

EVALUASI KINERJA PADA BERBAGAI VARIASI SUSUNAN *HEAT EXCHANGER* MENGUNAKAN METODE LMTD DAN NTU

EVALUATION OF HEAT EXCHANGER CONFIGURATION VARIATE PERFORMANCE USING LMTD AND NTU METHODS

Sucika Nandiati¹, M.Ramdlan Kirom², Tri Ayodha Ajiwiguna³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹sucikanandiati1@gmail.com, ²jakasantang@gmail.com, ³tri.ayodha@gmail.com.

Abstrak

Alat penukar kalor (*Heat Exchanger*) adalah satu alat yang digunakan sebagai media perpindahan kalor antara dua fluida atau lebih yang memiliki suhu yang berbeda. *Heat exchanger* memiliki tipe dan desain struktur yang berbeda, salah satunya yaitu *heat exchanger plate fin* yang dilengkapi dengan kipas. Dalam penelitian kali ini dilakukan evaluasi kinerja dari *heat exchanger plate fin* pada beberapa variasi susunan. Kinerja pada *heat exchanger* dapat dilihat dari nilai koefisien perpindahan kalor keseluruhan (U) dan efektivitas perpindahan kalor (ϵ). Eksperimen dilakukan dengan variasi susunan *heat exchanger* yaitu *single*, dua buah *heat exchanger* yg disusun seri dan dua buah *heat exchanger* yang disusun paralel. Laju aliran *hot fluid* input sama pada setiap variasi yaitu sebesar 1 kg/m^3 . Pengambilan data dilakukan dengan rentang suhu $50\text{-}80^\circ\text{C}$ pada kenaikan $\pm 5^\circ\text{C}$ dengan data yang direkam oleh datalogger yaitu suhu *hot fluid*, suhu *cold fluid* dan suhu lingkungan. Pengolahan data dilakukan untuk mendapatkan nilai U dan nilai efektivitas. Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan nilai koefisien perpindahan kalor rata-rata pada seri *heat exchanger* lebih tinggi $72,5916\%$ dari pada *single heat exchanger* dan paralel *heat exchanger* lebih tinggi $68,0385\%$ dari pada *single heat exchanger*. Sedangkan nilai efektivitas perpindahan kalor pada seri *heat exchanger* lebih tinggi $38,7494\%$ dari pada *single heat exchanger* dan paralel *heat exchanger* lebih tinggi $14,0521\%$ dari pada *single heat exchanger*.

Kata kunci : efektivitas, *heat exchanger*, koefisien perpindahan kalor, *plate fin*.

Abstract

Heat exchanger is a device that is used as a medium for heat transfer between two or more fluids that has a different temperature. The heat exchanger has a different type and design structure, one of which is the fin plate heat exchanger equipped with a fan. In this study an evaluation of the performance of the plate fin heat exchanger was carried out on several variations of the arrangement. The performance of the heat exchanger can be seen from the total heat transfer coefficient (U) and the effectiveness of heat transfer (ϵ). Experiments were carried out with variations in the heat exchanger arrangement namely single, two heat exchangers arranged in series and two heat exchangers arranged in parallel. The hot fluid input flow rate is the same for each variation, which is 1 kg/m^3 . Data retrieval was carried out with a temperature range of $50\text{-}80^\circ\text{C}$ at an increase of $\pm 5^\circ\text{C}$ with data recorded by the datalogger namely hot fluid temperature, cold fluid temperature and environment temperature. Data processing is done to get U value and effectiveness value. Based on the experimental results, the average heat transfer coefficient is $72,5916\%$ higher than the single heat exchanger than the single heat exchanger and parallel heat exchanger $68,0385\%$ higher than the single heat exchanger. While the effectiveness of heat transfer in the heat exchanger series is $38,7494\%$ higher than the single heat exchanger and the parallel heat exchanger is $14,0521\%$ higher than the single heat exchanger.

Keywords: effectiveness, *heat exchanger*, heat transfer coefficient, *plate fin*

1. Pendahuluan

Alat penukar kalor (*Heat Exchanger*) adalah sebuah alat yang digunakan untuk memfasilitasi perpindahan kalor antara dua fluida atau lebih yang memiliki perbedaan temperatur. Proses perpindahan kalor yang terjadi pada *heat exchanger* yaitu dari fluida bersuhu tinggi ke fluida bersuhu rendah. Perpindahan kalor antar fluida ini bisa terjadi secara langsung (tanpa dinding pemisah) dan tidak langsung (adanya dinding pemisah). Fluida yang bertukar kalor dapat berupa fluida yang sama fasa atau fluida yang berbeda fasa. Pada umumnya, *heat exchanger* terdapat uap panas (*super heated steam*) sebagai fluida pemanas dan air biasa sebagai fluida yang dipanaskan. *Heat exchanger* bisa berfungsi sebagai pendingin atau pemanas suatu fluida [1].

Heat exchanger banyak digunakan dalam berbagai aplikasi. Di dalam dunia industri *heat exchanger* berperan penting dalam suatu proses produksi. Salah satu contoh aplikasi penggunaan *heat exchanger* pada dunia industri adalah pembangkit listrik tenaga panas bumi yaitu kondenser yang berguna untuk merubah fasa uap menjadi fasa cair. Dalam otomotif aplikasi *heat exchanger* yaitu radiator mobil sedangkan dalam HVAC (*Heating Ventilating Air Conditioning*) yaitu evaporator, *air conditioning*, *cooling tower*, sistem refrigrasi, dan lain-lain [1,2].

Salah satu tipe *heat exchanger* yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi adalah *heat exchanger plate fin*. Penggunaan *heat exchanger* ini di antaranya untuk sistem pendingin *central processing units* (CPU) komputer. *Heat exchanger* ini berfungsi sebagai radiator untuk prosesor di dalam komputer. Sama seperti radiator untuk mobil, sistem pendingin air ini akan menyalurkan cairan melalui *heat exchanger* yang terpasang pada prosesor. Kemudian *heat exchanger plate fin* ini bisa juga digunakan pada *air conditioning* evaporator, *drive* frekuensi variabel industri, pendingin kabinet kontrol industri, dan lain-lain.

Kinerja dari *heat exchanger* dapat dilihat melalui nilai efektivitas perpindahan kalor (ϵ) dengan menggunakan metoda *Number of Transfer Units* (NTU) dan koefisien perpindahan kalor (U) menggunakan metoda *Log Mean Temperature Difference* (LMTD). Efektivitas didefinisikan dalam metoda *Number of Transfer Units* (NTU) yaitu sebagai rasio laju perpindahan kalor yang sebenarnya dari fluida panas ke fluida dingin terhadap laju perpindahan kalor maksimum yang mungkin. Dr. M K Chopra dan Ramjee Singh Prajapati melakukan analisis termal pada *heat exchanger* jenis unmixed dengan aliran cross flow [3]. Analisis ini dilakukan dengan memvariasikan laju aliran fluida yang masuk. Hasil percobaan menyatakan bahwa perpindahan kalor pada *heat exchanger* menurun jika persentase fluida dingin yang masuk melebihi 50% dibandingkan dengan fluida panas. Besarnya kalor yang berpindah akan berbanding lurus dengan luas permukaan yang diperlukan [4].

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan perbandingan kinerja dari beberapa variasi susunan *heat exchanger plate fin* yang dilengkapi dengan kipas. *Heat exchanger* ini terdiri dari dua fluida, dimana fluida air akan mengalir ke *heat exchanger plate fin* kemudian fluida udara akan dialirkan dari kipas menuju *plate fin* secara silang (*crossflow*). Setelah itu *heat exchanger* akan disusun pada beberapa variasi yaitu *single heat exchanger*, dua buah *heat exchanger* yang disusun secara seri dan dua buah *heat exchanger* yang disusun secara paralel. Kemudian setelah itu dilakukan evaluasi nilai perpindahan kalor keseluruhan (U) dan nilai efektivitas perpindahan kalor (ϵ) untuk melihat perbandingan kinerja *heat exchanger* dari ketiga variasi susunan tersebut. Sehingga dapat ditarik kesimpulan kinerja yang terbaik dari beberapa susunan *heat exchanger* tersebut.

2. Dasar Teori

2.1 Heat Exchanger

Alat penukar kalor (*Heat Exchanger*) adalah sebuah alat yang berfungsi untuk menukar kalor pada dua jenis fluida yang memiliki suhu yang berbeda. *Heat exchanger* banyak digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pembangkit listrik, industri minyak, sistem pendingin udara, dan sistem refrigrasi. *Heat exchanger* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe, yaitu dapat ditinjau dari jenis kontak antara dua fluida, arah aliran fluida dan *area density* (β) [2].

Ditinjau dari jenis kontak antara dua fluida pada *heat exchanger* memiliki dua tipe yaitu tipe *direct* dan *indirect*. Pada tipe *indirect* kalor berpindah melalui dinding pemisah antara dua fluida atau bisa disebut *plate fin*, sedangkan pada tipe *direct contact* kalor berpindah secara langsung tanpa adanya dinding pemisah antara dua fluida sehingga terjadinya pencampuran pada dua fluida tersebut. Sedangkan berdasarkan jenis alirannya *heat exchanger* memiliki tiga jenis aliran yang digunakan untuk aplikasi *heat exchanger* dengan tipe konstruksi yang berbeda yaitu *parallel flow*, *counter flow* dan *cross flow*, dimana *parallel flow* memiliki arah aliran yang searah pada kedua aliran fluida, *counter flow* memiliki arah aliran yang berlawanan, sedangkan *cross flow* memiliki arah aliran silang antar dua aliran fluida.

Area density (β) adalah rasio permukaan perpindahan kalor dengan volumenya, memiliki satuan m^2/m^3 . *Area density* digunakan untuk menentukan seberapa *compact* sebuah penukar kalor, apabila sebuah *heat exchanger* memiliki $\beta > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ maka bisa dibilang bahwa *heat exchanger* tersebut *compact*. *Plate fin*, *tube fin* dan regenerator adalah contoh *heat exchanger compact* dengan aliran gas pada salah satu atau kedua aliran fluida [2].

Untuk menganalisa performansi atau kinerja dari sebuah *heat exchanger*, maka diperlukan evaluasi nilai koefisien perpindahan kalor keseluruhan (U) dengan menggunakan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) dan nilai efektivitas (ϵ) dengan menggunakan metode *Number of Transfer Units* (NTU).

2.2 Laju Perpindahan Kalor

Tingkat perpindahan kalor dalam *heat exchanger* juga dapat dinyatakan dengan cara berikut ini berdasarkan hukum pendinginan Newton[1]:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = U A_s \Delta T_{lm} \quad (1)$$

Keterangan : \dot{Q} = laju perpindahan kalor (W)

U = koefisien perpindahan kalor keseluruhan ($\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)

A_s = luas perpindahan kalor (m^2)

R = Resistansi termal ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

ΔT_{lm} = selisih suhu rata-rata antara dua fluida ($^\circ\text{C}$)

Luas permukaan dapat ditentukan secara tepat menggunakan dimensi penukar panas. Namun, koefisien perpindahan panas keseluruhan U dan ΔT_m , secara umum, tidak konstan dan bervariasi sepanjang penukar panas. Laju alir massa berbanding lurus dengan nilai U , begitu juga dengan temperatur [6].

2.3 Log Mean Temperature Difference (LMTD)

Metode LMTD pada analisis *heat exchanger* berguna ketika suhu inlet dan outlet diketahui atau ditentukan. LMTD kemudian dengan mudah dihitung dan aliran panas, luas permukaan, atau koefisien perpindahan panas keseluruhan dapat ditentukan. ketika suhu masuk atau keluar harus dievaluasi untuk penukar panas yang diberikan, analisis yang digunakan yaitu fungsi logaritmik di LMTD.

Oleh karena itu, metode LMTD sangat cocok untuk menentukan ukuran penukar panas untuk merealisasikan suhu saluran keluar yang ditentukan ketika laju aliran massa dan suhu saluran masuk dan keluar dari fluida panas dan dingin ditentukan.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (2)$$

$$\Delta T_1 = T_{h, in} - T_{c, out} \quad (3)$$

$$\Delta T_2 = T_{h, out} - T_{c, in} \quad (4)$$

Keterangan : ΔT_1 , ΔT_2 = perbedaan suhu antara fluida panas dan fluida dingin ($^\circ\text{C}$)

Hubungan *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) diatas terbatas hanya untuk aliran *parallelflow* dan *counterflow* saja, tidak berlaku untuk jenis *multipass crossflow heat exchanger*, karena kondisi aliran yang kompleks. Dalam kasus seperti ini, akan lebih mudah untuk menghubungkan perbedaan temperatur ekuivalen dengan hubungan perbedaan suhu rata-rata log untuk kasus *counterflow*, persamaan nya sebagai berikut [1]:

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm, CF} \quad (5)$$

Keterangan : F = faktor koreksi

$\Delta T_{lm, CF}$ = LMTD untuk kasus *counterflow*

Faktor koreksi (F) tergantung pada geometri penukar kalor serta suhu masuk dan suhu keluar dari aliran fluida panas dan dingin *heat exchanger*. Nilai faktor koreksi (F) didapat dari grafik pada gambar 2.1 dengan menghubungkan rasio temperatur P dan R dengan persamaan sebagai berikut [1] :

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (6)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

2.4 Effectiveness Heat Exchanger dengan menggunakan NTU Heat Exchanger

Efektivitas penukar kalor biasanya berhubungan dengan *Number of Transfer Units* (NTU). Adapun persamaannya sabagai berikut[1] :

$$NTU = \frac{U A_s}{C_{min}} \quad (8)$$

Keterangan : U = koefisien perpindahan kalor keseluruhan ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

A_s = luas perpindahan kalor (m^2)

C_{min} = kapasitas kalor minimum ($\text{J/}^\circ\text{C}$)

Ketika $C_c \neq C_h$, fluida dengan tingkat kapasitas kalor yang lebih kecil akan mengalami perubahan suhu yang lebih besar dan akan menjadi yang pertama mengalami suhu maksimum, pada titik perpindahan kalor akan terhenti [1].

Nilai *effectiveness* bergantung pada *geometry* dan juga *flow arrangement* dari penukar kalor, maka setiap tipe penukar kalor memiliki persamaan *effectiveness* yang berbeda, Tabel 2. Merupakan hubungan antara nilai *effectiveness* dan tipe penukar kalor.

$$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ \frac{NTU^{0.22}}{c} [\exp(-c NTU^{0.78}) - 1] \right\}$$

Dimana c adalah rasio kapasitas kalor didapatkan dari persamaan berikut [1]:

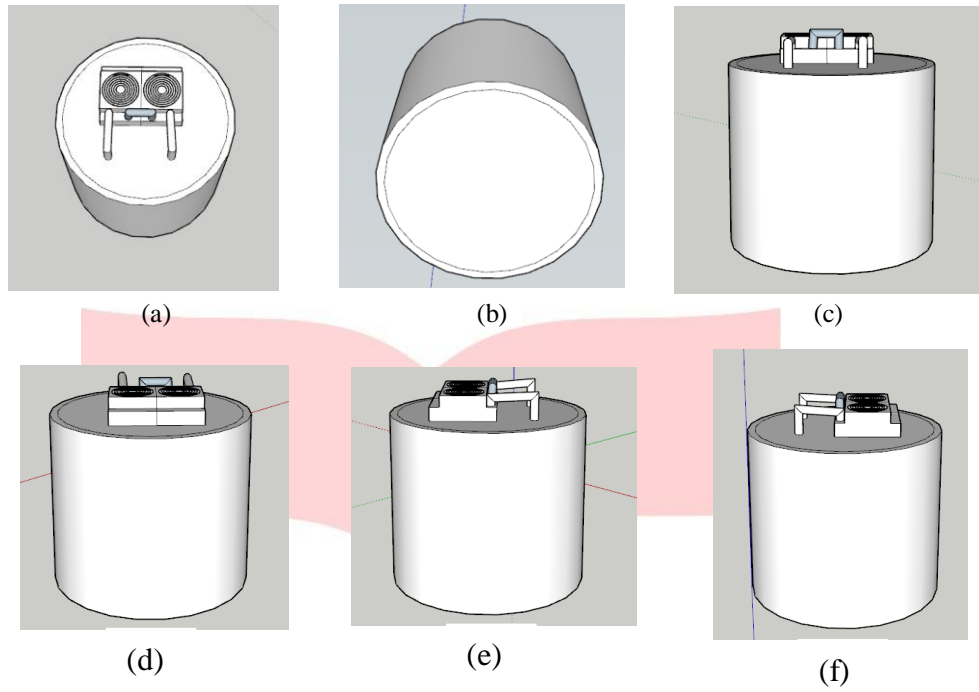
$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (9)$$

Keterangan : C_{min} = kapasitas kalor minimum ($\text{J/}^\circ\text{C}$)

C_{max} = kapasitas kalor maksimum ($\text{J/}^\circ\text{C}$)

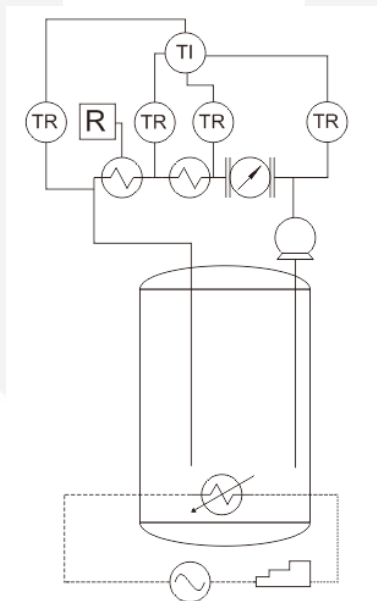
3. Pembahasan

3.1. Perancangan Alat



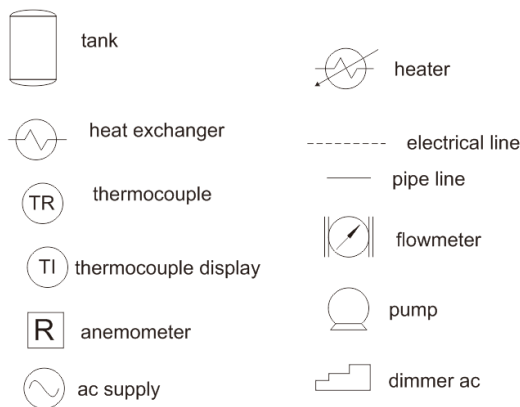
Gambar 1 Rancangan Alat (a) tampak atas, (b) tampak bawah, (c) tampak depan, (d) tampak belakang, € tampak samping kiri, dan (f) tampak samping kanan

3.2 Skema Pengukuran

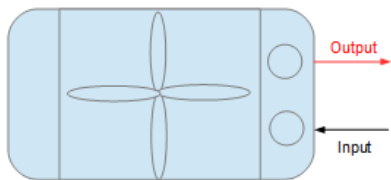


Gambar 2 Skema Pengambilan Data

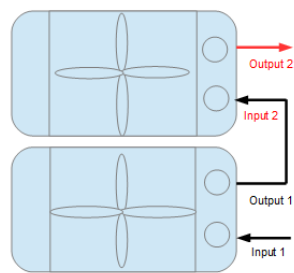
Keterangan :



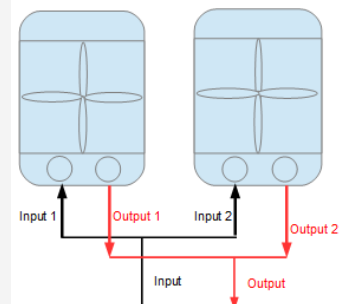
Pada gambar 2 terdapat dua *thermocouple display* dengan empat *channel* untuk menampilkan suhu air yang masuk (input) dan suhu yang keluar (output) dari *heat exchanger* serta suhu udara kipas sebelum dan setelah masuk ke *heat exchanger* selama dijalankan yang telah dihubungkan dengan *thermocouple type k*. Suhu *hot fluid* yang masuk pada rentang 50-80 °C dengan kenaikan setiap ±5°C. Pada penelitian kali ini akan digunakan *heat exchanger plate fin* yang dilengkapi dengan kipas. Dimana kipas tersebut akan mengalirkan udara menuju *plate fin* pada *heat exchanger* yang didalamnya dialiri *hot fluid*. *Anemometer* digunakan untuk mengukur kecepatan udara yang dihasilkan oleh kipas sebelum mengalir ke dalam *plate fin*, dimana kecepatan udara akan dikonversikan menjadi laju aliran massa. Kemudian pada saluran masuk air akan dipasang *flowmeter* untuk mengetahui laju aliran fluida yang masuk pada *heat exchanger*. Setelah air di dalam tanki dipanaskan oleh heater, dimana *heater* akan disambungkan dimmer yang berfungsi untuk mengatur resistansi, dimana ketika resistansi besar maka arus kecil dan daya akan besar sehingga akan terjadi perpindahan kalor pada penghantar. Dimana hasil pengambilan data akan dibuat dalam grafik yang ditampilkan di Ms. Excel.



Gambar 3 Single Heat Exchanger



Gambar 4 Heat Exchanger disusun Seri



Gambar 5 Heat Exchanger disusun Paralel

3.3 Pengolahan Data

Pengambilan data dilakukan dengan merekam suhu *hot and cold fluid* input dan output pada *heat exchanger* menggunakan data logger. Suhu *hot fluid* yang masuk pada rentang 50-80 °C dengan kenaikan setiap ±5°C. Dimana hasil pengambilan data akan dibuat dalam grafik yang ditampilkan di Ms. Excel. Kemudian menghitung jumlah perpindahan kalor berdasarkan data yang telah diperoleh, dimana untuk menghitung jumlah perpindahan kalor digunakan rumus hubungan laju aliran kalor dan jenis zat yaitu :

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_{ph} (T_{h, in} - T_{h, out}) \tag{10}$$

dengan \dot{m}_h adalah laju aliran massa *hot fluid inlet* (kg/s), C_{ph} adalah kapasitas panas *hot fluid inlet* (kJ/kg.K), dan ΔT adalah selisih suhu antara sisi *inlet* dan *outlet* pada *hot fluid* (°C). Setelah itu menghitung nilai koefisien perpindahan kalor (U) menggunakan metode LMTD dengan rumus hubungan laju aliran kalor yang telah diperoleh. Dengan menghubungkan persamaan (2.13) dan resistansi termal (2.1) dengan R_{kond} dapat diabaikan karena bahan *plate fin* yang tipis dan memiliki konduktivitas termal yang besar [1], sehingga didapat nilai U dengan rumus yaitu sebagai berikut :

$$U = \frac{As \Delta T_{lm}}{\dot{Q}} \tag{11}$$

Dengan As = luas permukaan perpindahan panas dan ΔT_{lm} adalah *logarithmic mean temperature difference* (LMTD). Dimana persamaan LMTD yang digunakan yaitu :

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \tag{12}$$

$$\Delta T_1 = T_{h, in} - T_{c, out} \tag{13}$$

$$\Delta T_2 = T_{h, out} - T_{c, in} \tag{14}$$

Hubungan *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) diatas terbatas hanya untuk aliran *parallelflow* dan *counterflow* saja, tidak berlaku untuk jenis *crossflow heat exchanger*, karena kondisi aliran yang kompleks. Dalam kasus seperti ini, akan lebih mudah untuk menghubungkan perbedaan temperature ekuivalen dengan hubungan perbedaan suhu rata-rata log untuk kasus *counterflow*, persamaannya sebagai berikut :

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm, CF} \tag{15}$$

Faktor koreksi (*F*) tergantung pada geometri penukar kalor serta suhu masuk dan suhu keluar dari aliran fluida panas dan dingin *heat exchanger*. Nilai faktor koreksi (*F*) didapat dari grafik pada gambar 2.1 dengan menghubungkan rasio temperatur P dan R dengan persamaan sebagai berikut [1] :

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \tag{16}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \tag{17}$$

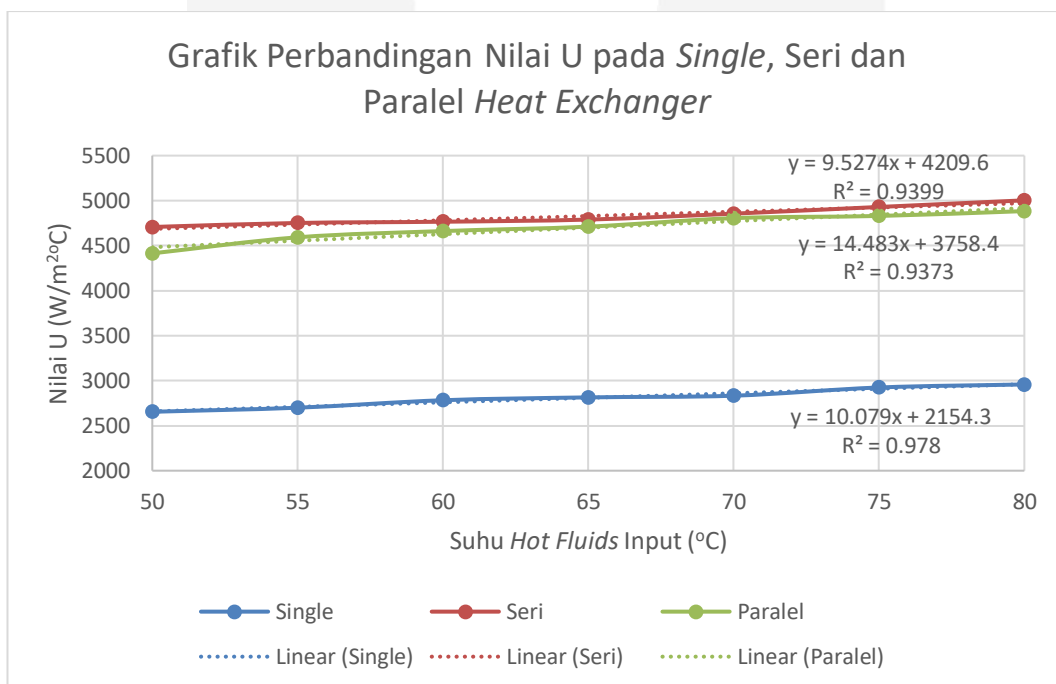
Lalu untuk mengevaluasi nilai ϵ nilai U yang telah didapat diolah menjadi nilai NTU terlebih dahulu. Kemudian menghitung nilai efektivitas perpindahan kalor pada masing-masing susunan *heat exchanger*, dengan menggunakan persamaan rumus yaitu :

$$\epsilon = 1 - \exp\left\{\frac{NTU^{0.22}}{c} [\exp(-c NTU^{0.78}) - 1]\right\} \tag{18}$$

$$NTU = \frac{U As}{C_{min}} \tag{19}$$

dengan C_{min} merupakan nilai terkecil dari perbandingan nilai antara C_c dan C_h . Nilai C_c dan C_h adalah hasil perkalian antara laju aliran massa dan kapasitas panas fluida. Jika nilai NTU telah didapat lalu diolah lagi sehingga mendapatkan nilai ϵ dan dibuat grafik pengaruh NTU terhadap nilai ϵ untuk mempermudah analisis perbandingan keefektivitasan penukar kalor. Setelah didapatkan nilai koefisien perpindahan kalor (*U*) dan nilai efektivitas perpindahan kalor (ϵ) maka dilakukan analisis perbandingan pada masing-masing susunan *heat exchanger* yaitu *single*, seri dan paralel. Sehingga kita dapat mengetahui dan menarik kesimpulan manakah yang perpindahan kalor yang lebih besar.

3.4 Perbandingan Single, Seri dan Paralel Heat Exchanger

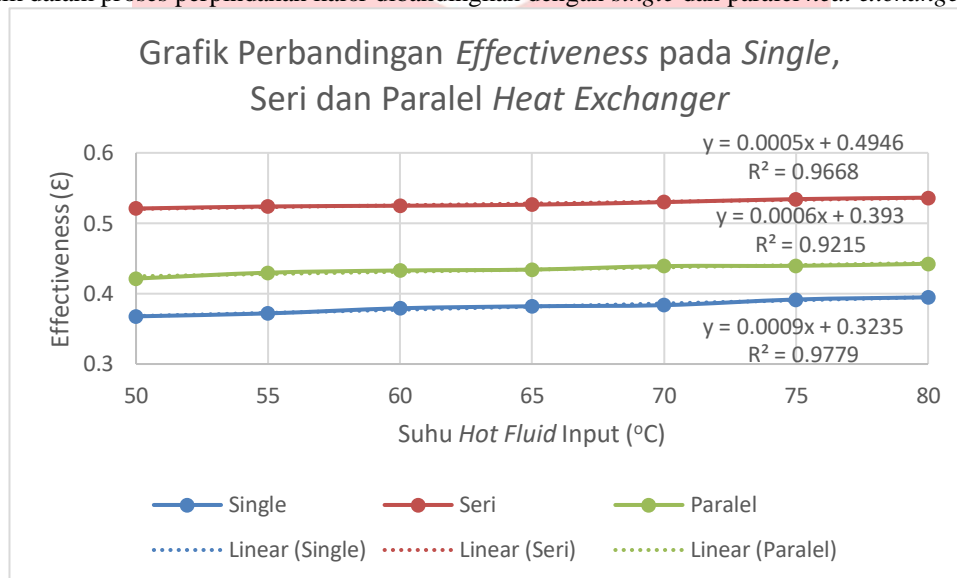


Gambar 6 Grafik Perbandingan Nilai U pada Single, Seri dan Paralel Heat Exchanger

Pada gambar 4.10, merupakan perbandingan nilai U pada setiap variasi dalam lima kali percobaan. Nilai U pada seri *heat exchanger* lebih tinggi dibandingkan variasi *single* dan paralel *heat exchanger* yaitu 4840,1 W/(m²K), sedangkan nilai U rata-rata pada *single heat exchanger* yaitu 2804,36 W/(m²K) dan paralel *heat exchanger* yaitu 4712,4118 W/(m²K). Hal ini disebabkan karena *hot fluid* input mengalami pertukaran kalor pada dua buah *heat exchanger* yang disusun seri, dimana jika dianalogikan pada rangkaian listrik input atau laju aliran massa *hot fluid* input (\dot{m}_h) akan mengalir pada dua buah resistansi termal yang disusun seri. Laju aliran massa *hot fluid* input (\dot{m}_h) mengalami pertukaran kalor dengan *cold fluid* lebih maksimal dibandingkan dengan *single heat exchanger*. Sehingga suhu *hot fluid* output lebih rendah dibandingkan dengan suhu *hot fluid* input, maka ΔT juga akan semakin besar. Dapat dilihat berdasarkan persamaan 2.13 akan membuktikan bahwa semakin besar ΔT maka laju perpindahan kalor akan lebih besar dan energi yang digunakan untuk melepaskan kalor lebih besar. Oleh karena itu laju perpindahan kalor (\dot{Q}) pada seri *heat exchanger* lebih baik dibandingkan dengan *single*.

Namun pada grafik 4.10 pengujian pada seri dan paralel memiliki nilai U yang tidak jauh berbeda. Hal ini disebabkan oleh laju aliran massa *hot fluid* input (\dot{m}_h) mengalami perpindahan kalor pada dua buah *heat exchanger* yang disusun secara seri maupun paralel. Sehingga ukuran keseluruhan koefisien perpindahan kalor yang terjadi pada *heat exchanger* yaitu total koefisien konveksi dan konduksi sepanjang *heat exchanger*nya sama. Akan tetapi suhu *hot fluid* output pada seri *heat exchanger* lebih rendah dibandingkan dengan paralel sehingga akan mempengaruhi nilai ΔT_h . Nilai ΔT_h pada seri *heat exchanger* lebih besar dibandingkan dengan paralel, sehingga semakin besar nilai ΔT_h maka nilai \dot{Q} pun akan semakin besar. Oleh karena itu suhu *hot fluid* output dari *heat exchanger* yang dioperasikan secara seri memiliki nilai lebih rendah yang berarti laju perpindahan kalor terjadi lebih cepat.

Pada grafik 4.10 nilai U pada *single*, seri dan paralel *heat exchanger* memiliki *trend* yang sama. Semakin besar suhu *hot fluid* input maka koefisien perpindahan kalor keseluruhannya pun akan semakin besar. Hal ini disebabkan karena hubungan antara suhu *hot fluid* input, nilai U dan \dot{Q} berbanding lurus. Dimana suhu *hot fluid* input semakin besar maka nilai rata-rata \dot{Q} juga akan semakin besar. Laju perpindahan kalor (\dot{Q}) yang semakin besar akan mengakibatkan resistansi termal semakin kecil sehingga perpindahan kalor secara konveksi antara sisi *plate fin* dan fluida terjadi lebih cepat. Semakin cepat kalor tersebut berpindah maka hal tersebut menjelaskan bahwa nilai koefisien perpindahan kalornya pun semakin tinggi. Laju perpindahan kalor yang semakin cepat maka koefisien perpindahan kalor keseluruhan juga akan semakin besar. Oleh karena itu *heat exchanger* yang disusun secara seri memiliki kemampuan yang lebih baik dalam proses perpindahan kalor dibandingkan dengan *single* dan paralel *heat exchanger*.



Gambar 7 Grafik Perbandingan *Effectiveness* pada *Single*, *Seri* dan *Paralel Heat Exchanger*

Dapat dilihat grafik pada gambar 4.10 berbeda dengan 4.11. dimana pada gambar 4.10 grafik seri dan paralel saling mendekati. Hal ini disebabkan karena nilai U yang hampir sama antara seri dan paralel *heat exchanger*. Sedangkan pada gambar 4.11 grafik seri dan paralel memiliki jarak yang berbeda. Pada gambar 4.11, merupakan perbandingan nilai *effectiveness* (ϵ) pada setiap variasi dalam lima kali percobaan. Efektivitas sebuah *heat exchanger* mencapai nilai maksimum ketika nilai U dan NTU nya pun mencapai nilai maksimum, hal itu karena pada sisi keluaran *heat exchanger* terjadi proses pertukaran kalor maksimal antara fluida panas dan fluida dingin. Nilai efektivitas rata-rata pada seri *heat exchanger* lebih tinggi dibandingkan dengan *single* dan paralel *heat exchanger* yaitu 0,528751 dengan nilai NTU 1,007274, sedangkan nilai efektivitas rata-rata pada *single heat exchanger* yaitu 0,381083 dengan nilai NTU 0,583616 dan pada paralel *heat exchanger* yaitu 0,434633 dengan nilai NTU 0,980705. Hal ini dikarenakan efektivitas yang berbanding lurus dengan ukuran kemampuan *heat exchanger* dalam melakukan perpindahan kalor (NTU). Sedangkan nilai NTU berbanding lurus dengan nilai U yang dihasilkan menjelaskan keseluruhan koefisien perpindahan kalor yaitu total koefisien konduksi dan konveksi sepanjang *heat exchanger*. Sehingga semakin besar nilai U maka akan semakin efektif sebuah *heat exchanger* dalam melakukan perpindahan kalor. Oleh karena itu, jika nilai U dan efektivitas perpindahan kalor semakin baik dalam sebuah *heat exchanger* maka kinerjanya juga akan semakin bagus.

Pada grafik 4.11 dapat dilihat bahwa grafik efektivitas pada *single*, seri dan paralel memiliki jarak yang berbeda satu sama lain. Nilai efektivitas pada seri *heat exchanger* 21,6543% lebih tinggi dibandingkan dengan paralel *heat exchanger*. Hal ini disebabkan karena pada pengujian seri *heat exchanger* laju aliran massa *hot fluid* input (\dot{m}_h) lebih besar dibandingkan dengan paralel *heat exchanger*. Maka akan mempengaruhi rasio kapasitas kalor (c) pada *heat exchanger*. Nilai c merupakan rasio atau perbandingan kapasitas kalor yang terjadi pada *heat exchanger*, dimana perbandingannya antara C_{min} dan C_{max} . Dimana C_{min} merupakan kapasitas kalor minimum antar dua fluida dan C_{max} merupakan kapasitas kalor maksimum antar dua fluida. Nilai C_{min} diperoleh pada fluida udara dari kipas dan nilai C_{max} diperoleh pada fluida air. Semakin besar laju aliran massa *hot fluid* input (\dot{m}_h) maka kapasitas kalor maksimum (C_{max}) juga akan semakin besar, hal ini dapat dibuktikan pada persamaan 2.9. Sehingga jika kapasitas kalor maksimum (C_{max}) pada *heat exchanger* semakin besar maka nilai c akan semakin kecil karena berbanding terbalik. Hal ini bisa dilihat dari

persamaan 2.19. Semakin kecil nilai c maka nilai efektivitas akan semakin meningkat karena membutuhkan energi yang lebih sedikit untuk melepas kalor sehingga ΔT_h akan besar. Oleh karena itu pada grafik 4.11 nilai efektivitas pada seri *heat exchanger* diperoleh 21,6543% lebih tinggi dibandingkan dengan paralel *heat exchanger*. Hal ini dikarenakan laju aliran massa *hot fluid* input (\dot{m}_h) pada seri lebih besar dibandingkan dengan paralel *heat exchanger*.

Sedangkan nilai efektivitas perpindahan kalor pada paralel *heat exchanger* tidak jauh berbeda dibandingkan dengan *single heat exchanger* yaitu 14,05206% lebih tinggi. Laju aliran massa *hot fluid* input (\dot{m}_h) pada paralel berbeda dengan *single heat exchanger*, akan tetapi paralel memiliki laju perpindahan kalor yang lebih besar dibandingkan *single heat exchanger*. Sehingga hal ini akan mempengaruhi nilai U dan NTU. Oleh karena itu nilai efektivitas perpindahan kalor pada paralel *heat exchanger* lebih tinggi dibandingkan dengan *single heat exchanger*.

Tabel 1. Nilai rata-rata \dot{Q} , U , NTU dan ϵ pada percobaan single, seri dan paralel heat exchanger

	Single Heat Exchanger	Seri Heat Exchanger	Paralel Heat Exchanger
Nilai laju perpindahan kalor (W)	368,05667	670,0935	632,1900
Nilai koefisien perpindahan kalor ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	2804,3634	4840,0983	4712,4119
Nilai Effectiveness (ϵ)	38,108322%	52,8750%	43,4633%

Pada tabel satu menjelaskan perbandingan nilai rata-rata laju perpindahan kalor, nilai koefisien perpindahan kalor, NTU dan efektivitas dalam lima kali eksperimen. berdasarkan tabel, dapat disimpulkan bahwa pada percobaan seri *heat exchanger* memiliki efektivitas lebih tinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan pada bab IV, terdapat beberapa kesimpulan, yaitu sebagai berikut :

1. Telah dilakukan evaluasi performansi pada beberapa variasi susunan *heat exchanger plate fin* yaitu *single*, seri dan paralel.
2. Suhu rata-rata keluaran selama eksperimen pada seri *heat exchanger* lebih rendah dibandingkan *single* dan paralel *heat exchanger*.
3. Pada percobaan dengan susunan seri *heat exchanger* memiliki keunggulan pada nilai koefisien perpindahan kalor keseluruhan (U) dibandingkan dengan perobaan yang lainnya. Nilai rata-rata koefisien perpindahan kalor keseluruhan (U) pada seri *heat exchanger* yaitu sebesar 4840,0983 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) memiliki perbandingan 72,5916% lebih tinggi dibandingkan dengan *single heat exchanger* yang menghasilkan nilai sebesar 2804,3634 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) dan pada paralel *heat exchanger* yaitu sebesar 4712,4119 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) memiliki perbandingan 68,0385% lebih tinggi dibandingkan dengan *single heat exchanger* yang menghasilkan nilai sebesar 2804,3634 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).
4. Efektivitas tertinggi terdapat pada percobaan dengan susunan seri *heat exchanger*. Nilai rata-rata efektivitas (ϵ) pada seri *heat exchanger* yaitu 52,875% dengan nilai rata-rata NTU 1,007274 memiliki perbandingan 38,7494% lebih tinggi dibandingkan dengan *single heat exchanger* yang menghasilkan nilai rata-rata efektivitas sebesar 38,1083% dengan nilai NTU 0,583616 dan pada paralel *heat exchanger* 43,4633% dengan nilai NTU 0,980705 memiliki perbandingan 14,0521% lebih tinggi dibandingkan *single heat exchanger*.

Daftar Pustaka:

- [1] Çengel Yunus A., *Heat transfer a practical approach*. Boston (Mass.): McGraw-Hill, 2006.
- [2] Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. New Jersey: John Wiley & sons, Inc.
- [3] Chopra, Dr. M K, dkk. 2014. Thermal Performance analysis of cross-flow unmixed-unmixed heat exchanger by the variation of inlet condition of hot fluid : International Refereed Journal of Engineering and Science. Vol.3, No.1, 2014, pp.29-31.
- [4] Holman, J.P., 2002, Perpindahan Kalor. Jakarta: Erlangga.
- [5] Syaichurrozi, Iqbal, dkk. 2014. Kajian Performa Alat Penukar Panas Plate and Frame : Pengaruh Laju Alir Massa, Temperatur Umpan dan Arah Aliran Terhadap Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh. Vol IX, No.02, 2014, ISSN: 1410-394X.
- [6] M. Khaled, M. Ramadan, & H. El Hage, "Innovative Approach of Determining the overall heat transfer coefficient of heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, vol. 99, pp. 1086-1092, April. 2016.