luar batas kendali, sedangkan setelah implementasi seluruh titik pengamatan berada dalam batas kendali. Selain itu, rentang antar-subgrup setelah implementasi terlihat lebih kecil dibandingkan kondisi sebelumnya. Hal ini menunjukkan adanya penurunan variasi proses dan peningkatan kestabilan operasi Cement Mill.





Gambar 8. Perbandingan Stabilitas dan Kapabilitas Proses Sebelum dan Setelah Implementasi Interlock.

Gambar 8 merangkum perbandingan parameter statistik proses sebelum dan setelah implementasi sistem Interlock, meliputi rata-rata vibrasi, rentang proses, persentase out-of-control $\bar{X}$ dan R, serta indeks kapabilitas Cpk. Berdasarkan Gambar 8, rata-rata vibrasi dan variabilitas proses mengalami penurunan setelah implementasi, sedangkan persentase pengamatan *out-of-control* menurun menjadi 0% dan nilai Cpk meningkat.

Kondisi ini mengindikasikan bahwa variasi proses yang sebelumnya dipengaruhi oleh penyebab khusus (*special cause variation*) telah berhasil diminimalkan [6]. Berkurangnya variasi tersebut menunjukkan bahwa sistem pengumpanan *strength enhancer* mampu mempertahankan laju aliran yang lebih konsisten sehingga fluktuasi vibrasi selama operasi *cement mill* menjadi

lebih kecil. Dengan demikian, peningkatan kestabilan proses tidak hanya ditunjukkan oleh posisi titik pengamatan yang berada di dalam batas kendali, tetapi juga oleh pola distribusi data yang lebih seragam dibandingkan kondisi sebelum implementasi. Hasil analisis statistik kondisi sebelum implementasi sistem Interlock untuk tiga variasi pengamatan disajikan pada Tabel 4.

Table 4. Hasil Analisis Statistik Sebelum

Metrik	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3
Rata-rata Vibrasi ($\bar{X}$)	4,4 mm/s	4,4 mm/s	4,4 mm/s
Variabilitas Proses ($\bar{R}$)	3,8 mm/s	3,2 mm/s	3,4 mm/s
<i>Out-of-Control</i> X-bar	20,8%	16,7%	16,7%
<i>Out-of-Control</i> R	12,5%	12,5%	16,7%
Kapabilitas Proses (Cpk)	0,97	1,16	1,09

Tabel 4 menunjukkan bahwa kondisi sebelum implementasi masih memiliki nilai variabilitas dan persentase pengamatan *out-of-control* yang relatif tinggi, dengan nilai Cpk antara 0,97–1,16.

Hasil analisis statistik setelah implementasi sistem Interlock disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Analisis Statistik Setelah

Metrik	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3
Rata-rata Vibrasi ($\bar{X}$)	2,4 mm/s	2,3 mm/s	2,3 mm/s
Variabilitas Proses ($\bar{R}$)	0,6 mm/s	0,5 mm/s	0,6 mm/s
<i>Out-of-Control</i> X-bar	0,0%	0,0%	0,0%
<i>Out-of-Control</i> R	0,0%	0,0%	0,0%
Kapabilitas Proses (Cpk)	3,45	3,60	3,28

Tabel 5 menunjukkan bahwa rata-rata vibrasi menurun menjadi 2,3–2,4 mm/s, variabilitas proses menurun menjadi 0,5–0,6 mm/s, dan seluruh pengamatan berada dalam kondisi terkendali dengan nilai *out-of-control* sebesar 0%. Nilai Cpk juga meningkat menjadi 3,28–3,60.

Setelah sistem Interlock diterapkan, hasil diagram kendali yang ditunjukkan pada Gambar 3 menunjukkan pola yang lebih stabil. Seluruh titik pengamatan berada di dalam batas kendali dan variasi antar-subgrup menjadi lebih kecil dibandingkan kondisi sebelumnya. Perubahan ini menunjukkan bahwa sistem mampu mengurangi variasi proses yang berkaitan dengan gangguan pada pengumpanan *Strength Enhancer*. Dengan berkurangnya variasi proses, operasi Cement Mill menjadi lebih konsisten sehingga potensi terjadinya trip akibat vibrasi tinggi dapat diminimalkan.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengendalian otomatis melalui sistem *Interlock* tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme proteksi peralatan, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan kestabilan proses produksi.

Analisis Kapabilitas Proses

Selain menggunakan diagram kendali, evaluasi juga dilakukan melalui analisis kapabilitas proses menggunakan indeks Cp dan Cpk. Nilai Cp menggambarkan kemampuan proses berdasarkan penyebaran variasi data terhadap batas spesifikasi, sedangkan nilai Cpk menunjukkan kemampuan proses dengan mempertimbangkan posisi rata-rata proses terhadap batas spesifikasi. Perbandingan nilai sebelum dan sesudah implementasi sistem menunjukkan adanya peningkatan kemampuan proses dalam memenuhi batas operasi yang telah ditetapkan.

Peningkatan nilai Cp menunjukkan bahwa penyebaran data vibrasi setelah implementasi sistem *interlock* menjadi lebih kecil dibandingkan kondisi sebelumnya [8]. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi proses berhasil ditekan sehingga kemam-

puan proses dalam memenuhi batas spesifikasi meningkat. Semakin kecil variasi proses, semakin besar peluang operasi berlangsung pada kondisi yang diinginkan tanpa menghasilkan penyimpangan yang berpotensi memicu gangguan operasi. Selain menunjukkan penurunan variasi proses, peningkatan nilai Cpk juga mengindikasikan bahwa rata-rata proses semakin mendekati kondisi operasi yang diharapkan [8]. Selain itu evaluasi kapabilitas proses merupakan bagian penting dalam SPC karena tidak hanya menunjukkan kestabilan proses, tetapi juga kemampuan proses dalam memenuhi batas spesifikasi. Benkova et al. [14] menunjukkan bahwa indeks kapabilitas dapat digunakan sebagai bagian dari evaluasi SPC untuk menilai kemampuan proses berdasarkan karakteristik distribusi data dan batas spesifikasi. Dengan kata lain, implementasi sistem *Interlock* tidak hanya mempersempit penyebaran data vibrasi, tetapi juga menjaga pusat distribusi proses tetap berada di dalam batas spesifikasi. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa sistem pengumpanan *Strength Enhancer* bekerja lebih konsisten sehingga risiko terjadinya penyimpangan proses dapat dikurangi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa kestabilan operasi *Vertical Roller Mill* sangat dipengaruhi oleh konsistensi parameter proses selama penggilingan. Penelitian ini memperluas temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa peningkatan kestabilan proses juga dapat dicapai melalui pengembangan sistem *interlock* pada pengumpanan *strength enhancer*. Selain itu, hasil analisis menggunakan diagram kendali dan indeks kapabilitas proses menunjukkan bahwa pendekatan pengendalian otomatis tidak hanya berfungsi sebagai sistem proteksi, tetapi juga mampu meningkatkan kapabilitas proses secara keseluruhan.

Temuan ini memperkuat hasil evaluasi menggunakan diagram kendali yang menunjukkan bahwa proses setelah implementasi sistem berada pada kondisi yang lebih stabil dibandingkan kondisi sebelum dilakukan perbaikan.

Implikasi Implementasi Sistem *Interlock* terhadap Operasi *Cement Mill*

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem *Interlock* memberikan dampak positif terhadap keandalan operasi *Cement Mill* [9]. Integrasi *flow meter* tambahan dengan sistem *Interlock* memungkinkan deteksi dini terhadap kebocoran *strength enhancer*, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum memengaruhi kestabilan operasi. Pendekatan ini mampu mengurangi variasi vibrasi, meningkatkan kemampuan proses, serta meminimalkan potensi penghentian operasi yang tidak direncanakan [12].

Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi sistem monitoring dan pengendalian otomatis dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan keandalan proses penggilingan. Pawuś dan Paszkiel [15] menunjukkan bahwa pengembangan pendekatan pengendalian pada proses *cement grinding* dapat digunakan untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam merespons perubahan kondisi operasi.

Perkembangan sistem pengendalian pada proses *cement grinding* menunjukkan kecenderungan penggunaan metode otomatis yang mampu merespons perubahan kondisi operasi. [16] mengembangkan metode *self-learning fuzzy predictive control* untuk proses *Cement Mill* yang menggabungkan prediksi kondisi proses dengan pengendalian multivariabel. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa sistem pengendalian yang mampu merespons perubahan kondisi operasi dapat digunakan untuk meningkatkan kemampuan pengendalian proses. Pada penelitian ini, pendekatan yang digunakan lebih sederhana melalui perbandingan laju aliran *Strength Enhancer* dan penerapan logika *Interlock*. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa metode pengendalian dapat disesuaikan dengan karakteristik gangguan yang dihadapi, sehingga sistem tidak harus menggunakan algoritma prediktif yang kompleks untuk memberikan fungsi deteksi dini dan proteksi proses. [17] mengembangkan sistem optimasi *real-time* berbasis XGBoost dan *Q-learning* yang mampu

memprediksi parameter operasi serta melakukan pengendalian terhadap beberapa variabel proses, termasuk *feed rate*, tekanan penggilingan, dan kecepatan separator. Pada penelitian ini, pendekatan tersebut diterapkan dalam bentuk yang lebih sederhana melalui integrasi *flow meter* dan logika *Interlock* untuk mendeteksi ketidaksesuaian aliran *Strength Enhancer* secara *real-time*. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme proteksi terhadap gangguan, tetapi juga sebagai bagian dari pengendalian proses untuk mempertahankan kestabilan operasi *Cement Mill*.

Dari sudut pandang operasional, implementasi sistem *interlock* memberikan manfaat yang tidak hanya terbatas pada penurunan vibrasi. Deteksi dini terhadap kebocoran *Strength Enhancer* memungkinkan tindakan korektif dilakukan lebih cepat sehingga frekuensi penghentian operasi dapat dikurangi. Kondisi ini berpotensi meningkatkan kontinuitas produksi, mengurangi waktu henti (*downtime*), serta mendukung efektivitas program pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*). Dengan demikian, penerapan sistem *Interlock* tidak hanya meningkatkan performa proses, tetapi juga memberikan nilai tambah terhadap keandalan sistem produksi secara keseluruhan.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem *Interlock* pada pengumpanan *Strength Enhancer* memberikan pengaruh positif terhadap kestabilan operasi *Vertical Roller Mill* (VRM) di unit *Cement Mill*. Permasalahan utama yang berasal dari kebocoran pada sistem pengumpanan berhasil diidentifikasi melalui Root Cause Analysis (RCA), sehingga tindakan perbaikan dapat difokuskan pada peningkatan sistem pemantauan dan pengendalian melalui pemasangan *flow meter* tambahan serta pengembangan logika *Interlock* otomatis.

Hasil evaluasi menggunakan diagram kendali $\bar{X}$ -R dan analisis kapabilitas

proses menunjukkan bahwa implementasi sistem *Interlock* mampu meningkatkan kestabilan proses dengan mengurangi variasi vibrasi selama operasi *Cement Mill*. Perbaikan tersebut juga menunjukkan peningkatan kemampuan proses dalam mempertahankan kondisi operasi sesuai batas yang telah ditetapkan, sehingga potensi gangguan operasi akibat ketidaksesuaian pengumpanan *Strength Enhancer* dapat diminimalkan.

Secara praktis, penelitian ini membuktikan bahwa optimalisasi sistem instrumentasi dan pengendalian dapat menjadi solusi yang efektif untuk meningkatkan keandalan operasi *Cement Mill* tanpa memerlukan modifikasi besar pada peralatan utama. Pendekatan yang diterapkan dalam penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi industri semen dalam mengembangkan sistem pemantauan dan pengendalian yang lebih responsif terhadap gangguan proses, sehingga kontinuitas produksi dan efisiensi operasi dapat terus ditingkatkan.

Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pabrik XYZ yang telah memberikan kesempatan dan dukungan selama pelaksanaan penelitian, khususnya dalam penyediaan data operasional yang diperlukan. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya (ITATS), atas dukungan akademik yang diberikan selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini.

Referensi

- [1] C. Liu *et al.*, “Analysis and Optimization of Grinding Performance of *Vertical Roller Mill* Based on Experimental Method,” *Minerals*, vol. 12, no. 2, p. 133, Jan. 2022, doi: 10.3390/min12020133.
- [2] R. Fatahi, H. Nasiri, E. Dadfar, and S. Chehreh Chelgani, “Modeling of energy consumption factors for an industrial cement *Vertical Roller Mill* by SHAP-XGBoost: a ‘conscious lab’ approach,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, p. 7543, May 2022, doi: 10.1038/s41598-022-11429-9.
- [3] R. Fatahi, H. Abdollahi, M. Noapara, and M. Hadizadeh, “Modeling the working pressure of a cement *Vertical Roller Mill* using SHAP-XGBoost: A ‘conscious lab of grinding principle’ approach,” *Powder Technol.*, vol. 457, p. 120923, May 2025, doi: 10.1016/j.powtec.2025.120923.
- [4] C. Liu, Z. Chen, W. Zhang, Y. Mao, P. Xu, and Q. Xie, “Analysis of *Vertical Roller Mill* performance with changes in material properties and operating conditions using DEM,” *Miner. Eng.*, vol. 182, p. 107573, May 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107573.
- [5] Y. Kaya, H. G. Şahin, N. Mardani, and A. Mardani, “Influence of Grinding Aids on the Grinding Performance and Rheological Properties of Cementitious Systems,” *Materials*, vol. 17, no. 21, p. 5328, Oct. 2024, doi: 10.3390/ma17215328.
- [6] S. N. M. Ariffin, M. F. Ibrahim, and N. H. A. Aziz, “Application of Statistical Process Control for Manufacturing Process Improvement: A Review,” *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 2023.
- [7] J. Paredes, J. Cepeda, and J. Lozada, “Parameters for the Grinding Process in Vertical Mills Using Optimization Methods,” *Revista Técnica “energía,”* vol. 20, no. 2, pp. 90–97, Jan.

- 2024, doi: 10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.594.
- [8] G. Besseris, "Modern Process Capability Analysis in Manufacturing Systems," *Qual. Eng.*, 2023.
- [9] D. Pietsch, M. Matthes, U. Wieland, S. Ihlenfeldt, and T. Munkelt, "Root Cause Analysis in Industrial Manufacturing: A Scoping Review of Current Research, Challenges and the Promises of AI-Driven Approaches," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 6, p. 277, Dec. 2024, doi: 10.3390/jmmp8060277.
- [10] E. e Oliveira, V. L. Miguéis, and J. L. Borges, "Automatic root cause analysis in manufacturing: an overview & conceptualization," *J. Intell. Manuf.*, vol. 34, no. 5, pp. 2061–2078, Jun. 2023, doi: 10.1007/s10845-022-01914-3.
- [11] W. Yue, J. Chai, X. Wan, Y. Xie, X. Chen, and W. Gui, "Root cause analysis for process industry using causal knowledge map under large group environment," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 57, p. 102057, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.aei.2023.102057.
- [12] M. McKinney *et al.*, "Unsupervised multimodal fusion of in-process sensor data for advanced manufacturing process monitoring," *J. Manuf. Syst.*, vol. 78, pp. 271–282, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.jmsy.2024.12.003.
- [13] A. Iqbal and A. Nurahmawati, "PENAMBAHAN PROGRAM INTERLOCK DARI SENSOR VIBRASI KE DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM CEMENT MILL TUBAN PLANT SEBAGAI SAFETY DEVICE," *Rekayasa Sistem Energi dan Manufaktur (ReSEM)*, vol. 3, no. 1, pp. 148–157, Mar. 2025, doi: 10.30651/resem.v3i1.21908.
- [14] M. Benková, D. Bednárová, and G. Bogdanovská, "Process Capability Evaluation Using Capability Indices as a Part of Statistical Process Control," *Mathematics*, vol. 12, no. 11, p. 1679, May 2024, doi: 10.3390/math12111679.
- [15] D. Pawuś and S. Paszkiel, "Identification and Expert Approach to Controlling the Cement Grinding Process Using Artificial Neural Networks and Other Non-Linear Models," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 26364–26383, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3366703.
- [16] T. Ma, Z. Li, J. Liu, A. F. Alkhateeb, and H. Jahanshahi, "A novel self-learning fuzzy predictive control method for the *Cement Mill*: Simulation and experimental validation," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 120, p. 105868, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.engappai.2023.105868.
- [17] A. Wan, Y. Gao, W. Liu, R. Yin, and K. Al-Bukhaiti, "Real-Time Optimization of *Vertical Roller Mills* Using XGBoost Prediction and Q-Learning Control," *Computers, Materials & Continua*, vol. 88, no. 2, pp. 1–10, 2026, doi: 10.32604/cmc.2026.081719.