

Analisis Eksergoekonomi pada Pemanfaatan Limbah Panas PLTP untuk Siklus Kalina KCS-11

by 03051281924075 Muhammad Reza Rizky Sinatria

Submission date: 23-Jan-2024 08:08AM (UTC+0700)

Submission ID: 2276324481

File name: Panas_PLTP_untuk_Siklus_Kalina_KCS-11_-_Reza_Rizky_Sinatria.docx (147.98K)

Word count: 7698

Character count: 50577

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik telah menjadi kebutuhan utama manusia, hampir segala kegiatan yang dilakukan oleh manusia membutuhkan yang namanya listrik. Kegiatan perkantoran, ekonomi, perindustrian serta kegiatan sehari-hari seperti belajar membutuhkan listrik. Listrik dihasilkan oleh pembangkit yang mengubah energi kinetik menjadi energi listrik, tentu untuk mengubah energi dari satu bentuk menjadi bentuk lain memerlukan yang namanya sumber energi. Sumber energi tersebut bisa didapatkan dari sumber energi yang terbarukan maupun energi tidak terbarukan.

Saat ini, hampir mayoritas sumber energi yang dipakai untuk membangkitkan energi listrik merupakan sumber energi yang tidak terbarukan seperti batu bara. penggunaan energi fosil sebagai sumber daya utama PLTU tentu masih banyak digunakan, penggunaan yang mudah serta efisien masih membuat energi fosil menjadi pilihan utama sebagai sumber daya pembangkit. Indonesia sendiri masih menggunakan energi fosil sebagai sumber daya PLTU, bahkan subtotal penggunaan energi fosil sebagai energi utama pembangkit listrik mencapai 87.4% atau 55,216 MW (Humas EBTKE, 2020).

Penggunaan pembangkit listrik yang masih memakai energi fosil ini menjadi perhatian pemerintah, dikarenakan ketersediaan akan sumber daya ini yang semakin lama menipis serta hasil pembakaran yang mencemari lingkungan. Oleh karena itu, pemerintahan indonesia saat ini sedang menggiatkan untuk beralih menggunakan sumber energi yang terbarukan seperti tenaga surya dan energi panas bumi.

Energi panas bumi adalah energi yang terkandung sebagai panas di interior bumi. hal ini menggambarkan struktur internal Bumi bersama dengan

mekanisme perpindahan panas di dalamnya mantel dan kerak. Itu juga menunjukkan lokasi ladang panas bumi di area tertentu di Bumi. Aliran panas bumi dan gradien panas bumi ditentukan, serta jenis panas bumi lapangan, lingkungan geologi energi panas bumi, dan metode eksplorasi untuk sumber daya panas bumi termasuk pengeboran dan penilaian sumber daya (Barbier, 2002).

Energi panas bumi pun dianggap sumber energi terbarukan yang disimpan sebagai panas di kedalaman bumi. Sumber energi ini berasal dari fitur struktural internal bumi. Salah satu batasan utama terhadap pemanfaatan energi panas bumi adalah aksesibilitas ke sumber daya termal ini. Karena sejumlah besar energi ini disimpan di bagian yang lebih dalam karena keterbatasan penggalian. Namun, di wilayah dunia yang dapat diakses di mana pengeboran dimungkinkan, bentuk energi ini dapat digunakan secara industri. Untuk memanfaatkan energi panas bumi, diperlukan pembawa perpindahan panas untuk mentransfer energi panas ini dari lapisan yang lebih dalam ke permukaan tanah (Ghazvini dkk., 2019).

Dalam pemanfaatan energi panas bumi ini, tentu akan ada limbah panas yang tersisa dari pembangkit. Limbah panas geothermal ini memiliki macam bentuk, yaitu berbentuk *brine water* dan *sludge*. Pada *brine water*, limbah panas ini memiliki suhu yang masih terbilang tinggi sebelum diinjeksikan kembali ke dalam bumi. Walaupun tidak setinggi saat uap panas masuk dari inti bumi menuju pembangkit, limbah panas ini tentu masih bisa kita manfaatkan untuk membangkitkan tenaga kembali, menggunakan siklus kalina KCS-11 (Pramuda, dkk, 2020).

¹ Teknologi pembangkit tenaga listrik dengan sumber panas bertemperatur rendah dapat menggunakan siklus Kalina. Siklus Kalina ditemukan oleh Dr. Alexdaner Kalina dengan memanfaatkan campuran amonia-air sebagai fluida kerja. Campuran ammonia-air digunakan sebagai fluida kerja karena memiliki titik didih yang rendah sehingga dengan temperatur sumber panas yang rendah, fluida kerja sudah dapat menguap. Campuran ammonia-air akan membentuk campuran non-azeotropik. Pada campuran azeotropik, fasa cair dan uap pada

kondisi setimbang memiliki komposisi dan temperatur yang sama sehingga sifatnya sama seperti fluida murni. Pada campuran non-azeotropik, temperatur dan komposisi dari campuran terus berubah selama proses pendidihan. Ketika campuran mulai mendidih, maka akan terbentuk uap dari komponen campuran yang mudah menguap (Wang dan Yu, 2016).

1 Siklus Kalina sederhana terdiri dari evaporator, separator, turbin, condenser, dan regenerator. Campuran amonia-air akan dididihkan di evaporator dengan memanfaatkan panas dari sumber air panas. Kemudian campuran tersebut masuk ke separator kemudian dipisahkan menjadi dua aliran yaitu, aliran dengan konsentrasi amonia dalam bentuk uap yang kemudian diekspansi di turbin dan aliran dengan konsentrasi amonia yang rendah dalam fasa cair yang kemudian dilalirkan ke recuperator. Kedua aliran tersebut kemudian menyatu di kondensor dimana campuran tersebut akan dikondensasikan dengan memanfaatkan sumber air dingin. Campuran yang sudah berada dalam fasa cair kemudian dipompa ke regenerator dan siklus akan berulang (Long dkk., 2019).

Demi menciptakan tujuan untuk memanfaatkan sumber daya alam yang terbarukan serta mencapai target *net zero* emmision dengan disuntik matinya PLTU di Indonesia tahun 2060. Pemanfaatan limbah panas dari Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi dengan menggunakan Siklus Kalina sebagai siklus pembangkit listrik diperkirakan dapat untuk menambah pasokan listrik dengan menggunakan sumber yang *sustainable*. Maka dengan alasan inilah penulis menggunakan kombinasi berupa analisis eksergi dan eksergoekonomi pada sistem siklus kalina untuk pembangkit panas bumi di Indonesia.

2 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan, maka perumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Kalor buang pada sistem Single Flasher yang ada di PLTP Lumut Balai masih sangat tinggi
2. Potensi kalor buang yang masih sangat tinggi masih bisa dimanfaatkan salah satunya dengan menambahkan sistem siklus kalina.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Sistem siklus kalina yang digunakan pada studi ini adalah KCS-11
2. Analisis yang dilakukan adalah analisis energi, eksergi dan eksergoekonomi
3. Analisis ini menggunakan fraksi massa Ammonia-Air dengan kadar 85%.

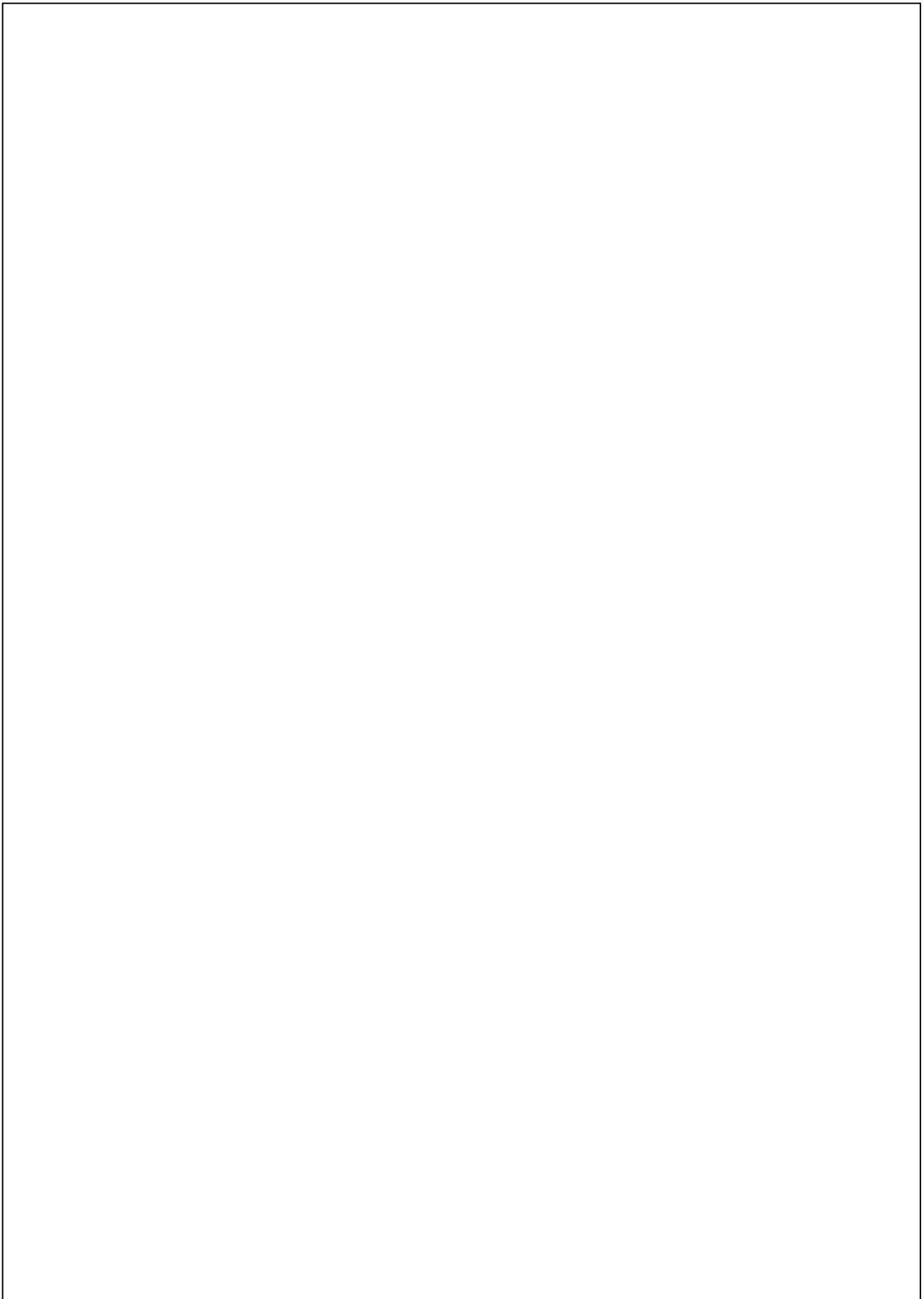
1.4 Tujuan Penelitian

Merujuk pada perumusan masalah yang telah disampaikan sebelumnya, tujuan dari penelitian yang akan dilakukan ini adalah :

1. Menganalisis besaran peningkatan sistem termal pada PLTP dengan adanya tambahan Siklus Kalina KCS-11
2. Mencari destruksi dan efisiensi eksergi pada setiap komponen pembangkit dalam perhitungan eksergoekonomi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diharapkan atas penelitian ini adalah bisa digunakan sebagai referensi keilmiah pada waktu yang akan datang, dan juga dapat digunakan oleh *stakeholder* perusahaan yang mengelola PLTP di Indonesia dalam bentuk saran ilmiah atas hasil penelitian yang telah di dapatkan.



BAB 2

2 **TINJAUAN PUSTAKA**

2.1 Energi Panas Bumi

Energi panas bumi merupakan sumber energi bersih yang telah terbukti karena tidak bergantung pada kondisi cuaca. Energi ini terutama dihasilkan dan disimpan di bagian dalam bumi. Energi ini merupakan sumber daya yang ramah lingkungan dan permintaannya di masa depan untuk pembangkit listrik terus meningkat dengan cepat. Kekurangan dari jenis energi ini sangat tergantung pada lokasi situs, spesifikasi situs dan suhu sumber. Selain itu, keterbatasan lain dalam menggunakan energi panas bumi adalah teknologi yang tersedia dan keuntungan finansial (Ahmadi dkk., 2020).

Untuk memanfaatkan energi panas bumi, diperlukan pembawa perpindahan panas untuk memindahkan energi panas ini dari lapisan yang lebih dalam ke permukaan tanah. Secara umum, proses ini dilakukan dalam dua tahap, dan melibatkan dua mekanisme perpindahan panas. Panas ditransfer melalui perpindahan panas konduksi antara batuan panas, dan kemudian melalui perpindahan panas konvektif, air panas dialirkan ke permukaan (Ghazvini dkk., 2019).

2.2 Limbah Kalor PLTP

Untuk memanfaatkan energi panas bumi, diperlukan pembawa perpindahan panas untuk memindahkan energi panas ini dari lapisan yang lebih dalam ke permukaan tanah. Secara umum, proses ini dilakukan dalam dua tahap, dan melibatkan dua mekanisme perpindahan panas. Panas ditransfer melalui perpindahan panas konduksi antara batuan panas, dan kemudian melalui

perpindahan panas konvektif, air panas dialirkan ke permukaan.(Ghazvini dkk, 2019)

2.2.1 Limbah Cair PLTP

Limbah cair merupakan air hasil kondensasi dari sistem PLTP dan brine yang tidak diinjeksikan kembali ke dalam reservoir, maka air hasil kondensasi dan brine tersebut menjadi limbah cair. Pada prinsipnya proses produksi *brine water* hampir mirip air terproduksi pada produksi minyak dan gas bumi. Limbah dari industri PLTP umumnya mengandung berbagai jenis mineral tersuspensi maupun terlarut dengan total *dissolved solid* cukup tinggi (Wahyu, dkk,2019).

2.2.2 Limbah Padat PLTP

Limbah padat yang dihasilkan dari kegiatan industri PLTP berupa lumpur *geothermal*, Lumpur *geothermal* merupakan serbuk yang berasal dari limbah padat *geothermal* yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Panas bumi (PLTP). Limbah padat *geothermal* mengandung unsur logam yang beberapa diantaranya logam berat, antara lain Si, Cu, Pb, Zn, Mn, Fe, Cd, As, Sb, Au, Ag, Hg, dan Se (Nurkholis Meiyati, dkk, 2015).

2.3 Siklus Kalina

⁶ Siklus Kalina diciptakan oleh seorang sarjana Rusia, Dr. Alexdaner Kalina pada tahun 1984. Siklus Kalina ini menggunakan campuran biner sebagai fluida kerja untuk membangkitkan daya dari sumber panas yang memiliki temperature rendah. Siklus Kalina pada dasarnya merupakan pengembangan dari siklus Rankine. Perbedaannya adalah terletak pada fluida kerjanya, yang

mana siklus Kalina menggunakan campuran dua fluida sedangkan siklus Rankine hanya menggunakan satu jenis fluida murni (Suparyanto dan Rosad, 2015).

¹ Siklus Kalina sederhana terdiri dari evaporator, separator, turbin, kondenser, dan regenerator. Campuran amonia-air akan dididihkan di evaporator dengan memanfaatkan panas dari sumber air panas. Kemudian campuran tersebut masuk ke separator kemudian dipisahkan menjadi dua aliran yaitu, aliran dengan konsentrasi amonia dalam bentuk uap yang kemudian diekspansi di turbin dan aliran dengan konsentrasi amonia yang rendah dalam fasa cair yang kemudian dilalirkan ke recuperator. Kedua aliran tersebut kemudian menyatu di kondensor dimana campuran tersebut akan dikondensasikan dengan memanfaatkan sumber air dingin. Campuran yang sudah berada dalam fasa cair kemudian dipompa ke regenerator dan siklus akan berulang (Pramuda, dkk, 2020).

Macam-macam siklus kalina terdiri dari Siklus Kalina KCS-11, KCS-34, dan KSG-1. Perbedaan dari ketiga jenis siklus kalina tersebut berada pada penggunaan evaporator, separator, dan recuperator. ketiga jenis itu diperlihatkan pada Gambar 2.1 (Wang dan Yu, 2016).

2.3.1 Siklus Kalina KCS-11

⁵ Sistem siklus Kalina KCS 11 merupakan salah satu siklus biner yang merupakan siklus tenaga listrik yang memanfaatkan sifat termodinamika dari ammonia dan air atau dapat pula disebut campuran amoniak-air. Siklus ini secara komersial pertama kali di dunia pada tahun 2000 di Islandia dan telah membuktikan keberhasilan dalam operasional dan mendapatkan efisiensi yang lebih baik dibandingkan pembangkit listrik lainnya yang beroperasi pada temperatur rendah (Yose dan Farasi, 2015.).

⁵ Siklus Kalina KCS-11 adalah salah satu varian dari siklus Kalina yang dipatenkan oleh Alexdander Kalina, penemunya. Pada penyelidikan awal

ditemukan bahwa KCS-11 adalah siklus yang paling cocok untuk diterapkan pada kondisi situs panas bumi di Indonesia (Nasruddin, dkk, 2015)

2.4 Properti Fluida pada Ammonia-Water

Nilai properti pada ammonia-water diperlukan dalam perhitungan analisis energi, eksergi, dan eksergoekonomi. Mencari nilai properti fluida *ammonia-water* dapat menggunakan grafik entalpi, entropi, temperatur terhadap konsentrasi dari ammonia. Adapun grafik yang digunakan didapat berdasarkan pada literatur jurnal yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 (Ganesh dan Srinivas, 2017)

2.5 Analisis Eksergi

Sebuah sistem menyediakan kerja maksimum yang mungkin sebagaimana proses reversibel dari keadaan mula khusus ke keadaan dari lingkungannya. Hal ini menggambarkan potensial kerja yang berguna dari sebuah keadaan sistem dan disebut dengan Eksergi. Eksergi menggambarkan batas atas sejumlah usaha dari sebuah alat yang bisa dihasilkan tanpa melanggar hukum termodinamika. Maka dari itu selalu ada perbedaan, kecil maupun besar, diantara eksergi maupun usaha aktual yang dihasilkan. Eksergi sebuah sistem pada sebuah keadaan bergantung pada kondisi lingkungan sebagaimana ciri-ciri dari sistem. Sehingga ciri-ciri dari eksergi adalah kombinasi dari sistem dan lingkungan, bukan hanya terbatas pada sistem saja (Cengel dan Boles, 2006).

Metode analisis eksergi merupakan metode analisis sistem termal yang mengkombinasikan antara hukum pertama dan kedua termodinamika. Dengan menggunakan metode ini akan didapatkan gambaran yang sesungguhnya tentang

besarnya kerugian dari suatu sistem, penyebabnya dan lokasinya, sehingga dapat melakukan peningkatan sistem secara keseluruhan ataupun hanya pada komponen-komponennya (Santoso dan Yusuf, 2012).

Analisis eksergi menjadi solusi atas kekurangan dari perhitungan analisis hukum konservasi energi. Satu hal yang dipertimbangkan dalam analisis eksergi namun tidak pada analisis energi yaitu mengaitkan tentang kondisi lingkungan di saat perhitungannya dilakukan. Analisis eksergi menyatakan bahwa, meskipun energi sejatinya tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi dapat kualitasnya dapat menurun, yang pada akhirnya akan mencapai keadaan yang setimbang dengan kondisi lingkungan sekitarnya dan tidak digunakan lebih lanjut untuk melakukan sebuah kerja (Ahmadi dan Toghraie, 2016).

Analisis eksergi dapat menunjukkan lokasi daripada degradasi energi atau eksergi destruksi dalam suatu proses serta besaran nilainya. Eksergi destruksi akan sama dengan entropi yang dibangkitkan. Nilai eksergi akan selalu berkurang dalam setiap irreversible proses. Pada akhirnya, eksergi destruksi atau entropi yang dibangkitkan ini lah yang akan besar pengaruhnya kepada efisiensi sistem atau proses yang kurang ideal (Regulagadda, dkk, 2010).

Pada prosesnya, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan untuk perhitungan menggunakan metode analisis eksergi.

2.5.1 Persamaan Kesenjangan Pada Volume Atur

Dalam menganalisis eksergi suatu siklus atau komponen, diperlukan adanya pertimbangan volume atur. Volume atur atau sistem termodinamika terbuka merupakan sistem termodinamika dimana selama berlangsungnya perpindahan energi dalam bentuk kerja dan panas, terdapat juga adanya perpindahan massa aliran fluida yang melewati batas sistem (Nise, 2011).

Sistem pada termodinamika merupakan segala sesuatu yang menjadi objek penelitian dan diamati sifat termodinamikanya. Ada berbagai macam jenis sistem, diantaranya adalah sistem tertutup, sistem terisolasi dan sistem terbuka. Sistem tertutup merupakan sistem termodinamika yang hanya memungkinkan suatu sistem untuk bertukar energi dengan lingkungannya, dimana panas dan bentuk

energi lainnya dapat masuk dan keluar sistem tetapi materi atau benda tidak dapat masuk dan keluar dari sistem. Sistem terisolasi merupakan sistem termodinamika dimana energi dan materi tidak dapat masuk maupun keluar daripada sistem, yang berarti materi dan energi panas dalam sistem akan tetap sama tanpa ada pertukaran dengan lingkungannya. Dalam menganalisis eksergi suatu siklus atau komponen, diperlukan adanya pertimbangan volume atur atau sistem terbuka.

Selain dari kontrol volume, asumsi kondisi tunak juga perlu dipertimbangkan dalam analisis. persamaan laju kesetimbangan yang digunakan adalah kesetimbangan massa, energi, entropi dan eksergi. Persamaan umum dinyatakan sebagai berikut :

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (2.1)$$

$$\sum \dot{E}_i + \dot{Q} = \sum \dot{E}_e + \dot{W} \quad (2.2)$$

$$\sum \dot{E}x_i + \dot{E}x_Q = \sum \dot{E}x_e + \dot{W} + \dot{E}x_D \quad (2.3)$$

Dengan mengabaikan energi kinetik dan potensial dalam persamaan energi karena berada dalam kondisi tunak, maka persamaan energi 2.2 menjadi:

$$\sum \dot{m}_i h_i + \dot{Q} = \sum \dot{m}_e h_e + \dot{W} \quad (2.4)$$

Untuk persamaan eksergi, perpindahan eksergi dari yang masuk dan keluar pada sistem kontrol volume terbuka setiap komponen berupa dalam bentuk massa, kerja, dan kalor.

Dengan besaran eksergi yang masuk dan keluar adalah

$$\sum \dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i \quad (2.5)$$

$$\sum \dot{E}x = \dot{m}(ex) = \dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch}) \quad (2.6)$$

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2.7)$$

$$\dot{E}x_{work} = \dot{W}_{useful} \quad (2.8)$$

$$\dot{E}x_D = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (2.9)$$

Merujuk pada persamaan 2.9, besarnya nilai eksergi destruksi atau irreversibilitas menggambarkan pengahancuran nilai potensi maksimum yang bisa dimanfaatkan menjadi kerja. Irreversibilitas yang dapat terjadi karena adanya berbagai faktor, diantaranya adalah gesekan, reaksi pembakaran atau

kimia dan perpindahan panas dengan perbedaan suhu yang terbatas akan selalu membangkitkan entropi. Semakin besar nilai pembangkitan entropi yang dihasilkan sistem maka eksergi yang dihancurkan juga akan semakin besar (Moran dkk., 2014).

Nilai Eksergi bergantung pada dua komponen yang sangat penting dalam analisisnya, yaitu eksergi fisik dan eksergi kimia. Eksergi fisik merupakan eksergi yang berhubungan dengan perubahan tekanan dan temperatur dalam aliran, dimana ini ditunjukkan pada persamaan 2.7. Eksergi kimia merupakan eksergi yang berhubungan dengan perubahan senyawa kimia. Eksergi ini sangat erat kaitannya dengan jenis bahan bakar yang digunakan dalam proses serta kondisi lingkungan sekitarnya. Untuk mencari besarnya nilai eksergi bahan bakar yang digunakan adalah persamaan rasio antara eksergi kimia bahan bakar dengan nilai kalor bersih dari bahan bakar yang digunakan. Persamaan nya dapat ditulis sebagai berikut :

$$\varphi = \frac{\dot{e}x_f}{LHV} \quad (2.10)$$

$$\dot{E}x_f = \dot{m}\varphi(LHV) \quad (2.11)$$

Untuk mendapatkan nilai φ pada kasus bahan bakar padat seperti batubara, maka diperlukan nilai kandungan fraksi masa dari unsur karbon (C), hidrogen (H), Oksigen (O) , Nitrogen (N) sulfur (S), serta kelembaban (w) yang terdapat dalam bahan bakar padat, dengan persamaan sebagai berikut :

$$\varphi_{dry} = 1.0437 + 0.1882 \frac{h}{c} + 0.0610 \frac{o}{c} + 0,0404 \frac{n}{c} \quad (2.12)$$

$$\dot{E}x_f = [LHV + 2442w]\varphi_{dry} + 9417s \quad (2.13)$$

Merujuk pada persamaan 2.11 tentang nilai laju eksergi yang bisa di dapatkan dari bahan bakar adalah bergantung pada seberapa besar nilai pembakaran atau *heting value*, yang merupakan jumlah panas atau jumlah energi yang dikeluarkan untuk setiap satu satuan massa bahan bakar. Semakin besar nilai kalori pembakarannya, maka eksergi yang didapatkan dari bahan bakar tersebut juga akan semakin besar (Kotas, 1995).

2.5.2 Efisiensi Eksergi

Efisiensi suatu sistem akan memberikan gambaran tentang seberapa baik sistem tersebut dalam menghasilkan kerja dari sumber yang tersedia. Untuk efisiensi eksergi sendiri, dinyatakan sebagai rasio perbandingan antara total laju eksergi yang keluar dibagi dengan total laju eksergi yang masuk.

Efisiensi eksergetik (efisiensi hukum kedua, efektifitas, atau efisiensi rasional) memberikan ukuran sebenarnya dari kinerja sistem energi dari sudut pandang termodinamika.:

$$\psi = \frac{\sum \dot{E}x_e}{\sum \dot{E}x_i} \quad (2.14)$$

Dari kesetimbangan eksergi, efisiensi eksergi dapat juga ditulis sebagai:

$$\psi = 1 - \frac{\dot{E}x_D}{\sum \dot{E}x_i} \quad (2.15)$$

Efisiensi lainnya adalah nilai perbandingan antara produk eksergi yang dihasilkan ($\dot{E}x_{product}$) dengan sumber eksergi yang dimasukkan dalam sistem ($\dot{E}x_{fuel}$). (Bejan, Tsatsaronis dan Moran, 1996)

Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\psi = \frac{\sum \dot{E}x_{product}}{\sum \dot{E}x_{fuel}} \quad (2.16)$$

2.5.3 Dead State

Dead State atau keadaan mati merupakan suatu kondisi dimana keadaan sistem yang kita tinjau memiliki nilai karakteristik termodinamika seperti temperatur dan tekanan yang sama nilainya dengan lingkungannya. Dalam kondisi yang sama dengan lingkungannya, sistem tidak memiliki kesempatan untuk membangkitkan kerja atau dalam kata lain suatu sistem akan memiliki nilai eksergi nol pada kondisi *dead state*. Selain itu, sistem memiliki kecepatan dan elevasi dengan nilai nol ketika relatif terhadap lingkungan sehingga tidak memungkinkan untuk terjadinya perubahan secara spontan antara sistem dan lingkungan (Kotas, 1995).

2.6 Analisis Eksergoekonomi

Untuk meningkatkan desain sistem termal, pertimbangan tidak hanya terbatas pada aspek teknis, tetapi juga harus memperhitungkan kinerja ekonomi. Dalam konteks ini, konsep eksergi menjadi krusial karena mencakup potensi kerja atau energi maksimum yang dapat diperoleh oleh suatu sistem. Pendekatan yang sesuai untuk mencapai tujuan kinerja sistem yang lebih baik adalah melalui eksergoekonomi. Metode ini melibatkan analisis biaya berdasarkan eksergi dengan tujuan menentukan biaya produksi dan penghancuran eksergi atau irreversibilitas selama proses berlangsung.

Dalam konteks analisis eksergoekonomi, kesetimbangan biaya untuk seluruh sistem menjadi esensial. Hal ini mengimplikasikan bahwa laju biaya yang keluar dari sistem harus setara dengan total laju biaya yang masuk, termasuk laju biaya terkait investasi modal, operasional, dan pemeliharaan. Secara matematis, dalam kondisi tunak, kesetimbangan ini dapat diungkapkan sebagai berikut :

$$\dot{C}_{e,tot} + \dot{C}_w = \dot{C}_{i,tot} + \dot{C}_q + \dot{Z}_{tot} \quad (2.17)$$

Dalam situasi operasional sistem dengan kondisi tunak, perpindahan panas, kerja, dan aliran massa melintasi batas sistem. Oleh karena itu, persamaan eksergi dapat dikaitkan dengan faktor biaya, seperti berikut ini:

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}x_i \quad (2.18)$$

$$\dot{C}_e = c_e \dot{E}x_e \quad (2.19)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (2.20)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}q \quad (2.21)$$

Pada persamaan tersebut, variabel c melambangkan biaya spesifik atau jumlah rata-rata biaya per komponen dari nilai eksergi dalam satuan US Dollar per kWh (USD/kWh).

Untuk mendapatkan biaya semua aliran unit eksergi, evaluasi eksergoekonomi bisa menggunakan variabel biaya unit bahan bakar (c_F), biaya unit produk (c_p), laju biaya eksergi destruksi (\dot{C}_D), dan juga faktor termoekonomi (f). Dengan persamaan matematis nya sebagai berikut :

$$c_F = \frac{\dot{c}_F}{\dot{E}x_F} \quad (2.22)$$

$$c_P = \frac{\dot{c}_P}{\dot{E}x_P} \quad (2.23)$$

$$\dot{c}_D = c_F \dot{E}x_D \quad (2.24)$$

$$\dot{c}_D = c_P \dot{E}x_D \quad (2.25)$$

$$f = \frac{\dot{z}}{\dot{z} + \dot{c}_D} \quad (2.26)$$

Dalam mencari biaya yang dikeluarkan dari eksergi destruksi adalah bergantung kepada apakah aliran-aliran pada komponen yang diteliti memiliki eksergi produk yang tetap atau eksergi bahan bakarnya tetap.

2.7 Analisis Eksergi dan Eksergoekonomi Siklus KCS-11

Untuk melakukan analisis terhadap parameter eksergi dan eksergoekonomi dalam siklus kalina KCS-11 diperlukan penyusunan neraca kesetimbangan yang mencakup neraca massa, energi, eksergi, dan biaya. Persamaan umum untuk neraca massa, energi, eksergi, dan biaya dapat dijabarkan sebagai berikut. Adapun komponen-komponen yang akan diteliti meliputi *heat exchanger 1, turbine, high temperature recuperator, low temperature recuperator, drum tank, condensor, pump, heat exchanger 2*.

2.7.1 Heat Exchangers 1

Kesetimbangan neraca massa, energi, eksergi dan biaya pada komponen heat exchanger 1 dinyatakan pada persamaan berikut :

Neraca massa

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{12} + \dot{m}_{11} \quad (2.27)$$

Neraca energi

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{13} h_{13} = \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{11} h_{11} \quad (2.28)$$

Neraca eksergi

$$\dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{11} = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_{13} + \dot{E}x_D \quad (2.29)$$

Neraca biaya

$$c_{12}\dot{E}x_{12} + c_{11}\dot{E}x_{11} + \dot{Z}_{he} = c_1\dot{E}x_1 + c_{13}\dot{E}x_{13} \quad (2.30)$$

2.7.2 Turbin

Kesetimbangan neraca massa , energi, eksergi dan biaya pada komponen turbin dinyatakan pada persamaan berikut :

Neraca massa

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (2.31)$$

Neraca energi

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{W}_{tur} \quad (2.32)$$

Neraca eksergi

$$\dot{E}x_1 = \dot{E}x_2 + \dot{E}x_D + \dot{W}_{tur} \quad (2.33)$$

Neraca biaya

$$c_1\dot{E}x_1 + \dot{Z}_{tur} = c_2\dot{E}x_2 + c_w\dot{W}_{tur} \quad (2.34)$$

2.7.3 Kondensor

Kesetimbangan neraca massa , energi, eksergi dan biaya pada komponen kondensor dinyatakan pada persamaan berikut :

Neraca massa

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_6 + \dot{m}_{15} = \dot{m}_7 + \dot{m}_{16} \quad (2.35)$$

Neraca energi

$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{15} h_{15} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{16} h_{16} \quad (2.36)$$

Neraca eksergi

$$\dot{E}x_5 + \dot{E}x_6 + \dot{E}x_{15} = \dot{E}x_7 + \dot{E}x_{16} + \dot{E}x_D \quad (2.37)$$

Neraca biaya

$$c_5\dot{E}x_5 + c_6\dot{E}x_6 + c_{15}\dot{E}x_{15} + \dot{Z}_k = c_7\dot{E}x_7 + c_{16}\dot{E}x_{16} \quad (2.38)$$

2.7.4 HT Recuperator

Kesetimbangan neraca massa , energi, eksergi dan biaya pada komponen *high temperature recuperator* dinyatakan pada persamaan berikut :

Neraca massa

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_9 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{10} \quad (2.39)$$

Neraca energi

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{10} h_{10} \quad (2.40)$$

Neraca eksergi

$$\dot{E}x_2 + \dot{E}x_9 = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_{10} + \dot{E}x_D \quad (2.41)$$

Neraca biaya

$$c_2 \dot{E}x_2 + c_9 \dot{E}x_9 + \dot{Z}_{HTR} = c_3 \dot{E}x_3 + c_{10} \dot{E}x_{10} \quad (2.42)$$

2.7.5 LT Recuperator

Kesetimbangan neraca massa , energi, eksergi dan biaya pada komponen *low temperature recuperator* dinyatakan pada persamaan berikut :

Neraca massa

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_8 = \dot{m}_9 + \dot{m}_4 \quad (2.43)$$

Neraca energi

$$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_4 h_4 \quad (2.44)$$

Neraca eksergi

$$\dot{E}x_3 + \dot{E}x_8 = \dot{E}x_9 + \dot{E}x_4 + \dot{E}x_D \quad (2.45)$$

Neraca biaya

$$c_3 \dot{E}x_3 + c_8 \dot{E}x_8 + \dot{Z}_{LTR} = c_9 \dot{E}x_9 + c_4 \dot{E}x_4 \quad (2.46)$$

2.7.6 Pompa

Kesetimbangan neraca massa , energi, eksergi dan biaya pada komponen *drain pump* dinyatakan pada persamaan berikut :

Neraca massa

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (2.47)$$

Neraca energi

$$\dot{m}_7 h_7 + \dot{W}_{WCEP} = \dot{m}_8 h_8 \quad (2.48)$$

Neraca eksergi

$$\dot{E}x_7 + \dot{E}x_{W,CEP} = \dot{E}x_8 + \dot{E}x_D \quad (2.49)$$

Neraca biaya

$$c_7 \dot{E}x_7 + c_w \dot{E}x_{W,CEP} + \dot{Z}_{bfwp} = c_8 \dot{E}x_8 \quad (2.50)$$

2.7.7 Heat Exchanger 2

Kesetimbangan neraca massa , energi, eksergi dan biaya pada komponen *Heat Exchanger 2* dinyatakan pada persamaan berikut :

Neraca massa

$$\dot{m}_{13} + \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{14} \quad (2.52)$$

Neraca energi

$$\dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{14} h_{14} \quad (2.53)$$

Neraca eksergi

$$\dot{E}x_{13} + \dot{E}x_{10} = \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{14} + \dot{E}x_D \quad (2.54)$$

Neraca biaya

$$c_{13} \dot{E}x_{13} + c_{10} \dot{E}x_{10} + \dot{Z}_{iph5} = c_{11} \dot{E}x_{11} + c_{14} \dot{E}x_{14} \quad (2.55)$$

2.8 Sistem Pembangkit ² Tenaga Panas Bumi

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa energi panas bumi di Indonesia pada umumnya dikategorikan sebagai sistem dengan temperatur tinggi (>225 °C), namun beberapa juga dikategorikan ke dalam sistem dengan temperature menengah (125-225 °C). Kedua kategori ini memiliki potensi untuk dijadikan sumber energi pada pembangkitan listrik hanya saja metode yang

digunakan berbeda. Untuk panas bumi dengan kategori temperatur tinggi, metode pembangkitan yang digunakan adalah dengan single/double flash sementara untuk panas bumi dengan kategori menengah digunakan metode pembangkitan siklus biner. Secara umum, Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) memiliki prinsip yang sama dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Hanya saja, pada PLTU uap dihasilkan di atas permukaan bumi dan berasal dari proses pada boiler, sementara pada PLTP uap berasal dari perut bumi. Jika fluida yang keluar dari reservoir panas bumi berupa uap, maka uap langsung dialirkan ke turbin untuk menghasilkan listrik (Rachman dan Arianto, 2020)

² Apabila fluida yang keluar dari reservoir berupa fluida dengan dua fasa (brine dan steam) maka terlebih dahulu fluida harus dikondisikan melalui proses separasi untuk memperoleh uap kering dari fluida tersebut dan kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin (Gondal, dkk, 2017).

Dari hasil pengamatan terhadap karakteristik fluida kerja untuk berbagai pembangkit listrik di lokasi yang berbeda, fluida kerja dibagi menjadi yang didominasi oleh air dan yang didominasi oleh uap. Berdasarkan suhunya, fluida geotermal diklasifikasikan menjadi tiga jenis. Yang pertama adalah suhu tinggi ($> 220^{\circ}\text{C}$), yaitu uap jenuh dan didominasi oleh uap. Yang kedua adalah suhu menengah antara $100^{\circ}\text{C} - 220^{\circ}\text{C}$, yaitu didominasi oleh air. Yang ketiga adalah suhu rendah antara $30^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$, juga didominasi oleh air (Mulyana dkk, 2016).

Berdasarkan pemanfaatannya, fluida kerja geotermal di bawah 125°C digunakan untuk berbagai kegiatan seperti pengeringan, pendinginan, evaporasi, rumah kaca, dan lainnya. Sementara itu, untuk pembangkit listrik, fluida kerja geotermal harus memiliki suhu yang lebih tinggi dari 125°C .

Efisiensi berkisar antara 30-35% untuk satu tahap penguapan (flash), dan 35-45% untuk dua tahap penguapan (double flash). Semakin tinggi suhu fluida geotermal, semakin banyak tahapan penguapan yang dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi termodinamika keseluruhan pembangkit listrik. Namun, kompleksitas sistem, operasional, dan pemeliharaan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah tahap penguapan, oleh karena itu, double-flash umumnya digunakan untuk sumber daya dengan suhu tinggi ($> 250^{\circ}\text{C}$)

Fluida geotermal pada suhu yang relatif rendah, $<150^{\circ}\text{C}$, tidak dapat digunakan sebagai pembangkit listrik geotermal. Namun, energi panas yang terkandung dalam fluida geotermal dapat digunakan sebagai pemanas untuk menguapkan fluida kerja lain yang titik didihnya kurang dari 150°C .

Adapun macam-macam dari Sistem Pembangkit Tenaga Panas Bumi adalah:

2.8.1 *Single Flash Geothermal Power Plant*

Single Flash Geothermal Power Plant biasanya dianggap sebagai alternatif yang paling ekonomis untuk sumber daya panas bumi yang tersedia dengan suhu di atas 190°C . Sumber daya bersuhu lebih tinggi akan menghasilkan lebih banyak cairan dan uap untuk kondisi tekanan. Untuk sumber daya bersuhu tinggi yang didominasi oleh dua fase panas bumi dipindahkan ke permukaan lubang bor sebagai campuran uap dan cairan (air garam). Proses pemisahan uap dari *Brine* terjadi baik dalam pemisah horizontal di bawah pengaruh gravitasi atau dalam *Separator* (El Haj Assad, Bani-Hani dan Khalil, 2017).

2.8.2 *Double Flash Geothermal Power Plant*

Pembangkit listrik *Double Flash System* lebih dipakai daripada *Single Flash System* tergantung pada kondisi sumber daya. Bahkan, ini mirip dengan pembangkit listrik *Single Flash* tetapi, *Double Flash* menghasilkan lebih banyak uap karena penggunaan dua *Separator*. Pembangkit listrik tenaga uap ganda mampu menghasilkan hingga 15-25% lebih besar dari pembangkit listrik tenaga uap tunggal karena kapasitas produksi listriknya berkisar antara 4,7 MW-110 MW. Dalam pembangkit listrik *Double Flash System*, cairan jenuh meninggalkan separator pertama diarahkan ke separator kedua pada tekanan yang lebih rendah, menghasilkan lebih banyak produksi uap (El Haj Assad, Bani-Hani dan Khalil, 2017).

2.8.3 Binary Power Plant

Pembangkit *Binary System*, fluida panas bumi disirkulasikan dalam alat penguap dan dikirim kembali ke sumur injeksi. Fluida sekunder dipanaskan dan diuapkan dalam alat penguap oleh pertukaran panas antara fluida panas bumi dan fluida sekunder. Uap yang dihasilkan dari fluida sekunder diarahkan ke turbin untuk produksi listrik. Uap yang meninggalkan turbin melewati regenerator di mana uap super panas digunakan untuk memanaskan fluida yang terkondensasi meninggalkan kondensor sebelum memasuki alat penguap (El Haj Assad, Bani-Hani dan Khalil, 2017)

Fluida geotermal pada suhu yang cukup rendah, kurang dari 150°C, tidak dapat dimanfaatkan secara langsung sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik geotermal. Meskipun demikian, panas yang terkandung dalam fluida geotermal pada suhu tersebut dapat digunakan sebagai sumber panas untuk menguapkan fluida kerja lain seperti siklus kalina atau fluida organik lainnya yang memiliki titik didih di bawah 150°C.

BAB 4

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

3.1 Sistem Siklus Kalina KCS-11

Pada Studi ini pemanfaatan energi dari brine water yang keluar dari *brine separator* PLTP Lumut Balai dengan *mass flow* 545 kg/s, dan temperature 157 °C dan asumsi kerugian tekanan pada separator. Pemanfaatan *brine water* dari sistem PLTP untuk menghasilkan daya menggunakan sistem siklus kalina KCS-11 dikarenakan *range* temperatur 121°C-204°C.

Pemanfaatan siklus kalina bertujuan untuk meningkatkan efisiensi total PLTP dengan cara membangkitkan sejumlah tenaga dari brine water sebelum diinjeksikan kembali ke dalam bumi.

3.2 Properti Fluida pada Ammonia-Water

Nilai properti pada ammonia-water diperlukan dalam perhitungan analisis energi, eksergi, dan eksergoekonomi. Mencari nilai properti fluida *ammonia-water* dapat menggunakan grafik entalpi, entropi, temperatur terhadap konsentrasi dari ammonia.

Pada Studi ini pemanfaatan energi dari brine water yang keluar dari *brine separator* PLTP Lumut Balai dengan *mass flow* 545 kg/s, dan temperatur 157 °C serta nilai *mass flow* yang masuk dari kondensor 1378 kg/s dan temperatur 23°C. Pemanfaatan *brine water* dari sistem PLTP untuk menghasilkan daya menggunakan sistem siklus kalina KCS-11 dikarenakan *range* temperatur 121°C-204°C.

Data operasi yang telah didapat menghasilkan nilai laju aliran massa, entalpi, dan entropi dair setiap titik pada PLTP, yang ditunjukkan pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Data Operasi PLTP Lumut Balai

Titik	\dot{m} (kg/s)	T (°C)	P (Bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
12	545	157	5,5	662,81	1,9122
13	545	100	5,5	419,75	1,3063
14	545	80	5,5	335,64	1,0748
15	1378,6	23	23	98,61	0,3386
16	1378,6	32	23	136,14	0,4636

3.3 Analisis Energi

Dari data desain yang diperoleh melalui pengukuran grafik pada lampiran 1 dan 2, nilai entalpi, entropi, dan laju aliran massa pada setiap titik dapat diidentifikasi. Untuk menghitung nilai laju aliran massa di titik-titik lainnya, dapat digunakan persamaan kesetimbangan laju aliran massa dan energi, seperti yang dinyatakan di bawah ini.

Nilai laju aliran massa di titik 1 dan 11 dapat dicari dengan menganalisis komponen HE 1 menggunakan neraca energi pada Persamaan berikut ini:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{13} h_{13} = \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{11} h_{11}$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} = 545 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{11}$$

nilai entalpi

$$h_1 = 1702,76 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{11} = 1302 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{12} = 662,81 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{13} = 419,75 \text{ kJ/kg}$$

maka, nilai laju aliran massa di titik 25 dan 2 yaitu

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_{12}(h_{12} - h_{13})}{(h_1 - h_{11})}$$

$$\dot{m}_1 = \frac{545 (662,81 - 419,75)}{(1702,76 - 1302)}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{11} = 467,1 \text{ kg/s}$$

Maka nilai laju aliran massa dalam Siklus Kalina KCS-11 memiliki nilai 467,1 kg/s. Seluruh nilai laju aliran massa dalam sistem akan selalu sama dengan asumsi keadaan dalam proses isentropik.

Hasil analisis energi yang telah dilakukan menghasilkan nilai laju aliran massa, entalpi, dan entropi dair setiap titik pada siklus pembangkit, yang ditunjukkan pada Tabel 4.1:

Tabel 4. 2 Data Operasi Sistem Siklus Kalina KCS-11

Titik	\dot{m} (kg/s)	T (°C)	P (Bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
1	467,1	152	35	1702,75	5,18
2	467,1	110	10	1694,14	5,2
3	467,1	68	9,5	1306,95	4,31
4	467,1	63	9	1291,75	3,77
5	350,35	50	9	1253,8	3,6
6	116,75	53	9	77,015	0,515
7	467,1	20	9,2	-15	0,264
8	467,1	20	35	-13	0,274

9	467,1	60	35	182,32	0,58
10	467,1	90	35	392,9	0,995
11	467,1	95	35	1302	3,923
12	545	157	5,5	662,81	1,9122
13	545	100	5,5	419,75	1,3063
14	545	80	5,5	335,64	1,0748
15	1378,6	23	23	98,61	0,3386
16	1378,6	32	23	136,14	0,4636

3.4 Analisis Eksergi pada Setiap State

Analisis eksergi dilakukan untuk dapat menilai seberapa besar potensi kinerja maksimum yang bisa dihasilkan dari setiap aliran. Dengan mengasumsikan temperatur dan tekanan lingkungan masing-masing sebesar 30°C dan 1 atm, didapatkan hasil sebagai berikut.

3.4.1 Laju Aliran Eksergi

laju aliran eksergi pada setiap titik dapat dicari dengan nilai entalpi dan entropi lingkungan pada temperatur 30°C dan tekanan 1 atm yaitu $h_0 = 125,9$ kJ/kg dan $s_0 = 0,4368$ kJ/kg·K sebagai berikut :

Titik 1

$$\dot{E}x_1 = \dot{m}_1[(h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0)]$$

$$\dot{E}x_1 = 467,1[(1702,76 - 125,9) - 303,15(5,18 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_1 = 64907,7115 \text{ kW}$$

Titik 2

$$\dot{E}x_2 = \dot{m}_2[(h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0)]$$

$$\dot{E}x_2 = 467,1[(1694,14 - 125,9) - 303,15(5,2 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_2 = 58049,2822 \text{ kW}$$

Titik 3

$$\dot{E}x_3 = \dot{m}_3[(h_3 - h_0) - T_0(s_3 - s_0)]$$

$$\dot{E}x_3 = 467,1[(1306,95 - 125,9) - 303,15(4,31 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_3 = 3218,048 \text{ kW}$$

Titik 4

$$\dot{E}x_4 = \dot{m}_4[(h_4 - h_0) - T_0(s_4 - s_0)]$$

$$\dot{E}x_4 = 467,1[(1378,61,75 - 125,9) - 303,15(3,77 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_4 = 54175,54521 \text{ kW}$$

Titik 5

$$\dot{E}x_5 = \dot{m}_5[(h_5 - h_0) - T_0(s_5 - s_0)]$$

$$\dot{E}x_5 = 32,78[(1253,8 - 125,9) - 303,15(3,6 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_5 = 59200,7135 \text{ kW}$$

Titik 6

$$\dot{E}x_6 = \dot{m}_6[(h_6 - h_0) - T_0(s_6 - s_0)]$$

$$\dot{E}x_6 = 10,93[(77,015 - 125,9) - 303,15(0,5455 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_6 = 8475,0377 \text{ kW}$$

Titik 7

$$\dot{E}x_7 = \dot{m}_7[(h_0 - h_7) - T_0(s_0 - s_7)]$$

$$\dot{E}x_7 = 467,1[(125,9 - (-15)) - 303,15(0,4368 - 0,264)]$$

$$\dot{E}x_7 = 41345,6741 \text{ kW}$$

Titik 8

$$\dot{E}x_8 = \dot{m}_8[(h_0 - h_8) - T_0(s_0 - s_8)]$$

$$\dot{E}x_8 = 467,1[(125,9 - (-13)) - 303,15(0,4368 - 0,274)]$$

$$\dot{E}x_8 = 41827,4878 \text{ kW}$$

Titik 9

$$\dot{E}x_9 = \dot{m}_9[(h_9 - h_0) - T_0(s_9 - s_0)]$$

$$\dot{E}x_9 = 467,1[(182,32 - 125,9) - 303,15(0,58 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_9 = 6076,4665 \text{ kW}$$

Titik 10

$$\dot{E}x_{10} = \dot{m}_{10}[(h_{10} - h_0) - T_0(s_{10} - s_0)]$$

$$\dot{E}x_{10} = 467,1[(392,9 - 125,9) - 303,15(0,995 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_{10} = 45673,8180 \text{ kW}$$

Titik 11

$$\dot{E}x_{11} = \dot{m}_{11}[(h_{11} - h_0) - T_0(s_{11} - s_0)]$$

$$\dot{E}x_{11} = 467,1[(1302 - 125,9) - 303,15(3,923 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_{11} = 55705,6313 \text{ kW}$$

Titik 12

$$\dot{E}x_{12} = \dot{m}_{12}[(h_{12} - h_0) - T_0(s_{12} - s_0)]$$

$$\dot{E}x_{12} = 545[(662,81 - 125,9) - 303,15(2,1395 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_{12} = 48855,1570 \text{ kW}$$

Titik 13

$$\dot{E}x_{13} = \dot{m}_{13}[(h_{13} - h_0) - T_0(s_{13} - s_0)]$$

$$\dot{E}x_{13} = 545[(419,75 - 125,9) - 303,15(1,3063 - 0,4368)]$$

$$\dot{E}x_{13} = 16492,2858 \text{ kW}$$

Titik 14

$$\begin{aligned}\dot{E}x_{14} &= \dot{m}_{14}[(h_{14} - h_0) - T_0(s_{14} - s_0)] \\ \dot{E}x_{14} &= 545[(335,64 - 125,9) - 303,15(1,0748 - 0,4368)] \\ \dot{E}x_{14} &= 8900,0135 \text{ kW}\end{aligned}$$

Titik 15

$$\begin{aligned}\dot{E}x_{15} &= \dot{m}_{15}[(h_0 - h_{15}) - T_0(s_0 - s_{15})] \\ \dot{E}x_{15} &= 1378,6[(125,9 - 98,61) - 303,15(0,4368 - 0,3386)] \\ \dot{E}x_{15} &= 3418,0043 \text{ kW}\end{aligned}$$

Titik 16

$$\begin{aligned}\dot{E}x_{16} &= \dot{m}_{16}[(h_{16} - h_0) - T_0(s_{16} - s_0)] \\ \dot{E}x_{16} &= 1378,6[(136,14 - 125,9) - 303,15(0,4636 - 0,4368)] \\ \dot{E}x_{16} &= 2916,5385 \text{ kW}\end{aligned}$$

Didapatkan nilai laju eksergi di setiap titik pada masing-masing temperatur lingkungan yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Nilai Laju Eksergi

Titik	\dot{m} (kg/s)	T (°C)	P (MPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	$\dot{E}x$ (kW)
1	467,1	152	35	1702,75	5,18	64907,7115
2	467,1	110	10	1694,14	5,2	58049,2822
3	467,1	68	9,5	1306,95	4,31	3218,0408
4	467,1	63	9	1291,75	3,77	54175,5121
5	350,35	50	9	1253,8	3,6	59200,7135
6	115,75	53	9	77,015	0,515	8475,0378
7	467,1	20	9,2	-15	0,264	41345,6741
8	467,1	20	35	-13	0,274	41827,4878
9	467,1	60	35	182,32	0,58	6076,4665

10	467,1	90	35	392,9	0,995	45673,8180
11	467,1	100	35	1302	3,923	55705,6313
12	545	180	10,2	662,81	1,9122	48855,1570
13	545	105	9,7	419,75	1,3063	16492,2858
14	545	80	9,2	335,64	1,0748	8900,0135
15	1378,6	23	23	98,61	0,3386	3418,0043
16	138,6	32	22,5	136,14	0,4636	2916,5385

3.5 Analisis Eksergi pada Apparatus

Analisis eksergi dilakukan untuk dapat menilai seberapa besar potensi kinerja maksimum yang bisa dihasilkan dari setiap aliran. Dengan mengasumsikan temperatur dan tekanan lingkungan masing-masing sebesar 30°C dan 1 atm, didapatkan hasil sebagai berikut.

3.5.1 Heat Exchangers 1

Laju aliran destruksi eksergi dari Heat Exchangers 1 dapat dicari dengan menggunakan neraca eksergi yaitu.

$$\dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{11} = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_{13} + \dot{E}x_D$$

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{11} - \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{13}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}x_D &= 5212,7877 \text{ kW} + 48855,1570 \text{ kW} - 64907,7115 \text{ kW} \\ &\quad - 16492,2858 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\dot{E}x_D = 23160,7909 \text{ MW}$$

Adapun efisiensi eksergetik HE1 yaitu

$$\psi_{HE1} = \frac{\dot{E}x_1 - \dot{E}x_{11}}{\dot{E}x_{12} - \dot{E}x_{13}}$$

$$\psi_{HE1} = \frac{64907,7115 \text{ kW} - 5212,7877 \text{ kW}}{48855,1570 \text{ kW} - 16492,2858 \text{ kW}}$$

$$\psi_{HE1} = 28,43 \%$$

3.5.2 Turbin

Laju destruksi eksergi dapat dicari dengan menggunakan neraca eksergi pada Persamaan 2.33, yaitu

$$\dot{E}x_1 = \dot{E}x_2 + \dot{E}x_D + \dot{E}x_W$$

Output daya internal turbin tekanan tinggi dihitung menggunakan neraca energi.

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{W}_{turbin}$$

$$\dot{W}_{turbin} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2$$

$$\dot{W}_{turbin} = (467,1 \times 1702,76) - (467,1 \times 164,14)$$

$$\dot{W}_{i,turb} = 4026,402 \text{ kW}$$

Output daya poros turbin, $\dot{W}_{s,turb}$ dihitung sebagai :

$$\dot{W}_{s,turb} = \eta_m \dot{W}_{i,turb} = (0,99)(4026,402) = 4026,402 \text{ kW}$$

Dimana nilai efisiensi mekanis turbin, η_m bervariasi dalam rentang 98,0 % - 99,5% (Shlyakin, P., 1988)

Output daya generator, $\dot{W}_{g,hpt}$ sebagai berikut:

$$\dot{W}_{g,turb} = \eta_{tr} \eta_g \dot{W}_{s,turb}$$

$$\dot{W}_{g,turb} = (1,00)(0,97)(4026,402 \text{ kW}) = 3905,6099 \text{ kW}$$

Dimana untuk sistem transmisi dengan kopling flens, kerugian transmisi dapat diabaikan ($\eta_{tr} = 100 \%$). Sedangkan nilai efisiensi generator bervariasi dalam rentang 95,7 % - 98,7 % (Moon, H dan Zarrouk, J.S., 2012).

Berdasarkan Persamaan yang menyatakan $\dot{E}x_W = \dot{W}_{usefull}$, maka didapatkan :

$$\dot{W}_{g,tur} = \dot{E}x_{W,tur} = 3905,6099 \text{ MW}$$

dengan begitu, dapat dicari nilai destruksi eksergi sebesar

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_1 - \dot{E}x_2 - \dot{E}x_{W,tur}$$

$$\dot{E}x_D = 64907,7115 \text{ kW} - 58049,28229 \text{ kW} - 3905,6099 \text{ kW}$$

$$\dot{E}x_D = 2952,8193 \text{ kW}$$

Adapun efisiensi eksergetik yang dapat diperoleh adalah :

$$\psi_{Turb} = \frac{\dot{E}x_{W,tur}}{(\dot{E}x_1 - \dot{E}x_2 - \dot{E}x_3)}$$

$$\psi_{Turb} = \frac{3905,6099 \text{ kW}}{64907,7115 \text{ kW} - 58049,28229 \text{ kW}}$$

$$\psi_{HPT} = 56,94 \%$$

3.5.3 HT Recuperator

Laju aliran destruksi eksergi dari HT Recuperator dapat dicari dengan menggunakan neraca eksergi yaitu.

$$\dot{E}x_2 + \dot{E}x_9 = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_{10} + \dot{E}x_D$$

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_2 + \dot{E}x_9 - \dot{E}x_{10} - \dot{E}x_3$$

$$\dot{E}x_D = 58049,28229 \text{ kW} + 6076,4665 \text{ kW} - 45673,8180 \text{ kW} \\ - 3218,048 \text{ kW}$$

$$\dot{E}x_D = 15233,8826 \text{ kW}$$

Adapun efisiensi eksergetik LPH 7 yaitu

$$\psi_{HTR} = \frac{\dot{E}x_{10} - \dot{E}x_9}{\dot{E}x_2 - \dot{E}x_3}$$

$$\psi_{HTR} = \frac{45673,8180 \text{ kW} - 6076,4665 \text{ kW}}{58049,28229 \text{ kW} - 3218,048 \text{ kW}}$$

$$\psi_{HTR} = 72,2168 \%$$

3.5.4 LT Recuperator

Laju aliran destruksi eksergi dari LT Recuperator dapat dicari dengan menggunakan neraca eksergi yaitu.

$$\dot{E}x_3 + \dot{E}x_8 = \dot{E}x_9 + \dot{E}x_4 + \dot{E}x_D$$

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_8 - \dot{E}x_9 - \dot{E}x_4$$

$$\dot{E}x_D = 3218,048 \text{ kW} + 41827,4878 \text{ kW} - 6076,4665 \text{ kW} \\ - 54175,54521 \text{ kW}$$

$$\dot{E}x_D = 15206,4428 \text{ kW}$$

Adapun efisiensi eksergetik LTR yaitu:

$$\psi_{LTR} = \frac{\dot{E}x_9 - \dot{E}x_8}{\dot{E}x_3 - \dot{E}x_4}$$

$$\psi_{LTR} = \frac{6076,4665 \text{ kW} - 41827,4878 \text{ kW}}{3218,048 \text{ kW} - 54175,54521 \text{ kW}}$$

$$\psi_{LPH7} = 70,17 \%$$

3.5.5 Kondensor

Laju destruksi eksergi dari kondensor dapat dicari dengan menggunakan neraca eksergi seperti berikut :

$$\dot{E}x_5 + \dot{E}x_6 + \dot{E}x_{15} = \dot{E}x_7 + \dot{E}x_{16} + \dot{E}x_D$$

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_5 + \dot{E}x_6 + \dot{E}x_{15} - \dot{E}x_7 - \dot{E}x_{16}$$

$$\dot{E}x_D = 59200,7135 + 8475,0377 + 3418,0043 - 41345,6741$$

$$- 2916,5385$$

$$\dot{E}x_D = 26831,5429 \text{ kW}$$

adapun efisiensi eksergetik dari kondensor yaitu

$$\psi_{kondensor} = \frac{\dot{E}x_{15} - \dot{E}x_{16}}{(\dot{E}x_7 - \dot{E}x_5 - \dot{E}x_6)}$$

$$\psi_{kondensor} = \frac{2916,5385 \text{ kW} - 3418,0043 \text{ kW}}{41345,6741 \text{ kW} - 59200,7135 \text{ kW} + 8475,0377 \text{ kW}}$$

$$\psi_{kondensor} = 1,90 \%$$

3.5.6 Pompa

Laju destruksi eksergi dari pompa dapat dicari dengan menggunakan neraca eksergi pada Persamaan :

$$\dot{E}x_7 + \dot{E}x_{W,CEP} = \dot{E}x_8 + \dot{E}x_D$$

Sebelum mencari destruksi eksergi, terlebih dahulu mencari nilai laju aliran kerja dari pompa kondensar \dot{W}_{cep} dengan menggunakan neraca energi pada Persamaan 2.48

$$\dot{m}_7 h_7 + \dot{W}_{cep} = \dot{m}_8 h_8$$

$$\dot{W}_{cep} = \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_7 h_7$$

$$\dot{W}_{cep} = (467,1 \times -13) - (467,1 \times -15)$$

$$\dot{W}_{cep} = 934,2 \text{ kW}$$

berdasarkan Persamaan 2.19 yang menyatakan $\dot{E}x_W = \dot{W}_{usefull}$, maka didapatkan nilai eksergi yang berkaitan dengan aliran kerja adalah

$$\dot{W}_{pmp} = \dot{E}x_{W,pmp} = 934,2 \text{ kW}$$

maka laju aliran destruksi eksergi didapatkan sebesar

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_7 + \dot{E}x_{W,pmp} - \dot{E}x_8$$

$$\dot{E}x_D = 41345,6741 \text{ kW} + 934,2 \text{ kW} - 41827,4878 \text{ kW}$$

$$\dot{E}x_D = 452,3863 \text{ kW}$$

Adapun efisiensi eksergetik nya didapatkan dengan persamaan berikut

$$\psi_{CEP} = \frac{\dot{E}x_8 - \dot{E}x_7}{\dot{E}x_{W,pmp}}$$

$$\psi_{CEP} = \frac{41827,4878 \text{ kW} - 41345,6741 \text{ kW}}{934,2 \text{ kW}}$$

$$\psi_{CEP} = 51,575\%$$

3.5.7 Heat Exchangers 2

Laju aliran destruksi eksergi dari Heat Exchangers 2 dapat dicari dengan menggunakan neraca eksergi yaitu.

$$\dot{E}x_{13} + \dot{E}x_{10} = \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{14} + \dot{E}x_D$$

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_{13} + \dot{E}x_{10} - \dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{14}$$

$$\dot{E}x_D = 16492,2858 \text{ kW} + 45673,8180 \text{ kW} - 5212,7877 \text{ kW} - 8900,0135 \text{ kW}$$

$$\dot{E}x_D = 2439,5409 \text{ kW}$$

Adapun efisiensi eksergetik HE 2 yaitu

$$\psi_{HE2} = \frac{\dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{10}}{\dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{14}}$$

$$\psi_{HE2} = \frac{5212,7877 \text{ kW} - 45673,8180 \text{ kW}}{16492,2858 \text{ kW} - 8900,0135 \text{ kW}}$$

$$\psi_{HE1} = 60,83 \%$$

Dengan menerapkan pola perhitungan yang sama, maka akan didapatkan juga hasil destruksi eksergi dan efisiensi eksergi dari variasi sampel temperatur lingkungan lainnya, perhitungan ini menunjukkan besaran destruksi eksergi yang terjadi di setiap komponen kerja Siklus Kalina KCS-11. Destruksi eksergi akan mengindikasikan berapa besaran nilai kerja bermanfaat yang hilang dan hancur selama proses yang terjadi di dalam sistem kerja komponen berlangsung.

Tabel 4. 4 Nilai Destruksi Eksergi

Komponen	\dot{E}_{x_D} (kW)
	$T_o = 30^\circ\text{C}$
Heat Exchangers 1	23160,79
Turbin	2952,81
HT Recuperator	15233,88
LT Recuperator	15206,44
Kondensor	26831,54
Pump	452,38
Heat Exchangers 2	2439,54
Drum Tank	13500,23

² Pada Tabel 4.5 merepresentasikan nilai efisiensi eksergi dari setiap komponen kerja Siklus Kalina KCS-11. Pada Tabel 4.5 juga dapat dilihat komponen mana yang memiliki efisiensi paling rendah sehingga nantinya akan perlu perhatian dan perbaikan lebih terhadap komponen yang memiliki efisiensi rendah. Dengan menjaga nilai-nilai efisiensi komponen yang telah dinilai tinggi serta menindaklanjuti efisiensi komponen-komponen dengan nilai yang rendah akan berdampak kepada efisiensi siklus pembangkit secara keseluruhan. Dalam perhitungan ini, rumus yang digunakan dalam mencari nilai efisiensi eksergi setiap komponen adalah dengan membandingkan nilai eksergi produk yang dihasilkan oleh sistem terhadap eksergi bahan bakar yang digunakan oleh sistem

untuk dapat menghasilkan produk. Hasil daripada nilai efisiensi eksergi masing-masing komponen ini akan dapat memberikan penilaian terhadap performansi dari komponen tersebut.

Tabel 4. 5 Efisiensi Eksergetik

Komponen	ψ (%)
	To = 30°C
Heat Exchangers 1	28,43
Turbin	56,94
HT Recuperator	72,21
LT Recuperator	70,15
Kondensor	1,90
Pump	51,57
Heat Exchangers 2	60,82
Drum Tank	80,05

3.6 Analisis Eksergoekonomi

Analisis eksergoekonomi merupakan kombinasi dari analisa eksergi dan ekonomi yang digunakan untuk mendapatkan perhitungan desain dan pengoperasian dari sebuah sistem yang efektif dari segi biaya. Tujuan dari analisis eksergoekonomi ini adalah untuk mengetahui nilai biaya yang diakibatkan oleh destruksi eksergi serta nilai performansi dari segi biaya komponen tersebut. Dalam melaksanakan analisis eksergoekonomi dari siklus kalina KCS-11, perlu diketahui data biaya investasi, operasional dan perawatan pada masing-masing komponen untuk melihat nilai performansi, nilai ini didapat dari literatur yang sudah dilihat.

Tabel 4. 6 Data Biaya Investasi, Operasi, dan Perawatan Komponen

Komponen	\dot{Z} (USD/h)
Heat Exchanger	1,313
Recuperator	22,12
Turbine	20,2
Generator	86,71
Kondenser	130,06
Pump	1,094

3.6.1 Turbin

Untuk melakukan analisis eksergoekonomi, terlebih dahulu mencari nilai biaya per unit eksergi (c) dari setiap aliran yang ada dengan bantuan hubungan-hubungan termoekonomi (Bejan, dkk., 1996).

Dalam komponen Heat Exchanger 1 diterapkan neraca biaya sebagai berikut :

$$c_1 \dot{E}x_1 + \dot{Z}_{turbin} = c_2 \dot{E}x_2 + c_w \dot{E}x_{W,turbin}$$

hubungan termoekonomi pada neraca ini adalah $c_1 = c_2 = c_3 = c_4$ Nilai c_w diambil dari harga listrik rata-rata per kWh saat ini yaitu sebesar 0,098 USD/kWh.

Dengan total biaya operasi dan perawatan Turbin yang didasarkan pada Tabel di atas sebesar $\dot{Z}_{turbin} = 20,2 \text{ USD/h}$ dan $\dot{W}_{x_{W,turbin}} = 376,78 \text{ kW}$, maka dapat ditentukan :

$$c_1 = \frac{c_w \dot{W}_{turbin} - \dot{Z}_{turbin}}{\dot{E}x_1 - \dot{E}x_2}$$

$$c_1 = \frac{\left(0,098 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times 376,78 \text{ kW}\right) - 20,2 \frac{\text{USD}}{\text{h}}}{64907,7115 \text{ kW} - 58049,28229 \text{ kW}}$$

$$c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 0,0572 \text{ USD/kWh}$$

dengan menggunakan Persamaan 2.22 dapat diperoleh laju aliran harga (USD/h) dan eksergi (kW) *fuel* pada turbine :

$$c_F = \frac{\dot{C}_F}{\dot{E}x_F}$$

$$c_F = \frac{(c_1 \dot{E}x_1) - (c_2 \dot{E}x_2)}{\dot{E}x_1 - \dot{E}x_2}$$

sehingga didapatkan nilai c_F sebesar 0,0572 USD/kWh.

Nilai c_F digunakan dalam memperhitungkan biaya yang diakibatkan destruksi eksergi dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{C}_d = c_F \times \dot{E}x_{d,hpt}$$

$$\dot{C}_d = 0,0572 \times 602,059$$

$$\dot{C}_d = 256,2858 \text{ USD/h}$$

faktor f dari komponen HE1 menggunakan Persamaan 2.26 sebagai berikut:

$$f_{hpt} = \frac{\dot{Z}_{turb}}{\dot{Z}_{turb1} + \dot{C}_{d,turb1}}$$

$$f_{hpt} = \frac{119,46}{119,46 + 256,2858}$$

$$f_{hpt} = 41,41 \%$$

3.6.2 Drum Tank

Dalam komponen Drum tank diterapkan neraca biaya sebagai berikut :

$$c_4 \dot{E}x_4 + \dot{Z}_{drumtnk} = c_5 \dot{E}x_5 + c_6 \dot{E}x_6$$

hubungan termoekonomi pada neraca ini adalah $c_5 = c_6$.

Dengan total biaya operasi dan perawatan Drum Tank yang didasarkan pada sebesar $\dot{Z}_{drumtnk} = 2,6419 \text{ USD/h}$ maka dapat ditentukan:

$$c_5 = \frac{c_4 \dot{E}x_4 + \dot{Z}_{drumtnk}}{\dot{E}x_5 + \dot{E}x_6}$$

$$c_5 = \frac{\left(0,0572 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times 54175,54521 \text{ kW}\right) + 2,6419 \frac{\text{USD}}{\text{h}}}{59200,7135 \text{ kW} + 8475,0377 \text{ kW}}$$

$$c_5 = c_6 = 0,0458 \text{ USD/kWh}$$

dengan menggunakan Persamaan 2.22 dapat diperoleh laju aliran harga (USD/h)

dan eksergi (kW) *product* pada drum tank:

$$c_F = \frac{\dot{C}_F}{\dot{E}x_F}$$

$$c_F = \frac{(c_4 \dot{E}x_4) - (c_5 \dot{E}x_5 + c_6 \dot{E}x_6)}{\dot{E}x_4 - \dot{E}x_5 - \dot{E}x_6}$$

sehingga didapatkan nilai c_p sebesar 2,5184 USD/kWh.

Nilai c_p digunakan dalam memperhitungkan biaya yang diakibatkan destruksi eksergi dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{C}_d = c_p \times \dot{E}x_{d,drumtank}$$

$$\dot{C}_d = 2,5184 \times 104901,1879 \text{ kW}$$

$$\dot{C}_d = 2,6419 \text{ USD/h}$$

faktor f dari komponen Drum tank sebagai berikut:

$$f_{drmtnk} = \frac{\dot{Z}_{drmtnk}}{\dot{Z}_{drmtnk} + \dot{C}_{d,drmtnk}}$$

$$f_{drmtnk} = \frac{2,6419}{2,6419 + 2,6419}$$

$$f_{drmtnk} = 11,40 \%$$

3.6.3 Kondensator

Pada kondensator diterapkan neraca biaya sebagai berikut :

$$c_5 \dot{E}x_5 + c_6 \dot{E}x_6 + c_{15} \dot{E}x_{15} + \dot{Z}_{kond} = c_7 \dot{E}x_7 + c_{16} \dot{E}x_{16}$$

hubungan termoekonomi pada neraca ini adalah $c_5 = c_6$, sedangkan nilai dari $c_{15} = c_{16} = 0$ karena aliran ini diambil secara langsung dari alam (sungai). maka dengan nilai yang ada di dapatkan nilai c_7 sebagai berikut:

$$c_7 = \frac{c_{13}(\dot{E}x_{13} + \dot{E}x_{31}) + \dot{Z}_{kond}}{\dot{E}x_{14}}$$

$$c_7 = \frac{0,0458 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} (59200,7135 \text{ kW} + 8475,0377 \text{ kW}) + 130,06 \frac{\text{USD}}{\text{h}}}{41345,6741}$$

$$c_7 = 0,0750 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}}$$

dengan menggunakan Persamaan 2.22 dapat diperoleh laju aliran harga (USD/h) dan eksergi (kW) *fuel* pada kondensator:

$$c_F = \frac{\dot{C}_F}{\dot{E}x_p}$$

$$c_F = \frac{(c_5 \dot{E}x_5) - (c_7 \dot{E}x_7) + (c_6 \dot{E}x_6)}{\dot{E}x_5 - \dot{E}x_7 + \dot{E}x_6}$$

sehingga didapatkan nilai c_F sebesar 0,07578 USD/kWh

nilai c_F ini dapat digunakan untuk menentukan nilai biaya destruksi eksergi komponen kondensor menggunakan Persamaan 2.24 berikut:

$$c_{d,kond} = c_F \times \dot{E}x_{d,kond}$$

$$c_{d,kond} = 0,07578 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times 26831,5429 \text{ kW}$$

$$c_{d,kond} = 2223,7622 \frac{\text{USD}}{\text{h}}$$

faktor f dari komponen kondensor menggunakan Persamaan 2.26 sebagai berikut:

$$f_{kond} = \frac{\dot{Z}_{kond}}{\dot{Z}_{kond} + \dot{C}_{d,kond}}$$

$$f_{kond} = \frac{130,06 \frac{\text{USD}}{\text{h}}}{130,06 \frac{\text{USD}}{\text{h}} + 2223,7622 \frac{\text{USD}}{\text{h}}}$$

$$f_{kond} = 5,525 \%$$

3.6.4 Pompa

Pada pompa kondensat diterapkan neraca biaya sebagai berikut :

$$c_7 \dot{E}x_7 + c_w \dot{E}x_{W,Pump} + \dot{Z}_{Pump} = c_8 \dot{E}x_8$$

Nilai c_w diambil dari nilai biaya harga listrik rata-rata yaitu 0,098 USD/kWh. dengan nilai \dot{Z}_{CEP} yang diambil dari Tabel 5.7, maka didapatkan nilai c_{15}

$$c_8 = \frac{c_7 \dot{E}x_7 + c_w \dot{E}x_{W,CEP} + \dot{Z}_{CEP}}{\dot{E}x_8}$$

$$c_8 = \frac{\left(0,044 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times 41345,6741 \text{ kW}\right) + \left(0,098 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times 934,2 \text{ kW}\right) + 1,094 \frac{\text{USD}}{\text{h}}}{41827,4878 \text{ kW}}$$

$$c_8 = 0,0763 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}}$$

Laju aliran harga dan eksergi produk dari pompa kondensat diperoleh menggunakan Persamaan 2.23

$$c_p = \frac{\dot{C}_p}{\dot{E}x_p}$$

$$c_p = \frac{(c_8 \dot{E}x_8) - (c_7 \dot{E}x_7)}{\dot{E}x_8 - \dot{E}x_7}$$

didapatkan nilai c_p pompa kondensat sebesar 0,1922 USD/kWh.

dengan nilai c_p pompa kondensat, dapat dicari nilai biaya yang diakibatkan destruksi eksergi pada sistem yaitu sebagai berikut:

$$c_{d,cep} = c_p \times \dot{E}x_{d,cep}$$

$$c_{d,cep} = 0,1922 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times 452,3863 \text{ kW}$$

$$c_{d,cep} = 86,9871 \frac{\text{USD}}{\text{h}}$$

faktor f dari komponen pompa kondensat yaitu:

$$f_{cep} = \frac{\dot{Z}_{cep}}{\dot{Z}_{cep} + \dot{C}_{d,cep}}$$

$$f_{cep} = \frac{1,094 \frac{\text{USD}}{\text{h}}}{1,094 \frac{\text{USD}}{\text{h}} + 86,9871 \frac{\text{USD}}{\text{h}}}$$

$$f_{cep} = 1,24 \%$$

3.6.5 LT Recuperator

Pada LPH 7 diterapkan neraca biaya sebagai berikut :

$$c_8 \dot{E}x_8 + c_3 \dot{E}x_3 + \dot{Z}_{ltrecu} = c_9 \dot{E}x_9 + c_4 \dot{E}x_4$$

Persamaan termoekonomi pada neraca ini adalah $c_3 = c_4$, serta nilai \dot{Z}_{ltrecu} yang diambil dari Tabel 5.7, maka didapatkan nilai c_{16} sebagai berikut :

$$c_9 = \frac{c_8 \dot{E}x_8 + c_3 (\dot{E}x_3 - \dot{E}x_4) + \dot{Z}_{ltrecu}}{\dot{E}x_9}$$

$$c_9 = \frac{(0,0763 \frac{USD}{kWh} \times 41827,4878 \text{ kW}) + 0,0572 \frac{USD}{kWh} (3218,048 \text{ kW} - 54175,54521 \text{ kW}) + 22,12 \text{ USD/h}}{6076,4665 \text{ kW}}$$

$$c_9 = 0,0493 \frac{USD}{kWh}$$

dengan menggunakan Persamaan 2.23 dapat diperoleh laju aliran harga (USD/h) dan eksergi (kW) produk pada LT Recuperator:

$$c_P = \frac{\dot{C}_P}{\dot{E}x_P}$$

$$c_P = \frac{(c_9 \dot{E}x_9) - (c_8 \dot{E}x_8)}{\dot{E}x_9 - \dot{E}x_8}$$

didapatkan nilai c_P dari LPH 7 sebesar 0,0809 USD/kWh.

biaya destruksi eksergi dari LPH 7 dengan diketahui nilai c_P nya yaitu:

$$c_{d,ltrecu} = c_P \times \dot{E}x_{d,ltrecu}$$

$$c_{d,ltrecu} = 0,0809 \frac{USD}{kWh} \times 15206,4428 \text{ kW}$$

$$c_{d,ltrecu} = 1231,3327 \text{ USD/h}$$

faktor f dari komponen LT Recuperator ini adalah:

$$f_{ltrecu} = \frac{\dot{Z}_{ltrecu}}{\dot{Z}_{ltrecu} + \dot{C}_{d,ltrecu}}$$

$$f_{ltrecu} = \frac{22,12 \frac{USD}{h}}{22,12 \frac{USD}{h} + 1231,3327 \frac{USD}{h}}$$

$$f_{lph 7} = 1,76\%$$

3.6.6 HT Recuperator

Pada LPH 7 diterapkan neraca biaya sebagai berikut :

$$c_9 \dot{E}x_9 + c_2 \dot{E}x_2 + \dot{Z}_{htrecu} = c_{10} \dot{E}x_{10} + c_3 \dot{E}x_3$$

Persamaan termoekonomi pada neraca ini adalah $c_2 = c_3$, serta nilai \dot{Z}_{htrecu} yang diambil dari Tabel 5.7 , maka didapatkan nilai c_{16} sebagai berikut :

$$c_{10} = \frac{c_9 \dot{E}x_9 + c_2 (\dot{E}x_2 - \dot{E}x_3) + \dot{Z}_{ht\ recu}}{\dot{E}x_{10}}$$

$$c_{10} = \frac{\left(0,0493 \frac{USD}{kWh} \times 41827,4878\ kW\right) + 0,0572 \frac{USD}{kWh} \times (58049,2822 - 3218,048) + 22,12\ USD/h}{45673,8180\ kW}$$

$$c_{10} = 0,0757 \frac{USD}{kWh}$$

dengan menggunakan Persamaan 2.23 dapat diperoleh laju aliran harga (USD/h) dan eksergi (kW) produk pada LT Recuperator:

$$c_p = \frac{\dot{C}_p}{\dot{E}x_p}$$

$$c_p = \frac{(c_{10} \dot{E}x_{10}) - (c_9 \dot{E}x_9)}{\dot{E}x_{10} - \dot{E}x_9}$$

didapatkan nilai c_p dari LPH 7 sebesar 0,0798 USD/kWh.

biaya destruksi eksergi dari LPH 7 dengan diketahui nilai c_p nya yaitu:

$$c_{d,ltrecu} = c_p \times \dot{E}x_{d,ltrecu}$$

$$c_{d,ltrecu} = 0,0798 \frac{USD}{kWh} \times 15233,8826\ kW$$

$$c_{d,ltrecu} = 1216,0644\ USD/h$$

faktor f dari komponen HT Recuperator ini adalah:

$$f_{ltrecu} = \frac{\dot{Z}_{ltrecu}}{\dot{Z}_{ltrecu} + \dot{C}_{d,ltrecu}}$$

$$f_{ltrecu} = \frac{22,12 \frac{USD}{h}}{22,12 \frac{USD}{h} + 1216,0644 \frac{USD}{h}}$$

$$f_{lph\ 7} = 1,7864\ \%$$

3.6.7 Heat Exchanger 2

Dalam komponen Heat Exchanger 2 diterapkan neraca biaya sebagai berikut:

$$c_{10} \dot{E}x_{10} + c_{13} \dot{E}x_{13} + \dot{Z}_{he2} = c_{11} \dot{E}x_{11} + c_{14} \dot{E}x_{14}$$

hubungan termoeconommi pada neraca ini adalah. Nilai $c_{13} = c_{14} = 0,0468$ diambil dari harga listrik rata-rata per kWh saat ini yaitu sebesar 0,098 USD/kWh.

Dengan total biaya operasi dan perawatan HE2 yang didasarkan pada Tabel 5.7 sebesar $\dot{Z}_{he2} = 18,06 \text{ USD/h}$ dan $\dot{W}_{x_{W,HE2}} = 175455,95 \text{ kW}$, maka dapat ditentukan:

$$c_{11} = \frac{c_{10}\dot{E}x_{10} + c_{13}\dot{E}x_{13} + \dot{Z}_{he2} - c_{14}\dot{E}x_{14}}{\dot{E}x_{11}}$$

$$= \frac{0,0468 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times 16492,2858 + 1,313 \text{ USD/h} - 0,0468 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times 8900,01}{5212,7877 \text{ kW}}$$

$$c_{11} = 0,0685 \text{ USD/kWh}$$

dengan menggunakan Persamaan 2.22 dapat diperoleh laju aliran harga (USD/h) dan eksergi (kW) *fuel* pada HE1 :

$$c_p = \frac{\dot{C}_F}{\dot{E}x_F}$$

$$c_p = \frac{(c_{11}\dot{E}x_{11}) - (c_{10}\dot{E}x_{10})}{\dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{10}}$$

sehingga didapatkan nilai c_p sebesar 0,0355 USD/kWh.

Nilai c_p digunakan dalam memperhitungkan biaya yang diakibatkan destruksi eksergi dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{C}_d = c_p \times \dot{E}x_{d,he2}$$

$$\dot{C}_d = 0,0355 \times 2439,5409$$

$$\dot{C}_d = 86,7257 \text{ USD/h}$$

faktor f dari komponen HE1 menggunakan Persamaan 2.26 sebagai berikut:

$$f_{he2} = \frac{\dot{Z}_{he2}}{\dot{Z}_{he2} + \dot{C}_{d,he2}}$$

$$f_{he2} = \frac{18,06}{18,06 + 86,7257}$$

$$f_{he2} = 1,4913 \%$$

Untuk mencapai perbaikan dalam desain sistem termal, tidak hanya aspek teknis yang perlu diperhitungkan, tetapi juga performansi ekonomi harus menjadi pertimbangan utama. Pendekatan biaya berbasis eksergi digunakan untuk menilai biaya produk serta kerugian eksergi atau irreversibilitas yang terjadi selama proses berlangsung.

Tabel 4. 7 Laju Biaya Aliran Eksergi

Titik	<i>c</i>
	(USD/kWh) To = 30 °C
1	0,0572
2	0,0572
3	0,0572
4	0,0572
5	0,0458
6	0,0458
7	0,0750
8	0,0763
9	0,0493
10	0,07570
11	0,0739
12	0,0468
13	0,0468
14	0,0468
15	0
16	0

Dalam perhitungan tersebut, biaya destruksi eksergi dihitung dengan mengalikan biaya aliran produk atau bahan bakar dengan nilai destruksi eksergi pada setiap komponen. Sementara itu, faktor *f* dihitung dengan membandingkan biaya investasi, operasi, dan pemeliharaan terhadap biaya destruksi eksergi,

ditambah dengan biaya investasi, operasi, dan pemeliharaan untuk setiap komponen.

Tabel 4. 8 Laju Biaya Destruksi Eksergi

Komponen	\dot{Z}_k (USD/h)	\dot{C}_D (USD/h)
		$T_o = 20\text{ }^\circ\text{C}$
Heat Exchangers	18,06	238,54561
1		
Turbin	119,46	15,04545
HT Recuperator	22,12	1216,064408
LT Recuperator	22,12	1231,3327
Drum Tank	2,6419	2,6419
Kondensor	130,06	2223,762
Pump	16,55	86,9871
Heat Exchangers	18,06	86,7257
2		

Tabel 4.8 menggambarkan jumlah biaya yang timbul akibat destruksi eksergi pada setiap komponen dalam Siklus Kalina KCS-11. Biaya destruksi eksergi ini memiliki dampak signifikan pada kinerja secara ekonomi, mempengaruhi efektivitas biaya investasi, operasional, dan pemeliharaan dari setiap komponen dalam siklus tersebut.

Tabel 4. 9 Nilai Faktor f

Komponen	\dot{Z}_k (USD/h)	f (%)
		$T_o = 30\text{ }^\circ\text{C}$
Heat Exchangers	18,06	7,03
1		
Turbin	119,46	41,50

HT Recuperator	22,12	1,78
LT Recuperator	22,12	1,76
Drum Tank	2,6419	11,40
Kondensor	130,06	5,52
Pump	16,55	1,24
Heat Exchangers	18,06	1,49

Tabel 4.9 mencantumkan nilai faktor f pada setiap komponen kerja. Faktor f ini mencerminkan perbandingan antara biaya investasi, operasional, dan pemeliharaan suatu komponen terhadap total biaya destruksi eksergi serta biaya investasi, operasional, dan pemeliharaan komponen tersebut. Faktor f memberikan gambaran tentang seberapa efektif suatu komponen ketika dilihat dari perspektif pengeluaran biaya. Nilai faktor f dapat dihitung dengan membandingkan laju biaya investasi, operasional, dan pemeliharaan komponen dengan total biaya destruksi eksergi dari komponen yang sedang dianalisis.

3.7 Hasil dan Pembahasan

Setelah melakukan perhitungan data terkait analisis eksergi dan analisis eksergoekonomi pada sistem siklus Kalina, diperoleh nilai-nilai seperti destruksi eksergi, efisiensi eksergi, biaya yang timbul akibat destruksi eksergi, dan performansi biaya yang direpresentasikan oleh faktor f untuk setiap komponen kerja. Data yang telah dianalisis ini kemudian disajikan melalui pembahasan visual menggunakan grafik.

3.7.1 Destruksi Eksergi

Berdasarkan hasil daripada analisis eksergi yang telah dilakukan, dengan melakukan variasi nilai destruksi eksergi terhadap sistem siklus kalina

didapatkan nilai-nilai laju destruksi eksergi yang terjadi pada setiap komponen kerja siklus kalina KCS-11. Kondensor menjadi komponen yang memiliki nilai destruksi eksergi paling tinggi dan Kontributor terbesar dalam total destruksi eksergi komponen siklus kalina KCS-11 yaitu 26831,5429 kW pada temperatur lingkungan 30°C. Kondensor berada pada urutan kedua dengan nilai destruksi eksergi mencapai 23160,7909 kW. Turbin memiliki nilai destruksi eksergi 276,3171 kW dan HT Recuperator, LT Recuperator, HE2 memiliki nilai destruksi eksergi 15233,8826 kW, 15206,4428 kW, 2439,5409 kW, serta Drum Tank 104901,1879 kW. Pompa memiliki nilai paling kecil yaitu 452,386333 kW.

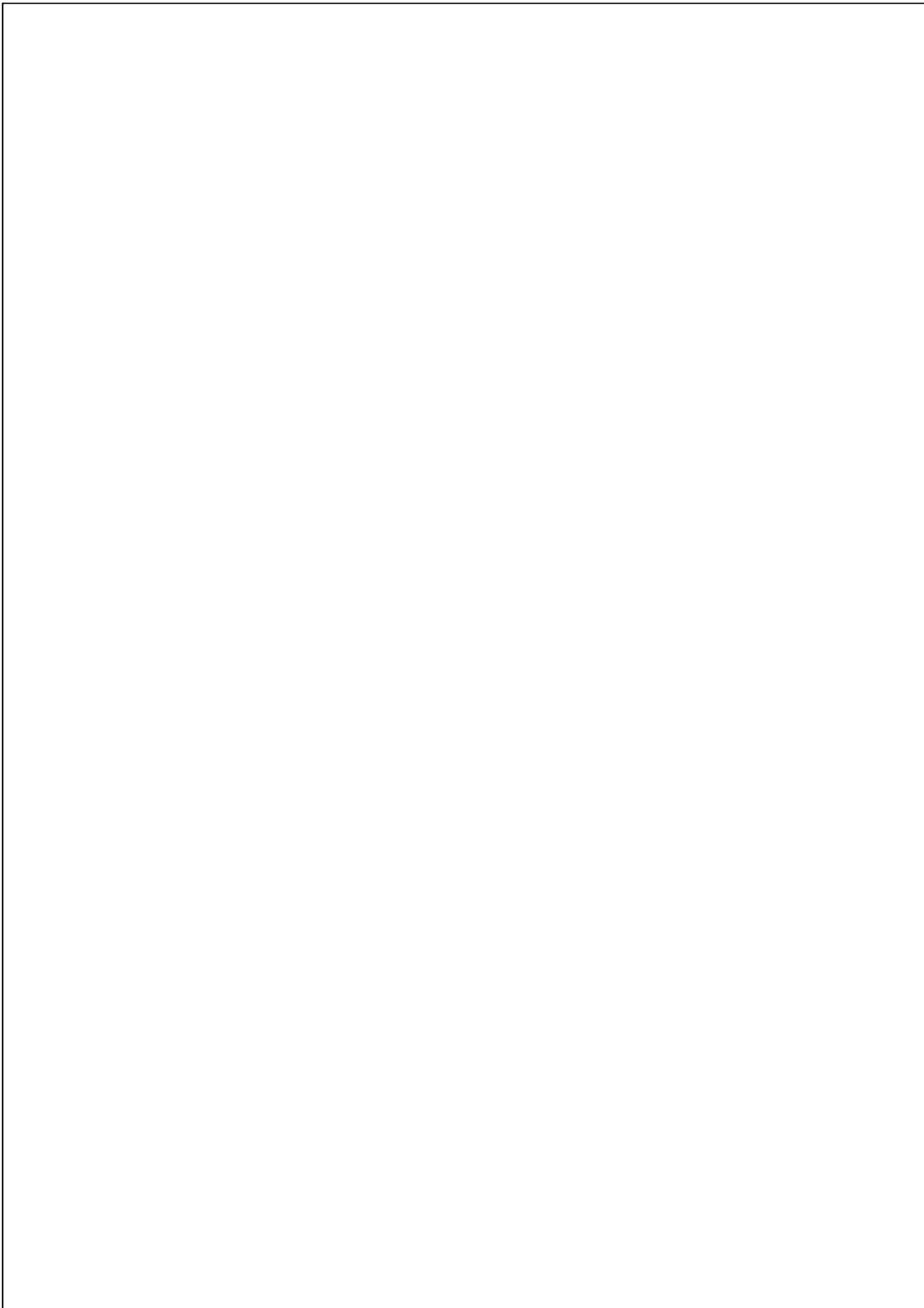
3.7.2 Efisiensi Eksergi

Berdasarkan hasil daripada analisis eksergi yang telah dilakukan, dengan melakukan perhitungan nilai efisiensi eksergi terhadap sistem siklus kalina KCS-11 didapatkan nilai-nilai laju destruksi eksergi yang terjadi pada setiap komponen kerja siklus kalina KCS-11. Drum Tank menjadi komponen yang memiliki nilai efisiensi eksergi paling tinggi dan Kontributor terbesar dalam total destruksi eksergi komponen siklus kalina KCS-11 yaitu 80,04% pada temperatur lingkungan 30°C. HT Recuperator berada pada urutan kedua dengan nilai efisiensi eksergi mencapai 72,2168 %. LT Recuperator memiliki nilai efisiensi eksergi 70,1696 %. Pada Heat Exchangers 1 memiliki nilai lebih kecil dibanding heat exchanger lainnya, nilai efisiensi ekserginya yaitu 18,58 %, Heat Exchangers 2 60,8269 dan turbin memiliki nilai efisiensi eksergi pada nilai 56,9461 %. Pompa memiliki nilai paling kecil yaitu 1,9 %. Tinggi rendahnya nilai efisiensi bergantung dengan perbandingan seberapa besar eksergi yang masuk serta eksergi yang keluar.

3.7.3 Kerugian Biaya dan Faktor F

Berdasarkan hasil analisis eksergoekonomi yang telah dilakukan, Kondensor memiliki biaya destruksi Eksergi terbesar yaitu 2223,762 \$/hr, *High Temperature Recuperator* serta *Low Temperature Recuperator* berada urutan kedua dan ketiga dengan nilai biaya destruksi eksergi 1216,0644 \$/hr dan 1231,3327 \$/hr. Sedangkan pada *Heat Exchangers* memiliki nilai biaya destruksi eksergi 256,2858 \$/hr dan pada Turbin memiliki nilai 238,54561 \$/hr. Pada Pompa memiliki nilai laju biaya destruksi eksergi 86,9871 \$/hr dan pada *Heat Exchangers 2* memiliki nilai 86,7262 \$/hr. Drain tank menjadi komponen yang memiliki nilai laju biaya destruksi eksergi terendah yaitu 2,6419\$/hr. Komponen yang memiliki nilai laju biaya destruksi eksergi yang tinggi terjadi diakibatkan besarnya destruksi Eksergi yang terjadi pada komponen tersebut seperti kondensor, *high temperature recuperator*, dan *low temperature recuperator*.

Pada komponen-komponen kerja siklus kalina KCS-11, terlihat bahwa faktor f pada Turbin memiliki nilai berada pada nilai 41% yang berarti nilai biaya kerugian akibat kehilangan eksergi lebih kecil dibandingkan dengan laju biaya investasi. *Drum Tank* memiliki nilai yang tempat 50%, yang dimana biaya investasi memiliki nilai yang berimbang dengan laju biaya destruksi eksergi. Pada komponen kerja lainnya terlihat bahwa faktor f pada komponen-komponen kerja lainnya memiliki nilai yang rendah, hal itu mendanakan bahwa nilai biaya kerugian akibat kehilangan eksergi lebih besar dibandingkan dengan laju biaya investasi komponen kerja. Dimana komponen lain seperti *High and Low Temperature Recuperator*, *Heat Exchangers 1 and 2* memiliki faktor f dibawah 0,1 atau 10%. Kondensor serta pompa juga memiliki nilai yang rendah sama seperti komponen yang memiliki nilai dari faktor f dibawah 10%



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis eksergi dan eksergoeknomi yang telah dibahas pada bab sebelumnya, kesimpulan yang dapat diambil adalah :

1. Heat Exchanger menjadi komponen kerja yang memiliki destruksi Eksergi paling besar
2. Komponen kerja yang memiliki efisiensi Eksergi paling tertingi adalah Drum Tank atau High dan Low Temperature Recuperator
3. Komponen kerja yang memiliki biaya destruksi Eksergi paling besar adalah Heat Exchangers 1, ini selaras dengan besarnya destruksi Eksergi pada Heat Exchangers 1
4. Komponen Heat Exchangers 1 yang memiliki faktor f terendah, mendanakan tidak efektifnya modal biaya operasi terhadap kerugian biaya akibat destruksi eksergi, dimana faktor f merupakan besaran yang menunjukkan seberapa efektif modal biaya operasi dan perawatan mesin terhadap total kerugian biaya akibat destruksi eksergi.

4.2 Saran

Diperlukan adanya peningkatan performansi pada komponen kerja sistem siklus kalina KCS-11, terutama pada komponen Heat Exchangers 1. Oleh karena masih kurang efisiennya proses perpindahan kalor pada Heat Exchangers 1. Namun peningkatan efisiensi juga harus mengkaji lebih lanjut dengan

mempertimbangkan faktor ekonomi pula, salah satunya dengan mengkaji nilai faktor f dari setiap komponen sistem siklus kalina KCS-11.

Dalam melakukan analisis performansi, harus lebih mendalami tentang properti fluida ammonia-air dalam perhitungan eksergi. Dalam perhitungan eksergi menggunakan aplikasi haruslah memiliki pengetahuan lebih dalam penggunaan aplikasi perhitungan agar didapatkan hasil yang lebih akurat. Data operasi aktual yang didapatkan dari pembangkit geothermal yang ada di Indonesia dari setiap komponen harus lebih diperhatikan lagi. Selain itu, untuk mendapatkan hasil analisis performansi dari segi ekonomi, sebaiknya digunakan data aktual mengenai biaya investasi, operasi dan perawatan setiap komponen agar didapatkan hasil analisis yang lebih akurat dan optimal.

Analisis Eksergoekonomi pada Pemanfaatan Limbah Panas PLTP untuk Siklus Kalina KCS-11

ORIGINALITY REPORT

9%

SIMILARITY INDEX

9%

INTERNET SOURCES

0%

PUBLICATIONS

1%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	ejournal.itenas.ac.id Internet Source	3%
2	repository.its.ac.id Internet Source	2%
3	lib.ui.ac.id Internet Source	1%
4	eurekaunima.com Internet Source	1%
5	etd.repository.ugm.ac.id Internet Source	1%
6	Submitted to Politeknik Negeri Bandung Student Paper	1%
7	www.kompas.com Internet Source	1%

Exclude quotes On

Exclude matches < 1%

Exclude bibliography On

SURAT KETERANGAN PENGECEKAN SIMILARITY

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Muhammad Reza Rizky Sinatria
Nim : 03051281924075
Prodi : Teknik Mesin

Menyatakan bahwa benar hasil pengecekan similarity yang berjudul “Analisis Eksergoekonomi pada Pemanfaatan Limbah Panas PLTP untuk Siklus Kalina KCS-11” adalah 9%.

Dicek oleh operator *: 1. Dosen Pembimbing

② UPT Perpustakaan

3. Operator Fakultas Teknik

Demikianlah surat keterangan ini saya buat dengan sebenarnya dan dapat saya pertanggung jawabkan.

Indralaya, Januari 2023

Menyetujui
Dosen pembimbing,

Yang menyatakan,



Ir. Dyos Santoso, M.T.
NIP. 196012231991021001

Muhammad Reza Rizky S
NIM. 03051281924075

***Lingkari salah satu jawaban, tempat anda melakukan pengecekan Similarity**