

Desain *Fully Welded Plate Heat Exchanger* untuk Pemanfaatan Asap Pirolisis dengan Metode *Computational Fluid Dynamic (CFD)*

Ahmad Maksu^{1*}, Gun Gun Ramdhan Gunadi², Faiz Irza Ramadhan² dan Candra Damis Widiyaway³

¹Program Studi Alat Berat, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

²Program Studi Pembangkit Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

³Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

*Corresponding author: ahmad.maksu@mesin.pnj.ac.id

Artikel info: Diterima: 21 September 2023 | Disetujui 29 Maret 2024 | Tersedia online: 30 April 2024
DOI: 10.32722/jmt.v5i1.6268

Abstrak

Tingginya kebutuhan akan energi di Indonesia menghadapi tantangan serius karena ketersediaan sumber energi yang terbarukan terus berkurang. Bahan bakar fosil, terutama Bahan Bakar Minyak (BBM), mendominasi konsumsi energi di negara ini. Meskipun potensi volume sekam padi hasil panen cukup besar, limbah ini seringkali hanya dibuang atau digunakan sebagai bahan bakar pada kompor dan tungku. Penelitian ini memiliki tujuan untuk merancang dan menganalisis suatu penukar panas yang dapat mengubah asap dari pembakaran sekam padi menjadi bentuk cairan, yang dapat dijadikan sebagai alternatif bahan campuran dengan BBM. Desain penukar panas ini dimaksudkan untuk memfasilitasi produksi asap cair yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat, terutama di daerah yang menghasilkan sekam padi dan oleh pelaku usaha kecil dan menengah (UMKM) untuk meningkatkan nilai dari limbah tersebut. Dengan optimalisasi pengolahan limbah organik seperti sekam padi, diharapkan dapat memberikan solusi terhadap masalah keterbatasan sumber energi tidak terbarukan di masa depan. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa desain penukar panas terbaru, yang merupakan tipe Plate Heat Exchanger dengan variasi jarak antar plat 1cm, 2cm, 3cm, 4cm, dan 5cm, menghasilkan suhu keluaran fluida panas setelah melalui perangkat penukar panas sebesar 109,12°C, 120,37°C, 139,95°C, 154,46°C, 163,55°C, dan memiliki efektivitas dalam sistem perpindahan panas berturut-turut sebesar 92,6%, 83,4%, 67,5%, 55,7%, 48,3%.

Kata-kata kunci: Penukar Panas, Pirolisis, Asap Cair, CFD.

Abstract

The high demand for energy in Indonesia is facing significant challenges due to the diminishing availability of renewable energy sources. Fossil fuels, especially Diesel Fuel (BBM), dominate the country's energy consumption. Although there is a substantial potential volume of rice husk waste generated during harvests, this waste is often either discarded or used as fuel for stoves. This research aims to design and analyze a heat exchanger capable of converting the smoke produced from burning rice husks into a liquid form, which can serve as an alternative additive to BBM. The purpose of this heat exchanger design is to facilitate the production of liquid smoke that can be utilized by the community, particularly in regions where rice husks are abundant, and by small and medium-sized enterprises (SMEs) to enhance the value of this waste material. By optimizing the treatment of organic waste such as rice husks, it is anticipated to provide a solution to the



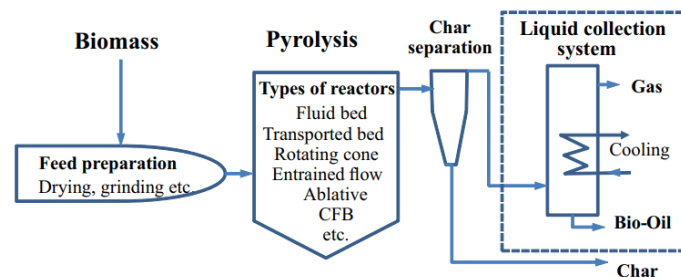
challenges posed by the limited availability of non-renewable energy sources in the future. The results of this research indicate that the latest heat exchanger design, a Plate Heat Exchanger type with variations in plate spacing of 1cm, 2cm, 3cm, 4cm, and 5cm, yielded hot fluid outlet temperatures of 109.12°C, 120.37°C, 139.95°C, 154.46°C, 163.55°C, and had consecutive heat transfer system efficiencies of 92.6%, 83.4%, 67.5%, 55.7%, and 48.3%.

Keywords: Heat Exchanger, Pyrolysis, Liquid Smoke, CFD.

1. PENDAHULUAN

1. Pendahuluan, Metode Penelitian, Hasil dan Pembahasan, Kesimpulan, dan Referensi.

Menurut data yang terdokumentasikan dalam Renstra (Rencana Strategis) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia, dapat disimpulkan bahwa mayoritas konsumsi energi di Indonesia bersumber dari bahan bakar fosil, dengan penekanan khusus pada Bahan Bakar Minyak (BBM) yang berkontribusi sekitar 50% dari total konsumsi energi fosil. BBM juga mendominasi sekitar 95% dari total konsumsi energi dalam negeri. Saat ini, cadangan minyak bumi Indonesia tercatat sekitar 4,7 miliar barel, namun proyeksi menunjukkan bahwa cadangan ini diperkirakan akan habis dalam kurun waktu lima tahun ke depan, yakni sekitar tahun 2028. Selama dekade terakhir, produksi bahan bakar di Indonesia telah mengalami peningkatan sekitar 3,8% per tahun, tetapi konsumsi energi juga mengalami pertumbuhan yang sebanding, menggarisbawahi tantangan keberlanjutan dalam pemenuhan kebutuhan energi nasional [1]. Indonesia memiliki potensi besar untuk menghasilkan bahan bakar alternatif melalui pengolahan limbah pertanian, terutama sekam padi. Produksi padi pada tahun 2021 mencapai 55,27 juta ton dengan residu berupa sekam padi mencapai 23,6 juta ton GKG. Sekam padi memiliki potensi untuk dijadikan bahan baku biofuel atau dicampur dengan bahan bakar lain [2]. Pengolahan limbah sekam padi dapat meningkatkan nilai ekonomis dan memiliki dampak positif terhadap lingkungan. Melalui proses karbonisasi, nilai kalor dari sekam padi dapat ditingkatkan, dan juga menghasilkan bio-oil. Penggunaan penukar panas bertujuan untuk mengubah gas hasil karbonisasi menjadi asap cair, yang memiliki nilai ekonomis tersendiri. Pemanfaatan asap cair dari limbah sekam padi ini memiliki potensi besar untuk menjadi sumber energi alternatif yang berkelanjutan [3].

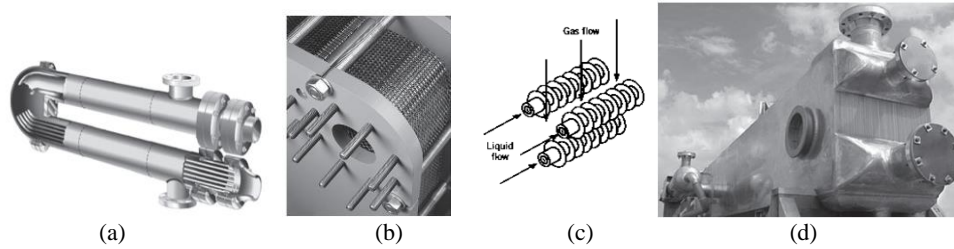


Gambar 1. Diagram Proses Pirolisis Biomassa. [4]

Pada penelitian diatas oleh kumar palla bahwa proses pirolisis asap dan arang namun dengan adanya pengolahan limbah hasil pembakaran dengan menggunakan penukar panas akan menghasilkan asap cair dan gas yang tidak terkondensasi. Penukar panas atau dikenal sebagai LCS (*Liquid Collection System*) digunakan untuk menurunkan suhu temperatur asap menjadi asap cair. [5]

Penukar Panas

Pada industri terdapat beberapa penukar panas yang biasa digunakan tergantung kebutuhannya, menurut buku Kuppam Thullukanam, penukar panas merupakan perangkat yang memainkan peran krusial dalam mentransfer panas secara efisien dari satu fluida ke fluida lainnya. Setiap jenis penukar panas memiliki desain dan prinsip kerja yang unik yang memengaruhi efisiensi pertukaran panasnya. [6]



Gambar 2. Jenis Jenis Penukar Panas: a) *Shell and Tube*, b) *Plate Heat Exchanger*, c) *Extended Surface*, d) *Regenerative* [7]

Pada penelitian dilakukan menggunakan jenis *Plate Heat Exchanger* sehingga dapat digunakan pada kondisi area yang tidak terlampaui luas namun memberikan efektivitas yang optimum dalam operasionalnya[8]. Kemudian penelitian lain menunjukkan terdapat peningkatan efektivitas dengan meningkatkan luas permukaan untuk kondisi area yang minim[9]. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan simulasi menggunakan perangkat yang sama untuk jenis *shell and tube* dan efisiensi belum mencapai hasil yang optimum[2,5]. Maka dari itu dilakukan penelitian ini untuk mengetahui hasil desain dan temperatur asap pirolisis yang keluar dari penukar panas

2. METODE PENELITIAN

Nomenklatur

A	Luas Permukaan	m^2	<i>Greek Symbol</i>	
C_p	Kalor Spesifik.....	$J/kg.^{\circ}C$	μ	Viskositas Dinamis.
h	Koefisien Panas Konveksi	$W/m^2.^{\circ}C$	ε	Efisiensi Perpindahan Panas
k	Konduktivitas Termal	$W/m.^{\circ}C$	η	Persentase Performa
L	Panjang	m	ρ	Densitas
$LMTD$	<i>long mean temperature difference</i>			
\dot{m}	Laju Aliran Massa	kg/s	<i>Subscript</i>	
Q_{max}	Laju Perpindahan Panas Maksimum	W	f	Fluida
P	Tekanan	Pa	c	Dingin
T	Temperatur	$^{\circ}C$	h	Panas
U	Koefisien Perpindahan Panas	$W/m^2.^{\circ}C$	i	Masukan
Q	Laju Perpindahan Panas	W	o	Keluaran
v	Kecepatan Fluida	m/s	max	Nilai Maksimum
N_c	Jumlah Channel	buah	min	Nilai Minimum
N_p	Jumlah Plat	buah		
Re	Reynold			
Pr	Prandtl			
Nu	Nusselt.....			
h	Koefisien Panas Konvektif	$W/m^2.^{\circ}C$		
DH	Diameter Hidraulik.....	m		

Makalah ini dibuat untuk melakukan desain dan simulasi menggunakan komputasi fluida dinamik. Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini melibatkan pemodelan dan analisis kinerja penukar panas pelat tipe *counter flow* dalam kondisi adiabatik. Jenis fluida panas diasumsikan uap, sementara fluida dingin adalah air. Dalam perancangan penukar panas, diasumsikan tidak ada perubahan fasa yang terjadi pada kedua fluida. Aliran fluida berlangsung dalam arah *counter flow*. Fokus utama dari perancangan adalah untuk memahami suhu keluaran fluida panas yang dihasilkan dari simulasi, nilai koefisien transfer panas global (U) dan efektivitas penukar panas. Pengujian diterapkan dalam kondisi adiabatik, di mana perpindahan panas terjadi dalam sistem tertutup tanpa mempertimbangkan faktor luar atau lingkungan. Perangkat lunak SolidWorks digunakan untuk melakukan simulasi yang mencakup berbagai kondisi operasional yang relevan. Hasil simulasi akan dianalisis secara mendalam untuk memahami kinerja penukar panas pelat dalam konteks yang ditentukan.

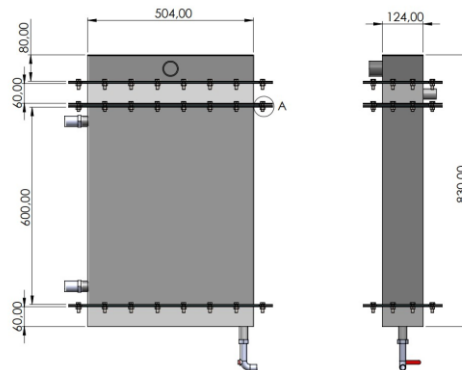
Tabel 1. *Table Properties of Matter* dari fluida

Parameter	Satuan	Nilai	
		Fluida Panas	Fluida Dingin
Laju Aliran Massa	kg/h	150	1500
Temperatur Masuk	$^{\circ}C$	223	25
Tekanan Fluida	Pa	200000	160000
Kapasitas Kalor	$kJ/kg.K$	1,985	4,179
Massa Jenis	kg/m^3	0,4405	997,01
Viskositas	$N.s/m^2$	0,00001704	0,000855
Konduktivitas Termal	$W/m.K$	0,0339	0,613

Dalam konteks aliran fluida panas yang merupakan uap air, digunakan laju aliran massa sebesar 150 kg per jam, yang setara dengan 0,0416667 kg per detik. Uap air ini memiliki suhu sebesar 223 °C dan tekanan sebesar 2 bar. Sebaliknya, dalam kasus fluida dingin, air digunakan dengan laju aliran massa sebesar 1500 kg per jam, yang sama dengan 0,416667 kg per detik. Air ini memiliki suhu awal sekitar 25 °C dan tekanan sebesar 1,6 bar. Suhu lingkungan yaitu 1,01 bar dengan temperatur lingkungan 27°C, kelembapan relatif adalah 88%. [10]

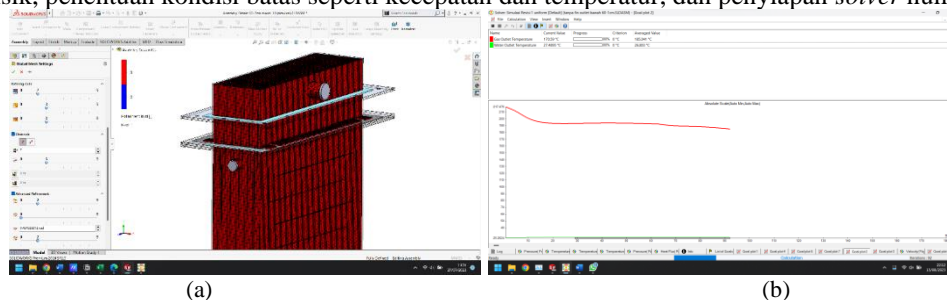
Computational Fluid Dynamic (CFD)

Desain dan analisis sistem teknis yang melibatkan aliran fluida dapat dilakukan melalui dua pendekatan fundamental, yaitu secara eksperimen dan matematis. Pendekatan matematis ini melibatkan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), yang merupakan solusi penyelesaian dari persamaan aliran fluida dengan bantuan komputer. Dalam metode CFD, persamaan kekekalan massa, energi, dan momentum digunakan untuk menghasilkan data prediksi seperti tekanan, laju aliran, dan temperatur. Proses ini melibatkan pembagian objek yang akan disimulasikan menjadi kontrol volume kecil, di mana perhitungan matematis dilakukan. [11]

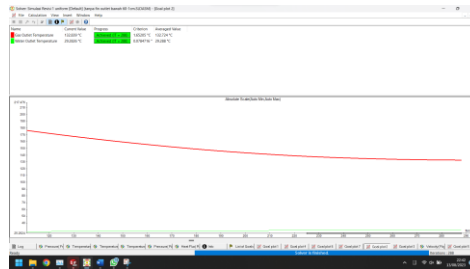


Gambar 3. Dimensi Penukar Panas Jenis Plat Las Penuh Tampak Depan dan Samping

Tahap *pre-processing* CFD merupakan langkah awal dalam persiapan simulasi. Ini mencakup pembuatan geometri digital dari objek fisik yang akan disimulasikan, pembuatan *mesh* atau *grid* untuk mendiskritisasi domain fisik, penentuan kondisi batas seperti kecepatan dan temperatur, dan penyiapan *solver* numerik.

Gambar 4. Gambar pada saat *processing*: a) meshing komponen sebelum dilakukan, b) komputasi sedang berjalan

Tahap processing CFD adalah saat perangkat lunak CFD memecahkan persamaan matematika yang menggambarkan aliran fluida dalam sistem. Software ini menggunakan informasi dari tahap *pre-processing* untuk menghitung properti fluida di setiap titik dalam mesh komputasi. Langkah-langkahnya mencakup pemecahan persamaan Navier-Stokes dan pengecekan konvergensi untuk memastikan hasil perhitungan konvergen.



Gambar 5. Simulasi Selesai

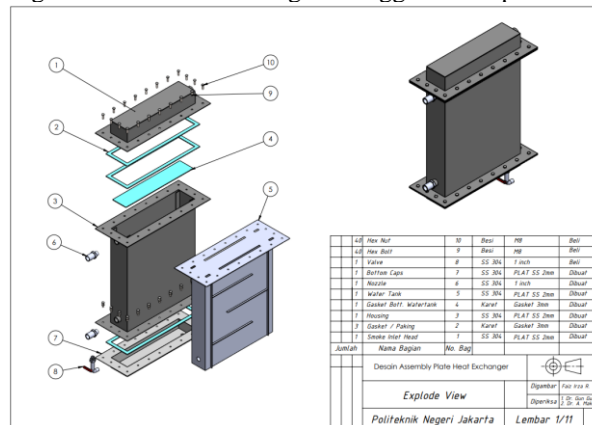
Setelah tahap simulasi, dilakukan *post-processing* CFD. Ini melibatkan pengambilan hasil simulasi dari solver CFD, visualisasi data dengan plot kontur dan animasi, analisis data seperti menghitung kecepatan aliran dan tekanan, validasi hasil dengan data eksperimen, dan interpretasi hasil untuk membuat keputusan tentang perilaku fluida. Seluruh proses ini memungkinkan pemahaman yang lebih dalam tentang sistem aliran fluida dan membantu dalam pengambilan keputusan teknis yang berdasarkan data simulasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai penyisipan tabel, gambar dan referensi.

Hasil Desain

Hasil Desain terdapat pada gambar dibawah ini dengan menggunakan aplikasi desain SolidWorks.



Gambar 6. Hasil Desain dan *Bill Of Material* Komponen Plate Heat Exchanger

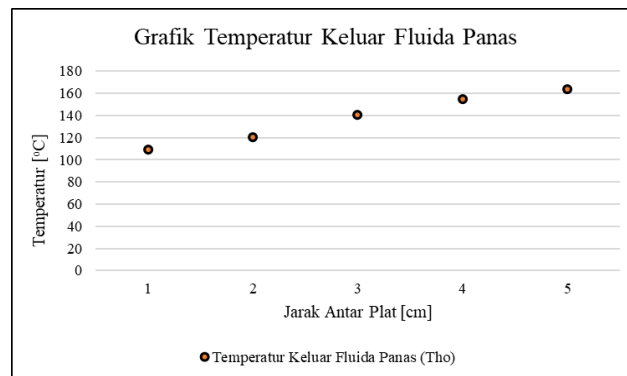
Hasil desain yang dihasilkan adalah *fully welded plate heat exchanger* dengan model *knock down*, yang dirancang khusus untuk digunakan oleh usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM), terutama para petani beras. Alat ini dirancang dengan tujuan agar para petani beras dapat memanfaatkannya untuk meningkatkan nilai jual dari hasil limbah panen mereka. Dengan menggunakan *heat exchanger* ini, petani dapat mengoptimalkan pengolahan hasil limbah panen mereka, sehingga menghasilkan produk yang lebih bernilai dan berkualitas tinggi. Dengan demikian, ini dapat memberikan dampak positif terhadap pendapatan petani dan membantu mereka meningkatkan kesejahteraan ekonomi mereka. Selain itu, desain *heat exchanger* yang mudah dirakit (*knock down*) juga memudahkan penggunaan dan perawatan oleh UMKM, sehingga menjadikannya solusi yang praktis dan efisien dalam memaksimalkan nilai hasil panen beras.

Hasil Simulasi

Tabel 2. Hasil Simulasi dan Perhitungan

Data Hasil Simulasi						
Parameter	Satuan	Variabel				
		1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
Parameter Hasil Simulasi						
Temp. Inlet <i>Hot fluid</i>	°C	223	223	223	223	223
Temp. Outlet <i>Hot fluid</i>	°C	109,12	120,37	139,95	154,46	163,55
Temp. Inlet <i>Cold fluid</i>	°C	25	25	25	25	25
Temp. Outlet <i>Cold fluid</i>	°C	30,41	29,87	28,9	28,25	27,83
Kecepatan Aliran Fluida Panas	m/s	9,54	4,38	3,35	2,35	1,73
Perhitungan Parameter Aliran						
Luas Penampang (A)	m ²	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025
Diameter Hidraulik (DH)	m	0,0196	0,0385	0,0566	0,0741	0,0909
Reynold <i>Hot fluid</i>	Re	4893,76	4364,21	4910,15	4517,93	4069,17
Prandtl <i>Hot fluid</i>	Pr	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
Nusselt <i>Hot fluid</i>	Nu	21,02	18,70	20,61	19,28	17,74
Perhitungan Parameter Perpindahan Panas						
Koefisien Perpindahan Panas Konvektif (<i>h_{hot}</i>)	W/m ² .K	4053,5	1902,39	1420,47	1015,52	761,02
Koefisien Perpindahan Panas Konvektif (<i>h_{cold}</i>)	W/m ² .K	3005,08	3005,08	3005,08	3005,08	3005,08
Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan (U)	W/m ² .K	1282,92	944,8	808,563	658,982	541,481
Laju Perpindahan Panas	W	226052,8	203720,6	164854,3	136051,9	118008,3
Efektivitas	%	92,6%	83,4%	67,5%	55,7%	48,3%

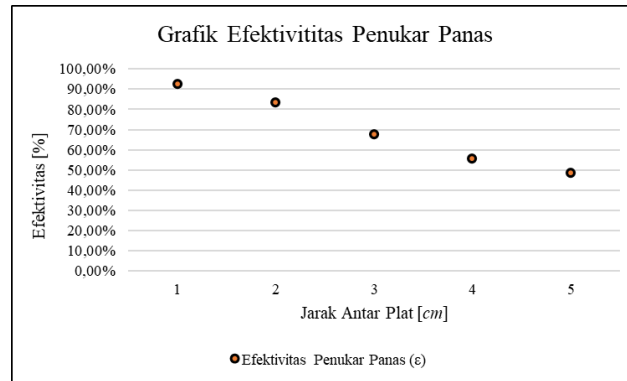
Menurut tabel diatas yang merupakan hasil simulasi *plate heat exchanger* dengan variasi jarak 1 hingga 5 cm menunjukkan hasil yang menarik dalam pemahaman kinerja peralatan tersebut. Perubahan ini tercermin dalam parameter perhitungan aliran, di mana kecepatan aliran fluida panas (*hot fluid*) mengalami penurunan yang signifikan dengan peningkatan jarak antar plat. Hal ini berdampak pada Reynolds number yang semakin kecil, menunjukkan perubahan dari aliran turbulen menjadi laminar. Namun, *Prandtl* number tetap konstan. Dalam hal perhitungan parameter perpindahan panas, koefisien perpindahan panas konvektif *hot fluid* (*h_{hot}*) mengalami penurunan yang cukup tajam seiring peningkatan jarak antar plat. Hal ini berarti bahwa perpindahan panas dari *hot fluid* ke *cold fluid* menjadi kurang efisien pada jarak yang lebih besar. Sebaliknya, koefisien perpindahan panas konvektif *cold fluid* (*h_{cold}*) tetap konstan.



Gambar 7. Grafik Temperatur Keluar Fluida Panas

Dalam parameter hasil simulasi, dapat dilihat bahwa suhu *inlet hot fluid* tetap konstan pada 223°C, sementara suhu *outlet hot fluid* menurun secara signifikan dengan peningkatan jarak antar plat, mulai dari 109,12°C pada jarak 1 cm menjadi 163,55°C pada jarak 5 cm. Di sisi lain, suhu *inlet cold fluid* juga tetap konstan pada 25°C,

namun suhu *outlet cold fluid* naik secara bertahap seiring peningkatan jarak antar plat, dari 30,41°C pada jarak 1 cm menjadi 27,83°C pada jarak 5 cm. Dalam analisis keseluruhan, tabel simulasi ini memberikan pemahaman yang jelas tentang bagaimana variasi jarak antar plat dapat memengaruhi kinerja *plate heat exchanger*, terutama dalam hal efisiensi perpindahan panas antara fluida panas dan fluida dingin. Dengan pemahaman ini, dapat dicari solusi yang optimal untuk pengaturan jarak antar plat yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi yang diinginkan.



Gambar 8. Grafik Efektivitas Penukar Panas

Efektivitas perpindahan panas juga menunjukkan tren penurunan yang signifikan seiring dengan peningkatan jarak antar plat, mulai dari 92,6% pada jarak 1 cm menjadi 48,3% pada jarak 5 cm. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar jarak antar plat, semakin kurang efisien peralatan ini dalam melakukan pertukaran panas antara fluida panas dan fluida dingin.

Hasil dari penelitian adalah desain dengan jarak antar plat 1cm memiliki nilai yang baik untuk mampu dijadikan acuan untuk manufaktur alat sehingga memperoleh efisiensi panas yang baik untuk melepas kalor dari asap sehingga penurunan temperatur asap dapat tercapai.

4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, terdapat tiga poin utama yang dapat disimpulkan. Pertama, sebuah desain *plate heat exchanger* telah dirancang secara khusus untuk mengakomodasi kebutuhan usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM), terutama dalam konteks petani beras. Desain ini bertujuan untuk meningkatkan nilai jual dari limbah panen petani, dan potensial untuk memberikan dampak positif terhadap pendapatan serta kesejahteraan ekonomi mereka. Kedua, hasil simulasi yang telah dilakukan mengungkapkan pengaruh yang signifikan dari variasi jarak antar plat terhadap kinerja *plate heat exchanger*. Perubahan suhu *outlet hot fluid* dan suhu *outlet cold fluid* yang berkaitan dengan peningkatan jarak antar plat mengindikasikan perubahan dalam efisiensi perpindahan panas sehingga penukar panas plat dengan jarak 1cm dinilai efektif dari segi hasil uji simulasi. Ketiga, *plate heat exchanger* dengan model *knock down* telah terbukti sebagai solusi praktis dan efisien untuk UMKM, khususnya para petani beras, dengan tujuan meningkatkan nilai hasil panen mereka melalui pengelolaan limbah panen yang lebih efektif. Penelitian ini memberikan landasan yang kokoh untuk pemilihan parameter desain yang tepat, seperti jarak antar plat, dan berpotensi memberikan kontribusi positif pada pengembangan produk pertanian dalam skala yang lebih luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial dari Politeknik Negeri Jakarta melalui skema hibah PMTA 2023 dan Kemendikbud Ristek melalui program Riset Keilmuan Terapan 2021. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih atas dukungan fasilitas dan keikutsertaan dari Riset *Center for eco-friendly Technology*.

REFERENSI

1. A. F. Sa'adah, A. Fauzi, and B. Juanda, *Jurnal Ekonomi Dan Pembangunan Indonesia* **17**, 118 (2017).
2. F. I. Ramadhan, J. W. M. Soedarsono, R. Riastuti, and A. Maksum, *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* **1111**, (2022).
3. A. T. Hoang, H. C. Ong, I. M. R. Fattah, C. T. Chong, C. K. Cheng, R. Sakthivel, and Y. S. Ok, *Fuel Processing Technology* **223**, 106997 (2021).
4. V. S. K. K. Palla, K. Papadikis, and S. Gu, *Fuel Processing Technology* **131**, 59 (2015).
5. M. Ramadani Rudiantama, F. Irza Ramadhan, P. Indra Kusumo, A. Syakuro, D. Ricardo Marulitua Tambun, Hamdi, and Ahmad Maksum, *Seminar Nasional Inovasi Vokasi* **1**, 96 (2022).
6. T. L. BERGMAN, A. S. LAVINE, and F. P. INCROPERA, *Introduction to Heat Transfer: Sixth Edition*, Sixth (JOHN WILEY & SONS, INC., 2011).
7. K. Thulukkanam, *Heat Exchanger Design Handbook*, Second (Taylor & Francis Group, 2013).
8. M. Picón-Núñez and J. E. Rumbo-Arias, *Energy* **235**, (2021).
9. M. Göлтаş, B. Gürel, A. Keçebaş, V. R. Akkaya, and O. V. Güler, *Int J Heat Mass Transf* **188**, (2022).
10. A. Maksum, A. Rustandi, S. Permana, and J. W. Soedarsono, *JP Journal of Heat and Mass Transfer* **16**, 313 (2019).
11. C. D. Widiawaty, A. I. Siswantara, Budiarmo, G. G. R. Gunadi, H. Pujowidodo, and M. H. G. Syafei, in *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* (IOP Publishing Ltd, 2020).