

## PENGARUH TEKANAN HIDROGEN TERHADAP TINGKAT RISIKO PADA HYDROGEN REFUELING STATION (HRS)

\*Thoriq Muhammad Dafa<sup>1</sup>, Budi Setiyana<sup>2</sup>, Muchammad<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: [thoriq03@students.undip.ac.id](mailto:thoriq03@students.undip.ac.id)

### Abstrak

Hydrogen Refueling Station (HRS) merupakan infrastruktur penting dalam pengembangan energi bersih berbasis hidrogen, namun memiliki risiko keselamatan tinggi akibat karakteristik hidrogen yang mudah terbakar, memiliki rentang flammability yang luas, serta disimpan pada tekanan tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kuantitatif pengaruh variasi tekanan hidrogen terhadap tingkat risiko keselamatan pada sistem HRS. Metode yang digunakan adalah pendekatan Quantitative Risk Assessment (QRA) dengan bantuan perangkat lunak simulasi berbasis skenario kebocoran. Variasi tekanan yang dianalisis meliputi tekanan rendah, menengah, dan tinggi sesuai kondisi operasional HRS. Parameter yang diamati meliputi radius dampak kebakaran dan ledakan, frekuensi kejadian, serta tingkat fatalitas terhadap manusia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan hidrogen secara signifikan meningkatkan tingkat risiko. Pada tekanan tinggi, radius dampak kebakaran meningkat hingga  $\pm 35\%$  dibandingkan tekanan rendah, sementara probabilitas kejadian fatal meningkat dari  $1,2 \times 10^{-5}$  menjadi  $4,8 \times 10^{-5}$  per tahun. Selain itu, laju kebocoran meningkat hingga  $\pm 40\%$  yang mempercepat pembentukan awan gas mudah terbakar dan meningkatkan potensi terjadinya ledakan. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa tekanan merupakan parameter dominan dalam menentukan tingkat risiko pada HRS. Oleh karena itu, diperlukan optimasi tekanan operasional, pemilihan material yang sesuai, serta penerapan sistem mitigasi seperti pressure relief valve dan deteksi kebocoran untuk meminimalkan risiko dan meningkatkan keselamatan operasional HRS.

**Kata kunci:** *hydrogen refueling station*; tekanan hidrogen; risiko keselamatan; qra; kebocoran

### Abstract

*Hydrogen Refueling Stations (HRS) are essential infrastructures in the development of hydrogen-based clean energy; however, they pose significant safety risks due to hydrogen's high flammability, wide flammability range, and high-pressure storage conditions. This study aims to quantitatively analyze the effect of hydrogen pressure variation on safety risk levels in HRS systems. A Quantitative Risk Assessment (QRA) approach was applied using simulation software based on leakage scenarios. Pressure variations include low, medium, and high levels corresponding to typical HRS operational conditions. Observed parameters include fire and explosion impact radius, event frequency, and human fatality levels. The results indicate that increasing hydrogen pressure significantly elevates safety risks. Under high-pressure conditions, the fire impact radius increases by approximately 35% compared to low pressure, while the fatality probability rises from  $1.2 \times 10^{-5}$  to  $4.8 \times 10^{-5}$  per year. Additionally, leakage rates increase by about 40%, accelerating the formation of flammable gas clouds and increasing explosion potential. Overall, the findings demonstrate that pressure is a dominant parameter influencing risk levels in HRS. Therefore, optimizing operating pressure, selecting appropriate materials, and implementing mitigation systems such as pressure relief valves and leak detection are crucial to minimize risks and enhance operational safety.*

**Keywords:** *hydrogen refueling station; hydrogen pressure; safety risk; qra; leakage*

### 1. Pendahuluan

Hydrogen Refueling Station (HRS) merupakan salah satu infrastruktur kunci dalam mendukung transisi energi menuju sistem energi rendah karbon dan berkelanjutan. Penggunaan hidrogen sebagai energi alternatif semakin berkembang karena memiliki emisi nol pada titik penggunaan serta potensi integrasi dengan energi terbarukan [1]. Meskipun demikian, hidrogen memiliki karakteristik fisik dan kimia yang menimbulkan tantangan keselamatan, seperti

mudah terbakar, memiliki rentang flammability yang luas (4–75% volume di udara), serta energi penyalaan minimum yang sangat rendah [2]. Selain itu, sifat molekul hidrogen yang kecil menyebabkan kecenderungan kebocoran lebih tinggi dibandingkan gas lain [3]. Oleh karena itu, pengembangan infrastruktur HRS harus mempertimbangkan aspek keselamatan secara komprehensif sejak tahap desain hingga operasional.

Salah satu parameter paling krusial dalam sistem HRS adalah tekanan operasional hidrogen. Pada umumnya, hidrogen disimpan dan didistribusikan pada tekanan tinggi, seperti 350 bar untuk kendaraan komersial dan 700 bar untuk kendaraan ringan [6]. Tekanan tinggi ini memungkinkan densitas energi yang lebih besar, namun juga meningkatkan energi tersimpan dalam sistem yang berpotensi dilepaskan saat terjadi kegagalan [7]. Selain itu, tekanan berpengaruh langsung terhadap laju aliran massa gas saat kebocoran, yang menentukan kecepatan pembentukan awan gas mudah terbakar [8]. Dengan demikian, tekanan tidak hanya memengaruhi performa sistem tetapi juga tingkat bahaya yang mungkin terjadi.

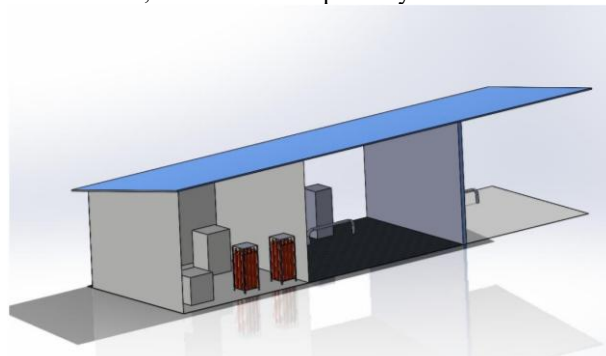
Pendekatan analisis risiko menjadi sangat penting untuk memahami dan mengelola potensi bahaya pada sistem HRS. Salah satu metode yang umum digunakan adalah Quantitative Risk Assessment (QRA), yang memungkinkan evaluasi risiko secara kuantitatif melalui analisis frekuensi dan konsekuensi [5]. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan tekanan berkorelasi dengan peningkatan radius dampak kebakaran dan ledakan [4]. Standar internasional seperti ISO 19880-1 dan NFPA 2 juga menekankan pentingnya pengendalian tekanan serta penerapan sistem keselamatan dalam operasional HRS [2]. Namun demikian, masih terdapat keterbatasan penelitian yang secara spesifik mengisolasi pengaruh tekanan terhadap berbagai parameter risiko dalam satu kerangka analisis yang terintegrasi.

Selain aspek teknis, peningkatan tekanan juga berdampak pada aspek keandalan material dan integritas struktur. Material yang digunakan dalam sistem HRS harus mampu menahan tegangan tinggi serta resistensi terhadap fenomena seperti hydrogen embrittlement yang dapat menyebabkan kegagalan prematur [7]. Kondisi ini memperbesar kemungkinan terjadinya kebocoran maupun kegagalan komponen jika tidak dirancang dengan baik. Oleh karena itu, pemilihan material dan desain sistem menjadi faktor penting dalam mitigasi risiko pada tekanan tinggi. Integrasi antara analisis risiko dan desain teknik menjadi pendekatan yang diperlukan untuk meningkatkan keselamatan sistem.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kuantitatif pengaruh variasi tekanan hidrogen terhadap tingkat risiko keselamatan pada Hydrogen Refueling Station menggunakan metode QRA. Analisis difokuskan pada parameter radius dampak, frekuensi kejadian, dan tingkat fatalitas sebagai indikator utama risiko. Dengan mengisolasi variabel tekanan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih jelas mengenai kontribusi tekanan terhadap peningkatan risiko. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam optimasi desain sistem HRS serta pengambilan keputusan terkait batas tekanan operasional yang aman. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi akademik dalam pengembangan studi keselamatan hidrogen.

## 2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode Quantitative Risk Assessment (QRA) untuk mengevaluasi tingkat risiko pada Hydrogen Refueling Station (HRS) melalui simulasi berbasis probabilistik. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang meliputi parameter teknis sistem HRS seperti tekanan operasional, diameter pipa, jenis komponen, serta properti hidrogen seperti densitas, batas flammability, dan energi penyalaan minimum yang diperoleh dari literatur, standar internasional, dan database seperti HyRAM+.



Gambar 1. Permodelan 3D Hydrogen Refueling Station

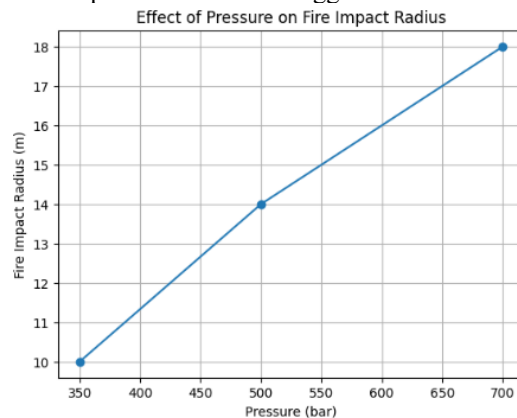
Variabel utama yang dianalisis adalah tekanan hidrogen dengan tiga variasi, yaitu 350 bar (rendah), 500 bar (menengah), dan 700 bar (tinggi), sedangkan variabel respon meliputi radius dampak kebakaran dan ledakan, frekuensi kejadian, serta tingkat fatalitas, dengan asumsi variabel lain seperti kondisi lingkungan dan material sistem konstan. Skenario kebocoran ditentukan berdasarkan variasi ukuran lubang kebocoran untuk merepresentasikan kondisi realistis di lapangan. Analisis dilakukan melalui tahapan identifikasi bahaya, analisis frekuensi menggunakan data probabilitas kegagalan komponen, serta analisis konsekuensi berupa simulasi dispersi gas, kebakaran jet, dan ledakan. Seluruh hasil

simulasi kemudian digunakan untuk menghitung tingkat risiko dalam bentuk individual risk dan dibandingkan antar variasi tekanan untuk menentukan pengaruh tekanan terhadap tingkat risiko keselamatan pada HRS.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi Quantitative Risk Assessment (QRA) menunjukkan bahwa tekanan hidrogen memiliki pengaruh signifikan terhadap seluruh parameter risiko yang dianalisis. Pada tekanan 350 bar (rendah), radius dampak kebakaran (jet fire) berada pada kisaran 8–12 m, sedangkan pada 500 bar (menengah) meningkat menjadi 12–16 m, dan pada 700 bar (tinggi) mencapai 15–20 m. Untuk skenario ledakan (vapor cloud explosion), overpressure 0,02 bar yang berpotensi menyebabkan kerusakan ringan tercapai pada radius  $\pm 18$  m (350 bar),  $\pm 24$  m (500 bar), dan  $\pm 30$  m (700 bar), menunjukkan peningkatan sekitar 30–40% seiring kenaikan tekanan seperti ilustrasi pada grafik di Gambar 1.

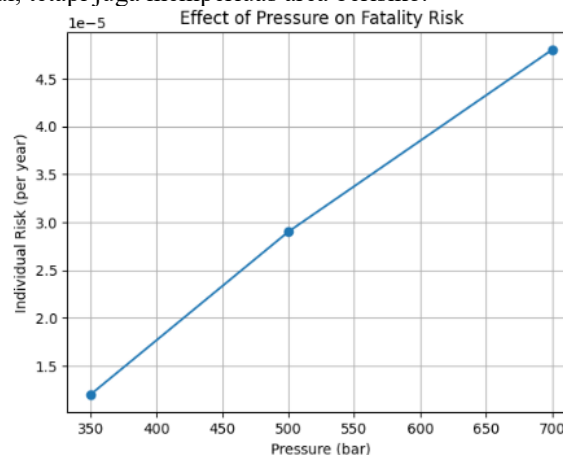
Dari sisi frekuensi kejadian, peningkatan tekanan juga berdampak pada probabilitas kegagalan sistem. Berdasarkan data kegagalan komponen, frekuensi kebocoran untuk lubang kecil (small leak) meningkat dari  $2,5 \times 10^{-4}$  per tahun pada 350 bar menjadi  $3,6 \times 10^{-4}$  per tahun pada 700 bar, sedangkan untuk kebocoran sedang (medium leak) meningkat dari  $8,0 \times 10^{-5}$  menjadi  $1,3 \times 10^{-4}$  per tahun. Peningkatan ini berkaitan dengan bertambahnya tegangan mekanik pada material serta meningkatnya potensi fatigue akibat operasi bertekanan tinggi.



Gambar 2. Perbandingan *Fire Impact* dan *Pressure*

Analisis konsekuensi menunjukkan bahwa laju kebocoran (mass flow rate) meningkat signifikan dengan tekanan. Pada skenario lubang kebocoran 5 mm, laju kebocoran hidrogen meningkat dari sekitar 0,12 kg/s (350 bar) menjadi 0,17 kg/s (500 bar) dan 0,21 kg/s (700 bar), atau meningkat hingga  $\pm 40$ – $50$ %. Peningkatan laju kebocoran ini mempercepat pembentukan awan gas mudah terbakar, sehingga waktu menuju kondisi ignition menjadi lebih singkat dan meningkatkan kemungkinan terjadinya flash fire maupun explosion.

Dampak terhadap tingkat fatalitas juga terlihat signifikan. Nilai individual risk pada jarak 10 m dari sumber meningkat dari  $1,2 \times 10^{-5}$  per tahun (350 bar) menjadi  $2,9 \times 10^{-5}$  (500 bar) dan  $4,8 \times 10^{-5}$  (700 bar). Pada jarak 20 m, nilai ini menurun namun tetap menunjukkan tren peningkatan, yaitu  $6,0 \times 10^{-6}$ ;  $1,4 \times 10^{-5}$ ; dan  $2,2 \times 10^{-5}$  per tahun untuk masing-masing tekanan dengan grafik yang dapat dilihat pada Gambar 2. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan tidak hanya memperbesar dampak lokal, tetapi juga memperluas area berisiko.



Gambar 3. Perbandingan *Risk* dan *Pressure*

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa tekanan merupakan parameter dominan dalam analisis risiko HRS. Peningkatan tekanan menyebabkan peningkatan simultan pada radius dampak, frekuensi kejadian, laju kebocoran,

serta tingkat fatalitas. Oleh karena itu, diperlukan strategi mitigasi seperti pembatasan tekanan operasional, penggunaan material dengan kekuatan tinggi, pemasangan pressure relief valve, serta sistem deteksi kebocoran yang responsif untuk menurunkan tingkat risiko ke batas yang dapat diterima.

Selain itu, hasil analisis juga dibandingkan dengan kriteria penerimaan risiko (risk acceptance criteria) yang umum digunakan dalam industri, yaitu batas individual risk sebesar  $1 \times 10^{-5}$  per tahun untuk area publik. Pada tekanan 350 bar, nilai individual risk pada jarak 10 m masih berada di sekitar batas toleransi, yaitu  $1,2 \times 10^{-5}$  per tahun, sedangkan pada tekanan 700 bar nilai tersebut meningkat signifikan hingga  $4,8 \times 10^{-5}$ .

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode Quantitative Risk Assessment (QRA), dapat disimpulkan bahwa tekanan hidrogen merupakan parameter yang sangat dominan dalam menentukan tingkat risiko keselamatan pada Hydrogen Refueling Station (HRS). Peningkatan tekanan dari 350 bar ke 700 bar terbukti meningkatkan secara signifikan radius dampak kebakaran dan ledakan hingga sekitar 30–40%, serta meningkatkan laju kebocoran hingga 40–50%. Kondisi ini menyebabkan pembentukan awan gas mudah terbakar menjadi lebih cepat dan meningkatkan potensi terjadinya kejadian berbahaya seperti jet fire dan vapor cloud explosion.

Selain itu, peningkatan tekanan juga berdampak pada frekuensi kejadian akibat meningkatnya tegangan mekanik pada material dan potensi kegagalan komponen. Nilai individual risk mengalami peningkatan dari  $1,2 \times 10^{-5}$  menjadi  $4,8 \times 10^{-5}$  per tahun pada jarak 10 meter, yang menunjukkan bahwa pada tekanan tinggi, tingkat risiko telah melampaui batas kriteria penerimaan risiko yang direkomendasikan. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan tidak hanya memengaruhi konsekuensi, tetapi juga probabilitas kejadian secara simultan.

Implikasi dari penelitian ini menegaskan bahwa pengendalian tekanan operasional merupakan aspek krusial dalam desain dan operasional HRS. Upaya mitigasi yang diperlukan meliputi optimasi tekanan kerja, penggunaan material dengan ketahanan tinggi, penerapan sistem keselamatan seperti pressure relief valve dan deteksi kebocoran, serta penentuan jarak aman (safety distance) yang memadai. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam pengembangan sistem HRS yang lebih aman serta sebagai referensi dalam penyusunan standar keselamatan hidrogen di masa depan.

Selain itu, hasil penelitian ini juga menegaskan pentingnya integrasi antara analisis risiko dan tahap perancangan sistem sejak awal (safety by design). Pendekatan ini memungkinkan identifikasi potensi bahaya secara dini sehingga langkah mitigasi dapat diterapkan secara lebih efektif dan efisien. Penggunaan perangkat lunak seperti HyRAM+ dalam analisis QRA terbukti mampu memberikan gambaran kuantitatif yang komprehensif terhadap skenario risiko yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, penerapan metode QRA secara sistematis sangat direkomendasikan dalam pengembangan dan evaluasi operasional HRS. Dengan integrasi antara desain teknik, analisis risiko, dan standar keselamatan, diharapkan sistem HRS dapat beroperasi secara optimal dengan tingkat risiko yang dapat diterima.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] International Energy Agency. *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities*. Paris: IEA; 2019.
- [2] International Organization for Standardization. ISO 19880-1: Gaseous hydrogen — Fueling stations — Part 1: General requirements. Geneva: ISO; 2020.
- [3] Center for Chemical Process Safety (CCPS). *Guidelines for Hydrogen Safety*. New York: AIChE; 2018.
- [4] Jordan T, Adams P, Baraldi D. *Hydrogen Safety Engineering and Risk Assessment*. Boca Raton: CRC Press; 2017.
- [5] Sandia National Laboratories. *HyRAM+ Technical Reference Manual*. Albuquerque: Sandia; 2021.
- [6] National Fire Protection Association. *NFPA 2: Hydrogen Technologies Code*. Quincy: NFPA; 2023.
- [7] Crowl DA, Louvar JF. *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. 4th ed. Boston: Pearson; 2019.
- [8] Turns SR. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 2012.
- [9] Lees FP. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2012.
- [10] American Petroleum Institute. *API Standard 521: Pressure-relieving and Depressuring Systems*. Washington DC: API; 2020.