E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Implementasi Fitur Force Logic Pulverizer Sequence Start Untuk Meningkatkan Availability Pada PT PLN Indonesia Power UBP Suralaya Unit 5 Dan 6

Rezki Triaji Saputra[1], Widya Nita Suliyanti[2]
[1] Program Studi Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Jakarta,
rezki202410751@itpln.ac.id
[2] Program Studi Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Jakarta,
widya@itpln.ac.id

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis batubara masih menjadi tulang punggung pemenuhan beban dasar sistem kelistrikan nasional, dengan pulverizer sebagai peralatan kritis yang rentan mengalami gangguan operasional akibat kegagalan fungsi guillotine damper. Implementasi force logic pada Distributed Control System (DCS) digunakan sebagai solusi operasional untuk mengatasi kegagalan tersebut, namun dampaknya terhadap keandalan sistem dan validitas mekanisme proteksi belum banyak dikaji secara sistematis. Penelitian ini bertujuan menganalisis mekanisme kerja force logic pada sequence start pulverizer serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap kinerja operasional Unit 5 dan Unit 6 PLTU Suralaya. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan indikator Equivalent Availability Factor (EAF) dan Equivalent Forced Outage Rate (EFOR), dilengkapi Fault Tree Analysis (FTA) untuk memetakan risiko yang timbul akibat penggunaan force logic. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan EAF pada Unit 5 dari 13,32% menjadi 43,15% dan pada Unit 6 dari -5,03% menjadi 36,09%, disertai penurunan EFOR pada kedua unit. Analisis FTA mengidentifikasi risiko residual berupa potensi kesalahan manusia dan masking fault, yang dimitigasi melalui multi-barrier control. Penelitian ini menyimpulkan bahwa force logic efektif meningkatkan keandalan operasional pulverizer, dengan syarat disertai tata kelola dan pengawasan penerapan yang ketat.

Kata kunci: *Force logic, Guillotine damper, Sequence start, Availability, Fault Tree Analysis*

Abstract

Coal-fired steam power plants remain a primary source of baseload electricity generation, with the pulverizer serving as a critical component prone to operational disruption due to guillotine damper malfunction. The implementation of force logic within the Distributed Control System (DCS) is commonly applied to address such failures, yet its impact on system reliability and protection validity has not been systematically examined. This study analyzes the working mechanism of force logic in the pulverizer sequence start process and evaluates its effect on the operational performance of Unit 5 and Unit 6 at PLTU Suralaya. A quantitative approach was employed using the Equivalent Availability Factor (EAF) and Equivalent Forced Outage Rate (EFOR) indicators, supported by Fault Tree Analysis (FTA) to map risks arising from force logic application. Results show an increase in EAF from 13.32% to 43.15% for Unit 5, and from -5.03% to 36.09% for Unit 6, along with a reduction in EFOR for both units. FTA identified residual risks in the form of human error potential and masking fault, mitigated through multi-barrier control. The study concludes that force logic effectively improves pulverizer operational reliability, provided its application is governed by strict oversight.

Keywords: *force logic, guillotine damper, sequence start, availability, Fault Tree Analysis*

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Corresponding Author:
Rezki Triaji Saputra

Institut Tekonologi PLN, rezki202410751@itpln.ac.id

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis batubara masih menjadi salah satu penopang utama beban dasar sistem kelistrikan nasional di Indonesia. Kesinambungan operasinya bergantung pada kinerja peralatan bantu yang mendukung proses pembakaran, dan salah satu yang paling menentukan adalah pulverizer, alat yang menggiling batubara menjadi partikel halus sebelum masuk ke ruang bakar boiler. Kebutuhan terhadap keandalan sistem ini ikut meningkat seiring naiknya konsumsi listrik global dan tuntutan efisiensi transmisi maupun distribusi tenaga listrik [3].

Pulverizer menjalankan tiga fungsi sekaligus, yaitu pengeringan, penghancuran, dan pengklasifikasian batubara menjadi serbuk halus sebelum dialirkan ke burner [1]. Kehalusan partikel ini menentukan luas permukaan kontak yang dibutuhkan untuk reaksi oksidasi saat pembakaran. Pulverizer tidak berdiri sendiri. Ia terintegrasi dengan Distributed Control System (DCS) yang mengatur seluruh proses melalui logika interlock, permissive, dan sequence start, di mana setiap tahapan bergantung pada terpenuhinya kondisi tertentu sebelum dapat berlanjut ke tahap berikutnya.

Efisiensi pulverizer juga tidak lepas dari kestabilan pasokan udara primer dan sekunder yang masuk ke sistem [2]. Udara primer berperan ganda, sebagai pengering kandungan air pada batubara sekaligus media transportasi serbuk batubara menuju burner. Karena suhu udara primer bisa mencapai 250 sampai 350 derajat Celsius, sistem isolasi pada saluran ini harus andal, terutama saat transisi operasional atau kondisi darurat. Salah satu komponen isolasi absolut pada saluran ini adalah guillotine damper, yang statusnya menjadi salah satu syarat permissive sebelum motor pulverizer diizinkan beroperasi. Kegagalan pada damper ini akan menghambat proses start pulverizer dan berujung pada penurunan beban unit (derating) [9].

Dalam praktik lapangan, guillotine damper cukup sering mengalami gangguan mekanis, seperti gagal membuka atau menutup penuh akibat keausan, akumulasi debu batubara, korosi, atau kegagalan aktuator. Saat kondisi ini terjadi, sinyal posisi damper yang dibaca DCS tidak sesuai dengan yang diharapkan, sehingga interlock pada sequence start pulverizer tidak terpenuhi dan proses start tertahan. Operator kemudian dihadapkan pada pilihan menghentikan operasi sampai perbaikan selesai, atau melakukan intervensi melalui fitur force logic pada DCS untuk memaksa status peralatan terbaca sesuai kondisi yang diinginkan sistem, meskipun secara fisik peralatan belum berubah [4].

Force logic memungkinkan proses tetap berjalan meskipun sebagian persyaratan logika tidak terpenuhi secara aktual [4]. Pendekatan ini efektif menjaga kelangsungan operasi jangka pendek, tetapi sekaligus membuat sistem kendali yang seharusnya bekerja berdasarkan kondisi aktual menjadi bergantung pada intervensi manual. Penggunaan berulang tanpa evaluasi memadai berpotensi menimbulkan risiko operasional yang lebih kompleks di kemudian hari.

Penelitian mengenai force logic dalam konteks peningkatan kinerja operasional pulverizer masih terbatas. Kajian terdahulu lebih banyak membahas keandalan peralatan secara umum atau optimasi sistem kontrol [6], [13], sementara studi tentang

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

pulverizer sendiri umumnya berfokus pada aspek mekanis dan performa penggilingan, bukan pada interaksi antara sistem kontrol dan kondisi operasional aktual di lapangan. Celah inilah yang coba diisi oleh penelitian ini, dengan menganalisis implementasi force logic pada sequence start pulverizer di PT PLN Indonesia Power UBP Suralaya Unit 5 dan 6, khususnya pada kasus kegagalan fungsi guillotine damper.

Tujuan penelitian ini mencakup lima hal. Pertama, menganalisis karakteristik dan mekanisme kerja force logic pada DCS dalam mendukung sequence start pulverizer. Kedua, mengidentifikasi kondisi operasional guillotine damper yang mengalami kegagalan fungsi dan bagaimana force logic diterapkan sebagai solusinya. Ketiga, mengevaluasi pengaruh implementasi force logic terhadap keberhasilan sequence start dan kelancaran operasi unit. Keempat, menganalisis hubungan antara penggunaan force logic dengan potensi gangguan operasi serta penyimpangan dari sistem proteksi yang dirancang. Kelima, mengevaluasi efektivitas force logic dalam meningkatkan kinerja operasional pulverizer, ditinjau dari aspek keandalan dan kontinuitas operasi.

TINJAUAN PUSTAKA

Distributed Control System (DCS) merupakan arsitektur pengendalian yang menjadi standar dalam pengelolaan proses industri berskala besar, termasuk pembangkitan listrik [7]. Berbeda dari sistem kendali terpusat konvensional, DCS membagi beban tugas kontrol ke beberapa unit kontroler yang tersebar namun tetap terhubung dalam satu jaringan komunikasi, sehingga operator dapat memonitor dan melakukan intervensi melalui antarmuka *HMI* secara terpadu [10]. Pada unit yang diteliti, sistem kontrol menggunakan teknologi ABB *Symphony Plus* dengan modul kontroler seri SPC 800, pengembangan dari platform *Bailey Infi* 90, yang bekerja dalam pasangan redundan dan mampu mengelola ribuan titik input output secara bersamaan.

Force logic, atau terkadang disebut *override logic*, adalah tindakan memaksa suatu titik input atau output pada kontroler untuk berada pada status tertentu, terlepas dari kondisi aktual perangkat lapangan. Fitur ini umumnya dipakai untuk kebutuhan *commissioning*, kalibrasi, atau penanganan kondisi darurat ketika sensor rusak namun proses operasional tetap harus berjalan aman [13]. Konsep eksekusi logika otomatis pada sistem berbasis digital bekerja dengan menjalankan kondisi atau *sequence* tertentu secara otomatis begitu parameter input yang dipersyaratkan terpenuhi [11]. Pada sistem yang diteliti, *force* hanya dapat dilakukan pada titik yang terdaftar dalam *Input/Output Control Logic Document*, dan begitu diaktifkan, kontroler mengabaikan sinyal elektrik dari lapangan lalu menggantinya dengan nilai yang dimasukkan secara manual.

Reliability menggambarkan konsistensi operasi unit pembangkit dalam jangka waktu panjang, tidak sekadar mencerminkan ketersediaannya [14]. Pengukurannya bersifat kuantitatif, memanfaatkan data historis gangguan dan operasi, dengan dua parameter utama yaitu *Mean Time Between Failures* (MTBF) dan *Mean Time To Repair* (MTTR). *Availability* sendiri menggambarkan tingkat kesiapan unit pembangkit untuk beroperasi dalam periode tertentu, terlepas dari apakah unit benar-benar beroperasi atau tidak [12]. Indikator yang lazim dipakai dalam industri pembangkitan adalah *Equivalent Availability Factor* (EAF), yang memberikan gambaran lebih realistis karena turut memperhitungkan kondisi *derating*, bukan sekadar *outage* total [8].

Guillotine damper, atau disebut juga *primary air isolation damper*, adalah perangkat mekanis berbentuk pelat geser yang mengisolasi aliran udara pada sistem udara primer PLTU. Berbeda dari *damper modulating* yang mengatur besar aliran, *guillotine damper* berfungsi sebagai perangkat isolasi penuh dengan tingkat kebocoran

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

sangat rendah saat tertutup. Kegagalan pada *damper* ini menghambat proses *sequence start pulverizer* dan berujung pada penurunan beban unit [9].

Fault Tree Analysis (FTA) adalah metode analisis keandalan dan risiko berbasis pendekatan deduktif, digunakan untuk mengidentifikasi kombinasi kegagalan komponen yang secara tunggal maupun kumulatif memicu kegagalan pada tingkat sistem. Dalam konteks penelitian ini, FTA dipakai untuk memetakan hubungan kausalitas berbasis gerbang logika pada *sequence start pulverizer*, dari *basic events* di tingkat komponen fisik hingga *top event* berupa kegagalan *sequence* secara keseluruhan.

METODE

Penelitian dilakukan di PT PLN Indonesia Power UBP Suralaya, dengan fokus pada Unit 5 dan Unit 6. Pemilihan lokasi didasarkan pada skala operasi yang besar, kompleksitas sistem DCS yang terintegrasi, dan keberadaan peralatan kritis seperti *pulverizer* beserta komponen pendukungnya. Data operasional dan analisis mencakup periode satu tahun, dari Januari hingga Desember, mencakup data historis aktivitas operasi, catatan gangguan, dan parameter kinerja peralatan.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan fokus pada evaluasi kinerja operasional melalui indikator EAF. Pengumpulan data dilakukan melalui tiga metode, yaitu studi literatur, data sekunder dari pengoperasian unit, dan observasi lapangan. Studi literatur menelaah *design manual book* serta jurnal internasional dan nasional yang relevan dengan topik *availability* peralatan pembangkit, sebagai landasan teoritis dalam memahami mekanisme *force logic*. Data sekunder mencakup data pengoperasian unit, data gangguan unit, dan *design logic existing* beserta skema *force*. Observasi lapangan dilakukan untuk memperoleh gambaran nyata kondisi operasional unit, sekaligus sebagai validasi keamanan sebelum skema *force logic* dijalankan.

Analisis data mencakup tiga tahap. Pertama, perhitungan EAF menggunakan rumus yang memperhitungkan *Period Hours*, *Planned/Forced Outage*, *Derating*, dan *Derating Potensial*, mengacu pada pendekatan standar yang mempertimbangkan *Equivalent Forced Outage Hours* [8]. Kedua, perhitungan *Equivalent Forced Outage Rate* (EFOR), yang memberikan gambaran lebih spesifik terkait tingkat gangguan paksa dari sisi frekuensi dan durasi. Ketiga, mitigasi risiko menggunakan *Fault Tree Analysis* untuk mengevaluasi keandalan sistem *sequence start pulverizer* secara kuantitatif. *Top event* didefinisikan sebagai kegagalan *sequence start pulverizer*, didekomposisi ke dalam tiga cabang *intermediate event*, yaitu kegagalan tahap *guillotine damper*, kegagalan tahap *swing valve*, dan kegagalan tahap *inerting*, yang dihubungkan melalui gerbang logika OR menuju *sub-intermediate event* dan *basic event* di tingkat komponen fisik.

Perhitungan kuantitatif FTA menggunakan data historis gangguan operasional pada *sequence start pulverizer* dengan total sampel 38 kejadian, dikelompokkan sesuai struktur diagram FTA. Probabilitas empiris tiap *basic event* dihitung dengan pendekatan frekuensi relatif, kemudian disubstitusikan ke dalam aljabar *Boolean* untuk kalkulasi akumulatif berjenjang dari *basic event* hingga *top event*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Operasional Sebelum Implementasi Force Logic

Sebelum fitur *force logic* diterapkan, sistem kendali pada PLTU Suralaya Unit 5 dan Unit 6 masih mengandalkan *Distributed Control System* (DCS) generasi *Bailey Infi 90*, yang memperlakukan setiap sinyal masukan dari instrumen lapangan secara biner dan kaku. Begitu ada indikasi ketidaksesuaian sinyal pada *limit switch guillotine*

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

damper, *swing valve*, atau *inerting valve*, kontroler langsung membatalkan (*abort*) proses *sequence start* dan mengembalikannya ke *Step 0*, tanpa membedakan apakah gangguan itu benar bahaya fisik atau sekadar sinyal semu akibat keausan mekanis, pemuaian material, atau penumpukan debu batubara. Berdasarkan data historis periode 1 Januari 2025 sampai 1 Mei 2026, kondisi ini tercermin pada nilai *Equivalent Availability Factor* (EAF) yang sangat rendah:

$$EAF_{Unit\ 5} = \frac{13080 - 3901{,}44 - 7435{,}62}{13080} \times 100\% = 13{,}32\%$$

$$EAF_{Unit\ 6} = \frac{13080 - 4653{,}81 - 9084{,}89}{13080} \times 100\% = -5{,}03\%$$

Nilai negatif pada Unit 6 menunjukkan bahwa akumulasi jam gangguan (*forced outage*) dan jam penurunan kapasitas (*derating hours*) melampaui total jam operasi normal unit pada periode tersebut. Dari ketiga peralatan bantu yang diamati, *guillotine damper* tercatat sebagai penyumbang gangguan terbesar, dengan potensi *derating* sebesar 3397 jam untuk Unit 5 dan 5166 jam untuk Unit 6 selama periode pengamatan yang sama. Selaras dengan rendahnya EAF, *Equivalent Forced Outage Rate* (EFOR) sebelum implementasi juga berada pada level yang mengkhawatirkan:

$$EFOR_{Unit\ 5\ before} = \frac{7435{,}62 + 2296}{13080 + 7435{,}62} \times 100\% = 47{,}43\%$$

$$EFOR_{Unit\ 6\ before} = \frac{9084{,}89 + 6175}{13080 + 9084{,}62} \times 100\% = 68{,}84\%$$

Tingginya EFOR ini mengonfirmasi bahwa mayoritas gangguan yang tercatat merupakan gangguan paksa akibat pembatalan sekuens, bukan pemeliharaan terjadwal. Ketiadaan mekanisme pemulihan dinamis pada sistem lama membuat waktu ketersediaan unit terbuang untuk menunggu penanganan teknis pada komponen bantu yang sebenarnya dalam kondisi fisik aman, sekaligus memaksa tim pemeliharaan melakukan penanganan darurat di lapangan di bawah tekanan waktu, kondisi yang menambah risiko keselamatan kerja.

Kondisi Operasional Sesudah Implementasi Force Logic

Setelah fitur *force logic* diaktifkan pada DCS *ABB Symphony Plus SPC 800*, operator dapat memintas (*bypass*) sinyal *feedback* posisi dari *limit switch* yang bermasalah, dengan syarat kondisi fisik peralatan di lapangan sudah dikonfirmasi aman secara manual. Perubahan ini langsung tercermin pada nilai *Equivalent Availability Factor* (EAF):

$$EAF_{Unit\ 5\ after} = \frac{13080 - 3901{,}44 - 3534{,}18}{13080} \times 100\% = 43{,}15\%$$

$$EAF_{Unit\ 6\ after} = \frac{13080 - 4653{,}81 - 3705{,}39}{13080} \times 100\% = 36{,}09\%$$

Penurunan jam *derating* akibat *sequence start* yang tidak lagi berulang kali *abort* juga menekan nilai *Equivalent Forced Outage Rate* (EFOR):

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

$$EFOR_{Unit\ 5\ after} = \frac{3534{,}18 + 1732}{13080 + 3534{,}18} \times 100\% = 31{,}64\%$$

$$EFOR_{Unit\ 6\ after} = \frac{3705{,}39 + 5279}{13080 + 3705{,}39} \times 100\% = 53{,}52\%$$

Perbandingan kedua kondisi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Nilai EAF dan EFOR Sebelum dan Sesudah Implementasi Force Logic

Unit	EAF Before (%)	EAF After (%)	EFOR Before (%)	EFOR After (%)	Selisih EAF (%)	Selisih EFOR (%)
5	13,32	43,15	47,43	31,64	+29,83	-15,79
6	-5,03	36,09	68,84	53,52	+41,12	-15,32

Selisih pada kedua unit menunjukkan arah yang konsisten. EAF naik di atas 29 poin persentase pada Unit 5 dan di atas 41 poin pada Unit 6, sementara EFOR turun sekitar 15 poin persentase pada kedua unit. Kenaikan EAF pada Unit 6 lebih besar dibanding Unit 5, sejalan dengan kondisi awalnya yang memang lebih buruk, EAF Unit 6 sempat berada di angka negatif akibat akumulasi *derating* yang melampaui jam operasi normal.

Dampak ini punya arti praktis yang lebih besar dari sekadar angka statistik. Setiap unit pembangkit 600 MW ditopang oleh enam *pulverizer*, dan satu *pulverizer* menanggung seperenam beban unit. Sebelum *force logic* diterapkan, kegagalan *guillotine damper* atau *swing valve* untuk mengirim sinyal posisi yang presisi langsung memicu pengulangan *sequence* dari *Step 0*, yang berarti penundaan pembebanan dan pemborosan bahan bakar penyalaan awal (*HSD*). Dengan *force logic*, hambatan sinyal semacam itu bisa dilewati begitu kondisi fisik terverifikasi aman, sehingga proses pembakaran, pengeringan, dan transportasi serbuk batubara menuju *burner* berjalan tanpa harus menghentikan seluruh sistem hanya untuk menunggu penggantian sensor atau perbaikan mekanis ringan.

Perbaikan ini bukan tanpa konsekuensi. Mekanisme *override* pada dasarnya menonaktifkan satu lapisan proteksi otomatis pada DCS. Risiko yang muncul dari kondisi ini, terutama potensi *masking fault*, dibahas lebih rinci pada bagian analisis *Fault Tree Analysis* berikut.

Analisis Kegagalan Sequence Start Pulverizer Menggunakan Fault Tree Analysis (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) digunakan untuk memetakan akar penyebab (*root cause*) kegagalan *sequence start pulverizer* secara bertingkat, mulai dari *basic event* di level sensor dan instrumen, naik ke *intermediate event*, hingga *top event* berupa kegagalan sekuens penyalaan secara keseluruhan. Seluruh cabang dihubungkan melalui gerbang logika OR, sehingga probabilitas pada tiap tingkat dijumlahkan secara akumulatif tanpa mekanisme penyaring atau redundansi (*AND gate*).

Perhitungan probabilitas *basic event* diperoleh dari frekuensi relatif 38 kejadian gangguan yang tercatat selama periode pengamatan, kemudian dirambatkan ke atas (*bottom-up*) menggunakan aljabar Boolean. Hasil akhirnya menempatkan probabilitas *top event*, yaitu kegagalan *sequence start pulverizer*, pada angka 0,71052632 atau 71,05%.

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

$$P(Top\ Event) = P(A) + P(B) + P(C) = 0{,}71052632$$

di mana *A* merupakan akumulasi cabang instrumen pengawasan (*J* + *K*), *B* merupakan cabang respon katup dan umpan balik mekanis (*L* + *M*), dan *C* merupakan cabang jalur *innerting* (*N* + *O*).

Angka 71,05% ini menunjukkan bahwa, pada kondisi tanpa intervensi logika kontrol, peluang sekuens penyalaan *pulverizer* berhenti secara otomatis (*auto-abort*) hampir mendominasi total pengujian operasional. Dua cabang, variabel *A* dan *B*, masing-masing menyumbang probabilitas 0,28947368, atau setara sekitar 40,74% dari total risiko *top event*. Kontribusi keduanya relatif seimbang, artinya kerentanan sistem tidak terpusat pada satu subsistem saja. Cabang *C*, jalur *innerting valve*, berkontribusi jauh lebih kecil, sekitar 18,52%, dengan variabel *N* mencatat probabilitas terendah di seluruh tabel, 0,02631579.

Pada level *basic event*, variabel *L* tercatat sebagai titik paling rawan (*single point of failure*), dengan probabilitas 0,18421053, tertinggi di antara seluruh komponen dasar. Variabel ini berkaitan dengan pembacaan sinyal pada instrumen katup, mencakup indikasi *limit switch* yang tidak presisi, keausan mekanis, dan fluktuasi tekanan udara instrumen. Variabel *J* (0,15789474) dan *K* (0,13157895) menyusul di posisi berikutnya, keduanya juga berasal dari masalah ketidaksesuaian pembacaan sensor bantu (*auxiliary sensors*), bukan kerusakan fatal pada komponen utama *pulverizer*.

Sebaran probabilitas ini memberi arah yang cukup jelas untuk strategi mitigasi. Karena sumber risiko terbesar terletak pada ketidaksesuaian sinyal instrumen, bukan pada kerusakan mekanis berat, penggantian komponen utama secara menyeluruh bukan langkah yang paling efisien. Rekayasa logika kontrol berupa *override sequence start*, yang memintas sinyal *fault* palsu dari *limit switch* setelah verifikasi manual di lapangan, memberi jalan untuk menekan probabilitas pada *intermediate event A* dan *B* mendekati titik nol, sehingga akumulasi probabilitas *top event* turun ke tingkat yang jauh lebih aman. Namun, memintas sinyal proteksi otomatis juga berarti menonaktifkan sementara satu lapisan pengaman. Risiko baru yang muncul dari kondisi ini dibahas pada bagian berikut.

Pengendalian Risiko dari Risiko Baru yang Muncul Setelah Fault Tree Analysis

Penerapan *force/override logic* memang efektif memotong rantai kegagalan (*cut set*) yang teridentifikasi dalam FTA, tetapi langkah ini juga memunculkan risiko sisa (*residual risk*) yang tidak bisa diabaikan. Saat operator memintas sinyal proteksi otomatis, lapisan keselamatan pada kontroler dinonaktifkan sementara. Dua ancaman utama muncul dari kondisi ini. Pertama, *masking fault*, kondisi di mana kerusakan fisik nyata pada *guillotine damper*, *swing valve*, atau *inerting valve* tertutup oleh status logika yang di-*override*. Kedua, *human error* akibat kesalahan eksekusi sinyal *interlock*. Jika status *force* diaktifkan tanpa verifikasi lapangan yang memadai, potensi bahaya seperti penumpukan serbuk batubara, kebocoran udara panas pada *Primary Air Fan*, atau kerusakan mekanis berat pada komponen *mill* bisa memicu *unplanned outage* yang jauh lebih fatal dibanding gangguan awal yang coba diatasi.

Manajemen pembangkit mengendalikan risiko ini melalui penguatan *Standard Operating Procedure* (SOP) dan mekanisme izin kerja khusus (*Permit to Override*). Intervensi logika tidak pernah dijalankan sebagai tindakan spontan di ruang kendali. Setiap keputusan *force logic* melewati verifikasi berlapis (*multi-barrier control*), operator DCS memberi instruksi kepada teknisi lapangan untuk memastikan kondisi

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

fisik peralatan aman secara visual, baru kemudian formulir izin kerja diisi dan disetujui oleh *Shift Supervisor* sebagai bukti akuntabilitas tindakan.

Status *force* juga dibatasi durasinya. Sistem log mencatat setiap parameter yang di-*bypass*, dan perbaikan fisik seperti penggantian *limit switch* atau pembersihan mekanik wajib dijadwalkan pada kesempatan pemeliharaan terdekat. Dengan kombinasi verifikasi fisik, otorisasi berjenjang, dan pembatasan waktu intervensi, risiko *human error* dan *masking fault* bisa ditekan tanpa mengorbankan manfaat kenaikan EAF dan penurunan EFOR yang sudah dicapai.

SIMPULAN

Fitur *force logic* pada *Distributed Control System* (DCS) bekerja sebagai mekanisme *override* sinyal input berbasis perangkat lunak, memotong rantai kegagalan sinyal kaku (*stiff logic cut set*) sehingga proses *sequence start pulverizer* dapat berlanjut tanpa terhenti berulang kali di *Step 0*. Kegagalan fungsi *guillotine damper* menjadi penyumbang gangguan terbesar, sebagian besar dipicu bukan oleh kerusakan fatal melainkan oleh ketidaksesuaian sinyal instrumen bantu, sebagaimana ditunjukkan oleh dominasi variabel *L* pada hasil FTA.

Secara kuantitatif, implementasi *force logic* pada Unit 5 dan Unit 6 PLTU Suralaya menunjukkan hasil yang konsisten. EAF Unit 5 naik dari 13,32% menjadi 43,15%, sementara EAF Unit 6 berbalik dari angka negatif -5,03% menjadi 36,09%. Di sisi lain, EFOR Unit 5 turun dari 47,43% menjadi 31,64%, dan EFOR Unit 6 turun dari 68,84% menjadi 53,52%. Perbaikan ini membuktikan bahwa fleksibilitas logika kontrol mampu mengembalikan kesiapan unit dari kondisi yang sebelumnya sangat rentan terhadap kegagalan sekuens.

Analisis FTA memperkuat temuan ini dari sisi risiko. Probabilitas *top event* sebesar 71,05% pada kondisi tanpa intervensi menunjukkan bahwa kegagalan sekuens penyalaan hampir mendominasi total pengujian operasional, dan variabel *A* serta *B* menjadi dua jalur risiko paling dominan. *Force logic* terbukti mampu memutus jalur perambatan risiko ini, tetapi juga memunculkan risiko sisa berupa *masking fault* dan *human error*. Kedua risiko ini dapat dimitigasi secara terstruktur melalui *multi-barrier control*, mencakup verifikasi fisik lapangan, penerbitan *Permit to Override*, dan pembatasan durasi status *force*. Dengan pengendalian tersebut, penerapan *force logic* pada Unit 5 dan Unit 6 PLTU Suralaya terbukti efektif meningkatkan keandalan operasional *pulverizer*, dengan syarat disertai tata kelola dan pengawasan yang ketat.

DAFTAR PUSTAKA

H. Chandra, R. Zulkarnain, and M. R. Fazal, “Failure analysis of pulverizer pipe elbow in PLTU boiler,” vol. 1, no. 1, pp. 1–17, 2023.

M. Ochowiak, Z. Bielecki, A. Krupińska, M. Matuszak, S. Włodarczak, M. Bielecki, D. Choiński, J. Smyła, and K. Jagiełło, “Pulverized coal-fired boilers: Future directions of scientific research,” *Energies*, vol. 16, no. 2, pp. 1–15, 2023, doi: 10.3390/en16020935.

A. Indarto, A. Bohra, S. Wahyudi, and A. Dharmanto, “Trafo daya menggunakan minyak isolasi yang dapat terurai secara biologis,” *Hexatech: Jurnal Ilmiah Teknik*, vol. 2, no. 2, pp. 49–55, 2023, doi: 10.55904/hexatech.v2i2.892.

S. Khan and S. Madnick, “Protecting chiller systems from cyberattack using a systems thinking approach,” pp. 606–627, 2022.

J. B. Kitto and S. C. Stultz, *Steam: Its Generation and Use*, 41st ed. Barberton, OH, USA: Babcock & Wilcox Company, 2005.

S. D. Nugroho, “Evaluasi Distributed Control System pada PLTU dengan Failure Mode,

E-ISSN : 2962-9713
P-ISSN : 2963-928X

Effect and Criticaly Analysis (FMECA)," *Kilat*, vol. 11, no. 1, pp. 88–102, 2022, doi: 10.33322/kilat.v11i1.1531.

K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Boston, MA, USA: Pearson, 2009.

A. J. Okirie, E. G. Saturday, M. I. Gift, and D. Ewe, "Operational data analytics for failure prediction and availability improvement in gas turbine power plants," pp. 1–39, 2025.

A. F. Ridlo, "Effectiveness analysis of the application of the failure mode and effect analysis method with failure defense task for reliability management improvement in sea water desalination system of PLTU Paiton Baru (1 x 660 MW)," *IPTEK Journal of Proceedings Series*, no. 5, p. 50, 2019, doi: 10.12962/j23546026.y2019i5.6279.

A. Sirajuddin, "The public private partnership model in the development and management of coal-fired power stations (PLTU) in Jenepoto Regency," pp. 201–209, 2023, doi: 10.18502/kss.v8i17.14115.

W. N. Suliyanti and R. F. Sari, "Blockchain-based implementation of building information modeling information using hyperledger composer," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3390/su13010321.

F. Wijayanti, "Root cause failure analysis pada shutoff hot damper mill di PT. Indonesia Power Unit Jasa Pembangkitan Jawa Tengah 2 Adipala," *Jurnal Mekanik Terapan*, vol. 3, no. 2, pp. 50–59, 2022, doi: 10.32722/jmt.v3i2.4616.

Y. Yudianto and A. S. Mohruni, "Industrial control system applied and problems: A review and experiences," *Journal of Mechanical Science and Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 001–005, 2021, doi: 10.36706/jmse.v8i1.49.

A. Ardiansyah Al Izzah, A. Lamada, Z. Zulhajji, A. Imran, and R. T. Mangesa, "Analysis of control system reliability at PLTG UPDK Tello," *Journal of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 2, no. 2, pp. 70–79, 2025, doi: 10.59562/jeeni.v2i2.6802.

P. J. Wildstein, M. T. Craig, and P. Vaishnav, "Participant overrides can halve the reliability value of direct load control programs," *Energy and Buildings*, vol. 299, art. 113606, 2023.