



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 1585

**STUDI KOMPARASI PERFORMANSI PLTU *SUB-CRITICAL* 660 MW BERBAHAN BAKAR *MEDIUM RANK COAL* DAN *LOW RANK COAL* DAN PLTU *ULTRASUPERCRITICAL* 660 MW BERBAHAN BAKAR *LOW RANK COAL***

RICKY ERDIANSA  
NRP 02111140000146

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. DJATMIKO ICHSANI, M.Eng

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI KOMPARASI PERFORMANSI PLTU 660 MW  
SUBCRITICAL BERBAHAN BAKAR *MEDIUM RANK*  
COAL DAN *LOW RANK COAL* DAN PLTU  
*ULTRASUPERCRITICAL* 660 MW BERBAHAN BAKAR**

RICKY ERDIANSA  
NRP. 02111140000146

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. DJATMIKO ICHSANI, M.Eng  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TM141585

**COMPARASION PERFORMANCE STUDY OF STEAM  
POWER PLANT SUBCRITICAL 660 MW FUELED BY  
MEDIUM RANK COAL AND LOW RANK COAL AND  
STEAM POWER PLANT ULTRASUPERCRITICAL  
660 MW FUELED BY LOW RANK COAL**

RICKY ERDIANSA  
02111140000146

Supervisor

Prof. Dr. Ir. DJATMIKO ICHSANI, M.Eng  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

**STUDI KOMPARASI PERFORMANSI PLTU  
SUBCRITICAL 660MW BERBAHAN BAKAR LOW  
RANK DAN HIGH RANK COAL DAN PLTU  
ULTRASUPERCRITICAL 660MW BERBAHAN  
BAKAR LOW RANK COAL**



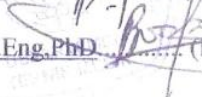
**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**RICKY ERDIANSA**  
NRP. 02111140000146

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng .....  ..... (Pembimbing)  
(NIP. 195310191979031002)
  2. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT .....  ..... (Penguji I)  
(NIP. 197301161997021001)
  3. Bambang Arip Dwiyanoro, ST, M.Eng, PhD .....  ..... (Penguji II)  
(NIP. 197804012002121001)
-



**Studi Komparasi Performansi PLTU *Subcritical* 660 MW  
berbahan bakar *low rank* dan *high rank coal* dan PLTU  
*UltraSuperCritical* 660MW berbahan bakar *low rank coal***

Nama Mahasiswa : Ricky Erdiansa  
NRP : 02111140000146  
Departemen : Teknik Mesin  
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichسانی, M.Eng.

### **ABSTRAK**

*Indonesia membutuhkan sumber energi listrik yang besar dikarenakan bertambahnya kebutuhan manusia akan energi listrik. Maka dari itu diperlukan evaluasi terhadap kinerja dan performa pembangkit yang ada saat ini. Untuk itu, teknologi ultra-supercritical (USC) sangat dibutuhkan dimana efisiensi yang didapatkan oleh teknologi ultrasupercritical mendekati 48% ,dimana pembangkit yang ada saat ini, subcritical power plant, memiliki efisiensi hanya berkisar 38%. Dan juga batubara yang paling banyak digunakan saat ini adalah batubara kualitas tinggi dan medium, dimana ketersediaan saat ini khususnya di Indonesia, mulai menipis. Maka dari itu, batubara kualitas rendah dipilih untuk menjadi bahan bakar pada penelitian kali ini. Dimana batubara kualitas rendah memiliki ketersediaan yang sangat banyak juga harga yang murah dibanding kualitas tinggi dan medium(sedang).*

*Penelitian dilakukan dengan cara membuat pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak cycle-tempo. Dimana variasi yang digunakan adalah variasi nilai kalor (LHV) pada batubara berkualitas rendah (low rank coal) untuk mengetahui jumlah bahan bakar yang digunakan dan juga biaya operasi pada pembangkit dengan ultrasupercritical technology (UST).*

*Variasi dari penelitian ini adalah nilai LHV pada 3800, 4000, 4200, dan pembebanan 50%, 75%, 100%, dan 110%.*

*Dengan mengganti dari subcritical menjadi ultrasupercritical (USC) dan pergantian bahan bakar dari Medium Rank Coal menjadi Low Rank Coal maka didapat hasil menurut perhitungan manual dan perhitungan melalui software cycle-tempo. Pada pembangkit dengan boiler subcritical, saat pembebanan pada turbin berada pada tingkat 50%, batubara dengan LHV 3800 kCal/kg membutuhkan batubara sebesar 69,94kg/s, batubara dengan LHV 4000 kCal/kg sebesar 67.91kg/s yang digunakan, dan batubara dengan LHV 4200kCal/kg sebesar 63.28kg/s dan pada LHV 5500kCal/kg sebesar 39.6kg/s. Pada pembebanan 75% LHV 3800kCal/kg membutuhkan batubara sebesar 104.6kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 101.55kg/s dan LHV 4200kCal/kg sebesar 94.63kg/s dan LHV 5500kCal/kg sebesar 59.22kg/s. Pada pembebanan 100% LHV 3800 kCal/kg menggunakan batubara sebesar 149.38kg/s, LHV 4000 sebesar 135.42kg/s dan LHV 4200 kCal/kg 126.19kg/s dan LHV 5500kCal/kg sebesar 78.97kg/s. Pada pembebanan 110% LHV 3800kCal/kg menggunakan 155.53kg/s, LHV 4000kCal/kg 149.08kg/s dan LHV 4200 138.92kg/s. Dan pada pembangkit UltraSuperCritical, Saat pembebanan pada turbin berada pada kondisi 50% batubara dengan LHV 3800kCal/kg didapatkan nilai laju konsumsi sebesar 49.22kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 47.78kg/s, dan LHV 4200kCal/kg sebesar 44.53kg/s. Pada pembebanan 75% LHV 3800kCal/kg sebesar 73.36kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 71.46kg/s dan LHV 4200kCal/kg sebesar 66.59kg/s. Pada pembebanan 100% LHV 3800kCal/kg sebesar 98.15kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 95.29kg/s dan LHV 4200kCal/kg sebesar 88.8kg/s. Pada pembebanan 110% LHV 3800kCal/kg laju konsumsi batubara didapat sebesar 108.05kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 104.09kg/s dan LHV 4200kCal/kg sebesar 97.7kg/s. Mengenai perhitungan ekonomi, pembangkit USC tidak feasible dikarenakan tidak mampu menutup bunga 7,1% dari Bank Indonesia, dan analisa ekonomi juga belum*

*memperhitungkan biaya perawatan, depresiasi nilai, nilai inflasi, dan down time.*

***Kata Kunci : Pembangkit, Pembangkit SubCritical ,  
Pembangkit UltraSuperCritical , Medium Rank Coal, Low Rank  
Coal, Software Cycle-Tempo***



**COMPARASION PERFORMANCE STUDY OF  
STEAM POWER PLANT SUBCRITICAL 660MW  
FUELED BY MEDIUM RANK COAL AND LOW  
RANK COAL AND STEAM POWER PLANT  
ULTRASUPERCRITICAL 660MW FUELED BY  
LOW RANK COAL**

Nama Mahasiswa : Ricky Erdiansa  
NRP : 02111140000146  
Departemen : Teknik Mesin  
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng.

**ABSTRACT**

*Indonesia needs a large source of electricity power due to the increasing of human's demand of electricity power. Its important to evaluate the performance of existing powerplant. For that pupose, UlstraSuperCritical Technology is needed and useful where the efficiency gained by ultrasupercritical technology is approcahing 48 percent, where the current powerplant , subcritical, has an efficiency only 38 percents. And also the most widely used coal today is high rank, medium rank, where the current availibility and also cheap compaed to high rank, medium rank, where the current availibility, especiallu in Indonesia , will running out. Then, the low rank coal will be selected by author for being fuel in thos research. Which low rank coal has many availibility and also cheap compared to high rank and medium rank.*

*Research was conducted by making modeling by using cycle-tempo software, Where the variations is heating value (LHV) in low rank coal to determine the amount of fuel used by*

power plant and also the operating cost of the plant with UltraSuperCritical Technology. Variation of this research are LHV at 3800, 4000, 4200 and condition of load from 50%, 75%, 100% and 110%.

By substituting from subcritical to ultrasupercritical (UST) and replace fuel from Medium Rank Coal to Low Rank Coal then the results obtained according to manual calculations and calculations from software cycle-tempo. From power plant with subcritical boilers, when turbine's loading is at 50% level, coal with LHV 3800kCal/kg requires 69.94kg/s of coal, coal with LHV 4000kCal/kg of 67.91kg/s used, and coal with LHV 4200kcal/kg of 63.28kg/s and at LHV 5500kcal/kg of 39.6kg/s. At loading 75% LHV 3800kcal/kg requires coal of 104.6kg/s, LHV 4000kCal/kg of 101.55kg/s and LHV 4200kCal/kg of 94.63kg/s and LHV 5500kCal/kg of 59.22kg/s. At loading 100% LHV 3800 kCal/kg using coal of 149.38kg/s, LHV 4000 of 135.42kg/s and LHV 4200 kCal/kg 126.19kg/s and LHV 5500kcal/kg of 78.97kg/s. At loading 110% LHV 3800kCal/kg using 155.53kg/s, LHV 4000kCal/kg 149.08kg/s and LHV 4200 138.92kg/s And at UltraSuperCritical power plant, when loading on turbine is in condition of 50% coal with LHV 3800kcal/kg got value consumption rate of 49.22kg/s, LHV 4000kCal/kg of 47.78kg/s, and LHV 4200kcal/kg of 44.53kg/s. At loading of 75% LHV 3800kCal/kg of 73.36kg/s, LHV 4000kCal/kg of 71.46kg/s and LHV 4200kCal/kg of 66.59kg/s. At loading 100% LHV 3800kcal/kg of 98.15kg/s, LHV 4000kCal/kg of 95.29kg/s and LHV 4200kcal/kg of 88.8kg/s. At 110% loading LHV 3800kcal/kg the rate of coal consumption is 108.05kg/s, LHV 4000kCal/kg of 104.09kg/s and LHV 4200kcal/kg of 97.7kg/s. Regarding economic calculations, the USC plant is not feasible due to not being able to cover 7.1% interest from Bank Indonesia, and economic analysis has not yet calculated the cost of maintenance, depreciation of value, inflation value, and down time.

***Keyword : Power Plant, SubCritical Powerplant, UltraSuperCritical Powerplant, Medium Rank Coal, Low Rank Coal, Software Cycle-Tempo***

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat, kasih dan karunia-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis berharap tugas akhir ini dapat memberi suatu manfaat, meskipun masih banyak kekurangan dalam kualitas penelitian tugas akhir ini. Kelancaran proses penulisan tugas akhir ini berkat bimbingan, arahan, dan petunjuk serta kerja sama dari berbagai pihak. Penulis dalam kesempatan ini menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Ayah dan Ibu, M.Manurung dan E.Panjaitan, atas kerja keras, kasih, doa, nasihat, bimbingan dan kepercayaan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh pendidikan di Kota Surabaya.
2. Lenny, Martin, Erwin selaku saudara-saudara yang selalu mendukung selama proses belajar.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichسانی, M.Eng. , sebagai dosen pembimbing yang telah banyak memberikan arahan, bimbingan, nasihat dan kepercayaan sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Terima kasih atas segala ilmu yang telah diberikan.
4. Bapak Bambang Arip Dwiyantoro, ST.M.Eng, PhD, . Dr. Bambang Sudarmanta, ST. MT. , Ary Bachtiar K.P., ST, MT, PhD. , selaku dosen – dosen penguji. Terima kasih atas ilmu, saran, serta kritik membangun yang telah diberikan untuk penyempurnaan tugas akhir ini.
5. Bapak Prof.Dr.Ing.I Made Londen Batan, ME. selaku dosen wali penulis yang telah membimbing penulis selama kuliah di Teknik Mesin ITS.
6. Seluruh dosen serta karyawan di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS yang telah memberikan banyak bantuan selama penulis menimba ilmu di kampus, dalam hal akademis maupun non-akademis.
7. Bapak Agus Dwi Moeljanto yang telah membantu penulis dalam membantu penulis selama pengerjaan Tugas Akhir

8. *Bang Rizky F Yusuf Simamora* yang telah membantu penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir.
9. Teman-teman Seperjuangan Tugas Akhir, *Melky Kevin Murphy J.* dan *M.Agilo Badai Bestari* yang telah menemani penulis selama masa-masa Tugas Akhir berlangsung.
10. Teman-teman kuliah, *Maylana Ikhwan, Rony O.G. M.Irsyadudin, A.Gafar, Ayub HP, M.Fahmi Hassan, M.Zaki,* yang telah membantu penulis selama mengerjakan Tugas Akhir.
11. Teman-teman M54, terima kasih atas segala yang diberikan dalam bentuk apapun. Semua yang kita lalui bersama akan selalu jadi kenangan yang tak terlupakan.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu. Terima kasih banyak.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Batasan Masalah .....	5
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap.....	7
2.2 Komponen Sistem PLTU .....	7
2.2.1 <i>Boiler</i> .....	8
2.2.2 Turbin.....	8
2.2.3 Kondenser .....	8
2.2.4 Pompa .....	8
2.2.5 <i>FeedWaterHeater</i> .....	9
2.3 Teknologi PLTU <i>UltraSuperCritical</i> .....	9
2.4 Analisa Termodinamika PLTU .....	12
2.5 Batubara sebagai Bahan Bakar PLTU .....	17
2.6 Penelitian Terdahulu.....	19
2.6.1 Anooj G. Sheth.....	19
2.6.2 Anurag Pandey.....	19
2.7 Analisa Biaya Produksi .....	20
2.8 <i>Software Cycle-Tempo</i> .....	20

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....	23
3.1 Metode Penelitian .....	25
3.2 Tahap Pengumpulan dan Pengolahan Data.....	25
3.3 Tahap Pemodelan Pembangkit pada <i>Cycle-Tempo</i> pada teknologi <i>Subcritical</i> .....	26
3.4 <i>Flowchart</i> Penelitian .....	27
 BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN .....	 29
4.1 Data dan Model Pembangkit Listrik Tenaga Uap .....	29
660MW .....	29
4.1.1 Data dan Model Pembangkit Listrik Tenaga Uap 660MW dengan <i>subcritical boiler</i> .....	29
4.1.2 Data dan Model Pembangkit Listrik Tenaga Uap 660MW dengan <i>UltraSuperCritical boiler</i> .....	33
4.2 Termodinamika dan Performa Pembangkit 660MW...	34
4.3 Contoh Perhitungan Hasil Perolehan Laju Aliran massa Batubara .....	41
4.4 Contoh Perhitungan Mencari Nilai <i>Nett Plant Heat Rate</i> .....	44
4.5 Analisa PLTU X Setelah dilakukan pergantian Bahan Bakar dan teknologi dengan variasi Pembebanan.....	45
4.5.1 Analisa konsumsi batubara yang divariasikan versus tingkat pembebanan pada pembangkit <i>subcritical</i> .....	45
4.5.2 Analisa konsumsi batubara yang divariasikan versus tingkat pembebanan pada pembangkit <i>UltraSuperCritical (USC)</i> .....	46
4.5.3 Analisa NPHR versus tingkat pembebanan pada variasi Pembangkit.....	48
4.6 Analisa secara Ekonomi .....	49
4.6.1 Analisa Biaya untuk Pembuatan Pembangkit .....	49
<i>UltraSuperCritical( USC)</i> .....	49
4.6.2 Analisa Pergantian Bahan Bakar Batubara .....	50
 BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	 55

5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	56

DAFTAR PUSTAKA.....	59
---------------------	----

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Lokasi dan Penampakan PLTU Tanjung Jati B .....1	1
Gambar 1.2	Lokasi dan Penampakan PLTU Tanjung Jati B .....2	2
Gambar 1.3	Pemetaan Cadangan Batubara terbesar di Indonesia .....2	2
Gambar 2.1	Komponen-Komponen Sistem Pembangkit Tenaga Uap.....7	7
Gambar 2.2	Siklus uap pada PLTU USC dan diagram T-s pada PLTU USC.....10	10
Gambar 2.3	Perbedaan teknologi pada <i>boiler subcritical</i> dengan USC .....1	1
Gambar 2.4	Ilustrasi prinsip kekekalan energi suatu volume atur .....12	12
Gambar 2.5	Siklus Rankine Sederhana dan diagram T-s pada Rankine Sederhana .....13	13
Gambar 2.6	Siklus tenaga uap dengan satu pemanas air- pengisian tertutup .....15	15
Gambar 2.7	Skema Efisiensi <i>Direct Method Boiler</i> .....1	1
Gambar 2.8	Simulasi menggunakan <i>cycle-tempo</i> .....21	21
Gambar 2.9	Parameter <i>Input</i> dari <i>software cycle-tempo</i> .....21	21
Gambar 3.1	<i>Heat Balance</i> dari sistem PLTU .....25	25
Gambar 3.2	Pemodelan dari sistem PLTU <i>Subcritical</i> ..26	26

Gambar 3.3	<i>Flowchart</i> Penelitian.....	27
Gambar 4.1	Pemodelan <i>cycle-tempo</i> berdasarkan PLTU <i>existing</i> dengan LHV 5500kCal/kg .....	30
Gambar 4.2	Hasil Simulasi dari <i>cycle-tempo</i> .....	32
Gambar 4.3	Diagram T-s <i>Subcritical</i> dari <i>cycle-tempo</i> . .....	33
Gambar 4.4	Diagram T-s <i>UltraSuperCritical</i> dari <i>cycle-tempo</i> .....	34
Gambar 4.5	Konsumsi batubara versus tingkat pembebanan dengan variasi nilai LHV pada <i>boiler subcritical</i> .....	45
Gambar 4.6	Konsumsi batubara versus tingkat pembebanan dengan variasi nilai LHV pada pembangkit <i>UltraSuperCritical</i> (USC) .....	47
Gambar 4.7	Perbandingan antara teknologi <i>powerplant</i> serta tingkat batubara terhadap tingkat pembebanan .....	48
Gambar 4.8	<i>Cashflow diagram</i> investasi pembangkit <i>UltraSuperCritical</i> (USC) .....	52
Gambar 4.9	<i>BI Rate</i> untuk mendapatkan suku bunga ..	53

**DAFTAR TABEL**

Tabel 4.1 Data <i>Heat Balance</i> pada kondisi <i>existing</i> .....	29
Tabel 4.2 Perbandingan antara Perhitungan manual dengan <i>Cycle-Tempo</i> .....	40
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan konsumsi batubara pada setiap pembebanan.....	43
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Nilai NPHR pada setiap pembebanan.....	44
Tabel 4.5 Biaya Investasi untuk pembuatan pembangkit <i>UltraSuperCritical (USC)</i> .....	48

**DAFTAR TABEL**

Tabel 4.1 Data <i>Heat Balance</i> pada kondisi <i>existing</i> .....	29
Tabel 4.2 Perbandingan antara Perhitungan manual dengan <i>Cycle-Tempo</i> .....	40
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan konsumsi batubara pada setiap pembebanan.....	43
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Nilai NPHR pada setiap pembebanan.....	44
Tabel 4.5 Biaya Investasi untuk pembuatan pembangkit <i>UltraSuperCritical (USC)</i> .....	48

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia membutuhkan sumber energi yang besar dikarenakan kebutuhan masyarakat yang meningkat seiring bertambahnya pertumbuhan penduduk, salah satunya yaitu energi listrik. Untuk menghasilkan energi listrik dalam jumlah besar dibutuhkan penghasil energi listrik yang mampu menghasilkan dalam jumlah yang besar, salah satu contohnya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). PJB UP Tanjung Jati B merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga uap yang memiliki kapasitas pembangkitan sebesar 660 MW menggunakan bahan bakar yaitu batubara. Pembangkit juga memerlukan banyak evaluasi, hal ini dikarenakan agar meningkatkan efisiensi pembangkit. Upaya peningkatan kinerja PLTU ini terutama dilakukan dengan meningkat suhu dan tekanan dari uap yang dihasilkan selama proses pembakaran. Perkembangannya dimulai dari *subcritical steam* kemudian *supercritical steam* serta *ultrasupercritical steam*.



**Gambar 1.1 Lokasi dan Penampakan PLTU Tanjung Jati B**

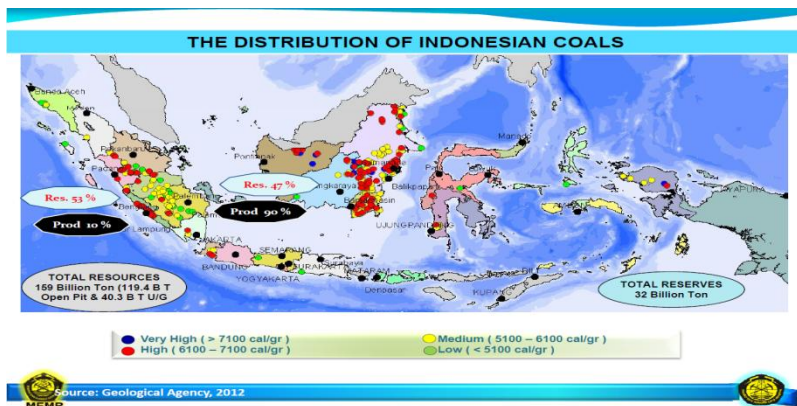
Di PLTU Tanjung Jati menggunakan PCC dengan *subcritical boiler* dan dimana bahan bakar yaitu *low rank coal*. PLTU Tanjung Jati B terletak di ujung semenanjung muria Pulau Jawa ( $6^{\circ} 26''$  LS  $110^{\circ} 44''$  BT), sekitar 40 km dari kota Jepara. Menempati area seluas 150 Ha yang termasuk wilayah Desa Tubanan, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara, Jawa Tengah.



**Gambar 1.2 Lokasi dan Penampakan PLTU Tanjung Jati B**

*Boiler supercritical* dan *ultrasupercritical* telah banyak digunakan di pembangkit listrik tenaga uap. *Boiler* ini dinamakan *ultrasupercritical* karena beroperasi pada tekanan dan temperatur ,yaitu di atas 300bar dan  $700^{\circ}\text{C}$ , efisiensi mendekati 50 persen. Teknologi ini memiliki keunggulan-keunggulan dibanding *boiler subcritical*, yaitu efisiensi yang lebih tinggi dan kadar emisi yang dihasilkan lebih rendah dari *boiler subcritical*. Berbeda dengan *boiler superheater* yang membutuhkan suatu alat untuk memisahkan antara uap air dengan campuran uap dan air (biasa disebut *steam drum*), *boiler supercritical* tidak memerlukannya. Selama proses pembentukan uap air tidak akan

terbentuk gelembung-gelembung uap (*bubbles*), karena tekanan air berada di atas tekanan kritisnya yang masih mungkin terbentuk gelembung uap. Hal ini menyebabkan penggunaan bahan bakar yang jauh lebih sedikit dan efisien, dan selanjutnya mengakibatkan produksi gas buang CO<sub>2</sub> menjadi berkurang.



**Gambar 1.3 Pemetaan Cadangan Batubara terbesar di Indonesia**

Indonesia merupakan penghasil cadangan batubara terbesar di dunia. Batubara terbesar di seluruh pelosok Indonesia, dan yang terbesar yaitu berada di daerah Sumatra Selatan, Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan. Hal ini merupakan potensi yang baik dimana PLTU masih sangat membutuhkan bahan bakar berupa batubara. Lebih dari 80% batubara di Indonesia merupakan batubara berjenis *Medium Rank*, 9% batubara *High Rank* dan batubara *low rank* 29%. Batubara Low Rank tersebut juga memiliki harga yang lebih murah dibandingkan dengan *High Rank* maupun *Low Rank*. Maka dari

itu, dipilih batubara *low rank* merupakan opsi terbaik dalam pemilihan material dari pertimbangan tersebut.

Pada kesempatan kali akan dibahas tentang teknologi yang bisa memaksimalkan kinerja dari pembangkit *subcritical* yaitu teknologi *ultrasupercritical* (USC). Teknologi yang memanfaatkan potensi batubara secara maksimal sehingga dapat mengurangi penggunaan batubara yang berlebihan sehingga dapat meminimalkan emisi gas buang dari sisa hasil pembakaran. Dan juga menganalisa investasi terhadap penggunaan batubara *low rank* dengan menggunakan teknologi *ultrasupercritical* dimana teknologi tersebut dikatakan lebih baik dari teknologi yang ada di Indonesia yaitu *subcritical*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas adalah:

1. Bagaimana memodelkan *heat and mass balance* PLTU dengan *boiler ultrasupercritical*?
2. Bagaimana performa kerja dari PLTU dengan *boiler ultrasupercritical* berbahan *low rank* dengan melakukan simulasi pada piranti lunak *Cycle Tempo*?
3. Bagaimana pengaruh perubahan penggunaan bahan bakar antara *high rank coal* dengan *low rank coal* pada performa kerja PLTU *subcritical* ?
4. Bagaimana mengetahui kebutuhan batubara *low rank* pada PLTU *ultrasupercritical*?
5. Bagaimana mengetahui perbandingan kebutuhan batubara *low rank* pada PLTU *subcritical* dan *ultrasupercritical* dengan menghitung analisa biaya investasi dan bahan bakar pada PLTU *ultrasupercritical* ?
6. Bagaimana mengetahui analisa finansial biaya investasi pada *ultrasupercritical* terhadap penghematan biaya bahan bakar *high rank* pada *subcritical*?

## 1.3 Tujuan Penelitian



Tujuan masalah yang akan dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Memodelkan *heat and mass balance* PLTU dengan *boiler ultrasupercritical*.
2. Mengetahui performa kerja dari PLTU dengan *boiler ultra-supercritical* berbahan *low rank* dengan melakukan simulasi pada piranti lunak *Cycle Tempo*
3. Mengetahui pengaruh perubahan penggunaan bahan bakar antara *high rank coal* dengan *low rank coal* pada performa kerja PLTU *subcritical*
4. Mengetahui kebutuhan batubara *low rank* pada PLTU *ultrasupercritical*
5. Mengetahui perbandingan kebutuhan batubara *low rank* pada PLTU *subcritical* dan *ultrasupercritical* dengan menghitung analisa biaya investasi dan bahan bakar pada PLTU *ultrasupercritical*
6. Mengetahui analisa finansial biaya investasi pada *ultrasupercritical* terhadap penghematan biaya bahan bakar *high rank* pada *subcritical*

#### **1.4 Batasan Masalah**

Analisis ini menggunakan beberapa batasan masalah dan asumsi yang digunakan dalam proses analisis, perhitungan, dan pembahasan sebagai berikut:

1. Analisa berdasarkan data operasi PLTU
2. Sistem dalam kondisi tunak.
3. Pengaruh perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan.
4. *Heat loss* dan kebocoran pipa diabaikan.
5. Radiasi diabaikan
6. Pengaruh terhadap lingkungan diabaikan.
7. Fluida kerja yang digunakan adalah air.
8. Inflasi diabaikan

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

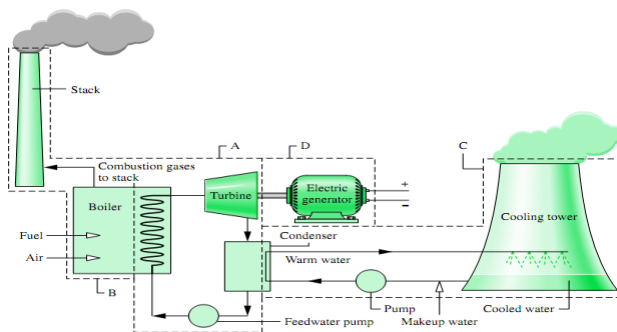
1. Meningkatkan kemampuan untuk mendesain sistem pembangkit dengan analisa termodinamika
2. Dapat digunakan sebagai informasi dalam efisiensi pembangkit.
3. Dapat digunakan sebagai data pembanding atau acuan dalam penentuan bahan bakar pada pembangkit

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Siklus termodinamika merupakan suatu urutan proses yang berawal dan berakhir pada keadaan yang sama, dimana pada akhir siklus semua sifat akan memiliki nilai yang sama dengan kondisi awal. Pada pembangkit listrik tenaga uap, fluida yang mengalami proses-proses tersebut adalah air. Air berfungsi sebagai fluida kerja. Air dalam siklus kerjanya mengalami beberapa proses seperti pemanasan, penguapan, ekspansi, pendinginan, dan kompresi.



**Gambar 2.1** Komponen-komponen sistem pembangkit tenaga uap

Pada gambar siklus di atas komponen-komponen utama yang menunjang kinerja dari sistem tersebut terdiri dari *boiler*, turbin, kondesor, *feedwater heater* atau sistem air-pengisian, dan pompa dimana pada sub-sistem ini tiap unit massa secara periodik melewati siklus termodinamika pada keempat komponen utama sistem pembangkit tenaga uap tersebut

## 2.2 Komponen sistem PLTU

### 2.2.1 Boiler

*Boiler* adalah suatu peralatan yang berfungsi mengubah air menjadi uap yang terdapat pada pembangkit. Fungsi utama *boiler* adalah tempat pembakaran bahan bakar sehingga air yang masuk ke *boiler* dipanaskan menjadi uap. Berikut adalah komponen yang terdapat didalam *boiler* :

1. *Economizer* yang berfungsi untuk memanaskan air dari *High Pressure Heater*.
2. *Superheater* yang berfungsi untuk memanaskan uap air sehingga dihasilkan uap yang kering
3. *Reheater* yang berfungsi untuk memanaskan kembali uap kering bertekanan tinggi yang telah keluar dari *high pressure turbine*.
4. *Separator* berfungsi untuk memisahkan fluida kerja yang masih dalam fase cair sehingga dapat dipanaskan ulang.

### 2.2.2. Turbin

Fungsi utama dari turbin uap adalah mengkonversi tekanan uap bertekanan tinggi menjadi gerakan memutar ,dimana tekanan uap tersebut menekan sudu turbin. Pada kondisi aktual turbin yang digunakan ada 3 macam :

1. Turbin tekanan tinggi (*High Pressure Turbine*)
2. Turbin tekanan sedang (*Intermediate Pressure Turbine*)
3. Turbin tekanan rendah (*Low Pressure Turbine*)

### 2.2.3. Kondensor

Kondeser merupakan alat untuk mengubah uap hasil keluaran turbin menjadi air dengan sistem kondensasi. Fungsi utama dari kondensor adalah mengubah uap keluaran turbin uap menjadi air sehingga dipompa ke *boiler* melalui *feedwater heater*.

### 2.2.4. Pompa

Pompa di sistem pembangkit ini yaitu alat untuk mengalirkan air. Salah satu contohnya yaitu *boiler feed pump*,

dimana pompa ini berfungsi untuk mengalirkan atau menyuplai air menuju *boiler* dari *deaerator*.

### **2.2.5 Feedwater Heater**

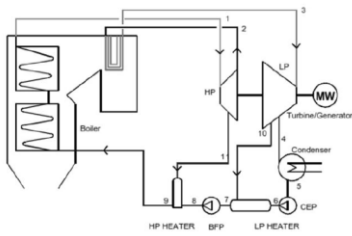
*Feedwater heater* merupakan komponen dari PLTU untuk meningkatkan efisiensi PLTU. Sebelum dipompa masuk ke *boiler*, *feedwater* harus dipanaskan terlebih dahulu hingga mencapai suhu tertentu. Pemanasan tersebut dilakukan dengan *heater (heat exchanger)*, yang berlangsung secara konduksi dengan memanfaatkan uap panas yang diambil (diekstraksi) dari turbin. Selain diteruskan ke kondenser, sebagian uap turbin yang diambil, digunakan untuk memanaskan *feedwater heater*. *Feedwater Heater* ini merupakan gabungan beberapa pemanas dengan tekanan tertentu sesuai dengan tekanan yang dicerat dari turbin.

*Feedwater Heater* terbagi dalam 2 jenis yaitu *open feedwater heater* dan *closed feedwater heater*. *Open Feedwater Heater* dalam pembangkit ini adalah *deaerator* yang digunakan untuk menghilangkan kandungan oksigen yang terdapat pada air kondensat hasil proses *low pressure turbine*. Jenis *feedwater heater* lainnya adalah *closed feedwater heater*, dan dalam pembangkit ini adalah *low pressure heater* dan *high pressure heater*. Panas yang diperoleh didapat dari uap panas hasil ekstraksi turbin. Perbedaan dari kedua jenis *feedwater heater* ini adalah tekanan dan temperatur *oultet* dari *high pressure heater* lebih tinggi daripada *low pressure heater*.

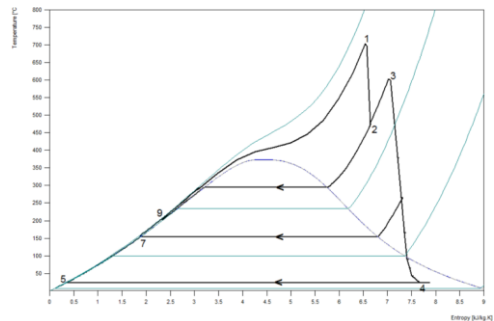
## **2.3 Teknologi PLTU UltraSuperCritical (USC)**

Saat ini, efisiensi energi merupakan tema yang tidak dapat dipisahkan di setiap pembangunan di negara berkembang maupun negara maju. Di dunia ketenagalistrikan pun, tema efisiensi energi ini selalu digaungkan, termasuk didalamnya pemilihan jenis *powerplant* (pembangkit listrik). Semakin efisien suatu jenis *powerplant* maka secara teknis peluang untuk dipilih dan dibangun akan semakin besar. Pembangkit listrik termal khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) akan semakin efisien ketika tekanan (*pressure*) dan temperatur operasi

uap (*steam*) semakin tinggi. Ketika *main steam* beroperasi diatas titik kritis air (*pressure* 221 bar dan temperatur  $374^{\circ}\text{C}$ ), maka PLTU tersebut disebut *supercritical power plant*. Parameter Temperatur di hampir semua PLTU pasti diatas  $374^{\circ}\text{C}$  sehingga hanya parameter *pressure* yang menentukan suatu PLTU disebut *supercritical* atau *subcritical*. Jika *pressure main steam* diatas 221 bar maka disebut PLTU *supercritical*, sebaliknya jika dibawah nilai tersebut disebut *subcritical*. Dan untuk teknologi *UltraSuperCritical (USC Technology)*, *pressure* diatas 300bar dan temperatur diatas  $700^{\circ}\text{C}$ .



(a)



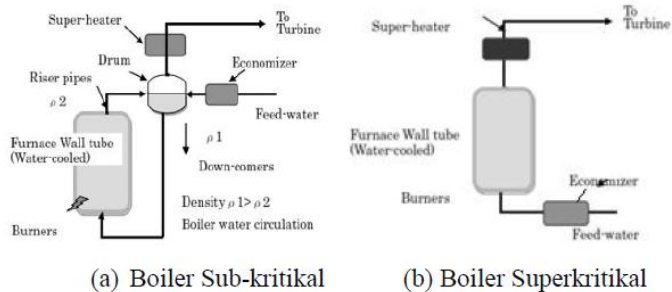
(b)

**Gambar 2.2 (a)Siklus uap pada PLTU USC dan (b) diagram T-s pada PLTU USC**

Berikut proses yang terjadi sesuai dengan gambar di atas, yaitu:

- Proses 1–2 : Ekspansi isentropik dari fluida kerja melalui turbin dari uap jenuh pada kondisi 1 hingga mencapai tekanan kondensor
- Proses 3-4 : Proses ekspansi dalam turbin
- Proses 4-5 : Perpindahan kalor dari fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui kondensor dengan cairan jenuh pada kondisi 5

- Proses 7-9 : *Feedwater* dipompa dengan BFP sebelum dialirkan menuju *boiler*.
- Proses 9-1 : Perpindahan kalor ke fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui *boiler* untuk menyelesaikan siklus



**Gambar 2.3 Perbedaan teknologi pada boiler subcritical dengan USC**

Berikut adalah teknologi yang terdapat pada teknologi USC :

Pada *boiler subcritical* menggunakan *steam drum* dimana fungsinya adalah memisahkan fasa cair dan gas. Fasa cair ini akan disirkulasikan kembali ke *water wall*. Dan pada *boiler USC*, air yang dipanaskan pada tekanan konstan diatas tekanan kritis sehingga tidak ada perbedaan antara gas dan cair. Dimana pada *boiler USC* tidak ada tahapan air berada dalam dua fasa yang membutuhkan separasi, sehingga *boiler* hanya sekali memanaskan dan fasa yang terjadi hanya fasa gas dimana langsung dikirim ke turbin

Telah diketahui dengan baik bahwa efisiensi siklus air/uap digunakan secara konvensional pembangkit listrik dapat dioptimalkan dengan :

- Meningkatkan parameter uap secara langsung (suhu dan tekanan).
- Mengurangi tekanan kondensor melalui pendinginan yang efektif seperti air laut

- Menggunakan pemanas ulang dan pemanas ulang ganda (*double reheat*)
- Mengoptimalkan temperatur *feedwater*
- Mengurangi Karbon Tidak Terbakar (UBC) dalam *fly ash* dengan efektif dan pembakaran meningkat

Beberapa langkah ini telah diperhitungkan mengembangkan efisiensi tinggi *UltraSuperCritical powerplant* di Eropa dan Jepang mencapai efisiensi hampir 48%

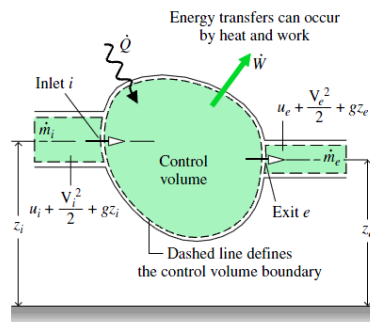
## 2.4. Analisa Termodinamika Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pada instalasi pembangkit tenaga uap, komponen-komponen utama dapat disederhanakan seperti siklus rankine sehingga proses evaluasi sistem pembangkit tenaga uap dapat dilakukan. Analisa sistem pembangkit uap dapat menggunakan analisa termodinamika yaitu dengan prinsip konservasi energi dan massa dan hukum kedua termodinamika.

Berikut adalah bentuk persamaan konservasi energi:

$$\Delta EK + \Delta EP + \Delta U = Q - W \quad (2.1)$$

Bentuk persamaan tersebut di atas menyatakan bahwa perpindahan energi melalui daerah batas sistem diwujudkan sebagai perubahan bentuk makroskopik energi yang hanya bergantung pada keadaan awal dan keadaan akhir.



**Gambar 2.4 Ilustrasi prinsip kekekalan energi suatu volume atur**



Berdasarkan gambar ilustrasi di atas dapat diperoleh bentuk neraca laju energi dengan kondisi tunak yaitu

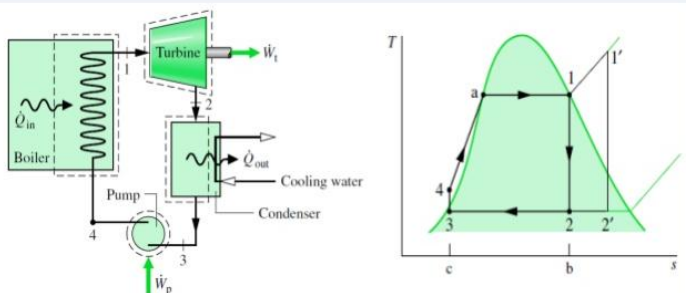
$$0 = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \sum_i \dot{m}_i \left[ h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right] - \sum_e \dot{m}_e \left[ h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right] \quad (2.2)$$

Bentuk tersebut di atas dapat disederhanakan dengan mengasumsikan bahwa di dalam sistem energi kinetik dan energi potensial diabaikan sehingga bentuk formula menjadi

$$0 = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \sum_i \dot{m}_i [h_i] - \sum_e \dot{m}_e [h_e] \quad (2.3)$$

Selanjutnya, prinsip kedua yang digunakan untuk mengevaluasi sistem pembangkit adalah prinsip termodinamika kedua. Prinsip termodinamika kedua adalah mengenai proses irreversibilitas di dalam suatu sistem proses aktual yang terjadi secara spontan. Hal tersebut terjadi karena ada energi yang tidak sepenuhnya terpakai karena efektifitas dari sistem tersebut. Irreversibilitas utama sistem pembangkit misalnya adalah dari turbin yang dialami oleh fluida kerja ada hubungannya dengan ekspansi melalui turbin. Perpindahan kalor dari turbin ke sekitarnya merupakan salah satu bentuk rugi, tapi karena rugi tersebut tidak terlalu signifikan, rugi tersebut akan diabaikan untuk proses-proses selanjutnya. Kemudian, masukkan kerja ke pompa yang diperlukan untuk mengatasi gesekan juga akan mengurangi efisiensi pembangkit.

Berikut adalah skema pembangkit sederhana yang digunakan untuk perhitungan pada masing-masing perangkat :



**Gambar 2.5 Siklus Rankine Sederhana dan diagram T-s pada Rankine sederhana**

➤ **Turbine**

Siklus uap yang dari kondisi 1 dari *boiler*, kondisi temperatur dan tekanan yang telah dinaikkan, mengalami ekspansi melalui turbin guna menghasilkan kerja dan kemudian dilanjutkan ke kondenser pada kondisi 2. Berdasarkan persamaan 2.3 kerja turbin adalah

$$\frac{W_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \quad (2.4)$$

➤ **Kondensor**

Selanjutnya, siklus uap dilanjutkan ke kondensor. Di kondensor, uap air akan mengalami kondensasi karena adanya perpindahan kalor dengan air pendingin yang mengalir dengan air yang terpisah. Kesetimbangan laju massa dan *energy volume* air pada kondensor adalah

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \quad (2.5)$$

➤ **Pompa**

Tenaga masuk per unit massa yang melalui pompa adalah

$$\frac{W_p}{\dot{m}} = h_4 - h_3 \quad (2.6)$$

➤ **Boiler**

Laju perpindahan kalor dari pemanasan fluida kerja per satuan massa sistem pembangkit tenaga uap di *boiler* adalah

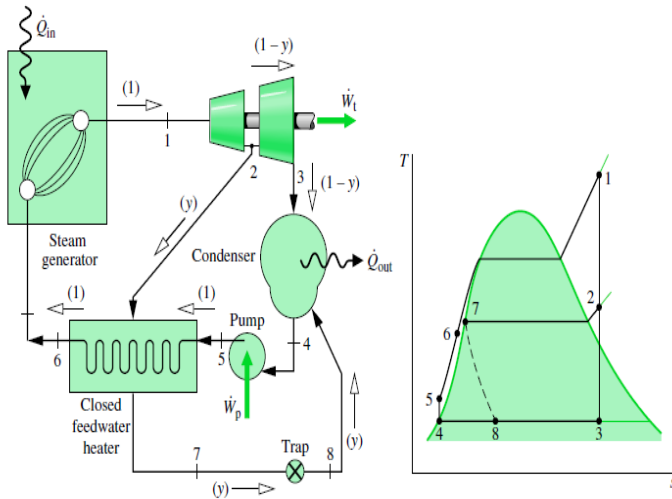
$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \quad (2.7)$$

➤ **Menghitung efisiensi**

Selain itu, parameter kerja suatu pembangkit juga perlu dievaluasi sehingga dapat diketahui efektifitas siklus pembangkit. Parameter tersebut antara lain adalah efisiensi termal pembangkit dan laju kalor. Efisiensi termal adalah sejumlah energi(kalor) yang diberikan pada fluida kerja melalui *boiler* yang dimanfaatkan menjadi kerja netto.

$$\eta = \frac{\frac{W_t}{\dot{m}} - \frac{W_p}{\dot{m}}}{\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} \quad (2.8)$$

Untuk optimasi sistem pembangkit, nilai efisiensi termal dari pembangkit tenaga uap dapat ditingkatkan. Hal tersebut dapat tercapai melalui sistem regeneratif dari siklus tenaga uap. Ada dua jenis sistem regeneratif, yaitu sistem pemanas air-pengisian terbuka dan sistem pemanas air-pengisian tertutup. Dengan adanya pemanas air-pengisian ini, diharapkan ada dua hal yang bisa diraih, yaitu yang pertama untuk meningkatkan temperatur dari air-pengisian yang mana akan meningkatkan efisiensi keseluruhan, kedua, yaitu untuk meminimalkan efek termal pada boiler.



**Gambar 2.6** Siklus tenaga uap dengan satu pemanas air-pengisian tertutup

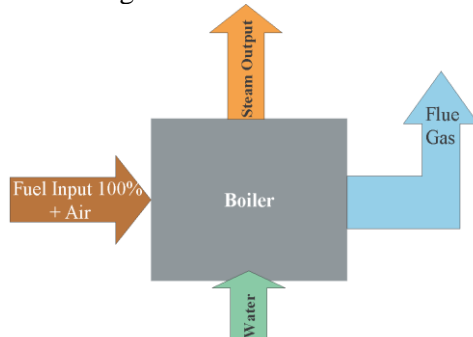
Seperti pada skema gambar 2.4 fraksi dari aliran total sistem pembangkit dengan satu *closed feedwaterheater* diperoleh dengan menerapkan prinsip konservasi massa dan energi pada sekeliling *feedwater heater*.

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

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_7} \quad (2.9)$$

Ada dua metode yang dapat digunakan untuk menghitung efisiensi *boiler*, yaitu dengan metode langsung (*Direct Method*) dan metode tidak langsung (*Indirect Method*). Perhitungan efisiensi *boiler* ini nantinya digunakan untuk menghitung nilai efisiensi *boiler*.

Metode perhitungan langsung adalah perhitungan efisiensi dengan membandingkan nilai *output* dengan *input*. Energi yang didapat dari fluida kerja (air dan *steam*) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar *boiler*.



**Gambar 2.7 Skema Efisiensi *Direct Method* Boiler**

Sesuai dengan gambar 2.5 skema efisiensi *boiler* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Boiler Efficiency } (\eta) = \frac{\text{heat output}}{\text{heat input}} \times 100\%$$

$$\text{Boiler Efficiency } (\eta) = \frac{\dot{m} \cdot (h_{\text{steam}} - h_{\text{water}})}{\dot{m}_{\text{fuel}} \cdot \text{LHV}} \times 100\% \quad (2.10)$$

dimana:

$\dot{m}$	= laju uap yang dihasilkan
$\dot{m}_{\text{fuel}}$	= laju bahan bakar yang diumpangkan
$\text{LHV}$	= nilai kalor bawah bahan bakar
$h_{\text{steam output}}$	= Entalphi uap
$h_{\text{water input}}$	= Entalphi air pengisi

## 2.5 Batubara sebagai Bahan Bakar PLTU

Saat ini, hampir semua PLTU di Indonesia menggunakan Bahan Bakar batubara. Alasan utama tentunya karena biaya produksi listrik PLTU batubara dibandingkan dengan menggunakan Bahan bakar Minyak (BBM) jauh lebih murah, setidaknya biaya bahan bakar BBM 6 kali lebih tinggi dari batubara atau bahkan lebih. Dan juga Indonesia merupakan salah satu negara dengan cadangan batubara terbesar di dunia. Indonesia memiliki cadangan batubara yang tersebar di pelosok Indonesia dimana hal ini sangat mendukung pembangunan pembangkit dan kelangsungan energi listrik berbahan bakar batubara.

Berikut adalah parameter yang merepresentasikan nilai kalor yang terkandung pada batubara, dalam satuan kCal/kg. Terdapat dua tipe nilai kalor pada setiap bahan bakar, *Gross Calorific Value* (GCV) dan *Nett Calorific Value* (NCV) atau kadang disebut juga *High Heating Value* (HHV) dan *Low Heating Value* (LHV).

- HHV: *heat* yang dihasilkan dari pembakaran sempurna batubara pada volume konstant sehingga semua air ( $H_2O$ ) terkondensasi dalam bentuk cairan.
- LHV : *heat* yang dihasilkan dari pembakaran sempurna batubara pada volume konstant dengan semua air ( $H_2O$ ) terbentuk dalam bentuk uap. Pada data diatas, kebetulan nilai NCV tidak ditampilkan

Berikut adalah Harga Batubara yang terdaftar di Ditjen Minerba :

**Tabel 2.1 Tabel Harga Patokan Batubara (HPB)**

No	MEREK DAGANG/ BRAND	KUALITAS TYPICAL				HPB (US\$/ton)
		CV (kcal/kg, GAR)	TM (%, ar)	TS (%, ar)	Ash (%, ar)	
9	Gunung Bayan II	7.000	12,00	2,00	10,00	94.67
10	Marunda Thermal Coal	6.600	11,00	0,50	10,00	96.14
11	Trubaindo HCV_HS	6.553	12,00	1,69	4,21	92.00
12	Medco Bara 6500	6.500	10,00	3,28	9,38	84.89
13	Trubaindo HCV_LS	6.423	11,50	0,71	4,76	94.40
14	AGM Waruba Coal	5.313	23,00	0,24	4,00	71.37
15	Pinang 6000 NAR	6.300	14,00	0,60	5,50	90.33
16	Arutmin Satui 10	6.300	11,00	1,00	10,00	89.92
17	Arutmin Senakin	6.250	11,00	1,00	12,00	88.42
18	Arutmin A6250	6.250	10,00	1,20	12,00	88.60
19	Mandiri 1	5.200	25,00	0,60	7,00	65.71
20	Wahana Coal	6.200	12,00	0,90	10,00	87.93
21	Medco Bara 6200	6.200	10,00	4,00	12,00	76.69
22	Indominco IM_West / 6500	6.171	15,50	0,76	5,22	86.58
23	TAJ Coal	6.200	10,00	1,00	14,00	87.89
24	Mandiri 2	5.100	26,00	0,60	7,00	63.72
25	Trubaindo MCV_LS	6.143	14,00	0,76	5,20	87.67
26	SKB Coal	6.130	9,00	2,20	17,00	81.87
27	Baramarta Coal	6.112	9,50	0,95	13,00	87.72
28	Arutmin A6100	6.100	11,50	1,00	12,50	85.62
29	Insani Coal	6.050	19,00	0,15	3,20	84.88
30	BCS Coal	5.915	15,10	0,56	9,40	82.66
31	Indominco IM_West / 6350	6.029	15,50	0,71	5,22	84.88
32	Bangun Coal	6.072	10,02	2,20	14,91	80.89
33	Pinang 6000	6.000	16,00	0,60	5,00	84.55
34	Indominco IMM_MCVHS	5.970	15,50	1,65	5,05	80.40
35	Multi Coal Low	5.950	16,00	1,00	7,00	81.48
36	Multi Coal Middle	5.900	16,00	2,00	7,00	76.82
37	Pinang 5900	5.900	19,00	0,90	4,50	79.42
38	Arutmin A5900	5.900	12,00	0,90	13,00	82.55

## 2.6 Penelitian Terdahulu

### 2.6.1. Anooj G. Sheth dan Alkesh M Mavani (2012).

**Tabel 2.2 Hasil Simulasi dengan menggunakan perangkat lunak *Gate-Cycle***

Variable	Output values	Unit
Ambient Temperature	288	°K
Ambient Pressure	1.0132	Bar
Ambient Relative Humidity	0.6	
Ambient Specific Humidity	0.0063	
Net Cycle Power	709735.6	kW
Net Cycle Lower Heating Value (LHV) Efficiency	42.7632	
Net Cycle Lower Heating Value (LHV) Heat Rate	2010.32	kcal/kW-hr
Total Lower Heating Value (LHV) Fuel Cons.	5.9747E09	kJ/hr
Net Steam Cycle Power	709735.6	kW
ST Shaft Power	743291.2	kW
ST Generator Losses	14865.81	kW
Steam Cycle BOP Losses	18689.81	kW
ST Generator Output	728425.4	kW
Adjusted Cycle Lower Heating Value (LHV) Efficiency	42.7632	
Adj. Cycle Lower Heating Value (LHV) Heat Rate	2010.32	kcal/kW-hr
Gross Power of Turbine Cycle	728425.4	kW

Anooj G. Sheth dan Alkesh M Mavani pada tahun 2012 dalam penelitiannya berjudul "*Determining Performance of Supercritical Power Plant with the help of Gate-Cycle*". Penelitian ini bertujuan untuk memaparkan performa pembangkit listrik tenaga uap *supercritical* 700MW dengan bantuan perangkat lunak *Gate-Cycle*. Pemodelan dan simulasi pada perangkat lunak *Gate-Cycle* dan mengikuti data dari katalog pembangkit.

Tabel 2.1 diatas menunjukkan hasil simulasi yang didapatkan pada pembangkit listrik tenaga uap berteknologi *supercritical* 700MW. Efisiensi yang dihasilkan pembangkit berdasarkan hasil simulasi perangkat lunak *Gate-Cycle* adalah sebesar 42,76% sedangkan *heat rate* yang dihasilkan adalah sebesar 2010,32 kCal/kWh atau sebesar 8411,17kJ/kWh

### 2.6.2 Anurag Pandey (2012)

Anurag Pandey pada tahun 2012 dalam penelitiannya berjudul "*A Review on Power generation by Ultra-Supercritical Technology*". Penelitian ini bertujuan untuk memaparkan bahwa dengan mengkonsumsi batubara lebih sedikit maka akan membantu mengurangi biaya listrik (*cost of electricity*). Pembangkit dengan teknologi *ultrasupercritical* akan mempengaruhi performa pembangkit. Dan juga peningkatan kinerja mereka akan menyebabkan peningkatan ketersediaan dan konservasi energi skala besar. Pada tabel 2.1 diatas menunjukkan hasil simulasi yang didapatkan pada pembangkit listrik tenaga uap berteknologi *supercritical* 700MW. Dengan meningkatkan temperatur dari 580°C ke 760°C dan tekanan dari 33MPa ke 42MPa. Efisiensi termal meningkat sekitar 4 persen.

## 2.7 Analisa Biaya Produksi

Analisa biaya produksi yang dilakukan adalah perhitungan biaya produksi pada PLTU *subcritical* dan PLTU *UltraSuperCritical*. Perhitungan yang dilakukan berdasarkan Harga Batubara Acuan (HBA) dengan persamaan :

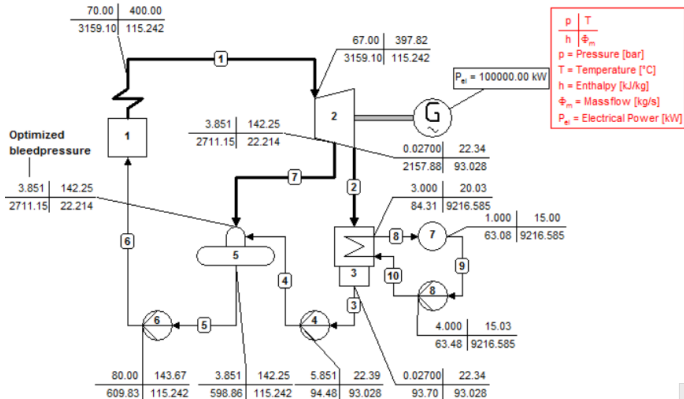
$$\text{biaya produksi} \left( \frac{\text{Rupiah}}{\text{tahun}} \right) = \dot{m}_{\text{batubara}} \left( \frac{\text{ton}}{\text{tahun}} \right) \times \text{HBA} \left( \frac{\text{Rupiah}}{\text{ton}} \right)$$

## 2.8 Software Cycle-Tempo

Tugas akhir ini dilakukan dengan metode penelitian simulasi numerik mengguna perangkat lunak *Cycle-Tempo*. *Cycle-Tempo* adalah perangkat lunak yang digunakan untuk pemodelan dan optimasi sistem konversi energi. Pada *software* ini pengguna bisa memasukan apparatus dan pipa yang digunakan. Penomoran pada apparatus dan pipa memerlukan nomor yang urut dalam mempersiapkan *input* data untuk semua skema proses dari pipa dan *apparatus* supaya mudah untuk mengidentifikasi urutan siklus.



Berikut adalah contoh dari simulasi menggunakan *cycle-tempo* dan contoh *input* data:



**Gambar 2.8** Simulasi menggunakan *cycle-tempo*

Apparatus 12 Turbine

Apparatus statistics

No.:

Name:

Additional input data

Input data

TUCODE	<input type="text" value="0"/>	-	PINCND	<input type="text"/>	bar
GDCCODE	<input type="text" value="1"/>	-	POUTDS	<input type="text"/>	bar
PIN	<input type="text" value="45.77"/>	bar	POUTRT	<input type="text"/>	bar
TIN	<input type="text"/>	°C	ETHAID	<input type="text"/>	-
TOUT	<input type="text" value="566"/>	°C			
DELT	<input type="text"/>	°C			
ETHAI	<input type="text"/>	-			
ETHAM	<input type="text"/>	-			
DIAIN	<input type="text"/>	m			
DIAOUT	<input type="text"/>	m			
SENG	<input type="text"/>	m			
DESMAS	<input type="text"/>	kg/s			

**Gambar 2.9** Parameter *Input* dari software *Cycle-Tempo*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metodologi Penelitian

Dalam melakukan penelitian terdapat beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Studi literatur.  
Studi literatur dilakukan untuk mencari serta mempelajari beberapa literatur yang terkait dengan topik permasalahan yang akan diteliti. Studi literatur diperoleh dari artikel ilmiah, jurnal, *text book*, serta hasil penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya.
2. Pengumpulan dan Pengolahan Data  
Data yang berkaitan dengan topik permasalahan dikumpulkan dan diolah untuk sebagai dasar untuk mengolah data untuk mendapatkan proses desain dan analisa dari topik permasalahan.
3. Pemodelan Skema PLTU  
Pemodelan skema PLTU kondisi *ultrasupercritical* dengan menggunakan *software Cycle-Tempo*. Tahapan ini diawali dengan pemodelan pada *software Cycle Tempo*
4. Simulasi Variasi pada Skema PLTU  
Setelah pemodelan dalam *Cycle-Tempo* tidak terdapat *error*, simulasi dilakukan dengan variasi. Variasi yang digunakan dalam simulasi ini adalah variasi LHV dan pembebanan di 50%,75%,100%,dan 110%.
5. Analisa dan Pengolahan Data Hasil Simulasi  
Setelah proses perhitungan dan simulasi selesai, dilakukan pengambilan data hasil simulasi. Data hasil simulasi akan diolah dalam bentuk grafik dan tabel untuk

dianalisis secara kuantitatif maupun kualitatif dan kedua parameter tersebut diperoleh hasil berupa karakteristik optimum dari pembangkit.

6. Analisa Ekonomi

Analisa studi kelayakan investasi pembangkit secara ekonomi.

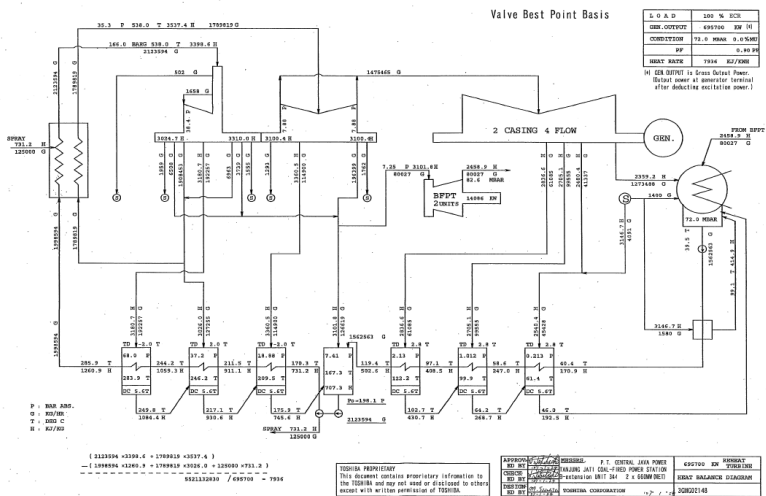
7. Penyusunan Laporan

Laporan ini tersusun atas pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, analisa dan pembahasan, kesimpulan dan saran.

### 3.2 Tahap Pengumpulan dan Pengolahan Data Data Pembangkit

Pada penelitian ini digunakan data dari PLTU X 2x660MW

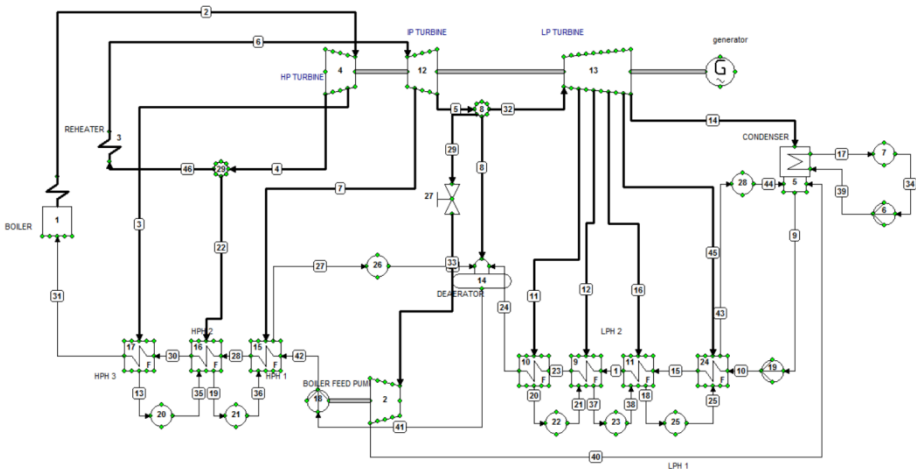
Berikut *Heat Balance* pada PLTU X 2x660MW



Gambar 3.1 *Heat Balance* dari sistem PLTU

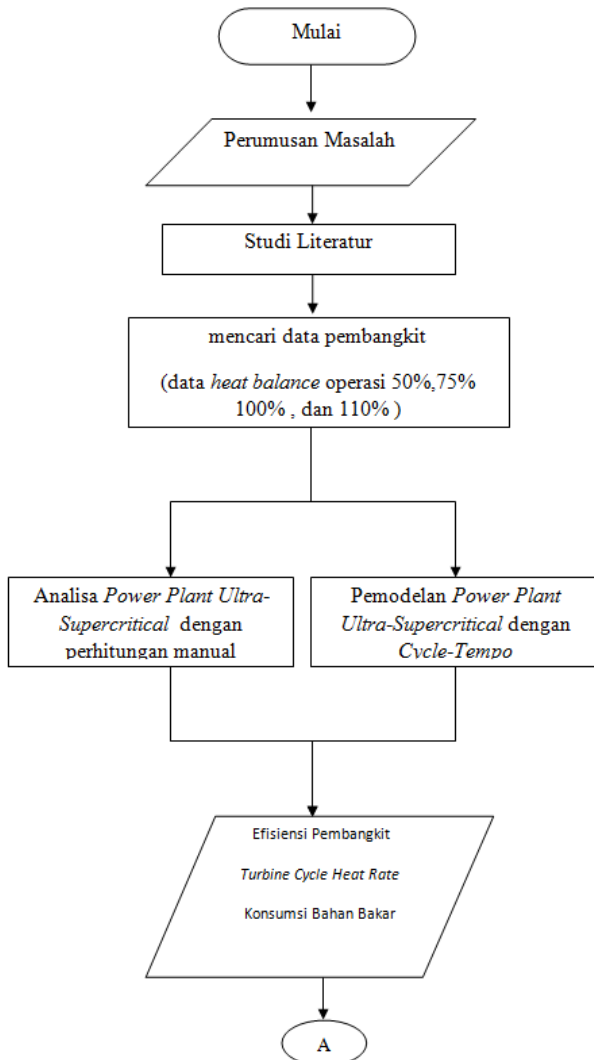
### 3.3 Tahap Pemodelan Pembangkit pada *Cycle-Tempo* pada teknologi *subcritical*.

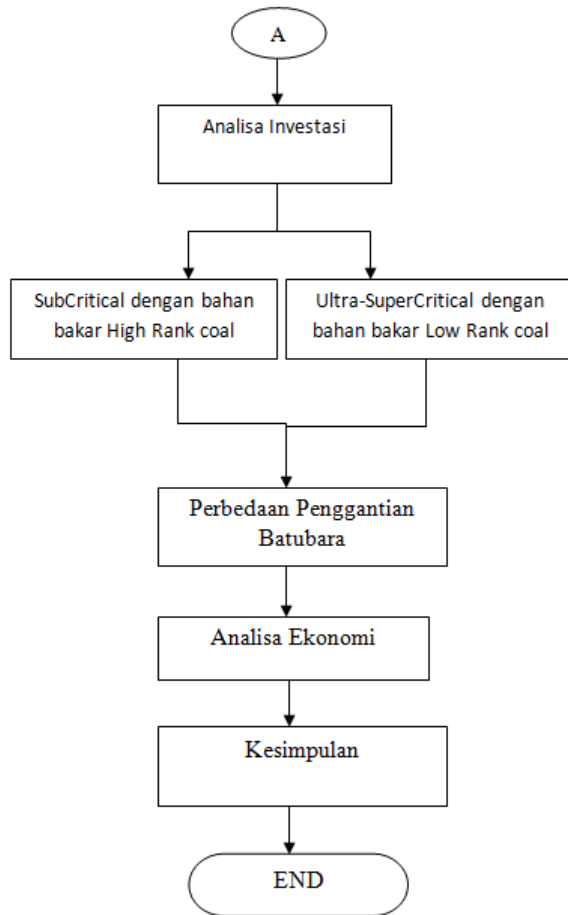
Tahap berikutnya yaitu pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak *Cycle-Tempo* berdasarkan PLTU yang dianalisa. Berikut ini adalah pemodelan dari *software Cycle-Tempo*:



**Gambar 3.2** Pemodelan dari sistem PLTU *subcritical*

### 3.4 Flowchart Penelitian





**Gambar 3.3** *Flowchart* Penelitian



## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

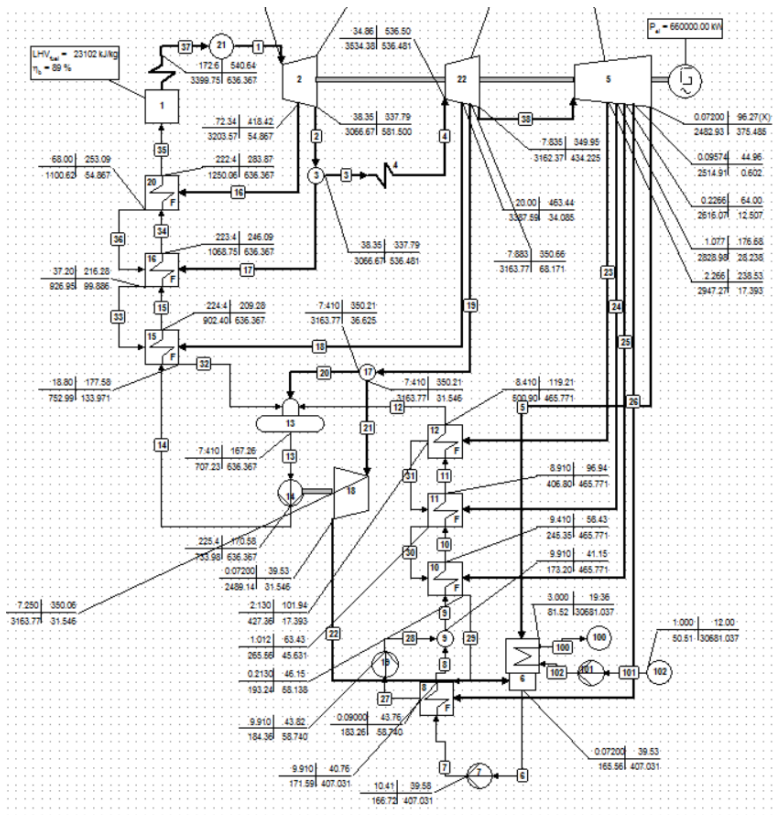
#### 4.1 Data dan Model Pembangkit Listrik Tenaga Uap 660 MW

##### 4.1.1 Data dan Model Pembangkit Listrik Tenaga Uap 660 MW dengan *Subcritical boiler*

Analisa yang akan digunakan dalam Tugas Akhir ini menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap 660 MW sebagai model pembangkit yang menjadi acuan. Data operasi pembangkit Listrik Tenaga Uap 660 MW tersebut adalah sebagai berikut:

Nilai Pembebanan	: 660 MW
Nilai Kalor Bawah	: 5500 LHV
Tipe Batubara	: <i>Medium Rank</i> (grade: 5100-6100kCal/kg)
<i>Boiler Eff</i>	: 89,21 %

Berikut adalah pemodelan PLTU X dengan *heat balance* yang didapatkan dengan hasil *cycle-tempo* :



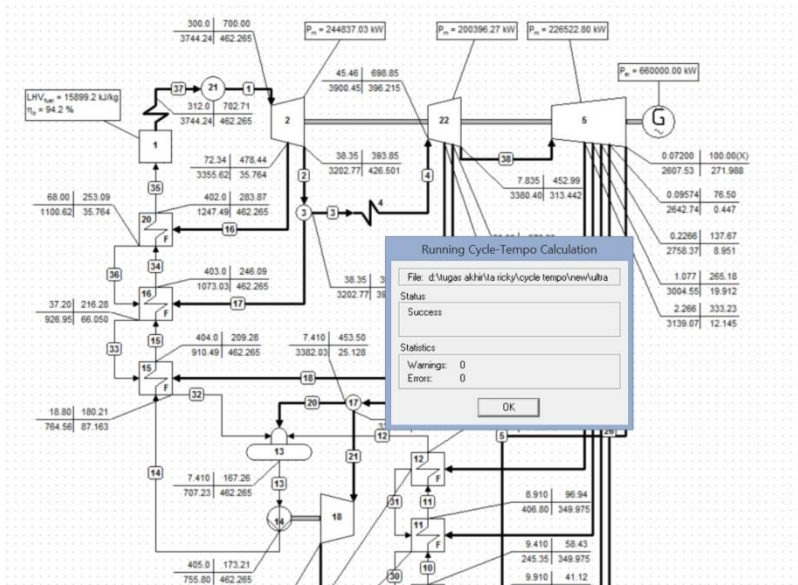
**Gambar 4.1** Pemodelan *Cycle-tempo* berdasarkan PLTU *existing* dengan LHV 5500kCal/kg

Tabel 4.1 Data *Heat Balance* pada kondisi *existing*.

Komponen	m (kg/s)	T <sub>in</sub> (°C)	T <sub>out</sub> (°C)	P <sub>in</sub> (bar)	P <sub>out</sub> (bar)	h <sub>in</sub> (kJ/kg)	h <sub>out</sub> (kJ/kg)	Q (kW)	W (kW)
Boiler	636,406	283,56	540,64	172,6	172,6	1250,06	3399,75	1537,165,75	
Reheat	538,401	337,79	536,5	38,35	38,35	3066,67	3534,38	2819,48,75	
High Pressure Turbine	636,367	538	337,79	166	38,35	3399,75	3066,67		2044,63,25
Ekstraksi 1	54,867	418,42	253,09	72,34	68	3202,57	1100,62		
Ekstraksi 2	45,552	366,64	216,28	38,35	37,2	3066,67	926,95		
Intermediate Pressure Turbine	536,514	536,5	349,95	34,86	7,835	3538,34	3162,37		1918,17,59
Ekstraksi 3	34,087	463,44	216,28	20	18,8	3387,59	752,99		
Ekstraksi 4	68,175	350,66	177,58	7,883	7,41	3136,77	707,23		
Low Pressure Turbine	434,252	349,73	96,27	7,6	0,072	3162,37	2482,93		2454,75,25
Ekstraksi 5	17,394	238,53	101,94	2,266	2,13	2947,27	427,36		
Ekstraksi 6	28,239	176,68	63,43	1,077	1,012	2828,98	265,56		
Ekstraksi 7	12,779	64	45,76	0,2266	0,213	2616,07	191,63		
Ekstraksi 8	0,764	44,96	43,76	0,0957	0,09	2514,91	183,26		
Kondensor	375,075	39,53	39,53	0,072	0,072	2482,93	165,56		
Boiler Feed Pump	636,406	167,26	170,58	7,41	225,4	707,23	733,98		1702,6,5
Condensat Feed Pump	465,8	39,53	39,58	0,072	10,41	465,8	465,8		573,6

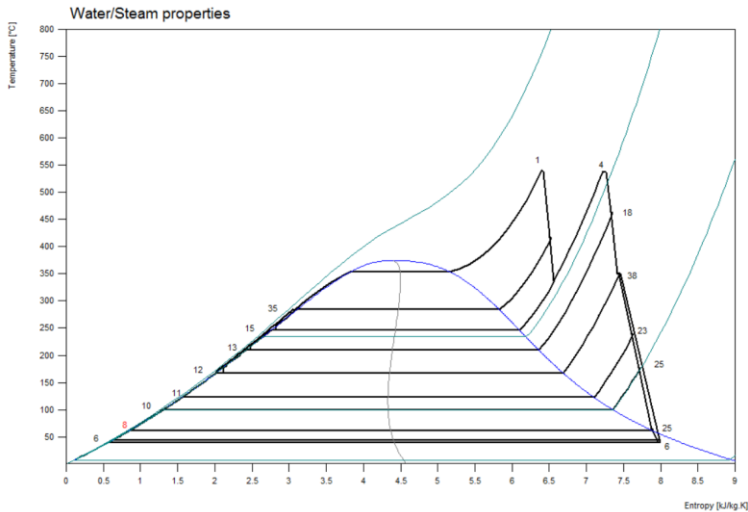
Pemodelan dengan menggunakan *software cycle-tempo* dilakukan untuk menganalisa performa suatu pembangkit. Pemodelan dengan *software cycle-tempo* akan konvergen apabila

tidak *error* saat di-*running*. Berikut adalah hasil pemodelan PLTU X 660MW telah konvergen



**Gambar 4.2** Hasil simulasi dari *cycle-tempo*

Dari simulasi yang telah konvergen maka didapatkan diagram T-s seperti berikut



**Gambar 4.3** Diagram T-s *Subcritical* dari *Cycle-Tempo*

#### 4.1.2 Data dan Model Pembangkit Listrik Tenaga Uap 660 MW dengan *UltraSupercritical boiler*

Analisa yang akan digunakan dalam Tugas Akhir ini menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap 660MW sebagai model pembangkit yang menjadi acuan. Dan pembangkit yang akan dibuat adalah menggunakan teknologi *UltraSuperCritical* dengan variasi pada tingkat batubara. Data operasi pembangkit Listrik Tenaga Uap 660 MW tersebut adalah sebagai berikut:

Teknologi	: <i>UltraSupercritical</i> (USC)
Nilai Pembebanan	: 660 MW
Tipe Batubara	: <i>Low Rank</i> (<5100 kCal/kg)
<i>Boiler Eff</i> :	: 94,21 % (referensi : <i>Boiler BWE</i> )

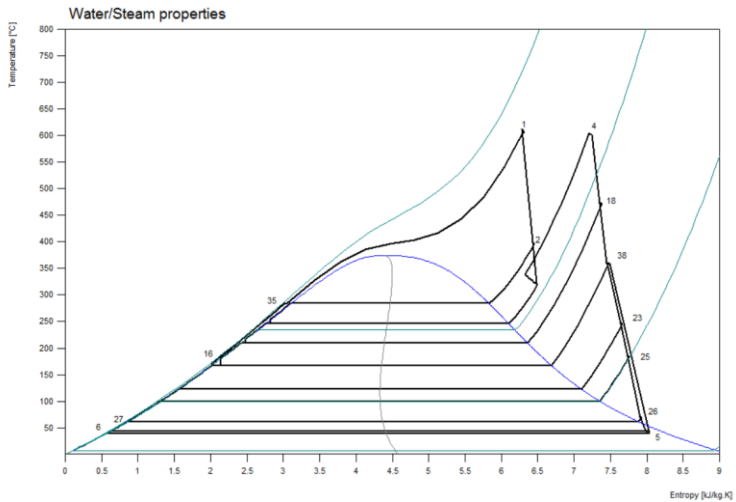
*Main Steam Temperature*: 605°C

*Main Steam Pressure* : 274 bar

*Reheat Steam Temperature* : 603 °C

*Reheat Steam Pressure* : 56.8 bar

Berikut adalah diagram T-s hasil simulasi pembangkit *UltraSuperCritical* 660MW dengan bahan bakar *Low Rank Coal* dengan menggunakan *Cycle-Tempo*



**Gambar 4.4 Diagram T-s *UltraSuperCritical* (USC) dari *Cycle-Tempo***

#### **4.2 Analisa termodinamika dan performa pembangkit 660MW**

Setelah properti dari tiap komponen diketahui maka energi dari tiap proses pada PLTU 660 MW dapat diketahui, untuk melakukan analisa termodinamika yang pertama menghitung nilai  $W_{\text{turbin}}$ . Untuk menghitung  $W_{\text{turbin}}$  dengan cara menghitung nilai fraksi massa ekstraksi  $y^1, y^2, y^3, y^4, y^5, y^6, y^7, \text{ dan } y^8$ .

Keluaran pada *High Pressure (HP) Turbine* ada 2 , yaitu  $y'^1$ ,  $y'^2$  sebagai berikut :

$y'^1$  dan  $y'^2$  pada *high pressure turbine* didapat dengan persamaan berikut

$$y'^1 h_{(16-36)} = h_{35} - h_{34}$$

$$y'^1 = \frac{h_{35} - h_{34}}{h_{16} - h_{36}}$$

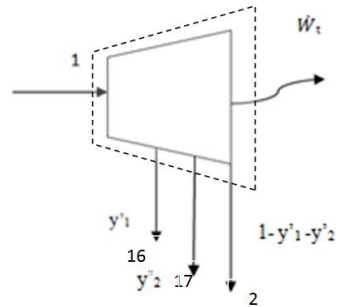
$$y'^1 = \frac{1250.06 - 1068.75}{3023.57 - 1100.62}$$

$$y'^1 = 0.086$$

$$y'^2 = \frac{h_{34} - h_{36}y'^1 - h_{15}}{h_{17} - h_{33}}$$

$$y'^2 = \frac{1068.75 - 902.4 - 94.5}{3066.67 - 926.95}$$

$$y'^2 = 0.033$$



$y'^3$  dan  $y'^4$  pada *intermediate pressure turbine* didapat dengan persamaan berikut

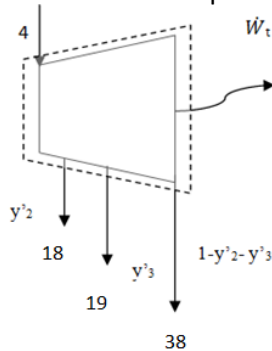
$$y'^3 = \frac{(h_{15} - h_{32}y'^2 - h_{14})}{h_{18} - h_{32}}$$

$$y'^3 = \frac{902.4 - 30.58 - 733.98}{3387.59 - 752.99}$$

$$y'^3 = 0.052$$

$$y'^4 = \frac{(h_{13} - h_{12} - h_{32}y'^3)}{h_{20}} y'^4$$

$$= \frac{(707.23 - 500.9 - 0.052 (752.99))}{3163.77}$$



$$y'^4 = 0.051$$

$y'^5, y'^6, y'^7$ , dan  $y'^8$  didapat dari *low pressure turbine*

$$y'^5 = \frac{(h_{12} - h_{11})}{h_{23} - 31}$$

$$y'^5 = \frac{500.9 - 406.8}{2947.27 - 427.36}$$

$$y'^5 = 0.037$$

$$y'^6 = \frac{(h_{11} - h_{10} - h_{31}y'^5)}{(h_{24} - h_{30})}$$

$$y'^6 = \frac{406.8 - 245.35 - 15.81}{2828.98 - 265.56}$$

$$y'^6 = 0.056$$

$$y'^7 = \frac{(h_{10} - h_9 - h_{30}y'^6)}{(h_{25} - h_{29})}$$

$$y'^7 = \frac{245.35 - 173.2 - 14.87}{2616.07 - 193.24}$$

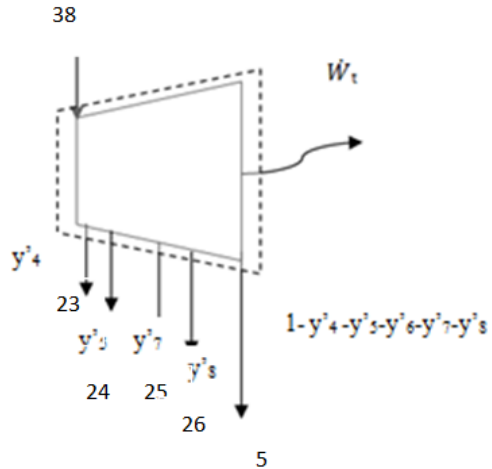
$$y'^7 = 0.023$$

$$y'^8 = \frac{(h_8 - h_7 - h_{29}y'^7)}{(h_{26} - h_{27})}$$

$$y'^8 = \frac{171.59 - 166.72 - 4.44}{2514.91 - 193.26}$$

$$y'^8 = 0.00018$$

- Turbine**





$$\dot{W}_{tHP} = \dot{m}[h_1 - h_2(1 - y'^1 - y'^2) - y'^1 h_{16} - y'^2 h_{17}]$$

$$\begin{aligned}\dot{W}_{tHP} &= 636.67 \text{ kg/s} [3399.75 \\ &\quad - 3066.67(1 - 0.086 \\ &\quad - 0.033) - 0.086(3203.57) \\ &\quad - 0.086(3066.67) ]\end{aligned}$$

$$\dot{W}_{tHP} = 204574.81 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{W}_{tIP} = \dot{m}[h_4 - (1 - y'^3 - y'^4)h_{38} - y'^3 h_{18} - y'^4 h_{20}]$$

$$\begin{aligned}\dot{W}_{tIP} &= 536.481 \text{ kg/s} [3534.38 \\ &\quad - (1 - 0.052 \\ &\quad - 0.051)434.225 - 0.052 \cdot 3387.59 - 0.051 \cdot 3163.77 ] \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\dot{W}_{tIP} = 194002.26 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{W}_{tLP}$$

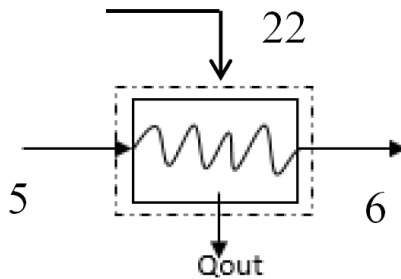
$$\begin{aligned}&= 434.22 [3162.37 \\ &\quad - (1 - 0.037 - 0.056 - 0.023 \\ &\quad - 0.00018)2482.93 - 0.037 \cdot 2947.27 - 0.056 \cdot 2828.98 \\ &\quad - 0.023 \cdot 2616.07 - 0.00018 \cdot 2514.91]\end{aligned}$$

$$\dot{W}_{tLP} = 277834.524 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{W}_{t,total} = \dot{W}_{tLP} + \dot{W}_{tIP} + \dot{W}_{tHP}$$

$$\dot{W}_{t,total} = (277834.524 + 194002.26 + 204574.81) \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{t,total} = 676411.6 \text{ kW}$$

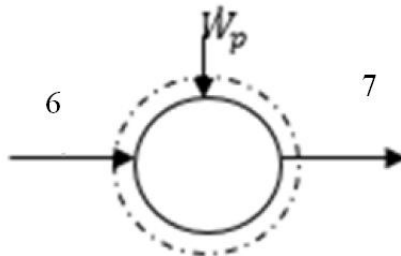


- **Kondensor**

$$\dot{m}_{22}(h_{22}) + \dot{m}_5(h_5) = \dot{Q}_{condenser} + \dot{m}_6(h_6)$$

$$31.456(2489.14) + 375.485(2482.93) = \dot{Q}_{condenser} + 407.031(165.56)$$

$$\dot{Q}_{condenser} = 14.98 \text{ kJ/s}$$



- **Condensate Pump**

$$W_p = \frac{\vartheta(P_7 - P_6)}{(\eta_{TURBIN})}$$

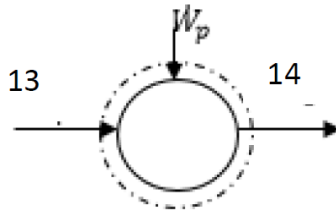
$$W_p = \frac{0.0011 \text{ m}^3/\text{kg}(22.42 \text{ bar} - 22.34 \text{ bar})}{(0.9)} \times 100 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{bar})$$

$$W_p = 1.24846 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{p,c} = \frac{1.24846 \text{ m}^2}{\text{s}^2} \times 407.031 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{W}_{p,c} = \frac{508.48 \text{ kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{W}_{p,c} = 508.48 \text{ kW}$$



- **Pompa BFW**

$$W_p = \frac{\vartheta(P_{14} - P_{13})}{(\eta_{TURBIN})}$$

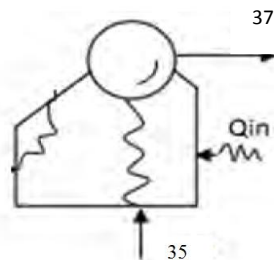
$$W_p = \frac{0.0011(225.4 \text{ bar} - 7.410 \text{ bar}) \times 100 \text{ kN/m}^2 \cdot \text{bar}}{(0.9)}$$

$$W_p = 26.64 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{p,BFW} = \dot{m}[26.64] \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{p,BFW} = 636.367 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times [296.64] \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{p,BFW} = 16954.86 \text{ kW}$$



- **Boiler**

$$\dot{Q}_{boiler} = \frac{\dot{m}[(h_{37} - h_{35})]}{\eta_{boiler}}$$

$$\dot{Q}_{boiler} = \frac{636.367 \text{ kg} [(3399.75 - 1250.06) \text{ kJ/kg}]}{0.89 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_{boiler} = 1535639.373 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{Q}_{reheat} = \frac{\dot{m}[(h_4 - h_3)]}{\eta_{boiler}}$$

$$\dot{Q}_{reheat} = \frac{536.481 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times [(3534.38 - 3066.67)]}{0.89}$$

$$\dot{Q}_{reheat} = 281929.80 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{boiler} + \dot{Q}_{reheat}$$

$$\dot{Q}_{total} = (1535639.373 + 281929.80) \text{ kJ/s}$$

$$\dot{Q}_{total} = 1817569.18 \text{ kJ/s}$$

- Efisiensi Siklus

$$\eta = \frac{\dot{W}_{netto}}{\dot{Q}_{TOTAL}}$$

$$\dot{W}_{netto} = \dot{W}_{tHP} + \dot{W}_{tIP} + \dot{W}_{tLP} + \dot{W}_{p,c} + \dot{W}_{p,bfw}$$

$$\dot{W}_{netto} = 277834.524 + 194002.26 + 204574.81 + 508.48 + 16954.86$$

$$\dot{W}_{netto} = 693874.934 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{W}_{netto} = 693874.934 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{693874.934 \text{ kJ/s}}{1817569.18 \text{ kJ/s}} \times 100\%$$

$$\eta = 38.17 \%$$

Berikut adalah tabel perbandingan antara perhitungan secara termodinamika

**Tabel 4.2 Perbandingan antara Perhitungan manual dengan *Cycle-Tempo***

<i>Apparratus</i>	Perhitungan		Satuan
	Termodinamika	<i>Cycle Tempo</i>	
$W_{\text{bfp}}$	16954.86	17025.45	kW
$Q_{\text{reheater}}$	281929.80	281931.43	kW
$Q_{\text{boiler}}$	1535639.373	1537071.4	kW
$W_{\text{condensat pump}}$	508.48	535.27	kW
<i>Efficiencies</i>	38.17%	35.7%	

### 4.3 Contoh Perhitungan Hasil perolehan laju aliran massa batubara

#### Pada Pembangkit USC

Pembangkit *UltraSuperCritical* (USC) dengan beban 660 MW menggunakan *Low Rank Coal*

Kondisi beban 50% dengan LHV batubara 3800kCal/kg dan efisiensi *boiler* 94,2%

Dari simulasi *Cycle-Tempo* didapat:

Data yang diketahui pada *boiler* :

$$m_{\text{boiler}} = 264.802 \text{ kg/s}$$

$$h_{\text{in}} = 1247.66 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{out}} = 3486.02 \text{ kJ/kg}$$

Data yang diketahui pada *reheater* :

$$m_{\text{reheat}} = 223.40 \text{ kg/s}$$

$$h_{in} = 3022.38 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{out} = 3668.37 \text{ kJ/kg}$$

Mencari nilai Q pada *Boiler* :

$$Q_{boiler} = m_{boiler} (h_{out} - h_{in}) + m_{reheat} (h_{out} - h_{in})$$

$$\begin{aligned} Q_{boiler} &= 264.802 \text{ kg/s} (3486.02 - 1247.66 \text{ kJ/kg}) + 223.40 \text{ kg/s} \\ & (3668.37 - 3022.38) \text{ kJ/kg} \\ &= 737197.8 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

Mencari  $m_{batubara}$

$$\begin{aligned} m_{batubara} &= Q_{boiler} / (\eta_{boiler} \times \text{LHV}) \\ &= 737197.8 \text{ kJ/s} / (0.942 \times 15899.2 \text{ kJ/kg}) \\ &= 49.22 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

### **Pada Pembangkit *Subcritical***

Pembangkit *Subcritical* dengan beban 660 MW menggunakan *Medium Rank Coal*.

Kondisi beban 50% dengan LHV batubara 5500kCal/kg dan efisiensi *boiler* 89%

Dari simulasi *Cycle-Tempo* didapat:

Data yang diketahui pada *boiler* :

$$m_{boiler} = 316.462 \text{ kg/s}$$

$$h_{in} = 1248.8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{out} = 3469.49 \text{ kJ/kg}$$

Data yang diketahui pada *reheater* :

$$m_{\text{reheat}} = 268.92 \text{ kg/s}$$

$$h_{\text{in}} = 3120.49 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{out}} = 3534.38 \text{ kJ/kg}$$

Mencari nilai Q pada *Boiler* :

$$\begin{aligned} Q_{\text{boiler}} &= m_{\text{boiler}} (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) + m_{\text{reheat}} (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \\ &= 316.462 \text{ kg/s} (3469.49 - 1248.8) \text{ kJ/kg} + 268.92 \text{ kg/s} \\ &\quad (3534.38 - 3120.49) \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$Q_{\text{boiler}} = 814296 \text{ kJ/s}$$

Mencari  $m_{\text{batubara}}$

$$m_{\text{batubara}} = Q_{\text{boiler}} / (\eta_{\text{boiler}} \times \text{LHV})$$

$$= \frac{814296 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{(0.942 \times 15899.2)}$$

$$= 39.6 \text{ kg/s}$$

### **Hasil Perbandingan $m_{\text{batubara}}$ vs beban**

Berikut ini adalah hasil perhitungan laju aliran massa pada setiap variasi pembebanan pada pembangkit *UltraSuperCritical* (USC)

**Tabel 4.3 Hasil Perhitungan konsumsi batubara pada setiap pembebanan.**

Bahan Bakar	Tipe PLTU	Pembebanan			
		50%	75%	100%	110%
LHV 3800 kCal/kg	SubCritical	69,94	104,6	149,38	155,53
	USC	49,22	73,6	98,15	108,05
LHV 4000 kCal/kg	SubCritical	67,91	101,55	135,42	149,08
	USC	47,78	71,46	95,29	104,9
LHV 4200 kCal/kg	SubCritical	63,28	94,63	126,19	138,92
	USC	44,53	66,59	88,8	97,7
LHV 5500 kCal/kg	SubCritical	39,6	59,22	78,97	86,94

#### 4.4. Contoh Perhitungan mencari nilai *Nett Plan Heat Rate* (NPHR)

Mencari nilai NPHR pada pembangkit *UltraSuperCritical* dalam kondisi pembebanan 50%, diketahui data sebagai berikut :

$$m_{batubara} = 49.22 \text{ kg/s}$$

$$\text{LHV} = 3800 \text{ kCal/kg} = 15899.2 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Nett Generating Output} = 50\% \times 660 \text{ MW}$$

$$= 330 \text{ MW} = 330000 \text{ kW}$$

$$\text{Net Plant Heat Rate : NPHR} = \frac{m_{fuel} \times \text{LHV} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{\text{Nett Generating Output}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}}$$

$$\text{NPHR} = \frac{49.22 \times 15899.2}{330000 \text{ kW}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}}$$

$$= 8537.32 \text{ kJ/kWh}$$



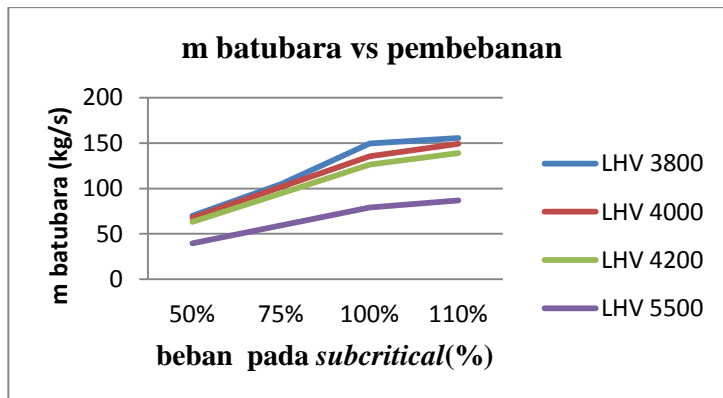
Berikut adalah nilai NPHR dari setiap variasi pembangkit

**Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Nilai NPHR pada setiap pembebanan**

Bahan Bakar	Pembebanan			
	50%	75%	100%	110%
<i>subcritical</i> dengan <i>Medium Rank</i>	9981,1 56	9950, 542	9951, 699	9959, 446
<i>UltraSuperCritical</i> dengan <i>Low Rank</i>	8537,3 2	8511, 12	8512, 12	8518, 75
<i>subcritical</i> dengan <i>Low Rank</i>	12132, 29	12095, ,06	12096, ,46	12105, ,88

#### 4.5 Analisa PLTU X setelah Dilakukan Pergantian Bahan Bakar dan Teknologi dengan variasi Pembebanan

##### 4.5.1 Analisa konsumsi batubara yang divariasikan versus Tingkat Pembebanan pada Pembangkit Subcritical

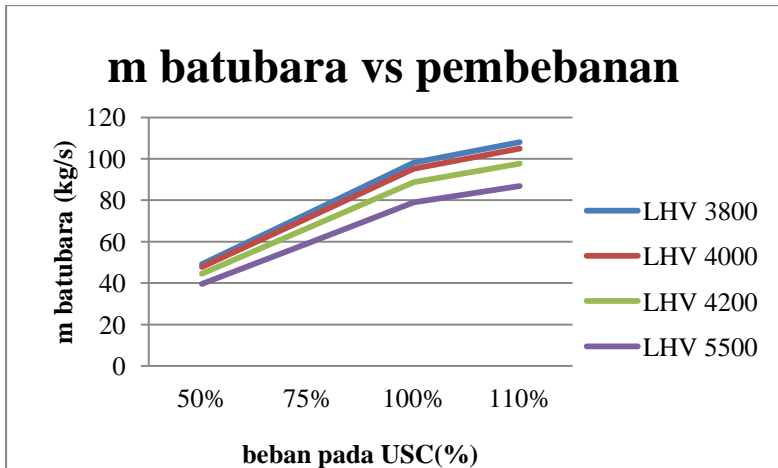


**Gambar 4.5 Konsumsi batubara versus tingkat pembebanan dengan variasi nilai LHV pada boiler *subcritical***

Grafik diatas menunjukkan hasil konsumsi batubara yang digunakan oleh pembangkit dengan melakukan variasi beban yang diterima oleh turbin uap. Grafik tersebut menunjukkan keempat trenline, yaitu batubara dengan nilai LHV 3800kCal/kg, 4000 kCal/kg dan 4200 kCal/kg, 5500kCal/kg. Pada keempat trenline tersebut memiliki trenline yang sama , yaitu mengalami kenaikan mulai dari keadaan tiap beban 50%, 75%, 100%, maupun 110%, dimana trenline mengalami kenaikan dengan meningkatnya beban yang diberikan pada turbin.

Saat pembebanan pada turbin berada pada kondisi 50%, batubara dengan LHV 3800 kCal/kg membutuhkan batubara sebesar 69,94kg/s, batubara dengan LHV 4000 kCal/kg sebesar 67.91kg/s yang digunakan, dan batubara dengan LHV 4200kCal/kg sebesar 63.28kg/s dan pada LHV 5500kCal/kg sebesar 39.6kg/s. Pada pembebanan 75% LHV 3800 kCal/kg membutuhkan batubara sebesar 104.6kg/s, LHV 4000 kCal/kg sebesar 101.55kg/s dan LHV 4200 kCal/kg sebesar 94.63kg/s dan LHV 5500kCal/kg sebesar 59.22kg/s. Pada pembebanan 100% LHV 3800 kCal/kg menggunakan batubara sebesar 149.38kg/s, LHV 4000 sebesar 135.42kg/s dan LHV 4200 kCal/kg 126.19kg/s dan LHV 5500kCal/kg sebesar 78.97kg/s. Pada pembebanan 110% LHV 3800kCal/kg menggunakan 155.53kg/s, LHV 4000kCal/kg 149.08kg/s dan LHV 4200 138.92kg/s LHV 5500kCal/kg sebesar 86.94kg/s. LHV 5500kCal/kg adalah laju konsumsi yang paling rendah di setiap variasi pembebanan. Kenaikan trenline pada grafik diatas sesuai dengan teori dimana dengan menggunakan batubara LHV yang lebih tinggi maka laju konsumsi batubara yang digunakan semakin sedikit.

#### **4.5.2 Analisa konsumsi batubara yang divariasikan versus Tingkat Pembebanan pada Pembangkit UltraSuperCritical (USC)**



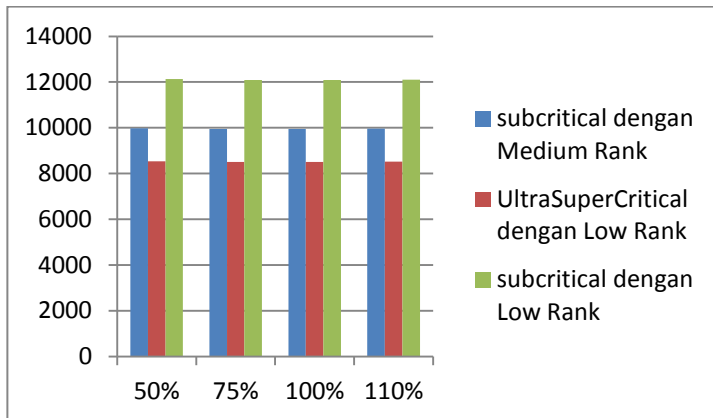
**Gambar 4.6 Konsumsi batubara versus tingkat pembebanan dengan variasi nilai LHV pada pembangkit *UltraSuperCritical* (USC)**

Grafik diatas menunjukkan hasil konsumsi batubara yang digunakan oleh pembangkit dengan melakukan variasi beban yang diterima oleh turbin uap. Grafik tersebut menunjukkan empat trenline, yaitu batubara dengan nilai LHV 3800kCal/kg, 4000kCal/kg dan 4200kCal/kg dan LHV 5500kCal/kg sebagai pembandingan terhadap tren pada USC. Pada keempat trenline tersebut memiliki trenline yang sama, yaitu mengalami kenaikan mulai dari tingkat pembebanan 50% , 75%, 100%, maupun 110%, dimana trenline mengalami kenaikan dengan meningkatnya beban yang diberikan pada turbin.

Saat pembebanan pada turbin berada pada kondisi 50% batubara dengan LHV 3800kCal/kg didapatkan nilai laju konsumsi sebesar 49.22kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 47.78kg/s, dan LHV 4200kCal/kg sebesar 44.53kg/s. Pada pembebanan 75% LHV 3800kCal/kg sebesar 73.36kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 71.46kg/s dan LHV 4200kCal/kg sebesar

66.59kg/s. Pada pembebanan 100% LHV 3800kCal/kg sebesar 98.15kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 95.29kg/s dan LHV 4200kCal/kg sebesar 88.8kg/s. Pada pembebanan 110% LHV 3800kCal/kg laju konsumsi batubara didapat sebesar 108.05kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 104.09kg/s dan LHV 4200kCal/kg sebesar 97.7kg/s. Terlihat pada nilai laju konsumsi *UltraSuperCritical* lebih besar dari *subcritical* pada setiap tingkat beban dikarenakan efisiensi pada *boiler UltraSuperCritical* lebih besar dari *boiler Subcritical* pada existing yaitu 89% dan *subcritical* dengan nilai efisiensi *boiler* 73%. Kenaikan ketiga trenline pada grafik diatas sesuai dengan teori dimana dengan menggunakan batubara LHV yang lebih tinggi maka konsumsi batubara yang digunakan semakin sedikit.

#### 4.5.3 Analisa NPHR versus Tingkat Pembebanan pada variasi Pembangkit



**Gambar 4.7** Perbandingan antara teknologi *power plant* serta tingkat batubara terhadap tingkat pembebanan

Grafik diatas menunjukkan nilai *Nett Plant Heat Rate* jenis pembangkit dengan variasi pembebanan dimana grafik menunjukkan trenline yang sama. *Subcritical powerplant* dengan

batubara *Low Rank Coal* (LRC) menunjukkan nilai NPHR tertinggi dikarenakan nilai efisiensi *boiler* yang rendah yaitu 73%.

Pada kondisi setiap pembebanan *subcritical* dengan *Low Rank Coal* dimana terdapat penurunan tren ketika teknologi diganti menjadi *UltraSuperCritical* dimana *boiler* yang digunakan memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan *Subcritical boiler*, dan mengalami kenaikan ketika mengganti dengan *Subcritical*. Hal ini sudah sesuai teori dimana nilai NPHR akan naik jika efisiensi *boiler* turun, dan akan mengalami penurunan NPHR saat efisiensi *boiler* naik ketika teknologi *subcritical* diganti menjadi *UltraSuperCritical* (USC).

## 4.6 Analisa secara Ekonomi

### 4.6.1 Analisa Biaya untuk pembuatan *UltraSuperCritical* (USC)

Berikut adalah analisa biaya yang ditinjau dari segi pembuatan :

**Tabel 4.5 Biaya Investasi untuk pembuatan pembangkit *UltraSuperCritical* (USC )**

Peralatan	Biaya (US\$ million)
<i>Boiler &amp; flue gas desulfurization</i>	483
<i>Steam turbine &amp; generator</i>	376
<i>Other equipment and civil engineering and construction work</i>	457
<i>Port system</i>	39
<i>Contingency (10%)</i>	135,5
Total (US\$million)	1490,5
Total (IndonesiaRp)	Rp 20.867.000.000.000,00

Tabel diatas adalah data yang diambil dari perencanaan pembangkit *UltraSuperCritical* (USC) di Vietnam.

Perkiraan biaya pada USC *powerplant* kali ini adalah Rp.20.867.000.000.000,00, dimana sudah termasuk biaya tak terduga *contingency* adalah sekitar 10 persen dari biaya keseluruhan peralatan yang digunakan.

#### 4.6.2 Analisa Pergantian Bahan bakar Batubara

Pada analisa pergantian bahan bakar batubara dari *Medium Rank Coal* menjadi *Low Rank coal* yaitu dengan nilai LHV 5500 kcal/kg dengan nilai LHV 3800kcal/kg adalah sebagai berikut:

PLTU *Subcritical* dengan nilai LHV=5500 kcal/kg

Kebutuhan batubara =78.97kg/s = 2490397.92 ton/tahun

Mencari harga kebutuhan batubara dengan menghitung HPB :

$$2490397.92\text{ton/ tahun} \times \$70,68 = \text{Rp. } 2.464.298.550.000,00$$

PLTU *UltraSuperCritical* dengan nilai LHV= 3800 kcal/kg

Kebutuhan batubara = 98.15 kg/s =3095258.4 ton/tahun

$$3095258.4 \text{ ton/ tahun} \times \$34.4 = \text{Rp. } 1.490.676.445.000,00$$

Jadi keuntungan yang didapat pertahun dengan mengganti teknologi dan juga batubara dengan LHV yang lebih rendah dari 5500 kcal/kg menjadi 3800 kcal/kg, maka yang didapat yaitu:

$$\text{Rp. } 2.464.298.550.000,00 - \text{Rp. } 1.490.676.445.000,00 = \text{Rp.}973.622.104.000,00$$

Keuntungan yang didapat adalah Rp. 973.622.104.000.00per tahun jika mengganti bahan bakar dari LHV 5500kCal/kg menjadi 3800kCal/kg.

Berdasarkan tabel 4.5 biaya total yang diperlukan adalah Rp 20.867.000.000.000,00 dengan asumsi pembangunan 4 tahun. Peminjaman investasi tahun pertama sampai dengan tahun ketiga sebesar Rp.5.000.000.000.000,00 dan peminjaman keempat sebesar 5.8670.000.000.000,00 , maka peminjaman tahun pertama pada saat PLTU beroperasi adalah:

$$\begin{aligned} F_1 &= P_1(1+i)^n \\ &= \text{Rp.}5.000.000.000.000,00(1+0.071)^4 \\ &= \text{Rp.}6.578.000.000.000,00 \end{aligned}$$

Pada peminjaman kedua (n=3) yang didapatkan adalah

$$\begin{aligned} F_2 &= P_2(1+i)^n \\ &= \text{Rp.}5.000.000.000.000,00(1+0.071)^3 \\ &= \text{Rp.}6.142.000.000.000,00 \end{aligned}$$

Pada peminjaman ketiga (n=2) yang didapatkan adalah

$$\begin{aligned} F_3 &= P_3(1+i)^n \\ &= \text{Rp.}5.000.000.000.000,00 (1+0.071)^2 \\ &= \text{Rp.} 5.732.000.000.000,00 \end{aligned}$$

Pada peminjaman keempat (n=1) yang didapatkan adalah

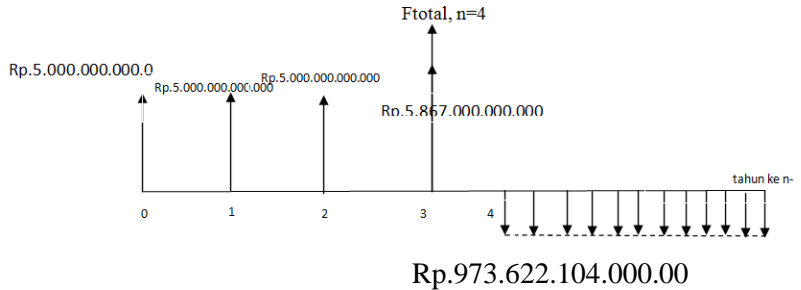
$$\begin{aligned} F_4 &= P_4(1+i)^n \\ &= \text{Rp.}5.867.000.000.000,00 (1+0.071)^1 \\ &= \text{Rp.} 6.288.000.000.000,00 \end{aligned}$$

maka total biaya investasi pada PLTU beroperasi adalah

$$F_{\text{total}} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$

$$= \text{Rp.}6.142.000.000.000,00 + \text{Rp.}6.578.000.000.000,00 + \text{Rp.}5.732.000.000.000,00 + \text{Rp.}6.288.000.000.000,00$$

$$F_{\text{total}} = \text{Rp.}25.040.000.000.000,00$$



**Gambar 4.8** *Cashflow diagram investasi pembangkit UltraSuperCritical(USC)*

$$PV = S \frac{1 - \left(\frac{1}{1+i}\right)^n}{i}$$

dimana : PV = *Present Value*, investasi (Rp.20.867.000.000.000,00)

S = *Saving* (Rp. 1.013.177.320.000.000)

i = Suku bunga, dalam hal ini *BI Rate* ( 7.1%)

n = jumlah tahun ke-n

*BI Rate* adalah suku bunga kebijakan yang mencerminkan sikap atau *stance* kebijakan moneter yang ditetapkan oleh Bank Indonesia (BI) dan diumumkan kepada publik. Untuk menghitung analisa ekonomi dibutuhkan suku bunga dari Bank Indonesia yang ditentukan pada rata-rata 3 (tiga) tahun terakhir, sebagai berikut :



Tanggal	BI Rate
21 Juli 2016	6.50 %
16 Juni 2016	6.50 %
19 Mei 2016	6.75 %
21 April 2016	6.75 %
17 Maret 2016	6.75 %
18 Februari 2016	7.00 %
14 Januari 2016	7.25 %
17 Desember 2015	7.50 %
17 Nopember 2015	7.50 %
15 Oktober 2015	7.50 %
17 September 2015	7.50 %
18 Agustus 2015	7.50 %
14 Juli 2015	7.50 %
18 Juni 2015	7.50 %
19 Mei 2015	7.50 %
14 April 2015	7.50 %
17 Maret 2015	7.50 %
17 Februari 2015	7.50 %
15 Januari 2015	7.75 %
11 Desember 2014	7.75 %
18 Nopember 2014	7.75 %
13 Nopember 2014	7.50 %
7 Oktober 2014	7.50 %
11 September 2014	7.50 %
14 Agustus 2014	7.50 %
10 Juli 2014	7.50 %
10 Juli 2014	7.50 %

**Gambar 4.9 BI Rate untuk mendapatkan suku bunga (i)**

Dalam 3 tahun terakhir dihitung mulai Juli 2016 maka suku bunga dalam 3 tahun terakhir adalah:

$$i_{\text{rata-rata}} = \frac{6,5\% + 7,5\% + 7,5\%}{3}$$

$$= 7,1\%$$

$$PV = S \frac{1 - \left(\frac{1}{1+i}\right)^n}{i}$$

$$\text{Rp. } 25.040.000.000.000,00$$

$$= 973.622.104.000,00 \frac{1 - \left(\frac{1}{1+0,071}\right)^n}{0,071}$$

$$1.826 = \left(\frac{1}{1+0,071}\right)^n$$

$$n = \frac{\log 1,82}{\log 0,93}$$

$$= -8,3 \text{ tahun}$$

$$\frac{7,1}{100} \times \text{Rp. } 25.040.000.000.000,00 = \text{Rp. } 1.775.000.0000.0000,00$$

Rp. 1.775.000.0000.0000,00 adalah bunga yang harus dibayarkan pertahun sedangkan pendapatan pertahun adalah Rp.973.622.104.000,00, maka tidak dapat menutupi bunga yang harus dibayarkan setiap tahunnya. Maka dapat disimpulkan pergantian ini adalah tidak *feasible* (tidak layak). Analisa diatas masih belum memperhitungkan :

1. Biaya perawatan
2. Depresiasi nilai
3. Nilai inflasi
4. *Down Time* (Biaya produksi listrik pada pembangunan USC)

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan pembahasan mengenai pergantian dari *subcritical* menjadi *UltraSuperCritical* (USC) dan pergantian bahan bakar pada PLTU X maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pada *boiler subcritical*, saat pembebanan pada turbin berada pada kondisi 50%, batubara dengan LHV 3800 kCal/kg membutuhkan batubara sebesar 69,94kg/s, batubara dengan LHV 4000 kCal/kg sebesar 67.91kg/s yang digunakan, dan batubara dengan LHV 4200kCal/kg sebesar 63.28kg/s dan pada LHV 5500kCal/kg sebesar 39.6kg/s. Pada pembebanan 75% LHV 3800 kCal/kg membutuhkan batubara sebesar 104.6kg/s, LHV 4000 kCal/kg sebesar 101.55kg/s dan LHV 4200 kCal/kg sebesar 94.63kg/s dan LHV 5500kCal/kg sebesar 59.22kg/s. Pada pembebanan 100% LHV 3800 kCal/kg menggunakan batubara sebesar 149.38kg/s, LHV 4000 sebesar 135.42kg/s dan LHV 4200 kCal/kg 126.19kg/s dan LHV 5500kCal/kg sebesar 78.97kg/s. Pada pembebanan 110% LHV 3800kCal/kg menggunakan 155.53kg/s, LHV 4000kCal/kg 149.08kg/s dan LHV 4200 138.92kg/s LHV 5500kCal/kg sebesar 86.94kg/s. Kenaikan trenline pada grafik diatas sesuai dengan teori dimana dengan menggunakan batubara LHV yang lebih tinggi maka laju konsumsi batubara yang digunakan semakin sedikit.

2. Pada *boiler UltraSupercritical*, saat pembebanan pada turbin berada pada kondisi 50% batubara dengan LHV 3800kCal/kg didapatkan nilai laju konsumsi sebesar 49.22kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 47.78kg/s, dan LHV 4200kCal/kg sebesar 44.53kg/s. Pada pembebanan 75% LHV 3800kCal/kg sebesar 73.36kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 71.46kg/s dan LHV 4200kCal/kg sebesar 66.59kg/s. Pada pembebanan 100% LHV 3800kCal/kg sebesar 98.15kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 95.29kg/s dan LHV 4200kCal/kg sebesar 88.8kg/s. Pada pembebanan 110% LHV 3800kCal/kg laju konsumsi batubara didapat sebesar 108.05kg/s, LHV 4000kCal/kg sebesar 104.09kg/s dan LHV 4200kCal/kg sebesar 97.7kg/s. Kenaikan ketiga trenline pada grafik diatas sesuai dengan teori dimana dengan menggunakan batubara LHV yang lebih tinggi maka konsumsi batubara yang digunakan semakin sedikit.
3. Dan pergantian teknologi dari *subcritical* menjadi *UltraSuperCritical* terdapat di setiap tingkat pembebanan *subcritical* dengan *Medium Rank Coal* dimana terdapat penurunan tren ketika teknologi diganti menjadi *UltraSuperCritical* dimana *boiler* yang digunakan memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan *Subcritical boiler*, dan mengalami kenaikan ketika mengganti dengan *Subcritical* dengan *Low Rank*. Hal ini sudah sesuai teori dimana nilai NPHR akan naik jika efisiensi *boiler* turun, dimana mengalami penurunan NPHR saat efisiensi *boiler* naik ketika teknologi *subcritical* diganti menjadi *UltraSuperCritical* (USC).
4. Menurut perhitungan ekonomi, pembangkit USC tidak *feasible* dikarenakan tidak mampu menutup bunga 7,1% dari Bank Indonesia, dan analisa ekonomi juga belum memperhitungkan biaya perawatan, depresiasi nilai, nilai inflasi, dan *down time*.

## 5.2 Saran

Beberapa saran yang bisa diberikan setelah pelaksanaan Tugas Akhir ini antara lain sebagai berikut :

1. Dalam perhitungan performa pembangkit dengan acuan pembangkit listrik tenaga uap 660 MW harus memiliki data-data peralatan pembangkit yang lebih lengkap agar mempermudah permodelan dan analisis data.
2. Info mengenai penggunaan *software cycle-tempo* perlu lebih banyak agar mempermudah menjalankan *software*.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Wrigth, James S. Albert, Paul. ”*Steam Turbine Thermal Evaluation and Assessment*”. New York : GE Power System Schenectady, 2000.
- ANSI/ASME PTC 6-2004 “*Steam Turbines*”.
- Elwakil, M.Mohamed. "*Power Plant Technology*". Singapore : The McGraw – Hill book company, 1984.
- Li, Yong & Wang Chao. "*Study on The Effect of Regenerative System on Power Type Relative Internal Efficiency of Nuclear Steam Turbine*". 2012 International Conference on Future Electrical Power an Energy Systems, Energy Procedia 17 (2012) 906-912, 2012.
- Moran MJ, Shapiro HN. "*Fundamentals of Engineering Thermodynamics*". John Wiley & Sons Inc, 2006.
- Rashidi, M. M., Aghagoli, A., dan Ali, M. *Thermodynamic Analysis of a Steam Power Plant with Double Reheat and Feed Water Heaters*, Hindawi Publishing Co. , 1996.
- Nielsen, Flemming S. & Danesi Paolo. “*Modern Boiler Design*”, India : BWE, 2012.
- Poulsen, Hans.H. "*Advantages of Ultra Super Critical Technology in Power Generation*" Gentofte : BWE, 2005.
- Nugraha, Juanda I.W. "**Pemanfaatan Low Rank Coal untuk sektor KetenagaanListrikan**" Indonesia : Seminar Nasional Batubara,2006.

- Susta. Miro R. "*SuperCritical and Ultra-SuperCritical Power Plants- SEA's Vision or Reality?*". Malaysia: Power Gen Asia, 2004.



## BIODATA PENULIS



Ricky Erdiansa, lahir di Jakarta pada tanggal 4 Desember 1991. Penulis adalah anak ketiga dari empat bersaudara dari pasangan Bapak M.Manurung dan Ibu E.Panjaitan. Pendidikan dasar ditempuh di SD SD Tunas Harapan dan lulus pada tahun 2003. Pendidikan menengah pertama ditempuh di SMP Negeri 19 Bekasi, lulus pada tahun 2006. Pendidikan menengah atas ditempuh di SMA Negeri 4 Bekasi, lulus pada tahun 2009. Selama menempuh kuliah di Teknik Mesin ITS, penulis aktif dalam Organisasi Society Exploration of Geophysicists ITS dan aktif dalam beberapa kegiatan kepanitiaan. Dalam bidang akademis penulis pernah aktif sebagai asisten Praktikum Perpindahan Panas dan Massa.

Untuk segala informasi dan saran yang ditujukan kepada penulis dapat melalui *e-mail* rickyerdiansa@yahoo.co.id.