

ANALISA PERFORMA HEAT EXCHANGER TIPE *SHELL AND TUBE* PADA PROSES PENDINGINAN PELUMAS SAG MILL DI AREA GRINDING CONCENTRATOR AREA 130 PT. AMMAN MINERAL NUSA TENGGARA

PERFORMANCE ANALYSIS OF SHELL AND TUBE TYPE HEAT EXCHANGER IN THE COOLING PROCESS OF SAG MILL LUBRICANT IN GRINDING CONCENTRATOR AREA 130 PT. AMMAN MINERAL NUSA TENGGARA

I Wayan Joniarta^{1*}, Wahyudi Santosa², Made Wijana³

^{1,3} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas, Mataram Jalan Majapahit No 62 Mataram

² Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas, Mataram Jalan Majapahit No 62 Mataram

*Corresponding author

E-mail addresses: wayanjoniartha@unram.ac.id

<https://doi.org/10.29303/empd.v2i1.2356>

Received 3 March 2023; Received in revised form 11 May 2023; Accepted 13 May 2023

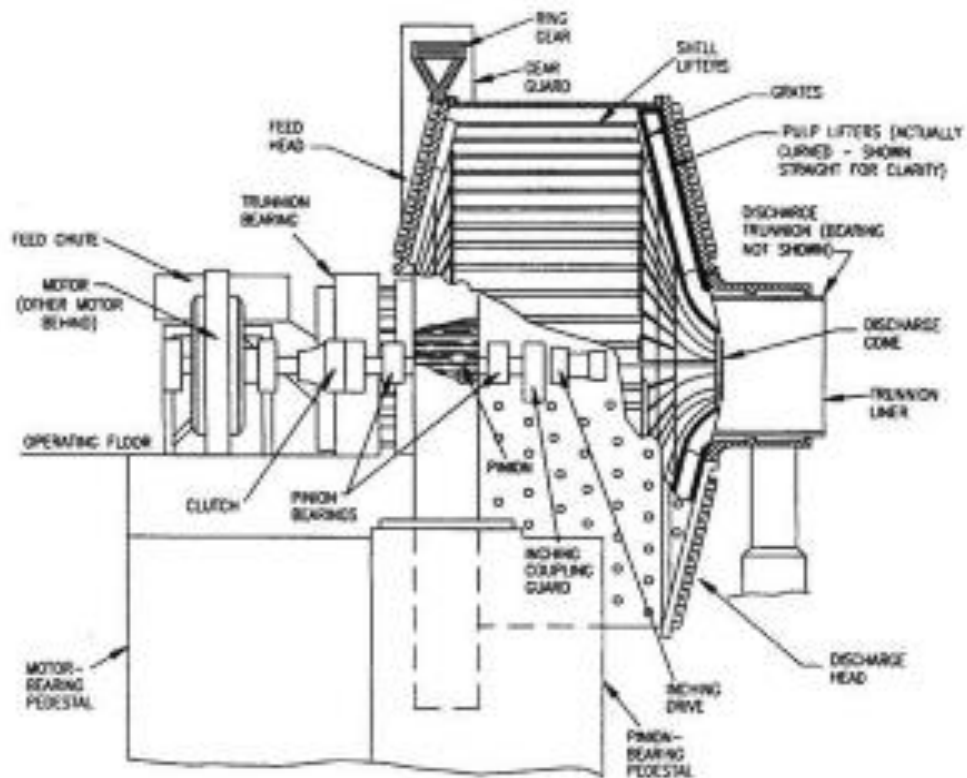
ABSTRACT

Heat exchangers have an important role in the production process, especially at PT. Amman Minerals, Nusa Tenggara. The shell and tube type heat exchanger used is a place for exchanging heat energy. In operating a heat exchanger on a Semi Autogenous (SAG) mill, this process is called oil conditioning. This process involves cooling and filtration in the oil to cool the lubricant in the SAG mill bearings. In this study, a comparison was made between design specifications and actual. The data is analyzed using the concept of heat transfer to determine heat load, heat transfer rate, heat transfer coefficient, LMTD and TDC. The calculation results show that the heat exchanger for the design LMTD is 8,66 °C and the actual is 13,58 °C. For the TDC for the design it is 16,02 °C and the actual is 16,75 °C. The heat exchanger used in the SAG mill meets the standards permissible eligibility. Routine maintenance must be carried out so that the heat exchanger can work optimally for a long time. The types of damage identified in the Heat Exchanger type C1760-8,4-6-F-CN are leaks that occur in the tube causing oil to mix with water so that it interferes with the lubrication of the SAG mill

Keywords: Heat exchanger, Heat transfer counter flow, Overall heat transfer coefficient

1. Pendahuluan

PT. Amman Mineral Nusa Tenggara adalah salah satu perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan tembaga dan emas yang berskala besar dan bertaraf internasional [1]. Pada bagian pengolahan dioperasikan *SAG Mill*, pada bantalan *SAG mill* tersebut terjadi perpindahan panas pada pelumas bantalan tersebut, oleh karena itu panas yang ditimbulkan perlu di turunkan agar tidak merusak konstruksi. Cara yang sudah dipilih adalah menggunakan penukar kalor *Shell and Tube* [1] Gambar 1 di bawah menunjukkan *SAG Mill* yang perlu dilumasi dan panas minyak pelumas perlu di buang melalui *Heat Exchanger* [1].

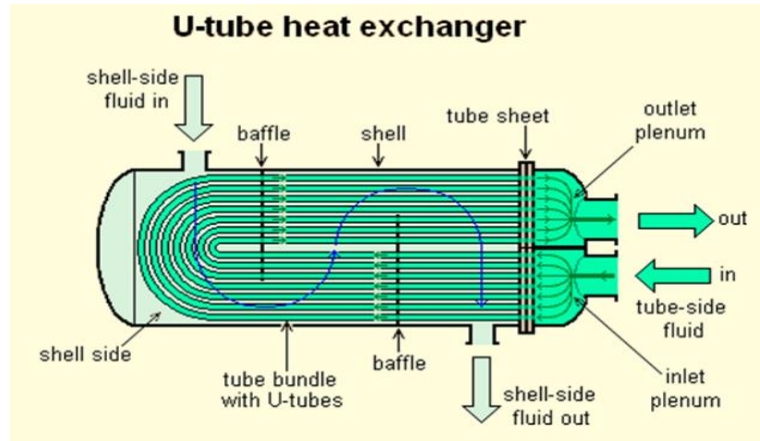


Gambar 1 SAG Mill di PT Amman Mineral Nusa Tenggara Barat

Alat penukar kalor merupakan suatu alat yang dapat digunakan untuk proses perpindahan panas antara dua fluida yang memiliki temperature berbeda tanpa terjadinya pencampuran antara fluida yang satu dengan yang lain [2]. Alat penukar kalor (*heat exchanger*) tersebut sangat berpengaruh dalam industri terhadap keberhasilan seluruh operasi rangkaian proses, operasi alat ini baik akibat kegagalan mekanikal maupun operasional dapat menyebabkan berhentinya operasi unit. Maka dipasang suatu alat penukar panas atau *heat exchanger* memiliki kinerja yang baik yang digunakan untuk menyerap panas dan sebagai pendingin pelumasan pada bantalan agar dapat diperoleh hasil yang maksimal. Pada alat penukar panas ini banyak permasalahan yang masih dapat menimbulkan terjadinya penyumbatan pada bagian tube yang mengalami kebocoran yang mengakibatkan tercampurnya oli dengan air disebabkan adanya korosi *pitting* pada *heat exchanger* yang berdampak pada tingginya biaya perawatan.

Perpindahan panas atau perpindahan kalor (*heat transfer*) adalah perpindahan energi dari satu benda/medium ke benda/medium lainnya akibat perbedaan temperatur. Perpindahan panas mengkaji laju perpindahan energi yang terjadi dalam suatu sistem. Energi termal berhubungan erat dengan temperatur, makin tinggi temperatur makin tinggi pula energi termal suatu benda [3]. Heat exchanger adalah suatu alat yang dimana terjadi aliran perpindahan panas di antara dua fluida atau lebih pada temperatur yang berbeda, dimana memiliki tujuan untuk mengontrol suatu sistem (temperatur) dengan menambahkan atau menghilangkan energi termal dari suatu fluida ke fluida lainnya. Walaupun ada banyak perbedaan ukuran, tingkat kesempurnaan, dan perbedaan jenis alat penukar kalor, semua alat penukar kalor menggunakan elemen – elemen konduksi termal yang pada umumnya berupa tabung “*tube*” atau plat untuk memisahkan dua fluida. Salah satu dari elemen tersebut, memindahkan energi kalor ke elemen yang lainnya [4]. Berdasarkan desain Standar TEMA serta penggunaan aplikasi HTRI surface area yang di butuhkan berdasarkan aplikasi yaitu 8,27 m² sedangkan perhitungan secara manual didapat 9,09 m² [5,6], menghasilkan rancangan *heat exchanger* jenis *shell and tube* memiliki nilai efektivitas 93% dengan faktor kemurnian 0,01 jam.ft².°F/Btu.

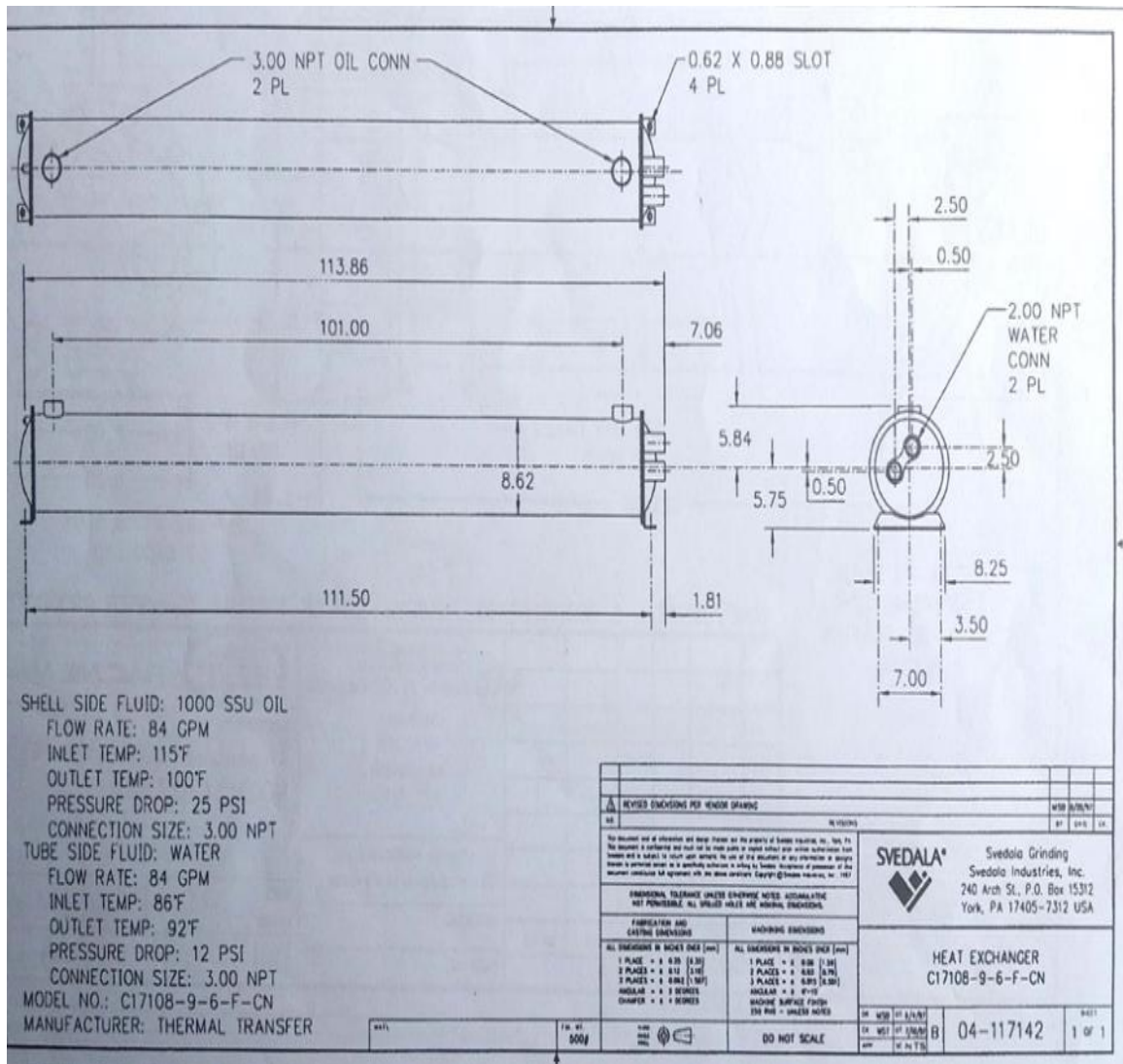
Dengan banyaknya hasil riset sebelumnya ini menunjukkan bahwa desain alat penukar kalor jenis *shell and tube* sangat sesuai di gunakan untuk industri (lihat Gambar 2).



Gambar 2 Alat penukar kalor tipe shell and tube [4]

1.1 Spesifikasi alat pada heat exchanger tipe shell and tube

Adapun spesifikasi alat yang digunakan pada heat exchanger tipe shell and tube dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3 dan dan Tabel 1.



Gambar 3 Gambar CAD Heat exchanger C1760 – 8,4 – 6 – F – CN

Tabel 1 Spesifikasi data standar *heat exchanger* tipe *shell and tube*

Standar Peringkat	Peringkat Kode ASME
Tekanan maksimum shell = 20.7 bar Tekanan maksimum tube = 10.3 bar Temperatur maksimum = 148.89 °C	Tekanan maksimum shell = 20.7 bar Tekanan maksimum tube = 10.3 bar Kode ASME SSC-1700 = 13.8 bar Temperatur maksimum = 148.89 °C
Material seri C	Ukuran
Tube: Tembaga Shell: Baja Sambungan shell: Baja Baffle: Kuningan End Bonnets: Besi Cor Mounting Brackets: Baja Gaskets: Nitrile Rubber/Cellulose Fiber Plat nama : Alumunium Foil	Nomer Alat: C-1760-8,4-6-F-CN Model ukuran: 1760 Jarak Baffle: 8,4 in Diameter Tube Pendingin: 3/8 in Model: C <i>Tube Side Passes: Four Pass</i>

1.2 Mekanisme perpindahan panas (*Heat Transfer*)

Perpindahan panas adalah perpindahan energi dalam bentuk panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu atau temperatur di antara benda atau material. Ada tiga cara bentuk mekanisme perpindahan panas yang diketahui, yaitu: konduksi, konveksi, dan radiasi.

a. Perpindahan panas secara konduksi

Perpindahan kalor secara konduksi adalah proses perpindahan kalor dimana kalor mengalir dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah dalam suatu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung sehingga terjadi pertukaran energi dan momentum [7].

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

q_k adalah laju perpindahan panas konduksi (kj / det,W), k adalah konduktifitas termal (W/m.°C), A adalah luas penampang (m²), dT adalah perbedaan temperatur (°C, °F), dx adalah perbedaan jarak (m / det), dT/dx adalah gradien suhu pada penampang (°K).

b. Perpindahan Panas Secara Konveksi

Perpindahan panas karena adanya gerakan/aliran/ pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin. Proses perpindahan panas secara konveksi merupakan satu fenomena permukaan [7].

$$q = h A \Delta T \quad (2)$$

q adalah laju perpindahan panas konveksi (kj/det atau W), h adalah koefisien perpindahan panas konveksi (W / m².°C), A adalah luas penampang (m²), ΔT adalah beda antara suhu permukaan dengan suhu fluida (°K).

Koefisien perpindahan panas konveksi pada aliran di dalam *shell*.

$$h_s = \frac{Nu k}{D_s} \quad (3)$$

Koefisien perpindahan panas konveksi pada aliran di dalam *tube*.

$$h_t = \frac{Nu k}{D_t} \quad (4)$$

h_s adalah koefisien perpindahan panas konveksi di dalam *Shell* (W/m² °K), h_t adalah koefisien perpindahan panas konveksi di dalam *tube* (W/m² K), Nu adalah bilangan *nusselt*, K adalah koefisien perpindahan panas konduksi (W/m °K), D_s adalah diameter *shell* (m).

Bilangan *Nusselt* menggambarkan karakteristik proses perpindahan panas pada suatu aliran.

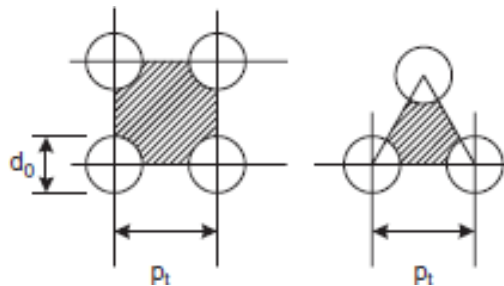
$$N_{u,d} = J_i Re_d P_r^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (5)$$

$$N_{u,d} = 0,023 Re_d^{0,8} P_r^n \quad (6)$$

Bilangan *Reynolds* adalah parameter tidak berdimensi untuk menentukan apakah aliran yang terjadi laminar atau turbulen yang tergantung dari besarnya bilangan tersebut. Untuk mengetahui sifat dari aliran tersebut laminar atau turbulen ditunjukkan dengan bilangan *Reynolds* (*Re*) yang dituliskan dalam persamaan sebagai berikut [7].

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (7)$$

Re adalah bilangan *Reynolds*, ρ adalah massa jenis (kg/m^3), v adalah kecepatan aliran (m/s), μ adalah viskositas dinamis fluida (kg/m s), D_h adalah diameter hidrolis (m). Untuk menentukan diameter hidrolis dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [9].



Gambar 4 *Equivalent diameter, cross-sectional areas and wetted perimeters*

Diameter hidrolis untuk *Square Pitch*

$$D_h = \frac{4 \left(\frac{P_t^2 - \pi D_{out}^2}{4} \right)}{\pi D_{out}} \quad (8)$$

Diameter hidrolis untuk *Triangular Pitch*

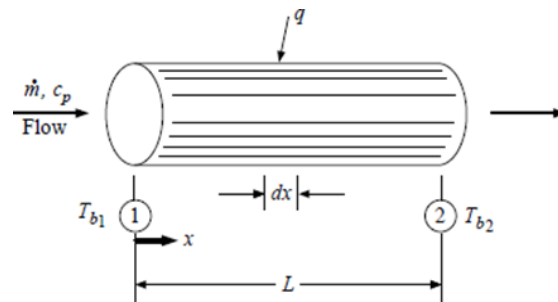
$$D_h = \frac{4 \times \left(\left(\sqrt{3} P_t^2 \right) - \left(\frac{\pi D_{out}^2}{8} \right) \right)}{\frac{1}{2} \pi D_{out}} \quad (9)$$

D_h adalah diameter Hidrolis (m), P_t adalah jarak *pitch* (m), D_{out} adalah diameter luar tube (m) (lihat Gambar 4). Untuk memperoleh kecepatan aliran, maka dapat diperoleh dengan persamaan 10.

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho_{oli} A} \quad (10)$$

v adalah kecepatan aliran (m/s), \dot{m} adalah laju aliran massa (kg/s), ρ adalah densitas (kg/m^3), A adalah luas penampang (m^2).

Koefisien perpindahan panas menyeluruh adalah penjumlahan dari seluruh koefisien perpindahan panas yang meliputi konduksi dan konveksi.



Gambar 5 Perpindahan panas pada suatu sistem aliran fluida

Perpindahan panas menyeluruh dapat dihitung dengan cara membagi beda temperatur menyeluruh dengan jumlah tahanan *thermal*. Sesuai dengan jaringan tahanan termal, besarnya A_o dan A_i adalah luas permukaan bagian luar dan bagian dalam seperti pada Gambar 5.

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{A_i}{A_o} \frac{1}{h_o}} \quad (11)$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o}} \quad (12)$$

U_o adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh di luar *tube* ($W/m^2 \text{ } ^\circ K$), U_i adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh di dalam *tube*. ($W/m^2 K$).

1.3 Menentukan Beban Termal atau Heat Load

Beban termal adalah kemampuan suatu alat atau sistem dalam melepas kalor. Beban termal menunjukkan seberapa besar kemampuan alat atau system melepas kalor dari temperature tinggi ke temperature rendah. Berikut ini adalah perhitungan beban termal pada *heat exchanger*.

Beban Termal (*Heat Load*) pada Shell

$$Q_s = \dot{m}C_p\Delta T \quad (13)$$

Beban termal (*heat load*) pada *tube*.

$$Q_t = \dot{m}C_p\Delta T \quad (14)$$

Q adalah kalor yang dilepaskan/diterima (W), \dot{m} adalah Laju aliran massa (kg/s), C_p adalah Spesifik kalor ($J/kg \text{ } ^\circ C$), ΔT merupakan Beda temperatur ($T_{out} - T_{in}$) ($^\circ C$).

1.4 Log Mean Temperatur Differential (LMTD)

Log Mean Temperatur Difference (LMTD) adalah rata rata *logaritmik* dari perbedaan suhu antara panas dan dingin pada fluida di setiap system *exchanger*, dengan kata lain LMTD merupakan banyaknya kalor yang ditransfer didalam system. Berikut ini adalah untuk menentukan LMTD pada *Heat exchanger*.

$$LMTD = \Delta T_m = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2} \right)} \quad (15)$$

LMTD adalah Selisih temperatur rata – rata logaritma ($^\circ C$), T_1 adalah Temperatur fluida masuk ke dalam shell ($^\circ C$), $T_2 =$ Temperatur fluida keluar shell ($^\circ C$), t_1 adalah Temperatur fluida masuk ke dalam tube ($^\circ C$), t_2 adalah Temperatur fluida ke luar tube ($^\circ C$).

1.5 Luas Area Perpindahan Panas

Luas area perpindahan panas adalah suatu luasan atau daerah bertukarnya kalor dari temperature tinggi ke temperature rendah yang terjadi di system. Luas area ini berhubungan dengan LMTD diatas, dikarenakan semakin besar LMTD maka semakin luas area perpindahan panasnya. Berikut adalah perhitungan untuk luas area perpindahan panas.

$$A = \frac{Q_s}{U_s \Delta T_m} \quad (16)$$

A adalah Luas area heat transfer (m^2), Q adalah Kalor yang dilepas/diterima (W), U adalah Koefisien perpindahan panas menyeluruh ($kJ/s \text{ } ^\circ C$), ΔT_m = Perbedaan temperature (LMTD) ($^\circ C$).

1.6 Temperature Design Constan (TDC)

Temperatur *design constant* adalah suatu metode untuk mengamati tekanan uap dan menemukan suhu uap dari uap dan suhu saluran masuk dan keluaran sekunder yang sesuai pada beban apapun. Setelah ukuran *exchanger* tetap dan suhu desain diketahui, maka akan lebih mudah untuk memprediksi operasi suhu menggunakan apa yang bisa disebut *heat exchanger temperature design constant (TDC)*. Metode *TDC* tidak memerlukan perhitungan logaritmik [8, 9].

TDC pada shell (TDC_S)

$$TDC_S = \frac{T_s - T_1}{T_s - T_2} \quad (17)$$

TDC pada tube (TDC_T)

$$TDC_T = \frac{T_s - T_1}{T_s - T_2} \quad (18)$$

TDC adalah *Temperatur Design Constant* ($^\circ C$), TF adalah temperatur fluida ($^\circ C$), T1 adalah temperatur masuk ($^\circ C$), T2 adalah temperatur keluar ($^\circ C$).

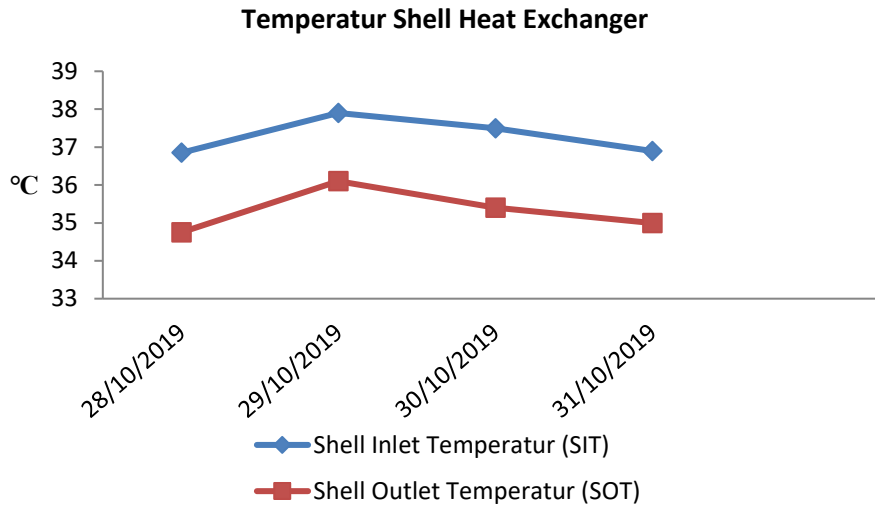
2. Bahan dan Metode

Metode pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan dengan beberapa metode, 1) Metode Studi Literatur (Kepustakaan), yaitu metode studi literatur ini dilakukan dengan cara mencari referensi dari buku-buku, baik handbook, maupun data report perusahaan yang ada hubungannya dengan pokok masalah untuk menambah pengetahuan yang berkaitan dengan penelitian ini, 2) Metode Studi Lapangan, yaitu merupakan suatu cara memperoleh data dan informasi dengan mengamati langsung objek yang diteliti sehingga diperoleh data aktual dimana merupakan perbandingan dari data yang diperoleh dari literatur dan 3) Metode Wawancara, yaitu merupakan suatu cara untuk memperoleh data dan informasi dengan melakukan wawancara secara langsung kepada pembimbing industri atau teknisi yang terkait untuk mengetahui masalah-masalah teknis di lapangan [10].

Adapun prosedur analisis pada penelitian ini melalui 3 tahap yaitu tahap pertama dengan mempelajari spesifikasi dari alat penukar kalor yang digunakan saat ini. Tahap kedua pengambilan data temperatur dan laju aliran pada sisi *inlet* dan *outlet* alat penukar kalor dan tahap ketiga yaitu pengolahan dan analisa data dari setiap data yang sudah di dapat. Hasil dari pengamatan dan pengambilan data dianalisa menggunakan perhitungan matematis [8].

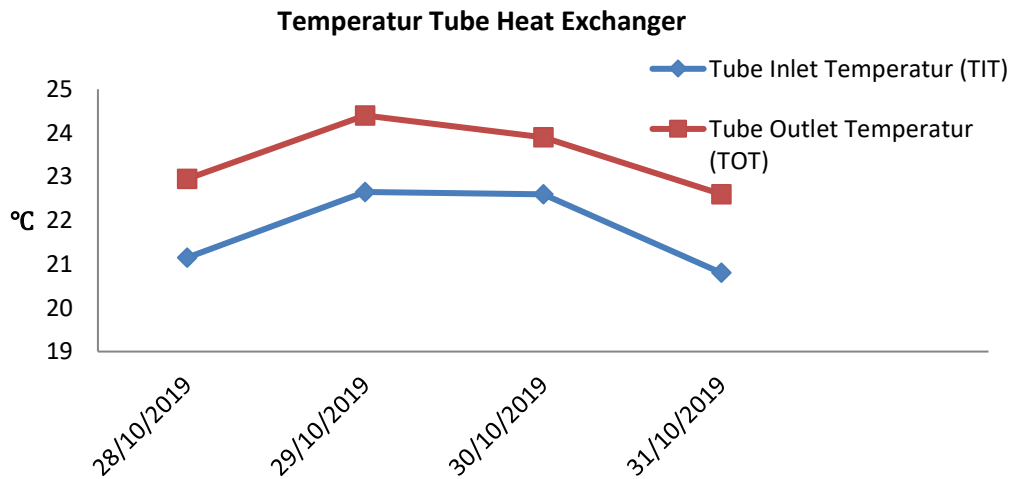
3. Hasil dan Pembahasan

Pada pengamatan ini dilakukan 4 kali pagi dan sore pengambilan data temperature terhadap *heat exchanger*. Dan dari hasil pengamatan didapatkan grafik yang menggambarkan *heat exchanger* dari sisi temperature pada *shell and tube*.



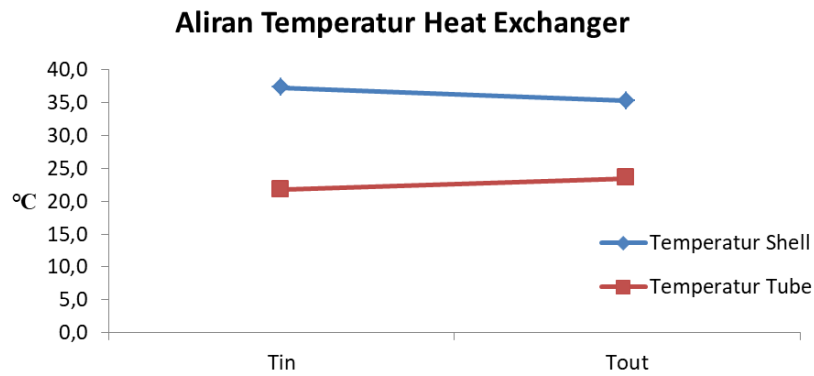
Gambar 6 Temperatur inlet dan outlet shell pada heat exchanger

Pada Gambar 6 memperlihatkan titik maksimum temperature shell inlet *heat exchanger* terjadi pada tanggal 29 Oktober 2019 sebesar 37,9°C, sedangkan pada outlet terjadi juga pada tanggal 29 Oktober 2019 sebesar 36,1°C. Dengan perbedaan temperature ini menandakan adanya perpindahan kalor pada sistem. Namun pada tanggal 28 Oktober 2019 terjadi beda temperature yang sangat rendah, hal ini menunjukkan pada tanggal 28 Oktober 2019 shell pada *heat exchanger* melepas kalor hanya saja kecil.



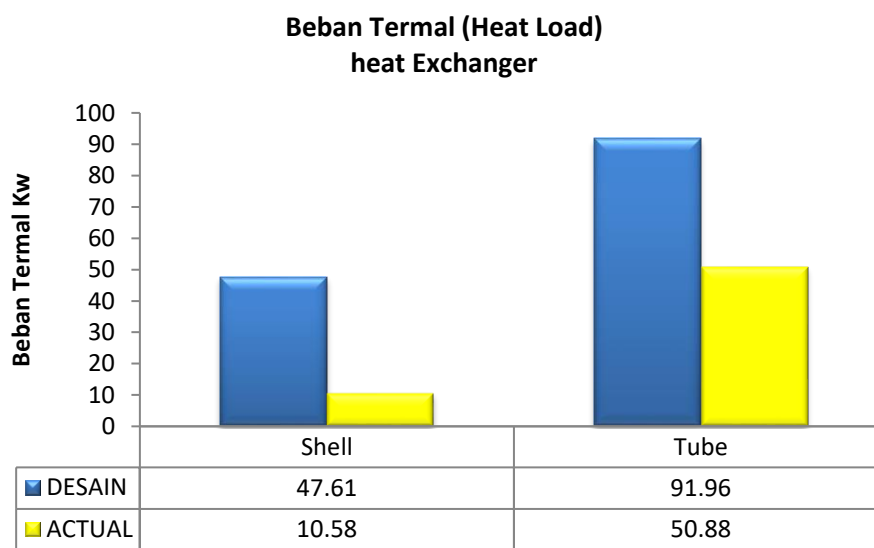
Gambar 7 Temperatur inlet dan outlet tube pada heat exchanger

Pada Gambar 7 menunjukkan bahwa temperature tube maksimum inlet terjadi pada tanggal 29 Oktober 2019 sebesar 22,65°C. Dan pada outlet titik maksimumnya terjadi pada tanggal 29 Oktober 2019 sebesar 24,4°C. Beda temperature pada tube di *heat exchanger* relatif cukup besar. Hal ini menunjukkan bahwa pada tube terjadi perpindahan kalor yang cukup besar., hasil ini sejalan juga dengan [12].



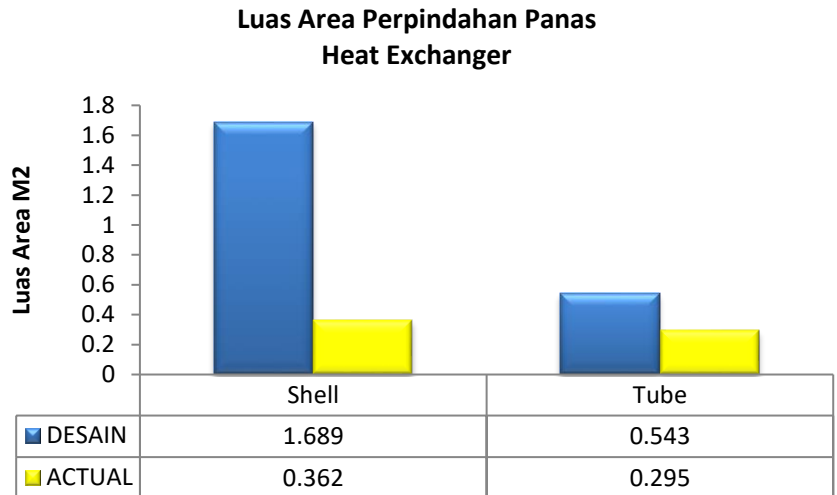
Gambar 8 Beda temperatur secara keseluruhan *heat exchanger*

Dari hasil pengamatan *heat exchanger* pada shell dan tube didapatkan profil temperature dari system *heat exchanger* seperti pada Gambar 8. Pada temperatur *inlet shell* didapatkan 37,3°C dan pada *outlet shell* didapatkan 35,3°C dari hasil rata-rata *temperature inlet* dan *outlet* pada *heat exchanger*. Dan pada *temperature inlet tube* didapatkan 21,8°C dan pada *outlet* didapatkan 23,46°C dari hasil rata-rata antara *heat exchanger* pada tube. Beda temperature pada *shell* dan *tube* di *heat exchanger* antara *inlet* dan *outlet* sebesar 15,35°C pada *shell* dan 12,02°C pada *tube* [11]. Kemudian dari hasil analisa *heat exchanger* terdapat beberapa perbandingan antara desain alat dan aktual, meliputi Beban Termal (*Heat Load*), *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), Luas Area Perpindahan Panas, Laju Aliran (*Flow Rate*), dan *Temperature Design Constant* (TDC). Berikut ini adalah pembahasan dari hasil analisa *heat exchanger*.

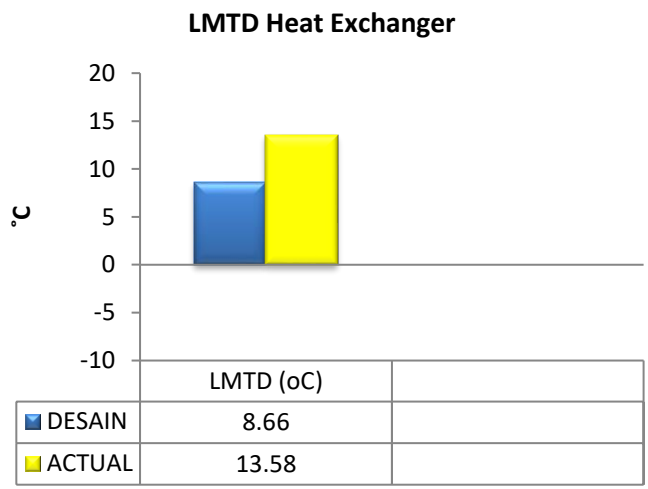


Gambar 9 Perbandingan beban termal (*heat load*) pada *heat exchanger*

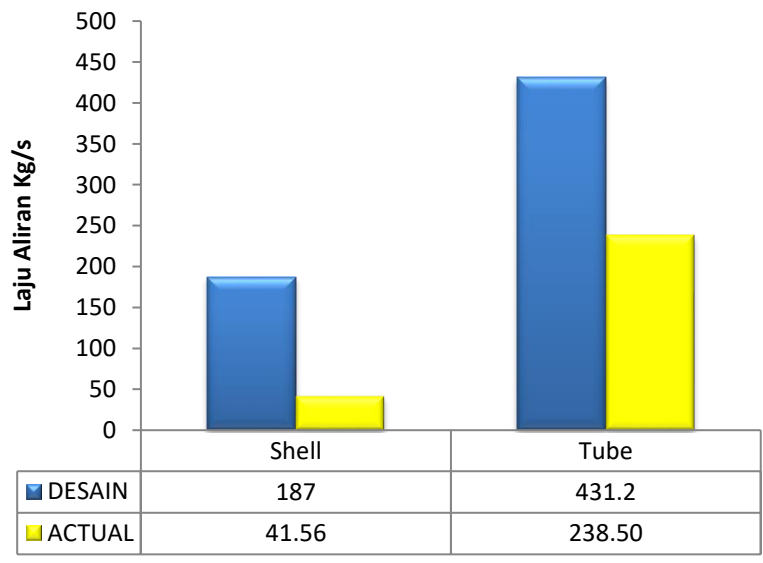
Untuk *heat load* di *heat exchanger* pada desain alat memiliki beban termal sebesar 47,61 kW pada *shell* dan pada *tube* sebesar 91,96 kW. Sedangkan pada aktual beban termalnya sebesar 10,58 kW pada *shell* dan 50,88 kW pada *tube* seperti pada Gambar 9. Dari hasil analisa luas area panas pada *heat exchanger*, dapat dilihat bahwa keadaan actual masih dibawah maksimum desain alat. Pada *shell* luas area panasnya sebesar 0,362 m² dan pada *tube* sebesar 0,295 m² karena maksimum pada desain sebesar 1,689 m² pada *shell* dan 0,543 m² pada *tube* [12] seperti pada Gambar 10. Berdasarkan diagram-diagram di atas menunjukkan bahwa besarnya luas perpindahan panas dipengaruhi oleh beban termal, LMTD dan koefisien perpindahan panas suatu aliran, hal ini mengakibatkan semakin besar luas pada *exchanger* [14].



Gambar 10 Perbandingan luas perpindahan panas pada *heat exchanger*

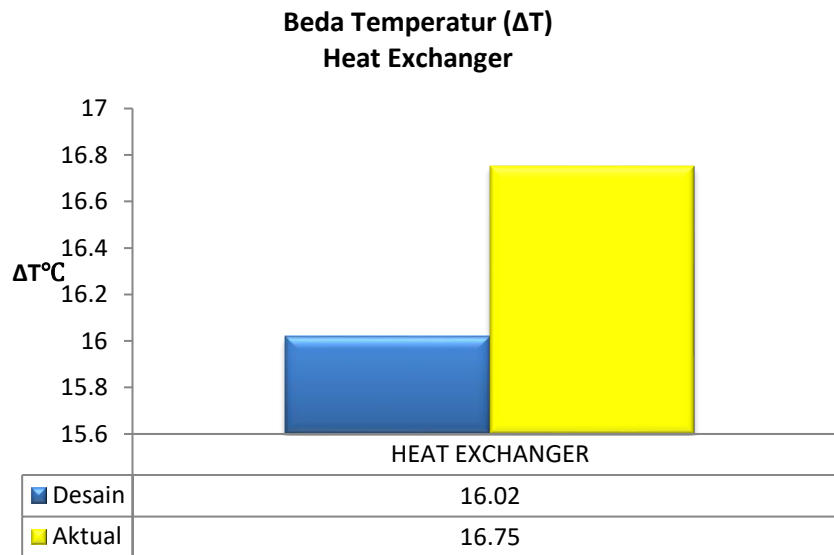


Gambar 11 Perbandingan LMTD pada *heat exchanger*



Gambar 12 Perbandingan laju aliran (*flow rate*) pada *heat exchanger*

Pada Gambar 12 memperlihatkan besarnya laju aliran pada *heat exchanger* laju aliran pada *tube* sebesar 238,50 kg/s, hal ini lebih besar dari pada *shell* sebesar 41,56 kg/s. Hal ini dikarenakan fluida yang mengalir pada *tube* (air) memiliki viskositas lebih kecil dari fluida pada *shell* (oli) seperti pada Gambar 11. Hal itu juga disebabkan oleh hubungan antara beban termal terhadap karakteristik laju aliran kedua fluida yang mengalir ke dalam alat penukar kalor. Karena semakin besar laju aliran maka semakin besar juga beban termal pada *heat exchanger* tersebut [12].



Gambar 13 Perbandingan beda temperatur (ΔT) pada *heat exchanger*

4. Kesimpulan

Heat Exchanger yang digunakan pada *SAG Mill* sudah memenuhi standar kelayakan yang diizinkan. Namun, tetap harus dilakukan perawatan secara rutin agar *heat exchanger* dapat bekerja secara optimum dan jangka waktu yang lama. Dan proses perawatan *heat exchanger* yang dilakukan oleh PT Amman Mineral Nusa Tenggara, meliputi persiapan inspeksi, inspeksi visual, pengambilan data temperatur *heat exchanger*, analisis data, mendokumentasikan pengamatan dan menentukan jenis kerusakan *heat exchanger*. Sedangkan Jenis-jenis titik kerusakan yang teridentifikasi pada *Heat Exchanger* tipe C1760-8,4-6-F-CN pada *SAG Mill* adalah kebocoran yang terjadi pada *tube* mengakibatkan tercampurnya oli dengan air sehingga pelumasan pada *SAG Mill* menjadi terganggu. Korosi yang terjadi pada *tube sheet* mengakibatkan pengotoran pada *tube* dan akan menghambat terjadinya proses perpindahan kalor *shell* dengan *tube*.

Daftar Pustaka

- [1] Anonim, Profil PT Amman Mineral Nusa Tenggara April 2018. (<https://www.amman.co.id/amman-mineral-industri/>)
- [2] Y.A. Çengel, Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 2002.
- [3] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T. Bergman, A. Lavine, Fundamental of Heat and Mass Transfer, sixth ed., John Wiley & Sons, New York, 2006.
- [4] J. Primo, Shell and Tube Basic Calculation. PDH Online Course M371, 5272 Meadow Estates Drive – USA, 2012.
- [5] B. Septian, A. Aziz, P.D. Rey, Desain dan rancang bangun alat penukar kalor (*heat exchanger*) jenis *shell* dan *tube*, Jurnal Baut dan Manufaktur, 3 (1) (2021).

- [6] M.P. Aprilia, A.B.D. Nandiyanto, T. Kurniawan, M. Fiandini, R. Ragadhita, Rancangan heat exchanger jenis shell and tube untuk produksi nanopartikel Fe₃O₄ skala industri, *Fraction: Jurnal Teori Dan Terapan Matematika*, 2 (2) (2022).
- [7] D.Y. Arifianto, “Rancang bangun dan pengujian model kondensor tipe concentric tube counter current ganda dengan penambahan sirip”, Surakarta: Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhamaddiyah, 2009.
- [8] Chaurette, Jaxques. *Fluide Design*. www.fluidedesign.com, 2003.
- [9] M.Z. Hidayatulloh, “Analisa Perpindahan Panas Alat Penukar Kalor Tipe Shell and Tube Pada Ball Mill di PT. Amman Mineral Nusa Tenggara”, Mataram: Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Mataram, 2016.
- [10] B.S. Dhillon, *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. Taylor & Francis Group, USA, 2006.
- [11] R.K. Mobley, *Maintenance Engineering Handbook*, The McGraw-Hill Companies, Inc., USA, 2008.
- [12] Nopryandi, Analisa kegagalan tube heat exchanger jenis HE-xxx di PT. S, *Jurnal Saint dan Teknologi*, 11 (3) (2021).
- [13] R. Novitaningrum, *Analisis overall equipment effectiveness & reliability pada sirkuit semiautogenous grinding mill (sag mill)*. Jakarta: Universitas Indonesia, 2016.
- [14] J. Sudarjat, *Analisis kinerja heat exchanger shell and tube pada sistem cog booster di integrated steel mill Krakatau*, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana, 2017.