

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Transisi menuju sistem energi bersih dan terbarukan mendorong berbagai negara dan industri untuk mencari alternatif bahan bakar yang rendah emisi. Dalam cara mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan menekan dampak perubahan iklim, energi bersih seperti surya, angin, dan bioenergi mulai diberlakukan secara luas. Di antara berbagai opsi tersebut, hidrogen muncul sebagai salah satu kandidat utama karena sifatnya yang fleksibel, tidak menghasilkan emisi karbon saat digunakan, dan dapat diaplikasikan lintas sektor—mulai dari transportasi, pembangkit listrik, hingga proses industri berat (Redekar et al., 2022). Peran strategis hidrogen dalam mendukung dekarbonisasi menjadikannya fokus utama dalam pengembangan teknologi energi masa depan.

Namun, dibalik potensinya, pemanfaatan hidrogen dalam skala industri menghadirkan tantangan keselamatan yang unik dan signifikan. Sebagai molekul terkecil, hidrogen memiliki kecenderungan tinggi untuk bocor melalui sambungan pipa, segel katup, dan bahkan mampu meresap secara perlahan melalui material pipa itu sendiri (Setiawan et al., 2017). Risiko ini diperparah oleh karakteristik pembakarannya yang ekstrem. Rentang flammabilitas hidrogen di udara sangat lebar, yaitu antara 4% hingga 76%, jauh melampaui metana yang hanya 5% hingga 15% (Pipeline Safety Trust, 2023). Artinya, bahkan kebocoran kecil pun berpotensi membentuk campuran yang mudah terbakar di lingkungan terbuka.

Hidrogen yang sangat ringan dan memiliki difusivitas tinggi cenderung membentuk vektor dilusi yang cepat dan menyebar secara radial dari titik kebocoran (RSNI3 ISO 19880-1:2020, 2024). Selain itu, interaksi antara hidrogen (adesi) terhadap permukaan logam seperti baja karbon cukup tinggi, menyebabkan molekul hidrogen menempel dan berdifusi ke dalam permukaan pipa. Fenomena ini memperlambat pelepasan gas dari permukaan internal dan

memperpanjang durasi paparan, serta berkontribusi terhadap terjadinya *Hydrogen Embrittlement* (HE).

Kehadiran HE menimbulkan probabilitas kegagalan pipa meningkat seiring waktu, menjadikan sistem deteksi kebocoran dan penutup darurat (*Automatic Shut-Off Valve*) semakin krusial seiring bertambahnya usia pipa. Inti dari tantangan desain sistem aktivasi ASV terletak pada dilema penentuan setpoint penurunan tekanan, yang menyeimbangkan antara keamanan dan ketersediaan operasional. Jika setpoint diatur terlalu sensitif, sistem akan rentan terhadap *spurious trip*—penghentian proses yang tidak perlu ketika tidak ada bahaya nyata (Dang et al., 2015). Selain itu, penempatan ASV pada lokasi yang tidak strategis dapat menyebabkan keterlambatan isolasi aliran gas, memperluas zona bahaya, dan menurunkan efektivitas proteksi sistem (RSNI3 ISO 19880-1:2020, 2024).

Dalam konteks sistem energi berisiko tinggi seperti hidrogen, PLC berperan sebagai pusat pengendali yang memastikan respons cepat terhadap kondisi abnormal. Ia membandingkan data sensor dengan setpoint yang telah ditentukan, lalu mengaktifkan ASV bila terjadi kebocoran atau penurunan tekanan signifikan. Tanpa setpoint, PLC tidak memiliki acuan untuk membedakan kondisi normal dan berbahaya. Sehingga kombinasi data ini mengarah pada kesimpulan bahwa keandalan keseluruhan *loop* kontrol ASV—mulai dari deteksi, pemrosesan logika, hingga aksi mekanis—merupakan benteng pertahanan paling krusial.

1.2 Identifikasi Masalah

Melalui latar belakang yang telah dipaparkan di atas, penulis mengidentifikasi masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Hidrogen memiliki sifat yang tergolong eksplosif, dengan difusivitas tinggi dan rentang flammabilitas yang luas.
2. Fenomena *Hydrogen Embrittlement* (HE) menyebabkan degradasi material pipa secara progresif, meningkatkan risiko kegagalan mekanis meskipun dalam kondisi operasi normal.

3. Penempatan *Automatic Shut-Off Valve* (ASV) yang tidak strategis dapat menyebabkan keterlambatan respons.
4. *Automatic Shut-Off Valve* berperan sebagai katup otomatis. Tanpa setpoint, PLC tidak dapat memutuskan kebocoran saat terjadi penurunan tekanan.

1.3 Pembatasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus dan terarah, maka ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian hanya berfokus pada setpoint penurunan tekanan sebagai parameter utama.
2. Penelitian hanya membahas penggunaan PLC sebagai sistem kendali utama dalam mendeteksi kebocoran dan mengaktifkan ASV.
3. Simulasi dan pembahasan hanya mencakup logika kendali PLC dan pengaturan *setpoint*, tanpa membahas detail desain *hardware* sensor maupun spesifikasi material pipa secara mendalam.
4. Analisis tidak mencakup aspek ekonomi secara mendetail, seperti analisis biaya-manfaat atau biaya siklus hidup dari sistem yang dirancang.

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah yang telah diuraikan, berikut adalah rumusan masalah yang diteliti dalam penelitian ini:

1. Bagaimana peran PLC sebagai sistem kendali utama dalam mendeteksi kebocoran hidrogen pada pipa distribusi?
2. Bagaimana PLC dapat mengintegrasikan data sensor tekanan dan aliran untuk mengaktifkan *Automatic Shut-Off Valve* (ASV) secara tepat?
3. Bagaimana logika kendali PLC dapat dioptimalkan agar mampu menyeimbangkan antara sensitivitas *setpoint* dan keandalan sistem, sehingga tidak terjadi *spurious trip* namun tetap efektif mendeteksi kebocoran?

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan utama yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan *setpoint* penurunan tekanan yang sensitif untuk mendeteksi kebocoran, tetapi tetap stabil terhadap fluktuasi operasional normal, sehingga meminimalisir *spurious trip*.
2. Untuk menganalisis mekanisme kerja sistem pengendalian otomatis berbasis PLC dalam merespons penurunan tekanan.
3. Merancang algoritma kontrol logis berbasis PLC menggunakan bahasa pemrograman *Ladder Diagram* untuk mengendalikan sistem *Automatic Shut-Off Valve* (ASV) secara otomatis dan real-time.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kegunaan dan manfaat yang berarti bagi industri dan pihak-pihak terkait dalam pengembangan energi hidrogen sebagai berikut:

1. Menyediakan rekomendasi teknis untuk mengurangi risiko *spurious trip* sekaligus meningkatkan keandalan sistem proteksi.
2. Mendukung transisi menuju energi bersih dengan memastikan bahwa pemanfaatan hidrogen dilakukan secara aman.
3. Mengurangi potensi kecelakaan industri yang dapat berdampak pada masyarakat dan lingkungan sekitar.

Intelligentia - Dignitas