

Analisis Kinerja Perpindahan Panas Fluida Perantara untuk Intermediate Fluid Vaporizer pada Sistem Regasifikasi Gas Alam Cair

Hafizh Akbar Alam^{1*}, Burniadi Moballa², Ika Erawati³

Program Studi D4 Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia^{1*}

Program Studi D4 Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia²

Program Studi D4 Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia³

Email: hafizhakbar@student.ppns.ac.id^{1*}; bmoballa@ppns.ac.id^{2*}; ika.iger@ppns.ac.id^{3*}

Abstract - PLTGU fuel was originally from high-speed diesel fuel to LNG. For this reason, a regasification system is needed to support this process. For this reason, a regasification terminal is needed to facilitate the process. In procuring a small-scale floating Liquefied Natural Gas (LNG) regasification terminal, a regasification tool with a relatively small size but good performance is required. Intermediate Fluid Vaporizer (IFV) as a regasification tool is very suitable to be used because when compared to other types of regasification equipment, IFV has the simplest structure and shape and relatively small size, as well as its performance, is quite good in the regasification process. IFV uses an intermediate fluid for the LNG evaporation process to the gas phase. The type of medium fluid that is widely used in IFV today is Propane. However, the use of Propane still has several risks, one of which is fire. With these problems, research was made to replace Propane with a more adequate fluid. The analysis was carried out using the Aspen Hysys software to get the working pressure, then for the numerical simulation using the OpenFoam software. The selected fluid must have good heat transfer performance. From the results of the study, it can be concluded that overall both from the value of heat transfer area, heat transfer coefficient, working pressure, and in terms of environmental friendliness, the intermediary fluid substitute for propane has the highest value according to the Intermediate Fluid Scoring is R-500. R-500 is suitable to replace propane as an intermediate fluid.

Keyword: IFV, Propane, Regasification, Intermediate Fluid.

1. PENDAHULUAN

Potensi gas alam di Indonesia menurut data Kementerian ESDM pada tahun 2012 terdapat 47,35 TSCF dari total 150,70 TSCF potensi yang tersebar di seluruh Indonesia. Gas alam salah satunya adalah LNG, yang merupakan campuran Metana, Etana, Propana dan Nitrogen. Karakteristik LNG adalah tidak berbau, tidak berwarna, nonkorosif, dan tidak beracun. LNG dapat digunakan sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik seperti PLTD, oleh karena itu pemerintah melalui KEPMEN ESDM No. 13.K/13/MEM/2020 akan merubah bahan bakar pembangkit yang semula dari bahan bakar high speed Diesel menjadi LNG. Untuk itu diperlukan sistem regasifikasi agar bisa menunjang proses tersebut.

Jenis alat regasifikasi yang telah berhasil dikembangkan ada beberapa jenis diantaranya adalah Ambient Air Vaporizer (AAV), Open Rack Vaporizer (ORV) Submerged Combustion Vaporizer (SCV), dan Intermediate Fluid Vaporizer (IFV). IFV merupakan alat penukar panas jenis shell and tube yang memiliki beberapa bagian seperti evaporator yang berguna untuk menguapkan fluida perantara oleh sumber panas, kondensor berguna untuk melepaskan kalor laten fluida perantara ke LNG, serta thermolator untuk memanaskan LNG sampai suhu tertentu sebelum digunakan (Xu et al., 2017b).

Dibeberapa kondisi diperlukan alat yang efektif untuk lingkungan regasifikasi yang kecil. Untuk memenuhi kebutuhan ini, Intermediate Fluid Vaporizer (IFV) dapat diterapkan karena IFV memiliki struktur yang relatif kecil serta performa yang sangat baik dibandingkan alat regasifikasi lainnya.

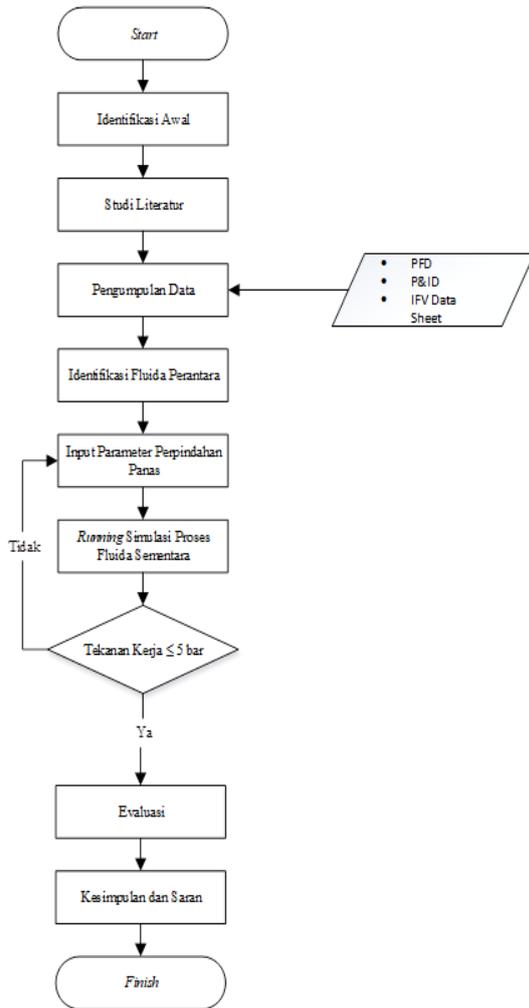
Dalam proses penguapan LNG menuju fase gas, IFV menggunakan fluida perantara. Fluida perantara yang digunakan juga beragam namun, harus memiliki titik didih di atas 0° C, tekanan uap di bawah 5 bar, tidak flammable, serta ramah lingkungan. Saat ini fluida perantara yang banyak digunakan adalah Propana. Tetapi, penggunaan Propana masih ada beberapa kekurangan seperti mudah terbakar, dan tidak ramah lingkungan.

Oleh karena itu, pada tugas akhir ini akan mengkaji jenis fluida perantara yang memungkinkan untuk menjadi alternatif pengganti Propana pada IFV ini untuk meminimalisir resiko kebakaran dan resiko lingkungan.

2. METODOLOGI.

2.1 Diagram Alir

Pada Gambar 2.1 menunjukkan diagram alir penelitian Studi Numerik Kinerja Perpindahan Panas Beberapa Fluida Perantara untuk *Evaporator* jenis *Intermediate Fluid Vaporizer* pada Sistem Regasifikasi Gas Alam Cair.



Gambar 2. 1 Diagram Alir Penelitian

2.2 Garis Besar Penelitian

Dengan adanya permasalahan tersebut dibuat penelitian untuk mengganti Propana dengan fluida yang lebih memadai. Analisis dilakukan menggunakan software Aspen Hysys untuk mendapatkan tekanan kerja, lalu untuk simulasi numerik menggunakan software OpenFoam. Fluida yang dipilih harus memiliki kinerja perpindahan panas yang baik.

2.2.1. Tahap Identifikasi Awal

2.2.1.1. Identifikasi Awal

Pada tahap ini sebuah penelitian didapatkan dari beberapa pengamatan terhadap permasalahan yang sudah diidentifikasi. Pada penelitian ini membahas tentang pergantian fluida perantara pada Intermediate Fluid Vaporizer yang awalnya Propana diganti menjadi fluida perantara yang non-flammable, ramah lingkungan, dan mempunyai kinerja perpindahan panas yang baik. Analisa tersebut akan dilakukan dengan menggunakan studi numerik dengan bantuan program OpenFOAM serta simulasi proses menggunakan Aspen Hysys.

2.2.1.2. Studi Literatur

Kegiatan dari studi literatur adalah pengumpulan teori-teori yang berhubungan dengan

Intermediate Fluid Vaporizer, dan juga studi numerik. Teori-teori tersebut digunakan sebagai landasan dalam menyelesaikan penelitian ini

2.2.2. Tahap Pengolahan Data dan Analisa

2.2.2.1. Identifikasi Fluida Perantara

Pada tahap ini dilakukan identifikasi fluida perantara dengan mencari fluida perantara yang sesuai dengan kriteria yang sudah ditetapkan untuk sebelum dilakukan simulasi. Kriteria yang dibutuhkan untuk memilih fluida perantara diantaranya adalah titik beku fluida, keramahan lingkungan, serta titik flammable.

Pada proses ini dilakukan dua kali simulasi untuk model *Heat Exchanger Simple End Point* dan *Rigorous Model*. Pada proses pemodelan dengan *Simple End Point* hasil yang dihasilkan adalah berupa data fluida perantara seperti Temperatur, Tekanan kerja serta *Molar flow*. Setelah itu dilanjutkan untuk pemodelan *Rigorous*, pemodelan ini bertujuan untuk mendapatkan dimensi dari *Heat Exchanger* itu sendiri.

2.2.2.2. Input Parameter Perpindahan Panas.

Dilakukan input untuk parameter perpindahan panas seperti temperatur, tekanan, molar flow, dan mass flow pada software simulasi proses.

2.2.2.3. Running simulasi proses fluida perantara

Running dilakukan dengan software dengan dua pemodelan *heat exchanger* yaitu *simple end point* dan *Rigorous Shell and Tube*. Setelah itu diidentifikasi apakah tekanan kerja lebih dari 5 bar gauge atau tidak.

2.2.2.4. Evaluasi

Pada evaluasi ini digunakan metode scoring untuk menilai fluida perantara mana yang sesuai untuk menggantikan Propana. Metode yang digunakan untuk scoring ini adalah dengan membagi variabel IF yang ada dengan nilai propana untuk variabel yang semakin besar semakin baik. Atau untuk nilai yang semakin kecil semakin baik, maka nilai propana dibagi dengan nilai IF tersebut. Metode scoring pada bab 4 menggunakan persamaan berikut:

- Untuk parameter yang semakin besar semakin baik:

$$Score = \frac{IF}{Propane}$$

- Untuk parameter yang semakin kecil semakin baik:

$$Score = \frac{Propane}{IF}$$

2.2.2.5. Tahap kesimpulan dan saran

Tahap ini adalah tahap akhir dari penelitian yaitu dengan mendapatkan kesimpulan terhadap hasil pemilihan fluida perantara berdasarkan parameter seperti tekanan kerja, sifat fluida, koefisien perpindahan panas menyeluruh, dan luas permukaan perpindahan panas.

2.3 Rancangan Jadwal Penelitian

Untuk menyelesaikan permasalahan yang terdapat dalam penelitian ini digunakan rancangan jadwal penelitian. Ada beberapa tahap dalam rancangan jadwal penelitian antara lain, yaitu:

2.3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Pengerjaan Tugas Akhir dan melakukan bimbingan dengan dosen pembimbing program studi D4 Teknik Perpipaan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemilihan Fluida Perantara

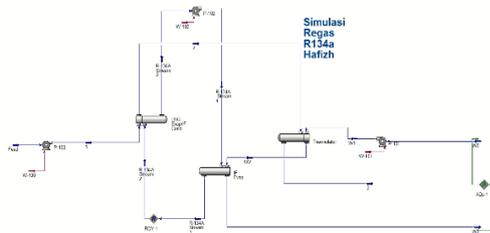
Pemilihan fluida perantara ini didasarkan pada sifat fluida, serta temperatur beku dari fluida ini. Sifat fluida yang dimaksud adalah non-flammable hal ini dikarenakan pada IFV saat ini fluida yang digunakan adalah Propana.

	Propane	R-134A	R-218	R-500
Molecular Weight (g/mol)	44,10	102,03	188,02	99,30
Temperature (°C)	20,00	20,00	20,00	20,00
Pressure (bar)	8,36	5,72	7,56	6,71
Density (kg/m ³)	500,06	1225,33	1352,22	1158,39
Specific Volume (m ³ /kg)	1,99977E-03	1,61040E-04	7,39522E-04	8,63260E-04
Specific Enthalpy (kJ/kg)	251,64	227,47	222,16	232,76
Kinematic Viscosity (m ² /s)	2,04554E-07	1,69233E-07	1,33564E-07	1,46962E-07
Dynamic Viscosity (Pa.s)	1,02288E-04	2,07366E-04	1,80608E-04	1,70204E-04
Vaporization Latent Heat (kJ/kg)	344,31	182,28	79,11	170,80
Flash Point	Flammable	non Flammable	non Flammable	non Flammable

Tabel 3. 1 Data Fluida Perantara

Dari tabel di atas dapat diketahui bahwa ada tiga fluida yang menjadi alternatif untuk menggantikan Propana sebagai fluida perantara pada sistem regasifikasi jenis IFV yaitu R-134A, R-218, dan R-500. Fluida perantara ini diperlukan untuk proses regasifikasi dari LNG yang dikirim dari vessel.

3.1.1. Fluida Perantara R-134A



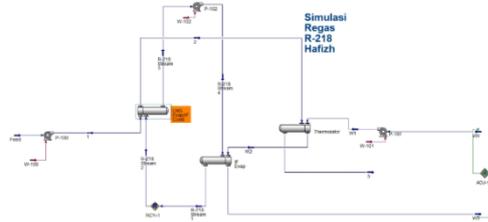
Gambar 3. 1 PFD R134A

Fluida perantara yang pertama disimulasikan adalah R-134A. Fluida ini dipilih karena memenuhi kriteria yang sudah disebutkan di atas

Pada gambar 3.1 diatas aliran fluida bisa ditinjau dari dua sisi yaitu sisi kiri dan kanan. Pada sisi kiri terdapat LNG yang masuk dengan suhu -162°C kemudian dialirkan menuju pompa untuk masuk ke dalam LNG Evaporator untuk proses evaporasi. Evaporasi dalam proses ini dilakukan oleh fluida perantara yang telah dahulu dipanaskan oleh air laut. Air laut, masuk dari sisi kanan dengan mass flow 339.300 kg/h. Air laut yang masuk ini akan memanaskan fluida perantara, lalu fluida perantara akan memanaskan LNG yang masuk dari sisi kiri.

3.1.2. Fluida Perantara R-218

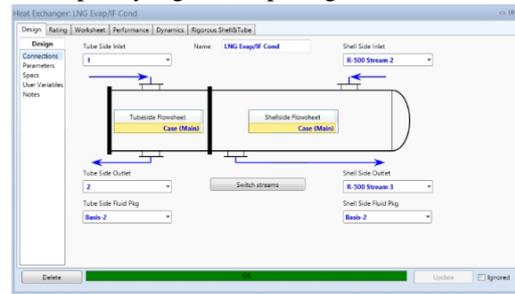
Fluida perantara yang kedua yang disimulasikan adalah R-500. Pada fluida ini juga disimulasikan menggunakan model simple end point terlebih dahulu. Gambar 3. 1 PFD R-218



Gambar 3. 2 PFD R-218

Pada simulasi ini mass flow dari R-218 terdapat sebanyak 57.340 kg/h. Pada PFD ini aliran dimulai dari sisi kiri dan kanan, dimana sisi kiri terdapat FEED atau Front End Engineering Design pada stream ini terdapat LNG dengan temperatur -162°C akan dialirkan ke dalam LNG Evaporator.

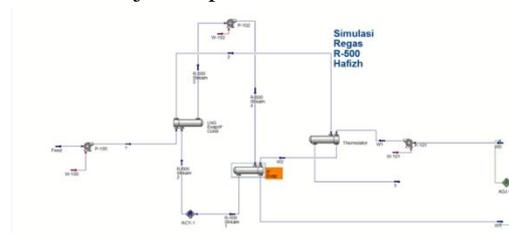
Pada kasus ini, R-218 sebagai fluida pemanas sedangkan LNG sebagai fluida penerima panasnya. Kondisi ini bisa erlihat pada desain yang ada pada LNG Evaporator dilihat melalui sistem koneksi yang ada seperti yang tertera pada gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Koneksi LNG evaporator

3.1.3 Fluida Perantara R-500 (Forane)

Fluida perantara yang ketiga yang disimulasikan adalah R-500. Pada fluida ini juga disimulasikan menggunakan model simple end point terlebih dahulu. Setelah melakukan simulasi, terdapat beberapa parameter yang diambil seperti tekanan kerja, temperatur, dan mass flow.



Gambar 3. 4 PFD R-500

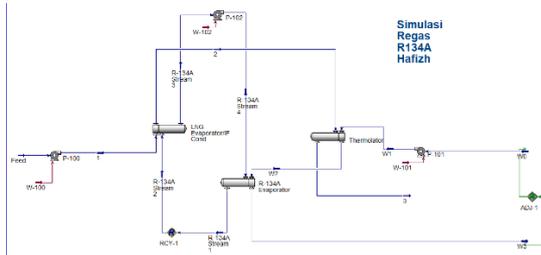
Pada simulasi ini mass flow dari R-500 terdapat sebanyak 30.290 kg/h. Pada PFD ini aliran dimulai dari sisi kiri dan kanan, dimana sisi kiri terdapat FEED atau Front End Engineering Design pada sisi kanan terdapat W0, dimana W0 ini adalah tempat masuknya air laut. Kondisi awal air laut yang masuk pada stream W0 dengan temperatur 30°C,

tekanan 1.013 bar absolut serta mass flow sebesar 380.400 kg/h.

Material Stream: W0			
Worksheet	Attachments	Dynamics	
Worksheet			Stream Name: W0 Aqueous Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	30.00	30.00
Composition	Pressure [bar]	1.013	1.013
Oil & Gas Feed	Molar Flow (MMSCFD)	423.9	423.9
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	3.804e+005	3.804e+005
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	381.2	381.2
User Variables	Molar Enthalpy [kcal/kgmole]	-6.800e+004	-6.800e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	7.823	7.823
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	-1.669e+006	-1.669e+006
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	374.8	374.8
Emissions	Fluid Package	Rbasis - 7	
	Utility Type		

Gambar 3. 5 Kondisi Stream W0

3.2 Simulasi Proses Pada Software Aspen Hysys



Gambar 3. 6 Process Flow Diagram Sistem Regasifikasi IFV pada Hysys

Masing-masing fluida perantara disimulasikan ke dalam sistem regasifikasi menggunakan software ASPEN HYSYS. Pertama, sebelum melakukan simulasi harus ditentukan dahulu paket properti beserta komposisi penyusun dari masing-masing fluida yang akan dialirkan, dalam hal ini terdapat tiga fluida yang akan dialirkan yaitu air laut, fluida perantara, dan LNG.

Setelah menentukan propertis dan komponen fluida, selanjutnya adalah menggambar PFD dari sistem regasifikasi ini. Pada PFD seperti yang tertera pada gambar 3.8 terdapat tiga komponen HE, dua pompa, satu recycle, serta satu adjuster. Recycle pada proses ini adalah yang

yang menjadi variabel adalah molar flow.

3.2.1 Data Sifat Fluida Pada Simulasi Evaporator Fluida Perantara

Dalam proses ini fluida perantara ditargetkan agar dapat berubah fase yang semula cair penuh dibuktikan dengan dengan nilai fraksi uap adalah 0 dan berubah menjadi uap penuh dibuktikan dengan nilai fraksi uap adalah 1. Berikut adalah hasil simulasi untuk evaporator fluida perantara.

Tabel 3.2 Data Sifat Hasil Simulasi Evaporator Fluida Perantara

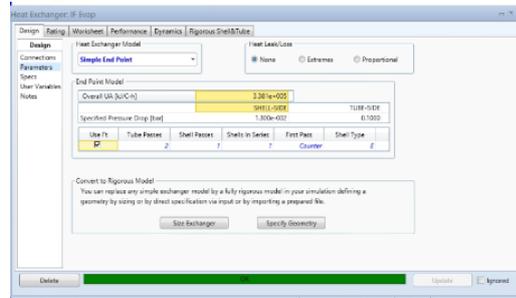
Fluida	OP bar	ṁ (kg/h)
Air Laut	15,92	339300
Propane	5,014	17571
R-134A	7,102	31120
R-218	5,26	57340

Dimana:

OP = Tekanan kerja (bar)

ṁ = Laju aliran massa total (kg/h)

Pada evaporator ini terdapat empat titik, yaitu dua inlet serta dua outlet. Fluida pemanas ditempatkan ada tube sedangkan fluida yang dipanaskan ditempatkan pada shell. Untuk pertama, simulasi Evaporator menggunakan model simple end point. Model simple end point adalah salah satu model HE yang ada pada Hysys, namun model yang dipakai pada kasus ini adalah simple end point dan Rigorous Shell and Tube. Untuk setting dari model simple end point dan Rigorous adalah seperti gambar 3.5 dan 3.6.



Gambar 3. 5 Setting Model Simple End Point



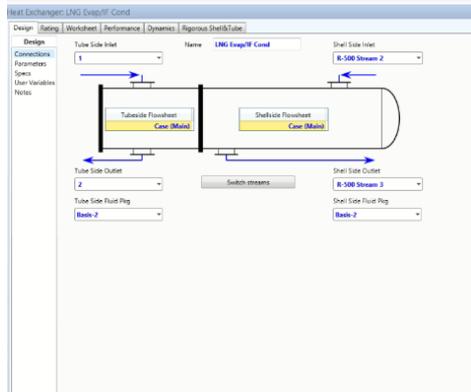
Gambar 3. 6 Setting untuk Model Rigorous Shell and Tube

3.3.2. Data Sifat Fluida Pada Simulasi Condenser Fluida Perantara

Dalam kondenser, fluida yang bekerja adalah fluida perantara dan LNG. Fluida perantara yang mula-mula dalam fase uap akibat melewati evaporator akan naik ke atas dan menyentuh rangkaian tabung berisikan LNG dengan temperatur yang sangat rendah sehingga terjadi pertukaran

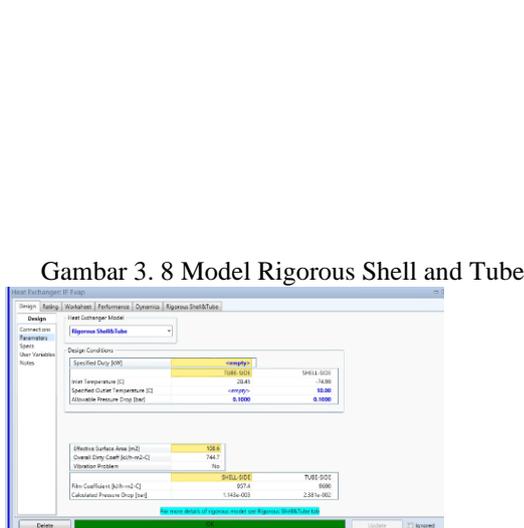
panas antara keduanya dimana fluida perantara akan mengalami kondensasi dan berubah menjadi fase cair, sementara LNG akan mengalami evaporasi yang semula fase cair menjadi fase gas.

Sama seperti evaporator, kondensor ini memiliki empat buah titik yaitu dua titik inlet serta dua titik outlet. Kondensor ini memiliki dua sisi, yaitu shell side dan tube side. Sisi dari shell diisi oleh fluida pemanas, dalam hal ini adalah fluida perantara sementara sisi tube diisi oleh fluida yang akan dipanaskan yaitu LNG. Hal ini dapat dilihat seperti pada gambar.



Gambar 3. 7 Connection LNG Evaporator

Untuk pertama, simulasi Kondensor menggunakan model simple end point adalah salah satu model HE yang ada pada Hysys, ada beberapa model pada Hysys namun model yang dipakai pada kasus ini adalah simple end point dan Rigorous Shell and Tube. Untuk setting dari model simple end point dan Rigorous seperti yang terlihat pada gambar.



Gambar 3. 9 Model Simple End Point

3.3 Scoring Pemilihan Fluida Perantara

Tabel 3. 3 Scoring Intermediate Fluid

Tabel Scoring				
Jenis Fluida	Propane	R-134A	R-218	R-500
A (Evaporator) (m ²)	1	0,632	0,49	0,437
OP (Evaporator)(bar)	1	1,202	0,923	1,103
U(Evaporator) (W/m ² -K)	1	0,508	0,589	0,515
A(Kondensor) (m ²)	1	3,535	3,535	3,535
OP(Kondensor)(bar)	1	1,203	0,922	3,575
U(Kondensor) (W/m ² -K)	1	1,860	2,189	2,265
Mass Flow(SW)(kg/h)	1	0,982	0,877	0,876
Mass Flow(IF)(kg/h)	1	0,565	0,306	0,580
Non-Flammable	0	1	1	1
Eco-Friendly	1	1	1	1
Total	9	12,488	11,832	14,885

Scoring atau penilaian pada fluida perantara yang sudah disimulasikan bertujuan untuk memilih fluida perantara mana yang memungkinkan untuk menggantikan Propana. Metode yang digunakan untuk scoring ini adalah dengan membagi variabel yang ada dengan nilai propane untuk variabel yang semakin besar semakin baik. Atau untuk nilai yang semakin kecil semakin baik, maka nilai propane dibagi dengan nilai tersebut. Berdasarkan penilaian tabel di atas, maka fluida perantara yang dapat menggantikan Propana adalah R-500.

4. KESIMPULAN

1. Ketiga fluida perantara pengganti propane adalah fluida yang ramah lingkungan dan tidak mudah terbakar atau non-flammable. Ketiga fluida tersebut memiliki sifat eco-friendly dan non-flammable.
2. Fluida perantara yang memiliki luas perpindahan panas yang paling kecil diantara fluida perantara adalah R-134A.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyadari penyusunan jurnal ini tidak terlepas dari bimbingan dan motivasi dari berbagai pihak, penulis menyampaikan terimakasih sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Ir. Eko Julianto, M.Sc., FRINA., selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
2. Bapak George Endri Kusuma, S.T., Teknik Perkapalan Negeri Surabaya, M.T., Politeknik Perpipaan, Negeri Surabaya, selaku Dosen Pembimbing II.
3. Bapak M. M. M. selaku Dosen Pembimbing I.
4. Bapak M. M. selaku Dosen Pembimbing II.
5. Bapak Burniadi Moballa, ST., M.Sc., Ph.D selaku Dosen Pembimbing pertama. Beliau yang selalu memberikan arahan dan bimbingan dari setiap permasalahan yang dihadapi penulis dalam penelitian ini.
6. Kedua orang tua serta saudara penulis yang telah memberi segala bentuk doa, dukungan dan perjuangan hingga penulis sampai di titik ini.

7. Seluruh staf civitas akademika PPNS yang telah memberikan bimbingan dan pengarahan selama pengerjaan Tugas Akhir dan proses studi penulis.
8. Semua teman-teman Teknik Perpipaan 2018 telah memberikan bantuan berupa semangat, keceriaan, dan ilmu selama penulisan tugas akhir.

7. PUSTAKA

- [1.] Cengel. (2015). *Heat and Mass Transfer – Fundamentals and Applications (5th ed)*.
- [2.] Guide. (2020). OpenFOAM v2012 User Guide. *OpenCFD Limited, December*, 104. [https://openfoam.org/ASTM A-105](https://openfoam.org/ASTM-A-105), Standard Specification for Carbon Steel Forgings for Piping Applications, United State.
- [4.] Han, H., Yan, Y., Wang, S., & Li, Y. X. (2018). Thermal design optimization analysis of an intermediate fluid vaporizer for liquefied natural gas. *Applied Thermal Engineering*, 129, 329–337. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017>.
- [5.] Higashi, K., Kondou, C., & Koyama, S. (2020). Feasibility analysis for intermediated fluid type LNG vaporizers using R32 and R410A considering fluid properties. *International Journal of Refrigeration*, 118, 325–335. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.06.028>.
- [6.] *HTRI Design Manual*. (2013).
- [7.] Iwasaki, M., Egashira, S., Oda, T., Asada, K., & Sugino, K. (2000). *Intermediate Fluid Type Vaporizer, and Natural Gas Supply Method Using The Vaporizer* (Patent No. 6164247). U.S. Patent Office.
- [8.] McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (1993). *Unit Operation of Chemical Engineering*.
- [9.] P. Incropera, F., S. Lavine, A., P. DeWitt, D., & L. Bergman, T. (2011). *Introduction to Heat Transfer, Sixth Edition*.
- [10.] Ribés, A., & Bruneton, A. (2014). Visualizing results in the SALOME platform for large numerical simulations: An integration of ParaView. *IEEE Symposium on Large Data Analysis and Visualization 2014, LDAV 2014 - Proceedings*, 119–120. <https://doi.org/10.1109/LDAV.2014.7013218>
- [10.] Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003a). *FUNDAMENTALS OF HEAT EXCHANGER DESIGN*.
- [11.] Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003b). *FUNDAMENTALS OF HEAT EXCHANGER DESIGN*.
- [12.] Solberg, E. L. (2015). *A comparative Analysis of Propane and Ethylene Glycol as Intermediate Fluid in a LNG Regasification System*.
- [13.] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition*. www.pearsoned.co.uk/versteeg
- [14.] Wang, B., Wang, W., Qi, C., Kuang, Y., & Xu, J. (2020). Simulation of performance of intermediate fluid vaporizer under wide operation conditions. *Frontiers in Energy*. <https://doi.org/10.1007/s11708-020-0681-4>
- [15.] Xu, S., Chen, X., & Fan, Z. (2017a). CFD simulation of supercritical LNG heat transfer in a horizontal tube of an intermediate fluid vaporizer. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 3A-2017*. <https://doi.org/10.1115/PVP2017-65669>
- [16.] Xu, S., Chen, X., & Fan, Z. (2017b). Design of an Intermediate Fluid Vaporizer for Liquefied Natural Gas. In *Chemical Engineering and Technology* (Vol. 40, Issue 3, pp. 428–438). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/ceat.201500740>
- [17.] Yao, S. G., Wang, M. di, & Zhao, R. (2021). Cold exergy recovery in LNG powered ships with a new integral intermediate fluid vaporizer. *AIP Advances*, 11(3). <https://doi.org/10.1063/5.0034865>