

PENGARUH DEBRIS FILTER DAN BALL CLEANING TERHADAP  
TINGKAT KEVAKUMAN DAN KEBERSIHAN KONDENSOR  
PLTU BARRU UNIT 1 SULAWESI SELATAN



PROGRAM STUDI D-4 TEKNIK PEMBANGKIT ENERGI  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG  
MAKASSAR  
2020

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul "Pengaruh Debris Filter dan Ball Cleaning Terhadap Tingkat Kevakuman dan Kebersihan Kondensor PLTU Barru Unit I Sulawesi Selatan" oleh Farobi Miswan Musthofa NIM 442 18 072 telah diterima dan disahkan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi Teknik Pembangkit Energi Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Makassar, 16 September 2020

Mengesahkan,

Pembimbing I,



Ir. Herman Nauwir, M.T.  
NIP. 19580606 198903 1 101

Pembimbing II,



Abdul Rahman, S.T., M.T.  
NIP. 19730803 200604 1 001

Mengetahui



Ir. Chandra Buana, M.T.  
NIP. 19650319 199103 1 003

## **HALAMAN PENERIMAAN**

Pada hari ini rabu tanggal 16 September 2020, tim penguji ujian sidang skripsi telah menerima skripsi mahasiswa Farobi Miswan Musthofa NIM 442 18 072 dengan judul “Pengaruh Debris Filter dan Ball Cleaning Terhadap Tingkat Kevakuman dan Kebersihan Kondensor PLTU Barru Unit 1 Sulawesi Selatan”

Makassar, 16 September 2020

### **Tim Penguji Ujian Sidang Skripsi:**

- |                                |              |   |
|--------------------------------|--------------|---|
| 1. Musrady Mulyadi, S.T., M.T. | Ketua        | (  |
| 2. Sri Suwasti, S.ST., M.T.    | Sekretaris   | (  |
| 3. Ir. Suryanto, M.Sc., Ph.D.  | Anggota I    | (  |
| 4. Apollo, S.T., M. Eng.       | Anggota II   | (  |
| 5. Ir. Herman Nauwir, M.T.     | Pembimbing I | (  |
| 6. Abdul Rahman, S.T., M.T.    | Pemimping II | (  |

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya, penulisan skripsi ini yang berjudul “Pengaruh Debris Filter dan Ball Cleaning Terhadap Tingkat Kevakuman dan Kebersihan Kondensor PLTU Barru Unit 1 Sulawesi Selatan” dapat diselesaikan dengan baik.

Dalam penulisan skripsi ini tidak sedikit hambatan yang penulis alami. Namun, berkat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, hambatan tersebut dapat teratasi. Sehubungan dengan itu, pada kesempatan dan melalui lembaran ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua saya yang senantiasa memberikan do'a, semangat serta dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Prof. Ir. Muhammad Anshar, M.Si., Ph.D. Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang.
3. Rusdi Nur, S.ST., M.T., Ph.D. Ketua Jurusan Teknik Mesin.
4. Ir. Chandra Buana, M.T. Koordinator Program Studi Teknik Pembangkit Energi.
5. Ir. Herman N, M.T. sebagai pembimbing I dan Abdul Rahman, S.T., M.T. sebagai pembimbing II yang telah mencurahkan perhatian dan kesempatannya untuk mengarahkan saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Seluruh pegawai PT Indonesia Power PLTU Barru OMU (*Operating and Maintenance Services Unit*) yang telah memberikan izin penelitian dan membantu kelancaran penelitian ini.

7. Dosen dan tenaga kependidikan Politeknik Negeri Ujung Pandang.
8. Seluruh teman-teman seangkatan, terutama kelas Alih Jenjang Teknik Pembangkit Energi Angkatan 2018.

Saya menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna. Oleh karena itu, saya mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini dan demi perbaikan pada masa mendatang. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi kita semua.



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i	
HALAMAN PERSETUJUAN .....	ii	
HALAMAN PENERIMAAN .....	iii	
KATA PENGANTAR.....	iv	
DAFTAR ISI .....	vi	
DAFTAR TABEL .....	viii	
DAFTAR GAMBAR.....	ix	
DAFTAR SIMBOL .....	x	
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi	
SURAT PERNYATAAN.....	xii	
RINGKASAN.....	xiii	
BAB I PENDAHULUAN .....	1	
1.1 .....	Latar Belakang.....	1
1.2 .....	Rumusa n Masalah.....	3
1.3 .....	Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.4 .....	Tujuan Penelitian.....	3
1.5 .....	Manfaat Penelitian .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5	

2.1	Konden	
sor .....	5	
2.2	Jenis-	
Jenis Kondensor.....	7	
2.3	Tekanan	
Vakum Kondensor.....	11	
2.4	<i>Debris</i>	
<i>Filter</i> .....	12	
2.5	<i>Ball</i>	
<i>Cleaning Condenser</i> .....	16	
2.6	Hukum	
Kekekalan Massa.....	19	
2.7	Persama	
an Dasar Perpindahan Panas .....	20	
2.8	Koefisie	
n Konveksi pada Pipa Air Pendingin, $h_i$ .....	21	
2.9	Koefisie	
n Konveksi pada <i>Shell</i> .....	22	
2.10	<i>Overall Heat Transfer (U)</i> .....	24
2.11	<i>Condenser Cleanliness</i> .....	25
2.12	<i>Logarithmic Mean Temerature Difference (LMTD)</i> .....	26
BAB III METODE PENELITIAN .....	27	
3.1	Tempat	
dan Waktu Penelitian .....	27	
3.2	Alat dan	
Bahan .....	27	
3.3	Pengum	
pulan Data .....	27	
3.4	Metode	
Analisis .....	28	

3.5 .....	Diagram
Alir .....	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	30
4.1 .....	Pengum
pulan Data .....	30
4.2 .....	Pengola
han Data .....	30
4.3 .....	Hasil
Pengolahan Data .....	38
4.4 .....	Perband
ingan Kondisi Sebelum dan Setelah Adanya	
<i>Debris Filter dan ball cleaning</i> .....	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	45
5.1 .....	Kesimp
ulan .....	45
5.2 .....	Saran
.....	46
DAFTAR PUSTAKA .....	47
LAMPIRAN .....	48

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Kondensor PLTU Barru.....	10
Tabel 4.1 Data aktual kondensor beban 50 MW .....	30
Tabel 4.2 Parameter pada masing-masing zona .....	31
Tabel 4.3 <i>Physical properties</i> pada air pendingin .....	33
Tabel 4.4 <i>Physical properties</i> pada uap.....	35
Tabel 4.5 Hasil pengolahan data sebelum adanya <i>debris filter</i> dan <i>ball cleaning</i> .....	38
Tabel 4.6 Hasil pengolahan data setelah adanya <i>debris filter</i> dan <i>ball cleaning</i> .....	39



## DAFTAR GAMBAR

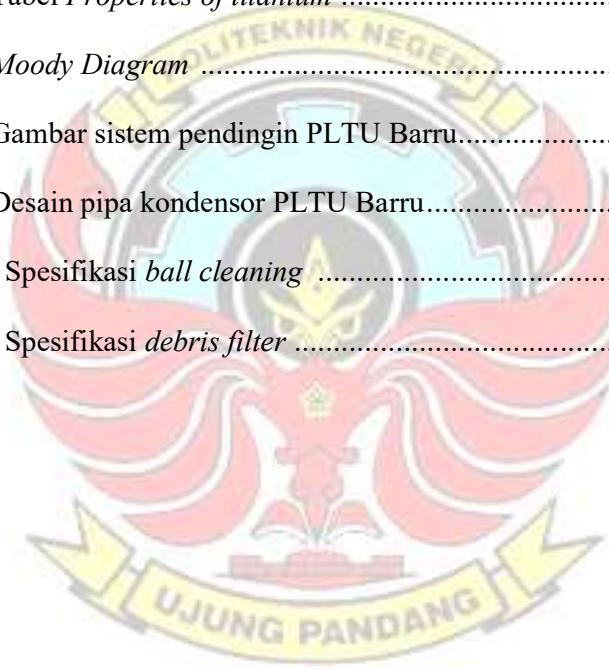
Gambar 2.1 Skema Sistem air pendingin kondensor.....	5
Gambar 2.2 Zona Perpidahan Panas Kondensor .....	6
Gambar 2.3 Kondensor Kontak Langsung.....	8
Gambar 2.4 Kondensor Permukaan Lintasan Tunggal.....	9
Gambar 2.5 Kondensor Permukaan lintasan ganda.....	10
Gambar 2.6 Kondensor PLTU Barru.....	10
Gambar 2.7 <i>Tube Fouling</i> .....	12
Gambar 2.8 <i>Debris Filter Condenser</i> .....	13
Gambar 2.9 <i>Debris Filter</i> .....	14
Gambar 2.10 <i>Debris Filter Automatic Mode</i> .....	15
Gambar 2.11 <i>Debris Filter Manual Mode</i> .....	15
Gambar 2.12 <i>Ball Cleaning Condenser</i> .....	16
Gambar 2.13 Bola-bola yang akan sirkulasi dalam kondensor .....	17
Gambar 2.14 <i>Ball Cleaning Automatic Mode</i> .....	18
Gambar 2.15 <i>Ball Cleaning Manual Mode</i> .....	19
Gambar 2.16 <i>Control Volume</i> Kekekalan Massa .....	19
Gambar 2.17 <i>Heat Exchanger</i> Aliran Counter Flow.....	21
Gambar 2.18 Distribusi Temperatur <i>Heat Exchanger</i> Aliran Counter Flow.....	21
Gambar 3.1 Diagram Alir .....	29
Gambar 4.1 Grafik laju perpindahan panas sebelum dan sesudah adanya <i>debris filter</i> dan <i>ball cleaning</i> .....	42
Gambar 4.2 Grafik tingkat kebersihan dan kevakuman kondensor.....	43
Gambar 4.3 Grafik LMTD terhadap tingkat kebersihan kondensor sebelum dan setelah adanya <i>debris filter</i> dan <i>ball cleaning</i> ..	44

## DAFTAR SIMBOL

No.		Keterangan	Satuan
1	$Q$	= <i>Heat</i>	kg/s
2	$\dot{m}$	= laju massa	kJ/kg °C
3	$C_p$	= <i>specific heat</i>	kJ/kg °C
4	$T_{hi}$	= temperatur masuk fluida panas	°C
5	$T_{ho}$	= temperatur keluar fluida panas	°C
6	$T_{ci}$	= temperatur masuk fluida dingin	°C
7	$T_{co}$	= temperatur keluar fluida dingin	°C
8	$R_e$	= <i>Reynold Number</i>	-
9	$\dot{m}_{cw}$	= laju massa air pendingin	kg/s
10	Di	= diameter dalam pipa	m
11	$\mu_f$	= viskositas absolut	kg/m.s
12	Nu	= <i>Nusselt Number</i>	-
13	$h_i$	= koefisien konveksi dalam pipa	W/m <sup>2</sup> °C
14	$h_o$	= koefisien konveksi luar pipa	W/m <sup>2</sup> °C
15	k	= konduktivitas termal	W/m °C
16	Ja	= <i>Jacob Number</i>	-
17	$T_{sat}$	= temperatur saturasi	°C
18	$T_m$	= temperatur mean	°C
19	$h_{fg}$	= <i>enthalpy of vaporization</i>	kJ/kg
20	$\rho_f$	= <i>density of fluid</i>	kg/m <sup>3</sup>
21	$\rho_v$	= <i>density of vapour</i>	kg/m <sup>3</sup>
22	$r_t$	= jari-jari dalam <i>tube</i>	m
23	$r_o$	= jari-jari luar <i>tube</i>	m
24	$R''_f$	= <i>fouling factor</i>	°C/W
25	$U_f$	= <i>Heat Transfer Coefficient (fouling)</i>	W/m. °C
26	$U_c$	= <i>Heat Transfer Coefficient (clean)</i>	W/m. °C
27	CF	= <i>Condenser Cleanliness Factor</i>	%

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data sebelum adanya <i>debris filter</i> dan <i>ball cleaning</i> .....	49
Lampiran 2. Data setelah adanya <i>debris</i> dan <i>ball cleaning</i> .....	52
Lampiran 3. <i>Steam Table</i> .....	55
Lampiran 4. Tabel <i>Properties of water</i> .....	56
Lampiran 5. Tabel <i>Representative fouling factor</i> .....	57
Lampiran 6. Tabel <i>Properties of titanium</i> .....	57
Lampiran 7. <i>Moody Diagram</i> .....	58
Lampiran 8. Gambar sistem pendingin PLTU Barru.....	59
Lampiran 9. Desain pipa kondensor PLTU Barru.....	60
Lampiran 10. Spesifikasi <i>ball cleaning</i> .....	61
Lampiran 11. Spesifikasi <i>debris filter</i> .....	62



## **SURAT PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Farobi Miswan Musthofa

NIM : 44218072

menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa segala pernyataan dalam skripsi ini yang berjudul “Pengaruh Debris Filter dan Ball Cleaning Terhadap Tingkat Kevakuman dan Kebersihan Kondensor PLTU Barru Unit 1 Sulawesi Selatan” merupakan gagasan dan hasil karya sendiri dengan arahan komisi pembimbing dan belum pernah diajukan dalam bentuk apapun pada perguruan tinggi dan instansi mana pun.

Semua data dan informasi yang digunakan telah dinyatakan secara jelas dan dapat diperiksa kebenarannya. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya penulis lain telah disebutkan dalam naskah dan dicantumkan dalam skripsi ini.

Jika pernyataan saya tersebut di atas tidak benar, saya siap menanggung resiko yang ditetapkan oleh Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Makassar, 15 September 2020  


## **PENGARUH DEBRIS FILTER DAN BALL CLEANING TERHADAP TINGKAT KEVAKUMAN DAN KEBERSIHAN KONDENSOR PLTU BARRU UNIT 1**

### **RINGKASAN**

PLTU Barru dengan kapasitas 2 x 50 MW sebagai pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara memegang peranan penting dalam proses ketenaga listrikan di wilayah Sulawesi Selatan. Oleh karena itu, PLTU Barru perlu menjaga keandalan unit supaya pasokan listrik terus berjalan.

Pada tanggal 20 Januari 2019 terjadi penurunan nilai vakum kondensor yang menyebabkan unit *derating* bahkan sampai *stop*. Kejadian tersebut terjadi karena banyak kotoran yang masuk ke dalam kondensor sehingga harus melakukan pembersihan kotoran di dalam kondensor secara manual selama 1 hari. Maka dari itu, PLTU Barru memasang *debris filter* dan *ball cleaning* pada sistem pendingin kondensor.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kebersihan dan kevakuman kondensor sebelum dan setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning*. Data penelitian ini diambil pada bulan Januari, Februari, Maret, Juli, Agustus, dan September 2019 di *control room* PLTU Barru unit 1. Selanjutnya data diolah menggunakan rumus dari beberapa referensi. Setelah itu dilakukan analisis data untuk menganalisis pengaruh *debris filter* dan *ball cleaning condenser* terhadap tingkat kebersihan dan kevakuman kondensor dengan berbagai beban.

Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa tingkat kebersihan kondensor berbanding lurus dengan tingkat kevakuman kondensor. Saat tingkat kebersihan kondensor rendah, menyebabkan vakum kondensor rendah (mendekati nol) dan saat tingkat kebersihan kondensor tinggi, menyebabkan vakum kondensor tinggi (menjauhi nol). Selain itu, setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning*, tingkat kebersihan kondensor meningkat 1-5% dan kevakuman kondensor meningkat 4-5%

pada beban 30-45MW.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

PLTU Barru dengan kapasitas 2 x 50 MW sebagai pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara memegang peranan penting dalam proses ketenaga listrikan di wilayah Sulawesi Selatan. PLTU ini terdiri dari beberapa peralatan utama diantaranya Boiler, Turbin, Kondensor dan Generator.

Kondensor merupakan peralatan utama pada sistem turbin uap yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi air. Proses perubahannya dilakukan dengan cara mengalirkan uap ke dalam suatu ruangan yang berisi pipa - pipa (*tubes*). Uap mengalir di luar pipa-pipa, sedangkan air sebagai pendingin mengalir di dalam pipa-pipa. Kondensor seperti ini disebut *surface condenser*. Pendingin pada kondensor biasanya menggunakan air sungai atau air laut. Sedangkan untuk uap yang tidak terkondensasi (*uncondensable gas*) akan dihisap oleh *vacuum pump*. Dengan demikian, terjadi ke vakuman pada kondensor.

Kinerja kondensor dapat dilihat dari beberapa parameter, seperti temperatur air pendingin pada sisi *inlet* dan *oulet* kondensor, temperatur *inlet steam* kondensor, temperatur air kondensasi dan tekanan vakum kondensor.

Maulana, dkk (2014) menyatakan bahwa penyebab turunnya tekanan vakum di dalam kondensor yang mengakibatkan turunnya nilai *effectiveness* atau efisiensi kinerja kondensor sendiri dipengaruhi oleh kebersihan pipa air pendingin, laju aliran uap, temperatur air pendingin, adanya gag-gas yang

tidak terkondensasi maupun kebersihan dan kebocoran pada pipa-pipa air pendingin.

Prayudi, dkk (2016) juga menyatakan bahwa peningkatan efisiensi kondensor dipengaruhi oleh nilai heat rate, penurunan panas yang dibuang oleh kondensor, penurunan rata-rata temperature logaritmik, peningkatan *cleanliness factor*.

Permasalahan yang ada pada PLTU Barru adalah sering terjadinya perubahan nilai vakum kondensor yang mengakibatkan unit pembangkit mengalami *derating* seperti tanggal 20 Januari 2019 bahkan sampai *stop* unit untuk melakukan pembersihan sampah / kotoran di dalam kondensor secara manual selama 1 hari. Maka dari itu, untuk menjawab permasalahan tersebut, PLTU Barru memasang alat *debris filter* pada sisi *inlet* air pendingin kondensor dan *ball cleaning* pada jalur *inlet* dan *outlet* air pendingin kondensor sebagai bentuk meningkatkan kinerja kondensor PLTU Barru unit 1.

*Debris filter* berfungsi untuk membersihkan air laut sebelum masuk kondensor sehingga tidak ada sampah / kotoran yang masuk kondensor. Sedangkan *ball cleaning* berfungsi untuk membersihkan pipa-pipa air pendingin yang berada di dalam kondensor sehingga proses kondensasi pada kondensor bisa maksimal.

Analisa pada skripsi ini yaitu melakukan studi analisis pada parameter-parameter kondensor, khususnya pada komponen-komponen sistem yang melakukan peristiwa perpindahan panas saat operasional terjadi. Hal ini

dilakukan dengan tujuan agar dapat diketahui secara pasti seberapa besar tingkat kebersihan pipa dan kevakuman yang terjadi pada sebuah sistem kondensor sebelum dan setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning*.

## 1.2 Rumusan Masalah

- a. Bagaimana laju perpindahan panas di kondensor dengan beban yang berbeda?
- b. Bagaimana pengaruh adanya *debris filter* dan *ball cleaning* terhadap tingkat kebersihan dan vakum kondensor?

## 1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dalam penelitian ini adalah:

1. Objek penelitian diambil pada kondensor PLTU Barru unit 1
2. Menganalisa data-data operasi kondensor yang tersedia pada histori.
3. Menganalisa perubahan tingkat kebersihan dan vakum kondensor.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui laju perpindahan panas di kondensor dengan beban yang berbeda.
2. Mengetahui pengaruh setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning* terhadap tingkat kebersihan dan vakum kondensor.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah ilmu pengetahuan dalam mata kuliah pemeliharaan pembangkit, operasi pembangkit, dan termodinamika bagi peneliti.

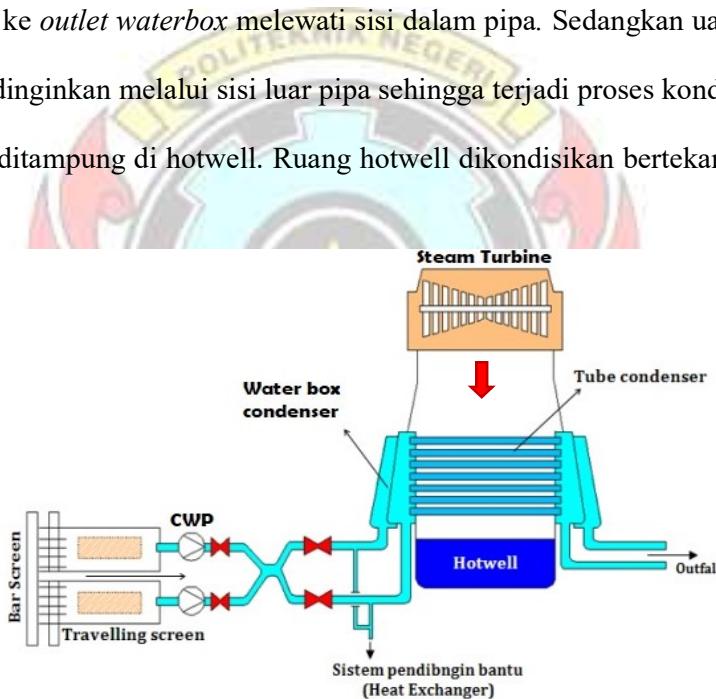
2. Sebagai salah satu masukan untuk perusahaan dalam upaya meningkatkan keandalan unit terutama pada kinerja kondensor.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kondensor

Kondensor adalah peralatan utama pada PLTU siklus tertutup yang berfungsi sebagai alat penukar kalor. Kondensor terdiri dari pipa-pipa pendingin dengan media pendinginnya berupa air laut dari *discharge Circulating Water Pump* (CWP) yang disalurkan melalui *inlet waterbox* mengalir ke *outlet waterbox* melewati sisi dalam pipa. Sedangkan uap keluaran turbin didinginkan melalui sisi luar pipa sehingga terjadi proses kondensasi dan hasilnya ditampung di hotwell. Ruang hotwell dikondisikan bertekanan negatif



bertujuan untuk mempercepat laju masa uap terkondensasi.

**Gambar 2.1** Skema Sistem air pendingin kondensor

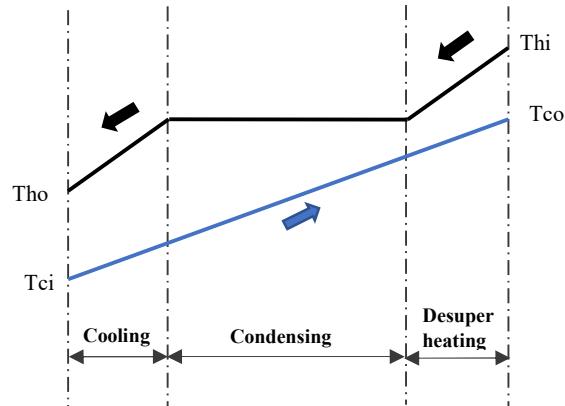
Laju perpindahan panas tergantung pada aliran air pendingin, kebersihan pipa-pipa dan perbedaan temperatur antara uap dan air pendingin. Proses perubahan uap menjadi air terjadi pada tekanan dan temperatur jenuh, dalam hal ini kondensor berada pada kondisi vakum. Karena temperatur air pendingin

sama dengan temperatur udara luar, maka temperatur air kondensatnya maksimum mendekati temperatur udara luar. Apabila laju perpindahan panas terganggu, maka akan berpengaruh terhadap tekanan dan temperatur.

Fungsi utama kondensor selain untuk mengkondensasikan uap menjadi air juga memiliki fungsi lain, yaitu:

- Sebagai tempat untuk menampung dan mengontrol air kondensat.
- Sebagai tempat untuk membuang udara atau gas yang tidak terkondensasi (*Non Condensable Gas*).
- Mengoptimalkan kinerja turbin karena adanya tekanan vakum kondensor.

Terdapat tiga zona pada kondensor, yakni *desuperheating zone*, *condensing zone* dan *cooling zone*. Desuperheating zone merupakan daerah terjadinya penurunan temperatur *steam* dari *superheated* menjadi *saturated* (uap jenuh). *Condensing zone* merupakan daerah terbesar pada kondensor yang di dalamnya terjadi perubahan fase dari uap menjadi cair dengan temperatur tetap yakni pada temperatur saturasinya. Sedangkan *cooling zone* adalah daerah dimana terjadi penurunan temperatur air kondensat dibawah temperatur



saturasinya.

**Gambar 2.2** Zona perpindahan panas kondensor

Gambar 2.2 menunjukkan terdapat dua fluida pada kondensor yaitu uap sebagai fluida yang akan didinginkan serta dikondensasi dan air pendingin dari laut sebagai media kondensasi. Laju perpindahan panas pada masing-masing zona dapat dihitung dengan menentukan temperatur dan enthalpi dari masing-masing zona.

## 2.2 Jenis-Jenis Kondensor

Dilihat dari proses perpindahan panasnya, kondensor terdiri dari dua jenis, yaitu kondensor kontak langsung dan kondensor permukaan.

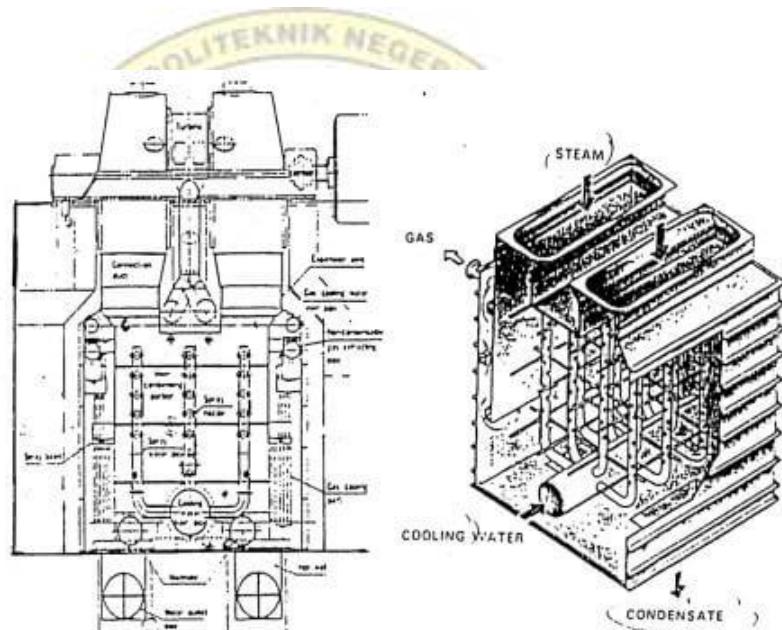
### 2.2.1 Kondensor Kontak Langsung

Kondensor kontak langsung digunakan pada pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) yang siklus kerjanya terbuka. Perpindahan panas pada kondensor ini dilakukan dengan menyemprotkan air pendingin ke aliran uap secara langsung. Air kondensat yang terkumpul di kondensor sebagian digunakan sebagai air pendingin kondensor dan selebihnya dibuang.

Pada bagian dalam kondensor ditempatkan beberapa buah pipa dan *nozzle* penyemprot. Air Pendingin mengalir melalui pipa dan *nozzle* penyemprot. Uap yang terkena semprotan air pendingin akan melepaskan panasnya dan selanjutnya diserap oleh air penyemprot. Uap yang telah melepaskan panasnya akan mengembun (terkondensasi)

menjadi air bercampur dengan air penyemprot, sehingga kedua fluida tersebut mencapai temperatur akhir yang sama di *Hot Well*.

Untuk mempertahankan kondisi vakum di dalam kondensor, level air di *hot well* perlu dipertahankan. Terlalu tingginya air di dalam kondensor akan mengganggu proses penyemprotan, dan terlalu rendah akan menyebabkan terjadinya gangguan pada pompa air pendingin (*Condensate Pump*). Selain itu, vakum di kondensor dipertahankan



dengan mengeluarkan gas-gas dan udara yang tidak terkondensasi.

Gambar 2.3 Kondensor Kontak Langsung

### 2.2.2 Kondensor Permukaan

Pada kondensor permukaan, uap terpisah dari air pendingin, uap berada di luar pipa-pipa sedangkan air pendingin berada di dalam pipa. Perpindahan panas dari uap ke air terjadi melalui perantaraan pipa-pipa. Pada kondensor ini kemurnian air pendingin tidak menjadi masalah

karena terpisah dari air kondensat. Penyekatan yang tepat pada *water box* dari air pendingin dapat dibuat satu atau dua aliran melintasi kondensor sebelum mencapai keluaran. Menurut arah alirannya, kondensor permukaan dibagi menjadi 2 jenis yaitu:

a) *Single flow* (aliran tunggal)

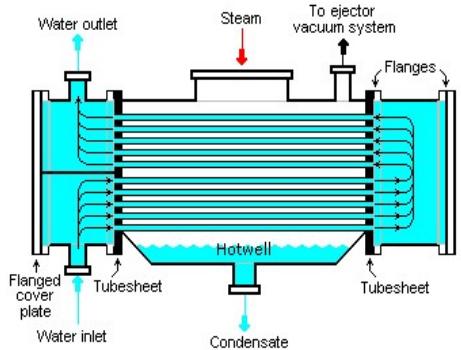
Kondensor dengan aliran tunggal atau juga disebut dengan satu laluan adalah kondensor yang air pendinginnya mengalir melalui semua tabung melalui satu ujung dan keluar dari ujung yang lain.



Gambar 2.4 Kondensor Permukaan lintasan tunggal

b) *Double flow* (aliran ganda)

Kondensor *double flow* disebut juga dengan kondensor dengan dua laluan. Pada kondensor dua laluan, air pendingin memasuki pipa melalui *waterbox* yang terbagi dua pada satu sisi, yakni sisi *inlet* dan *outlet*. Air pendingin kemudian memasuki separuh jumlah *tube*. Setelah air pendingin sampai pada *waterbox* pada sisi lain, maka air pendingin akan memasuki *tube* yang lain dan keluar melalui *waterbox* yang memiliki dua sisi. Kondensor inilah yang terdapat di PLTU Barru.



Gambar 2.5 Kondensor Permukaan lintasan ganda



Gambar 2.6 Kondensor PLTU Barru

Tabel 2.1 Spesifikasi Kondensor PLTU Barru

Type	Two Surface Type
Cooling Water	Sea Water
Cooling Area	3500 m <sup>2</sup>
Cooling Water Temperature (design value)	30 °C
Length of Tube	7345 mm
Number of Tubes	5488 pieces
Thickness Tube	0.5 mm
Velocity in tubes	2.3 m/s
Material of Tubes	Titanium

Diameter (outer)	28 mm
Diameter (inner)	27,5 mm

### 2.3 Tekanan Vakum Kondensor

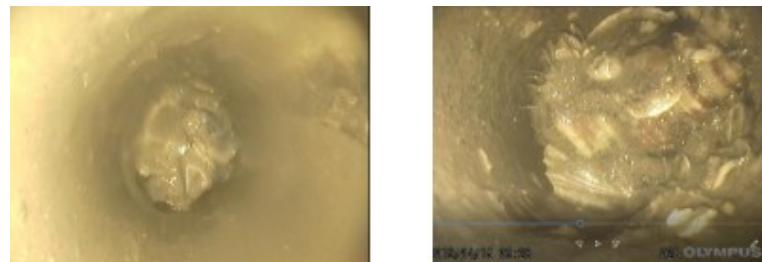
Parameter kinerja kondensor dipantau berdasarkan nilai vakum atau *pressure* yang dihasilkan. Nilai vakum kondensor ini akan mempengaruhi kinerja *steam turbine*. Vakum kondensor akan mempengaruhi tinggi rendahnya beban yang dihasilkan oleh turbin uap. Apabila tekanan vakum menjauhi tekanan atmosfer dengan jumlah energi masuk turbin yang sama akan didapat beban yang lebih tinggi. Nilai tekanan vakum kondensor berasal dari konstruksi kondensor itu sendiri. Dari konstruksi awal kondensor PLTU Barru dirancang sedemikian rupa untuk menghasilkan tekanan vakum di dalam kondensor  $\pm -88$  kPa.

Beberapa faktor yang memengaruhi unjuk kerja kondensor di antaranya adalah sebagai berikut:

- Kebersihan Pipa Air Pendingin

*Tube fouling* adalah pengotoran atau timbulnya endapan pada *tube* kondensor. Endapan pada *tube* ini sangat mungkin terjadi karena *cooling water* pada kondensor berasal dari air laut sehingga akan banyak biota laut ataupun kotoran yang terbawa aliran. *Fouling* dapat berupa mikrobiologi dan kotoran yang menyumbat *tube* kondensor. Saat terjadi pengotoran, performa kondensor akan menurun. Laju perpindahan panas akan

berkurang sehingga proses kondensasi *steam* menjadi air kondensat akan menurun.



Gambar 2.7 *Tube fouling*

- Aliran Air Pendingin

Aliran air pendingin yang tidak sesuai atau kurang dari standar desain akan mengurangi kemampuan pendinginan. Sehingga, proses kondensasi tidak optimal. Berkurangnya aliran air pendingin dapat disebabkan oleh kemampuan pompa air pendingin yang tidak normal, adanya hambatan pada saluran air pendingin berupa sampah atau kotoran, atau karena level air laut atau sungai rendah.

- Udara/Gas dalam Air Pendingin

Udara/gas yang terjebak dalam *tube* air pendingin di kondensor akan menyebabkan kurang optimalnya kontak langsung antara air pendingin dengan permukaan *tube*, sehingga proses perpindahan panas antara air pendingin dengan uap keluaran *turbine* juga menjadi tidak optimal.

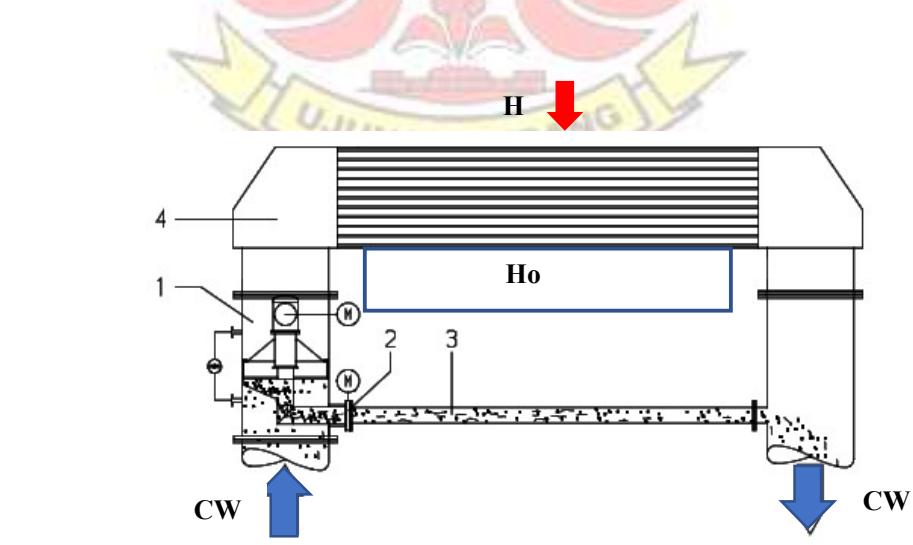
#### **2.4 Debris Filter**

*Debris filter* adalah *strainer/saringan* yang digunakan untuk menyaring kotoran yang dibawa air pendingin (air laut) untuk masuk ke dalam kondensor

agar tidak mengotori *tube-tube* dalam kondensor. *Debris filter* terletak pada jalur inlet air laut kondensor. *Filter* ini berbeda dengan yang lainnya karena ditanam di dalam aliran air di antara *flange* pipa, bukan sebagai *pre-filter* yang ditempatkan di area terbuka.

*Debris filter* memiliki berbagai macam teknologi bahkan dipatenkan oleh *supplier*. Masing-masing *supplier* memiliki kelebihan dan kelemahan terhadap teknologi yang mereka gunakan, sehingga *user* harus memilih teknologi paling sedikit kelemahannya agar bisa teraplikasikan secara efektif di unit kerja.

*Debris filter* adalah salah satu komponen penting pada kondensor, karena sebagian besar PLTU menggunakan air laut sebagai sistem pendingin dimana banyak mengandung sampah plastik, cangkang kerang, dan sampah padatan lainnya. Cangkang kerang yang berhasil masuk ke dalam pipa-pipa kondensor bisa mengikis pipa sehingga bisa menyebabkan kebocoran pada pipa kondensor. Dengan adanya *debris filter* ini kinerja kondensor bisa tetap



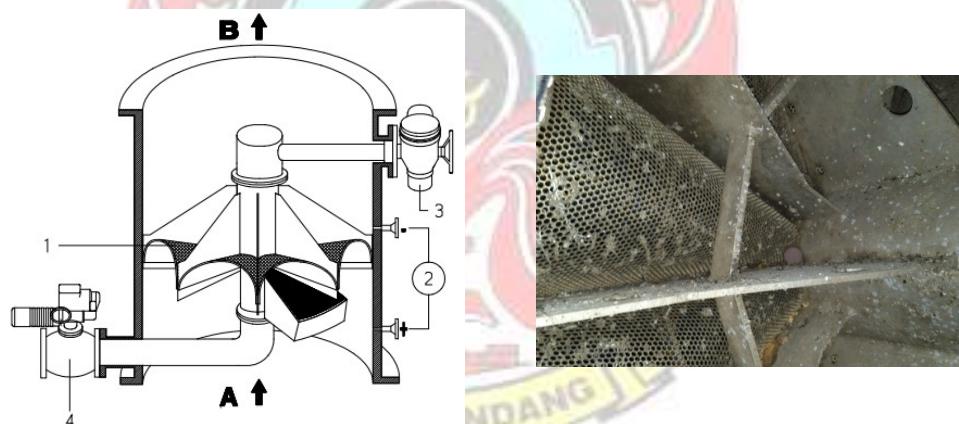
optimal karena dapat menghindarkan penyumbatan pada pipa kondensor.

Gambar 2.8 Debris Filter Condenser

Keterangan gambar 2.8:

1. Debris Filter
2. Discharge valve
3. Discharge pipe
4. Kondensor

Prinsip kerja *debris filter* yaitu ketika perbedaan tekanan sebelum dan sesudah *filter* tinggi, maka blade akan berputar mengelilingi *filter* dan menutup satu persatu bagian *filter*. Dengan memanfaatkan aliran balik ketika *filter* tertutup, sampah-sampah pada *filter* akan terbawa dan mengalir menuju jalur *outlet* kondensor.



Gambar 2.9 Debris Filter

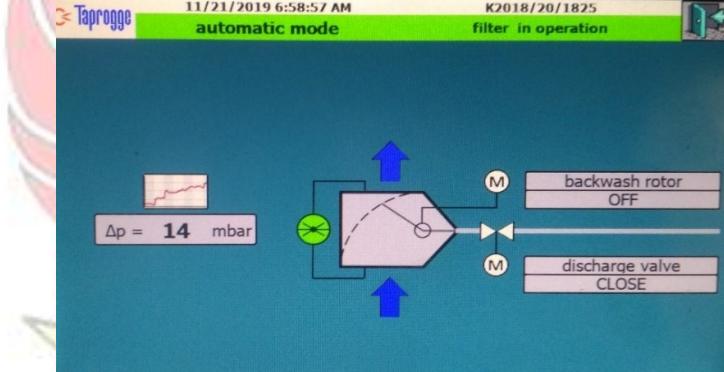
Keterangan gambar 2.9:

1. Filter
2. Transmitter *differential pressure*
3. Motor
4. Discharge valve

Prosedur Kerja:

a) *Automatic Mode*

Jika nilai  $\Delta P$  mencapai  $\Delta P$  backwash (40 mBar), maka *discharge valve* akan membuka dan *debris filter* akan beroperasi secara



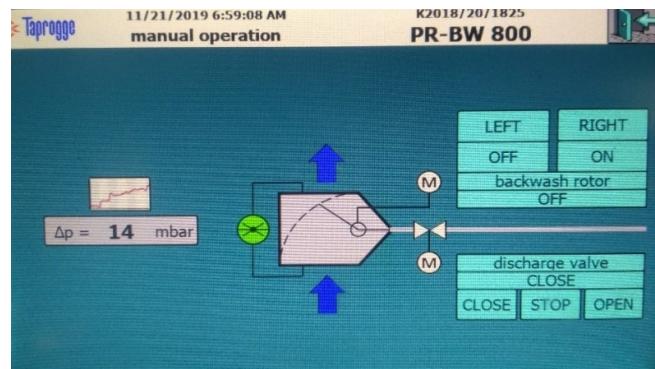
otomatis selama 1 menit

Gambar 2.10 Debris Filter Automatic Mode

b) *Manual Mode*

- 1) Jika nilai  $\Delta P$  mencapai  $\Delta P$  backwash (40 mBar), tekan “OPEN” *discharge valve*. Lalu tekan “ON” *backwash rotor*.

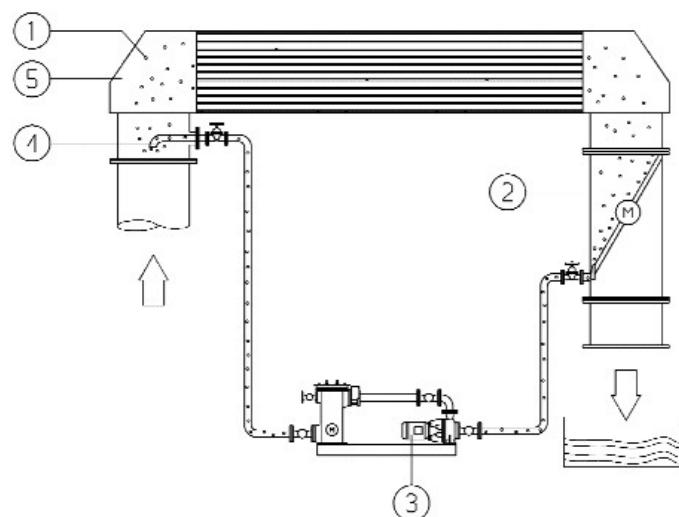
- 2) Jika nilai  $\Delta P$  sudah normal (< 15 mBar), tekan “OFF”



Gambar 2.11 Debris Filter Manual Mode

## 2.5 Ball Cleaning

*Ball cleaning* adalah salah satu cara pembersihan *tube* kondensor dengan menginjeksikan bola karet ke dalam *tube* kondensor secara *online* sehingga



tidak perlu menunggu unit stop untuk pembersihan kondensor.

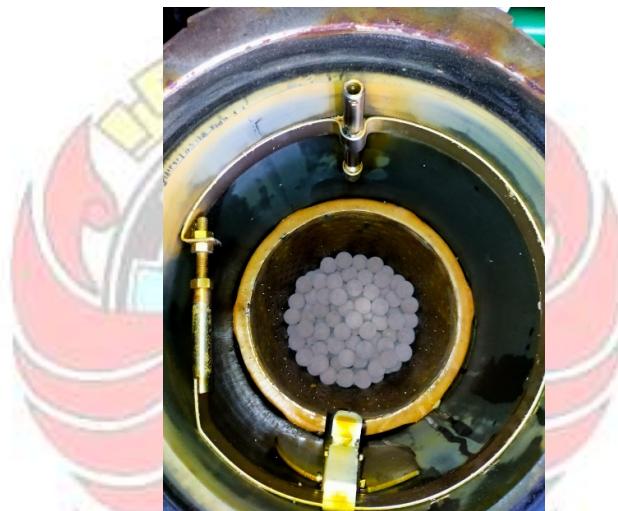
Gambar 2.12 Ball Cleaning Condenser

Keterangan gambar 2.12:

1. Bola-bola
2. *Strainer*
3. Pompa resirkulasi
4. Injektor bola
5. Kondensor



Prinsip kerja *ball cleaning* adalah pompa resirkulasi menginjeksi bola-bola karet ke dalam *tube-tube* kondensor melalui jalur *inlet* air laut. Bola-bola karet tersebut biasanya berukuran lebih besar dari diameter dalam dari *tube* kondensor yang bertujuan untuk menggerus kotoran yang menempel di dinding dalam *tube*. Bola-bola tersebut dimasukkan sebanyak 10% dari jumlah *tube* yang ada di dalam kondensor (*Manual Book Operating Instructions Taprogge*



*Tube Cleaning System*) atau sekitar 549 bola. Setelah masuk *tube*, bola-bola karet tersebut mengalir menuju jalur *outlet* air laut. Agar bola-bola tersebut tidak ikut terbuang bersama air laut, maka dipasang strainer pada jalur *outlet* kondensor untuk menangkap bola-bola tersebut, sehingga dapat disirkulasikan kembali untuk membersihkan *tube-tube* kondensor.

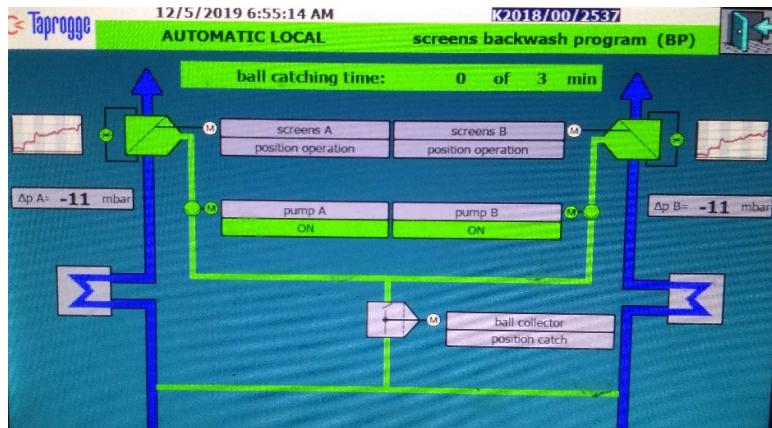
**Gambar 2.13** Bola-bola yang akan sirkulasi dalam kondensor

Prosedur Kerja:

a) *Automatic Mode*

- 1) Memasukkan bola sebanyak 10% dari jumlah *tube* kondensor.

- 2) Arahkan switch pada mode *Automatic*
- 3) Pompa A & B dan ball collector akan operasi

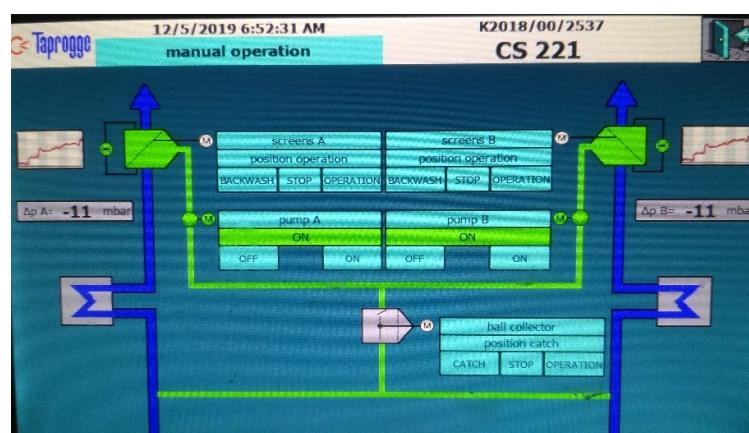


Gambar 2.14 Ball Cleaning Automatic Mode

Pada *automatic mode*, jika  $\Delta P$  pada *strainer* > 30 mBar, maka *strainer* akan melakukan *backwash* untuk membersihkan kotoran yang menumpuk pada *strainer*. Jika saat *backwash* terdapat bola pada *strainer*, maka bola tersebut ikut terbuang dan operator perlu menambah bola agar *ball cleaning* bekerja secara *continue*.

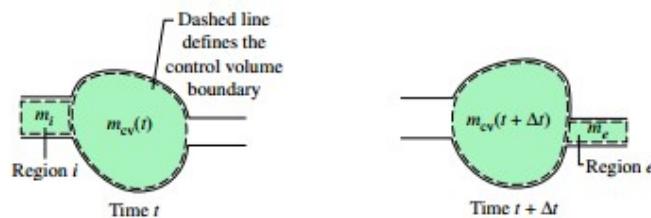
#### b) Manual Mode

- 1) Memasukkan bola sebanyak 10% dari jumlah *tube* kondensor ke dalam *ball collector*.
- 2) Tekan “ON” pada pompa A dan B
- 3) Tekan “OPERATION” pada *ball collector*.



**Gambar 2.15** Ball Cleaning Manual Mode

## **2.6 Hukum Kekekalan Massa**



**Gambar 2.16** *Control Volume* Hukum Kekekalan Massa

Gambar 2.15 menjelaskan bahwa dalam sebuah *control volume* pada waktu ( $t$ ), massa masuk yang diberi notasi  $m_i$  sementara di dalam *control volume* sudah terdapat massa sendiri yang diberi notasi  $m_{cv}(t)$ . Pada saat waktu ( $t + \Delta t$ ) massa di dalam *control volume* mengalami perubahan. Perubahan tersebut adalah terdapat massa keluar yang diberi notasi  $m_o$  dan massa yang ada di dalam *control volume* diberi notasi  $m_{cv}(t + \Delta t)$ . Sehingga perubahan laju massa dalam *control volume* per satuan waktu dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Laju perubahan massa} \\ \text{yang terdapat} \\ \text{dalam control volume} \\ \text{pada waktu } t \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Laju aliran} \\ \text{massa masuk} \\ \text{yang melintasi} \\ \text{sisi masuk} \\ \text{pada waktu } t \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{Laju aliran} \\ \text{massa keluar} \\ \text{yang melintasi} \\ \text{sisi keluar} \\ \text{pada waktu } t \end{array} \right]$$

Secara matematis dapat dituliskan dengan rumus berikut:

$$\frac{dm_{\text{ev}}}{dt} = \sum_i \dot{m}_i - \sum_e \dot{m}_e \dots \quad (2.1)$$

dimana  $i$  merupakan sisi masuk dan  $e$  merupakan sisi keluar.

## 2.7 Persamaan Dasar Perpindahan Panas

Berdasarkan hukum termodinamika pertama dengan kondisi *open system*, *steady state*, *steady flow*, energi potensial dan energi kinetik diabaikan didapatkan persamaan sebagai berikut:

Jika fluida tidak diikuti perubahan fase dan memiliki *specific heat* yang konstan maka  $di = C_p dT_i$ , sehingga persamaan menjadi

$$\dot{Q} = (\dot{m} C_p)_h (T h_i - T h_o) \dots \quad (2.3)$$

$$\dot{Q} = (\dot{m} C_p)_c (T c_o - T c_i) \dots \quad (2.4)$$

### Keterangan:

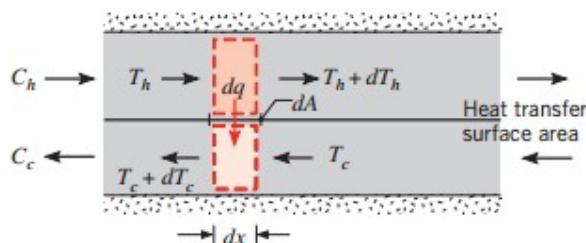
$\dot{Q} = Heat$  [kg/s]

**m** = laju massa [kg/kg°C]

**C<sub>v</sub>** = specific heat [kJ/kg°C]

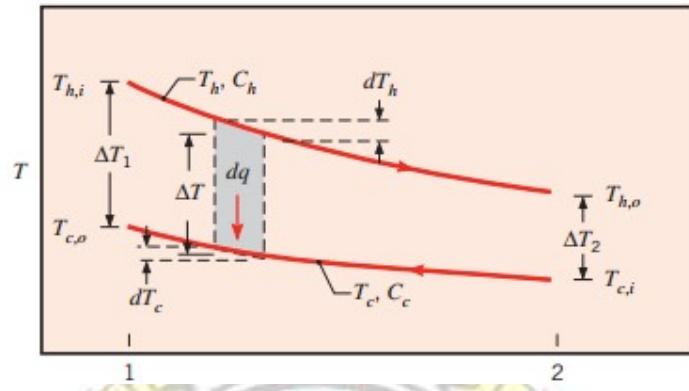
## 2.8 Logarithmic Mean Temperature Difference

*Logarithmic Mean Temperature Difference* (LMTD) adalah perbedaan temperatur rata-rata antara aliran fluida dingin dan fluida panas. Berikut adalah distribusi temperatur dari aliran *counter flow* sesuai dengan kondensor



PLTU Barru.

**Gambar 2.17 Heat Exchanger Aliran Counter Flow**



**Gambar 2.18** Distribusi Temperatur *Heat Exchanger* Aliran Counter Flow

Berdasarkan gambar di atas, dapat dilihat bahwa

Sehingga,

## Keterangan

$T_{in}$  = temperatur masuk fluida panas [°C]

$T$  = temperatur keluar fluida panas [°C]

$T_i$  = temperatur masuk fluida dingin [°C]

**T<sub>so</sub>** = temperatur keluar fluida dingin [°C]

## 2.9 Koefisien Konveksi pada Pipa Air Pendingin, $h_i$

### 2.9.1 Menghitung *Reynold Number*

Bilangan *Reynold* adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskos yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis aliran dalam pipa. Untuk angka *Reynold* di bawah 2000, aliran pada kondisi tersebut adalah laminer. Aliran akan turbulen apabila angka *Reynold* lebih dari 4000. Apabila angka *Reynold* berada di antara kedua nilai tersebut maka disebut aliran transisi. Perhitungan bilangan *Reynold* pada aliran di dalam pipa ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$Re = \frac{4\dot{m}_{cw}}{\pi Di \mu_f} \dots \quad (2.9)$$

Keterangan:

**Re** = Reynold Number

$m_{air}$  = Laju masa air pendingin [kg/s]

**Di** = Diameter dalam pipa [m]

$\mu_s$  = Viskositas absolut [kg/m.s]

### **2.9.2 Menghitung Nusselt Number**

Untuk Nusselt Number dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Nu = 0.023 Re_p^{4/5} Pr^m \dots \quad (2.10)$$

Dimana:

n= 0,4 untuk heating ( $T_s > T_m$ )

n= 0,3 untuk cooling ( $T_s < T_m$ )

Dengan syarat:

$$\begin{cases} 0.6 \leq \text{Pr} \leq 160 \\ Re_D \geq 10000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{cases}$$

## Keterangan:

**Nu** = Nusselt Number

*Re* = Reynold Number

*Pr = Prandtl Number*

### 2.9.3 Menghitung Koefisien Konveksi Pipa Air Pendingin

Koefisien konveksi dalam pipa air pendingin pada pipa menggunakan persamaan sebagai berikut

## Keterangan:

$hi$  = koefisien konveksi dalam pipa [W/m<sup>2</sup> °C]

**Nu** = Nusselt Number

$k$  = konduktivitas termal [W/m°C]

*Di* = diameter dalam pipa [m]

## 2.10 Koefisien Konveksi Pada *Shell*

### 2.10.1 Menghitung Jacob Number

Jacob Number adalah rasio antara panas sensible terhadap panas latent yang diserap ketika terjadi perubahan fase, digunakan persamaan sebagai berikut.

$$J_a = \frac{C_p(T_{sat}-T_m)}{h_{fg}} \dots \quad (2.12)$$

## Keterangan:

**J<sub>a</sub>** = Jacob Number

**T<sub>sat</sub>** = Temperatur saturasi [°C]

*Tm* = Temperatur Mean [°C]

***h<sub>f,g</sub>*** = Enthalpy of vaporization [kJ/kg]

## 2.10.2 Menghitung Panas Laten Penguapan

Pada kondisi aliran massa uap secara horizontal yang mengakibatkan perubahan wujud zat (panas latent) maka ditambahkan persamaan panas latent penguapan sebagai berikut

### 2.10.3 Menghitung Nusselt Number

Menentukan Nusselt number pada kondensasi di permukaan luar pipa horizontal maka digunakan persamaan berikut,

$$Nu = 0,729 \left[ \frac{\rho_f (\rho_f - \rho_v) h r_{fg} D o^3}{\mu_f (T_{sat} - T_m) k_f} \right]^{1/4} \quad \dots \dots \dots (2.14)$$

## Keterangan:

$\rho_f$  = Density fluid [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_v$  = Density vapour [kg/m<sup>3</sup>]

#### **2.10.4 Konveksi Luar Pipa**

Koefisien konveksi luar pipa atau shell dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

## Keterangan:

$ho$  = koefisien konveksi luar pipa [W/m<sup>2</sup>·°C]

### 2.11 *Overall Heat Transfer, U*

Koefisien perpindahan panas total juga didefinisikan sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi dengan memperhitungkan hambatan diantara fluida pada pipa, dihitung dengan persamaan:

$$U_f = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + R^n f_o + \frac{r_o}{k} \ln \left( \frac{r_o}{r_i} \right) + \left( \frac{r_o}{r_i} \right) R^n f_i + \left( \frac{r_o}{r_i} \right) \frac{1}{h_i}} \quad \dots \dots \dots (2.16)$$

Sedangkan untuk mendapatkan koefisien overall heat transfer tanpa *fouling (clean)*, dapat digunakan persamaan:

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{r_o}{k} \ln \left( \frac{r_o}{r_i} \right) + \left( \frac{r_o}{r_i} \right) \frac{1}{h_i}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.17)$$

## Keterangan:

$U$  = overall Heat Transfer Coefficient  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

**$h_o$**  = koefisien konveksi luar tube

$h_i$  = koefisien konveksi dalam tube

$r_o$  = jari-jari luar tube [m]

$r_i$  = jari-jari dalam tube [m]

$R^*$  = fouling factor [°C]

## 2 Condenser Cleanliness

## 2.12 Condenser Cleanliness

*Condenser cleanliness* merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengetahui tingkat kebersihan pipa-pipa kondensor yang mengindikasikan rasio koefisien perpindahan panas antara pipa-pipa pada saat temperatur dan aliran uapnya sama. Sebagai indikator kinerja kondensor, nilai *condenser cleanliness* mencerminkan tingkat *fouling* pada *water-side wall* (*water box*) kondensor. Nilai *condenser cleanliness* juga merupakan koefisien perpindahan panas kondensor. Perubahan nilai *condenser cleanliness* akan sangat berpengaruh pada optimalisasi operasi dan peningkatan sistem *cooling water circulation*. Nilai *condenser cleanliness* dapat dihitung dengan menggunakan rumus di bawah ini.

$$CF = \frac{U_f}{U_c} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (2.18)$$

Keterangan:

- $CF = \text{Condenser Cleanliness Factor}$  [%]
  - $U_f = \text{Heat Transfer Coefficient (Fouling)}$  [W/m°C]
  - $U_c = \text{Heat Transfer Coefficient (Clean)}$  [W/m°C]

Di dalam buku *Power Plant Technology* oleh El-Wakil halaman 234 menyatakan bahwa nilai *condenser cleanliness factor* adalah 0.85 atau 85%, jika di bawah nilai tersebut maka pipa kondensor kotor.

### BAB III METODE PENELITIAN

### **3.1 Tempat dan Waktu Penelitian**

Adapun lokasi penelitian ini dilaksanakan di Unit 1 PLTU Barru Dusun Bawasalo Desa Lampoko Kabupaten Barru, Sulawesi Selatan 90752, sedangkan waktu penelitian dilakukan dari Agustus 2019 dengan mengambil data operasi pada tahun 2019.

### 3.2 Alat dan Bahan

Dalam penelitian ini, digunakan alat berupa komputer *control room* PLTU Barru dan bahan berupa data-data parameter dari pengoperasian kondensor PLTU Barru unit 1.

### 3.3 Pengumpulan Data

Data diambil di PLTU Barru unit 1 dalam dua kondisi, yaitu sebelum dan setelah terpasangnya *debris filter* dan *ball cleaning* pada sistem pendingin kondensor.

Parameter-parameter data yang diambil meliputi:

#### 1. Data Kuantitatif

Data kuantitatif yaitu data yang berbentuk angka-angka atau data yang dapat dihitung, seperti:

- a. Temperatur *inlet* air laut kondensor [°C]
- b. Temperatur *outlet* air laut kondensor [°C]
- c. Temperatur uap masuk kondensor [°C]
- d. Temperatur air kondensat [°C]
- e. Tekanan vakum kondensor [-kPa]
- f. Beban [MW]
- g. *Heat Transfer Coefficient* [W/m<sup>2</sup> °C]

h. *Condenser Cleanliness* [%]

## 2. Data Kualitatif

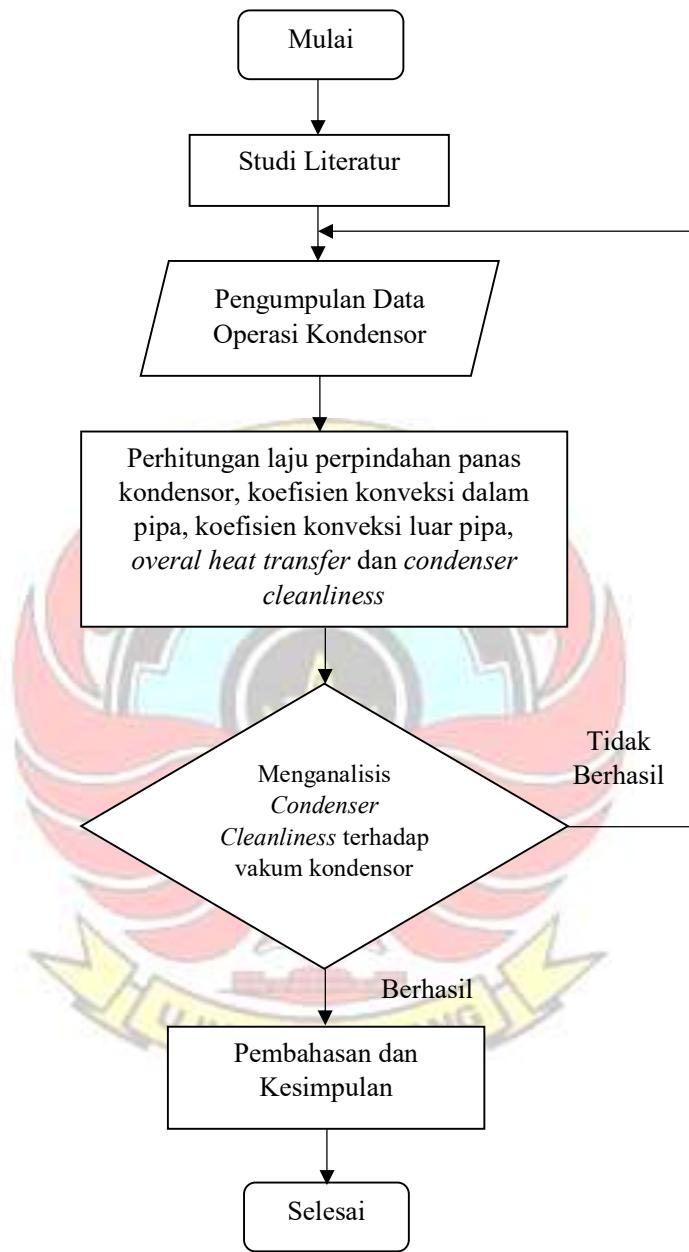
Data kualitatif yaitu data-data yang tidak dapat diukur dan dihitung, berbentuk uraian gambar, dalam hal ini berupa single line diagram sistem pendingin utama dan kondensor untuk mengetahui alur kerja kondensor.

## 3.4 Metode Analisis

Setelah data terkumpul, selanjutnya data diolah menggunakan rumus dari beberapa referensi. Setelah itu dilakukan analisis data untuk menganalisis pengaruh *debris filter* dan *ball cleaning* terhadap tingkat kebersihan dan kevakuman kondensor dengan berbagai beban.

## 3.5 Diagram Alir

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini ditunjukkan pada diagram alir berikut:



**Gambar 3.1** Diagram alir

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pengumpulan Data

Data yang digunakan untuk menganalisa kondensor ini cukup terbatas demikian juga dengan peralatan lainnya di PLTU Barru karena beberapa kendala diantaranya adalah tidak lengkapnya dokumen desain dan bahasa penulisan menggunakan bahasa cina.

Disebabkan tidak adanya data unjuk kerja dari kondensor maka perhitungan terdiri dari dua jenis data yaitu data desain kondensor dan data operasional secara aktual pada bulan Januari, Februari, Maret, Juli, Agustus, dan September 2019. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk tabel pada lampiran 1.

### 4.2 Pengolahan Data

Berikut adalah contoh perhitungan koefisien konveksi pada data operasi tanggal 18 September 2019.

Tabel 4.1 Data aktual kondensor beban 50 MW

Data sisi Uap		
<i>Steam Exhaust Inlet Temperature, <math>T_{hi}</math></i>	°C	59,1
<i>Steam Exhaust Oulet Temperature (hotwell), <math>T_{ho}</math></i>	°C	56,9
<i>Steam Exhaust Mass Flow, <math>m_{uap}</math></i>	ton/h	142,6
<i>Main Steam Flow, msf</i>	ton/h	197
<i>Surface Temperature, <math>T_{surface}</math></i>	°C	58,70

<i>Vacuum Condenser</i>	kPa	-81,8
<b>Data sisi air pendingin</b>		
<i>Sea Water Inlet Temperature, T<sub>ci</sub></i>	°C	28,6
<i>Sea Water Outlet Temperature, T<sub>co</sub></i>	°C	44,75

#### 4.2.1 Laju Perpindahan Panas Kondensor

Tabel 4.2 Parameter pada masing-masing zona

Parameter	Desuperheating	Condensing	Cooling
<i>Pressure, kPa</i>	8,3		
<i>Thi [°C]</i>	59,1		
<i>Tho [°C]</i>			56,9
<i>Tsat [°C]</i>		58,95	
<i>hv [kJ/kg]</i>	2.607,28	2607,02	
<i>hf [kJ/kg]</i>		246,76	
<i>hf [kJ/kg]</i>			238,19

Berdasarkan tabel 4.1 di atas, didapatkan laju perpindahan panas pada masing-masing zona dengan laju aliran massa uap sebesar 142,6 ton/h atau 39,61 kg/s adalah sebagai berikut:

a. *Desuperheating*

$$Q_{des} = \dot{m}_{uap} (h_{vdes} - h_{vcond})$$

$$= 39,61 \text{ kg/s} * (2.607,28 \text{ kJ/kg} - 2607,02 \text{ kJ/kg})$$

$$= 10,30 \text{ kW}$$

b. *Condensing*

$$Q_{cond} = \dot{m}_{vap} (h_{v\ cond} - h_{f\ cond})$$

$$= 39,61 \text{ kg/s} * (2607,02 \text{ kJ/kg} - 246,76 \text{ kJ/kg})$$

$$= 93.492,52 \text{ kW}$$

c. *Cooling*

$$Q_{cool} = \dot{m}_{vap} (h_{f\ cond} - h_{f\ cool})$$

$$= 39,61 \text{ kg/s} * (246,76 \text{ kJ/kg} - 238,19 \text{ kJ/kg})$$

$$= 339,47 \text{ kW}$$

Sehingga laju perpindahan panas pada sisi *shell* adalah:

$$Q_{tot} = Q_{des} + Q_{cond} + Q_{cool}$$

$$= 93.842,29 \text{ kW}$$

Sedangkan laju perpindahan panas pada sisi *tube* dapat ditentukan setelah menghitung laju aliran air pendingin berdasarkan hukum keetimbangan energi:

$$\dot{m}_{cw} = \frac{Q_{shell}}{(T_{co} - T_{ci}) * C_p}$$

$$\dot{m}_{cw} = \frac{93.842,29 \text{ kW}}{(44,75 \text{ }^{\circ}\text{C} - 28,6 \text{ }^{\circ}\text{C}) * 4,174 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}}$$

$$\dot{m}_{cw} = 1.392,11 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{cw} = 0,25 \text{ kg/s per pipa}$$

Sehingga, laju perpindahan panas pada pipa adalah:

$$Q_{tube} = \dot{m}_{cw} * C_p * (T_{eo} - T_{ci})$$

$$Q_{tube} = 1.392,11 \text{ kg/s} * 4,174 \text{ kJ/kg°C} * (44,75 \text{ °C} - 28,6 \text{ °C})$$

$$Q_{tube} = 93.842,29 \text{ kW}$$

#### 4.2.2 Koefisien konveksi pada pipa

Berdasarkan data operasi pada tabel 4.1, didapat  $T_{mean} = 36,68 \text{ °C}$

yang mempunyai *physical properties* sebagai berikut:

Tabel 4.3 *Physical properties* pada air pendingin

<i>Physical properties</i>	Satuan	Nilai
<i>Specific Volume, v<sub>f</sub></i>	m <sup>3</sup> /kg	0,00100667
<i>Density Sea Water, ρ<sub>f</sub></i>	kg/m <sup>3</sup>	993,375899
<i>Specific Heat, c<sub>pf</sub></i>	kJ/kg°C	4,174
<i>Absolut Viscosity, μ<sub>f</sub></i>	kg/m.s	0,00069842
<i>Thermal Conductivity, k<sub>f</sub></i>	W/m°C	0,628615
<i>Pr</i>		4,6467

##### a. Menghitung *Reynold Number*

Perhitungan Reynold number pada aliran di dalam pipa ditentukan menggunakan persamaan berikut

$$Re = \frac{4 \dot{m}_{cw}}{\pi D i \mu_f}$$

$$Re = \frac{4 * 0,25 \text{ kg/s}}{\pi * 0,0275 \text{ m} * 0,00069842 \text{ kg/m.s}}$$

$$Re = 16.824,44$$

b. Menghitung *Nusselt Number*

$$Nu = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n$$

$$Nu = 0.023 * (16.824,44)^{\frac{4}{5}} * (4,6467)^{0,4}$$

$$Nu = 102,17$$

c. Menghitung koefisien konveksi pipa air pendingin

$$h_i = \frac{Nu_D * k}{Di}$$

$$h_i = \frac{102,17 * 0,628615 \text{ W/m°C}}{0,0275 \text{ m}}$$

$$h_i = 2.335,56 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

#### 4.2.3 Koefisien konveksi pada *shell*

Karena tidak terdapat data yang lengkap untuk menentukan koefisien konveksi secara langsung, untuk menghitung Tmean, maka Tsurface ditentukan berdasarkan asumsi Tsurface = 58,7 °C. Dengan Tmean = (Tsaturasi-Tsurface)/2, maka Tmean = 58,83 °C, sehingga didapat *physical properties* sebagai berikut:

Tabel 4.4 Physical properties pada uap

<b>Physical properties</b>	<b>Satuan</b>	<b>Nilai</b>
<i>Specific Volume, <math>v_f</math></i>	$\text{m}^3/\text{kg}$	0,001016462
<i>Specific Volume, <math>v_v</math></i>	$\text{m}^3/\text{kg}$	8,1108746
<i>Density Fluid, <math>\rho_f</math></i>	$\text{kg}/\text{m}^3$	983,805036
<i>Density Vapour, <math>\rho_v</math></i>	$\text{kg}/\text{m}^3$	0,123291266
<i>Specific Heat, <math>c_{pf}</math></i>	$\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$	4,179
<i>Specific Heat, <math>h_{fg}</math></i>	$\text{kJ}/\text{kg}$	2360,5314
<i>Absolut Viscosity, <math>\mu_f</math></i>	$\text{kg}/\text{m.s}$	0,000479838
<i>Thermal Conductivity, <math>k_f</math></i>	$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$	0,652948
<i>Pr</i>		3,071025

a. Menghitung Jacob Number

$$Ja = \frac{C_p (T_{sat} - T_m)}{h_{fg}}$$

$$Ja = \frac{4,179 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} (58,95^\circ\text{C} - 58,83^\circ\text{C})}{2360,5314 \text{ kJ/kg}}$$

$$Ja = 0,00021$$

b. Menghitung Panas Laten Penguapan

$$h'_{fg} = h_{fg} (1 + 0,68 Ja)$$

$$h'_{fg} = 2360,5314 \text{ kJ/kg} (1 + 0,68 * 0,00021)$$

$$h'_{fg} = 2.360,87 \text{ kJ/kg}$$

c. Menghitung *Nusselt Number*

$$Nu = 0,729 \left[ \frac{g \rho_f (\rho_f - \rho_v) h'_{fg} Do^3}{\mu_f (T_{sat} - T_m) k_f} \right]^{1/4}$$

*Nu*

$$= 0,729 \left[ \frac{9,8 \frac{m}{s^2} * 983,805036 \frac{kg}{m^3} \left( 983,805036 \frac{kg}{m^3} - 0,123291266 \frac{kg}{m^3} \right) 2,360,87 \frac{kJ}{kg} * 0}{0,000479838 \frac{kg}{m.s} (58,95^\circ C - 58,83^\circ C) 0,652948 \frac{W}{m.\circ C}} \right]$$

$$Nu = 1.386,19$$

d. Menghitung koefisien konveksi pada *shell*

$$h_o = \frac{Nu_D \times k}{Do}$$

$$h_o = \frac{1.386,19 \times 0,652948 \frac{W}{m.\circ C}}{0,028 m}$$

$$h_o = 32.325,37 \frac{W}{m^2 \circ C}$$

Berdasarkan dengan desain pipa kondensor *triangular staggered* maka digunakan persamaan sebagai berikut:

$$h_{o \text{ per pipe}} = h_o (N_L)^{-1/6}$$

$$h_{o \text{ per pipe}} = 32.325,37 \frac{W}{m^2 \circ C} (74,08)^{-1/6}$$

$$h_{o \text{ per pipe}} = 15.773,41 \frac{W}{m^2 \circ C}$$

#### 4.2.4 Overall Heat Transfer

Dengan menggunakan konduktifitas panas pipa titanium pada  $T_{mean} = 58,83 \text{ }^{\circ}\text{C}$  sebesar  $k = 21,4203 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  dan nilai *representative fouling factors* pada air laut  $R''_{fo} = 0,0001 \text{ m}^{2}\text{C/W}$  dan uap  $R''_{fo} = 0,0001 \text{ m}^{2}\text{C/W}$ , maka

a. Dengan *fouling*

$$U_f = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R''_{fo} + \frac{r_o}{k} \ln \left( \frac{r_o}{r_i} \right) + \left( \frac{r_o}{r_i} \right) R''_{fi} + \left( \frac{r_o}{r_i} \right) \frac{1}{h_i}}$$

$$U_f = \frac{1}{\frac{1}{15,773,41 \frac{W}{m^2\text{C}}} + 0,0001 \frac{m^2\text{C}}{W} + \frac{0,014 \text{ m}}{21,4203 \frac{W}{m^2\text{C}}} \ln \left( \frac{0,014 \text{ m}}{0,01375 \text{ m}} \right) + \left( \frac{0,014 \text{ m}}{0,01375 \text{ m}} \right) \frac{1}{2,335,56 \frac{W}{m^2\text{C}}}}$$

$$U_f = 1,402,64 \frac{W}{m^2\text{C}}$$

b. Tanpa *fouling (clean)*

$$U_e = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{r_o}{k} \ln \left( \frac{r_o}{r_i} \right) + \left( \frac{r_o}{r_i} \right) \frac{1}{h_i}}$$

$$U_e = \frac{1}{\frac{1}{15,773,41 \frac{W}{m^2\text{C}}} + \frac{0,014 \text{ m}}{21,4203 \frac{W}{m^2\text{C}}} \ln \left( \frac{0,014 \text{ m}}{0,01375 \text{ m}} \right) + \left( \frac{0,014 \text{ m}}{0,01375 \text{ m}} \right) \frac{1}{2,335,56 \frac{W}{m^2\text{C}}}}$$

$$U_e = 1,956,48 \frac{W}{m^2\text{C}}$$

#### 4.2.5 Condenser Cleanliness

$$CF = \frac{U_f}{U_e} \times 100\%$$

$$CF = \frac{1.402,64}{1.956,48} \frac{W}{m^{\circ}C} \times 100\%$$

$$CF = 71,69 \%$$

#### 4.2.6 Logarithmic Mean Temperature Difference

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}}$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{(59,1^{\circ}C - 44,75^{\circ}C) - (56,9^{\circ}C - 28,6^{\circ}C)}{\ln \frac{(59,1^{\circ}C - 44,75^{\circ}C)}{(56,9^{\circ}C - 28,6^{\circ}C)}}$$

$$\Delta T_{LM} = 20,542^{\circ}C$$

### 4.3 Hasil Pengolahan Data

#### 4.3.1 Sebelum adanya *debris filter* dan *ball cleaning condenser*

Tabel 4.5 Hasil pengolahan data sebelum adanya *debris filter* dan *ball cleaning*.

Parameter	Satuan	Nilai				
		04/01/19	05/03/19	01/03/19	27/02/19	07/02/19
Beban	MW	30	35	40	45	50
Vakum Kondensor	kPa	-80	-72,7	-73	-75,1	-77,4
Q desuper	kW	42,5	32,78	17,83	19,47	48,26
Q cond	kW	62.557,28	74.451,63	81.043,82	88.347,86	93.590,74
Q cool	kW	424,5	425,9	579,82	583,29	499,90

<b>Q tot</b>	kW	63.024,28	74.910,31	81.641,47	88.950,63	94.138,9
<b>LMTD</b>	$^{\circ}\text{C}$	17,01	25,821	25,677	23,443	17,724
<i>Reynold Number</i>		11968,31014	14159,48164	15081,8051	15829,819	16880,5478
<i>Nusselt Number</i>		78,02	87,33	91,78	95,21	74
<b>koefisien konveksi pipa air pendingin</b>	$\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$	1782,338	2005,172	2107,739	2187,677	1709,451
<i>Jacob Number</i>		0,0017	0,00045	0,00045	0,00045	0,00044
<b>Panas Laten</b>	kJ/kg	2.360,04	2.343,01	2.341,77	2.346,73	2.351,65
<i>Nusselt Number</i>		827,76	1.180,73	1.181,98	1.175,79	1.168,10
<b>koefisien konveksi pada shell</b>	$\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$	9.436,29	13.575,58	13.601,07	13.488,46	13.363,63
<i>Overall Heat Transfer, <math>U_f</math></i>	$\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$	1.122,53	1.257,71	1.298,28	1.327,67	1.131,12

<i>Overall Heat Transfer,</i> $U_c$	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	1.451,33	1.685,55	1.759,22	1.813,63	1.465,72
<i>Condenser Cleanliness</i>	%	77,35	74,62	73,80	73,21	77,17

#### 4.3.2 Setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning condenser*

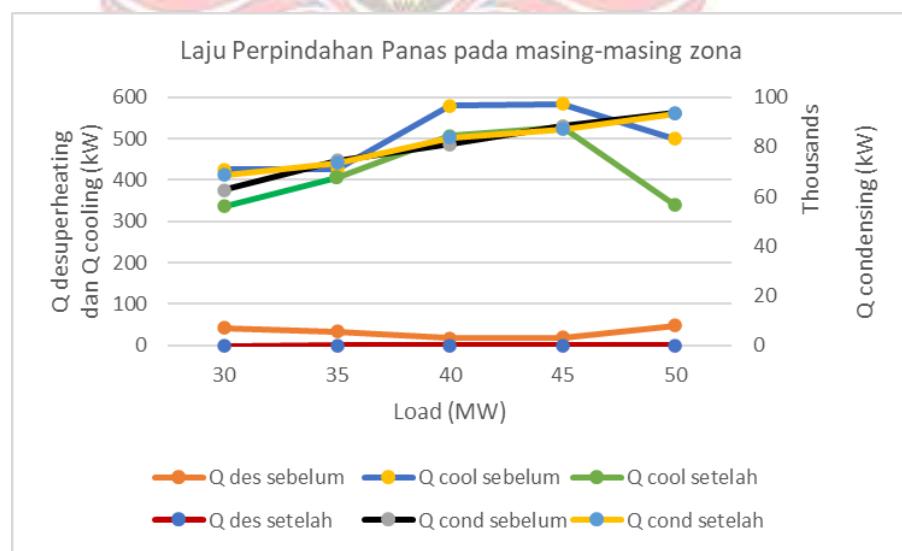
Tabel 4.6 Hasil pengolahan data setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning condenser*.

Parameter	Satuan	Nilai				
		28/07/19	31/07/19	13/08/19	02/09/19	18/09/19
<b>Beban</b>	MW	30	35	40	45	50
<b>Vakum Kondensor</b>	kPa	-75	-76,2	-77	-78,5	-81,8
<b>Q desuper</b>	kW	8,20	27,69	43,16	18,90	10,30
<b>Q cond</b>	kW	68.608,37	73.517,86	83.741,41	87.083,15	93.492,52
<b>Q cool</b>	kW	335,82	404,36	507,18	528,78	339,47
<b>Q tot</b>	kW	68.952,39	75949,91	84.291,75	87.630,83	93.842,29
<b>LMTD</b>	$^\circ C$	24,392	22,081	22,093	24,262	20,542
<b>Reynold Number</b>		9761,619418	9893,776863	13960,50624	13.561,32	16.824,44

<i>Nusselt Number</i>		64,80	64,95	85,74	86,10	102,17
<b>koefisien konveksi pipa air pendingin</b>	$\frac{W}{m^2 \cdot C}$	1.488,24	1.494,77	1.972,07	1.967,62	2.335,56
<i>Jacob Number</i>		0,00021	0,00018	0,00018	0,00019	0,00021
<b>Panas Laten</b>	kJ/kg	2.343,96	2.346,18	2.348,39	2.350,59	2.360,87
<i>Nusselt Number</i>		1.416,91	1.478,66	1.474,25	1.452,17	1.386,19
<b>koefisien konveksi pada shell</b>	$\frac{W}{m^2 \cdot C}$	16.276,88	16.964,08	16.892,64	15.903,64	15.773,41
<i>Overall Heat Transfer, <math>U_f</math></i>	$\frac{W}{m^2 \cdot C}$	1.042,49	1.048,48	1.267,21	1.259,48	1.402,64
<i>Overall Heat Transfer, <math>U_c</math></i>	$\frac{W}{m^2 \cdot C}$	1.320,26	1.329,89	1.702,66	1.688,74	1.956,48
<b>Condenser Cleanliness</b>	%	71,69	78,84	74,43	74,58	71,69



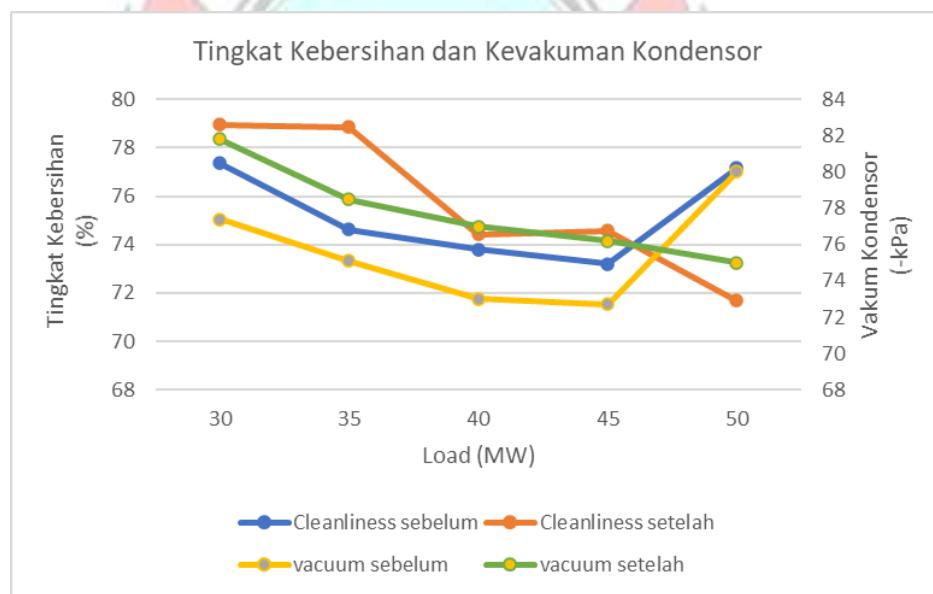
#### 4.4 Perbandingan kondisi sebelum dan setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning*



Gambar 4.1 Grafik laju perpindahan panas sebelum dan sesudah adanya *debris filter* dan *ball cleaning*

Gambar 4.1 merupakan grafik laju perpindahan panas sebelum dan sesudah adanya *debis filter* dan *ball cleaning* pada masing-masing zona dengan beban yang berbeda. Gambar tersebut menunjukkan bahwa sebelum adanya *debis filter* dan *ball cleaning* nilai laju perpindahan panas pada zona desuperheating berada pada *range* 17,83 kW sampai dengan 48,26 kW, zona condensing pada *range* 62.557,28 kW sampai 93.590,74 kW dan zona cooling pada *range* 424,5 kW sampai dengan 583,29 kW.

Sedangkan setelah adanya *debis filter* dan *ball cleaning* menunjukkan bahwa nilai laju perpindahan panas pada zona



desuperheating berada pada *range* 8,2 kW sampai dengan 43,16 kW, zona condensing pada *range* 68.608,37 kW sampai 93.492,52 kW dan zona cooling pada *range* 335,82 kW sampai dengan 528,78 kW.

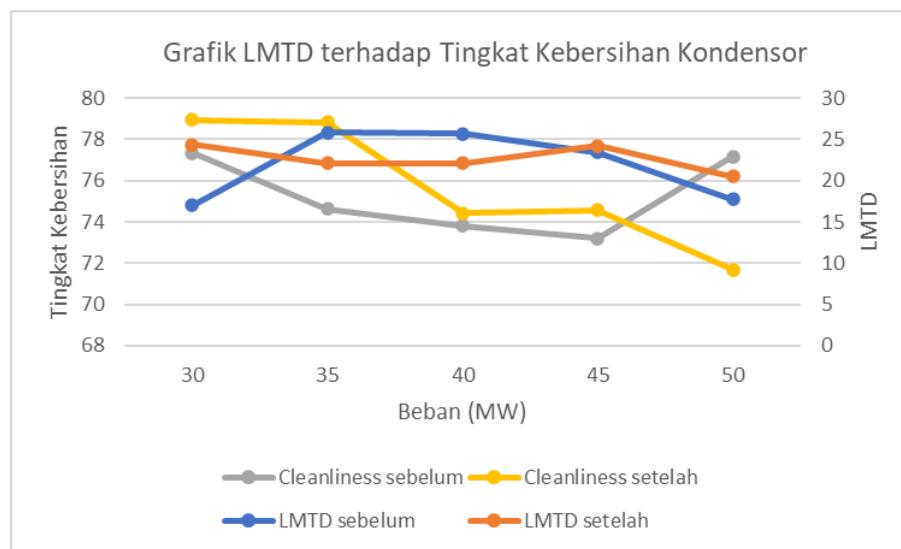
**Gambar 4.2** Grafik tingkat kebersihan dan kevakuman kondensor

Gambar 4.2 menunjukkan grafik hubungan antara tingkat kebersihan dan kevakuman kondensor sebelum dan setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning* dengan beban yang berbeda. Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa tingkat kevakuman kondensor berbanding terbalik dengan beban. Saat beban tinggi, maka kevakuman kondensor semakin rendah (mendekati nol), begitu juga sebaliknya. Hal ini disebabkan karena tingkat kebersihan kondensor rendah. Gambar 4.2 terlihat bahwa saat tingkat kebersihan kondensor rendah, menyebabkan vakum kondensor rendah dan saat tingkat kebersihan kondensor tinggi, menyebabkan vakum kondensor tinggi (menjauhi nol). Selain itu, setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning*, tingkat kebersihan kondensor meningkat 1-5% dan kevakuman kondensor meningkat 4-5% pada beban 30 – 45 MW. Berbeda pada beban 50 MW menunjukkan bahwa tingkat kebersihan dan kevakuman kondensor sebelum adanya *debris filter* dan *ball cleaning* lebih tinggi dari pada setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning* dikarenakan

sebelumnya terdapat pembersihan kondensor secara manual saat *Maintenance Outage* (MO).

**Gambar 4.3** Grafik LMTD terhadap tingkat kebersihan sebelum dan setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning*

Gambar 4.3 menunjukkan grafik hubungan antara *Logarithmic Mean*



*Temperature Difference (LMTD)* terhadap tingkat kebersihan kondensor.

Grafik di atas menunjukkan bahwa semakin tinggi perbedaan temperatur rata-rata antara aliran fluida dingin dan fluida panas, maka semakin rendah tingkat kebersihan kondensor, begitu pula sebaliknya. Tingkat kebersihan paling tinggi sebelum adanya *debris filter* dan *ball cleaning* yaitu 77,35% dengan LMTD sebesar 17,01°C. Sedangkan Tingkat kebersihan paling tinggi setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning* yaitu 78,96% dengan

LMTD sebesar 24,392 °C.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

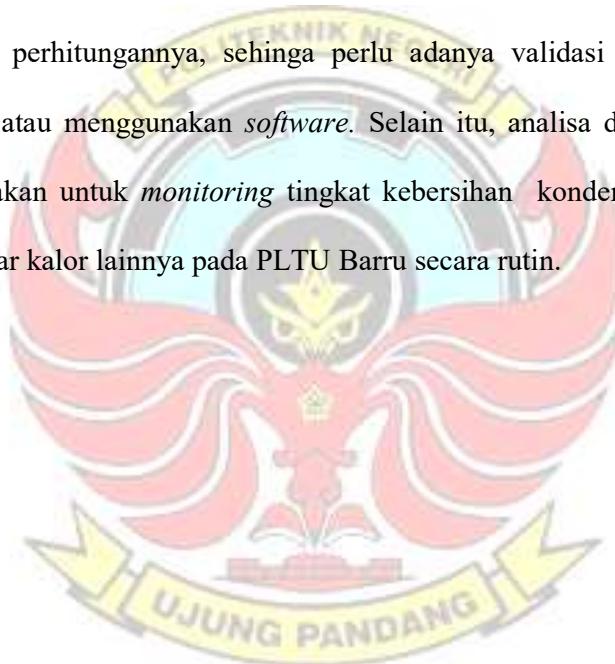
1. Laju perpindahan panas sebelum adanya *debis filter* dan *ball cleaning* dengan beban yang berbeda pada zona desuperheating berada pada *range* 17,83 kW sampai dengan 48,26 kW, zona condensing pada *range* 62.557,28 kW sampai 93.590,74 kW dan zona cooling pada *range* 424,5 kW sampai dengan 583,29 kW.
2. Laju perpindahan panas setelah adanya *debis filter* dan *ball cleaning* beban yang berbeda pada zona desuperheating berada pada *range* 8,2 kW sampai dengan 43,16 kW, zona condensing pada *range* 68.608,37 kW sampai 93.492,52 kW dan zona cooling pada *range* 335,82 kW sampai dengan 528,78 kW.
3. Tingkat kevakuman kondensor berbanding terbalik dengan beban. Saat beban tinggi, maka kevakuman kondensor semakin rendah (mendekati nol), begitu juga sebaliknya. Perubahan nilai vakum terjadi karena beberapa faktor antara lain sistem pendingin kurang bagus, tingkat kebersihan kondensor rendah, dan adanya udara luar yang masuk pada sistem kondensor.
4. Tingkat kebersihan kondensor berbanding lurus dengan tingkat kevakuman kondensor. Saat tingkat kebersihan kondensor rendah, menyebabkan vakum kondensor rendah (mendekati nol) dan saat

tingkat kebersihan kondensor tinggi, menyebabkan vakum kondensor tinggi (menjauhi nol).

5. Setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning*, tingkat kebersihan kondensor meningkat 1-5% dan kevakuman kondensor meningkat  $3,4 - 4,4$  (-kPa) pada beban  $30 - 45$  MW

## 5.2 Saran

Dalam analisa di atas terdapat parameter yang menggunakan asumsi dalam perhitungannya, sehingga perlu adanya validasi perhitungan dari pakar atau menggunakan *software*. Selain itu, analisa di atas juga dapat digunakan untuk *monitoring* tingkat kebersihan kondensor maupun alat penukar kalor lainnya pada PLTU Barru secara rutin.



## DAFTAR PUSTAKA

- A.Grunsky. 2001. *Condenser Application and Maintenance Guide*. United States America: EPRI.
- J.P. Holman. 2010. *Heat Transfer 10<sup>th</sup> Edition*. United States: McGraw-Hill.
- Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine. 2011. *Fundamentals Of Heat and Mass Transfer 7<sup>th</sup> Edition*. United States Of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Yunus A Cengel. 2008. *Introduction To Thermodynamics And Heat Transfer 2<sup>nd</sup> Edition*. United States Of America: McGraw Hill.
- Electric Engineering Technical Service Subsidiary of Wuhan Qingyuan Electric Co., Ltd. 2012. *Operation Manual Turbine PLTU SULAWESI SELATAN 2×50 MW COALFIRED STEAM POWER PLANT*. Electric Engineering Technical Service Subsidiary of Wuhan Qingyuan Electric Co., Ltd.
- Electric Engineering Technical Service Subsidiary of Wuhan Qingyuan Electric Co., Ltd. 2012. *Maintenance Manual Turbine PLTU SULAWESI SELATAN 2×50 MW COALFIRED STEAM POWER PLANT*. Electric Engineering Technical Service Subsidiary of Wuhan Qingyuan Electric Co., Ltd.
- Manual Book Operating Instructions Taprogge Filter System.*
- Manual Book Operating Instructions Taprogge Tube Cleaning System.*
- Sadik Kakac, Hongtan Liu, Anchasa Pramuanjaroenkij. 2012. *Heat Exchanger – Selection, Rating and Thermal Design*. New York: CRC Press.
- Handayani, Yeyet. 2018. Analisis Pengaruh Perubahan Kevakuman Kondensor Terhadap Efisiensi Turbin Uap. Jakarta: Politeknik Negeri Jakarta.
- Afifah Nur Esti. 2015. Analisis Pengaruh Perbedaan Material Tube Pada Kondensor Unit 3 dan Unit 4 PT PJB UP Gresik Ditinjau dari Laju Perpindahan Panas. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Bono Fatkhurrahman Maulana dan Wiwik Purwati Widyaningsih. 2014. Analisis Kinerja Kondensor Terhadap Perubahan Tekanan Vakum di PT PLN Sektor Pembangkitan PLTGU Cilegon. Semarang: Politeknik Negeri Semarang.

Prayudi, Sudirmanto, dan Wijaya D.I. 2016. Analisis Kinerja Kondensor Sebelum dan Sesudah Overhaul di PT Indonesia Power UJP PLTU Lontar Banten Unit 3. Jakarta: Sekolah Tinggi Teknik PLN.

Pedoman Penulisan Proposal dan Skripsi Program Diploma Empat (D-4).2016.  
Makassar. Politeknik Negeri Ujung Pandang



Lampiran 1

Data sebelum adanya *debris filter* dan *ball cleaning*

Tanggal		04/01/19	05/03/19	01/03/19	27/02/19	07/02/19
Nama	Satuan	Data				
Beban	MW	30	35	40	45	50
Vacuum condenser	kPa	-80,4	-72,7	-73	-75,1	-77,4
<i>Steam Exhaust Inlet Temperature, <math>T_{hi}</math></i>	°C	60,2	67,1	67,3	65,3	63,7
<i>Steam Exhaust Outlet Temperature (hotwell), <math>T_{ho}</math></i>	°C	57,3	63,3	63	61,3	60
<i>Steam Exhaust Mass Flow, <math>m_{steam}</math></i>	ton/h	95,631	114,456	124,656	135,605	143,352
<i>Main Steam Flow, <math>msf</math></i>	ton/h	127	152	168	185	198
<i>Surface Temperature, <math>T_{surface}</math></i>	°C	59,2	66	66,5	64,5	62,5
<i>Sea Water Inlet Temperature, <math>T_{c,i}</math></i>	°C	28,8	30,9	30,8	30,7	29,3
<i>Sea Water Outlet Temperature, <math>T_{c,o}</math></i>	°C	43	46,5	47,20	47,1	54,2
<i>Physical Properties Steam Side</i>						
<i>Steam Exhaust Mass Flow, <math>m_{steam}</math></i>	kg/s	26,56	31,79	34,63	37,67	39,82
<i>Steam Exhaust Pressure, <math>P_{team}</math></i>	bar	0,21	0,28	0,28	0,26	0,24
<i>Steam Exhaust Sat. Temperature, <math>T_{sat}</math></i>	°C	61,12	66,50	67,00	65,00	63,00

<i>Mean Temperature, <math>T_{mean}</math></i>	°C	60,16	66,25	66,75	64,75	62,75
<i>Specific Volume, <math>v_f</math></i>	m³/kg	0,001017073	0,001020489	0,00102077	0,001019646	0,001018523
<i>Specific Volume, <math>v_g</math></i>	m³/kg	7,619848	5,905025	5,789635	6,267175	6,856575
<i>Density Vapour, <math>\rho_f</math></i>	kg/m³	983,2136	979,9223	979,652518	980,7324	981,8135
<i>Density Vapour, <math>\rho_g</math></i>	kg/m³	0,13123621	0,16934729	0,17272246	0,159561525	0,145845411
<i>Specific Heat, <math>c_{pf}</math></i>	kJ/kg°C	4,179	4,183	4,184	4,182	4,181
<i>Specific Heat, <math>h_{fg}</math></i>	kJ/kg	2357,31	2342,3	2341,06	2346,015	2350,935
<i>Absolut Viscosity, <math>\mu_f</math></i>	kg/m.s	0,000469819	0,000426349	0,000423741	0,000435945	0,000450705
<i>Thermal Conductivity, <math>k_f</math></i>	W/m°K	0,654144	0,6597554	0,660295	0,658275	0,656477
<i>Pr</i>		3,001936	2,70482	2,686835	2,7706	2,8714
<i>Physical Properties Water Side</i>						
<i>T mean</i>	°C	36,38	38,90	39,00	39,25	41,98
<i>Specific Volume, <math>v_f</math></i>	m³/kg	0,00100654	0,00100754	0,00100758	0,00100769	0,00100889
<i>Density Sea Water, <math>\rho_f</math></i>	kg/m³	993,47842	992,51568	992,47243	992,36448	991,1837
<i>Specific Heat, <math>c_{pf}</math></i>	kJ/kg°C	4,174	4,174	4,174	4,174	4,174
<i>Absolut Viscosity, <math>\mu_f</math></i>	kg/m.s	0,0007029	0,00066866	0,00066749	0,00066452	0,0006321
<i>Thermal Conductivity, <math>k_f</math></i>	W/m°C	0,6282374	0,6314126	0,6315386	0,6318536	0,635292
<i>Pr</i>		4,678561	4,431118	4,422298	4,400248	4,15956
<i>Laju Perpindahan Panas</i>						
<i>Enthalpy of Vapour , <math>h_v</math> (desuperheater)</i>	kJ/kg	2609,19	2621,127	2621,471	2618,028	2615,265
<i>Enthalpy of Vapour , <math>h_v</math> (condensation)</i>	kJ/kg	2610,79	2620,096	2620,956	2617,511	2614,053
<i>Enthalpy of Fluid , <math>h_f</math> (condensation)</i>	kJ/kg	255,84	278,359	280,453	272,079	263,708
<i>Enthalpy of Fluid , <math>h_f</math> (cooling zone)</i>	kJ/kg	239,86	264,963	263,708	256,594	251,154

$Q_{desuperheater}$	kW	42,50	32,78	17,83	19,47	48,26
$Q_{condensation}$	kW	62.557,28	74.451,63	81.043,82	88.347,86	93.590,74
$Q_{cooling}$	kW	424,50	425,90	579,82	583,29	499,90
$Q_{total}$	kW	63.024,28	74.910,31	81.641,47	88.950,63	94.138,90
<b>Koefisien Konveksi Dalam, <math>hi</math></b>						
<i>Cooling Water Flow</i>	kg/s	996,65	1.121,68	1.192,65	1.246,24	889,69
<i>Cooling Water Flow perpipe</i>	kg/s	0,18	0,20	0,22	0,23	0,16
<i>Reynold Number, <math>hg</math></i>		11968,31014	14159,48164	15081,80511	15829,81901	11880,54784
<i>Nusselt Number, <math>N_u</math></i>		78,02	87,33	91,78	95,21	74,00
<i>Koefisien Konveksi Dalam, <math>hi</math></i>	W/m <sup>2</sup> °C	1782,338202	2005,171837	2107,739351	2187,677135	1709,451013
<b>Koefisien Konveksi Luar, <math>ho</math></b>						
<i>Jacob Number, <math>T_{surface}</math></i>		0,00170	0,00045	0,00045	0,00045	0,00044
<i>Kalor Laten Penguapan, <math>h'_{fg}</math></i>	kJ/kg	2.360,04	2.343,01	2.341,77	2.346,73	2.351,65
<i>Nusselt Number, <math>N_u</math></i>		1.168,10	1.175,79	1.181,98	1.180,73	827,76
<i>Koefisien Konveksi Luar, <math>h_o</math></i>	W/m <sup>2</sup> °C	27386,8716	27642,69121	27873,46282	27821,21438	19338,33252
<i>Koefisien Konveksi Luar Per Tube, <math>h_o</math></i>	W/m <sup>2</sup> °C	13.363,63	13.488,46	13.601,07	13.575,58	9.436,29
<b>Overall Heat Transfer Coefficient</b>						
$k$ Titanium dengan $T_{mean}$	W/m°C	21,40	21,31	21,30	21,33	21,36
<i>Overall Heat Transfer Coefficient (fouled), <math>U_{of}</math></i>	W/m°C	1.122,53	1.257,71	1.298,28	1.327,67	1.131,12
<i>Overall Heat Transfer Coefficient (clean), <math>U_{oc}</math></i>	W/m°C	1.451,33	1.685,55	1.759,22	1.813,63	1.465,72
<i>Conndenser Cleanliness</i>	%	77,35	74,62	73,80	73,21	77,17
LMTD	°C	21,804	25,821	25,677	23,443	17,724

Lampiran 2

Data setelah adanya *debris filter* dan *ball cleaning*

Tanggal		28/07/19	31/07/19	13/08/19	02/09/19	18/09/19
Nama	Satuan	Data				
Beban	MW	30	35	40	45	50
Vacuum condenser	kPa	-75	-76,2	-77	-78,5	-81,8
<i>Steam Exhaust Inlet Temperature, <math>T_{hi}</math></i>	°C	66	65,4	64,7	63,4	59,1
<i>Steam Exhaust Outlet Temperature (hotwell), <math>T_{ho}</math></i>	°C	63,1	61,9	60,6	59,7	56,9
<i>Steam Exhaust Mass Flow, <math>m_{uap}</math></i>	ton/h	105,4	115,9	128,4	133,4	142,6
<i>Main Steam Flow, msf</i>	ton/h	138	154	173	182	197
<i>Surface Temperature, <math>T_{surface}</math></i>	°C	65,6	64,7	63,8	62,9	58,70
<i>Sea Water Inlet Temperature, <math>T_{c,i}</math></i>	°C	28,3	28,2	30,5	27,2	28,6
<i>Sea Water Outlet Temperature, <math>T_{c,o}</math></i>	°C	49,70	51,90	49,05	45,85	44,75
Physical Properties Steam Side						
<i>Steam Exhaust Mass Flow, <math>m_{steam}</math></i>	kg/s	29,28	32,19	35,67	37,06	39,61
<i>Steam Exhaust Pressure, <math>P_{team}</math></i>	bar	0,26	0,25	0,24	0,23	0,19
<i>Steam Exhaust Sat. Temperature, <math>T_{sat}</math></i>	°C	65,84	64,90	64,00	63,11	58,95

<i>Mean Temperature, <math>T_{mean}</math></i>	°C	65,72	64,80	63,90	63,01	58,83
<i>Specific Volume, <math>v_f</math></i>	m³/kg	0,001020191	0,001019674	0,001019166	0,001018669	0,001016462
<i>Specific Volume, <math>v_g</math></i>	m³/kg	6,0273384	6,25244	6,51767	6,779953	8,1108746
<i>Density Vapour, <math>\rho_f</math></i>	kg/m³	980,208273	980,7054	981,194	981,6731	983,805036
<i>Density Vapour, <math>\rho_g</math></i>	kg/m³	0,165910711	0,15993756	0,153429063	0,147493648	0,123291266
<i>Specific Heat, <math>c_{pf}</math></i>	kJ/kg°C	4,183	4,182	4,182	4,181	4,179
<i>Specific Heat, <math>h_{fg}</math></i>	kJ/kg	2343,6144	2345,892	2348,108	2350,2954	2360,5314
<i>Absolut Viscosity, <math>\mu_f</math></i>	kg/m.s	0,000429113	0,000435576	0,000442218	0,000448766	0,000479838
<i>Thermal Conductivity, <math>k_f</math></i>	W/m°K	0,659183453	0,65832	0,65751	0,6567115	0,652948
<i>Pr</i>		2,723884892	2,76808	2,81344	2,858156	3,071025
<b>Physical Properties Water Side</b>						
<i>T mean</i>	°C	39,00	40,05	39,78	36,53	36,68
<i>Specific Volume, <math>v_f</math></i>	m³/kg	0,00100758	0,00100805	0,00100793	0,00100662	0,00100667
<i>Density Sea Water, <math>\rho_f</math></i>	kg/m³	992,47243	992,01837	992,135	993,427158	993,375899
<i>Specific Heat, <math>c_{pf}</math></i>	kJ/kg°C	4,174	4,174	4,174	4,174	4,174
<i>Absolut Viscosity, <math>\mu_f</math></i>	kg/m.s	0,00066749	0,00065501	0,00065822	0,00070066	0,00069842
<i>Thermal Conductivity, <math>k_f</math></i>	W/m°C	0,631539	0,632863	0,63252	0,628426	0,628615
<i>Pr</i>		4,422288	4,329585	4,35342	4,6626	4,6467
<b>Laju Perpindahan Panas</b>						
<i>Enthalpy of Vapour , <math>h_v</math> (desuperheater)</i>	kJ/kg	2619,24	2618,2	2616,99	2614,75	2.607,28
<i>Enthalpy of Vapour , <math>h_v</math> (condensation)</i>	kJ/kg	2618,96	2617,34	2615,78	2614,24	2607,02
<i>Enthalpy of Fluid , <math>h_f</math> (condensation)</i>	kJ/kg	275,6	271,66	267,89	264,17	246,76
<i>Enthalpy of Fluid , <math>h_f</math> (cooling zone)</i>	kJ/kg	264,13	259,1	253,67	249,9	238,19

$Q_{desuperheater}$	kW	8,20	27,69	43,16	18,90	10,30
$Q_{condensation}$	kW	68.608,37	75.517,86	83.741,41	87.083,15	93.492,52
$Q_{cooling}$	kW	335,82	404,36	507,18	528,78	339,47
$Q_{total}$	kW	68.952,39	75.949,91	84.291,75	87.630,83	93.842,29
<b>Koefisien Konveksi Dalam, <math>h_i</math></b>						
<i>Cooling Water Flow</i>	kg/s	771,94	767,76	1.088,65	1.125,71	1.392,11
<i>Cooling Water Flow perpipe</i>	kg/s	0,14	0,14	0,20	0,21	0,25
<i>Reynold Number, <math>h_g</math></i>		9761,619418	9893,776863	13960,50624	13.561,32	16.824,44
<i>Nusselt Number, <math>N_u</math></i>		64,80	64,95	85,74	86,10	102,17
<i>Koefisien Konveksi Dalam, <math>h_i</math></i>	W/m <sup>2</sup> °C	1.488,24	1.494,77	1.972,07	1.967,62	2.335,56
<b>Koefisien Konveksi Luar, <math>h_o</math></b>						
<i>Jacob Number, <math>T_{surface}</math></i>		0,00021	0,00018	0,00018	0,00019	0,00021
<i>Kalor Laten Penguapan, <math>h'_{fg}</math></i>	kJ/kg	2.343,96	2.346,18	2.348,39	2.350,59	2.360,87
<i>Nusselt Number, <math>N_u</math></i>		1.416,91	1.478,66	1.474,25	1.452,17	1.386,19
<i>Koefisien Konveksi Luar, <math>h_o</math></i>	W/m <sup>2</sup> °C	33357,16332	34765,46803	34619,06511	32592,24856	32.325,37
<i>Koefisien Konveksi Luar Per Tube, <math>h_o</math></i>	W/m <sup>2</sup> °C	16.276,88	16.964,08	16.892,64	15.903,64	15.773,41
<b>Overall Heat Transfer Coefficient</b>						
$k$ Titanium dengan $T_{mean}$	W/m°C	21,32	21,33	21,34	21,36	21,42
<i>Overall Heat Transfer Coefficient (fouled), <math>U_{of}</math></i>	W/m°C	1.042,49	1.048,48	1.267,21	1.259,48	1.402,64
<i>Overall Heat Transfer Coefficient (clean), <math>U_{oc}</math></i>	W/m°C	1.320,26	1.329,89	1.702,66	1.688,74	1.956,48
<i>Conndenser Cleanliness</i>	%	78,96	78,84	74,43	74,58	71,69
LMTD	°C	24,392	22,081	22,093	24,262	20,542

### Lampiran 3

**TABLE A-4**

Saturated water—Temperature table

Temp., <i>T</i> °C	Sat. press., <i>P<sub>sat</sub></i> , kPa	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, <i>v<sub>f</sub></i>	Sat. vapor, <i>v<sub>g</sub></i>	Sat. liquid, <i>u<sub>f</sub></i>	Evap., <i>u<sub>fg</sub></i>	Sat. vapor, <i>u<sub>g</sub></i>	Sat. liquid, <i>h<sub>f</sub></i>	Evap., <i>h<sub>fg</sub></i>	Sat. vapor, <i>h<sub>g</sub></i>	Sat. liquid, <i>s<sub>f</sub></i>	Evap., <i>s<sub>fg</sub></i>	Sat. vapor, <i>s<sub>g</sub></i>
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.9593	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827

*Steam Table*



Lampiran 4

Tabel *Properties of water*

**Table A-9** | Properties of water (saturated liquid).†

Note: $\text{Gr}_x \text{Pr} = \left( \frac{g\beta\rho^2 c_p}{\mu k} \right) x^3 \Delta T$							
°F	°C	$c_p$ kJ/kg · °C	$\rho$ kg/m³	$\mu$ kg/m · s	$k$ W/m · °C	Pr	$\frac{g\beta\rho^2 c_p}{\mu k}$ 1/m³ · °C
32	0	4.225	999.8	$1.79 \times 10^{-3}$	0.566	13.25	
40	4.44	4.208	999.8	1.55	0.575	11.35	$1.91 \times 10^9$
50	10	4.195	999.2	1.31	0.585	9.40	$6.34 \times 10^9$
60	15.56	4.186	998.6	1.12	0.595	7.88	$1.08 \times 10^{10}$
70	21.11	4.179	997.4	$9.8 \times 10^{-4}$	0.604	6.78	$1.46 \times 10^{10}$
80	26.67	4.179	995.8	8.6	0.614	5.85	$1.91 \times 10^{10}$
90	32.22	4.174	994.9	7.65	0.623	5.12	$2.48 \times 10^{10}$
100	37.78	4.174	993.0	6.82	0.630	4.53	$3.3 \times 10^{10}$
110	43.33	4.174	990.6	6.16	0.637	4.04	$4.19 \times 10^{10}$
120	48.89	4.174	988.8	5.62	0.644	3.64	$4.89 \times 10^{10}$
130	54.44	4.179	985.7	5.13	0.649	3.30	$5.66 \times 10^{10}$
140	60	4.179	983.3	4.71	0.654	3.01	$6.48 \times 10^{10}$
150	65.55	4.183	980.3	4.3	0.659	2.73	$7.62 \times 10^{10}$
160	71.11	4.186	977.3	4.01	0.665	2.53	$8.84 \times 10^{10}$
170	76.67	4.191	973.7	3.72	0.668	2.33	$9.85 \times 10^{10}$
180	82.22	4.195	970.2	3.47	0.673	2.16	$1.09 \times 10^{11}$
190	87.78	4.199	966.7	3.27	0.675	2.03	
200	93.33	4.204	963.2	3.06	0.678	1.90	
220	104.4	4.216	955.1	2.67	0.684	1.66	
240	115.6	4.229	946.7	2.44	0.685	1.51	
260	126.7	4.250	937.2	2.19	0.685	1.36	
280	137.8	4.271	928.1	1.98	0.685	1.24	
300	148.9	4.296	918.0	1.86	0.684	1.17	
350	176.7	4.371	890.4	1.57	0.677	1.02	
400	204.4	4.467	859.4	1.36	0.665	1.00	
450	232.2	4.585	825.7	1.20	0.646	0.85	
500	260	4.731	785.2	1.07	0.616	0.83	
550	287.7	5.024	735.5	$9.51 \times 10^{-5}$			
600	315.6	5.703	678.7	8.68			

Lampiran 5

Tabel *Representative Fouling Factor* 56

**TABLE 11.1** Representative Fouling Factors [1]

Fluid	$R_f''$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )
Seawater and treated boiler feedwater (below 50°C)	0.0001
Seawater and treated boiler feedwater (above 50°C)	0.0002
River water (below 50°C)	0.0002–0.001
Fuel oil	0.0009
Refrigerating liquids	0.0002
Steam (nonoil bearing)	0.0001

Lampiran 6

Tabel *Properties of titanium*

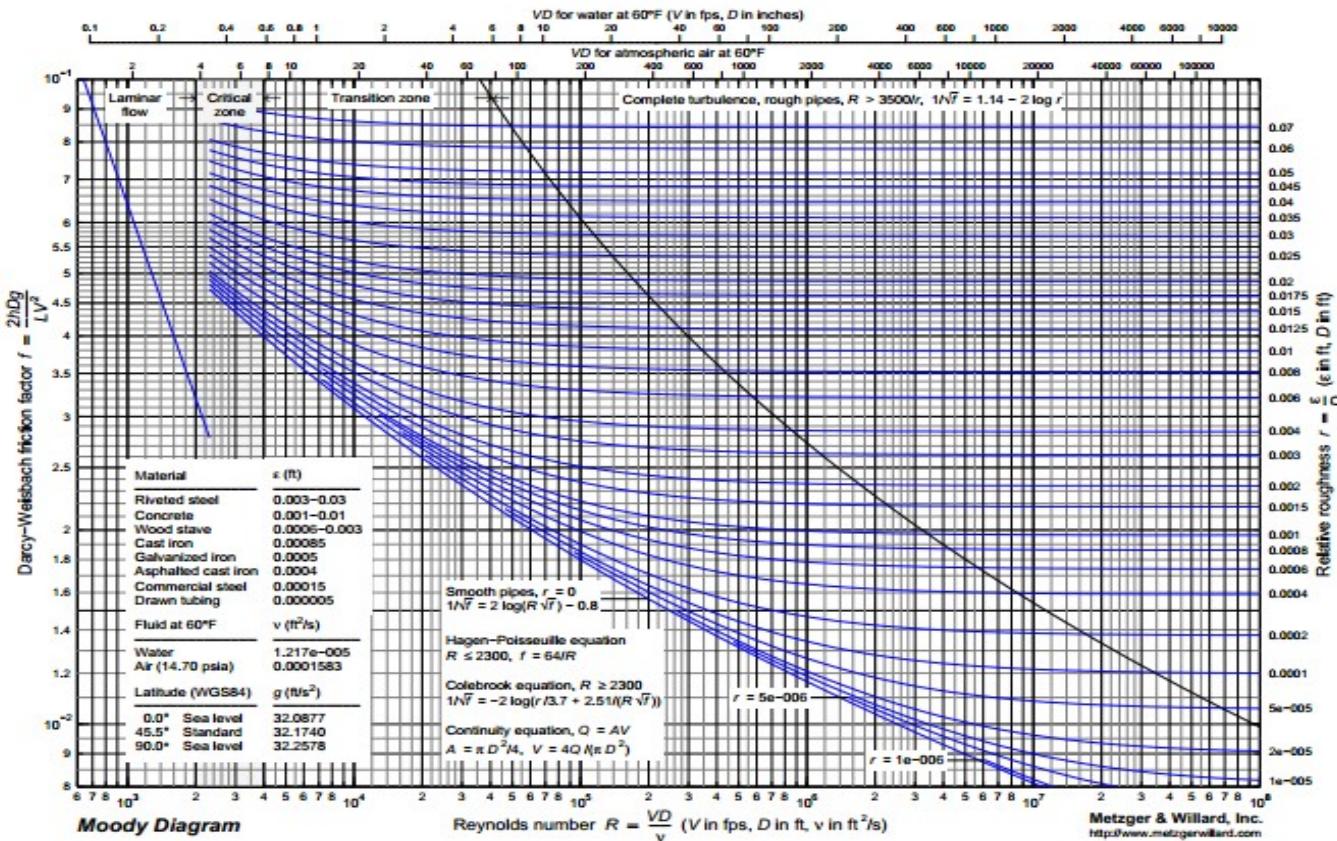
**TABLE A.1** *Continued*

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K)									
		$\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$c_p$ (J/kg · K)	$k$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$k$ (W/m · K) / $c_p$ (J/kg · K)									
						100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Titanium	1953	4500	522	21.9	9.32	30.5 300	24.5 465	20.4 551	19.4 591	19.7 633	20.7 675	22.0 620	24.5 686		
Tungsten	3660	19300	132	174	68.3	208 87	186 122	159 137	137 142	125 145	118 148	113 152	107 157	100 167	95 176
Uranium	1406	19070	116	27.6	12.5	21.7 94	25.1 108	29.6 125	34.0 146	38.8 176	43.9 180	49.0 161			
Vanadium	2192	6100	489	30.7	10.3	35.8 258	31.3 430	31.3 515	33.3 540	35.7 563	38.2 597	40.8 645	44.6 714	50.9 867	
Zinc	693	7140	389	116	41.8	117 297	118 367	111 402	103 436						
Zirconium	2125	6570	278	22.7	12.4	33.2 205	25.2 264	21.6 300	20.7 322	21.6 342	23.7 362	26.0 344	28.8 344	33.0 344	



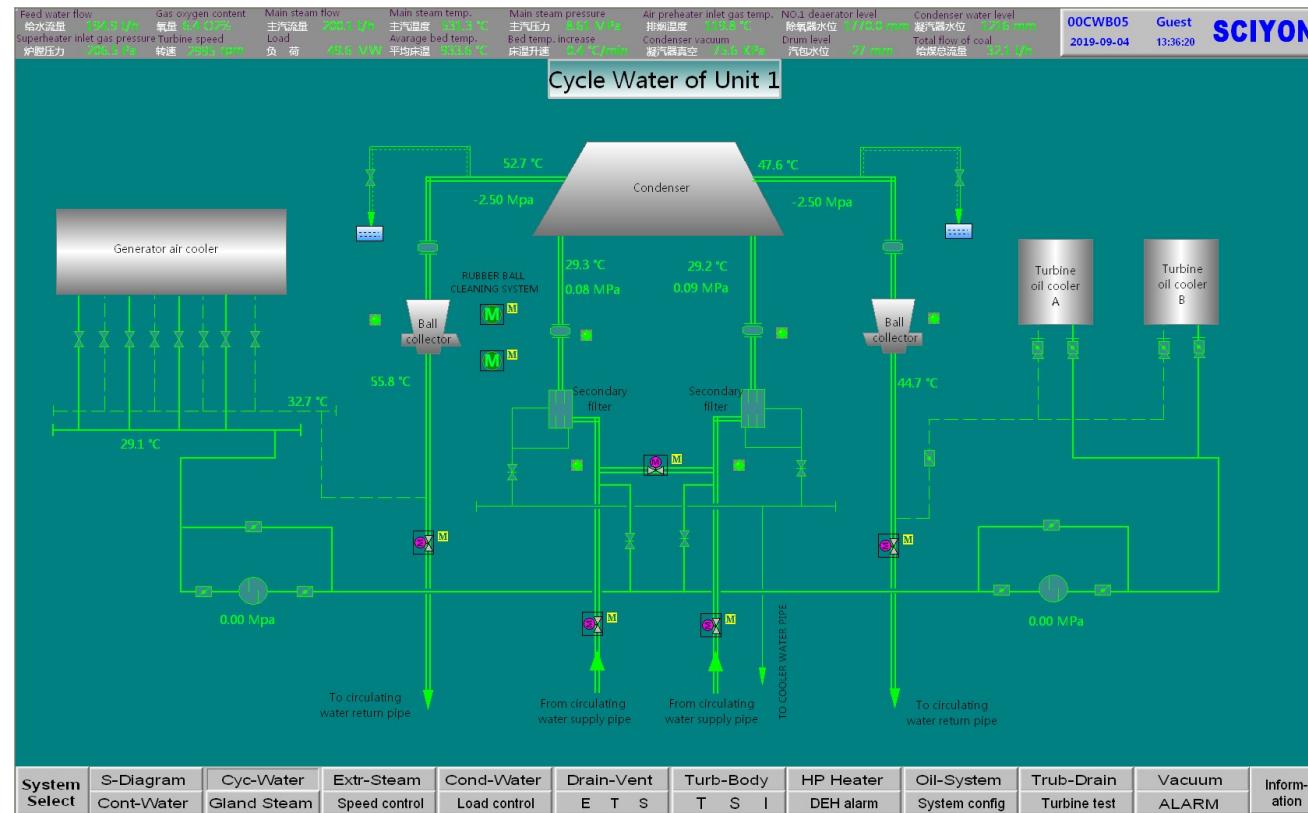
## Lampiran 7

### Moody Diagram



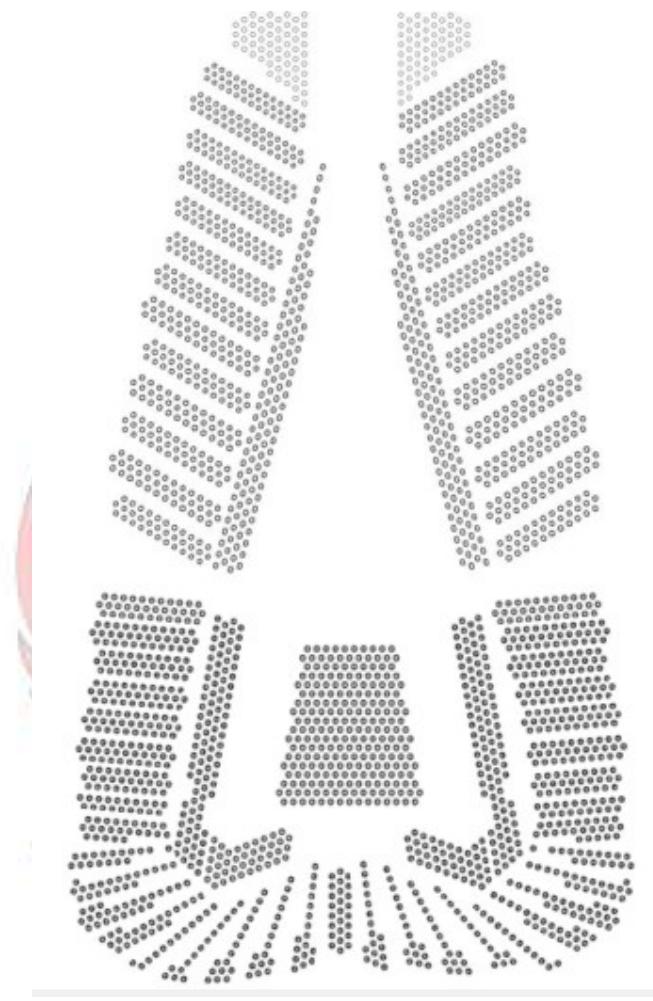
## Lampiran 8

Gambar sistem pendingin PLTU Barru



Lampiran 9

Desain pipa kondensor PLTU Barru





Lampiran 10

Spesifikasi *ball cleaning*



**27-S 16 0 - 3**

Arrows point from the numbers in the code to the following descriptions:

- Nominal ball diameter (mm) 27
- Ball type S = sponge ball
- Ball recipe no. 16 = dark blue
- Ball Ø field of tolerance 0 =  $27^0_{+1}$  = 27 – 28 mm
- Hardness degree (elasticity) 3 = medium

Ball type (sponge rubber ball)	Rubber recipe (Colour)	Ball Ø field of tolerance (in mm)	Hardness degree (elasticity)
G = plastic granulate ball	11 = green	0 = $^0_{+1}$ (standard)	1 = soft
L = long life ball	13 = orange	1 = $^0_{+0,5}$ *	2 = medium/soft*
P = polishing ball (standard ball)	15 = brown	2 = $^{+0,5}_{+1,0}$ *	3 = medium
R = ring-coated corundum ball	16 = dark blue	* special balls	4 = medium/hard*
S = sponge ball	20 = blue		5 = hard
T = totally coated corundum ball	22 = red		6 = extra hard*
	30 = light brown		* special balls

## Lampiran 11

### Spesifikasi debris filter

