

Mitigasi Risiko *Single Point of Failure* pada *Multifuel Boiler* melalui Implementasi *Double Channel Digital Input* Indikasi RUN PAF

Mitigation of Single Point of Failure Risk in Multifuel Boiler through Implementation of Double Channel Digital Input for RUN PAF Indication

^{1,2}M Dicky Alfansyah*), ¹Mohamad Haifan

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Institut Teknologi Indonesia, Tangerang Selatan 15314, Indonesia,

²PT. Indah Kiat Pulp And Paper Tbk, Kabupaten Siak 28772, Provinsi Riau, Indonesia,

*) *corresponding email: dickyalfansyaah@gmail.com*

Abstrak

Primary Air Fan (PAF) merupakan peralatan kritis pada *multifuel boiler* yang menyuplai udara primer untuk proses pembakaran. Status RUN PAF digunakan sebagai masukan untuk fungsi *permissive* dan *interlock* pada *Distributed Control System (DCS)*. Konfigurasi awal menggunakan *single channel digital input* sehingga penerimaan indikasi RUN bergantung pada satu *channel* DCS dan berpotensi menjadi *single point of failure* apabila *channel* tersebut mengalami gangguan. Penelitian ini menerapkan *preventive improvement* melalui penggunaan *double channel digital input* dengan logika OR (1oo2) pada sisi DCS. Tahapan penelitian meliputi observasi konfigurasi eksisting, perancangan *wiring* dan *Function Block Diagram (FBD)*, implementasi, serta verifikasi fungsional pada kondisi normal dan kondisi kegagalan yang disimulasikan. Pengujian mencakup 14 kondisi, yaitu 4 *loop test*, 4 *simulation test*, 2 *failover test*, dan 4 verifikasi *permissive/interlock*. Seluruh kondisi memenuhi kriteria yang ditetapkan sehingga keberhasilan pengujian fungsional mencapai 100%. Pada dua *failover test*, CAL RUN PAF tetap aktif ketika satu *channel* dinonaktifkan sementara *channel* lainnya masih memberikan indikasi RUN. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *preventive improvement* mampu mempertahankan fungsi indikasi RUN PAF pada kondisi kegagalan individual *channel* yang diuji. Improvement dibatasi pada sisi *terminal* dan *digital input* DCS, sedangkan sumber sinyal dan kabel *field* tetap satu jalur.

Kata Kunci: *distributed control system, critical equipment, digital input, primary air fan.*

Abstract

The *Primary Air Fan (PAF)* is critical equipment in a *multifuel boiler*, and its RUN status is used for *permissive* and *interlock* functions in the *Distributed Control System (DCS)*. The existing configuration used a *single channel digital input*, creating a potential *single point of failure* if the receiving *channel* failed. This study proposes a *preventive improvement* using *double channel digital input* with OR (1oo2) logic. The method consisted of field observation, evaluation of the existing configuration, *wiring* and *Function Block Diagram (FBD)* design, implementation, and functional verification. Verification covered 14 conditions: four *loop tests*, four *simulation tests*, two *failover tests*, and four *permissive/interlock checks*. All 14 conditions met the defined functional criteria, giving a 100% functional test success rate. In both *failover tests*, CAL RUN PAF remained active when one input *channel* was disabled while the other still indicated RUN. The result demonstrates that the *preventive improvement* maintained the RUN PAF indication under the individual *channel-failure* conditions tested. The implementation is limited to the DCS *terminal* and *digital input* side, while the *field signal* source and cable remain *single-path*. Thus, the result demonstrates functional mitigation of the tested failure condition, not a quantified reliability or availability improvement.

Keywords: *distributed control system, critical equipment, digital input, primary air fan*

Makalah diterima 01 Juli 2026– makalah direvisi 13 September 2026– disetujui 13 Oktober 2026

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](#).



1 Pendahuluan

Primary Air Fan (PAF) merupakan peralatan kritis pada *multifuel boiler* yang menyuplai udara primer untuk proses pembakaran. Status RUN PAF digunakan sebagai informasi masukan untuk fungsi *permissive* dan *interlock* pada *Distributed Control System (DCS)*. Oleh karena itu, penerimaan status RUN PAF pada DCS perlu memiliki konfigurasi yang mampu mempertahankan informasi tersebut ketika terjadi gangguan pada salah satu elemen penerimaan [1].

Pada konfigurasi yang diamati di lapangan, pembacaan RUN PAF menggunakan *single channel digital input* sehingga informasi RUN pada sisi penerimaan DCS bergantung pada satu *channel*. Kondisi tersebut

menimbulkan potensi *single point of failure*: apabila *channel* penerimaan mengalami gangguan, informasi RUN dapat tidak tersedia pada DCS meskipun sumber indikasi di *field* masih berada pada kondisi RUN. Potensi tersebut menjadi dasar dilakukannya *preventive improvement* sebagai tindakan mitigasi sebelum kegagalan aktual terjadi. Pendekatan redundansi pada arsitektur kontrol digunakan untuk mempertahankan fungsi ketika sebagian komponen mengalami gangguan [2],[3].

Kajian terdahulu mengenai sistem instrumentasi keselamatan dan arsitektur redundan memberikan dasar penggunaan *channel* tambahan untuk mengurangi ketergantungan pada satu elemen. Mechri dan Simon membahas strategi pengujian pada sistem instrumentasi keselamatan dalam kondisi degradasi [3], sedangkan Zhang et al. mengembangkan strategi pengujian adaptif pada *final element* sistem instrumentasi keselamatan [4]. Innal et al. membahas formulasi *PFDavg* untuk arsitektur 1oo1 dan 1oo2 [5], sedangkan Ruchkov et al. mengembangkan model analitis untuk struktur 1oo2 dan 2oo3 [6]. Penelitian tersebut menjadi dasar konseptual, tetapi penelitian ini berfokus pada implementasi dan verifikasi fungsional pada *input* DCS.

Masalah yang lebih spesifik pada penelitian ini adalah penerapan redundansi pada pembacaan indikasi RUN peralatan kritis non-safety pada DCS *multifuel boiler*. Penelitian terdahulu banyak membahas redundansi pada *safety instrumented system*, *sensor*, *actuator*, atau *logic solver*, sedangkan penerapan *double channel digital input* untuk indikasi RUN peralatan kritis pada DCS *multifuel boiler* belum menjadi fokus utama. Studi tentang sistem *safety* dan *interlock* memberikan dasar terkait perancangan dan verifikasi fungsi *interlock* [7],[8],[9]. Kajian mengenai *common cause failure* pada sistem redundan serta sensing pada pengendalian boiler juga memberikan konteks pendukung [8],[9]. Dengan demikian, *research gap* penelitian ini terletak pada konteks penerapan dan verifikasi teknis, bukan pada pengembangan algoritma voting baru.

Tabel 1. Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian usulan

Peneliti	Judul penelitian	Fokus utama	Perbedaan/Posisi Penelitian Ini
Wang et al. [1]	<i>Research on safety interlock system design and control experiment of combined support and anchor equipment</i>	<i>Safety interlock</i> dan eksperimen kontrol	Objek berbeda; penelitian ini menguji CAL RUN PAF sebagai input fungsi <i>permissive/interlock</i> pada DCS.
Mechri & Simon [3]	<i>Improving the reliability of safety instrumented systems under degradation with an alternating testing strategy</i>	Pengujian <i>Safety Instrumented Systems</i> pada kondisi <i>degradation</i>	Objek berbeda; penelitian ini berfokus pada <i>preventive improvement input</i> RUN PAF pada DCS dan verifikasi fungsional.
Zhang et al. [4]	<i>Adaptive testing policy for multi-state systems with application to the degrading final elements in safety-instrumented systems</i>	<i>Adaptive testing</i> dan <i>degradation</i>	Tidak mengembangkan <i>adaptive testing</i> ; penelitian ini berfokus pada perubahan konfigurasi input DCS dan verifikasi fungsional.
Innal et al. [5]	<i>PFDavg generalized formulas for SIS subject to partial and full periodic tests based on multi-phase Markov models</i>	Pemodelan <i>PFDavg</i> pada SIS	Tidak melakukan pemodelan probabilitistik; penelitian ini berfokus pada implementasi 1oo2 dan verifikasi fungsional RUN PAF.
Ruchkov et al. [6]	<i>Reliability assessment of '2oo3' and '1oo2' redundant structures taking into account the means of information processing and communications</i>	Evaluasi struktur redundan 1oo2 dan 2oo3	Prinsip 1oo2 diterapkan pada dua <i>channel digital input</i> untuk satu indikasi RUN PAF pada DCS.
Kajmakovic et al. [10]	<i>Degradation detection in a redundant sensor architecture</i>	Sensor redundan dan deteksi <i>degradation</i>	Tidak melakukan deteksi <i>degradation</i> ; penelitian ini menerapkan 1oo2 pada digital input untuk mitigasi kegagalan satu channel.
Penelitian ini	Mitigasi risiko <i>single point of failure</i> pada <i>multifuel boiler</i> melalui implementasi <i>double channel digital input</i> indikasi RUN PAF	<i>Preventive improvement</i> pada I/O DCS	Satu sinyal RUN PAF dari field diterima melalui dua <i>channel digital input</i> (RUN dan RUN2), diproses dengan OR (1oo2) menjadi CAL RUN PAF, dan diverifikasi melalui 14 kondisi pengujian.

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) mengidentifikasi ketergantungan pada *single channel digital input* untuk indikasi RUN PAF; (2) merancang dan menerapkan *double channel digital input* berbasis logika OR pada sisi DCS; dan (3) memverifikasi respons CAL RUN PAF serta penggunaannya pada fungsi *permissive* dan *interlock*. Improvement dibatasi pada sisi penerimaan DCS, tanpa mengubah sumber sinyal dan kabel *field*.

2 Metode Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan studi kasus terapan pada DCS *multifuel boiler*. Objek penelitian dibatasi pada penerimaan dan pengolahan indikasi RUN PAF pada sisi DCS. Tahapan penelitian meliputi observasi konfigurasi eksisting, perancangan *wiring* dan *Function Block Diagram* (FBD), implementasi *hardware* dan *software*, serta verifikasi fungsional. Urutan tersebut dipilih agar perubahan konfigurasi dapat ditelusuri dari kondisi awal, rancangan, implementasi, hingga pembuktian fungsi.



Gambar 1. Tahapan penelitian

2.1 Objek dan Spesifikasi Sistem

Sistem yang digunakan adalah ABB Ability™ System 800xA dengan Advant Controller 450 dan S800 I/O. Modul *digital input* yang digunakan adalah DI820 dengan 8 *channel input* pada kelas tegangan 120 V AC/110 V DC. Platform dan konfigurasi I/O mengacu pada dokumentasi sistem yang digunakan [11]. Satu *channel* RUN yang sudah digunakan dan satu *channel* tambahan pada modul I/O yang berbeda digunakan untuk menerima indikasi RUN PAF sebagai RUN dan RUN2. Spesifikasi dicantumkan untuk mendukung reproduktibilitas implementasi.

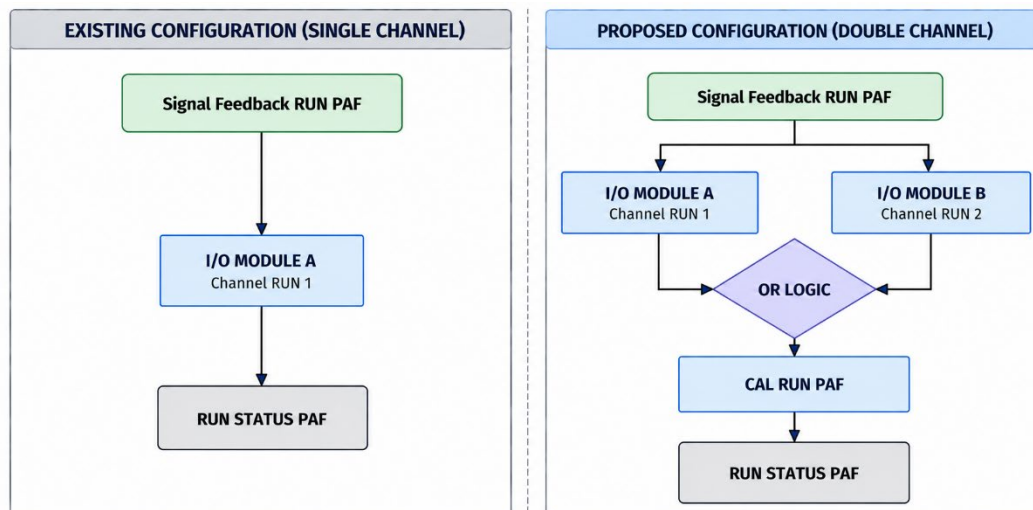
2.2 Observasi dan Evaluasi Konfigurasi Eksisting

Observasi dilakukan terhadap sumber indikasi RUN PAF, *terminal* penerimaan, *channel digital input*, modul I/O, dan pemakaian status tersebut pada fungsi *permissive* serta *interlock*. Parameter yang dibandingkan sebelum dan sesudah implementasi adalah jumlah *channel* penerimaan, kondisi RUN dan RUN2, nilai *expected* dan *actual* CAL RUN PAF, keberlangsungan keluaran saat salah 1 *channel* tidak aktif, serta kesesuaian respons *permissive* dan *interlock*. Pendekatan ini memisahkan evaluasi fungsi penerimaan DCS dari evaluasi sumber sinyal *field*.

Lingkup redundansi ditetapkan sejak awal. 1 sinyal RUN PAF pada *terminal* didistribusikan ke 2 *channel digital input* pada modul berbeda, sedangkan sumber sinyal dan kabel *field* tetap 1 jalur. Dengan demikian, penelitian hanya menguji pengurangan ketergantungan pada sisi *terminal*, *channel digital input*, dan modul I/O DCS. Gangguan pada sumber sinyal atau kabel *field* berada di luar lingkup verifikasi. Pendekatan pemanfaatan *channel* tambahan pada sistem kontrol juga telah diterapkan pada sistem berbasis PLC dan *sensor redundant* [12].

2.3 Rancangan Double Channel Digital Input

Rancangan mengubah penerimaan RUN PAF dari *single channel* menjadi *double channel* pada sisi DCS. 1 sinyal dari *terminal* diterima oleh 2 *channel* sebagai RUN dan RUN2, kemudian digabungkan dengan logika OR untuk menghasilkan CAL RUN PAF. Pada konfigurasi ini, keluaran tetap aktif apabila sekurang-kurangnya 1 *channel* memberikan kondisi RUN. Prinsip 1oo2 digunakan sebagai dasar arsitektur redundansi, sedangkan implementasi penelitian dibatasi pada *input* DCS [6],[13]. Kajian arsitektur sensor redundan dan deteksi degradasi juga menjadi konteks pendukung [14].



Gambar 2. Rancangan usulan

2.4 Prosedur Verifikasi Fungsional

Verifikasi dilakukan melalui *loop test*, *simulation test*, *failover test*, dan verifikasi *permissive/interlock*. *Loop test* dan *simulation test* masing-masing terdiri atas 4 kondisi, *failover test* 2 kondisi, dan verifikasi *permissive/interlock* 4 kondisi, sehingga total terdapat 14 kondisi. *Expected response* ditentukan berdasarkan logika OR pada 2 *channel digital input*.

Tabel 2. Skenario pengujian

Skenario	Jumlah kondisi	Parameter utama	Kriteria keberhasilan
<i>Loop test</i>	4	RUN, RUN2, hasil pembacaan	Hasil aktual = kondisi <i>input</i>
<i>Simulation test</i>	4	RUN, RUN2, hasil yang diharapkan/hasil aktual CAL RUN PAF	Hasil aktual = hasil yang diharapkan
<i>Failover test</i>	2	<i>Channel</i> yang dinonaktifkan, <i>channel</i> lain, CAL RUN PAF	CAL RUN PAF mengikuti <i>channel</i> yang masih aktif
<i>Permissive/interlock</i>	4	CAL RUN PAF dan respons fungsi	Respons sesuai logika yang ditetapkan
Total	14	Seluruh parameter di atas	Seluruh kondisi memenuhi kriteria

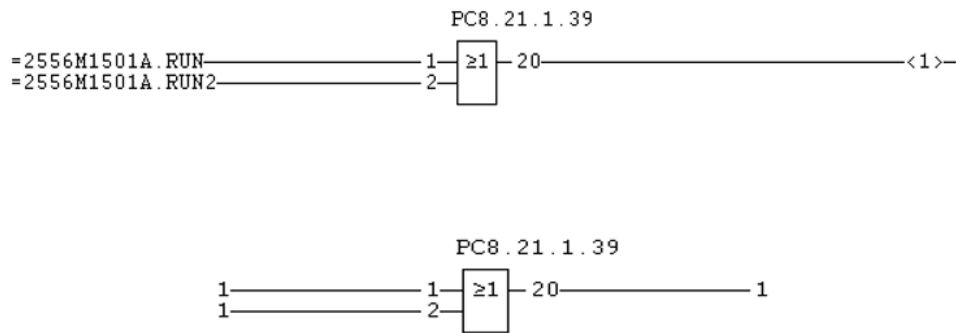
Persentase keberhasilan pengujian dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$P = \frac{N_b}{N_t} \times 100\% \quad (1)$$

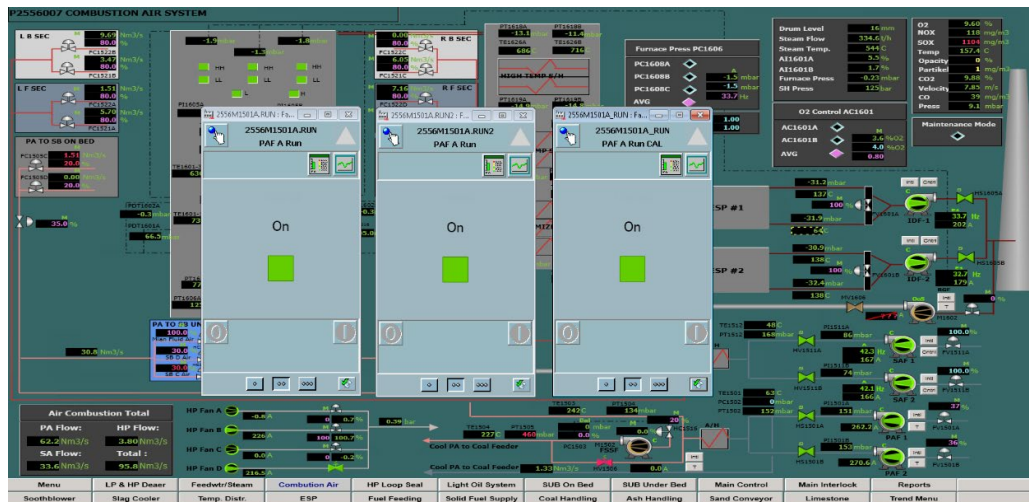
Keterangan: P merupakan persentase keberhasilan pengujian (%), N_b merupakan jumlah pengujian yang berhasil, dan N_t merupakan jumlah seluruh pengujian.

3 Hasil dan Diskusi

Improvement mengubah konfigurasi penerimaan RUN PAF dari *single channel* menjadi *double channel* pada sisi DCS. 1 sinyal RUN PAF diterima oleh RUN dan RUN2, kemudian diproses dengan logika OR untuk menghasilkan CAL RUN PAF. Perubahan ini ditujukan untuk mengurangi ketergantungan fungsi *permissive* dan *interlock* terhadap 1 *channel* penerimaan tanpa mengubah sumber sinyal dan kabel *field*.



Gambar 3. Logic penerapan double channel



Gambar 4. Tampilan RUN, RUN2, dan CAL RUN PAF pada DCS setelah implementasi

3.1 Hasil Loop Test

Tabel 3. Hasil loop test

No.	RUN	RUN2	Hasil yang diharapkan	Hasil aktual	Hasil
1	ON	ON	ON/ON	ON/ON	Berhasil
2	OFF	ON	OFF/ON	OFF/ON	Berhasil
3	ON	OFF	ON/OFF	ON/OFF	Berhasil
4	OFF	OFF	OFF/OFF	OFF/OFF	Berhasil

Keempat kondisi *loop test* menunjukkan kesesuaian antara kondisi *input* yang diberikan dan pembacaan pada kedua *channel*. Hasil ini memverifikasi lapisan penerimaan sebelum keluaran CAL RUN PAF diproses oleh logika OR. Dengan kata lain, pengujian memastikan bahwa penambahan *channel* kedua tidak mengubah pemetaan kondisi *input* menjadi status digital pada DCS.

3.2 Hasil Simulation Test

Tabel 4. Hasil simulation test

No.	RUN	RUN2	Hasil yang diharapkan	Hasil aktual	Hasil
1	0	0	0	0	Berhasil
2	0	1	1	1	Berhasil
3	1	0	1	1	Berhasil
4	1	1	1	1	Berhasil

Simulation test memverifikasi empat kombinasi masukan yang membentuk tabel kebenaran OR. Keluaran aktual sama dengan nilai yang diharapkan pada seluruh kombinasi. Secara teknis, kondisi 0/1 dan 1/0 merupakan kondisi yang paling relevan untuk tujuan mitigasi karena menunjukkan bahwa keluaran tetap aktif ketika hanya 1 *channel* yang memberikan kondisi RUN. Kondisi 0/0 tetap menghasilkan keluaran 0 sehingga perubahan konfigurasi tidak menghilangkan fungsi dasar status OFF.

3.3 Hasil Failover Test

Tabel 5. Hasil *failover test*

No.	Channel dinonaktifkan	Channel aktif	Hasil yang diharapkan	Hasil aktual	Hasil
1	RUN OFF	RUN2 ON	1	1	Berhasil
2	RUN2 OFF	RUN ON	1	1	Berhasil

Failover test memberikan bukti langsung terhadap tujuan utama rancangan. Ketika RUN dibuat OFF dan RUN2 tetap ON, CAL RUN PAF tetap bernilai 1. Kondisi yang sama terjadi ketika RUN2 dibuat OFF dan RUN tetap ON. Hasil ini menunjukkan bahwa fungsi keluaran tidak bergantung pada keberadaan 1 *channel* tertentu selama *channel* lainnya masih menyediakan indikasi RUN. Hasil *failover* dibatasi pada kondisi yang diuji. Gangguan pada sumber sinyal, kabel *field*, atau kegagalan dengan penyebab bersama dapat memengaruhi lebih dari 1 elemen *redundant* [8],[10].

3.4 Verifikasi Permissive dan Interlock

Tabel 6. Verifikasi *Permissive* dan *Interlock*

No.	RUN	RUN2	CAL RUN PAF	<i>Permissive</i>	<i>Interlock</i>
1	1	1	1	Sesuai	Sesuai
2	0	1	1	Sesuai	Sesuai
3	1	0	1	Sesuai	Sesuai
4	0	0	0	Sesuai	Sesuai

Verifikasi *permissive* dan *interlock* menunjukkan bahwa CAL RUN PAF dapat digunakan sebagai sumber status pada fungsi terkait pada empat kondisi yang diuji. Kondisi 1 *channel* aktif tetap menghasilkan status yang dapat diteruskan ke fungsi DCS, sedangkan kondisi kedua *channel* OFF menghasilkan status 0. Dengan demikian, perubahan pada lapisan penerimaan tidak mengubah hubungan fungsional antara CAL RUN PAF dan logika *permissive/interlock* pada skenario yang diuji.

3.5 Rekapitulasi Pengujian

Tabel 7. Hasil akhir pengujian

Skenario	Jumlah kondisi	Berhasil	Tidak berhasil	Pemenuhan kriteria uji
<i>Loop test</i>	4	4	0	100%
<i>Simulation test</i>	4	4	0	100%
<i>Failover test</i>	2	2	0	100%
<i>Permissive/interlock</i>	4	4	0	100%
Total	14	14	0	100%

Sebanyak 14 kondisi pengujian memenuhi kriteria yang ditetapkan. Hasil ini merupakan ringkasan verifikasi fungsional pada skenario pengujian, bukan penilaian kinerja sistem dalam periode operasi jangka panjang.

3.6 Keterbatasan Penelitian

Penelitian dibatasi pada satu objek dan satu konfigurasi DCS. Redundansi diterapkan pada sisi *terminal* dan *digital input*, sedangkan sumber sinyal dan kabel *field* tetap satu jalur. Pengujian bersifat fungsional dan menggunakan simulasi kegagalan individual pada *channel*, sehingga hasil penelitian tidak dimaksudkan untuk menggambarkan kinerja sistem pada operasi jangka panjang atau kondisi kegagalan dengan penyebab bersama. Perbandingan langsung dengan sistem DCS sejenis tidak dilakukan karena konfigurasi dan implementasi DCS industri bersifat *proprietary* dan tidak tersedia secara terbuka untuk dibandingkan secara setara. Karena itu, perbandingan difokuskan pada pendekatan redundansi dan hasil verifikasi fungsional.

4 Kesimpulan

Verifikasi dilakukan pada 14 kondisi, terdiri atas empat *loop test*, empat *simulation test*, dua *failover test*, dan empat verifikasi *permissive/interlock*. Seluruh 14 kondisi memenuhi kriteria pengujian. Dua *failover test* menunjukkan bahwa CAL RUN PAF tetap aktif ketika salah 1 *channel* dinonaktifkan dan *channel* lainnya tetap memberikan indikasi RUN. Hasil tersebut memberikan bukti fungsional bahwa ketergantungan fungsi terkait terhadap 1 *channel* penerimaan dapat dikurangi pada lingkup yang diuji.

Kontribusi penelitian berada pada penerapan dan verifikasi teknis konfigurasi 1oo2 untuk indikasi RUN peralatan kritis pada DCS *multifuel boiler*, bukan pada pengembangan metode redundansi baru. Hasil 14 dari 14 kondisi menunjukkan bahwa seluruh skenario pengujian yang ditetapkan memenuhi kriteria fungsional. Hasil tersebut tidak digunakan untuk menyimpulkan perilaku sistem di luar kondisi uji. Penelitian selanjutnya dapat memperluas objek ke *critical equipment* lain, mengevaluasi *common cause failure*, serta menggunakan data operasi jangka panjang untuk melakukan evaluasi kuantitatif apabila diperlukan.

Ucapan Terima kasih

Penelitian ini dilakukan secara mandiri tanpa dibiayai oleh pihak lembaga atau institusi manapun. Penulis menyampaikan terima kasih kepada rekan kerja di industri tempat studi kasus ini dilaksanakan atas dukungan data dan diskusi teknis selama proses penelitian.

Referensi

- [1] 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, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22166058>
- [2] N. Trapani and L. Longo, "Fault Detection and Diagnosis Methods for Sensors Systems: A Scientific Literature Review," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 1253–1263, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1749>.
- [3] W. Mechri and C. Simon, "Improving the Reliability of Safety Instrumented Systems Under Degradation with an Alternating Testing Strategy," *Machines*, vol. 13, no. 7, p. 619, 2025. <https://doi.org/10.3390/machines13070619>.
- [4] A. Zhang, S. Wu, D. Fan, M. Xie, B. Cai, and Y. Liu, "Adaptive testing policy for multi-state systems with application to the degrading final elements in safety-instrumented systems," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 221, p. 108360, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108360>.
- [5] F. Innal, M. A. Lundteigen, Y. Liu, and A. Barros, "PFDavg generalized formulas for SIS subject to partial and full periodic tests based on multi-phase Markov models," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 150, pp. 160–170, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.01.022>.
- [6] E. Ruchkov, V. Kharchenko, A. Kovalenko, I. Babeshko, and A. Poroshenko, "Reliability assessment of '2oo3' and '1oo2' redundant structures taking into account the means of information processing and communications," *Advanced Information Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 77–83, 2020. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.11>.
- [7] Z. C. Zhang, Z. Ji, Y. Wang, B. J. Xiao, and F. Xia, "Prototype Design for Upgrading East Safety and Interlock System," in *Proc. 17th Int. Conf. on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALPCS2019)*, New York, NY, USA, 2019, pp. 179–182. <https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALPCS2019-MOMPR009>.
- [8] S. Alizadeh and S. Sriramula, "Impact of common cause failure on reliability performance of redundant safety related systems subject to process demand," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 172, pp. 129–150, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.12.011>.

- [9] J. Mižáková, J. Piteř, A. Hošovský, I. Pavlenko, M. Ochowiak, and S. Khovanskyi, "Biomass Combustion Control in Small and Medium-Scale Boilers Based on Low Cost Sensing the Trend of Carbon Monoxide Emissions," *Processes*, vol. 9, no. 11, p. 2030, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9112030>.
- [10] A. Kajmakovic, K. Diwold, K. Römer, J. Pestana, and N. Kajtazovic, "Degradation Detection in a Redundant Sensor Architecture," *Sensors*, vol. 22, no. 12, p. 4649, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22124649>.
- [11] J. Luo, M. Kang, E. Bisse, M. Veldink, D. Okunev, S. Kolb, J. G. Tylka, and A. Canedo, "A Quad-Redundant PLC Architecture for Cyber-Resilient Industrial Control Systems," *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 13, no. 4, pp. 218–221, 2021. <https://doi.org/10.1109/LES.2020.3011309>.
- [12] A. R. Hakim, Junita, and H. Kanabele, "Optimalisasi Pengendalian Pompa Air Sisa Produksi Berbasis PLC dengan Sensor Floatless Level Switch dan Sensor Redundansi untuk Pencegahan Luapan Air Tangki Industri," *Jurnal Sains dan Teknologi (JST-Undiksha)*, vol. 14, no. 3, pp. 455–467, 2025, doi: <https://doi.org/10.23887/jst-undiksha.v14i3.99283>.
- [13] ABB Group, "ABB Ability™ System 800xA System Guide", Zurich, Switzerland: ABB, 2023.
- [14] J. Zhou, Y. Zhu, Z. Shao, Z. Dong, and C. Yang, "Identification-based sensor and actuator fault diagnosis for industrial control systems and its application to HTR-PM," *Control Engineering Practice*, vol. 131, p. 105402, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105402>.