

Studi Eksperimen Kinerja Penukar Kalor Kompak Sebagai Pemanas Tambahan di Rumah Pengering Hibrid

Sherly Satriani Ludji¹, Matheus M. Dwinanto¹, Verdy A. Koehuan¹

¹) Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana

Jl. Adi Sucipto, Penfui-Kupang, NTT 85001

E-mail: sherlyludji3@gmail.com

ABSTRAK

Proses pengeringan sistem hibrid yang menggunakan gabungan energi surya dan biomassa terdapat sejumlah kalor berguna di cerobong tungku biomassa. Limbah kalor ini memiliki temperatur yang cukup tinggi sehingga dengan bantuan penukar kalor kompak maka dapat dimanfaatkan sebagai pemanas tambahan. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kinerja penukar kalor kompak *discrete flat plate-finned tube* tipe aliran silang dengan susunan tabung sebaris (*inline*) yang digunakan sebagai alat pemanas tambahan di dalam rumah pengering hibrid. Pengujian dilakukan pada pukul 10.00-15.00 selama tiga hari pengujian dengan variasi kecepatan aliran udara 1,3 m/s, 1,6 m/s dan 1,8 m/s sedangkan kecepatan aliran air dalam pipa dianggap konstan dengan 0,000168 m/s dan kecepatan aliran udara di *exhaust fan* dipertahankan konstan sebesar 1 m/s. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa koefisien perpindahan kalor menyeluruh sangat dipengaruhi oleh efektivitas penukar kalor, dan dengan meningkatnya efektivitas penukar kalor maka koefisien perpindahan kalor juga akan meningkat. Koefisien perpindahan kalor menyeluruh tertinggi diperoleh pada hari kedua yaitu 99,263 W/m².°C. Total laju perpindahan kalor dipengaruhi oleh efektivitas penukar kalor tetapi pada nilai tertentu kedua nilai tersebut cenderung stabil akibat keterbatasan dimensi penukar kalor. NTU sangat berpengaruh terhadap efektivitas penukar, dan dalam kasus ini nilai NTU berkisar antara 0,6-0,8 sedangkan efektivitas penukar kalor berkisar antara 46%-56%.

ABSTRACT

The process of drying a hybrid system that uses a combination of solar energy and biomass contains some useful heat in the chimney of the biomass stove. This heat waste has a high enough temperature so that with the help of a compact heat exchanger it can be used as an additional heater. The purpose of this study was to analyze the performance of a cross-flow type discrete flat plate-finned tube compact heat exchanger with an inline tube arrangement which is used as an additional heating device in the hybrid dryer housing. The test was carried out at 10.00-15.00 for three days of testing with variations in air flow velocity of 1.3 m/s, 1.6 m/s and 1.8 m/s while the velocity of water flow in the pipe was considered constant with 0.000168 m/s. s and the air flow velocity in the exhaust fan is kept constant at 1 m/s. The results of this study indicate that the overall heat transfer coefficient is strongly influenced by the effectiveness of the heat exchanger, and with the increase in the effectiveness of the heat exchanger, the heat transfer coefficient will also increase. The highest overall heat transfer coefficient was obtained on the second day, namely 99.263 W/m².oC. The total heat transfer rate is influenced by the effectiveness of the heat exchanger but at a certain value both values tend to be stable due to the limited dimensions of the heat exchanger. NTU is very influential on the effectiveness of the exchanger, and in this case the value of NTU ranges from 0.6-0.8 while the effectiveness of the heat exchanger ranges from 46%-56%.

Keywords: Compact heat exchanger, auxiliary heater, performance, hybrid dryer

PENDAHULUAN

Pengeringan merupakan salah satu tahapan penting dalam teknologi pascapanen baik itu produk pertanian maupun perikanan sehingga produk-produk tersebut dapat

disimpan untuk jangka waktu tertentu sebelum diproses lebih lanjut. Pengeringan merupakan proses penurunan kandungan air dalam bahan dengan menggunakan kalor (energi dalam bentuk panas). Pengeringan porang dapat dilakukan menggunakan rumah pengering

energi surya, energi biomassa, dan kombinasi energi surya dan biomassa (hibrid) [1].

Rumah pengering yang memanfaatkan energi surya merupakan pilihan termurah. Faktor yang mendorong berkembangnya pengeringan energi surya di Kupang dikarenakan ketersediaan sinar matahari surya yang melimpah, dan merupakan energi terbarukan, gratis, dan ramah lingkungan. Namun, saat kondisi cuaca yang kurang mendukung atau pada saat malam hari, proses pengeringan dapat terus berlangsung dengan mengoperasikan tungku biomassa sebagai pemanas tambahan. Pemanfaatan sistem hibrid sebagai sumber panas merupakan suatu bentuk solusi penyediaan energi alternatif, terlebih pada saat krisis energi seperti yang dihadapi oleh masyarakat di pedesaan [2].

Pengujian terhadap desain terintegrasi tungku biomassa dan penukar kalor telah dilakukan untuk melihat performansinya menggunakan metode efektifitas-NTU (ϵ -NTU), efisiensi sebagai fungsi dari *fin analogy number* ($\eta(Fa)$) dan beda temperatur rata-rata logaritmik (LMTD). Tungku biomassa sebagai pembangkit kalor menghasilkan energi senilai 25.600 W dengan laju pembakaran tongkol jagung 7.03 kg/jam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penukar kalor memiliki kinerja yang dapat memenuhi kebutuhan panas udara pengeringan biji jagung berdasarkan rekomendasi untuk pakan sebesar 82 °C. Laju perpindahan kalor aktual yang terjadi di penukar panas adalah sebesar 11.285 Watt dengan efektifitas penukaran kalor 0,90 sedangkan efisiensi penukar kalor sebagai ukuran tingkat performansi sistem secara keseluruhan adalah 0,78 [3].

Analisis efektifitas penukar kalor kompak dengan pemanas tungku biomassa berbahan bakar serbuk kayu juga telah dilakukan menggunakan penukar kalor tipe aliran silang (*cross flow*). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efektifitas penukar kalor adalah 0,14 dan hal ini dipengaruhi kecilnya panas sebenarnya (aktual) yang dihasilkan tungku dibandingkan panas maksimum yang dihasilkan dari hasil pembakaran bahan bakar [4].

Rancang bangun alat penukar kalor plat

datar dengan sumber panas dari tungku bahan bakar telah dilakukan untuk menganalisis kinerja termal efektifitasnya. Hasil studi ini menunjukkan efektifitas penukar kalor adalah 0,345 (34,5%) dengan temperatur keluar penukar kalor 83,3°C. Laju perpindahan kalor yang terjadi adalah 23,3 kJ/detik [5].

Studi efisiensi temperatur penukar kalor untuk pengering juga telah dilakukan dengan menggunakan tiga jenis aliran, yaitu aliran sejajar, aliran lawan arah, dan aliran silang. Hasil studi ini menunjukkan bahwa dari ketiga jenis penukar kalor, maka penukar kalor aliran silang cenderung memiliki nilai temperaur keluar tertinggi, yakni 52,2°C sedangkan aliran searah dan aliran berlawanan memiliki temperatur keluar masing-masing 47,6 °C dan 48,4 °C. Efisiensi temperatur untuk penukar kalor aliran searah, berlawanan dan silang masing-masingnya adalah 15,9%; 17,3%; dan 21,3% [6].

Uji prestasi penukar kalor *plate-fin* tipe aliran silang berbahan bakar sekam padi juga telah dilakukan di mesin pengering rak telur. Hasil studi ini menunjukkan bahwa pada kecepatan aliran udara panas konstan dengan 4 variasi kecepatan aliran udara lingkungan diperoleh efektifitas penukar kalor sebesar 25,59% pada kecepatan aliran udara lingkungan 17 m/s, 25,54% untuk kecepatan aliran udara lingkungan 18 m/s, 25,65% untuk kecepatan aliran udara lingkungan 19 m/s, dan 25,67% untuk kecepatan aliran udara lingkungan 20 m/s . Untuk aliran udara lingkungan konstan dengan 4 variasi kecepatan aliran udara panas diperoleh efektifitas penukar kalor sebesar 26,23% pada kecepatan aliran udara panas 1,6 m/s, 26,53% untuk kecepatan aliran udara panas 1,7 m/s, 25,65% untuk kecepatan aliran udara panas 1,9 m/s dan 25,06 % untuk kecepatan aliran udara panas 2,1 m/s [7].

Studi eksperimental juga telah dilakukan untuk menganalisis pengaruh *baffle* di penukar kalor aliran searah untuk sistem pengering. Hasil penelitian awal menunjukkan bahwa penggunaan *baffle* mempengaruhi peningkatan temperatur di penukar kalor, dimana pada aliran *outlet fresh air* yang tidak menggunakan *baffle* menghasilkan temperatur

sebesar 72°C sedangkan yang menggunakan *baffle* menghasilkan temperatur sebesar 88°C dengan Nilai *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) penukar kalor tanpa menggunakan *baffle* lebih tinggi daripada yang menggunakan *baffle*. Hal ini bisa menggambarkan bahwa rugi kalor (*heat losses*) semakin kecil yang terbuang sehingga penyerapan kalor oleh sistem sebaliknya menjadi lebih tinggi [8].

Berbagai tipe dan bentuk alat atau rumah pengereng hibrid telah dikembangkan. Di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana Kupang rumah pengereng baru dikembangkan pada pertengahan tahun 2020 untuk mengeringkan kopi. Kemudian pada pertengahan 2021 rumah pengereng tersebut dikembangkan menjadi pengereng hibrid (gabungan energi surya dan biomassa) untuk mengeringkan porang. Dalam rumah pengereng hybrid terdapat sejumlah kalor di cerobong tungku biomassa masih dapat dimanfaatkan energinya sebelum dibuang ke udara sekitar. Limbah kalor ini memiliki temperatur yang cukup tinggi sehingga dengan bantuan penukar kalor kompak maka dapat dimanfaatkan sebagai pemanas tambahan untuk meningkatkan temperatur dalam rumah pengereng sehingga porang lebih cepat dikeringkan.

Salah satu penukar kalor yang dapat digunakan adalah penukar kalor kompak *discrete flat plate-finned tube* tipe aliran silang dengan susunan tabung sebaris (*inline*). Penukar kalor ini sudah banyak digunakan dalam industri maupun dalam kehidupan sehari-hari, seperti evaporator di lemari pendingin (refrigerator). Penggunaan sirip (*fin*) di permukaan luar pipa merupakan ciri khusus dari penukar kalor kompak. Pada umumnya fluida cair mengalir di dalam pipa dan gas mengalir di celah-celah antar sirip. Salah satu hal penting yang perlu diperhatikan dalam penukar kalor kompak adalah perpindahan kalor pada sisi udara [9].

Dalam rumah pengereng hibrid ini, gas panas sisa pembakaran (limbah kalor) dibuang melalui cerobong. Di dalam cerobong ini

ditempatkan penukar kalor bentuk *serpentine* untuk menyerap panas buang tersebut dan kemudian dimanfaatkan untuk memanaskan air. Air panas ini kemudian dialirkan ke penukar kalor kompak *discrete flat plate-finned tube* untuk memanaskan rumah pengereng. Pipa cerobong juga masih memiliki temperatur yang cukup tinggi (limbah kalor) sehingga dapat juga dimanfaatkan untuk menaikkan temperatur rumah pengereng.

Udara lingkungan yang melalui permukaan luar pipa cerobong dan menyerap panas yang kemudian dialirkan dengan menggunakan saluran bentuk persegi empat menuju penukar kalor kompak. Dengan bantuan kipas di penukar kalor tersebut maka udara panas dialirkan melewati permukaan luar pipa bersirip penukar kalor kompak. Bila hanya udara lingkungan (yang temperaturnya lebih rendah dari temperatur air di dalam penukar kalor kompak) dialirkan ke dalam rumah pengereng maka kenaikan temperatur udara tersebut tidak signifikan. Oleh karena itu, gabungan udara panas dan air panas tersebut diharapkan dapat menaikkan temperatur rumah pengereng secara signifikan.

Pemanfaatan limbah kalor ini sebagai pemanas tambahan dengan menggunakan penukar kalor kompak sebagai alat untuk membantu menaikkan temperatur rumah pengereng menarik untuk diteliti. Hal ini yang mendorong dilakukan penelitian ini untuk menganalisis kinerja penukar kalor kompak *discrete flat plate-finned tube* tipe aliran silang yang digunakan sebagai pemanas tambahan di dalam rumah pengereng hibrid tersebut.

METODE PENELITIAN

Metode eksperimen dan berdasarkan referensi-referensi penukar kalor kompak [10-12] digunakan untuk menganalisis kinerja penukar kalor kompak sebagai pemanas tambahan di rumah pengereng hibrid tersebut (Gambar 1).

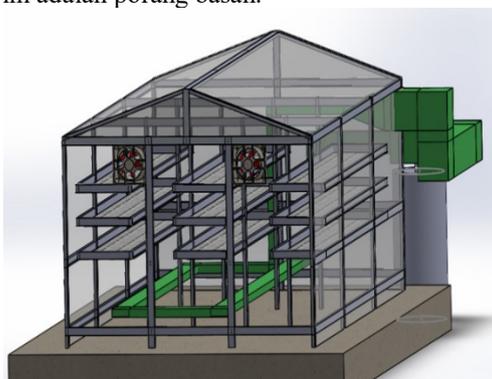
Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah penukar kalor kompak *discrete flat*

plate-finned tube, kipas penukar kalor, termometer digital, termokopel tipe-K, pompa air sirkulasi, anemometer, dan tungku biomassa.

Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah porang basah.



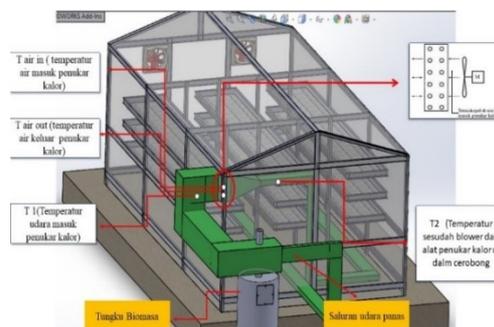
Gambar 1. Rumah pengering hibrid

Ekperimen dan pengambilan data

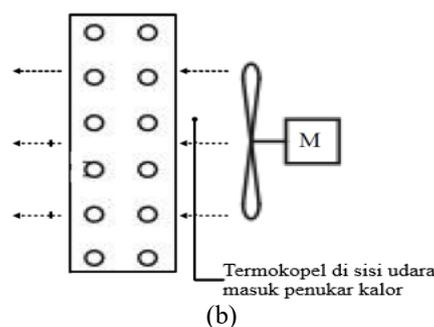
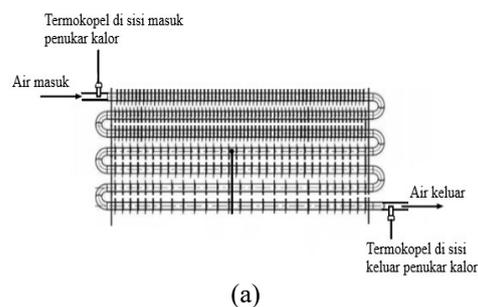
Langkah-langkah saat melakukan eksperimen dan pengambilan data adalah sebagai berikut:

- Setelah tungku biomassa bekerja dengan asumsi nyala api tungku sudah dalam keadaan stedi maka pompa sirkulasi air panas, dan kipas penukar kalor dihidupkan sehingga air panas dari tungku biomassa akan dialirkan ke penukar kalor.
- Selanjutnya udara panas yang mengalir melintasi permukaan cerobong tungku biomassa akan dialirkan melalui saluran yang dibuat khusus sehingga kipas akan menghembuskan udara panas tersebut melintasi permukaan sisi udara penukar kalor.
- Termokopel tipe-K yang telah dipasang di sisi air dan sisi udara penukar kalor akan mengukur perubahan temperatur di sisi masuk dan sisi keluar dari sisi udara dan sisi air penukar kalor.
- Data temperatur hasil pembacaan termometer digital akan dicatat setiap 15 menit dari waktu pengujian. Pengambilan

data dilakukan selama 5 jam, yaitu dari pukul 10.00 – 15.00 WITA.



Gambar 2. Posisi penukar kalor dalam rumah pengering hibrid



Gambar 3. Posisi termokopel di penukar kalor, (a) sisi air; (b) sisi udara

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 4 menyajikan distribusi temperatur selama 300 menit pengukuran untuk hari pertama pengambilan data. Pada gambar ini terlihat bahwa temperatur air masuk penukar kalor lebih tinggi

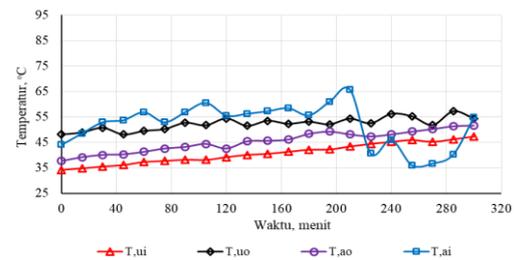
dibandingkan dengan udara masuk. Hal ini menunjukkan bahwa air yang dipanaskan di cerobong tungku pemanas dan disirkulasikan oleh pompa mampu menyerap kalor lebih besar dibandingkan dengan udara lingkungan yang melewati cerobong dan dihembuskan oleh *blower*. Pada gambar ini juga terlihat bahwa udara keluar penukar kalor (setelah melewati penukar kalor) temperaturnya mengalami peningkatan sekitar 14°C dan hal ini menunjukkan bahwa udara yang dihembuskan oleh *blower* mampu menyerap kalor dari air panas yang mengalir di dalam pipa-pipa penukar kalor.

Pada hari pertama, rata-rata temperatur air masuk penukar kalor memiliki nilai yang paling tinggi sehingga ini menunjukkan bahwa kalor yang dibuang melalui cerobong tungku pemanas mampu diserap dengan baik oleh penukar kalor berbentuk pipa spiral yang berada di dalam cerobong.

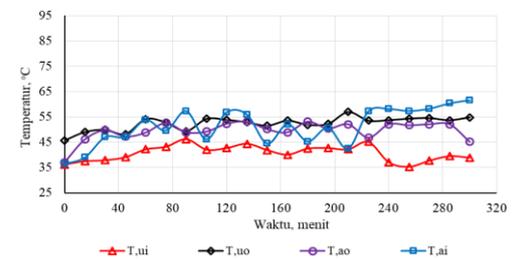
Gambar 5 menyajikan distribusi temperatur pada hari kedua dengan waktu pengukuran sama dengan pada hari pertama. Pada gambar ini terlihat bahwa pada hari kedua temperatur udara masuk penukar kalor memiliki nilai yang paling rendah, dan ini sama dengan hari pertama sedangkan temperatur udara keluar penukar kalor lebih tinggi dan relatif stabil selama pengujian berlangsung, yaitu rata-rata sekitar $11,71^{\circ}\text{C}$. Berbeda dengan temperatur air masuk dan keluar penukar kalor yang pada gambar terlihat mengalami perubahan temperatur yang cukup fluktuatif. Namun, secara keseluruhan selisih temperatur rata-rata adalah sekitar $12,1^{\circ}\text{C}$.

Gambar 6 menunjukkan distribusi temperatur pada hari ketiga dengan waktu pengukuran sama dengan pada hari pertama dan kedua. Pada gambar ini terlihat bahwa temperatur air masuk penukar kalor mengalami fluktuasi yang cukup signifikan tetapi secara keseluruhan rata-rata selisih temperatur air masuk dan keluar adalah sekitar $17,43^{\circ}\text{C}$. Berbeda dengan temperatur udara masuk dan keluar penukar kalor yang selisihnya rata-rata sekitar $11,85^{\circ}\text{C}$.

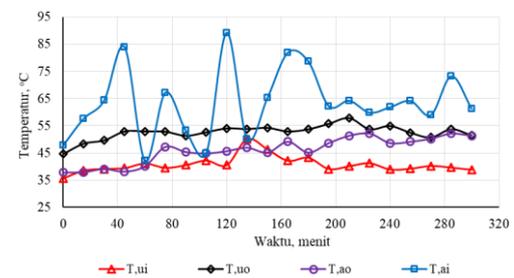
Gambar 7 menyajikan hubungan laju perpindahan kalor sisi udara (pelepasan kalor) dan efektivitas penukar kalor. Pada gambar ini terlihat bahwa dengan meningkatnya pelepasan kalor maka efektivitas penukar kalor juga mengalami peningkatan tetapi pada nilai $1100 - 1200$ watt, nilai efektivitas penukar kalor cenderung stabil yaitu sekitar 54%.



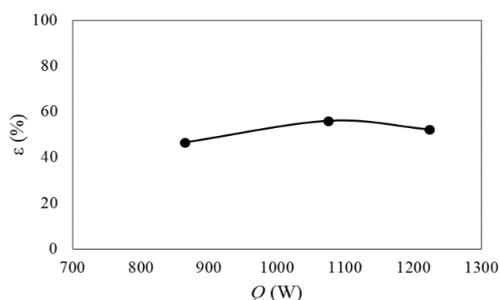
Gambar 4. Distribusi temperatur di penukar kalor hari pertama



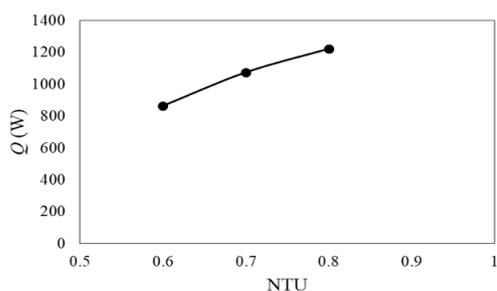
Gambar 5. Distribusi temperatur di penukar kalor hari kedua



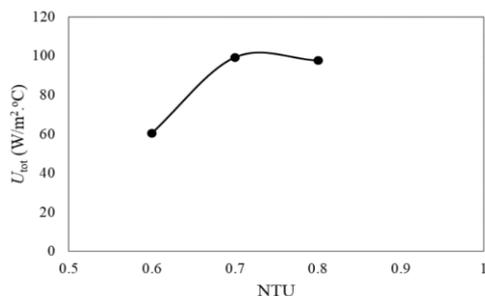
Gambar 6. Distribusi temperatur di penukar kalor hari ketiga



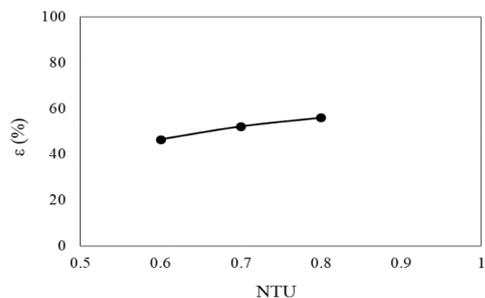
Gambar 7. Hubungan pelepasan kalor dan efektivitas



Gambar 8. Hubungan NTU dan pelepasan kalor



Gambar 9. Hubungan NTU dan koefisien perpindahan kalor menyeluruh



Gambar 10. Hubungan NTU dan efektivitas

Gambar 8 menunjukkan hubungan pelepasan kalor dan NTU (Number of Transfer Unit). Dari gambar ini terlihat bahwa dengan meningkatnya nilai NTU maka pelepasan kalor akan juga mengalami peningkatan.

Gambar 9 menunjukkan hubungan NTU dan koefisien perpindahan kalor menyeluruh di penukar kalor. Dari gambar ini terlihat bahwa pada nilai NTU 0,6 sampai dengan 0,7 nilai koefisien perpindahan kalor menyeluruh mengalami peningkatan yang signifikan tetapi pada nilai NTU 0,7 sampai dengan 0,8 besarnya nilai koefisien perpindahan kalor menyeluruh cenderung stabil.

Gambar 10 menunjukkan hubungan antara NTU dan efektivitas penukar kalor. Pada gambar ini terlihat bahwa dengan meningkatnya nilai NTU maka efektivitas penukar kalor juga akan mengalami peningkatan. Pada kasus ini, nilai NTU dan efektivitas hampir membentuk garis linier. Oleh karena itu, nilai NTU sangat mempengaruhi besar efektivitas penukar kalor.

KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah bahwa nilai koefisien perpindahan kalor menyeluruh sangat dipengaruhi oleh nilai efektivitas penukar kalor, dan dengan meningkatnya efektivitas penukar kalor maka koefisien perpindahan kalor juga akan meningkat. Koefisien perpindahan kalor menyeluruh tertinggi diperoleh pada hari kedua yaitu 99,263 W/m²·°C dan terendah diperoleh pada hari pertama, yaitu 60,488 W/m²·°C sedangkan pada hari ketiga diperoleh nilai sebesar 97,712 W/m²·°C.

Total laju perpindahan kalor juga dipengaruhi oleh efektivitas penukar kalor tetapi pada nilai tertentu kedua nilai tersebut cenderung stabil akibat keterbatasan efektivitas penukar kalor. Nilai NTU sangat berpengaruh terhadap efektivitas penukar kalor, di mana dengan meningkatnya NTU maka efektivitas juga akan ikut meningkat.

Dalam kasus nilai NTU berkisar antara 0,6 sampai dengan 0,8. Efektivitas penukar kalor yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berkisar antara 46% sampai dengan 56%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Martiani, E., Murad, dan Putra, G. M. D., 2017, Modifikasi dan Uji Performansi Alat Pengereng Hybrid (Surya-Biomassa) Tipe Rak, *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem*, Volume 5, Nomor 1, Maret, hal. 339 – 347.
- [2]. Abadi, F. R., Ahmadi, N. R., dan Nurhasanah, A., 2018, Keragaan Pengereng Hybrid Energi Surya dan Biomassa untuk Pengerengan Sawut Ubi Kayu Terfermentasi, *Buletin Palawija*, Volume 16, Nomor 2, Oktober, hal. 54 – 64.
- [3]. Tahir, M., Kasim, R., dan Bait, Y., 2013, Uji Performansi Desain Terintegrasi Tungku Biomassa dan Penukar Panas, *AGRITECH*, Volume 33, Nomor 2, Mei, hal. 219 – 225.
- [4]. Sulaeman, dan Satria, N., 2014, Analisa Efektivitas Alat Penukar Panas, *Jurnal Teknik Mesin*, Volume 4, Nomor 1, April, hal. 22 – 24.
- [5]. Firman, L. M., 2014, Rancang Bangun Alat Penukar Kalor Plat Datar, *Jurnal Mekanikal Teknik Mesin*, Volume 10, Nomor 2, Agustus, hal. 33 – 38.
- [6]. Syukran, 2018, Kaji Efisiensi Temperatur Penukar Panas dengan Variasi Aliran untuk Aplikasi Pengereng, *Jurnal POLIMESIN*, Volume 16, Nomor 2, Agustus, hal. 39 – 42.
- [7]. Piarah, W. H., Djafar, Z., Aziz, N., dan Bahasyah, S., 2018, Kaji Prestasi Alat Penukar Panas pada Mesin Pengereng Rak Telur dengan Berbahan Bakar Sekam, *Prosiding Seminar Ilmiah Nasional Sains dan Teknologi*, Volume 4, November, hal. 409 – 421.
- [8]. Azwinur, dan Zulkifli, 2019, Kaji Eksperimental Pengaruh Baffle pada Alat Penukar Panas Aliran Searah dalam Upaya Optimasi Sistem Pengereng, *SINTEK JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Volume 13, Nomor 1, Juni, hal. 8 – 14.
- [9]. Dwinanto, M. M., Riwu, D. B. N., Pah, J. C. A., and Tobe, A. Y., 2019, Multi-Objective Optimization of a Discrete Plate Finned-Tube Evaporator Design using Entropy Generation Minimization Method, *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, Volume 5, Issue 3, pp. 370 – 383.
- [10]. Holman, J. P., 2010, *Heat Transfer*, Tenth Edition, McGraw-Hill Companies, New York, pp. 521 – 567.
- [11]. Kakaç, S., Liu, H., and Pramuanjaroenkij, A., 2012, *Heat Exchangers (Selection, Rating, and Thermal Design)*, Third Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, pp. 427 – 445.
- [12]. Zohuri, B., 2017, *Compact Heat Exchangers (Selection, Application, Design and Evaluation)*, Springer International Publishing, Switzerland, pp. 57 – 183.