

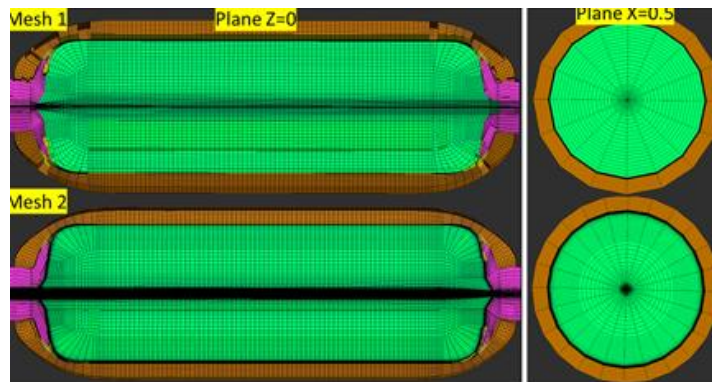
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *State of Art*

Dalam penulisan penelitian ini, penulis memiliki beberapa referensi yang membantu penulis dalam mengkaji Analisa dalam penelitiannya. *State of Art* ini merupakan pembahasan singkat mengenai penelitian sebelum-sebelumnya dan juga memberikan pembeda dari karya penulis dengan penelitian sebelumnya. Berikut ialah penelitian-penelitian mengenai *Hydrogen Storage Tank*.

1. Penelitian berjudul *CFD Simulation of Hydrogen Tank Fuelling: Sensitivity to Turbulence and Grid Resolution* yang ditulis oleh Huanguang Xie Dkk tahun 2023.



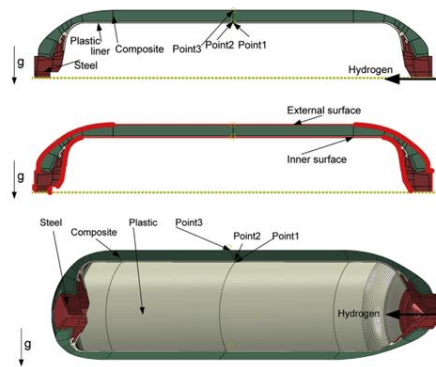
Gambar 2.1 *Tank Meshing*

(Sumber: Xie *et al*, 2023)

Dalam penelitian ini, membahas mengenai simulasi pengisian tangki hydrogen menggunakan metode CFD Studi ini meneliti dampak pemilihan model turbulensi terhadap simulasi CFD pengisian bahan bakar hydrogen gas pada tingkat tekanan tinggi dalam tangki hidrogen tipe IV berukuran 29 L. Dengan menggunakan lima model turbulensi yang berbeda, penelitian ini menghadirkan perbandingan langsung atas kinerja model-model tersebut dalam simulasi CFD 3D dari proses pengisian yang sama. Menandai langkah inovatif, simulasi ini melibatkan model LES 3D dan

model RANS-LES hibrida (SAS dan DES), serta model RANS (modified k-model dan RSM), untuk pertama kalinya. Melalui analisis yang mendalam, paper ini memeriksa hasil simulasi termasuk tekanan hidrogen, suhu, fluks panas, dan kecepatan aliran dalam tangki, membawa kontribusi penting dalam konteks keselamatan hidrogen yang sebelumnya belum tersentuh.

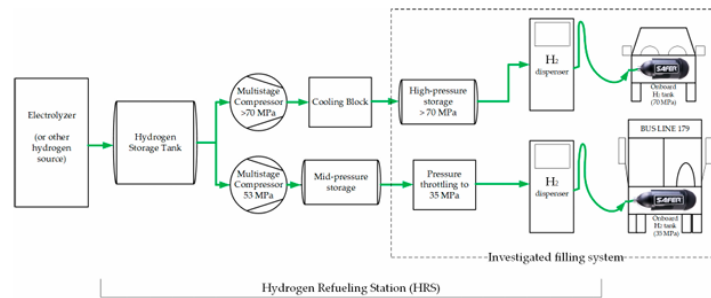
2. Penelitian berjudul *Thermal Simulation of a Hydrogen Storage Tank during Fast Filling* yang ditulis oleh Igor Simonovski Dkk tahun 2015.



Gambar 2.2 Storage Tank Design
(Sumber: Simonovski *et al*, 2015)

Penelitian ini menyajikan informasi teknis mengenai penyimpanan hidrogen dalam kondisi tekanan tinggi serta sifat-sifat termal yang terjadi selama proses pengisian ulang. Pembahasan mencakup pengaruh konduktivitas termal dan kapasitas panas spesifik terhadap fluktuasi suhu saat tahap pengisian. Tak hanya itu, penelitian juga merujuk pada standar industri dan peraturan terkait kendaraan hidrogen dan teknologi sel bahan bakar.

3. Penelitian berjudul *Effects of Hydrogen, Methane, and Their Blends on Rapid-Filling Process of High-Pressure Composite Tank* yang ditulis oleh Adam Saferna Dkk pada tahun 2024.



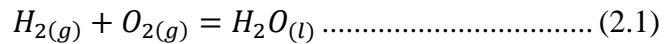
Gambar 2.3 HRS Schematics
(Sumber: Simonovski *et al*, 2015)

Penelitian ini membahas mengenai pengaruh dari hidrogen, metana dan campuran masing-masing pada proses *Rapid-Filling* di tangki tekanan komposit. Metode yang digunakan yaitu simulasi numerik. Dalam analisis yang dilakukan pada proses pengisian cepat tangki tipe IV komposit, beberapa parameter dievaluasi: waktu pengisian, peningkatan tekanan silinder, perubahan suhu silinder, laju aliran massa, peningkatan massa silinder, koefisien Joule-Thomson, dan generasi entropi. Temuan menunjukkan bahwa, untuk setiap kapasitas silinder yang dipertimbangkan, waktu pengisian terpendek untuk mencapai tekanan maksimum (35 MPa dan 70 MPa) terjadi ketika menggunakan hidrogen murni, dan durasi ini memanjang ketika proporsi hidrogen menurun dalam campuran dengan metana. Massa yang dihasilkan dalam silinder setelah pengisian hingga tekanan akhir terendah untuk hidrogen murni dan tertinggi untuk metana murni, yang berkorelasi langsung dengan komposisi sampel gas yang dianalisis. Lebih penting dalam konteks ini adalah potensi untuk mencapai konten energi maksimum dalam tangki setelah pengisian.

2.2 Hidrogen

Hidrogen, yang berasal dari bahasa Latin (*hydrogenium*) dan bahasa Yunani (*hydro*) yang berarti "air" dan "membentuk", merupakan unsur kimia pada tabel periodik dengan simbol H dan nomor atom 1. Pada kondisi standar,

hidrogen tidak memiliki warna, aroma, dan bersifat non-logam dengan valensi tunggal. Hidrogen adalah gas diatomik yang sangat mudah terbakar.



Hidrogen merupakan unsur teringan di dunia, hidrogen juga merupakan unsur paling melimpah, membentuk sekitar 75% dari total massa unsur di alam semesta. Produksi hidrogen dapat dilakukan dari air melalui elektrolisis, namun secara komersial lebih mahal daripada produksi dari gas alam. Gas hidrogen sangat mudah terbakar, bahkan pada konsentrasi serendah 4% H₂ di udara bebas. Entalpi pembakaran hidrogen adalah -286 kJ/mol (Ma'ruf & Widiharsa, 2016).

Hidrogen adalah unsur yang paling melimpah di alam, tetapi hanya ada sedikit yang tersisa di Bumi. Dari analisis spektrum sinar yang dipancarkan oleh bintang, disimpulkan bahwa bintang terdiri dari hidrogen. Hidrogen sangat reaktif, sehingga di Bumi terdapat senyawa air yang mengandung 11,1% hidrogen, serta hidrokarbon seperti gas alam sebesar 25%, minyak bumi sebesar 14%, dan karbohidrat seperti 6% (Putra, 2010).

2.3 *Hydrogen Storage Tank*

dibandingkan dengan penyimpanan gas lainnya, tangki hidrogen memerlukan perhatian khusus dalam pemilihan baja untuk tangki tipe I, II, dan III, serta pilihan polimer untuk tangki tipe IV. Uji material umumnya diminta untuk membuktikan bahwa pengerasan rendah: uji tarik, uji cakram, uji mekanisme retak. Pengukuran permeasi lengkap diperlukan pada satu tangki untuk membuktikan bahwa permeasi berada di bawah tingkat yang ditentukan (misalnya 1 cm³/l/jam). Pengukuran pada sampel saja juga bisa cukup untuk menilai tingkat permease (Barthélémy, 2012).

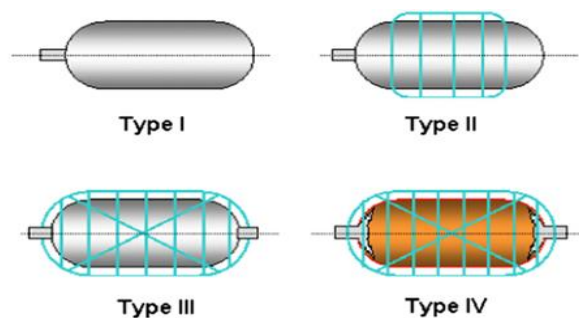
Dibandingkan dengan gas industri, energi hidrogen telah membawa batasan baru untuk wadah tekanan, terutama di sektor transportasi. Sebelum memasuki detail wadah tekanan yang didedikasikan untuk energi hidrogen, penting untuk mengingat aplikasi utama energi hidrogen. Mereka tercantum

di bawah ini dan tergantung pada perkembangan sel bahan bakar (Barthélémy, 2012):

1. Bahan bakar untuk transportasi
bus, mobil, skuter, kendaraan rekreasi lainnya. Kendaraan-kendaraan ini dapat ditenagai oleh sel bahan bakar atau oleh mesin pembakaran internal yang diisi dengan H₂.
2. Aplikasi stasioner
pasokan daya cadangan atau generator daya untuk rumah tangga. Untuk aplikasi ini, biaya hidrogen yang disediakan adalah parameter utama. Umur siklus tekanan juga menjadi masalah.
3. Aplikasi portable
pasokan daya cadangan portabel, generator daya portabel, elektronik (komputer, ponsel, dll.).

2.4 Klasifikasi Storage Tank

Berikut ini merupakan 4 *type* dari *storage tank* yang sudah terklasifikasi.



Gambar 2.4 Representasi skematik dari 4 *type storage tank*

(Sumber: Barthélémy, 2012)

1. *Type I*
Tipe ini, terbuat dari bahan yang bermaterial logam. Menurut Barthélémy, tekanan maksimum yang dapat diterima sebesar 300 bar. Type 1 memiliki harga pembuatan cukup murah. Tipe ini memiliki bobot yang berat.
2. *Type II*
Tipe ini, terbuat dari bahan yang bermaterial logam tebal dan di-*wrapping* dengan material komposit serat-resin berbentuk silinder. Menurut

Barthélémy, tidak ada limit tekanan maksimum pada tangki ini. Type II memiliki harga pembuatan yang sedikit mahal. Type ini memiliki bobot yang cukup ringan.

3. *Type III*

Type ini, terbuat dari bahan yang bermaterial logam dan di-*wrapping* dengan material komposit serat-resin secara menyeluruh. Menurut Barthélémy, tekanan maksimum yang dapat dicapai oleh tangki ini sebesar 700 bar. Type III memiliki harga pembuatan yang sangat mahal. Bobot yang diperoleh dari *Type* ini memang sangat ringan.

4. *Type IV*

Type ini, terbuat dari bahan yang bermaterial polimer dan di-*wrapping* dengan material komposit serat-resin secara menyeluruh. Port dari tangki ini terbuat dari logam dan terintegrasi dalam strukturnya.. Menurut Barthélémy, tekanan maksimum yang dapat dicapai oleh tangki ini sebesar 700 bar. Type III memiliki harga pembuatan yang sangat mahal. *Type IV* memiliki bobot yang sangat ringan.

Untuk mempermudah pengklasifikasian, dibuatlah tabel yang mencakup fitur utama dari tangki penyimpanan bertekanan.

Tabel 2.1 Klasifikasi *Storage Tank* (Barthélémy, 2012).

Type	Classification			
	Technology Mature	Pressure Limit	Cost Performance	Weight Performance
Type I	++	300 Bar	++	-
Type II	+	Not limited	+	0
Type III	N/A	P<350 Bar P>700 Bar	-	+
Type IV	N/A	P<350 Bar P>700 Bar	-	+

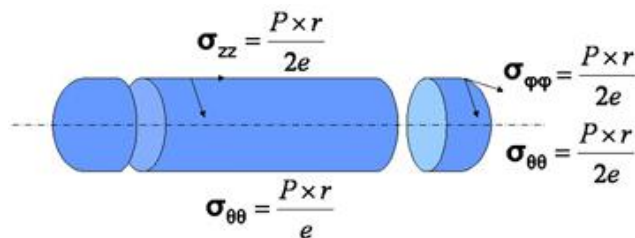
Karena perbedaan rentang operasional dari ketiga teknologi penyimpanan, berbagai kebutuhan berlaku untuk tangki penyimpanan padat. Biasanya, tangki-tangki ini dibagi menjadi empat kategori. Tangki tipe I terbuat hanya

dari baja dan dapat menahan tekanan hingga 200 bar. Tangki tipe II terdiri dari baja yang dilapisi dengan plastik yang diperkuat serat karbon untuk mengurangi berat total tangki. Tangki tipe III terbuat dari liner baja atau aluminium di dalam silinder plastik yang diperkuat serat karbon atau kaca, memungkinkan tekanan yang lebih tinggi. Terakhir, tangki tipe IV berbeda dari tangki tipe III oleh liner, yang terbuat dari polimer, menghasilkan tangki yang lebih ringan yang dapat menahan tekanan hingga 700 bar (Stops *et al*, 2024)

2.5 Design and Manufacturing

Untuk semua *Storage Tank*, desain harus memperhitungkan tekanan layanan dan uji, serta tegangan eksternal yang khusus untuk penggunaan (seperti benturan, media agresif, getaran, suhu, berat konektor, dll.), umur sebenarnya (penggunaan berulang) dan koefisien keamanan yang ditentukan untuk kondisi statis dan dinamis. Mode kegagalan seperti deformasi plastik, pembengkokan, perlahan, kelelahan, dll. untuk logam, delaminasi, pecah serat, retak, penuaan, dll. untuk komposit juga diperhitungkan dalam desain. Semua parameter ini menentukan desain mekanis dan pemilihan bahan. Bahan juga harus kompatibel dengan gas saat bersentuhan. Penting untuk dicatat bahwa wadah logam dan wadah komposit sangat berbeda (Barthélémy, 2012):

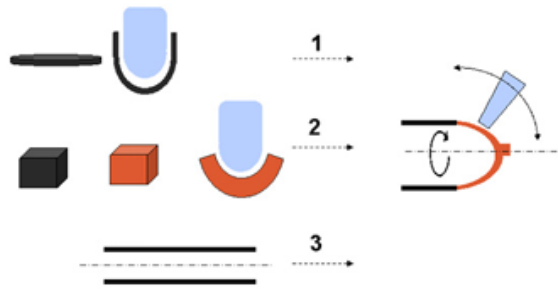
1. Logam bersifat isotropik, sedangkan komposit bersifat *anisotropic*
2. sifat mekanik terkonsentrasi dalam arah serat untuk komposit.
3. Mode kegagalan berbeda.
4. Penuaan juga berbeda.



Gambar 2.5 Parameter utama yang dipertimbangkan untuk desain *storage tank*

(Sumber: Barthélémy, 2012)

Sebagai contoh, Gambar diatas memberikan Parameter utama yang umumnya dipertimbangkan untuk wadah tekanan logam. Secara umum, kubah-kubah direncanakan lebih dari cukup. Itulah mengapa tipe II wadah, dengan penguatan lingkaran hanya pada bagian silinder dari pelapis tebal, dapat dengan mudah menahan tekanan yang lebih tinggi. Berikut beberapa proses manufaktur yang bisa dilakukan.



Gambar 2.6 Prinsip dari pembuatan tangki logam
(Sumber: Barthélémy, 2012)

1. Dari plat: proses ini terdiri dari menarik logam yang dilapisi untuk membentuk bentuknya (langkah ini dapat dilakukan beberapa kali untuk mendapatkan diameter dan ketebalan yang diinginkan)
2. dari *billets*: Billet pertama kali dipanaskan untuk memungkinkan penarikan dilakukan. Proses ini kemudian mirip dengan yang sebelumnya.
3. dari *tubes*: Tabung dibeli dan pada umumnya ketebalan asli dipertahankan untuk lingkaran. Kubah dibentuk dengan putaran panas dan silinder dengan 1 atau 2 port dapat diperoleh. Prosesnya kemudian mirip dengan yang pertama.

Untuk setiap teknologi, kontrol kualitas bahan yang digunakan dan setiap langkah pembuatan dilakukan dan dilacak. Pelapis dari wadah tipe II dan tipe III dapat diproduksi dengan cara yang sama. Pelapis polimer dapat dibuat dengan (Barthélémy, 2012):

1. Dari *polimer* atau *monomer* dengan proses *rotomolding*: *polimer* (atau *monomer*) dimasukkan ke dalam cetakan yang bentuknya adalah bentuk akhir pelapis. Pelapis dibuat dengan memanaskan dan kemudian mendinginkan cetakan sambil berputar (temperatur peleburan atau

temperatur polimerisasi harus tercapai). Ini bisa menjadi pelapis satu atau dua *port*. *Boss* logam dimasukkan selama langkah *rotomolding* atau ditempelkan pada pelapis sebelum dibungkus.

2. Dari tabung: tabung *polimer* (dibuat dengan ekstrusi *blow molding*) dan kubah (dilengkapi dengan *boss* logam) dibeli dengan diameter yang diinginkan. Kedua bentuk tersebut dilas untuk membentuk pelapis.

Untuk semua wadah komposit, pelapis logam atau *polimer* kemudian dibungkus dengan kawat melingkar atau sepenuhnya dengan komposit menggunakan mesin pembungkus kawat. Untuk wadah silinder, terdapat 3 pembungkusan yang mungkin: *hoop*, *polar*, dan heliks. Tipe II hanya dibungkus *hoop*. Wadah tipe III dan IV umumnya merupakan kombinasi pembungkusan *hoop* dan *polar*, tetapi kombinasi dari ketiga pembungkusan tersebut juga dapat dipertimbangkan. Banyak wadah dapat dibungkus dalam mesin pembungkus yang sama jika dilengkapi dengan banyak kepala pembungkus. Setelah pelapis dibungkus, resin harus diset. Pengerasan biasanya dilakukan di oven dengan perawatan panas resin yang sesuai (Barthélémy, 2012).

2.4 Standar untuk *Hydrogen Tank*

Untuk mendesain dan melaksanakan simulasi pada *hydrogen storage tank*, perlu diketahui standarisasi yang mengampu mengenai parameter utama pada *hydrogen storage tank*. Berikut ini, tabel yang berisikan beberapa standar mengenai *hydrogen storage tank*. Dibawah ini merupakan standar mengenai *general design* dan *safety* yang harus dipertimbangkan dalam desain, peletakan, instalasi, dan keamanan pada *hydrogen storage tank*. Tabel ini berisikan 8 standar CGA, 2 standar NFPA, dan 4 standar GB/T.

Tabel 2.2 *General Design and safety standards* (Yang *et al*, 2022).

No	Number of standards	Name of standards
1	CGA H-5-2014	Installation standard for bulk hydrogen supply systems
2	CGA P-12-2017	Safe handling of cryogenic liquids

3	CGA PS-17-2004	CGA position statement on underground installation of liquid hydrogen storage tanks
4	CGA PS-20	CGA Position statement on the direct burial of gaseous hydrogen storage tanks
5	CGA P-28-2014	Risk management plan guidance document for bulk liquid hydrogen systems
6	CGA P-41-2018	Locating bulk liquid storage systems in courts
7	CGA PS-46-2017	Position statement - roofs over hydrogen storage systems
8	CGA PS-48-2016	CGA Position statement on clarification of existing hydrogen setback distances and development of new hydrogen setback distances in NFPA 55
9	NFPA 2	Hydrogen technologies code
10	NFPA 55	Compressed gases and cryogenic fluids code
11	GB/T 34583-2017	Safety technical requirements for hydrogen storage devices used in hydrogen fuelling station
12	GB/T 34584-2017	Safety technical regulations for hydrogen refueling station
13	GB/T 29729-2013	Essential requirements for the safety of hydrogen systems
14	GB/T 34542.1 2017	Storage and transportation systems for gaseous hydrogen Part 1: General requirements

Dibawah ini merupakan standar untuk *hydrogen storage tank* pada kendaraan yang menggunakan *Fuel Cell* yang harus dipertimbangkan. Tabel ini berisikan 3 standar ISO, 4 standar GB/T, dan 2 standar ANSI.

Tabel 2.3 *Standards for hydrogen receptacles of fuel cell vehicles (Yang et al, 2022).*

No	Number of standards	Name of standards
1	ISO 11349:2013	specifies minimum requirements for light-weight refillable gas cylinders
2	ISO 13985:2006	Liquid hydrogen - Land vehicle fuel tanks
3	ISO 19881:2018	Gaseous hydrogen - Land vehicle fuel containers
4	ISO 19882:2018	Gaseous hydrogen - Thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle fuel containers
5	GB/T 34544 2017	Safety test methods for onboard low pressure hydrogen storage devices for small fuel cell vehicles
6	GB/T 29126 2012	Fuel cell electric vehicles - Onboard hydrogen system - Test methods
7	GB/T 26990 2011	Fuel cell electric vehicles - Onboard hydrogen system - Specifications
8	GB/T 35544 2017	Fully-wrapped carbon fiber reinforced cylinders with an aluminum liner for the on-board storage of compressed hydrogen as a fuel for land vehicles
9	ANSI/CSA HPRD1-2013	Standard for thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle fuel containers
10	ANSI HGV 2 2014	Compressed hydrogen gas vehicle fuel containers

Dari tabel diatas diperoleh 1 standar yang relevan dengan penelitian ini. Standar tersebut sudah menjelaskan mengenai *general requirement*, dan spesifikasi. Standar ini akan membantu untuk proses desain dan simulasi pada penelitian ini. Berikut standar yang akan dijadikan acuan pada penelitian ini.

Tabel 2.4 standar yang digunakan

No	Number of standards	Name of standards	Concerns
1	ISO 11349:2013	specifies minimum requirements for light-weight refillable gas cylinders	Specifies minimum requirements

ISO (the International Organization for Standardization) merupakan federasi standar internasional. Standar ISO 11349:2013 menetapkan persyaratan minimum untuk tabung gas isi ulang ringan yang diproduksi secara massal yang ditujukan hanya untuk penyimpanan gas alam terkompresi dengan tekanan tinggi di atas kendaraan sebagai bahan bakar untuk kendaraan. Standar ini tidak mencakup beban eksternal yang mungkin timbul dari tabrakan kendaraan, dll.

Standar ini mencakup tabung yang terbuat dari baja *seamless*, paduan aluminium *seamless*, atau bahan non-logam, menggunakan desain atau metode pembuatan apa pun yang sesuai untuk kondisi standar yang ditentukan. Standar internasional ini tidak mencakup tabung dari *stainless steel*. Meskipun standar menggunakan tekanan kerja referensi 200 bar, tekanan kerja lainnya dapat digunakan. Tabung penyimpanan yang dicakup oleh standar ini yaitu tipe 1, tipe 2, tipe 3, dan tipe 4. Standar ISO 11349:2013 digunakan sebagai acuan untuk perancangan, manufaktur, inspeksi, dan *Approval* pada *Storage Tank* yang terpasang pada kendaraan. *Storage tank* tersebut berfungsi untuk menyimpan gas alam. Gas alam pada tangki dijadikan sebagai bahan bakar untuk kendaraan. Pada standar ini dijelaskan bahwa umur kerja dari tangki penyimpanan yaitu 20 tahun. Tekanan maksimum yang harus diperhatikan sesuai dengan standar ISO 11439:2013 yaitu sebesar 260 bar. Dan untuk tekanan kerja untuk tangki penyimpanan sebesar 200 bar pada temperatur 15 °C