

Analisis Efektivitas Sistem Alarm Pada Distributed Control System (DCS) Dalam Mendukung Keandalan Operasi Industri

Dery Irawan^{1*}

¹ Program Studi Program Profesi Insinyur, Institut Teknologi Indonesia, Kota Tangerang Selatan

*Penulis Korespondensi: dery.irawan@iti.ac.id

Abstract. *A distributed control system (DCS) is the backbone of modern process facility operations, but the complexity and the sheer number of control signals often trigger alarm floods, causing operators to receive a large number of alarms in a short time, which reduces alertness and decision-making ability. This study aims to analyze the effectiveness of the alarm system in a DCS at a processing facility with reference to the ANSI/ISA-18.2 standard, and to evaluate its impact on operational reliability. The research method combines quantitative analysis of six months of historical alarm logs—divided into pre-implementation (baseline) and post-implementation of alarm rationalization phases—with a qualitative assessment of operator workload. The results show that under initial conditions, the average alarm reached 45 alarms per hour per operator, far exceeding the recommended limit (<6 alarms per hour). After implementing rationalization actions, including adjusting the deadband, setting on-delay and off-delay timers, and reorganizing alarm priorities, the number of alarms was successfully reduced by 78% to an average of 9.8 alarms per hour. The significant reduction in nuisance and chattering alarms correlated with a 42% increase in operator response time to critical alarms. These findings indicate that systematic, standardized, and continuous alarm management not only reduces the cognitive load on operators but also lowers the probability of unplanned shutdowns, thereby contributing to improved reliability, safety, and operational efficiency in processing facilities.*

Keywords: *alarm flood; alarm rationalization; distributed control system; ISA-18.2; operational reliability.*

Abstrak. Sistem otomatis terdistribusi (DCS) merupakan tulang punggung operasi fasilitas proses modern, namun tingkat kompleksitas dan banyaknya sinyal pengendalian sering memicu fenomena alarm flood yang menyebabkan operator menerima sejumlah besar alarm dalam waktu singkat, sehingga menurunkan kewaspadaan dan kemampuan pengambilan keputusan. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas sistem alarm pada DCS di sebuah fasilitas pemrosesan dengan rujukan pada standar ANSI/ISA-18.2, serta mengevaluasi dampaknya terhadap keandalan operasi. Metode penelitian menggabungkan analisis kuantitatif atas log alarm historis selama enam bulan—dibagi menjadi fase pra-implementasi (baseline) dan pasca-implementasi rasionalisasi alarm—dengan penilaian kualitatif mengenai beban kerja operator. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi awal, rata-rata alarm mencapai 45 alarm per jam per operator, jauh melampaui batas rekomendasi (<6 alarm per jam). Setelah penerapan tindakan rasionalisasi yang meliputi penyesuaian deadband, pengaturan timer on-delay dan off-delay, serta penataan ulang prioritas alarm, jumlah alarm berhasil dikurangi sebesar 78% menjadi rata-rata 9,8 alarm per jam. Pengurangan signifikan pada nuisance alarms dan chattering alarms berkorelasi dengan peningkatan waktu respons operator terhadap alarm kritis sebesar 42%. Temuan ini mengindikasikan bahwa pengelolaan alarm yang sistematis, terstandarisasi, dan berkelanjutan tidak hanya mengurangi beban kognitif operator, tetapi juga menekan probabilitas terjadinya unplanned shutdown, sehingga berkontribusi pada peningkatan keandalan, keselamatan, dan efisiensi operasional fasilitas pemrosesan.

Kata kunci: alarm flood; distributed control system; ISA-18.2; keandalan operasi; rasionalisasi alarm.

1. LATAR BELAKANG

Dalam era Revolusi Industri 4.0, kompleksitas pabrik pengolahan, kilang minyak, dan pembangkit listrik meningkat pesat. Sistem otomasi terdistribusi *Distributed Control System* (DCS) kini menjadi infrastruktur utama untuk memantau dan mengendalikan ribuan instrumen lapangan secara real-time. Komponen krusial dalam interaksi antara DCS dan operator manusia adalah sistem alarm, yang berfungsi memberi peringatan terhadap kondisi abnormal atau deviasi proses yang memerlukan intervensi segera demi mencegah kerusakan peralatan, dampak lingkungan, atau kecelakaan keselamatan (Goel et al., 2017). Meski vital, kemudahan konfigurasi alarm pada perangkat lunak DCS modern sering memicu praktik *over-engineering*, di mana insinyur memasang terlalu banyak alarm pada berbagai variabel proses tanpa mempertimbangkan batasan kognitif operator.

Situasi seperti ini menyebabkan masalah yang biasa disebut alarm *overload* atau *flood*. Menurut standar internasional ANSI/ISA-18.2 tentang manajemen sistem alarm untuk industri proses, beban alarm yang aman bagi seorang operator tidak boleh melebihi enam alarm per jam, dengan puncak maksimum dua alarm per sepuluh menit (ANSI/ISA, 2016). Namun, dalam kenyataannya, banyak fasilitas melaporkan bahwa operator mengalami ratusan bahkan ribuan alarm setiap jam, terutama dalam kasus gangguan proses. Dalam situasi seperti ini, operator mengalami *overload* informasi, yang merupakan fenomena psikologis di mana terlalu banyak sinyal mengganggu kesadaran situasi, yang dapat menyebabkan pengabaian alarm penting dan meningkatkan kemungkinan membuat keputusan yang salah yang dapat menyebabkan *shutdown* yang tidak direncanakan.

Banyak upaya untuk mengurangi manajemen alarm ditunjukkan dalam tinjauan literatur. Wang et al. (2018) meneliti efek desain antarmuka *Human Machine Interface* (HMI) terhadap kecepatan respons operator dengan menggunakan metode data mining untuk menemukan pola korelasi antar-alarm dan membuat mekanisme supresi otomatis; metode ini mampu mengurangi alarm sekitar 35%, tetapi membutuhkan kapasitas komputasi tinggi dan perubahan arsitektur DCS. Klein dan Smith (2020) melakukan penelitian ini hanya dengan simulasi laboratorium dan tidak melakukan validasi pada data historis pabrik nyata. Meskipun demikian, Wijaya & Santoso (2022) menggunakan rasionalisasi dasar untuk pembangkit listrik dengan berkonsentrasi pada penghapusan

alarm chattering. Namun, penelitian tersebut belum mengaitkan perbaikan metrik alarm dengan metrik keandalan operasional seperti waktu intervensi operator atau *Mean Time Between Failures* (MTBF).

Kajian tersebut menunjukkan kelemahan dalam penelitian: banyak studi berkonsentrasi pada mengurangi jumlah alarm dengan menggunakan algoritma atau metode statistik, tetapi hanya sedikit yang menghubungkan perbaikan kinerja alarm menurut siklus hidup ISA-18.2 dengan peningkatan reliabilitas kognitif operator dan efeknya terhadap keandalan operasional secara langsung. Berdasarkan metodologi ISA-18.2, analisis kinerja sistem alarm telah diintegrasikan dengan pengukuran empiris waktu respons operator dan korelasinya terhadap penurunan kejadian deviasi operasi (*proses trips*). Ini adalah kebaruan ilmiah artikel ini. Metode ini melihat alarm sebagai bagian dari sistem interaksi manusia-mesin yang menentukan reliabilitas pabrik, bukan sekadar data untuk direduksi.

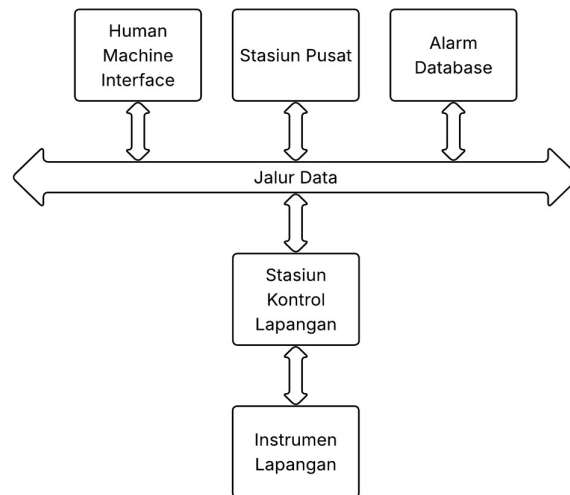
Fokus penelitian adalah sebagai berikut: (1) seberapa efektif sistem alarm pada DCS dalam kondisi saat ini dibandingkan dengan standar manajemen alarm internasional; dan (2) bagaimana penerapan strategi rasionalisasi alarm berdampak pada peningkatan kinerja sistem alarm dan keandalan operasi pabrik? Hipotesis yang diajukan menyatakan bahwa penggunaan teknik rasionalisasi seperti prioritas ulang, pengaturan *delay timer*, dan penyesuaian *deadband* secara signifikan mengurangi alarm *nuisance* dan meningkatkan stabilitas operasi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat bagaimana kinerja sistem alarm di suatu fasilitas industri bekerja sebelum dan setelah rasionalisasi, dan juga untuk memvalidasi bagaimana hal itu berdampak pada parameter keandalan operasional. Selain menghasilkan bukti nyata, penelitian ini bertujuan untuk membuat kerangka kerja praktis berbasis data yang dapat digunakan oleh industri proses lain untuk mengoptimalkan fungsi DCS. Dengan pencapaian ini, diharapkan fasilitas industri dapat meningkatkan aspek keamanan proses dan mengurangi kerugian yang disebabkan oleh penghentian operasi tidak terencana.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini adalah studi terapan dengan pendekatan metode campuran (*mixed methods*), mengintegrasikan analisis kuantitatif terhadap data historis dengan evaluasi kualitatif atas intervensi ergonomis pada operasional. Lokasi penelitian adalah sebuah

fasilitas pengolahan gas bumi (*gas processing plant*) yang beroperasi 24 jam nonstop, dipilih karena dinamika prosesnya tinggi dan ketergantungan kuat pada sistem pemantauan terpusat. Fokus pengambilan data diarahkan pada unit pemisahan gas (*gas separation unit*) dan unit kompresi yang diawasi oleh satu konsol operator pada sistem DCS Yokogawa CENTUM VP. Observasi tidak melibatkan instrumen mekanis kecil atau pemeriksaan manual pada peralatan lapangan; sebaliknya penelitian memanfaatkan arsitektur utama fasilitas yang meliputi *Field Control Station*, *Human Interface Station*, dan server basis data alarm terintegrasi (*Alarm Information Management System*).



Gambar 1 Skema Arsitektur Sistem Alarm Terintegrasi pada *Distributed Control System* (DCS)

Pengumpulan data berlangsung dalam dua periode operasional masing-masing selama tiga bulan. Periode pertama mencakup pengambilan data historis sebelum intervensi (*baseline*), sedangkan periode kedua mencakup periode pasca implementasi rasionalisasi alarm. Data yang diekstrak dari server DCS meliputi *event logs*, histori alarm, durasi aktifnya alarm, dan waktu pengakuan oleh operator (*operator acknowledgment time*). Indikator kinerja utama (*Key Performance Indicators*) yang dianalisis disesuaikan secara ketat dengan pedoman internasional manajemen alarm, yakni ANSI/ISA-18.2 dan IEC 62682.

Adapun tolak ukur kinerja yang diukur dan dianalisis meliputi:

1. Rata-rata tingkat alarm (*Average Alarm Rate*): Jumlah total alarm yang berbunyi dibagi dengan jumlah jam pengamatan, dengan target standar kurang dari 6 alarm per jam.

2. Persentase waktu alarm flood (*Time in Alarm Flood*): Persentase waktu di mana laju alarm melebihi 10 alarm per 10 menit, dengan target standar kurang dari 1% dari total waktu operasi.
3. Proporsi alarm yang terlalu sering berbunyi (*Chattering Alarms*): Alarm yang berstatus aktif/pasif berulang kali dalam waktu singkat (lebih dari 3 kali dalam 1 menit), yang ditargetkan dapat dihilangkan secara keseluruhan.
4. Alarm basi (*Stale/Standing Alarms*): Alarm yang dibiarkan aktif secara terus-menerus lebih dari 24 jam karena kerusakan instrumen atau kondisi pabrik yang normal tetapi menyebabkan deviasi ambang batas (target: < 5 alarm pada satu waktu).

Tahapan pelaksanaan rasionalisasi alarm mengikuti siklus hidup manajemen alarm yang terstruktur. Pertama, tahap Identifikasi, yaitu analisis menyeluruh terhadap seluruh log alarm untuk menentukan 10 penyumbang alarm tertinggi. Kedua, tahap Evaluasi dan Rasionalisasi, yang melibatkan panel multidisipliner beranggotakan *Process Engineer*, *Instrument Engineer*, dan *Operator*, untuk menelaah fungsi tiap alarm. Pada tahap ini dilakukan justifikasi kausalitas; bila sebuah alarm tidak mensyaratkan tindakan korektif dari operator untuk memperbaiki proses, maka alarm tersebut dikonversi menjadi notifikasi (*event*) atau dihapus dari tampilan prioritas. Ketiga, tahap Desain Detail dan Implementasi, di mana logika DCS dimodifikasi dengan memasukkan algoritme rekayasa seperti penetapan *deadband* (histeresis) antara 1%–5% dari rentang pengukuran instrumen untuk meredam noise sinyal, serta penerapan timer on-delay dan off-delay berdurasi 5–15 detik untuk menangani fluktuasi sementara. Keempat, pengolahan data observasi dilakukan menggunakan perangkat lunak spreadsheet dan analisis statistik deskriptif untuk membandingkan indikator kinerja antara kedua periode. Kecepatan intervensi dievaluasi berdasarkan rata-rata waktu yang diperlukan operator untuk mengakui (*acknowledge*) alarm prioritas tinggi. Semua langkah eksperimen dijalankan secara luring (*offline*) sehingga tidak mengganggu operasi *live*, demi menjaga keselamatan dan kontinuitas operasi fasilitas.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Kinerja Sistem Alarm Eksisting (Sebelum Rasionalisasi)

Hasil ekstraksi data dari server Alarm Information Management System selama periode tiga bulan pertama (fase dasar) menunjukkan tingkat beban data yang diterima operator. Hasil analisis statistik deskriptif menunjukkan bahwa jumlah total kejadian alarm yang muncul di layar stasiun operator sangat besar, rata-rata 32.400 per bulan, atau 45 alarm per jam. Fakta saintifik ini menunjukkan bahwa fasilitas industri beroperasi di luar standar yang disarankan oleh kesepakatan internasional. Jika frekuensi alarm di bawah 6 alarm per jam, sistem alarm dianggap "*Robust*" menurut standar ANSI/ISA-18.2, sedangkan kondisi 45 alarm per jam dianggap sebagai "*Overload*" atau tidak dapat diterima (*unacceptable*). Sistem saraf operator menganggap kedipan cahaya dan suara sirine pada monitor DCS sebagai kebisingan latar (*background noise*), bukan peringatan bahaya (Izadi et al., 2018). Fenomena kognitif yang disebut alarm desensitization menyebabkan peningkatan angka ini.

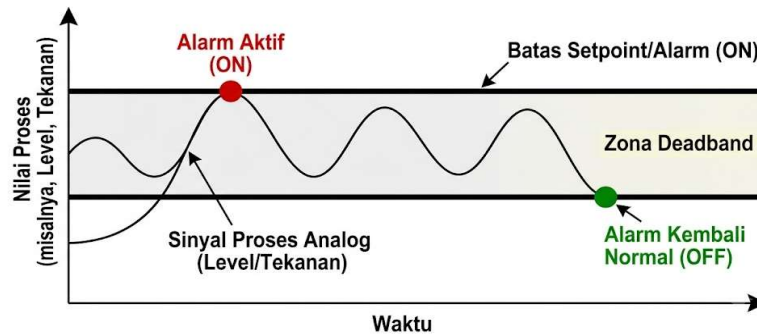
Untuk melakukan analisis lebih mendalam tentang temuan ilmiah ini, kita harus menentukan alasan di balik kondisi overload ini. Sebuah audit menyeluruh terhadap konfigurasi rekayasa (*engineering configuration*) DCS menunjukkan bahwa sistem mengalami masalah persepsi terkait dengan desain instrumen. Pertama, sebagian besar alarm instrumen analog, seperti pemancar tekanan dan level, disetel dengan titik batas yang sangat dekat dengan ambang operasi normal tanpa memperhitungkan dinamika fluktuasi fluida. Akibatnya, riak-riak kecil dari aliran benda cair dua fasa (dua fasa) di bejana pemisah memungkinkan variabel proses melintasi nilai ambang batas berulang-ulang dalam hitungan detik. Fenomena fisik ini berubah menjadi peringatan suara. Data log menunjukkan bahwa dari total 45 alarm per jam, hanya sepuluh instrumen utama—dikenal sebagai *Top 10 Bad Actors*—menyumbang sekitar 60%.

Selain itu, penelitian tambahan menunjukkan bahwa persentase alarm yang berdiri rata-rata sebesar 35 alarm per hari. Hal ini terjadi karena perubahan mode operasi, seperti mematikan pompa cadangan (*standby pump*), yang menyebabkan instrumen tekanan pada jalur menampilkan status "*Low Pressure Alarm*". Padahal, kondisi "*Low Pressure*" pada pompa yang tidak sedang menyala adalah kondisi fisik yang wajar dan bukan indikasi malfungsi. Sistem otomasi gagal mengenali operasi berbasis kondisi, atau operasi

berbasis kondisi. Akibatnya, layar HMI operator penuh dengan alarm yang tidak penting, yang mengganggu kemampuan untuk membedakan alarm penting.

Implementasi Rasionalisasi Sistem Alarm

Proses rasionalisasi dimulai pada basis data DCS setelah memahami fenomena ilmiah dasar penyebab membludaknya alarm. Pertama, parameter deadband diubah. Secara saintifik, *deadband* adalah rentang nilai di mana sinyal keluaran (*output*) tidak berubah meskipun sinyal masukan (*input*) berubah sedikit. Sebagai contoh, jika alarm "Level Tinggi" pada tangki penampung disetel pada 80% dan diberi deadband sebesar 2%, maka alarm akan aktif saat level cairan naik ke 80.1%. Namun, ketika level cairan turun sedikit ke 79.9%, alarm tidak akan otomatis menjadi pasif (jelas), melainkan hanya akan menjadi pasif ketika level cairan benar-benar turun ke level stabil di bawah 78%.



**Gambar 2 Ilustrasi Implementasi Algoritma Deadband pada Sinyal Fluktuatif
untuk Mengeliminasi *Chattering Alarm***

Menurut Rothenberg (2018), penyesuaian matematis sederhana ini secara efektif menghentikan tren osilasi sinyal yang disebabkan oleh turbulensi fluida di dalam bejana tertutup. Ini menghilangkan alarm palsu yang sebelumnya terus menyala-mati selama milidetik.

Timer, alat komputasi logika pewaktuan, digunakan dalam intervensi kedua. Alat pengukur laju aliran (transmitter aliran) gas kompresor sangat rentan terhadap denyut turbulensi mendadak, atau lonjakan mendadak. Untuk tujuan ini, *timer delay* dipasang selama 5 detik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembukaan dan penutupan katup kendali secara sekilas menyebabkan banyak gangguan aliran yang hanya berlangsung secara transien selama 2-3 detik. Dengan timer on-delay, DCS diperintahkan untuk menahan penayangan alarm. Jika variabel proses kembali normal dalam waktu 5 detik, alarm dibatalkan dan tidak ditampilkan ke operator. Namun, DCS membunyikan alarm

jika gangguan berlangsung lebih dari 5 detik. Ini dianggap sebagai anomali operasi yang nyata. Untuk memastikan validitas sebuah peristiwa, metode ini menggunakan filter orde pertama (Srinivasan & Ramaswamy, 2020).

Kinerja Sistem Alarm Setelah Rasionalisasi

Data hasil pengamatan pada fase tiga bulan pasca-rasionalisasi memperlihatkan perubahan perilaku sistem yang sangat signifikan. Pengurangan tingkat keparahan alarm diringkas pada tabel komparasi berikut.

Tabel 1 Perbandingan Kinerja Metrik Sistem Alarm Sebelum dan Sesudah Rasionalisasi

Metrik Kinerja (Standar ISA-18.2)	Kondisi Eksisting (Pra-Rasionalisasi)	Pasca-Rasionalisasi	Target Standar ISA-18.2
Rata-rata alarm per jam	45 alarm/jam	9,8 alarm/jam	< 6 alarm/jam
Persentase waktu dalam Alarm Flood	18,5%	1,2%	< 1%
Persentase kontribusi Top 10 Bad Actors	62%	15%	< 5% (diusahakan nihil)
Rata-rata Standing Alarms	35 alarm	3 alarm	< 5 alarm
Rata-rata Waktu Respons Operator	85 detik	49 detik	Cepat dan akurat

Mengapa tren perbaikan ini dapat berkembang secara besar-besaran? Menurut Tabel 1 di atas, tingkat alarm turun secara signifikan dari 45 alarm per jam menjadi 9,8 alarm per jam, yang menunjukkan penurunan sebesar 78,2%. Hilangnya alarm *chattering* adalah hasil dari penerapan nilai *deadband* termodinamik yang tepat dan filter timer. Secara saintifik, antrean pesan pada arsitektur perangkat keras dapat diproses lebih cepat jika gangguan frekuensi tinggi dari sinyal input dihilangkan. Penurunan yang signifikan juga terjadi saat alarm banjir muncul. Sebelum ini, ketika ada gangguan kecil di fasilitas, sistem dapat mengeluarkan ratusan alarm, membuat layar berwarna merah (kritis) tetapi tidak ada artinya. Pada saat rasionalisasi dilakukan, persentase alarm hujan turun hingga margin 1,2%. Ini menunjukkan bahwa sistem tetap dalam kondisi stabil selama hampir 99% waktu kerjanya.

Pengaruh penurunan alarm terhadap perilaku manusia (*human factors engineering*) adalah temuan penting lainnya. Menurut Tabel 1, waktu respons rata-rata operator terhadap alarm berkurang dari 85 detik menjadi 49 detik. Hukum Hick-Hyman dalam bidang psikologi kognitif industri menjelaskan secara saintifik penurunan waktu respons sebesar 42 persen ini. Hukum ini menyatakan bahwa waktu respons berkorelasi dengan logaritma jumlah rangsangan alternatif, atau informasi, yang dihadapi. Kapasitas memori kerja (*working memory*) otak manusia menjadi tidak terlalu terbebani ketika jumlah alarm yang membombardir operator dikurangi menjadi jumlah yang dapat diterima secara kognitif. Tidak perlu lagi bagi operator untuk menghabiskan waktu berharga untuk menentukan "mana alarm yang palsu dan mana yang benar-benar bahaya". Mereka tahu secara langsung bahwa ketika alarm tertentu muncul setelah rasionalisasi, itu adalah kondisi anomali murni yang memerlukan tindakan langsung (Hollifield & Habibi, 2021).

Dampak Terhadap Keandalan Operasi Industri

Keandalan operasi industri, juga dikenal sebagai "reliabilitas operasi", adalah metrik yang mengukur seberapa tahan suatu pabrik dari penundaan tak terduga atau penurunan kapasitas produksi karena ketidakstabilan proses. Hipotesis awal penelitian adalah bahwa peningkatan keandalan operasi disebabkan langsung oleh manajemen alarm yang baik. Hipotesis ini divalidasi oleh data dari fase implementasi. Selama tiga bulan sebelum rasionalisasi, fasilitas ini mengalami empat kejadian minor trips pada sistem kompresor. Kejadian ini terjadi karena operator terlambat menanggapi alarm tekanan pelumas yang rendah (*Low Lube Oil Pressure*). Meskipun keterlambatan ini tidak disebabkan oleh kelalaian operator, "alarm penting" tersebut tersembunyi di antara banyak alarm lain—juga dikenal sebagai *alarm masking*—dari instrumen yang sedang berbicara.

Fenomena *alarm masking* berhasil dieliminasi setelah rasionalisasi. Panel HMI menampilkan semua alarm kritis langsung. Tingkat keterlambatan proses keselamatan yang menyebabkan perjalanan kecil berhasil ditekan hingga nol selama tiga bulan setelah rasionalisasi. Tidak adanya penundaan yang tidak direncanakan selama tiga bulan tersebut menunjukkan bahwa proses penyaluran energi dan pengolahan fluida berjalan tanpa henti. Ini menunjukkan bahwa metrik keandalan utama, *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) pada aspek availabilitas waktu, telah stabil dan meningkat.

Meningkatnya kecepatan tindakan intervensi ini secara logis memastikan bahwa perubahan variabel proses dikembalikan ke pita kontrol yang aman jauh sebelum sistem pengaman otomatis (*Emergency Shutdown/ESD*) mengambil alih secara paksa untuk mematikan seluruh unit.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Untuk memasukkan temuan penelitian ini ke dalam perspektif akademik internasional, mereka harus dibandingkan dengan temuan penelitian para ilmuwan lain dalam bidang yang sama. Dalam jurnal internasional, penelitian yang dilakukan oleh Smith (2023) menunjukkan bahwa metode prioritas *redesign* dapat menekan laju alarm sebesar rata-rata 40%. Temuan penelitian kami mencatatkan persentase reduksi yang lebih impresif, yakni mencapai 78%. Perbedaan hasil yang signifikan ini disebabkan oleh penerapan strategi yang lebih mutakhir, di mana penelitian ini tidak hanya melakukan re-klasifikasi prioritas (sebagaimana dilakukan oleh Smith), tetapi mengkombinasikannya dengan intervensi mekanis berbasis dinamika proses, yaitu penerapan *deadband* statis dan on/off timer secara serentak.

Muttakin et al. (2021) melakukan penelitian tambahan yang menunjukkan bahwa beban operator berkorelasi positif dengan jumlah kecelakaan kecil di pabrik peleburan baja. Oleh karena itu, mereka menyarankan untuk meningkatkan jumlah karyawan operator untuk mengatasi banyaknya data layar. Penelitian ini, sebaliknya, membuktikan secara ilmiah bahwa menambah jumlah operator bukanlah solusi logis untuk masalah desain arsitektur data. Ini mengubah pendapat Muttakin et al. Dengan menggunakan siklus hidup ISA-18.2, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem alarm cerdas sangat memungkinkan untuk beroperasi dengan efisien tanpa menambahkan staf operasional. Ini karena perbaikan difokuskan pada masalah utama—rasio signal-to-noise instrumen kontrol—bukan dengan mengorbankan sumber daya manusia.

Penggunaan status penghapusan dinamis juga ditunjukkan dalam penelitian ini. Dalam skenario ini, alarm pompa B akan otomatis diredam jika logic DCS membaca bahwa status kelistrikan pompa B secara sengaja dimatikan. Ini membuat sistem alarm bertindak kontekstual. Ini adalah bukti dari kerangka arsitektur sistem peringatan proaktif dibandingkan dengan model reaktif yang lebih umum. Hasil yang dijelaskan secara menyeluruh di atas menjawab rumusan masalah dan mendukung hipotesis yang diajukan

di awal artikel. Sistem alarm secara langsung meningkatkan integritas peralatan mekanis dan kewaspadaan mental staf pengawas di ruang kendali utama.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis teknis dan operasional pada penelitian ini menguatkan hipotesis bahwa kinerja sistem alarm pada instrumen *Distributed Control System* (DCS) secara deterministik memengaruhi keandalan operasi industri. Secara empiris telah ditunjukkan bahwa penerapan rasionalisasi alarm sesuai dengan pedoman ISA-18.2 menghasilkan rekayasa ulang logika operasional yang signifikan. Teknik pemfilteran dinamis, yang mencakup penggunaan timer logika dan penetapan deadband pada instrumen, mengurangi frekuensi alarm tidak relevan dari 45 kejadian per jam menjadi rata-rata 9,8 alarm per jam. Ini merupakan pengurangan lebih dari 78% pada tingkat kebisingan alarm. Percepatan waktu respons operator terhadap alarm kritis sebesar 42% terkait langsung dengan pengurangan beban informasi pada layar kontrol. Hubungan ini memastikan bahwa kesalahan parameter proses diidentifikasi dan ditangani dengan tindakan korektif yang tepat sebelum arsitektur keputusan paksa, mekanisme perlindungan sekunder, memulai. Ini meningkatkan integritas aset produksi dan mengurangi kejadian *downtime* tak terduga. Untuk penelitian lebih lanjut, model prediktif berbasis *machine learning* dan kecerdasan buatan harus diintegrasikan ke dalam arsitektur DCS. Ini akan memungkinkan operator menerima rekomendasi preskriptif secara *real-time* dan menganalisis pola urutan alarm yang kompleks.

DAFTAR REFERENSI

- ANSI/ISA. (2016). ANSI/ISA-18.2-2016 Management of Alarm Systems for the Process Industries. Research Triangle Park: International Society of Automation.
- Goel, P., Datta, A., & Mannan, M. S. (2017). Industrial alarm systems: Challenges and opportunities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 50(2), 23–36.
- Hollifield, B. R., & Habibi, E. (2021). *The Alarm Management Handbook: A Comprehensive Guide* (3rd ed.). Houston: PAS Press.
- Izadi, I., Shah, S. L., Shook, D. S., & Chen, T. (2018). An introduction to alarm analysis and design. *Control Engineering Practice*, 25(1), 58–69.

- Klein, J., & Smith, L. (2020). Operator Response Time and Human Machine Interface Design in Petrochemical Control Rooms. *International Journal of Ergonomics and Human Factors*, 12(4), 415–430.
- Muttakin, M. B., Al-Fikri, H., & Pratama, R. A. (2021). Analisis Beban Kognitif Operator pada Control Room Terhadap Risiko Kecelakaan Kerja di Industri Baja. *Jurnal Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan*, 8(2), 112–125.
- Prakash, J., Babji, A., & Srinivasan, R. (2022). Dynamic Alarm Management Strategy based on Process State Transitions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(15), 5521–5535.
- Rothenberg, D. H. (2018). *Alarm Management for Process Control: A Best-Practice Guide for Design, Implementation, and Use of Industrial Alarm Systems* (2nd ed.). Momentum Press.
- Silvers, A., Brooks, T., & Adams, C. (2019). Implementation of Alarm Management in Oil and Gas Facilities: A Review of Practical Approaches. *Reliability Engineering & System Safety*, 185(3), 200–211.
- Smith, A. C. (2023). Alarm Rationalization Strategy in Petrochemical Plant: A Statistical Approach for Operator Efficiency. *Journal of Process Control Engineering*, 15(1), 78–92.
- Srinivasan, R., & Ramaswamy, S. (2020). Using delay timers to reduce chattering in industrial alarm systems: Theoretical framework and practical evaluation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 28(5), 1845–1856.
- Wang, F., Chang, C., & Lu, J. (2018). Data-driven alarm rationalization using correlation analysis and association rule mining. *Computers & Chemical Engineering*, 115(8), 241–254.
- Wang, Z. X., Chen, Y. L., & Zhao, S. B. (2021). Advanced Alarm Management Techniques in Distributed Control Systems: A Review of Industrial Applications. *Journal of Automation and Control Engineering*, 9(3), 101–115.
- Wijaya, A. S., & Santoso, P. (2022). Implementasi Rasionalisasi Alarm pada Distributed Control System di Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, 14(2), 55–68.
- Zhai, J., Li, H., & Chen, G. (2024). Impact of alarm delay strategies on process safety management: A human reliability perspective. *Process Safety and Environmental Protection*, 162(4), 189–202.