

## PENGARUH TERMAL TERHADAP AKURASI HASIL NUMERIK: STUDI KASUS PADA TANGKI HIDROGEN BERTEKANAN TINGGI

\*Jonathan Pulung Kudadiri<sup>1</sup>, M. Tauviqirrahman<sup>2</sup>, Sulisty<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: [jonathanpulung@students.undip.ac.id](mailto:jonathanpulung@students.undip.ac.id)

### Abstrak

Manajemen termal pada tangki hidrogen tekanan tinggi tipe 1 sangat vital untuk memastikan keamanan dan efisiensi dalam operasi, terutama dalam kendaraan sel bahan bakar hidrogen dan sistem penyimpanan energi. Seiring dengan kemajuan teknologi penyimpanan hidrogen, pemahaman terhadap dinamika termal selama proses pengisian dan penyimpanan menjadi semakin penting. Tangki hidrogen bertekanan tinggi yang biasanya terbuat dari baja, dirancang untuk menahan tekanan hingga 700 bar. Namun, proses pengisian dapat menyebabkan peningkatan suhu yang signifikan akibat kompresi adiabatik yang berpotensi mengurangi integritas struktural tangki. Stres termal akibat variasi suhu dapat memengaruhi umur pakai dan keamanan tangki ini. Ekspansi termal di bawah kondisi tekanan tinggi dapat menyebabkan konsentrasi tegangan. Teknik pemodelan canggih seperti analisis elemen hingga (Finite Element Analysis/FEA) digunakan untuk mensimulasikan perilaku termal, memprediksi distribusi suhu, dan mengidentifikasi titik-titik kegagalan potensial. Penerapan bahan dan strategi isolasi termal dapat mengurangi dampak negatif, sehingga meningkatkan keamanan dan efisiensi. Studi ini menyajikan pendekatan baru dengan mengintegrasikan pemodelan termal lanjutan dan modul kontrol ke dalam desain tangki, serta mengembangkan modul kontrol termal waktu nyata untuk memprediksi, memantau, dan mengatur respons termal selama operasi kritis. Analisis komparatif dari hasil simulasi menunjukkan bahwa suhu internal yang rendah secara signifikan meningkatkan regangan dan tegangan *equivalent* Von Mises, menekankan pentingnya penggunaan material yang kuat dan tahan terhadap stres termal dan tekanan ekstrem.

**Kata kunci:** finite element analysis; tangki tekanan tinggi; tegangan thermal

### Abstract

*The thermal management of high-pressure Type 1 hydrogen tanks is crucial for ensuring their safety and efficiency, particularly in hydrogen fuel cell vehicles and energy storage systems. As hydrogen storage technology advances, understanding the thermal dynamics during filling and storage processes becomes increasingly important. High-pressure hydrogen tanks, typically constructed from steel, are designed to withstand pressures up to 700 bar. However, rapid filling can lead to significant temperature increases due to adiabatic compression, potentially compromising the structural integrity of the tank. Thermal stresses from temperature variations can impact the lifespan and safety of these tanks, with thermal expansion under high-pressure conditions leading to stress concentrations. Advanced modeling techniques, such as finite element analysis (FEA) is employed to simulate thermal behavior, predict temperature distributions, and identify potential failure points. Implementing thermal insulation materials and strategies can mitigate adverse effects, enhancing safety and efficiency. This study presents a novel approach by integrating advanced thermal modeling and control modules into tank design, developing a real-time thermal control module to predict, monitor, and regulate thermal responses during critical operations. Comparative analysis of simulation results reveals that low internal temperatures significantly increase equivalent strain and stress, highlighting the importance of robust materials capable of withstanding extreme thermal and pressure-induced stresses.*

**Keywords:** finite element analysis; high-pressure hydrogen storage; thermal stress

### 1. Pendahuluan

Manajemen termal pada tangki hidrogen tekanan tinggi tipe 1 merupakan aspek penting dalam menjamin keselamatan dan efisiensi penggunaannya di berbagai aplikasi, khususnya pada kendaraan sel bahan bakar hidrogen dan sistem penyimpanan energi. Seiring dengan kemajuan teknologi penyimpanan hidrogen, pemahaman terhadap dinamika termal selama proses pengisian dan penyimpanan menjadi semakin penting. Tangki hidrogen bertekanan tinggi, yang umumnya terbuat dari baja, dirancang untuk menahan tekanan hingga 700 bar. Namun, pengisian cepat dapat

menyebabkan peningkatan suhu yang signifikan akibat kompresi adiabatik dan efek termal lainnya [1][2]. Peningkatan suhu ini berpotensi mengganggu integritas struktural tangki dan mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem penyimpanan hidrogen [3].

Stres termal yang disebabkan oleh variasi suhu dapat berdampak signifikan terhadap masa pakai dan keselamatan tangki hidrogen. Penelitian menunjukkan bahwa ekspansi termal material dalam kondisi tekanan tinggi dapat menyebabkan konsentrasi tegangan yang membahayakan integritas struktural tangki [4]. Interaksi antara stres termal dan mekanik menjadi faktor kritis, karena sifat material tangki dapat berubah akibat fluktuasi suhu, sehingga mempengaruhi kemampuannya dalam menahan tekanan operasional [5]. Misalnya, kekuatan luluh baja menurun seiring peningkatan suhu, yang dapat menyebabkan mode kegagalan yang tidak terduga selama operasi bertekanan tinggi [6]. Teknik pemodelan lanjutan seperti analisis elemen hingga (Finite Element Analysis/FEA) dan dinamika fluida komputasional (Computational Fluid Dynamics/CFD) telah digunakan untuk mensimulasikan perilaku termal tangki hidrogen dalam berbagai skenario operasional. Model-model ini membantu memprediksi distribusi suhu, konsentrasi tegangan, serta titik-titik kegagalan potensial, dan memberikan wawasan penting bagi para insinyur dalam merancang serta mengoptimalkan struktur tangki [7]. Selain itu, penerapan bahan isolasi dan strategi manajemen termal dapat mengurangi dampak negatif dari fluktuasi suhu, sehingga meningkatkan keselamatan dan efisiensi sistem penyimpanan hidrogen secara keseluruhan [8].

Model-model termal telah dikembangkan untuk memprediksi perilaku tangki hidrogen selama proses pengisian dan pengosongan, dengan menggunakan pendekatan CFD dan analisis aliran jaringan untuk mensimulasikan respons termal tangki dalam berbagai kondisi operasional [9][10][11][12]. Penelitian menunjukkan bahwa laju pengisian, suhu lingkungan, dan sifat termal material tangki sangat mempengaruhi karakteristik termal tangki hidrogen [13][14]. Efek Joule-Thomson juga diketahui memainkan peran penting dalam perilaku termal hidrogen selama proses pengisian. Ketika gas hidrogen dikompresi, terjadi peningkatan suhu yang dapat menimbulkan stres termal pada material tangki [15][16]. Penelitian juga menunjukkan bahwa mempertahankan suhu dinding tangki yang konstan secara efektif dapat mengurangi kenaikan suhu gas hidrogen, sehingga meningkatkan keselamatan dan efisiensi proses pengisian [10]. Di samping itu, respons termal dari material tangki itu sendiri, termasuk karakteristik perpindahan panasnya, sangat penting dalam memprediksi perilaku termal selama pengisian cepat [17].

Integrasi model termal ke dalam desain tangki hidrogen tekanan tinggi menjadi kunci dalam mengoptimalkan kinerjanya. Teknik pemodelan canggih, termasuk CFD dan FEA, memungkinkan pemahaman yang mendalam tentang interaksi termal antara gas hidrogen dan dinding tangki [9][11]. Model ini dapat memprediksi distribusi suhu, perubahan tekanan, dan potensi mode kegagalan dalam berbagai kondisi operasional, memberikan panduan teknis yang berharga bagi para perancang [18]. Selain itu, penggunaan bahan isolasi termal dan penukar panas dapat lebih lanjut meningkatkan manajemen termal tangki, dengan mengurangi risiko panas berlebih selama pengisian dan penyimpanan [19]. Kemajuan terbaru dalam teknologi manajemen termal, seperti sistem isolasi aktif dan penukar panas, menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan stabilitas termal tangki hidrogen tekanan tinggi [20][21]. Sistem ini bertujuan untuk mempertahankan suhu operasi yang optimal dan mencegah akumulasi panas berlebih selama pengisian maupun penyimpanan. Lebih jauh lagi, penelitian terkini mengenai respons termal tangki hidrogen dalam kondisi ekstrem, seperti paparan terhadap api, menegaskan pentingnya strategi perlindungan termal yang tangguh untuk mencegah kegagalan yang bersifat katastrofik [22].

Makalah ini menyajikan pendekatan baru dalam mengevaluasi manajemen termal tangki penyimpanan hidrogen tekanan tinggi dengan mengintegrasikan pemodelan termal lanjutan dan modul kontrol ke dalam desain tangki. Meskipun sejumlah studi sebelumnya telah menelaah efek pengisian cepat, sifat material, dan konsentrasi stres operasional terhadap kinerja tangki, hanya sedikit yang secara sistematis mengkaji peran modul termal yang secara dinamis mengelola variasi suhu dalam lingkungan bertekanan tinggi. Studi ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut melalui pengembangan dan implementasi modul kontrol termal waktu nyata yang memanfaatkan CFD dan FEA untuk memprediksi, memantau, dan mengatur respons termal tangki hidrogen selama operasi kritis seperti pengisian cepat dan penyimpanan pada suhu lingkungan yang bervariasi. Kajian ini menyumbangkan perspektif baru mengenai regulasi termal aktif, serta meletakkan dasar bagi inovasi masa depan dalam desain tangki penyimpanan hidrogen tekanan tinggi yang aman dan efisien dengan sistem manajemen termal yang adaptif.

## 2. Bahan dan Metode Penelitian

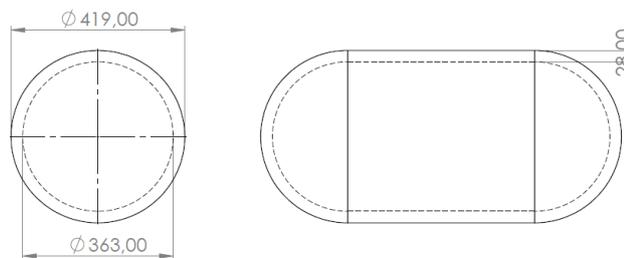
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja struktural dari modifikasi bentuk kubah pada tangki hidrogen bertekanan tinggi dengan menggunakan Analisis Elemen Hingga (Finite Element Analysis/FEA) melalui perangkat lunak ANSYS. Metodologi yang digunakan mencakup pengembangan model geometris, pemilihan material, proses meshing, penetapan kondisi batas, serta tahapan simulasi untuk mengevaluasi bagaimana konfigurasi batas yang berbeda memengaruhi integritas struktural tangki, baik dalam kondisi termal maupun tanpa kondisi termal.

Penggunaan paduan aluminium dalam konstruksi tangki hidrogen Tipe 1 telah menarik perhatian signifikan karena sifat-sifat unggul yang dimilikinya, antara lain ringan, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, serta ketahanan terhadap korosi. Karakteristik ini menjadikan paduan aluminium sangat cocok untuk aplikasi penyimpanan gas bertekanan tinggi, seperti tangki hidrogen, di mana bobot dan integritas struktural merupakan faktor krusial [23][24]. Jenis paduan aluminium yang digunakan dalam penelitian ini adalah AL 2024 T3. Sifat-sifat material ini tercantum

dalam Tabel 1. Panjang keseluruhan tangki adalah 870 mm dengan ketebalan 28 mm dan diameter dalam sebesar 363 mm.

**Tabel 1.** *Mechanical properties of Al 2024 T3*[25]

<i>Modulus of Elasticity</i>	<i>Poisson's Coefficient</i>	<i>Density</i>	<i>Yield Strength</i>	<i>Ultimate Tensile Strength</i>
7,448e+10 Pa	0,33	2780 kg/m <sup>3</sup>	385 MPa	483 MPa

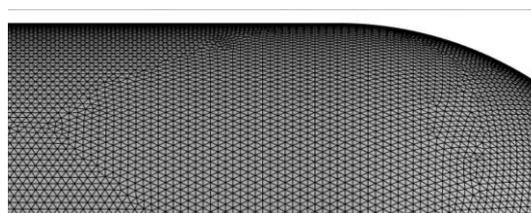


**Gambar 1.** Model Geometri

Pentingnya proses meshing dalam analisis struktural tangki hidrogen Tipe I sangat krusial, karena secara langsung memengaruhi integritas dan kinerja sistem penyimpanan bertekanan tinggi ini. Tangki Tipe I, yang umumnya dibuat dari material logam, dirancang untuk menahan tekanan internal yang tinggi dengan tetap menjamin keselamatan dan keandalan. Integritas struktural tangki-tangki ini menjadi aspek utama, terutama dengan mempertimbangkan potensi terjadinya *hydrogen embrittlement* (keretakan akibat hidrogen) yang dapat menurunkan sifat material di bawah kondisi tegangan tinggi [26]. Proses meshing yang dilakukan dengan tepat sangat penting untuk menangkap geometri kompleks dan distribusi tegangan yang terjadi di dalam tangki selama operasi, sehingga memungkinkan penilaian menyeluruh terhadap kinerja strukturalnya [14].



**Gambar 2.** Meshing Tangki Hidrogen



**Gambar 3.** Zoom in meshing tangki hydrogen

**Tabel 2.** Kriteria Meshing

<i>Average Skewness</i>	0,22586
<i>Max Skewness</i>	0,69965
<i>Element Size</i>	5 mm
<i>Total Elements</i>	2568613
<i>Total Nodes</i>	3619813

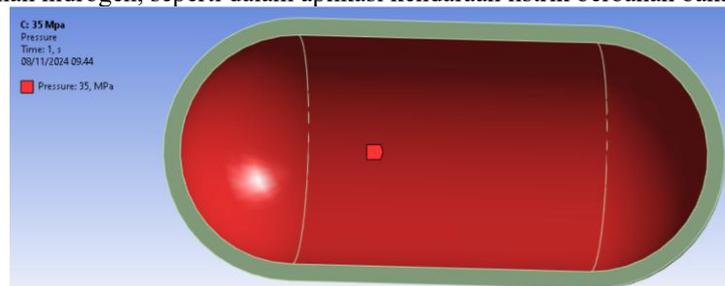
Tabel 2 menyajikan ringkasan terperinci mengenai parameter meshing dan pembebanan untuk model tangki hidrogen bertekanan tinggi. Tangki ini memiliki ketebalan dinding sebesar 28 mm dan dirancang untuk menahan tekanan internal sebesar 35 MPa, yang merupakan nilai umum untuk aplikasi penyimpanan hidrogen seperti pada kendaraan listrik berbahan bakar sel hidrogen. Metode MultiZone meshing digunakan dengan struktur grid tetrahedral yang menghasilkan rata-rata skewness sebesar 0,22586, yang menunjukkan kualitas mesh yang baik dan distorsi elemen yang minimal—faktor yang sangat penting untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat. Setiap elemen memiliki

ukuran 5 mm, menghasilkan mesh terperinci dengan total 2.568.613 elemen dan 3.619.813 nodes, yang memungkinkan representasi yang presisi terhadap distribusi tegangan dan efek termal pada seluruh struktur tangki. Metode *MultiZone* meshing telah menjadi teknik yang sangat penting dalam analisis komputasi untuk geometri kompleks, khususnya di bidang-bidang yang membutuhkan presisi tinggi dan kemampuan adaptasi. Teknik ini memungkinkan pembentukan mesh yang mampu merepresentasikan bentuk serta fitur yang rumit, yang sering dijumpai dalam berbagai aplikasi rekayasa. Kemampuan untuk menghasilkan mesh berkualitas tinggi yang sesuai dengan kontur geometri kompleks sangat penting bagi akurasi simulasi numerik, karena kualitas mesh secara langsung memengaruhi tingkat ketelitian hasil komputasi [27]. Teknik *MultiZone meshing* memfasilitasi pembagian domain komputasi ke dalam beberapa zona, di mana masing-masing zona dapat dilakukan proses meshing secara independen. Hal ini memungkinkan terjadinya *refinement* lokal di area tertentu sesuai kebutuhan, serta meningkatkan efisiensi komputasi secara keseluruhan [28].

Desain geometri dan material yang akan digunakan dalam penelitian kali ini. Memiliki panjang total 870 mm, diameter dalam 363 mm, dan panjang silinder 461 mm. Sementara material yang digunakan adalah material T700/Epoxy. Terdapat 2 jenis setup yang digunakan pada penelitian ini, yaitu Setup untuk simulasi beban (static structural setup) dan setup pendefinisian material komposit (Ansys Composite Prep Post Setup). Penelitian ini mengabaikan kondisi thermal yang terjadi pada tangki hidrogen saat beroperasi dan berfokus pada integritas dari struktur tangki pada saat diberi beban mekanis. Fixed support agar benda tetap statis diletakkan pada bagian nozzle agar tidak mempengaruhi gaya reaksi pada tangki yang ditimbulkan oleh tekanan kerja yang terletak pada bagian dalam tangki.

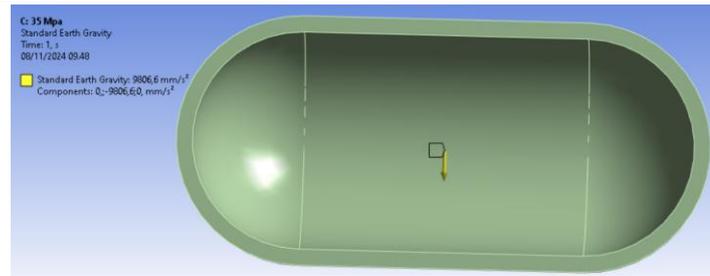
Dalam analisis elemen hingga (*finite element analysis/FEA*), penetapan kondisi batas dan definisi pembebanan yang presisi sangat penting untuk mereplikasi kondisi operasi nyata serta memperoleh hasil yang akurat. Untuk tangki hidrogen bertekanan tinggi, parameter pembebanan harus mampu mensimulasikan tekanan internal, penyangga struktural, dan gaya eksternal yang menyerupai kondisi nyata dalam praktik. Analisis ini mencakup penerapan tekanan internal, penyangga tetap (*fixed support*) pada bagian dasar tangki, serta gaya gravitasi—semuanya bertujuan untuk merefleksikan tegangan dan batasan yang memengaruhi integritas struktural tangki. Kombinasi dari kondisi-kondisi ini membentuk kerangka kerja yang andal untuk mengevaluasi kinerja dan ketahanan tangki dalam aplikasi penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi.

Penerapan tekanan internal sebagai kondisi batas merupakan langkah kunci dalam mensimulasikan perilaku tangki hidrogen dalam kondisi operasional. Untuk menentukannya, beban tekanan internal—biasanya berada dalam rentang 35 MPa hingga 70 MPa pada aplikasi penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi—diberikan pada seluruh permukaan bagian dalam tangki. Beban tekanan ini merepresentasikan tekanan gas hidrogen bertekanan tinggi di dalam tangki, menciptakan tegangan yang menyerupai kondisi operasional nyata. Penetapan kondisi batas ini memerlukan perhatian khusus terhadap besarnya tekanan, agar sesuai dengan spesifikasi desain tangki. Tekanan internal didistribusikan secara merata sepanjang dinding bagian dalam untuk mensimulasikan gaya seragam yang diberikan oleh gas terkompresi terhadap material tangki. Pengaturan ini memungkinkan penilaian yang akurat terhadap distribusi tegangan, potensi deformasi, serta area dengan konsentrasi tegangan tinggi, sehingga memberikan wawasan mendalam mengenai integritas dan ketahanan struktural tangki. Dengan mengintegrasikan kondisi tekanan yang realistis, para insinyur dapat mengevaluasi aspek keselamatan dan keandalan tangki, memastikan bahwa tangki tersebut memenuhi standar ketat untuk penyimpanan hidrogen, seperti dalam aplikasi kendaraan listrik berbahan bakar sel hidrogen.



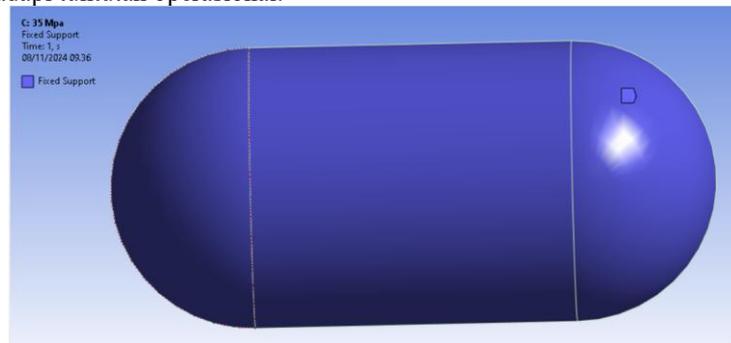
**Gambar 4.** Letak Tekanan Kerja ada Tangki Hidrogen

Gambar 5 menunjukkan tangki hidrogen bertekanan tinggi dengan kondisi batas gaya gravitasi bumi standar yang diterapkan, direpresentasikan oleh simbol panah kuning. Pengaturan gravitasi ini, dengan percepatan sebesar  $9,8066 \text{ m/s}^2$  yang diarahkan ke bawah, mensimulasikan gaya gravitasi yang bekerja pada tangki dalam kondisi nyata. Dengan mengintegrasikan gaya gravitasi bumi standar, simulasi ini secara akurat mempertimbangkan berat struktur tangki dan isinya, sehingga memberikan analisis yang lebih realistis terhadap tegangan dan deformasi yang mungkin dialami tangki akibat massanya sendiri dalam kondisi penyimpanan bertekanan tinggi. Pencantuman efek gravitasi sangat penting dalam evaluasi integritas struktural tangki, karena gaya ini memengaruhi distribusi tegangan serta potensi deformasi, khususnya dalam skenario beban jangka panjang atau kondisi tegangan tinggi. Pengaturan ini meningkatkan akurasi simulasi dengan memastikan bahwa semua gaya relevan yang bekerja pada tangki, termasuk beratnya sendiri, diperhitungkan secara menyeluruh.



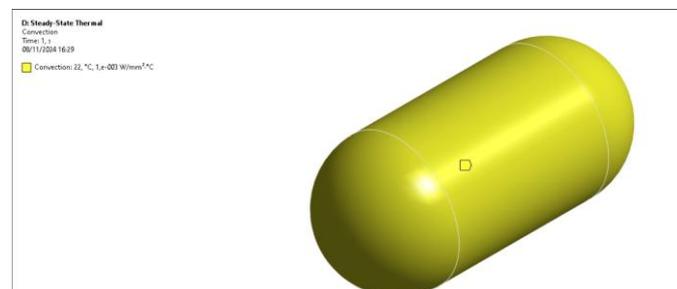
Gambar 5. Input Gaya Gravitasi

Gambar 6 menampilkan tangki hidrogen bertekanan tinggi dengan kondisi batas fixed support (penyangga tetap) yang diterapkan pada salah satu ujungnya, sebagaimana ditunjukkan oleh simbol persegi biru. Penyangga tetap ini membatasi semua derajat kebebasan translasi dan rotasi pada lokasi yang ditentukan, sehingga secara efektif mengunci tangki pada posisinya. Pengaturan ini mensimulasikan bagaimana tangki akan dipasang dalam aplikasi dunia nyata, seperti pada kendaraan atau fasilitas penyimpanan, di mana tangki dipasang secara kaku pada titik-titik tertentu untuk mencegah pergerakan. Dengan menahan ujung tersebut, penyangga tetap memastikan bahwa deformasi atau tegangan yang timbul akibat tekanan internal, gaya gravitasi, atau beban lainnya tetap terkendali di dalam struktur tangki. Hal ini memungkinkan analisis yang akurat terhadap distribusi tegangan dan integritas struktural dalam kondisi tekanan tinggi, karena respons tangki dievaluasi dengan salah satu ujungnya dalam posisi stabil dan tidak bergerak. Penyangga tetap ini sangat penting dalam simulasi yang realistis, karena menyediakan dasar yang andal untuk menilai perilaku tangki dalam menghadapi tuntutan operasional.



Gambar 6. Letak Fixed Support Pada Tangki

Gambar 7 menunjukkan konfigurasi tangki hidrogen bertekanan tinggi untuk analisis termal keadaan tunak (steady-state thermal analysis). Kondisi batas konveksi diterapkan dengan koefisien film sebesar  $1 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , yang menunjukkan laju perpindahan panas antara permukaan tangki dan lingkungan sekitarnya. Suhu lingkungan ditetapkan sebesar  $22^\circ\text{C}$ , memungkinkan terjadinya interaksi termal antara tangki dan lingkungan eksternal pada suhu tersebut. Kondisi batas konveksi diterapkan pada seluruh permukaan geometri tangki untuk mensimulasikan pelepasan panas dalam kondisi keadaan tunak. Konfigurasi ini sangat penting untuk memahami tegangan termal yang terjadi pada lingkungan bertekanan tinggi, karena membantu mengevaluasi bagaimana panas yang dihasilkan atau ditransfer dalam operasi normal memengaruhi integritas struktural tangki.



Gambar 7. Letak Konveksi pada Tangki

Gambar 8 menunjukkan penerapan kondisi suhu tertentu untuk mensimulasikan lingkungan termal di dalam tangki. Kondisi batas suhu ditetapkan pada  $-40^\circ\text{C}$  dan diterapkan pada tiga permukaan terpilih dalam geometri tangki, yang secara efektif memodelkan lingkungan internal bersuhu rendah yang dapat merepresentasikan skenario penyimpanan kriogenik atau kondisi ekstrem. Pengaturan ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana suhu internal yang rendah memengaruhi perilaku termal dan struktural tangki dalam kondisi keadaan tunak (steady-state). Evaluasi

ini penting untuk memahami respons material dan distribusi tegangan akibat paparan suhu ekstrem, yang sangat relevan dalam aplikasi penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi di lingkungan bersuhu rendah.

D: Steady-State Thermal  
 Temperature  
 Time: 1 s  
 08/11/2024 16:30  
 Temperature: -40, °C



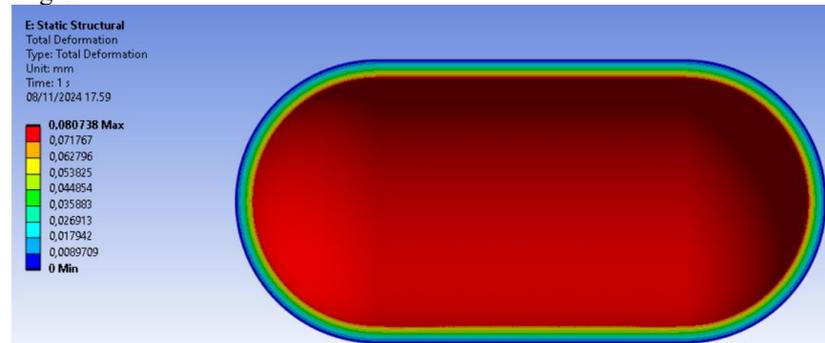
**Gambar 8.** Letak suhu pada Tangki Hidrogen

### 3. Hasil dan Pembahasan

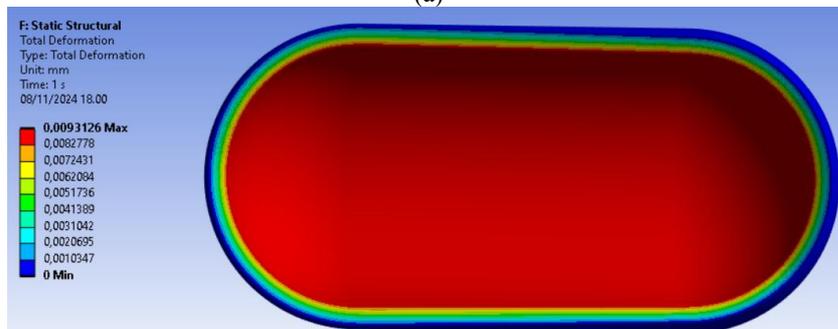
Bagian ini menguraikan hasil analisis elemen hingga (Finite Element Analysis/FEA) yang dilakukan menggunakan perangkat lunak Ansys, dengan penekanan pada empat parameter mekanik kritis: Deformasi Total, Regangan Elastis, Tegangan Ekuivalen (von Mises), dan Faktor Keamanan. Setiap parameter memberikan wawasan yang berbeda mengenai perilaku material saat menerima beban, yang secara kolektif memungkinkan penilaian menyeluruh terhadap integritas struktural dan tingkat keselamatan komponen.

Gambar 9(a) dan 9(b) menggambarkan perbandingan hasil deformasi struktural pada tangki hidrogen bertekanan tinggi (Tipe 1) di bawah kondisi termal yang berbeda. Pada gambar pertama, kondisi termal keadaan tunak sebesar  $-40^{\circ}\text{C}$  diterapkan secara internal, yang memengaruhi respons struktural tangki. Simulasi ini menunjukkan deformasi total maksimum sekitar  $0,080738\text{ mm}$ , yang mengindikasikan bagaimana suhu internal yang rendah memengaruhi ekspansi atau kontraksi material, serta berdampak pada integritas struktural tangki. Distribusi deformasi divisualisasikan melalui gradasi warna, yang menyoroti area dengan tingkat deformasi yang lebih besar maupun lebih kecil.

Sebaliknya, gambar kedua menunjukkan skenario tanpa penerapan kondisi termal keadaan tunak. Pengaturan ini menghasilkan deformasi maksimum yang sedikit lebih tinggi, yaitu sekitar  $0,093126\text{ mm}$ . Perbedaan nilai deformasi antara kedua simulasi tersebut menunjukkan bahwa penerapan kondisi termal rendah sedikit mengurangi tingkat deformasi. Efek ini kemungkinan disebabkan oleh kontraksi material tangki akibat pendinginan, yang dapat mengimbangi sebagian ekspansi akibat tekanan internal. Peningkatan deformasi secara bertahap dari waktu ke waktu juga ditampilkan dalam kedua skenario, menggambarkan bagaimana perubahan struktural berkembang di bawah beban yang diterapkan. Hasil ini menegaskan pentingnya pengaruh kondisi termal dalam mengevaluasi stabilitas struktural tangki penyimpanan hidrogen.



(a)

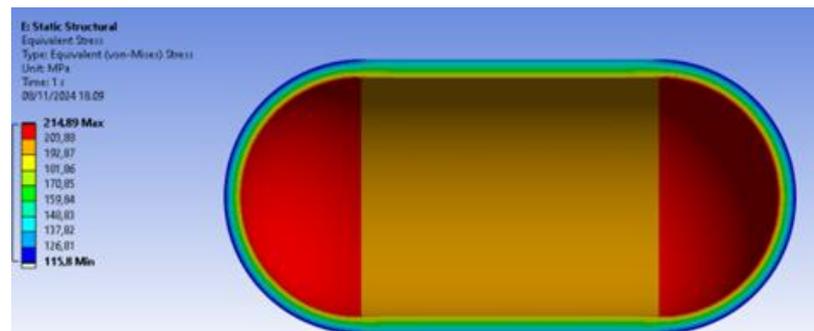


(a)

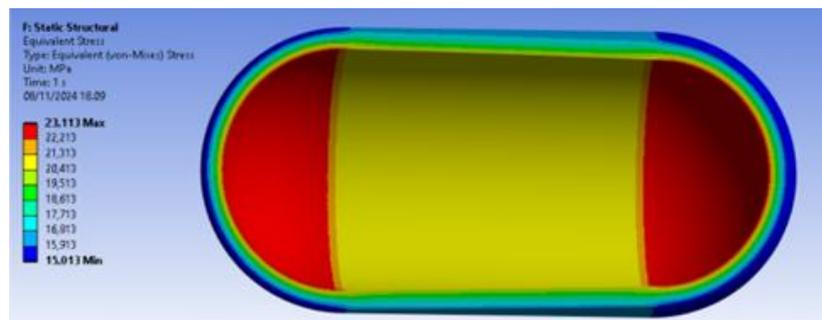
**Gambar 9.** Kontur Total Deformasi tangki hidrogen (a) dengan efek termal (b) tanpa efek termal

Gambar 10(a) dan 10(b) menunjukkan perbandingan tegangan ekuivalen (*von Mises stress*) pada tangki hidrogen bertekanan tinggi (Tipe 1) di bawah kondisi termal yang berbeda, yang mengungkapkan perbedaan signifikan dalam distribusi dan besarnya tegangan. Pada gambar pertama, di mana kondisi termal keadaan tunak sebesar  $-40^{\circ}\text{C}$  diterapkan secara internal, tegangan ekuivalen maksimum mencapai 214,89 MPa. Tegangan tinggi ini terutama terkonsentrasi di area ujung tangki, kemungkinan besar akibat kontraksi termal dari suhu rendah yang memperbesar tegangan internal yang diinduksi oleh tekanan.

Sebaliknya, pada gambar kedua, yang tidak melibatkan kondisi termal keadaan tunak, tegangan ekuivalen maksimum jauh lebih rendah, yaitu sebesar 23,113 MPa. Ketiadaan pengaruh termal menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata di seluruh tangki, dengan intensitas tegangan yang lebih rendah secara keseluruhan, karena material tangki tidak mengalami kontraksi tambahan akibat pendinginan. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan suhu internal yang rendah secara drastis meningkatkan tegangan ekuivalen dalam tangki, yang berpotensi membawa material pada tingkat tegangan kritis. Perbandingan ini menekankan pentingnya kondisi termal terhadap perilaku tegangan, yang merupakan faktor esensial dalam evaluasi keselamatan dan ketahanan tangki penyimpanan hidrogen, terutama dalam skenario suhu ekstrem.



(a)



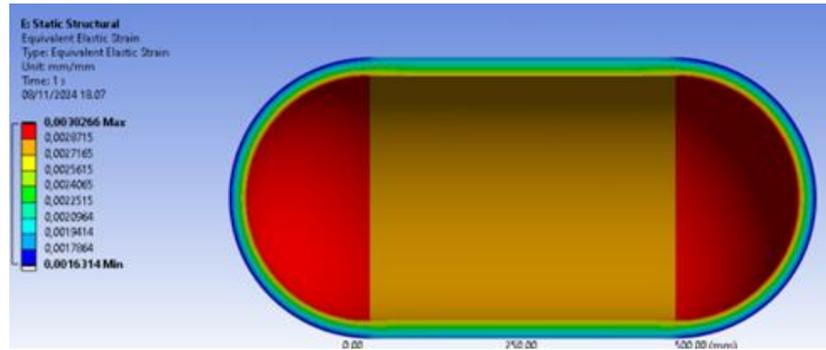
(b)

**Gambar 10.** Kontur tegangan Equivalent (*Von misses*) tangki hidrogen (a) dengan efek termal (b) tanpa efek termal

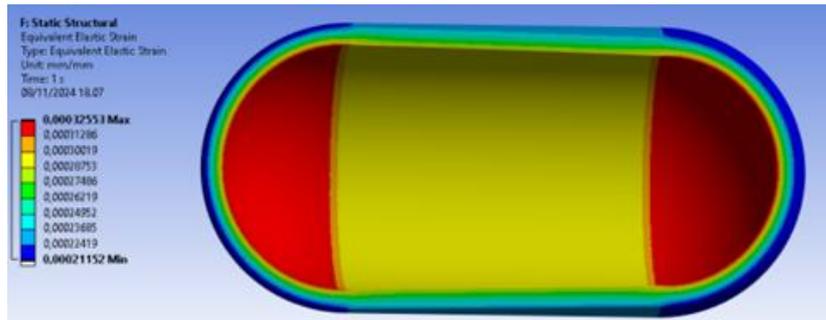
Gambar 11(a) dan 11(b) menyajikan perbandingan regangan ekuivalen (*von Mises strain*) pada tangki hidrogen bertekanan tinggi (Tipe 1) di bawah kondisi termal yang berbeda. Pada gambar pertama, kondisi termal keadaan tunak sebesar  $-40^{\circ}\text{C}$  diterapkan secara internal, yang menghasilkan regangan ekuivalen maksimum sebesar 0,0030266 mm/mm. Konfigurasi ini menunjukkan bahwa suhu internal yang rendah menyebabkan distribusi regangan yang terkonsentrasi di bagian ujung tangki, di mana tegangan cenderung lebih tinggi akibat kontraksi termal yang diinduksi oleh suhu rendah.

Sementara itu, pada gambar kedua, yang tidak melibatkan kondisi termal keadaan tunak, regangan ekuivalen maksimum sedikit lebih tinggi, yaitu sebesar 0,0032553 mm/mm. Pengaturan ini menunjukkan distribusi regangan yang lebih merata di seluruh tangki, dengan nilai maksimum regangan teramati di sekitar tutup ujung (*end caps*). Ketiadaan pengaruh termal menyebabkan peningkatan regangan relatif, kemungkinan akibat tidak adanya kontraksi termal yang dalam kondisi lain akan membantu mengimbangi sebagian regangan akibat tekanan internal.

Secara keseluruhan, hasil ini mengindikasikan bahwa penerapan suhu internal yang rendah sedikit mengurangi regangan ekuivalen pada tangki, karena efek pendinginan menghasilkan kontraksi yang mampu menyeimbangkan sebagian regangan yang ditimbulkan oleh tekanan internal. Perbandingan ini menyoroti pentingnya kondisi termal dalam mengevaluasi perilaku regangan pada tangki bertekanan tinggi, yang sangat krusial untuk menjamin keselamatan dan integritas struktural.



(a)



(b)

**Gambar 11.** Kontur Regangan Equivalent tangki hidrogen (a) dengan efek termal (b) tanpa efek termal

Kedua tabel memberikan ringkasan komparatif hasil simulasi untuk tangki hidrogen bertekanan tinggi (Tipe 1) dalam dua kondisi berbeda: dengan dan tanpa kondisi termal (keadaan tunak termal pada  $-40^{\circ}\text{C}$ ).

Pada Tabel 3, yang merangkum hasil dengan kondisi termal, tangki menunjukkan deformasi total maksimum sebesar 0,080738 mm, dengan deformasi rata-rata sebesar 0,03541 mm. Regangan elastis ekuivalen mencapai maksimum  $3,0266 \times 10^{-3}$  mm/mm, sedangkan nilai rata-ratanya adalah  $2,2221 \times 10^{-2}$  mm/mm. Tegangan ekuivalen pada kondisi ini menunjukkan nilai maksimum yang sangat tinggi, yaitu 214,89 MPa, dengan rata-rata 157,75 MPa. Nilai tegangan dan regangan yang tinggi ini menunjukkan bahwa kontraksi termal akibat lingkungan bersuhu  $-40^{\circ}\text{C}$  secara signifikan meningkatkan tegangan internal dalam tangki, yang berpotensi mendekati ambang batas kritis tegangan material.

Sementara itu, Tabel 4, yang menyajikan hasil tanpa kondisi termal, menunjukkan deformasi maksimum yang sedikit lebih tinggi sebesar 0,093126 mm, dengan deformasi rata-rata 0,042367 mm. Namun, regangan dan tegangan elastis ekuivalennya jauh lebih rendah dibandingkan dengan kondisi termal. Regangan elastis ekuivalen maksimum tercatat sebesar  $3,2553 \times 10^{-4}$  mm/mm, dengan rata-rata  $2,5846 \times 10^{-4}$  mm/mm. Tegangan ekuivalen maksimum dalam kondisi ini adalah 23,113 MPa, dan rata-ratanya sebesar 18,349 MPa—jauh lebih rendah dibandingkan dengan saat kondisi termal diterapkan.

Perbandingan ini menegaskan bahwa penerapan suhu termal rendah (misalnya,  $-40^{\circ}\text{C}$ ) meningkatkan tegangan dan regangan di dalam tangki akibat kontraksi termal, meskipun sedikit mengurangi deformasi total. Hasil ini menggarisbawahi pentingnya mempertimbangkan pengaruh kondisi termal dalam aplikasi bertekanan tinggi, karena kondisi tersebut secara signifikan mempengaruhi integritas struktural dengan memperbesar tingkat tegangan dan regangan dalam tangki.

**Tabel 3.** Hasil Simulasi dengan Kondisi Termal

	<i>Deformation</i>	<i>Equivalent Elastic Strain</i>	<i>Equivalent Stress</i>
<i>Max</i>	0,0080738mm	0,0030266mm/mm	214,89 MPa
<i>Min</i>	0 mm	0,0016314 mm/mm	115,8 MPa
<i>Avg</i>	0,03541 mm	0,0022221 mm/mm	157,75 MPa

**Tabel 4.** Hasil Simulasi tanpa Kondisi Termal

	<i>Deformation</i>	<i>Equivalent Elastic Strain</i>	<i>Equivalent Stress</i>
<i>Max</i>	0,0093126 mm	0,00032553 mm/mm	23,113 MPa
<i>Min</i>	0 mm	0,00021152 mm/mm	15,013 MPa
<i>Avg</i>	0,0042367 mm	0,00025846 mm/mm	18,349 MPa

#### 4. Kesimpulan

Based on the comparative analysis of simulation results for the Type 1 hydrogen tank, incorporating a thermal state (-40°C) versus a non-thermal state reveals notable differences in structural behavior.

1. Deformasi total sedikit lebih rendah pada kondisi termal (0,080738 mm) dibandingkan dengan kondisi non-termal (0,093126 mm). Pengurangan kecil dalam deformasi ini dapat dikaitkan dengan efek kontraksi termal, di mana suhu internal yang rendah membantu mengimbangi sebagian ekspansi yang disebabkan oleh tekanan internal.
2. Adanya kondisi termal secara signifikan meningkatkan regangan elastis ekuivalen, dengan nilai maksimum sebesar 0,0030266 mm/mm dan rata-rata 0,0022221 mm/mm. Sebaliknya, nilai regangan jauh lebih rendah pada kondisi tanpa termal, yaitu maksimum 0,00032553 mm/mm dan rata-rata 0,0002584 mm/mm. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi termal menyebabkan regangan tambahan pada material tangki akibat tegangan yang ditimbulkan oleh suhu.
3. Tegangan ekuivalen jauh lebih tinggi pada kondisi termal, dengan nilai maksimum sebesar 214,89 MPa dan rata-rata 157,75 MPa. Tanpa adanya kondisi termal, tegangan tercatat jauh lebih rendah, yaitu maksimum hanya 23,113 MPa dan rata-rata 18,349 MPa. Peningkatan tegangan yang signifikan pada kondisi termal ini menunjukkan bahwa suhu rendah memperbesar tegangan internal, yang berpotensi membawa material mendekati batas tegangan kritis.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa suhu internal yang rendah (-40°C) di dalam tangki hidrogen secara signifikan meningkatkan regangan dan tegangan ekuivalen, meskipun hanya menyebabkan penurunan deformasi total yang relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi termal memainkan peran yang sangat penting dalam stabilitas struktural tangki hidrogen bertekanan tinggi. Peningkatan tegangan dan regangan pada kondisi termal menegaskan pentingnya merancang sistem penyimpanan hidrogen dengan material yang tangguh dan mampu menahan tegangan ekstrem akibat pengaruh suhu maupun tekanan, terutama pada aplikasi yang melibatkan suhu kriogenik.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] Molkov V, Dadashzadeh M, Makarov D. Physical model of onboard hydrogen storage tank thermal behaviour during fuelling. *Int J Hydrogen Energy* . 2019;44(8):4374–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.115>
- [2] Olmos F, Manousiouthakis VI. Hydrogen car fill-up process modeling and simulation. *Int J Hydrogen Energy* . 2013;38(8):3401–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.064>
- [3] Li JQ, Li JC, Park K, Jang SJ, Kwon JT. An analysis on the compressed hydrogen storage system for the fast-filling process of hydrogen gas at the pressure of 82 mpa. *Energies*. 2021;14(9).
- [4] Yatsenko EA, Goltsman BM, Izvarin AI, Novikov Y V. The problems of protection and heat insulation of steel tanks which are used in hydrogen power engineerings. *CIS Iron Steel Rev*. 2023;25:97–101.
- [5] Gomez A, Smith H. Liquid hydrogen fuel tanks for commercial aviation: Structural sizing and stress analysis. *Aerosp Sci Technol* . 2019;95:105438. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105438>
- [6] Prieto C, Blindu A, Cabeza LF, Valverde J, García G. Molten Salts Tanks Thermal Energy Storage: Aspects to Consider during Design. *Energies*. 2024;17(1).
- [7] Werlink RW, Fesmire JE, Sass JP. Vibration considerations for cryogenic tanks using glass bubbles insulation. *AIP Conf Proc*. 2012;1434(57):55–65.
- [8] Tapeinos IG, Koussios S, Groves RM. Design and analysis of a multi-cell subscale tank for liquid hydrogen storage. *Int J Hydrogen Energy* . 2016;41(5):3676–88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.104>
- [9] Deng S, Li F, Luo H, Yang T, Ye F, Chahine R, et al. Lumped Parameter Modeling of SAE J2601 Hydrogen Fueling Tests. *Sustain*. 2023;15(2).
- [10] Johnson T, Bozinoski R, Ye J, Sartor G, Zheng J, Yang J. Thermal model development and validation for rapid filling of high pressure hydrogen tanks. *Int J Hydrogen Energy* . 2015;40(31):9803–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.157>
- [11] Kassemi M, Panzarella CH. Ventless pressure control of two-phase propellant tanks in microgravity. *Ann N Y Acad Sci*. 2004;1027:511–28.
- [12] Monde M, Kosaka M. Understanding of Thermal Characteristics of Fueling Hydrogen High Pressure Tanks and Governing Parameters. *SAE Int J Altern Powertrains*. 2013;2(1):61–7.
- [13] GEZGİNCİ V, BOĞA C, SEYEDZAVVAR M. Finite Element Analyses of Stresses Developed in Oil Separator Composite Tank Used in Screw Type Compressor Systems. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilim Derg*. 2022;11(4):1093–101.

- [14] Yuan K, Pan H, Liu Z, Andersson M. Numerical Modeling for Rapid Charging of Hydrogen Gas Vessel in Fuel Cell Vehicle. *Processes*. 2023;11(2).
- [15] LI JQ, Myoung NS, Kwon JT, Jang SJ, Lee T, Lee YH. A theoretical analysis of temperature rise of hydrogen in high-pressure storage cylinder during fast filling process. *Adv Mech Eng*. 2020;12(12):1–10.
- [16] Li JQ, Li JC, Kwon JT, Shang C. The effect of internal pressure change on the temperature rise and the amount of filling hydrogen of high pressure storage tank. *Adv Mech Eng*. 2022;14(8):1–10.
- [17] Matsunaga T, Kon M, Washio K, Shinozawa T, Ishikiriyama M. TiCrVMo alloys with high dissociation pressure for high-pressure MH tank. *Int J Hydrogen Energy* . 2009;34(3):1458–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.061>
- [18] Jeong SJ, Lee SJ, Moon SJ. CFD Thermo-Hydraulic Evaluation of a Liquid Hydrogen Storage Tank with Different Insulation Thickness in a Small-Scale Hydrogen Liquefier. *Fluids*. 2023;8(9).
- [19] Endo N, Matsumura K, Kawakami Y, Ishida M, Maeda T. Operation of metal hydride hydrogen storage systems for hydrogen compression using solar thermal energy. *J Int Counc Electr Eng* . 2016;6(1):65–71. <http://dx.doi.org/10.1080/22348972.2016.1173779>
- [20] Li D, Hang J, Li Y, Dong S. Fuel flowrate control for aeroengine and fuel thermal management for airborne system of aircraft—an overview. *Appl Sci*. 2022;12(1).
- [21] Mer S, Thibault JP, Corre C. Active insulation technique applied to the experimental analysis of a thermodynamic control system for cryogenic propellant storage. *J Therm Sci Eng Appl*. 2016;8(2):1–8.
- [22] Xie F, Song W, Chen Z, Lv L. The analysis for mechanical response of 16MnR steel under single-tank pool fire. *Appl Mech Mater*. 2013;271(PART 1):277–82.
- [23] Tashlykova-Bushkevich II, Itoh G, Shepelevich VG, Shikagawa T. Kinetics of hydrogen desorption from rapidly solidified Al-Cr alloys. *Mater Trans*. 2011;52(5):895–9.
- [24] Yang H, Liu L, Chen H, Wang L, Qin T. Investigation on creep age forming of AA2219 stiffened structures. *MATEC Web Conf*. 2015;21.
- [25] LEVENT ÜNLÜSOY. Structural Design and Analysis of the Mission Adaptive Wings of Wings of an Unmanned Aerial Vehicle a Thesis Submitted To of By. 2014;(February 2010).
- [26] Creton N, Dejardin S, Grysakowski B, Optasanu V, Montésin T. A mechano-chemical coupling for hydrogen diffusion in metals based on a thermodynamic approach. *Defect Diffus Forum*. 2014;353:286–91.
- [27] Sonon B, François B, Massart TJ. An advanced approach for the generation of complex cellular material representative volume elements using distance fields and level sets. *Comput Mech*. 2015;56(2):221–42.
- [28] Ali Z, Tyacke J, Watson R, Tucker PG, Shahpar S. Efficient preprocessing of complex geometries for CFD simulations. *Int J Comput Fluid Dyn* . 2019;33(3):98–114. <https://doi.org/10618562.2019.1606421>