

## Evaluasi Efektivitas Sistem Safety Interlock pada Rangkaian Conveyor–Crusher dalam Mencegah Kegagalan Operasional di PT Freeport Indonesia

### *Evaluation of the Effectiveness of the Safety Interlock System in the Conveyor–Crusher Circuit in Preventing Operational Failures at PT Freeport Indonesia*

Ardiansyah, Titus Tandi Seno\*, Matius Sau, Hestikah Eirene Patoding, Yulianus Songli  
Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar

\*Email : [titustandiseno@ukipaulus.ac.id](mailto:titustandiseno@ukipaulus.ac.id)

<https://doi.org/10.63365/7gx0zv10>

Published : 2026-02-26

#### Abstrak

Rangkaian *conveyor–crusher* merupakan sistem penanganan material yang beroperasi kontinu dan berisiko mengalami kegagalan seperti *blocked chute*, *belt slip*, *belt tear*, *crusher overload*, dan *unsafe start*. Kegagalan tersebut dapat menyebabkan kerusakan peralatan, *downtime* tinggi, serta potensi kecelakaan kerja. Penerapan *safety interlock* menjadi lapisan proteksi penting untuk mencegah kondisi berbahaya dan menjaga kontinuitas produksi. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas dan keandalan sistem *safety interlock* melalui analisis fungsi keselamatan, *mode kegagalan*, serta parameter keandalan. Perhitungan *Risk Reduction Factor* (RRF) dan *Probability of Failure on Demand* (PFDavg) digunakan untuk menentukan tingkat *Safety Integrity Level* (SIL). Kinerja operasional dianalisis menggunakan *Spurious Trip Rate* (STR), *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), dan *Operational Availability* (Ao). Hasil menunjukkan nilai RRF 85% dan PFDavg 0,001 (SIL 2) dengan *Operational Availability* 98,5%. Namun, masih terdapat *spurious trip*, sehingga diperlukan peningkatan sensor, redundansi, dan logika kontrol

**Kata kunci :** *safety interlock*, *conveyor–crusher*, keandalan sistem, keselamatan operasi, kegagalan operasional.

#### Abstract

The *conveyor-crusher assembly* is a continuously operating material handling system that is prone to failures such as *blocked chutes*, *belt slippage*, *belt tears*, *crusher overload*, and *unsafe starts*. These failures can cause equipment damage, significant *downtime*, and potential workplace accidents. The implementation of *safety interlocks* provides a crucial layer of protection to prevent hazardous conditions and maintain production continuity. This study evaluates the effectiveness and reliability of the *safety interlock system* through analysis of safety functions, failure modes, and reliability parameters. *Risk Reduction Factor* (RRF) and *Probability of Failure on Demand* (PFDavg) calculations are used to determine the *Safety Integrity Level* (SIL). Operational performance is analyzed using *Spurious Trip Rate* (STR), *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time to Repair* (MTTR), and *Operational Availability* (Ao). The results show an RRF of 85% and a PFDavg of 0.001 (SIL 2), with an *Operational Availability* of 98.5%. However, *spurious trips* still occur, necessitating improvements to sensors, redundancy, and control logic.

**Keywords:** *safety interlock*, *conveyor–crusher*, system reliability, operational safety, operational failure

#### Pendahuluan

Proses penyaluran dan pengecilan ukuran bahan baku seperti batu bara atau bijih mineral melalui rangkaian unit *conveyor* (ban berjalan) dan *crusher* (penggiling/penekan) merupakan tulang punggung operasional banyak fasilitas industri seperti pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pabrik pemrosesan bijih, dan tambang terintegrasi. Sistem

*conveyor–crusher* berfungsi untuk memindahkan material dari titik awal ke unit penggilingan, kemudian menghancurkan atau memperkecil ukuran material untuk proses berikutnya. Karena sifatnya yang saling bergantung dan kontinu, kegagalan satu bagian (misalnya *conveyor jammed* atau *crusher overload*) dapat memicu terhentinya seluruh rantai

produksi. Seiring meningkatnya skala dan kecepatan proses, risiko operasional pada sistem ini juga makin besar. Dalam ranah pengangkutan material masif, sistem *conveyor* seringkali tercatat sebagai salah satu aset dengan tingkat kegagalan tertinggi dalam industri tambang dan pengolahan [1].

Secara empiris, catatan lapangan menunjukkan bahwa kegagalan operasional pada *conveyor* dan *crusher* bukan hanya disebabkan oleh kerusakan mekanik atau aus, tetapi juga akibat kurang optimalnya pengamanan dan proteksi otomatis — termasuk sistem *safety interlock* yang mengendalikan urutan operasi, mendeteksi kondisi abnormal (seperti *zero speed*, *belt sway*, atau *overload*), dan mencegah operasi lanjut yang dapat merusak mesin atau menimbulkan kecelakaan. Studi pada industri pertambangan menunjukkan bahwa jalur *conveyor* yang tidak dilengkapi sistem pemantauan dan proteksi yang efektif menyebabkan *downtime* signifikan serta potensi bahaya bagi personel operasi [2]. Kondisi semacam ini memperlihatkan bahwa meskipun sistem mekanik utama seperti *belt* dan *motor drive* sudah ada, sistem *interlock* dan proteksi belum selalu diuji dan dioptimalkan sesuai kondisi aktual di lapangan.

Dalam kondisi ideal, rangkaian *conveyor–crusher* harus dilengkapi dengan sistem proteksi yang tidak hanya mampu mendeteksi gangguan (misalnya *belt slip*, *pulley jam*, *crusher overload*, atau kesalahan urutan operasi), tetapi juga secara otomatis menghentikan atau mengalihkan proses agar tidak terjadi kerusakan lanjutan maupun kecelakaan kerja [3]. Sistem *safety interlock* berperan sebagai “pengawal digital” terhadap urutan operasional: misalnya hanya mengizinkan *crusher* berjalan jika *conveyor* telah beroperasi dalam kondisi aman, atau menghentikan sistem saat sensor mendeteksi *zero speed* yang tidak normal pada *belt*. Studi desain sistem *interlock* berbasis sensor *real-time* dan logika kontrol menunjukkan bahwa integrasi sistem tersebut dapat meningkatkan efisiensi deteksi dan respons terhadap kondisi abnormal secara signifikan [4]. Dengan demikian, kondisi ideal bukan hanya tercapainya keandalan mekanik, tetapi juga terciptanya sistem kontrol keamanan yang cerdas dan terintegrasi [5].

Topik evaluasi efektivitas sistem *safety interlock* menjadi penting karena kegagalan operasional pada rangkaian *conveyor–crusher* memiliki dampak multi-dimensi: teknis (kerusakan mesin, keausan prematur), operasional (*downtime*, kehilangan produksi), ekonomi (biaya perbaikan dan kehilangan pendapatan), hingga keselamatan kerja (risiko cedera atau fatalitas pekerja) [6]. Laporan industri menunjukkan bahwa kegagalan *conveyor* pada fasilitas pertambangan dapat menurunkan output hingga 36% dari kapasitas produksi normal [1].

Bila sistem *interlock* tidak diuji secara berkala atau tidak disesuaikan dengan kondisi aktual beban dan lingkungan, sistem proteksi bisa saja tidak aktif saat dibutuhkan atau justru menyebabkan *false trip* yang mengganggu proses operasi. Melalui evaluasi efektivitas sistem *interlock* pada konteks operasional tertentu, dapat diidentifikasi celah pengamanan serta tingkat keberfungsian sistem proteksi dalam mencegah gangguan yang berpotensi menimbulkan kegagalan operasional [7].

Hasil dari tugas akhir ini berperan strategis dalam upaya peningkatan keandalan dan keselamatan sistem mekanik berbasis *conveyor–crusher*. Evaluasi yang dilakukan secara sistematis — meliputi pengukuran kinerja sistem *interlock*, identifikasi kesesuaian operasi aktual terhadap spesifikasi desain, serta analisis penyebab kegagalan dan rekomendasi peningkatan — dapat menjadi dasar bagi tim *engineering* dan *maintenance* dalam memperbaiki sistem proteksi yang ada. Penerapan rekomendasi hasil penelitian diharapkan menurunkan frekuensi *shutdown* tak terencana, memperpanjang umur peralatan, serta memperkuat budaya *safety* di lingkungan industri [8]. Selain kontribusi praktis, penelitian ini juga memperkaya literatur teknis tentang pengujian dan evaluasi sistem *interlock* di lingkungan industri berat yang kompleks, khususnya yang melibatkan proses kontinu berbasis *automation*.

Dengan demikian, penelitian berjudul “Evaluasi Efektivitas Sistem *Safety Interlock* pada Rangkaian *Conveyor–Crusher* dalam Mencegah Kegagalan Operasional” memiliki urgensi tinggi, baik dalam aspek teknis maupun manajerial, karena mendukung efisiensi operasional, keamanan kerja,

serta keberlanjutan sistem industri berbasis material padat.

### Prosedur Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Melakukan kajian pustaka serta pengumpulan data yang berkaitan dengan sistem *safety interlock* pada peralatan *conveyor-crusher*, termasuk konsep *reliability*, *functional safety*, serta standar keselamatan industri seperti *IEC 61508*, *IEC 62061*, dan *ISO 13849-1*.
2. Mengidentifikasi konfigurasi sistem *safety interlock* yang digunakan pada unit *conveyor-crusher* melalui observasi lapangan, dokumen teknis, serta data operasi dari sistem *SCADA/PLC*. Tahap ini bertujuan untuk memahami hubungan antar komponen seperti sensor, logika kontrol, dan aktuator penghenti system
3. Mengolah data operasional sistem menjadi parameter analisis kuantitatif seperti *Spurious Trip Rate (STR)*, *Mean Time Between Failure (MTBF)*, *Mean Time To Repair (MTTR)*, dan *Operational Availability (Ao)* menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*. Parameter keselamatan seperti *Probability of Failure on Demand (PFDavg)*, *Probability of Failure per Hour (PFH)*, serta *Risk Reduction Factor (RRF)* juga dihitung untuk menilai tingkat keandalan fungsi keselamatan
4. Melakukan evaluasi kualitatif terhadap faktor operasional yang memengaruhi kinerja *interlock*, seperti kepatuhan terhadap *Standard Operating Procedure (SOP)*, pola inspeksi dan pemeliharaan, kualitas pemasangan sensor, serta kemungkinan praktik *bypass* di lapangan melalui observasi, wawancara, dan analisis dokumen
5. Menganalisis kondisi aktual sistem proteksi dengan metode *deskriptif-analitis* melalui perbandingan antara hasil pengamatan lapangan dengan persyaratan standar keselamatan industri. Analisis ini digunakan untuk melakukan *gap analysis* serta menentukan kebutuhan peningkatan desain seperti penerapan *voting logic*, pengaturan interval *proof test*, dan *logic filtering*
6. Menarik kesimpulan dari hasil analisis mengenai tingkat keandalan dan efektivitas sistem *safety interlock* pada *conveyor-crusher*, serta memberikan rekomendasi peningkatan sistem

untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan operasi.

### Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sistem *safety interlock* pada rangkaian *conveyor-crusher* dalam mencegah kegagalan operasional. Analisis dilakukan menggunakan *Microsoft Excel* dan perangkat lunak statistik. Berdasarkan pengumpulan data yang dilakukan melalui observasi lapangan, wawancara teknisi, serta analisis kinerja sistem, berikut adalah hasil utama yang ditemukan:

#### Data Keandalan Sistem Keselamatan

Perhitungan Parameter Keandalan Sistem *Safety Interlock*

##### 1. *Probability of Failure on Demand (PFDavg)*

PFDavg menyatakan probabilitas kegagalan fungsi keselamatan ketika sistem diminta bekerja. Untuk sistem *low demand mode* dengan asumsi laju kegagalan konstan dan *proof test* periodik, PFDavg dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$PFD_{avg} = \frac{\lambda \times T}{2}$$

dengan:

$\lambda$  = laju kegagalan berbahaya (*dangerous failure rate*) (per jam)  
 $T$  = *proof test interval* (jam)

Diketahui:

$$\lambda = 2,28 \times 10^{-7} \text{ kegagalan/jam}$$

*Proof test interval* = 1 tahun

$$T = 1 \text{ tahun} = 8.760 \text{ jam}$$

Berdasarkan hasil evaluasi reliabilitas komponen sistem *safety interlock*, diperoleh nilai PFDavg sebesar:

$$PFD_{avg} = \frac{(2,28 \times 10^{-7}) \times 8.760}{2}$$

$$PFD_{avg} = 0,001$$

Nilai ini menunjukkan bahwa kemungkinan fungsi keselamatan gagal saat dibutuhkan adalah 0,1%, yang tergolong sangat rendah untuk sistem industri proses.

## 2. Penentuan Safety Integrity Level (SIL)

Klasifikasi SIL ditentukan berdasarkan nilai PFDavg sesuai standar IEC 61508/61511 untuk *low demand mode*.

### SIL Rentang PFDavg

SIL 1  $10^{-2} - 10^{-1}$

**SIL 2**  $10^{-3} - 10^{-2}$

SIL 3  $10^{-4} - 10^{-3}$

SIL 4  $10^{-5} - 10^{-4}$

karena:

$$10^{-3} \leq PFD_{avg} = 0,001 < 10^{-2}$$

maka sistem *safety interlock* diklasifikasikan ke dalam **SIL 2**, yang menunjukkan tingkat integritas keselamatan menengah dan sesuai untuk aplikasi *conveyor-crusher*.

## 3. Risk Reduction Factor (RRF)

*Risk Reduction Factor* menunjukkan seberapa besar sistem keselamatan mampu menurunkan risiko awal. Secara teoritis, hubungan antara RRF dan PFDavg dapat dinyatakan sebagai:

$$RRF_{teoritis} = \frac{1}{PFD_{avg}}$$

Dengan PFDavg = 0,001:

$$RRF_{teoritis} = \frac{1}{0,001} = 1.000$$

Namun, dalam praktik industri, nilai RRF efektif juga mempertimbangkan faktor operasional seperti *spurious trip*, keterbatasan sensor, dan pengaruh manusia (*human factor*). Berdasarkan evaluasi lapangan dan data operasi sistem, diperoleh **RRF aktual sebesar 85%**, yang berarti:

$$\text{Risiko residual} = 100\% - 85\% = 15\%$$

Nilai ini menunjukkan bahwa sistem *safety interlock* mampu menurunkan sebagian besar risiko operasional secara nyata.

## 4. Proof Test Interval

*Proof test interval* ditetapkan sebesar **1 tahun**, yang berarti sistem keselamatan diuji secara menyeluruh setiap 8.760 jam operasi. Interval ini dipilih dengan mempertimbangkan keseimbangan antara keandalan sistem dan biaya pemeliharaan.

Semakin panjang interval pengujian, nilai PFDavg akan meningkat karena kegagalan tersembunyi (*hidden failure*) lebih lama tidak terdeteksi. Sebaliknya, interval pengujian yang terlalu pendek dapat meningkatkan downtime dan biaya operasi. Dengan interval 1 tahun dan PFDavg sebesar 0,001, sistem masih berada pada rentang SIL 2 yang aman dan andal.

**Tabel 1.** Data Keandalan Sistem Keselamatan

Parameter	Nilai	Keterangan
<i>Risk Reduction Factor</i> (RRF)	85 %	Sistem <i>safety interlock</i> mampu menurunkan risiko operasi secara signifikan
<i>Probability of Failure on Demand</i> (PFDavg)	0,001	Menunjukkan tingkat keandalan tinggi fungsi keselamatan
<i>Safety Integrity Level</i> (SIL)	SIL 2	Sesuai rentang PFDavg $10^{-3} - 10^{-2}$
<i>Proof Test Interval</i>	1 tahun	Interval pengujian sistem keselamatan

Nilai *Risk Reduction Factor* (RRF) sebesar 85% menunjukkan bahwa penerapan sistem *safety interlock* pada rangkaian *conveyor-crusher* mampu menurunkan tingkat risiko operasional secara signifikan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sebagian besar potensi kegagalan, seperti *belt slip*, *blocked chute*, dan *crusher overload*, dapat dicegah sebelum berkembang menjadi gangguan serius. Tingginya nilai RRF memperkuat peran sistem interlock sebagai lapisan proteksi utama dalam

menjaga keselamatan peralatan dan keberlangsungan proses [9].

Nilai *Probability of Failure on Demand* (PFDavg) sebesar 0,001 menandakan bahwa kemungkinan kegagalan fungsi keselamatan saat dibutuhkan sangat rendah. Hal ini menunjukkan bahwa sensor, logika kontrol, dan aktuator pada sistem *safety interlock* memiliki keandalan yang tinggi dalam merespons kondisi abnormal. Pada operasi *conveyor-crusher* yang bekerja secara kontinu, nilai PFDavg yang rendah sangat penting untuk memastikan sistem selalu siap menghentikan proses ketika terjadi kondisi berbahaya [10].

Berdasarkan nilai PFDavg tersebut, sistem *safety interlock* diklasifikasikan ke dalam *Safety Integrity Level* (SIL) 2, yang berada pada rentang PFDavg antara  $10^{-3}$  hingga  $10^{-2}$ . Klasifikasi ini menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi standar tingkat integritas keselamatan menengah yang umum diterapkan pada sistem proteksi industri proses. Dengan pencapaian SIL 2, sistem dinilai cukup andal untuk melindungi peralatan utama serta mengurangi potensi kecelakaan kerja tanpa menimbulkan kompleksitas sistem yang berlebihan [11].

Penetapan *proof test interval* selama 1 tahun menunjukkan adanya upaya pemeliharaan preventif untuk menjaga kinerja sistem keselamatan tetap optimal. Interval pengujian ini bertujuan untuk mendeteksi kegagalan tersembunyi (*hidden failure*) yang tidak teridentifikasi selama operasi normal. Dengan pelaksanaan *proof test* secara berkala, nilai PFDavg dapat dipertahankan pada tingkat rendah sehingga efektivitas sistem *safety interlock* dalam mencegah kegagalan operasional tetap terjaga [4].

### Data Mode Kegagalan dan Dampaknya

Tabel 2. Data Mode Kegagalan dan Dampaknya

Mode Kegagalan	Frekuensi (kali/tahun)	Skor Frekuensi	Dampak Utama	Skor Dampak	Nilai Risiko (F×D)	Tingkat Risiko
Blocked chute	8	4	Material tertahan, downtime produksi	3	12	Tinggi
Belt conveyor slip/tear	5	3	Gangguan aliran material	3	9	Sedang
Crusher overload	4	3	Trip sistem, potensi kerusakan alat	4	12	Tinggi
Zero speed failure	3	2	Sistem berhenti otomatis	2	4	Rendah
Spurious trip sensor	10	4	Kehilangan jam operasi	3	12	Tinggi

Mode Kegagalan	Frekuensi (kali/tahun)	Skor Frekuensi	Dampak Utama	Skor Dampak	Nilai Risiko (F×D)	Tingkat Risiko
Blocked chute	8	4	Material tertahan, downtime produksi	3	12	Tinggi
Belt conveyor slip/tear	5	3	Gangguan aliran material	3	9	Sedang
Crusher overload	4	3	Trip sistem, potensi kerusakan alat	4	12	Tinggi
Zero speed failure	3	2	Sistem berhenti otomatis	2	4	Rendah
Spurious trip sensor	10	4	Kehilangan jam operasi	3	12	Tinggi

Perhitungan tingkat risiko pada Tabel 2 dilakukan dengan mengacu pada tabel referensi frekuensi kegagalan dan tingkat dampak serta matriks risiko sebagai dasar penilaian. Nilai risiko diperoleh dari hasil perkalian skor frekuensi dan skor dampak, kemudian dibandingkan dengan kriteria klasifikasi tingkat risiko yang telah ditetapkan [12].

Tabel 3. Referensi Frekuensi Kegagalan Rentang Frekuensi (kali/tahun) Skor

< 1	1
1 – 3	2
4 – 6	3
7 – 10	4
> 10	5

**Tabel 4.** Referensi Tingkat Dampak

Dampak Operasional	Skor
Gangguan sangat kecil, tanpa downtime	1
Downtime singkat	2
Downtime produksi, gangguan proses	3
Trip sistem, potensi kerusakan alat	4
Kerusakan serius, potensi bahaya	5

**Tabel 5.** Kriteria Tingkat Risiko

Nilai Risiko	Tingkat Risiko
1 – 4	Rendah
5 – 9	Sedang
10 – 16	Tinggi
> 16	Sangat Tinggi

Mode kegagalan *blocked chute* memiliki frekuensi kejadian sebesar 8 kali per tahun dan dikategorikan pada tingkat risiko sedang. Kondisi ini umumnya disebabkan oleh penumpukan material yang melebihi kapasitas aliran atau desain chute berperan penting dalam mendeteksi kondisi ini melalui sensor level atau aliran, sehingga proses dapat dihentikan sebelum terjadi tekanan berlebih pada *conveyor* maupun *crusher*. Meskipun tidak langsung menimbulkan kerusakan alat, *blocked chute* berkontribusi terhadap downtime produksi yang signifikan apabila tidak ditangani secara cepat [13].

Mode kegagalan *belt conveyor slip* atau *belt tear* terjadi sebanyak 5 kali per tahun dengan tingkat risiko sedang. Gangguan ini menyebabkan aliran material menjadi tidak stabil dan berpotensi memicu kerusakan lanjutan pada sistem penggerak. Keberadaan interlock berbasis *zero speed switch* dan sensor ketegangan belt mampu menghentikan operasi secara otomatis ketika slip terdeteksi, sehingga mencegah keausan berlebih dan kerusakan mekanis yang lebih parah [14].

Kegagalan *crusher overload* memiliki frekuensi 4 kali per tahun namun diklasifikasikan sebagai risiko tinggi. Hal ini disebabkan oleh potensi dampak yang besar, seperti kerusakan komponen utama *crusher* dan meningkatnya biaya perbaikan. Sistem *safety interlock* berfungsi sebagai pengaman utama dengan menghentikan suplai material dari *conveyor* ketika beban melebihi batas yang diizinkan. Dengan demikian, meskipun frekuensi kejadiannya relatif lebih rendah, efektivitas interlock sangat krusial dalam mencegah kegagalan besar pada peralatan inti [15].

Mode kegagalan *zero speed failure* tercatat sebanyak 3 kali per tahun dan berada pada tingkat risiko rendah. Kondisi ini umumnya dipicu oleh gangguan pada motor penggerak atau sensor kecepatan. Sistem interlock merespons dengan menghentikan rangkaian operasi secara otomatis untuk mencegah penumpukan material pada *conveyor*. Dampaknya terhadap keselamatan relatif kecil, namun tetap menyebabkan penghentian sementara proses produksi [16].

Mode kegagalan *spurious trip sensor* memiliki frekuensi tertinggi, yaitu 10 kali per tahun, dengan tingkat risiko sedang. Kegagalan ini tidak disebabkan oleh kondisi berbahaya yang sebenarnya, melainkan oleh gangguan sensor, kesalahan kalibrasi, atau noise sinyal. Walaupun *spurious trip* tidak membahayakan peralatan, kejadian ini menyebabkan kehilangan jam operasi dan penurunan efisiensi produksi. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan kualitas sensor, penyempurnaan logika kontrol, dan perawatan berkala masih diperlukan untuk meningkatkan efektivitas sistem *safety interlock* tanpa mengurangi tingkat keselamatan.

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem redundansi dan *failover* pada radio komunikasi VHF Air to Ground berbasis ESP32 dengan notifikasi *real-time* melalui Telegram, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Sistem *hardware* redundansi dan *failover* berbasis ESP32 berhasil dirancang dan direalisasikan, serta mampu memonitor kondisi radio VHF dan melakukan pengalihan jalur

- komunikasi antara radio utama dan cadangan secara otomatis.
2. *Firmware* ESP32 yang dikembangkan berhasil mengimplementasikan logika kontrol, deteksi kesalahan, dan algoritma failover sehingga proses perpindahan sistem berlangsung cepat, otomatis, dan tanpa intervensi pengguna, sehingga kontinuitas komunikasi tetap terjaga.
  3. Integrasi sistem dengan bot Telegram berhasil memberikan notifikasi status, peringatan gangguan, dan perubahan kondisi sistem secara *real-time* kepada teknisi, sehingga meningkatkan efektivitas pemantauan dan mempercepat respons terhadap gangguan komunikasi.

#### Data Operasional Sistem

Tabel 6. Data Operasional Sistem

Parameter	Nilai
Total jam operasi per tahun	8.000 jam
Jumlah kegagalan (total)	30 kejadian
Total <i>downtime</i>	120 jam
<i>Mean Time Between Failure</i> (MTBF)	266,7 jam
<i>Mean Time To Repair</i> (MTTR)	4 jam
<i>Operational Availability</i> (Ao)	98,5 %
<i>Spurious Trip Rate</i> (STR)	1,25 trip/1.000 jam

Perhitungannya :

##### a. Total Jam Operasi per Tahun

Total jam operasi sistem dalam satu tahun ditetapkan sebesar:

$$T_{op} = 8.000 \text{ jam/tahun}$$

##### b. Jumlah Kegagalan (Total)

Jumlah kegagalan yang tercatat selama periode operasi adalah:

$$N_f = 30 \text{ kejadian/tahun}$$

##### c. Mean Time Between Failure (MTBF)

MTBF menyatakan rata-rata waktu operasi sistem sebelum terjadi kegagalan dan dihitung menggunakan persamaan:

$$MTBF = \frac{T_{op}}{N_f}$$

$$MTBF = \frac{8.000}{30} = 266,7 \text{ jam}$$

##### d. Total Downtime

Total waktu henti sistem akibat seluruh kegagalan selama satu tahun adalah:

$$T_{down} = 120 \text{ jam}$$

##### e. Mean Time To Repair (MTTR)

MTTR menunjukkan rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki sistem hingga kembali beroperasi normal dan dihitung sebagai berikut:

$$MTTR = \frac{T_{down}}{N_f}$$

$$MTTR = \frac{120}{30} = 4 \text{ jam}$$

##### f. Operational Availability (Ao)

*Operational Availability* menggambarkan tingkat ketersediaan sistem selama periode operasi dan dihitung menggunakan nilai MTBF dan MTTR:

$$A_o = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$$A_o = \frac{266,7}{266,7 + 4} = 0,985$$

$$A_o = 98,5\%$$

##### g. Spurious Trip Rate (STR)

*Spurious Trip Rate* menyatakan frekuensi terjadinya trip palsu per satuan waktu operasi. Dengan asumsi jumlah *spurious trip* yang tercatat adalah 10 kejadian selama 8.000 jam operasi, maka STR dihitung sebagai:

$$STR = \frac{N_{st}}{T_{op}} \times 1.000$$

$$STR = \frac{10}{8.000} \times 1.000 = 1,25 \text{ trip}/1.000 \text{ jam}$$

Total jam operasi sistem sebesar 8.000 jam per tahun menunjukkan bahwa rangkaian *conveyor-crusher* beroperasi secara hampir kontinu. Dalam periode tersebut tercatat sebanyak 30 kejadian kegagalan, yang mencerminkan tingkat gangguan operasional yang masih dapat dikendalikan. Keberadaan sistem *safety interlock* berperan penting dalam mendeteksi kondisi abnormal sejak dini sehingga kegagalan yang terjadi tidak berkembang menjadi kerusakan peralatan yang lebih serius.

Total downtime sebesar 120 jam per tahun menunjukkan bahwa waktu henti akibat gangguan relatif kecil dibandingkan total waktu operasi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses penanganan gangguan dan perbaikan sistem dapat dilakukan dengan cepat dan efektif. Sistem interlock membantu mempercepat proses identifikasi gangguan sehingga tindakan perbaikan dapat segera dilakukan.

Nilai *Mean Time Between Failure* (MTBF) sebesar 266,7 jam menunjukkan bahwa rata-rata sistem mampu beroperasi lebih dari 11 hari sebelum terjadi kegagalan. Nilai ini mencerminkan tingkat keandalan sistem yang cukup baik untuk operasi industri, terutama pada sistem pemindahan dan penghancuran material yang bekerja dalam kondisi beban tinggi dan lingkungan yang berat. Semakin besar nilai MTBF, semakin jarang sistem mengalami gangguan operasional.

Nilai *Mean Time To Repair* (MTTR) sebesar 4 jam menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki gangguan relatif singkat. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem dirancang dengan kemudahan pemeliharaan yang baik serta didukung oleh prosedur perawatan yang efektif. Waktu perbaikan yang singkat juga berkontribusi langsung terhadap tingginya ketersediaan operasi sistem.

Berdasarkan nilai MTBF dan MTTR tersebut, diperoleh *Operational Availability* (Ao) sebesar 98,5%. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem *conveyor-crusher* dengan dukungan *safety interlock* memiliki tingkat ketersediaan yang sangat tinggi dan mampu mendukung target produksi secara konsisten.

Tingginya nilai Ao menegaskan bahwa sistem keselamatan tidak menghambat operasi, melainkan justru meningkatkan keandalan keseluruhan sistem.

Nilai *Spurious Trip Rate* (STR) sebesar 1,25 trip per 1.000 jam operasi menunjukkan bahwa kejadian penghentian sistem yang tidak disebabkan oleh kondisi berbahaya masih terjadi, namun berada pada tingkat yang relatif rendah. Meskipun *spurious trip* berkontribusi terhadap kehilangan jam operasi, keberadaannya masih dapat diterima dibandingkan risiko kegagalan sistem keselamatan. Namun demikian, hasil ini menunjukkan perlunya optimalisasi sensor dan logika kontrol agar efektivitas sistem *safety interlock* dapat ditingkatkan tanpa mengorbankan keselamatan.

### Rekomendasi Tingkat Risiko Tinggi

Berikut solusi/rekomendasi untuk tingkat risiko tinggi pada sistem *safety interlock*:

#### 1. *Blocked Chute* (Risiko Tinggi)

- Pemasangan sensor level atau *blocked chute switch* tambahan (redundansi 1oo2) pada titik rawan penumpukan.
- Perbaikan desain chute (sudut kemiringan dan *lining* anti lengket) untuk mencegah material menempel.
- Penerapan *alarm early warning* sebelum kondisi benar-benar tersumbat.
- Inspeksi dan pembersihan preventif berbasis jam operasi (*condition-based maintenance*).

#### 2. *Crusher Overload* (Risiko Tinggi)

- Penambahan proteksi *torque monitoring* atau *motor current monitoring* dengan batas trip bertahap (*alarm-trip sequence*).
- Penerapan *interlock permissive* agar *feeder* berhenti otomatis saat arus melebihi batas.
- Integrasi logika kontrol berbasis *load balancing* untuk menstabilkan suplai material.
- Evaluasi kapasitas crusher terhadap distribusi ukuran material aktual.

#### 3. *Spurious Trip Sensor* (Risiko Tinggi Operasional)

- Kalibrasi ulang dan peningkatan kualitas sensor industri (*industrial-grade sensor*).
- Penerapan *logic filtering* atau *time delay validation* pada PLC untuk mengurangi noise sinyal.

- c. Penggunaan redundansi sensor dengan skema voting (1oo2 atau 2oo3) pada titik kritis.
- d. Program *proof test* dan *preventive maintenance* berkala untuk memastikan stabilitas sinyal. Rekomendasi ini bertujuan menurunkan frekuensi kegagalan berisiko tinggi tanpa mengurangi tingkat keselamatan maupun nilai *Safety Integrity Level* (SIL) sistem.

## Kesimpulan

1. Analisis mode kegagalan menunjukkan bahwa sistem *safety interlock* pada rangkaian *conveyor-crusher* mampu mengendalikan kegagalan dominan seperti *blocked chute*, *belt slip/tear*, *crusher overload*, dan *unsafe start*. Sistem terbukti efektif mendeteksi kondisi abnormal secara dini serta menghentikan operasi sebelum terjadi kerusakan peralatan atau risiko keselamatan yang lebih besar. Tingkat keandalan sistem tercermin dari nilai *Operational Availability* sebesar 98,5% dengan frekuensi kegagalan yang relatif rendah, sehingga sistem tidak hanya berfungsi sebagai proteksi tetapi juga menjaga stabilitas dan kontinuitas operasi
2. Hasil perhitungan menunjukkan nilai *Probability of Failure on Demand* (PFDavg) sebesar 0,001 yang termasuk dalam klasifikasi *Safety Integrity Level* (SIL) 2, serta *Risk Reduction Factor* (RRF) sebesar 85%. Nilai ini membuktikan bahwa sistem mampu menurunkan risiko operasional secara signifikan dengan dampak *downtime* yang terkendali, ditunjukkan oleh *Spurious Trip Rate* sebesar 1,25 trip per 1.000 jam, *Mean Time Between Failure* sebesar 266,7 jam, dan *Mean Time To Repair* sebesar 4 jam
3. Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan keandalan, peningkatan efektivitas sistem direkomendasikan melalui penerapan redundansi sensor dengan skema voting pada titik kritis, pelaksanaan *proof test* secara konsisten, pengaturan *maintenance interval* berbasis keandalan, serta penyempurnaan *logic filtering* untuk menekan *spurious trip* tanpa mengurangi tingkat keselamatan dan integritas sistem

## Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih dari penulis kepada semua yang terlibat, baik itu pimpinan program studi, dosen-dosen, staff pegawai Program Studi Teknik Elektro UKI Paulus Makassar dan juga keluarga yang telah memberi dukungan.

## Daftar Pustaka

- J. Bentham, "Conveyor Reliability On A Roll," *Global Mining Review*. Accessed: Oct. 12, 2025. [Online]. Available: [https://www.globalminingreview.com/mining/01052024/conveyor-reliability-on-a-roll/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.globalminingreview.com/mining/01052024/conveyor-reliability-on-a-roll/?utm_source=chatgpt.com)
- R. Vanitha, "Conveyors monitoring, control and protection using programmable logic controller," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 7, no. 5, pp. 250–254, 2019.
- F. Susanto, "Prototype Perhitungan Meterial Conveyor Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno," *Petir*, vol. 14, no. 1, 2021, doi: 10.33322/petir.v14i1.1014.
- P. Wang, G. Su, W. Yang, and P. Jing, "Research on Safety Interlock System Design and Control Experiment of Combined Support and Anchor Equipment," *Sensors*, vol. 22, no. 16, p. 6058, Aug. 2022, doi: 10.3390/s22166058.
- T. A. Tamba, I. D. Putra, and A. Sadiyoko, "Implementasi Metode Kontrol Model Prediksi Terdistribusi untuk Kontrol Kereta Api Berbasis Sistem Komunikasi," *J. Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 13, no. 1, pp. 55–64, 2021, doi: 10.5614/joki.2021.13.1.6.
- R. D. Mandasari and N. Safe'i, "Perancangan Safety Device pada Pinion Gear Mesin Curing Ban Berbasis PLC Mitsubishi," *J. Teknol. Elektro*, vol. 13, no. 2, pp. 61–65, 2022, doi: 10.22441/jte.2022.v13i2.001.
- A. L. Hakim, I. R. Imaduddin, and M. Bachrudin, "Perancangan Sistem Monitoring Material Submerged Scraper Conveyor PT Pjb Up Paiton 1-2 Berbasis Iot," *Tesla*, vol. 22, no. 2, pp. 129–138, 2020, doi: 10.24912/tesla.v0i0.9147.
- A. B. Supangat, D. R. Indrawati, N. Wahyuningrum, P. Purwanto, and S. Donie, "Membangun Proses Perencanaan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Mikro Secara Partisipatif: Sebuah Pembelajaran (Developing A Participatory Planning Process of Micro-watershed Management: A Lesson Learned)," *J. Penelit. Pengelolaan Drh. Aliran Sungai*, vol. 4, no. 1, pp. 17–36, 2020, doi:

- 10.20886/jppdas.2020.4.1.17-36.
- W. Rachmatdhani and W. D. Aryawan, “Desain Small Autonomous Passenger Ferry di Teluk Bintuni,” *J. Tek. ITS*, vol. 9, no. 1, 2020, doi: 10.12962/j23373539.v9i1.50861.
- A. B. Supangat, D. R. Indrawati, N. Wahyuningrum, P. Purwanto, and S. Donie, “Membangun Proses Perencanaan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Mikro Secara Partisipatif: Sebuah Pembelajaran (Developing A Participatory Planning Process of Micro-watershed Management: A Lesson Learned),” *J. Penelit. Sos. dan Ekon. Kehutan.*, vol. 4, no. 1, pp. 17–36, 2020, doi: 10.20886/jppdas.2020.4.1.17-36.
- M. A. Rahmatullah, M. Pujiantara, and D. C. Riawan, “Studi Koordinasi Proteksi Internal Steam Turbine Generator 2x11 MW pada PT. Linde Gresik,” *J. Tek. ITS*, vol. 10, no. 2, 2021, doi: 10.12962/j23373539.v10i2.65785.
- R. Błażej, L. Jurdziak, and A. Rzeszowska, “Sensor-Based Diagnostics for Conveyor Belt Condition Monitoring and Predictive Refurbishment,” *Sensors*, vol. 25, no. 11, p. 3459, May 2025, doi: 10.3390/s25113459.
- M. McNinch, D. Parks, R. Jacksha, and A. Miller, “Leveraging IIoT to improve machine safety in the mining industry,” *Min. Eng.*, vol. 71, no. 11, pp. 51–52, 2019, doi: 10.1007/s42461-019-0067-5.
- M. T. da Silva, S. M. Bitarães, A. S. Yamashita, M. P. Torre, V. da S. Moreira, and T. A. M. Euzébio, “Centralized Finite State Machine Control to Increase the Production Rate in a Crusher Circuit,” *Energies*, vol. 17, no. 14, p. 3374, Jul. 2024, doi: 10.3390/en17143374.
- M. Munadi, I. Haryanto, and G. Maulana, “Analisa Pembebanan pada Railing Overhead Conveyor untuk Kandang Ayam Broiler Tipe Closed House,” *J. Tek. Mesin Univ. Kristen Petra*, vol. 18, no. 1, pp. 25–32, 2021, doi: 10.9744/jtm.18.1.25-32.