

QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT (QRA) PADA HYDROGEN REFUELING STATION MENGGUNAKAN SOFTWARE HYRAM+ 5.0

*Hakan Syukur Allatif¹, Budi Setiyana², Muchammad²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: hsallatif22@students.undip.ac.id

Abstrak

Perkembangan energi terbarukan semakin mendorong penggunaan hidrogen sebagai alternatif bahan bakar bersih. Hydrogen Refueling Station (HRS) menjadi infrastruktur vital dalam mendukung distribusi hidrogen untuk kendaraan bermotor. Namun, hidrogen memiliki karakteristik yang sangat mudah terbakar dan mudah meledak, sehingga diperlukan analisis risiko yang komprehensif terhadap sistem HRS. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis *Quantitative Risk Assessment* (QRA) pada desain HRS menggunakan perangkat lunak HyRAM+ versi 5.0. Studi ini mencakup validasi model nozzle teoritis (Brich, Brich 2, Ewan, Molkov, dan Otugen), pemodelan sistem fisik HRS berdasarkan data komponen dan layout, serta simulasi risiko pada tiga variasi tekanan (500, 700, dan 900 bar) dengan rentang temperatur 100–300°C. Parameter risiko yang dianalisis mencakup *Potential Loss of Life* (PLL), *Fatal Accident Rate* (FAR), dan *Average Individual Risk* (AIR). Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan tekanan secara langsung meningkatkan tingkat risiko keselamatan. Nilai PLL tertinggi mencapai $7,05 \times 10^{-5}$ pada tekanan 900 bar, dengan nilai FAR sebesar 0,305 dan AIR mencapai 0,0007. Lokasi dengan risiko tertinggi ditemukan di area penyimpanan dan pengisian. Model Ewan memberikan hasil dispersi maksimum, sedangkan Brich dan Otugen menunjukkan nilai simulasi paling akurat terhadap data jurnal. Penelitian ini menunjukkan bahwa QRA berbasis HyRAM+ dapat memberikan pendekatan sistematis dalam menilai dan merancang sistem HRS yang lebih aman. Temuan ini diharapkan menjadi referensi awal untuk pengembangan HRS di Indonesia secara komprehensif, terutama dalam aspek desain mitigasi dan perencanaan zona aman berbasis data risiko kuantitatif.

Kata Kunci: *average individual risk; fatal accident rate; hydrogen refueling station; potential loss of life; quantitative risk assessment*

Abstract

The development of renewable energy increasingly promotes the use of hydrogen as a clean fuel alternative. Hydrogen Refueling Stations (HRS) serve as critical infrastructure to support hydrogen distribution for motorized vehicles. However, hydrogen's highly flammable and explosive characteristics require comprehensive risk analysis for HRS systems. This study aims to perform a *Quantitative Risk Assessment* (QRA) of an HRS design using the HyRAM+ version 5.0 software. The research includes the validation of five theoretical nozzle models (Brich, Brich 2, Ewan, Molkov, and Otugen), physical system modeling based on actual HRS component layout, and risk simulations under three pressure variations (500, 700, and 900 bar) within a temperature range of 100–300°C. The assessed risk parameters include *Potential Loss of Life* (PLL), *Fatal Accident Rate* (FAR), and *Average Individual Risk* (AIR). Simulation results indicate that increasing system pressure significantly raises safety risks. The highest PLL was recorded at 7.05×10^{-5} at 900 bar, with a corresponding FAR of 0.305 and AIR of 0.0007. The highest-risk zones were found near the hydrogen storage and dispensing components. The Ewan model produced the widest dispersion result, while Brich and Otugen models most closely matched experimental data. This research demonstrates that HyRAM+-based QRA provides a systematic approach to evaluating and designing safer HRS systems. The findings are expected to serve as a baseline reference for future HRS development in Indonesia, particularly regarding mitigation strategies and safe zone planning using quantitative risk data.

Keywords: *average individual risk; fatal accident rate; hydrogen refueling station; potential loss of life; quantitative risk assessment*

1. Pendahuluan

Pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan emisi karbon signifikan, mencapai 34,74 miliar ton CO₂ pada 2021 [1]. Dampaknya mencakup pemanasan global dan pencemaran udara yang membahayakan kesehatan serta keselamatan [2,3]. Salah satu solusi untuk mengurangi emisi adalah penggunaan hidrogen, yang memiliki densitas energi tinggi, tidak mengandung karbon, dan menghasilkan air saat dibakar [4–6].

Namun, hidrogen bersifat mudah terbakar dan berisiko meledak jika terjadi kebocoran [7]. Oleh karena itu, dibutuhkan infrastruktur seperti Hydrogen Refueling Station (HRS) yang aman. Di Indonesia, baru satu HRS diresmikan pada 2024 [9], jauh tertinggal dari Jepang dan Tiongkok yang memiliki ratusan HRS [10].

Untuk memastikan keamanan HRS, diperlukan analisis risiko melalui Quantitative Risk Assessment (QRA). Metode ini menghitung risiko seperti PLL, FAR, dan AIR secara numerik. Perangkat lunak HyRAM+ 5.0 dari Sandia National Laboratories dapat digunakan untuk mensimulasikan berbagai skenario kegagalan dan dampak fisiknya [11]. Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko pada desain HRS agar pengembangannya di Indonesia memenuhi standar keselamatan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko kuantitatif pada desain HRS menggunakan perangkat lunak HyRAM+ 5.0, serta meninjau efek fisik dari berbagai skenario kegagalan. Hasil penelitian diharapkan menjadi acuan dalam pengembangan HRS yang aman dan sesuai standar keselamatan di Indonesia.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak HyRAM+ 5.0 dengan pendekatan validasi model nosel dan pemodelan sistem HRS. Data desain dan konfigurasi HRS diambil dari P&ID aktual dan disimulasikan pada berbagai kondisi tekanan (500, 700, dan 900 bar). Parameter yang dianalisis meliputi:

- Potensi kehilangan nyawa (PLL)
- Tingkat kecelakaan fatal (FAR)
- Risiko individu rata-rata (AIR)

3. Hasil dan Pembahasan

Simulasi QRA pada sistem Hydrogen Refueling Station (HRS) dilakukan untuk tiga variasi tekanan: 500, 700, dan 900 bar, guna mengevaluasi pengaruhnya terhadap parameter risiko PLL, FAR, dan AIR. Hasil menunjukkan peningkatan tekanan secara signifikan meningkatkan risiko keselamatan. Nilai PLL meningkat dari $2,12 \times 10^{-5}$ (500 bar) menjadi $4,23 \times 10^{-5}$ (700 bar) dan $7,05 \times 10^{-5}$ (900 bar). Demikian pula, FAR naik dari 0,092 ke 0,185 lalu 0,305, dan AIR dari 0,0002 ke 0,0004 lalu 0,0007. Titik risiko tertinggi terletak pada area storage vessel, kompresor, dan dispenser. Hasil ini menegaskan bahwa tekanan adalah faktor kritis dalam desain keselamatan HRS, sehingga perlu pengendalian tekanan, sistem deteksi kebocoran, dan proteksi kebakaran yang optimal.

4. Kesimpulan

Hasil analisis Quantitative Risk Assessment (QRA) menggunakan HyRAM+ 5.0 menunjukkan bahwa tekanan hidrogen sangat memengaruhi tingkat risiko keselamatan pada sistem Hydrogen Refueling Station (HRS). Meningkatnya tekanan menghasilkan nilai PLL, FAR, dan AIR yang lebih tinggi secara eksponensial. Pada 900 bar, tercatat PLL sebesar $7,05 \times 10^{-5}$, FAR sebesar 0,305, dan AIR sebesar 0,0007. Titik risiko tertinggi berada pada area storage vessel, kompresor, dan dispenser. Temuan ini menegaskan pentingnya kontrol tekanan dalam desain dan operasi HRS. Metode QRA melalui HyRAM+ efektif dalam mengevaluasi risiko dan menjadi dasar untuk penetapan zona aman, strategi mitigasi, serta perencanaan keselamatan fasilitas, terutama dalam konteks pengembangan HRS di Indonesia.

5. Daftar Pustaka

- [1] Omenu T. Global Carbon Emissions from Fossil Fuels. *J Environ Sustain*. 2024;12(1):1–9.
- [2] Jana D. Emisi Karbon dan Polusi Kendaraan. *Jurnal Teknik Lingkungan*. 2024;10(2):13–20.
- [3] Wakhidatul M. Kecelakaan Lalu Lintas dan Emisi. *TekMesin*. 2021;6(3):12–18.
- [4] Tarigan H. Energi Alternatif dan Hidrogen. *J Energi Terbarukan*. 2020;8(1):21–27.
- [5] Rahayu P. Aplikasi Hidrogen dalam Transportasi. *JTM*. 2011;3(3):55–60.
- [6] Sofyan R. Karakteristik Hidrogen. *Jurnal Kimia Dasar*. 2021;2(2):88–92.
- [7] Gómez A, Santos M. Global Hydrogen Vehicle Data. *Renew Sustain Energy*. 2023;67(5):101–109.
- [8] Molina A, et al. Hydrogen Refueling Station Safety. *Int J Hydrogen Energy*. 2024;49(2):277–285.
- [9] PLN. PT PLN Resmikan Stasiun Pengisian Hidrogen di Senayan. Press Release PLN; 2024.
- [10] Martin P. Asia Hydrogen Station Growth. *Hydrogen Insight*. 2024;5(4):22–27.
- [11] Groth KM, Hecht ES. Hydrogen Risk Assessment Models. Sandia National Labs; 2016.