

ANALISIS EFEKTIVITAS PENUKAR KALOR *SHELL AND SERPENTINE TUBE* ALIRAN BERLAWANAN SEBAGAI PEMULIHAN LIMBAH PANAS GAS BUANG

Graine C M Hutubessy¹⁾, Nicolas Titahelu²⁾, Antoni Simanjuntak³⁾

¹⁾S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Pattimura
Email: Christabelmaryo@gmail.com,

²⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura
Email: titahelunick@gmail.com,

³⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura
Email: antonisimanjuntak@gmail.com,

Abstrak Penerapan penukar kalor shell and serpentine tube aliran berlawanan sebagai sistem pemulihan limbah panas gas buang generator listrik 5 kVA dengan suhu berkisar ± 510 K terbuang sia-sia ke lingkungan dan belum dimanfaatkan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kecepatan fluida dingin (udara) sisi *shell* yang efektif, dimana efektivitas penukar kalor maksimal. Metode penelitian eksperimental dengan memvariasikan kecepatan masuk fluida dingin 1- 5 m/s pada suhu masuk fluida panas, suhu masuk fluida dingin dan laju aliran massa fluida panas kontan. Pencatatan data terukur berupa suhu, kecepatan, dan laju aliran massa setelah tercapai kondisi tunak. Hasil penelitian menunjukkan efektivitas menurun dengan meningkatnya kecepatan masuk fluida dingin, dimana efektivitas maksimum pada kecepatan masuk fluida dingin minimum sebesar 1,0% sedangkan efektivitas minimum pada kecepatan masuk fluida dingin maksimum sebesar 49%. Disimpulkan bahwa kecepatan masuk fluida dingin maksimum or minimum dari penukar kalor *shell and serpentine tube* dapat selanjutnya dalam aplikasi.

Kata kunci: Efektivitas, penukar kalor, *shell and serpentine tube*, pemulihan limbah panas.

1. PENDAHULUAN

Penukar kalor merupakan perangkat yang dirancang untuk perpindahan panas antara fluida panas dan fluida dingin yang dipisahkan oleh dinding, sehingga tidak bercampur (Titahelu, et al., 2023). Berbagai tipe penukar kalor diantaranya penukar kalor pelat (Al-Turki et al., 2021; Eldeeb et al., 2020), penukar kalor *tube bank* (Elmekawy et al., 2021; Kwon et al., 2020), penukar kalor *helical* (Baqir et al., 2019; Hatumessen et al., 2021; Titahelu et al., 2021), penukar kalor *shell and tube* (Said et al., 2021; Titahelu, 2010). Aplikasi penukar kalor pada industry sebagai sistem *destilasi, fraksionasi, pasteurisasi, sterilisasi, kristalisasi, konsentrat* (Tavousi et al., 2023) dan sebagai pemulihan limbah panas (Masud et al., 2020). Parameter-parameter yang mempengaruhi kinerja termal penukar kalor *shell and serpentine tube*, diantaranya parameter geometri: diameter *tube* dalam (d_i), diameter *tube* luar (d_o), diameter dalam *shell* (D_i), diameter luar *shell* (D_o), (Gayakwad Shiwaji et al., 2018), parameter aliran seperti bilangan Reynold, kecepatan aliran fluida (González et al., 2019), konfigurasi aliran paralel dan berlawanan (Omidi et al., 2017; Pandelidis et al., 2019), dan parameter fluida seperti bilangan Prandtl (Mangrulkar et al., 2020).

Seiring dengan pertumbuhan penduduk dan industri, menyebabkan peningkatan pula penggunaan energi, mengakibatkan krisis energi di seluruh dunia (Mahmoudi et al., 2018), dimana energi yang dikonsumsi didominasi energi fosil sebesar 66,4% dengan rincian minyak bumi 40,8%, gas alam 15,5% dan batu bara 10,1% (Bimanatya & Widodo, 2018).

Penggunaan energi fosil menyebabkan masalah lingkungan seperti pemanasan global, perubahan iklim, hujan asam dan kerusakan ozon di stratosfer (Kazemi et al., 2020; Stramarkou et al., 2017). Limbah panas merupakan energi panas yang dihasilkan dalam proses pembakaran bahan bakar atau reaksi kimia yang tidak dimanfaatkan secara efektif, dimana 50% energi tersebut terbuang sia-sia ke lingkungan (Lion et al., 2017; M. Masud et al., 2017). Selain itu, limbah panas memiliki faktor pemanfaatan yang tinggi tanpa membutuhkan energi listrik (Papapetrou et al., 2018). Kajian awal telah dilakukan untuk mengukur suhu limbah panas gas buang generator listrik 5 kVA berkisar ± 510 K terbuang ke lingkungan dan belum dimanfaatkan.

2. METODE PENELITIAN

A. Metode Pengumpulan Data

Teknik observasi lapangan pengumpulan data dilakukan dengan melakukan peninjauan terhadap pemanfaatan limbah panas gas buang genset berdasarkan data literatur. Sehingga dapat memperoleh data guna mendesain penukar kalor sebagai sistem pemulihan limbah panas gas buang genset.

Studi eksperimen akan diperoleh data secara fisik pola aliran dan perpindahan panas berupa kecepatan udara dan distribusi suhu pada pemanas udara awal tipe *shell and multi tube parallel* dengan memvariasikan kecepatan udara masuk ($V_{c,i}$) guna mengetahui efektivitas (ϵ_{he}) penukar kalor.

B. Variabel Penelitian

a. Independent Variable (Variabel Bebas)

Independent Variable atau Variabel Bebas adalah Variabel yang menjadi penyebab atau memiliki kemungkinan teoritis berdampak pada Variabel lain. Variabel Bebas umumnya dilambangkan dengan huruf X. keberadaan Variabel Bebas pada umumnya terkait atau ada hubungannya dengan keberadaan Variabel Terikat.

b. Dependent Variable (Variabel Terikat)

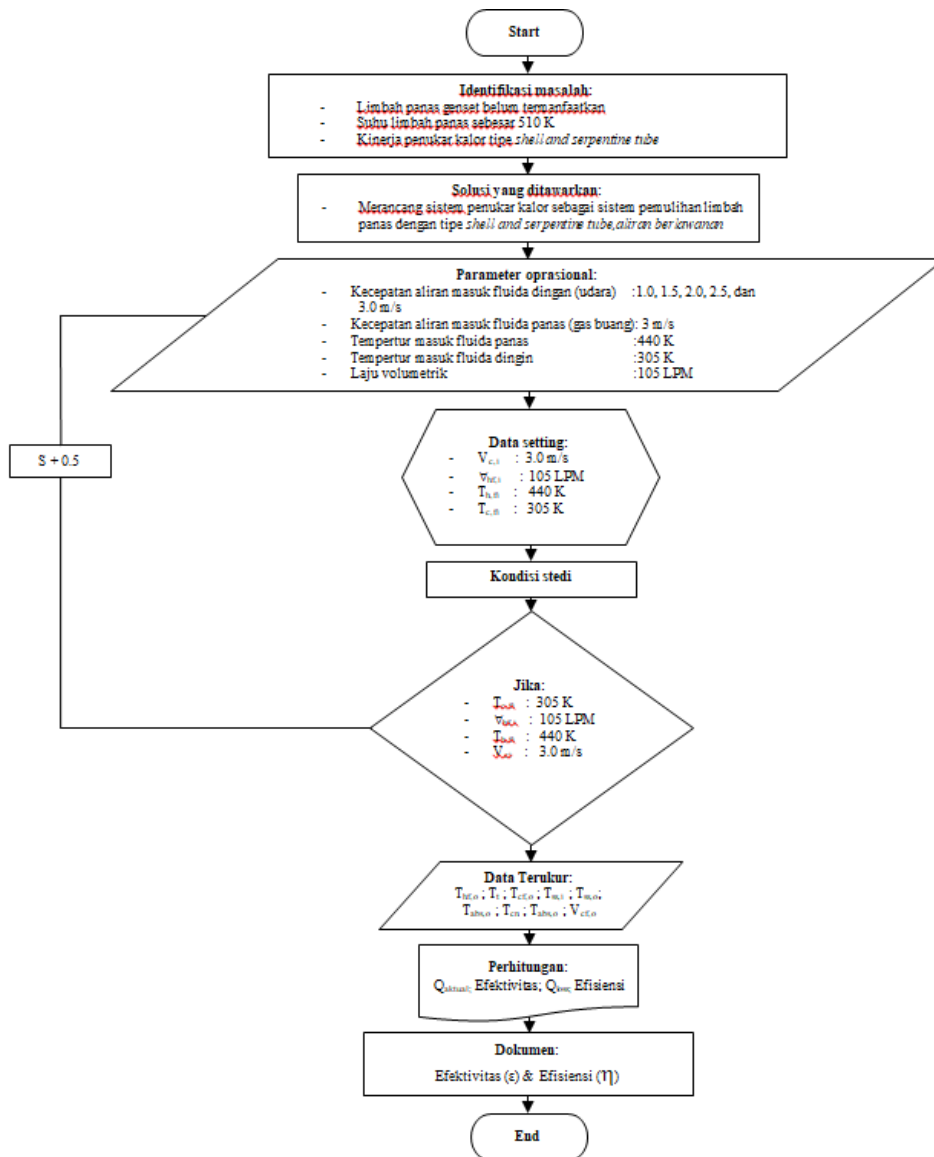
Dependent Variable atau Variabel Terikat adalah variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat karena adanya variabel bebas.

c. Control Variable (Variabel Kontrol)

Variabel kontrol adalah faktor dalam penelitian yang sengaja dijaga tetap konstan atau tidak berubah sepanjang eksperimen untuk memastikan hasil yang diperoleh murni disebabkan oleh variabel bebas yang sedang diuji.

- Variabel Bebas (x):
kecepatan masuk fluida dingin (udara) $V_{c,i}$ yakni 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, dan 3.0 m/s.
- Variabel terikat (y):
Efektivitas
- Variabel control :
Temperature fluida panas masuk ($T_{hf,i}$), temperature masuk fluida dingin ($T_{cf,i}$) dan laju volumetric (LPM).

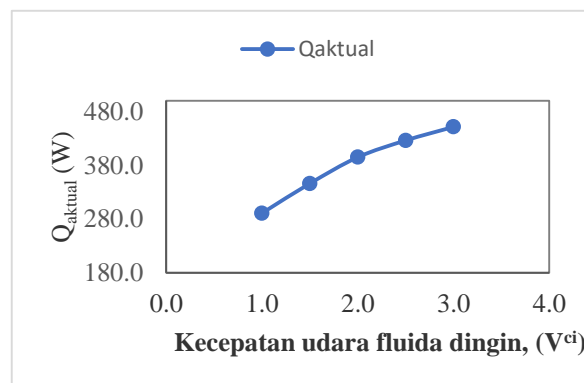
d. Alur Penelitian



Gambar 1. Flowchart Alur Penelitian

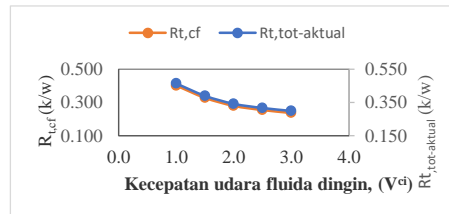
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Panas Aktual (Q_{aktual})



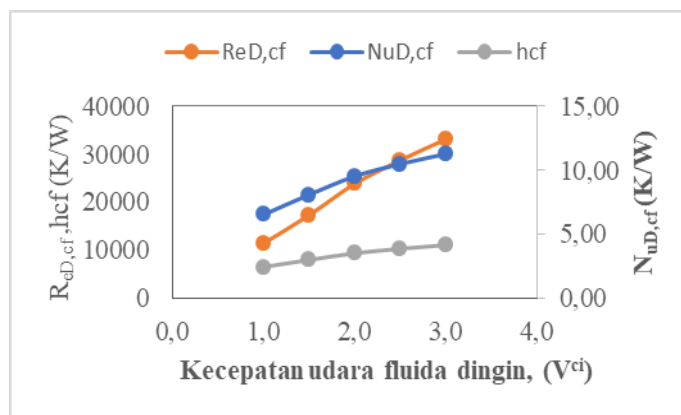
Gambar 2. Panas Aktual (Q_{aktual})

Analisis kuantitatif terhadap grafik menunjukkan bahwa peningkatan Q_{aktual} tidak linier sempurna tetapi tetap menunjukkan pola pertumbuhan yang melambat pada kecepatan tinggi. Misalnya, dari 1,0 m/s ke 1,5 m/s, nilai Q_{aktual} meningkat sekitar 55.331 W, sedangkan dari 2,5 m/s ke 3,0 m/s kenaikannya lebih kecil yakni sekitar 25.204 W. Pola ini menunjukkan adanya diminishing return, di mana tambahan pertambahan laju aliran udara menghasilkan peningkatan laju perpindahan panas yang semakin kecil pada kecepatan udara yang lebih tinggi.



Gambar 3. Peningkatan kecepatan masuk fluida dingin ($V_{cf,i}$) menyebabkan bertambahnya bilangan Reynolds ($Re_{D,cf}$)

Peningkatan kecepatan masuk fluida dingin ($V_{cf,i}$) menyebabkan bertambahnya bilangan Reynolds ($Re_{D,cf}$), yang diikuti oleh kenaikan bilangan Nusselt ($Nu_{D,cf}$) serta koefisien perpindahan panas konveksi fluida dingin (h_{cf}), sebagaimana ditunjukkan pada (Gambar 4.3). Kenaikan koefisien konveksi (h_{cf}) secara langsung memengaruhi salah satu komponen utama dari total tahanan termal aktual ($R_{t,tot-aktual}$), yaitu tahanan termal pada sisi fluida dingin ($R_{t,cf}$), sehingga nilai tahanan tersebut menurun. Penurunan komponen tahanan yang bersifat dominan ini menyebabkan total tahanan termal aktual ikut menurun, seperti diperlihatkan pada (Gambar 4.2). Temuan ini menunjukkan bahwa pengaruh kecepatan fluida terhadap bilangan Reynolds, Nusselt, dan koefisien konveksi tidak hanya merupakan mekanisme klasik dalam konveksi, tetapi menjadi semakin signifikan ketika dikombinasikan dengan efek arus Hall dan pemanasan Joule pada fluida non-Newtonian.

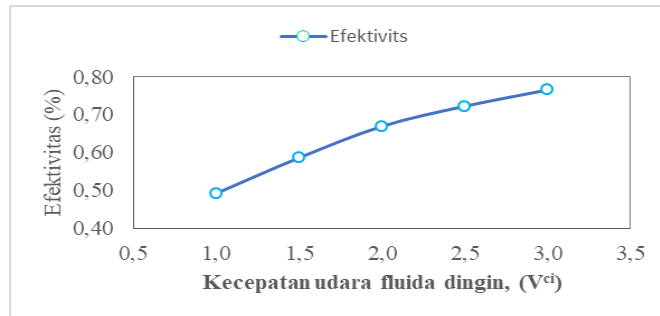


Gambar 4. hubungan antara kecepatan udara fluida dingin (V_{ci}) pada sumbu X dengan tiga parameter pada sumbu Y

Grafik menunjukkan hubungan antara kecepatan udara fluida dingin (V_{ci}) pada sumbu X dengan tiga parameter pada sumbu Y: $Re_{D,cf}$ (bilangan Reynolds untuk fluida dingin, menunjukkan karakter aliran), $Nu_{D,cf}$ (bilangan Nusselt, tak berdimensi untuk konveksi), h_{cf} (koefisien perpindahan panas konveksi). $Re_{D,cf}$ meningkat kuat ketika V_c naik dari 11 405 pada V_{ci} 1,0 (m/s) ke 33 069 pada V_{ci} 3,0 (m/s), $Nu_{D,cf}$ juga meningkat, namun pada skala

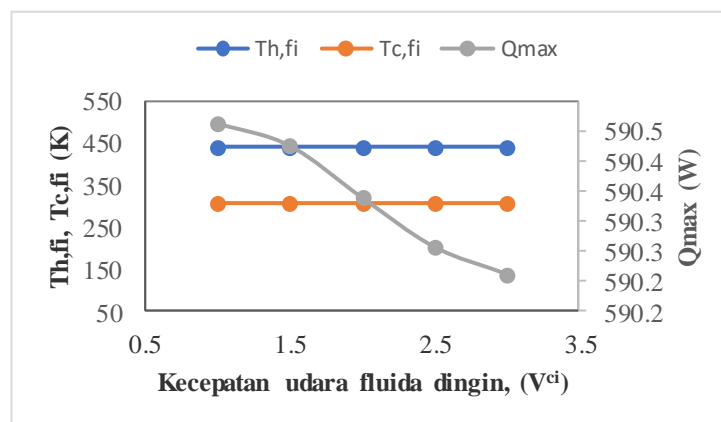
lebih kecil dibandingkan $R_{eD,cf}$, Nilai $N_{uD,cf}$ naik dari 6,52 di V_{ci} 1.0 (m/s) ke 11,28 di V_{ci} 3.0 (m/s), h_{cf} meningkat, namun tidak sebesar $R_{eD,cf}$ dan $N_{uD,cf}$ dari 2,45 (K/W) di V_{ci} 1.0 (m/s) ke 4,16 (K/W) di V_{ci} 3.0 (m/s). Ketiga parameter menunjukkan trend peningkatan terhadap kecepatan aliran udara

B. Efektifitas (ϵ)



Gambar 5. Analisis kuantitatif persentase kenaikan efektifitas menurun pada kecepatan yang lebih tinggi

Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa persentase kenaikan efektifitas menurun pada kecepatan yang lebih tinggi. Pada rentang awal (1,0–1,5 m/s), peningkatan efektifitas cukup signifikan, sedangkan pada rentang kecepatan lebih tinggi (2,5–3,0 m/s) peningkatannya lebih kecil. Pola ini mengindikasikan adanya diminishing return, yaitu bahwa tambahan peningkatan efektifitas berkurang seiring kecepatan udara meningkat.



Gambar 6. $T_{h,fi}$ dan $T_{c,fi}$ konstan plot

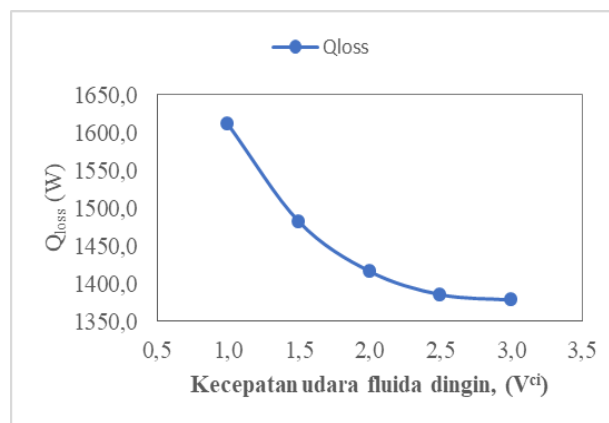
$T_{h,fi}$ dan $T_{c,fi}$ konstan plot menunjukkan bahwa suhu outlet fluida panas dan dingin tetap relatif stabil meskipun kecepatan udara dingin berubah. Ketidakberubahan ini mengindikasikan bahwa kecepatan udara dalam rentang diuji tidak memengaruhi suhu outlet secara signifikan. Q_{max} menurun dengan meningkatnya V_{ci} . Berbeda dengan suhu, Q_{max} menurun saat kecepatan udara dingin bertambah. Artinya, meskipun kecepatan udara lebih tinggi, kemampuan sistem untuk memaksimalkan perpindahan panas berkurang (Hammoodi et al., 2025).

Saat kecepatan udara dingin meningkat, waktu kontak antara udara dingin dan permukaan panas berkurang. Akibatnya, meskipun turbulensi mungkin meningkat, energi total yang ditransfer dari fluida panas ke dingin dalam satuan waktu justru bisa berkurang. Hal ini sesuai temuan bahwa peningkatan laju aliran udara tidak selalu meningkatkan laju perpindahan

panas secara linier karena keterbatasan waktu kontak termal dan karakteristik aliran dalam pertukaran panas. Literatur menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran udara dapat menaikkan koefisien konveksi lokal karena turbulensi yang lebih kuat. Namun pada sistem pertukaran panas dengan geometri tertentu, peningkatan kecepatan dapat menyebabkan penurunan efektivitas operasional total jika gradien suhu tidak optimal (Achmad et al., 2023).

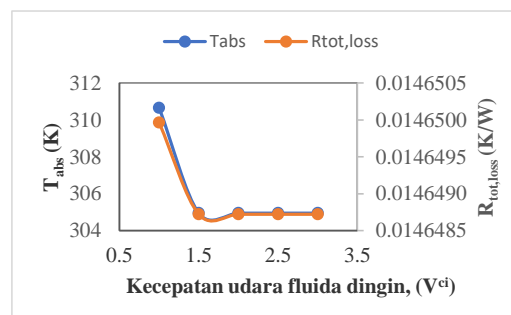
- Suhu outlet fluida panas stabil di sekitar 440,20 K mengindikasikan sistem berada dalam kondisi operasi konstan dengan suplai panas dan batasan desain tertentu yang meminimalkan dampak variasi V_{ci} pada suhu outlet.
- Suhu outlet udara dingin 305,50 K menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara tidak cukup memengaruhi akumulasi panas di sisi fluida dingin dalam angka outlet yang diukur, kemungkinan karena perubahan terjadi terutama di lapisan boundary internal tanpa memengaruhi titik yang diukur.
- Nilai Q_{max} yang turun dari sekitar 462 W pada V_{ci} 1,0 m/s menjadi 211 W pada V_{ci} 3,0 m/s menunjukkan efisiensi perpindahan panas maksimum yang berkurang saat kecepatan dingin meningkat.

C. Kehilangan panas (Q_{loss})



Gambar 7. Analisis kuantitatif terhadap penurunan Q_{loss}

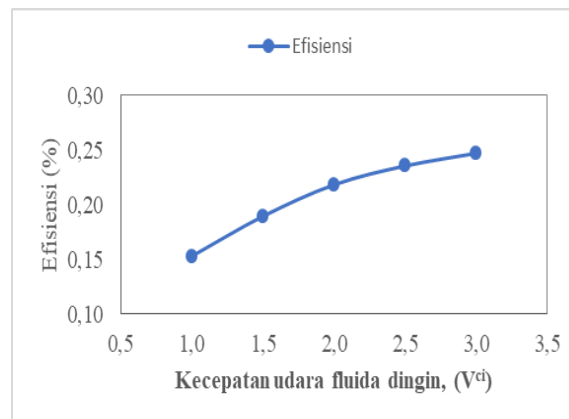
Analisis kuantitatif terhadap data grafik menunjukkan bahwa penurunan Q_{loss} bersifat lebih tajam pada rentang kecepatan rendah, dan kemudian bergerak menuju penurunan yang melandai pada kecepatan yang lebih tinggi. Misalnya, penurunan terbesar terlihat antara 1,0–1,5 m/s, sedangkan di rentang 2,5–3,0 m/s, nilai Q_{loss} hampir konstan dengan penurunan yang lebih kecil. Pola ini mengindikasikan bahwa kecepatan udara fluida dingin yang lebih tinggi efektif mengurangi kehilangan panas, namun setelah mencapai titik tertentu efeknya mulai berkurang.



Gambar 8. T_{abs} menurun tajam ketika V_{ci} meningkat

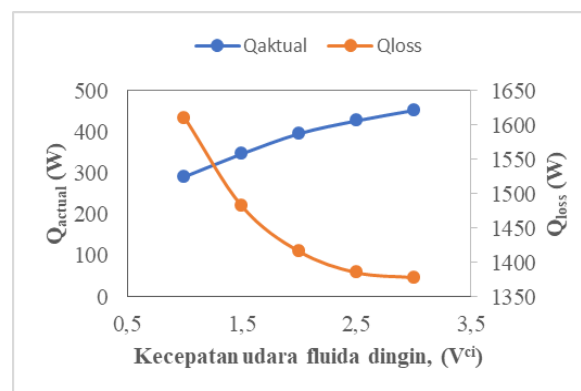
T_{abs} menurun tajam ketika V_{ci} meningkat pada rentang awal mulai dari 310,65 K pada V_{ci} 1,0 (m/s) turun cepat ke 305 K di V_{ci} 1,5 (m/s), Setelah V_{ci} lebih besar dari 1,5, T_{abs} cenderung stabil sekitar 304,95 K, menunjukkan batas perubahan suhu. $R_{tot,loss}$ menunjukkan perubahan yang sangat kecil sepanjang rentang V_{ci} Berada di sekitar 0,0146487 hingga 0,0146500 (K/W).

D. Efisiensi penukar kalor (η)



Gambar 9. Analisis numerik pertumbuhan efisiensi pada kecepatan yang lebih tinggi.

Analisis numerik terhadap data menunjukkan bahwa pertumbuhan efisiensi cenderung menurun pada kecepatan yang lebih tinggi. Misalnya, antara 1,0 m/s dan 1,5 m/s, efisiensi meningkat sekitar 3,64 %, sedangkan antara 2,5 m/s dan 3,0 m/s, peningkatannya lebih kecil sekitar 1,14 %. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi relatif lebih signifikan pada kecepatan awal, sedangkan pada kecepatan tinggi efisiensi masih meningkat tetapi dengan laju kenaikan yang melandai.

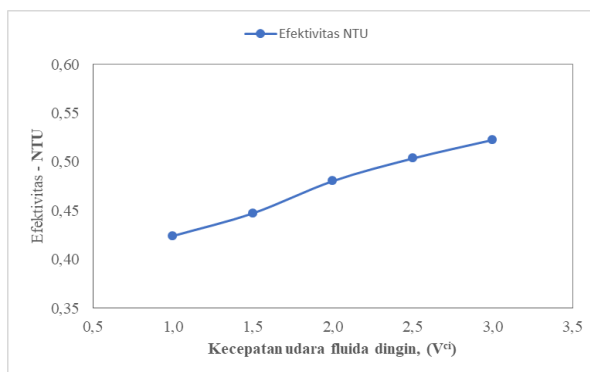


Gambar 10. Peningkatan Q_{actual}

Peningkatan Q_{actual} saat V_{ci} meningkat dijelaskan oleh efek konveksi paksa. Kecepatan udara yang lebih tinggi meningkatkan *Reynolds number* dan *Nusselt number*, sehingga konveksi menjadi lebih efektif dan mempercepat perpindahan panas dari permukaan ke aliran fluida. Ini sesuai prinsip bahwa peningkatan kecepatan fluida meningkatkan selisih energi yang dibawa fluida keluar dari permukaan. Penurunan Q_{loss} terjadi karena lebih banyak panas yang “ditangkap” oleh aliran udara (meningkatnya Q_{actual}), sehingga bagian panas yang hilang ke lingkungan melalui mekanisme lain (mis. radiasi) menjadi lebih kecil secara proporsional (Zhao et al., 2022). Q_{actual} menunjukkan tren naik terhadap V_{ci} , yang berarti kemampuan perpindahan panas sistem meningkat dengan kecepatan aliran udara. Q_{actual} meningkat secara konsisten seiring kenaikan V_{ci} dari 290,87 W pada V_{ci} 1.0 (m/s) ke 451,53 W pada V_{ci} 3.0

(m/s). Q_{loss} menunjukkan tren turun, mengindikasikan bahwa aliran udara yang lebih cepat mengurangi kehilangan panas dari sistem (kemungkinan karena lebih banyak panas berhasil ditransfer ke fluida daripada hilang ke lingkungan) Q_{loss} mengalami penurunan seiring meningkatnya V_{ci} dari 1610,48 W di V_{ci} 1.0 (m/s) turun ke 1377,80 W di V_{ci} 3.0 (m/s) (Madloul et al., 2023b).

E. Hubungan ϵ -NTU



Gambar 11. Analisis kuantitatif efisiensi NTU

Analisis kuantitatif terhadap data grafik menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi NTU terjadi di seluruh rentang kecepatan, namun laju kenaikan relatif melandai pada kecepatan yang lebih tinggi. Misalnya, peningkatan dari 1,0 (m/s) ke 1,5 (m/s) menghasilkan kenaikan efisiensi NTU sekitar 0,3 (3%), sedangkan pada rentang 2,5 (m/s) ke 3,0 (m/s) kenaikannya lebih kecil, sekitar 0,2 (2%). Pola ini menunjukkan adanya tren pertumbuhan yang melandai, yang konsisten dengan fenomena diminishing return dalam proses perpindahan panas, di mana efek peningkatan kecepatan terhadap peningkatan efisiensi menjadi berkurang pada laju aliran yang lebih tinggi (Hammoodi et al., 2025).

4. SIMPULAN

Pengaruh terhadap efisiensi termal aktual. peningkatan kecepatan fluida dingin dari 1 m/s hingga 3 m/s juga meningkatkan efisiensi termal aktual penukar kalor sebesar X-Y% yang di tunjukan oleh meningkatnya rasio panas yang diterima fluida dingin terhadap panas yang di lepas fluida panas. kenaikan efisiensi ini menunjukkan bahwa pada kecepatan fluida dingin yang lebih tinggi, pemanfaatan panas menjadi lebih efektif dan proporsi kehilangan panas ke lingkungan relatif menurun, sehingga kinerja termal penukar kalor meningkat secara keseluruhan.

- 1) Besar pengaruh variasi kecepatan fluida dingin terhadap efektivitas (ϵ) penukar kalor *shell and serpentine tube* 3.0 m/s.
- 2) Besar variasi kecepatan fluida dingin memengaruhi efisiensi termal aktual penukar kalor *shell and serpentine tube* 18 %

DAFTAR PUSTAKA

- Abraham, J. D., Dhoble, A. S., & Mangrulkar, C. K. (2020). Numerical analysis for thermo-hydraulic performance of staggered cross flow tube bank with longitudinal tapered fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104905>
- Almeshaal, M. A., & Choubani, K. (2023). *Using the Log Mean Temperature Difference (LMTD) and ϵ -NTU Methods to Analyze Heat and Mass Transfer in Direct Contact Membrane Distillation*.
- Al-Turki, Y. A., Moria, H., Shawabkeh, A., Pourhedayat, S., Hashemian, M., & Dizaji, H. S. (2021). Thermal, frictional and exergetic analysis of non-parallel configurations for plate heat

- exchangers. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108319>
- Amanowicz, Ł., & Wojtkowiak, J. (2020). Approximated flow characteristics of multi-pipe earth-to-air heat exchangers for thermal analysis under variable airflow conditions. *Renewable Energy*, 158, 585–597. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.125>
- Arefin, A. E., Masud, M. H., Joardder, M. U. H., & Mourshed, M. (2017). Waste heat recovery systems for internal combustion engines : A review. *International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science*, (February), 3–5.
- Bacellar, D., Aute, V., Huang, Z., & Radermacher, R. (2016). Airside friction and heat transfer characteristics for staggered tube bundle in crossflow configuration with diameters from 0.5 mm to 2.0 mm. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 98, 448–454. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.072>
- Baqir, A. S., Mahood, H. B., & Kareem, A. R. (2019). Optimisation and evaluation of NTU and effectiveness of a helical coil tube heat exchanger with air injection. *Thermal Science and Engineering Progress*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100420>
- Baroutaji, A., Arjunan, A., Ramadan, M., Robinson, J., Alaswad, A., Ali, M., & Olabi, A. (2021). Advancements and prospects of thermal management and waste heat recovery of PEMFC. *International Journal of Thermofluids*, 9, 100064. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100064>
- Bhran, A. A., Maghrabie, H. M., Gadallah, A., & Fawaz, H. E. (2025). Experimental investigation and ANN-based prediction of average Nusselt number for a flat surface subjected to double inclined air jets. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18142-3>
- Bimanatya, T. E., & Widodo, T. (2018). Fossil fuels consumption, carbon emissions, and economic growth in Indonesia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(4), 90–97.
- Cheng, Z., Tan, Z., Guo, Z., Yang, J., & Wang, Q. (2020). Technologies and fundamentals of waste heat recovery from high-temperature solid granular materials. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 179). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115703>
- Cui, X., Guo, J., Huai, X., Zhang, H., Cheng, K., & Zhou, J. (2019). Numerical investigations on serpentine channel for supercritical CO₂ recuperator. *Energy*, 172, 517–530. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.148>
- Dizaji, H. S., Pourhedayat, S., Moria, H., Alqahtani, S., Alshehry, S., & Anqi, A. E. (2024). Performance boost of a commercial air-to-air plate heat recovery unit by mesh-net insert; thermal-frictional, economic, and effectiveness-NTU analysis. *Energy*, 290(November 2023), 130037. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130037>
- Eldeeb, R., Aute, V., & Radermacher, R. (2020). Pillow plate heat exchanger weld shape optimization using approximation and parallel parameterized CFD and non-uniform rational B-splines. *International Journal of Refrigeration*, 110, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.10.024>
- Elmekawy, A. M. N., Ibrahim, A. A., Shahin, A. M., Al-Ali, S., & Hassan, G. E. (2021). Performance enhancement for tube bank staggered configuration heat exchanger – CFD Study. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108392>