

ANALISIS KEGAGALAN TERMOMEKANIK TANGKI HIDROGEN KOMPOSIT BERBASIS KARBON-EPOKSI PADA TIGA FASE PENYIMPANAN HIDROGEN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Muhammad Rafli At Thariq¹, Mohammad Tauviqirrahman², Sulisty²

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: rafli.thariq@gmail.com

Abstrak

Tangki hidrogen komposit bertekanan tinggi tipe V berbahan karbon-epoksi merupakan solusi yang efisien dan ringan dalam sistem penyimpanan energi untuk kendaraan berbahan bakar hidrogen. Namun, tantangan struktural signifikan muncul akibat kondisi ekstrem dari variasi fase penyimpanan, seperti fase gas bertekanan tinggi, fase cair bersuhu sangat rendah, dan fase gas kriogenik bertekanan. Ketiga fase ini menghasilkan beban termomekanik yang berbeda, yang dapat mempercepat terjadinya kerusakan mikrostruktur pada material komposit. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi kegagalan struktural tangki tipe V akibat pengaruh simultan tekanan dan suhu, melalui pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga. Simulasi diawali dengan proses validasi terhadap data referensi terdahulu, yang menunjukkan tingkat kesalahan relatif sebesar 5,91 persen terhadap nilai tegangan hoop, sehingga metode dinyatakan valid. Selanjutnya, dilakukan uji *grid independence* yang menghasilkan ukuran elemen optimal sebesar enam milimeter dengan deformasi minimum sebesar 0,55063 milimeter. Hasil simulasi variasi fase hidrogen menunjukkan bahwa fase gas bertekanan menghasilkan tegangan hoop tertinggi, yaitu sebesar 451,61 MPa, diikuti oleh fase kriogenik bertekanan sebesar 169,16 MPa, dan fase cair sebesar 125,7 MPa. Tekanan pecah tertinggi tercatat sebesar 32,25 MPa, dengan tekanan kerja maksimum sebesar 14,33 MPa berdasarkan faktor keamanan 2,25. Perbedaan karakteristik antar fase menunjukkan bahwa tekanan tinggi meningkatkan tegangan mekanik, sedangkan suhu ekstrem mempercepat degradasi termal resin komposit. Temuan ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan desain tangki hidrogen yang lebih andal dan aman terhadap kondisi operasional ekstrem.

Kata kunci: metode elemen hingga; tangki hidrogen; tekanan ledak

Abstract

High-pressure type V hydrogen composite tanks made of carbon-epoxy materials offer an efficient and lightweight solution for energy storage systems in hydrogen-powered vehicles. However, significant structural challenges arise due to extreme conditions resulting from variations in hydrogen storage phases, including high-pressure gas, low-temperature liquid, and cryogenic compressed gas. These three phases impose different thermomechanical loads, which can accelerate the onset of microstructural damage in composite materials. This study aims to analyze the structural failure potential of type V tanks under the combined influence of pressure and temperature using a numerical approach based on the finite element method. The simulation began with model validation against prior reference data, yielding a relative error of 5.91 percent in hoop stress, thus confirming the validity of the method. A subsequent grid independence test identified an optimal element size of six millimeters, producing a minimum deformation of 0.55063 millimeters. The phase variation simulation showed that the high-pressure gas phase resulted in the highest hoop stress at 451.61 MPa, followed by the cryogenic compressed phase at 169.16 MPa, and the liquid phase at 125.7 MPa. The highest recorded burst pressure was 32.25 MPa, with a maximum allowable working pressure of 14.33 MPa based on a safety factor of 2.25. The differences between phases indicate that high pressure amplifies mechanical stress, while extreme temperatures accelerate thermal degradation of the composite resin. These findings offer valuable insights for developing safer and more reliable hydrogen tank designs for extreme operating conditions.

Keywords: burst pressure; finite element method; hydrogen tank

1. Pendahuluan

Tangki hidrogen bertekanan tinggi berbahan komposit karbon-epoksi menjadi salah satu solusi andalan dalam sistem penyimpanan energi untuk kendaraan berbahan bakar hidrogen karena karakteristik densitas energi yang tinggi dan bobotnya yang ringan [1]. Sistem penyimpanan tipe V, yang sepenuhnya terdiri dari material komposit tanpa penggunaan liner logam, dinilai mampu secara signifikan mengurangi massa struktur tanpa mengorbankan kekuatan mekanik [2]. Meski demikian, tangki ini harus dirancang untuk dapat menahan variasi beban termomekanik yang dihasilkan dari penyimpanan hidrogen dalam berbagai fase, yaitu fasa gas bertekanan (*compressed*), cair (*liquid*), dan kriogenik bertekanan (*cryo-compressed*) [3].

Perubahan suhu ekstrem yang terjadi selama proses pengisian cepat dapat menghasilkan tegangan termal tinggi, yang berpotensi menyebabkan degradasi matriks resin serta delaminasi antarlapisan serat-matriks [4]. Penurunan modulus elastisitas resin epoksi pada suhu mendekati titik transisi kaca (T_g) menjadi salah satu faktor percepatan kerusakan mekanik [5]. Di sisi lain, efek pendinginan lokal akibat ekspansi gas selama pelepasan tekanan (efek Joule-Thomson) dapat memicu retakan mikro pada dinding tangki [6]. Selain itu, perbedaan koefisien muai termal antara serat karbon dan matriks resin pada suhu kriogenik menciptakan tegangan sisa yang memperbesar potensi kegagalan struktural [7].

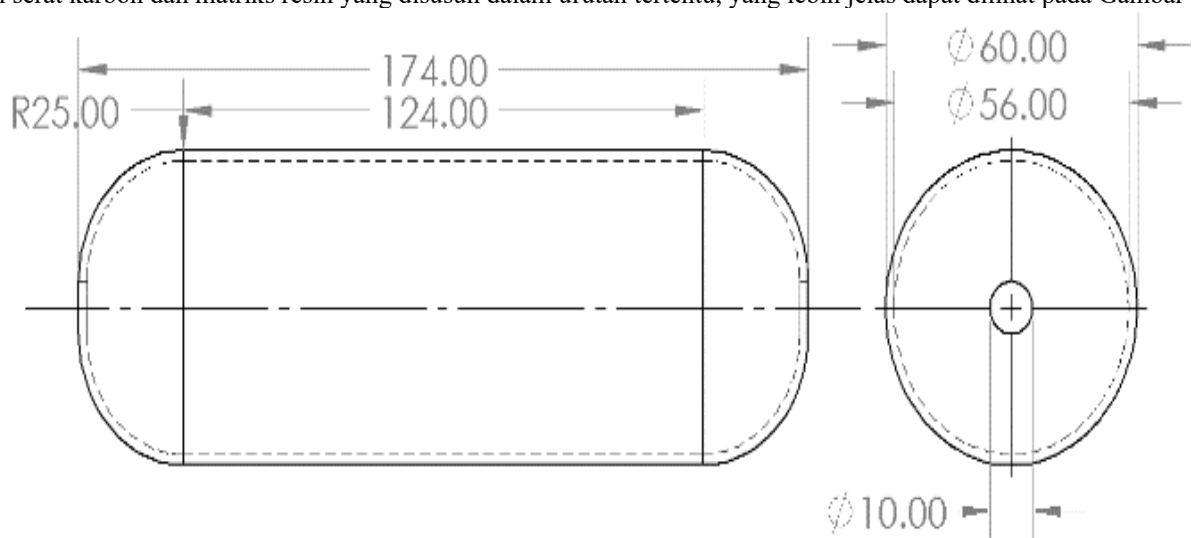
Berbagai penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan tekanan pecah (*burst pressure*) tangki hidrogen komposit dengan pendekatan numerik. Wu et al. menggunakan simulasi metode elemen hingga (FEM) pada tangki tipe IV dan menyimpulkan bahwa konfigurasi *winding* dan orientasi serat berperan krusial dalam menentukan kekuatan ledak struktur [1]. Sementara itu, Ahluwalia et al. meneliti performa penyimpanan hidrogen dalam ketiga fasa utama dan mengusulkan parameter kritis untuk pengujian desain tangki generasi berikutnya [3]. Studi oleh Sraja dan Ekoto secara khusus menunjukkan bahwa gradien suhu tinggi akibat beban termal transien dapat mempercepat kerusakan lokal pada lapisan komposit [2].

Penelitian ini melakukan simulasi numerik berbasis metode elemen hingga (FEM) untuk memprediksi tekanan pecah tangki hidrogen tipe V berbahan karbon T700 dan resin epoksi [8]. Studi ini mengadopsi variasi parameter tekanan dari 35 hingga 70 MPa, serta suhu operasional pada 20 K (*Liquid*), 50 K (*cryo-compressed*), dan 300 K (*compressed*), berdasarkan data desain dan referensi dari studi Ahluwalia et al. [9]. Data properti ortotropik material dimasukkan sebagai fungsi temperatur untuk memungkinkan simulasi kondisi ekstrem secara lebih realistis dan akurat [10].

2. Bahan dan Metode Penelitian

Validasi metode numerik dalam penelitian ini dilakukan dengan mengadopsi geometri dan pendekatan dari studi sebelumnya, yaitu model tangki berbasis komposit yang digunakan dalam simulasi tekanan ledak (*burst pressure*) pada tangki tipe IV oleh Nagaraja et al. (2024) [1]. Studi tersebut telah terverifikasi secara eksperimental dan numerik, sehingga digunakan sebagai rujukan awal dalam penyusunan model dan pembebanan awal penelitian ini. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi tekanan pecah dengan data referensi, serta menguji ketergantungan terhadap jumlah elemen melalui uji grid independence hingga konvergensi hasil tercapai.

Setelah proses validasi selesai, geometri tangki disesuaikan untuk merepresentasikan model tangki hidrogen tipe V yang sepenuhnya tersusun dari bahan komposit tanpa liner logam. Tangki dimodelkan dalam bentuk silinder dengan dua penutup berbentuk hemisfer pada kedua ujungnya. Dimensi utama yang digunakan meliputi panjang silinder 124 mm, diameter luar 60 mm, dan ketebalan total dinding komposit 4 mm. Setiap bagian dari dinding terdiri atas beberapa lapisan serat karbon dan matriks resin yang disusun dalam urutan tertentu, yang lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Dimensi geometri tangka hidrogen

Model material disusun berdasarkan karakteristik ortotropik dari material komposit serat karbon T700 yang diperkuat resin epoksi. Parameter mekanik dan termal material diinput berdasarkan literatur relevan serta data teknik dari basis material pada perangkat lunak simulasi. Nilai-nilai seperti *Modulus Young*, rasio *Poisson*, kekuatan tarik dan tekan, serta modulus geser disesuaikan untuk masing-masing arah X, Y, dan Z, baik pada kondisi normal maupun temperatur ekstrem. Data lengkap mengenai properti material yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Properti Material Karbon/Epoksi

Property (unit)	Value			
	T=25°	T=100°	T=150°	T=180°
Young Modulus (GPa)	132	125	50	10
Poisson's Ratio (-)	0.25	0.26	0.3	0.33
Shear Modulus (GPa)	6.5	5.5	2.5	1.0
Tensile Strength (GPa)	2.1	1.9	1.0	0.3
Compressive Strength (Pa)	-1050	-900	-500	-200
Shear Strength (MPa)	75	65	40	150
Density (kg/m ³)			1570	
Coefficient of Thermal Expansion (1/K)			1E-06	
Thermal Conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)			0.4	
Specific Heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹)			1E-03	

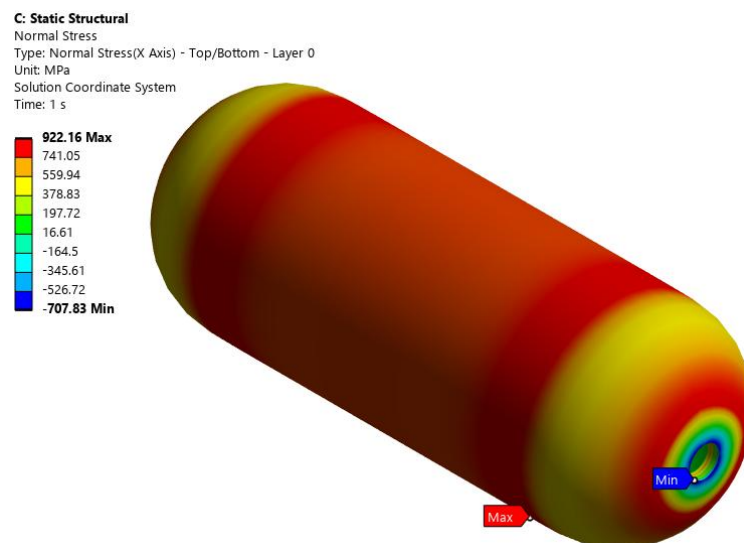
Nilai *peak pressure* dan *peak temperature* pada ketiga fase hidrogen *compressed*, *liquid*, dan *cryo-compressed* digunakan sebagai acuan pembebanan pada simulasi termomekanik. Fase terkompresi memiliki tekanan tinggi dan suhu ruang, sedangkan fase cair memiliki suhu sangat rendah dan tekanan rendah. Fase *cryo-compressed* menggabungkan keduanya dengan tekanan sedang dan suhu kriogenik. Rincian lebih lengkap mengenai parameter masing-masing fase dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rincian Suhu dan Tekanan pada Penyimpanan Fisik Hidrogen

Phase	Peak Pressure (Bar)	Peak Temperature (K)
Compressed Hydrogen	350-700	300
Liquid Hydrogen	6-8	20
Cryo-Compressed Hydrogen	50-300	20-50

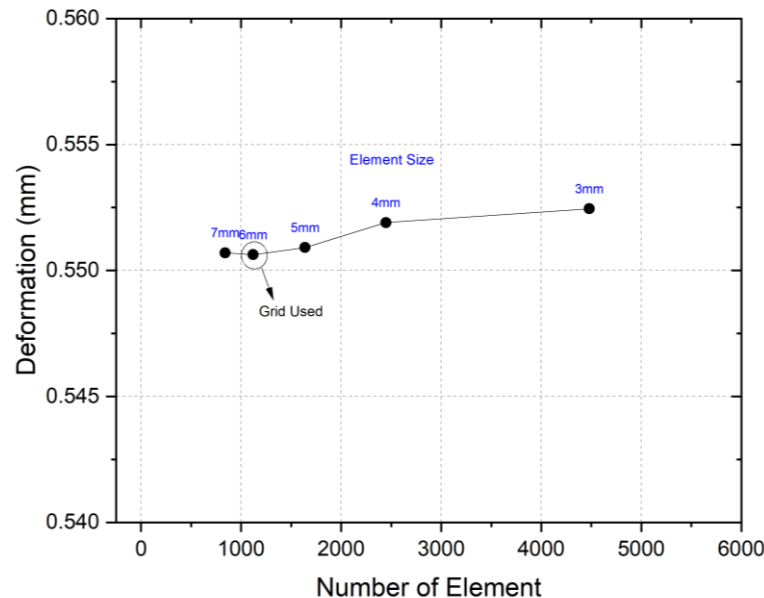
3. Hasil dan Pembahasan

Simulasi validasi dilakukan dengan mengadopsi pendekatan dari Saharudin et al. untuk mengevaluasi keakuratan metode dalam memprediksi tekanan pecah (*burst pressure*) pada tangki hidrogen tipe V. Hasil simulasi menunjukkan tegangan *hoop* maksimum sebesar 922.16 MPa yang mengindikasikan nilai *burst pressure* sebesar 131.73 MPa. Nilai ini memiliki selisih sebesar 8.27 MPa atau sekitar 5.91% lebih rendah dibandingkan hasil referensi Saharudin sebesar 140 MPa, yang menunjukkan tingkat kesalahan relatif kecil. Dengan demikian, metode simulasi yang digunakan dapat dikategorikan valid dan layak diterapkan untuk analisis lebih lanjut. Hasil simulasi dan perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



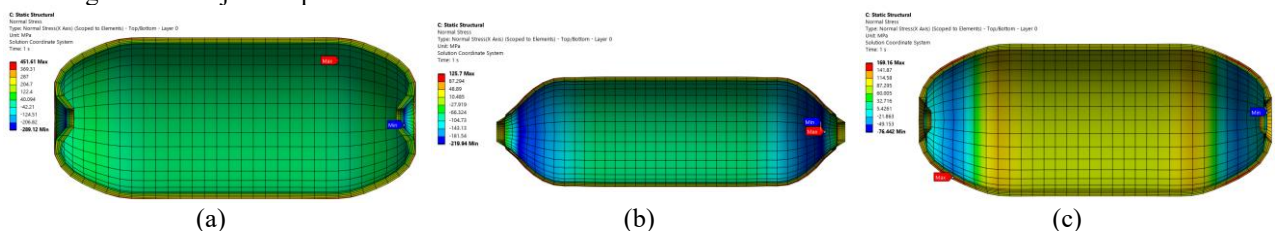
Gambar 2. Hasil Simulasi Validasi Saharudin et al (2025)

Untuk memastikan akurasi numerik model, dilakukan *grid independence test* guna menentukan ukuran elemen mesh yang memberikan hasil simulasi paling optimal. Pengujian ini mengindikasikan bahwa ukuran elemen 6 mm menghasilkan deformasi minimum sebesar 0.55063 mm dibandingkan ukuran elemen lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa elemen 6 mm mampu memberikan keseimbangan terbaik antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi. Hasil lengkap dari pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 2.2.



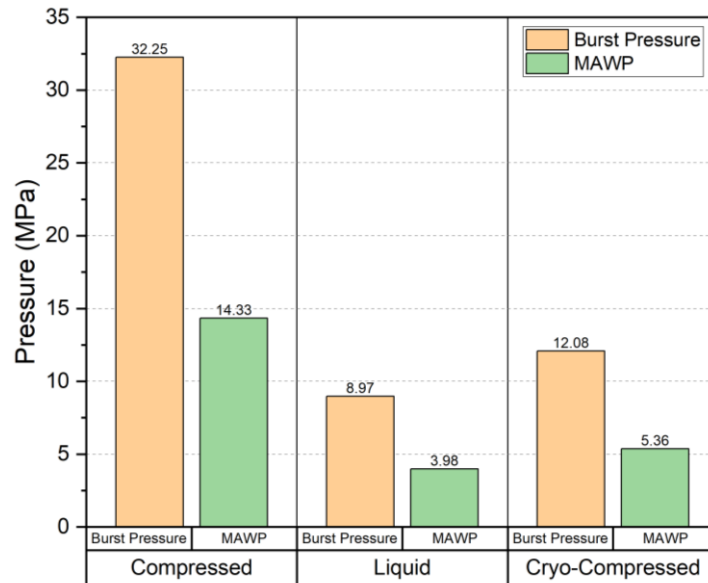
Gambar 3. Hasil Grid Independence Test

Simulasi dilakukan dengan memvariasikan fase hidrogen untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap tegangan *hoop* pada dinding tabung tekanan. Hasil menunjukkan bahwa tegangan hoop tertinggi terjadi pada *Compressed Hydrogen* sebesar 451,61 MPa, disusul oleh *Cryo-Compressed* sebesar 169,16 MPa, dan terendah pada *Liquid Hydrogen* sebesar 125,7 MPa. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa fase hidrogen memengaruhi besarnya beban internal, di mana tekanan penyimpanan yang lebih tinggi menghasilkan tegangan mekanik yang lebih besar. Hal ini berkaitan dengan karakteristik termodinamika masing-masing fase; gas terkompresi memerlukan tekanan tinggi untuk menyimpan hidrogen dalam volume terbatas, sedangkan hidrogen cair bertekanan rendah tetapi bersifat kriogenik. Zhang et al. (2023) dan Ma et al. (2024) juga menyebutkan bahwa tekanan tinggi pada fase gas meningkatkan tegangan lingkaran, sementara suhu ekstrem pada fase cair menurunkan tekanan tetapi meningkatkan risiko retak termal. Hasil visualisasi tegangan hoop dari ketiga fase ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Simulasi Variasi Fase Hidrogen, (a) *Compressed*, (b) *Liquid*, (c) *Cryo-Compressed*

Analisis lanjutan dilakukan untuk membandingkan nilai *burst pressure* dan maksimum tekanan kerja yang diizinkan (MAWP) dari masing-masing fase hidrogen, dengan MAWP dihitung menggunakan faktor keamanan sebesar 2,25. Hasil menunjukkan bahwa *Compressed Hydrogen* memiliki *burst pressure* tertinggi sebesar 32,25 MPa dan MAWP 14,33 MPa. Selanjutnya *Cryo-Compressed Hydrogen* mencatat *burst pressure* 12,08 MPa dan MAWP 5,36 MPa, sedangkan *Liquid Hydrogen* memiliki nilai terendah, yaitu 8,97 MPa dan MAWP 3,98 MPa. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa fase gas terkompresi menuntut ketahanan struktural lebih tinggi akibat tekanan internal yang besar pada suhu ruang. Studi oleh Sharma et al. (2022) dan Yan et al. (2024) menunjukkan bahwa fase gas cenderung menghasilkan distribusi tegangan yang lebih tinggi, sehingga mempengaruhi batas desain mekanik dan batas aman operasi. Sebaliknya, pada fase cair, ketahanan termal menjadi faktor dominan ketimbang tekanan mekanis. Hasil perbandingan *burst pressure* dan MAWP dari ketiga fase ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan *Burst Pressure* dan *Maximum Allowable Working Pressure* antara 3 Fase

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang dilakukan dari bab pendahuluan hingga pembahasan, penelitian ini memberikan gambaran komprehensif terkait performa mekanik tangki hidrogen komposit tipe V berbasis karbon-epoksi pada berbagai kondisi penyimpanan hidrogen. Simulasi numerik melalui pendekatan elemen hingga berhasil memvalidasi metode, menganalisis sensitivitas *mesh*, serta mengkaji dampak perbedaan fase hidrogen terhadap tegangan struktur. Kesimpulan utama dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Simulasi variasi fase hidrogen menunjukkan bahwa *Compressed Hydrogen* menghasilkan tegangan hoop maksimum sebesar 451.61 MPa, jauh lebih tinggi dibanding *Cryo-Compressed* sebesar 169.16 MPa, dan *Liquid Hydrogen* sebesar 125.7 MPa. Perbedaan ini mencerminkan pengaruh langsung dari kondisi termodinamika masing-masing fase terhadap respons mekanik tangki. Pada fase gas bertekanan, tekanan internal yang tinggi menyebabkan distribusi tegangan radial dan aksial yang lebih merata namun intens, sehingga meningkatkan beban pada dinding silinder. Sebaliknya, pada fase cair dan kriogenik, meskipun suhu ekstrem menimbulkan tegangan termal, tekanan kerjanya relatif lebih rendah sehingga kontribusi terhadap tegangan *hoop* menjadi minimal.
2. Nilai *burst pressure* dan *Maximum Allowable Working Pressure* (MAWP) tertinggi tercatat pada fase *Compressed Hydrogen* masing-masing sebesar 32.25 MPa dan 14.33 MPa, diikuti oleh *Cryo-Compressed Hydrogen* (12.08 MPa dan 5.36 MPa), serta *Liquid Hydrogen* (8.97 MPa dan 3.98 MPa). Hasil ini mengindikasikan bahwa desain tangki pada fase gas memerlukan margin kekuatan struktural yang jauh lebih besar akibat tekanan internal yang dominan, dibanding fase cair atau kriogenik. Studi-studi sebelumnya juga menggarisbawahi bahwa pada penyimpanan kriogenik, tantangan utama bergeser dari tekanan mekanik ke degradasi termal material akibat suhu ekstrem, seperti retakan mikro dan delaminasi akibat ketidaksesuaian koefisien muai antar material penyusun. Oleh karena itu, kebutuhan desain pada tiap fase harus mempertimbangkan secara simultan antara parameter tekanan dan suhu sebagai faktor kegagalan utama.

5. Daftar Pustaka

- [1] Wu D, Zhang Y, Chen M, Zhou Z, Wang Z. Research and development status of high-pressure hydrogen storage tanks: A review. *Energy Storage and Saving*. 2024;7:245–267. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.03.001>
- [2] Sraj I, Ekoto I. Thermal modeling of high-pressure hydrogen composite tanks under extreme fill conditions. *Renewable Energy*. 2024;240:122870. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122870>
- [3] Ahluwalia RK, Peng JK, Hua TQ. Analysis of the performance of physical hydrogen storage systems for light-duty fuel cell vehicles. *Journal of Composite Science*. 2023;7(2):75. <https://doi.org/10.3390/jcs7020075>
- [4] Dagdag HO, Kim H. Cryogenic impact on carbon fibre-reinforced epoxy composites for hydrogen storage vessels. *Journal of Composite Science*. 2024;8(11):459. <https://doi.org/10.3390/jcs8110459>
- [5] Simmons KL, Johnson K, Gotthold D, Nguyen N. Materials challenges for cryogenic hydrogen storage technologies. *DOE Hydrogen Fuel Cells Program Annual Report*; 2019. West Richland, Washington.
- [6] Nguyen BN, Roh HS, Merkel DR, Johnson KI, Simmons KL. A multiscale modeling approach to cryo-compressed hydrogen storage pressure vessels – Part II: Constitutive modeling and finite element analysis. *SAMPE neXus Proc*; 2021. West Richland, Washington.

-
- [7] Takeuchi S. Evaluation of adhesive bonding structure in cryogenic composite tank and failure analysis. *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*. 2009;52(175):36–46.
 - [8] Khandelwal A, Lux S, Sattelmayer T. Numerical simulation of type IV high-pressure hydrogen tanks under fast filling. *Journal of the International Association for Hydrogen Energy*. 2019;44(49):26712–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.001>
 - [9] Zhang J, Fisher TS, Ramachandran PV, Gore JP, Mudawar I. A review of heat transfer issues in hydrogen storage technologies. *Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005;127(12):1391–9. <https://doi.org/10.1115/1.2098875>
 - [10] Gentileau B, Touchard F, Grandidier JC. Numerical study of influence of temperature and matrix cracking on type IV hydrogen high-pressure storage vessel behavior. *Composite Structure*. 2014;111:618–27. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.12.034>