



TESIS - TM 185400

STUDI NUMERIK DAN OPTIMASI PENDINGINAN METAL HYDRIDE AB₂ MENGGUNAKAN PHASE CHANGE MATERIAL RT60

Fajar Dwi Yudanto

NRP 6007201021

Dosen Pembimbing I

Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 198005202005011003

Dosen Pembimbing II

Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 198105292003122001

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TESIS - TM 185400

**STUDI NUMERIK DAN OPTIMASI PENDINGINAN METAL
HYDRIDE AB₂ MENGGUNAKAN PHASE CHANGE
MATERIAL RT60**

Fajar Dwi Yudanto

NRP 6007201021

Dosen Pembimbing I

Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 198005202005011003

Dosen Pembimbing II

Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 198105292003122001

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



THESIS - TM 185400

NUMERICAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF COOLING METAL HYDRIDE AB₂ USING PHASE CHANGE MATERIAL RT60

Fajar Dwi Yudanto

NRP 6007201021

Advisor

Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 198005202005011003

Co-Advisor

Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 198105292003122001

Study Program Master

Mechanical Engineering Department

Faculty Of Industrial and System Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN THESIS

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

Di

Program Studi S-2 Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Fajar Dwi Yudanto

NRP. 6007201021

Tanggal Ujian : 14 Juli 2022

Periode Wisuda : September 2022

Disetujui oleh,

Pembimbing :

Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 198005202005011003

Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 198105292003122001

Penguji :

Dr. Witantyo, S.T., M.Eng.

NIP. 196303141988031002

Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 198512022014042002

Kepala Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Dr. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.

NIP. 19660402198903100

**ANALISA NUMERIK DAN OPTIMASI PENDINGINAN
METAL HYDRIDE AB₂ MENGGUNAKAN PHASE CHANGE
MATERIAL RT60**

Nama Mahasiswa : Fajar Dwi Yudanto
NRP : 6007201021
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.
: Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Hydrogen merupakan energi terbarukan yang menjanjikan untuk menggantikan energi fosil karena memiliki banyak sumber, ramah lingkungan, dan kepadatan tinggi. Namun sistem *metal hydride* memiliki kelemahan terutama pada penyimpanannya, penyimpanan hidrogen dalam bentuk *metal hydride* melibatkan reaksi reversibel, reaksi hidrogenasi bersifat eksotermik, sedangkan reaksi dehidrogenasi bersifat endotermik yang dapat menurunkan laju reaksi. Reaksi hidrogenasi menghasilkan entalpi sehingga pendinginan diperlukan untuk menjaga agar reaksi tetap berlangsung. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan desain pendinginan yang paling optimal dari berbagai desain dengan menggunakan metode desain optimasi untuk mendapatkan pendinginan yang optimal dan meningkatkan laju penyerapan hidrogen.

Metode numerik merupakan metode yang cocok untuk mensimulasikan kondisi fenomena termal yang terjadi selama penyerapan hidrogen. Penelitian ini akan menggunakan desain pendinginan spiral tube dan selimut metal hydride dengan material pendinginan PCM (RT60) dan non PCM (Copper). PCM dianggap menjadi metode pendinginan yang paling terbaru dan paling optimal dibandingkan dengan metode konvensional. Material metal hydride menggunakan material AB₂ hydroalloy C5 Al (0,27%), Ti (27,13%), V (13,95%), Mn (51,31%), Fe (2,98%), Zr (2,97%). Mekanisme simulasi CFD dilakukan dengan membuat asumsi domain adalah solid yang dapat memberikan energi bangkitan sebesar 5 MW/m³. Spiral dimodelkan berbentuk solid yang dapat bertransformasi menjadi liquid. Validasi disajikan dengan membandingkan hasil eksperimen temperatur vs waktu pada masing-masing variasi.

Berdasarkan hasil simulasi CFD dan optimasi dengan metode anova, dengan menggunakan ambient temperature, dan bentuk pendingin spiral + 1 straight tube memiliki efek yang signifikan terhadap perpindahan panas pada metal hydride. Sedangkan material PCM RT60 tidak berpengaruh signifikan terhadap penyerapan panas dikarenakan titik didih/perubahan fasa terjadi pada 53-60°C sehingga material ini kurang cocok untuk pendinginan metal hydride AB₂ hydroalloy C5.

Kata kunci: hydrogen storage, AB₂, Metal Hydride, CFD

(Halaman sengaja dikosongkan)

NUMERIC ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF COOLING METAL HYDRIDE AB₂ USING PHASE CHANGE MATERIAL RT60

Name : Fajar Dwi Yudanto
NRP : 6007201021
Advisor : Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.
Co-Advisor : Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

Hydrogen is a promising energy carrier especially in renewable energy because it has many sources, is environmentally friendly, and has high density. However, because of low volumetric density of hydrogen gas, the hydrogen storage is challenging. Metal hydride can be form by reaction of metal and hydrogen and can be used to store energy in solid-state. A reversible reaction during hydride formation and decomposition produce and consumed heat that must be managed. The hydrogenation reaction is exothermic reaction, heat management is required optimized the hydrogen tank design. This study aims to find the most optimal cooling design from various designs using numerical modelling combined with the design of experiment.

The numerical method is suitable for simulating the metal hydride's conditions and thermal phenomenon. This research used a spiral tube cooling design and heat absorbent with PCM(RT60) and non-PCM(Copper). PCM considered being the newest and most optimal cooling method compared to conventional methods. The metal hydride used was AB₂ type hydride. The numerical study was implemented in CFD simulation mechanism assumes a solid domain that can generate estimated energy of 5 MW/m³. Spirals are modeled as solids that can transform into liquids. Validation was comparing the experimental results of temperature versus time for each variation.

The results of CFD simulation and ANOVA method, using ambient temperature and the spiral+1 straight tube cooling form, can increase the effect of heat absorption in metal hydride. Then the PCM RT60 material has no significant effect of heat absorption because the phase change occurs at a temperature of 53-60°C so that the material is not suitable for cooling this metal hydride.

Keyword: hydrogen storage, AB₂, Metal Hydride, CFD

(Halaman sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah yang telah memberikan rahmat, hidayah dan ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan judul “**Analisa Numerik dan Optimasi Pendinginan *Metal Hydride AB₂* Menggunakan *Phase Change Material RT60***”. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan akademis dalam menempuh pendidikan Program Studi Magister S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penyusunan tesis ini tidak lepas dari peran dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan terselesaikannya tesis ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Edi Sudarto, S.H. dan Mindaryati yang selalu memberikan semangat dan doa kepada penulis. Tanpa kasih sayang dari mereka penulis tidak akan bisa menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing tesis yang telah memberikan ilmu, nasihat, dan bimbingan kepada penulis selama ini dengan penuh kesabaran.
3. Ibu Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing kedua tesis yang telah memberikan arahan dan nasihat kepada penulis.
4. Bapak Dr. Witantyo, S.T., M.Eng dan Ibu Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan untuk penulis guna penyempurnaan tesis ini.
5. Saudara kandung penulis, Nur Apriyanto Nugroho, S.T., dan Setyo Aji Nugroho yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
6. Nadya Rigita Permatasari yang selalu memberi semangat dan doa kepada penulis sehingga tugas akhir ini selesai tepat pada waktunya.
7. Segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS yang telah mencurahkan segala tenaga dan pikiran dalam rangka proses akademik dan non-akademik selama penulis menempuh pendidikan magister di Departemen Teknik Mesin.

8. Seluruh rekan-rekan S2 Teknik Mesin angkatan 2020 yang selalu menjadi garda terdepan ketika penulis mengalami paceklik inspirasi.
9. Semua pihak yang telah membantu dalam proses dalam penyusunan Tugas Akhir yang tidak dapat disebutkan satu persatu

Dengan selesainya laporan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa penelitian tugas akhir ini belum sempurna sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk perbaikan demi kesempurnaan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini memberikan manfaat dan dapat menambah wawasan keilmuan bagi semua pihak.

Surabaya, 31 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Hydrogen Storage Vessel.....	7
2.3 Reaksi Hydrogen.....	12
2.4 Heat Transfer	14
2.5 Phase Change Material.....	15
2.6 Aliran Laminar dan Turbulen.....	15
2.7 Computational Fluid Dynamic	17
2.8 Species Transport.....	18
2.9 Validasi	19
2.10 Penelitian Terdahulu	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian	29
3.1.1 Observasi.....	30
3.1.2 Perumusan Masalah.....	30
3.1.3 Studi Literatur	30
3.1.4 Penentuan Data Awal	30
3.1.5 Desain 3D Modeling, Meshing, dan Pre-Processing.....	30
3.1.6 Analisis Hasil Data dan Kesimpulan	31
3.1.7 Penulisan Laporan	31
3.2 Geometri Benda Uji	31
3.3 Pemodelan dan Simulasi	31
3.3.1 Diagram Alir Simulasi.....	32
3.3.2 Tahap Pre Processing	33
3.3.3 Tahap Post Processing	35

3.4 Lokasi Pengambilan Data.....	37
3.5 Setting Simulasi CFD untuk Validasi	38
3.6 Analisa Grid Independency	39
3.7 Optimasi Desain dengan ANOVA.....	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Variasi 111	44
4.2 Variasi 112	46
4.3 Variasi 121	48
4.4 Variasi 122	50
4.5 Variasi 211	52
4.6 Variasi 212	54
4.7 Variasi 221	57
4.8 Variasi 222	59
4.9 Perbandingan Antar Metode.....	61
4.9.1 Perbandingan Pada Near Wall	62
4.9.2 Perbandingan Pada Top PCM.....	62
4.9.3 Perbandingan Pada Core.....	63
4.9.4 Perbandingan Pada Middle Spiral.....	64
4.9.5 Perbandingan Dalam Tube Spiral	64
4.10 Perbandingan dengan ANOVA	65
4.10.1 Anova Setiap Bagian pada Metal Hydride.....	66
4.10.2 Analisis berdasarkan Temp Maksimal Metal Hydride	72
4.11 Effectifitas Perpindahan Panas	Error! Bookmark not defined.
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	77
BIODATA PENULIS.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.4 Mekanisme reaksi penyerapan dan pelepasan hydrogen dari diagram p-v....	13
Gambar 2. 2 Skema PCM-MHB [5].....	15
Gambar 2.3 Kinetika penyerapan hydrogen	20
Gambar 2.4 Kandungan hydrogen sebagai fungsi waktu untuk absorpsi (a) dan desorpsi (b) pada 293 K pada berbagai tekanan awal P_i . Peningkatan tekanan meningkatkan laju penyerapan dan menurunkan laju desorpsi [3]	22
Gambar 2.5 Profil suhu selama penyerapan hydrogen dalam percobaan penyerapan H ₂ bertahap.....	22
Gambar 2.6	23
Gambar 2.7 Tipe tube pendingin dan distribusi temperatur MHB.....	24
Gambar 2.8 Berbagai macam perbaikan konfigurasi.....	25
Gambar 2.9 (a) Tabung spiral dengan PCM dan (b) jaket PCM berbentuk kerucut dengan tabung spiral [5]	25
Gambar 2.10 Geometri untuk pengujian dengan volume 285 cm ³ yang dapat menampung 961 gram metal hydride [7].....	27
Gambar 2.11 PCI untuk Hydroalloy C5 dalam temperatur 5-50°C (a) alur realtif van't hoff (b) [9].....	28
Gambar 2.12 Kurva absorpsi untuk siklus.....	28
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	29
Gambar 3.2 Diagram alir simulasi	32
Gambar 3.3 Meshing vessel	33
.....	34
Gambar 3.4 Boundary condition a) 4 spiral ambient temperatur b) 4 spiral + 1 straight tube ambient temperatur, dan c) 4 spiral tube + 1 straight tube dengan selimut PCM	34
Gambar 3.5 Lokasi pengambilan (a) data kuantitatif (b) data kualitatif	38
Gambar 3.5 <i>Grid independency</i> Temperature vs cell (Capurso et al., 2016)	40
Gambar 4.1 Lokasi pengambilan (a) data kuantitatif (b) data kualitatif	44
Gambar 4.2	45
Gambar 4.3 Grafik Temperature vs Time pada variasi 111	45
Gambar 4.4 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 112	46
.....	46
Gambar 4.5 Grafik Temperature vs Time pada variasi 112.....	47
Gambar 4.6 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 121	48
.....	48
Gambar 4.7 (a) Profil fraksi liquid saat 30s, dan (b) Profil fraksi liquid saat 250s variasi 121	49
Gambar 4.8 Grafik Temperature vs Time pada variasi 121.....	49
Gambar 4.9 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 122	51
.....	51
Gambar 4.10 (a) Profil Fraksi Liquid saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 122	51

Gambar 4.11 Grafik Temperature vs Time pada variasi 122	52
Gambar 4.12 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 211	53
Gambar 4.13 Grafik Temperature vs Time pada variasi 211	54
Gambar 4.14 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 212	55
Gambar 4.15 Profil Fraksi Liquid pada variasi 212.....	56
Gambar 4.16 Grafik Temperature vs Time pada variasi 212	56
Gambar 4.17 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 221	57
Gambar 4.18 Profil Fraksi Liquid pada variasi 221	58
Gambar 4.19 Grafik Temperature vs Time pada variasi 221	59
Gambar 4.20 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 222	60
Gambar 4.21 Liquid Fraction pada variasi 222	61
Gambar 4.22 Grafik Temperature vs Time pada variasi 222	61
Gambar 4.23 Grafik Perbandingan Temperature vs Time Near Wall	62
Gambar 4.24 Grafik Perbandingan Temperature vs Time Top PCM	63
Gambar 4.25 Grafik Perbandingan Temperature vs Time Core	63
Gambar 4.26 Grafik Perbandingan Temperature vs Time Middle Spiral	64
Gambar 4.27 Grafik Perbandingan Temperature vs Time Dalam Spiral	65
Gambar 4.28 Grafik main effects plot for anova dari respon near wall	67
Gambar 4.29 Grafik main effects plot for anova dari respon top PCM	68
Gambar 4.30 Grafik main effects plot for anova dari respon core	69
Gambar 4.31 Grafik main effects plot for anova dari respon middle spiral	71
Gambar 4.32 Grafik main effects plot for anova dari respon tube spiral	72
Gambar 4.33 Grafik main effects plot for anova dari respon maks temperatur	73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat-sifat dari tiap metode secara umum.....	7
Tabel 2.2 Sifat-sifat dari tiap metode secara umum.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 3.1 Grid independency ditinjau dari Temperatur saat time 16s.....	40
Tabel 3.2 Variasi pengujian simulasi ANOVA 3 faktor 2 level.....	41
Tabel 3.3 Tabel variasi untuk anova.....	42
Tabel 4.1 Data temperature di setiap titik pengujian pada t_{250}	65
Tabel 4.2 Hasil Anova near wall	66
Tabel 4.3 Hasil Anova top PCM.....	67
Tabel 4.4 Hasil Anova pada core.....	69
Tabel 4.5 Hasil Anova pada Middle Spiral.....	70
Tabel 4.6 Hasil Anova pada tube spiral	71
Tabel 4.7 Hasil Anova berdasarkan temp maksimum metal hydride	73

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan bertambahnya populasi di dunia, kebutuhan energi semakin meningkat sehingga berakibat semakin sedikit ketersediaan energi fosil dan pemanasan global. Beberapa alternatif pengembangan renewable energy pun semakin giat dikembangkan agar tidak memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Hidrogen adalah bahan bakar yang sempurna untuk masa depan atau abad ke-21, panas reaksinya sangat tinggi dan produk yang dihasilkan dari pembakarannya sangat ekologis. [1] Untuk memanfaatkan energi potensial ini, penelitian tentang teknologi hidrogen terus dikembangkan. **Sharma et al (2015)** telah mempelajari kelayakan penggunaan hidrogen sebagai energi untuk transportasi dan produksi produk konsumen serta perkembangan terbaru dalam produksi hidrogen dan dampak lingkungannya. Namun, meskipun produksi hidrogen telah giat dikembangkan dengan baik, masalah utama dengan sumber energi ini tetap pada penyimpanan dan pelepasannya.

Proses penyimpanan dan pelepasan hydrogen dari tangki akan terjadi reaksi eksotermik (menghasilkan panas) dan endotermik (membutuhkan panas). Besarnya panas kalor yang ditransfer masuk atau keluar dari unggun metal hydride meningkat dengan naiknya laju aliran hidrogen yang diserap. Hal ini akan mengakibatkan penurunan penyerapan dan pelepasan hidrogen. Untuk mempertahankan proses pengisian dan pelepasan hidrogen, tekanan puncak dan temperatur yang sesuai dari sistem penyimpanan MH harus dijaga pada tingkat yang diinginkan. Oleh karena itu, sistem manajemen termal yang baik harus dapat menyerap panas kalor selama pengisian dan menambah jumlah panas yang sama kembali ke MH selama proses pengosongan.

Studi eksperimental di bidang inovasi desain tanki hidrogen ini relatif sedikit, berbahaya dan membutuhkan cost yang besar. Oleh karena itu metode numerik menggunakan perangkat lunak Computational fluid dynamic (CFD) menjadi pilihan sempurna untuk memahami fenomena utama yang terlibat dalam proses

penyerapan/pelepasan hidrogen. Sehingga design pendinginan yang optimal dapat dicari dengan CFD dengan menunjukkan tekanan, kecepatan, temperatur, fraksi mol H_2 , fraksi mol AB_2 , dan fraksi mol AB_2H_2 yang terjadi saat penyerapan hydrogen.

Dalam beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan analisa menggunakan metode numerik maupun eksperimen mengenai efek penyerapan hydrogen didalam metal hydride. Diantaranya penelitian yang dilakukan oleh **Ismail Hilali et al (2017)** meneliti mengenai pengaruh tekanan kesetimbangan, temperatur udara ambient, dan kecepatan terhadap jarak ideal tangki metal hydride yang digunakan untuk penyimpanan hydrogen dalam aplikasi sel bahan bakar secara numerik dan teori dengan aplikasi Autodesk CFD Simulation. Pada penelitian ini material metal menggunakan $LaNi_5$. Penelitian ini menggunakan variasi temperatur lingkungan, Reynold Number, dan tekanan kesetimbangan. Penelitian ini menghasilkan temuan bahwa jarak ideal diantara tangki MH yang dapat digunakan untuk memaksimalkan efisiensi dari integrasi antar metal hydride tank tanpa meningkatkan energy tambahan.

Selain itu pada penelitian yang dilakukan oleh **C.A. Chung et al (2015)** bertujuan untuk memprediksi kinerja dari penyimpanan hidrogen dengan metode numerik untuk mensimulasikan perilaku fluida di dalam tangki metal hydride yang menimbulkan panas ketika pengisian. Simulasi pada penelitian ini menggunakan software ANSYS Fluent dengan $LaNi_5$ sebagai media penyimpanannya. Model pada penelitian ini di validasi menggunakan perbandingan dengan data eksperimen dalam literatur sebelumnya yang membuktikan efektivitas pipa panas untuk meningkatkan perpindahan panas yang terjadi antara metal hydride tank dan udara luar tangki. Metode yang digunakan dengan membandingkan desain tangki dengan dan tanpa pipa panas dan sirip internal. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa pipa panas sangat mengubah distribusi temperatur, kandungan hidrogen dan tekanan kesetimbangan di atas lapisan metal.

Pada penelitian **Saad Ferekho et al (2015)** mengenai efek komponen tambahan untuk peningkatan perpindahan panas internal dengan sirip dan metal foam based pada saat pengisian hidrogen. Penelitian ini menerapkan kondisi transien berdasarkan hasil eksperimen selama pengisian hidrogen. Hasilnya kedua

model menunjukkan konduktivitas thermal yang efektif dengan menggunakan metal foam based dengan porositas optimal.

Kemudian pada penelitian **Atef Chibani (2018)** mengenai stimulasi reaksi hidrogen pada LaNi_5 dengan penekanan khusus pada perpindahan massa dan panas selama proses penyerapan dan desorpsi. Simulasi numerik dilakukan dengan internal kondisi yang berbeda dan divalidasi dengan hasil eksperimen. Ditemukan bahwa kapasitas penyerapan/desorpsi hidrogen meningkat secara proporsional dengan ketebalan logam (yaitu penurunan bagian internal reaktor).

Menurut **Cui Y. et al (2021)** secara garis besar desain heat exchanger metal dapat diklasifikasikan ke dalam lima kategori yang berbeda, yaitu: 1) desain tube pendingin, 2) desain sirip, 3) peningkatan dan pengaturan tabung pendingin, 4) desain geometris lainnya, dan 5) PCM atau material pengubah fasa. Hasilnya, pada metode konvensional, konfigurasi desain tube spiral dengan sirip adalah konfigurasi terbaik. Sedangkan, material pendingin PCM adalah metode terbaru dalam pendinginan metal hydride. Pemanfaatan material ini dapat menyerap panas lebih baik daripada konfigurasi lainnya. Cui Y et al menyarankan untuk mempertimbangkan pekerjaan optimasi berdasarkan integrasi PCM dan tube spiral untuk penelitian selanjutnya.

1.2 Rumusan Masalah

Proses penyimpanan dan pelepasan hydrogen dapat menimbulkan reaksi eksotermik dan endotermik. Reaksi yang ditimbulkan ini dapat mengakibatkan melambatnya laju penyerapan dan pelepasan hydrogen, sehingga heat exchanger diperlukan untuk mendinginkan sistem tersebut. Heat exchanger perlu divariasikan untuk mendapatkan hasil yang optimal. Pada penelitian ini akan digunakan metode heat absorbent dengan keadaan ketika penyerapan hydrogen, heat absorbent akan mendinginkan dengan cara isothermik. Kemudian ketika pelepasan hydrogen akan menahan / memberikan energy sehingga histerisis atau losses akan menjadi berkurang.

Metode numerik dianggap dapat merepresentasikan fenomena yang terjadi didalam tanki penyimpanan hidrogen dengan berbagai model desain. Oleh karena

itu, penelitian ini dilakukan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) sebagai alat untuk mempresentasikan kejadian yang terjadi di dalam hydrogen storage sekaligus untuk mencari desain paling optimal dari penyerapan panas.

Menurut Cui,Y et al (2022) PCM adalah metode pendinginan paling optimal dibandingkan dengan metode konvensional. Cui Y menambahkan bahwa integrasi antara metode PCM dan metode konvensional tube spiral perlu dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya. Material PCM RT60 dapat digunakan menjadi heat absorbent dengan memanfaatkan konduksi sebagai metode perpindahan panasnya. Material PCM dapat menahan pada saat kondisi isothermal/perubahan fasa.

1.3 Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk memahami fenomena utama yang terlibat dalam proses penyerapan/pelepasan hidrogen metal hydride AB_2 . Kemudian mencari desain pendinginan yang paling optimal untuk tanki penyimpanan hydrogen.

Selain itu, terdapat tujuan khusus untuk menganalisa baik dalam bentuk data kuantitatif dan kualitatif pada kajian numerik ini, berikut tujuan khusus penelitian ini :

1. Mendesain tanki penyimpanan hydrogen menggunakan PCM dan tube spiral
2. Melakukan studi numerik untuk pengelolaan panas di dalam tanki penyimpanan hidrogen.
3. Melakukan optimasi dengan metode anova untuk melihat parameter yang berpengaruh dalam penyimpanan hydrogen.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan yang berisi tentang variabel yang akan diteliti maupun variabel yang akan diasumsikan sehingga bahasan tidak melebar dari tujuan utama. Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini, yaitu :

1. Material yang digunakan untuk pengikatan adalah AB_2 (Hydroalloy C_5)
2. Kinetik dari penyerapan hydrogen diabaikan

3. Material hydroalloy C5 diasumsikan sebagai solid yang dapat membangkitkan panas
4. Boundary condition hanya wall penyerap panas
5. Heat generation menggunakan 5 MW/m^3 (Visaria et al., 2010)
6. Material PCM menggunakan RT60

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian dari thesis ini yaitu:

1. Memberikan gambaran secara kualitatif dan kuantitatif mengenai fenomena yang terjadi pada metal hydride ketika menyimpan hydrogen.
2. Memberikan konsep pendinginan yang paling optimal

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hydrogen Storage Vessel

Renewable energy hydrogen memiliki masalah dalam penyimpanan. Penyimpanan hydrogen secara garis besar dibagi menjadi 2, yaitu physical based dan material based.

Pada physical based dibagi menjadi **compress gas, cold compressed, dan liquid hydrogen**. Sedangkan pada material based hydrogen diikat oleh material lain seperti magnesium, litium zeolite, aluminum, dan lain sebagainya. Pengikatan ini terdiri dari beberapa metode seperti **adsorbent, liquid organic, interstitial hydride, complex hydride, dan chemical hydride**. Masing- masing metode ini memiliki kekurangan dan kelebihan dengan sifat-sifatnya seperti ditunjukkan pada **tabel 2.1** dibawah ini.

Tabel 2.1 Sifat-sifat dari tiap metode secara umum

	Physical Based		Material Based Solid State	
	Compresed Gas	Liquid Hydrogen	Physisorption	Chemisorpstion
Keuntungan	Teknologi dan umum digunakan, Aplikasi praktis	umum digunakan untuk menyimpan di tank dengan bentuk dan ukuran	Dapat menyimpan hydrogen dengan jumlah yang lebih banyak dengan volume yang lebih kecil dibanding bentuk compressed gas dan liquid state, ekonomis, dan aman.	
Penyimpanan	Max 20 Mpa, gas	1 bar, Temp 20K (-253C)	-196 tekanan ~40 atm	di ikat oleh material lain
Kelemahan	Perawatan berat dan biaya tinggi	Kebocoran panas bisa terjadi, dinding besar dan tebal, konsumsi energy tinggi selama proses pencairan, etc	kapasitas rendah dan biaya (1wt%)	Pengoperasian temperature tinggi dan bisa stable dan unstable.
Desain	Silinder dari serat filamen komposit berliku	Silinder dan persegi panjang, tekanan tidak merata.	area permukaan besar, porosity tinggi cocok untuk host	Silinder yang diisi oleh material pengikat.
Methode	-	-	carbon based, zeolites, MOFs	metal hydride, complex hydride

2.2 Material-based: Solid-State Storage

Material based secara umum dibagi menjadi 2 yaitu physisorption material dan chemisorpsion material.

2.2.1 Physisorption Materials

Metode physisorption adalah metode physical bonding antara molekul hydrogen dan permukaan adsorbent berdasarkan van der Waals dan gaya atraktif elektrostatik. Physisorption relative mudah dihandle, reversible karena energi ikatan rendah dan cepat menyerap kinetik dibandingkan chemisorption. Metode ini membutuhkan temperatur rendah lingkungan (biasanya pada -196°C) dan tekanan hydrogen tinggi (~40 atm). Pengoprasian pada temperatur lingkungan dan tekanan 50-100 atm dapat dilakukan, tetapi dengan biaya dan kapasitas penyimpanan rendah (<1wt%). Karena ikatan terbatas pada permukaan material, metode ini cocok untuk host yang memiliki porosity tinggi, volume pori dan area permukaan besar. Material yang digunakan untuk metode ini sebagai berikut:

Carbon-based Materials

Nanostruktur karbon adalah material porus yang digunakan pada physisorption. Material seperti graphene, carbon nanotubes (CNTs), fullerenes dan karbon aktif mendapatkan dapat digunakan karena area permukaan tinggi. Secara umum nanostruktur karbon dapat dibagi menjadi 2 kategori, yaitu material dengan jajaran panjang dari carbon hexagons dan Material yang memiliki struktur tidak teratur.

Metal Organic Frameworks (MOFs)

MOFs adalah crystalline materials yang porus dengan area permukaan internal lebih besar jika dibandingkan dengan zeolite (4800m²/g). Terbuat dari metal cluster atau ion dihubungkan oleh ligan organik untuk membentuk saluran atau pori-pori. Modifikasi pada ukuran pori dengan penghubung lebih pendek lebih diinginkan untuk efisiensi penyimpanan lebih tinggi. Material MOF diklaim dapat megadsorpsi hydrogen hingga kapasitas 1.38wt% pada -196 °C 1 atm tekanan hydrogen (dari studi kerja pada water-stable Zr-furmarate dimana MOF sebagai penyimpanan hydrogen). Study sebelumnya menyebutkan bahwa sintesis chromium MOFs dapat mengadsorb 2.12 wt% hidrogen pada -196 °C dibawah 1 atm tekanaan hidrogen. Study lain dengan eksperimental konvensional 3D printing

acrylonitrile-butadiene-styrene MOF-5 untuk penyimpanan hydrogen. Pencetakan material dapat mempertahankan 6.1×10^{-4} wt% hydrogen pada 23 °C

Zeolite

Ditemukan pada tahun 1756. Terbuat dari AlO_4/SiO_4 tetrahedra building blocks. Struktur terbuka dan 3D kaku dengan luas permukaan area internal lebih besar ($1000\text{m}^2/\text{g}$). Dimensi zeolite frameworks berada dalam range ~ 0.2 - 0.9nm . Zeolite sukses disintesis menggunakan radiasi ultrasonic untuk penyimpanan hydrogen. Sintesis zeolite memiliki 1.3wt% kapasitas adsorpsi hydrogen pada temperature - $196\text{ }^\circ\text{C}$ 1 atm tekanan hidrogen. Study lain menilai kemungkinan aplikasi clays dan zeolite sebagai template untuk sintesis karbon nanostruktur sebagai material penyimpanan hydrogen. Area permukaan BET dan kapasitas penyimpanan pada $2196\text{ }^\circ\text{C}$ 1 atm of tekanan hidrogen berada pada range 0.3 - 0.9 wt%. Study lain menyebutkan sintesis karbon menggunakan zeolite-sucrose composite sebagai template. Area permukaan BET karbon 684 - $1033\text{ m}^2/\text{g}$ dan material diklaim dapat mengadsorpsi hydrogen kapasitas hydrogen 0.3wt% pada $-100\text{ }^\circ\text{C}$.

2.2.2 Chemisorption Materials

Metode ini memanfaatkan ikatan berbasis proses kimia. Molekul hydrogen memisahkan atom hydrogen untuk menempati interstisial site atau matrik material ke bentuk ikatan kimia baru. Tidak seperti hydrogen physisorption, chemisorption melibatkan energi ikatan lebih tinggi, lebih dari 40 kJ/mol. Proses chemisorption membutuhkan pengoperasian temperature tinggi dan hidride bisa terlalu stabil (mudah menyerap hydrogen) dan bisa juga sangat tidak stabil (susah menyerap hydrogen dan perlu tekanan dan temperature yang tinggi agar dapat menyerap). Berikut yang biasanya digunakan pada metode chemisorption material:

Intermetallic Compound

Intermetallic compound mempunyai potensi untuk digunakan diaplikasi lapangan. Pada tabel dibawah ini terdapat families dari hidride forming intermetallic compound yang meliputi prototype dan strukturnya. Element A biasanya menggunakan lathanide element atau mischmetal (campuran rare earth metal yang mudah membentuk hidride yang stabil dan material B biasanya element yang membentuk non stable hidride).

Intermetallic Compound	Prototype	Hydrides	Structure
AB ₅	LaNi ₅	LaNi ₅ H ₆	Haucke phases, hexagonal
AB ₂	ZrV ₂ , ZrMn ₂ , TiMn ₂	ZrV ₂ H _{5.5}	Laves phase, hexa or cubic
AB ₃	CeNi ₃ , YFe ₃	CeNi ₃ H ₄	Hexagonal, PuNi ₃ -type
A ₂ B ₇	Y ₂ Ni ₇ , Th ₂ Fe ₇	Y ₂ Ni ₇ H ₃	Hexagonal, Ce ₂ Ni ₇ -type
A ₆ B ₂₃	Y ₆ Fe ₂₃	Ho ₆ Fe ₂₃ H ₁₂	Cubic, Th ₆ Mn ₂₃ -type
AB	TiFe, ZrNi	TiFeH ₂	Cubic, CsCl-/CrB-type
A ₂ B	Mg ₂ Ni, Ti ₂ Ni	Mg ₂ NiH ₄	Cubic, MoSi ₂ -/Ti ₂ Ni-type

Binary Hydrides

Binary hydrides mendapatkan perhatian sebagai kandidat tepat untuk material penyimpanan hydrogen solid-state. Beberapa binary hydrides bisa ditemui, yaitu:

Hydrides	Hydrogen Content (wt.%)	Volumetric H kg/m ³	Decomposition temperature (°C)
Lithium Hydrides (LiH)	12.59	98.60	720
Sodium Hydrides (NaH)	4.17	57.73	425
Potassium Hydrides (KH)	2.49	36.01	417
Rubidium Hydrides (RbH)	1.18	30.44	170
Caesium hydride (CsH)	0.75	25.86	170
Magnesium hydride (MgH ₂)	7.60	110.03	327
Calcium hydride (CaH ₂)	4.75	92.37	600
Strontium hydride (SrH ₂)	2.23	74.00	675
Barium hydride (BaH ₂)	1.44	60.41	675

Magnesium Hydrides

Diantara metal hydride, banyak yang fokus pada magnesium hydrides. Ini memiliki kapasitas penyimpanan hydrogen besar (7.6wt%), biaya rendah, dan super

reversibility sehingga magnesium hydrides menjadi kandidat menjanjikan untuk penyimpanan hydrogen onboard. Ada beberapa drawback yang memaksa aplikasi partikal pada magnesium hydride, khususnya untuk aplikasi mobile. Hasil termodinamik stabil yang tinggi MgH_2 menghasilkan enthalpy desorption yang tinggi ($\Delta H = 66-75 \text{ KJ/molH}_2$) yang dikarenakan desorption tidak menguntungkan pada 300°C at 1 bar H_2 . MgH_2 hanya mulai men-desorb hydrogen diatas 300°C dan lambat desorp kinetik. Temperature ini terlalu tinggi intuk pengaplikasian on board

Complex Hydrides

Formula	Molecular Weight g/mol	Start of decomposition $^\circ\text{C}$	Hydrogen Content Wt%
LiBH₄	21.8	320	18.4
NaBH₄	37.8	450	10.6
Mg(BH₄)₂	53.9	320	14.8
Ca(BH₄)₂	69.8	360	11.5
NaAlH₄	54.0	230	7.5
Mg(AlH₄)₂	86.3	110-130	9.3
Ca(AlH₄)₂	102.1	80	7.9
LiAlH₄	40.4	170	10.8

Kompleks hydrides adalah grup material yang merupakan kominasi hydrogen dan grup 1,2 dan 3 elemen ringan (contoh: Li, Na, B dan Al). Berat ringan dan nomer atom hydrogen per atom metal yang mana adalah 2 dibanyak kasus, dan hasilnya memiliki kapasitas hydrogen yang sangat tinggi membuat complex hydrides material penyimpanan yang menarik. Hydrogen pada complex hydrides biasanya berlokasi di pojok pada tetrahedron dengan B atau Al pada tengahnya. Muatan negative anion $[BH_4]$ atau $[AlH_4]$ adalah dampak aksi. Contoh Li atau Na. Ada 2 grup utama compex hydrides yaitu hydride complexes of borane, tethrahydrobonates $M(BH_4)$ dan hydride complexes of alane, the tetrahydroaluminates $M(AlH_4)$.

Alanates

Alanates bukanlah material yang menarik mata, sebagai salah satu kandidat penyimpanan hydrogen karena isu reversibility hingga ditemukan oleh Bogdanovic dan Schwickardi. Bogdanovic dan Schwickardi membuktikan bahwa senyawa Ti yang didopingkan pada NaAlH_4 reversible pada proses hydrogenation/dehydrogenation. Awal study mereka, proses signifikan pada senyawa metal hidrida ringan diteliti seperti LiAlH_4 , $\text{Ca}(\text{AlH}_4)_2$, dan $\text{Mg}(\text{AlH}_4)_2$ untuk material penyimpanan hydrogen solid-state.

Borohydrides

Lithium Borohydride

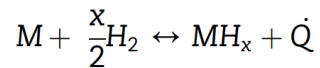
Lithium borohydride (LiBH_4) memiliki densitas gravimetric hydrogen 18.4 wt% dan densitas volumetric hydrogen 121 kg H/m^3 dan desorb hydrogen hanya diatas temperature leleh. Dekomposisi thermal LiBH_4 . LiBH_4 mulai terdekomposisi pada temperature lebih tinggi dari 320 °C tapi seluruh dekomposisi terjadi pada range temperature 400-600 °C. Hanya 50% kapasitas secara teori dapat ter desorb oleh senyawa. LiBH_4 tidak cocok untuk penyimpanan hydrogen solid-state onboard karena temperature dekomposisi tinggi dan irreversibility

Sodium Borohydride

Sodium borohydride (NaBH_4) adalah borohydride kompleks yang lain. NaBH_4 mendapatkan perhatian sebagai material penyimpan hydrogen potensial lebih dari satu dekade. NaBH_4 adalah metal borohydride kompleks dengan kapasitas penyimpanan hydrogen reversible tinggi hingga 10.8 wt%. Proses dekomposisi NaBH_4 lebih rumit dan mungkin melibatkan fase menengah tambahan seperti NaH , $\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{12}$ atau gas seperti B_2H_6 . Penggunaan praktisnya terhambat oleh stabilitas termodinamik yang tinggi dan kinetik perubahan hydrogen lambat. Sekarang, penggunaan NaBH_4 terhalang oleh stabilitas yang tinggi, menyebabkan suhu desopsi jauh diatas temperature ruang.

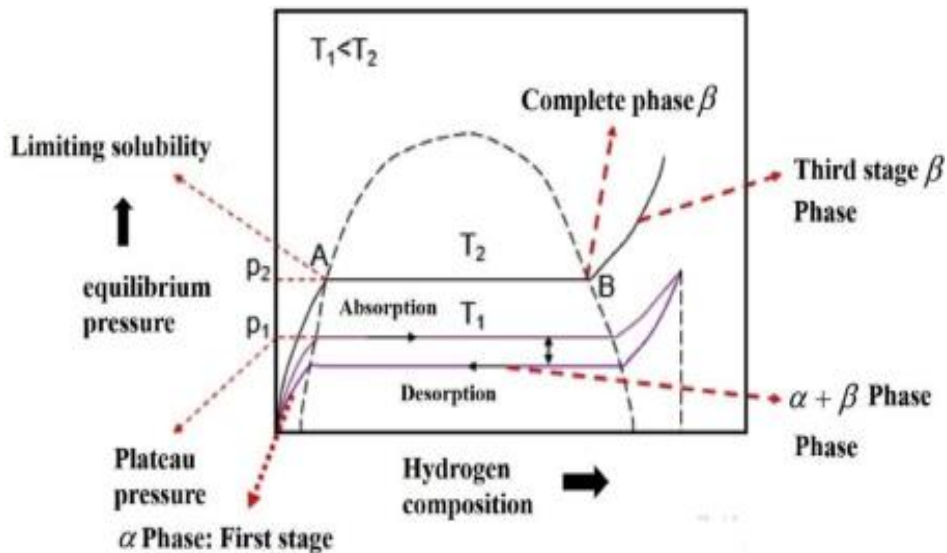
2.3 Reaksi Hydrogen

Metal hydride dibentuk oleh reaksi kimia reversibel hidrogen dengan paduan logam atau paduan intermetalik pada suhu dan tekanan tertentu. Proses ini dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:



di mana M adalah logam atau paduan intermetalik; MH_x adalah hidrida logam yang dihasilkan; x adalah rasio hidrogen terhadap logam (H/M); dan Q adalah panas reaksi.

Berdasarkan gambar 2.4 dapat dilihat ketika mekanisme hydrogen bereaksi terhadap base metal menjadi metal hydride akan terjadi kenaikan temperature dari T_1 ke T_2 . Reaksi ini diakibatkan karena gaya kinetik dari pressure yang masuk kedalam sistem metal hydride. Kenaikan temperature ini dapat mempengaruhi komposisi hydrogen, berdasarkan kurva kubah panjang fasa β ke fasa α menjadi berkurang sehingga hydrogen yang dapat diserap oleh sistem akan berkurang juga. Sedangkan pada saat pelepasan hydrogen, metal hydride akan membutuhkan panas. Penurunan temperature ini juga tidak sebanding dengan temperature pada saat penyerapan. Hal ini dikarenakan terjadi losses energy atau histerisis pada sistem metal hydride.



Gambar 2.4 Mekanisme reaksi penyerapan dan pelepasan hydrogen dari diagram p-v

Heat flux dari reaksi kimia antara hidrogen dan metal adalah fungsi dari laju aliran hidrogen dan pembentukan entalpi. Besarnya fluks kalor yang dipindahkan masuk atau keluar dari unggun MH meningkat dengan naiknya laju aliran hidrogen

yang diserap. Untuk mempertahankan proses pengisian dan pengosongan hidrogen, tekanan puncak dan suhu yang sesuai dari sistem penyimpanan MH harus dijaga pada tingkat yang diinginkan. Oleh karena itu, sistem manajemen termal yang baik harus dapat menyerap semua heat flux selama pengisian dan memasok jumlah panas yang sama kembali ke MH selama proses pengosongan.

2.4 Heat Transfer

Perpindahan panas adalah disiplin ilmu teknik termal yang menyangkut pembangkitan, penggunaan, konversi, dan pertukaran energi panas (panas) antara sistem fisik. Perpindahan panas diklasifikasikan ke dalam berbagai mekanisme, seperti konduksi termal, konveksi termal, radiasi termal, dan transfer energi melalui perubahan fasa. Heat transfer juga mempertimbangkan transfer massa spesies kimia yang berbeda baik dingin atau panas, untuk mencapai perpindahan panas. Sementara mekanisme ini memiliki karakteristik yang berbeda, mereka sering terjadi secara bersamaan dalam sistem yang sama.

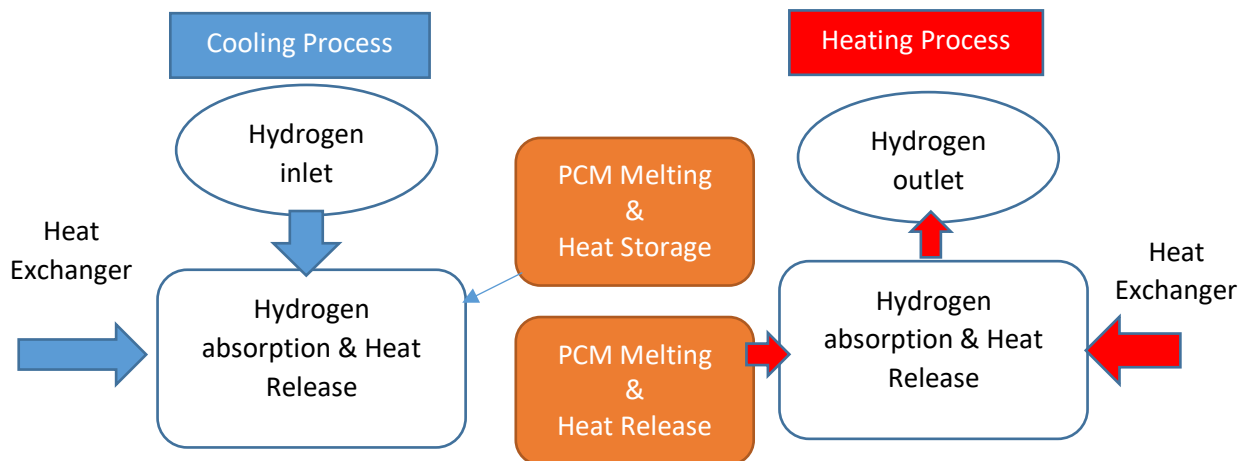
Konduksi, juga disebut difusi, adalah pertukaran mikroskopis langsung energi kinetik partikel (seperti molekul) melalui batas antara dua sistem. Ketika suatu benda berada pada suhu yang berbeda dari benda lain atau sekitarnya, panas mengalir sehingga benda dan lingkungan mencapai suhu yang sama, di mana mereka berada dalam kesetimbangan termal. Perpindahan panas spontan seperti itu selalu terjadi dari daerah bersuhu tinggi ke daerah lain yang bersuhu lebih rendah, seperti yang dijelaskan dalam hukum kedua termodinamika.

Konveksi terjadi ketika aliran suatu fluida (gas atau cairan) membawa panasnya melalui fluida. Semua proses konveksi juga memindahkan panas sebagian melalui difusi. Aliran fluida dapat dipaksakan oleh proses eksternal, atau kadang-kadang (dalam medan gravitasi) oleh gaya apung yang disebabkan ketika energi panas mengembangkan fluida (misalnya dalam semburan api), sehingga mempengaruhi transfernya sendiri. Proses yang terakhir ini sering disebut "konveksi alami". Proses sebelumnya sering disebut "konveksi paksa". Dalam hal ini, fluida dipaksa mengalir dengan menggunakan pompa, kipas, atau alat mekanis lainnya.

Radiasi termal terjadi melalui ruang hampa atau media transparan (padat atau cairan atau gas). Ini adalah transfer energi melalui foton atau gelombang elektromagnetik yang diatur oleh hukum yang sama.

2.5 Phase Change Material

Perpindahan panas adalah masalah utama untuk hydrogen dan sistem penyimpanannya, baik untuk mode pengisian (pelelehan PCM) dan pengosongan (pemadatan PCM). Phase change material atau material pengubah fasa adalah panas laten (entalpi perubahan fasa) dari transisi fasa. PCM biasanya digunakan dalam energi surya, pendingin perangkat elektronik, kontruksi bangunan, dan bidang lain karena kapasitas penyimpanan termal yang tinggi dan isothermal [5]. Sistem penyimpanan hidrogen perlu menghilangkan panas yang dihasilkan oleh reaksi eksotermik selama proses penyerapan dan menyuplai panas saat proses pelelehan. Skema sistem menggunakan PCM pada metal hydride ditunjukkan pada gambar 2.2



Gambar 2. 2 Skema PCM-MHB [5]

2.6 Aliran Laminar dan Turbulen

Aliran *viscous* terbagi menjadi aliran laminar dan aliran turbulen. Aliran laminar adalah aliran dimana struktur aliran dibentuk oleh partikel-partikel fluida yang bergerak secara berlapis-lapis, dimana setiap lapisan bergerak diatas lapisan lainnya. Dalam aliran laminar, partikel-partikel fluida seolah-olah bergerak sepanjang lintasan-lintasan yang halus dan lancar, dengan satu lapisan meluncur secara mulus pada lapisan yang bersebelahan. Ciri-ciri aliran laminar

adalah fluida bergerak mengikuti garis lurus, kecepatan fluidanya rendah, viskositasnya tinggi dan lintasan gerak fluida teratur antara satu dengan yang lain.

Umumnya klasifikasi ini bergantung pada gangguan-gangguan yang dialami suatu aliran yang mempengaruhi gerak partikel-partikel fluida tersebut. Apabila aliran mempunyai kecepatan relatif rendah atau fluidanya sangat *viscous*, gangguan yang mungkin dialami medan aliran akibat getaran, ketidakteraturan permukaan batas dan sebagainya, relatif lebih cepat teredam oleh viskositas fluida disebut aliran laminar. Gangguan yang timbul semakin besar sehingga tercapai kondisi peralihan (*transition state*) pada kecepatan aliran yang bertambah besar atau efek viskositas yang berkurang. Terlampauinya kondisi peralihan menyebabkan sebagian gangguan tersebut menjadi semakin kuat, dimana partikel bergerak fluktuatif atau acak dan terjadi pencampuran gerak partikel antara lapisan-lapisan yang berbatasan. Kondisi aliran yang demikian disebut aliran turbulen.

Kondisi aliran yang laminar dan turbulen ini dapat dinyatakan dengan bilangan Reynolds (*Reynolds number*). Bilangan Reynolds merupakan bilangan tidak berdimensi yang merupakan perbandingan antara gaya inersia *body* terhadap gaya geser yang ditimbulkan aliran fluida.

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Geser}} \quad (2.3)$$

Dimana: $\text{Gaya Inersia} = p \times A = \rho \cdot U^2 \cdot L^2 \quad (2.4)$

$$\text{Gaya Geser} = \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L}\right) \cdot L^2 \quad (2.5)$$

Sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L}\right) \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu} \quad (2.6)$$

dimana: ρ : Densitas fluida

U_{∞} : Kecepatan aliran *free stream* fluida

L : Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran, dalam kasus ini panjang karakteristik benda uji adalah penampang *needle* yaitu D

μ : Viskositas dinamis fluida

Sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} D}{\mu} \quad (2.7)$$

Bila $Re < 2300$, maka aliran tersebut tergolong aliran laminar. Apabila $Re=2300$, maka aliran tersebut aliran transisi dan jika $Re > 2300$ maka aliran tersebut adalah aliran turbulen.

2.7 Computational Fluid Dynamic

CFD adalah suatu analisa dari sistem yang berbasis metode numerik yang mampu menyelesaikan beberapa permasalahan pada aliran fluida, perpindahan panas, dan reaksi kimia dengan simulasi komputer. Keuntungan dari penggunaan CFD ini jika dibandingkan dengan metode analitik atau eksperimen adalah metode CFD lebih menghemat biaya dan juga tenaga, mampu menghasilkan data dari suatu parameter jika parameter tersebut susah diambil datanya melalui eksperimen, sebagai analisa dasar ketika ingin mengembangkan suatu desain atau produk terbaru, sebagai alat bantu dalam menganalisa permasalahan yang ada didalam industri, dan masih banyak lagi. Namun CFD ini pun juga memiliki kekurangan seperti perlunya spesifikasi komputer yang memadai, memakan waktu yang banyak khususnya pada kasus *transient*, data yang dihasilkan pun masih terdapat error.

Didalam metode CFD untuk menyelesaikan permasalahan didalam aliran fluida (tanpa perpindahan panas) menggunakan 2 persamaan dasar aliran, yakni konservasi massa dan persamaan momentum pada aliran fluida . untuk persamaan konservasi masa yang diselesaikan pada CFD adalah sebagai berikut

$$\nabla \rho \vec{V} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Untuk fluida *incompressible*, tidak ada perubahan densitas baik pada perubahan ruang ataupun perubahan waktu, sehingga persamaannya

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Didalam konservasi masa ini menunjukkan bahwa dalam suatu kontrol volume tertutup. Jumlah massa alir disetiap posisi akan tetap bernilai konstan.

Untuk persamaan momentum pada aliran fluida dapat ditunjukkan pada persamaan dibawah ini.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho \cdot g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho \cdot g - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho \cdot g - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan *navier- stokes equation*. Persamaan ini merupakan bentuk dari persamaan numerik dikarenakan tidak mungkin untuk membentuk persamaan yang menjelaskan gaya yang diakibatkan oleh kontak antara permukaan dari fluida dengan permukaan benda solid secara analitik. Persamaan ini menunjukkan gaya – gaya internal yang bekerja pada suatu aliran fluida yang mempunyai arah ke bidang (gaya normal) dan juga gaya yang arahnya tangensial ke bidang (gaya *shear*). Persamaan diatas valid untuk kondisi *incompressible viscous flow*.

2.8 Species Transport

Jika didalam simulasi terdapat reaksi kimia, kita dapat memilih species transport equations untuk memecahkan konservasi kimia. ANSYS Fluent memprediksi local mass fraction dari setiap species atau unsur. Y_i melalui solusi persamaan konveksi-difusi untuk species ke i. Persamaan konservasi ini mengambil bentuk umum, seperti berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i$$

Dimana R_i adalah laju produksi bersih spesies melalui reaksi kimia dan S_i merupakan laju penciptaan dengan penambahan dari fase terdispersi ditambah sumber yang ditentukan peneliti. Persamaan bentuk ini akan diselesaikan untuk N-

1 spesies dimana N adalah jumlah total spesies kimia fase fluida yang ada dalam sistem. Karena fraksi massa spesies harus dijumlahkan menjadi satu, fraksi massa ke-N ditentukan sebagai satu dikurangi jumlah fraksi massa yang diselesaikan. Untuk meminimalkan kesalahan numerik, spesies ke-N harus dipilih sebagai spesies dengan fraksi massa terbesar secara keseluruhan, seperti N₂ ketika pengoksidasi adalah udara.

Mass Diffusion in Turbulent Flows

Di aliran turbulen, ANSYS Fluent menghitung difusi massa dengan mengikuti bentuk :

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}$$

Dimana Sc_t adalah turbulent Schmidt number ($\frac{\mu_t}{\rho D_t}$) dimana μ_t adalah turbulen viscosity dan D_t adalah turbulen diffusivity. Nilai default dari Sc_t adalah 0,7.

Efek Species Transport dalam Persamaan Energi

Pada banyak aliran pencampuran multikomponen, transport entalpi karena difusi spesies dapat memiliki efek signifikan pada entalpi dan tidak boleh diabaikan. Khususnya pada Lewis number :

$$\nabla \cdot \left[\sum_{i=1}^n h_i \vec{J}_i \right]$$

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}}$$

untuk setiap spesies jauh dari kesatuan, mengabaikan istilah ini dapat menyebabkan kesalahan yang signifikan. ANSYS Fluent akan menyertakan istilah ini secara default. k adalah thermal conductivity.

2.9 Validasi

Salah satu faktor yang mempengaruhi keakuratan dari proses simulasi adalah jumlah cell. Idealnya, semakin banyak jumlah cell yang digunakan maka hasil dari simulasi akan semakin akurat. Namun dengan penggunaan jumlah cell yang banyak maka waktu komputasi juga akan semakin lama. Maka diperlukan

menggunakan jumlah cell yang optimal. Optimal disini dapat diartikan bahwa dengan menggunakan jumlah cell yang sedikit mungkin namun didapatkan hasil parameter yang diinginkan tidak jauh berbeda dengan menggunakan cell yang banyak. Maka untuk itu dilakukan sebuah test yaitu *Grid independency test* (GIT).

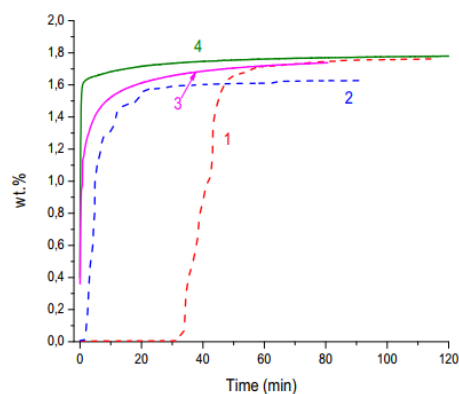
Pada penelitian ini ditentukan terdapat 4 jumlah cell yang digunakan yaitu 723 ribu, 892 ribu, 992 ribu, dan 1.228 juta cell poly hexa. Parameteri yang akan dibandingkan hasilnya adalah temperatur pada saat time 16s dari setiap jumlah cell yang dihasilkan. Pada proses GIT ini menggunakan setting heat generation pada cell zone metal hydride dengan estimasi 5MW/m^3 (Visaria et al., 2010).

2.10 Penelitian Terdahulu

Adapun rincian penelitian-penelitian ini, yaitu seperti berikut:

1. Study of hydrogen storage properties of oxygen modified Ti- based AB₂ type metal hydride alloy (Davids, M., et al (2021))

Melakukan eksperimen menggunakan material Intermetallic alloy AB₂ (A = Ti_{0.85}Zr_{0.15}, B₂= Mn_{1.22}Ni_{0.22}Cr_{0.2}V_{0.3}Fe_{0.06}) dan AB₂O_{0.05} untuk kendaraan Penambahan oksigen pada paduan tidak banyak mengubah sifat PCT; satu-satunya perbedaan adalah bahwa tekanan plateau untuk paduan yang dimodifikasi oksigen sedikit meningkat.



Gambar 2.3 Kinetika penyerapan hidrogen pada $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $P_0 = 30\text{ bar}$ untuk paduan tipe AB₂ berbasis Ti: (1) paduan AB₂ tanpa aktivasi, (2) paduan AB₂O_{0.05} tanpa aktivasi, (3) AB₂O_{0.05} paduan setelah aktivasi dengan pemanasan vakum pada $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam, (4) paduan AB₂ setelah aktivasi dengan pemanasan vakum pada $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam. [1]

Hasilnya Kedua paduan telah terbukti menjadi kandidat yang sangat baik untuk penyimpanan H₂, terutama untuk kendaraan. Kinerja reaksi paduan AB₂ berbasis Ti ditingkatkan dengan memasukkan oksigen ke dalam paduan yang memungkinkannya menyerap H₂ tanpa reaksi apa pun, tetapi menurunkan kapasitas penyerapan hidrogen dari 1,7 wt% menjadi 1,6 wt%.

2. Reversible hydrogenation of AB₂-type Zr–Mg–Ni–V based hydrogen storage alloys (Wu, Y et al (2021))

Material : AB₂ dengan A (Zr dan Mg) B (Y dan Ni₂) dimana Y divariasikan menjadi 3 bentuk yaitu ZrMgNi₄, ZrMgNi₃V, dan ZrMgNi₂V₂ yang diperoleh tetap memiliki struktur fase Laves tunggal pada keadaan anil, terhidrogenasi, dan dehidrogenasi, yang menunjukkan bahwa amorfisasi dan disproporsi yang diinduksi hidrogen telah dihilangkan

Hasilnya Dari ZrMgNi₄ menjadi ZrMgNi₂V₂ dengan peningkatan derajat substitusi vanadium, kapasitas penyimpanan hidrogen reversibel meningkat dari 0,6 wt% (0,35H/M) menjadi 1,8 wt% (1,0H/M), sementara stabilitas kisi meningkat secara bertahap. Paduan ZrMgNi₂V₂ dapat menyerap 1,8% berat hidrogen dalam waktu sekitar 2 jam pada 300 K di bawah tekanan 4 MPa H₂ dan secara reversibel menyerap

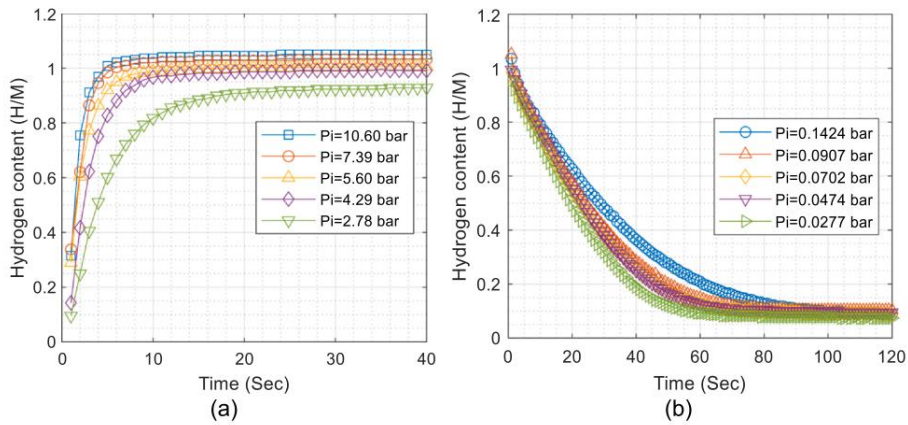
hidrogen yang diserap dalam waktu sekitar 30 menit pada 473 K tanpa proses aktivasi yang rumit. Sifat menonjol dari **ZrMgNi₂V₂** menjelaskan potensi tinggi untuk aplikasi penyimpanan hidrogen.

3. Modeling of the hydrogen sorption kinetics in an AB₂ laves type metal hydride alloy (Haryadi, A et al (2022))

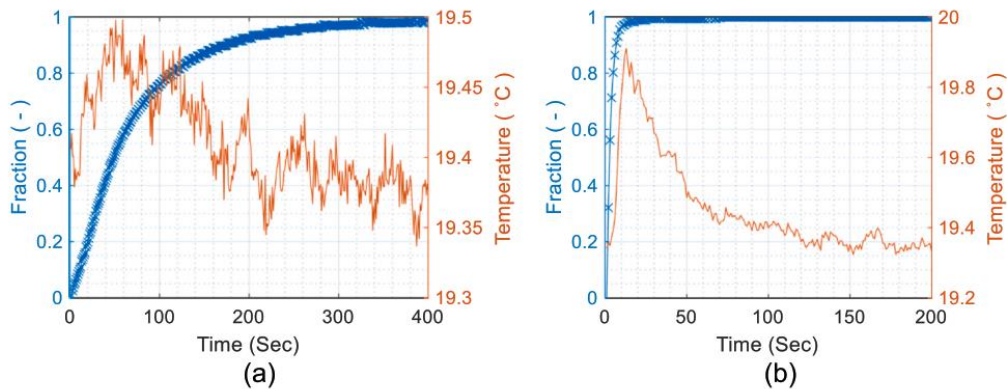
Material Hidrida : Ti_{0.15}Zr_{0.85}La_{0.03}Ni_{1.126}Mn_{0.657}V_{0.113}Fe_{0.113} AB₂ Laves (A=Zr, Ti; B = logam transisi – Fe, Co, Ni, Mn, Cr, V) mengandung 4 atom H/unit rumus AB₂ sehingga kapasitas penyimpanan hidrogen kisaran 1,5 hingga 2 wt% dan menawarkan pengisian dan pelepasan hidrogen yang tinggi.

Metode penelitian menggunakan studi eksperimental dan pemodelan termodinamika dan interaksi kinetik pada saat pengisian dan pelepasan hidrogen.

Hasil :



Gambar 2.4 Kandungan hidrogen sebagai fungsi waktu untuk absorpsi (a) dan desorpsi (b) pada 293 K pada berbagai tekanan awal P_i). Peningkatan tekanan meningkatkan laju penyerapan dan menurunkan laju desorpsi [3]



Gambar 2.5 Profil suhu selama penyerapan hidrogen dalam percobaan penyerapan H_2 bertahap (a) dan penuh (b). Contoh profil suhu penyerapan penuh ini dipilih untuk reaksi tercepat di antara data terukur, yang memungkinkan hanya dalam 9 detik untuk mencapai fraksi reaksi 0,95. Perbedaan suhu yang terukur cukup kecil, kurang dari $1^\circ K$. [3]

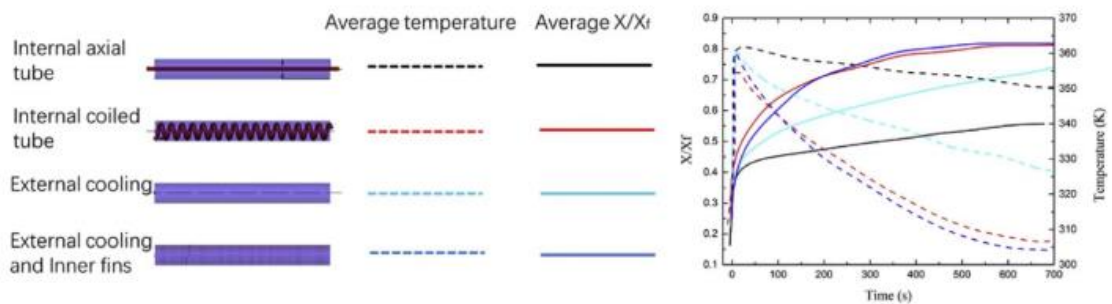
- Nilai eksponen pengisian ($n=1-1.25$) dan pelepasan ($n=1$) Ini menunjukkan bahwa langkah-langkah penyerapan dan desorpsi hidrogen yang membatasi laju dapat diatur bersama oleh difusi hidrogen dan nukleasi batas butir dari larutan alfa-padat dan beta.
- Energi aktivasi untuk penyerapan dan pelepasan hidrogen menurun seiring dengan meningkatnya kandungan hidrogen dalam hidrida ΔH_{abs} . 36.03 kJ/molH_2 dan ΔS_{abs} . $115.08 \text{ J/molH}_2.K$

- The comprehensive review for development of heat exchanger configuration design in metal hydride bed (Cui, Y et al (2022))

Tujuan : Pekerjaan ini dikonsentrasikan untuk menilai efektivitas perpindahan panas dan massa dari berbagai konfigurasi struktur reaktor. Keunggulan dan kelemahan konfigurasi yang berbeda dirangkum untuk memberikan perbandingan efek pertukaran panas. Selain itu, analisis parameter struktural untuk setiap konfigurasi juga ditinjau dari aspek perpindahan panas dan massa.

Metode : Konfigurasi desain struktur penukar panas memainkan peran penting dalam meningkatkan efek perpindahan panas dan massa di dalam metal hydride. Akibatnya, berbagai konfigurasi desain metal hydride yang berbeda telah diselidiki dalam penelitian eksperimental dan simulasi untuk peningkatan laju absorpsi/desorpsi. Ringkasan dan tinjauan desain hidrida logam secara garis besar dapat diklasifikasikan ke dalam lima kategori yang berbeda, yaitu: 1) desain tabung pendingin, 2) desain sirip, 3) peningkatan dan pengaturan tabung pendingin, 4) desain geometris lainnya, dan 5) pemanfaatan bahan perubahan fasa.

Hasil :

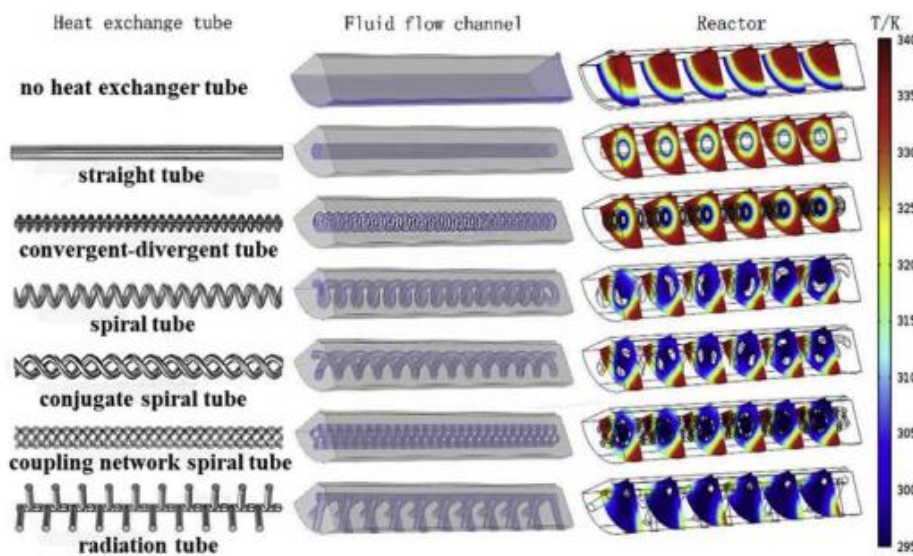


Gambar 2.6 Gambar skema, konsentrasi hidrogen rata-rata dan suhu unggun hidrida logam dengan berbagai opsi pertukaran panas [5]

- Untuk lima kategori ini, desain tabung pendingin dan sirip memiliki volume kecil dan penalti kepadatan sambil meningkatkan perpindahan panas memengaruhi di MHB. Karena itu, ini dua poin menduduki posisi utama dalam domain studi MHB. Meskipun peningkatan jumlah tabung pendingin akan membawa peningkatan kinerja yang signifikan, perubahan konfigurasi ini juga akan menyebabkan pengaruh negatif dari berat dan densitas sistem yang berlebihan.

- Dibandingkan dengan metode tradisional di atas, pemanfaatan PCM di MHB dapat menghemat pemborosan energi panas selama proses penyerapan/desorpsi.
- Untuk meningkatkan perpindahan panas dan mengurangi hambatan termal di MHB

Saran penelitian selanjutnya:



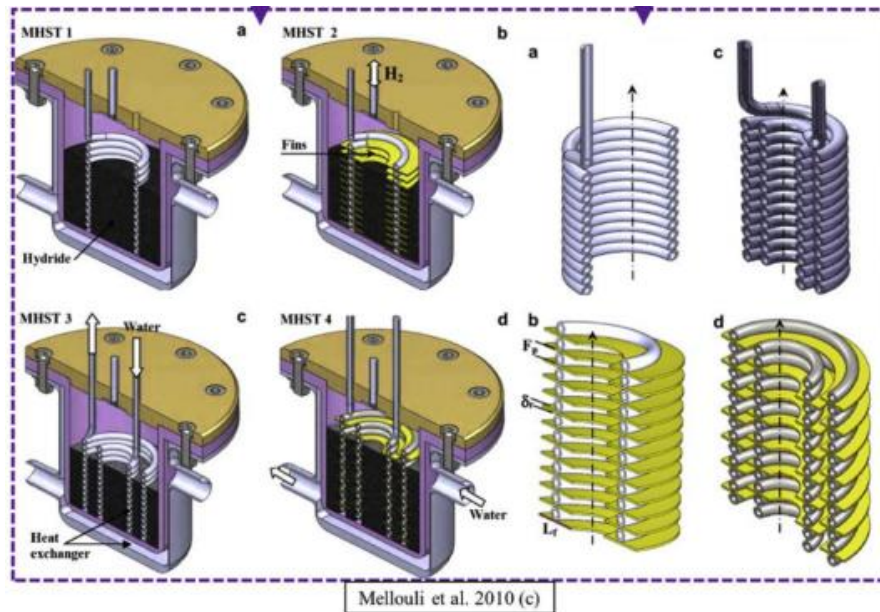
Gambar 2.7 Tipe tube pendingin dan distribusi temperatur MHB [5]

Untuk saluran spiral dan tabung radiasi dianggap pilihan terbaik. Namun integrasi beberapa konfigurasi direkomendasikan untuk pengoptimalan lebih lanjut. Misalnya, konsep desain tube bercabang dapat digunakan dalam HE Spiral, dan penukar panas baru dapat diperoleh dengan cara ini. Untuk saluran radiasi, konfigurasi berbentuk pohon dapat digunakan untuk mencapai area perpindahan panas yang lebih tinggi.

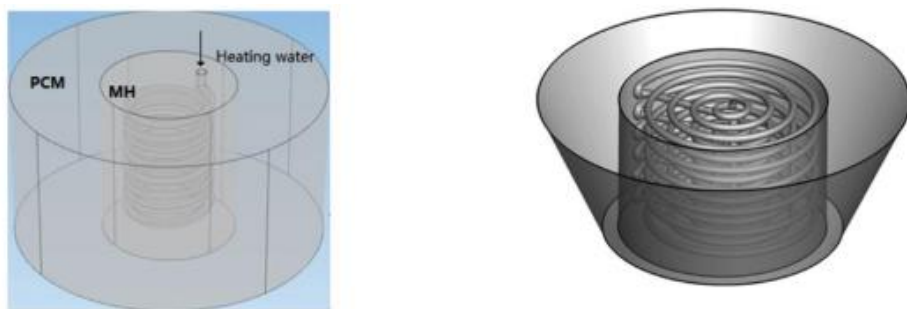
Untuk desain sirip, konfigurasi sirip kerucut memiliki penungkatan yang paling efektif. Dalam studi lebih lanjut, sirip dari berbagai bentuk dapat di terapkan ke MHB, seperti hemispherical dan prismatic sirip. Selain itu ada kombinasi yang tak terhitung banyaknya untuk pilihan susunan dan geometri sirip yang membuatnya lebih sulit untuk menemukan skema sirip terbaik.

Untuk itu bidang dari PCM pemanfaatan di sebuah MHB, di samping itu bentuk kerucut dan bola, geometri yang lebih kompleks dapat diselidiki dan dibahas di masa depan. Integrasi PCM dan teknik pertukaran panas tradisional (tabung dan

sirip pendingin) harus dipertimbangkan dalam pekerjaan optimasi. Bahkan jika beberapa penelitian telah mengusulkan penukar panas hibrida berdasarkan kombinasi jaket PCM dan tabung spiral, dua bagian yang terdiri dari proses pertukaran panas adalah mandiri. Itu Selanjutnya riset kerja sebaiknya memajukan itu interaksi kedua bagian tersebut.



Gambar 2.8 Berbagai macam perbaikan konfigurasi [5]



Gambar 2.9 (a) Tabung spiral dengan PCM dan (b) jaket PCM berbentuk kerucut dengan tabung spiral [5]

5. A study on ideal distance between staggered metal hydride tanks in forced convection (Ismail Hilali et al (2017))

Penelitian yang dilakukan oleh **Ismail Hilali et al (2017)** meneliti mengenai pengaruh tekanan kesetimbangan, temperatur udara ambient, dan kecepatan

terhadap jarak ideal tangki metal hydride yang digunakan untuk penyimpanan hydrogen dalam aplikasi sel bahan bakar secara numerik dan teori dengan aplikasi Autodesk CFD Simulation. Pada penelitian ini material metal menggunakan LaNi_5 . Penelitian ini menggunakan variasi temperatur lingkungan, Reynold Number, dan tekanan kesetimbangan. Penelitian ini menghasilkan temuan bahwa jarak ideal diantara tangki MH yang dapat digunakan untuk memaksimalkan efisiensi dari integrasi antar metal hydride tank tanpa meningkatkan energy tambahan.

6. CFD investigation on performance enhancement of metal hydride hydrogen storage vessels using heat pipes (C.A. Chung et al (2015))

Selain itu pada penelitian yang dilakukan oleh C.A. Chung et al (2015) bertujuan untuk memprediksi kinerja dari penyimpanan hidrogen dengan metode numerik untuk mensimulasikan perilaku fluida di dalam tangki metal hydride yang menimbulkan panas ketika pengisian. Simulasi pada penelitian ini menggunakan software ANSYS Fluent dengan LaNi_5 sebagai media penyimpanannya. Model pada penelitian ini di validasi menggunakan perbandingan dengan data eksperimen dalam literatur sebelumnya yang membuktikan efektivitas pipa panas untuk meningkatkan perpindahan panas yang terjadi antara metal hydride tank dan udara luar tangki. Metode yang digunakan dengan membandingkan desain tangki dengan dan tanpa pipa panas dan sirip internal. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa pipa panas sangat mengubah distribusi temperatur, kandungan hidrogen dan tekanan kesetimbangan di atas lapisan metal.

7. Numerical comparison of heat-fin- and metal-foam-based hydrogen storage beds during hydrogen charging process (Saad Farekho et al (2015))

Pada penelitian Saad Ferekho et al (2015) mengenai efek komponen tambahan untuk peningkatan perpindahan panas internal dengan sirip dan metal foam based pada saat pengisian hidrogen. Penelitian ini menerapkan kondisi transien berdasarkan hasil eksperimen selama pengisian hidrogen. Hasilnya kedua model menunjukkan konduktivitas thermal yang efektif dengan menggunakan metal foam based dengan porositas optimal.

8. Simulation of hydrogen absorption/desorption on metal hydride LaNi₅-H₂: Mass and heat transfer (Atef Chibani (2018))

Kemudian pada penelitian Atef Chibani (2018) mengenai stimulasi reaksi hidrogen pada LaNi₅ dengan penekanan khusus pada perpindahan massa dan panas selama proses penyerapan dan desorpsi. Simulasi numerik dilakukan dengan internal kondisi yang berbeda dan divalidasi dengan hasil eksperimen. Ditemukan bahwa kapasitas penyerapan/desorpsi hidrogen meningkat secara proporsional dengan ketebalan logam (yaitu penurunan bagian internal reaktor).

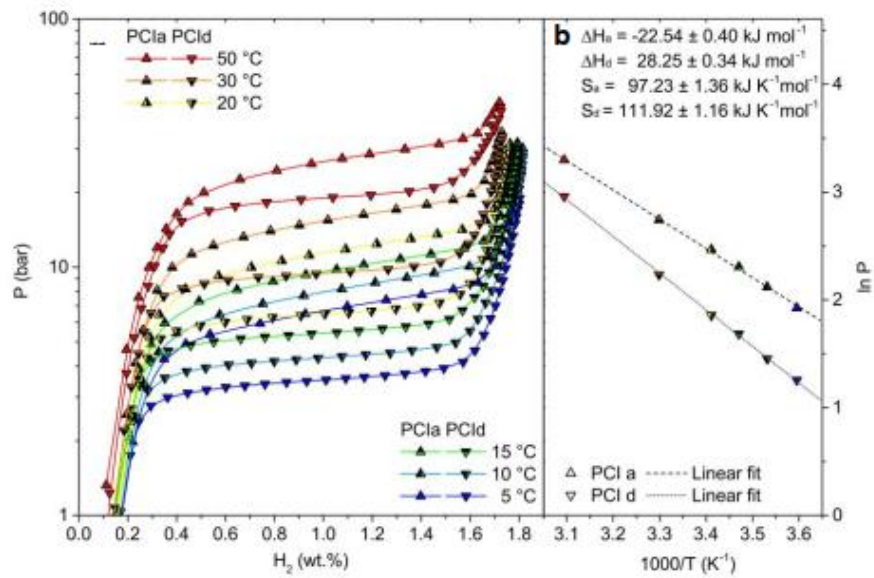
9. Development of a modular room-temperatur hydride storage system for vehicular applications (Capurso G. et al (2015))



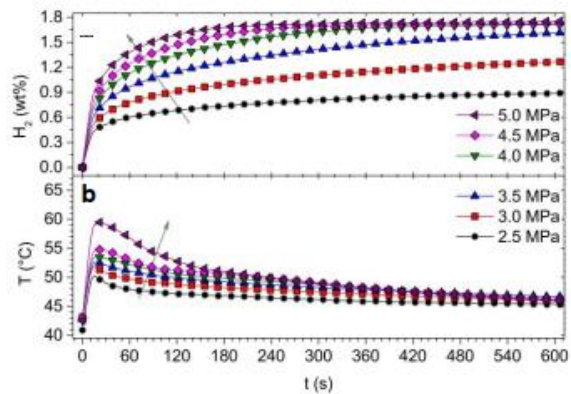
Gambar 2.10 Geometri untuk pengujian dengan volume 285 cm³ yang dapat menampung 961 gram metal hydride [7]

Melakukan eksperimen pengembangan sistem tangki hidrogen kendaraan pada temperatur kamar, menggunakan metal hydride intermetalik AB₂ (Hydroalloy C5). Material hydroalloy C5 terdiri dari Al 0.27%, Ti 27.13%, V 13.95%, Mn 51.31%, Fe 2.98%, Zr 2.97%. Geometri tangki hidrogen berbentuk silinder B1 pada 20 MPa (diameter 10 cm dan panjang 35 cm) dengan massa 2.57 kg seperti ditunjukkan pada gambar 2.10.

Skema pengujiannya hydrogen dimasukkan kedalam tangki dengan variasi tekanan yaitu 2.5 MPa, 3.0 MPa, 3.5 MPa, 4.0 MPa, 4.5 MPa, dan 5 MPa dan pendinginan menggunakan temperatur ruangan yaitu 40°C. Hasil dari penelitian ini akan menjadi validasi penelitian ini, validasi meliputi temperatur



Gambar 2.11 PCI untuk Hydroalloy C5 dalam temperatur 5-50°C (a) alur realtif van't hoff (b) [9]

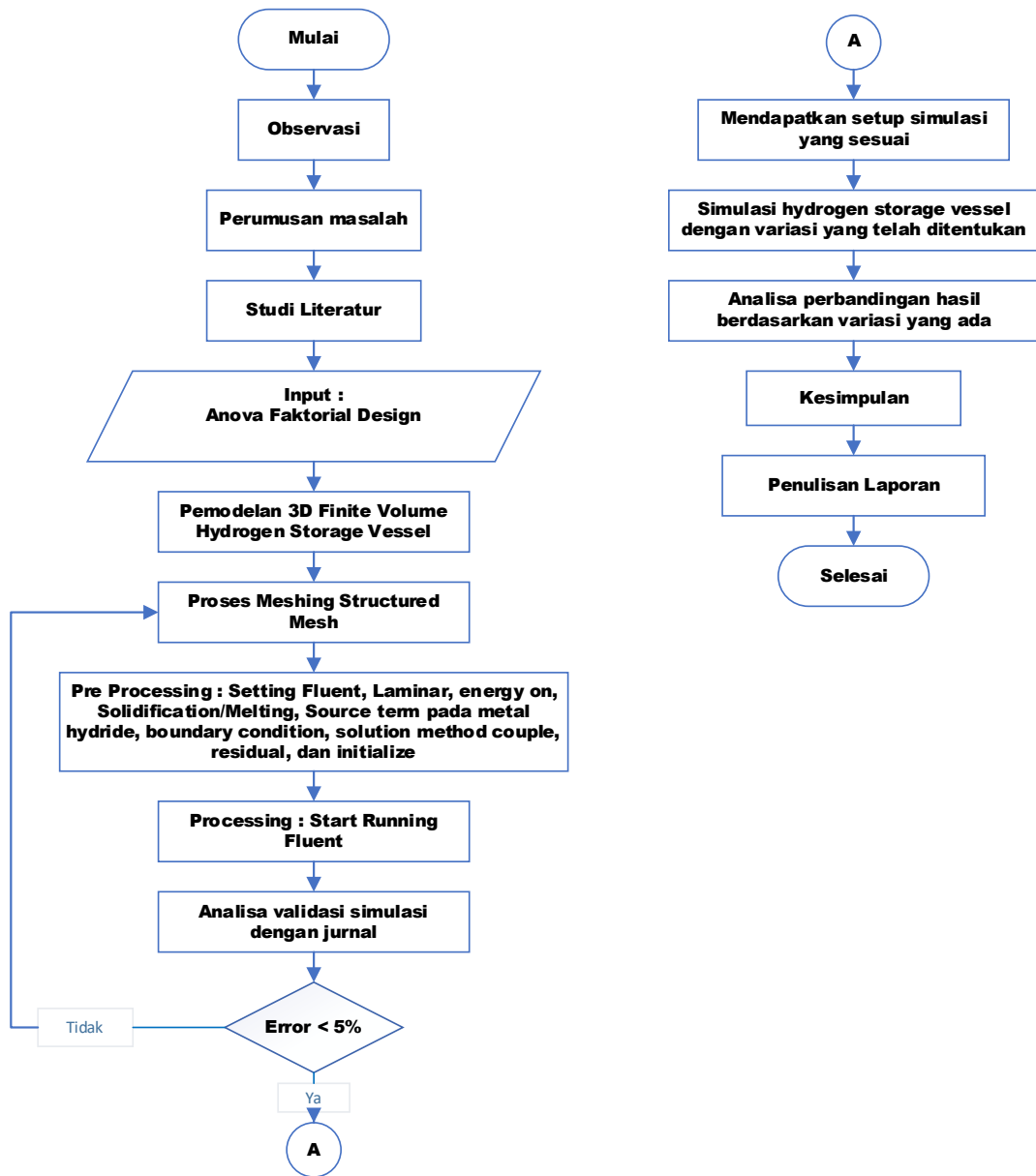


Gambar 2.12 Kurva absorpsi untuk siklus a/d berturut-turut mulai dari 40 C dan tekanan yang berbeda (a) dan profil temperturnya (b) [7]

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab metodologi akan dijelaskan mengenai *flowchart* dari penelitian yang dilakukan, dimulai dari studi literatur sampai dengan hasil yang diinginkan yaitu mendapatkan parameter yang berpengaruh terhadap respon anova. Tahapan-tahapan dan metodologi yang digunakan akan dibahas pada bab ini.

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1.1 Observasi

Observasi merupakan langkah pertama yang dilakukan penulis. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk menentukan ruang lingkup permasalahan yang akan diteliti. Pada tahap ini observasi difokuskan pada lingkup pendinginan *hydrogen storage vessel*.

3.1.2 Perumusan Masalah

Setelah dilakukan observasi, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah perumusan masalah. Dalam hal ini permasalahan yang dicoba untuk diteliti oleh penulis adalah proses penyimpanan dan pelepasan hydrogen dari tangki mengakibatkan reaksi eksotermik (menghasilkan panas) dan endotermik (membutuhkan panas). Besarnya panas kalor yang ditransfer masuk atau keluar dari tangki metal hydride meningkat dengan naiknya laju aliran hidrogen yang diserap. Hal ini akan mengakibatkan penurunan penyerapan dan pelepasan hidrogen.

3.1.3 Studi Literatur

Dilakukan studi literatur untuk mendapatkan informasi secara lebih detail serta menunjang penelitian yang akan dilakukan. Informasi berupa dasar teori mengenai jurnal-jurnal atau referensi penelitian terdahulu proses pengisian hydrogen kedalam hydrogen storage vessel baik simulasi maupun eksperimen. Kemudian, penulis merangkum penelitian terdahulu tersebut dari berbagai sumber.

3.1.4 Penentuan Data Awal

Data awal yang digunakan pada penelitian adalah geometry hydrogen storage vessel, proses aktivasi energy, material dari metal hydride, data reaksi, dan data boundary condition yang akan di inputkan kedalam proses simulasi.

3.1.5 Desain 3D Modeling, Meshing, dan Pre-Processing

Perencanaan desain 3D menggunakan *software* SpaceClaim sehingga mempermudah dalam hal modeling, proses meshing menggunakan *software* Gambit 2.4.6 atau menggunakan Fluent meshing, dan proses pre-processing

menggunakan software Fluent 2020 R2. Kemudian proses simulasi akan dijelaskan lebih detail pada subbab 3.4 dan 3.5.

3.1.6 Analisis Hasil Data dan Kesimpulan

Setelah dilakukan desain dan simulasi akan didapatkan data berupa parameter-parameter penyerapan hydrogen, seperti temperatur atau aktivasi energy terhadap waktu, pressure terhadap hydrogen yang terserap, dan hydrogen yang terserap terhadap waktu. Pada analisis kali ini lebih diutamakan temperatur hydrogen terhadap waktu dikarenakan berfokus terhadap perpindahan panas yang terjadi. Namun demikian, tetap parameter-parameter yang lain juga penting dikarenakan hal-hal tersebutlah yang menentukan simulasi dilakukan dengan skema yang benar ataukah tidak. Kemudian dari beberapa keadaan yang telah dibuat, dapat dianalisa menggunakan metode optimasi design sehingga didapatkan desain yang paling optimal. Setelah itu akan didapatkan beberapa kesimpulan dari penelitian ini.

3.1.7 Penulisan Laporan

Tahap terakhir dari penelitian ini adalah penulisan laporan. Penulisan laporan ini dilakukan berdasarkan sistematika laporan yang ada.

3.2 Geometri Benda Uji

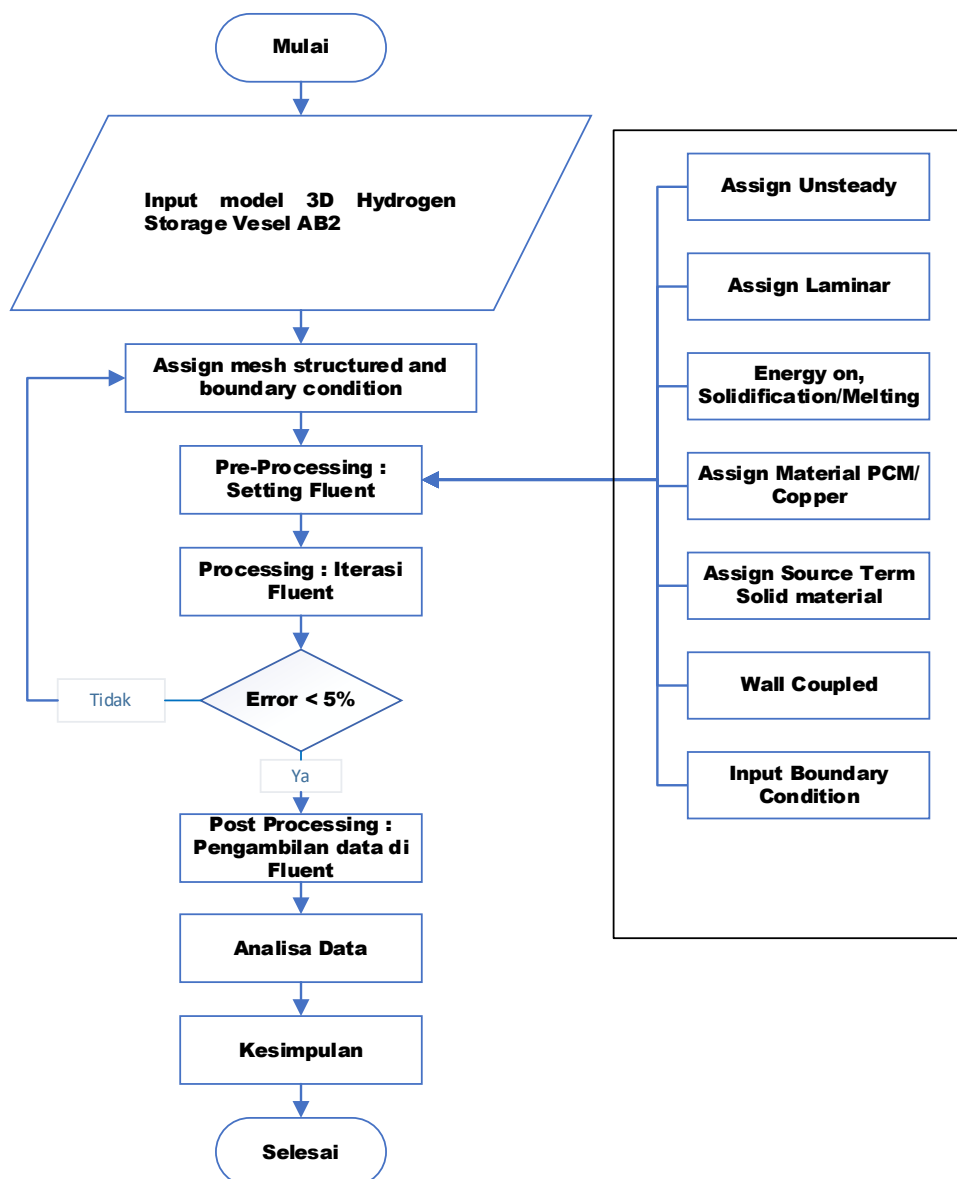
Penelitian secara numerik ini dilakukan dengan menyimulasikan hydrogen kedalam hydrogen storage vessel yang akan menjadi metal hydride. Material metal sendiri menggunakan AB_2 atau dengan hydroalloy c5 yang berkomposisi Al 0.27%, Ti 27.13%, V 13.95%, Mn 51.31%, Fe 2.98%, Zr 2.97% [Capurso G et al 2016]. Geometry metal AB_2 dimodelkan dengan mengasumsikan menjadi porous zone. Ilustrasi gambar dapat dilihat di gambar 3.1.

3.3 Pemodelan dan Simulasi

Penelitian ini adalah dengan menyimulasikan proses pengisian/penyerapan hydrogen pada metal hydride sehingga dari penelitian ini dapat diketahui reaksi yang eksotermik dan endotermik yang terjadi saat pengisian dan pelepasan. Penyimulasian pada penelitian ini memanfaatkan komputasi fluida (CFD) untuk

melakukan pendekatan secara numerik dan membuat geometri model. Pada pemodelannya, model dibuat sedemikian rupa hingga menjadi seperti geometri pada gambar 3.2 serta mendiskritisasikan model (*meshing*) sehingga model dapat diproses dengan CFD. Secara umum, urutan kerja yang dilakukan pada penelitian numerik ada tiga tahapan, yaitu tahap *pre-processing*, *processing*, dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing* jika dinilai sudah benar. Tahapan-tahapan ini dapat dilihat pada diagram alir pada gambar 3.3.

3.3.1 Diagram Alir Simulasi



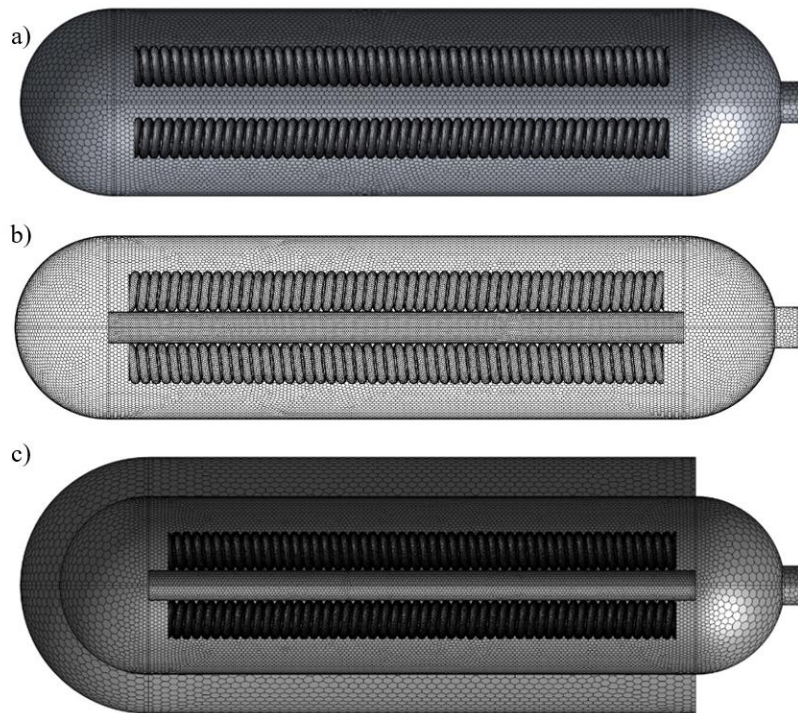
Gambar 3.2 Diagram alir simulasi

Gambar 3.2 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan simulasi penelitian ini. Simulasi menggunakan *software* ANSYS Fluent 2020 R2.

3.3.2 Tahap Pre Processing

Pada tahap *pre-processing* adalah tahapan proses yang paling berpengaruh dalam proses simulasi sehingga pada tahap ini harus benar dalam memodelkan geometri benda. Secara umum proses *pre-processing* di bagi menjadi tiga tahapan proses, yaitu:

- a. Pembuatan model 3D berupa hydrogen storage vessel dan tube mengacu pada geometri gambar 3.1. dimana model *hydrogen storage vessel* dan *tube* dibuat dengan variasi desain yang berbeda. Pembuatan geometri dilakukan dengan membuat beberapa koordinat serta *edge* yang tersedia.

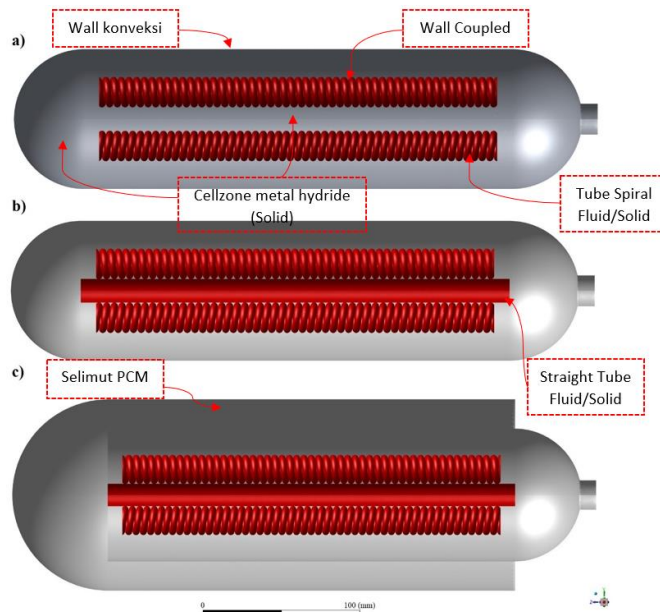


Gambar 3.3 Meshing vessel tipe Poly-hexa a) 4 spiral ambient temperatur b) 4 spiral + 1 straight tube ambient temperatur, dan c) 4 spiral tube + 1 straight tube dengan selimut PCM

- b. Pembuatan *meshing* dilakukan untuk setiap variasi desain yang telah ditetapkan. *Meshing* dilakukan dengan membagi menjadi 2 bagian cellzone yaitu *solid metal hydride* dan *liquid material* PCM. *Meshing* volume yang

digunakan dengan tipe *poly-hexahedral*. Metode meshing yang semakin rapat pada sisi dinding untuk menangkap area buffer layer. Contoh hasil *meshing* pada hydrogen storage vessel untuk percobaan ini, diilustrasikan pada gambar 3.3.

- c. Tahapan selanjutnya adalah pembuatan *boundary condition* untuk dapat diproses pada proses selanjutnya. Tahapan ini adalah tahapan untuk mendefinisikan wall coupled (antara tube spiral dengan metal hydride), wall perpindahan panas konveksi dengan free stream 300 K. contoh hasil *boundary condition* diilustrasikan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Boundary condition a) 4 spiral ambient temperatur b) 4 spiral + 1 straight tube ambient temperatur, dan c) 4 spiral tube + 1 straight tube dengan selimut PCM

Pada simulasi penelitian ini, energi kinetik diabaikan dengan mengganti energi bangkitan estimasi $5\text{MW}/\text{m}^3$ berdasarkan **Visari et al 2009**. Energi bangkitan di setting pada source term di cell zone metal hydride. Energi bangkitan ini yang akan memberikan panas selama 16 detik untuk menggantikan efek dari energi kinetik yang diabaikan. Sehingga *boundary condition* yang digunakan untuk setiap metode adalah sama. Perpindahan panas didasarkan dari material spiral tube dan pendingin luar antara ambient temperatur dan material PCM. Pada spiral tube

dimodelkan sebagai wall coupled yang tersambung dengan metal hydride. Sedangkan pada pendinginan luar dimodelkan sebagai natural convection dengan free stream temperatur adalah 300 K. Namun, jika pendinginan luar menggunakan material PCM, maka dinding antara metal hydride dengan selimut PCM menggunakan coupled dan dinding PCM terluar tetap dimodelkan sebagai pendinginan luar ambient temperatur.

3.3.3 Tahap Post Processing

Pada tahap *post-processing* adalah tahapan proses memulai simulasinya. Simulasi ini harus menyetting parameter-parameter yang digunakan. Parameter yang digunakan pada penelitian ini meliputi:

a. Grid

Langkah pertama yang dilakukan adalah *read* untuk *file* hasil *meshing* berbentuk *.msh*. Kemudian *grid checking* untuk melihat apakah *grid* pada *meshing* tersebut sudah bagus untuk dilakukan *post-processing* apabila tidak sesuai maka akan muncul tulisan *error*, Setelah itu skala ditentukan dalam satuan milimeter (*mm*).

b. Models

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik aliran, meliputi pemilihan model *solver pressure based, unsteady* dan menggunakan model laminar. Selain itu, pada bagian PCM dimodelkan menggunakan *solidification and melting* dengan *mushy zone* adalah 10^5 didasarkan pada penelitian **Mathura Kumar et al 2016**.

c. Materials

Data *properties* dibagi menjadi 2, yaitu material metal hydride AB_2 dengan hydroalloy c5, material fluida dan solid material menggunakan material PCM RT60 dan copper. Pada material PCM perlu menentukan titik perubahan fasa pada material RT60 sesuai dengan data yang ada. Data ini bertujuan untuk penentuan material tersebut dapat berubah fasa dan menjadi isothermal pada temperatur tertentu. Pada material RT60, titik perubahan fasa terjadi pada saat material ini mencapai 326 K (fasa solid) – 335 K (fasa liquid) hal ini didasarkan pada penelitian **Alvaro C et al 2014**.

d. Cell zone

Pada penelitian ini, cell zone digunakan untuk menentukan daerah solid dan fluid. Pada bagian metal hydride diasumsikan sebagai solid yang dapat memberi energi bangkitan sebesar 5MW/m^3 selama 16 detik. Sedangkan pada bagian phase change material (PCM) diasumsikan sebagai fluid yang berbentuk solid ketika diberikan panas yang mencapai fasa isothermalnya akan membuat material ini berubah fasa dan mendinginkan metal hydride dengan iso thermalnya hingga material berubah fasa menjadi liquid.

e. Boundary conditions

Menentukan parameter-parameter dan batasan yang telah dibuat pada tahap *pre-processing* dengan membuat wall coupled dan wall convection. Wall convection terletak pada bagian wall terluar dari metal hydride vessel, sedangkan pada wall coupled terletak diantara metal hydride dan cellzone material solid PCM RT60 atau solid copper. Pada boundary condition wall coupled tidak perlu mensetting kembali, sedangkan pada wall convection memakai data free stream temperature 300K dan koefisien konveksi $300\text{ W/m}^2\text{K}$ berdasarkan penelitian **Li, H et al 2015**.

f. Solution

Solution pada penelitian ini akan menggunakan metode *SIMPLE/Couple* serta *discretization second order* semua. Menggunakan second order agar dapat lebih detail dalam proses simulasi numerik sehingga keakuratannya menjadi tinggi.

g. Initialize

Merupakan langkah awal untuk proses iterasi agar mudah mencapai *convergen*, langkah ini dapat dihitung dari *all zone* atau daerah lainnya seperti wall couple, inlet, ataupun yang lainnya. Dalam kasus ini langkah awal dimulai dari sisi *all zone* karena simulasi mengabaikan kinetik energi sehingga perhitungan yang pertama dilakukan adalah pada semua bagian yang terdapat source term.

h. Monitor residual

Pada proses iterasi berlangsung harga kriteria konvergensi ditentukan agar proses iterasi tidak berlangsung terlalu lama. Kriteria konvergensi ditetapkan sebesar 10^{-6} untuk *continuity*, *x*, *y*, *z momentum*, dan *energy*. Proses iterasi dinyatakan telah *convergen* setelah residualnya mencapai nilai lebih kecil dari nilai

yang telah ditentukan dan terus berlanjut karena proses yang digunakan adalah transient hingga time yang ditentukan.

i. Iterate

Langkah selanjutnya setelah penetapan *monitor residual* adalah *iterate*, yang merupakan langkah perhitungan pada piranti lunak simulasi *CFD* komersial. *Iterate* akan secara otomatis berhenti apabila semua nilai residualnya mencapai nilai lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan dapat dikatakan iterasi sudah *convergen*. Apabila tidak tercapai kriteria *convergen* maka dilakukan tahapan untuk memperbaiki pembuatan *meshing*.

j. Post-processing

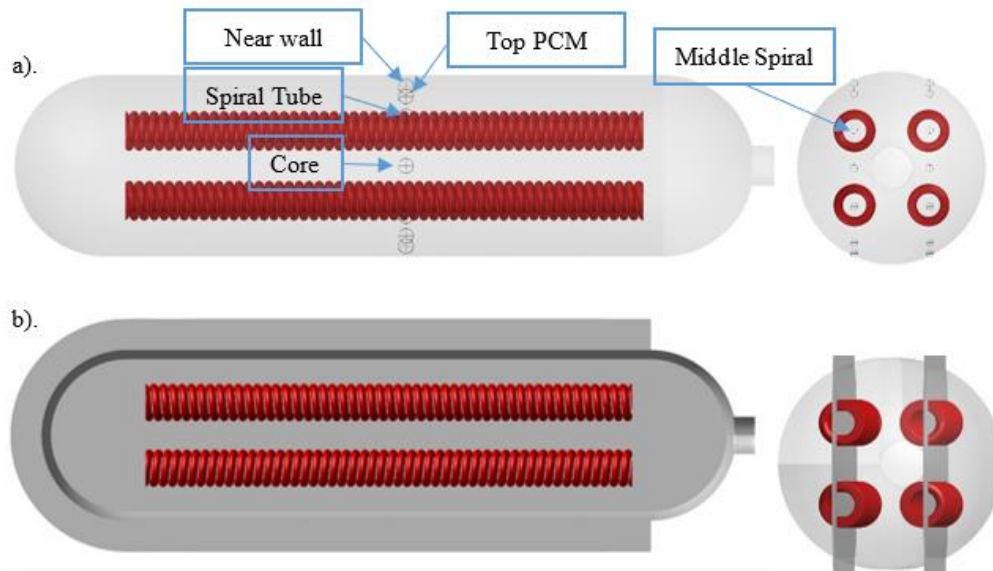
Merupakan penampilan hasil setelah dilakukan iterasi. Hasil tersebut berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa distribusi nilai temperatur terhadap waktu dan liquid fraction terhadap waktu pada beberapa lokasi pengambilan data. Data kualitatif berupa penampilan kontur temperatur pada setiap variasi yang digunakan pada penelitian ini.

3.4 Lokasi Pengambilan Data

Data yang diperoleh dari simulasi numerik berupa data kualitatif dan kuantitatif. Data kuantitatif direpresentasikan dalam bentuk grafik profil temperatur dan liquid fraction, sedangkan data kualitatif direpresentasikan dalam bentuk visualisasi di dalam metal hydride vessel. Visualisasi ini bertujuan untuk memperjelas hasil yang didapatkan dari data kuantitatif, yaitu berupa perbandingan antar 3 faktor 2 level. Penampilan visualisasi dilakukan dengan perangkat lunak metode komputasi fluida komersial dengan pemodelan solidification and melting untuk pemodelan PCM

Pengambilan data kontur dilakukan dengan cara memotong sumbu z pada tengah vessel dan penampang yang dapat memotong spiral tube sehingga dapat terlihat kontur temperatur dan fraksi liquid akibat perubahan fasa dengan pemodelan solidification and melting. Sedangkan pada data grafik diambil pada near wall, atas phase change material, core vessel, tengah spiral, dan dalam phase change material seperti ditunjukkan pada gambar 3.5. Hal ini bertujuan untuk

melihat persebaran distribusi temperatur yang terdapat pada vessel. Pada bagian material phase change material, perpindahan panas akan mengakibatkan material berubah fasa dari solid ke liquid sehingga diperlukan pengambilan data perubahan fasa yang terjadi pada saat simulasi.



Gambar 3.5 Lokasi pengambilan (a) data kuantitatif (b) data kualitatif

3.5 Setting Simulasi CFD untuk Validasi

Parameter		Input
Model	Solver	Pressure Based, Absolute, Transient
		Gravity on coordinate y=-9.81 m/s ²
		Energy on
	Viscous	Laminar
	Solidification/Melting	mushy zone 10 ⁵
Material	Fluid	PCM
	Solid	Copper
		Hydroalloy C5
		Steel
Cell zone Condition	Spiral Tube	Fluid
		Material PCM

	Metal Hydride Zone	Solid
		Material Hydroalloy C5
		Source Term 5MW/m ³
	Zone in	Solid
		Hydroalloy C5
		Tanpa Source Term
Boundary Condition	Wall coupled	no input parameter
	wall convection	Setting convection
		Free stream temperature 300K
		Koef konveksi 300
Solution Methods	Methods	Couple scheme
		Least Squares Cell Based
		Pressure first order
		momentum first order
		Energy second order
	Residual	Continuity 10 ⁻⁶
		X,Y,Z momentum 10 ⁻⁶
Energy 10 ⁻⁶		
Report definition	Temperature vs time	Near wall, top pcm, core, spiral tube, middle spiral tube
	Liquid Fraction vs time	Spiral tube
Initialization	Standart Initialization	All zone

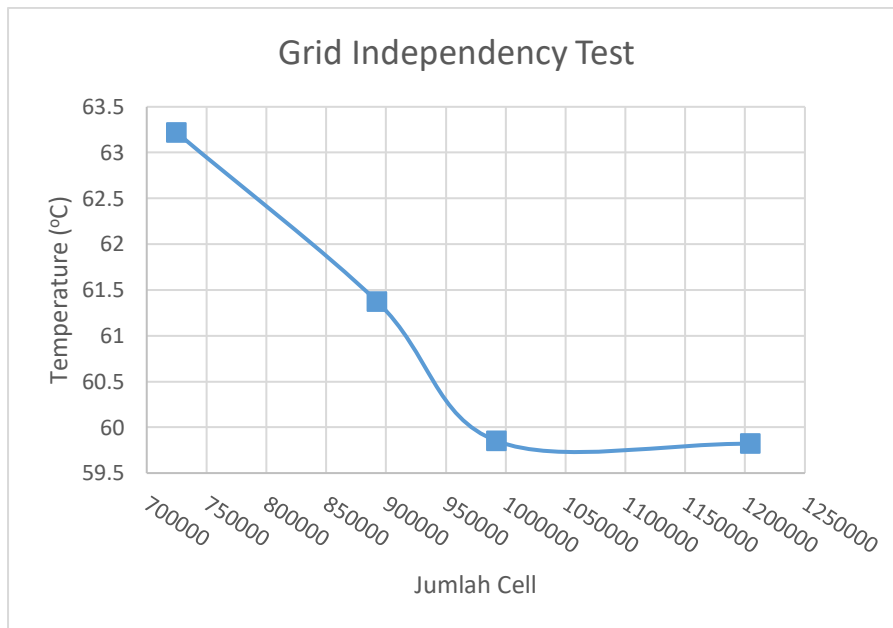
3.6 Analisa Grid Independency

Dari beberapa hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak CFD, telah dilakukan variasi *mesh* pada model hydrogen storage vessel. Variasi *mesh* dilakukan pada bagian *zone solid* PCM dan *zone* material metal hydride AB₂ yang telah dibuat. Variasi *mesh* dibuat sebanyak empat buah dengan kerapatan *mesh* yang berbeda-beda.

Analisa *grid independency* menggunakan model laminar dengan menggunakan source term estimasi 5MW/m³ (Visaria et al., 2010) selama 16 detik kemudian menganalisa temperatur per waktu untuk setiap variasi *mesh* yang dibuat pada posisi y=0 mm atau core sebagai data acuan, sehingga dapat dilihat pada tabel 3.3.

Tabel 3.1 Grid independency ditinjau dari Temperatur saat time 16s

No	Jumlah <i>cell</i>	Peak Temperatur (°C)	Peak Temperatur Experiment (°C)	Error (%)
1	723957	63.22	60	5.36%
2	892124	61.37		2.28%
3	992851	59.85		0.25%
4	1228642	59.82		0.3%



Gambar 3.5 *Grid independency* Temperature vs cell (Capurso et al., 2016)

Berdasarkan tabel 3.3 disajikan data perbandingan tiap variasi *mesh* terhadap nilai temperatur lokal maksimum, sehingga didapatkan mesh nomor 3 dipilih untuk pemodelan penelitian ini. Mesh nomor 3 ini dipilih karena mesh ini sudah tidak memiliki perubahan nilai temperature maksimum jika ditambahkan jumlah meshnya dan dengan nilai jumlah cell yang sedikit.

3.7 Optimasi Desain dengan ANOVA

Untuk mendapatkan design yang optimal dilakukan analisa berupa grafik perbandingan hasil uji setiap variasi sesuai dengan desain eksperimen. Desain eksperimen akan menggunakan metode ANOVA 3 faktor, 2 level. Variasi yang akan dibuat dalam penelitian ini adalah bentuk, ukuran geometri dari tube

pendingin dan material pendinginnya. Penggunaan material pendingin PCM akan divariasikan menggunakan 3 bentuk ukuran yang berbeda.

Tabel 3.2 Variasi pengujian simulasi ANOVA 3 faktor 2 level

No	Faktor			Respon Temperatur					
	A	B	C	Near Wall	Top PCM	Core	Middle Spiral	On spiral	Maks Temp
1	1	1	1						
2	1	1	2						
3	1	2	1						
4	1	2	2						
5	2	1	1						
6	2	1	2						
7	2	2	1						
8	2	2	2						

Faktor A adalah bentuk pendingin dalam dengan level 1 empat spiral pendingin dan level 2 empat spiral pendingin + satu straight tube. Faktor B material pendingin dengan level 1 adalah copper dan level 2 adalah material phase change material RT60 (PCM). Faktor C adalah pendinginan luar dengan level 1 ambient temperature dan level 2 material PCM RT60. Sesuai dengan tabel 3.2, pada variasi 111 artinya pendingin dalam 4 spiral tube dengan material copper dan pendinginan luar ambient temperatur. Pada variasi 112 adalah pendingin dalam menggunakan empat spiral pendingin dengan material copper dan pendingin luar material PCM RT60. Pada variasi 121 adalah pendingin dalam menggunakan empat spiral pendingin dengan material PCM RT60 dan pendingin luar menggunakan ambient temperatur. Pada variasi 122 adalah pendingin dalam dan pendingin luar menggunakan material pendingin PCM RT60. Pada variasi 211 adalah variasi pendinginan dalam empat spiral dan tube lurus dengan material copper dan pendinginan luar ambient temperatur. Pada variasi 212 adalah variasi pendingin dalam empat spiral dan tube lurus dengan material copper serta pendingin luar material PCM RT60. Pada variasi 221 adalah variasi pendingin dalam empat spiral dan tube lurus dengan material PCM RT60 dan pendingin luar ambient temperatur.

Kemudian, pada variasi 222 adalah pendingin dalam empat spiral dan tube lurus serta pendingin luar menggunakan material pendingin PCM RT60, seperti di tunjukkan pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Tabel variasi untuk anova

No	Variabel	Level 1	Level 2
1	Pendingin Dalam (A)	4 Spiral Pendingin	4 Spiral + 1 Straight Tube Pendingin
2	Material pendinginan (B)	non PCM	PCM
3	Pendingin Luar (C)	Ambient Temp.	Material PCM

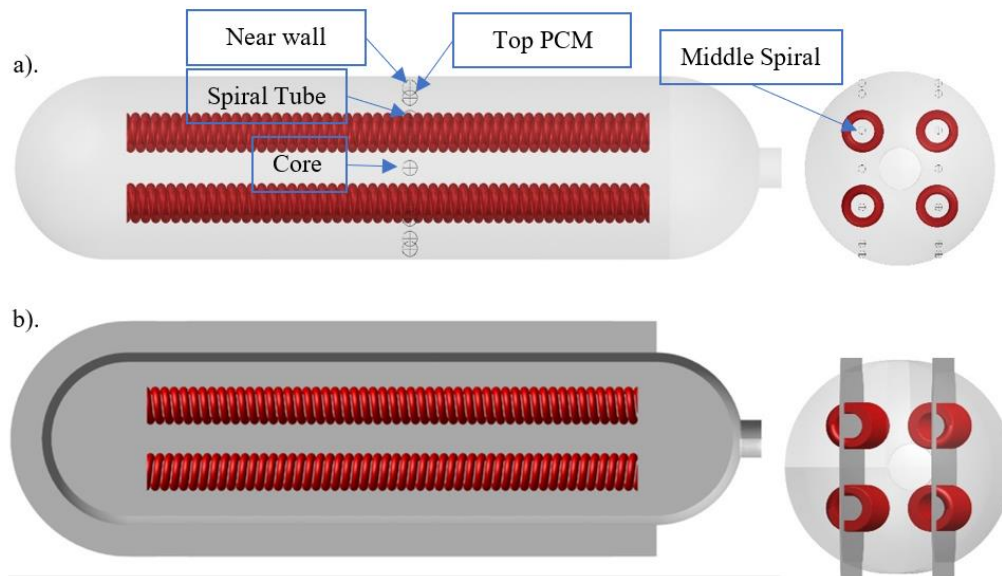
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas secara terperinci mengenai analisa dan pembahasan data hasil simulasi numerik. Data yang diperoleh dari simulasi numerik berupa data kualitatif dan kuantitatif. Data kuantitatif direpresentasikan dalam bentuk grafik profil temperatur dan liquid fraction, sedangkan data kualitatif direpresentasikan dalam bentuk visualisasi di dalam metal hydride vessel. Visualisasi ini bertujuan untuk memperjelas hasil yang didapatkan dari data kuantitatif, yaitu berupa perbandingan antar 3 faktor 2 level. Penampilan visualisasi dilakukan dengan perangkat lunak metode komputasi fluida komersial dengan pemodelan solidification and melting untuk pemodelan PCM dengan estimasi heat generation 5 MW/m^3 sesuai dengan penelitian **Visaria et al 2010**.

Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan pendingin dalam, material pendingin, dan pendingin luar masing-masing 2 level faktor. Pada level faktor 1 menggunakan pendinginan dalam 4 spiral, material pendinginan non PCM (Cooper), dan pendinginan luar ambient temperatur. Sedangkan pada level faktor 2 menggunakan pendinginan dalam 4 spiral pendingin + 1 straight tube, material pendingin dan pendingin luar menggunakan PCM RT60.

Pengambilan data kontur dilakukan dengan cara memotong sumbu z pada tengah vessel dan penampang yang dapat memotong spiral tube sehingga dapat terlihat kontur temperatur dan fraksi liquid akibat perubahan fasa dengan pemodelan solidification and melting. Sedangkan pada data grafik diambil pada near wall, atas phase change material, core vessel, tengah spiral, dan dalam phase change material seperti ditunjukkan pada gambar 4.1. Hal ini bertujuan untuk melihat persebaran distribusi temperatur yang terdapat pada vessel. Pada bagian material phase change material, perpindahan panas akan mengakibatkan material berubah fasa dari solid ke liquid sehingga diperlukan pengambilan data perubahan fasa yang terjadi pada saat simulasi.

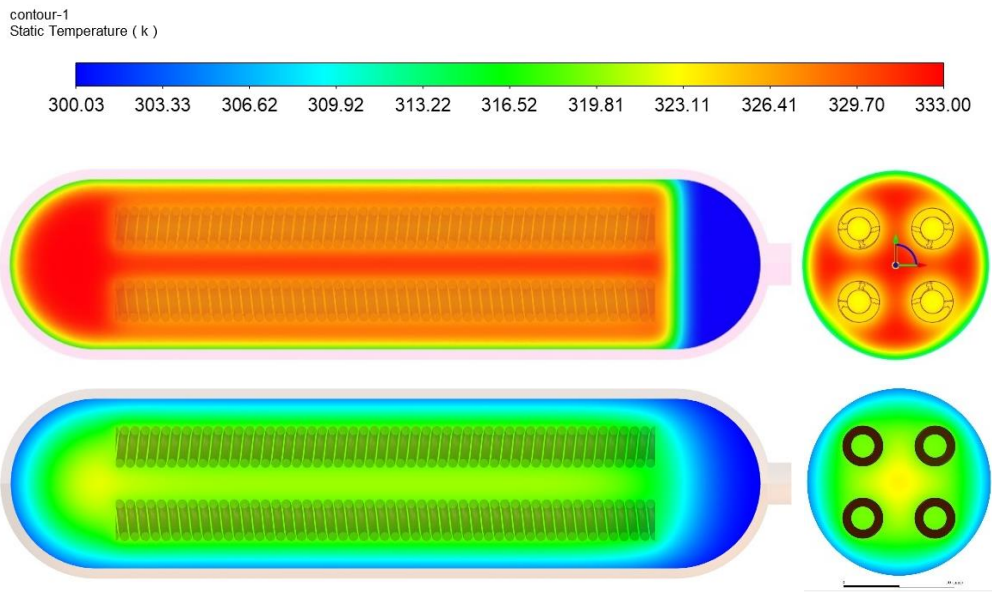


Gambar 4.1 Lokasi pengambilan (a) data kuantitatif (b) data kualitatif

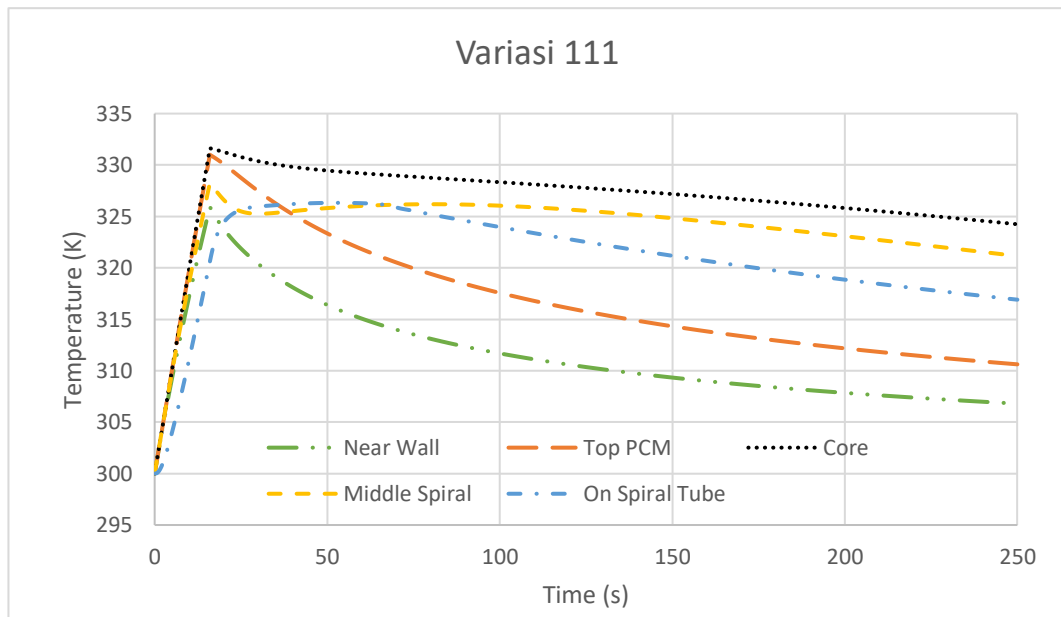
4.1 Variasi 111

Variasi 111 adalah variasi menggunakan pendinginan dalam 4 spiral dengan material non phase change material (copper) dan pendinginan luar menggunakan ambient temperatur. Perpindahan panas yang bekerja pada keadaan ini adalah konduksi pada material solid copper dan konveksi dari vessel ke free stream temperatur.

Berdasarkan hasil simulasi variasi 111 dapat dilihat pada gambar 4.2 (a) bahwa kontur temperatur pada waktu 30 detik menunjukkan warna merah (333.71K) merata pada bagian metal hydride vessel, warna hijau (321.66 K) pada bagian wall ambient temperature, dan warna kuning (326.48 K) pada spiral tube. Setelah di simulasi selama 250 detik terjadi perpindahan panas yang keluar dari vessel, terlihat pada gambar (b) penurunan paling banyak terjadi pada bagian wall ambient temperatur. Sedangkan pada daerah core, perpindahan panas dari metal hydride tidak efektif karena masih terdapat warna merah atau estimasi 327 K. Pada bagian spiral terlihat pada gambar kontur masih berwarna kuning atau estimasi di 319 K. Spiral pada simulasi variasi ini cukup dapat menyerap panas, terlihat pada kontur terdapat degradasi warna yang terjadi.



Gambar 4.2 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 111



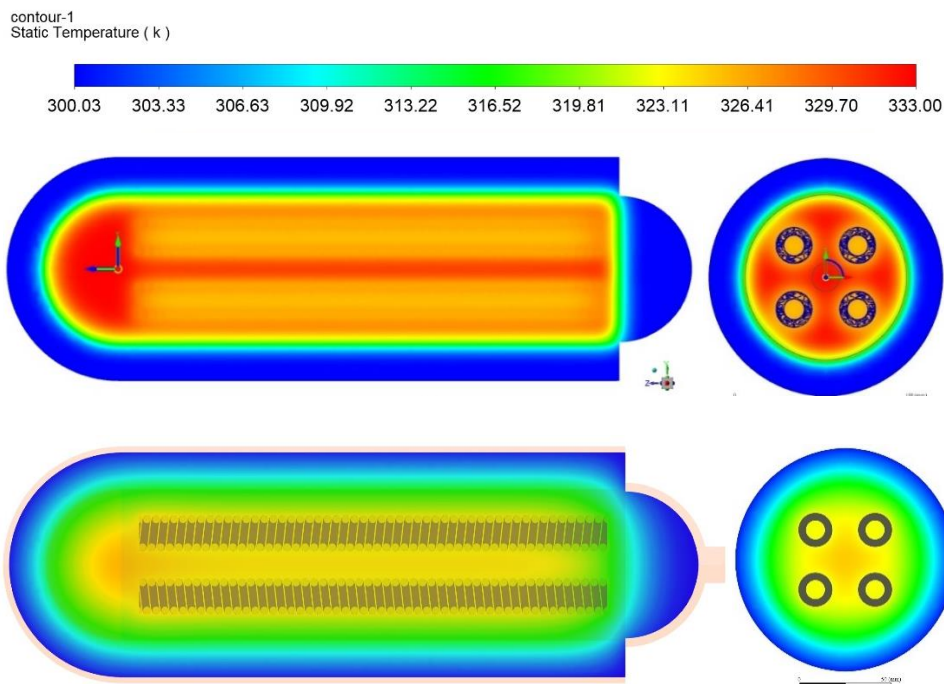
Gambar 4.3 Grafik Temperature vs Time pada variasi 111

Gambar 4.3 menunjukkan grafik temperatur vs time pada variasi 111 yang terjadi akibat proses perpindahan panas pada storage vessel. Temperatur pada t_0 adalah 300 K kemudian naik hingga titik tertinggi 60°C atau 333 K pada sekitar 16 detik kemudian turun hingga t_{250} . Lokasi pengambilan ini diambil pada beberapa

titik, yaitu pada near wall, top pcm, core, middle pcm, dan dalam pcm. Temperatur t_{250s} pada near wall adalah paling rendah (308K) daripada lokasi yang lain, dan core memiliki temperatur yang paling tinggi (322K). Hal ini berarti proses perpindahan panas tidak cukup efektif untuk pendinginan bagian dalam storage vessel.

4.2 Variasi 112

Variasi 112 adalah variasi menggunakan pendinginan dalam 4 spiral dengan material non phase change material (copper) dan pendinginan luar menggunakan material phase change material RT60. Perpindahan panas yang bekerja pada keadaan ini adalah konduksi pada material solid copper dan material phase change material RT60 di selimut vessel. Selain itu, konveksi juga terjadi dari material RT60 ke free stream.



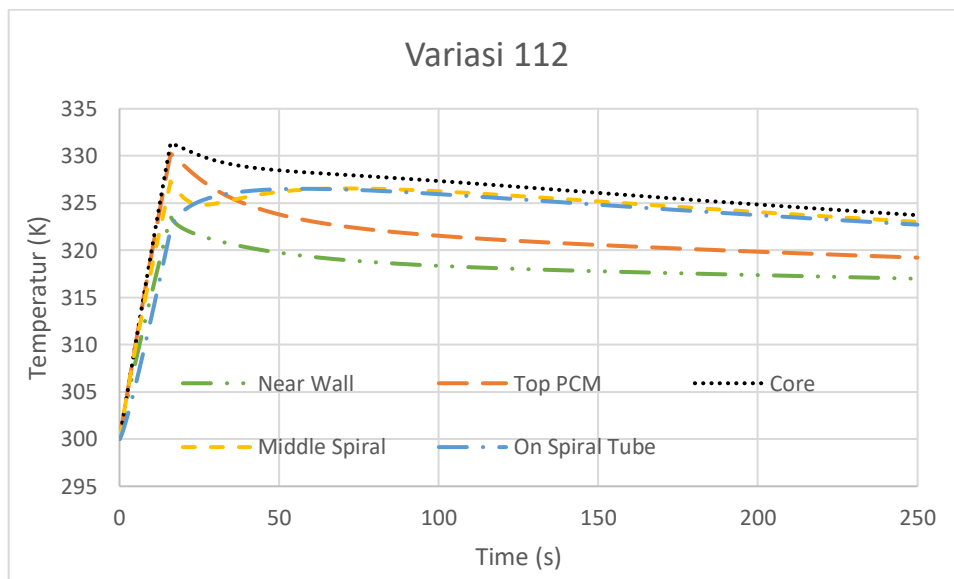
Gambar 4.4 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 112

Berdasarkan hasil simulasi variasi 112 dapat dilihat pada gambar 4.4 (a) bahwa kontur temperatur pada waktu 30 detik menunjukkan warna merah (333.71K) merata pada bagian metal hydride vessel, warna hijau (321.66 K) pada

bagian penyambung material phase change material dengan metal hydride, dan warna orange (326.48 K) pada spiral.

Setelah di simulasi selama 250 detik terjadi perpindahan panas yang keluar dari vessel ke RT60. Namun, perpindahan panas yang terjadi tidak dapat mengubah fasa dari solid ke liquid terlihat pada gambar (b) penurunan paling banyak terjadi pada bagian material pcm dengan metal hydride vessel. Sedangkan pada daerah core, perpindahan panas dari metal hydride tidak efektif karena masih terdapat warna merah atau estimasi 327 K. Pada bagian spiral terlihat pada gambar kontur masih berwarna orange atau estimasi di 324 K.

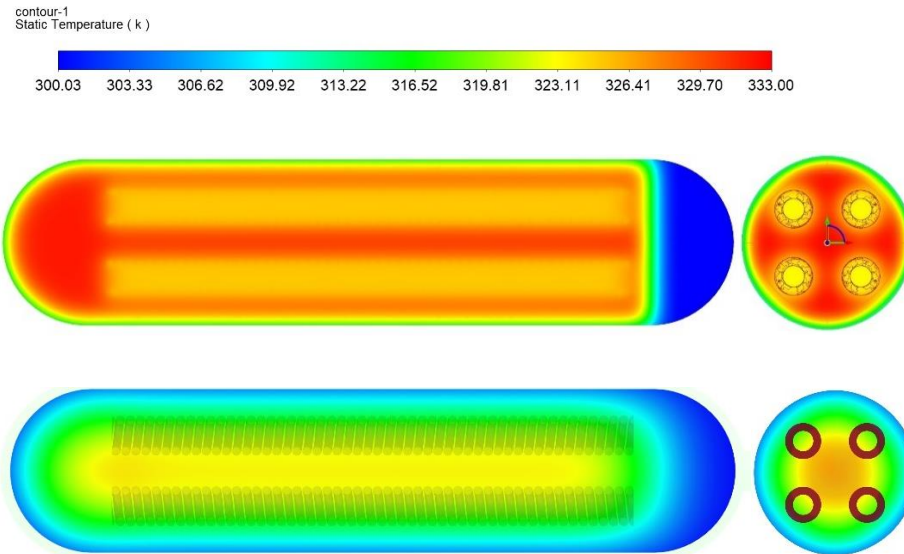
Gambar 4.5 menunjukkan grafik temperatur vs time pada variasi 112 yang terjadi akibat proses perpindahan panas yang terjadi pada storage vessel. Temperatur pada t_0 adalah 300 K kemudian naik hingga titik tertinggi 60°C atau 333 K pada sekitar 16 detik kemudian turun hingga t_{250} . Lokasi pengambilan ini diambil pada beberapa titik, yaitu pada near wall, top pcm, core, middle pcm, dan dalam pcm. Temperatur t_{250s} pada near wall adalah paling rendah (317K) daripada lokasi yang lain, dan core memiliki temperatur yang paling tinggi (324K). Hal ini berarti proses perpindahan panas tidak cukup efektif untuk pendinginan bagian dalam storage vessel.



Gambar 4.5 Grafik Temperature vs Time pada variasi 112

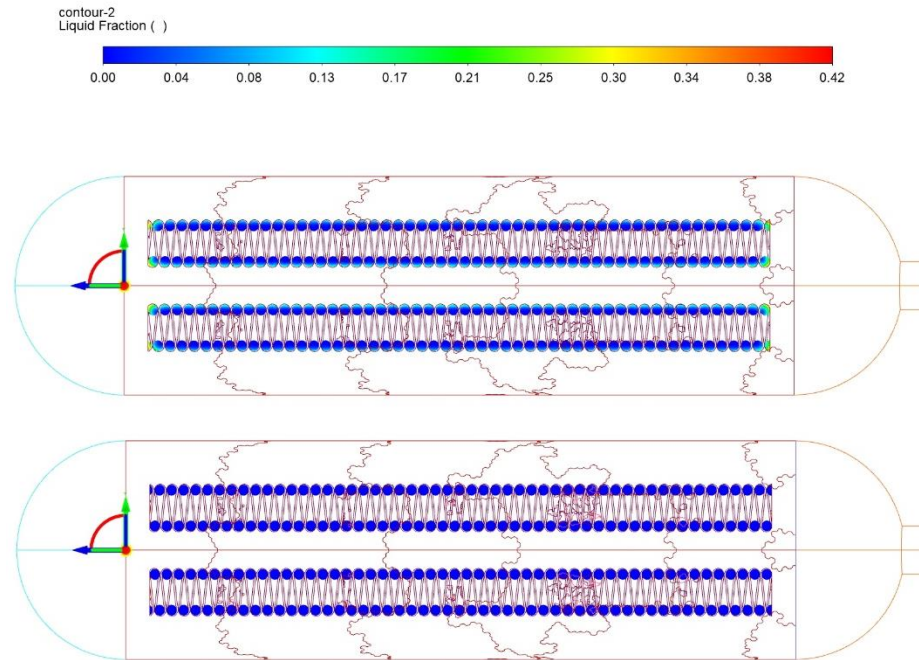
4.3 Variasi 121

Variasi 121 adalah variasi menggunakan pendinginan dalam 4 spiral dengan material phase change material RT60 dan pendinginan luar ambient temperatur. Perpindahan panas yang bekerja pada keadaan ini adalah konduksi pada material solid copper dan konveksi dari vessel ke free stream temperatur.

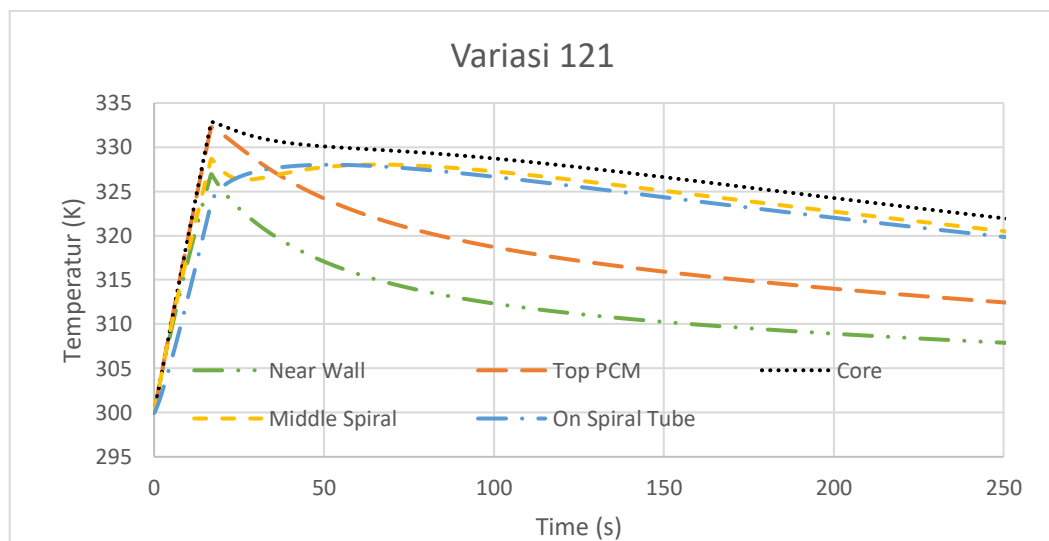


Gambar 4.6 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 121

Berdasarkan hasil simulasi variasi 121 dapat dilihat pada gambar 4.6 (a) bahwa kontur temperatur pada waktu 30 detik menunjukkan warna merah (333.1K) merata pada bagian metal hydride vessel, warna hijau (320.66 K) pada bagian penyambung material phase change material dengan metal hydride, dan warna kuning (325 K) pada spiral. Fraction liquid terjadi di variasi ini, dengan lokasi fraksi liquid pada bagian sisi luar tube spiral yang terkena perpindahan panas yang tinggi seperti ditunjukkan pada gambar 4.7 (a). fraction liquid terjadi akibat temperatur PCM sudah menyentuh fase isothermal yang dapat mengubah fraction solid menjadi liquid. Namun fase ini terjadi sangat cepat, yaitu pada range antara detik ke 30 hingga 70 seperti ditunjukkan pada gambar 4.8. Terlihat pada grafik variasi 121 pada line on pcm sempat mengalami fasa isothermal atau tidak terjadi kenaikan temperatur.



Gambar 4.7 (a) Profil fraksi liquid saat 30s, dan (b) Profil fraksi liquid saat 250s variasi 121



Gambar 4.8 Grafik Temperature vs Time pada variasi 121

Setelah di simulasi selama 250 detik terjadi perpindahan panas yang keluar dari vessel ke RT60. Namun, perpindahan panas yang terjadi tidak dapat mengubah fasa dari solid ke liquid terlihat pada gambar (b) penurunan paling banyak terjadi pada bagian bagian dekat dengan dinding ambient temperatur. Sedangkan pada

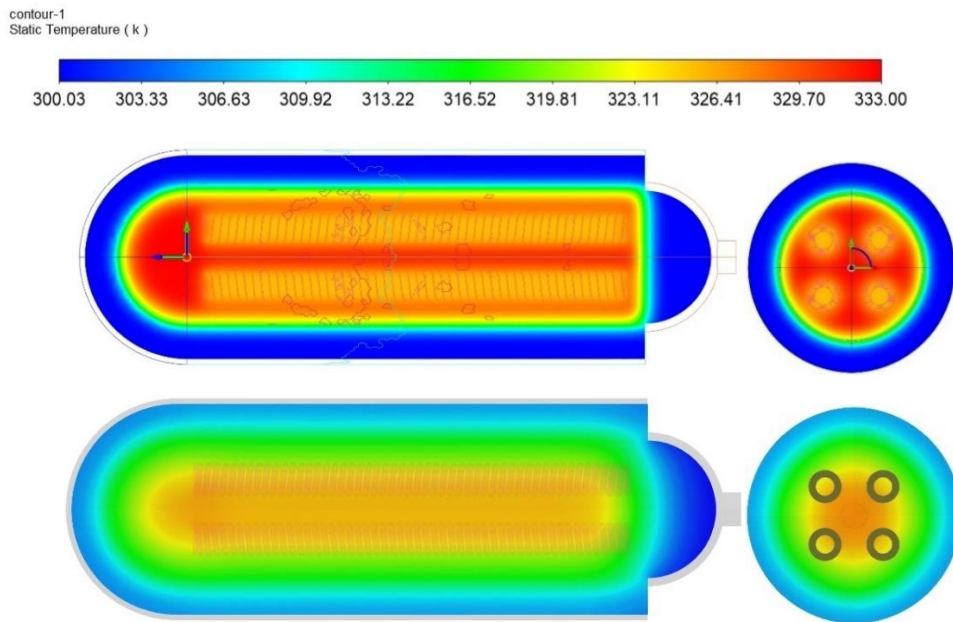
daerah core, perpindahan panas dari metal hydride tidak efektif karena masih terdapat warna merah atau estimasi 324 K. Pada bagian spiral terlihat pada gambar kontur masih berwarna orange atau estimasi di 321 K.

Gambar 4.8 menunjukkan grafik temperatur vs time pada variasi 121 yang terjadi akibat proses perpindahan panas yang terjadi pada storage vessel. Temperatur pada t_0 adalah 300 K kemudian naik hingga titik tertinggi 60°C atau 333 K pada sekitar 16 detik kemudian turun hingga t_{250} . Lokasi pengambilan ini diambil pada beberapa titik, yaitu pada near wall, top pcm, core, middle pcm, dan dalam pcm. Temperatur t_{250s} pada near wall adalah paling rendah (307K) daripada lokasi yang lain, dan core memiliki temperatur yang paling tinggi (324K). Hal ini berarti proses perpindahan panas tidak cukup efektif untuk pendinginan bagian dalam storage vessel.

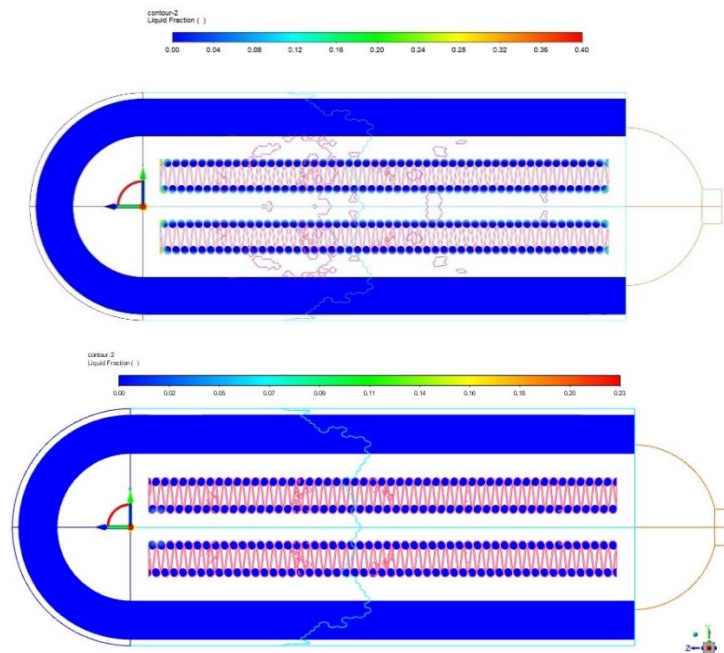
4.4 Variasi 122

Variasi 122 adalah variasi menggunakan pendinginan dalam 4 spiral dan pendinginan luar dengan material phase change material RT60. Perpindahan panas yang bekerja pada keadaan ini adalah konduksi pada material solid copper dan konveksi dari material PCM vessel ke free stream temperatur.

Berdasarkan hasil simulasi variasi 122 dapat dilihat pada gambar 4.9 (a) bahwa kontur temperatur pada waktu 30 detik menunjukkan warna merah (333.1K) merata pada bagian metal hydride vessel, warna hijau (320.66 K) pada bagian penyambung material phase change material dengan metal hydride, dan warna kuning (325 K) pada spiral. Fraction liquid terjadi di variasi ini, dengan lokasi fraksi liquid hanya pada spiral bagian luar, sedangkan pada selimut PCM tidak terjadi perubahan fasa seperti ditunjukkan pada gambar 4.10 (a). fraction liquid terjadi akibat temperatur PCM sudah menyentuh fase isothermal yang dapat mengubah fraction solid menjadi liquid. Namun fase ini terjadi sangat cepat, yaitu pada range antara detik ke 30 hingga 70 seperti ditunjukkan pada gambar 4.11. Terlihat pada grafik variasi 121 pada line on pcm sempat mengalami fasa isothermal atau tidak terjadi kenaikan temperatur.



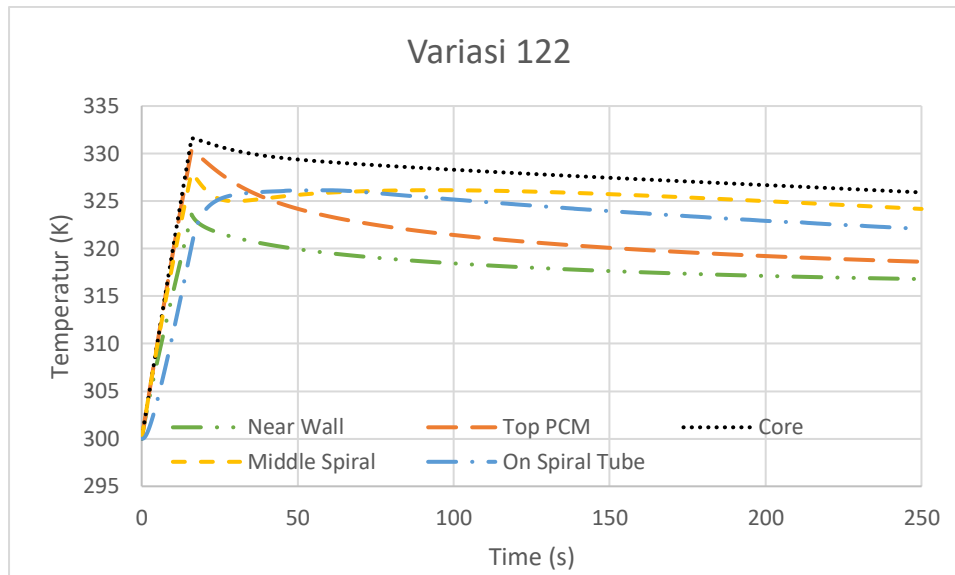
Gambar 4.9 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 122



Gambar 4.10 (a) Profil Fraksi Liquid saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 122

Setelah di simulasi selama 250 detik terjadi perpindahan panas yang keluar dari vessel ke RT60. Namun, perpindahan panas yang terjadi tidak dapat mengubah fasa dari solid ke liquid terlihat pada gambar (b) penurunan paling banyak terjadi

pada bagian bagian dekat dengan dinding ambient temperatur. Sedangkan pada daerah core, perpindahan panas dari metal hydride tidak efektif karena masih terdapat warna merah atau estimasi 326 K. Pada bagian spiral terlihat pada gambar kontur masih berwarna orange atau estimasi di 325 K.



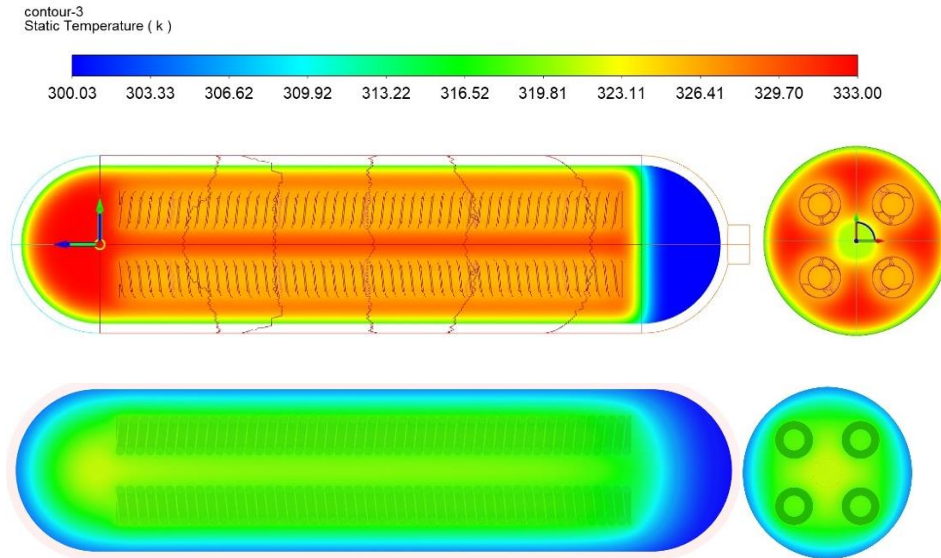
Gambar 4.11 Grafik Temperature vs Time pada variasi 122

Gambar 4.11 menunjukkan grafik temperatur vs time pada variasi 112 yang terjadi akibat proses perpindahan panas yang terjadi pada storage vessel. Temperatur pada t_0 adalah 300 K kemudian naik hingga titik tertinggi 60° C atau 333 K pada sekitar 16 detik kemudian turun hingga t_{250} . Lokasi pengambilan ini diambil pada beberapa titik, yaitu pada near wall, top pcm, core, middle pcm, dan dalam pcm. Temperatur t_{250s} pada near wall adalah paling rendah (316K) daripada lokasi yang lain, dan core memiliki temperatur yang paling tinggi (326K). Hal ini berarti proses perpindahan panas tidak cukup efektif untuk pendinginan bagian dalam storage vessel.

4.5 Variasi 211

Variasi 211 adalah variasi menggunakan pendinginan dalam 4 spiral + 1 straight tube dengan material non phase change material (copper) dan pendinginan luar menggunakan ambient temperatur. Perpindahan panas yang bekerja pada

keadaan ini adalah konduksi pada material solid copper dan konveksi dari vessel ke free stream temperatur.



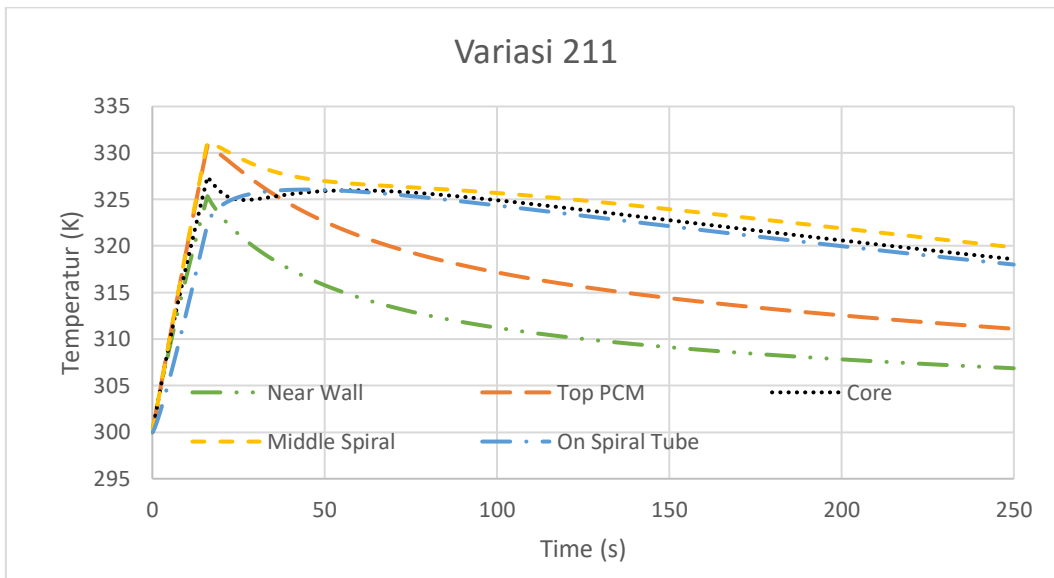
Gambar 4.12 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 211

Berdasarkan hasil simulasi variasi 211 dapat dilihat pada gambar 4.12 (a) bahwa kontur temperatur pada waktu 30 detik menunjukkan warna merah (333.1K) merata pada bagian metal hydride vessel, warna hijau (320.66 K) pada bagian penyambung material phase change material dengan metal hydride, dan warna kuning (325 K) pada spiral. Pada simulasi variasi ini tidak terdapat fraksi liquid dikarenakan tidak terdapat material PCM.

Setelah di simulasi selama 250 detik terjadi perpindahan panas yang keluar dari vessel, terlihat pada gambar (b) penurunan paling banyak terjadi pada bagian wall ambient temperatur. Sedangkan pada daerah core, perpindahan panas dari metal hydride tidak efektif karena masih terdapat warna merah atau estimasi 324 K. Pada bagian spiral terlihat pada gambar kontur masih berwarna kuning atau estimasi di 319 K. Spiral pada simulasi variasi ini cukup dapat menyerap panas, terlihat pada kontur terdapat degradasi warna yang terjadi.

Gambar 4.13 menunjukkan grafik temperatur vs time pada variasi 211 yang terjadi akibat proses perpindahan panas pada storage vessel. Temperatur pada t_0

adalah 300 K kemudian naik hingga titik tertinggi 60° C atau 333 K pada sekitar 16 detik kemudian turun hingga t_{250} . Lokasi pengambilan ini diambil pada beberapa titik, yaitu pada near wall, top pcm, core, middle pcm, dan dalam pcm. Temperatur t_{250s} pada near wall adalah paling rendah (308K) daripada lokasi yang lain, dan core memiliki temperatur yang paling tinggi (322K). Hal ini berarti proses perpindahan panas tidak cukup efektif untuk pendinginan bagian dalam storage vessel.



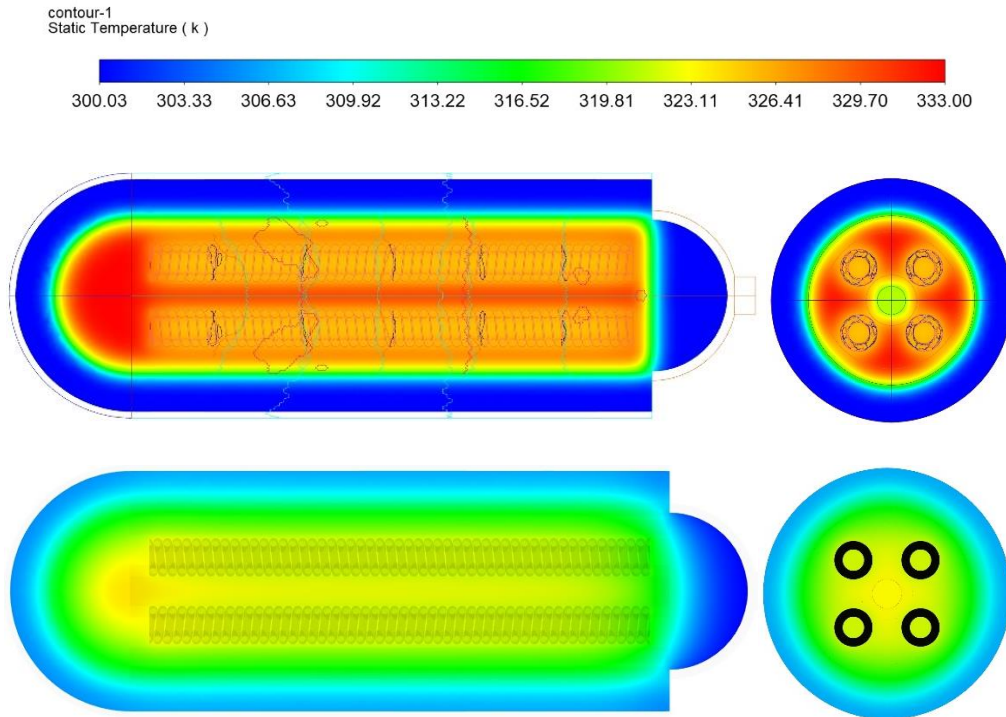
Gambar 4.13 Grafik Temperature vs Time pada variasi 211

4.6 Variasi 212

Variasi 212 adalah variasi menggunakan pendinginan dalam 4 spiral + 1 straight tube dengan material non phase change material (copper) dan pendinginan luar menggunakan material phase change material RT60. Perpindahan panas yang bekerja pada keadaan ini adalah konduksi pada material solid copper dan material selimut pcm serta perpindahan panas konveksi dari material pcm ke free stream temperatur.

Berdasarkan hasil simulasi variasi 212 dapat dilihat pada gambar 4.14 (a) bahwa kontur temperatur pada waktu 30 detik menunjukkan warna merah (333.1K) merata pada bagian metal hydride vessel, warna hijau (320.66 K) pada bagian penyambung material phase change material dengan metal hydride, dan warna kuning (325 K) pada spiral. Namun, perpindahan panas yang terjadi tidak dapat

mengubah fasa dari solid ke liquid terlihat pada gambar (b). Hal ini dikarenakan perpindahan panas tidak cukup mampu untuk mengubah fasa pada bagian dinding selimu RT60.

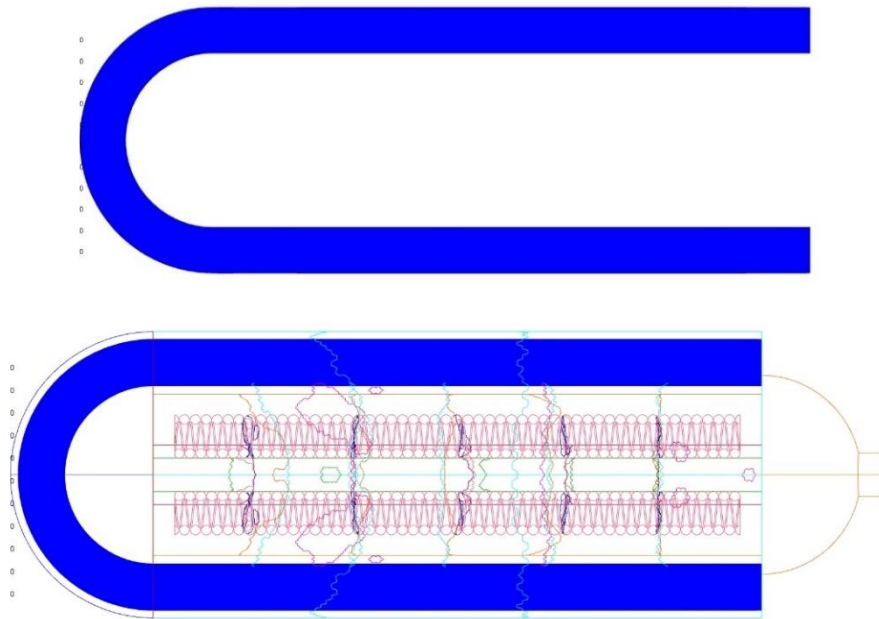


Gambar 4.14 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 212

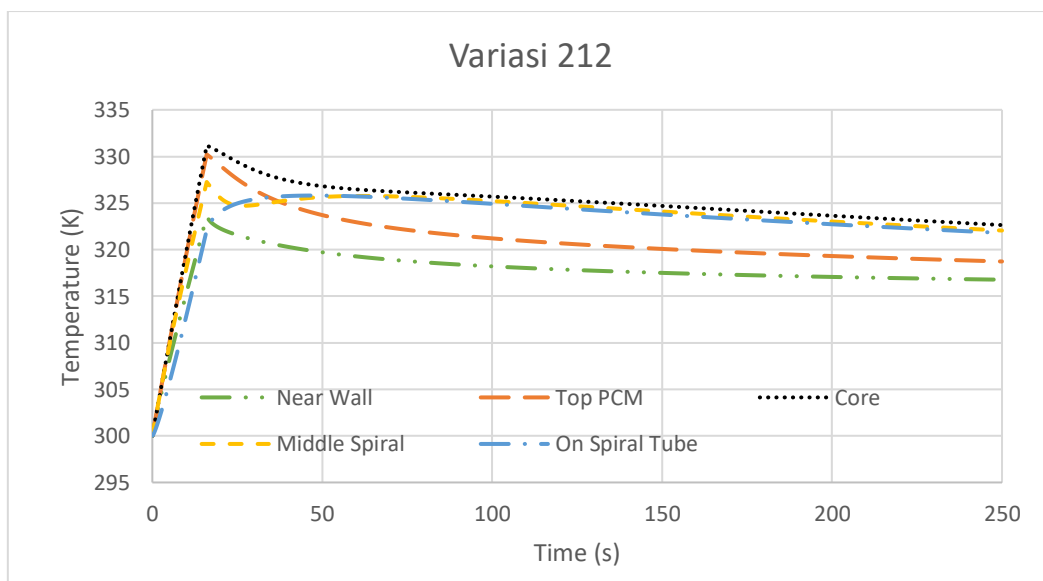
Setelah di simulasi selama 250 detik terjadi perpindahan panas yang keluar dari vessel ke RT60. Namun, perpindahan panas yang terjadi tidak dapat mengubah fasa dari solid ke liquid terlihat pada gambar (b) penurunan paling banyak terjadi pada bagian bagian dekat dengan dinding ambient temperatur. Sedangkan pada daerah core, perpindahan panas dari metal hydride tidak efektif karena masih terdapat warna merah atau estimasi 324 K. Pada bagian spiral terlihat pada gambar kontur masih berwarna orange atau estimasi di 323 K.

Gambar 4.16 menunjukkan grafik temperatur vs time pada variasi 212 yang terjadi akibat proses perpindahan panas yang terjadi pada storage vessel. Temperatur pada t_0 adalah 300 K kemudian naik hingga titik tertinggi 60°C atau 333 K pada sekitar 16 detik kemudian turun hingga t_{250} . Lokasi pengambilan ini diambil pada beberapa titik, yaitu pada near wall, top pcm, core, middle pcm, dan

dalam pcm. Temperatur t250s pada near wall adalah paling rendah (307K) daripada lokasi yang lain, dan core memiliki temperatur yang paling tinggi (324K). Hal ini berarti proses perpindahan panas tidak cukup efektif untuk pendinginan bagian dalam storage vessel.

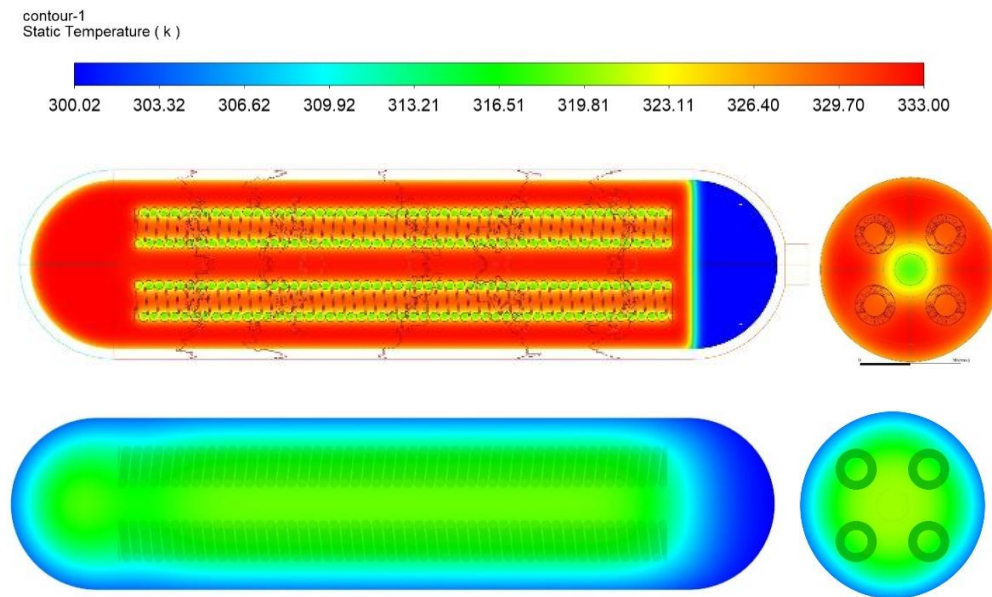


Gambar 4.15 Profil Fraksi Liquid pada variasi 212



Gambar 4.16 Grafik Temperature vs Time pada variasi 212

4.7 Variasi 221

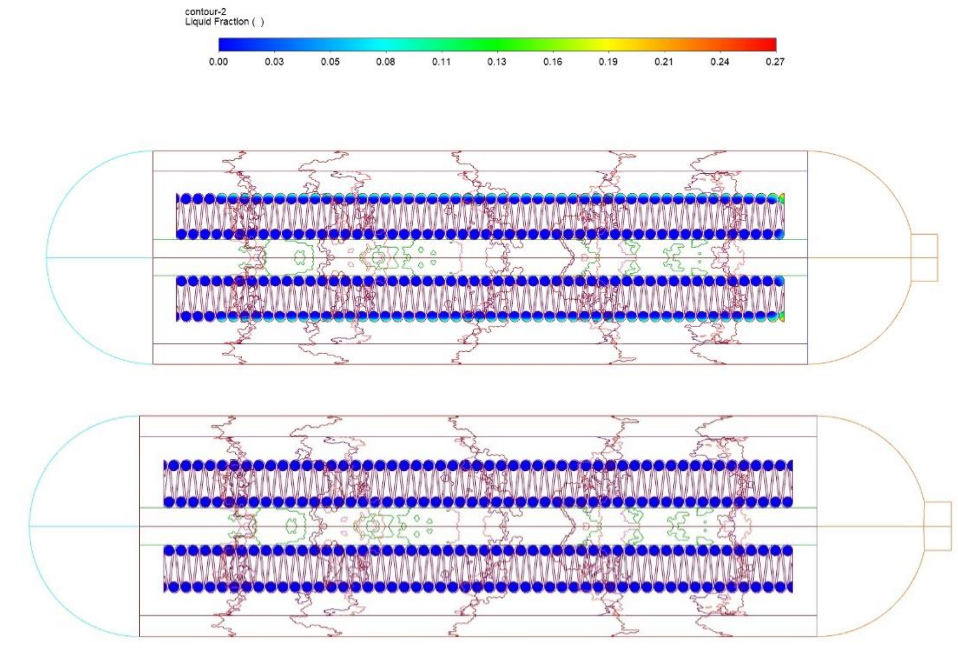


Gambar 4.17 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 221

Variasi 221 adalah variasi menggunakan pendinginan dalam 4 spiral + 1 straight tube dengan material phase change material (RT60) dan pendinginan luar menggunakan ambient temperatur. Perpindahan panas yang bekerja pada keadaan ini adalah konduksi pada material solid copper dan konveksi dari vessel ke free stream temperatur.

Berdasarkan hasil simulasi variasi 221 dapat dilihat pada gambar 4.17 (a) bahwa kontur temperatur pada waktu 30 detik menunjukkan warna merah (333.1K) merata pada bagian metal hydride vessel, warna hijau (320.66 K) pada bagian penyambung material phase change material dengan metal hydride, dan warna kuning (325 K) pada spiral. Fraction liquid terjadi di variasi ini, dengan lokasi fraksi liquid pada bagian sisi luar tube spiral yang terkena perpindahan panas yang tinggi seperti ditunjukkan pada gambar 4.18 (a). fraction liquid terjadi akibat temperatur PCM sudah menyentuh fase isothermal yang dapat mengubah fraction solid menjadi liquid. Namun fase ini terjadi sangat cepat, yaitu pada range antara detik ke 30 hingga 70 seperti ditunjukkan pada gambar 4.19. Terlihat pada grafik variasi

121 pada line on pcm sempit mengalami fasa isothermal atau tidak terjadi kenaikan temperatur.

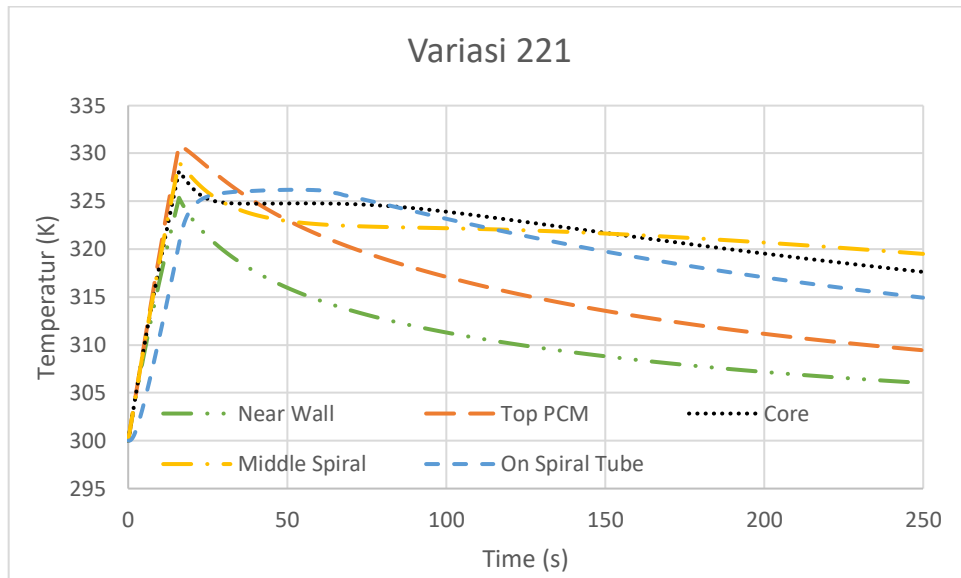


Gambar 4.18 Profil Fraksi Liquid pada variasi 221

Setelah di simulasi selama 250 detik terjadi perpindahan panas yang keluar dari vessel ke RT60. Namun, perpindahan panas yang terjadi tidak dapat mengubah fasa dari solid ke liquid terlihat pada gambar (b) penurunan paling banyak terjadi pada bagian bagian dekat dengan dinding ambient temperatur. Sedangkan pada daerah core, perpindahan panas dari metal hydride tidak efektif karena masih terdapat warna merah atau estimasi 324 K. Pada bagian spiral terlihat pada gambar kontur masih berwarna orange atau estimasi di 321 K.

Gambar 4.19 menunjukkan grafik temperatur vs time pada variasi 221 yang terjadi akibat proses perpindahan panas yang terjadi pada storage vessel. Temperatur pada t_0 adalah 300 K kemudian naik hingga titik tertinggi 60°C atau 333 K pada sekitar 16 detik kemudian turun hingga t_{250} . Lokasi pengambilan ini diambil pada beberapa titik, yaitu pada near wall, top pcm, core, middle pcm, dan dalam pcm. Temperatur t_{250} s pada near wall adalah paling rendah (307K) daripada lokasi yang lain, dan core memiliki temperatur yang paling tinggi (324K). Hal ini

berarti proses perpindahan panas tidak cukup efektif untuk pendinginan bagian dalam storage vessel.



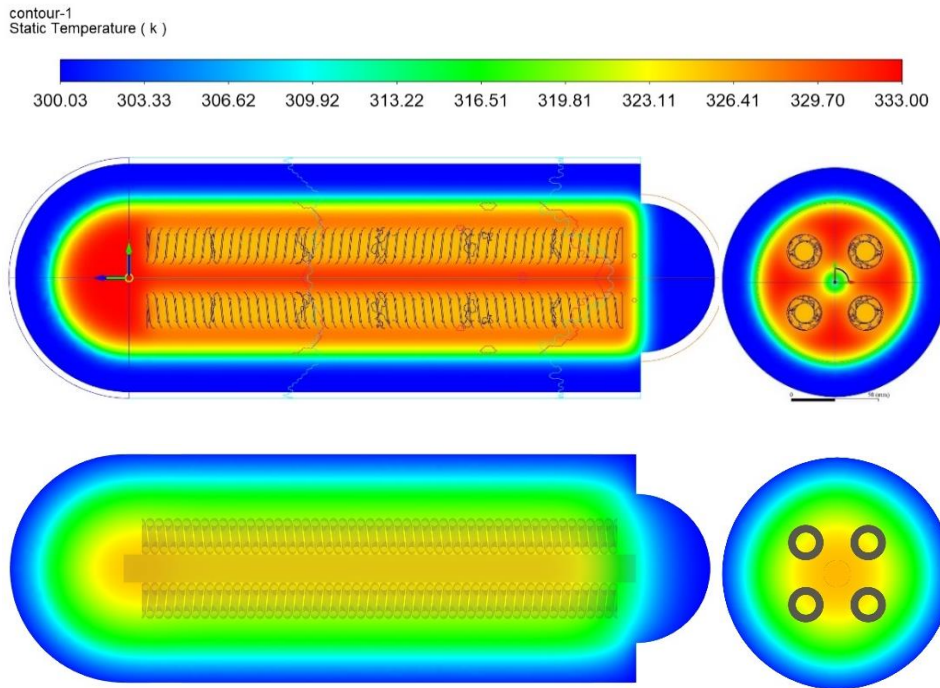
Gambar 4.19 Grafik Temperature vs Time pada variasi 221

4.8 Variasi 222

Variasi 222 adalah variasi menggunakan pendinginan dalam 4 spiral + 1 straight tube dan pendinginan luar menggunakan material phase change material (RT60). Perpindahan panas yang bekerja pada keadaan ini adalah konduksi pada material solid copper dan konveksi dari vessel ke free stream temperatur.

Berdasarkan hasil simulasi variasi 222 dapat dilihat pada gambar 4.20 (a) bahwa kontur temperatur pada waktu 30 detik menunjukkan warna merah (333.1K) merata pada bagian metal hydride vessel, warna hijau (320.66 K) pada bagian penyambung material phase change material dengan metal hydride, dan warna kuning (325 K) pada spiral. Fraction liquid terjadi di variasi ini, dengan lokasi fraksi liquid pada bagian sisi luar tube spiral yang terkena perpindahan panas yang tinggi seperti ditunjukkan pada gambar 4.21 (a). Sedangkan pada bagian selimut, PCM tidak mengalami perubahan fasa. Fraction liquid terjadi akibat temperatur PCM sudah menyentuh fase isothermal yang dapat mengubah fraction solid menjadi liquid. Namun fase ini terjadi sangat cepat, yaitu pada range antara detik ke 30 hingga 70 seperti ditunjukkan pada gambar 4.7. Terlihat pada grafik variasi 121

pada line on pcm sempat mengalami fasa isothermal atau tidak terjadi kenaikan temperatur.

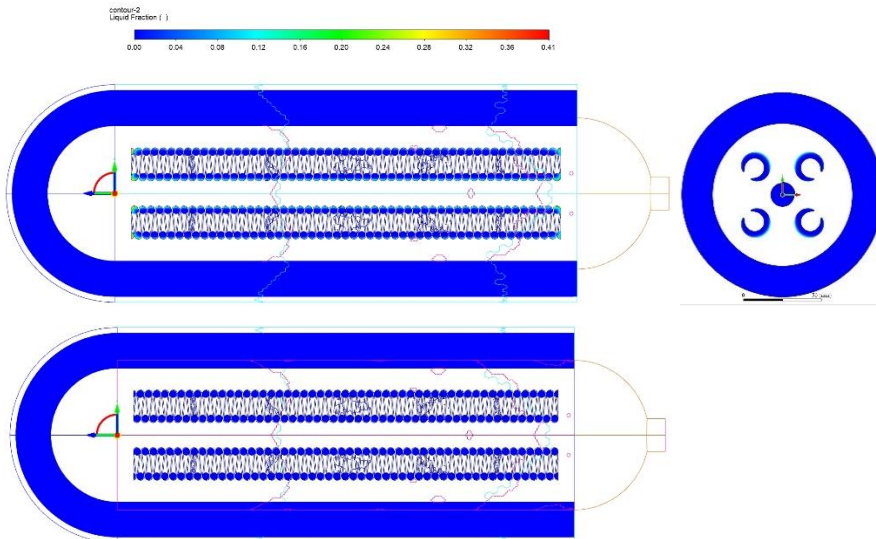


Gambar 4.20 (a) Profil Temperatur saat 30s, dan (b) Profil Temperatur saat 250s variasi 222

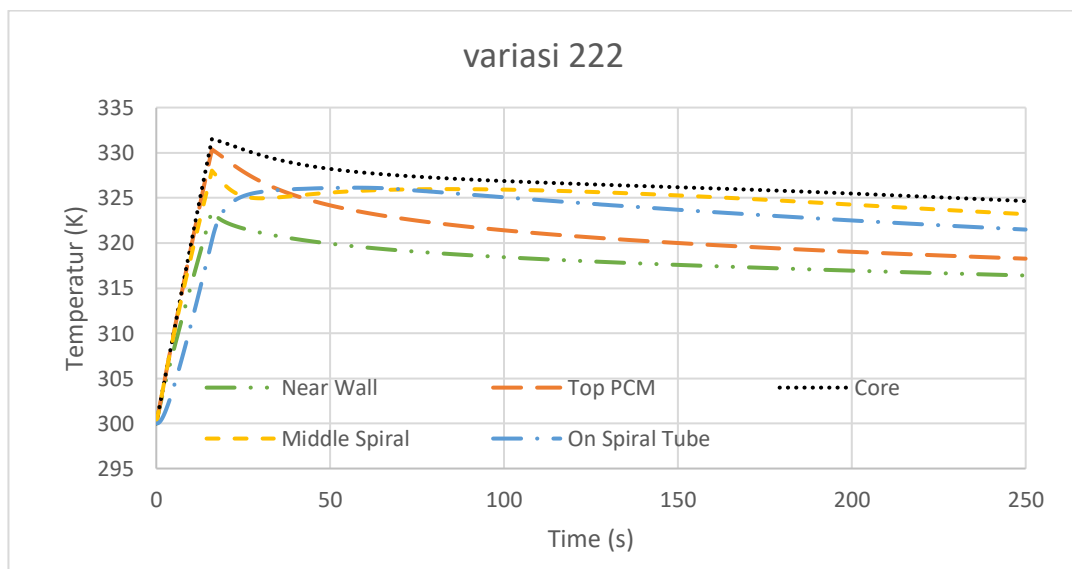
Setelah di simulasi selama 250 detik terjadi perpindahan panas yang keluar dari vessel ke RT60. Namun, perpindahan panas yang terjadi tidak dapat mengubah fasa dari solid ke liquid terlihat pada gambar (b) penurunan paling banyak terjadi pada bagian bagian dekat dengan dinding ambient temperatur. Sedangkan pada daerah core, perpindahan panas dari metal hydride tidak efektif karena masih terdapat warna merah atau estimasi 324 K. Pada bagian spiral terlihat pada gambar kontur masih berwarna orange atau estimasi di 321 K.

Gambar 4.22 menunjukkan grafik temperatur vs time pada variasi 222 yang terjadi akibat proses perpindahan panas yang terjadi pada storage vessel. Temperatur pada t_0 adalah 300 K kemudian naik hingga titik tertinggi 60°C atau 333 K pada sekitar 16 detik kemudian turun hingga t_{250} . Lokasi pengambilan ini diambil pada beberapa titik, yaitu pada near wall, top pcm, core, middle pcm, dan dalam pcm. Temperatur t_{250s} pada near wall adalah paling rendah (307K) daripada

lokasi yang lain, dan core memiliki temperatur yang paling tinggi (324K). Hal ini berarti proses perpindahan panas tidak cukup efektif untuk pendinginan bagian dalam storage vessel.



Gambar 4.21 Liquid Fraction pada variasi 222



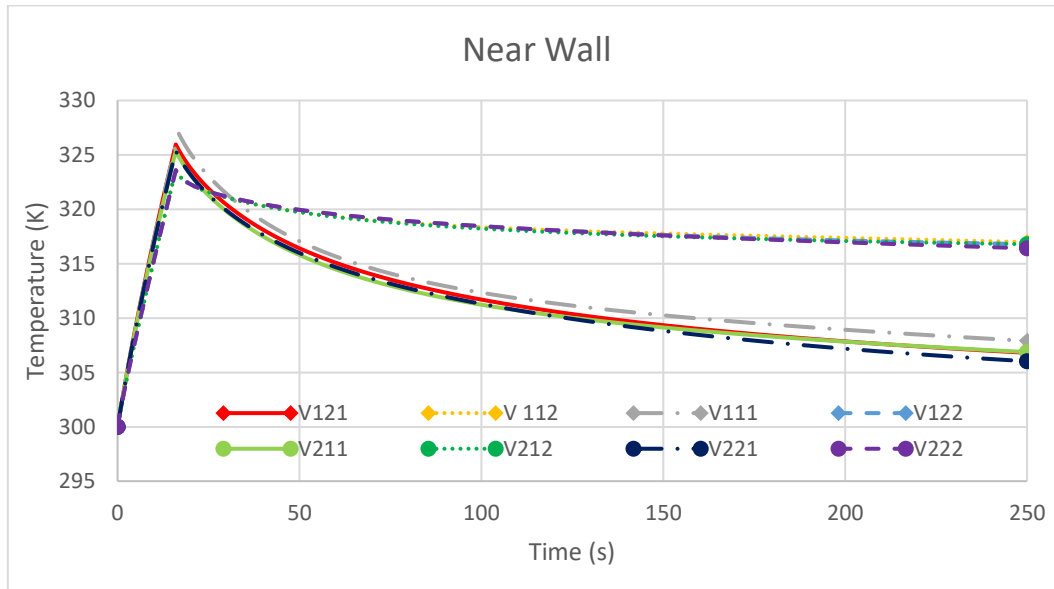
Gambar 4.22 Grafik Temperature vs Time pada variasi 222

4.9 Perbandingan Antar Metode

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan antar metode dalam respon temperatur pada vessel. Perbandingan ini dilakukan pada beberapa

titik di dalam metal hydride vessel, yaitu pada near wall, top pcm, core, middle spiral, dan tube spiral.

4.9.1 Perbandingan Pada Near Wall



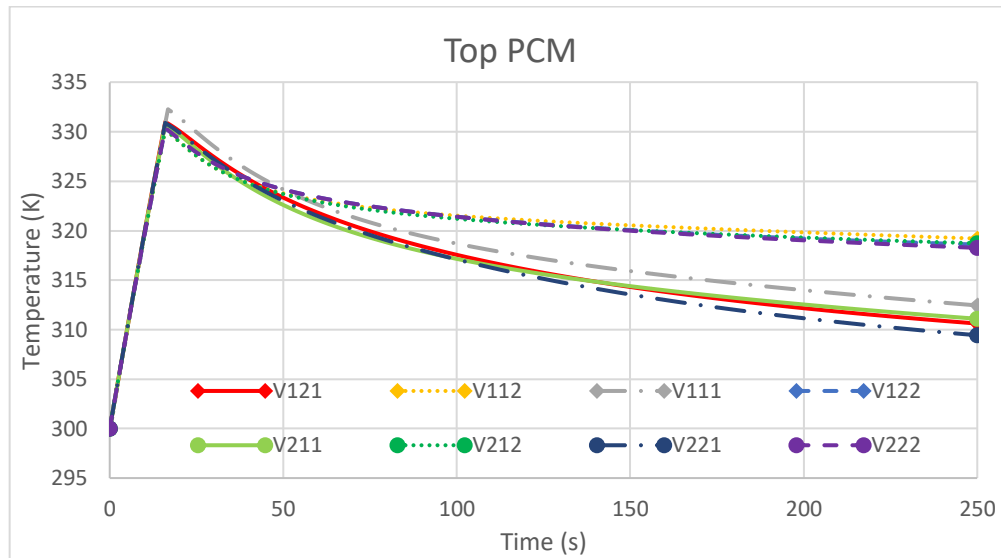
Gambar 4.23 Grafik Perbandingan Temperature vs Time Near Wall

Lokasi pengambilan data ini berada pada near wall metal hydride. Berdasarkan hasil grafik pada gambar 4.23 terlihat variasi 221 dan 211 adalah yang memiliki nilai paling terbaik daripada variasi lain. Sedangkan pada variasi 222 dan 122 adalah variasi yang paling kurang dapat menyerap perpindahan panas yang terjadi pada metal hydride vessel. Hal ini berarti pendinginan metode pendinginan luar yang lebih bagus adalah menggunakan wall tanpa material RT60, karena material RT60 tidak dapat menyerap lebih baik dari ambient temperature.

4.9.2 Perbandingan Pada Top PCM

Lokasi pengambilan data ini berada pada top pcm diantara wall dan material tube spiral pendingin metal hydride. Berdasarkan hasil grafik pada gambar 4.24 terlihat variasi 221 dan 121 adalah yang memiliki nilai paling terbaik daripada variasi lain. Sedangkan pada variasi 222 dan 112 adalah variasi yang paling kurang dapat menyerap perpindahan panas yang terjadi pada metal hydride vessel. Hal ini berarti pendingin RT60 yang diletakkan pada metal hydride vessel cukup dapat menyerap panas, dikarenakan lokasi pengambilan data di daerah tube spiral. Selain

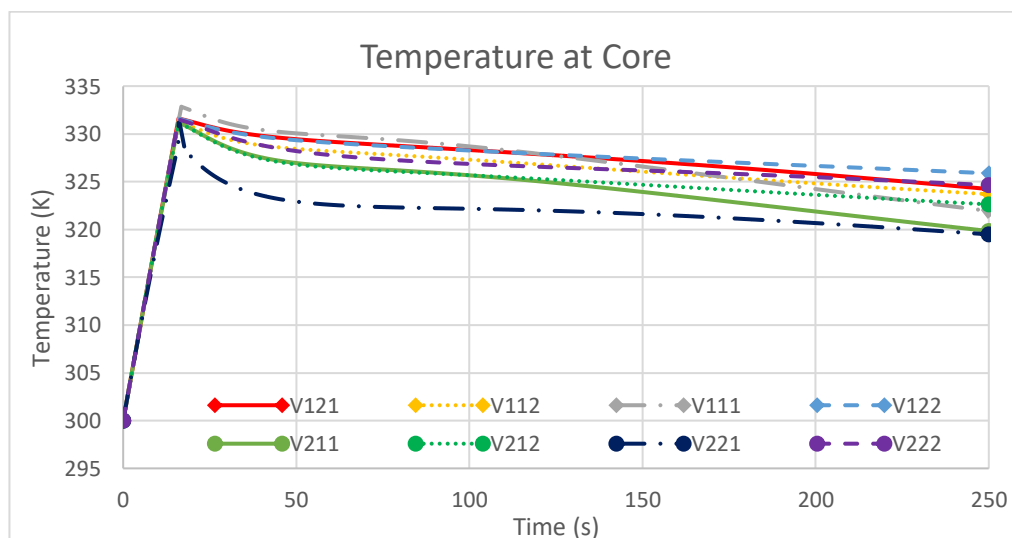
itu, temperature ambient cukup efektif untuk perpindahan panas di metal hydride vessel tanpa ada material RT60.



Gambar 4.24 Grafik Perbandingan Temperature vs Time Top PCM

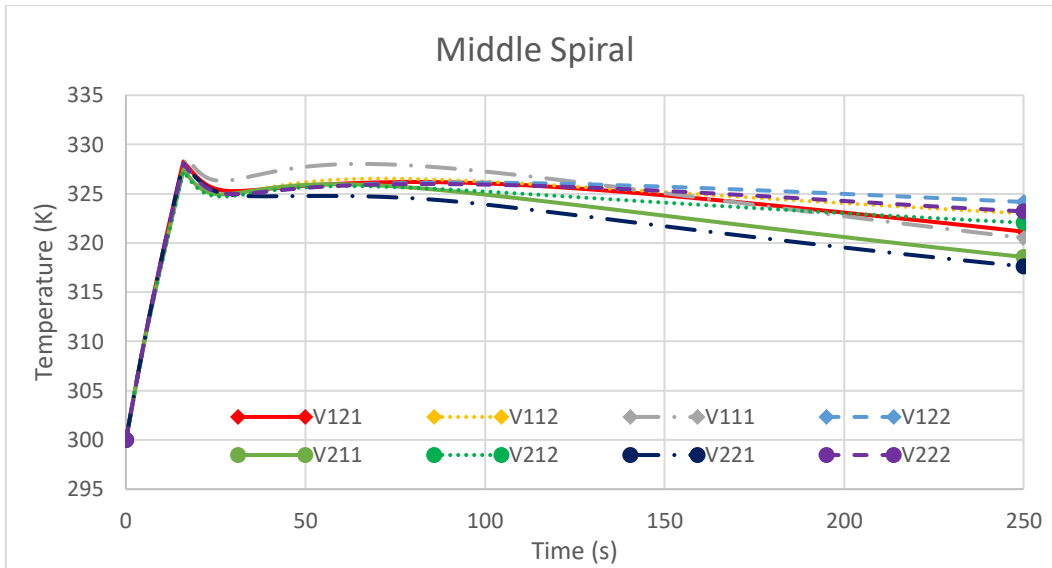
4.9.3 Perbandingan Pada Core

Lokasi pengambilan data ini berada pada core metal hydride. Berdasarkan hasil grafik pada gambar 4.25 terlihat variasi 221 dan 211 adalah yang memiliki nilai paling terbaik daripada variasi lain. Sedangkan pada variasi 122 dan 222 adalah variasi yang paling kurang dapat menyerap perpindahan panas yang terjadi pada metal hydride vessel.



Gambar 4.25 Grafik Perbandingan Temperature vs Time Core

4.9.4 Perbandingan Pada Middle Spiral

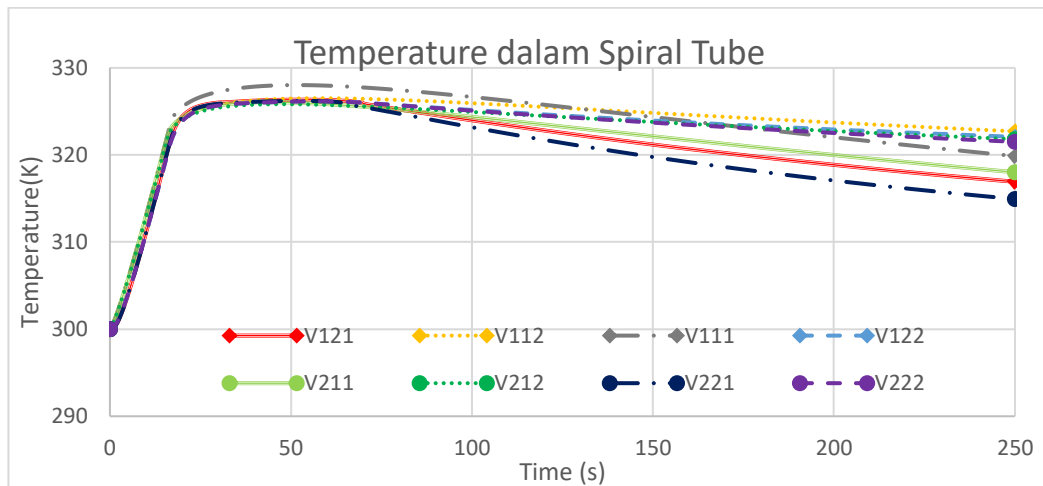


Gambar 4.26 Grafik Perbandingan Temperature vs Time Middle Spiral

Lokasi pengambilan data ini berada pada di tengah dari spiral tube pendingin. Berdasarkan hasil grafik pada gambar 4.26 terlihat variasi 221 dan 211 adalah yang memiliki nilai paling terbaik daripada variasi lain. Sedangkan pada variasi 122 dan 222 adalah variasi yang paling kurang dapat menyerap perpindahan panas yang terjadi pada metal hydride vessel.

4.9.5 Perbandingan Dalam Tube Spiral

Lokasi pengambilan data ini berada pada top pcm diantara wall dan material tube spiral pendingin metal hydride. Berdasarkan hasil grafik pada gambar 4.27 terlihat variasi 221 dan 121 adalah yang memiliki nilai paling terbaik daripada variasi lain. Sedangkan pada variasi 112 dan 122 adalah variasi yang paling kurang dapat menyerap perpindahan panas yang terjadi pada metal hydride vessel. Hal ini berarti pendingin RT60 yang diletakkan pada metal hydride vessel cukup dapat menyerap panas, dikarenakan lokasi pengambilan data di daerah tube spiral. Selain itu, temperature ambient cukup efektif untuk perpindahan panas di metal hydride vessel tanpa ada material RT60.



Gambar 4.27 Grafik Perbandingan Temperature vs Time Dalam Spiral

4.10 Perbandingan dengan ANOVA

Optimasi design pada penelitian ini menggunakan metode anova dengan perangkat lunak minitab untuk menganalisa faktor dan level faktor apakah meningkatkan secara signifikan pada respon temperatur. Metode ini menggunakan 3 faktor yaitu A (bentuk pendinginan dalam), B (Material Pendingin), C (Pendinginan luar) yang masing-masing memiliki 2 level faktor sehingga menjadi seperti pada tabel 4.1. Data-data pada tabel ini adalah hasil dari data kuantitatif yang diambil dari setiap grafik pada saat t_{250} .

Tabel 4.1 Data temperature di setiap titik pengujian pada t_{250}

No	Faktor			Respon Temperatur					
	A	B	C	Near Wall	Top PCM	Core	Middle Spiral	On spiral	Maks Temp
1	1	1	1	306.8	310.623	324.245	321.1518	316.9095	327.9687
2	1	1	2	316.9772	319.2101	323.7086	322.9951	322.6998	327.6417
3	1	2	1	307.8969	312.4542	321.9562	320.5078	319.8559	327.5282
4	1	2	2	316.7905	318.6102	325.8986	324.1624	322.0657	328.4633
5	2	1	1	306.8657	311.1058	319.8531	318.5772	318.0027	324.0629
6	2	1	2	316.7759	318.7341	322.6414	322.0583	321.7947	325.6619
7	2	2	1	306.0239	309.439	319.5023	317.6211	314.9307	321.5933
8	2	2	2	316.4039	318.2713	324.6576	323.2051	321.4965	327.7784

4.10.1 Anova Setiap Bagian pada Metal Hydride

Pada sub bab ini akan ditampilkan hasil optimasi respon temperature pada setiap titik yang di uji. Titik-titik ini sesuai dengan tabel 4.1, yaitu pada near wall, top pcm, core, middle spiral, dan on spiral tube dengan H_0 adalah $H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$ dan alternative hypotesis $H_1 : \text{at least } \tau \neq 0$ dengan confidence level α 0.05 atau 5%. Kemudian compare P-value dengan Confidence level, apakah signifikan atau tidak.

Hasil Anova pada near wall

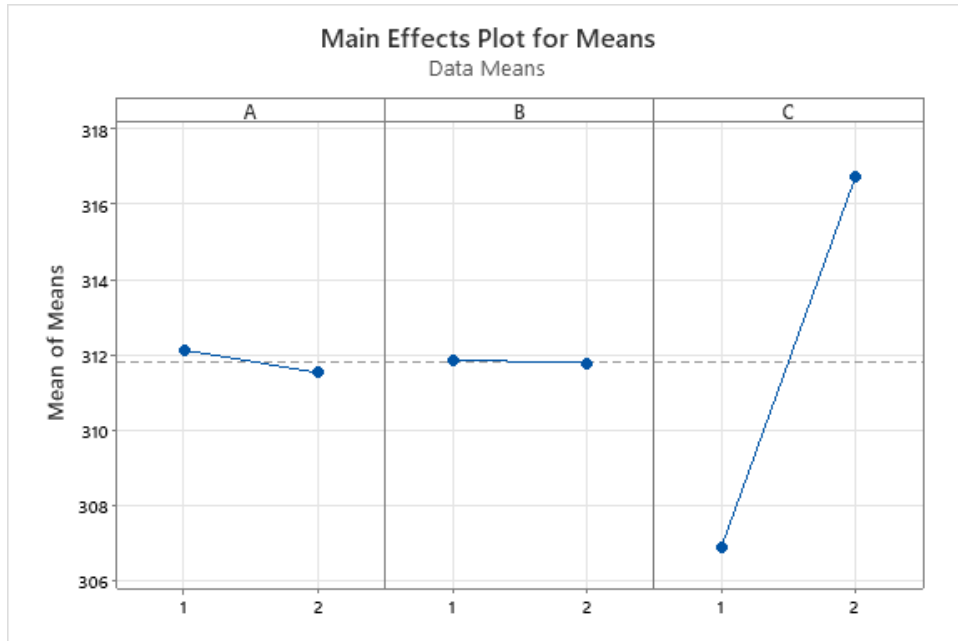
Berdasarkan hasil minitab faktor A dan B memiliki $P_{\text{value}} > \alpha$ sehingga dengan tingkat keyakinan 95% H_0 gagal ditolak yang berarti bahwa tidak terdapat efek yang signifikan terhadap respon temperatur pada faktor A dan B. Sedangkan pada faktor C memiliki $P_{\text{value}} < \alpha$ sehingga dengan tingkat keyakinan 95% H_0 ditolak dan H_1 diterima yang berarti faktor ini terdapat efek yang signifikan terhadap respon temperatur. Kemudian pada analisa interaksi AB; AC; dan BC memiliki $P_{\text{value}} > \alpha$ sehingga dengan tingkat keyakinan 95% dapat diartikan bahwa tidak terdapat treatment efek pada interaksi dari faktor-faktor tersebut.

Tabel 4.2 Hasil Anova near wall

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	0,717	0,717	0,717	1,87	0,402
B	1	0,012	0,012	0,012	0,03	0,891
C	1	193,661	193,661	193,661	503,91	0,028
A*B	1	0,564	0,564	0,564	1,47	0,439
A*C	1	0,186	0,186	0,186	0,48	0,613
B*C	1	0,083	0,083	0,083	0,22	0,723
Residual Error	1	0,384	0,384	0,384		
Total	7	195,606				
Level	A	B	C			
1	322,2	321,2	319,5			
2	320,4	321,4	323,1			
Delta	1,8	0,2	3,6			
Rank	2	3	1			

Berdasarkan hasil anova, faktor yang paling berpengaruh terhadap optimasi adalah faktor C pada daerah near wall yang berarti faktor C_1 (ambient temperature) yang paling signifikan dalam menurunkan respon temperature. Hal ini ditunjang pada tabel 4.2 dan gambar 4.28 pada bagian rank, faktor C (pendinginan luar) rank

1, faktor A (bentuk pendinginan dalam) rank 2, dan faktor B (Material pendingin) rank 3.



Gambar 4.28 Grafik main effects plot for anova dari respon near wall

Hasil Anova pada top PCM

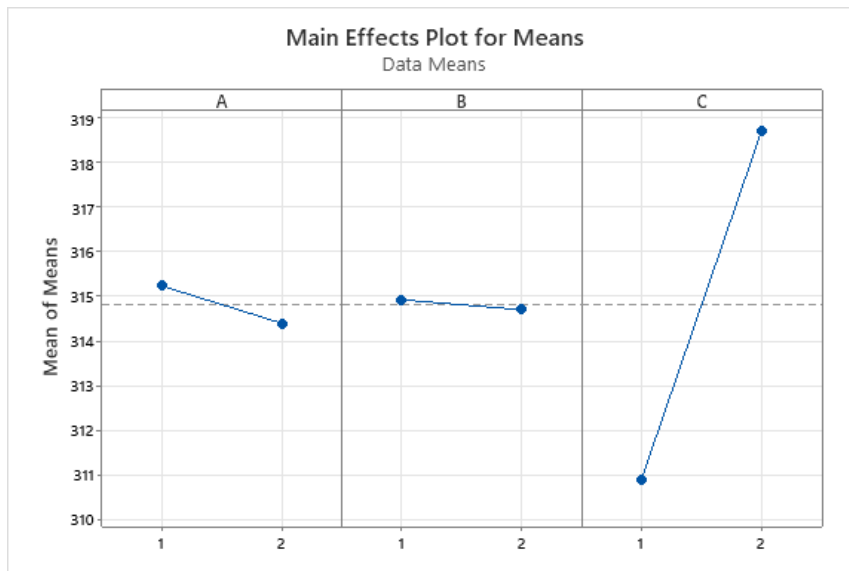
Tabel 4.3 Hasil Anova top PCM

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	1,401	1,401	1,401	0,85	0,526
B	1	0,101	0,101	0,101	0,06	0,846
C	1	121,709	121,709	121,709	73,69	0,074
A*B	1	1,412	1,412	1,412	0,85	0,525
A*C	1	0,369	0,369	0,369	0,22	0,719
B*C	1	0,188	0,188	0,188	0,11	0,793
Residual Error	1	1,652	1,652	1,652		
Total	7	126,831				
Level	A	B	C			
	1	315,2	314,9	310,9		
	2	314,4	314,7	318,7		
	Delta	0,8	0,2	7,8		
	Rank	2	3	1		

Berdasarkan hasil minitab faktor A,B, dan C memiliki $P_{value} > \alpha$ yang masing masing adalah 52.6% (A), 84.46% (B), dan 7.4% (C) sehingga dengan tingkat keyakinan 95% H_0 gagal ditolak. Hal ini dapat diartikan bahwa tidak terdapat efek yang signifikan terhadap respon temperatur pada faktor A,B, dan C. Kemudian pada

analisa interaksi A*B;A*C; dan B*C memiliki $P_{value} > \alpha$ sehingga dengan tingkat keyakinan 95% dapat diartikan bahwa tidak terdapat treatment efek pada interaksi dari faktor-faktor tersebut .

Berdasarkan hasil anova, faktor yang paling berpengaruh terhadap optimasi adalah faktor C pada daerah top pcm yang berarti faktor C₁ (ambient temperature) yang paling signifikan dalam menurunkan respon temperature. Hal ini ditunjang pada tabel 4.2 dan gambar 4.29 pada bagian rank, faktor C (pendinginan luar) rank 1, faktor A (bentuk pendinginan dalam) rank 2, dan faktor B(Material pendingin) rank 3.



Gambar 4.29 Grafik main effects plot for anova dari respon top PCM

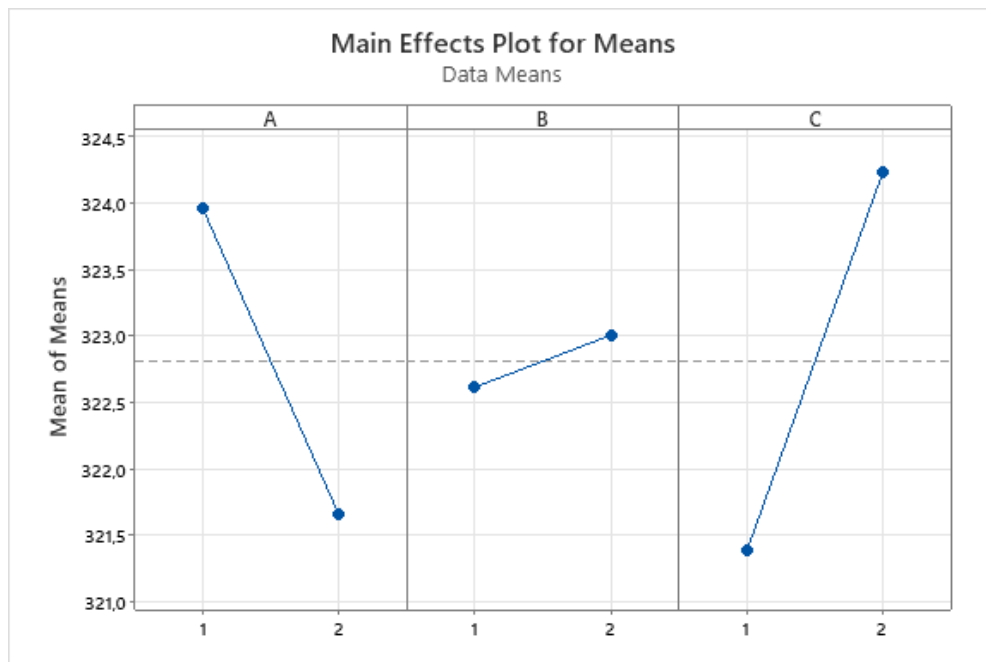
Hasil Anova pada core

Berdasarkan hasil minitab faktor A,B, dan C memiliki $P_{value} > \alpha$ yang masing masing adalah 14.4% (A), 59.4% (B), dan 11.7% (C) sehingga dengan tingkat keyakinan 95% H_0 gagal ditolak. Hal ini dapat diartikan bahwa tidak terdapat efek yang signifikan terhadap respon temperatur pada faktor A,B, dan C. Kemudian pada analisa interaksi A*B;A*C; dan B*C memiliki $P_{value} > \alpha$ sehingga dengan tingkat keyakinan 95% dapat diartikan bahwa tidak terdapat treatment efek pada interaksi dari faktor-faktor tersebut di daerah core.

Berdasarkan hasil anova, faktor yang paling berpengaruh terhadap optimasi adalah faktor C pada daerah core yang berarti faktor C₁ (ambient temperature) yang paling signifikan dalam menurunkan respon temperature. Hal ini ditunjang pada tabel 4.2 dan gambar 4.30 pada bagian rank, faktor C (pendinginan luar) rank 1, faktor A (bentuk pendinginan dalam) rank 2, dan faktor B (Material pendingin) rank 3.

Tabel 4.4 Hasil Anova pada core

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	10,4744	10,4744	10,4744	18,79	0,144
B	1	0,3068	0,3068	0,3068	0,55	0,594
C	1	16,1019	16,1019	16,1019	28,88	0,117
A*B	1	0,3890	0,3890	0,3890	0,70	0,557
A*C	1	2,5737	2,5737	2,5737	4,62	0,277
B*C	1	5,8580	5,8580	5,8580	10,51	0,190
Residual Error	1	0,5575	0,5575	0,5575		
Total	7	36,2613				
Level	A	B	C			
1	324,0	322,6	321,4			
2	321,7	323,0	324,2			
Delta	2,3	0,4	2,8			
Rank	2	3	1			



Gambar 4.30 Grafik main effects plot for anova dari respon core

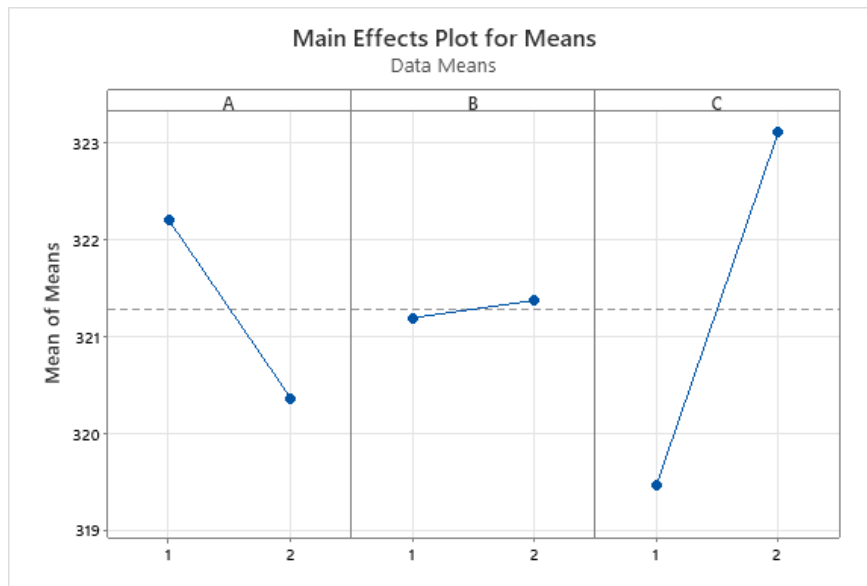
Hasil Anova pada Middle Spiral

Berdasarkan hasil minitab faktor B memiliki P_{value} (24.7%) $> \alpha$ sehingga dengan tingkat keyakinan 95% H_0 gagal ditolak yang berarti bahwa tidak terdapat efek yang signifikan terhadap respon temperatur pada faktor A dan B di middle spiral. Sedangkan pada faktor A dan C memiliki $P_{\text{value}} < \alpha$ yang masing masing A (2.5%) dan C (1.3%) sehingga dengan tingkat keyakinan 95% H_0 ditolak dan H_1 diterima yang berarti faktor ini terdapat efek yang signifikan terhadap respon temperatur. Kemudian pada analisa interaksi AB; AC; dan BC memiliki $P_{\text{value}} > \alpha$ sehingga dengan tingkat keyakinan 95% dapat diartikan bahwa tidak terdapat treatment efek pada interaksi dari faktor-faktor tersebut.

Tabel 4.5 Hasil Anova pada Middle Spiral

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	6,7629	6,7629	6,7629	635,36	0,025
B	1	0,0637	0,0637	0,0637	5,99	0,247
C	1	26,5102	26,5102	26,5102	2490,54	0,013
A*B	1	0,0138	0,0138	0,0138	1,30	0,458
A*C	1	1,5905	1,5905	1,5905	149,43	0,052
B*C	1	1,9152	1,9152	1,9152	179,92	0,047
Residual Error	1	0,0106	0,0106	0,0106		
Total	7	36,8671				
Level	A	B	C			
1	322,2	321,2	319,5			
2	320,4	321,4	323,1			
Delta	1,8	0,2	3,6			
Rank	2	3	1			

Berdasarkan hasil anova, faktor yang paling berpengaruh terhadap optimasi adalah faktor C pada daerah middle spiral. Hal ini dapat diartikan faktor C_1 (ambient temperature) yang paling signifikan dalam menurunkan respon temperature. Hal ini ditunjang pada tabel 4.2 dan gambar 4.31 pada bagian rank, faktor C (pendinginan luar) rank 1, faktor A (bentuk pendinginan dalam) rank 2, dan faktor B (Material pendingin) rank 3.



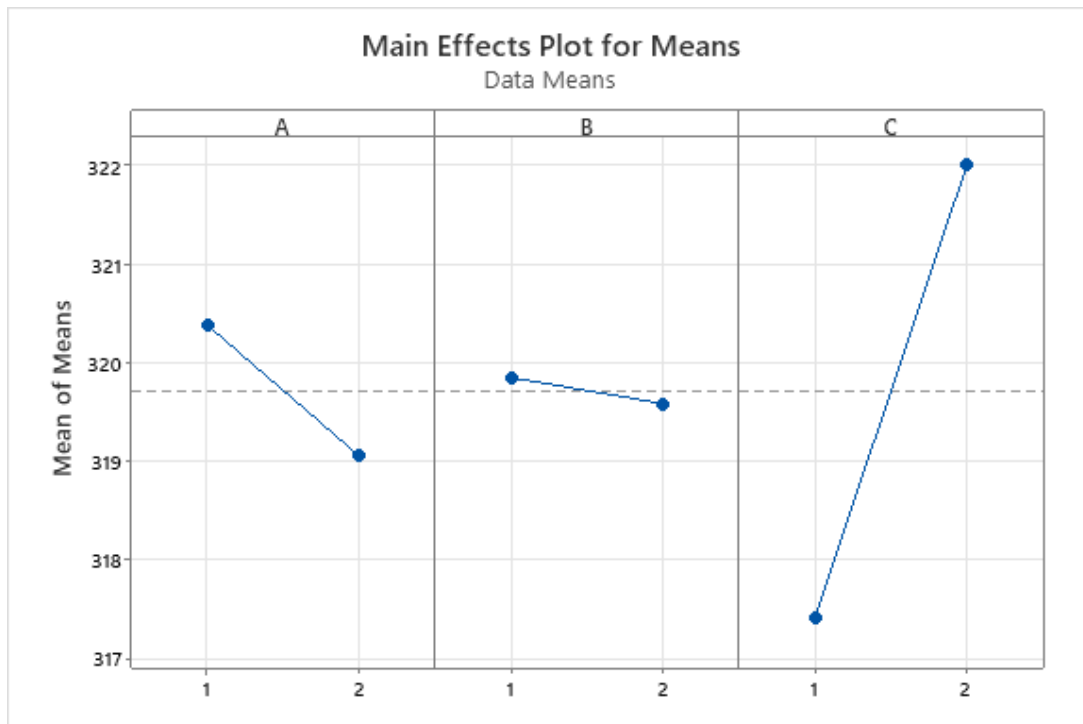
Gambar 4.31 Grafik main effects plot for anova dari respon middle spiral

Hasil Anova pada tube spiral

Berdasarkan hasil minitab faktor A,B, dan C memiliki $P_{value} > \alpha$ yang masing masing adalah 55.7% (A), 89.5% (B), dan 21.2% (C) sehingga dengan tingkat keyakinan 95% H_0 gagal ditolak. Hal ini dapat diartikan bahwa tidak terdapat efek yang signifikan terhadap respon temperatur pada faktor A,B, dan C di tube spiral. Kemudian pada analisa interaksi A*B;A*C; dan B*C memiliki $P_{value} > \alpha$ sehingga dengan tingkat keyakinan 95% dapat diartikan bahwa tidak terdapat treatment efek pada interaksi dari faktor-faktor tersebut di daerah tube spiral.

Tabel 4.6 Hasil Anova pada tube spiral

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	3,5193	3,5193	3,5193	0,70	0,557
B	1	0,1399	0,1399	0,1399	0,03	0,895
C	1	42,1261	42,1261	42,1261	8,35	0,212
A*B	1	4,0365	4,0365	4,0365	0,80	0,535
A*C	1	0,6949	0,6949	0,6949	0,14	0,774
B*C	1	0,0814	0,0814	0,0814	0,02	0,920
Residual Error	1	5,0473	5,0473	5,0473		
Total	7	55,6453				
Level	A	B	C			
1	320,4	319,9	317,4			
2	319,1	319,6	322,0			
Delta	1,3	0,3	4,6			
Rank	2	3	1			



Gambar 4.32 Grafik main effects plot for anova dari respon tube spiral

Berdasarkan hasil anova, faktor yang paling berpengaruh terhadap optimasi adalah faktor C pada daerah core yang berarti faktor C₁ (ambient temperature) yang paling signifikan dalam menurunkan respon temperature. Hal ini ditunjang pada tabel 4.2 dan gambar 4.32 pada bagian rank, faktor C (pendinginan luar) rank 1, faktor A (bentuk pendinginan dalam) rank 2, dan faktor B (Material pendingin) rank 3.

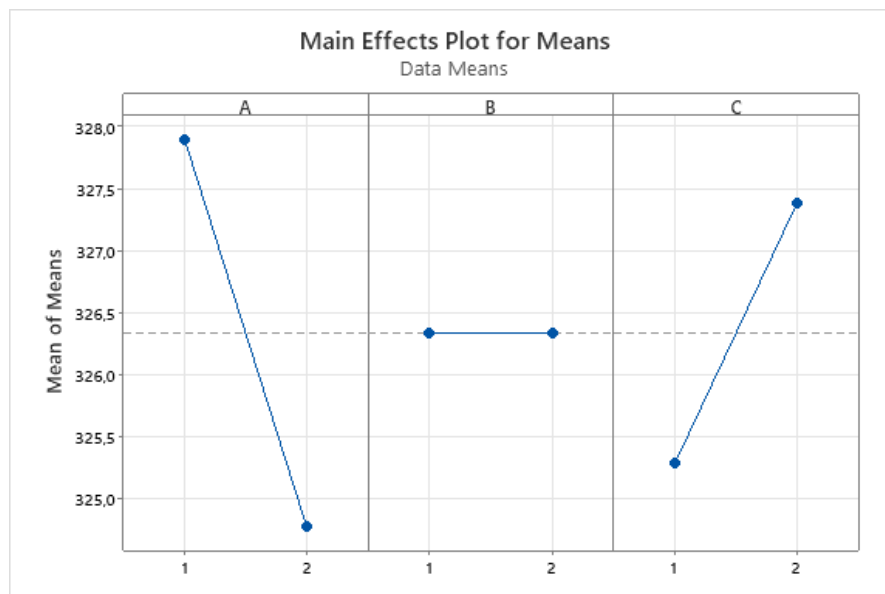
4.10.2 Analisis berdasarkan Temp Maksimal Metal Hydride

Berdasarkan hasil minitab faktor A, B, dan C memiliki $P_{\text{value}} > \alpha$ yang masing masing adalah 16.5% (A), 99.5% (B), dan 24% (C) sehingga dengan tingkat keyakinan 95% H_0 gagal ditolak. Hal ini dapat diartikan bahwa tidak terdapat efek yang signifikan terhadap respon temperatur pada faktor A, B, dan C di keseluruhan vessel. Kemudian pada analisa interaksi A*B; A*C; dan B*C memiliki $P_{\text{value}} > \alpha$ sehingga dengan tingkat keyakinan 95% dapat diartikan bahwa tidak terdapat treatment efek pada interaksi dari faktor-faktor tersebut di dalam vessel.

Berdasarkan hasil anova, faktor yang paling berpengaruh terhadap optimasi adalah faktor A pada daerah core yang berarti faktor A₂ (4 Spiral +1 cooling tube) yang paling signifikan dalam menurunkan respon temperature. Hal ini ditunjang pada tabel 4.2 dan gambar 4.32 pada bagian rank, faktor A (bentuk pendinginan dalam) rank 1, faktor C (pendinginan luar) rank 2, dan faktor B (Material pendingin) rank 3.

Tabel 4.7 Hasil Anova berdasarkan temp maksimum metal hydride

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	19,5485	19,5485	19,5485	14,15	0,165
B	1	0,0001	0,0001	0,0001	0,00	0,995
C	1	8,8035	8,8035	8,8035	6,37	0,240
A*B	1	0,0674	0,0674	0,0674	0,05	0,862
A*C	1	6,4370	6,4370	6,4370	4,66	0,276
B*C	1	4,2752	4,2752	4,2752	3,10	0,329
Residual Error	1	1,3812	1,3812	1,3812		
Total	7	40,5129				
Level	A	B	C			
1	327,9	326,3	325,3			
2	324,8	326,3	327,4			
Delta	3,1	0,0	2,1			
Rank	1	3	2			



Gambar 4.33 Grafik main effects plot for anova dari respon maks temperatur

Berdasarkan analisa temperature maks saat time 250, didapatkan bahwa faktor yang paling berpengaruh adalah bentuk pendingin dalam 4 spiral + 1 straight tube, kemudian faktor C tetap dengan ambient temperature. Sedangkan faktor material PCM dan non PCM tidak berpengaruh karena pemilihan material PCM RT 60.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik dan optimasi dengan metode anova didapatkan beberapa simpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil simulasi material PCM RT60 tidak dapat berubah fasa ke fasa liquid secara total pada proses pendinginan metal hydride hydroalloy C5. PCM RT60 hanya dapat berubah fasa mencapai 4%.
2. Berdasarkan hasil simulasi variasi 221 adalah variasi paling signifikan dapat menurunkan temperatur pada metal hydride.
3. Berdasarkan hasil optimasi pada setiap titik, pada titik spiral tube, core, dan top pcm semua treatment tidak memiliki efek yang signifikan dalam menurunkan temperature. Sedangkan pada titik near wall dan middle spiral dengan tingkat keyakinan 95% terdapat treatment yang lebih dapat menurunkan temperatur. Pada near wall ambient temperature menjadi pilihan yang tepat daripada menggunakan material PCM RT60. Sedangkan pada middle spiral treatment yang pengaruh adalah penambahan tube lurus pada tengah vessel.
4. Berdasarkan hasil optimasi pada temperatur maksimum di dalam vessel, didapatkan bahwa perubahan desain tidak ada yang berpengaruh terhadap respon temperature. Hal ini didasarkan pada hasil anova yang didapatkan dengan tingkat keyakinan 95% P_{value} lebih tinggi daripada confidence level (α). Namun demikian, dari ketiga faktor didapatkan urutan yang berpengaruh hingga tidak berpengaruh terhadap respon, yaitu faktor bentuk dengan menambahkan luas penampang perpindahan panas akan dapat menurunkan temperatur. Kemudian faktor pendingin luar pada ambient temperatur lebih baik dalam menurunkan respon temperatur daripada menggunakan selimut PCM RT60 serta faktor material pendingin PCM dan cooper tidak berpengaruh signifikan terhadap respon temperatur.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran untuk penelitian selanjutnya diantaranya sebagai berikut :

1. Penggunaan UDF perlu dipertimbangkan sehingga energi kinetik dari laju penyerapan hydrogen akan lebih dapat ditangkap dan hasilnya akan lebih akurat.
2. Pemilihan material Phase Change Material $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ lebih dipertimbangkan untuk mendapatkan performance yang lebih baik dalam menurunkan temperatur di dalam vessel.

DAFTAR PUSTAKA

- Alqahtani, T., Mellouli, S., Bamasag, A., Askri, F., & Phelan, P. (2020). Thermal performance analysis of a metal hydride reactor encircled by a phase change material sandwich bed. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 45(43), 23076-23092. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.126>
- Ardahaie, S., Hosseini, M., Eisapour, M., Eisapour, A., & Ranjbar, A. (2021). A novel porous metal hydride tank for hydrogen energy storage and consumption assisted by PCM jackets and spiral tubes. *Journal Of Cleaner Production*, 311, 127674. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127674>
- Campos-Celador, Á., Diarce, G., Zubiaga, J., Bandos, T., García-Romero, A., López, L., & Sala, J. (2014). Design of a Finned Plate Latent Heat Thermal Energy Storage System for Domestic Applications. *Energy Procedia*, 48, 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.035>
- Capurso, G. et al. Development of a modular room-temperatur hydride storage system for vehicular applications. *Applied Physics A*, 122(3). (2016)
- Chibani, A., Bougriou, C. and Merouani, S., 2018. Simulation of hydrogen absorption/desorption on metal hydride LaNi₅-H₂: Mass and heat transfer. *Applied Thermal Engineering*, 142, pp.110-117.
- Chung, C. et al. CFD investigation on performance enhancement of metal hydride hydrogen storage vessels using heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 91, pp.434-446. (2015)
- Cui, Y., Zeng, X., Xiao, J., & Kou, H. (2022). The comprehensive review for development of heat exchanger configuration design in metal hydride bed. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 47(4), 2461-2490. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.172>

- Davids, M., et al. Study of hydrogen storage properties of oxygen modified Ti-based AB₂ type metal hydride alloy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(25), pp.13658-13663. (2021)
- El Mghari, H., Huot, J., & Xiao, J. (2019). Analysis of hydrogen storage performance of metal hydride reactor with phase change materials. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 44(54), 28893-28908. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.090>
- El Mghari, H., Huot, J., Tong, L., & Xiao, J. (2020). Selection of phase change materials, metal foams and geometries for improving metal hydride performance. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 45(29), 14922-14939. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.226>
- Ferekh, S., Gwak, G., Kyoung, S., Kang, H., Chang, M., Yun, S., Oh, Y., Kim, W., Kim, D., Hong, T. and Ju, H., 2015. Numerical comparison of heat-fin- and metal-foam-based hydrogen storage beds during hydrogen charging process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(42), pp.14540-14550.
- Hariyadi, A. et al. Modeling of the hydrogen sorption kinetics in an AB₂ laves type metal hydride alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 893, p.162135. (2022)
- Hilali, I., Karadag, R., Bulut, H. and Aktacir, M., 2018. A study on ideal distance between staggered metal hydride tanks in forced convection. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(38), pp.17970-17977.
- Kumar, M., & Krishna, D. (2017). Influence of Mushy Zone Constant on Thermohydraulics of a PCM. *Energy Procedia*, 109, 314-321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.074>
- Li, H., Wang, Y., He, C., Chen, X., Zhang, Q., & Zheng, L. et al. (2015). Design and performance simulation of the spiral mini-channel reactor during H₂ absorption. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 40(39), 13490-13505. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.08.066>
- Mellouli, S., Askri, F., Abhilash, E., & Ben Nasrallah, S. (2017). Impact of using a heat transfer fluid pipe in a metal hydride-phase change material tank. *Applied*

Thermal Engineering, 113, 554-565

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.065>

Mellouli, S., Ben Khedher, N., Askri, F., Jemni, A., & Ben Nasrallah, S. (2015).

Numerical analysis of metal hydride tank with phase change material. Applied

Thermal Engineering, 90, 674-682.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.022>

Pickering, L. et al. Induction melted AB 2 -type metal hydrides for hydrogen storage and compression applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(4), pp.10470-10478. (2018)

Porto, T., Delgado, J., Guimarães, A., Barbosa de Lima, A., Andrade, T., & Magalhães, H. et al. (2020). Phase Change Materials: From Fundamentals and

Melting Process to Thermal Energy Storage System for Buildings Application.

Efficient And Suitable Construction, 1-46. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62829-1_1)

[62829-1_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62829-1_1)

S. Sharma, S.K. Ghoshal, Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43 (2015) 1151–1158.

Tong, L., Xiao, J., Bénard, P., & Chahine, R. (2019). Thermal management of metal hydride hydrogen storage reservoir using phase change materials. *International Journal Of Hydrogen Energy*,

44(38), 21055-21066.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.127>

Tong, L., Yuan, C., Yang, T., Bénard, P., Yuan, Y., & Xiao, J. (2021). Performance estimation of dehydrating process in metal hydride hydrogen storage tank with

coiled-tube heat exchanger. *Case Studies In Thermal Engineering*, 28, 101633.

<https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101633>

Tong, L., Yuan, Y., Yang, T., Bénard, P., Yuan, C., & Xiao, J. (2021). Hydrogen release from a metal hydride tank with phase change material jacket and coiled-

tube heat exchanger. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 46(63),

32135-32148. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.230>

- Visaria, M., Mudawar, I., Pourpoint, T., & Kumar, S. (2010). Study of heat transfer and kinetics parameters influencing the design of heat exchangers for hydrogen storage in high-pressure metal hydrides. *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 53(9-10), 2229-2239.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.010>
- Wang, D., Wang, Y., Huang, Z., Yang, F., Wu, Z., & Zheng, L. et al. (2019). Design optimization and sensitivity analysis of the radiation mini-channel metal hydride reactor. *Energy*, 173, 443-456.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.033>
- Wu, Y. et al. Reversible hydrogenation of AB₂-type Zr–Mg–Ni–V based hydrogen storage alloys. *Progress in Natural Science: Materials International*, 31(2), pp.319-323. (2021)
- Ye, Y., Lu, J., Ding, J., Wang, W., & Yan, J. (2020). Numerical simulation on the storage performance of a phase change materials based metal hydride hydrogen storage tank. *Applied Energy*, 278, 115682.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115682>

BIODATA PENULIS



Fajar Dwi Yudanto merupakan nama lengkap dari penulis tugas akhir ini. Penulis yang lahir di Yogyakarta pada 13 Juni 1994 ini merupakan anak ke dua dari pasangan Bapak Edi Sudarto dan Ibu Mindaryati. Penulis memulai pendidikan formal di SD Tamanmuda IP pada tahun (2000-2006). Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 3 Yogyakarta (2006-2009). Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMKN 2 Yogyakarta jurusan Teknik Instalasi Tenaga Listrik (2009-2012) dan melanjutkan ke jenjang studi diploma tiga jurusan Teknik Mesin konsentrasi manufaktur di Universitas Gadjah Mada hingga 2015. Setelah lulus dari jenjang diploma tiga di Universitas Gadjah Mada, Pada tahun yang sama penulis melanjutkan dan menempuh pendidikan di Teknik Mesin FTI Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan mengambil bidang studi Rekayasa Konversi Energi khususnya pada laboratorium Mekanika Fluida lulus pada tahun 2017. Penulis bergabung dengan tim Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D pada tahun 2019 sebagai asisten engineer di konsultan ITS Tekno Sains. Kemudian penulis memutuskan untuk melanjutkan studi Magister Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun September 2020.

Selama perkuliahan magister penulis tidak hanya duduk diam mendapatkan pendidikan formal di kelas, tetapi juga berusaha mengembangkan *softskill* dan *hardskill*. Penulis aktif dalam pekerjaan riset penelitian, mengisi pelatihan, dan pekerjaan konsultan dari ITS Tekno Sains.

Dengan diterbitkannya buku tesis ini, penulis berharap akan dapat memberikan sumbangsih ilmu pengetahuan melalui media penelitian yang telah dilakukan. Info lebih lanjut terkait penelitian ini dapat menghubungi penulis melalui email yudanfajar@gmail.com

