

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 HUKUM TERMODINAMIKA

2.1.1 *The zeroth law of thermodynamics*

Hukum nol termodinamika berkaitan tentang kesetimbangan termodinamika yang dinyatakan sebagai berikut “Jika dua sistem termodinamika berada dalam kesetimbangan termal dengan sistem ketiga, maka keduanya juga berada dalam kesetimbangan termodinamika satu sama lain” (Dincer & Zamfirescu, 2018).

2.1.2 *The first law of thermodynamics*

Di dalam sistem yang terisolasi, energi total sistem adalah konstan, meskipun energi telah diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. (Ini adalah cara lain untuk menyatakan hukum kekekalan energi.) Jika sistem tidak diisolasi, perubahan energi dalam sistem ΔU sama dengan selisih antara kalor Q yang ditambahkan ke sistem dari lingkungannya dan kerja W dilakukan oleh sistem terhadap lingkungannya (Stewart, 2023).

2.1.3 *The second law of thermodynamics*

Hukum Kedua Termodinamika mengacu pada konsep proses reversibel dan irreversibel. Proses reversibel adalah proses kuasistatik, yang berarti bahwa suatu proses termodinamika disebut reversibel jika selama transformasi, baik sistem termodinamika maupun lingkungannya dapat dikembalikan ke keadaan awalnya. Semua perubahan kecil yang terjadi selama proses harus bersifat reversibel agar keseluruhan proses dianggap reversibel. Sebaliknya, proses irreversibel terjadi ketika sistem termodinamika tidak dapat kembali ke keadaan awalnya karena adanya disipasi energi yang terjadi secara irreversibel akibat gesekan, pelepasan panas, kehilangan energi listrik, kimia, mekanik, dan sebagainya. Dalam aplikasi nyata, selalu terdapat disipasi energi; oleh karena itu, proses reversibel hanyalah idealisasi yang penting dari sudut pandang teori (Dincer & Zamfirescu, 2018).

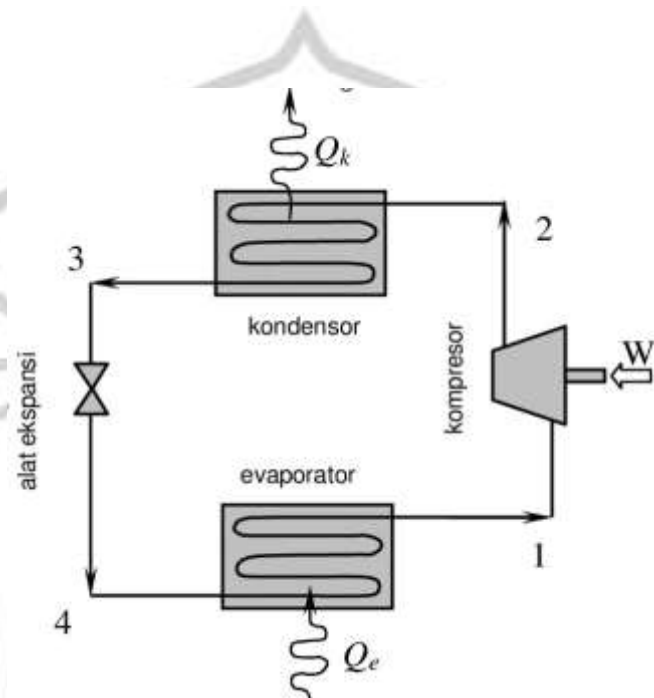
2.1.4 *The third law of thermodynamics*

Entropi sistem terisolasi mendekati nilai konstan saat suhu sistem mendekati nol mutlak ($-273,15^{\circ}\text{C}$ atau $-459,67^{\circ}\text{F}$). Dalam istilah praktis, teorema ini mengimplikasikan ketidakmungkinan mencapai nol mutlak, karena ketika suatu sistem mendekati nol mutlak, ekstraksi energi lebih jauh dari sistem itu menjadi semakin sulit (Stewart, 2023).

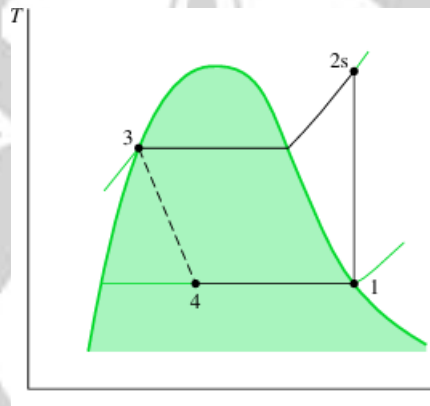
2.2 SISTEM REFRIGERASI KOMPRESI UAP

sistem refrigerasi kompresi uap beroperasi berdasarkan prinsip dasar hukum termodinamika, yaitu siklus kompresi uap yang mencakup empat proses utama: kompresi, kondensasi, ekspansi, dan evaporasi. Pada siklus ini, refrigeran dipaksa untuk berubah fase dari uap ke cair dan sebaliknya untuk menyerap atau melepaskan panas dari lingkungan sekitar. Proses kompresi meningkatkan tekanan dan suhu refrigeran, sementara kondensasi memungkinkan pelepasan panas, sedangkan proses ekspansi dan evaporasi menyebabkan penurunan tekanan dan suhu, yang memudahkan penyerapan panas (Stoecker, 1979)

Sistem refrigerasi kompresi uap terdiri dari 4 komponen utama yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator. Sistem kompresi uap bekerja dengan prinsip dasar memampatkan dan mengubah refrigeran menjadi siklus gas-likuid-gas untuk menciptakan efek pendinginan. Sistem siklus kompresi uap sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah :



Gambar 2.1 Sistem Refrigerasi Siklus Kompresor Uap Sederhana (Aziz & Herisiswanto, 2009).



Gambar 2.2 Diagram T-s siklus kompresi uap ideal (Moran & Shapiro, 2006).

Proses 1–2s: Kompresi isentropik dari refrigeran dari keadaan 1 ke tekanan kondensor pada keadaan 2s.

Proses 2s–3: Transfer panas dari refrigeran saat mengalir pada tekanan konstan melalui kondensor. Refrigeran keluar sebagai cairan pada keadaan 3.

Proses 3–4: Proses throttling dari keadaan 3 ke campuran cairan–uap dua fasa pada keadaan 4.

Proses 4–1: Transfer panas ke refrigeran saat mengalir pada tekanan konstan melalui evaporator untuk menyelesaikan siklus (Moran & Shapiro, 2006).

2.3 ORGANIC RANKINE CYCLE

Saat ini, ada banyak upaya untuk menggunakan energi terbarukan seperti energi matahari, energi angin, biomassa dan panas bumi serta menggunakan limbah panas untuk produksi listrik. *Organic Rankine Cycle* (ORC) adalah proses yang menjanjikan untuk konversi panas suhu rendah dan sedang menjadi listrik. Proses ORC bekerja seperti pembangkit listrik tenaga uap Clausius–Rankine tetapi menggunakan fluida kerja organik, bukan air. Tantangan tertentu adalah pilihan fluida kerja organik dan desain siklus tertentu. Proses tersebut harus memiliki efisiensi termal yang tinggi η_{th} dan memungkinkan pemanfaatan yang tinggi dari sumber panas yang tersedia. Selain itu, fluida kerja harus memenuhi kriteria keselamatan, ramah lingkungan, dan memungkinkan biaya rendah untuk pembangkit listrik (Saleh, 2008). Yang membuatnya mampu menghasilkan tenaga dan tetap super panas setelah ekspansi di turbin pada suhu rendah dan sedang. Proses pembuatan listrik dari sumber energi terbarukan harus ekonomis. Beberapa metode baru telah diusulkan untuk mengatasi tantangan ini seperti metode perencanaan berbasis nilai untuk penempatan pendinginan, pemanasan dan daya gabungan (CCHP) berdasarkan konsep pusat energi atau kebijakan *Feed in Tarif* (FIT) yang di anggap sebagai satu kesatuan. Strategi yang efisien dalam mendorong pengembangan energi terbarukan (Bahrami, 2015).

2.4 Energi Dan Eksergi Keterkaitannya Dengan Lingkungan Dan Keberlanjutan

Dalam setiap proses, sistem, dan aplikasi energi, sangat penting untuk memahami secara termodinamika sistem dan merancanginya, menganalisisnya, dan menilai kinerjanya melalui efisiensi yang sebenarnya. Dalam termodinamika, deskripsi sistem konversi energi apapun biasanya diikuti dengan definisi efisiensi sistem yang sesuai. Hal ini dapat dilakukan melalui efisiensi energi dan eksergi, atau koefisien kinerja berbasis energi (COP) dan COP berbasis eksergi. Penilaian kinerja sistem yang

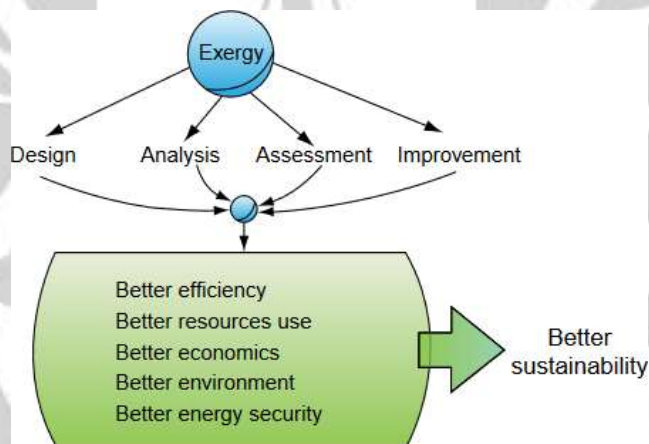
tepat membutuhkan studi yang cermat tentang efisiensi dan peningkatannya. Untuk sistem apapun, efisiensi secara umum, dapat didefinisikan sebagai rasio output yang diinginkan (berguna) dibagi dengan input yang dibutuhkan. Ada banyak definisi dan persamaan efisiensi yang berbeda secara konseptual dan terkadang saling bertentangan dalam literatur yang mungkin tidak sepenuhnya benar. Bahkan ada definisi dan persamaan efisiensi yang membingungkan yang dapat menyebabkan penilaian kinerja yang salah (Moran & Shapiro, 2021).

2.4.1 Energi dan Exergi serta Keterkaitannya dengan Lingkungan dan Keberlanjutan

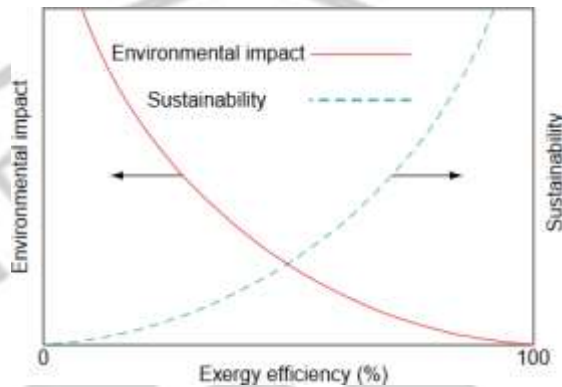
Termodinamika membawa dua konsep penting, seperti energi dan eksergi. Energi sangat terkait dengan hukum pertama termodinamika dengan persamaan kesetimbangan energi. Sedangkan eksergi sangat terkait dengan hukum kedua termodinamika dengan persamaan kesetimbangan eksergi. Kedua konsep ini secara Teknis mengatur semua proses praktis dan hubungannya dengan dampak lingkungan dan Pembangunan berkelanjutan, karenanya sangat penting. Analisis eksergi berguna untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya energi, untuk menghitung lokasi, jenis, dan besaran pemborosan dan kerugian. Secara umum, efisiensi yang lebih bermakna dievaluasi dengan analisis eksergi daripada analisis energi, karena efisiensi eksergi selalu merupakan ukuran sebenarnya tentang seberapa dekat efisiensi suatu proses mendekati ideal. Oleh karena itu, analisis eksergi mengidentifikasi secara akurat margin yang tersedia untuk merancang sistem energi yang lebih efisien dengan mengurangi inefisiensi. Banyak insinyur dan peneliti setuju bahwa kinerja termodinamika paling baik dievaluasi menggunakan analisis eksergi karena memberikan lebih banyak wawasan dan lebih berguna dalam upaya peningkatan efisiensi daripada analisis energi saja. Langkah-langkah untuk meningkatkan efisiensi energi dapat mengurangi dampak lingkungan dengan mengurangi kehilangan energi. Dari sudut pandang eksergi, aktivitas tersebut mengarah pada peningkatan efisiensi eksergi dan pengurangan kehilangan eksergi (baik emisi eksergi limbah maupun

konsumsi eksergi internal). Pemahaman yang lebih dalam tentang hubungan antara eksergi dan lingkungan dapat mengungkapkan pola dan kekuatan mendasar yang mendasari yang mempengaruhi perubahan lingkungan, dan membantu peneliti menangani dengan cara yang lebih baik untuk mengatasi kerusakan lingkungan. Hukum kedua termodinamika, dalam hal ini, berperan penting dalam memberikan wawasan tentang dampak lingkungan. Hubungan yang paling tepat antara hukum kedua dan dampak lingkungan telah diusulkan menjadi eksergi, dan, sebagian karena itu adalah ukuran dari keadaan sistem dari lingkungan. Besarnya eksergi suatu sistem pada dasarnya bergantung pada keadaan sistem dan lingkungan. Keadaan awal ini nol hanya ketika sistem berada dalam kesetimbangan dengan lingkungannya setelah mencapai keadaan referensi atau kondisi *Dead state*. Faktanya, analisis eksergi adalah alat metodologis dan konseptual yang diambil dari hukum kedua termodinamika, dan dapat menunjukkan hilangnya kualitas, atau potensi kerja, dalam suatu sistem. Analisis eksergi akibatnya terkait dengan keberlanjutan karena dalam meningkatkan keberlanjutan penggunaan energi, kita harus memperhatikan tidak hanya kehilangan energi, tetapi juga kehilangan kualitas energi (atau eksergi). Keuntungan utama dari analisis eksergi atas analisis energi adalah bahwa kandungan eksergi dari aliran proses adalah penilaian aliran yang lebih baik daripada kandungan energi, karena eksergi menunjukkan fraksi energi yang mungkin berguna dan dapat digunakan. Pengamatan ini berlaku sama pada level komponen, level proses, dan level siklus hidup. Penerapan analisis eksergi pada komponen, proses, atau sektor dapat menghasilkan wawasan tentang cara meningkatkan keberlanjutan aktivitas yang terdiri dari sistem dengan mengurangi kerugian eksergi. Pembangunan berkelanjutan tidak hanya membutuhkan penggunaan sumber daya energi yang berkelanjutan, tetapi sumber daya tersebut digunakan secara efisien. Penulis dan yang lainnya merasa bahwa metode eksergi dapat digunakan untuk mengevaluasi dan meningkatkan efisiensi dan dengan demikian meningkatkan keberlanjutan. Karena energi tidak pernah dapat “hilang” karena kekal sesuai dengan hukum pertama termodinamika, sedangkan eksergi dapat hilang karena

ireversibilitas internal, kehilangan eksergi yang mewakili potensi yang tidak digunakan, terutama dari penggunaan bentuk energi tak terbarukan, harus diminimalkan. ketika usaha untuk pembangunan berkelanjutan. Selanjutnya, Gambar 2.3 dengan jelas merangkum keuntungan dari eksergi sebagai potensi untuk lingkungan yang lebih baik dan pembangunan berkelanjutan. Jelas bahwa pemahaman tentang aspek termodinamika pembangunan berkelanjutan dapat membantu dalam mengambil tindakan berkelanjutan terkait energi. Prinsip termodinamika dapat digunakan untuk merancang, menganalisis, menilai, dan meningkatkan sistem dan kinerjanya, serta untuk lebih memahami dampak lingkungan dan masalah keberlanjutan. Untuk pemahaman yang lebih luas, semua prinsip termodinamika harus digunakan, tidak hanya yang berkaitan dengan energi. Dengan demikian, banyak peneliti merasa bahwa pemahaman dan apresiasi eksergi, seperti yang didefinisikan sebelumnya, sangat penting dalam pembahasan dampak lingkungan dan pembangunan berkelanjutan serta dimensinya (Moran & Shapiro, 2021).



Gambar 2.3 Ilustrasi bagaimana eksergi berkontribusi pada lingkungan yang lebih baik dan Pembangunan berkelanjutan (Moran & Shapiro, 2021).



Gambar 2.4 Representasi kualitatif tentang hubungan seperti apa yang ada antara dampak lingkungan dan keberlanjutan suatu proses, dan Efisiensi Eksergi (Moran & Shapiro, 2021).

Gambar 2.3 menggambarkan lebih lanjut apa yang dilakukan eksergi melalui sistem dan aplikasi, yang mencakup desain, analisis, penilaian, dan peningkatan yang pada akhirnya membantu mencapai efisiensi yang lebih baik, penggunaan sumber daya yang lebih baik, ekonomi yang lebih baik, lingkungan yang lebih baik, dan keamanan energi yang lebih baik yang pada akhirnya berkontribusi untuk memperoleh pembangunan berkelanjutan yang lebih baik (Moran & Shapiro, 2021).

Gambar 2.4 menggambarkan hubungan antara eksergi dan keberlanjutan dan dampak lingkungan. Di sini, keberlanjutan terlihat meningkat dan dampak lingkungan menurun seiring dengan proses peningkatan efisiensi eksergi Pertama, ketika efisiensi eksergi mendekati efisiensi penuh (yaitu, 100%), dampak lingkungan mendekati nol (yaitu, 0%), karena eksergi hanya diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya tanpa kehilangan, baik melalui konsumsi internal maupun emisi limbah. Keberlanjutan juga mendekati tak terhingga karena prosesnya mendekati reversibilitas. Kedua, ketika efisiensi eksergi mendekati 0%, keberlanjutan mendekati nol karena sumber daya yang digunakan mengandung eksergi tetapi tidak ada yang dicapai. Selain itu, dampak lingkungan mendekati tak terhingga karena, jumlah sumber daya yang digunakan terus meningkat, dan jumlah limbah yang mengandung eksergi juga meningkat (Moran & Shapiro, 2021).

Hubungan antara dampak lingkungan dan keberlanjutan versus efisiensi eksergi dapat dinyatakan secara kuantitatif dengan beberapa contoh persamaan berikut :

$$n_{ex} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{E}x_{in}} \quad (2.1)$$

Dimana $\dot{W}_{out}$ adalah laju kerja aliran keluar $\dot{E}x_{in}$ adalah laju input eksergi yang sama dengan laju aliran massa bahan bakar yang dikonsumsi dikalikan kandungan eksergi bahan bakar spesifik. Laju masukan eksergi juga dapat didefinisikan dalam bentuk laju masukan eksergi termal karena laju perpindahan panas.

Untuk sistem refrigerasi dan pompa panas, pendekatan efisiensi dasar tidak lagi digunakan karena nilainya lebih dari 100%, dianggap tidak mungkin untuk efisiensi. Ini pada dasarnya membutuhkan kriteria kinerja lain, bukan efisiensi, seperti COP. COP eksergetik untuk sistem refrigerasi didefinisikan sebagai COP sebenarnya dibagi dengan COP reversibel di bawah batas suhu yang sama. Seperti persamaan di bawah :

$$COP_{ex} = \frac{COP_{act}}{COP_{rev}} \quad (2.2)$$

di mana COP reversibel, didefinisikan dalam istilah suhu TL reservoir suhu rendah dan reservoir suhu tinggi TH, persamaan sebagai berikut :

$$COP_{rev} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (2.3)$$

bahwa efisiensi konsumsi bahan bakar fosil hanya ditandai dengan angka penipisan yang didefinisikan dengan ditunjukkan persamaan sebagai berikut (Connelly & Koshlandbs, 1997). :

$$D_p = \frac{\dot{E}x_d}{\dot{E}x_{in}} \quad (2.4)$$

yang merepresentasikan hubungan antara kerusakan eksergi $\dot{E}x_d$ dan input eksergi $\dot{E}x_{in}$ dengan konsumsi bahan bakar. Hubungan antara faktor penipisan dan efisiensi eksergi ditunjukkan dengan persamaan berikut :

$$n_{ex} = 1 - D_p \quad (2.5)$$

untuk menyatakan keberlanjutan sumber daya bahan bakar dengan indeks keberlanjutan (SI) sebagai kebalikan dari angka deplesi sebagai indikasi berapa

besarnya deplesi (melalui angka deplesi) mempengaruhi keberlanjutan (melalui SI) (Connelly & Koshlandbs, 1997). Ditunjukkan dengan persamaan berikut :

$$SI = \frac{1}{D_p} \dots\dots\dots(2.6)$$

2.4.2 Perubahan Energi dan Perpindahan Energi

Energi secara termodinamika didefinisikan sebagai kapasitas untuk melakukan kerja, dan karenanya energi suatu sistem dapat terdiri dari energi dalam, energi kinetic, dan energi potensial. Energi internal mencakup energi termal, kimia, dan nuklir. Kecuali jika ada reaksi kimia atau nuklir, perubahan internal suatu sistem disebabkan oleh perubahan energi panas. Dengan tidak adanya listrik, magnet, tegangan permukaan, dan efek lain yang mungkin terjadi, perubahan total energi sistem dapat di tulis dengan rumus persamaan berikut :

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \dots\dots\dots(2.7)$$

di mana perubahan energi internal, kinetik dan potensial didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\Delta KE = \frac{1}{2}m (V_2^2 - V_1^2) \dots\dots\dots(2.9)$$

$$\Delta PE = \frac{1}{2}m(z_2 - z_1) \dots\dots\dots(2.10)$$

Untuk sebagian besar kasus, perubahan KE dan PE dianggap dapat diabaikan selama proses di mana perubahan energi disebabkan oleh perubahan energi internal seperti ditunjukkan persamaan berikut :

$$\Delta E = \Delta U = m(u_2 - u_1) \dots\dots\dots(2.11)$$

1. Laju Aliran Massa

Massa yang memasuki sistem membawa energi bersamanya dan energi sistem meningkat. Massa yang meninggalkan sistem mengurangi kandungan energi dalam sistem $\dot{m}(\frac{kg}{s})$.

2. Perpindahan Panas

Penting untuk dicatat bahwa panas adalah bentuk energi termal dan perpindahan panas terjadi ketika ada perbedaan suhu di dalam suatu media atau di antara media yang berbeda. Panas selalu membutuhkan perbedaan suhu untuk perpindahannya. Perbedaan suhu yang lebih tinggi memberikan tingkat perpindahan panas yang lebih tinggi. Perpindahan panas memiliki satuan yang sama dengan energi. Simbol perpindahan kalor adalah $Q(\text{kJ})$. Perpindahan panas per satuan massa dilambangkan dengan $q(\text{kJ/kg})$. Perpindahan panas per satuan waktu adalah laju perpindahan panas $\dot{Q}(\text{kW})$. Jika tidak ada perpindahan panas yang terlibat dalam suatu proses, itu disebut proses adiabatik.

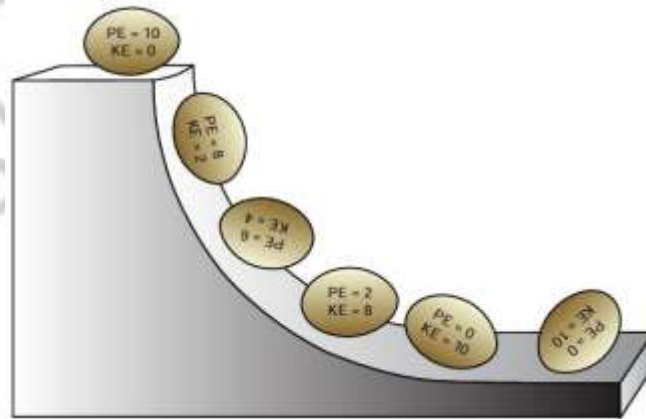
3. Kerja

Kerja adalah bentuk energi yang ditransfer oleh perbedaan tekanan atau di bawah pengaruh gaya apa pun dan dibagi menjadi kerja poros dan kerja aliran. Kerja dilambangkan dengan W . Kerja poros adalah energi mekanik yang digunakan untuk menggerakkan suatu mekanisme, seperti pompa, kompresor, atau turbin. Kerja aliran adalah energi yang dipindahkan ke dalam suatu sistem oleh fluida yang mengalir masuk atau keluar dari sistem. Tingkat transfer kerja (yaitu, per satuan waktu) disebut daya $\dot{W}(\text{kW})$. Usaha memiliki satuan yang sama dengan energi.

2.5 KONSEP HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA

Hukum pertama termodinamika, juga dikenal sebagai prinsip kekekalan energi, yang berarti bahwa energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, hanya dapat diubah bentuk satu ke bentuk lain. Prinsip ini juga menegaskan bahwa jumlah total energi selalu terjaga dan tetap konstan tanpa adanya pembangkitan atau pemusnahan energi (Dincer, 2018). Gambar 2.5 merupakan contoh ilustrasi yang cukup menarik, sebuah batu yang menggelinding yang menunjukkan variasi kandungan energi total pada setiap langkah. Oleh karena itu, ini adalah contoh mengenai prinsip kekekalan

energi yang menggambarkan perubahan energi secara kinetik dan potensial sepanjang proses, sementara energi totalnya tetap konstan.



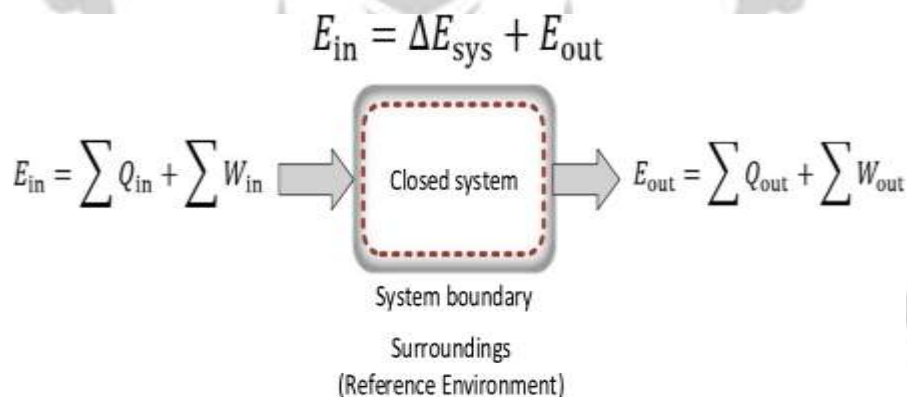
Gambar 2.5 Ilustrasi konsep kekekalan energi melalui batu yang menggelinding dengan total energi sebesar 10 satuan (Dincer, 2018).

2.5.1 Sistem Tertutup

Hukum pertama termodinamika dapat digunakan untuk sistem tertutup karena perubahan energi total sistem tertutup selama proses sama dengan selisih antara energi total yang masuk dan energi total yang keluar sistem. Gambar 2.5 di bawah menunjukkan ilustrasi hukum pertama termodinamika.

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$E_{in} - E_{out} = \frac{dE}{dt} \dots\dots\dots (2.13)$$

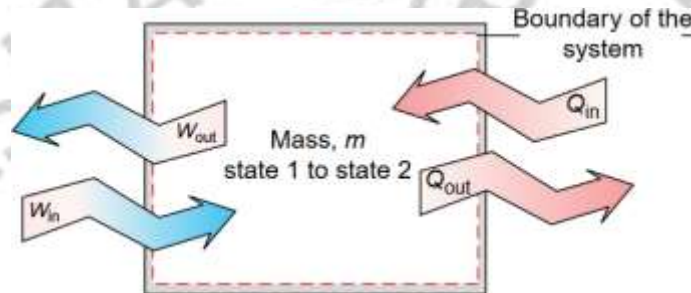


Gambar 2.6 Ilustrasi hukum pertama termodinamika sistem tertutup (Dincer &

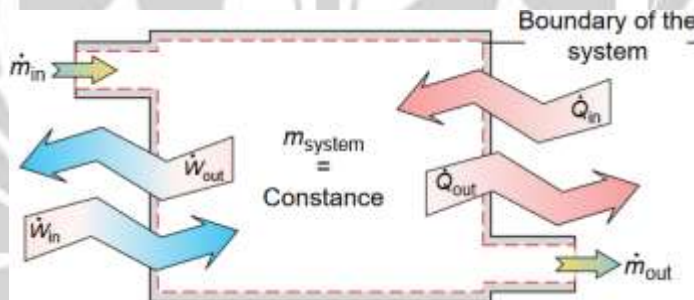
Bicer, 2020).



Untuk sistem tertutup yang mengalami proses antara keadaan awal dan akhir dengan interaksi panas dan kerja dengan lingkungan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan Gambar 2.8 di bawah ini:



Gambar 2.7 Sistem tertutup dengan panas dan interaksi kerja (Moran & Shapiro, 2021).



Gambar 2.8 Volume kontrol aliran tunak (CV) dengan interaksi massa, panas, dan kerja (Moran & Shapiro, 2021).

2.5.2 Steady Flow System

Sistem terbuka digambarkan sebagai sistem aliran tunak (yaitu, aliran tunak keadaan tetap) jika massa di dalam volume yang dikontrol dari sistem terbuka tidak berubah terhadap waktu. Massa memasuki dan meninggalkan sistem dan terjadi interaksi panas dan kerja dengan lingkungan seperti pada Gambar 2.7. Selama proses aliran tunak, massa total dan kandungan energi CV tetap konstan, sehingga perubahan energi total sistem adalah nol. Maka hukum pertama termodinamika dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$E_{in} - E_{out} = \frac{dE}{dt} = 0 \dots\dots\dots(2.14)$$

Bentuk persamaan kesetimbangan energi :

$$\frac{dE}{dt} = Q - W \dots\dots\dots(2.15)$$

$\frac{dE}{dt}$ (menggambarkan konsep tentang seberapa cepat energi dalam sistem berubah pada waktu tertentu).

Q (menjelaskan seberapa cepat energi masuk ke dalam sistem melalui transfer panas pada waktu tertentu).

W (menggambarkan bagaimana energi keluar dari sistem melalui kerja pada waktu tertentu).

2.6 KONSEP HUKUM KEDUA TERMODINAMIKA

Mengacu pada contoh sebelumnya, hukum pertama termodinamika memiliki keterbatasan dalam menggambarkan potensi kerja, jumlah energi maksimum, atau energi yang dapat digunakan dalam suatu sistem atau medium. Kekurangan utama dari hukum ini adalah tidak memperhitungkan faktor ireversibilitas, kehilangan energi, inefisiensi, serta degradasi energi. Karena dalam kenyataannya semua sistem mengalami ketidakterbalikan serta kehilangan energi dan inefisiensi, diperlukan pendekatan yang lebih luas dari sekadar hukum pertama termodinamika. Salah satu cara untuk mengatasi keterbatasan ini adalah dengan menerapkan hukum kedua termodinamika sebagai pendekatan utama. Untuk menutupi kekurangan tersebut, hukum kedua termodinamika harus dipertimbangkan. Berbeda dari hukum pertama, hukum kedua tidak hanya mempertimbangkan jumlah energi, tetapi juga kualitasnya. Prinsip ini menyatakan bahwa dalam proses alami, energi akan selalu bergerak menuju kondisi dengan kualitas yang lebih rendah (Dincer, 2018).

2.7 KESETIMBANGAN ENTROPI

Keseimbangan entropi merupakan bentuk dari hukum kedua termodinamika yang sangat berguna dalam analisis termodinamika. Entropi dikaitkan dengan proses reversibilitas dan ireversibilitas artinya tingkat perbedaan antara proses ireversibel dan reversibel dapat di evaluasi dengan konsep entropi dalam termodinamika. Jika suatu sistem diisolasi, entropi suatu sistem terus meningkat karena proses ireversibel dan

mencapai nilai maksimum yang mungkin terjadi setelah sistem mencapai keadaan kesetimbangan termodinamika. Dalam keadaan kesetimbangan, semua proses ireversibel selesai. Bila suatu sistem mulai mentransfer entropi ke lingkungan, artinya terjadi proses ireversibel dalam keadaan kesetimbangan, yang menyebabkan pembangkitan entropi. Perpindahan entropi dapat terjadi baik melalui perpindahan panas maupun perpindahan massa. Jika tidak ada akumulasi entropi di dalam suatu sistem, maka total entropi sistem ditambah lingkungan pada keadaan keluar lebih besar daripada entropi pada keadaan masuk karena entropi dihasilkan oleh proses ireversibel di dalam sistem (Moran & Shapiro, 2021).

2.8 ANALISIS TERMODINAMIKA

2.8.1 Analisis Energi

Secara umum Analisis energi merupakan metode untuk mengevaluasi sistem termodinamika. Hal ini didasarkan pada hukum pertama termodinamika, Dimana energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan di dalam suatu proses. Energi hanya dapat berubah bentuk dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Dengan kata lain jumlah total energi dalam suatu sistem tetap konstan (Dincer, 2018).

Analisis energi berdasarkan hukum pertama termodinamika sering melibatkan pemahaman terhadap perubahan energi dalam suatu sistem, yang dapat dijelaskan dengan persamaan berikut :

$$\Delta U = Q - W \dots\dots\dots(2.16)$$

Persamaan di atas menggambarkan bahwa perubahan energi internal sistem (ΔU) sama dengan jumlah panas yang diterima (Q) dikurangi dengan kerja yang dilakukan oleh sistem (W). Tanda positif dan negatif masing-masing digunakan untuk menunjukkan apakah energi masuk ke dalam atau keluar dari sistem.

Jika Q positif, artinya sistem menerima panas (energi masuk). Jika Q negatif, artinya sistem melepas panas (energi keluar). Demikian pula, jika W positif, artinya sistem melakukan kerja pada lingkungannya (energi keluar dari sistem). Jika W negatif, artinya lingkungan melakukan kerja pada sistem (energi masuk ke sistem).

Dengan hal ini sistem diasumsikan dalam keadaan tunak. Gesekan yang terjadi di dalam pipa, kehilangan panas dalam sistem, perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan. Sehingga perubahan energi internal dalam sistem sama dengan nol (ΔU) menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$0 = Q - W \dots\dots\dots(2.17)$$

Pada siklus kompresi uap sistem ini fluida kerja masuk kompresor dalam fasa *saturated vapor* dan masuk *mixing chamber* dalam fasa *saturation vapor*. keluar *mixing chamber* masuk kondensor dalam fase campuran. Di kondensor terjadi proses kondensasi pelepasan panas ke lingkungan atau terjadi pertukaran kalor antara sistem dengan lingkungan menyebabkan fluida kerja berubah fasa menjadi *saturated liquid* dan keluar kondensor dalam fasa *saturated liquid* pada sistem ini terdapat flow regulator sebagai pengatur aliran. Masuk katup ekspansi tekanan fluida cair diturunkan dan mengalami penurunan temperatur tanpa ada perubahan entropi. Keluar katup ekspansi masuk evaporator fluida cair murni terjadi proses evaporasi dimana pada proses evaporasi terjadi pertukaran kalor antara sistem dengan temperature ruang. Proses ini terjadi pengulangan secara terus menerus.

Pada siklus rankine organik sistem ini fluida kerja dalam fase *saturated liquid* masuk pompa untuk dialirkan ke boiler. Di boiler fluida kerja dididihkan agar temperaturnya meningkat hingga 100°C sehingga mengalami perubahan fasa menjadi *saturation vapor* dan mengalir ke turbin ORC. Lalu terjadi proses *mechanical rotation* dan *mechanical rotation* inilah yang dihubungkan dengan kompresor menggunakan shaft silinder untuk menggerakkan kompresor. Selain menggerakkan kompresor turbin ORC mengalirkan fluida kerja berfasa uap ke *mixing chamber*. keluar *mixing chamber* fluida kerja berfasa campuran masuk kondensor. Di kondensor terjadi proses kondensasi pelepasan panas ke lingkungan atau terjadi pertukaran kalor antara sistem dengan lingkungan menyebabkan fluida kerja berubah fasa menjadi *saturated liquid*. Pada sistem ini terdapat flow regulator untuk mengatur aliran. Proses ini terjadi pengulangan secara terus menerus. Dari persamaan diatas dapat menghasilkan

persamaan-persamaan analisis energi untuk setiap komponen pada sistem. Komponen-komponen tersebut diantaranya :

1. Kompresor

Kompresor adalah salah satu komponen kunci dalam siklus refrigerasi untuk meningkatkan tekanan dan gas refrigeran untuk masuk ke dalam sistem. Proses pada kompresor terdapat efisiensi isentropik. Efisiensi isentropik adalah parameter untuk mengukur suatu proses dalam sistem termodinamika mendekati proses isentropik atau adiabatik reversibel. Proses isentropik adalah suatu proses dimana entropi sistem tetap konstan. Dengan kata lain, memberikan gambaran tentang seberapa baik suatu proses mendekati keadaan ideal atau teoritis tidak ada kerugian energi dan peningkatan entropi. Proses isentropic hanyalah keadaan kerja ideal atau teoritis untuk memudahkan Analisa, yang sesungguhnya kompresor memiliki keadaan kerja aktual. Dari keterangan di atas dapat dirumuskan persamaan umum sebagai berikut

$$W_{Comp Is} = \dot{m}_1(h_1 - h_{2s}) \dots\dots\dots(2.18)$$

$$W_{comp Ak} = \dot{m}_1(h_1 - h_{2a}) \dots\dots\dots(2.19)$$

Analisis energi pada besar kecilnya nilai kerja kompresor dapat memberikan pengetahuan yang sangat penting tentang kinerja keseluruhan sistem. Nilai kerja kompresor memainkan peran dalam siklus refrigerasi. Analisis energi melibatkan perhitungan dan pemahaman tentang berbagai bentuk energi yang terlibat dalam siklus atau proses tertentu. Termasuk energi masuk (energi Listrik atau daya mekanis yang digunakan untuk menggerakkan kompresor) dan energi keluar (energi yang diserap atau dilepaskan oleh fluida). Jika nilai kerja kompresor besar, menunjukkan bahwa kompresor memerlukan banyak energi untuk mengkompres gas. Terdapat indikasi kurangnya efisiensi kompresor atau kemungkinan adanya kerugian panas atau gesekan di dalam kompresor. Peningkatan nilai kerja kompresor tanpa peningkatan keuntungan yang sesuai menunjukkan adanya masalah efisiensi. Jika nilai kerja kompresor kecil, menunjukkan bahwa kompresor

memerlukan energi lebih sedikit untuk melakukan kompresi. Kecilnya nilai kerja kompresor berarti adanya peningkatan efisiensi termal.

Dalam Upaya mengoptimalkan sistem, nilai kerja kompresor dapat dijadikan parameter penting pengoptimalan efisiensi sistem dapat mencakup pemilihan kompresor yang efisien, pemeliharaan yang tepat, dan pemantauan kondisi operasional. Analisis energi membantu dalam mengidentifikasi sumber-sumber potensial kerugian energi. Dengan memahami dan mengurangi kerugian diseluruh sistem dapat meningkatkan efisiensi dan mengurangi kerja kompresor.

2. Kondensor

Kondensor adalah salah satu komponen dalam siklus refrigerasi yang berfungsi untuk melepaskan panas dari sistem ke lingkungan. Efisiensi kondensor ditentukan oleh sejauh mana kondensor dapat membantu mendinginkan dan mengkondensasi gas refrigerant. Sebuah kondensor yang efisien dapat memaksimalkan pelepasan panas dan meningkatkan efisiensi keseluruhan siklus refrigerasi. Temperature lingkungan memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja kondensor. Semakin tinggi temperature lingkungan, semakin sulit untuk kondensor melepaskan panas ke udara.

Pada sistem gabungan siklus kompresi uap yang terintegrasi siklus rankine organik ini kalor kondensor disebabkan oleh perhitungan dari kalor evaporator ditambah kalor boiler dan dikurangi kerja kompresor aktual. Dapat dirumuskan persamaan umum sebagai berikut :

$$Q_C = Q_{Evap} + Q_{Boiler} - W_{kompak} \dots\dots\dots (2.20)$$

Kalor kondensor adalah jumlah panas yang dilepaskan oleh gas refrigeran selama proses kondensasi dalam kondensor. Analisis energi pada kondensor melibatkan pemahaman tentang bagaimana energi panas bergerak melalui sistem. Analisis energi mencakup perhitungan panas yang diserap atau dilepaskan selama proses kondensasi.

Jika nilai kalor kondensor besar, menandakan bahwa ada banyak panas yang dilepaskan selama proses kondensasi. Hal ini menunjukkan kondensor bekerja dengan baik dalam menyalurkan panas ke lingkungan. Kalor yang besar juga menunjukkan bahwa beban kerja pada kondensor signifikan yang mungkin menunjukkan kondisi operasional atau pemilihan peralatan yang baik. Jika nilai kalor kondensor kecil menunjukkan bahwa efisiensi kondensor mungkin rendah atau ada gangguan dalam proses kondensasi. Misalnya, kemungkinan adanya tekanan rendah atau suhu gas refrigeran yang tidak optimal.

Analisis energi membantu dalam memahami sejauh mana kondensor dapat memindahkan panas secara efisien. Pemeliharaan yang tepat, pemantauan suhu dan tekanan, dan pemilihan kondensor yang sesuai beban kerja dapat meningkatkan efisiensi kondensor.

Analisis energi membantu mengidentifikasi area-area kerugian panas yang mungkin terjadi selama proses kondensasi. Pemahaman ini penting untuk merancang sistem yang dapat meminimalkan kerugian energi, meningkatkan efisiensi, dan mengoptimalkan kinerja kondensor.

Analisis energi kondensor harus dilihat dalam konteks siklus refrigerasi keseluruhan atau sistem termal. Mengevaluasi dampak kalor kondensor terhadap efisiensi keseluruhan dan memastikan bahwa sistem beroperasi sesuai dengan kebutuhan dan standar efisiensi.

3. Katup ekspansi

Secara teoritis, katup ekspansi pada siklus refrigerasi tidak menghasilkan energi secara bersih. Karena fungsi katup ekspansi hanya untuk mengurangi tekanan dan temperatur refrigeran sebelum memasuki evaporator, menciptakan kondisi optimal untuk penguapan refrigeran di dalam evaporator. Penurunan tekanan dan temperatur yang terjadi selama ekspansi di katup memungkinkan refrigeran untuk menyerap energi termal dari lingkungan sekitarnya saat memasuki evaporator.

Pada kondisi tertentu, panas tersembunyi (*latent heat*) yang di ambil oleh refrigeran selama penguapan dapat di anggap sebagai bentuk energi yang di simpan dan kemudian dilepaskan saat refrigeran Kembali menjadi cair di kondensor. Meskipun bukan produksi energi, ini mencerminkan transfer dan manajemen energi dalam siklus refrigerasi.

4. Evaporator

Analisis energi membantu dalam melihat bagaimana energi termal bergerak melalui sistem, dan nilai evaporator adalah parameter yang mencerminkan seberapa besar panas yang diserap oleh evaporator selama penguapan refrigeran. Semakin besar nilai kalor evaporator, semakin efisien proses penguapan dan semakin besar kapasitas pendinginan evaporator.

Efisiensi energi sistem refrigerasi mencakup seberapa efisien panas dihilangkan dari area yang didinginkan oleh evaporator. Ini melibatkan perbandingan antara jumlah panas yang diserap oleh evaporator dengan daya yang digunakan oleh kompresor. Secara umum efisiensi energi sistem secara keseluruhan bergantung pada seberapa baik nilai kalor evaporator dioptimalkan.

Temperatur evaporator mempengaruhi seberapa banyak panas dapat diserap selama penguapan. Semakin rendah temperature evaporator, semakin banyak panas yang dapat dihilangkan dari area yang didinginkan. Nilai kalor evaporator yang lebih tinggi pada temperatur evaporator yang lebih rendah dapat menunjukkan efisiensi yang baik dalam menyerap panas dari area yang didinginkan. Nilai kalor evaporator yang optimal dan efisiensi yang tinggi berkontribusi pada performa keseluruhan sistem refrigerasi.

Untuk menentukan kalor evaporator dapat dirumuskan persamaan umum sebagai berikut :

$$Q_{evap} = \dot{m}(h_1 - h_5) \dots \dots \dots (2.21)$$

5. Pompa ORC

Dalam siklus rankine organik refrigerasi, pompa digunakan untuk memompa cairan refrigeran organik dari kondensor ke boiler. Meskipun pompa dan kompresor memiliki fungsi umum dalam meningkatkan tekanan fluida, namun pompa pada umumnya merujuk pada peningkatan tekanan pada fluida dalam keadaan cair, sedangkan kompresor merujuk pada peningkatan tekanan pada fluida dalam keadaan gas.

Efisiensi pompa adalah parameter untuk mengukur seberapa efisien pompa dalam mengkonversi daya masukan menjadi peningkatan tekanan cairan. Semakin tinggi efisiensi pompa, semakin sedikit daya yang dibutuhkan untuk menyalurkan cairan kerja dari kondensor ke boiler.

Efisiensi pompa memiliki dampak pada konsumsi energi sistem secara keseluruhan. Pompa dengan efisiensi tinggi, konsumsi daya dapat diminimalkan, menghasilkan sistem yang lebih efisien secara energi. Secara umum dalam analisis energi dapat dirumuskan persamaan umum berikut.

$$W_{pompa\ is} = \dot{m}(h_{6s} - h_4) \dots\dots\dots(2.22)$$

$$W_{pompa\ ak} = \dot{m}(h_{6a} - h_4) \dots\dots\dots(2.23)$$

6. Boiler ORC

Boiler ORC adalah salah satu komponen siklus rankine organik untuk memanaskan fluida kerja organik dari keadaan cair menjadi uap berkualitas tinggi. Seperti alkana atau senyawa organik lainnya. Fluida organik memiliki titik didih rendah dari pada air, sehingga dapat menguap pada suhu yang lebih rendah. Bekerja pada suhu yang relative lebih rendah jika dibandingkan dengan boiler konvensional. Dapat memiliki efisiensi yang baik dalam kondisi operasional yang sesuai dan dapat dirancang untuk ukuran yang lebih kecil.

Jenis fluida kerja organik yang digunakan dalam siklus ORC memiliki pengaruh besar pada analisis energi. Fluida kerja organik dengan sifat termofisika

yang baik dapat meningkatkan efisiensi pemanasan di boiler. Pemilihan fluida kerja yang sesuai dengan suhu dan tekanan operasional sangat kritis.

Efisiensi boiler mengukur sejauh mana panas dari sumber panas dapat di transfer ke fluida kerja organik untuk menghasilkan uap berkualitas tinggi. Peningkatan efisiensi boiler dapat dicapai dengan desain yang baik, pengendalian suhu dan tekanan yang optimal, serta pilihan material yang efisien.

Nilai kalor yang dihasilkan oleh boiler secara langsung memengaruhi kinerja turbin, karena uap berkualitas tinggi yang dihasilkan akan digunakan untuk memutar turbin. Analisis energi pada boiler harus mempertimbangkan kebutuhan energi yang sesuai untuk operasi turbin. Ada nilai kerja boiler dapat dirumuskan persamaan umum sebagai berikut :

$$Q_{boiler} = \dot{m}(h_7 - h_{6a}) \dots\dots\dots(2.24)$$

Dalam konteks energi terbarukan, boiler pada siklus ORC dapat terhubung dengan sumber yang berkelanjutan, seperti panas limbah industri atau sumber panas geothermal. Analisis energi membantu memastikan bahwa nilai kalor yang diambil dari sumber panas berkelanjutan dimanfaatkan secara maksimal.

7. Turbin ORC

Turbin ORC menerima uap berkualitas tinggi dari boiler, dan energi kinetik dari uap ini digunakan untuk memutar turbin dan menghasilkan daya mekanis. Daya mekanis yang dihasilkan oleh turbin dapat digunakan untuk menggerakkan *compressor* dalam sistem gabungan VRC-ORC ini dan Uap di dalam turbin ORC diteuskan Kembali ke mixing chamber.

Idealnya, ekspansi di dalam turbin akan bersifat isentropik, tetapi faktor-faktor seperti kebocoran dan gesekan menyebabkan efisiensi turbin kurang dari 100%. Variasi suhu dan tekanan uap selama ekspansi di dalam turbin mempengaruhi seberapa efisien energi termal dapat diubah menjadi energi mekanis. Suhu dan tekanan operasional turbin harus dioptimalkan.

Analisis energi turbin tidak dapat dipisahkan dari efisiensi keseluruhan siklus ORC. Turbin berinteraksi dengan komponen lain dalam siklus, terutama boiler, sehingga efisiensi keseluruhan sistem harus menjadi pertimbangan utama. Analisis energi melibatkan evaluasi kinerja turbin pada berbagai Tingkat beban untuk memastikan fleksibilitas dan efisiensi operasional.

Pemantauan dan pengendalian operasi turbin sangat penting dalam memaksimalkan efisiensi. Analisis energi turbin harus mempertimbangkan perubahan entropi selama proses ekspansi. Nilai kerja turbin adalah jumlah energi mekanis yang dihasilkan oleh turbin sebagai hasil dari ekspansi uap berkualitas tinggi selama siklus ORC. Merupakan ukuran kinerja utama turbin dan indikator sejauh mana energi termal dapat diubah menjadi energi mekanis. Adapun dalam menentukan kerja turbin dapat dirumuskan persamaan umum sebagai berikut :

$$W_{turbin\ Is} = \dot{m}_2(h_7 - h_{8s}) \dots\dots\dots(2.25)$$

$$W_{turbin\ ak} = \dot{m}_2(h_7 - h_{8a}) \dots\dots\dots(2.26)$$

Analisis energi melibatkan pemahaman perubahan energi dalam bentuk potensial dan kinetik selama proses. Suhu dan tekanan uap masuk dan keluar dari turbin memainkan peran penting dalam penentuan nilai kerja. Semakin tinggi perbedaan suhu dan tekanan, semakin besar potensial kerja yang dapat dihasilkan. Perubahan entropi selama proses menjadi parameter penting dalam analisis energi. Analisis energi pada turbin tidak dapat dipisahkan dari siklus ORC secara keseluruhan, efisiensi turbin harus dilihat dalam konteks efisiensi keseluruhan siklus untuk mendapatkan gambaran kinerja yang komprehensif.

2.8.2 Analisis Eksergi

Hukum kedua termodinamika berkaitan dengan properti termodinamika instrumental yang disebut eksergi. *“Eksergi adalah kerja teoritis maksimum yang dapat diperoleh keseluruhan sistem yang terdiri dari sistem dan lingkungan Ketika sistem mencapai kesetimbangan termal dengan lingkungannya (Dead state)”* (Moran, 1986).

Nilai eksergi suatu sistem atau aliran tergantung pada keadaan sistem atau aliran dan suhu lingkungan. Suhu lingkungan biasa disebut suhu ambien. Oleh karena itu suhu ambien perlu ditentukan untuk melakukan analisis eksergi. Suhu ambien biasanya dimodelkan sebagai kondisi aktual sebenarnya dimana sistem itu ada. Suhu ambien dapat bervariasi tergantung pada lokasi, musim, dan beberapa kondisi lainnya. Misalnya, sistem pendingin udara berfungsi dengan kinerja yang berbeda-beda pada kondisi pengoperasian yang berbeda dan pada iklim yang berbeda.

Sebelum memasuki analisis eksergi, secara umum diketahui Eksergi suatu sistem (E) pada keadaan tertentu, dapat dirumuskan persamaan sebagai berikut :

$$E = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + KE + PE \dots\dots\dots(2.27)$$

Ketika sistem dalam keadaan *Dead State* $KE = PE = 0$, satuan eksergi sama dengan satuan energi (KW). Secara umum, nilai eksergi tidak boleh negatif. jika suatu sistem berada pada keadaan selain *Dead State*, sistem tersebut akan mengubah kondisinya secara spontan, menuju ke *Dead State*. Kecenderungan tersebut akan berhenti Ketika *Dead State* tercapai. Tidak ada usaha yang harus dilakukan untuk menghasilkan perubahan spontan tersebut. Oleh karena itu, setiap perubahan kondisi ke *Dead State* dapat dicapai paling sedikit adalah nol dengan demikian usaha maksimum eksergi tidak boleh negatif.

Berbeda dengan energi, eksergi bersifat tidak kekal karena di pengaruhi oleh *Irreversible*. Karena, jika suatu sistem mengalami perubahan spontan potensi untuk Kembali mengalami proses ideal atau *reversible* tidak akan terjadi.

Sistem tertutup pada keadaan tertentu dapat mencapai keadaan baru melalui berbagai cara, termasuk interaksi kerja dan panas dengan lingkungannya. Nilai eksegi yang terkait dengan keadaan baru umumnya berbeda dengan keadaan awal hal ini bisa disebut perubahan eksergi (Michael J. Moran, 1986).

Kesetimbangan eksergi sistem tertutup secara umum dirumuskan persamaan beritu :

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 (1 - \frac{T_0}{T_b}) \delta Q - [W - P_0(V_2 - V_1)] - T_0 \sigma \dots\dots\dots(2.28)$$

Dari persamaan diatas dapat diturunkan persamaan-persamaan analisis eksergi untuk setiap komponen dalam sistem gabungan ORC-VCR ini.

1. Kompresor

Dalam konteks kompresor, eksergi dapat dianggap sebagai “daya kerja maksimum” yang diperoleh dari energi yang ditransfer ke fluida kerja selama proses kompresi. Analisis eksergi dapat dikorelasikan dengan diagram mollier untuk mengevaluasi perubahan entalpi dan entropi selama proses kompresi. Diagram mollier membantu memvisualisasikan efek suhu dan tekanan terhadap nilai eksergi dan kinerja kompresor.

Analisis eksergi konvensional penggunaan entropi, berdasarkan hukum kedua termodinamika adalah metode klasik untuk menggambarkan distribusi kerugian yang tidak dapat diubah dalam siklus kompresi uap (Cui, 2022). Menguraikan sumber kerugian yang tidak dapat diubah dalam siklus kompresi uap dan menjelaskan secara kuantitatif kerugian yang tidak dapat diubah pada setiap komponen menggunakan persamaan kesetimbangan entropi (Press, 2016).

Kerusakan eksergi pada sistem VCRS ada kerusakan eksergi refrigeran dan kerusakan eksergi pada komponen padat. Keduanya, masing-masing diperoleh berdasarkan analisis eksergi siklus aktual dan siklus refrigeran. Kerusakan eksergi komponen yang mencerminkan ketidaksempurnaan kinerja komponen dipisahkan dengan mengurangi kerusakan eksergi refrigeran dari kerusakan eksergi sistem. Kerusakan eksergi pada kompresor sepenuhnya disebabkan oleh kompresor itu sendiri karena proses kompresi bersifat reversibel Ketika efisiensi kompresor 100% (Cui, 2022).

Untuk menghitung kerusakan eksergi refrigeran dan kerusakan eksergi komponen pada VCR-ORC. Pertama, analisis eksergi siklus sebenarnya dilakukan untuk mengetahui kerusakan eksergi yang terjadi pada setiap komponen. Untuk menyederhanakan model eksergi digunakan asumsi berikut :

- Aliran fluida stabil, energi kinetik dan potensial diabaikan

- Temperature lingkungan digunakan sebagai temperatur acuan
- Kapasitas pendinginan yang sama, profil temperature fluida yang sama (Morosuk & Tsatsaronis, 2009).

Metode perhitungan digunakan berdasarkan persamaan kesetimbangan eksergi berikut:

$$Ed_{Comp} = T_0 \times \dot{m} \times (S_{2a} - S_1) \dots\dots\dots(2.29)$$

2. Mixing Chamber

Mixing chamber adalah komponen dalam siklus kompresi uap yang berfungsi untuk mencampur uap refrigeran yang berasal dari kompresor dan turbin. Dimana refrigeran mengalami percampuran untuk meningkatkan efisiensi sistem. Disinilah suhu dan tekanan refrigeran di atur untuk meningkatkan transfer panas antara refrigeran dan lingkungan.

Analisis eksergi di mixing chamber dapat memberikan informasi tentang sejauh mana mixing chamber berkontribusi terhadap efisiensi siklus refrigerasi secara keseluruhan. Jika nilai kerusakan eksergi tinggi di mixing chamber, ini menunjukkan adanya potensi untuk meningkatkan efisiensi dengan memperbaiki desain atau control di dalam mixing chamber. kerusakan eksergi memberikan ukuran kuantitatif dari seberapa besar energi yang hilang selama proses sistem.

Nilai kerusakan eksergi *Mixing Chamber* dapat dihitung menggunakan rumus persamaan berikut :

$$Ed_{Mix} = T_0 \times (\dot{m}_1 \times S_{2a} + \dot{m}_2 \times S_{8a} - \dot{m}_3 \times S_3) \dots\dots\dots(2.30)$$

Aliran uap refrigeran dengan suhu dan tekanan yang berbeda bercampur untuk mencapai kondisi yang diinginkan sebelum memasuki kondensor. Penurunan suhu dan tekanan dapat menghasilkan kondisi yang lebih sesuai dengan kebutuhan sistem.

3. Kondensor

Analisis kinerja kondensor dalam siklus Rankine organik dengan berbagai fluida kerja dilakukan berdasarkan hukum termodinamika pertama dan kedua

untuk pemulihan sumber panas terbatas tingkat rendah. Hasilnya menunjukkan bahwa pemilihan fluida kerja dan suhu kondensasi mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kinerja termodinamika evaporator. Efektivitas penukar panas, kerusakan eksergi, atau efisiensi hukum kedua meningkat dengan meningkatnya suhu kondensasi. Namun rasio aliran massa cairan pendingin atau NTU menurun seiring dengan meningkatnya suhu kondensasi (Hoon Kim & Han, 2016).

Kerusakan eksergi pada kondensor sebagai fungsi suhu kondensasi berbagai fluida kerja. Patut dicatat bahwa dalam kasus ini pemusnahan eksergi sama dengan hasil kali suhu Deat State T_0 dan pembangkitan entropi di evaporator. Kerusakan eksergi meningkat dengan meningkatnya suhu kondensasi. Oleh karena itu, semakin tinggi suhu kondensasi, semakin tinggi pula irreversibilitas evaporator. Pada nilai temperatur kondensasi tertentu, eksergi destruksinya menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan meningkatnya temperatur kritis fluida kerja (Hoon Kim & Han, 2016).

Kerusakan eksergi menyebabkan penurunan efisiensi termodinamika suatu sistem jika dibandingkan dengan proses ideal yang setara (Sciacovelli et al., 2015).

Nilai kerusakan eksergi Kondensor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$Ed_{Cond} = T_0 \times \dot{m} \times \left(\frac{h_3 - h_4}{T_{Kond}} - (S_3 - S_4) \right) \dots\dots\dots(2.31)$$

4. Turbin

Kerusakan eksergi turbin gas bergantung pada variasi variabel termodinamika: tekanan dan suhu, untuk pengurangan rasio kompresi dan rasio udara-bahan bakar. Kondisi pengoperasian turbin gas sangat menentukan dalam analisis kinerja termodinamikanya.

Turbin memiliki peran kunci dalam mengubah energi termal menjadi energi mekanis, yang kemudian dapat digunakan untuk menghasilkan Listrik atau melakukan kerja mekanis. Oleh karena itu, analisis eksergi pada turbin memberikan

gambaran tentang seberapa efisien siklus secara keseluruhan dalam mengkonversi panas menjadi kerja.

Nilai kerusakan eksergi pada turbin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$Ed_{Turbin} = T_0 \times \dot{m}_2 \times (S_{8a} - S_7) \dots\dots\dots(2.32)$$

5. Boiler

Boiler mempunyai kontribusi besar terhadap kerusakan eksergi sistem, disusul turbin dan kompresor (Pektezel & Acar, 2019). Efisiensi boiler secara keseluruhan dipengaruhi oleh seberapa baik proses pembakaran berlangsung dan seberapa efisien penukar panas dalam bekerja.

Nilai kerusakan eksergi pada boiler dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$Q_{boiler} = (1 - \frac{T_0}{T_{Boiler}}) \times Q_{Boiler} + T_0 \times \dot{m}_2 \times (S_7 - S_{6a}) \dots\dots\dots(2.33)$$

6. Evaporator

Dalam konteks evaporator nilai kerusakan eksergi secara umum disebabkan karena inefisiensi internal di evaporator (Solanki et al., 2023). Pengaturan suhu dan tekanan dapat mempengaruhi nilai eksergi yang dihasilkan selama proses evaporasi. Jenis dan sifat fluida kerja juga berpengaruh pada efisiensi penukar panas.

Nilai kerusakan eksergi pada evaporator dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Ed_{Evap} = (1 - \frac{T_0}{T_{Evap}}) \times Q_{Evap} + T_0 \times \dot{m}_1 \times (S_1 - S_5) \dots\dots\dots(2.34)$$

7. Katup Ekspansi

Katup ekspansi pada umumnya menghasilkan proses ekspansi yang bersifat irreversibel. Artinya, sejumlah eksergi akan dihancurkan selama proses tersebut karena adanya gesekan.

Nilai kerusakan eksergi pada katup ekspansi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$Ed_{Exp} = T_0 \times \dot{m}_1 \times (S_4 - S_5) \dots \dots \dots (2.35)$$

8. Pompa

Analisis eksergi pada pompa membantu menghitung efisiensi pompa, yang didefinisikan sebagai rasio antara energi yang berguna (yang meningkatkan tekanan fluida kerja) dengan energi total yang diinput ke dalam pompa. Efisiensi ini memberikan gambaran tentang seberapa efisien pompa dalam mengonversi energi.

Nilai kerusakan eksergi pada pompa dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$Ed_{Pomp} = T_0 \times \dot{m}_2 \times (S_6 - S_4) \dots \dots \dots (2.36)$$

Gambar 3.1 di bawah ini.

Gambar 3.1 Foto Training Center Undip

