

PERANCANGAN *HEAT EXCHANGER* SISTEM *AUXILIARY COOLING WATER* UNTUK KONDENSASI UAP PADA PT YTL JAWA TIMUR

Fatikhatul Muhibah¹, Yanty Maryanty¹, Erry Nabil²

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

²PT YTL Jawa Timur, Jl. Raya Surabaya-Situbondo No.Km. 141, Dusun Krajan, Sumberanyar,

Kecamatan Paiton, Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur 67291, Indonesia

fatikhatulmuhibah61@gmail.com ; yanty.maryanty@polinema.ac.id

ABSTRAK

PT YTL Jawa Timur menghadapi tantangan dalam meningkatkan efisiensi sistem kondensasi uap akibat kecilnya perbedaan suhu antara fluida panas berupa *demineralized water* dan fluida dingin berupa air laut. Sistem pendinginan sebelumnya menggunakan metode *direct cooling*, yaitu air laut dialirkan secara langsung ke kondensor utama untuk mendinginkan uap bekas turbin. Perbedaan suhu yang kecil menyebabkan gaya pendorong perpindahan panas menurun, sehingga proses kondensasi menjadi kurang optimal, tekanan kondensor meningkat, dan efisiensi termal sistem menurun. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan perancangan dan penambahan *heat exchanger* tipe *shell and tube* dengan konfigurasi 1 *shell pass* dan 2 *tube pass* pada sistem *Auxiliary Cooling Water* (ACW). Penelitian ini bertujuan merancang *heat exchanger* yang mampu menurunkan temperatur fluida panas sebelum memasuki kondensor utama, sehingga dapat mengurangi beban kondensor dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Metodologi penelitian meliputi pengumpulan data lapangan dari sistem kondensasi PLTU PT YTL Jawa Timur, meliputi temperatur fluida panas dan dingin, laju aliran, tekanan operasi, serta perhitungan laju perpindahan panas dan luas permukaan perpindahan panas. Hasil perancangan menunjukkan bahwa *heat exchanger* dengan konfigurasi 1 *shell pass* dan 2 *tube pass* menggunakan 70 pipa berbahan SS316 mampu mentransfer panas sebesar 66,67 kW. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan sistem tersebut mampu mengurangi beban kondensor utama hingga 28% dan meningkatkan efisiensi termal siklus Rankine sebesar 4–5%. Desain yang dihasilkan bersifat modular sehingga dapat dikembangkan sesuai kebutuhan sistem. Dengan demikian, penerapan *heat exchanger* pada sistem ACW berpotensi meningkatkan kinerja kondensasi dan efisiensi termal PLTU.

Kata kunci: *auxiliary cooling water, efisiensi termal, heat exchanger, kondensasi uap, shell and tube*

ABSTRACT

PT YTL East Java faces challenges in improving the efficiency of its steam condensation system due to the small temperature difference between the hot fluid, namely *demineralized water*, and the cold fluid, namely *seawater*. The previous cooling system employed a *direct cooling* method, in which *seawater* was directly circulated through the main condenser to cool the exhaust steam from the turbine. The small temperature difference reduces the driving force for heat transfer, resulting in less optimal condensation, increased condenser pressure, and decreased overall thermal efficiency. To address this issue, a *shell-and-tube heat exchanger* with a 1-*shell-pass* and 2-*tube-pass* configuration was designed and incorporated into the *Auxiliary Cooling Water* (ACW) system. This study aims to design a *heat exchanger* capable of reducing the temperature of the hot fluid before it enters the main condenser, thereby reducing the condenser load and improving heat transfer efficiency. The methodology involved collecting field data from the condensation system of the PT YTL East Java power plant, including hot and cold fluid temperatures, flow rates, operating pressures, and calculations of heat transfer rate

Corresponding author: Yanty Maryanty

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: yanty.maryanty@polinema.ac.id



and heat transfer surface area. The design results indicate that the heat exchanger, using a 1-shell-pass and 2-tube-pass configuration with 70 SS316 tubes, is capable of transferring heat at a rate of 66.67 kW. Simulation results show that the proposed system can reduce the load on the main condenser by up to 28% and improve the thermal efficiency of the Rankine cycle by approximately 4–5%. The proposed design is modular and can be further developed according to system requirements. Therefore, the implementation of a heat exchanger in the ACW system has the potential to improve condensation performance and the overall thermal efficiency of the power plant.

Keywords: auxiliary cooling water, thermal efficiency, heat exchanger, condensation, shell and tube

1. PENDAHULUAN

Kondensasi uap merupakan bagian penting dalam siklus Rankine yang diterapkan pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Dalam sistem ini, uap yang telah melewati turbin akan didinginkan kembali menjadi air agar dapat digunakan ulang sebagai air umpan boiler. Untuk mendukung proses ini, dibutuhkan media pendingin yang andal dan konsisten, seperti air laut atau air dari sistem sirkulasi tertutup [1, 2]. Keberhasilan proses kondensasi sangat bergantung pada kemampuan sistem menjaga suhu rendah di area kondensasi. Jika suhu uap sisa terlalu tinggi, maka laju perpindahan panas akan berkurang dan tekanan dalam kondensor akan meningkat, yang pada akhirnya akan menurunkan efisiensi termal keseluruhan sistem. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Sadaghiyani, dkk. (2017) menunjukkan bahwa penerapan sistem pendingin tambahan (*auxiliary cooling*) yang efektif dalam menjaga suhu kondensasi rendah dapat meningkatkan efisiensi eksergi hingga 36%, yang menekankan pentingnya pengaturan suhu dalam proses kondensasi [3]. Selain itu, penelitian oleh Shin, dkk. (2015) menunjukkan bahwa efektivitas perpindahan panas dalam proses kondensasi sangat dipengaruhi oleh ukuran dan konfigurasi dari *heat exchanger* khususnya dalam menjaga suhu kondensat tetap rendah. Optimasi parameter seperti sudut dan diameter tabung pada sistem PAFS (*Passive Auxiliary Feedwater System*) dapat secara signifikan menurunkan suhu, yang membuktikan bahwa suhu rendah sangat penting dalam proses kondensasi uap [4]. Dan penelitian yang dilakukan oleh Laskowski, dkk. (2015) juga menyatakan bahwa kenaikan suhu kondensasi dapat mengurangi kinerja turbin, terutama pada bagian tekanan rendah, karena menurunnya efisiensi isentropik dan bertambahnya konsumsi energi. Dengan demikian, menjaga suhu uap bekas dan hasil kondensat tetap rendah menjadi langkah utama dalam merancang sistem kondensasi yang efisien [5].

PT YTL Jawa Timur sebagai salah satu pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) besar di Indonesia menghadapi kendala dalam sistem pendinginannya akibat selisih suhu yang kecil antara fluida panas dan fluida dingin. Sebelumnya, sistem pendinginan yang digunakan merupakan sistem pendinginan langsung (*direct cooling*), dimana air laut dialirkan ke kondensor utama untuk mendinginkan uap bekas turbin tanpa melalui alat penukar panas tambahan. Sistem ini bekerja efektif pada kondisi perbedaan suhu yang besar, namun pada kondisi selisih suhu yang kecil antara fluida panas (*demineralized water*) dan fluida dingin (air laut), efisiensi perpindahan panas menjadi rendah. Akibatnya, laju kondensasi menurun, tekanan dalam kondensor meningkat, dan beban kerja sistem pendinginan secara keseluruhan bertambah [2, 3].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan perancangan ulang dengan penambahan sistem *heat exchanger* tipe *shell and tube* pada sistem *auxiliary cooling water* (ACW). Desain baru ini menggunakan konfigurasi 1 *shell pass* dan 2 *tube pass*, yang

memungkinkan peningkatan efektivitas perpindahan panas melalui turbulensi fluida dan waktu kontak antarfluida. Dengan adanya sistem *pre-cooling* ini, suhu fluida panas dapat diturunkan sebelum memasuki kondensor utama, sehingga mengurangi beban kondensor dan meningkatkan efisiensi termal siklus Rankine secara keseluruhan [4, 8].

Suhu rata-rata pada fluida panas (*demineralized water*) mencapai 103,592°F, sedangkan suhu rata-rata fluida dingin (*sea water*) sebesar 91,83°F. Selisih temperatur yang terbatas ini menghambat efisiensi perpindahan panas, sehingga proses kondensasi tidak berjalan optimal. Akibatnya, kondensor utama harus bekerja lebih keras dan sistem mungkin memerlukan energi tambahan untuk mempertahankan kestabilan suhu operasional. Untuk mengatasi permasalahan ini, dibutuhkan sistem pendukung berupa *auxiliary cooling water* (ACW) yang dilengkapi dengan *heat exchanger* yang dirancang secara efisien [6, 7, 8].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *heat exchanger* tipe *shell and tube* sangat efektif digunakan dalam sistem dengan laju aliran besar dan perbedaan suhu kecil. Selain itu, penggunaan material tahan korosi seperti *stainless steel* SS316 membuat desain ini lebih optimal untuk aplikasi dengan air laut sebagai fluida pendingin. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada perancangan dan evaluasi kinerja *heat exchanger* tipe *shell and tube* (1 *shell pass* – 2 *tube pass*) untuk sistem *auxiliary cooling water* di PLTU PT YTL Jawa Timur, untuk meningkatkan efisiensi proses kondensasi dan efisiensi energi pembangkit listrik secara keseluruhan [4, 5].

Bae, dkk. (2012) mengungkapkan bahwa sistem *Passive Auxiliary Feedwater System* (PAFS) yang memanfaatkan proses kondensasi pasif dapat mengatasi panas peluruhan tanpa memerlukan pasokan energi eksternal [11]. Sementara itu, Mrzljak, dkk. (2013) juga membuktikan melalui uji eksperimental bahwa desain *Passive Auxiliary Feedwater System* (PAFS) konfigurasi *heat exchanger* horizontal tetap mampu menjaga efektivitas pendinginan meskipun tidak menggunakan sistem aktif [12]. Teknologi pendinginan tambahan seperti ini juga telah diadopsi oleh sejumlah negara maju guna meningkatkan keandalan sistem pendinginan pada turbin uap [13]. Selanjutnya, penelitian oleh Jeong, dkk. (2017) menunjukkan bahwa penggabungan sistem *auxiliary cooling* dengan teknologi refrigerasi mampu meningkatkan efisiensi konversi energi menjadi kerja hingga 36% [14]. Chen, dkk. (2015) membuktikan bahwa pengendalian suhu kondensasi sangat berpengaruh terhadap kinerja turbin, khususnya dibagian tekanan rendah [15]. Selain itu, penerapan *heat exchanger* pada sistem pendingin tambahan yang ditempatkan sebelum kondensor utama mampu meningkatkan efisiensi energi dan pengurangan emisi, karena sistem menjadi lebih optimal dalam memanfaatkan energi panas dan mengalirkan energi panas [2, 13].

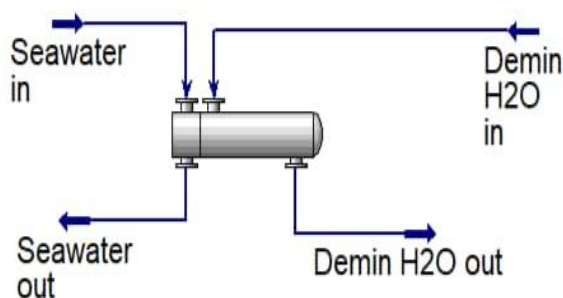
Keunggulan dari penelitian ini terletak pada perancangan sistem *heat exchanger* untuk *auxiliary cooling water* yang disesuaikan secara spesifik dengan kondisi operasional aktual di PT YTL Jawa Timur. Rancangan ini mempertimbangkan keterbatasan perbedaan suhu antar fluida, keterbatasan ruang instalasi, dan tuntutan efisiensi energi tanpa penggunaan sistem aktif tambahan. Berbeda dari pendekatan umum dalam studi sebelumnya, desain yang ditawarkan dalam penelitian ini mempertimbangkan konfigurasi 1 *shell pass* dan 2 *tube pass*, pemilihan material tahan korosi seperti SS316, serta penyesuaian jumlah pipa berdasarkan kapasitas dan efisiensi biaya. Pendekatan ini membuat rancangan menjadi lebih realistis dan sesuai untuk diterapkan langsung pada sistem yang ada di PLTU tersebut. oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan mengevaluasi kinerja *heat exchanger* tipe

shell and tube yang dimiliki oleh sistem pendinginan di PT YTL Jawa Timur, serta mampu memberikan dampak nyata terhadap peningkatan efisiensi kondensasi uap [1, 4, 8].

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini melibatkan proses perancangan teknis dan evaluasi performa *heat exchanger* tipe *shell and tube* dalam sistem *auxiliary cooling water* (ACW) untuk meningkatkan efisiensi kondensasi uap bekas dan uap keluaran di kondensor PT YTL Jawa Timur. Adapun tahapan-tahapan metodologi yang digunakan dijabarkan sebagai berikut:

2.1. Pengumpulan Data Lapangan



Gambar 1. Pengambilan Sampel Fluida pada *Heat Exchanger*

Pengumpulan data dilakukan langsung dari sistem kondensasi di unit PLTU PT YTL Jawa Timur. Pengambilan sampel dilakukan pada titik masuk dan keluar fluida panas (*demineralized water*) serta fluida dingin (air laut) untuk memperoleh data temperatur dan kondisi operasi aktual. Skema pengambilan sampel pada sistem *auxiliary cooling water* (ACW) ditunjukkan pada Gambar 1. Parameter-parameter penting yang dikumpulkan meliputi:

- | | |
|---|-------------------------|
| a. Suhu fluida panas (<i>demineralized water</i>) | = 103,592°F = 39,8°C |
| b. Suhu fluida dingin (air laut) | = 91,83°F = 33,24°C |
| c. Laju aliran fluida panas | = 13,89 L/s |
| d. Tekanan sistem operasi | = ± 2 atm |
| e. Kapasitas panas jenis (C_p) air | = 4,18 kJ/kg·K |
| f. Densitas air | = 997 kg/m ³ |

Data tersebut digunakan untuk menghitung kebutuhan perpindahan panas dan mendesain dimensi *heat exchanger*.

2.2. Data Perancangan *Heat Exchanger*

Data yang digunakan dalam perancangan *heat exchanger* ini merupakan data aktual hasil pengukuran lapangan pada sistem *auxiliary cooling water* (ACW) di PT YTL Jawa Timur. Data tersebut digunakan sebagai dasar untuk menentukan spesifikasi desain dan parameter operasi alat. Spesifikasi awal perancangan ditunjukkan pada Tabel 1. Susunan *triangular* (segitiga) dipilih karena memungkinkan jumlah pipa lebih banyak dalam ruang yang lebih kecil, serta meningkatkan turbulensi fluida, yang berdampak pada peningkatan koefisien perpindahan panas.

Tabel 1. Data Perancangan *Heat Exchanger*

Parameter	Nilai Desain	Satuan
Tipe	<i>Shell and Tube</i>	
Jumlah <i>Shell Pass</i>	1	
Jumlah <i>Tube Pass</i>	2	
Material <i>Tube</i>	<i>Stainless Steel (SS316)</i>	
Diameter Luar <i>Tube</i>	19	mm
Ketebalan <i>Tube</i>	2	mm
Panjang <i>Tube</i>	1,5	m
Jumlah <i>Tube</i>	±70	
Pola Susunan <i>Tube</i>	<i>Triangular Pitch</i>	
Diameter <i>Shell</i>	±300	mm
Material <i>Shell</i>	Baja karbon anti-korosi	
Koneksi	<i>Flange standar ASME B16.5</i>	

2.3. Perhitungan Kebutuhan Perpindahan Panas dan Luas Permukaan

a. Laju Perpindahan Panas

Laju perpindahan panas dapat dihitung dari:

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad (1)$$

Keterangan:

Q = Laju perpindahan panas (Btu/h)

m = Laju aliran massa fluida (lb/s)

C_p = Kapasitas panas jenis fluida (Btu/lb°F)

ΔT = Selisih temperatur fluida (°F)

Nilai Q digunakan untuk menghitung luas permukaan (A) *heat exchanger* yang dibutuhkan. Perhitungan Q juga menunjukkan seberapa besar beban pendinginan yang bisa diambil alih oleh sistem *auxiliary cooling water* sebelum uap masuk ke kondensor utama.

b. Perhitungan Luas Permukaan Perpindahan Panas

$$A = \frac{Q}{U \times \Delta T} \quad (2)$$

Keterangan:

A = Luas permukaan perpindahan panas (ft²)

Q = Laju perpindahan panas (Btu/h)

U = Koefisien perpindahan panas keseluruhan (Btu/h.ft². °F)

ΔT = Selisih temperatur fluida (°F)

Luas permukaan perpindahan panas menjadi dasar dalam menentukan jumlah, panjang, dan diameter *tube*.

c. Desain Mekanis

Setelah diperoleh nilai laju perpindahan panas dan luas permukaan panas, dilakukan perancangan mekanis *heat exchanger* untuk menentukan jumlah pipa, material, dimensi shell, ketebalan komponen, serta standar keamanan yang digunakan. Jumlah pipa ditentukan berdasarkan luas permukaan total yang dibutuhkan dan luas permukaan tiap

pipa (*outer surface area*), dengan mempertimbangkan batas tekanan operasi serta efisiensi aliran fluida di sisi *shell* dan *tube*. Material yang digunakan adalah *stainless steel* SS316 untuk bagian *tube* karena ketahanannya terhadap korosi air laut, sedangkan *shell* menggunakan baja karbon berlapis pelindung anti-korosi. Dimensi *shell*, *cover*, dan koneksi disesuaikan dengan standar ASME B16.5 dan API 660 agar alat memenuhi ketahanan terhadap tekanan dan korosi.

Untuk menilai kinerja termal alat, dilakukan perhitungan efisiensi perpindahan panas (η) yang menunjukkan seberapa besar kemampuan *heat exchanger* dalam mentransfer panas aktual dibandingkan panas maksimum teoritis, dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{Q_{\text{aktual}}}{Q_{\text{maksimum}}} = \frac{m_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci})}{C_{min} (T_{hi} - T_{ci})} \quad (3)$$

Keterangan:

η = Efisiensi perpindahan panas

Q_{aktual} = Panas aktual yang berpindah dari fluida panas ke fluida dingin (W)

Q_{maksimum} = Panas maksimum teoritis yang dapat berpindah antara kedua fluida (W)

m_c = Laju aliran massa fluida dingin (kg/s)

C_{pc} = Kapasitas panas jenis fluida dingin (kJ/kg.K)

T_{co} = Suhu keluaran fluida dingin (°C)

T_{ci} = Suhu masukan fluida dingin (°C)

C_{min} = Kapasitas panas minimum di antara kedua fluida (kJ/s.K)

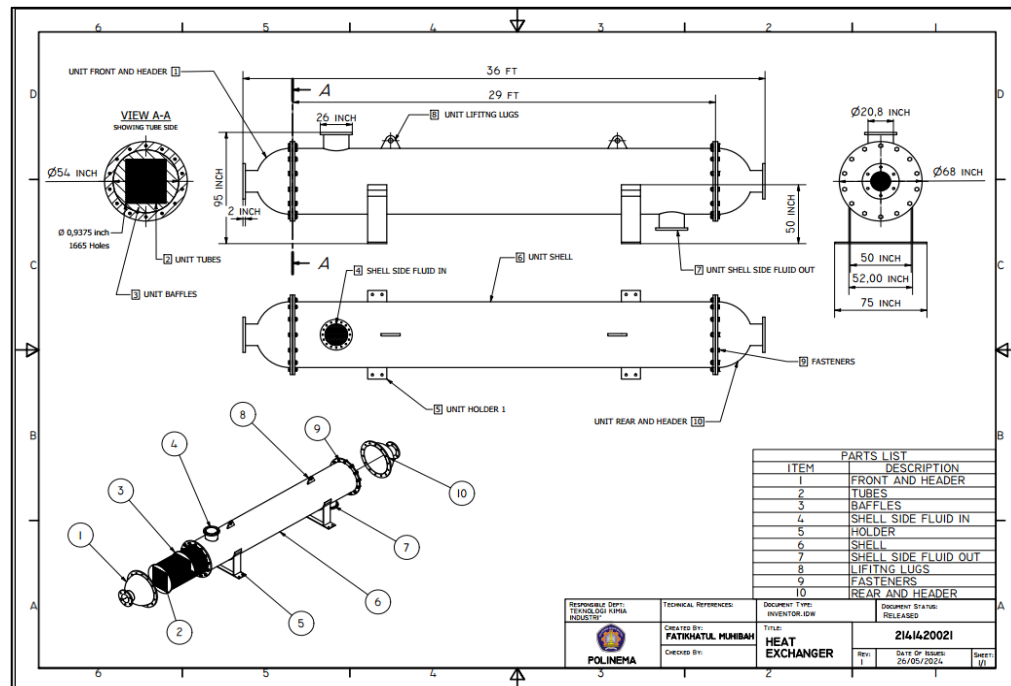
T_{hi} = Suhu masukan fluida panas (°C)

Nilai efisiensi ini digunakan untuk mengevaluasi performa termal alat terhadap kondisi ideal dan memvalidasi hasil perhitungan luas perpindahan panas yang diperoleh sebelumnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem kondensasi uap pada PLTU PT YTL Jawa Timur menghadapi permasalahan efisiensi akibat perbedaan suhu yang kecil antara fluida panas (*deminerlized water*) dan fluida dingin (air laut). Sebelumnya, sistem pendinginan yang digunakan merupakan sistem pendinginan langsung (*direct cooling*), di mana air laut dialirkan langsung ke kondensor utama untuk mendinginkan uap bekas turbin tanpa melalui proses pendinginan awal. Sistem ini umum digunakan pada pembangkit listrik konvensional karena sederhana dan efisien untuk selisih suhu besar, tetapi menjadi kurang efektif akibat gradien suhu antarfluida terlalu kecil [1, 2].

Pada kondisi eksisting, suhu fluida panas rata-rata sebesar 39,8°C, sedangkan suhu fluida dingin sekitar 33,2°C, sehingga perbedaan suhu efektif (ΔT) hanya sekitar 6,56°C. selisih temperatur yang rendah ini menyebabkan gaya pendorong perpindahan panas (*driving force*) menjadi kecil, sehingga laju kondensasi menurun, tekanan di dalam kondensor meningkat, dan efisiensi termal sistem menurun. Hal ini sejalan dengan penelitian Laskowski dkk. (2015) yang menyatakan bahwa kenaikan tekanan kondensasi dapat menurunkan efisiensi isentropik turbin secara signifikan [5]. Berdasarkan data operasional dan analisis termodinamika, efisiensi termal siklus Rankine pada kondisi awal hanya mencapai sekitar 34%, dengan selisih entalpi antara uap masuk dan keluar turbin sebesar 1.083 kJ/kg.



Gambar 2. Rancangan *Heat Exchanger*

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan *re-design* sistem pendinginan dengan menambahkan *heat exchanger* tipe *shell and tube* pada sistem *Auxiliary Cooling Water* (ACW) yang ditunjukkan pada Gambar 2. Desain ini menggunakan konfigurasi 1 *shell pass* dan 2 *tube pass*, yang mampu meningkatkan waktu kontak fluida (*residence time*) dan memperluas area perpindahan panas dibandingkan konfigurasi satu lintasan (*single pass*) [4]. Desain ini juga memastikan aliran fluida lebih seragam dan mengurangi kemungkinan terbentuknya *dead zone* di dalam *shell*, yang dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas [6]. Sementara itu, data hasil perancangannya disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 2 data hasil perancangan *heat exchanger*, Pemilihan material dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi operasi aktual. Material *tube* menggunakan *stainless steel* SS316 karena ketahanan korosinya yang tinggi terhadap air laut [1], sementara material *shell* menggunakan baja karbon berlapis *coating* anti-korosi untuk menjaga kekuatan mekanik [7]. Jumlah pipa yang digunakan sebanyak 70 buah dengan diameter luar 19 mm dan panjang 1,5 m, disusun dalam pola *triangular pitch* untuk meningkatkan turbulensi fluida dan memperbesar koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) [8]. Pendekatan modular ini juga memungkinkan peningkatan kapasitas di masa mendatang tanpa perubahan besar pada sistem utama [3].

Setelah penambahan *heat exchanger*, suhu fluida panas sebelum masuk ke kondensor utama turun dari 39,8°C menjadi 33,2°C, atau terjadi penurunan sebesar 6,6°C. Penurunan suhu ini berdampak langsung terhadap penurunan tekanan kondensasi, sehingga laju kondensasi meningkat dan proses perpindahan panas di kondensor menjadi lebih efisien. Secara termodinamika, penurunan tekanan kondensasi mengakibatkan entalpi keluaran turbin menurun, sehingga selisih entalpi antara uap masuk dan keluar turbin meningkat menjadi 1.145 kJ/kg. Dengan panas masuk ke boiler yang relatif konstan, peningkatan selisih

entalpi ini menghasilkan kenaikan efisiensi termal siklus Rankine menjadi sekitar 38–39%, atau meningkat sekitar 4–5% dibandingkan kondisi awal [3, 5].

Tabel 2. Data Hasil Perancangan *Heat Exchanger*

Parameter	Spesifikasi	Keterangan
Tipe <i>Heat Exchanger</i>	<i>Shell and Tube</i>	1 <i>shell pass</i> , 2 <i>tube pass</i>
Material <i>Tube</i>	<i>Stainless Stell</i> (SS316)	Tahan korosi, cocok untuk fluida laut
Material <i>Shell</i>	Baja karbon anti-korosi	Diperlukan perlindungan tambahan
Diameter Luar <i>Tube</i>	19 mm	Standar untuk aplikasi industri
Panjang <i>Tube</i>	1,5 m	Disesuaikan dengan keterbatasan ruang instalasi
Jumlah <i>Tube</i> (terpasang)	70 buah	Jumlah minimum dari kebutuhan luas permukaan total
Pola Susun <i>Tube</i>	<i>Triangular Pitch</i>	Memaksimalkan <i>turbulens</i> dan jumlah <i>tube</i> dalam ruang sempit
Laju Perpindahan Panas (Q)	66,67 kW (240.000 kJ/jam)	Berdasarkan selisih temperatur dan laju alir
Koefisien Perpindahan Panas (U)	300 W/m ² .K	Asumsi rata-rata untuk <i>shell and tube</i> dengan air laut
ΔT Log Mean Temperature Difference (LMTD)	6,56°C	Berdasarkan data suhu masuk dan keluar fluida
Luas Permukaan yang Dibutuhkan	33,89 m ²	Total kebutuhan luas perpindahan panas
Efisiensi Penurunan Suhu	28% beban kondensor dikurangi	Berdasarkan perhitungan
Potensi Peningkatan Efisiensi PLTU	4-5%	Melalui peningkatan efisiensi kondensasi sistem
Mode Operasi	Pendinginan pasif tanpa kompresor tambahan	Sumber dingin dari air laut

Selain peningkatan efisiensi termal, integrasi *heat exchanger* juga memberikan dampak signifikan terhadap kinerja kondensor utama. Sebagian panas dari fluida panas telah diserap terlebih dahulu oleh sistem *Auxiliary Cooling Water*, sehingga beban kerja kondensor utama berkurang hingga 28%. Hasil ini sesuai dengan penelitian Sadaghiyani dkk. (2017) yang menunjukkan bahwa penambahan sistem pendingin tambahan dapat meningkatkan efisiensi konversi energi dan menurunkan beban kondensasi secara signifikan [3]. Dampak positif lainnya meliputi penurunan tekanan operasi kondensor, penghematan energi pompa sirkulasi, serta peningkatan umur peralatan akibat penurunan beban termal [11, 12]. Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan *heat exchanger* tipe *shell and tube* dengan konfigurasi 1 *shell pass* dan 2 *tube pass* pada sistem *Auxiliary Cooling Water* (ACW) mampu meningkatkan efektivitas perpindahan panas, menurunkan tekanan kondensasi, dan memperbaiki efisiensi termal siklus Rankine pada PLTU PT YTL Jawa Timur. Peningkatan efisiensi sebesar 4–5% dan penurunan beban kondensor hingga 28% membuktikan bahwa rancangan ini layak diterapkan sebagai solusi peningkatan kinerja sistem kondensasi pada pembangkit listrik tenaga uap berbasis sistem pendinginan air laut [13, 14, 15].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menghasilkan rancangan *heat exchanger* tipe *shell and tube* dengan konfigurasi 1 *shell pass* dan 2 *tube pass* pada sistem *Auxiliary Cooling Water* (ACW) untuk meningkatkan efisiensi kondensasi uap di PLTU PT YTL Jawa Timur. Rancangan menggunakan 70 pipa *stainless steel* SS316 berdiameter 19 mm dan panjang 1,5 m dengan susunan *triangular pitch*, luas permukaan perpindahan panas 33,89 m², serta kemampuan perpindahan panas sebesar 66,67 kW. Penerapan rancangan mampu menurunkan temperatur fluida panas dari 39,8°C menjadi 33,2°C, meningkatkan selisih entalpi turbin dari 1.083 kJ/kg menjadi 1.145 kJ/kg, serta meningkatkan efisiensi termal siklus Rankine dari sekitar 34% menjadi 38–39% atau sebesar 4–5%. Selain itu, beban kerja kondensor utama dapat dikurangi hingga 28%, sehingga rancangan *heat exchanger* dinilai berpotensi meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan kinerja sistem kondensasi.

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, disarankan agar dilakukan pengujian kinerja secara eksperimental terhadap rancangan *heat exchanger* tipe *shell and tube* untuk memverifikasi hasil perhitungan teoritis yang telah diperoleh serta menilai kesesuaian performa alat dengan kondisi operasi nyata di lapangan. Dalam rancangan saat ini baru memanfaatkan sekitar 20% dari kapasitas optimal desain, maka penambahan jumlah pipa atau modul *heat exchanger* secara bertahap perlu dilakukan untuk mencapai kapasitas penuh sebesar 333,35 kW dan memperoleh efisiensi termal maksimum. Selain itu, kajian ekonomi dan keberlanjutan perlu dilakukan untuk menilai kelayakan investasi, efisiensi energi, serta dampak penurunan emisi yang dihasilkan dari peningkatan efisiensi sistem pendingin ini.

REFERENSI

- [1] S. Kim, B. U. Bae, Y. J. Cho, Y. S. Park, K. H. Kang, dan B. J. Yun, "An experimental study on the validation of cooling capability for the Passive Auxiliary Feedwater System (PAFS) condensation heat exchanger," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 260, hal. 54–63, 2013.
- [2] W. Peng dan O. K. Sadaghiani, "Thermodynamic analyses and optimization of an auxiliary heat exchanger equipped with an absorption refrigeration system to increase the cooling capability of Heller cooling tower," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 25, no. August, hal. 101032, 2021.
- [3] O. K. Sadaghiani, S. Khalililaria, dan I. Mirzaee, "Energic, Exergic, Exergo-economic investigation and optimization of auxiliary cooling system (ACS) equipped with compression refrigerating system (CRS)," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 10, hal. 517–531, 2017.
- [4] C. W. Shin, H. C. No, B. Y. Yun, dan B. G. Jeon, "The experimental investigation of tube's diameter and inclination angle in a separate effect PAFS test facility for APR+," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 86, hal. 914–922, 2015.
- [5] R. Laskowski, A. Smyk, J. Lewandowski, dan A. Rusowicz, "Cooperation of a Steam Condenser with a Low-pressure Part of a Steam Turbine in Off-design Conditions," *Am. J. Energy Res.*, vol. 3, no. 1, hal. 13–18, 2015.
- [6] B. U. Bae, S. Kim, Y. S. Park, K. H. Kang, T. H. Ahn, dan B. J. Yun, "Evaluation of mechanistic wall condensation models for horizontal heat exchanger in PAFS (Passive Auxiliary Feedwater System)," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 107, hal. 53–61, 2017.
- [7] B. U. Bae, S. Kim, Y. S. Park, K. H. Kang, dan B. J. Yun, "Experimental investigation into the effect of the passive condensation cooling tank water level in the thermal performance of the passive auxiliary feedwater system," *Nucl. Technol.*, vol. 181, no. 3,

- hal. 479–492, 2013.
- [8] S. Wuryanti dan R. P. H, "Calculation of Heat Exchanger as Demineralized Water Cooler in C3W," vol. 11, no. 7, hal. 49–53, 2023.
 - [9] P. Kumar, J. Saini, dan P. Sahu, "Numerical Analysis of Condenser Using ANSYS," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, hal. 471–476, 2020.
 - [10] X. Luo, X. Huang, M. M. El-Halwagi, J. M. Ponce-Ortega, dan Y. Chen, "Simultaneous synthesis of utility system and heat exchanger network incorporating steam condensate and boiler feedwater," *Energy*, vol. 113, hal. 875–893, 2016.
 - [11] B. U. Bae, B. J. Yun, S. Kim, dan K. H. Kang, "Design of condensation heat exchanger for the PAFS (Passive Auxiliary Feedwater System) of APR+ (Advanced Power Reactor Plus)," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 46, hal. 134–143, 2012.
 - [12] V. Mrzljak, T. Senčić, I. Poljak, dan V. Medica-Viola, "Thermodynamic Analysis of Steam Cooling Process in Marine Power Plant by Using Desuperheater," *J. Marit. Transp. Sci.*, vol. 62, no. 1, hal. 9–30, 2022.
 - [13] H. Ha, S. Lee, dan H. Kim, "Optimal design of passive containment cooling system for innovative PWR," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 49, no. 5, hal. 941–952, 2017.
 - [14] Y. S. Jeong, K. M. Kim, I. G. Kim, dan I. C. Bang, "Hybrid heat pipe based passive in-core cooling system for advanced nuclear power plant," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 90, hal. 609–618, 2015.
 - [15] L. Chen, W. Huang, W. Wang, L. Yang, dan X. Du, "Subregional modulation of axial flow fans to reduce condensate supercooling of air-cooled steam condenser in cold days," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 193, no. December 2020, hal. 117016, 2021.