

**KOMPUTASI KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PT PLN PERSERO
SEKTOR PEMBANGKITAN TARAHAN DENGAN PENDEKATAN KESEIMBANGAN
ENERGI DAN EKSERGI MENGGUNAKAN BAHASA PEMROGRAMAN PYTHON**

Skripsi

Oleh

ANGGA DARMA PRABOWO



JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG

2019

ABSTRACT

THE COMPUTATION OF STEAM POWER PLANT PERFORMANCE OF PT PLN PERSERO TARAHAN POWER GENERATION SECTOR BASED ON ENERGY BALANCE AND EXERGY APPROACH USING PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE

by

ANGGA DARMA PRABOWO

More than 50% of power plants in Indonesia are Coal-Fired Steam Power Plants. According to the Ministry of Energy and Mineral Resources of Indonesia, coal reserves in Indonesia will run out in 67 years. Fuel saving can be done by operating the system in the highest efficiency operating conditions. These conditions can be determined by studying the operating history of the system along with the performance produced. Performance calculation of the Coal-Fired Steam Power Plants system that is not easy results in lack of system performance data generated from the history of the coal-fired steam power plants operation so that the Steam Powerplant Performance Calculator software written using the Python programming language is used to calculate the coal-fired steam power plants performance based on the principle of energy balance and exergy quickly and accurately.

Accuracy of Steam Powerplant Performance Calculator was tested using the Coal-Fired Steam Power Plants performance values calculated manually as a comparison and result difference between the two types of calculations below 1% and able to cut manual calculation time from 4 hours 28 minutes to 14.34 minutes using the software with operator equipped with knowledge of Engineering Thermodynamics and knowledge of the Coal-Fired Steam Power Plants working principal and 17.13 minutes with operator equipped only having knowledge of the Coal-Fired Steam Power Plants working principal.

Keyword : Steam Power Plant, Performance, Python

ABSTRAK

KOMPUTASI KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PT PLN PERSERO SEKTOR PEMBANGKITAN TARAHAH DENGAN PENDEKATAN KESEIMBANGAN ENERGI DAN EKSERGI MENGUNAKAN BAHASA PEMROGRAMAN PYTHON

oleh

ANGGA DARMA PRABOWO

Lebih dari 50% pembangkit listrik di Indonesia merupakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu-bara. Menurut kementerian ESDM, cadangan batubara di Indonesia akan habis dalam 67 tahun. Penghematan penggunaan bahan bakar PLTU dapat dilakukan dengan megoperasikan sistem pada kondisi operasi dengan efisiensi tertinggi. Kondisi tersebut dapat ditentukan dengan mempelajari riwayat operasi sistem beserta kinerja yang dihasilkan. Perhitungan kinerja sistem PLTU yang tidak mudah mengakibatkan kurangnya data kinerja yang dihasilkan dari riwayat operasi sistem PLTU sehingga software Steam Powerplant Performance Calculator yang ditulis menggunakan bahasa pemrograman Python digunakan untuk menghitung kinerja sistem PLTU berdasarkan prinsip keseimbangan energi dan eksergi secara cepat dan akurat.

Akurasi Steam Powerplant Performance Calculator diuji menggunakan nilai kinerja sistem PLTU yang dihitung secara manual sebagai pembanding dan menghasilkan nilai selisih antara kedua jenis perhitungan dibawah 1% dan dapat memangkas waktu perhitungan manual selama 4 jam 28 menit menjadi 14,34 menit dengan operator berlatar belakang memiliki pengetahuan Termodinamika Teknik serta pengetahuan sistem kerja PLTU dan 17.13 menit dengan operator berlatar belakang hanya memiliki pengetahuan sistem kerja PLTU.

Kata kunci : PLTU, Kinerja, Python

**KOMPUTASI KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PT PLN PERSERO
SEKTOR PEMBANGKITAN TARAHAN DENGAN PENDEKATAN KESEIMBANGAN
ENERGI DAN EKSERGI MENGGUNAKAN BAHASA PEMROGRAMAN PYTHON**

Oleh

ANGGA DARMA PRABOWO

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2019

Judul Skripsi : **KOMPUTASI KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PT PLN PERSERO SEKTOR PEMBANGKITAN TARAHAN DENGAN PENDEKATAN KESEIMBANGAN ENERGI DAN EKSERGI MENGGUNAKAN BAHASA PEMROGRAMAN PYTHON**

Nama Mahasiswa : **Angga Darma Prabowo**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1415021013


Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP 19740816 200012 1 001


A Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng.
NIP 19760715 200812 1 002

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin

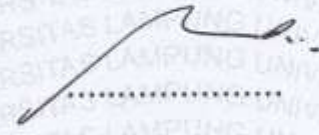

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP 19740816 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Ahmad Su'udi, S.T., M.T.



Anggota

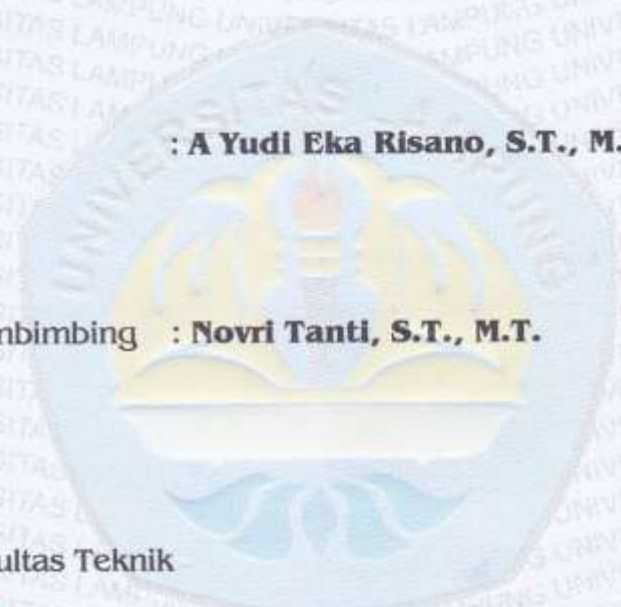
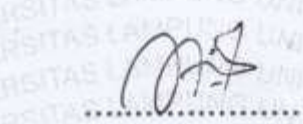
: A Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng.



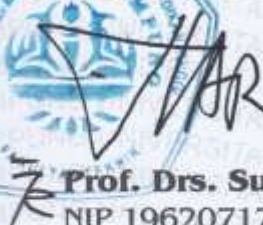
Penguji

Bukan Pembimbing

: Novri Tanti, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Suharno, M.Sc., Ph.D.

NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 19 Juni 2019

PERNYATAAN PENULIS

SKRIPSI INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 27 PERATURAN
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT
KEPUTUSAN REKTOR NO. 3187/H26/DT/2010

YANG MEMBUAT PERNYATAAN



ANGGA DARMA PRABOWO

NPM. 1415021013

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 6 Mei 1996, sebagai anak pertama dari 2 bersaudara dari pasangan Bapak Muhadi dan Ibu Erna. Penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SDN 5 Talang Bandar Lampung pada tahun 2008. Kemudian melanjutkan ke SMPN 3 Bandar Lampung dan lulus pada tahun 2011. Kemudian Penulis melanjutkan ke SMAN 8 Bandar Lampung dengan jurusan IPA dan lulus pada tahun 2014.

Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Universitas Lampung pada program studi S1 Jurusan Teknik Mesin.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam organisasi kampus HIMATEM (Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung) sebagai anggota bidang diklat. Selain itu penulis juga aktif sebagai panitia dari acara-acara besar kampus seperti IC STAR 2015 dan KRTI 2016.

Pada tahun 2016, penulis melakukan kerja praktek di PT PLN PERSERO Sektor Pembangkitan Tarahan dengan judul “Analisa Eksergi Turbin Uap PT PLN PERSERO Sektor Pembangkitan Tarahan Unit 4”.

Kemudian penulis tertarik dengan Data Science dan Machine Learning dan mengambil judul skripsi “Komputasi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap PT PLN PERSERO Sektor Pembangkitan Tarahan Dengan Pendekatan Keseimbangan Energi Dan Eksergi Menggunakan Bahasa Pemrograman Python” untuk menguasai bahasa pemrograman Python dan dapat mengaplikasikannya dalam dunia industry sebagai langkah awal dalam mempelajari Data Science dan Machine Learning.

DENGAN RASA SYUKUR KEPADA ALLAH SWT

KARYA INI KUPERSEMBAHKAN UNTUK :

KEDUA ORANG TUAKU TERCINTA

BAPAK MUHADI

&

IBU ERNA

JUGA KEPADA

REKAN-REKAN SEPERJUANGAN

ALMAMATER TERCINTA

TEKNIK MESIN UNIVERSITAS LAMPUNG

QUOTES

FANTASY is reality in the future

Writer

Failures is investments that you can harvest them in the future

Writer

Nothing is imposible, it is just a question

“ HOW MUCH YOU ?”

Writer

The more you do, The more you invest, The more you get

Writer

DON'T STOP until your IDOLS become your RIVALS

Writer

Money (Success) Follows Attention, So don't afraid to get attention

Grant Cardone (The 10X)

Don't do what you love, DO WHAT IT TAKES !!!

Dan Lok (The King of High Ticket Sales)

Have no FEAR, Just *** DO IT !!!**

Dan Pena (The 50 Billion Dollars Man)

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas rahmat dan ridho Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi dengan judul **“Komputasi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap Pt Pln Persero Sektor Pembangkitan Tarahan Dengan Pendekatan Keseimbangan Energi Dan Eksergi Menggunakan Bahasa Pemrograman Python”** merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung .

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapat motivasi serta dukungan baik secara moril maupun materil dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tuaku tercinta Bapak Muhadi dan Ibu Erna, yang selalu memberikan dukungan semangat, kasih sayang, kesabaran, dan selalu mendoakan atas kesuksesan penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini dan mendapat gelar Sarjana Teknik
2. Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P., selaku Rektor Universitas Lampung
3. Prof . Drs. Suharno, M.Sc., Ph.D., Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
4. Bapak Ahmad Su'udi, S.T., M.T., Selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung sekaligus sebagai Dosen Pembimbing Pertama yang telah memberikan banyak waktu, ide, serta pengarahannya dalam penyusunan skripsi ini.
5. Bapak A Yudi Eka Rosano, S.T., M.Eng., Selaku Dosen Pembimbing Kedua yang telah memberikan banyak waktu, ide, serta pengarahannya dalam penyusunan skripsi ini.

6. Ibu Novri Tanti, S.T., M.T., Selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat bermanfaat bagi penulis.
7. Bapak Anwar Selaku Staff Bagian Operasi PT PLN PERSERO Sektor Pembangkitan Tarahan yang telah membantu penulis dalam meninjau sistem PLTU dan memberi data-data yang sangat bermanfaat dalam skripsi ini.
8. Bapak Indra Mamad Gandidi, S.T., M.T., Selaku Dosen Pembimbing PKM sekaligus Mentor Penulis yang banyak memberikan nasihat-nasihat yang sangat bermanfaat bagi penulis dalam menjalani kehidupan.
9. Bapak Achmad Yahya, S.T., M.T., Selaku Dosen Pembimbing BKSTM 2018 di Kupang NTT, yang telah memberikan motivasi, dukungan, dan saran-saran yang bermanfaat untuk pengembangan diri penulis
10. Seluruh Staff Pengajar Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu yang berguna kepada penulis
11. Seluruh Staff Pendukung Jurusan Teknik Mesin, Khususnya Mas Marta yang telah memberikan pelayanan administrasi yang sangat cepat dan memuaskan.
12. Teman-teman seperjuangan TEKNIK MESIN 2014 yang telah membantu dan saling mendukung, Semoga persaudaraan kita tetap terjaga dan berpegang teguh pada “SOLIDARITY FOREVER”

Akhir kata, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, akan tetapi sedikit harapan semoga yang sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, Juni 2019

Penulis

Angga Darma Prabowo

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|----------------|
| SANWACANA | iii |
| DAFTAR ISI..... | iv |
| DAFTAR GAMBAR..... | vii |
| DAFTAR TABEL | viii |
| | |
| BAB I. PENDAHULUAN | |
| A. Latar Belakang..... | 1 |
| B. Tujuan..... | 3 |
| C. Batasan Masalah..... | 3 |
| D. Sistematika Penulisan..... | 4 |
| | |
| BAB II. TINJAUAN PUSTAKA | |
| A. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)..... | 5 |
| 1. Sistem Pembangkitan..... | 5 |
| 2. Jenis-jenis boiler..... | 5 |
| 3. Jenis-jenis turbin uap..... | 6 |
| B. Siklus Rankine | 8 |
| 1. Analisa Siklus Rankine Sederhana | 8 |
| 2. Analisa Siklus Rankine Regeneratif..... | 9 |
| C. IAPWS-IF97 | 12 |
| 1. Persamaan Area 1..... | 12 |
| 2. Persamaan Area 2..... | 15 |
| 3. Persamaan Area 3..... | 17 |
| 4. Persamaan Area 4..... | 19 |
| 5. Persamaan Area 5..... | 21 |

| | |
|---|----|
| D. Eksergi..... | 23 |
| E. Performa Boiler..... | 25 |
| 1. Metode Langsung..... | 25 |
| 2. Metode Tidak Langsung..... | 25 |
| 3. Analisa eksergi boiler..... | 30 |
| F. Performa Turbin..... | 32 |
| G. Performa Kondensor..... | 33 |
| H. Performa Pompa..... | 34 |
| I. Performa Regenerator..... | 35 |
| J. Bahasa Pemrograman Python..... | 37 |
| 1. Komponen-komponen bahasa pemrograman Python..... | 37 |

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

| | |
|--------------------------------------|----|
| A. Waktu dan Tempat Pelaksanaan..... | 39 |
| B. Alat dan Bahan..... | 39 |
| C. Prosedur Penelitian..... | 40 |
| D. Diagram Alir Penelitian..... | 42 |
| E. Arsitektur Program..... | 44 |
| F. Diagram Alir program..... | 45 |

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

| | |
|---|----|
| A. Data Pengukuran..... | 53 |
| 1. Data spesifikasi PLTU Tarahan unit 3..... | 53 |
| 2. Data pengukuran kondisi siklus PLTU tarahan..... | 53 |
| 3. Data parameter operasi boiler..... | 58 |
| B. Perhitungan Kinerja PLTU Secara Manual..... | 62 |
| 1. Perhitungan kinerja turbin..... | 65 |
| 2. Perhitungan kinerja boiler..... | 73 |
| 3. Perhitungan kinerja kondensor..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| 4. Perhitungan kinerja regenerator | 76 |
| 5. Perhitungan kinerja pompa | 77 |
| C. Perhitungan Kinerja PLTU Menggunakan Program..... | 81 |
| 1. Perhitungan kinerja turbin menggunakan program..... | 87 |
| 2. Perhitungan kinerja boiler menggunakan program | 89 |
| 3. Perhitungan kinerja kondensor menggunakan program.... | 92 |
| 4. Perhitungan kinerja regenerator menggunakan program .. | 94 |
| 5. Perhitungan kinerja pompa menggunakan program | 95 |
| D. Perbandingan Perhitungan Program dengan Perhitungan Manual | 96 |
| 1. Perbandingan perhitungan kinerja turbin | 96 |
| 2. Perbandingan perhitungan kinerja boiler | 100 |
| 3. Perbandingan perhitungan kinerja kondensor | 105 |
| 4. Perbandingan perhitungan kinerja regenerator | 106 |
| 5. Perbandingan perhitungan kinerja pompa..... | 107 |
| E. Analisa Penggunaan Program | 109 |

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN

| | |
|-------------------|-----|
| A. Simpulan | 113 |
| B. Saran..... | 113 |

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|-----|
| Gambar 2.1. Diagram siklus rankine ideal..... | 8 |
| Gambar 2.2. Diagram siklus rankine dengan open feed water heater..... | 10 |
| Gambar 2.3. Diagram siklus rankine dengan closed feed water heater ... | 11 |
| Gambar 2.4. Diagram daerah kerja standar IAPWS-IF97 | 12 |
| Gambar 2.5. Heat Exchanger tipe Shell and Tube | 27 |
| Gambar 3.1. Diagram alir penelitian..... | 42 |
| Gambar 3.2. Arsitektur program | 44 |
| Gambar 3.3. Diagram alir program | 45 |
| Gambar 4.1. Grafik siklus Rankine PLTU Tarahan..... | 62 |
| Gambar 4.2. Tampilan awal program dengan kotak data masukan yang belum terisi | 81 |
| Gambar 4.3. Tampilan awal program dengan kotak data masukan yang sudah terisi | 82 |
| Gambar 4.4. Tampilan status data yang sudah sesuai, belum sesuai, dan pesan penjelasan kesalahan yang dilakukan | 83 |
| Gambar 4.5. Nilai entalpi dan entropi setiap titik parameter operasi..... | 84 |
| Gambar 4.6. Tampilan program pada segmen perhitungan kinerja turbin | 87 |
| Gambar 4.7. Tampilan program pada segmen perhitungan kinerja boiler..... | 90 |
| Gambar 4.8. Tampilan program pada segmen perhitungan kinerja kondensor..... | 93 |
| Gambar 4.9. Tampilan program pada segmen perhitungan kinerja regenerator | 94 |
| Gambar 4.10. Tampilan program pada segmen perhitungan kinerja pompa ... | 95 |
| Gambar 4.11. Grafik waktu yang dibutuhkan pengguna untuk menghitung kinerja PLTU menggunakan program. | 111 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1. Nilai I, J, dan n untuk area 1 | 14 |
| Tabel 2.2. Nilai J^0 , dan n^0 untuk area 2 (γ^o) | 16 |
| Tabel 2.3. Nilai I, J, dan n untuk area 2 (γ^r) | 16 |
| Tabel 2.4. Nilai sigma I, J, dan n area 3 | 18 |
| Tabel 2.5. nilai n_1 sampai dengan n_{10} pada persamaan area 4 atau area saturasi | 21 |
| Tabel 2.6. Nilai J^0 , dan n^0 untuk area 5 (γ^o) | 22 |
| Tabel 2.7. Nilai I, J, dan n untuk area 5 (γ^r) | 22 |
| Tabel 4.1. Data pengukuran kondisi-kondisi siklus uap PLTU Tarahan unit 3 pada pembebanan 64,12 MW. | 54 |
| Tabel 4.2. Data pengukuran kondisi-kondisi siklus uap PLTU Tarahan unit 3 pada pembebanan 74,25 MW. | 55 |
| Tabel 4.3. Data pengukuran kondisi-kondisi siklus uap PLTU Tarahan unit 3 pada pembebanan 86,02 MW. | 56 |
| Tabel 4.4. Data pengukuran kondisi-kondisi siklus uap PLTU Tarahan unit 3 pada pembebanan 100.82 MW. | 57 |
| Tabel 4.5. Data pengukuran parameter operasi boiler PLTU Tarahan unit 3 pada pembebanan 64,12 MW | 58 |
| Tabel 4.6. Data pengukuran parameter operasi boiler PLTU Tarahan unit 3 pada pembebanan 74,25 MW | 59 |
| Tabel 4.7. Data pengukuran parameter operasi boiler PLTU Tarahan unit 3 pada pembebanan 86,02 MW | 60 |
| Tabel 4.8. Data pengukuran parameter operasi boiler PLTU Tarahan unit 3 pada pembebanan 100,82 MW | 61 |
| Tabel 4.9. Nilai entalpi dan entropi pada beban 64,12 MW dan 74,25 MW | 63 |

| | |
|---|----|
| Tabel 4.10. Nilai entalpi dan entropi pada beban 86,02 MW dan 100,82 MW | 64 |
| Tabel 4.11. Fraksi massa aliran ekstraksi uap turbin pada beban 64,12 MW dan 74,25 MW | 66 |
| Tabel 4.12. Fraksi massa aliran ekstraksi uap turbin pada beban 86,02 MW dan 100,82 MW | 66 |
| Tabel 4.13. Nilai entalpi dan entropi pada kerja aktual dan kerja isentropis turbin uap pada beban 64,12 MW..... | 67 |
| Tabel 4.14. Nilai entalpi dan entropi pada kerja aktual dan kerja isentropis turbin uap pada beban 74,25 MW..... | 67 |
| Tabel 4.15. Nilai entalpi dan entropi pada kerja aktual dan kerja isentropis turbin uap pada beban 86,02 MW..... | 68 |
| Tabel 4.16. Nilai entalpi dan entropi pada kerja aktual dan kerja isentropis turbin uap pada beban 100,82 MW..... | 69 |
| Tabel 4.17. Nilai kerja aktual dan kerja isentropis turbin uap pada beban 64,12 MW dan 74,25 MW..... | 70 |
| Tabel 4.18. Nilai kerja aktual dan kerja isentropis turbin uap pada beban 86,02 MW dan 100,82 MW..... | 70 |
| Tabel 4.19. Efisiensi isentropis turbin uap..... | 71 |
| Tabel 4.20. Nilai eksergi aliran turbin. | 72 |
| Tabel 4.21. Nilai kerja reversibel turbin uap..... | 72 |
| Tabel 4.22. Efisiensi eksergetik turbin uap..... | 73 |
| Tabel 4.23. Kehilangan panas (losses) boiler metode indirect..... | 74 |
| Tabel 4.24. Kehilangan panas (losses) boiler metode direct dan unknown losses | 75 |
| Tabel 4.25. Nilai eksergi uap, eksergi bahan bakar, eksergi udara, dan efisiensi eksergetik boiler | 75 |

| | |
|---|----|
| Tabel 4.26. Nilai beban panas, panas maksimal yang dapat dipindahkan, dan efektivitas kondensor | 76 |
| Tabel 4.27. Nilai beban panas, panas maksimal yang dapat dipindahkan, dan efektivitas regenerasi HPH 1, HPH 2, LPH 4, dan LPH 5 | 77 |
| Tabel 4.28. Nilai entalpi dan entropi titik keluar masuk pompa kondensat.. | 78 |
| Tabel 4.29. Nilai entalpi dan entropi titik keluar masuk pompa air umpan.. | 78 |
| Tabel 4.30. Nilai kerja aktual, kerja isentropis dan kerja reversibel pompa. | 79 |
| Tabel 4.31. Nilai efisiensi isentropis dan efisiensi eksergetik pompa kondensat dan pompa air umpan..... | 80 |
| Tabel 4.32. Nilai entalpi dan entropi pada beban 64,12 MW dan 74,25 MW menggunakan program..... | 85 |
| Tabel 4.33. Nilai entalpi dan entropi pada beban 86,02 MW dan 100,82 MW menggunakan program..... | 86 |
| Tabel 4.34. Nilai kerja aktual dan kerja isentropis turbin uap pada beban 64,12 MW dan 74,25 MW menggunakan program..... | 88 |
| Tabel 4.35. Nilai kerja aktual dan kerja isentropis turbin uap pada beban 86,02 MW dan 100,82 MW menggunakan program..... | 88 |
| Tabel 4.36. Nilai kerja reversibel turbin uap dengan program | 89 |
| Tabel 4.37. Efisiensi isentropis dan eksergetik turbin dengan program | 89 |
| Tabel 4.38. Kinerja boiler metode direct pada program | 91 |
| Tabel 4.39. Nilai kehilangan panas (losses) boiler metode indirect pada program | 91 |
| Tabel 4.40. Nilai kinerja boiler metode eksergi pada program..... | 92 |
| Tabel 4.41. Parameter masukan dan nilai efektivitas kondensator pada program | 93 |
| Tabel 4.42. Nilai efektivitas regenerasi pada program..... | 95 |
| Tabel 4.43. Nilai kerja aktual, kerja isentropis dan kerja reversibel pompa. | 96 |

| | |
|--|-----|
| Tabel 4.44. Perbandingan nilai kerja aktual menggunakan program dan manual pada beban 64,12 MW dan 74,25 MW. | 97 |
| Tabel 4.45. Perbandingan nilai kerja aktual menggunakan program dan manual pada beban 86,2 MW dan 100,82 MW. | 97 |
| Tabel 4.46. Perbandingan nilai kerja isentropis menggunakan program dan manual pada beban 64,12 MW dan 74,25 MW. | 98 |
| Tabel 4.47. Perbandingan nilai kerja isentropis menggunakan program dan manual pada beban 86,2 MW dan 100,82 MW. | 98 |
| Tabel 4.48. Perbandingan nilai kerja reversibel menggunakan program dan manual pada beban 64,12 MW dan 74,25 MW. | 99 |
| Tabel 4.49. Perbandingan nilai kerja reversibel menggunakan program dan manual pada beban 86,2 MW dan 100,82 MW. | 100 |
| Tabel 4.50. Perbandingan perhitungan kinerja boiler metode direct dengan program dan manual pada daya 64.12 MW dan 74.25 MW..... | 101 |
| Tabel 4.51. Perbandingan perhitungan kinerja boiler metode direct dengan program dan manual pada daya 86.02 MW dan 100.82 MW..... | 101 |
| Tabel 4.52. Perbandingan persentase kehilangan panas (losses) boiler metode indirect dengan program dan manual pada beban 64.12 MW dan 74.25 MW | 102 |
| Tabel 4.53. Perbandingan persentase kehilangan panas (losses) boiler metode indirect dengan program dan manual pada beban 86.02 MW dan 100.82 MW | 103 |
| Tabel 4.54. Perbandingan perhitungan kinerja boiler metode eksergi dengan program dan manual pada beban 64.12 MW dan 74.25 MW | 104 |
| Tabel 4.55. Perbandingan perhitungan kinerja boiler metode eksergi dengan program dan manual pada beban 86.02 MW dan 100.82 MW ... | 104 |
| Tabel 4.56. Perbandingan perhitungan nilai efektivitas kondensor dengan program dan manual | 105 |

| | |
|---|-----|
| Tabel 4.57. Perbandingan perhitungan nilai efektivitas regenerator dengan program dan manual pada beban 64.12 MW dan 74.25 MW..... | 106 |
| Tabel 4.58. Perbandingan perhitungan nilai efektivitas regenerator dengan program dan manual pada beban 86.02 MW dan 100.82 MW..... | 106 |
| Tabel 4.59. Perbandingan nilai kerja aktual CP dan BFP menggunakan program dan manual..... | 107 |
| Tabel 4.60. Perbandingan nilai kerja isentropis CP dan BFP menggunakan program dan manual | 108 |
| Tabel 4.61. Perbandingan nilai kerja reversibel CP dan BFP menggunakan program dan manual | 108 |
| Tabel 4.62. Tabel waktu yang dibutuhkan pengguna berlatar belakang memiliki pengetahuan sistem PLTU dalam mengoperasikan program..... | 110 |
| Tabel 4.63. Tabel waktu yang dibutuhkan pengguna berlatar belakang memiliki pengetahuan sistem PLTU dan Termodinamika Teknik dalam mengoperasikan program | 110 |

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Semakin menipisnya persediaan bahan bakar tak terbarukan mendorong perusahaan penyedia energi khususnya PT PLN PERSERO untuk terus meningkatkan efisiensi penggunaan energi guna memperpanjang waktu pemakaian bahan bakar tak terbarukan dan meningkatkan keuntungan perusahaan dengan mengurangi volume penggunaan bahan bakar. Tercatat pada tahun 2016 total cadangan batu bara indonesia yang merupakan bahan bakar pembangkit listrik tenaga uap sebesar 28,4 miliar ton dengan target produksi sebesar 419 juta ton pada tahun 2016. Jika tidak ditemukannya cadangan batubara baru dan asumsi produksi konstan maka dalam 67 tahun cadangan batubara di indonesia akan habis (Kementrian ESDM, 2016).

Salah satu langkah yang paling berpengaruh untuk memperpanjang waktu pemakaian bahan bakar adalah meningkatkan efisiensi pembangkit listrik dengan cara menganalisa setiap komponen sistem dimana terjadinya kerugian-kerugian energi yang dapat dikurangi dengan melakukan perbaikan atau modifikasi sistem. Dengan meningkatnya efisiensi sistem, maka untuk memperoleh daya listrik yang sama dapat dicapai dengan bahan bakar yang lebih sedikit sehingga konsumsi bahan bakar dapat dikurangi. Hal tersebut berimbas pada perpanjangan waktu pemakaian bahan bakar tak terbarukan seperti batu bara.

Peningkatan efisiensi pembangkit listrik guna memperpanjang waktu pemakaian bahan bakar tak terbarukan dapat dilakukan dengan meminimalisir kerugian-kerugian yang terjadi pada proses pembangkitan listrik. Terdapat dua

cara dalam menganalisa kerugian-kerugian yang terjadi pada sistem pembangkit daya yaitu analisa konservasi dan eksergi. Analisa konservasi energi menitikberatkan pada keseimbangan antara energi yang masuk dengan energi yang keluar sedangkan analisa eksergi merupakan kajian mengenai kualitas energi yang terdapat pada masing-masing komponen sistem sehingga diketahui berapa energi maksimum yang dapat dimanfaatkan dan berapa destruksi yang terjadi (Bejan 2016).

Kedua jenis analisa tersebut membutuhkan perhitungan yang relatif menyita waktu dan harus dilakukan oleh seseorang yang berlatar belakang keinsinyuran. Selain itu analisa eksergi masih jarang digunakan pada industri-industri khususnya sektor pembangkitan daya karena metodenya yang lebih sulit dipahami dari analisa keseimbangan energi. Saat ini untuk menghitung kinerja dari komponen-komponen pembangkit tenaga uap, PT PLN PERSERO Sektor Pembangkitan Tarahan masih menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel yang hampir sama dengan perhitungan manual yang diharuskan memasukan persamaan-persamaan yang digunakan. Perhitungan kinerja komponen-komponen pembangkit tenaga uap yang menggunakan lebih dari 60 data masukan dan 30 persamaan sangat rentan dengan kesalahan jika dilakukan dengan perangkat lunak yang ditunjukan untuk melakukan perhitungan secara umum bukan perhitungan khusus untuk menghitung kinerja pembangkit daya uap. Selain itu keahlian dan pengalaman karyawan yang bertugas dalam menghitung kinerja komponen-komponen pembangkit daya uap sangat menentukan tingkat akurasi perhitungan dan untuk dapat melakukan perhitungan performa komponen-komponen pembangkit daya uap dibutuhkan pelatihan yang mumpuni. Hal tersebut cukup menyita waktu dan biaya saat terjadinya *reshuffle* posisi jabatan (Pembangkit Listrik Negara, 2017).

Kesalahan-kesalahan akibat kurangnya pengalaman atau ketelitian karyawan dapat diminimalisir dengan bantuan komputer untuk melakukan perhitungan secara otomatis. Oleh karena itu sebuah software atau program komputer yang dapat mengkalkulasi kinerja dan kerugian-kerugian yang terjadi pada komponen-komponen pembangkit daya uap dapat menjadi solusi bagi PT PLN PERSERO Sektor Pembangkitan Tarahan untuk dapat melakukan perhitungan

kinerja komponen-komponen pembangkit daya uap dengan cepat dan akurat sehingga dapat menentukan langkah cepat dalam mengoptimasi sistem pembangkit daya.

Selain itu perhitungan terkomputerisasi yang cepat juga memungkinkan data operasi dan nilai kinerja sistem PLTU dapat digunakan sebagai *Big Data* yang dapat diproses lebih lanjut untuk menjadi pedoman dalam pengoperasian sistem PLTU mengikuti perkembangan revolusi industri 4.0.

B. Tujuan

1. Membuat program untuk menghitung kinerja sistem PLTU Tarahan berdasarkan prinsip keseimbangan energi dan eksergi berbasis bahasa pemrograman Python
2. Membuat algoritma program yang dapat menghitung kinerja sistem PLTU secara akurat dengan nilai selisih maksimal sebesar 1% dari perhitungan secara manual.
3. Melakukan pengujian kecepatan program dalam menghitung kinerja sistem PLTU Tarahan serta membandingkan kualifikasi yang dibutuhkan pengguna untuk dapat menggunakan program secara efektif.

C. Batasan Masalah

1. Model sistem pembangkit daya uap yang digunakan adalah PLTU PT PLN PERSERO Sektor Pembangkitan Tarahan.
2. Perhitungan kinerja komponen-komponen sistem pembangkit tenaga uap menggunakan pendekatan keseimbangan energi dan eksergi.
3. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah Python versi 3 dengan *framework* PyQt5.
4. Data input merupakan hasil pengukuran pada saat dilakukan *Performance Test* pada tahun 2017.

D. Sistematika Penulisan

I. PENDAHULUAN

Menguraikan latar masalah belakang secara jelas, tujuan dan batasan masalah yang diambil sebagai batasan utama serta sistematika penulisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan landasan teori yang berkaitan dengan penelitian.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan waktu, tempat, alat, dan bahan yang digunakan serta prosedur yang dilakukan dalam penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang data-data yang didapatkan dari penelitian serta pembahasan terhadap data-data tersebut.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Berisikan simpulan dan saran yang ingin disampaikan dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan literatur-literatur atau referensi-referensi yang diperoleh penulis untuk menunjang penelitian ini

LAMPIRAN

Berisikan kelengkapan dan beberapa hal yang mendukung penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

1. Sistem Pembangkitan

Pembangkit Listrik Tenaga Uap merupakan sebuah sistem pembangkitan energi listrik yang menggunakan air sebagai fluida kerjanya. Pembangkit listrik tenaga uap berdasarkan siklusnya dapat dibedakan menjadi siklus tertutup dan siklus terbuka. PLTU dengan siklus tertutup terdiri dari 4 komponen utama yaitu turbin, kondensor, dan pompa. Keempat komponen tersebut berfungsi untuk merekayasa siklus air dalam sistem tertutup dimana massa air dalam sistem adalah tetap walaupun dalam kondisi aktualnya tidak ada sistem seperti ini.

PLTU dengan sistem terbuka hanya memiliki 3 komponen yaitu *boiler*, turbin, dan pompa sehingga uap buangan turbin langsung dibuang menuju atmosfer. Sistem ini sangat jarang diterapkan karena sistem mengkonsumsi air dalam jumlah yang sangat besar. Dari keempat komponen pada PLTU *boiler* dan turbin merupakan komponen yang memegang peranan terpenting pada efisiensi sistem. Hal tersebut mengakibatkan terciptanya beberapa jenis *boiler* dan turbin (Everett, 2004).

2. Jenis-jenis boiler

Secara umum boiler dibedakan menjadi 2 jenis yaitu boiler pipa api dan boiler pipa air.

a. Boiler pipa api

Boiler pipa api merupakan mesin konversi energi yang berfungsi mengubah air dari fasa cair menjadi fasa gas dengan cara memanaskannya. *Boiler* pipa api terdiri dari kumpulan pipa yang dialiri api dalam sebuah bejana yang secara bersamaan dialiri air sehingga berkontak dengan permukaan luar pipa sehingga terjadi perpindahan panas dari api menuju air hingga temperatur didihnya.

b. Boiler pipa air

Boiler pipa air merupakan mesin konversi energi yang berfungsi mengubah air dari fasa cair menjadi fasa gas dengan cara memanaskannya. *Boiler* pipa air terdiri dari kumpulan pipa yang dialiri air dalam sebuah bejana yang secara bersamaan dialiri api atau gas panas sehingga air dalam pipa mendidih dan berubah fasa menjadi uap. Berdasarkan metode perpindahan panasnya, boiler pipa api dapat dibedakan menjadi *boiler Pulverized Coal* dan *Circulating Fluidized Bed*.

3. Jenis-jenis turbin uap

Pemilihan jenis turbin sangat berpengaruh terhadap daya keluaran sistem. Turbin dapat dibedakan dengan beberapa klasifikasi antara lain berdasarkan pemberian panas uap, perlakuan uap buangan, dan ekstraksi uap.

a. Berdasarkan pemberian panas uap

1) *Reheat*

Turbin jenis ini terdiri dari *high pressure turbine* dan *low pressure turbine* dimana uap keluaran dari *high pressure turbine* dialirkan terlebih dahulu menuju boiler untuk meningkatkan temperaturnya sebelum memasuki *low pressure turbine*.

2) *Non reheat*

Pada jenis ini *high pressure turbine* dan *low pressure turbine* berada dalam satu casing dan tidak dilakukan pemanasan ulang pada uap.

b. Berdasarkan perlakuan uap buangan

1) *Condensing*

Jenis turbin ini memiliki tekanan keluar turbin dibawah tekanan atmosfer. Uap langsung dialirkan menuju kondensor untuk diubah menjadi fasa cair. Turbin jenis ini banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap.

2) *Non condensing*

Jenis turbin ini memiliki tekanan keluar diatas tekanan atmosfer. Uap keluaran turbin tidak dikondensasi melainkan digunakan untuk keperluan proses industri.

c. Berdasarkan ekstraksi uap

1) Dengan ekstraksi

Jenis turbin ini mengekstraksi sebagian aliran massa uap yang melalui turbin pada titik-titik tertentu. Aliran uap tersebut digunakan sebagai pemanas air umpan sebelum memasuki *boiler* dengan tujuan meningkatkan efisiensi sistem. Terdapat variasi jumlah aliran ekstraksi pada turbin yang berbeda semakin besar daya yang dihasilkan sebuah turbin semakin besar pula jumlah ekstraksi yang terdapat pada turbin tersebut. Menurut penelitian semakin banyak jumlah ekstraksi uap pada sebuah turbin semakin besar efisiensi siklus yang dihasilkan dengan maksimal jumlah ekstraksi sebanyak 7 buah ekstraksi uap.

2) Tanpa ekstraksi

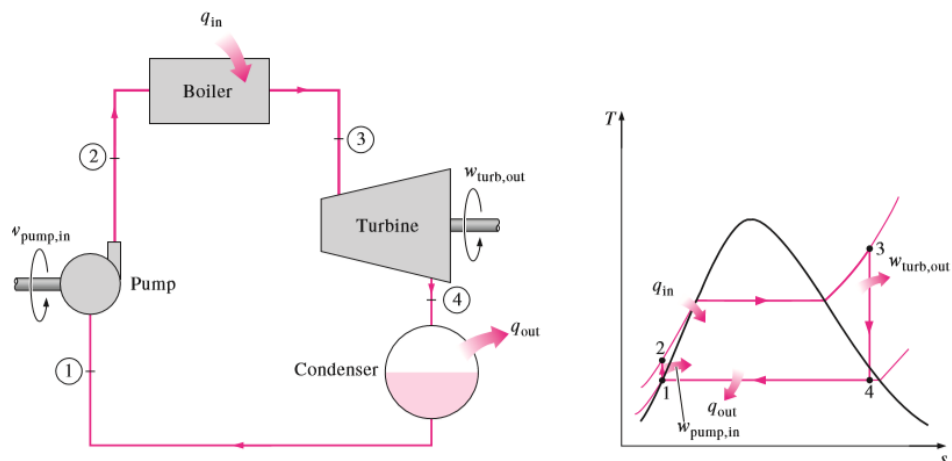
Pada beberapa turbin uap khususnya yang berukuran kecil dan pada kasus tertentu tidak terdapat ekstraksi uap pada turbin sehingga aliran massa masuk dan keluar turbin relatif sama (Everett, 2004).

B. Siklus Rankine

Siklus Rankine merupakan siklus air pada PLTU dimana air berfase cair diberi panas sesuai panas sensibel dan panas laten yang dibutuhkan untuk berubah fasa menjadi uap kering atau *superheated vapor*. Uap kering keluaran *boiler* kemudian diekspansikan dalam turbin yang berfungsi mengubah energi kinetik uap menjadi energi mekanik sehingga menghasilkan kerja. Uap keluaran turbin dialirkan menuju kondensor untuk membuang panas ke lingkungan sehingga uap berubah fasa menjadi cair dengan tujuan air dapat dipompa menuju *boiler* dan siklus berulang.

1. Analisa Siklus Rankine Sederhana

Siklus Rankine sederhana pada pembangkit tenaga uap dapat dianalisa dengan diagram fungsi temperatur dan entropi sebagai berikut.



Gambar 2.1. Diagram siklus Rankine ideal
(Yunus, 1998)

Proses 1-2 adalah proses kompresi isentropis pada pompa, proses 2-3 adalah proses penambahan panas dengan tekanan konstan pada *boiler*, proses 3-4 adalah proses ekspansi isentropis pada turbin, proses 4-1 adalah proses pembuangan panas isentropis pada kondensor.

Dengan diketahui kerja dan panas yang keluar masuk siklus, dapat diketahui kerja bersih yang disimbolkan w_{net} yang dihasilkan siklus pembangkit tenaga uap dengan persamaan.

$$w_{net} = q_{in} - q_{out} = w_{turb\ out} - w_{pump\ in} \quad (2.1)$$

Dimana :

- w_{net} : Kerja bersih (kW)
- q_{in} : Panas masuk (kW)
- q_{out} : Panas keluar (kW)
- $w_{turb\ out}$: Kerja keluaran turbin (kW)
- $w_{pump\ in}$: Kerja masukan pompa (kW)

Dengan diperoleh kerja bersih yang dihasilkan, dapat diperoleh efisiensi dari sistem pembangkit tenaga uap yang dianalisa dengan persamaan efisiensi termal sistem (Yunus, 1998).

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} \times 100 \quad (2.2)$$

Dimana :

- η_{th} : Persamaan efisiensi termal system (%)
- w_{net} : Kerja bersih (kW)
- q_{in} : Panas masuk (kW)

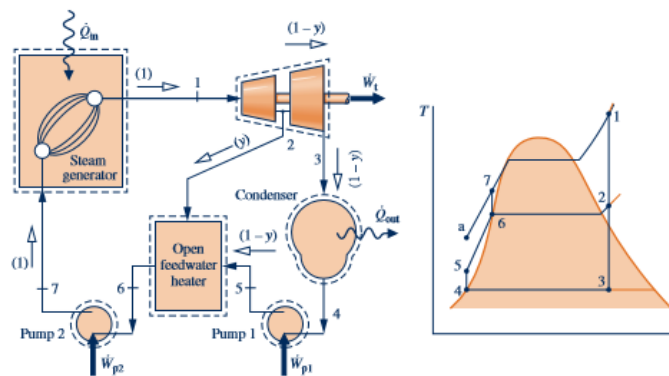
2. Analisa Siklus Rankine Regeneratif

Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi sistem adalah dengan cara memanaskan air umpan terlebih dahulu sebelum memasuki *boiler* dengan

sumber panas berasal dari uap hasil ekstraksi uap turbin. Terdapat dua jenis pemanasan air umpan yaitu pemanasan air umpan terbuka dan tertutup.

a. Pemanas air umpan terbuka

Pemanas air umpan terbuka atau *open feed water heater* merupakan pemanas air umpan sebelum memasuki boiler dengan prinsip kerja mencampurkan air umpan dengan uap hasil ekstraksi turbin sehingga diperoleh temperatur rata-rata dari temperatur air umpan dan uap. Selain untuk memanaskan air umpan, pencampuran air umpan dan uap secara langsung juga berfungsi untuk menghilangkan kandungan oksigen dari air umpan sehingga pemanas air umpan terbuka biasa disebut *deaerator*. Berikut adalah diagram siklus rankine dengan pemanas air umpan terbuka.



Gambar 2.2. Diagram siklus rankine dengan *open feed water heater*
(Moran, 2014)

Pada kondisi 2 sebagian aliran massa uap yang disimbolkan (\dot{m}) diekstraksi menuju *open feedwater heater* untuk bercampur dengan air umpan. Fraksi aliran massa ekstraksi dapat diketahui dengan menggunakan prinsip konservasi energi dan kekekalan massa.

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_1 \quad (2.3)$$

Dengan mengasumsikan aliran massa ekstraksi adalah y dan aliran air umpan $1 - y$ diperoleh

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = 1 - y \quad (2.4)$$

Dengan menerapkan prinsip konservasi energi diperoleh persamaan

$$y \cdot h_2 + (1 - y)h_5 - h_6 = 0 \quad (2.5)$$

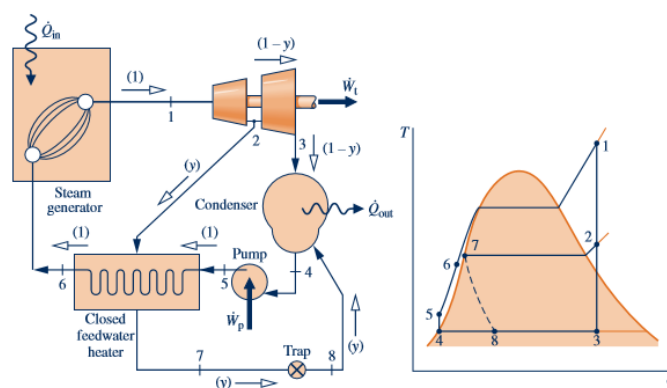
$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5} \quad (2.6)$$

Dimana :

h_n : Entalpi pada titik n

b. Pemanas air umpan tertutup

Pemanas air umpan terbuka atau *closed feed water heater* merupakan pemanas air umpan sebelum memasuki *boiler* menggunakan alat penukar kalor atau *heat exchanger* sehingga air umpan dan uap hasil ekstraksi tidak berkontak secara langsung melainkan hanya terjadi perpindahan panas melalui pipa *heat exchanger*. Berikut adalah diagram siklus rankine dengan pemanas air umpan tertutup.



Gambar 2.3. Diagram siklus rankine dengan *closed feed water heater*
(Moran, 2014)

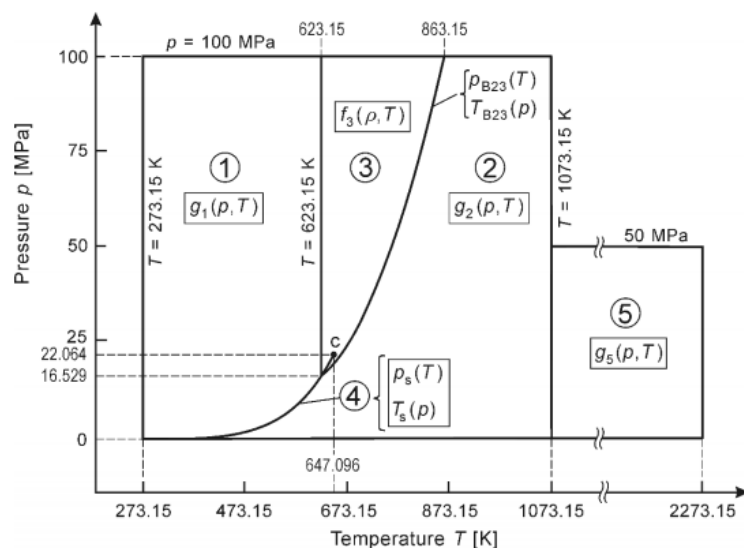
Seperti pada siklus rankine dengan open feedwater heater, pada kondisi 2 terdapat pembagian aliran massa ekstraksi yang disimbolkan y dan aliran massa yang akan digunakan sebagai air umpan yang disimbolkan $1 - y$. Dengan menerapkan prinsip konservasi energi, diperoleh persamaan (Moran, 2014).

$$y(h_2 - h_7) + (h_5 - h_6) = 0 \quad (2.7)$$

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_7} \quad (2.8)$$

C. IAPWS-IF97

Merupakan standar industri internasional yang diterbitkan oleh International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) untuk mengkalkulasi karakteristik termodinamika dari air dan uap. IAPWS-IF97 terdiri dari persamaan Gibbs, Helmholtz, dan turunan-turunannya yang merupakan persamaan masing-masing dari 5 daerah kerja standar IAPWS-IF97 yang dapat digambarkan pada diagram berikut.



Gambar 2.4. Diagram daerah kerja standar IAPWS-IF97
(Wagner, 2008)

Area-area pada diagram IAPWS-IF97 dibatasi oleh beberapa titik temperatur yaitu 273,15 K, 623,15 K, 1073,5 K serta garis saturasi atau area 4 yang memisahkan antara area 1 dan 2 dengan area 2. Algoritma penentuan area pada titik pertemuan dari fungsi tekanan dan temperatur telah terstandarisasi oleh modul iapws pada bahasa pemrograman Python. Masing-masing area pada diagram IAPWA-IF97 memiliki persamaan yang berbeda dalam menentukan entalpi dan entropi. Berikut adalah persamaan pada area-area diagram IAPWS-IF97.

1. Persamaan Area 1

Persamaan yang digunakan pada area 1 adalah persamaan energi bebas spesifik Gibbs untuk region 1 yang telah divalidasi keakuratannya oleh IAPWS.

$$\frac{g_1(p, T)}{RT} = \gamma(\delta, \tau) = \sum_{i=1}^{34} [n_i(7.1 - \pi)^{L_i}(\tau - 1.222)^{J_i}] \quad (2.9)$$

Dimana :

g_1 : Nilai energi bebas spesifik Gibbs area 1

π : $\frac{p}{p^*}$

τ : $\frac{T^*}{T}$

p : Tekanan (MPa)

T : Temperatur (K)

p^* : 16.53 MPa

T^* : 1386 K

R : $0,461526 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Berikut adalah nilai sigma I, J, dan n dari 1 sampai dengan 34 pada persamaan energi bebas spesifik Gibbs pada area 1

Tabel 2.1. Nilai I, J, dan n untuk area 1

| i | I _i | J _i | n _i | i | I _i | J _i | n _i |
|----|----------------|----------------|----------------|----|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0 | -2 | 0.146329712 | 18 | 2 | 3 | -4.41418E-06 |
| 2 | 0 | -1 | -0.845481872 | 19 | 2 | 17 | -7.2695E-16 |
| 3 | 0 | 0 | -3.756360367 | 20 | 3 | -4 | -3.16796E-05 |
| 4 | 0 | 1 | 3.385516917 | 21 | 3 | 0 | -2.82708E-06 |
| 5 | 0 | 2 | -0.957919634 | 22 | 3 | 6 | -8.52051E-10 |
| 6 | 0 | 3 | 0.157720385 | 23 | 4 | -5 | -2.24253E-06 |
| 7 | 0 | 4 | -0.016616417 | 24 | 4 | -2 | -6.51712E-07 |
| 8 | 0 | 5 | 0.000812146 | 25 | 4 | 10 | -1.43417E-13 |
| 9 | 1 | -9 | 0.000283191 | 26 | 5 | -8 | -4.0517E-07 |
| 10 | 1 | -7 | -0.000607063 | 27 | 8 | -11 | -1.27343E-09 |
| 11 | 1 | -1 | -0.018990068 | 28 | 8 | -6 | -1.74249E-10 |
| 12 | 1 | 0 | -0.032529749 | 29 | 21 | -29 | -6.87621E-19 |
| 13 | 1 | 1 | -0.021841717 | 30 | 23 | -31 | 1.44783E-20 |
| 14 | 1 | 3 | -5.28384E-05 | 31 | 29 | -38 | 2.63358E-23 |
| 15 | 2 | -3 | -0.000471843 | 32 | 30 | -39 | -1.19476E-23 |
| 16 | 2 | 0 | -0.000300018 | 33 | 33 | -40 | 1.82281E-24 |
| 17 | 2 | 1 | 4.76614E-05 | 34 | 34 | -41 | -9.35371E-26 |

(Wagner, 2008)

Untuk memperoleh nilai entalpi dan entropi dari nilai temperatur dan tekanan yang dimasukkan maka persamaan energi bebas spesifik Gibbs diturunkan terhadap τ . Sehingga entalpi (h) dan entropi (s) dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$h = R \cdot T \cdot \tau \cdot \frac{d\gamma}{d\tau} \quad (2.10)$$

$$s = R \cdot \left(\tau \cdot \frac{d\gamma}{d\tau} \cdot \gamma \right) \quad (2.11)$$

2. Persamaan Area 2

Persamaan yang digunakan pada area 2 adalah persamaan energi bebas spesifik Gibbs untuk area 2.

$$\frac{g_2(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^o(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \quad (2.12)$$

$$\gamma^o(\pi, \tau) = \ln \pi \sum_{i=1}^9 n_i^o \tau^{J_i^o} \quad (2.13)$$

$$\gamma^r(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^{43} [n_i \pi^{J_i} (\tau - 0.5)^{J_i}] \quad (2.14)$$

Dimana :

g_2 : Nilai energi bebas spesifik Gibbs area 2

π : $\frac{p}{p^*}$

τ : $\frac{T^*}{T}$

p : Tekanan (MPa)

T : Temperatur (K)

p^* : 1 MPa

T^* : 540 K

R : $0,461526 \frac{\text{kJ}}{\text{kg. K}}$

Berikut adalah nilai sigma J^0 , dan n^0 dari 1 sampai dengan 9 pada persamaan energi bebas spesifik Gibbs pada area 2 untuk menentukan (γ^o)

Tabel 2.2. Nilai J^0 , dan n^0 untuk area 2 (γ^o)

| i | J^0 | n^0 | i | J^0 | n^0 |
|---|-------|--------------|---|-------|--------------|
| 1 | 0 | -9.69276865 | 6 | -2 | 1.424081917 |
| 2 | 1 | 10.08665597 | 7 | -1 | -4.383951132 |
| 3 | -5 | -0.005608791 | 8 | 2 | -0.284086325 |
| 4 | -4 | 0.071452738 | 9 | 3 | 0.021268464 |
| 5 | -3 | -0.407104982 | | | |

(Wagner, 2008)

Berikut adalah nilai sigma I, J, dan n dari 1 sampai dengan 43 pada persamaan energi bebas spesifik Gibbs pada area 2 untuk menentukan (γ^r)

Tabel 2.3. Nilai I, J, dan n untuk area 2 (γ^r)

| i | I_i | J_i | n_i | i | I_i | J_i | n_i |
|----|-------|-------|--------------|----|-------|-------|--------------|
| 1 | 1 | 0 | -0.001773174 | 23 | 7 | 0 | -5.90596E-18 |
| 2 | 1 | 1 | -0.017834862 | 24 | 7 | 11 | -1.26218E-06 |
| 3 | 1 | 2 | -0.045996014 | 25 | 7 | 25 | -0.038946842 |
| 4 | 1 | 3 | -0.057581259 | 26 | 8 | 8 | 1.12562E-11 |
| 5 | 1 | 6 | -0.050325279 | 27 | 8 | 36 | -8.23113409 |
| 6 | 2 | 1 | -3.30326E-05 | 28 | 9 | 13 | 1.98097E-08 |
| 7 | 2 | 2 | -0.00018949 | 29 | 10 | 4 | 1.0407E-19 |
| 8 | 2 | 4 | -0.003939278 | 30 | 10 | 10 | -1.02347E-13 |
| 9 | 2 | 7 | -0.043797296 | 31 | 10 | 14 | -1.00182E-09 |
| 10 | 2 | 36 | -2.66745E-05 | 32 | 16 | 29 | -8.08829E-11 |
| 11 | 3 | 0 | 2.04817E-08 | 33 | 16 | 50 | 0.106930319 |
| 12 | 3 | 1 | 4.38707E-07 | 34 | 18 | 57 | -0.336622506 |
| 13 | 3 | 3 | -3.22777E-05 | 35 | 20 | 20 | 8.91858E-25 |

| i | I _i | J _i | n _i | i | I _i | J _i | n _i |
|----|----------------|----------------|----------------|----|----------------|----------------|----------------|
| 14 | 3 | 6 | -0.001503392 | 36 | 20 | 35 | 3.06293E-13 |
| 15 | 3 | 35 | -0.040668254 | 37 | 20 | 48 | -4.20025E-06 |
| 16 | 4 | 1 | -7.88473E-10 | 38 | 21 | 21 | -5.9056E-26 |
| 17 | 4 | 2 | 1.27907E-08 | 39 | 22 | 53 | 3.78269E-06 |
| 18 | 4 | 3 | 4.82254E-07 | 40 | 23 | 39 | -1.27686E-15 |
| 19 | 5 | 7 | 2.29221E-06 | 41 | 24 | 26 | 7.30876E-29 |
| 20 | 6 | 3 | -1.67148E-11 | 42 | 24 | 40 | 5.54147E-17 |
| 21 | 6 | 16 | -0.002117147 | 43 | 24 | 58 | -9.43697E-07 |
| 22 | 6 | 35 | -23.89574193 | | | | |

(Wagner, 2008)

Untuk memperoleh nilai entalpi dan entropi dari nilai temperatur dan tekanan yang dimasukkan maka persamaan energi bebas spesifik Gibbs diturunkan terhadap τ . Sehingga entalpi (h) dan entropi (s) dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$h = R \cdot T \cdot \tau \cdot \left(\frac{d\gamma^o}{d\tau} + \frac{d\gamma^r}{d\tau} \right) \quad (2.15)$$

$$s = R \cdot \left[\tau \cdot \left(\frac{d\gamma^o}{d\tau} + \frac{d\gamma^r}{d\tau} \right) - (\gamma^o - \gamma^r) \right] \quad (2.16)$$

3. Persamaan Area 3

Persamaan yang digunakan pada area 3 merupakan persamaan energi bebas spesifik Helmholtz.

$$\frac{f_3(p, T)}{RT} = \phi(\delta, \tau) = n_1 \ln \delta \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{I_i \tau^{J_i}} \quad (2.17)$$

Dimana :

f_3 : Nilai energi bebas spesifik Helmholtz area 3

$$\delta \quad : \frac{\rho}{\rho^*}$$

$$\tau \quad : \frac{T^*}{T}$$

$$\rho \quad : \text{Massa jenis} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$T \quad : \text{Temperatur (K)}$$

$$\rho^* \quad : 322 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T^* \quad : 647,096 \text{ K}$$

Berikut adalah nilai sigma I, J, dan n dari 1 sampai dengan 40 pada persamaan energi bebas spesifik Helmholtz area 3

Tabel 2.4. Nilai sigma I, J, dan n area 3

| i | I _i | J _i | n _i | i | I _i | J _i | n _i |
|----|----------------|----------------|----------------|----|----------------|----------------|----------------|
| 1 | - | - | 1.065807003 | 21 | 3 | 4 | -2.018991502 |
| 2 | 0 | 0 | -15.73284529 | 22 | 3 | 16 | -0.008214764 |
| 3 | 0 | 1 | 20.94439697 | 23 | 3 | 26 | -0.475960357 |
| 4 | 0 | 2 | -7.686770788 | 24 | 4 | 0 | 0.043984074 |
| 5 | 0 | 7 | 2.618594779 | 25 | 4 | 2 | -0.444764354 |
| 6 | 0 | 10 | -2.808078115 | 26 | 4 | 4 | 0.905720707 |
| 7 | 0 | 12 | 1.20533697 | 27 | 4 | 26 | 0.705224501 |
| 8 | 0 | 23 | -0.008456681 | 28 | 5 | 1 | 0.107705126 |
| 9 | 1 | 2 | -1.265431548 | 29 | 5 | 3 | -0.329136233 |
| 10 | 1 | 6 | -1.152440781 | 30 | 5 | 26 | -0.50871062 |
| 11 | 1 | 15 | 0.88521044 | 31 | 6 | 0 | -0.022175401 |
| 12 | 1 | 17 | -0.642077652 | 32 | 6 | 2 | 0.094260752 |
| 13 | 2 | 0 | 0.384934602 | 33 | 6 | 26 | 0.164362784 |

| i | I _i | J _i | n _i | i | I _i | J _i | n _i |
|----|----------------|----------------|----------------|----|----------------|----------------|----------------|
| 14 | 2 | 2 | -0.852147088 | 34 | 7 | 2 | -0.013503372 |
| 15 | 2 | 6 | 4.897228154 | 35 | 8 | 26 | -0.014834345 |
| 16 | 2 | 7 | -3.050261726 | 36 | 9 | 2 | 0.00057923 |
| 17 | 2 | 22 | 0.039420537 | 37 | 9 | 26 | 0.00323089 |
| 18 | 2 | 26 | 0.125584084 | 38 | 10 | 0 | 8.09648E-05 |
| 19 | 3 | 0 | -0.279993297 | 39 | 10 | 1 | -0.000165577 |
| 20 | 3 | 2 | 1.389979957 | 40 | 11 | 26 | -4.49239E-05 |

(Wagner, 2008)

Untuk memperoleh nilai entalpi dan entropi dari nilai temperatur dan tekanan yang dimasukkan maka persamaan energi bebas spesifik Helmholtz diturunkan terhadap τ dan ϕ . Sehingga entalpi (h) dan entropi (s) dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$h = R \cdot T \cdot \left(\tau \cdot \frac{d\phi}{d\tau} + \delta \frac{d\phi}{d\delta} \right) \quad (2.18)$$

$$s = R \cdot \left(\tau \cdot \frac{d\phi}{d\tau} - \phi \right) \quad (2.19)$$

4. Persamaan Area 4

Area 4 merupakan daerah saturasi dimana terjadinya perubahan fasa air dari cair ke gas atau sebaliknya. Untuk memperoleh nilai temperatur atau tekanan saturasi, digunakan persamaan dasar sebagai berikut.

$$\beta^2 \vartheta^2 + n_1 \beta^2 \vartheta + n_2 \beta^2 \vartheta + n_3 \beta \vartheta^2 + n_4 \beta \vartheta + n_5 \beta + n_6 \vartheta^2 + n_7 \vartheta + n_8 = 0 \quad (2.20)$$

$$\beta = (P_s / P^*)^{0.25} \quad (2.21)$$

$$\vartheta = \frac{T_s}{T^*} + \frac{n_9}{(T_s / T^*) - n_{10}} \quad (2.22)$$

Sehingga pada kasus dimana temperatur saturasi diketahui, dapat diperoleh tekanan saturasi dengan menggunakan persamaan dasar region 4.

$$\frac{P_s}{P^*} = \left[\frac{2C}{-B + (B^2 - 4AC)^{0.5}} \right]^4 \quad (2.23)$$

Dimana :

P_s : Tekanan saturasi

P^* : 1 MPa

A : $\vartheta^2 + n_1\vartheta + n_2$

B : $n_3\vartheta^2 + n_4\vartheta + n_5$

C : $n_6\vartheta^2 + n_7\vartheta + n_8$

Jika tekanan saturasi yang diketahui, dengan menggunakan persamaan dasar diperoleh persamaan.

$$\frac{T_s}{T^*} = \frac{n_{10} + D - [(n_{10} + D)^2 - 4(n_9 + n_{10}D)]^{0.5}}{2} \quad (2.24)$$

$$D = \left[\frac{2G}{-F + (F^2 - 4EG)^{0.5}} \right] \quad (2.25)$$

Dimana :

T_s : Temperatur saturasi

$$T^* : 1 K$$

$$E : \beta^2 + n_3\beta + n_6$$

$$F : n_1\beta^2 + n_3\beta + n_7$$

$$G : n_2\beta^2 + n_5\beta + n_8$$

Berikut adalah nilai n_1 sampai dengan n_{10} pada persamaan area 4 atau area saturasi.

Tabel 2.5. nilai n_1 sampai dengan n_{10} pada persamaan area 4 atau area saturasi.

| i | n_i | i | n_i |
|---|--------------|----|--------------|
| 1 | 1167.052145 | 6 | 14.91510861 |
| 2 | -724213.167 | 7 | -4823.265736 |
| 3 | -17.07384694 | 8 | 405113.4054 |
| 4 | 12020.8247 | 9 | -0.238555576 |
| 5 | -3232555.032 | 10 | 650.1753484 |

(Wagner, 2008)

5. Persamaan Area 5

Area 5 merupakan area dengan temperatur kerja antara 1073.15 K sampai 2273,15 K. persamaan yang digunakan pada area 5 adalah persamaan energi babas Gibbs. Berikut adalah persamaan dasar area 5.

$$\frac{g_5(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^o(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \quad (2.26)$$

$$\gamma^o(\pi, \tau) = \ln \pi + \sum_{i=1}^6 n_i^o \tau^{J_i^o} \quad (2.27)$$

$$\gamma^r(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^6 n_i \pi^i \tau^{J_i} \quad (2.28)$$

Dimana :

g_5 : Nilai energi bebas spesifik Gibbs area 5

$$\pi : \frac{p}{p^*}$$

$$\tau : \frac{T^*}{T}$$

p : Tekanan (MPa)

T : Temperatur (K)

p^* : 1 MPa

T^* : 1000K

$$R : 0,461526 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Berikut adalah nilai sigma J^0 , dan n^0 dari 1 sampai dengan 6 pada persamaan energi bebas spesifik Gibbs pada area 5 untuk menentukan (γ^0)

Tabel 2.6. Nilai J^0 , dan n^0 untuk area 5 (γ^0)

| i | J^0 | n^0 | i | J^0 | n^0 |
|---|-------|--------------|---|-------|--------------|
| 1 | 0 | -13.17998367 | 4 | -2 | 0.36901535 |
| 2 | 1 | 6.854084163 | 5 | -1 | -3.116131821 |
| 3 | -3 | -0.024805149 | 6 | 2 | -0.329616265 |

(Wagner, 2008)

Berikut adalah nilai sigma I, J, dan n dari 1 sampai dengan 6 pada persamaan energi bebas spesifik Gibbs pada area 5 untuk menentukan (γ^r)

Tabel 2.7. Nilai I, J, dan n untuk area 5 (γ^r)

| i | I _i | J _i | n _i | i | I _i | J _i | n _i |
|---|----------------|----------------|----------------|---|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 1 | 1 | 0.00157364 | 4 | 2 | 3 | 2.244E-06 |
| 2 | 1 | 2 | 0.000901538 | 5 | 2 | 9 | -4.11633E-06 |
| 3 | 1 | 3 | -0.005027008 | 6 | 3 | 7 | 3.79195E-08 |

(Wagner, 2008)

Untuk memperoleh nilai entalpi dan entropi dari nilai temperatur dan tekanan yang dimasukkan maka persamaan energi bebas spesifik Gibbs diturunkan terhadap τ . Sehingga entalpi (h) dan entropi (s) dapat diperoleh dari persamaan berikut (Wagner, 2008).

$$h = R \cdot T \cdot \tau \cdot \left(\frac{d\gamma^o}{d\tau} + \frac{d\gamma^r}{d\tau} \right) \quad (2.29)$$

$$s = R \cdot \left[\tau \cdot \left(\frac{d\gamma^o}{d\tau} + \frac{d\gamma^r}{d\tau} \right) - (\gamma^o - \gamma^r) \right] \quad (2.30)$$

D. Eksergi

Eksergi merupakan salah satu sifat termodinamika dari suatu kondisi yang menyatakan seberapa besar kerja berguna atau energi yang dapat dimanfaatkan. Eksergi disebut juga *availability* atau ketersediaan energi. Kerja merupakan fungsi dari kondisi awal, proses, dan kondisi akhir. Kerja maksimal dari kondisi awal dapat diperoleh dengan proses reversibel hingga kondisi mati dimana terjadi keseimbangan baik secara fisik (temperatur, tekanan, kecepatan, dan ketinggian) maupun secara kimiawi sehingga tidak ada potensi kerja yang dapat dilakukan. Kerja maksimal tersebut disebut kerja reversibel, namun pada kondisi nyata tidak ada sistem yang dapat menghasilkan kerja reversibel

sehingga terdapat kerja yang terbuang yang disebut irreversibilitas. Irreversibilitas secara matematis merupakan selisih antara kerja reversibel dan kerja aktual.

$$I = W_{rev} - W_{akt} \quad (2.31)$$

Dimana :

I : Irreversibilitas (kW)

W_{rev} : Kerja reversible (kW)

W_{akt} : Kerja actual (kW)

Analisa eksergi digunakan dalam menghitung Efisiensi hukum 2 termodinamika (η_{II}). Berbeda dengan efisiensi hukum 1 termodinamika yang merupakan rasio antara kerja keluar dengan masuk, Efisiensi hukum 2 termodinamika (η_{II}) merupakan rasio antara kerja aktual dengan kerja reversibel atau rasio antara eksergi yang dipulihkan dengan eksergi masuk.

$$\eta_{II} = \frac{\text{Eksergi yang dipulihkan}}{\text{Eksergi masuk}} \quad (2.32)$$

Efisiensi hukum 2 termodinamika (η_{II}) juga dapat diartikan rasio antara kerja aktual dengan kerja reversibel

$$\eta_{II} = \frac{W_{akt}}{W_{rev}} \quad (2.33)$$

Terdapat 2 jenis eksergi yang paling banyak digunakan dalam analisa sistem pembangkit daya yaitu eksergi aliran dan eksergi kimia. Eksergi aliran merupakan kerja maksimal yang dapat dilakukan oleh fluida yang mengalir pada suatu kontrol volume dikarenakan terdapatnya energi kinetik dan perbedaan tekanan dan temperatur dengan kondisi *dead state* (Bejan, 2016).

$$\psi_{aliran} = (h_{in} - h_{out}) - T_o(s_{in} - s_{out}) \quad (2.34)$$

Dimana :

ψ_{aliran} : Eksergi Aliran (kJ/kg)

h_{in} : Entalpi masuk (kJ/kg)

h_{out} : Entalpi keluar (kJ/kg)

T_o : Temperatur Dead State (K)

s_{in} : Entropi masuk (kJ/kg.K)

s_{out} : Entropi keluar (kJ/kg.K)

E. Kinerja Boiler

Boiler merupakan komponen utama yang paling berpengaruh dalam performa sistem pembangkit daya uap. Terdapat 2 metode dalam mengkalkulasi efisiensi dari suatu boiler yaitu metode langsung dan metode tidak langsung.

1. Metode Langsung

Metode langsung adalah metode perhitungan efisiensi boiler yang hanya memperhitungkan parameter entalpi air masuk dan uap yang keluar dari boiler dibandingkan dengan nilai kalor yang terdapat pada bahan bakar boiler.

$$\eta_{direct} = \frac{\dot{m}_{steam} \cdot (h_{out} - h_{in}) \cdot 100}{\dot{m}_{fuel} \cdot GCV} \quad (2.35)$$

Dimana :

η_{direct} : Efisiensi boiler metode langsung (%)

\dot{m}_{steam} : Aliran massa uap (kg/s)

- h_{in} : Entalpi masuk (kJ/kg)
 h_{out} : Entalpi keluar (kJ/kg)
 \dot{m}_{fuel} : Aliran massa bahan bakar (kg/s)
 GCV : Gross Caloric Value (kJ/kg)

Kelebihan dari metode langsung adalah perhitungannya yang singkat dan tidak memerlukan parameter yang kompleks namun dalam metode langsung tidak dapat diketahui dimana terjadinya *losses* atau hilangnya energi terbesar.

2. Metode Tidak Langsung

Metode tidak langsung atau *indirect method* adalah metode untuk menghitung efisiensi suatu boiler dengan cara menganalisa komponen komponen yang menjadi penyebab *losses* atau hilangnya energi. Berbeda dengan metode langsung, metode tidak langsung memerlukan parameter masukan yang jauh lebih banyak dan perhitungan melibatkan lebih banyak persamaan. Namun dengan metode tidak langsung, dapat diketahui dimana lokasi terjadinya *losses* terbesar hingga yang terkecil. Terdapat 8 penyebab utama hilangnya energi pada boiler yaitu :

a. Gas buang

$$L_{fg} = \frac{\dot{m}_{fg} \cdot C_p \cdot (T_{fg} - T_{\infty})}{GCV_{fuel}} \cdot 100 \quad (2.36)$$

Dimana :

- L_{fg} : Kehilangan panas akibat gas buang (%)
 \dot{m}_{fg} : Aliran massa gas buang (kg/s)
 C_p : Kapasitas panas spesifik gas buang (kJ/kg.K)

T_{fg} : Temperatur gas buang (K)

T_{∞} : Temperatur lingkungan (K)

GCV_{fuel} : Gross Caloric Value bahan bakar (kJ/kg)

b. Hydrogen dalam bahan bakar

$$L_{H_2} = \frac{9 \cdot M_{H_2} \cdot \{584 + C_p \cdot (T_{fg} - T_{\infty})\}}{GCV_{fuel}} \cdot 100 \quad (2.37)$$

Dimana :

L_{H_2} : Kehilangan panas akibat hidrogen (%)

M_{H_2} : Fraksi massa hydrogen dengan bahan bakar

C_p : Kapasitas panas spesifik gas buang (kJ/kg.K)

T_{fg} : Temperatur gas buang (K)

T_{∞} : Temperatur lingkungan (K)

GCV_{fuel} : Gross Caloric Value bahan bakar (kJ/kg)

c. Kandungan air dalam bahan bakar

$$L_{wf} = \frac{M_{wf} \cdot \{584 + C_p \cdot (T_{fg} - T_{\infty})\}}{GCV_{fuel}} \cdot 100 \quad (2.38)$$

Dimana :

L_{wf} : Kehilangan panas akibat air (%)

M_{wf} : Fraksi massa air dengan bahan bakar

C_p : Kapasitas panas spesifik gas buang (kJ/kg.K)

T_{fg} : Temperatur gas buang (K)

T_{∞} : Temperatur lingkungan (K)

GCV_{fuel} : Gross Caloric Value bahan bakar (kJ/kg)

d. Kandungan air dalam udara

$$L_{fg} = \frac{AAS \cdot faktor\ kelembaban \cdot C_p \cdot (T_{fg} - T_{\infty})}{GCV_{fuel}} \cdot 100 \quad (2.39)$$

Dimana :

L_{fg} : Kehilangan panas akibat air (%)

AAS : Fraksi massa udara dengan bahan bakar

C_p : Kapasitas Panas spesifik gas buang (kJ/kg.K)

T_{fg} : Temperatur gas buang (K)

T_{∞} : Temperatur lingkungan (K)

GCV_{fuel} : Gross Caloric Value bahan bakar (kJ/kg)

e. Karbon monoksida (CO) hasil pembakaran

$$L_{CO} = \frac{\%CO \cdot C}{\%CO + \%CO_2} \cdot \frac{5744}{GCV_{fuel}} \cdot 100 \quad (2.40)$$

Dimana :

L_{CO} : Kehilangan panas akibat karbon monoksida (%)

$\%CO$: Fraksi volume CO dengan gas buang

$\%CO_2$: Fraksi volume CO_2 dengan gas buang

C : Fraksi massa karbon dengan bahan bakar

GCV_{fuel} : Gross Caloric Value bahan bakar (kJ/kg)

f. Radiasi dan konveksi permukaan boiler

Panas yang hilang karena radiasi dan konveksi tidak dapat dihitung secara akurat dan biasanya digabungkan dengan sumber-sumber kehilangan panas lain-lain (L_{uk}) . Untuk boiler pembangkit listrik skala besar, gabungan kehilangan panas yang disebabkan oleh radiasi, konveksi, dan penyebab lainnya sebesar 0,4-1%.

g. Karbon pada *fly ash*

$$L_{FA} = \frac{M_{FA} \cdot GCV_{FA}}{GCV_{fuel}} \cdot 100 \quad (2.41)$$

Dimana :

L_{FA} : Kehilangan panas akibat *fly ash* (%)

M_{FA} : Fraksi massa *fly ash* dengan bahan bakar

GCV_{FA} : Gross Caloric Value *fly ash* (kJ/kg)

GCV_{fuel} : Gross Caloric Value bahan bakar (kJ/kg)

h. Karbon pada *bottom ash*

$$L_{BA} = \frac{M_{BA} \cdot GCV_{FA}}{GCV_{fuel}} \cdot 100 \quad (2.42)$$

Dimana :

L_{FA} : Kehilangan panas akibat *fly ash* (%)

M_{FA} : Fraksi massa *fly ash* dengan bahan bakar

GCV_{FA} : Gross Caloric Value *fly ash* (kJ/kg)

GCV_{fuel} : Gross Caloric Value bahan bakar (kJ/kg)

Sehingga dengan prinsip konservasi energi, efisiensi boiler metode tidak langsung ($\eta_{indirect}$) merupakan pengurangan persentase 100% dengan jumlah persentase *losses* yang terjadi pada boiler (Bureau of Energy Efficiency, 2017).

$$\eta_{indirect} = 100\% - (L_{fg} + L_{H_2} + L_{wf} + L_{wa} + L_{CO} + L_{uk} + L_{FA} + L_{BA}) \quad (2.43)$$

3. Analisa eksergi boiler

Terdapat 2 proses yang terjadi pada boiler yaitu proses pembakaran bahan bakar dan proses perpindahan panas dari gas hasil pembakaran menuju fluida kerja. Selain aliran, komposisi kimia juga memiliki potensi energi yang dapat dimanfaatkan yang dapat diperoleh nilainya menggunakan analisa eksergi kimia sehingga analisa eksergi juga sangat penting untuk dilakukan pada boiler. Efisiensi hukum 2 termodinamika secara matematis dapat ditulis (Saidur, 2010).

$$\eta_{II \text{ boiler}} = \frac{\psi_{steam}}{\psi_{fuel} + \psi_{air}} \times 100 \quad (2.44)$$

Dimana :

$\eta_{II \text{ boiler}}$: Efisiensi hukum 2 termodinamika boiler (%)

ψ_{steam} : Eksergi aliran uap (kJ/kg)

ψ_{fuel} : Eksergi aliran bahan bakar (kJ/kg)

ψ_{air} : Eksergi aliran udara (kJ/kg)

Eksergi bahan bakar dapat diperoleh dengan cara menganalisa komponen-komponen penyusun bahan bakar yaitu karbon (C), hidrogen (H₂), nitrogen (N₂), sulfur (S), oksigen (O₂), dan air (H₂O) menghasilkan Net Caloric Value (NCV) atau Lower Heating Value (LHV). Eksergi kimia bahan bakar padat tanpa kandungan air dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut.

$$\varphi_{dry} = 1,0437 + 0,1882 \frac{m_{H_2}}{m_C} + 0,061 \frac{m_{O_2}}{m_C} + 0,0404 \frac{m_{N_2}}{m_C} \quad (2.45)$$

Dimana :

φ_{dry} : Eksergi bahan bakar kering (kJ/kh)

m_{H_2} : Fraksi massa hydrogen dengan bahan bakar

m_C : Fraksi massa karbon dengan bahan bakar

m_{O_2} : Fraksi massa oksigen dengan bahan bakar

m_{N_2} : Fraksi massa nitrogen dengan bahan bakar

Bahan bakar padat aktual terdapat kandungan air dan sulfur sehingga parameter kandungan air dan sulfur perlu dimasukkan dalam persamaan eksergi bahan bakar padat aktual (Kaushik, 2013).

$$\psi_{ch} = [(NCV + 2442 \cdot m_{H_2O})\varphi_{dry}] + 9417 \cdot \left(\frac{m_S}{100}\right) \quad (2.46)$$

Dimana :

ψ_{ch} : Eksergi bahan bakar (kJ/kh)

m_{H_2O} : Fraksi massa air dengan bahan bakar

φ_{dry} : Eksergi bahan bakar kering (kJ/kh)

m_s : Fraksi massa sulfur dengan bahan bakar

NCV : Net Caloric Value bahan bakar (kJ/kg)

F. Kinerja Turbin

Turbin merupakan komponen dalam siklus pembangkit daya uap yang berfungsi mengubah energi kinetik aliran uap menjadi energi mekanik berupa putaran poros atau komponen yang bertugas menghasilkan kerja. Analisa performa turbin dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu dengan perhitungan efisiensi isentropis dan perhitungan eksergi atau efisiensi hukum 2 termodinamika. Efisiensi isentropis merupakan perbandingan kerja aktual dengan kerja isentropis dimana tidak terjadinya perubahan entropi dalam proses ekspansi uap.

$$w_s = \dot{m}(h_{in} - h_s) \quad (2.47)$$

$$\eta_s = \frac{w_{aktual}}{w_s} \times 100\% \quad (2.48)$$

Dimana :

η_s : Efisiensi isentropis (%)

w_{aktual} : Kerja aktual (kW)

w_s : Kerja isentropis(kW)

\dot{m} : Aliran massa uap (kg/s)

h_{in} : Entalpi masuk (kJ/kg)

h_s : Entalpi isentropis (kJ/kg)

Berbeda dengan efisiensi isentropis, efisiensi hukum 2 termodinamika merupakan perbandingan atau rasio antara kerja aktual turbin dengan kerja reversibel yang dihasilkan dari ekspansi uap pada turbin. Pada turbin, kerja reversibel merupakan kerja maksimum yang dapat dicapai oleh sistem yang diperoleh dari eksergi aliran uap pada kontrol volume berupa turbin (Yunus, 1998).

$$w_{rev} = \dot{m} \cdot \psi \quad (2.49)$$

$$\eta_{II} = \frac{W_{aktual}}{W_{rev}} \times 100\% \quad (2.50)$$

Dimana :

η_{II} : Efisiensi eksergetik (%)

w_{aktual} : Kerja aktual (kW)

w_{rev} : Kerja reversibel (kW)

\dot{m} : Aliran massa uap (kg/s)

ψ : Eksergi aliran (kJ/kg)

G. Kinerja Kondensor

Kondensor merupakan alat penukar kalor (*heat exchanger*) yang berfungsi mengubah fasa uap keluaran turbin menjadi fasa cair dengan cara mengambil panas sensibel dan panas laten dari uap keluaran turbin menuju lingkungan melalui perantara fluida yang bertemperatur lebih rendah. Performa kondensor dapat dinilai berdasarkan efektifitasnya atau rasio antara panas aktual yang dipindahkan melalui kondensor sebagai alat penukar kalor dengan panas maksimal yang dapat dipindahkan oleh kondensor. Terdapat berbagai jenis kondensor seperti jenis shell & tube, direct contact, surface, dan lain-lain yang memiliki persamaan nilai efektifitas yang berbeda. Berikut adalah persamaan nilai efektifitas kondensor jenis surface dengan arah aliran melintang dengan n kali laluan (Karthik, 2017).

$$efektivitas = \frac{\text{beban panas}}{\text{panas maksimal yang dapat dipindahkan}} \cdot 100 \quad (2.51)$$

$$efektivitas = \frac{\dot{m}_{air} \cdot C_{p \text{ air}} \cdot (T_{air \text{ out}} - T_{air \text{ in}})}{[\dot{m}_{uap} \cdot C_{p \text{ uap}} \cdot (T_{uap \text{ out}} - T_{uap \text{ in}})] + [\text{Latent heat} \cdot \dot{m}_{uap}]} \cdot 100 \quad (2.52)$$

Dimana :

\dot{m}_{air} : Aliran massa air pendingin (kg/s)

$C_{p \text{ air}}$: Kapasitas panas spesifik air pendingin (kJ/kg.K)

$T_{air \text{ out}}$: Temperatur keluar air pendingin (K)

$T_{air \text{ in}}$: Temperatur masuk air pendingin (K)

\dot{m}_{uap} : Aliran massa uap (kg/s)

$C_{p \text{ uap}}$: Kapasitas panas spesifik uap (kJ/kg.K)

$T_{uap \text{ out}}$: Temperatur keluar uap (K)

$T_{uap \text{ in}}$: Temperatur masuk uap (K)

Latent heat : Panas laten kondensasi uap (kJ/kg)

H. Kinerja Pompa

Pompa merupakan salah satu komponen sistem pembangkit daya uap yang berfungsi untuk mengalirkan fluida kerja berupa air hasil kondensasi menuju boiler. Perhitungan performa pompa sama seperti turbin yang merupakan kontrol volume dalam kerjanya. Perbedaan pompa dan turbin adalah konversi energi yang terjadi adalah kerja menjadi energi kinetik aliran. Perhitungan performa pompa sama seperti turbin yang dapat dilakukan dengan perhitungan efisiensi isentropik dan efisiensi hukum 2 termodinamika namun dengan persamaan yang berbeda.

$$w_s = \dot{m}(h_s - h_{in}) \quad (2.53)$$

$$\eta_s = \frac{w_s}{w_{aktual}} \times 100\% \quad (2.54)$$

Dimana :

η_s : Efisiensi isentropis (%)

w_{aktual} : Kerja aktual (kW)

w_s : Kerja isentropis(kW)

\dot{m} : Aliran massa air umpan (kg/s)

h_{in} : Entalpi masuk (kJ/kg)

h_s : Entalpi isentropis (kJ/kg)

Perbedaan pada persamaan efisiensi isentropik pompa dan turbin terletak pada rasio kerja yang terbalik. Dalam perhitungan efisiensi hukum 2 termodinamika juga memiliki perbedaan dari rasio kerja yang terbalik (Yunus, 1998).

$$\eta_{II} = \frac{w_{rev}}{w_{aktual}} \times 100\% \quad (2.55)$$

$$w_s = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) \quad (2.56)$$

Dimana :

η_{II} : Efisiensi eksergetik (%)

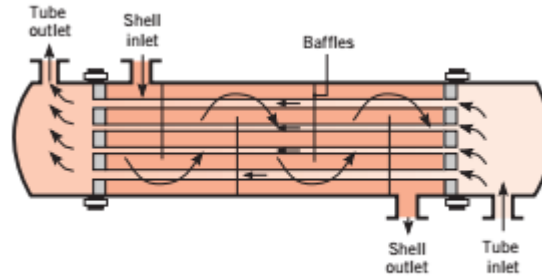
w_{aktual} : Kerja aktual (kW)

w_{rev} : Kerja reversibel (kW)

I. Kinerja Regenerator

Regenerator merupakan alat penukar kalor (*heat exchanger*) yang berfungsi memanaskan air umpan pada sistem pembangkit daya uap sebelum memasuki

boiler dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi sistem. Panas regenerator dapat bersumber dari ekstraksi uap boiler atau turbin.



Gambar 2.5. Heat Exchanger tipe Shell and Tube

Sumber : Frank , Incropera., David, Dewit. 2012

Perhitungan performa regenerator dapat dilakukan dengan menghitung efektifitas alat penukar kalor yaitu perbandingan panas aktual yang dipindahkan alat penukar kalor berbanding panas maksimal yang dapat dipindahkan oleh alat penukar kalor. Berikut adalah persamaan efektifitas alat penukar kalor tipe *shell & tube* (Incropera, 2012).

$$\text{efektifitas} = \frac{\text{beban panas}}{\text{panas maksimal yang dapat dipindahkan}} \cdot 100 \quad (2.57)$$

$$\text{efektifitas} = \frac{\dot{m}_{fw} \cdot C_{p\ fw} \cdot (T_{fw\ out} - T_{fw\ in})}{[\dot{m}_{uap} \cdot C_{p\ uap} \cdot (T_{uap\ out} - T_{uap\ in})] + [\text{Latent heat} \cdot \dot{m}_{uap}]} \cdot 100 \quad (2.58)$$

Dimana :

\dot{m}_{fw} : Aliran massa air umpan (kg/s)

$C_{p\ fw}$: Kapasitas panas spesifik air umpan (kJ/kg.K)

$T_{fw\ out}$: Temperatur keluar air umpan (K)

$T_{fw\ in}$: Temperatur masuk air umpan (K)

- \dot{m}_{uap} : Aliran massa uap (kg/s)
- $C_{p\ uap}$: Kapasitas panas spesifik uap (kJ/kg.K)
- $T_{uap\ out}$: Temperatur keluar uap (K)
- $T_{uap\ in}$: Temperatur masuk uap (K)
- Latent heat* : Panas laten kondensasi uap (kJ/kg)

J. Bahasa Pemrograman Python

Python merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi yang digunakan secara luas. Bahasa pemrograman python didesain oleh Guido Van Rossum dan dikembangkan oleh Python Software Foundation yang merupakan organisasi non-profit sehingga interpreter yang digunakan untuk mengeksekusi Bahasa pemrograman Python dapat digunakan untuk membuat program komputer dengan berbagai tujuan secara gratis. Keuntungan lain selain gratis dari penggunaan Python adalah sintaks yang ringkas dan mudah dipahami serta tidak adanya pendefinisian variabel karena variabel didefinisikan secara otomatis oleh interpreter Python.

1. Komponen-komponen bahasa pemrograman Python

a. Statement

Statement atau perintah program merupakan komponen yang berfungsi memberi perintah pada komputer untuk melakukan tugas-tugas yang diberikan seperti mencetak tipe data, membandingkan tipe data, dan melakukan operasi-operasi data.

b. Struktur Kontrol

Struktur kontrol merupakan susunan pada Bahasa pemrograman python yang berfungsi mengendalikan statement seperti pengulangan atau

pemilihan aksi dari statement yang diberikan. Struktur kontrol pada Bahasa pemrograman Python terdiri dari if, for, while.

c. Fungsi

Fungsi merupakan komponen yang berisi satu tugas spesifik yang dapat dipanggil berulang kali sehingga penugasan yang berulang dapat ditulis dengan ringkas. Fungsi terdiri dari dua jenis yaitu fungsi dengan nilai balik dan fungsi tanpa nilai balik.

d. Kelas

Kelas merupakan suatu tipe data bentukan yang berisi daftar atribut dan metode yang digunakan untuk memodelkan suatu objek seperti dalam permasalahan menghitung luas persegi panjang. Panjang dan lebar merupakan atribut dan rumus luas merupakan metode kelas. Kedua komponen tersebut menjadi satu dalam bentuk kelas.

e. Modul

Modul merupakan program yang berada pada file lain untuk tujuan memudahkan manajemen program yang kompleks sehingga satu program dapat ditulis dalam file yang berbeda (Raharjo, 2016).

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian dilaksanakan di PT PLN PERSERO Sektor Pembangkitan Tarahan dan Laboratorium Komputasi Mekanik Teknik Mesin Universitas Lampung dimulai dari tanggal 1 Oktober 2017 sampai dengan 30 Januari 2018.

B. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Python 3

Adalah program *open source* (tidak berbayar) yang digunakan untuk menginterpretasikan bahasa pemrograman Python ke dalam bahasa mesin.

2. Modul PyQt

Adalah modul dalam bahasa pemrograman Python yang berfungsi untuk membuat tampilan antarmuka (*interface*).

3. Modul SciPy

Adalah modul dalam bahasa pemrograman Python yang berfungsi untuk mengeksekusi permasalahan *scientific*.

4. Komputer

Spesifikasi minimum komputer yang dapat digunakan untuk menjalankan program Python 3 adalah sebagai berikut :

OS : Windows xp

Processor : 1 GHz single core Processor

RAM : 512 MB

Storage : 200 MB free

C. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Meninjau lapangan
Melakukan peninjauan lapangan untuk mempelajari siklus pembangkitan daya Pembangkit Listrik Tenaga Uap milik PT PLN PERSERO Sektor Pembangkitan Tarahan.
2. Studi literatur
Mencari persamaan-persamaan yang berkaitan dengan perhitungan performa komponen-komponen utama sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap.
3. Menentukan parameter masukan dan keluaran
Menentukan parameter-parameter masukan yang dibutuhkan dalam perhitungan performa komponen-komponen utama sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap serta keluaran yang menyatakan performa dari objek yang dihitung.
4. Memperoleh data operasi PLTU
Memperoleh data operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap Sektor Pembangkitan Tarahan berdasarkan hasil *performance test*.
5. Membuat antarmuka program
Membuat antarmuka program sebagai tampilan untuk memudahkan pengguna memasukan parameter masukan dan melihat hasil perhitungan.
6. Membuat algoritma perhitungan performa turbin
Membuat algoritma perhitungan menggunakan bahasa pemrograman python yang dapat menghitung kualitas uap keluaran turbin, efisiensi isentropis, dan efisiensi hukum 2 termodinamika turbin berdasarkan parameter yang dimasukan pada program.
7. Memvalidasi perhitungan performa turbin
Memvalidasi perhitungan efisiensi isentropis dan efisiensi hukum 2 termodinamika turbin pada program dengan perhitungan manual.

8. Membuat algoritma perhitungan performa boiler
Membuat algoritma perhitungan menggunakan bahasa pemrograman python yang dapat menghitung performa boiler berdasarkan efisiensi hukum 1 termodinamika menggunakan metode indirect untuk mengetahui penyebab-penyebab kerugian dan metode direct untuk menghitung penyebab kerugian yang tidak diketahui serta menghitung efisiensi hukum 2 termodinamika berdasarkan eksergi.
9. Memvalidasi perhitungan performa boiler
Memvalidasi perhitungan efisiensi hukum 1 dan hukum 2 termodinamika boiler pada program dengan perhitungan manual.
10. Membuat algoritma perhitungan performa kondensor
Membuat algoritma perhitungan menggunakan bahasa pemrograman python yang dapat menghitung efektifitas kondensor berdasarkan parameter yang dimasukkan pada program.
11. Memvalidasi perhitungan performa regenerator
Memvalidasi perhitungan efektifitas regenerator pada program dengan perhitungan manual.
12. Membuat algoritma perhitungan performa regenerator
Membuat algoritma perhitungan menggunakan bahasa pemrograman python yang dapat menghitung efektifitas regenerator berdasarkan parameter yang dimasukkan pada program.
13. Memvalidasi perhitungan performa regenerator
Memvalidasi perhitungan efektifitas regenerator pada program dengan perhitungan manual.
14. Membuat algoritma perhitungan performa pompa
Membuat algoritma perhitungan menggunakan bahasa pemrograman python yang dapat menghitung efisiensi isentropik dan efisiensi hukum 2 termodinamika berdasarkan parameter yang dimasukkan pada program.
15. Memvalidasi perhitungan performa turbin

Memvalidasi perhitungan efisiensi isentropis dan efisiensi hukum 2 termodinamika turbin pada program dengan perhitungan manual.

16. Membuat algoritma perhitungan performa sistem pembangkit

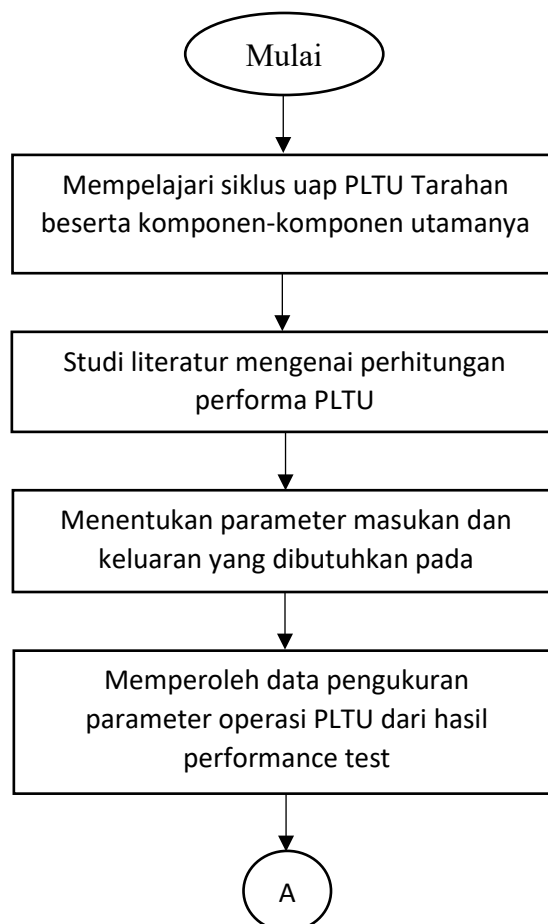
Membuat algoritma perhitungan menggunakan bahasa pemrograman python yang dapat menghitung performa sistem pembangkit listrik tenaga uap secara keseluruhan berdasarkan perhitungan performa komponen-komponen sistem.

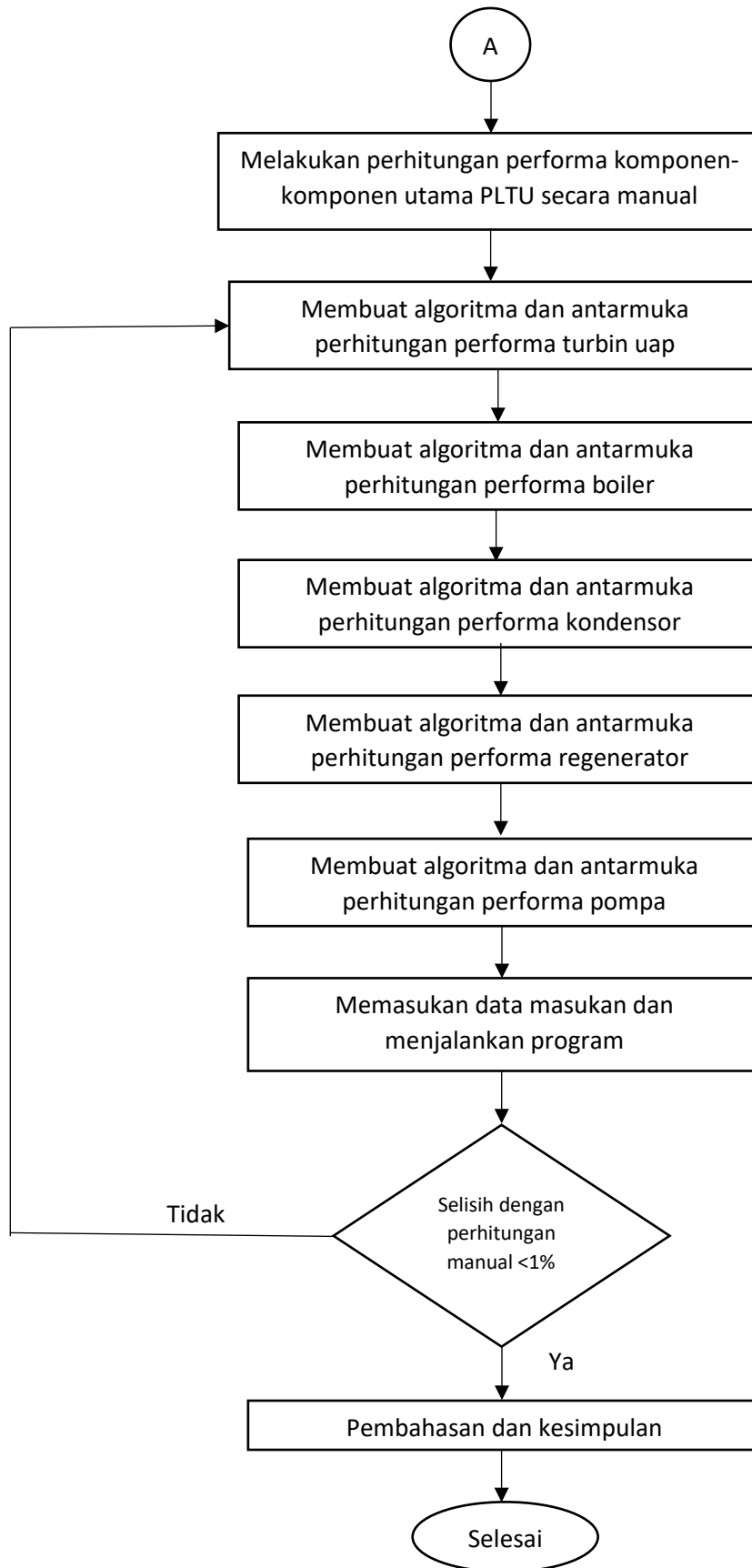
17. Evaluasi

Pembahasan dan penarikan kesimpulan terhadap penelitian yang dilakukan serta melaksanakan seminar untuk memperoleh masukan guna perbaikan hasil penelitian

D. Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah diagram alir dalam melakukan penelitian ini

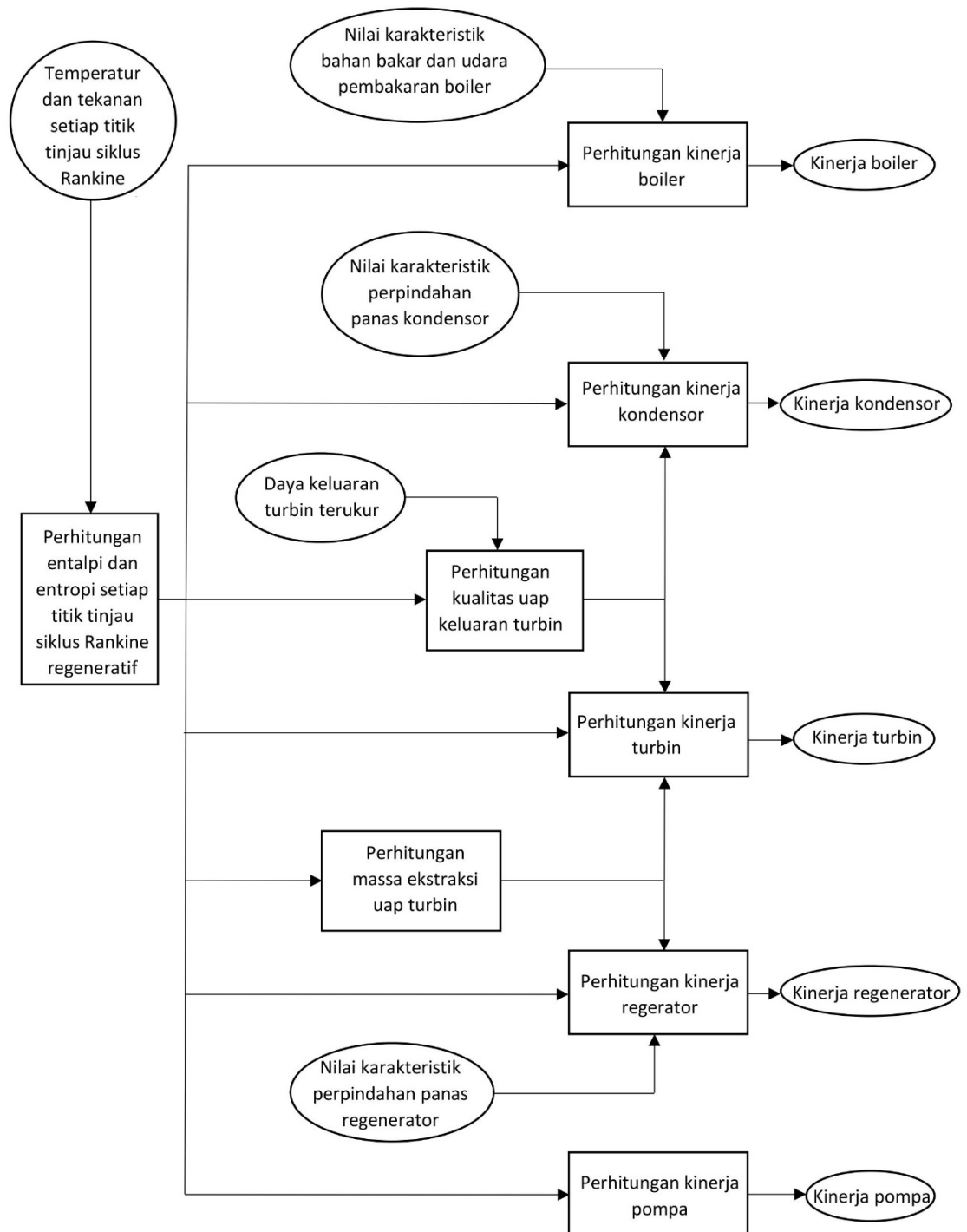




Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

E. Arsitektur Program

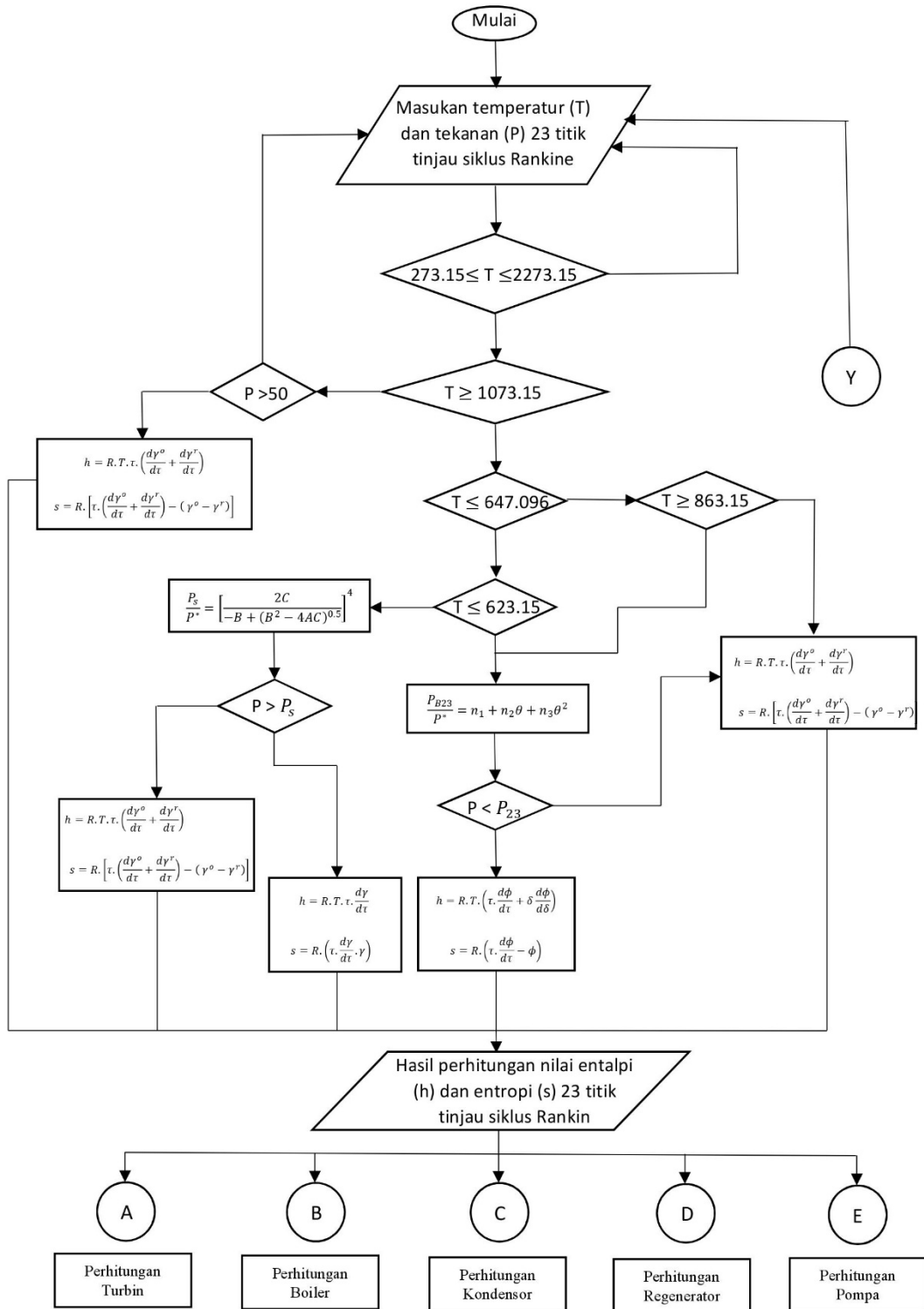
Berikut adalah arsitektur program perhitungan kinerja komponen-komponen PLTU menggunakan bahasa pemrograman Python

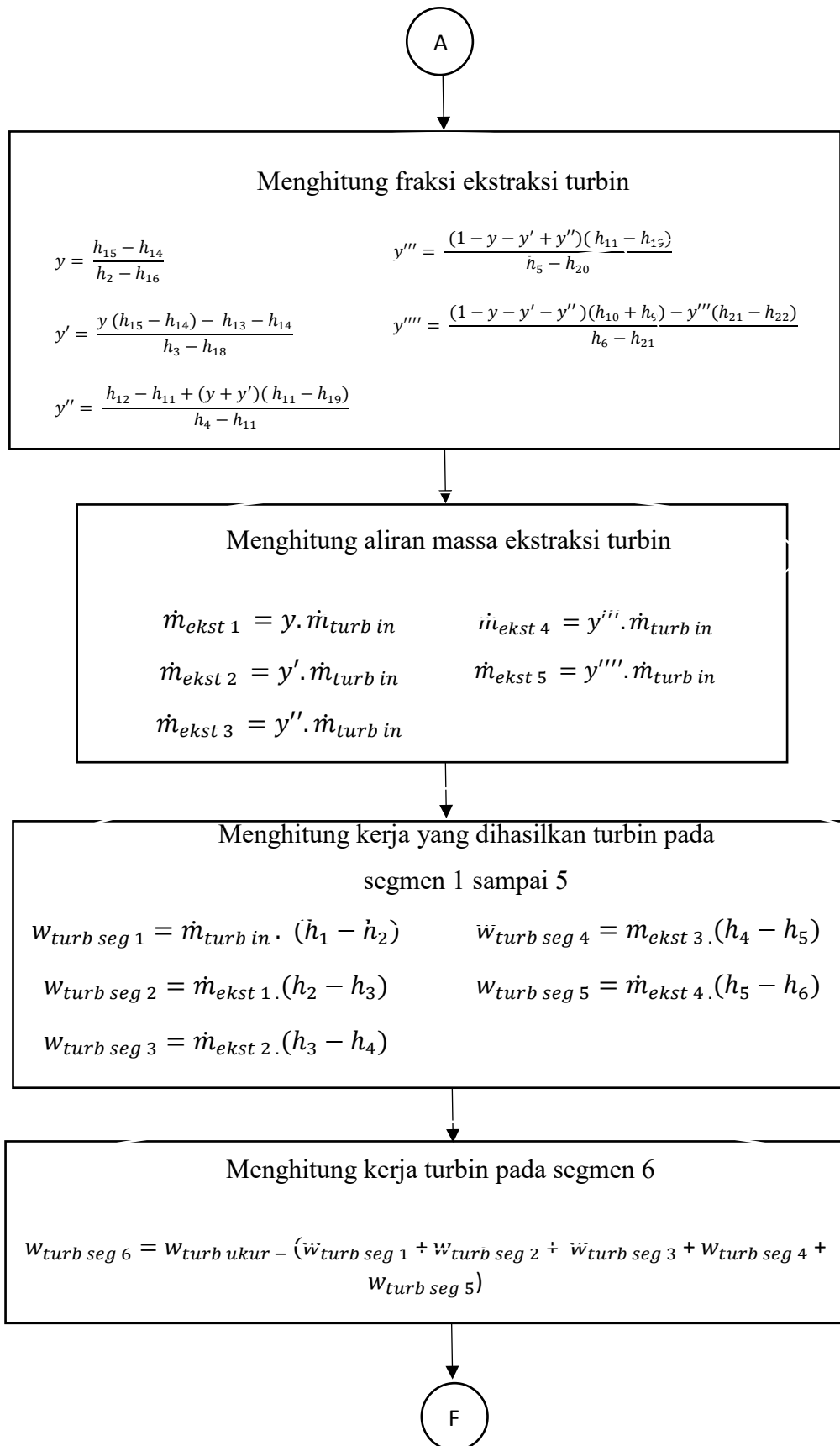


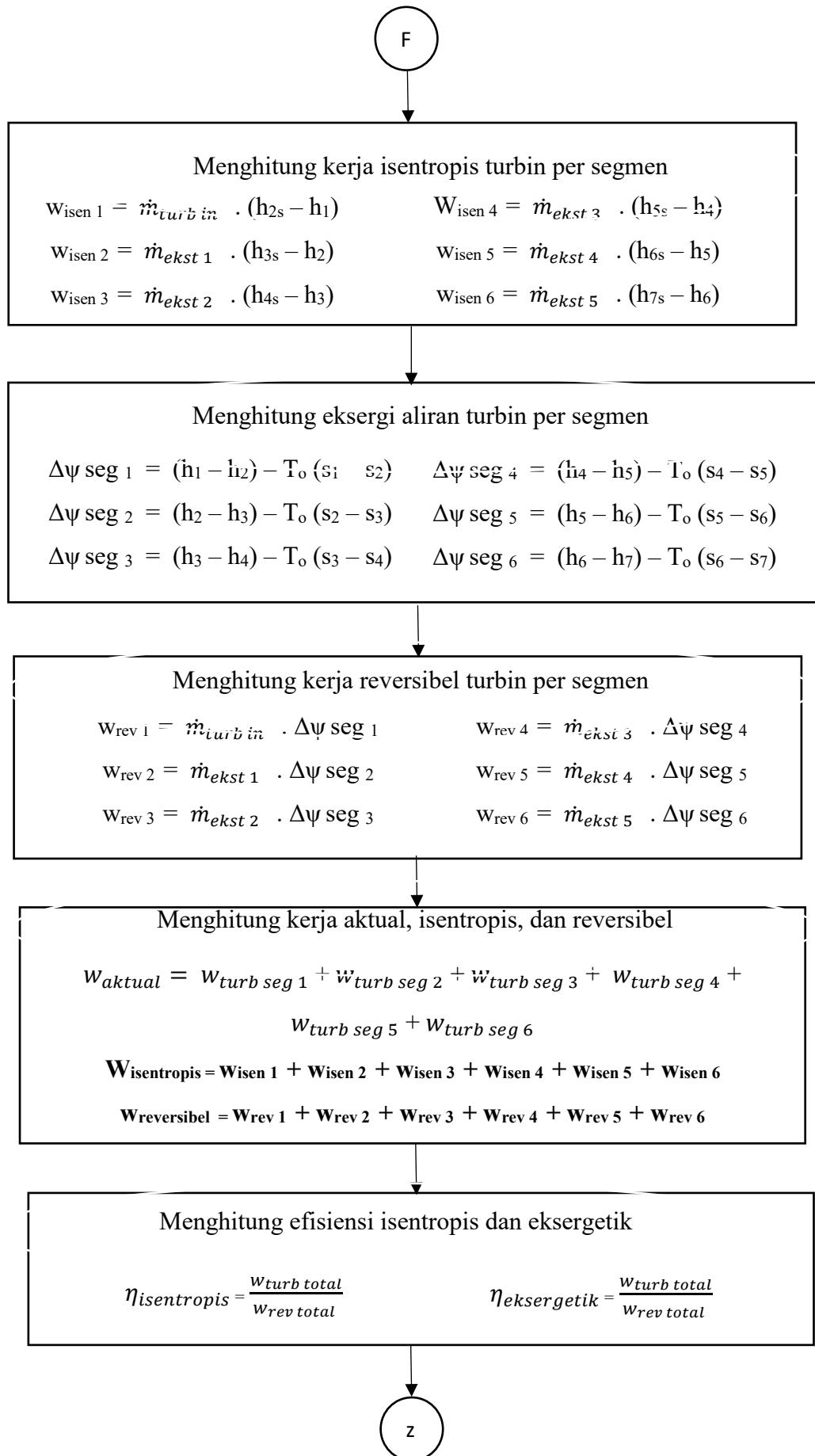
Gambar 3.2. Arsitektur program

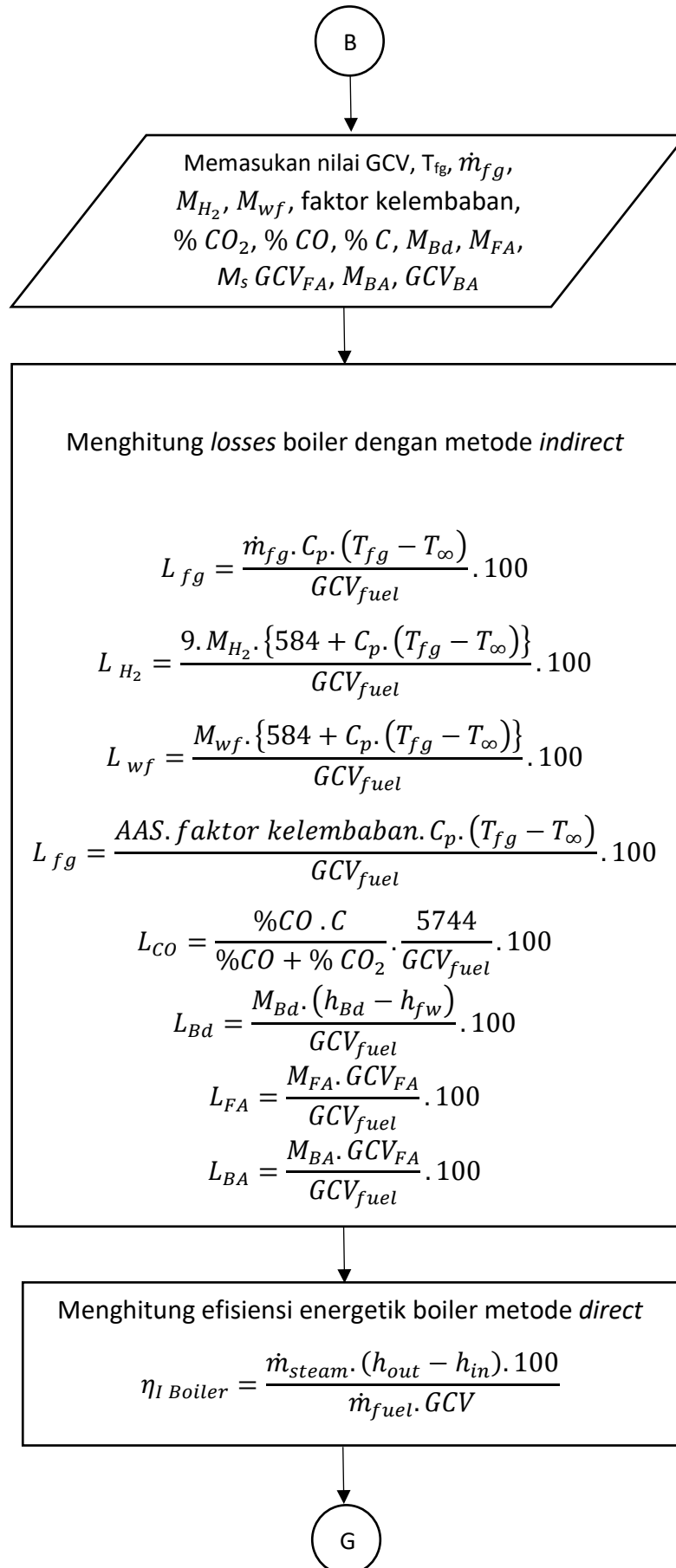
F. Diagram Alir Program

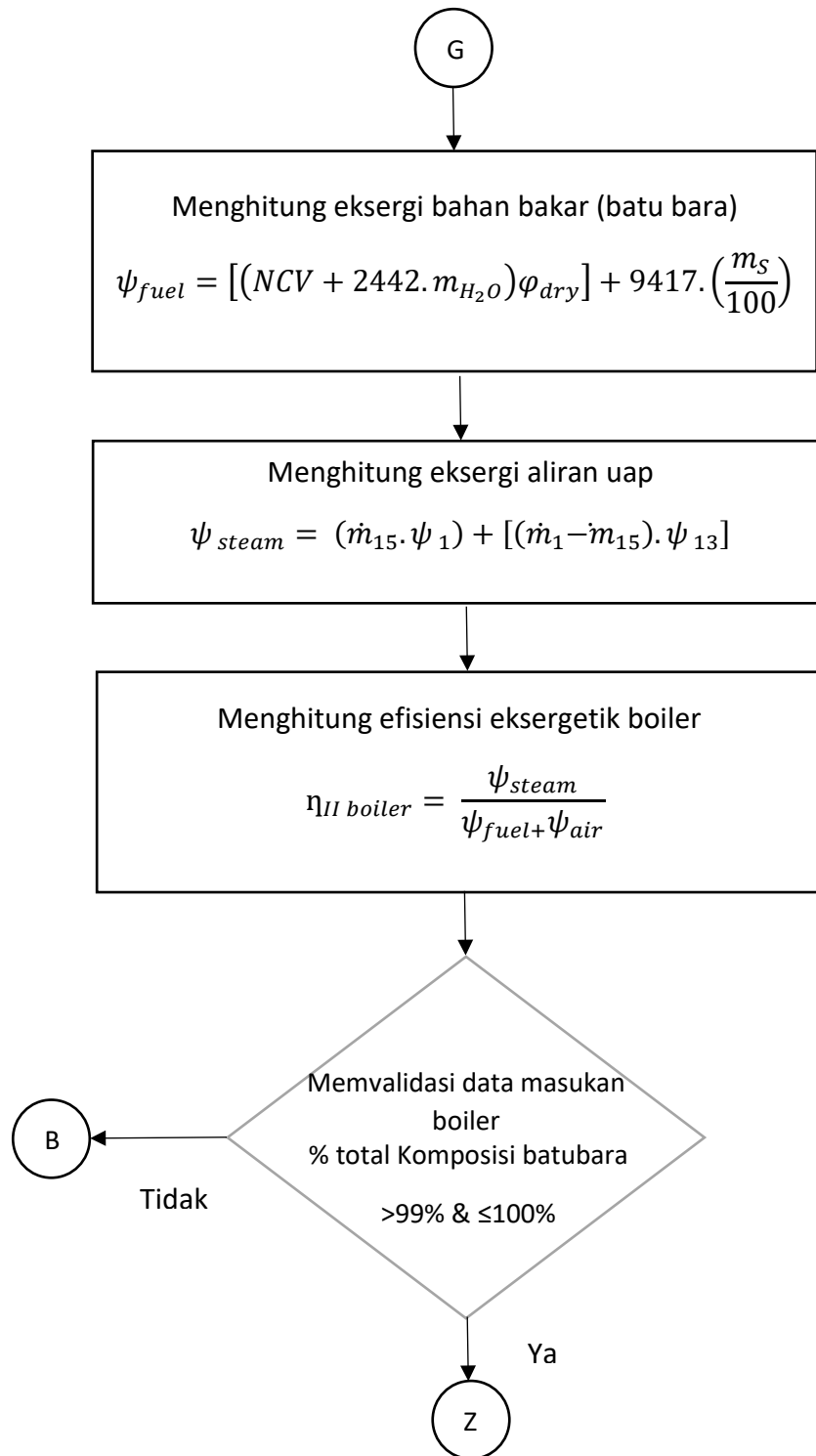
Berikut adalah diagram alir program perhitungan kinerja komponen-komponen PLTU menggunakan bahasa pemrograman Python

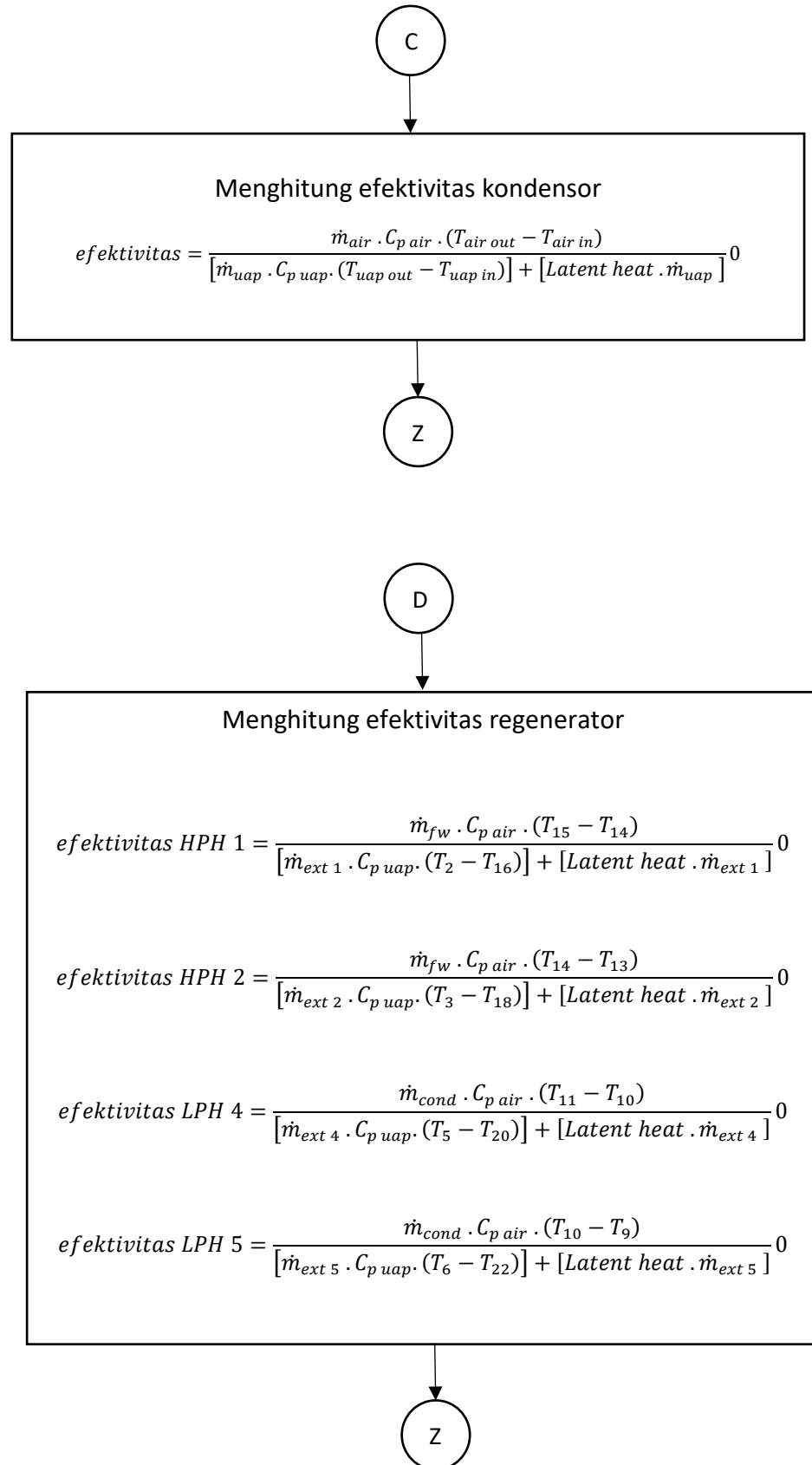


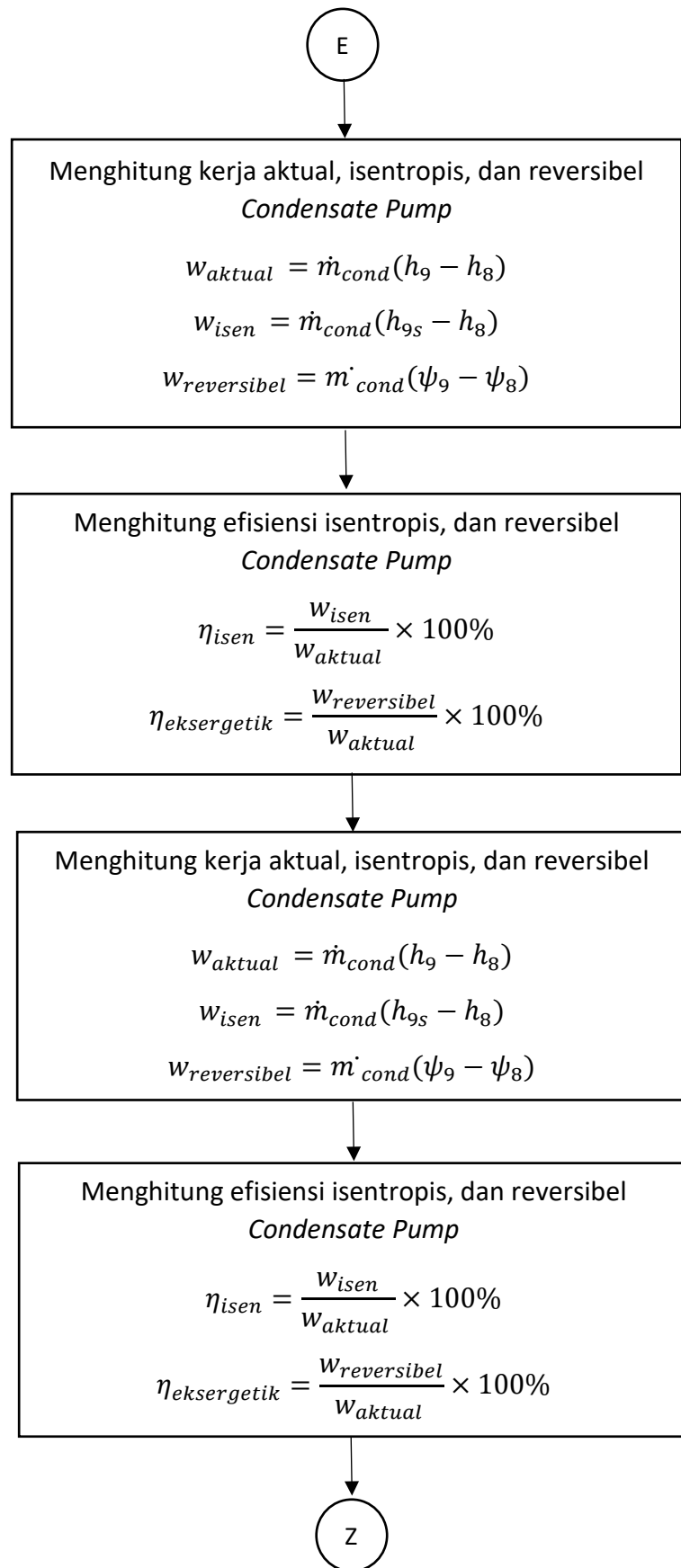


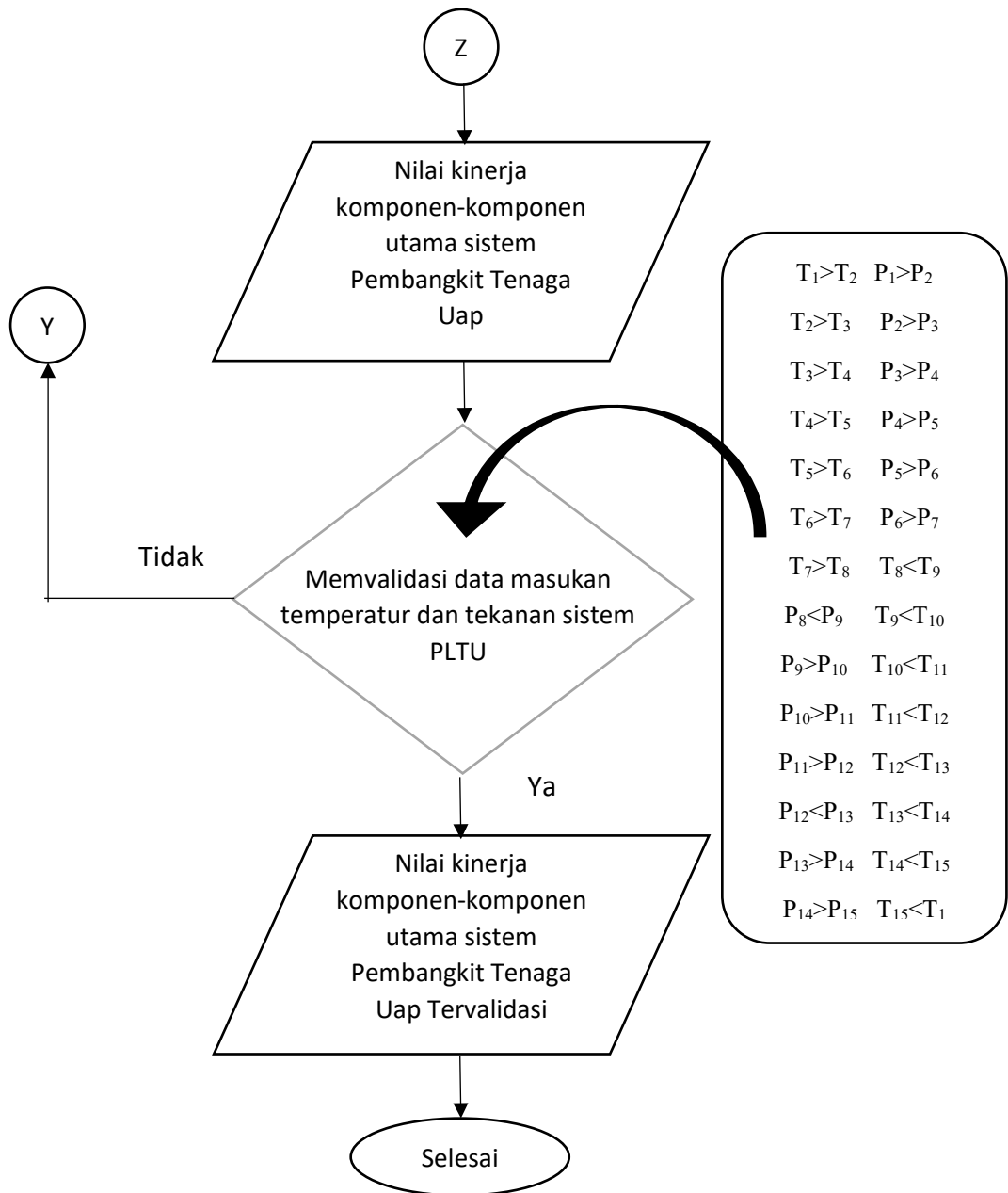












Gambar 3.3. Diagram alir program

V.SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

1. Telah dibuat Program dengan nama “Steam Plant Performance Calculator” berbasis Bahasa pemrograman Python yang dapat menghitung kinerja Sistem PLTU Tarahan secara otomatis.
2. Berdasarkan nilai kinerja sistem PLTU Tarahan yang dihitung secara manual dan secara otomatis menggunakan program, tidak ditemukan perbedaan atau nilai selisih melebihi 1%.
3. Berdasarkan pengujian pengoperasian program, perhitungan secara manual selama 4 jam 28 menit dapat dipangkas menggunakan program menjadi 17,13 menit untuk pengguna dengan latar belakang memiliki pengetahuan sistem PLTU dan 14,34 menit untuk pengguna dengan latar belakang memiliki pengetahuan sistem PLTU dan termodinamika teknik

B. Saran

1. Pada penelitian selanjutnya atau pengembangan software ini agar data input atau masukan dapat dilakukan secara otomatis dari perangkat instrumen Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap.

2. Pada penelitian selanjutnya atau pengembangan software ini agar dapat dijalankan pada platform berbasis online terhubung dengan infrastruktur *BIG DATA*.
3. Kualitas uap keluaran turbin seharusnya diberi instrumen pengukuran untuk meningkatkan akurasi perhitungan kinerja turbin
4. Saluran ekstraksi turbin seharusnya diberi sensor aliran massa untuk mengetahui secara akurat massa uap yang diekstraksi dari turbin
5. *Performance test* seharusnya dilakukan lebih dari 1 kali dalam 1 tahun untuk mempermudah analisa kondisi PLTU.

DAFTAR PUSTAKA

Bejan, Adrian. 2016. "*Advanced Engineering Thermodynamics 4th Edition*". Canada : John Wiley & Sons

Bureau of Energy Efficiency. 2017. "*Energy Performance Assessment of Boilers*". India : Ministry of Power India

Direktorat Jendral Mineral dan Batubara. 2016. "*Laporan Kinerja 2016*". Jakarta : Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia

Everett, B Woodruff., Herbert B Lammers., Thomas F. lammers . 2004. "*Steam Plant Operation 8th edition*". New York: McGraw Hill Professional

Frank , Incropera., David, Dewit. 2012. "*Fundamental of Heat and Mass Transfer 7th Edition*". USA : John Wiley & Sons

Kaushik, S., Singh, Omendra. 2013. "*Estimation of Chemical Exergy of Solid, Liquid, and Gaseous Fuels Used in Thermal Power Plants*". Budapest : Akademia Kiado

Moran, Michael J., dkk. 2014. "*Fundamentals Of Engineering Thermodynamics 8th Edition*". USA : John Wiley & Sons

Pembangkit Listrik Negara. 2016. "*Laporan pengujian heat rate PLTU Tarahan unit 3*". Lampung Selatan: PT PLN PERSERO Sektor Pembangkitan Tarahan.

Raharjo, Budi. 2016. *“Pemrograman GUI dengan Python dan PyQt”*. Jakarta : Informatika

Saidur, R., dkk. 2010. *“Energy, Exergy, and Economic Analys of Industrial Boilers”*. Elsevier : Journal of Energy Policy

Subrata, Ari., Prabowo. 2015. *“Analisa Termodinamika Pengaruh Aliran Massa Ekstraksi Turbin Uap Untuk Feedwater Heaters Terhadap Performa Pembangkit Listrik Tenaga Uap 100MW”* Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Wagner, Wolfgang., Kretschmar, Hans. 2008. *“Properties of Water and Steam Based on Industrial Formulation IAPWS-IF97”*. Berlin : Springer

Yunus, A Cengel. 1998. *“Thermodynamics: An engineering approach, 5th edition”*. Boston: McGraw-Hill.