

MANUFAKTUR TANGKI GAS HIDROGEN TIPE I BERBAHAN BAJA KARBON *SCHEDULE 160* DILAPISI EPOKSI RESIN

*Philippie Daniel Nababan¹, Sulistyo Sulistyo², Mohammad Tauviqirrahman²

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: philippie.danieln@gmail.com

Abstrak

Penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi merupakan salah satu tantangan utama dalam pengembangan sistem energi hidrogen yang aman dan andal. Tangki gas hidrogen tipe I berbahan baja karbon memiliki keunggulan dari sisi kekuatan mekanik dan biaya produksi, namun masih menghadapi risiko *hydrogen embrittlement* akibat paparan hidrogen bertekanan tinggi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi proses manufaktur dan kualitas pelapisan internal epoksi pada tangki gas hidrogen tipe I berbahan baja karbon *Schedule 160* melalui pengujian ketebalan lapisan, adhesi, dan *hydrostatic pressure test* hingga 350 bar. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental melalui manufaktur tangki, aplikasi *internal coating* menggunakan metode *rotational coating*, serta evaluasi melalui pengujian *dry film thickness*, adhesi, dan *hydrostatic pressure test*. Sebelum diaplikasikan pada tangki aktual, dilakukan simulasi pelapisan pada material uji berupa pipa baja karbon *Schedule 160* dan spesimen baja karbon berbentuk cakram dengan permukaan datar untuk menentukan komposisi pelapisan optimal berdasarkan pengujian ketebalan dan adhesi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi optimal diperoleh pada variasi 20 g resin epoksi dan 10 g hardener dengan ketebalan rata-rata 575,6 μm dan kekuatan adhesi 16,89 MPa. Berdasarkan perbandingan luas permukaan, kebutuhan material pelapis untuk tangki adalah 48,4 g resin epoksi dan 24,2 g hardener. Hasil *hydrostatic pressure test* menunjukkan bahwa tangki mampu menahan tekanan hingga 350 bar tanpa kebocoran maupun kegagalan struktural, sehingga menunjukkan potensi penerapan pelapisan internal epoksi untuk meningkatkan keandalan tangki hidrogen tipe I.

Kata kunci: baja karbon *schedule 160*; epoksi resin; *hydrogen embrittlement*; tangki gas hidrogen tipe I

Abstract

High-pressure hydrogen storage remains one of the main challenges in developing safe and reliable hydrogen energy systems. Type I hydrogen gas tanks made of carbon steel offer advantages in terms of mechanical strength and production cost; however, they still face the risk of hydrogen embrittlement due to exposure to high-pressure hydrogen. This study aims to evaluate the manufacturing process and the quality of internal epoxy coating on a Type I hydrogen gas tank made of Schedule 160 carbon steel through coating thickness, adhesion, and hydrostatic pressure test up to 350 bar. The research was conducted experimentally through tank manufacturing, internal coating application using the rotational coating method, and evaluation by dry film thickness, adhesion, and hydrostatic pressure testing. Prior to application on the actual tank, coating simulations were performed on Schedule 160 carbon steel pipe and flat carbon steel disc specimens to determine the optimal coating composition based on thickness and adhesion tests. The results showed that the optimal composition was obtained at 20 g of epoxy resin and 10 g of hardener, producing an average coating thickness of 575,6 μm and an adhesion strength of 16,89 MPa. Based on surface area comparison, the required coating material for the tank was 48,4 g of epoxy resin and 24,2 g of hardener. The hydrostatic pressure test results demonstrated that the tank successfully withstood pressure up to 350 bar without leakage or structural failure, indicating the potential application of internal epoxy coating to improve the reliability of Type I hydrogen tanks.

Keywords: epoxy resin; hydrogen embrittlement; schedule 160 carbon steel; type i hydrogen gas tank

1. Pendahuluan

Pengembangan teknologi penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi menjadi salah satu aspek penting dalam mendukung transisi menuju energi bersih. Hidrogen memiliki potensi besar sebagai *energy carrier* karena densitas energi yang tinggi serta tidak menghasilkan emisi karbon pada tahap penggunaannya. Dalam implementasinya, sistem penyimpanan bertekanan tinggi menjadi komponen utama yang menentukan keamanan dan keandalan operasional. Salah

satu teknologi yang banyak digunakan adalah tangki gas hidrogen tipe I berbahan logam penuh, khususnya baja karbon, karena memiliki kekuatan mekanik tinggi, kemudahan proses manufaktur, serta biaya produksi yang relatif lebih rendah dibandingkan tangki berbasis material komposit [1]. Meskipun demikian, penggunaan baja karbon pada tangki hidrogen tipe I masih menghadapi tantangan berupa risiko *hydrogen embrittlement* dan permeasi gas hidrogen ke dalam struktur material. Fenomena tersebut dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik, terbentuknya retak mikro, hingga kegagalan struktural pada kondisi tekanan tinggi [2]. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk meminimalkan risiko tersebut adalah penerapan pelapisan internal berbasis epoksi resin yang diharapkan mampu berfungsi sebagai *hydrogen barrier* untuk mengurangi interaksi langsung antara gas hidrogen dan permukaan baja karbon. Namun, efektivitas lapisan tersebut sangat dipengaruhi oleh kualitas proses manufaktur, meliputi *surface preparation*, metode aplikasi pelapisan, keseragaman ketebalan, dan kualitas adhesi terhadap substrat [3]. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada pengembangan tangki hidrogen tipe III dan tipe IV berbasis material komposit, sementara studi mengenai manufaktur tangki tipe I berbahan baja karbon dengan pelapisan internal epoksi masih terbatas, khususnya dalam evaluasi kualitas pelapisan internal, optimasi parameter pelapisan, serta validasi performa struktural melalui pengujian tekanan aktual [4]. Kondisi ini menunjukkan masih adanya kebutuhan penelitian untuk mengembangkan pendekatan manufaktur tangki hidrogen tipe I yang lebih sederhana, ekonomis, dan tetap memenuhi aspek keselamatan operasional. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi proses manufaktur dan kualitas pelapisan internal epoksi pada tangki gas hidrogen tipe I berbahan baja karbon Schedule 160. Penelitian dilakukan melalui tahapan fabrikasi tangki, *surface preparation* menggunakan *sandblasting*, aplikasi pelapisan dengan metode *rotational coating*, serta evaluasi kualitas pelapisan melalui pengujian ketebalan, adhesi, dan uji tekanan hingga 350 bar. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan metode manufaktur tangki hidrogen tipe I berbasis baja karbon dengan sistem pelapisan internal yang lebih aman, andal, dan ekonomis untuk mendukung implementasi energi hidrogen di masa mendatang.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menganalisis proses manufaktur tangki gas hidrogen tipe I berbahan baja karbon *Schedule 160 Grade A* yang dilapisi epoksi resin sebagai *liner* internal. Pemilihan pipa baja karbon *Schedule 160 Grade A* didasarkan pada ketebalan dindingnya yang lebih besar dibandingkan spesifikasi *schedule* di bawahnya, sehingga memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan tekanan internal tinggi sesuai kebutuhan aplikasi tangki hidrogen bertekanan [5]. Selain itu, berdasarkan data *ASTM A106*, material ini memiliki kekuatan luluh (*yield strength*) sebesar 205 MPa, sehingga dinilai memadai untuk digunakan sebagai material utama tangki dalam menahan beban tekanan internal selama proses pengoperasian. Tahapan penelitian meliputi perancangan geometri tangki, proses fabrikasi, simulasi pelapisan pada material uji, aplikasi pelapisan pada tangki aktual, serta pengujian hasil manufaktur. Parameter utama yang digunakan adalah tekanan desain sebesar 35 MPa (350 bar), sesuai dengan standar penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi.

2.1 Material dan Peralatan

Material utama yang digunakan adalah pipa baja karbon *Schedule 160* dengan diameter luar 60 mm, diameter dalam 43 mm, dan panjang 200 mm sebagai badan utama tangki. Material tambahan berupa baja as berbentuk cakram dengan diameter 120 mm dan 130 mm digunakan sebagai material uji untuk pengujian adhesi pada permukaan datar. Material pelapis yang digunakan adalah epoksi resin dan *hardener* dengan rasio pencampuran 2:1. Peralatan utama yang digunakan meliputi mesin bubut untuk pembentukan *dome*, peralatan pengelasan, alat *sandblasting*, alat *rotational coating*, *PosiTector* untuk pengujian ketebalan lapisan, serta alat *pull-off test* untuk pengujian adhesi. Material utama yang digunakan pada studi ini yaitu pipa baja karbon *schedule 160* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pipa Baja Karbon *Schedule 160*

2.2 Proses Manufaktur Tangki

Tahap manufaktur diawali dengan perancangan geometri tangki berdasarkan teori bejana tekan silinder menggunakan standar ASME BPVC Section VIII. Tangki dirancang dengan konfigurasi silinder dan dua *elliptical dome* pada bagian atas dan bawah, karena bentuk ini mampu mendistribusikan tegangan internal secara lebih merata sehingga

dapat meningkatkan ketahanan struktur terhadap tekanan tinggi [6]. Setelah desain ditentukan, dilakukan proses fabrikasi meliputi pemotongan material, pembentukan *dome* menggunakan proses pembubutan (*turning process*), pemasangan *nozzle*, dan proses pengelasan untuk menyatukan seluruh komponen tangki menjadi satu sistem tertutup.

2.3 Simulasi dan Aplikasi Pelapisan Epoksi

Sebelum diaplikasikan pada tangki aktual, dilakukan simulasi pelapisan menggunakan material uji berupa pipa baja karbon *Schedule 160* dan baja as permukaan datar untuk menentukan komposisi pelapisan yang optimal. Tahap *surface preparation* dilakukan melalui proses *sandblasting* menggunakan abrasif Purfequ Australian Garnet 30/60 hingga mencapai tingkat kebersihan permukaan Sa 3 sesuai ISO 8501-1:1988. Tingkat kebersihan ini dipilih karena merupakan standar *white metal blast cleaning*, yaitu kondisi permukaan yang telah bebas secara menyeluruh dari karat, oksida, dan kontaminan, sehingga mampu menghasilkan kekasaran permukaan yang optimal untuk meningkatkan daya lekat lapisan epoksi terhadap substrat baja karbon [7]. Selanjutnya dilakukan pencampuran epoksi resin dan *hardener*, kemudian diaplikasikan menggunakan metode *rotational coating* untuk memperoleh distribusi lapisan yang merata pada permukaan internal tangki. Setelah proses pelapisan selesai, spesimen didiamkan pada suhu ruang selama proses *curing* hingga lapisan mengeras sempurna.

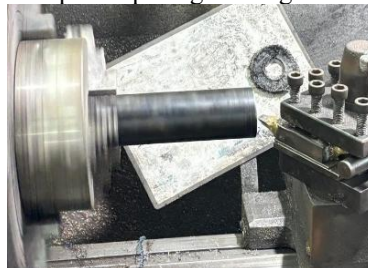
2.4 Pengujian Hasil Manufaktur

Evaluasi kualitas pelapisan dilakukan melalui pengujian ketebalan lapisan (DFT) menggunakan *PosiTector* pada beberapa titik pengukuran untuk menentukan keseragaman distribusi lapisan serta memastikan ketebalan *coating* yang dihasilkan sesuai dengan kebutuhan desain sebagai *hydrogen barrier* [8]. Selanjutnya dilakukan pengujian adhesi menggunakan metode *pull-off test* untuk mengetahui kekuatan ikatan antara lapisan epoksi dan substrat baja karbon, sehingga dapat dievaluasi kemampuan lapisan dalam mempertahankan integritasnya selama tangki beroperasi pada tekanan tinggi [9]. Setelah proses pelapisan dinyatakan memenuhi kriteria, tangki diuji menggunakan uji tekanan hingga 350 bar untuk mengevaluasi integritas struktural, ketahanan terhadap kebocoran, serta performa keseluruhan hasil manufaktur tangki gas hidrogen tipe I.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Manufaktur Tangki Gas Hidrogen Tipe I

Proses manufaktur tangki gas hidrogen tipe I selesai dilakukan melalui tahapan pembentukan badan silinder, pembuatan *dome*, pemasangan *nozzle*, dan proses pengelasan hingga terbentuk sistem tangki tertutup sesuai desain. Adapun proses pembentukan *dome* menggunakan *turning process* menghasilkan geometri elipsoidal yang presisi, sehingga mampu mendukung distribusi tegangan yang lebih merata pada saat tangki menerima tekanan internal. Hasil akhir dari keseluruhan proses manufaktur ditampilkan pada gambar-gambar dibawah ini.



Gambar 2. Proses Perataan Dimensi pada Badan Silinder Tangki



Gambar 3. Proses Pembentukan *Dome* Tangki Hidrogen



Gambar 4. Hasil Proses Pengelasan Badan Silinder dan *Dome*



Gambar 5. Hasil Manufaktur Tangki Hidrogen Tipe I

Observasi hasil manufaktur dilakukan melalui inspeksi visual dan evaluasi kualitas sambungan hasil pengelasan pada seluruh bagian tangki. Berdasarkan hasil inspeksi visual, geometri tangki, sambungan antar komponen, serta permukaan hasil manufaktur menunjukkan kondisi yang baik tanpa ditemukan cacat signifikan seperti deformasi, retak, maupun ketidaksesuaian dimensi. Selain itu, hasil pengujian pada sambungan las menunjukkan bahwa tidak ditemukan indikasi kebocoran pada area pengelasan maupun sambungan utama tangki. Hasil tersebut menegaskan bahwa proses manufaktur yang dilakukan telah menghasilkan tangki dengan integritas struktur dan kualitas sambungan yang memenuhi kriteria keamanan untuk aplikasi penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi.

3.2 Hasil Simulasi Pelapisan dan Penentuan Komposisi Optimal

Simulasi pelapisan dilakukan pada dua jenis material uji, yaitu pipa baja karbon *Schedule 160* sebagai representasi permukaan internal tangki dan baja as permukaan datar sebagai media pendukung pengujian pada bidang datar.

Tabel 1. Hasil Pengukuran DFT pada Tiap Percobaan

Material Uji	Variasi Komposisi	Dry Film Thickness (μm)			Rata-rata (μm)
		1	2	3	
Pipa <i>Schedule 160</i>	20 g resin : 10 g <i>hardener</i>	635,30	630,18	633,07	632,85
Pipa <i>Schedule 160</i>	40 g resin : 20 g <i>hardener</i>	1064,78	1066,95	1069,90	1067,21
Baja as $\varnothing 120$ mm	10 g resin : 5 g <i>hardener</i>	584,30	591,20	551,30	575,60
Baja as $\varnothing 130$ mm	20 g resin : 10 g <i>hardener</i>	1003	1011	1008	1007,33

Nilai dari hasil pengukuran *Dry Film Thickness* pada tiap percobaan dapat dilihat melalui Tabel 1. Dimana, pada material uji pipa, percobaan pertama dengan komposisi 20 gram resin epoksi dan 10 gram *hardener* menghasilkan rata-rata ketebalan lapisan sebesar 632,85 μm , sedangkan percobaan kedua dengan komposisi 40 gram resin epoksi dan 20

gram *hardener* menghasilkan rata-rata ketebalan sebesar 1067,21 μm . Kedua variasi menunjukkan distribusi lapisan yang seragam pada permukaan material uji.

Pada material uji baja as, percobaan pertama dengan komposisi 10 gram resin epoksi dan 5 gram *hardener* menghasilkan rata-rata ketebalan lapisan sebesar 575,6 μm , sedangkan percobaan kedua dengan komposisi 20 gram resin epoksi dan 10 gram *hardener* menghasilkan rata-rata ketebalan sebesar 1007,3 μm . Hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua percobaan mampu menghasilkan lapisan yang homogen dengan distribusi yang baik pada permukaan spesimen.

Berdasarkan hasil kedua simulasi tersebut, komposisi 20 gram resin epoksi dan 10 gram *hardener* dipilih sebagai komposisi optimal untuk aplikasi aktual pada tangki. Pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan bahwa komposisi tersebut telah menghasilkan ketebalan lapisan yang memadai, distribusi lapisan yang seragam, serta penggunaan material yang lebih efisien dibandingkan variasi dengan komposisi yang lebih besar [10].

3.3 Hasil Pengujian Adhesi Lapisan

Pengujian adhesi dilakukan menggunakan metode *pull-off test* pada spesimen baja as berdiameter 130 mm dengan komposisi optimal 20 gram resin dan 10 gram *hardener*. Hasil pengujian menunjukkan nilai kekuatan adhesi sebesar 15,36 MPa, 15,63 MPa, dan 19,67 MPa, dengan nilai rata-rata sebesar 16,89 MPa. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lapisan epoksi memiliki daya lekat yang sangat baik terhadap substrat baja karbon dan konsisten pada seluruh titik pengujian [11]. Nilai kekuatan pelapisan yang didapat dari pengujian *pull-off test* dapat dilihat melalui Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Pull-off Test*

Material Uji	Variasi Komposisi	Pull Off Strength (MPa)			Rata-rata (MPa)
		1	2	3	
Baja as Ø130 mm	20 g resin : 10 g <i>hardener</i>	15,36	15,63	19,67	16,89

Pengujian adhesi pada lapisan epoksi dilakukan menggunakan metode *pull-off test*, yaitu dengan merekatkan *dolly* pada permukaan spesimen menggunakan lem *adhesive araldite* yang kemudian diberi gaya tarik secara tegak lurus terhadap permukaan menggunakan alat *pull-off adhesion tester* hingga terjadi kegagalan lapisan.

3.4 Implementasi Pelapisan pada Tangki Aktual

Berdasarkan hasil simulasi dan pendekatan perbandingan luas permukaan, kebutuhan material pelapis untuk aplikasi pada tangki ditentukan sebesar 48,4 gram resin epoksi dan 24,2 gram *hardener*. Komposisi tersebut diaplikasikan menggunakan metode *rotational coating* menggunakan mesin bubut, di mana campuran epoksi dimasukkan ke dalam tangki kemudian diputar secara horizontal selama 60 menit pada kecepatan putar 90 rpm untuk memperoleh distribusi lapisan yang merata pada seluruh permukaan internal tangki.

Setelah proses pemutaran tangki pada mesin bubut selesai dilakukan, tahapan selanjutnya adalah proses *curing* dengan mendinginkan tangki selama 24 jam pada suhu ruang sekitar 25–27°C agar reaksi polimerisasi antara resin epoksi dan *hardener* berlangsung secara optimal, sehingga lapisan yang terbentuk dapat mengeras sempurna dan memiliki kekuatan adhesi yang baik [13].

3.5 Pengujian Tekanan Tangki

Pengujian tekanan pada tangki yang telah dilakukan pelapisan dilakukan dengan metode *hydrostatic pressure test*, yaitu melalui pengisian oli hidrolik ke dalam tangki yang kemudian diberi tekanan secara bertahap menggunakan *hand hydraulic pump* hingga mencapai tekanan pengujian.

Berdasarkan hasil pengujian tekanan yang dilakukan hingga mencapai 350 bar, tangki yang telah dilapisi epoksi resin menunjukkan performa yang baik tanpa ditemukan indikasi kebocoran, deformasi permanen, maupun kegagalan struktural pada badan tangki dan sambungan utama. Hasil ini menunjukkan bahwa lapisan epoksi yang diaplikasikan mampu berfungsi secara efektif sebagai *hydrogen barrier coating*, yaitu membentuk lapisan pelindung pada permukaan internal tangki yang membantu menghambat permeasi gas hidrogen ke dalam substrat baja karbon. Selain itu, kualitas pelapisan yang ditunjukkan oleh distribusi ketebalan yang seragam dan nilai adhesi yang tinggi turut berkontribusi terhadap keberhasilan tangki dalam mempertahankan integritasnya selama pengujian tekanan. Dengan demikian, hasil *pressure test* ini membuktikan bahwa sistem pelapisan internal yang diterapkan tidak hanya mampu meningkatkan ketahanan tangki terhadap potensi *hydrogen embrittlement*, tetapi juga mendukung keamanan dan keandalan operasional tangki gas hidrogen bertekanan tinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Tangki gas hidrogen tipe I berbahan baja karbon *Schedule 160* yang telah dimanufaktur dan dilapisi epoksi resin berhasil menahan tekanan hingga 35 MPa (350 bar) tanpa ditemukan indikasi kebocoran maupun kegagalan struktural. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi material, desain tangki, serta proses manufaktur yang diterapkan telah memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan untuk aplikasi penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi.
2. Proses pembentukan *dome* menggunakan metode *turning process* pada mesin bubut berhasil menghasilkan geometri *elliptical dome* dengan presisi dimensi dan kualitas permukaan yang baik. Geometri ini mampu mendistribusikan tegangan internal secara lebih merata serta mengurangi konsentrasi tegangan pada area kritis, sehingga mendukung peningkatan integritas struktural tangki.
3. Hasil pengujian pelapisan menunjukkan bahwa komposisi optimal diperoleh pada percobaan pertama dengan nilai rata-rata ketebalan lapisan sebesar 575,6 μm , yang menunjukkan distribusi lapisan cukup seragam dan sesuai dengan kebutuhan pelapisan internal tangki. Selain itu, hasil uji adhesi menunjukkan nilai rata-rata sebesar 16,89 MPa dengan dominasi kegagalan kohesif (*cohesive failure*), yang menandakan bahwa ikatan antara lapisan epoksi dan substrat baja karbon berada dalam kondisi sangat baik. Berdasarkan hasil optimasi tersebut, kebutuhan material pelapis untuk aplikasi aktual pada tangki ditentukan sebesar 48,4 gram resin epoksi dan 24,2 gram *hardener*. Dengan karakteristik tersebut, lapisan epoksi yang dihasilkan efektif berfungsi sebagai *hydrogen barrier*, sehingga berpotensi mengurangi permeasi hidrogen dan meningkatkan ketahanan material terhadap fenomena *hydrogen embrittlement*.

5. Daftar Pustaka

- [1] A. M. Elberry, J. Thakur, and A. Santasalo-aarnio, "Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 29, pp. 15671–15690, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.080.
- [2] B. Somerday and E. Sutherland, "III . 5 Hydrogen Embrittlement of Structural Steels," pp. 29–32, 2013.
- [3] D. Biggio, B. Elsener, and A. Rossi, "Ni-P Coatings as Hydrogen Permeation Barriers — A Review," 2025.
- [4] A. Magliano, C. Perez Carrera, C. M. Pappalardo, D. Guida, and V. P. Berardi, "A Comprehensive Literature Review on Hydrogen Tanks: Storage, Safety, and Structural Integrity," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 20, pp. 1–38, 2024, doi: 10.3390/app14209348.
- [5] V. Alcántar, S. Ledesma, S. M. Aceves, E. Ledesma, and A. Saldaña, "Optimization of type III pressure vessels using genetic algorithm and simulated annealing," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 31, pp. 20125–20132, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.146.
- [6] Z. Abbas Hamdani Syed, J. le Che, and S. H. Chang, "Design of a Type-III hydrogen pressure vessel with an elliptical dome for stress reduction in the composite layer," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 103, no. January, pp. 937–950, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.215.
- [7] A. Kim, S. Kainuma, and M. Yang, "Surface Characteristics and Corrosion Behavior of Carbon Steel Treated by Abrasive Blasting," 2021. doi: 10.3390/met11122065.
- [8] S. A. Khwaja and S. Paul, "Inspection of Coated Hydrogen Transportation Pipelines," 2022. doi: 10.3390/app12199503.
- [9] A. Trentin, R. Samiee, A. H. Pakseresht, A. Duran, Y. Castro, and D. Galusek, "Applied Surface Science Advances Influence of pre-treatments on adhesion , barrier and mechanical properties of epoxy coatings : A comparison between steel , AA7075 and AA2024," *Appl. Surf. Sci. Adv.*, vol. 18, no. July, p. 100479, 2023, doi: 10.1016/j.apsadv.2023.100479.
- [10] N. Mao *et al.*, "Investigation of Microstructure and Hydrogen Barrier Behavior in Epoxy Resin-Based Ceramic / Graphene Composite Coatings," pp. 1–14, 2025.
- [11] K. Cai and B. Jiang, "Preparation and Characterization of Composite Hydrogen Barrier Coatings with (Graphene – Epoxy Resin)/(Silicon Carbide – Epoxy Resin)/(Graphene – Epoxy Resin) Sandwich Structures," 2025.
- [12] A. Momber, *Blast Cleaning Technology*. 2008. doi: 10.1007/978-3-540-73645-5_7.
- [13] S. Ahmed, K. Lepkova, X. Sun, W. D. A. Rickard, and T. Pojtanabuntoeng, "Performance of Phenolic-Epoxy Coatings after Exposure to High Temperatures," 2024. doi: 10.3390/cmd5010004.