

**PENGARUH JUMLAH *PLUGGING TUBE HIGH PRESSURE*
FEEDWATER HEATER TERHADAP EFISIENSI PLTU 400 MW**

TESIS

Untuk memenuhi salah satu syarat mencapai derajat pendidikan Strata Dua (S-2)
Sebagai Magister Sains pada Program Studi Magister Energi



Disusun Oleh :

AKBAR DWITAMA

30000421420048

**PROGRAM STUDI MAGISTER ENERGI
SEKOLAH PASCA SARJANA UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG**

AGUSTUS, 2023

PERSETUJUAN UJIAN TESIS

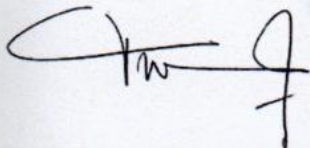
Yang bertanda tangan di bawah ini. Dosen Pembimbing dari :

Mahasiswa : AKBAR DWITAMA
NIM : 30000421420048
Program Studi : Magister Energi
Judul Tesis : *PENGARUH JUMLAH PLUGGING TUBE HIGH
PRESSURE FEEDWATER HEATER TERHADAP
EFISIENSI PLTU 400 MW*

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut telah melaksanakan Ujian Proposal Tesis dan Ujian Seminar Hasil Tesis sehingga menyetujui dan layak untuk melaksanakan Ujian Tesis.

Semarang, 31 Juli 2023

Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. Widayat, S.T., M.T., IPM
NIP. 197206091998031001

Pembimbing II



MSK Tony Suryo Utomo, M.T., Ph.D
NIP. 197104211999031003

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam tesis ini tidak terdapat karya yang pernah ditulis atau diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka.

Semarang, 04 Agustus 2023



Akbar Dwitama
NIM. 30000421420048

HALAMAN PENGESAHAN

TESIS

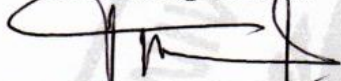
**PENGARUH JUMLAH *PLUGGING TUBE HIGH PRESSURE*
FEEDWATER HEATER TERHADAP EFISIENSI PLTU 400 MW**

Disusun Oleh :
AKBAR DWITAMA
30000421420048

Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji
Pada tanggal, 04 Agustus 2023


Tim Penguji,

Pembimbing Pertama



Prof. Dr. Ir. Widayat, S.T., M.T., IPM
NIP. 197206091998031001

Penguji Pertama




Prof. Dr. Ir. Hadivanto, S.T., M.Sc., IPU
NIP.19750281999031004

Pembimbing Kedua



MSK Tony Surjo Utomo, M.T., Ph.D
NIP. 197104211999031003

Penguji Kedua




Dr. Muchammad, S.T., M.T.
NIP. 197303051997021001

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Magister Energi

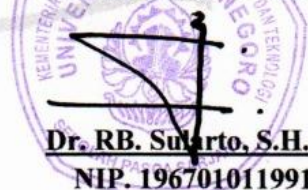

Tanggal, 04 Agustus 2023

Ketua Program Studi Magister Energi



Dr. Ir. Jaka Windarta, M.T., IPU, Asean.Eng
NIP. 196405261989031002

Dekan Sekolah Pascasarjana



Dr. RB. Sularto, S.H., M. Hum
NIP. 196701011991031005

**PERNYATAAN PERSETUJUAN
PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Akbar Dwitama
NIM : 30000421420048
Program Studi : Magister Energi
Sekolah : Program Pascasarjana
Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:


“PENGARUH JUMLAH *PLUGGING TUBE HIGH PRESSURE FEEDWATER HEATER* TERHADAP EFISIENSI PLTU 400 MW”

Beserta perangkat yang ada. Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Program Studi Magister Energi Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalihmedia / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tesis saya selama mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Dibuat di: Semarang

Pada Tanggal, 04 Agustus 2023

Yang menyatakan

 Akbar Dwitama

30000421420048

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “**PENGARUH JUMLAH *PLUGGING TUBE HIGH PRESSURE FEEDWATER HEATER* TERHADAP EFISIENSI PLTU 400 MW**” dengan lancar. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Magister Energi, Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang.

Pada kesempatan ini penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membimbing, memberi bantuan, arahan dan saran dalam penyusunan tesis ini yaitu kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Widayat, S.T., M.T., IPM selaku Dosen Pembimbing Pertama atas waktu, tenaga, petunjuk, dan keramah tamahannya dalam membimbing penulis mengerjakan tesis ini.
2. MSK Toni Suryo Utomo, M.T., Ph.D selaku Dosen Pembimbing Kedua atas waktu, tenaga, petunjuk, dan keramah-tamahannya dalam membimbing penulis mengerjakan tesis ini.
3. Prof. Dr. Hadiyanto, S.T., M.Sc., IPU & Dr. Muchammad, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji atas waktu, saran, masukan dan keramahannya dalam menguji tesis ini.
4. Dr. R.B. Sularto, S.H., M.Hum, selaku Dekan Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro Semarang.
5. Dr. Ir. Jaka Windarta, M.T., IPU, selaku Ketua Program Studi Magister Energi Universitas Diponegoro Semarang.
6. Orang Tua dan Keluarga yang selalu mendukung serta memberi semangat kepada penulis
7. Bapak dan Ibu Dosen Magister Energi yang telah memberikan pengajaran dan ilmu yang sangat luar biasa kepada penulis.

8. Rekan Kerja dari Divisi Engineering & Pemeliharaan Unit 1-4 SLAPGU yang telah membantu dalam memperoleh data-data yang diperlukan untuk penyusunan tesis ini.
9. Teman – teman Magister Energi yang selalu mendukung dan memberi semangat kepada penulis serta pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Akhir kata penulis memohon maaf apabila terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan tesis ini. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan dan pengembangan tesis ini kearah yang lebih baik. Mudah-mudahan usaha penyusunan tesis ini memperoleh ridha dari Allah SWT. Amin.

Semarang, 2023

Penyusun

Akbar Dwitama

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	1
PERSETUJUAN UJIAN TESIS	2
PERNYATAAN ORISINALITAS	3
HALAMAN PENGESAHAN TESIS	4
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	5
KATA PENGANTAR	6
DAFTAR ISI	8
DAFTAR TABEL	11
DAFTAR GAMBAR	12
DAFTAR LAMPIRAN	14
DAFTAR LAMBANG & NOTASI	15
INTISARI	19
ABSTRACT	20
BAB I PENDAHULUAN	Error! Bookmark not defined.
I.1 Latar Belakang	Error! Bookmark not defined.
I.2 Perumusan Masalah	Error! Bookmark not defined.
I.3 Tujuan Penelitian	Error! Bookmark not defined.
I.4 Manfaat Penelitian	Error! Bookmark not defined.
I.5 Orisinalitas Penelitian	Error! Bookmark not defined.
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	Error! Bookmark not defined.
II.1 Prinsip Kerja PLTU	Error! Bookmark not defined.
II.1.1 Komponen PLTU (PLN, 1983)	Error! Bookmark not defined.
II.1.2 Siklus Air dan Uap (PLN, 1983)	Error! Bookmark not defined.
II.2 Siklus <i>Rankine</i> PLTU	Error! Bookmark not defined.
II.3 Sistem Air Pengisi <i>Boiler</i> (PLN, 1983)	Error! Bookmark not defined.
II.3.1 Sistem Aliran Air Pengisi	Error! Bookmark not defined.
II.3.2 Sistem Aliran <i>Bledsteam</i>	Error! Bookmark not defined.
II.4 Perhitungan Kerja dan Kalor pada Siklus <i>Rankine</i>	Error! Bookmark not defined.
II.5 <i>Heat Transfer</i>	Error! Bookmark not defined.
II.5.1 Konduksi	Error! Bookmark not defined.

II.5.2	Konveksi	Error! Bookmark not defined.
II.5.3	Radiasi.....	Error! Bookmark not defined.
II.6	<i>Heat exchanger</i>	Error! Bookmark not defined.
II.6.1	<i>Heat exchanger Type</i>	Error! Bookmark not defined.
II.6.2	<i>Shell & Tube Heat exchanger</i>	Error! Bookmark not defined.
II.7	<i>High Pressure Feedwater heater (HPH)</i>	Error! Bookmark not defined.
II.7.1	Zona Pemanasan <i>High Pressure Feedwater Heater</i>	Error! Bookmark not defined.
II.7.2	Analisis Termodinamika	Error! Bookmark not defined.
II.7.3	Analisis Perpindahan Panas	Error! Bookmark not defined.
II.7.4.1	Perpindahan Panas Eksternal (Sisi <i>shell</i>)	Error! Bookmark not defined.
II.7.4.2	Perpindahan Panas <i>Internal</i> (Sisi <i>tube</i>)	Error! Bookmark not defined.
II.7.4.3	Analisis <i>Pressure drop</i>	Error! Bookmark not defined.
II.7.4.4	<i>Thermal resistance</i>	Error! Bookmark not defined.
II.7.4.5	Analisis Alat Penukar Panas dengan Metode <i>Number of Transfer Unit</i> (NTU)	Error! Bookmark not defined.
II.7.4.6	Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan.....	Error! Bookmark not defined.
II.7.4.7	<i>Log Mean Temperature Difference</i>	Error! Bookmark not defined.
II.7.4.8	Laju Perpindahan Panas Keseluruhan.....	Error! Bookmark not defined.
II.8	Penjelasan Perangkat Lunak <i>Cycle-tempo</i> (De Schans 23, n.d.).....	Error! Bookmark not defined.
II.9	<i>Cost Benefit Analysis</i> (Cummins, 2021)	Error! Bookmark not defined.
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		Error! Bookmark not defined.
III.1	Lokasi Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
III.2	Jenis Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
III.3	Kerangka Pikir Penelitian	Error! Bookmark not defined.
III.4	Ruang Lingkup Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
III.5	Jenis dan Sumber Data.....	Error! Bookmark not defined.
III.6	Teknik Pengumpulan Data.....	Error! Bookmark not defined.
III.7	Teknik Analisis Data.....	Error! Bookmark not defined.
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		Error! Bookmark not defined.
IV.1	Analisis Termodinamika	Error! Bookmark not defined.
IV.2	Analisis Batas <i>Plugging Tubes</i> HPH 5	Error! Bookmark not defined.
IV.3	Analisis Nilai <i>Effectiveness & Pressure drop</i> HPH 5	Error! Bookmark not defined.

IV.4	Perhitungan Temperatur <i>Outlet Feedwater</i> Serta Drain <i>Shell</i> HPH 5 dengan Variasi <i>Plugging</i> 10%, 20% dan 30%.....	Error! Bookmark not defined.
IV.5	Analisis NPHR & Efisiensi PLTU 400 MW (100% MCR) dengan Variasi Jumlah <i>Plugging</i> HPH 5	Error! Bookmark not defined.
IV.6	<i>Cost Benefit Analysis Retubing</i> HPH 5	Error! Bookmark not defined.
BAB V KESIMPULAN, REKOMENDASI & SARAN		Error! Bookmark not defined.
V.1	Kesimpulan	Error! Bookmark not defined.
V.2	Rekomendasi.....	Error! Bookmark not defined.
V.3	Saran	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR PUSTAKA		Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN		Error! Bookmark not defined.

DAFTAR TABEL

- Tabel 1. 1: Daftar Feedwater heater Suralaya PGU **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 1. 2: Kumpulan ringkasan dan gap penelitian terdahulu..... **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 2. 1: Korelasi antara NTU dan effectiveness (Kakac et al., 2012)**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3. 1: Spesifikasi HPH 5 **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3. 2: Propertis HPH 5 **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3. 3: Data awal untuk perhitungan NPV **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3. 4: Data biaya investasi retubing & pemeliharaan HPH 5 **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3. 5: Format penyajian data effectiveness & pressure drop setiap zona HPH 5**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3. 6: Format penyajian data effectiveness dengan variasi plugging tube HPH 5**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3. 7: Format penyajian data penurunan tekanan sisi tube dengan variasi plugging tube HPH 5..... **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3. 8: Format penyajian hasil perhitungan NPV investasi retubing HPH 5**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4. 1: Nilai Q_{hot} dan Q_{cold} HPH 5 Suralaya PGU **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4. 2: Kualitas uap pada zona condensing serta distribusi temperatur pada HPH 5**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4. 3: Laju perpindahan panas, outlet feedwater & drain shell temperature HPH 5 dengan plugging 10%, 20% dan 30% **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4. 4: Temperatur outlet feedwater HPH 6 & 7 **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4. 5: Data perbandingan *heat balance design* dengan simulasi *cycle-tempo***Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4. 6: Data histori *plugging tubes* HPH 5 dari tahun 2010 (setelah *retubing*) sampai dengan 2022..... **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4. 7: Data inflasi dari tahun 2010-2022 (<https://www.bi.go.id/id/statistik/indikator/data-inflasi.aspx>) **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4. 8: Hasil perhitungan NPV *retubing* HPH 5 dengan opsi *plugging* 30%**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4. 9: Hasil perhitungan NPV *retubing* HPH 5 dengan opsi *plugging* 20%**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4. 10: Hasil perhitungan NPV *retubing* HPH 5 dengan opsi *plugging* 10%**Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2. 1: Proses perubahan energi di PLTU (Tirumala Srinivas, 2017) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 2: Steam & water cycle (PLN, 1983) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 3: Diagram siklus Rankine sederhana (Elamin, 2020) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 4: Siklus Rankine di Suralaya PGU (Sumber: Suralaya PGU) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 5: *Feedwater Flow System* Suralaya PGU (PLN, 1983) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 6: Bled Flow System Suralaya PGU (PLN, 1983) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 7: Jenis laju aliran pada penukar panas pipa ganda (double-pipe heat exchanger) (Cengel, 2003) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 8: Jenis aliran pada cross flow heat exchangers (Cengel, 2003) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 9: *Skema shell & tube heat exchangers* (Cengel, 2003) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 10: Konfigurasi aliran multipass digunakan pada penukar kalor shell dan tube (Cengel, 2003) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 11: Konstruksi HPH (EPRI, 2010; Hewith et al., 1994) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 12: HPH 5 Suralaya PGU **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 13: Pembagian zona pada HPH (Bode et al., 2016) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 14: Diagram zona de-superheating, condensing, dan subcooling (ASME, 2000) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 15: Ilustrasi *control volume* (Moran & Shapiro, 2006) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 16: *Balance Energy* HPH 5 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 17: Ilustrasi jenis aliran fluida berdasarkan tube banks (a) aligned dan (b) staggered (Kakac et al., 2012) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 18: Penentuan jarak Pitch (P_T) pada tube banks (a) aligned dan (b) staggered (Kakac et al., 2012) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 19: Berbagai tipe *plate baffle* (Kakac et al., 2012) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 20: Berbagai tipe *rod baffle* (Kakac et al., 2012) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 21: *Thermal resistance* pada tube (Moran & Shapiro, 2006) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 22: Faktor koreksi shell & tube Heat exchanger (Kumareswaran, 2014) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 23: Simbol apparatus Boiler (De Schans 23, n.d.) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 24: Simbol apparatus Turbin (De Schans 23, n.d.) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 25: Simbol apparatus Condenser (De Schans 23, n.d.) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 26: Simbol apparatus Feedwater heater (De Schans 23, n.d.) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 27: Simbol apparatus deaerator (De Schans 23, n.d.) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 28: Skema contoh pembangkit listrik menggunakan cycle-tempo (De Schans 23, n.d.) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 29: Flowchart perhitungan cycle-tempo **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3. 1: Lokasi Suralaya PGU (-5.892230325479776, 106.02975545209368) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3. 2: Kerangka pemikiran penelitian **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3. 3: *Heat & mass balance diagram* Suralaya PGU pada 100% MCR (*Redrawing menggunakan Cycle-tempo*) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3. 4: Ilustrasi *heat balance* HPH 5 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3. 5: *Flowchart* perhitungan distribusi temperatur dan kualitas uap HPH 5 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3. 6: Zona section pada HPH 5 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3. 7: *Flowchart* perhitungan *effectiveness & pressure drop* tiap zona HPH 5 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3. 8: *Flowchart* perhitungan performa HPH 5 dengan variasi *plugging tube* HPH 5 0-30% **Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 3. 9: *Flowchart* perhitungan NPV investasi *retubing* HPH 5 dengan opsi ketika mencapai *plugging tube* 10%, 20% & 30% **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4. 1: Skema kesetimbangan energi HPH 5 Suralaya PGU **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4. 2: Grafik effectiveness tiap zona HPH 5 vs Beban **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4. 3: Pressure drop shell side (Pa) HPH 5 tiap zona vs Beban **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4. 4: Grafik effectiveness HPH 5 dengan variasi beban & *plugging tubes* **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4. 5: Grafik pressure drop tube side (Pa) HPH 5 dengan variasi beban & *plugging tubes* **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4. 6: Pemodelan diagram siklus Suralaya PGU dengan cycle-tempo **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4. 7: Grafik perbandingan NPHR & Efisiensi vs *Plugging* HPH 5 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4. 8: Perbandingan nilai NPV (penghematan batubara) dengan opsi *plugging tubes* HPH 5 mencapai 10%, 20% & 30% **Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 Perhitungan Q_{hot} dan Q_{cold}	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 2 Perhitungan Kualitas Uap Pada Zona <i>Condensing</i> Serta Temperatur sisi <i>Tube</i> di Setiap Perbatasan Zona	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 3 Perhitungan Batas <i>Plugging Tubes</i> HPH 5	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 4 Perhitungan <i>Effectiveness</i> setiap zona di HPH 5.....	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 5 Perhitungan <i>Pressure drop Tube Side</i>	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 6 Perhitungan <i>Pressure drop Shell Side</i>	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 7 Perhitungan Temperatur <i>Outlet Feedwater</i> serta <i>Drain Shell</i> HPH 5 dengan <i>Plugging</i>	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 8 Perhitungan GTHR & NPHR.....	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 9 Hasil Simulasi 100% MCR tanpa <i>plugging tubes</i>	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 10 Hasil Simulasi 100% MCR dengan <i>plugging tubes</i> 10%	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 11 Hasil Simulasi 100% MCR dengan <i>plugging tubes</i> 20%	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 12 Hasil Simulasi 100% MCR dengan <i>plugging tubes</i> 30%	Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN 13 Hasil Simulasi 100% MCR tanpa operasi HPH 5 & 6	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR LAMBANG & NOTASI

A	(m ²)	Luas area/penampang
B	(m)	<i>Baffle spacing</i>
C	(m)	<i>Clearance antar tube</i>
c		Konstanta <i>Chisholm</i>
C _c	(W/°C)	<i>Heat capacity rate cold side</i>
C _h	(W/°C)	<i>Heat capacity rate hot side</i>
C _{in}	Rupiah	<i>Cash in</i>
C _{min}	(W/°C)	<i>Heat capacity minimum</i>
C _{out}	Rupiah	<i>Cash out</i>
C _r	(W/°C)	<i>Heat capacity ratio</i>
D _e	(m)	Diameter Ekuivalen
d _i	(m)	Diameter dalam
DMN	(kW)	Daya mampu net
d _o	(m)	Diameter luar
D _s	(m)	Diameter dalam <i>shell</i>
$\frac{dT}{dx}$	(°C/m)	Gradien suhu
ε		Efektifitas
e		Emitansi permukaan
f		<i>Friction factor</i>
F	(N)	Gaya Fluida
g	(m/s ²)	Percepatan gravitasi
G _s	(kg/m ² .s)	Laju aliran massa sisi <i>shell</i>
GTHR	kCal/kWh	<i>Gross Turbine Heat rate</i>
\bar{h}	(W/m ² .°C)	Koefisien perpindahan panas konveksi
HHV	kCal/kg	<i>High Heating Value</i> bahan bakar
\bar{h}_i	(W/m ² .°C)	Koefisien perpindahan panas konveksi sisi dalam <i>tube</i>
\bar{h}_o	(W/m ² .°C)	Koefisien perpindahan panas konveksi sisi luar <i>tube</i>
h _{ob}	(kJ/kg)	Nilai <i>enthaply outlet Boiler</i>
h _{ib}	(kJ/kg)	Nilai <i>enthaply inlet Boiler</i>
h _{or}	(kJ/kg)	Nilai <i>enthaply outlet Reheater</i>

h_{ir}	(kJ/kg)	Nilai <i>enthalpy</i> inlet Reheater
h'_{fg}	(kJ/kg)	Selisih <i>enthalpy</i> saturasi liquid dan <i>steam</i>
Ja		<i>Jacob number</i>
K	(W/m ² .°C)	Konduktivitas termal bahan
L	(m)	Panjang efektif <i>tube</i>
\dot{m}	(kg/s)	<i>Massflow rate</i>
\dot{m}_b	(kg/s)	<i>Massflow rate</i> menuju Boiler
\dot{m}_c	(kg/s)	<i>Massflow rate cold side</i>
\dot{m}_{di}	(kg/s)	<i>Massflow rate drain inlet</i>
\dot{m}_{do}	(kg/s)	<i>Massflow rate drain outlet</i>
mf	(kg/h)	laju aliran massa bahan bakar
\dot{m}_c	(kg/s)	<i>Massflow rate hot side</i>
\dot{m}_r	(kg/s)	<i>Massflow rate</i> menuju Reheater
\dot{m}_{si}	(kg/s)	<i>Massflow rate steam inlet</i>
\dot{m}_{wi}	(kg/s)	<i>Massflow rate feedwater inlet</i>
\dot{m}_{wo}	(kg/s)	<i>Massflow rate feedwater outlet</i>
NCF	%	<i>Net Capacity Factor</i>
η	%	Efisiensi
N_p		<i>Number tube passes</i>
NPHR	kCal/kWh	<i>Net Plant Heat rate</i>
NPV	Rupiah	<i>Net Present Value</i>
N_T		Jumlah <i>tube</i>
NTHR	kCal/kWh	<i>Net Turbine Heat rate</i>
NTU		<i>Number of Transfer Unit</i>
Nu_D		<i>Nusselt Number</i>
ΔP_t	(Pa)	<i>Pressure drop sisi tube</i>
ΔP_{total}	(Pa)	<i>Total pressure drop</i>
$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{fr}$	(Pa)	<i>Friction pressure drop</i>
$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{mo}$	(Pa)	<i>Momentum pressure drop</i>
$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{gr}$	(Pa)	<i>Hydrostatic pressure drop</i>
p	(N/m ²)	Tekanan fluida

P_{eg}	(kW)	Daya <i>Generator</i>
P_{aux}	(kW)	Daya pemakaian sendiri
P_m	(m)	Keliling <i>tube</i>
Pr		<i>Prandtl number</i>
P_T	(m)	<i>Pitch distance</i>
ρ	(kg/m ³)	Massa jenis fluida
ρ_g	(kg/m ³)	Massa jenis <i>steam</i>
ρ_l	(kg/m ³)	Massa jenis <i>liquid</i>
\dot{Q}	(kJ/s)	Laju perpindahan panas
\dot{Q}_{conv}	(kJ/s)	Laju perpindahan panas konveksi
\dot{Q}_{kond}	(kJ/s)	Laju perpindahan panas konduksi
\dot{Q}_{rad}	(kJ/s)	Laju perpindahan panas radiasi
r		<i>Discount rate</i>
R_{total}	(°C/W)	<i>Thermal resistance</i>
Re		<i>Reynolds number</i>
r_i	(m)	<i>Radius</i> bagian dalam
r_o	(m)	<i>Radius</i> bagian luar
ΔT_{LMTD}	(°C)	<i>Log mean temperature difference</i>
T_1	(K)	Temperatur benda kelabu
T_2	(K)	Temperatur benda hitam yang mengelilinginya
T_s	(°C)	Temperatur permukaan padat
T_∞	(°C)	Temperatur rata-rata fluida
T_{di}	(°C)	Temperatur <i>drain inlet</i>
T_{do}	(°C)	Temperatur <i>drain outlet</i>
T_{si}	(°C)	Temperatur <i>steam inlet</i>
T_{wi}	(°C)	Temperatur <i>feedwater inlet</i>
T_{wo}	(°C)	Temperatur <i>feedwater outlet</i>
σ	W/m ² .K ⁴	Konstanta boltzmann
U	(W/m ² .°C)	<i>Overall heat transfer coefficient</i>
μ	(Ns/m ²)	Viskositasi absolut fluida
v	(m/s)	Kecepatan aliran
\dot{W}	(kJ/s)	Daya atau kerja per satuan waktu
X		Parameter Martinelli

x		Kualitas campuran <i>steam & liquid</i>
X ₀	Rupiah	Biaya investasi
y		Nomor tahun pada periode investasi

INTISARI

Feedwater heater berfungsi memanaskan air umpan pada PLTU menggunakan uap ekstraksi dari turbin, sehingga efisiensi dalam pembangkit listrik meningkat, biaya produksi lebih rendah, meningkatkan kinerja serta mengoptimalkan penggunaan energi di dalam PLTU. PLTU Suralaya mempunyai 7 *feedwater heater* diantaranya tiga *low pressure feedwater heater* (LPH 1, 2 dan 3), sebuah *deaerator* dan tiga *high pressure feedwater heater* (HPH 5, 6 dan 7). HPH 5 telah mengalami penambalan sebanyak 480 dari 1579 *tubes*. Penambalan pada *tube* yang mengalami kebocoran adalah perbaikan sementara sehingga *feedwater heater* tetap bisa beroperasi. Jika jumlah penambalan *tube* mencapai batas maksimum yaitu 30,02%, maka opsi *retubing feedwater heater* harus dilakukan guna mengembalikan keandalan *feedwater heater*. Selanjutnya nilai efektifitas dan penurunan tekanan pada HPH 5 serta efisiensi unit pembangkit dihitung dan dianalisis dengan variasi jumlah penambalan *tube* 0%, 10%, 20% dan 30%. Nilai efektifitas menunjukkan penurunan dengan semakin naik beban & persentase penambalan *tube* HPH 5 sedangkan nilai penurunan tekanan menunjukkan kenaikan selaras dengan kenaikan persentase penambalan *tube* HPH 5 dan beban unit. Efisiensi unit pembangkit mengalami penurunan selaras dengan kenaikan persentase plugging *tube* HPH 5. Hal ini menyebabkan kenaikan *net plant heat rate* unit pembangkit dimana bahan bakar yang diperlukan bertambah banyak dengan beban unit yang sama. Selain itu perhitungan kelayakan ekonomi dilakukan untuk opsi investasi *retubing* HPH 5 ketika mencapai penambalan *tube* 10%, 20% dan 30%. Hasil perhitungan menunjukkan opsi yang paling direkomendasikan adalah melakukan *retubing* HPH 5 ketika penambalan *tube* mencapai 20%, dimana berpotensi penghematan batubara sebanyak 50,07 Juta ton. Perlu adanya perencanaan yang sistematis dan teratur dalam melakukan *retubing* HPH 5 demi memastikan performa dan kehandalan peralatan HPH 5 selalu optimal serta efisiensi unit pembangkit dapat dipertahankan.

Kata Kunci: *Feedwater heater, Penambalan tube, Efektifitas, Penurunan tekanan, Efisiensi, Retubing HPH, Kelayakan ekonomi*

ABSTRACT

The function of a feedwater heater is to heat the feedwater in a thermal power plant using extracted steam from the turbine, therefore improving plant efficiency, reducing production costs, and optimizing energy utilization. The Suralaya thermal power plant has seven feedwater heaters, including three low-pressure feedwater heaters (LPH 1, 2, and 3), one deaerator, and three high-pressure feedwater heaters (HPH 5, 6, and 7). HPH 5 has undergone 480 tubes plugging out of 1579 total tubes. The tube plugging is a temporary repair to ensure that the feedwater heater can continue operation. If the maximum tube plugging limit of 30.02% is exceeded, the retubing of the feedwater heater should be considered to maintain its reliability. The effectiveness and pressure drop of HPH 5, as well as the plant efficiency, are analyzed with variations in tube plugging percentages of 0%, 10%, 20%, and 30%. The effectiveness value decreases with an increase in both the load and percentage of plugging, whereas the pressure drop increases in tandem with the percentage of tube plugging and load. The efficiency of the power plant decreases with an increase in tube plugging, leading to an increase in net plant heat rate, resulting in more fuel being required for the same unit load. Additionally, an economic feasibility analysis was conducted for the retubing investment option at a 10%, 20%, and 30% tube plugging threshold. The results show that the most recommended option is to retube HPH 5 when the tube plugging reaches 20%, with potential savings of 50.07 million tons of coal. Proper planning and systematic retubing of HPH 5 are essential to guarantee optimal performance and reliability of the equipment, and thereby maintain plant efficiency.

Keywords: *Feedwater heater, Tube plugging, Effectiveness, Pressure drop, efficiency, Retubing HPH, Economic feasibility*