

SIMULASI DAN ANALISIS KESETIMBANGAN ENERGI PADA
UJP PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) BARRU 2X50 MW
DENGAN MENGGUNAKAN CYCLE TEMPO



SKRIPSI

WAHYU SILAHUDDIN
442 16 015

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

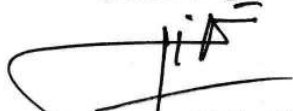
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini dengan judul “Simulasi dan Analisis Keseimbangan Energi pada UJP Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Barru 2X50 MW dengan Menggunakan Cycle Tempo” oleh Wahyu Silahuddin NIM 442 16 015 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.

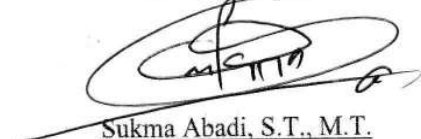
Makassar, 2 Oktober 2020

Mengesahkan,

Pembimbing I,



Ir. Suryanto, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19590826 198803 1 003

Pembimbing II,


Sukma Abadi, S.T., M.T.
NIP. 19751024 200312 1 001

Mengetahui

Koordinator Program Studi
D4 Teknik Pembangkit Energi,



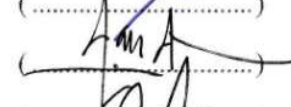




Ir. Chandra Bhuana, M.T.
NIP. 19650319 199103 1 003

HALAMAN PENERIMAAN

Pada hari ini, jumat tanggal 2 Oktober 2020 tim penguji ujian siding skripsi telah menerima skripsi oleh mahasiswa: Wahyu Silahuddin NIM 442 16 015 dengan judul "Simulasi dan Analisis Keseimbangan Energi pada UJP Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Barru 2X50 MW dengan Menggunakan Cycle Tempo".

Makassar, 2 Oktober 2020

Tim ujian siding skripsi:

1. Prof. Ir. Makmur Saini, M.T., Ph.D.	Ketua	
2. Musrady Mulyadi, S.T., M.T.	Sekretaris	
3. Ir. Chandra Bhuana, M.T.	Anggota I	
4. Sri Suwasti, S.ST., M.T.	Anggota II	
5. Ir. Suryanto, M.Sc., Ph.D.	Pembimbing I	
6. Sukma Abadi, S.T., M.T.	Pembimbing II	

KATA PENGANTAR

Ucapan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat, hidayah, serta inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Simulasi dan Analisis Kesetimbangan Energi pada UJP Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Barru 2X50 MW Dengan Menggunakan Cycle Tempo” dapat diselesaikan dengan baik.

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

1. Kedua orang tua saya yang senantiasa memberikan semangat, dorongan, dan bantuan baik berupa materi maupun berupa doa, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Ir. Muhammad Anshar, M.Si., Ph.D. selaku Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang.
3. Bapak Rusdi Nur, S.ST., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.
4. Bapak Ir. Chandra Buana, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Pembangkit Energi Politeknik Negeri Ujung Pandang.
5. Bapak Ir. Suryanto, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing I yang senantiasa sabar dalam mengarahkan saya dalam pembuatan skripsi ini.

6. Bapak Sukma Abadi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing II yang senantiasa sabar dalam mengarahkan saya dalam pembuatan skripsi ini.
7. Bapak Dr. Jumadi Tangko, M.Pd. selaku Wali Kelas.
8. Seluruh Dosen dan tenaga kependidikan Jurusan Teknik Mesin Program Studi Teknik Pembangkit Energi yang telah membimbing saya selama perkuliahan sejak semester 1 hingga semester akhir. Semoga Allah membalas semua kebaikan dan ketulusan kalian.
9. Seluruh rekan-rekan mahasiswa Teknik Mesin angkatan 2016 terutama rekan sekelas Teknik Pembangkit Energi'16 yang telah menjadi saudara-saudaraku serta banyak memberikan motivasi, bantuan serta doanya, selama berada di Politeknik Negeri Ujung Pandang.
10. Seluruh pihak yang tidak sempat penulis sebutkan satu-persatu yang berjasa dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritikan dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini dan demi perbaikan pada masa mendatang. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca.

Makassar, September 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PENERIMAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR NOTASI.....	xi
SURAT PERNYATAAN.....	xiii
RINGKASAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Siklus Rankine.....	5
2.2. Siklus Rankine Regeneratif.....	6
2.2.1. Perhitungan Kerja dan Perpindahan Kalor.....	8
2.2.2. Perhitungan Fraksi Massa	15
2.2.3. Perhitungan Efisiensi Sistem.....	16

2.2.4.	Perhitungan Laju Kalor (Heat Rate).....	17
2.3.	Penjelasan <i>Software Cycle-Tempo</i>	17
2.3.1.	Penjelasan <i>Apparatus Software Cycle-Tempo</i>	18
2.3.2.	<i>Flowchart</i> Perhitungan <i>Cycle-Tempo</i>	24
2.3.3.	Prinsip Perhitungan <i>Cycle-Tempo</i>	25
2.3.4.	Hasil dari <i>Flowchart</i>	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		29
3.1.	Tempat dan Waktu Penelitian	29
3.2.	Alat Penelitian	29
3.3.	Tahapan Penelitian	29
3.4.	Prosedur Penelitian	30
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN		31
4.1	Data dan Model PT.Indonesia Power UJP PLTU Barru unit 1.....	31
4.2	Hasil Simulasi Cycle Tempo PT. Indonesia Power UJP PLTU Barru Unit 1.....	35
4.2.1.	Pemodelan cycle tempo	35
4.2.2.	Input Data.....	36
4.2.3.	Verifikasi Hasil Simulasi Model Sistem PLTU	43
4.2.4.	Analisis Kesetimbangan Energi Sistem PLTU pada Cycle Tempo.....	45
4.3.	Pembahasan.....	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		50
5.1.	Kesimpulan	50
5.2.	Saran	51
DAFTAR PUSTAKA		52
LAMPIRAN.....		54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a) Bagian diagram alir siklus <i>Rankine</i> dan (b) Diagram T-s siklus <i>Rankine</i>	5
Gambar 2.2 Siklus rankine sistem PLTU Barru 2X50 MW (a) Diagram alir sistem PLTU Barru; (b) Diagram T-s sistem PLTU Barru	7
Gambar 2.3 <i>Open Feedwater Heater</i>	13
Gambar 2.4 <i>Closed Feedwater Heater</i>	14
Gambar 2.5 Siklus Regeneratif	15
Gambar 2.6 Contoh pekerjaan <i>cycle tempo</i>	18
Gambar 2.7 Boiler dalam <i>cycle-tempo</i>	19
Gambar 2.8 Turbin dalam <i>cycle-tempo</i>	20
Gambar 2.9 Condenser dalam <i>cycle-tempo</i>	21
Gambar 2.10 <i>Feed water heater</i> dalam <i>cycle-tempo</i>	22
Gambar 2.11 <i>Deaerator</i> dalam <i>cycle-tempo</i>	23
Gambar 2.12 Diagram perhitungan <i>cycle-tempo</i>	24
Gambar 3.1 Diagram alir langkah penelitian	30
Gambar 4.1 Model sistem PLTU pada <i>cycle tempo</i>	35
Gambar 4.2 Parameter input boiler	37
Gambar 4.3 Parameter input turbin	38
Gambar 4.4 Parameter input kondenser.....	40
Gambar 4.5 Parameter input pompa	41
Gambar 4.6 Parameter Parameter input feed water heater	42

Gambar 4.7 Model sistem PLTU dengan parameter Φ_m , h, T, p. 44

Gambar 4.8 Profil aliran massa pada turbin uap 46

Gambar 4.9 Profil aliran massa pada pompa *condenser*..... 47

Gambar 4.10 Profil aliran massa pada pompa boiler feed pump 48

Gambar A.1 Single line diagram sistem PLTU Barru..... 57

Gambar B.1 Diagram T-S sistem PLTU..... 62



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Spesifikasi high pressure heater 1 dan 2	33
Tabel 4.2 Spesifikasi low pressure heater 4, 5 dan 6.....	34
Tabel 4.3 Input data untuk jenis-jenis turbin.	39
Tabel 4.4 Data properti hasil simulasi cycle tempo	45
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan efisiensi pada simulasi cycle tempo	49
Tabel B.1 Energy Balance	58
Tabel B.2 Data for all pipes	59
Tabel B.3 Losses in pipes	60
Tabel B.4 Heat exchanging equipment.....	61



DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan
dE_{cv}	Diferensial energi
dt	Diferensial waktu
g	Akselerasi gravitasi
h_i	Entalpi spesifik sisi input
h_o	Entalpi spesifik sisi output
$h_{u_{in}}$	Entalpi spesifik uap input
$h_{u_{out}}$	Entalpi spesifik uap output
\dot{m}_i	Laju aliran massa sisi input
\dot{m}_o	Laju aliran massa sisi output
η_s	Efisiensi sistem
y	Fraksi dari aliran total ekstraksi turbin
\dot{Q}_{cv}	Laju perpindahan kalor energi per satuan waktu
$\dot{Q}_{condensor}$	Laju perpindahan kalor kondensor per satuan waktu
\dot{Q}_{in}	Laju perpindahan kalor sisi input per satuan waktu

\dot{Q}_{out}	Laju perpindahan kalor sisi output per satuan waktu
v_i	Volume spesifik pada sisi input
v_o	Volume spesifik pada sisi output
\dot{W}_{cv}	Kerja energi per satuan waktu
\dot{W}_t	Kerja turbin per satuan waktu
\dot{W}_p	Kerja pompa per satuan waktu
z_i	Ketinggian atau jarak sisi input
z_o	Ketinggian atau jarak sisi output
ΔEK	Perubahan energi kinetik
ΔEP	Perubahan energi potensial



SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Wahyu Silahuddin

Nim : 44216015

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa segala pernyataan dalam skripsi ini yang berjudul “Simulasi dan Analisis Kesetimbangan Energi pada UJP Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Barru 2X50 MW Dengan Menggunakan Cycle Tempo” merupakan gagasan dan hasil karya sendiri dengan arahan komisi pembimbing dan belum pernah diajukan dalam bentuk apapun pada perguruan tinggi dan instansi manapun.

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, 02 Oktober 2020

Hormat saya,



Wahyu Silahuddin

NIM 44216015

RINGKASAN

Sebagai salah satu produsen listrik yang memiliki peran penting pada ketersediaan energi listrik daerah interkoneksi SulSelrabar, PLTU Barru diharapkan dapat beroperasi dengan efisiensi optimal. Hilangnya energi dengan jumlah yang besar pada sistem pembangkit listrik dapat terjadi di salah satu atau lebih pada komponen mesin. Untuk mengetahui komponen-komponen tersebut maka perlu dilakukan analisis di setiap komponen sistem pembangkit listrik tersebut. Pengaplikasian metode kesetimbangan energi pada PLTU dapat digunakan untuk mengidentifikasi sumber ketidakefisienan, menentukan lokasinya dan besarnya kerugian yang terjadi. Simulasi dan analisis kesetimbangan energi dapat dilakukan untuk mengetahui nilai efisiensi termal PLTU Barru dengan menggunakan software *cycle-tempo* untuk mengatasi kelemahan perhitungan secara manual.

Dari hasil penelitian dapat diketahui persentase perbandingan data hasil simulasi software *cycle-tempo* dengan data kondisi aktual komisioning pada PT. Indonesia Power UJP PLTU Barru unit 1 nilai daya berdasarkan data Heat Balance yaitu 55581.3 kW dan data simulasi *cycle-tempo* 54294.09 kW dengan persentase perbandingan sebesar 2.3%. Untuk data heat rate berdasarkan data kondisi aktual komisioning yaitu 9274.3 kJ/kWh dan data simulasi *cycle-tempo* yaitu 10965.6 kJ/kWh dengan persentase perbandingan sebesar 18.24%. Untuk data efisiensi berdasarkan data kondisi aktual komisioning yaitu 38.46% dan data simulasi *cycle-tempo* yaitu 32.73% dengan persentase perbandingan sebesar 14.89%. Adapula perbedaan ini terjadi akibat terdapat perbedaan nilai laju aliran massa yang agak lebih besar daripada kondisi aktual PLTU serta adanya kondisi software yang berbeda dengan kondisi aktual PLTU seperti efisiensi, leak off, kebocoran, dan pressure drop dalam apparatus.

Kata kunci : PLTU, kesetimbangan energi, efisiensi, Simulasi, *cycle-tempo*.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Keperluan energi listrik Indonesia terus meningkat akibat peningkatan nilai beban yang terus meningkat tiap tahunnya. Menurut Outlook Energi Indonesia (OEI) (2019: 8-9), diketahui kapasitas pembangkit tenaga listrik sampai dengan tahun 2018 mencapai 64,5 GW atau naik sebesar 3% dibandingkan kapasitas tahun 2017. Kapasitas terpasang pembangkit listrik tahun 2018 sebagian besar berasal dari pembangkit energi fosil khususnya batubara (50%), diikuti gas bumi (29%), BBM (Bahan Bakar Minyak) (7%) dan energi terbarukan (14%). Pada tahun 2018, produksi pembangkit listrik mencapai 283,8 TWh yang sebagian besar dihasilkan dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara sebesar 56,4%, pembangkit listrik berbahan bakar gas sebesar 20,2% dan BBM hanya 6,3%, sementara 17,1% berasal dari EBT (Energi Baru Terbarukan).

Dari data OEI 2019 di atas dapat diketahui bahwa jenis pembangkit listrik yang paling populer di Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menggunakan batubara sebagai bahan bakar utamanya. Idealnya pada sistem PLTU, dihendaki agar energi bahan bakar (*input*) dapat diubah seluruhnya menjadi energi listrik (*output*). Pada kenyatannya, hal ini tidak mungkin dapat dilaksanakan karena adanya berbagai kerugian (*losses*) yang terjadi hampir di setiap komponen PLTU. Akibat kerugian-kerugian tersebut, maka energi listrik yang dihasilkan PLTU akan selalu lebih kecil dari energi input yang masuk ke sistem PLTU.

Hilangnya energi dengan jumlah yang besar pada sistem pembangkit listrik dapat terjadi di salah satu atau lebih pada komponen mesin. Untuk mengetahui komponen-komponen tersebut maka perlu dilakukan analisis di setiap komponen sistem pembangkit listrik tersebut. Metode analisa kesetimbangan energi dapat digunakan untuk menganalisa sistem termal dari pembangkit jenis PLTU. Pengaplikasian metode kesetimbangan energi pada PLTU dapat digunakan untuk mengidentifikasi sumber ketidakefisienan, menentukan lokasinya dan besarnya kerugian yang terjadi.

Pada umumnya, perhitungan analisis kesetimbangan energi ini dilakukan secara manual dengan menggunakan pendekatan analisis ternodinamika. Perhitungan secara manual memiliki beberapa kelemahan yang cukup merugikan diantaranya yaitu dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk melakukan perhitungan apabila terjadi perubahan keadaan pada sistem pembangkit dan perlunya ketelitian lebih saat melakukan perhitungan. Kelemahan perhitungan secara manual dapat diatasi dengan menggunakan *software* komputer dimana proses perhitungan dapat dilakukan dengan membuat pemodelan sistem lalu menginput data yang diperlukan. Salah satu *software* yang dapat digunakan untuk menghitung kesetimbangan energi pada suatu sistem pembangkit termal adalah *cycle-tempo*.

Salah satu produsen listrik yang menggunakan jenis pembangkit listrik tenaga uap adalah PT. Indonesia Power Unit Jasa Pembangkitan (UJP) PLTU Barru 2 x 50 MW. PLTU Barru beroperasi dengan menggunakan bahan bakar batubara jenis lignit yang berkalori rendah dengan LHV: 3700 - 4700 kcal/kg yang

terinterkoneksi dengan 150 kV SulSelrabar. PLTU Barru mulai beroperasi pada tahun 2012 dan selama masa operasi tersebut PLTU Barru telah mengalami beberapa permasalahan. Sebagai salah satu produsen listrik yang memiliki peran penting pada ketersediaan energi listrik daerah interkoneksi SulSelrabar, PLTU Barru diharapkan dapat beroperasi dengan efisiensi optimal. Simulasi dan analisis kesetimbangan energi dapat dilakukan berdasarkan kondisi ini untuk mengetahui nilai efisiensi termal PLTU Barru dengan menggunakan *software cycle-tempo*.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka permasalahan penelitian ini adalah bagaimana perhitungan efisiensi termal PLTU Barru melalui analisis kesetimbangan energi dengan menggunakan *software Cycle Tempo 5.1*?

1.3. Ruang Lingkup Penelitian

Dalam penelitian ini, penulis memberikan batasan masalah untuk lebih memfokuskan kegiatan penelitian sebagai berikut:

1. Analisis berdasarkan data *heat balance* TMCR (*Turbine Maximum Continuous Rate*) atau 100% load UJP PLTU Barru 2 x 50 MW unit 1.
2. Kondisi operasi adalah tunak.
3. Efek perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan.
4. Perhitungan dilakukan berdasarkan analisis termal.
5. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software cycle-tempo 5.1*.
6. Perhitungan *leak off* pada *heat balance* dalam *software* diabaikan.

7. Tidak ada *pressure drop* dalam *tube* pada seluruh *feedwater heater*.
8. Nilai dari *main steam* dari boiler dianggap konstan.
9. Nilai *effectiveness* pada *feedwater heater* adalah 1.

1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai efisiensi termal PLTU Barru melalui analisis kesetimbangan energi dengan menggunakan *software Cycle Tempo 5.1*.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari pembuatan penelitian ini adalah:

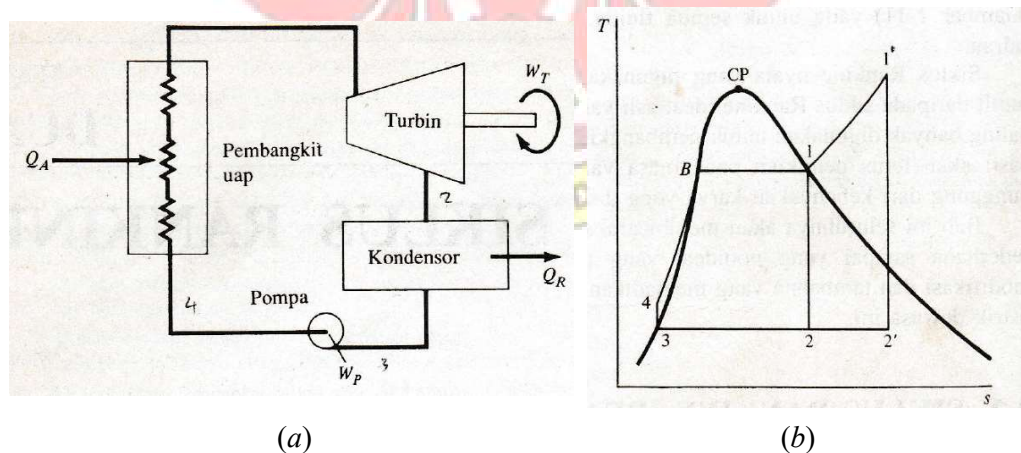
1. Memberikan informasi kepada pembaca dan pihak produsen listrik mengenai informasi nilai kesetimbangan energi pada PLTU Barru melalui penggunaan *software cycle-tempo*.
2. Sebagai referensi bagi mahasiswa dan peneliti lain untuk penelitian yang berkaitan dengan topik penelitian ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Siklus Rankine

Siklus *Rankine* adalah siklus daya uap yang digunakan untuk menghitung atau memodelkan proses kerja mesin uap / turbin uap. Fluida kerjanya biasanya adalah H_2O , tetapi tidak selalu harus itu. Siklus *Rankine* merupakan siklus teoritis paling sederhana yang menggunakan uap sebagai medium kerja sebagaimana digunakan pada sebuah PLTU. Dikatakan siklus teoritik paling sederhana, karena merupakan modifikasi dari siklus *Carnot*, dimana proses pemanasan dan pendinginan pada siklus ini terjadi pada tekanan yang tetap (El-Wakil, M.M. 1996: 27-28).

Gambar 2-1a menunjukkan diagram aliran sederhana siklus *Rankine* dan Gambar 2.1b menunjukkan diagram T-s siklus *Rankine*.



Gambar 2.1 (a) Bagian diagram aliran siklus *Rankine* dan (b) Diagram T-s siklus *Rankine* (Sumber : El-Wakil, M.M. 1992:28)

“Siklus 1-2-3-4-B-1 adalah siklus *Rankine* jenuh, yang berarti bahwa yang masuk ke turbin adalah uap jenuh. 1'-2'-3-4-B-1' adalah siklus *Rankine* panas-lanjut, yang berarti uap panas-lanjut yang masuk ke turbin. Siklus-siklus ini, karena mampu-balik, terdiri atas proses-proses berikut: [1] Proses 1-2 atau 1'-2': Ekspansi isentropik mampu-balik adiabatik melalui turbin. Uap keluar pada 2 atau 2' biasanya berada dalam daerah dua-fase. [2] Proses 2-3 atau 2'-3': Proses suhu tetap dan, karena merupakan proses dua-fase, juga tekanan tetap untuk pembuangan kalor pada kondensor. [3] Proses 3-4: Kompresi adiabatik mampu-balik oleh pompa terhadap cairan-jenuh pada tekanan kondensor, 3, menjadi cairan dingin-lanjut pada tekanan pembangkit-uap, 4. Garis 3-4 merupakan garis vertikal pada diagram P-V atau T-S karena cairan itu pada dasarnya tak-mampu-mapat dan pompa itu mampu-balik adiabatik. [4] Proses 4-1 atau 4-1': Penambahan kalor pada tekanan-tetap dalam pembangkit-uap. Garis 4-B-1-1' merupakan garis tekanan-tetap pada diagram. Bagian 4-B adalah proses membawa cairan dingin-lanjut, 4, menjadi cairan-jenuh pada B. Bagian 4-B dalam pembangkit-uap disebut ekonomisator (*economizer*). Bagian B-1 menunjukkan pemanasan cairan-jenuh menjadi uap-jenuh pada tekanan dan suhu tetap (karena campuran dua-fase), dan bagian B-1 dalam pembangkit-uap disebut pendidih (*boiler*) atau *evaporator* (penguap). Bagian 1-1', dalam siklus panas-lanjut, menunjukkan pemanasan uap-jenuh pada 1 menjadi 1'. Bagian 1-1' dalam pembangkit-uap disebut pemanas-lanjut (*superheater*).” (El-Wakil, M.M. 1996: 28-29)

Selain siklus *Rankine* ideal terdapat juga siklus uap lain yaitu siklus regeneratif. Siklus ini merupakan salah satu metode untuk meningkatkan efisiensi termal dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yaitu dengan cara meningkatkan temperatur rata-rata fluida yang akan masuk ke dalam boiler. Peningkatan temperatur ini dapat dilakukan dengan menggunakan suatu alat yang disebut dengan *feedwater heater*.

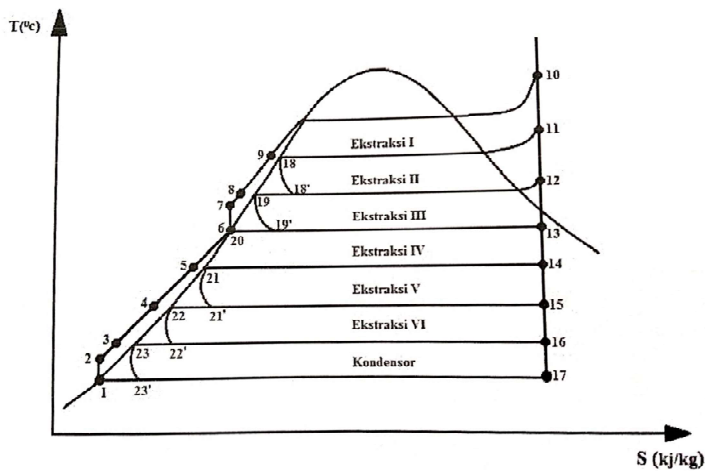
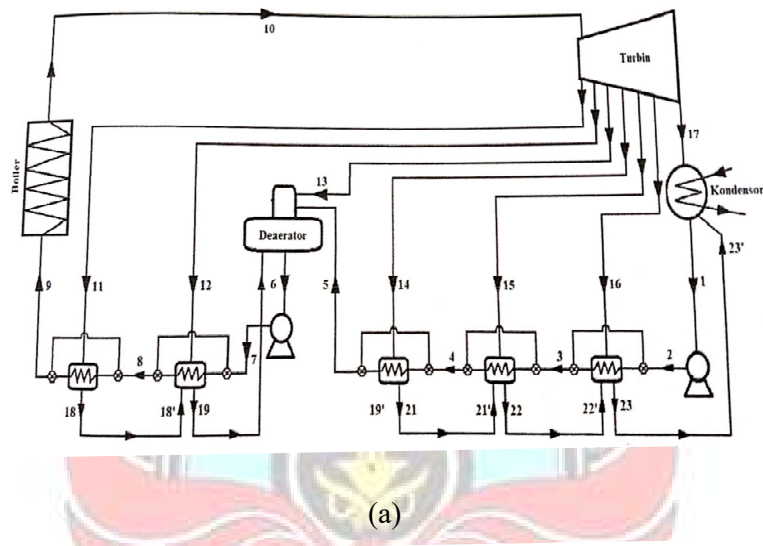
2.2. Siklus *Rankine* Regeneratif

“Siklus *rankine* regeneratif adalah modifikasi siklus *rankine* dimana air sebagai fluida kerja dinaikkan temperaturnya dengan memanfaatkan uap ekstraksi dari turbin sehingga kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan fluida kerja pada boiler berkurang. Hal ini tentu saja akan menaikkan efisiensi siklus. Regenerasi tidak hanya meningkatkan efisiensi siklus tetapi juga salah satu cara deaerasi. Deaerasi yaitu menghilangkan kadar oksigen dalam air yang bisa menyebabkan korosi pada jalur perpipaan. Proses regenerasi umumnya dengan menggunakan alat yang biasanya disebut *feedwater heater* dengan prinsip kerja seperti *heat exchanger*. *Feedwater heater* ada 2 jenis yaitu tipe terbuka dan tertutup. *Open feedwater heater* atau bisa disebut juga pemanas kontak langsung secara prinsip

adalah sebuah ruangan pencampur antara uap ekstraksi dengan fluida kerja (air). Tipe selanjutnya adalah *Close Feedwater Heater* atau biasa disebut pemanas sistem tertutup. Prinsip kerjanya adalah panas dari uap ekstraksi dipindahkan ke air pengisi namun tanpa terjadi kontak langsung.” (Satiti, Sekar. 2015: 8-9)

PLTU Barru telah menerapkan prinsip ini dan dapat dilihat pada Gambar

2.2 berikut:



Gambar 2.2 Siklus rankine sistem PLTU Barru 2X50 MW (a) Diagram alir sistem PLTU Barru; (b) Diagram T-s sistem PLTU Barru (Sumber Pratama, Rian. 2014: 39-41)

2.2.1. Perhitungan Kerja dan Perpindahan Kalor

Siklus *Rankine* seperti ditunjukkan Gambar 2.1 di atas menunjukkan perpindahan kalor yang terjadi antara komponen pembangkit dengan sekelilingnya yang diabaikan untuk memudahkan analisis. Perubahan energi kinetik dan potensial juga diabaikan. Setiap komponen dianggap beroperasi pada kondisi tunak. Prinsip kekekalan massa dan energi dapat digunakan untuk mengembangkan persamaan perpindahan energi dari titik-titik kondisi seperti yang telah ditunjukkan dalam Gambar 2.1. Adapun bentuk dasar dari persamaan kesetimbangan energi pada volume atur adalah:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left[h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right] - \dot{m}_o \left[h_o + \frac{v_o^2}{2} + gz_o \right] \dots (2.1)$$

Dalam aplikasinya, terdapat beberapa kemungkinan tempat untuk masuk/keluar nya massa pada batas volume atur, sehingga neraca laju energi menjadi:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \left[h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right] - \sum_o \dot{m}_o \left[h_o + \frac{v_o^2}{2} + gz_o \right] \dots (2.2)$$

Banyak aplikasi penting tentang volume atur dengan satu sisi masuk dan satu sisi keluar pada keadaan tunak, sehingga neraca laju massa dan energi berubah secara sederhana menjadi:

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m} \left[(h_i - h_o) + \frac{(v_i^2 - v_o^2)}{2} + g(z_i - z_o) \right] \dots (2.3)$$

A. Analisis Turbin Uap

Turbin uap adalah alat yang mengekstraksi uap air yang bertekanan menjadi kerja. Cara kerja pada turbin uap ini yaitu fluida kerja berupa uap yang

mempunyai massa dan tekanan dinaikkan temperaturnya dalam boiler sehingga berubah fase uap panas lanjut (*superheat*) dan memiliki energi yang besar. Energi dalam uap panas lanjut ini diekspansikan secara adiabatik (isentropik) sehingga menjadi kerja. Setelah diekspansikan oleh turbin, tekanan dan temperatur uap akan mengalami penurunan karena energinya digunakan untuk menggerakkan sudu-sudu turbin. Dengan analisa hukum thermodynamika pertama persamaan energi pada turbin adalah:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \left[h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right] - \sum_o \dot{m}_o \left[h_o + \frac{v_o^2}{2} + gz_o \right]$$

- Asumsi:
1. *Steady state*
 2. ΔEK diabaikan
 3. ΔEP diabaikan
 4. $\dot{Q}_{cv} = 0$

Maka:

- Kesetimbangan Energi

Uap dari boiler pada kondisi 1 yang berada pada temperatur dan tekanan yang sudah dinaikkan, berekspansi melalui turbin untuk menghasilkan kerja dan kemudian dibuang ke kondenser pada kondisi 2 dengan tekanan yang relatif rendah. Dengan mengabaikan perpindahan kalor dengan sekelilingnya, kesetimbangan laju energi dan massa untuk volume atur di sekitar turbin pada kondisi tunak menjadi:

$$0 = \cancel{\dot{Q}_{cv}} - \dot{W}_t + \dot{m} \left[(h_i - h_o) + \frac{\cancel{v_i^2} - \cancel{v_o^2}}{2} + g(\cancel{z_i} - \cancel{z_o}) \right]$$

$$0 = -\dot{W}_t + \dot{m} (h_i - h_o)$$

$$\dot{W}_t = \dot{m} (h_i - h_o) \dots\dots\dots(2.4)$$

B. Analisis Kondenser

Kondenser merupakan alat penukar panas yang berfungsi mengkondensasi fluida kerja. Agar tidak mengurangi efisiensi suatu pembangkit turbin uap, sejumlah uap yang telah digunakan untuk menggerakkan turbin harus dikembalikan dalam fasa cair yang disebut kondensat. Uap yang keluar dari turbin tekanan rendah terkondensasi menjadi air yang mengeluarkan panas laten dari uap. Sebagai akibat dari kehilangan panas, uap hasil ekstraksi dari turbin mula-mula didinginkan menjadi uap jenuh atau campuran, kemudian mengembun berubah menjadi cair. Dengan analisa hukum thermodinamika pertama persamaan energi pada kondenser adalah:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left[h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right] - \dot{m}_o \left[h_o + \frac{v_o^2}{2} + gz_o \right]$$

- Asumsi:
1. *Steady state*
 2. ΔEK diabaikan
 3. ΔEP diabaikan
 4. $\dot{W}_{cv} = 0$

Maka:

- *Balance energy*

$$\frac{\dot{Q}_{condenso}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_i - h_o \dots\dots\dots(2.5)$$

$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}$ merupakan laju perpindahan energi dari fluida kerja ke air pendingin per unit massa fluida kerja yang melalui kondensor. Perpindahan energi bernilai positif ke arah luar sistem.

C. Analisis Pompa

Pompa adalah suatu alat atau mesin yang digunakan untuk memindahkan cairan dari suatu tempat ke tempat yang lain melalui suatu media perpipaan dengan cara menambahkan energi pada cairan yang dipindahkan dan berlangsung secara terus menerus. Pompa beroperasi dengan prinsip membuat perbedaan tekanan antara bagian masuk (*suction*) dengan bagian keluar (*discharge*). Dengan kata lain, pompa berfungsi mengubah tenaga mekanis dari suatu sumber tenaga (penggerak) menjadi tenaga kinetis (kecepatan), dimana tenaga ini berguna untuk mengalirkan cairan dan mengatasi hambatan yang ada sepanjang pengaliran.

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left[h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right] - \dot{m}_o \left[h_o + \frac{v_o^2}{2} + gz_o \right]$$

- Asumsi:
1. *Steady state*
 2. ΔEK diabaikan
 3. ΔEP diabaikan
 4. pompa diisolasi ($\dot{Q} = 0$)

Maka:

- *Balance energy*

Pada siklus Rankine ini, kondensat cair yang meninggalkan kondensor dipompa dari kondensor ke dalam boiler yang bertekanan lebih tinggi. Dengan menggunakan volume atur di sekitar pompa dan mengasumsikan

tidak ada perpindahan kalor dengan sekitarnya, kesetimbangan laju massa dan energi adalah:

$$\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} = h_o - h_i \dots\dots\dots(2.6)$$

D. Analisis Boiler

Boiler adalah suatu alat yang digunakan untuk dapat menghasilkan uap bertekanan yang mempunyai temperature tinggi, dimana fluida kerjanya adalah air. Pada siklus rankine ideal, fluida kerja menyelesaikan siklus ketika uap yang terkondensasi menjadi cair, dipompakan kemudian dipanaskan sampai keadaan jenuh dan diuapkan di dalam boiler. Uap panas tersebut dapat dimanfaatkan sebagai penggerak turbin untuk membangkitkan tenaga listrik. Dengan analisis hukum pertama termodinamika persamaan energi pada boiler adalah:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \left[h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right] - \sum_o \dot{m}_o \left[h_o + \frac{v_o^2}{2} + gz_o \right]$$

- Asumsi:
1. *Steady state*
 2. ΔEK diabaikan
 3. ΔEP diabaikan
 4. $\dot{W}_{cv} = 0$

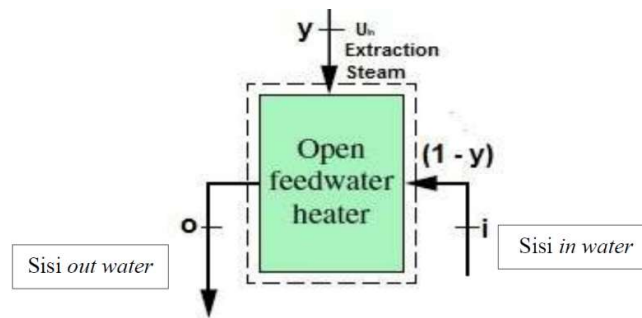
Maka:

- *Balance energy*

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_o - h_i \dots\dots\dots(2.7)$$

E. Analisis *Open Feedwater Heater*

Pada heat exchanger jenis ini aliran fluida yang berbeda temperatur akan bercampur secara langsung tanpa adanya penyekat.



Gambar 2.3 *Open Feedwater Heater*

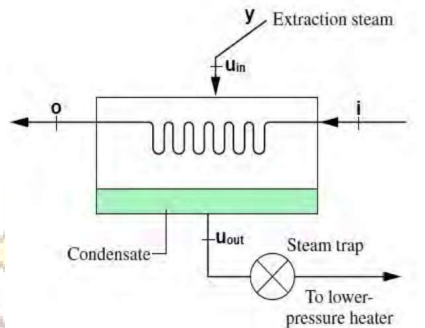
Fraksi y dapat dihitung dengan menerapkan prinsip-prinsip konservasi massa dan konservasi energi pada volume atur di sekeliling pemanas air-pengisian. Jika tidak terjadi perpindahan kalor antara pemanas air-pengisian dan lingkungan sekitarnya serta efek energi kinetik dan potensial diabaikan, kesetimbangan laju massa dan energi pada kondisi *steady* akan menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$0 = y h_{uin} + (1 - y) h_i - h_o \dots \dots \dots (2.8)$$

$$0 = y \dot{m}_{uin} + (1 - y) \dot{m}_i - \dot{m}_o \dots \dots \dots (2.9)$$

F. Analisis Closed Feedwater Heater

Closed feedwater heater merupakan heat exchanger tipe shell and tube. Uap yang dicerat dari turbin akan dikondensasikan pada sisi shell sementara feedwater (air pengumpan) akan masuk melalui sisi tube dan menyerap panas dari uap sehingga akan meningkatkan temperatur.



Gambar 2.4 Closed Feedwater Heater

Fraksi dari aliran total yang diekstraksi diwakili oleh variabel y dapat dihitung dengan menerapkan prinsip-prinsip konservasi massa dan konservasi energi pada volume air di sekeliling pemanas tertutup. Diasumsikan tidak terjadi perpindahan kalor antara pemanas air pengisian dengan lingkungan sekelilingnya dan mengabaikan efek energi kinetik dan potensial, kesetimbangan laju massa dan energi pada kondisi steady state, konservasi massa dan energi dapat disederhanakan menjadi:

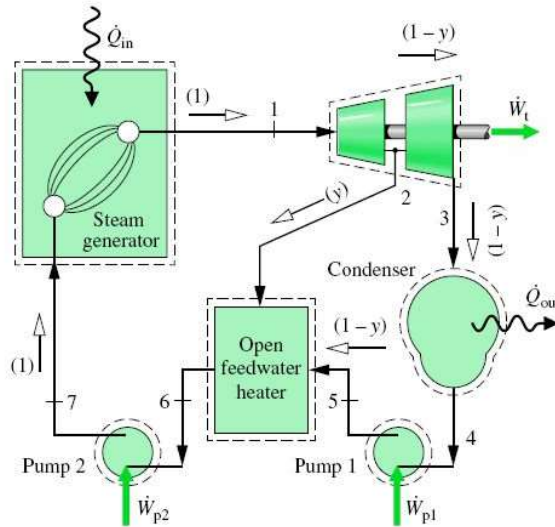
$$0 = y (h_{u_{in}} - h_{u_{out}}) + (h_o - h_i) \dots \dots \dots (2.10)$$

atau

$$y = \frac{h_o - h_i}{(h_{u_{in}} - h_{u_{out}})} \dots \dots \dots (2.11)$$

2.2.2. Perhitungan Fraksi Massa

Perhitungan fraksi massa digunakan untuk mengetahui laju aliran yang melalui bagian dari tiap komponen pembangkit. Fraksi massa biasa digunakan pada siklus regeneratif.



Gambar 2.5 Siklus regeneratif

Dari Gambar 2.2, langkah awal yang penting dalam menganalisis siklus regeneratif yaitu dengan melakukan evaluasi terhadap laju aliran massa yang melalui setiap komponen. Penggunaan satu volume atur yang melingkupi kedua tingkat turbin, kesetimbangan laju massa pada kondisi tunak adalah:

$$\sum \dot{m}_o = \sum \dot{m}_i \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_1 \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana \dot{m}_1 adalah laju massa yang masuk ke dalam turbin tingkat pertama pada kondisi 1, \dot{m}_2 adalah laju massa yang diekstrak dan keluar pada

kondisi 2, dan \dot{m}_3 adalah laju massa yang keluar dari turbin tingkat kedua pada kondisi 3, jika dibagi dengan \dot{m}_1 , maka akan diperoleh nilai berdasarkan unit massa yang melewati turbin tingkat pertama.

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = 1 \dots\dots\dots (2.14)$$

Jika fraksi dari aliran total yang diekstrasi pada kondisi 2 diwakili oleh variabel y , maka $y = \dot{m}_2/\dot{m}_1$ dimana nilai $y = 0 < y < 1$. Fraksi dari aliran total yang melewati turbin tingkat kedua adalah:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \dots\dots\dots (2.15)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - y\dot{m}_1 \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1(1 - y) \dots\dots\dots (2.17)$$

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = (1 - y) \dots\dots\dots (2.18)$$

2.2.3. Perhitungan Efisiensi Sistem

Efisiensi siklus rankine mengukur seberapa banyak energi yang masuk ke dalam fluida kerja melalui boiler yang dikonversi menjadi keluaran kerja netto. Efisiensi siklus rankine dijelaskan dalam bentuk rumus sebagai berikut :

$$\eta_s = \left(\frac{W_t/\dot{m} - W_p/\dot{m}}{Q_{in}/\dot{m}} \right) \dots\dots\dots (2.19)$$

$$\eta_s = \left(\frac{W_t - W_p}{Q_{in}} \right) \dots\dots\dots (2.20)$$

2.2.4. Perhitungan Laju Kalor (Heat Rate)

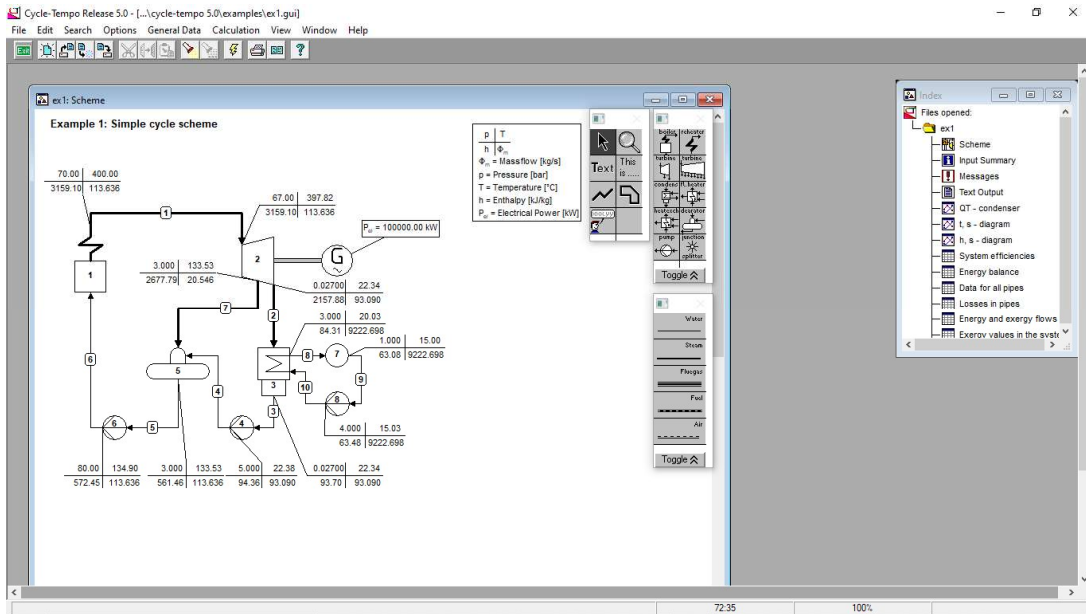
Laju kalor (heat rate) adalah jumlah energi yang ditambahkan melalui perpindahan kalor ke dalam siklus, biasanya dalam kJ, untuk menghasilkan satu unit keluaran kerja netto, biasanya dalam kW-h. Oleh karena itu, laju kalor berbanding terbalik dengan efisiensi thermal, memiliki satuan kJ/kW-h.

$$\text{Heat Rate} = \frac{\text{Total fuel heat input (kJ)}}{\text{Electrical generation (kW-h)}} \dots\dots\dots (2.21)$$

2.3. Penjelasan *Software Cycle-Tempo*

Skripsi ini dilakukan dengan metode penelitian simulasi numerik menggunakan *software cycle-tempo*. *Software cycle-tempo* adalah suatu program yang digunakan untuk analisis termodinamika dan mengoptimasi sistem konversi energi. (*power, refrigeration, heating, etc.*) *Software cycle-tempo* dikembangkan untuk menghitung laju aliran massa, variabel termodinamika, kesetimbangan kimia, dan komposisi dari laju aliran campuran dari suatu proses atau kombinasi sebagai berikut:

- *Steam turbine power plants*
- *Gas turbines*
- *Combined cycle plants*
- *Combustion and gasification systems*
- *Heat transfer systems*
- *Organic Rankine Cycle (ORC) power plants*
- *Refrigeration systems (compression and absorption)*
- *Heat pumps.*

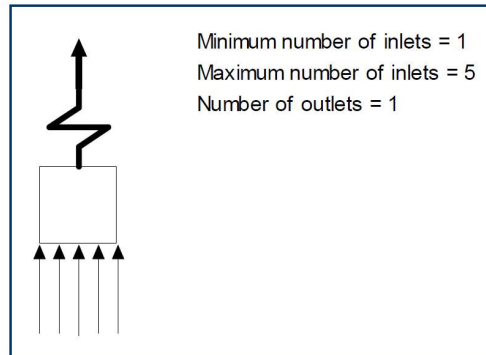


Gambar 2.6 Contoh pekerjaan *cycle tempo*

2.3.1. Penjelasan *Apparatus Software Cycle-Tempo*

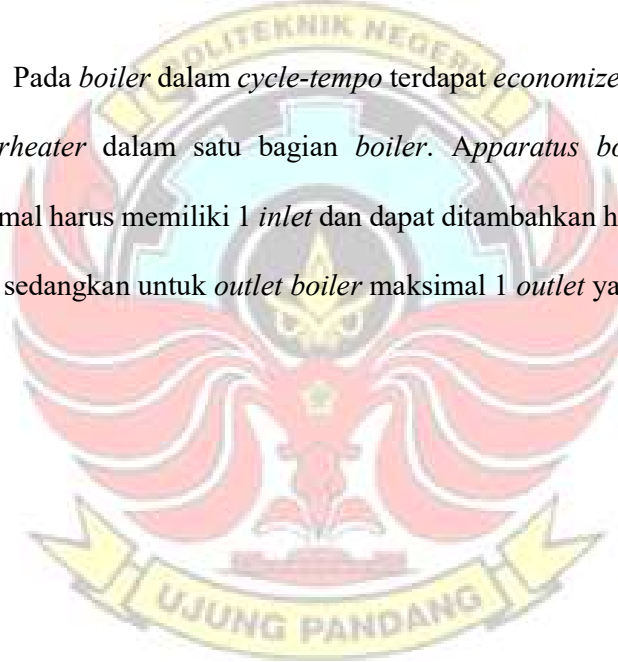
Software cycle-tempo mempunyai beberapa peralatan/*apparatus* dalam pembuatan diagram alir. Penelitian ini menggunakan beberapa *apparatus* yang diperlukan penjelasan secara khusus diantaranya:

A. Boiler

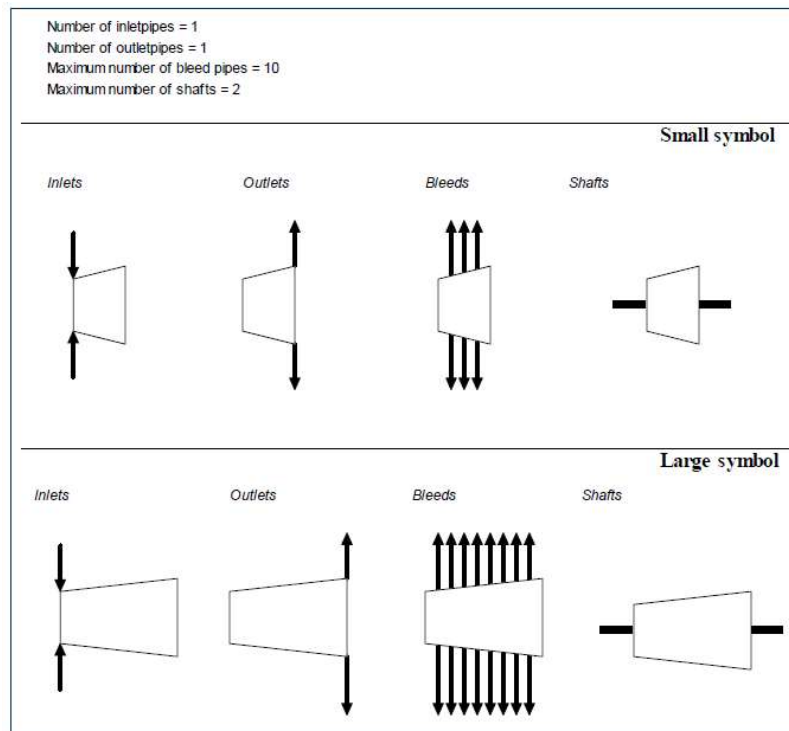


Gambar 2.7 Boiler dalam *cycle-tempo*

Pada boiler dalam *cycle-tempo* terdapat *economizer*, *evaporator* dan *superheater* dalam satu bagian boiler. Apparatus boiler *cycle-tempo* minimal harus memiliki 1 *inlet* dan dapat ditambahkan hingga maksimal 5 *inlet* sedangkan untuk *outlet boiler* maksimal 1 *outlet* yang berupa *steam*.



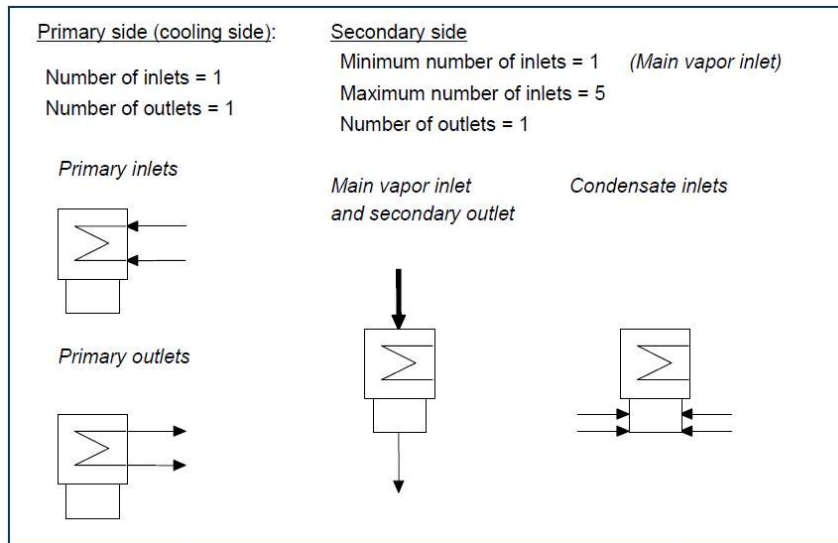
B. Turbin



Gambar 2.8 Turbin dalam *cycle-tempo*

Pada *cycle-tempo* terdapat 2 jenis turbin yang berbeda yaitu turbin dengan *small symbol* dan *large symbol* dengan perbedaan yang terdapat pada jumlah ekstraksi yang ada. Pada *small symbol* turbin terdapat maksimum 6 ceratan dan pada *large symbol* turbin terdapat maksimum 8 ceratan. Untuk *inlet* dan *outlet* bila melebihi dari jumlah tersebut dapat digunakan lebih dari 1 turbin.

C. Condenser

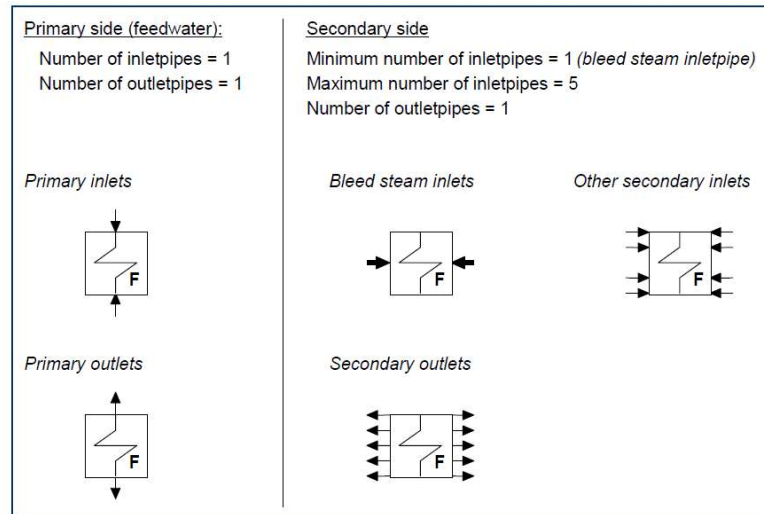


Gambar 2.9 Condenser dalam *cycle-tempo*

Pada *cycle-tempo*, Condenser memiliki dua sisi. Sisi pertama adalah *primary side (cooling side)* dan *secondary side*. *Primary side* adalah sisi *inlet* dan *outlet* untuk *cooling water* Condenser sedangkan *secondary side* adalah sisi untuk *inlet* uap dan *outlet* serta *inlet* air kondensat. Condenser ini terdapat dua kondisi berdasarkan *Energy EQUation CODE* (EEQCOD):

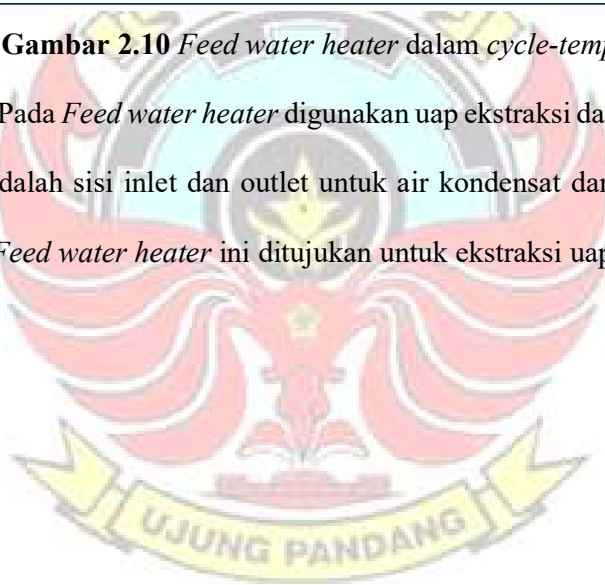
- EEQCOD = 1: *Energy equation* dari *apparatus* digunakan untuk menghitung laju aliran massa.
- EEQCOD = 2: *Energy equation* dari *apparatus* digunakan untuk menghitung *enthalpy* dari salah satu *inlet* atau *outlet condenser*.

D. Feed Water Heater

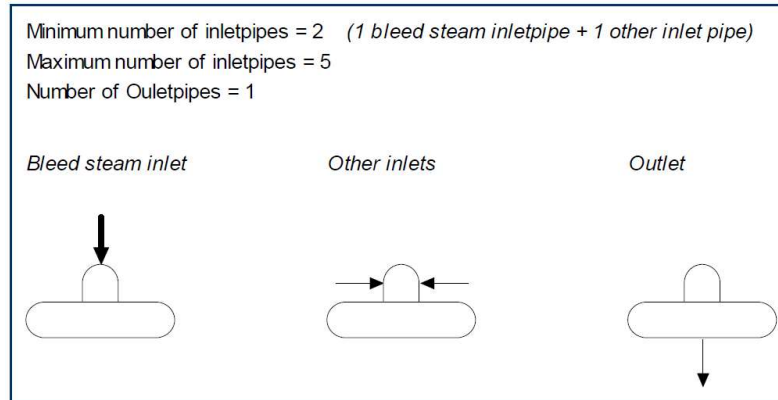


Gambar 2.10 *Feed water heater* dalam *cycle-tempo*

Pada *Feed water heater* digunakan uap ekstraksi dari turbin. *Primary side* adalah sisi inlet dan outlet untuk air kondensat dan *Secondary inlet* pada *Feed water heater* ini ditujukan untuk ekstraksi uap dari turbin.



E. Deaerator

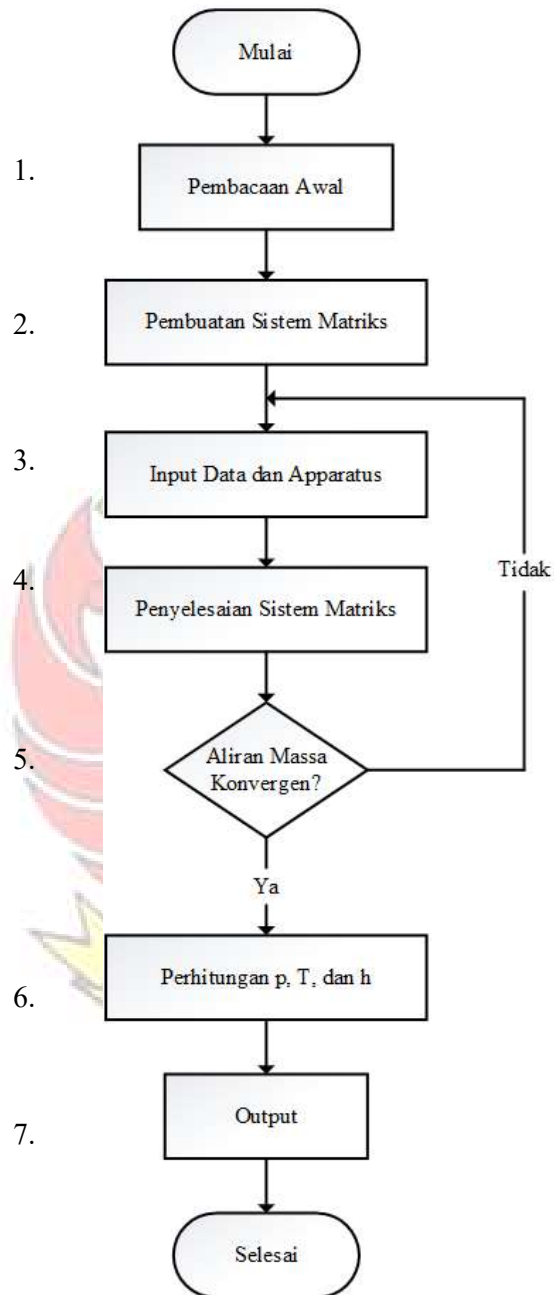


Gambar 2.11 Deaerator dalam cycle-tempo

Deaerator digunakan sebagai *contact heater* umum dengan asumsi cairan jenuh pada *outlet*. Pada Deaerator *cycle tempo* terdapat 1 *inlet* untuk ekstraksi uap dari turbin, 1 *inlet* untuk air kondensat dan 1 *outlet*.



2.3.2. Flowchart Perhitungan *Cycle-Tempo*



Gambar 2.12 Diagram perhitungan *cycle-tempo*

2.3.3. Prinsip Perhitungan *Cycle-Tempo*

Cycle tempo memiliki *closed* dan *open system* dalam kombinasi sistemnya. Penomoran yang urut diperlukan dalam mempersiapkan input data untuk semua skema proses dari pipa dan *apparatus* agar mudah untuk diidentifikasi dan urutan siklus tidak terpecah. Prosedur perhitungan ini terdapat 7 tahapan yaitu:

A. Langkah 1: Pembacaan Awal

Dalam pembacaan awal yang perlu diperhatikan:

- a. Parameter yang menentukan ukuran dari sistem seperti banyak *apparatus*, pipa, turbin, dll.
- b. Data *apparatus* yang lebih spesifik yang berada pada tiap *apparatus*.
- c. Topology dari sistem yang menjelaskan program bagaimana pipa dapat terhubung dengan tiap *apparatus*.
- d. Medium data tiap pipa.
- e. Pembacaan awal data pilihan yang menjelaskan data tambahan lain yang diperlukan dalam perhitungan.

Dalam memasukkan *input* data diperlukan pengecekan tiap langkah dikarenakan untuk setiap langkah yang *error* pasti langsung terdapat pesan *error* dari *software* ini. Data-data tersebut harus dimasukkan agar mendapatkan hasil yang mendekati kondisi aktual dari pembangkit.

B. Langkah 2: Pembuatan Sistem Matriks

Perhitungan dimulai dengan melakukan pembuatan sistem matriks untuk perhitungan aliran massa. Perhitungan ini dilakukan agar dapat menentukan jumlah aliran massa sebanding dengan jumlah pipa. Jumlah aliran massa

dan jumlah pipa yang tidak sebanding akan mendapatkan pesan error dari program sehingga program berhenti.

C. Langkah 3: Input Data dan *Apparatus*

Langkah yang dilakukan dalam input data dan apparatus adalah pembuatan skema sistem pembangkit terlebih dahulu. Proses input data awal pada tiap apparatus dapat dilakukan setelah membangun skema agar membantu perhitungan sistem.

D. Langkah 4: Penyelesaian Sistem Matriks

Pada cycle-tempo digunakan hukum eliminasi Gauss. Perhitungan entalpi di substitusi menggunakan perhitungan analisis energi untuk mendapatkan aliran massa pada sistem.

E. Langkah 5: Menentukan Karakteristik Aliran Massa

Langkah untuk menentukan karakteristik dari iterasi utama adalah dengan menentukan jumlah pipa dengan aliran massa dan jika kondisi tersebut sudah terpenuhi, maka aliran massa yang terakhir dihitung adalah hasil dari sistem tersebut. Kondisi ini akan kembali ke langkah 2 bila kondisi tersebut tidak konvergen.

F. Langkah 6: Perhitungan *p*, *T*, dan *h*

Pressure, *temperature*, dan *enthalpy* yang belum diketahui pada langkah 3 input data dan apparatus memerlukan pengecekan dari setiap apparatus pada langkah 5. Program yang telah berhasil di running dapat dilihat pada pesan “Data for all Pipes” untuk mengetahui:

- Aliran massa

- Tekanan masuk dan keluar
- Temperatur masuk dan keluar
- Entalpi masuk dan keluar

G. Langkah 7: Output

Output dari *cycle-tempo* dapat ditentukan melalui running skema yang sudah konvergen dengan membuka “*system efficiencies*” pada *cycle-tempo*. Hasil yang didapatkan dari langkah tersebut adalah daya netto dan gross serta efisiensi netto dan gross. Keseimbangan energi pada setiap komponen juga dapat dilihat pada pilihan “*Energybalance*” yang didapatkan dari persamaan:

$$\sum_{j=1}^n \phi_{m,in}(j)h_{in}(j) - \sum_{i=1}^n \phi_{m,out}(i)h_{out}(i) = Q + W$$

2.3.4. Hasil dari *Flowchart*

Setelah data yang diperoleh dimasukkan dalam tiap *apparatus* dan hasil dari *Flowchart* tersebut dapat di run tanpa terjadi error dalam memasukkan data maka hasil yang didapat dari pembuatan diagram alir tersebut diantaranya:

A. Efisiensi Sistem

Efisiensi Sistem yang didapatkan meliputi:

- *Input energy*
- *Energy consumption*
- *Power production*
- *Heat production*

B. Energy Balance

Energy balance yang didapatkan meliputi:

- Laju aliran energi dalam entalpi
- laju aliran energi dari total energi saat *environmental condition* (water as liquid) ditambahkan *higher heating value*
- laju aliran energi dari total energi saat *environmental condition* (water as vapour) dikurangi *lower heating value*

E. Data for all pipes

F. Losses in Pipes

K. Heat Exchanging Equipment



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT. Indonesia Power Unit Jasa Pembangkitan (UJP) PLTU Barru 2 x 50 MW unit 1 yang berlokasi di Desa Lampoko, Dusun Bawasalo, Kecamatan Balusu, Kabupaten Barru 2 km dari jalan utama trans Sulawesi Makassar-Parepare. Waktu penelitiannya dilakukan pada bulan Februari sampai dengan Agustus 2020.

3.2. Alat Penelitian

Adapun alat penelitian yang akan dipergunakan pada penelitian ini berupa:

- Seperangkat Laptop
- *Software Cycle Tempo 5.1*
- Seperangkat peralatan tulis-menulis

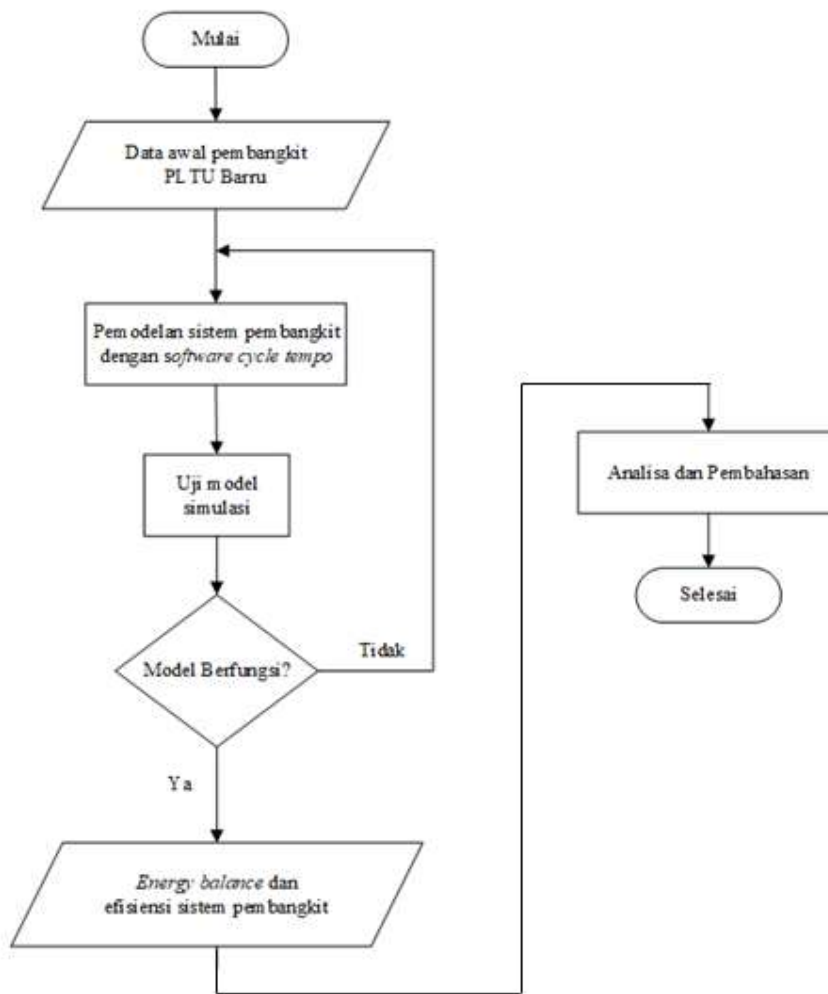
3.3. Tahapan Penelitian

- Melakukan pengambilan data *heat balance* TMCR (*Turbine Maximum Continuous Rate*) atau *100% load* pada sistem pembangkitan listrik pada PLTU Barru unit 1.
- Melakukan pembuatan model dari sistem pembangkitan listrik berdasarkan data yang telah diperoleh, serta teori dan hukum dasar termodinamika dalam bentuk simulasi *cycle-tempo*.
- Membuat program dan pengujian simulasi menggunakan *software cycle-tempo*.

- Melakukan pengolahan data dan pembahasan. Dari hasil simulasi akan diperoleh data *energy balance* dan *system efficiencies* dari sistem pembangkitan listrik dan selanjutnya akan dilakukan pembahasan.

3.4. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan. Tahapan-tahapan tersebut sesuai dengan *flowchart* pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir langkah penelitian

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Data dan Model PT. Indonesia Power UJP PLTU Barru Unit 1

Perhitungan dan analisa kesetimbangan energi yang dilakukan menggunakan data *heat balance* TMCR (*Turbine Maximum Continuous Rate*) atau 100% *load* dari PLTU Barru unit 1 PT. Indonesia Power sebagai acuannya. Adapula data spesifikasi PLTU unit 1 2 x 50 MW tersebut adalah sebagai berikut:

1. Spesifikasi Desain

Kapasitas output : 50 MW
Bahan bakar : Batu Bara Lignite
Nomor unit : 1

2. Peralatan sistem PLTU

a. Turbin uap

Manufacturer : Nanjing Turbine & Electric Machinery
(Group) Co., Ltd.

Type : N50-8.83/535

Model : HP HT condensing turbine

Rated Speed : 3000r/min

Main Steam Pressure : 8.826 Mpa

Main Steam Temperature: 535 °C

b. Generator

Manufacturer : Nanjing Turbine & Electric Machinery
(Group) Co., Ltd.

Type : QFW-60-2
Power : 60 MW
Voltage : 10.5 KV
Current : 4124 A
Power factor : 0.80
Frequency : 50 Hz
Efficiency : $\geq 98.2\%$

Cooling Mode : Air Cooling

c. Condenser

Type : Two-surface type
Cooling area : 3500 m²
Net Weight outside water: 105 t
Weight in running : 220 t
Cooling water temp. : 30 °C

d. Condensate Pump

Model : 65LDTN-10
Flow rate : 200 m³/h
Lift : 155 m
Shaft Power : 150 kW
Pump Efficiency : 76%

e. Boiler Feed Pump

Manufacturer : Zengzou Power Equipment work
Type : 100SB-P

Flow rate : 267 m³/h
 Head : 148 m
 Rated Speed : 2985 rpm
 Efficiency : 76%
 NPSH : 6 m

f. Deaerator

Working pressure : 0.49 MPa
 Working temperature : 158 °C
 Design pressure : 0.65 MPa
 Design temperature : 320 °C
 Outlet capacity : 230 t/h
 Oxygen guarantee : ≤ 7 µg/l
 Capacity : 40 m³

g. High pressure heater

Tabel 4.1 Spesifikasi high pressure heater 1 dan 2

Name Parameter	#1 High Pressure Heater		#2 High Pressure Heater	
	Tube Side	Shell side	Tube Side	Shell side
Design temperature (°C)	270	320	250	280
Design pressure (MPa)	17.15	1.9	17.65	1.9
Working pressure (MPa)	17.15	2.741	17.15	1.566
Heat exchange area (m ²)	190		220	

h. Low pressure heater

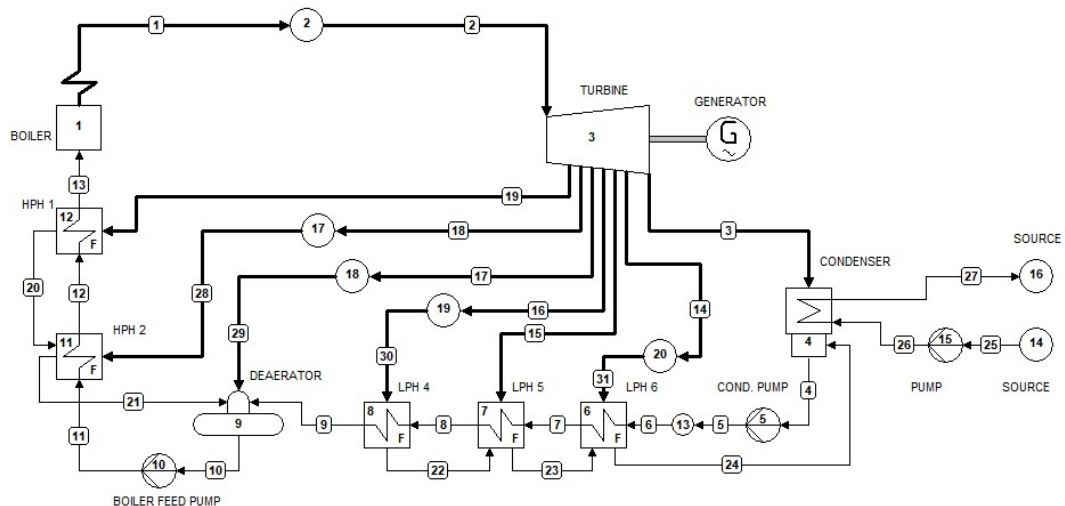
Tabel 4.2 Spesifikasi low pressure heater 4, 5 dan 6

Name Parameter	#4 Low Pressure Heater		#5 Low Pressure Heater		#6 Low Pressure Heater	
	Tube Side	Shell side	Tube Side	Shell side	Tube Side	Shell side
	Design temperature (°C)	165	260	135	180	85
Design pressure (MPa)	2.5	0.8	2.5	0.4	2.5	0.1
Working pressure (MPa)	2.0	0.7	2.0	0.3	2.0	-0.05
Heat exchange area (m ²)	170		170		185	

4.2. Hasil Simulasi Cycle-Tempo PT. Indonesia Power UJP PLTU Barru Unit 1

4.2.1. Pemodelan Cycle Tempo

Sistem PLTU unit 1 pada PT. Indonesia Power Barru dimodelkan menggunakan perangkat lunak *cycle-tempo* yang dikembangkan oleh TU Delft untuk melakukan pemodelan termodinamika dari sebuah sistem pengubah energi beserta simulasinya. Pemodelan Sistem PLTU unit 1 PT. Indonesia Power Barru terdiri dari pemodelan siklus uap. Siklus uap terdiri dari komponen boiler, turbin, *condenser*, pompa *condenser*, *feed water heater*, deaerator, dan boiler *feed pump*. Bahan bakar dan udara pembakaran yang digunakan dalam pemodelan memiliki komposisi standar dari *cycle-tempo*. LHV (*Low Heating Value*) batubara sesuai dengan data desain yaitu 15400 kJ/kg. Hasil Pemodelan sistem PLTU ditunjukkan oleh Gambar 4.1

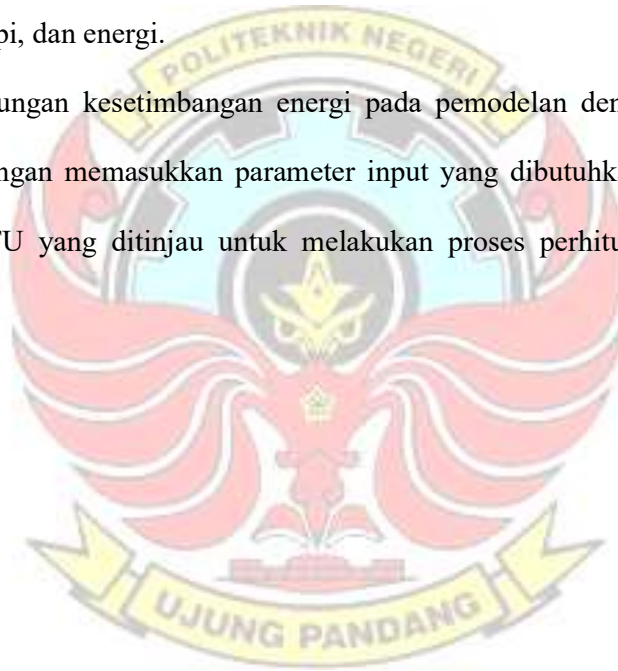


Gambar 4.1 Model sistem PLTU pada *cycle-tempo*

4.2.2. Input Data

Pada tahapan ini, komponen-komponen PLTU beserta pipa penghubung antar komponen digambarkan dalam tampilan awal pada *cycle-tempo* sehingga menghasilkan skema hubungan antar komponen sistem PLTU. Hubungan antar komponen sistem PLTU ditunjukkan oleh Gambar 4.1 yang dibaca oleh *cycle-tempo* dan diolah menggunakan data yang diperlukan dan dimasukkan pada setiap komponen. Data tersebut digunakan oleh *cycle-tempo* untuk menghitung nilai entalpi, entropi, dan energi.

Perhitungan kesetimbangan energi pada pemodelan dengan *cycle tempo* dilakukan dengan memasukkan parameter input yang dibutuhkan sesuai dengan keadaan PLTU yang ditinjau untuk melakukan proses perhitungan dan iterasi *software*.



a. Parameter input kesetimbangan energi pada boiler

The screenshot shows a software window titled 'Apparatus 1 Boiler'. It is divided into several sections:

- Apparatus statistics:** Contains input fields for 'No.' (value: 1) and 'Name' (value: Boiler).
- Additional input data:** Contains two buttons: 'Geometry input data' and 'Off-design input data'.
- Input data:** A table of parameters with their values and units:

Parameter	Value	Unit
PIN		bar
POUT		bar
DELP	0	bar
TIN		°C
TOUT		°C
DELT		°C
DELE		kW
ESTMAS	56.94	kg/s
ETHAB	0.89	-
LHV	15400	kJ/kg
EXFUEL	22	kJ/kg
- Buttons:** OK, Cancel, Clear, and Help.

Gambar 4.2 Parameter input boiler

Parameter input:

PIN, POUT, DELP, TIN, TOUT dan DELT adalah data standar.

ESTMAS = Laju aliran massa yang diperkirakan.

ETHAB = Efisiensi termal boiler

LHV = Nilai kalor rendah bahan bakar

EXFUEL = Eksergi bahan bakar

b. Parameter input kesetimbangan energi pada turbin

Penggunaan berbagai jenis turbin disesuaikan dengan kondisi dan parameter serta batasan-batasan dalam pemodelannya. Tipe yang digunakan adalah tipe Condensing Turbine dengan sistem governor.

Parameter	Value	Unit
TUCODE	46000	-
GDCODE	2	-
PIN	65	bar
TIN	498.59	°C
TOUT		°C
DELT		°C
ETHAI		-
ETHAM		-
DIAIN		m
DIAOUT		m
SLENG		m
DESMAS	55	kg/s
PINCND		bar
POUTDS		bar
POUTRT		bar
ETHAID		-

Gambar 4.3 Parameter input turbin

Parameter input yang digunakan sebagai data input dalam perhitungan cycle tempo untuk apparatus turbin adalah sebagai berikut:

- PIN = Tekanan masuk turbin
- TIN = Temperatur masuk turbin
- GDCODE = kode yang mengindikasikan adanya (GDCODE = 2) atau tidak adanya (GDCODE = 1) governing stage
- DESMAS = Desain inlet mass flow rate.
- TUCODE = Input data untuk jenis turbin

Tabel 4.3 Input data untuk jenis-jenis turbin.

Turbine type	TUCODE	GDCODE	ETHAID ¹⁾	Required data	Optional data
General turbine	0	1 or 2	not applicable	-	ETHAI
Intermediate pressure section ²⁾ (with double reheating)	10000	1	not applicable	-	-
High pressure section with 1-row governing stage	2000v	2	0.870	DIAIN	POUTDS, DESMAS ³⁾
High pressure section with 2-row governing stage	3000v	2	0.840	-	POUTDS, DESMAS ³⁾
Turbine without reheater with 2-row governing stage	4000	2	0.8948	-	POUTRT, DESMAS ³⁾
Condensing section MP + LP, 3000 rpm ⁴⁾	5mdLe	1	0.9193	SLENG, DIAOUT	-
Back pressure turbine (pressure controlled)	60c00	2	0.800	DESMAS, DELH	-
Back pressure turbine (mass flow controlled)	70c00	2	0.800	DESMAS, DELH	-
Condensing section 3000/1500 rpm ⁴⁾	8mdLe	1	0.9193	SLENG, DIAOUT	PINCND
Condensing section 1500 rpm ⁴⁾	9mdLe	1	0.9295	SLENG, DIAOUT	-



c. Parameter input kesetimbangan energi pada kondenser

The screenshot shows a software window titled 'Apparatus 4 Condenser'. It contains several input fields and buttons. On the left, there are 'Apparatus statistics' fields for 'No.' (value: 4) and 'Name' (value: Condenser). Below these are 'Additional input data' buttons for 'Geometry input data' and 'Off-design input data'. The main 'Input data' section contains a grid of fields: EEQCOD (1), PIN1, POUT1, DELP1 (0), TIN1, TOUT1 (37), DELT1, DELE, RPSM, PIN2 (0.087), POUT2, DELP2 (0), TIN2, TOUT2, DELT2, DELTL, DELTH, SATCOD (0), and DTSUBC. At the bottom are 'OK', 'Cancel', 'Clear', and 'Help' buttons.

Gambar 4.4 Parameter input kondenser

Parameter input:

- EEQCOD = 1 Menghitung aliran massa
2 menghitung temperatur, nilai entalpi masuk dan keluar
- SATCOD = 0 apabila aliran keluar dari *secondary flow* berada pada titik saturasi

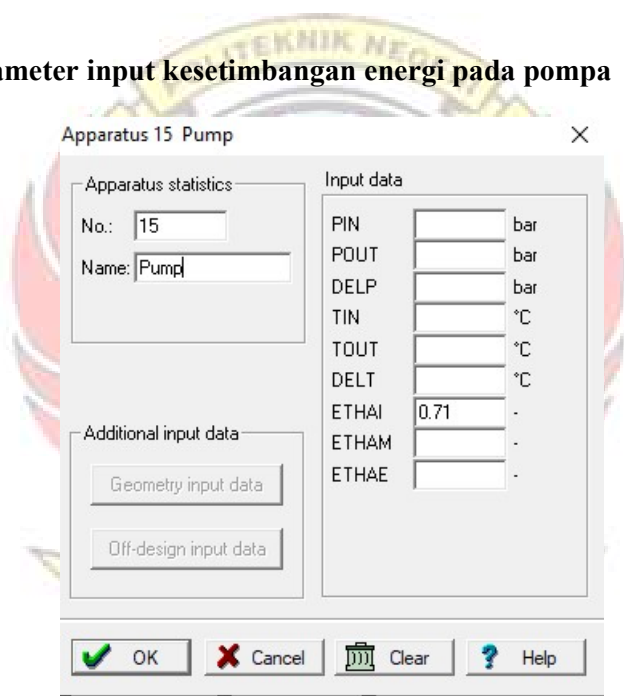
Perhitungan pada condenser melibatkan perhitungan kesetimbangan energi dan kesetimbangan massa. Perhitungan dapat diperoleh dari perhitungan dalam *software* dengan langkah sebagai berikut:

1. Cara pertama dengan menggunakan EEQCOD (*energy equation code*) = 1. Dengan cara ini yang dihitung adalah aliran massa pada *condenser* atau sistem secara keseluruhan dan digunakan untuk

menghitung kuantitas aliran air pendingin yang dibutuhkan. Persamaan ini dapat diselesaikan dengan mengetahui entalpi masuk dan keluar dari kondenser. Entalpi tersebut dihitung jika perbedaan tekanan dan salah satu dari tekanan masuk/keluar diketahui.

2. Cara kedua adalah dengan menggunakan $EEQCOD = 2$, persamaan energi digunakan untuk menghitung temperatur dan entalpi dari kondenser atau sistem secara keseluruhan.

d. Parameter input kesetimbangan energi pada pompa



Gambar 4.5 Parameter input pompa

Parameter input:

PIN, POUT, DELP, TIN, TOUT dan DELT adalah standar.

ETHAI = Efisiensi isentropik

e. Parameter input kesetimbangan energi pada feed water heater

Parameter	Value	Unit
PIN1		bar
POUT1		bar
DELP1	0	bar
TIN1		°C
TOUT1		°C
DELT1		°C
DELE		kW
SATCOD	0	-
PIN2	0.465	bar
POUT2		bar
DELP2	0	bar
TIN2		°C
TOUT2		°C
DELT2		°C
DELT1		°C
DELTH	5	°C

Gambar 4.6 Parameter input feed water heater

Sebuah *feed water heater* normalnya menggunakan ekstraksi uap dari turbin. Kesetimbangan energi digunakan untuk perhitungan *mass flow rate* dan secara otomatis ditambahkan ke sistem matrix.

Parameter input:

PIN1, POUT1, DELP1, TIN1, TOUT1, DELT1 adalah standard

PIN2, POUT2, DELP2, TIN2, TOUT2, DELT2 adalah standard

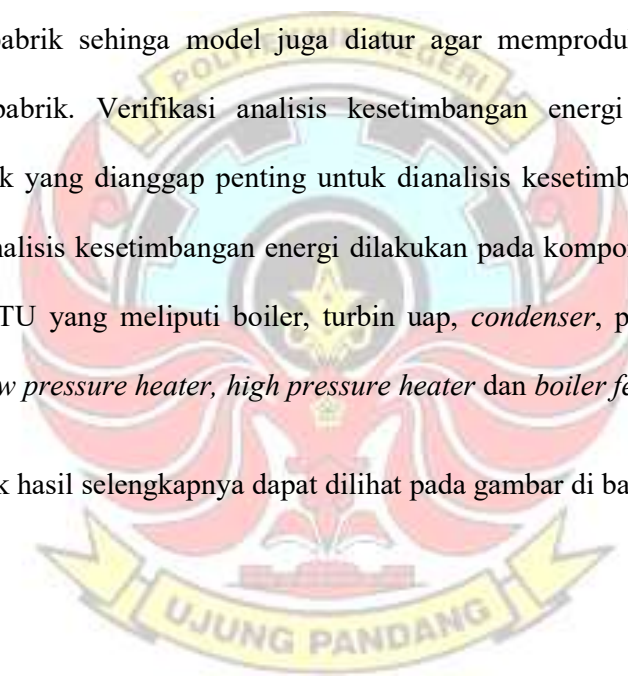
SATCOD = 0 apabila aliran keluar dari *secondary flow* berada pada titik saturasi

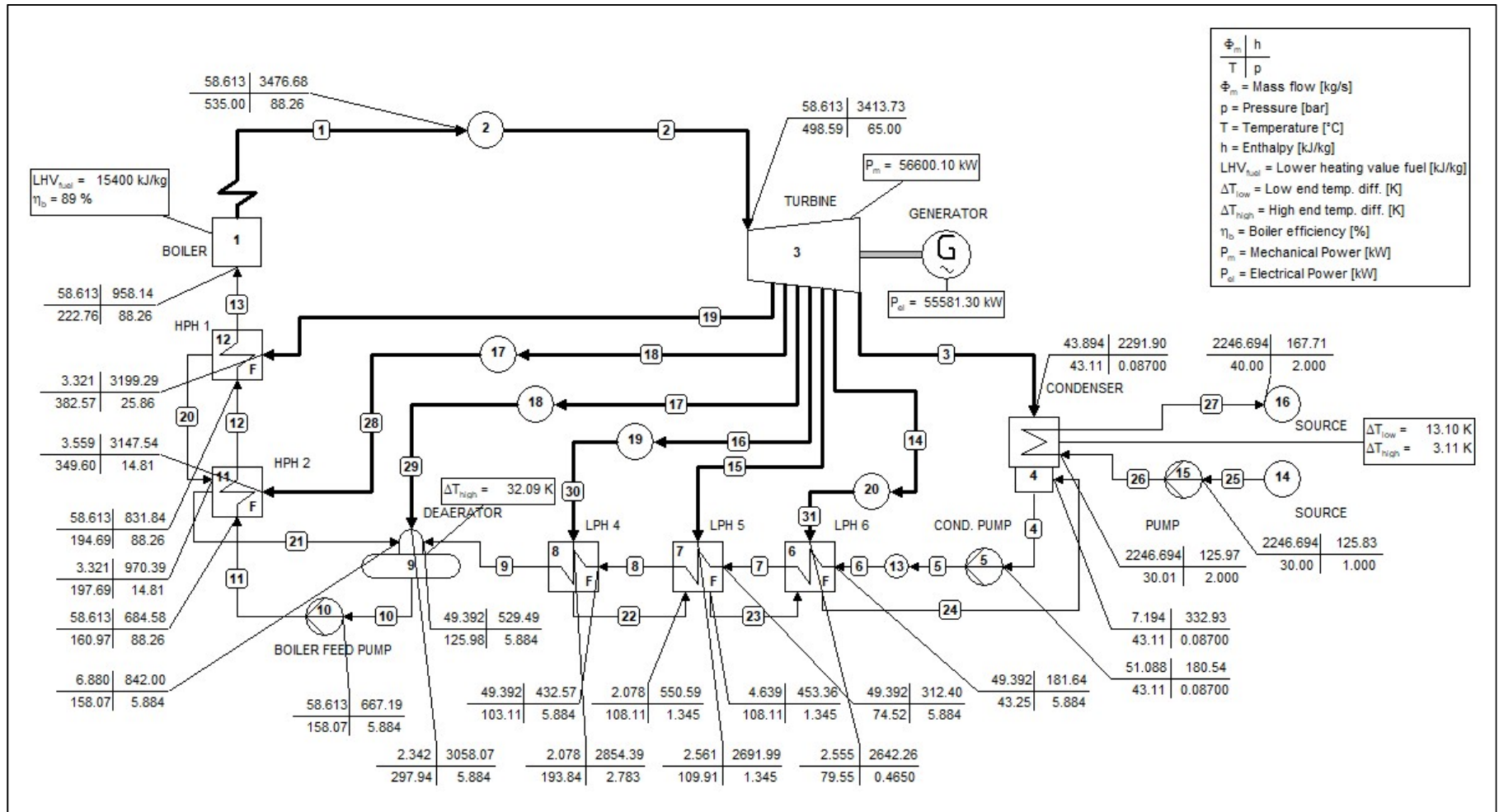
DELTH = Perbedaan temperatur antara *outlet* utama dan temperatur saturasi dari uap ekstraksi.

4.2.3. Verifikasi Hasil Simulasi Model Sistem PLTU

Perhitungan melalui simulasi menghasilkan nilai-nilai parameter setiap komponen yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Nilai-nilai yang dapat diketahui melalui simulasi meliputi laju aliran massa, tekanan, suhu, entalpi, entropi dan fraksi massa pada setiap titik serta daya yang dihasilkan oleh turbin maupun daya yang dikonsumsi oleh pompa. Hasil perhitungan didapatkan melalui simulasi ini sesuai data *heat balance* sistem sehingga daya yang diproduksi sesuai dengan kebutuhan pabrik sehingga model juga diatur agar memproduksi daya sebesar kebutuhan pabrik. Verifikasi analisis kesetimbangan energi dilakukan pada beberapa titik yang dianggap penting untuk dianalisis kesetimbangan energinya. Verifikasi analisis kesetimbangan energi dilakukan pada komponen masukan dan keluaran PLTU yang meliputi boiler, turbin uap, *condenser*, pompa *condenser*, deaerator, *low pressure heater*, *high pressure heater* dan *boiler feed pump*.

Untuk hasil selengkapnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.





Gambar 4.7 Model sistem PLTU dengan parameter Φ_m , h , T , p .

4.2.4. Analisis Kesetimbangan Energi Sistem PLTU pada *cycle tempo*

a. Tabel data hasil simulasi dengan *cycle-tempo*

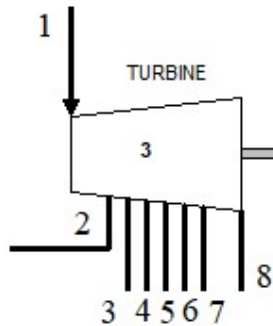
Tabel 4.4 Data properti hasil simulasi *cycle-tempo*

Keadaan	\dot{m} (kg/s)	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)
Main Steam	58.613	535	88.26	3476.68
Masuk Turbin	58.613	498.59	65	3413.73
Ekstraksi Turbin 1	3.321	384.37	28.11	3199.29
Ekstraksi Turbin 2	2.745	315.28	16.10	3069.34
Ekstraksi Turbin 3	1.962	268.09	10.69	2980.64
Ekstraksi Turbin 4	1.740	141.81	3.025	2743.12
Ekstraksi Turbin 5	2.561	110.60	1.462	2691.99
Ekstraksi Turbin 6	2.391	8160	0.505	2645.70
Masuk HPH 1	3.321	382.57	25.86	3199.29
Masuk HPH 2	3.559	349.60	14.81	3147.54
Masuk Deaerator	2.342	297.94	5.884	3058.07
Masuk LPH 4	2.078	193.84	2.783	2854.39
Masuk LPH 5	2.561	109.91	1.345	2691.99
Masuk LPH 6	2.555	79.55	0.465	2642.26
Masuk Kondensor	43.894	43.11	0.087	2291.90
Masuk Boiler	58.613	222.76	88.26	958.14

Adapun data efisiensi dan daya yang didapatkan dari hasil simulasi *cycle tempo* adalah sebagai berikut

- Daya netto : 54294.09 kW
- Daya gross : 55581.30 kW
- Efisiensi pembangkit gross : 33.510%
- Efisiensi pembangkit netto : 32.734%

b. Dayaangkitan pada turbin uap



- Ket: 1: Input turbin
 2: Bleed output HPH2
 3: Bleed output HPH1
 4: Bleed output Deaerator
 5: Bleed output LPH3
 6: Bleed output LPH2
 7: Bleed output LPH2
 8: Turbin output kondensor

Gambar 4.8 Profil aliran massa pada turbin uap

Gambar 4.8 menunjukkan profil aliran massa yang masuk melalui inlet, bleed, dan outlet pada turbin uap. Perhitungan daya didapatkan melalui perhitungan termodinamika yang menghasilkan nilai:

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_t + \dot{m} \left[(h_i - h_o) + \frac{(v_i^2 - v_o^2)}{2} + g(z_i - z_o) \right]$$

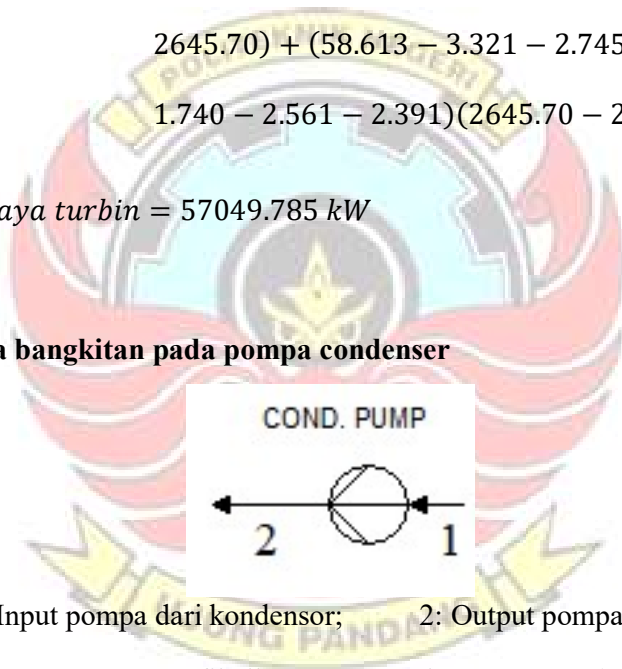
Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Daya turbin} = & \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \\ & \dot{m}_3)(h_3 - h_4) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4)(h_4 - h_5) + \\ & (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4 - \dot{m}_5)(h_5 - h_6) + \\ & (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6)(h_6 - h_7) + \\ & (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6 - \dot{m}_7)(h_7 - h_8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Daya turbin} = & 58.613(3413.73 - 3199.29) + (58.613 - \\
 & 3.321)(3199.29 - 3069.34) + (58.613 - 3.321 - \\
 & 2.745)(3069.34 - 2980.64) + (58.613 - 3.321 - \\
 & 2.745 - 1.962)(2980.64 - 2743.12) + \\
 & (58.613 - 3.321 - 2.745 - 1.962 - \\
 & 1.740)(2743.13 - 2691.99) + (58.613 - 3.321 - \\
 & 2.745 - 1.962 - 1.740 - 2.561)(2691.99 - \\
 & 2645.70) + (58.613 - 3.321 - 2.745 - 1.962 - \\
 & 1.740 - 2.561 - 2.391)(2645.70 - 2291.90)
 \end{aligned}$$

$$\text{Daya turbin} = 57049.785 \text{ kW}$$

c. Dayaangkitan pada pompa condenser



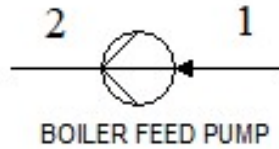
Ket: 1: Input pompa dari kondensor; 2: Output pompa.

Gambar 4.9 Profil aliran massa pada pompa *condenser*

Gambar 4.9 menunjukkan profil aliran massa yang masuk melalui inlet dan outlet pada pompa *condenser*. Perhitungan daya didapatkan melalui perhitungan termodinamika yang menghasilkan nilai:

$$\begin{aligned}
 \text{Daya pompa kondensat} &= \dot{m} (h_2 - h_1) \\
 &= 51.088 (181.64 - 180.54) \\
 &= 56.198 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

d. Daya bangkitan pada boiler feed pump



Ket: 1 : Input pompa dari deaerator; 2 : Output pompa.

Gambar 4.10 Profil aliran massa pada pompa *boiler feed pump*

Gambar 4.10 menunjukkan profil aliran massa yang masuk melalui inlet dan outlet pada pompa *condenser*. Perhitungan daya didapatkan melalui perhitungan termodinamika yang menghasilkan nilai:

$$\begin{aligned} \text{Daya boiler feed pump} &= \dot{m} (h_2 - h_1) \\ &= 58.613 (684.58 - 667.19) \\ &= 1019.28 \text{ kW} \end{aligned}$$

e. Efisiensi PLTU berdasarkan cycle tempo

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi nett PLTU} &= \frac{(\text{daya output generator} - \text{daya auxialary})}{Q_{\text{boiler}}} \\ &= \frac{(55581.3 - 1287.21)}{165865.59} \\ &= 32.73 \% \end{aligned}$$

f. **Nett heat rate PLTU berdasarkan cycle tempo**

$$\begin{aligned}
 \text{Nett heat rate PLTU} &= \frac{Q_{\text{boiler}}}{\text{nett power output}} \\
 &= \frac{165865.59}{54438.45} \\
 &= 3.046 \text{ kJ/kWs} \\
 &= 10965.6 \text{ kJ/kWh}
 \end{aligned}$$

4.3. Pembahasan Simulasi Cycle-Tempo PT. Indonesia Power UJP PLTU

Barru Unit 1

Berdasarkan analisis kesetimbangan sistem PLTU dan simulasi menggunakan cycle tempo 5.1 yang telah dilakukan, maka hasil persentase efisiensi net PLTU adalah 32.73% melalui analisis kesetimbangan energi. Selanjutnya untuk hasil Heat Rate adalah 10965.6 kJ/kWh.

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan efisiensi pada simulasi cycle tempo

	No.	Apparatus	Type	Energy [kW]	Totals [kW]
Absorbed power	1	Boiler	1	165865.59	165865.59
Delivered gross power	1	Generator	G	55581.30	55581.30
Aux. power consumption	5	Pump	8	-269.65	
	10	Pump	8	1072.54	
	15	Pump	8	484.32	
					1287.21
Delivered net power					54294.09
Efficiencies	gross			33.510 %	
	net			32.734 %	

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi, analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

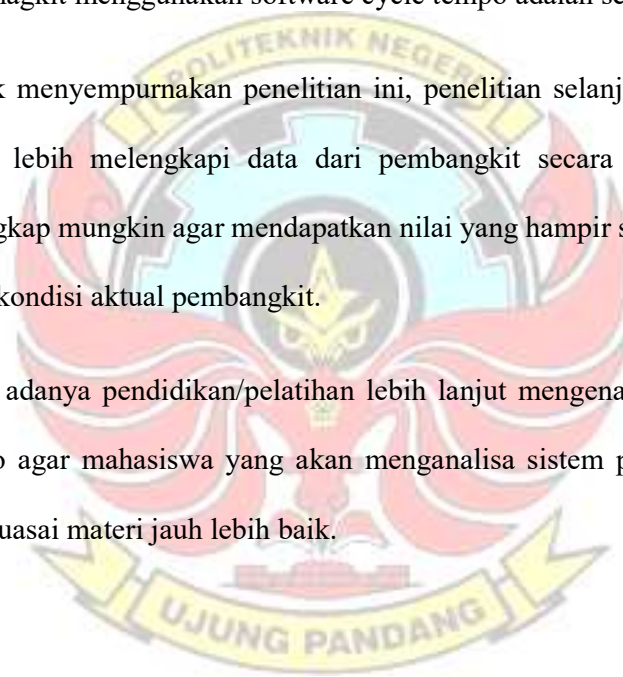
1. Hasil penelitian dengan menggunakan analisis kesetimbangan energi yang telah didapatkan menggunakan software cycle tempo untuk kondisi aktual pada PT. Indonesia Power UJP PLTU Barru unit 1 adalah daya sebesar, 54294.09 kW, heat rate sebesar 10965.6 kJ/kWh dan efisiensi sebesar 32.734%.
2. Dari hasil penelitian dapat diketahui persentase perbandingan data hasil simulasi software cycle tempo dengan data kondisi aktual komisioning pada PT. Indonesia Power UJP PLTU Barru unit 1 untuk nilai daya berdasarkan data Heat Balance yaitu 55581.3 kW dan data simulasi cycle tempo 54294.09 kW dengan persentase perbandingan sebesar 2.3%.
3. Untuk nilai persentase perbandingan data heat rate berdasarkan data kondisi aktual komisioning yaitu 9274.3 kJ/kWh dan data simulasi cycle tempo yaitu 10965.6 kJ/kWh dengan persentase perbandingan sebesar 18.24%.
4. Untuk nilai persentase perbandingan data efisiensi berdasarkan data kondisi aktual komisioning yaitu 38.46% dan data simulasi cycle tempo yaitu 32.73% dengan persentase perbandingan sebesar 14.89%.

5. Adapula perbedaan-perbedaan ini terjadi akibat terdapat perbedaan nilai laju aliran massa yang agak lebih besar daripada kondisi aktual PLTU serta adanya kondisi software yang berbeda dengan kondisi aktual PLTU seperti efisiensi, *leak off*, kebocoran, dan *pressure drop* dalam *apparatus*.

5.2. Saran

Beberapa saran yang dapat disampaikan setelah melakukan perancangan sistem pembangkit menggunakan software cycle tempo adalah sebagai berikut:

1. Untuk menyempurnakan penelitian ini, penelitian selanjutnya diharapkan dapat lebih melengkapi data dari pembangkit secara lebih detail dan selengkap mungkin agar mendapatkan nilai yang hampir sama dengan nilai pada kondisi aktual pembangkit.
2. Perlu adanya pendidikan/pelatihan lebih lanjut mengenai software cycle-tempo agar mahasiswa yang akan menganalisa sistem pembangkit dapat menguasai materi jauh lebih baik.



DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, Rizki Candra. 2016. “Simulasi Cycle-Tempo Pengaruh Operasi High Pressure Heater Terhadap Performa PLTU 200 MW PT. PJB Gresik”. Laporan Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Apollo dan Jamal. 2013. *Termodinamika Teknik*. Bahan Ajar. Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Delft Institute of Technology. *Cycle-Tempo 5 Technical Notes*. Dokumen teknis, Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering. Netherlands.
- El-Wakil, M.M. 1996. *Instalasi Pembangkit Daya*. Dialihbahasakan oleh E. Jasjfi. Jakarta: Eirlangga.
- Hetharia, Marlon dan Yolanda J. Lewerissa. 2018. “Analisis pada Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan Cycle Tempo”. *Jurnal Voering*, 3 (1): 1-8.
- <https://www.youtube.com/watch?v=uB0cntfOHK0&list=PLBUHO4VNB5hCf8vIFj86rHQnJHD4rE0ES&index=45>
- Kurkiya, Raviprakash dan Sharad Chaudhary. 2012. “Energy Analysis of Thermal Power Plant”. *Journal of Scientific & Engineering Research*. 3 (7):1-7.
- Nasruddin dan Pujo Satrio. 2015. “Analisa Energi, Exergi dan Optimasi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Super Kritis 660 MW”. Banjarmasin, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV*.
- Outlook Energi Indonesia 2019*. 2019. Jakarta: Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional.
- P. Ravindra Kumar, V. Ramachandra Raju dan N. Ravi Kumar. 2016. “Simulation and Parametric Optimisation of Thermal Power Plant Cycles”. *Elsevier*, hal. 304-306.

- Pratama, Rian dkk. 2014. “Simulasi Pengaruh Variasi Ekstraksi Turbin Terhadap Efisiensi Termal Sisltem PLTU Barru Menggunakan MATLAB/Simulink”. *Jurnal Sinergi*, (2): 171-180.
- Satiti, Sekar. 2015. “Analisis Performa PLTU Versus Variasi Beban pada Turbin Uap Menggunakan Software Cycle Tempo”. Laporan Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- S.C. Kaushik, V. Siva Reddy dan S.K. Tyagi. 2010. “Energi and Exergy Analyses of Thermal Power Plants: A review”. *Elsevier*, hal. 16.
- Syahrunnisa, Aini dkk. 2016. “Exergy Analysis on Thermal Power Plant PT. Makassar Tene Using Cycle-Tempo 5”. *Jurnal Sinergi*, (2): 178-190.
- Zakaria, Muhammad Fauzi dan Mohammad Effendy. 2018. “Analisis Energi dan Turbin Uap pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Unit 2 Tanjung Awar-Awar”. *JTM*, 6 (2): 77-85.



L

A

M

P

I

R

A

N







PLTU Barru Operation and Maintenance Services Unit (BRU)
Dusun Bawasalo, Desa Lampoko, Kecamatan Balusu,
Kabupaten Barru, Sulawesi Selatan.
Telepon :
Facsimile :

SURAT KETERANGAN
030.SKt/080/BRUOMU/2020

Yang bertandatangan dibawah ini menerangkan bahwa Mahasiswa Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang yang tersebut dibawah ini :

NO	NAMA	NIM
1	Wahyu Silahudin	442160015

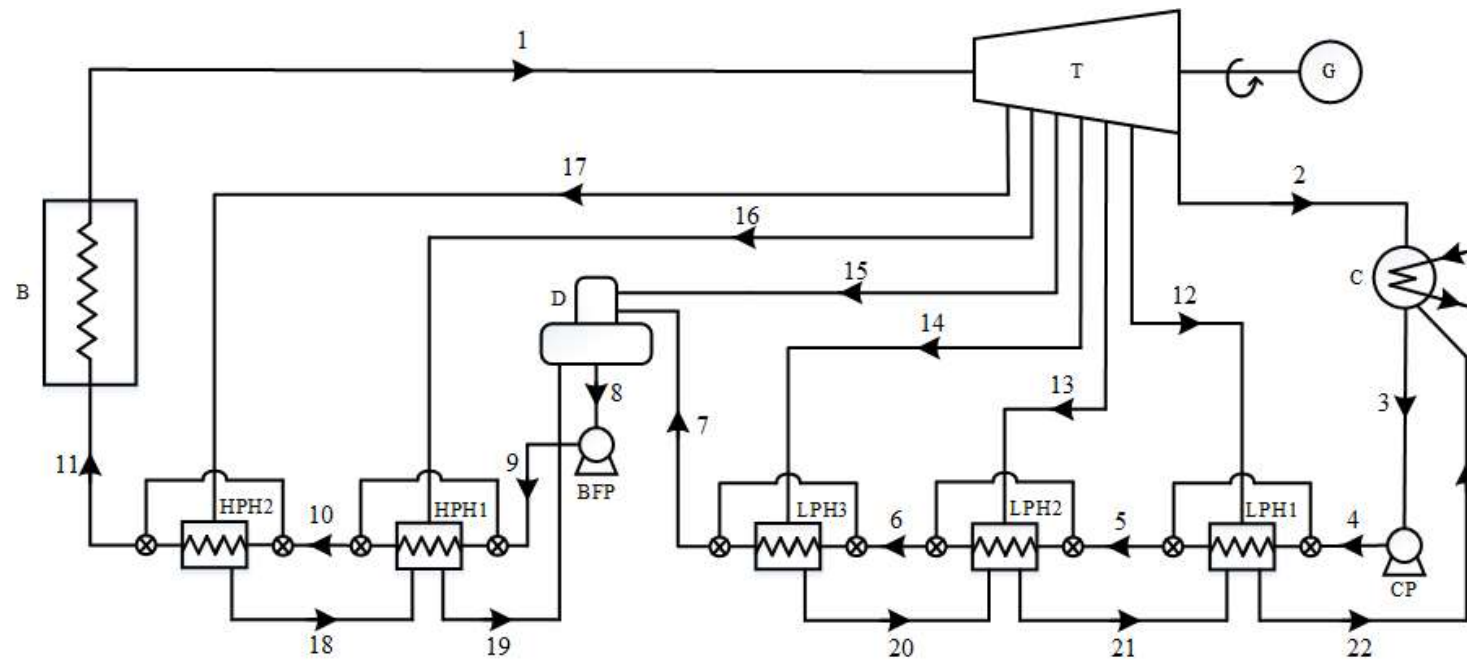
Telah melaksanakan Penelitian di PLTU Barru OMU PT Indonesia Power pada tanggal 7 s.d 11 September 2020 dengan surat persetujuan kami No.0172/150/BRUOMU/2020.

Sehubungan hal tersebut mohon dapat melampirkan dokumen hasil penelitian yang telah di tandatangani oleh pihak kampus.

Demikian surat keterangan ini kami berikan untuk digunakan sebagaimana mestinya.

MANAGER OF PLTU BARRU OPERATION AND
MAINTENANCE SERVICES UNIT





- | | | | |
|-----|--------------------|------|-------------------------------------|
| B | : Boiler | LPH1 | : Low pressure feed water heater 1 |
| T | : Turbin | LPH2 | : Low pressure feed water heater 2 |
| G | : Generator | LPH3 | : Low pressure feed water heater 3 |
| C | : Condenser | HPH1 | : High pressure feed water heater 1 |
| D | : Deaerator | HPH2 | : High pressure feed water heater 2 |
| CP | : Condenser pump | | |
| BFP | : Boiler feed pump | | |

Gambar A.1. Single line diagram sistem PLTU Barru

LAMPIRAN B

OUTPUT CYCLE TEMPO

Tabel B.1 Energy Balance

No.	Name	Type	Energy loss (enthalpy) [kW]	Energy loss (HHV) [kW]	Energy loss (LHV) [kW]
1	Boiler	1	-147620.38	-147620.38	-147620.38
3	Turbine	3	56600.10	56600.10	56600.10
4	Condenser	4	0.00	0.00	0.00
6	Flash.Heater	5	0.00	0.00	0.00
7	Flash.Heater	5	0.00	0.00	0.00
8	Flash.Heater	5	0.00	0.00	0.00
11	Flash.Heater	5	0.00	0.00	0.00
12	Flash.Heater	5	0.00	0.00	0.00
9	Deaerator	7	0.00	0.00	0.00
5	Pump	8	251.68	73.72	-4067.41
10	Pump	8	-1018.93	-1018.93	-1018.93
15	Pump	8	-454.23	-454.23	-454.23
13	Node	9	0.00	0.00	0.00
2	Sink/Source	10	3689.64	3689.64	3689.64
14	Sink/Source	10	-404057.56	-67121.77	7773377.00
16	Sink/Source	10	498283.84	161348.06	-7679151.00
17	Sink/Source	10	-2776.75	-2691.33	-703.78
18	Sink/Source	10	-1313.95	-1274.07	-346.23
19	Sink/Source	10	-1158.38	-1122.91	-297.62
20	Sink/Source	10	-425.11	-407.90	-7.46
1	Pipe		0.00	0.00	0.00
2	Pipe		0.00	0.00	0.00
14	Pipe		0.00	0.00	0.00
15	Pipe		0.00	0.00	0.00
16	Pipe		0.00	0.00	0.00
17	Pipe		0.00	0.00	0.00
18	Pipe		0.00	0.00	0.00
19	Pipe		0.00	0.00	0.00
20	Pipe		0.00	0.00	0.00
21	Pipe		0.00	0.00	0.00
22	Pipe		0.00	0.00	0.00
23	Pipe		0.00	0.00	0.00
24	Pipe		0.00	0.00	0.00
28	Pipe		0.00	0.00	0.00
29	Pipe		0.00	0.00	0.00
30	Pipe		0.00	0.00	0.00
31	Pipe		0.00	0.00	0.00
	Total:		0.00	0.00	0.00

Tabel B.2 Data for all pipes

Pipe no.	Medium	Mass flow [kg/s]	Mole flow [kmol/s]	Volume flow [m ³ /s]	Pressure [bar]	Temperature [°C]	Enthalpy [kJ/kg]	Entropy [kJ/kg.K]	Quality [%]
1	WATERSTM	58.613	3.254	2.3324	88.26	535.00	3476.68	6.7816	100.00
				2.3324	88.26	535.00	3476.68	6.7816	100.00
2	WATERSTM	58.613	3.254	3.0463	65.00	498.59	3413.73	6.8353	100.00
				3.0463	65.00	498.59	3413.73	6.8353	100.00
3	WATERSTM	43.894	2.436	646.23	0.08700	43.11	2291.90	7.2898	88.03
				646.23	0.08700	43.11	2291.90	7.2898	88.03
4	WATERSTM	51.088	2.836	0.051554	0.08700	43.11	180.54	0.6137	0.00
				0.051554	0.08700	43.11	180.54	0.6137	0.00
5	WATERSTM	49.392	2.742	0.049832	5.884	43.25	181.64	0.6154	0.00
				0.049832	5.884	43.25	181.64	0.6154	0.00
6	WATERSTM	49.392	2.742	0.049832	5.884	43.25	181.64	0.6154	0.00
				0.049832	5.884	43.25	181.64	0.6154	0.00
7	WATERSTM	49.392	2.742	0.050639	5.884	74.52	312.40	1.0095	0.00
				0.050639	5.884	74.52	312.40	1.0095	0.00
8	WATERSTM	49.392	2.742	0.051647	5.884	103.11	432.57	1.3416	0.00
				0.051647	5.884	103.11	432.57	1.3416	0.00
9	WATERSTM	49.392	2.742	0.052635	5.884	125.98	529.49	1.5917	0.00
				0.052635	5.884	125.98	529.49	1.5917	0.00
10	WATERSTM	58.613	3.254	0.064458	5.884	158.07	667.19	1.9235	0.00
				0.064458	5.884	158.07	667.19	1.9235	0.00
11	WATERSTM	58.613	3.254	0.064316	88.26	160.97	684.58	1.9427	0.00
				0.064316	88.26	160.97	684.58	1.9427	0.00
12	WATERSTM	58.613	3.254	0.066899	88.26	194.69	831.84	2.2694	0.00
				0.066899	88.26	194.69	831.84	2.2694	0.00
13	WATERSTM	58.613	3.254	0.069585	88.26	222.76	958.14	2.5315	0.00
				0.069585	88.26	222.76	958.14	2.5315	0.00
14	WATERSTM	2.391	0.133	7.6757	0.5050	81.60	2645.70	7.5898	100.00
				7.6757	0.5050	81.60	2645.70	7.5898	100.00
15	WATERSTM	2.561	0.142	3.0416	1.462	110.60	2691.99	7.2316	100.00
				3.3052	1.345	109.91	2691.99	7.2694	100.00
16	WATERSTM	1.740	0.097	1.0696	3.025	141.81	2743.12	7.0322	100.00
				1.0696	3.025	141.81	2743.12	7.0322	100.00
17	WATERSTM	1.962	0.109	0.44303	10.69	268.09	2980.64	6.9672	100.00
				0.44303	10.69	268.09	2980.64	6.9672	100.00
18	WATERSTM	2.745	0.152	0.44610	16.10	315.28	3069.34	6.9419	100.00
				0.44610	16.10	315.28	3069.34	6.9419	100.00
19	WATERSTM	3.321	0.184	0.34369	28.11	384.37	3199.29	6.9036	100.00
				0.37372	25.86	382.57	3199.29	6.9405	100.00
20	WATERSTM	3.321	0.184	0.0039884	25.86	225.76	970.39	2.5711	0.00
				0.032754	14.81	197.69	970.39	2.5816	6.59
21	WATERSTM	6.880	0.382	0.0079323	14.81	197.69	842.00	2.3090	0.00
				0.19208	5.884	158.07	842.00	2.3288	8.37

22	WATERSTM	2.078	0.115	0.0022246 0.11815	2.783 1.345	130.98 108.11	550.59 550.59	1.6450 1.6528	0.00 4.35
23	WATERSTM	4.639	0.257	0.0048708 0.84344	1.345 0.4650	108.11 79.52	453.36 453.36	1.3977 1.4111	0.00 5.21
24	WATERSTM	7.194	0.399	0.0074003 7.6511	0.4650 0.08700	79.52 43.11	332.93 332.93	1.0697 1.0956	0.00 6.35
25	WATERSTM	3211.074	178.243	3.2251 3.2251	1.000 1.000	30.00 30.00	125.83 125.83	0.4368 0.4368	0.00 0.00
26	WATERSTM	3211.074	178.243	3.2250 3.2250	2.000 2.000	30.01 30.01	125.97 125.97	0.4369 0.4369	0.00 0.00
27	WATERSTM	3211.074	178.243	3.2325 3.2325	2.000 2.000	37.00 37.00	155.18 155.18	0.5321 0.5321	0.00 0.00
28	WATERSTM	3.559	0.198	0.67226 0.67226	14.81 14.81	349.60 349.60	3147.54 3147.54	7.1085 7.1085	100.00 100.00
29	WATERSTM	2.342	0.130	1.0337 1.0337	5.884 5.884	297.94 297.94	3058.07 3058.07	7.3759 7.3759	100.00 100.00
30	WATERSTM	2.078	0.115	1.5844 1.5844	2.783 2.783	193.84 193.84	2854.39 2854.39	7.3227 7.3227	100.00 100.00
31	WATERSTM	2.555	0.142	8.8607 8.8607	0.4650 0.4650	79.54 79.55	2642.26 2642.26	7.6178 7.6178	100.00 100.00

Tabel B.3 Losses in pipes

Pipe no.	Geogr hght dif [m]	Pr.drop hght dif [bar]	Pr.drop fl res [bar]	Pressure drop [bar]	Temperature drop [°C]	Enthalpy drop [kJ/kg]	Entropy rise [kJ/kg.K]	Energy loss [kW]
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00
15	0.00	0.00	0.12	0.12	0.69	0.00	0.0377	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00
19	0.00	0.00	2.25	2.25	1.80	0.00	0.0369	0.00
20	0.00	0.00	11.05	11.05	28.07	0.00	0.0105	0.00
21	0.00	0.00	8.93	8.93	39.62	0.00	0.0199	0.00
22	0.00	0.00	1.44	1.44	22.87	0.00	0.0078	0.00
23	0.00	0.00	0.88	0.88	28.59	0.00	0.0134	0.00
24	0.00	0.00	0.38	0.38	36.41	0.00	0.0259	0.00
28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00
31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00

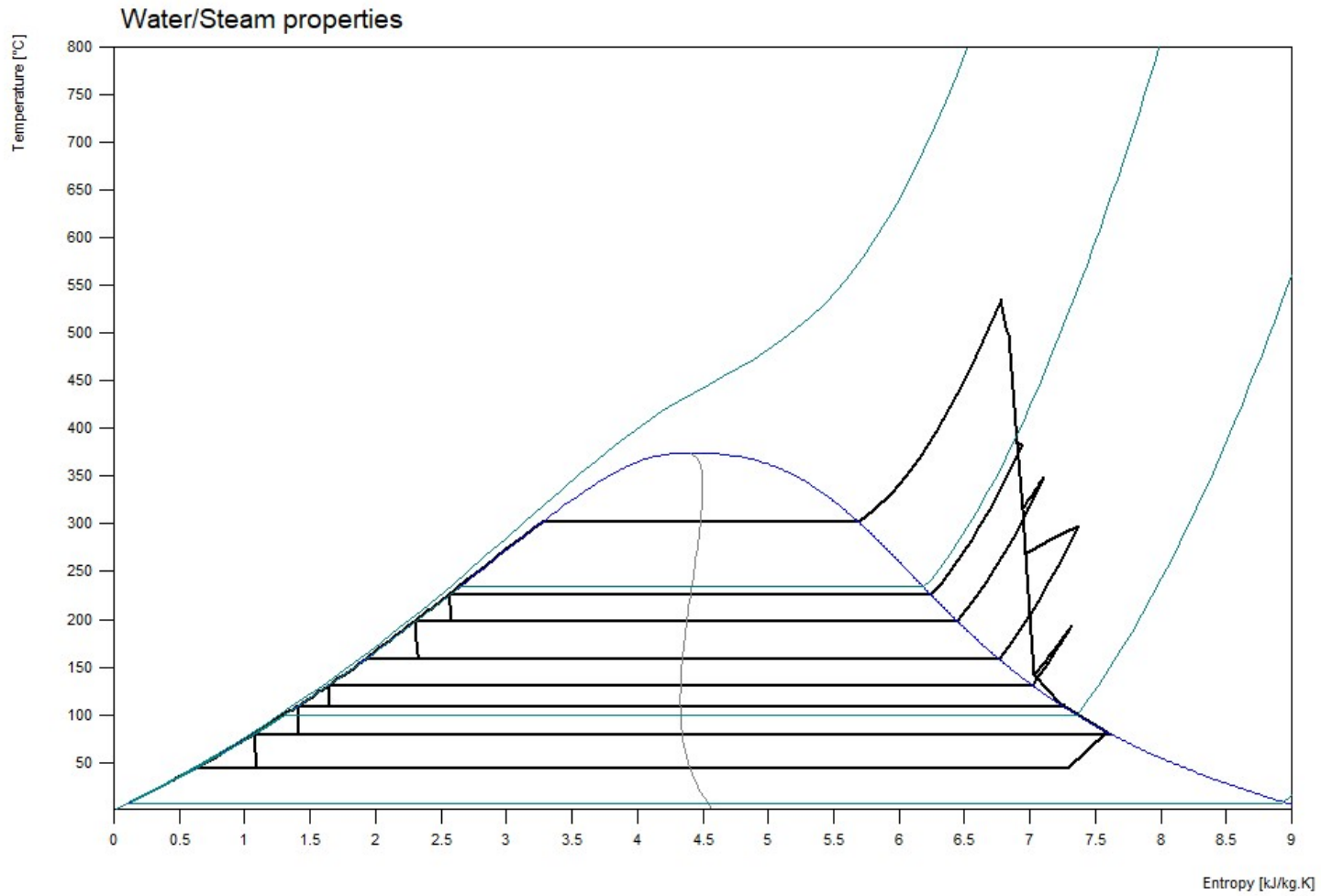
Tabel B.4 Heat exchanging equipment

App. no.	Name	Type	Low end temperature diff. [K]	High end temperature diff. [K]	Transmitted heat flow [kW]
4	Condenser	4	13.10	6.11	93772.06
6	Flash.Heater	5	36.27	5.00	6458.56
7	Flash.Heater	5	33.59	5.00	5935.34
8	Flash.Heater	5	27.87	5.00	4786.85
11	Flash.Heater	5	36.72	3.00	8631.21
12	Flash.Heater	5	31.07	3.00	7402.88

PLTU Barru LENGKAP.rfp - miniREFPROP - NIST Reference Fluid Properties - [3: Water: Specified state points]
 File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help Cautions

	Pressure (bar)	Temperature (°C)	Quality (kg/kg)	Enthalpy (kJ/kg)
1	88.260	535.00	Superheated	3476.8
2	65.000	498.59	Superheated	3413.9
3	0.087000	43.140	Superheated	2579.1
4	0.087142	43.140	0.00000	180.66
5	0.089438	43.640	0.00000	182.75
6	0.095065	44.820	0.00000	187.68
7	0.37859	74.540	0.00000	312.10
8	1.1328	103.13	0.00000	432.38
9	2.3947	126.00	0.00000	529.33
10	5.8878	158.09	0.00000	667.18
11	6.1949	160.08	0.00000	675.82
12	13.896	194.69	0.00000	828.40
13	24.427	222.72	0.00000	956.19
14	0.50500	81.600	Superheated	2645.7
15	1.4620	110.60	Superheated	2692.0
16	3.0250	141.81	Superheated	2743.1
17	10.690	268.09	Superheated	2980.5
18	16.100	315.28	Superheated	3069.3
19	28.110	384.37	Superheated	3199.4
20	25.843	225.72	0.00000	970.15
21	14.812	197.69	0.00000	841.87
22	2.7846	131.00	0.00000	550.65
23	1.3460	108.13	0.00000	453.50
24	0.46538	79.540	0.00000	333.08
25	0.042470	30.000	0.00000	125.73
26	0.042470	30.000	0.00000	125.73
27	0.062823	37.000	0.00000	154.99
28	14.810	349.60	Superheated	3147.6
29	5.8840	297.94	Superheated	3058.0
30	2.7830	193.84	Superheated	2854.3
31	0.46500	79.540	Superheated	2642.3
32				

Gambar B.1 Hasil output nilai entalpi PLTU Barru 2x50 MW Unit 1 menggunakan aplikasi miniREFPROP sebagai pembanding hasil output *cycle tempo*.



Gambar B.2 Diagram T-S sistem PLTU

LEMBAR REVISI JUDUL SKRIPSI

Nama : WATYU SILAHUDDIN
 NIM : 442.16.015.

Catatan Daftar Revisi Penguji :

No	Nama	Uraian	Tanda Tangan
1.	Bri Sunasti, ST, MT	hd. 20. Koreksi flow chart.	de Ae 4/2/21
2.	Musyady Mulyadi, SSTMT	# hal. 20. penjelasan gbr 2-7 # daftar Notasi. # hal. 24 cek diagram perhitungannya cycle tempo.	Aec 05/2021 02
3.	Prof. Ir. Makmur Saini MT, PhD	# Usulkan ada pembatasan dari hasil cycle tempo. # Munculkan selisih error (angka) # Lampirkan Gbr Single Diagram PTH. # Koreksi ringkasan. # Jelaskan standar penginputan pd cycle tempo. # Penjelasan gbr 4.8. (Keterangan tambur). # Koreksi kesimpulan.	Ae 19/2021 02

Makassar,
Ketua / Sekretaris Panitia Ujian Sidang.

NIP.

Catatan: Jika ada perubahan Judul Tugas Akhir konfirmasi secepatnya ke bagian Akademik.