

ANALISIS RISIKO AKIBAT LEDAKAN GAS HIDROGEN PADA STASIUN PENGISIAN BAHAN BAKAR HIDROGEN TIPE TERTUTUP MENGGUNAKAN SOFTWARE FLACS

*Yoga Surya Ramadhana Djohar¹, 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: yogasurya211@gmail.com

Abstrak

Stasiun pengisian hidrogen (*Hydrogen Refueling Station*) merupakan salah satu infrastruktur kunci dalam pengembangan energi bersih, namun berpotensi menimbulkan bahaya serius apabila terjadi kebocoran gas hidrogen bertekanan tinggi. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik sebaran tekanan, temperatur, dan *heat flux* akibat kebocoran gas hidrogen pada tangki berkapasitas 52 liter di HRS dengan variasi kondisi operasi dan lingkungan. Simulasi dilakukan pada tangki dengan tekanan operasi 150 bar, 350 bar, dan 500 bar, serta dua kondisi kecepatan angin, yaitu 2 m/s dan 4 m/s, untuk mengevaluasi pengaruh tekanan tangki dan kecepatan angin terhadap besaran parameter bahaya di sekitar sumber kebocoran menggunakan *software* FLACS. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan tekanan tangki menyebabkan kenaikan tekanan, temperatur, dan *heat flux* pada posisi target yang paling dekat dengan jarak 1.30 meter dari titik kebocoran. Nilai maksimum yang diperoleh pada target terdekat secara berturut-turut adalah tekanan sebesar 0,170 bar, temperatur sebesar 1442,743 K, dan *heat flux* sebesar 95,759 kW/m². Hubungan yang hampir berbanding lurus antara kenaikan tekanan tangki dan peningkatan parameter bahaya ini mengindikasikan bahwa kondisi operasi bertekanan lebih tinggi di HRS memerlukan perhatian khusus dalam perancangan sistem keselamatan, penentuan zona berbahaya, serta penyusunan prosedur operasi dan mitigasi risiko.

Kata kunci: *heat flux; hydrogen refueling station (hrs); kecepatan angin; mitigasi risiko; tekanan; temperatur*

Abstract

Hydrogen refueling stations are key infrastructures in the development of clean energy, but they can pose serious hazards in the event of high-pressure hydrogen gas leaks. This study aims to analyze the distribution characteristics of pressure, temperature, and heat flux resulting from hydrogen gas leakage from a 52-liter storage tank at a hydrogen refueling station under various operating and environmental conditions. Simulations were carried out for tank pressures of 150 bar, 350 bar, and 500 bar, and for two wind velocities, 2 m/s and 4 m/s, to evaluate the effects of tank pressure and wind speed on hazardous parameters around the leak source using FLACS software. The simulation results show that increasing tank pressure leads to higher pressure, temperature, and heat flux at the target position closest to the leak point by 1.30 meters. The maximum values obtained at this target are 0.170 bar for overpressure, 1442.743 K for temperature, and 95.759 kW/m² for heat flux. This quasi-linear relationship between the increase in tank pressure and the escalation of hazardous parameters indicates that higher operating pressures at hydrogen refueling stations require special attention in safety system design, hazardous area classification, and the development of operating procedures and risk mitigation measurement

Keywords: *heat flux; hydrogen refueling station (hrs); mitigation measurement; overpressure; temperature; wind velocity*

1. Pendahuluan

Perkembangan kebutuhan energi global pada abad ke-21 menunjukkan pergeseran signifikan seiring meningkatnya perhatian terhadap isu keberlanjutan dan lingkungan. Ketergantungan yang masih tinggi pada energi fosil menimbulkan berbagai permasalahan [1], seperti keterbatasan cadangan, ketidakstabilan harga, serta peningkatan emisi gas rumah kaca yang berdampak pada pemanasan global. Kondisi ini mendorong banyak negara untuk mengembangkan sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya adalah hidrogen yang dinilai memiliki potensi besar sebagai energi masa depan karena densitas energi per satuan massanya yang tinggi serta aplikasinya yang luas, khususnya pada sektor transportasi berbasis fuel cell electric vehicle (FCEV) [2].

Seiring dengan meningkatnya pemanfaatan kendaraan berbasis hidrogen, keberadaan infrastruktur pendukung seperti *hydrogen refueling station* (HRS) menjadi faktor yang sangat penting. HRS berfungsi sebagai fasilitas pengisian bahan bakar hidrogen bagi kendaraan [3], sehingga aspek ketersediaan dan keselamatan desainnya menjadi penentu keberhasilan implementasi teknologi hidrogen. Meskipun demikian, hidrogen memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berisiko tinggi, antara lain sifatnya yang sangat mudah berdifusi, rentang konsentrasi ledakan yang luas, serta energi penyalan yang rendah [4]. Karakteristik tersebut menjadikan potensi kebakaran dan ledakan akibat kebocoran hidrogen sebagai risiko keselamatan yang tidak dapat diabaikan, terutama pada fasilitas penyimpanan dan distribusi [5].

Dalam konteks rekayasa teknik, mitigasi risiko ledakan pada HRS dapat dilakukan melalui analisis numerik dan simulasi ledakan untuk memprediksi perilaku penyebaran gas, potensi penyalan, serta besaran tekanan ledakan yang mungkin terjadi [6]. Pendekatan ini penting untuk mengevaluasi tingkat keamanan desain HRS, termasuk tata letak peralatan, kapasitas tangki, sistem ventilasi, dan penggunaan penghalang fisik [7]. Oleh karena itu, penelitian terkait analisis ledakan pada desain *hydrogen refueling station* memiliki urgensi tinggi, baik dari sisi akademik maupun praktis [8], guna menghasilkan rekomendasi teknis yang dapat meningkatkan keselamatan fasilitas sekaligus mendukung pengembangan teknologi hidrogen sebagai bagian dari transisi energi menuju sistem yang lebih bersih dan berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Metodologi penelitian mencakup pengumpulan dan analisis kebutuhan, perancangan konseptual dan seleksi desain, dan pengembangan dan spesifikasi desain akhir.

2.1 Penentuan Data System State

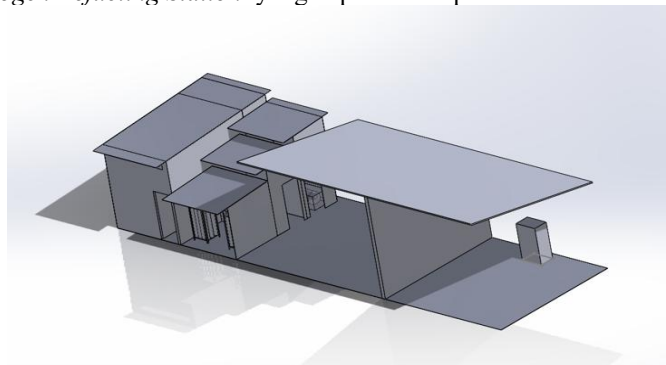
Untuk memulai proses pemodelan dalam suatu simulasi, langkah pertama adalah menetapkan *system state*, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. System state mencakup sejumlah parameter dasar yang harus dipenuhi dan disesuaikan dengan kondisi lapangan, karakteristik instalasi, serta variabel-variabel yang akan digunakan dalam skenario simulasi. Penetapan parameter ini penting untuk memastikan bahwa konfigurasi awal simulasi mencerminkan keadaan nyata secara representatif.

Tabel 1. Data Parameter *System State*

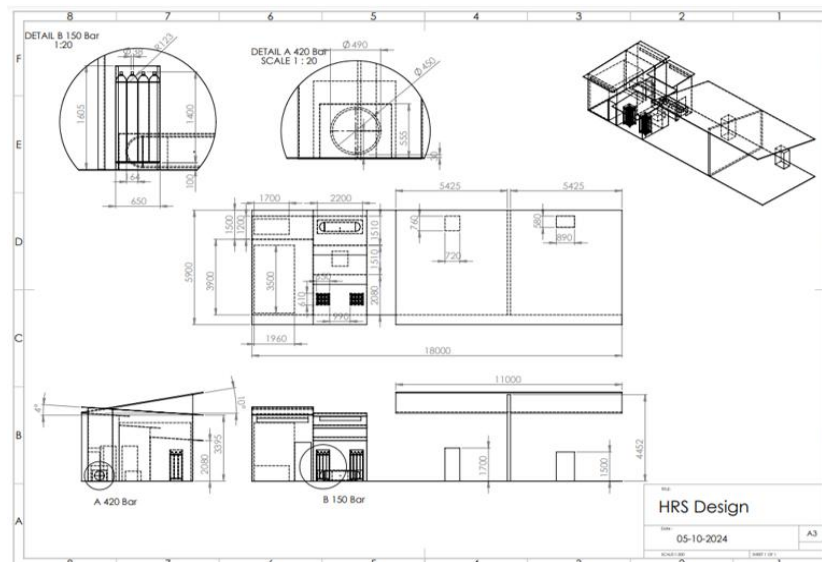
Pameter	Nilai	Satuan
Bahan Bakar	Hidrogen	
Suhu Tangki fluida	33	°C
Suhu Ambien	34	°C
Tekanan Tangki	150 220 350 500	Bar
Tekanan ambien	1	Atm
Koofesien <i>discharge</i>	0.85	
Kecepatan Angin	2 4	m/s
Diameter <i>Leakage</i>	5	mm

2.2 Data Layout Desain *Hydrogen Refueling Station*

Model dari *Hydrogen Refueling Station* yang digunakan pada penelitian ini memiliki dimensi 18 x 5,4 meter dengan tinggi maksimum sebesar 4 meter. Permodelan HRS ini dilakukan dengan menggunakan *software* SolidWorks 2022 untuk permodelan 3 dimensi dan juga AutoCAD 2025 untuk permodelan 2 dimensi. Berikut merupakan ilustrasi permodelan *layout* 3D *Hydrogen Refueling Station* yang dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2 di bawah ini:

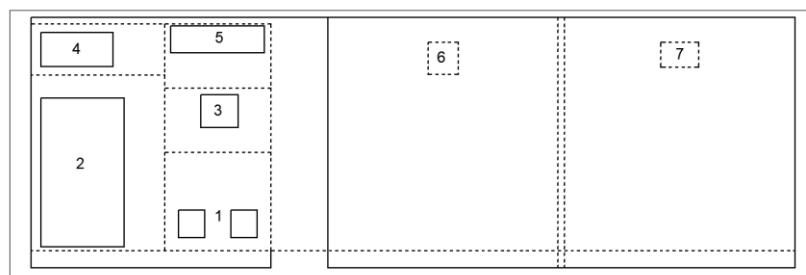


Gambar 1. Permodelan 3 Dimensi *Hydrogen Refueling Station*



Gambar 2. Permodelan 2 Dimensi *Hydrogen Refueling Station*

Adapun komponen-komponen penyusun *Hydrogen Refueling Station* (HRS) dapat ditunjukkan oleh Gambar 3 di bawah ini dengan keterangan berdasarkan penomoran dari setiap komponennya.



Gambar 3. Tampak Atas *Hydrogen Refueling Station*

Hydrogen Refueling Station terdiri dari komponen-komponen seperti: Supply Hidrogen (1), Kompresor Udara (2), Kompresor *Pneumatic* (3), *Chiller* (4), *Storage* (5), Dispenser Hidrogen (6), dan SPKLU (Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum) (7).

2.3 Penentuan Target Monitor

Pada Gambar 4 dapat dilihat setiap target yang telah ditentukan pada stasiun pengisian bahan bakar hidrogen yang akan disimulasikan. Setiap target diasumsikan berupa keberadaan manusia di mana target 1 terletak di luar bangunan HRS dengan jarak 6,70 meter dari sumber kebocoran, target 2 terletak di depan bangunan HRS dengan jarak 7,16 meter dari sumber kebocoran, target 3 terletak pada bagian dispenser tempat pengisian bahan bakar hidrogen dengan jarak 6,80 meter dari sumber kebocoran, dan target 4 merupakan target yang paling terpapar oleh kebocoran gas hidrogen sebab terletak pada bagian dalam ruangan tempat kebocoran berlangsung dan terpapar secara langsung dari gas dan api yang terbentuk dari kebocoran tangki hidrogen dan hanya berjarak 1,30 meter dari sumber kebocoran.



Gambar 4. Posisi Target pada FLACS

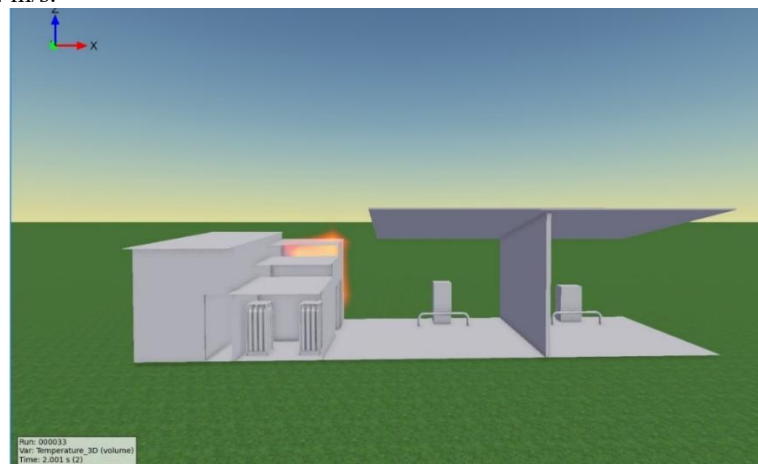
Pada penelitian ini kondisi lingkungan ditentukan dengan kondisi netral dengan pasquil class D, Kecepatan angin sebesar 2 m/s dan 4 m/s ke arah (-Y) dengan intensitas 0,1. Adapun temperatur lingkungan disesuaikan dengan temperatur standar di Indonesia sebesar 34°C dan tekanan atmosfer sebesar 1 atm.

3. Hasil dan Pembahasan

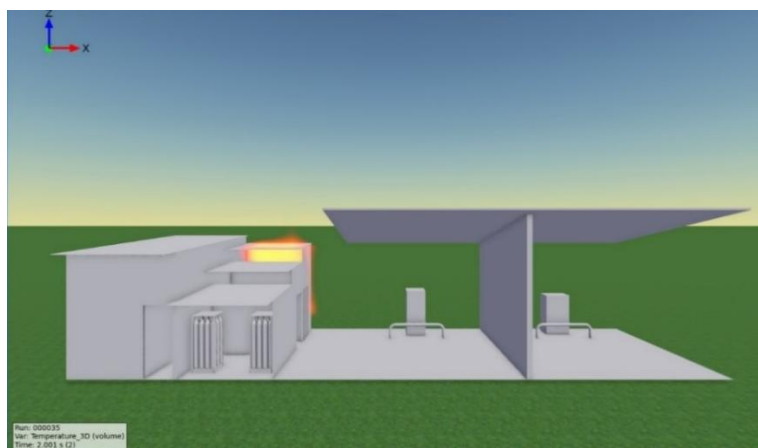
Kecepatan angin dan tekanan tangki merupakan parameter utama yang memengaruhi konsekuensi kebakaran akibat kebocoran hidrogen [9]. Peningkatan kecepatan angin memperkuat proses pembakaran melalui suplai oksigen yang lebih besar serta mempercepat penyebaran api dan partikel panas, sementara variasi tekanan tangki pada 150 bar, 350 bar, dan 500 bar secara langsung menentukan laju massa hidrogen yang keluar dari orifis kebocoran sesuai prinsip aliran tersumbat. Kenaikan tekanan tangki meningkatkan suplai bahan bakar ke zona pembakaran sehingga berdampak pada peningkatan tekanan, temperatur, dan fluks panas, serta perubahan distribusi spasial zona berbahaya [10]. Hasil simulasi menunjukkan bahwa target yang berada pada garis pandang langsung terhadap sumber kebocoran dan dikelilingi oleh struktur bangunan mengalami konsekuensi yang lebih tinggi akibat penguatan dan pengarahannya oleh geometri lingkungan, sedangkan target yang terlindung atau berada di area terbuka menunjukkan tingkat paparan yang lebih rendah. Seluruh hasil konsekuensi tersebut kemudian diintegrasikan untuk menentukan nilai *average individual risk*, yang selanjutnya dievaluasi terhadap kriteria penerimaan risiko berdasarkan standar EIGA.

3.1 Visualisasi Kebocoran Hidrogen dengan Variasi Kecepatan Angin

Gambar 5 dan Gambar 6 di bawah ini merupakan output plot kebocoran tangki hidrogen pada geometri stasiun pengisian bahan bakar hidrogen dalam bentuk 3D dengan kecepatan angin yang bekerja pada lingkungan secara berturut-turut senilai 2 m/s dan 4 m/s.



Gambar 5. Visualisasi Kebocoran dengan Kecepatan Angin 2 m/s



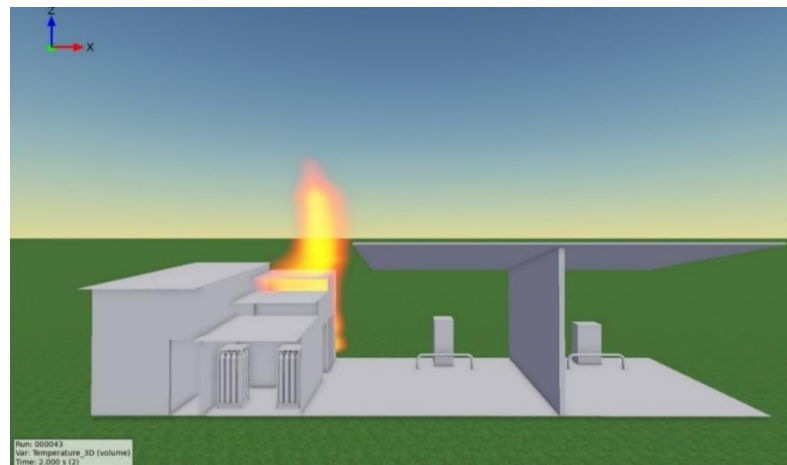
Gambar 6. Visualisasi Kebocoran dengan Kecepatan Angin 4 m/s

3.2 Visualisasi Kebocoran Hidrogen dengan Variasi Tekanan

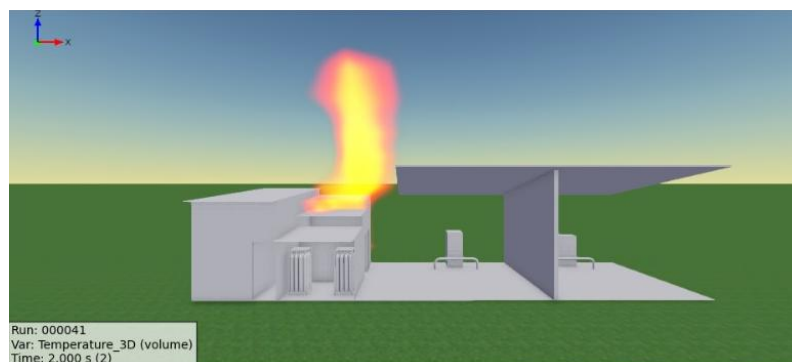
Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9 di bawah ini merupakan output plot kebocoran tangki hidrogen pada geometri stasiun pengisian bahan bakar hidrogen dalam bentuk 3D dengan spesifikasi tangki penyimpanan hidrogen yang bekerja pada tekanan secara berturut-turut senilai 150 bar, 350 bar, dan 500 bar.



Gambar 7. Visualisasi Kebocoran dengan Tekanan 150 Bar



Gambar 8. Visualisasi Kebocoran dengan Tekanan 350 Bar



Gambar 9. Visualisasi Kebocoran dengan Tekanan 500 Bar

3.3 Nilai Average Individual Risk

Dengan mengaplikasikan nilai hasil simulasi *heat flux* pada kebocoran tangka hidrogen dan nilai PLL pada persamaan FAR sehingga didapat nilai PLL seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 di bawah ini:

Tabel 3. Nilai AIR *Heat Flux* Tangki Tekanan 150 Bar

Target	Heat Flux (kW/m ²)	P _{fatal}	IR (Per Tahun)	AIR	Standar EIGA
1	0,004	0	0,000	0	Aman
2	0,319	0	0,000	0	Aman
3	0,043	0	0,000	0	Aman
4	30,332	0.05	$5,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-3}$	Tidak

Tabel 4. Nilai AIR *Heat Flux* Tangki Tekanan 350 Bar

Target	Heat Flux (kW/m ²)	P _{fatal}	IR (Per Tahun)	AIR	Standar EIGA
1	0,000	0	0.000	0	Aman
2	4,096	5×10^{-4}	$5,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-5}$	Aman
3	4,794	5×10^{-4}	$5,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-5}$	Aman
4	52,982	0,9	$9,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-2}$	Tidak

Tabel 5. Nilai AIR *Heat Flux* Tangki Tekanan 500 Bar

Target	Heat Flux (kW/m ²)	P_{fatal}	IR (Per Tahun)	AIR	Standar EIGA
1	0,209	0	0,000	0	Aman
2	7,157	5×10^{-3}	$5,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-4}$	Tidak
3	8,288	5×10^{-3}	$5,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-4}$	Tidak
4	95,759	0,9	$9,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-2}$	Tidak

4. Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak FLACS dan menunjukkan bahwa tekanan tangki serta kecepatan angin memiliki pengaruh yang signifikan terhadap konsekuensi kebakaran dan ledakan akibat kebocoran hidrogen. Variasi tekanan tangki sebesar 150 bar, 350 bar, dan 500 bar secara nyata meningkatkan nilai tekanan, temperatur, dan heat flux, khususnya pada target 4 yang berjarak 1,30 m dari tangki, dengan tekanan masing-masing sebesar 0,061 bar, 0,147 bar, dan 0,170 bar, temperatur 631,375 K, 794,473 K, dan 1442,743 K, serta heat flux 30,332 kW/m², 52,982 kW/m², dan 95,759 kW/m². Kecepatan angin juga terbukti memengaruhi perilaku api, di mana pada target 3 yang berjarak 6,80 m dan searah arah angin, peningkatan kecepatan angin dari 2 m/s menjadi 4 m/s menyebabkan kenaikan temperatur dari 310,23 K menjadi 367,11 K. Secara keseluruhan, semakin besar tekanan reservoir maka semakin besar dampak ledakan yang dihasilkan, sementara kecepatan angin berperan penting dalam menentukan karakteristik dan sebaran api. Analisis risiko menunjukkan bahwa pada seluruh variasi tekanan tangki, target 4 menghasilkan nilai *Average Individual Risk* (AIR) berbasis *heat flux* yang paling tinggi dibandingkan target lainnya, sehingga mengindikasikan tingkat paparan risiko tertinggi pada lokasi tersebut.

5. Daftar Pustaka

- [1] Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022b). Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114>.
- [2] Van Der Spek, M., Banet, C., Bauer, C., Gabrielli, P., Goldthorpe, W., Mazzotti, M., Munkejord, S. T., Røkke, N. A., Shah, N., Sunny, N., Sutter, D., Trusler, J. M., & Gazzani, M. (2022). Perspective on the hydrogen economy as a pathway to reach net-zero CO₂ emissions in Europe. *Energy & Environmental Science*, 15(3), 1034–1077. <https://doi.org/10.1039/d1ee02118d>.
- [3] Shoja, Z. M., Mirzaei, M. A., Seyedi, H., & Zare, K. (2022). Sustainable energy supply of electric vehicle charging parks and hydrogen refueling stations integrated in local energy systems under a risk-averse optimization strategy. *Journal of Energy Storage*, 55, 105633. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105633>.
- [4] Rolo, I., Costa, V. a. F., & Brito, F. P. (2023). Hydrogen-Based Energy Systems: Current technology development status, opportunities and challenges. *Energies*, 17(1), 180. <https://doi.org/10.3390/en17010180>.
- [5] Raj, A., Larsson, I. S., Ljung, A., Forslund, T., Andersson, R., Sundström, J., & Lundström, T. (2024). Evaluating hydrogen gas transport in pipelines: Current state of numerical and experimental methodologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 67, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.140>.
- [6] Lee, K., & Kang, C. (2024). Expansion of Next-Generation Sustainable Clean Hydrogen Energy in South Korea: Domino Explosion Risk Analysis and Preventive Measures Due to Hydrogen Leakage from Hydrogen Re-Fueling Stations Using Monte Carlo Simulation. *Sustainability*, 16(9), 3583. <https://doi.org/10.3390/su16093583>.
- [7] Yazdi, M., Moradi, R., Pirbalouti, R. G., Zarei, E., & Li, H. (2023). Enabling safe and sustainable hydrogen mobility: Circular Economy-Driven management of Hydrogen vehicle Safety. *Processes*, 11(9), 2730. <https://doi.org/10.3390/pr11092730>.
- [8] Neacsu, A., Eparu, C. N., Panaitescu, C., Stoica, D. B., Ionete, B., Prundurel, A., & Gal, S. (2023). Hydrogen–Natural Gas Mix—A viable perspective for environment and society. *Energies*, 16(15), 5751. <https://doi.org/10.3390/en16155751>.
- [9] Ustolin, F., Campari, A., & Taccani, R. (2022). An Extensive Review of Liquid Hydrogen in Transportation with Focus on the Maritime Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), 1222. <https://doi.org/10.3390/jmse10091222>.
- [10] Giacomazzi, E., Troiani, G., Di Nardo, A., Calchetti, G., Cecere, D., Messina, G., & Carpenella, S. (2023). Hydrogen Combustion: Features and Barriers to Its Exploitation in the Energy Transition. *Energies*, 16(20), 7174. <https://doi.org/10.3390/en16207174>.