BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

PLTU Banten 3 Lontar merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga uap terbesar di sistem kelistrikan Jawa-Bali dengan kapasitas terpasang 3 x 315 MW, yang berperan penting dalam menjaga stabilitas pasokan listrik di wilayah barat Indonesia. Pada pembangkit ini, sistem pengolahan air menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari operasi sehari-hari. Berdasarkan hasil observasi dan diskusi dengan tim operasional di lapangan, teridentifikasi bahwa sistem Chemical Raw Water Pump (CRWP) di PLTU Banten 3 Lontar memiliki riwayat gangguan overpressure yang berulang. Insiden paling kritis terjadi pada 7 Mei 2024, di mana valve inlet seawater MED mengalami interlock close secara mendadak, menyebabkan aliran keluar dari header CRWP terhambat. Akibatnya, tekanan di dalam pipa meningkat drastis dalam waktu singkat, melampaui batas desain perpipaan, sehingga pipa main header CRWP mengalami kebocoran dan mengganggu proses pengolahan air secara signifikan. Kondisi deadhead atau pump running against closed valve ini memicu aktivasi Distributed Control System (DCS) yang berhasil mengeksekusi interlock dan mematikan pompa setelah delay yang telah diprogram, sehingga tekanan dapat kembali normal dan mencegah kerusakan lebih parah. Data tekanan puncak dari insiden ini menjadi acuan utama dalam penelitian untuk memvalidasi model simulasi yang dikembangkan.

Insiden kebocoran pipa akibat overpressure ini bukanlah kejadian pertama yang menimpa sistem CRWP di PLTU Banten 3 Lontar. Berdasarkan catatan work order pemeliharaan, tercatat tiga kali kejadian kebocoran pipa main header CRWP akibat kondisi serupa, yaitu pada 23 Agustus 2013 dan dua kali pada 20 Agustus 2014. Pola kejadian yang berulang ini menunjukkan bahwa sistem CRWP memiliki kerentanan terhadap kondisi deadhead, di mana pompa tetap beroperasi sementara katup discharge dalam posisi tertutup. Kondisi ini menyebabkan tekanan di dalam pipa meningkat secara eksponensial karena energi kinetik dari pompa diubah menjadi tekanan statis. Tanpa adanya sistem proteksi otomatis yang memadai, tekanan dapat melampaui batas desain perpipaan dan menyebabkan kebocoran atau bahkan ledakan pipa. Fakta bahwa insiden serupa terjadi berulang kali mengindikasikan bahwa solusi yang telah diterapkan sebelumnya belum sepenuhnya efektif dalam mengatasi akar permasalahan.

Secara teknis, interlock adalah mekanisme proteksi diskrit yang menghentikan operasi suatu peralatan ketika parameter operasi tertentu berada di luar batas aman. Pada sistem CRWP, interlock melibatkan parameter seperti level tangki air baku untuk mencegah dry running,

tekanan suction untuk mendeteksi penyumbatan, tekanan discharge untuk mendeteksi penyumbatan di sisi keluar seperti kasus katup tertutup, serta status katup. Logika interlock bersifat on/off based on limit, yang berarti keputusannya hanya dua: menghidupkan atau mematikan pompa, tanpa parameter tengah seperti pada sistem kontrol kontinu. Dengan kata lain, interlock adalah sistem keselamatan, bukan sistem kontrol proses.

Pengoperasian dan eksekusi logika interlock tersebut dijalankan melalui sistem kendali terdistribusi atau Distributed Control System (DCS). DCS merupakan sistem kontrol industri berbasis komputer yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian proses secara real-time dari pusat kendali melalui antarmuka Human Machine Interface (HMI). Sistem ini mengintegrasikan sensor, aktuator, dan logika kontrol sehingga operator dapat memantau kondisi peralatan, mengeksekusi logika proteksi, serta merekam data operasi secara terpusat. Penggunaan DCS dalam sistem tenaga listrik terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasi dan keandalan sistem karena memungkinkan proses kontrol dan monitoring dilakukan secara cepat dan akurat dengan waktu eksekusi logika yang deterministik. Namun, berdasarkan observasi lapangan, teridentifikasi beberapa permasalahan pada DCS, yaitu belum adanya logika interlock overpressure secara otomatis yang terintegrasi penuh, nilai delay interlock yang belum teroptimasi untuk gangguan transien cepat, tidak adanya logika deteksi laju kenaikan tekanan (rate-of-change), serta belum terintegrasinya proteksi berlapis secara optimal dalam logika DCS (Hasil observasi lapangan. Permasalahan performa DCS ini menjadi semakin kritis ketika dihadapkan pada skenario gangguan transien cepat, di mana tekanan dapat meningkat secara tiba-tiba dalam hitungan detik. Pada kondisi seperti ini, delay interlock yang terlalu panjang dapat menyebabkan tekanan melampaui batas aman sebelum DCS sempat mengeksekusi perintah trip. Selain itu, ketiadaan logika deteksi laju kenaikan tekanan (rate-of-change) membuat DCS tidak dapat membedakan antara kenaikan tekanan bertahap yang masih dapat ditoleransi dengan kenaikan tekanan cepat yang berpotensi membahayakan. Belum optimalnya integrasi proteksi berlapis—yang seharusnya menyediakan mekanisme cadangan ketika interlock utama gagal—juga menjadi celah keandalan yang perlu diatasi.

Analisis performa sistem kontrol menjadi aspek penting dalam memastikan operasi industri berjalan stabil. Performa DCS dalam mengeksekusi logika interlock perlu dievaluasi menggunakan parameter terukur seperti waktu respons alarm (Alarm Response Time), waktu respons interlock (Interlock Response Time), waktu eksekusi DCS (DCS Execution Time), tingkat keberhasilan trip (Trip Success), tekanan puncak (Peak Pressure), laju kenaikan tekanan (Pressure Rise Rate), laju penurunan aliran (Flow Decay Rate), overshoot tekanan (Pressure Overshoot), dan waktu pemulihan (Recovery Time). Kesembilan parameter ini mencerminkan kecepatan deteksi, ketepatan eksekusi, dan efektivitas proteksi DCS dalam menghadapi kondisi

abnormal. Pengujian langsung pada sistem pembangkit yang sedang beroperasi memiliki keterbatasan karena tidak semua skenario kegagalan dapat diuji secara aman tanpa mengganggu operasi.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pendekatan pemodelan dan simulasi sistem kontrol menjadi metode yang banyak digunakan. Salah satu perangkat lunak yang paling banyak digunakan adalah MATLAB dan Simulink yang dirancang khusus untuk memodelkan logika diskrit berbasis keadaan (state machine). Stateflow sangat cocok untuk merepresentasikan logika interlock CRWP yang bersifat on/off based on limit. Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan mengenai analisis keandalan sistem kontrol dan sistem DCS, penelitian yang secara khusus membahas pemodelan sistem kontrol interlock CRWP pada sistem pengolahan air pembangkit listrik masih relatif terbatas. Penelitian-penelitian sebelumnya lebih banyak membahas aspek interlock atau sistem kendali secara terpisah, belum terintegrasi dalam satu kerangka analisis performa DCS di PLTU Banten 3 Lontar. Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan pendekatan yang memodelkan interaksi antara logika kontrol interlock CRWP dan sistem eksekusi DCS secara terpadu. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model sistem kontrol interlock CRWP menggunakan MATLAB/Simulink Stateflow dan menganalisis performa DCS dalam mendeteksi serta merespons kondisi operasi abnormal—termasuk skenario katup tertutup yang pernah menyebabkan insiden pipa pecah di PLTU Banten 3 Lontar.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana melakukan pemodelan sistem kontrol interlock CRWP menggunakan MATLAB/Simulink berdasarkan parameter operasi (tekanan normal, *setpoint* alarm, *setpoint* trip, dan *delay* interlock)?
2. Bagaimana menentukan logika sistem kontrol interlock CRWP pada sistem MED di PLTU Banten 3 Lontar yang direpresentasikan dalam *Cause & Effect Matrix* dan diagram *state*?
3. Bagaimana tingkat performa DCS dalam mengeksekusi logika interlock yang diukur melalui sembilan parameter (*Peak Pressure*, *Pressure Rise Rate*, *Flow Decay Rate*, *Alarm Response Time*, *Interlock Response Time*, *DCS Execution Time*, *Trip Success*, *Pressure Overshoot*, dan *Recovery Time*) berdasarkan hasil simulasi?
4. Bagaimana respons DCS dalam mendeteksi dan merespons kondisi operasi abnormal pada sistem CRWP berdasarkan hasil simulasi lima skenario (normal, *before interlock*, *after interlock*, *deadhead fast*, dan *interlock fail*)?

5. Bagaimana tingkat akurasi model simulasi yang dikembangkan dalam merepresentasikan kondisi aktual sistem CRWP di PLTU Banten 3 Lontar berdasarkan validasi dengan data gangguan aktual.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disusun, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan model simulasi sistem kontrol interlock CRWP menggunakan MATLAB/Simulink dengan berdasarkan parameter operasi (tekanan normal , *setpoint* alarm , *setpoint* trip, dan *delay* interlock) untuk menggambarkan perilaku operasi pompa pada berbagai kondisi sistem.
2. Menganalisis karakteristik dan logika sistem kontrol interlock CRWP pada sistem MED di PLTU Banten 3 Lontar melalui representasi *Cause & Effect Matrix* dan diagram *state* yang diimplementasikan dalam Stateflow.
3. Menganalisis performa DCS dalam mengeksekusi logika interlock yang diukur melalui sembilan parameter (*Peak Pressure*, *Pressure Rise Rate*, *Flow Decay Rate*, *Alarm Response Time*, *Interlock Response Time*, *DCS Execution Time*, *Trip Success*, *Pressure Overshoot*, dan *Recovery Time*) berdasarkan hasil simulasi.
4. Menganalisis respons DCS terhadap kondisi operasi abnormal pada sistem CRWP berdasarkan hasil simulasi lima skenario (normal, *before interlock*, *after interlock*, *deadhead fast*, dan *interlock fail*) yang merepresentasikan berbagai kemungkinan gangguan di lapangan.
5. Memvalidasi model simulasi yang dikembangkan dengan data gangguan aktual sistem CRWP untuk mengevaluasi tingkat akurasi representasi kondisi nyata.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik bagi pengembangan sistem proteksi tenaga listrik maupun bagi penguatan kajian keandalan peralatan pada jaringan distribusi tegangan menengah. Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan kajian sistem kontrol industri dan otomasi pembangkit listrik, khususnya pada analisis performa DCS dalam pengendalian sistem pompa menggunakan pendekatan pemodelan dan simulasi. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem kontrol dan proteksi pada pembangkit listrik.
2. Memberikan gambaran analitis mengenai performa DCS dalam mengendalikan CRWP pada sistem MED sehingga dapat menjadi referensi bagi operator dan teknisi

PLTU Banten 3 Lontar dalam memahami karakteristik operasi sistem kontrol serta mengidentifikasi potensi kelemahan sistem proteksi yang ada.

3. Menyediakan model simulasi sistem kontrol yang dapat digunakan untuk menganalisis respons operasi CRWP pada berbagai kondisi sistem tanpa harus melakukan pengujian langsung pada sistem operasi pembangkit, sehingga mengurangi risiko gangguan operasi dan biaya pengujian.
4. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya terkait analisis sistem kontrol pompa, pengembangan sistem DCS, maupun studi performa sistem kontrol pada fasilitas pembangkit listrik, khususnya dalam konteks optimalisasi parameter proteksi dan peningkatan keandalan sistem.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup permasalahan pada penelitian ini dijabarkan sebagai berikut:

Ruang lingkup permasalahan pada penelitian ini dijabarkan sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada sistem pengolahan air MED di PLTU Banten 3 Lontar, dengan fokus pada sistem kontrol interlock CRWP.
2. Objek penelitian difokuskan pada analisis logika sistem kontrol interlock CRWP serta performa DCS dalam merespons kondisi operasi sistem.
3. Data penelitian meliputi dokumentasi sistem kontrol CRWP, data parameter operasi sistem pengolahan air MED, dan informasi performa DCS yang diperoleh dari dokumen inovasi dan hasil observasi lapangan.
4. Pemodelan sistem kontrol dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink untuk merepresentasikan logika interlock yang bersifat diskrit (*on/off based on limit*).
5. Analisis performa DCS dilakukan menggunakan sembilan parameter. *Peak Pressure, Pressure Rise Rate, Flow Decay Rate, Alarm Response Time, Interlock Response Time, DCS Execution Time, Trip Success, Pressure Overshoot, dan Recovery Time.*
6. Simulasi dilakukan pada lima skenario operasi: kondisi normal, *before interlock*, *after interlock*, *deadhead fast*, dan *interlock fail*.
7. Penelitian tidak membahas secara rinci desain perangkat keras DCS, konfigurasi jaringan komunikasi, maupun kalibrasi instrumen lapangan.
8. Penelitian tidak mencakup modifikasi atau perancangan ulang sistem kontrol pada sistem operasi pembangkit yang sedang berjalan.

1.6 Kebaharuan

Kebaruan dalam penelitian ini terletak pada beberapa aspek berikut. Penelitian ini menawarkan pendekatan yang berbeda dari penelitian-penelitian sebelumnya, di mana analisis performa DCS dilakukan melalui pemodelan sistem kontrol interlock CRWP secara terpadu menggunakan MATLAB/Simulink dengan. Berbeda dengan penelitian-penelitian terdahulu yang umumnya membahas aspek interlock atau sistem kendali secara terpisah, penelitian ini mengintegrasikan keduanya dalam satu kerangka analisis yang komprehensif, dengan fokus pada sistem pengolahan air di PLTU Banten 3 Lontar. Adapun kebaruan yang ditawarkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pendekatan analisis performa DCS berbasis pemodelan sistem kontrol, di mana performa DCS dianalisis melalui representasi logika kontrol interlock CRWP dalam model simulasi menggunakan MATLAB/Simulink dengan. Pendekatan ini memungkinkan analisis performa DCS secara kuantitatif tanpa mengganggu operasi pembangkit yang sedang berjalan
2. Fokus penelitian pada sistem pengolahan air pembangkit listrik, khususnya sistem MED di PLTU Banten 3 Lontar, yang masih jarang dikaji dalam penelitian sistem kontrol industri berbasis simulasi. Penelitian ini mengisi celah kajian pada komponen pendukung kritis yang sering terabaikan dalam analisis sistem pembangkit
3. Analisis respons sistem kontrol interlock terhadap berbagai kondisi operasi, baik kondisi operasi normal maupun kondisi gangguan (termasuk skenario *deadhead* bertahap, *deadhead fast*, dan *interlock fail*), untuk melihat bagaimana DCS merespons perubahan kondisi operasi pompa secara dinamis.
4. Pendekatan simulasi sebagai metode analisis tanpa mengganggu sistem operasi pembangkit, sehingga memungkinkan studi perilaku sistem kontrol dilakukan tanpa risiko terhadap keberlangsungan operasi pembangkit listrik. Hal ini memungkinkan pengujian skenario kegagalan yang tidak mungkin dilakukan secara langsung di lapangan.

Penggunaan parameter performa DCS spesifik yang belum banyak diterapkan pada penelitian sejenis tentang performa DCS di PLTU, meliputi *alarm response time*, *interlock response time*, *DCS execution time*, *trip success*, *pressure overshoot*, dan *recovery time*

1.7 Sistematis Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian mengenai latar belakang penelitian yang menjelaskan pentingnya

sistem kontrol interlock CRWP dalam mendukung operasi sistem pengolahan air pada pembangkit listrik, serta identifikasi permasalahan performa DCS yang menjadi fokus penelitian. Selain itu, bab ini memuat rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, kebaruan penelitian, serta sistematika penulisan sebagai gambaran umum struktur penelitian

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas landasan teori yang berkaitan dengan penelitian, meliputi konsep sistem pengolahan air pada pembangkit listrik, prinsip kerja MED, konsep DCS, prinsip kerja sistem kontrol interlock pompa, serta konsep pemodelan dan simulasi sistem kontrol menggunakan MATLAB/Simulink. Selain itu, bab ini juga memaparkan penelitian terdahulu yang relevan sebagai dasar pengembangan penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi pendekatan penelitian, jenis dan sumber data yang digunakan, teknik pengumpulan data, serta tahapan pemodelan sistem kontrol CRWP menggunakan MATLAB/Simulink. Bab ini juga menjelaskan prosedur simulasi, penentuan parameter performa DCS, serta teknik analisis data berdasarkan hasil simulasi.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pemodelan sistem kontrol interlock CRWP, hasil simulasi berbagai kondisi operasi sistem, serta analisis respons sistem kontrol terhadap perubahan kondisi operasi. Selain itu, dilakukan pembahasan mengenai performa DCS dalam mengeksekusi logika interlock berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian mengenai performa DCS pada sistem kontrol interlock CRWP. Selain itu, disampaikan pula saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan analisis sistem kontrol dan pengembangan sistem otomasi pada pembangkit listrik.