

ANALISIS PENGARUH SUHU DAN MATERIAL *LINER* DAN *COMPOSITE* TERHADAP KEKUATAN STRUKTUR DINDING HYDROGEN TANK TYPE III DENGAN *FINITE ELEMENT METHOD*

*Ilhan Raznand Allabib¹, Mohammad Tauviqirrahman², Sulisty²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: ilhanraznand712@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu dan kombinasi material terhadap kekuatan struktur dinding tangki hidrogen Tipe III dengan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*). Material yang digunakan pada bagian *liner* adalah baja AISI 4130, sedangkan untuk bagian komposit digunakan E-Glass/Epoxy. Simulasi dilakukan pada tekanan internal sebesar 70 MPa dengan tiga kondisi suhu operasi, yaitu -20°C, 20°C, dan 70°C. Hasil analisis menunjukkan bahwa deformasi struktural meningkat seiring dengan kenaikan suhu, yang disebabkan oleh penurunan kekakuan material akibat pelunakan termal. Meskipun demikian, nilai deformasi masih berada dalam batas aman. Di sisi lain, tegangan maksimum pada lapisan *liner* menunjukkan tren penurunan seiring naiknya suhu, mengindikasikan terjadinya relaksasi tegangan pada material logam. Penurunan ini bersifat moderat, sehingga struktur tetap menunjukkan stabilitas yang baik terhadap fluktuasi suhu. Secara keseluruhan, kombinasi material AISI 4130 dan E-Glass/Epoxy terbukti cukup andal dalam mempertahankan kekuatan struktural tangki hidrogen Tipe III di bawah kondisi termal yang bervariasi.

Kata Kunci: aisi 4130; e-glass/epoxy; *finite element method*; suhu operasi; tangki hidrogen tipe iii

Abstract

This study aims to analyze the effect of temperature variation and material combination on the structural strength of Type III hydrogen tank walls using the Finite Element Method (FEM). The liner material used is AISI 4130 steel, while the composite layer is made of E-Glass/Epoxy. Simulations were conducted under an internal pressure of 70 MPa with three operating temperature conditions: -20°C, 20°C, and 70°C. The analysis results show that structural deformation increases with rising temperature, caused by reduced material stiffness due to thermal softening. Nevertheless, the deformation values remain within a safe limit. On the other hand, the maximum stress in the liner layer shows a decreasing trend with increasing temperature, indicating stress relaxation in the metal material. This decrease is moderate, suggesting that the structure maintains good stability under temperature fluctuations. Overall, the combination of AISI 4130 and E-Glass/Epoxy has proven to be reliable in maintaining the structural integrity of Type III hydrogen tanks under varying thermal conditions.

Keywords: aisi 4130; e-glass/epoxy; *finite element method*; operating temperature; type iii hydrogen tank

1. Pendahuluan

Hidrogen diproyeksikan menjadi sumber energi masa depan yang ramah lingkungan karena potensinya dalam mengurangi dampak pemanasan global dan menjawab tantangan keterbatasan energi fosil [1]. Sebagai energi terbarukan, hidrogen menghasilkan emisi yang bersih dan tidak beracun, menjadikannya pilihan menarik dalam pengembangan energi berkelanjutan. Salah satu aplikasi utama hidrogen adalah sebagai bahan bakar kendaraan, khususnya kendaraan berbasis sel bahan bakar, yang dianggap sebagai alternatif potensial pengganti kendaraan berbahan bakar fosil dalam mewujudkan sistem transportasi yang lebih hijau. Namun, agar hidrogen dapat digunakan secara luas secara komersial, aspek penyimpanannya harus efisien dan aman [2].

Penyimpanan hidrogen dalam bentuk gas bertekanan tinggi merupakan metode yang umum digunakan di sektor otomotif [3]. Tangki tekanan tinggi atau pressure vessel dirancang untuk menahan tekanan internal yang jauh lebih besar dari tekanan atmosfer. Karena beban tekanan yang tinggi tersebut, perancangan tangki harus sangat presisi untuk mencegah kegagalan struktural. Semua sistem mekanik, termasuk tangki hidrogen, memiliki risiko mengalami kegagalan akibat tegangan, dan masa pakai tangki sangat dipengaruhi oleh frekuensi serta besarnya siklus pembebangan [4].

Salah satu faktor kunci dalam menentukan performa tangki penyimpanan hidrogen adalah desain lapisan kompositnya. Struktur tangki komposit yang kompleks memberikan fleksibilitas dalam teknik manufaktur dan desain,

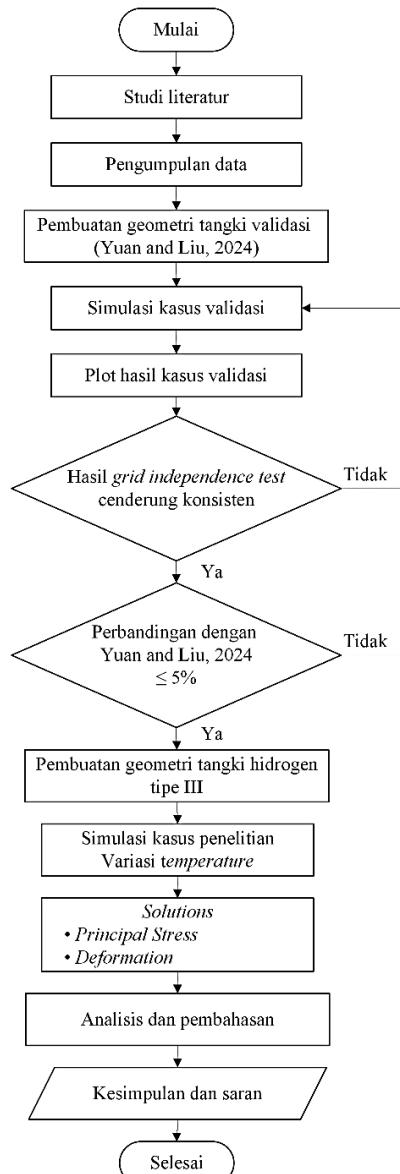
yang sangat memengaruhi karakteristik kekuatan mekanis dan daya tahan jangka panjangnya [5]. Meski demikian, proses pengisian ulang hidrogen dengan tekanan dan suhu tinggi dapat menyebabkan kerusakan material dan kelelahan struktural, sehingga menurunkan integritas tangki. Oleh karena itu, analisis menyeluruh terhadap perilaku mekanik dan termal tangki dalam berbagai kondisi operasi sangat diperlukan untuk memprediksi potensi kerusakan dan menjamin kestabilan struktur selama masa pakainya [6].

Inti dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi material liner dan komposit terhadap stress dan deformasi pada tangki hidrogen Tipe III yang beroperasi pada tekanan 70 MPa. Penelitian ini menggunakan metode analisis elemen hingga (FEA) untuk memodelkan dan mensimulasikan perilaku mekanis tangki. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang berguna untuk optimasi desain tangki hidrogen Tipe IV, serta meningkatkan pemahaman mengenai pengaruh material dan suhu terhadap ketahanan dan daya tahan struktural tangki hidrogen di masa depan.

2. Bahan dan Metode Penelitian

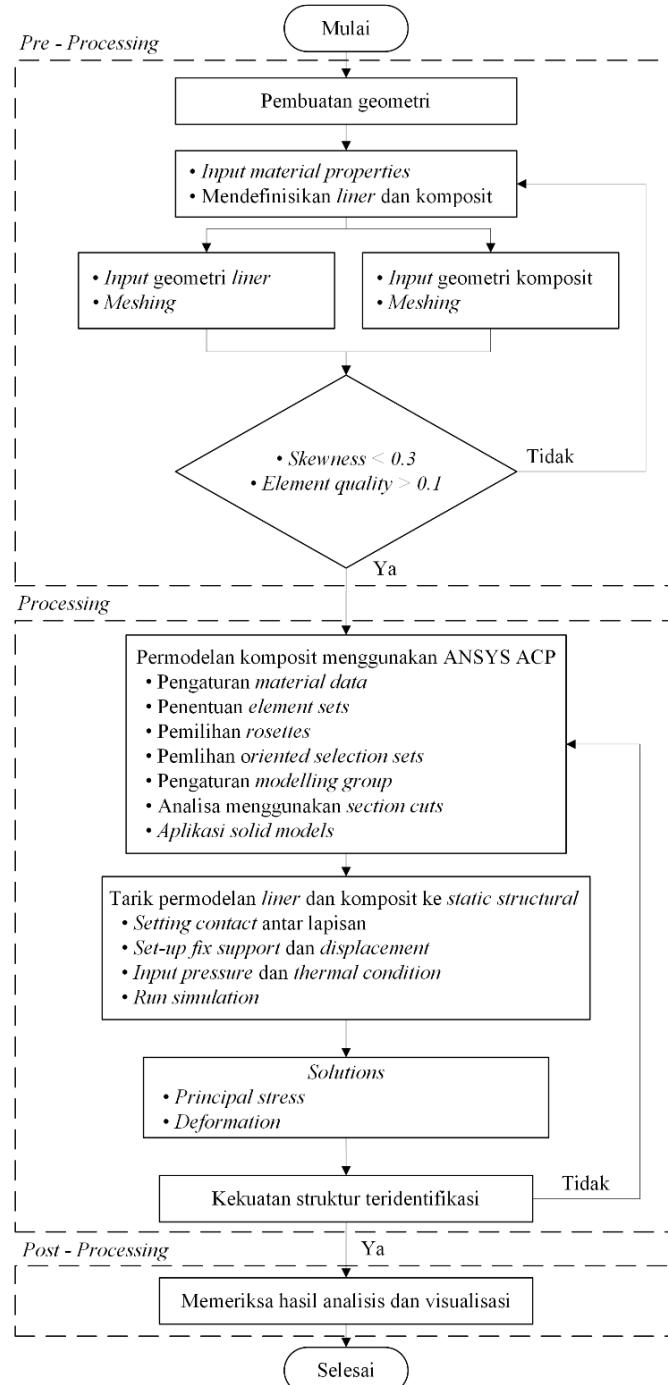
2.1 Metode Penelitian

Secara umum, penelitian ini menggunakan metode analisis elemen hingga (FEA) dengan aplikasi ANSYS 2023 R2, yang mencakup penggunaan ANSYS ACP dan ANSYS Static Structural untuk menganalisis pengaruh material liner dan komposit pada tangki hidrogen Tipe III. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan tekanan internal sebesar 70 MPa. Hasil dari analisis ini akan memberikan wawasan terkait desain dan optimasi struktural tangki hidrogen, dengan fokus pada dampak suhu gas hidrogen terhadap stres dan deformasi material pada kondisi operasional yang ekstrem. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pada tahapan selanjutnya, penelitian ini difokuskan pada proses simulasi numerik guna merepresentasikan kondisi operasional tangki hidrogen Tipe III secara mendetail. Tangki-tangki ini dirancang untuk dapat menangani tekanan kerja nominal (NWP) hingga 70 MPa [9]. Simulasi ini dilakukan dengan mempertimbangkan penggunaan material pilihan pada lapisan *liner* dan komposit, serta memvariasikan kondisi suhu operasi guna mencerminkan kondisi ekstrem yang mungkin terjadi selama pengisian, penyimpanan, maupun penggunaan hidrogen dalam kendaraan berbahan bakar sel. Penekanan utama dalam proses ini adalah untuk mengevaluasi bagaimana material dan suhu memengaruhi respons struktural tangki, khususnya terhadap distribusi tegangan (*stress*) dan tingkat deformasi yang terjadi pada dinding tangki. Perilaku termal tangki Tipe III selama siklus hidrogen (pengisian dan pengosongan) sangat penting. Suhu gas di dalam tangki dan suhu permukaan luar dipantau secara ketat untuk memastikan keselamatan dan kinerja [10]. Oleh karena itu, melalui simulasi ini, akan dilakukan pemetaan terhadap zona-zona kritis pada struktur tangki yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi atau deformasi signifikan. Hasil simulasi ini akan menjadi dasar untuk mengevaluasi kinerja material dan merancang konfigurasi tangki yang optimal dari segi kekuatan, ketahanan termal, dan umur pakai. Representasi visual dari proses simulasi dan fokus area analisis dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Simulasi

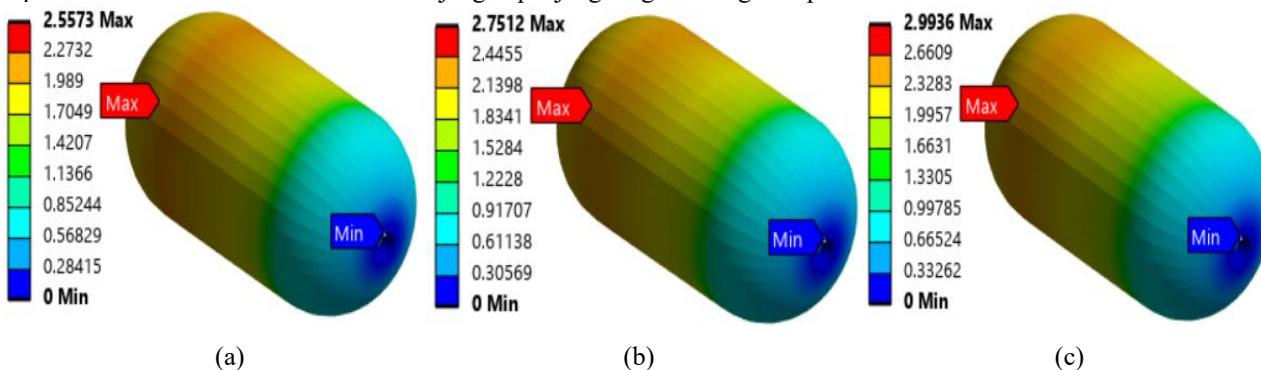
2.2 Kondisi Batas

Dalam penelitian ini, kondisi batas (*boundary condition*) ditetapkan untuk merepresentasikan lingkungan operasional tangki hidrogen Tipe III secara realistik. Material *liner* yang digunakan adalah AISI 4130 Steel [7] dan untuk material *composite* menggunakan E-Glass/Epoxy [8]. Tekanan internal sebesar 70 MPa diberikan secara merata pada permukaan bagian dalam tangki untuk mensimulasikan kondisi kerja aktual selama penyimpanan gas hidrogen terkompresi. Selain itu, variasi suhu operasi diterapkan sebagai beban termal merata dengan rentang *temperature* -20°C, 20°C, hingga 70°C, guna mengkaji pengaruh perubahan suhu terhadap respons struktural tangki. Pada salah satu ujung tangki, diterapkan kondisi penahanan (*fixed support*) untuk mencegah perpindahan translasi dan rotasi, sehingga memastikan kestabilan selama proses simulasi. Kontak antara lapisan *liner* dan komposit diasumsikan memiliki sifat *perfect bonded*, yang berarti tidak terjadi slip atau delaminasi selama pembebahan. Apabila geometri dan pembebahan bersifat simetris, pendekatan bidang simetri juga dapat digunakan untuk menyederhanakan model dan efisiensi komputasi dalam analisis elemen hingga.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisa Deformasi Pada Struktur Tangki

Berdasarkan hasil simulasi deformasi dari kombinasi material *liner* AISI 4130 dan komposit E-Glass/Epoxy, terlihat bahwa deformasi meningkat secara bertahap seiring dengan kenaikan suhu operasi. Dapat dilihat pada Gambar 3, pada suhu -20°C, deformasi tercatat sebesar 2,5573 mm, meningkat menjadi 2,7512 mm pada suhu ruang (20°C), dan mencapai 2,9936 mm pada suhu tinggi 70°C. Pola ini menunjukkan bahwa efek pelunakan termal berkontribusi terhadap peningkatan deformasi, di mana modulus elastisitas material menurun pada suhu yang lebih tinggi, menyebabkan struktur tangki menjadi lebih fleksibel. AISI 4130 sebagai material *liner* logam memiliki kekakuan tinggi, namun pada suhu tinggi kekakuananya dapat berkurang dan menyebabkan distribusi tegangan lebih besar ke lapisan komposit. Di sisi lain, E-Glass/Epoxy dikenal memiliki kekakuan menengah sehingga menghasilkan deformasi yang lebih besar dibandingkan material komposit berkekuatan tinggi seperti Carbon/Epoxy. Meskipun deformasi masih berada dalam batas moderat (<3 mm), tren ini perlu diperhatikan dalam perancangan tangki karena deformasi berlebih dapat memicu delaminasi antar lapisan serta mengurangi umur pakai tangki. Secara keseluruhan, kombinasi ini menunjukkan respons struktural yang cukup stabil terhadap perubahan suhu, namun evaluasi lebih lanjut terhadap tegangan dan kriteria kegagalan tetap diperlukan untuk memastikan keandalan jangka panjang tangki hidrogen Tipe IV.



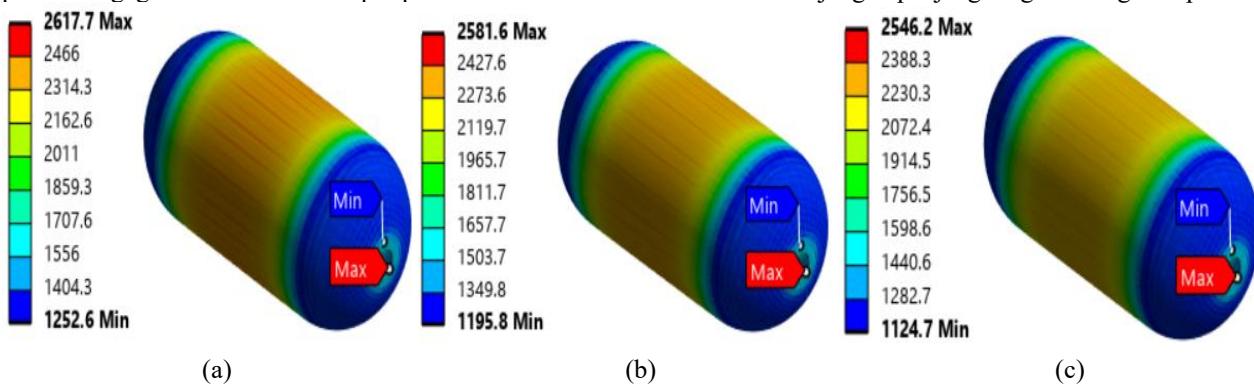
Gambar 3. Deformasi pada struktur tangki dengan material AISI 4130 & E-Glass/Epoxy di suhu (a) -20°C, (b) 20°C, dan (c) 70°C

3.2 Analisa Stress pada Dinding Tangki

Berdasarkan data hasil simulasi, nilai tegangan (*stress*) pada lapisan *liner* dengan material AISI 4130 yang dipasangkan dengan komposit E-Glass/Epoxy menunjukkan tren penurunan seiring kenaikan suhu operasi. Dapat dilihat pada Gambar 4, pada suhu rendah -20°C, tegangan tertinggi tercatat sebesar 2617.7 MPa. Nilai ini kemudian menurun menjadi 2581.6 MPa pada suhu 20°C dan terus menurun menjadi 2546.2 MPa pada suhu tinggi 70°C. Penurunan tegangan ini mengindikasikan bahwa sifat mekanik *liner* AISI 4130 mengalami pelonggaran (relaksasi tegangan) seiring meningkatnya suhu, yang merupakan karakteristik umum dari material logam di bawah beban tetap. Pada suhu rendah, logam cenderung menjadi lebih kaku, sehingga ketika menerima tekanan internal 70 MPa, distribusi tegangan pada lapisan *liner* menjadi lebih tinggi. Sebaliknya, saat suhu meningkat, kekakuan material menurun, menyebabkan tegangan terdistribusi lebih merata ke seluruh struktur, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan pada lapisan *liner*.

Selain itu, sifat termal dari E-Glass/Epoxy yang memiliki ketahanan termal cukup baik turut membantu menyerap sebagian deformasi akibat ekspansi termal, sehingga beban yang diterima *liner* dapat berkurang. Namun demikian, meskipun terjadi penurunan tegangan, perbedaan antar suhu relatif kecil (sekitar 2,7%), yang menunjukkan bahwa kombinasi AISI 4130 & E-Glass/Epoxy masih mempertahankan stabilitas struktural yang baik terhadap fluktuasi suhu dalam kisaran -20°C hingga 70°C. Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa kombinasi material tersebut

cukup andal terhadap perubahan suhu, dengan risiko kegagalan akibat tegangan tinggi yang relatif rendah selama beroperasi pada tekanan tetap 70 MPa. Meski begitu, evaluasi lanjutan terhadap distribusi tegangan antar lapisan dan potensi kegagalan delaminasi tetap diperlukan untuk memastikan keamanan jangka panjang tangki hidrogen Tipe IV.



Gambar 4. Stress pada lapisan liner dengan material AISI 4130 & E-Glass/Epoxy di suhu (a) -20°C, (b) 20°C, dan (c) 70°C

4. Kesimpulan

1. Deformasi struktural meningkat seiring kenaikan suhu: Kombinasi material AISI 4130 sebagai *liner* dan E-Glass/Epoxy sebagai komposit menunjukkan pola deformasi yang bertahap meningkat dari suhu rendah ke tinggi akibat efek pelunakan termal. Meskipun nilai deformasi masih tergolong moderat, tren ini perlu diperhatikan untuk mencegah potensi delaminasi dan penurunan umur pakai tangki.
2. Tegangan menurun secara bertahap terhadap suhu: Nilai tegangan pada *liner* cenderung menurun saat suhu meningkat, menunjukkan adanya relaksasi tegangan pada AISI 4130. Penurunan ini relatif kecil, menandakan stabilitas struktural yang baik terhadap fluktuasi suhu, namun analisis lanjutan tetap diperlukan untuk menjamin keandalan tangki dalam jangka panjang.

5. Daftar Pustaka

- [1] Kuroki, T., Nagasawa, K., Peters, M., Leighton, D., Kurtz, J., Sakoda, N., Monde, M. and Takata, Y. (2021). Thermodynamic modeling of hydrogen fueling process from high-pressure storage tank to vehicle tank. International Journal of Hydrogen Energy, **46(42)**, hal. 22004-22017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.037>.
- [2] Sapre, S., Vyas, M. and Pareek, K. (2021). Impact of refueling parameters on storage density of compressed hydrogen storage Tank. International Journal of Hydrogen Energy, **46(31)**, hal. 16685-16692. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.136>.
- [3] Koutsawa, Y. and Bouhala, L. (2024). Uncertainty analysis in the design of Type-IV composite pressure vessels for hydrogen storage. Composites Part C Open Access, **16**, hal. 100544–100544. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100544>.
- [4] Niranjana, S.J., Patel, S.V. and Dubey, A.K. (2018). Design and Analysis of Vertical Pressure Vessel using ASME Code and FEA Technique. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **376**, hal. 012135. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/376/1/012135>.
- [5] Zhou, W., Wang, J., Pan, Z., Liu, J., Ma, L., Zhou, J. and Su, Y. (2022). Review on optimization design, failure analysis and non-destructive testing of composite hydrogen storage vessel. International Journal of Hydrogen Energy, **47(91)**, hal. 38862–38883. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.028>.
- [6] Sapre, S., Pareek, K. and Vyas, M. (2020). Investigation of structural stability of type IV compressed hydrogen storage tank during refueling of fuel cell vehicle. Energy Storage, **2(4)**, e150. <https://doi.org/10.1002/est2.150>.
- [7] A. Díaz, Cuesta, I.I. and Alegre, J.M. (2017). A methodology for the numerical assessment of autofrettage influence on hydrogen content near a notch in a 4130 steel pressure vessel. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, **92**, hal. 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2017.07.024>.
- [8] Jaber, M., Yahya, A., Arif, A.F., Jaber, H. and Alkhedher, M. (2024). Burst pressure performance comparison of type V hydrogen tanks: Evaluating various shapes and materials. International Journal of Hydrogen Energy, **81**, hal. .906–917. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.315>.
- [9] Zou, L., Li, B., Han, B., Liu, Y., Wang, X., Bi, M. and Shu, C.-M. (2024). Release of high-pressure hydrogen from type III tank in a fire scenario: Analysis and prediction of jet flame length and thermal response characteristics. Fuel, **372**, hal. 132153–132153. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132153>.

-
- [10] de Miguel, N., Ortiz Cebolla, R., Acosta, B., Moretto, P., Harskamp, F. and Bonato, C. (2015). Compressed hydrogen tanks for on-board application: Thermal behaviour during cycling. International Journal of Hydrogen Energy, **40(19)**, hal. 6449–6458. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.035>.