

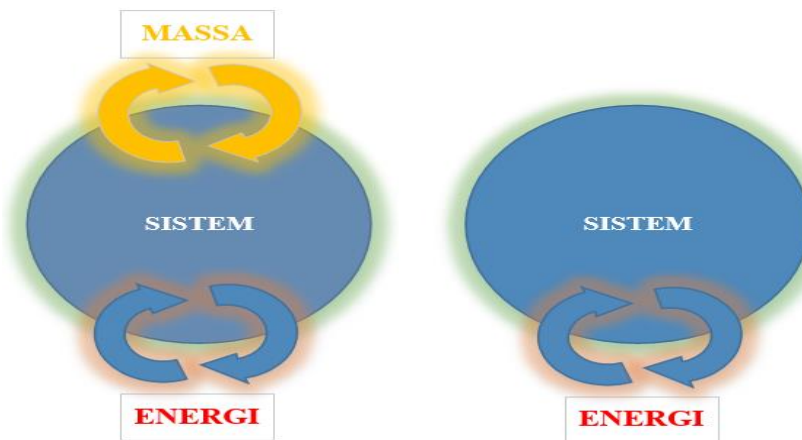
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Termodinamika Dasar

Termodinamika adalah cabang ilmu fisika yang mempelajari hubungan antara energi, panas dan kerja. Energi dapat dipandang sebagai kemampuan untuk menyebabkan perubahan. Termodinamika berasal dari kata Yunani yaitu *therme* (panas) dan *dynamic* (pergerakan atau perubahan titik), menggambarkan upaya awal untuk mengubah panas menjadi daya (Cengel *et al.*, 2019). Dalam mempelajari ilmu termodinamika perlu kiranya, mendefinisikan istilah sebagai berikut:

a. Sistem

Sistem diartikan sebagai suatu kumpulan benda yang berada dalam batasan tertentu. Sistem dibagi menjadi sistem terbuka dan sistem tertutup. Gambar 2.1 menunjukkan konsep sistem terbuka yang dapat bertukar energi dan materi dengan lingkungannya, namun berbeda halnya dengan sistem tertutup, yang dapat bertukar energi dengan lingkungannya, tetapi tidak dapat bertukar materi. (Warnana, 2016).



Gambar 2.1 Sistem terbuka (kiri) dan sistem tertutup (kanan)
sumber: (Warnana, 2016).

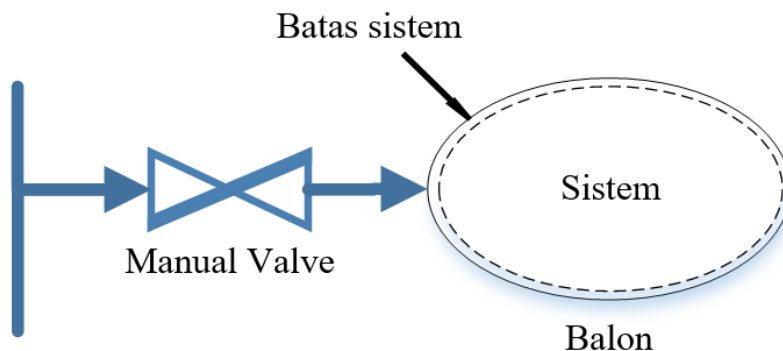
b. Lingkungan

Daerah yang berada diluar sistem dan dapat berinteraksi dengan sistem tersebut melalui pertukaran energi atau materi dinamakan lingkungan (*surrounding*). Konsep lingkungan

digunakan untuk memahami bagaimana energi dan materi bergerak keluar atau masuk dari sistem yang dipelajari (Ambiyar, 2009).

c. Batas Sistem

Pemisah antara sistem yang sedang dianalisis dan lingkungan sekitar dinamakan batas sistem atau *system boundary*. Batas ini bersifat nyata (fisik) atau imajiner (teoritis), tergantung pada bagaimana sistem didefinisikan. Batas sistem perlu dipahami dengan baik agar bisa lebih baik dalam menganalisis bagaimana suatu proses termodinamika berlangsung, baik dalam konteks energi maupun materi. Berikut adalah batas sistem sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Ambiyar, 2009).



Gambar 2.2 Sistem terbuka dengan batas sistem bergerak
sumber: (Ambiyar, 2009).

2.2. Hukum Termodinamika

Hukum ini memberikan landasan ilmiah yang menjelaskan perubahan energi dalam suatu sistem dan interaksinya dengan lingkungan. Ada 4 hukum utama termodinamika, yaitu hukum kesetimbangan termal (hukum nol), hukum konservasi energi (hukum 1), hukum entropi (hukum 2) dan hukum entropi pada temperatur nol absolut (hukum 3). Salah satu hukum paling mendasar di alam adalah hukum pertama termodinamika dengan konsep energi internal sistem, yang merupakan total energi kinetik dan potensial dari molekul dalam sistem. Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan selama suatu proses, itu hanya mampu bisa berubah bentuk (Cengel *et al.*, 2019).

Sementara pada hukum termodinamika 2 menyatakan tentang arah alami dari proses termodinamika dan berhubungan dengan konsep entropi. Entropi alam semesta selalu bertambah

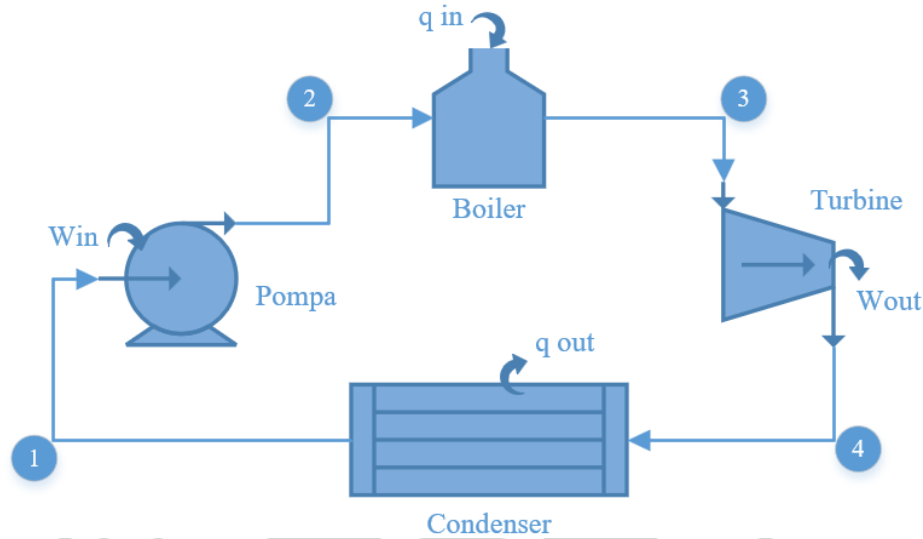
dalam proses alami, dan tidak ada proses yang 100% efisien dalam mengubah panas menjadi kerja (Hail, 2012). Hukum kedua ini tersebut mengindikasikan bahwa energi tidak hanya memiliki kuantitas, tetapi juga kualitas (dapat berkurang selama siklus berlangsung) yang dinyatakan sebagai eksergi (Agustin, 2018). Umumnya siklus termodinamika dibagi kedalam 2 tipe, yaitu:

a) Siklus Reversibel

Proses reversibel adalah proses yang dapat dibalik dan tidak mengubah sistem dan lingkungannya. Contoh proses reversibel adalah ekspansi atau kompresi gas dimana suhu dijaga konstan dan perpindahan panas terjadi sangat lambat, tanpa adanya kehilangan energi. Karakteristik proses reversibel diantaranya tidak ada gesekan mekanis atau resistansi dalam proses sehingga tidak ada kehilangan energi. Maka pada siklus ini, kondisi awal dicapai kembali pada akhir siklus (Wiendartun, 2012).

b) Siklus Ireversibel

Proses ireversibel merupakan proses tidak bisa dibalik tanpa meninggalkan perubahan sistem atau lingkungan dan selalu terjadi peningkatan entropi dalam sistem atau lingkungan. Karakteristik proses ireversibel diantaranya adalah terdapat gesekan sehingga mengalami kehilangan energi dalam bentuk panas sehingga efisiensi lebih rendah dari proses reversibel. Contoh pada siklus ini adalah panas yang mengalir dari benda panas ke benda dingin. Proses ini ireversibel karena entropi meningkat dan energi panas yang hilang tidak bisa sepenuhnya digunakan kembali. Maka pada siklus irreversibel, kondisi awal tidak didapati pada kondisi di akhir siklus (Wiendartun, 2012).

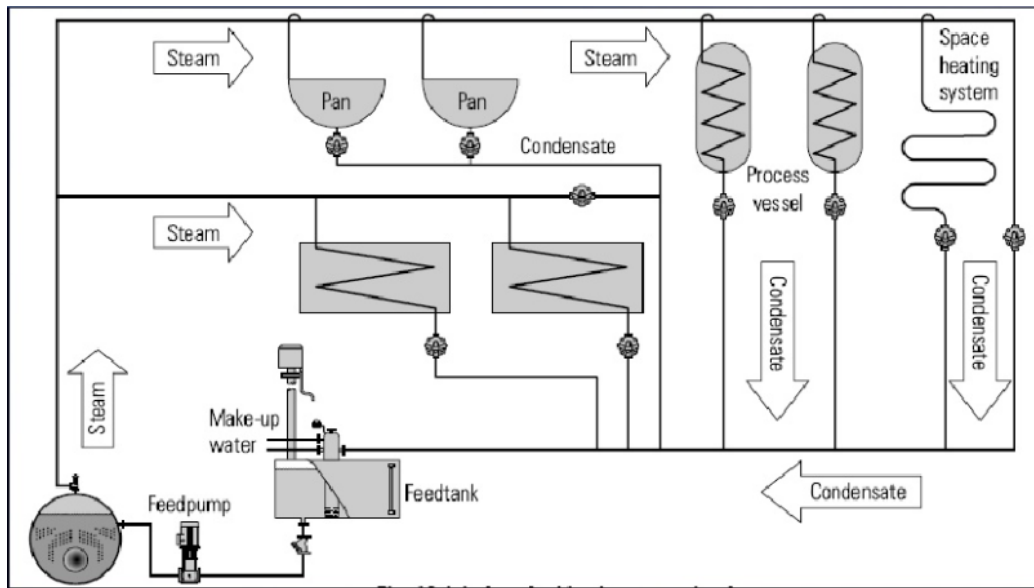


Gambar 2.3 Siklus *Rankine*
sumber: (Cengel, et al., 2019).

Siklus *rankine* ideal biasanya diasumsikan sebagai reversibel, namun dalam praktiknya, setiap komponen siklus menghadapi irreversibilitas yang mengurangi efisiensi keseluruhan sehingga irreversibilitas ini tidak dapat dihindari. Irreversibilitas menyebabkan kehilangan energi dan mengurangi kerja yang bisa dihasilkan dari energi panas yang masuk.

2.3. Siklus pada sistem uap dan Komponen Utama

Sistem uap merupakan sistem yang digunakan untuk menghasilkan, mendistribusikan dan menggunakan uap sebagai media pembawa energi. Sistem ini sering digunakan dalam pembangkit listrik, industri manufaktur, pemrosesan kimia dan fasilitas pemanas (UNEP, 2006). Fungsi utama dari sistem uap adalah untuk mentransfer energi panas ke proses lain melalui uap bertekanan. Sistem uap dirancang agar berjalan dalam siklus tertutup, dimana uap yang telah digunakan didinginkan, dikondensasikan dan dipompa kembali untuk digunakan dalam *boiler* sehingga meningkatkan efisiensi dan mengurangi pemborosan energi. Manfaat dalam penggunaan sistem uap diantaranya efisiensi energi tinggi, penerapan luas sehingga banyak digunakan oleh berbagai industri dan penghematan biaya. Berikut alur distribusi *steam* pada Gambar 2.4. (UNEP, 2006).



Gambar 2.4 Alur distribusi steam
sumber: pedoman efisiensi energi untuk industri di asia.

Proses kerja sistem uap secara umum melalui air diubah menjadi uap dalam *boiler* menggunakan panas dari bahan bakar yang kemudian uap jenuh dari *boiler* dipanaskan lebih lanjut menjadi uap *superheated*. Uap ini yang digunakan sebagai media pemanas pada alat penukar panas yang kemudian menghasilkan kondensasi. Air kondensasi dipompa ke *boiler* oleh pompa kondensat untuk memulai kembali siklus. Penggunaan air sebagai media pemanas dalam bentuk uap memiliki sejumlah keunggulan yang membuat ideal untuk berbagai aplikasi industri. Selain itu air juga lebih menguntungkan dibandingkan dengan media kerja lainnya (Dato, 2018), diantaranya:

- a. Biaya rendah, hal ini membuat air menjadi pilihan yang ekonomis.
- b. Air adalah zat yang tidak bersifat korosif.
- c. Air dapat menyimpan energi dalam bentuk panas laten.
- d. Air dapat dihasilkan dan digunakan pada tekanan yang tinggi.

Beberapa golongan uap yang dikategorikan berdasarkan sifat dan penggunaannya. (Pratama, 2020), diantaranya adalah:

a. Uap basah

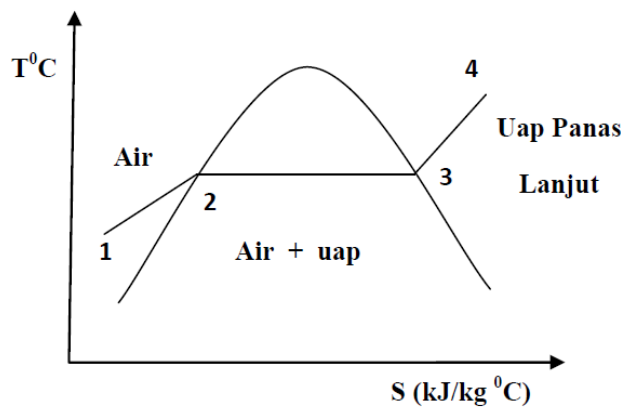
Campuran antara uap dan air (kondensat). Ini berarti bahwa tidak semua air telah berubah menjadi uap seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5. kondisi uap terdapat pada poin 2 hingga poin 3.

b. Uap jenuh (*Saturated*)

Uap berada dalam kesetimbangan dengan air pada suhu dan tekanan tertentu. Ini berarti bahwa jika uap didinginkan, uap akan mengembun menjadi air. Kualitas uap pada kondisi ini sudah 100%. Pada uap ini diperoleh penambahan kalor pada uap basah sehingga mencapai titik 3.

c. Uap panas lanjut (*Superheated*)

Uap yang telah dipanaskan lebih lanjut dari suhu jenuh pada tekanan tertentu. Tidak berada dalam kesetimbangan dengan air, sehingga tidak akan mengembun pada suhu tersebut (Pratama, 2020).



Gambar 2.5 Diagram T-S proses pembentukan uap.
sumber: (Pratama, 2020).

Diagram pada Gambar 2.5 merupakan salah satu alat penting dalam termodinamika yang digunakan untuk menganalisis proses yang melibatkan zat dalam fase uap dan cair. Diagram ini membantu memvisualisasikan perubahan keadaan zat. Pemanasan air dimulai dari poin 1 hingga menghasilkan kondisi cair jenuh pada poin 2. Pemanasan dari poin 1 hingga poin 2 akan menaikkan temperatur namun tidak merubah fasa cair. Perubahan fasa menjadi uap ini akan terjadi bila panas akan tetap diberikan pada air hingga mencapai kondisi pada poin 2 (Monintja, 2020).

$$Q_{1-2} = m_a (h_2 - h_1) \quad (2.1)$$

Pemberian panas selanjutnya yaitu akan membuat perubahan pada air menjadi uap jenuh (*saturated*) atau pemanasan dari poin 2 sampai dengan poin 3 (Monintja, 2020). Persamaan panas yang diserap pada kondisi fase berubah ini adalah

$$Q_{2-3} = m_u (h_3 - h_2) \quad (2.2)$$

Uap *saturated* secara kontinyu membuat kenaikan temperatur uap sehingga menjadi uap *superheated* yang ditunjukkan pada poin 4 (Monintja, 2020). Panas yang dibutuhkan adalah:

$$Q_{3-4} = m_u (h_4 - h_3) \quad (2.3)$$

Berikut beberapa komponen peralatan yang penting dalam proses sistem distribusi uap, diantaranya adalah sebagai berikut:

2.3.1. *Boiler Package*

Boiler uap perangkat yang digunakan untuk memanaskan air menggunakan bahan bakar (gas atau minyak) hingga berubah menjadi uap atau mencapai temperatur tertentu untuk tujuan pemanasan (Kharisma & Budiman, 2020). *Steam* pada tekanan atau suhu tertentu memiliki nilai energi termal yang dapat digunakan untuk mentransfer panas dalam bentuk energi kalor ke suatu sistem distribusi. Ini adalah prinsip dasar yang digunakan dalam banyak aplikasi industri dan domestik, seperti pemanas, pembangkit listrik dan proses manufaktur. *Steam* adalah media yang sangat efisien dalam mentransfer energi kalor karena kemampuan untuk menyimpan dan melepaskan panas dalam jumlah besar pada tekanan dan suhu tertentu (Rofiq, 2019).

Sistem *boiler* secara umum terdiri dari tiga komponen utama yaitu sistem air umpan (yang memasok air ke *boiler*), sistem *steam* (yang mengelola dan mendistribusikan uap) dan sistem bahan bakar (yang menyediakan energi untuk memanaskan air hingga menjadi uap). Setiap komponen memiliki fungsi penting dalam operasi *boiler* untuk memastikan efisiensi dalam menghasilkan uap (*steam*) dari air dengan memanfaatkan bahan bakar. Berbagai kontrol otomatis disediakan untuk mengatur tekanan, suhu dan aliran bahan bakar sehingga *boiler* bekerja pada kondisi optimal dan membantu menjaga keamanan *boiler*, mencegah tekanan berlebihan atau kondisi operasi yang tidak aman. *Safety valve* juga disediakan untuk mencegah tekanan berlebihan dalam *boiler* yang bisa menyebabkan ledakan (Rofiq, 2019).

2.3.2. Pompa Boiler Feed Water

Salah satu komponen penting dalam sistem *boiler*, yang bertugas mengalirkan air umpan (*feed water*) ke dalam *boiler* untuk diubah menjadi *steam* (uap). Memiliki fungsi utama yaitu memastikan bahwa *boiler* selalu memiliki air yang cukup pada tekanan dan laju aliran yang dibutuhkan, sehingga proses pemanasan dapat berlangsung terus menerus dengan aman dan efisien. Pompa sentrifugal yang paling umum digunakan karena efisiensinya dalam memindahkan air dalam jumlah besar. Pompa sentrifugal bekerja dengan memanfaatkan gaya sentrifugal untuk memindahkan air melalui *impeller* (Fauzi, 2021).

Pompa *boiler feed water* biasanya dilengkapi dengan berbagai sistem pengendalian otomatis untuk memastikan operasi yang aman dan efisien. Beberapa fitur yang mendukung operasi pompa ini adalah terdapat kontrol level air di *boiler*. Pompa air umpan sering dikendalikan oleh sistem otomatis yang memantau level air di dalam *boiler*. Jika air turun dibawah level aman, pompa akan otomatis bekerja untuk memasok air tambahan, jika level air terlalu tinggi, maka pompa akan berhenti atau memperlambat laju alirannya (Sinambela, 2022).

2.3.3. Heat Exchanger

Perangkat esensial yang digunakan untuk memindahkan panas antara dua atau lebih fluida (cairan atau gas) tanpa mencampurkannya. Alat ini sangat umum digunakan di berbagai industri untuk berbagai keperluan seperti pendinginan atau pemanasan fluida, pengondesasian uap atau pemanfaatan kembali energi termal. Industri proses menggunakan alat ini untuk pemanasan atau pendinginan fluida selama proses industri seperti dalam industri kimia, petrokimia dan pengolahan makanan (Indiarti, 2016).

Heat exchanger melakukan perpindahan panas antara fluida melalui dinding pemisah. Perpindahan panas dapat terjadi melalui konduksi (perpindahan panas yang terjadi tanpa disertai perpindahan partikel zat penghantarnya) dan konveksi (perpindahan panas yang disertai dengan perpindahan partikel zat penghantarnya dan umumnya terjadi pada fluida) (Muttaqin, 2012). Dua metode yang umum digunakan dalam proses perpindahan panas dalam *heat exchanger*, yaitu:

a. Direct Contact

Fluida yang berbeda (seperti gas dan cairan) langsung bercampur atau bersentuhan selama proses perpindahan panas. Contoh *cooling tower*, sebagian panas hilang melalui penguapan saat air bersentuhan langsung dengan udara.

b. Indirect Contact

Fluida panas mengalir di dalam tabung, sementara fluida dingin mengalir diluar *tube* dan panas ditransfer melalui dinding *tube*. Contoh: *shell and tube heat exchanger* dan kondensor perpindahan panasnya menggunakan pipa, plat atau jenis lainnya, tergantung tipe dari alat penukar panas.

Beberapa tipe aliran alat penukar panas yang digunakan untuk mengoptimalkan perpindahan panas, yaitu:

- a. Aliran paralel (*Parallel Flow*): mengalir dalam arah yang sama.
- b. Aliran kontra flow (*Counter Flow*): mengalir dalam arah berlawanan.
- c. Aliran lintas (*Cross Flow*): aliran mengalir berpotongan pada sudut 90°

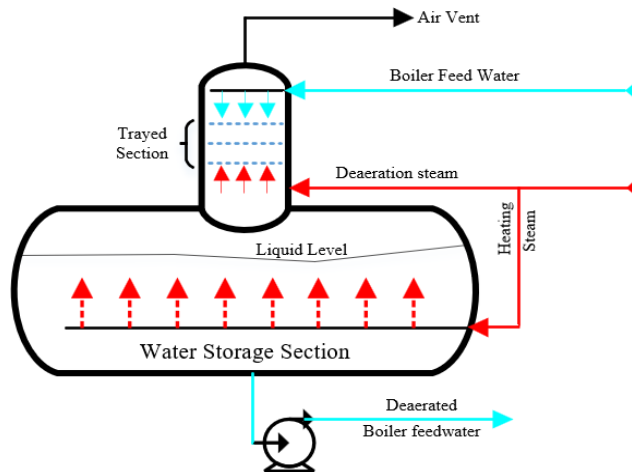
Berikut adalah empat jenis utama dari alat penukar panas:

- a. *Double Pipe Heat Exchanger*
- b. *Shell and Tube Heat Exchanger*
- c. *Plate Heat Exchanger*
- d. *Fin Tube Heat Exchanger*

2.3.4. Deaerator

Perangkat yang digunakan untuk menghilangkan gas terlarut, terutama udara, dari air atau cairan lainnya dengan tujuan untuk mencegah masalah korosi dalam sistem perpipaan dan peralatan seperti *boiler* dan sistem pemanas. Proses penghilangan gas terlarut ini penting untuk meningkatkan efisiensi sistem dan umur panjang peralatan, selain itu dengan menghilangkan gas terlarut seperti O₂ dan CO₂, pemakaian energi untuk memanaskan air dapat diminimalisir (Chairi *et al.*, 2017).

Prinsip dari proses deaerasi secara ringkas melalui air umpan dipanaskan hingga mencapai suhu tertentu (biasanya di atas 100 °C) untuk meningkatkan kemampuan air dalam mengeluarkan gas terlarut. Gas yang terlarut kemudian dihilangkan dari air melalui proses pemisahan dan gas yang dikeluarkan dapat dibuang ke atmosfer. Komponen utama pada *deaerator* diantara lain tangki *deaerator*, pemanas uap, pipa, *safety valve* dan kontrol tekanan dan suhu (Hariyatma *et al.*, 2015).

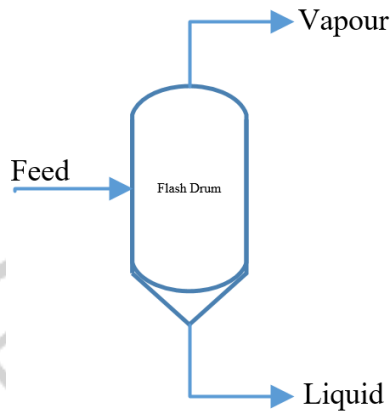


Gambar 2.6 Deaerator
sumber: Operasi pembangkit 2004, hal.83.

2.3.5. Flash Drum

Peralatan yang digunakan dalam proses pemisahan campuran fluida, khususnya dalam industri minyak dan gas, pengolahan kimia dan aplikasi sistem pemanas. Berfungsi untuk memisahkan campuran cair dan uap berdasarkan perbedaan tekanan dan temperatur. *Flash drum* dirancang untuk menerima campuran air dan uap, dengan mengubah tekanan dan temperatur, campuran tersebut dapat dipisahkan menjadi dua fase (uap dan cair). Peralatan ini beroperasi dengan mengurangi tekanan pada campuran cair, ketika tekanan diturunkan, sebagian cairan akan segera menguap (*flash*) menjadi uap. Proses ini memungkinkan pemisahan fase secara efisien. *Flash drum* dapat meningkatkan efisiensi secara keseluruhan dari proses pemisahan lebih lanjut seperti distilasi atau pemisahan lainnya. Komponen utama pada *flash drum* diantaranya tangki, inlet dan outlet, kompartmen, katup pengatur dan *level gauge* (Ketut et al., 2019). Aplikasi *flash drum* diantara lain:

- a. Industri minyak dan gas: digunakan dalam proses pengolahan minyak untuk memisahkan gas dan cairan dari hasil ekstraksi.
- b. Industri kimia: digunakan untuk memisahkan produk reaksi berdasarkan perbedaan fase.
- c. Sistem pendingin dan pemanas: digunakan dalam sistem pemanas dan pendinginan untuk mengelola uap dan cairan.



Gambar 2.7 Prinsip dasar *flash drum*
sumber: (Ketut, et al., 2019).

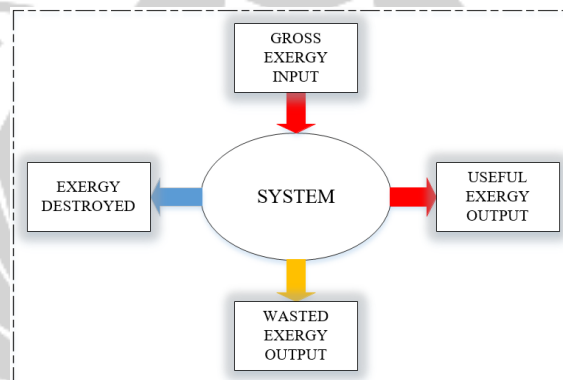
2.4. Konsep Dasar Analisa Eksergi

Analisis eksergi memiliki sejarah yang berkaitan erat dengan perkembangan ilmu termodinamika dan pemahaman tentang energi. Dasar dasar termodinamika dikembangkan oleh ilmuwan *Sadi Carnot* (1824) yang memperkenalkan konsep efisiensi termal dalam mesin panas dan kemudian *Rudolf Clausius* (1865) memperkenalkan konsep entropi. Konsep entropi menjadi fundamental dalam memahami batasan efisiensi energi. Tahun 1950 istilah eksergi mulai digunakan dalam literatur teknik. Konsep ini diperkenalkan oleh *G.N. Hatsopoulos* dan *E.P. Gyftopoulos* dalam penelitian tentang termodinamika dan sistem energi. Eksergi berasal dari bahasa Yunani “*ergon*”, yang berarti kerja. Eksergi mempresentasikan potensi kerja yang dapat diekstraksi dari sistem. Tahun 1970-an analisis eksergi mulai diterapkan dalam berbagai industri energi. Para insinyur dan ilmuwan menggunakan analisis eksergi untuk mengidentifikasi kerugian energi dan meningkatkan efisiensi sistem (Basri & Santoso, 2016).

Metode analisis eksergi digunakan untuk mengevaluasi efisiensi suatu sistem atau proses energi dengan mempertimbangkan kualitas energi dan potensi untuk melakukan kerja. Konsep ini didasarkan pada hukum termodinamika dan berfokus pada energi yang dapat digunakan secara berguna, bukan hanya jumlah total energi yang tersedia. Keunggulan analisis eksergi ini diantara lain penilaian kualitas energi yang memperhitungkan tidak hanya kuantitas energi tetapi juga kualitasnya, kemudian membantu dalam menemukan area dimana perbaikan efisiensi dapat dilakukan (Azwar, 2019).

Konsep eksergi memiliki beberapa fungsi utama yang sangat penting dalam analisis sistem energi dan proses termodinamika diantaranya membantu dalam merancang sistem yang lebih

efisien dan mengurangi kerugian (evaluasi efisiensi energi), memberikan wawasan yang mendalam dalam desain untuk memaksimalkan penggunaan energi dan meminimalkan pemborosan (pengoptimalan sistem), memahami kerugian eksergi sehingga organisasi dapat mengidentifikasi area dimana proses dapat ditingkatkan baik melalui peningkatan teknologi, pemeliharaan atau modifikasi proses (peningkatan kinerja proses), membantu dalam analisis kebijakan energi dan pengembangan strategi untuk keberlanjutan dengan menilai efisiensi dan potensi energi dalam sistem maka pembuat kebijakan dapat membuat keputusan yang lebih baik tentang investasi dan pengembangan energi terbarukan (Anggara *et al.*, 2022). Gambar 2.8 menggambarkan laju alir eksergi.



Gambar 2.8 Laju alir eksergi
sumber: (Anggara, et al., 2022).

Beberapa aspek dari eksergi yang perlu diketahui sebagai berikut:

- Eksergi sebagai ukuran tingkat keadaan. Eksergi menggambarkan seberapa jauh dari keadaan kesetimbangan dengan lingkungannya.
- Eksergi tidak bernilai negatif. Eksergi selalu memiliki nilai positif atau nol, ini sesuai dengan prinsip termodinamika bahwa sistem akan berusaha mencapai kesetimbangan dengan lingkungannya.
- Eksergi tidak kekal. Eksergi tidak dapat dipertahankan dalam sistem karena adanya irreversibilitas dalam proses.
- Eksergi sebagai kerja teoritis maksimum. Mencerminkan potensi energi yang tersedia untuk melakukan kerja, baik itu saat sistem bertransisi dari keadaan tertentu menuju keadaan mati (keadaan keseimbangan dengan lingkungan)
- Keadaan mati. Tidak ada potensi energi yang dapat dihasilkan dan tidak ada kerja yang dapat dilakukan oleh sistem dalam kondisi ini (Michael *et al.*, 2014).

2.4.1. Analisis Eksergi

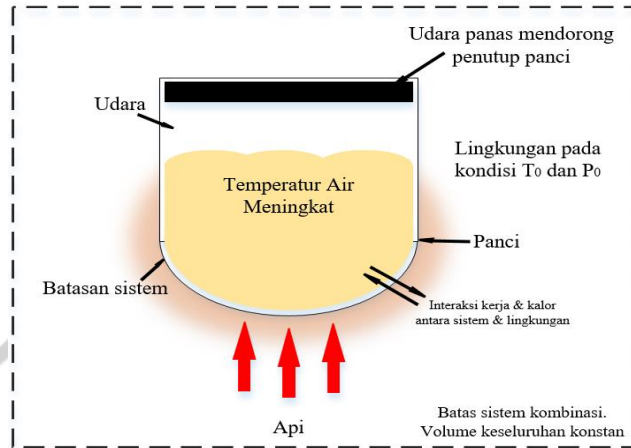
Sangat cocok terhadap penggunaan sumber daya yang lebih efisien, karena memungkinkan untuk mendapatkan informasi terkait lokasi, jenis dan besaran kerugian. Informasi ini dapat digunakan untuk merancang sistem termal dan mengupayakan dalam mengurangi sumber inefisiensi dalam sistem yang ada. Suatu tujuan analisis eksergi adalah untuk mengidentifikasi dimana letak kerusakan dan kerugian eksergi terjadi. Hal ini tentunya memungkinkan perhatian terhadap operasi sistem yang untuk perbaikan yang hemat biaya. (Michael *et al.*, 2014). Analisis eksergi suatu sistem (E) pada aliran tertentu diekspresikan sebagai berikut:

$$E_x = (U - U_0) + p_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0) + KE + PE \quad (2.4)$$

Dimana U, KE, PE, V dan S masing – masing menunjukkan energi internal, energi kinetik, energi potensial, volume dan entropi pada keadaan tertentu. Sementara U_0 , V_0 dan S_0 masing – masing menyatakan energi internal, volume dan entropi dari sistem ketika pada keadaan mati. Mengenai energi kinetik dan energi potensial masing masing dievaluasi relatif terhadap lingkungan. Jadi ketika sistem dalam keadaan *dead state*, sistem akan relatif terhadap lingkungan dan nilai energi kinetik dan energi potensialnya adalah nol (Michael *et al.*, 2014).

2.4.2. Eksergi Fisik

Eksergi fisik merupakan jumlah kerja mekanis yang dapat dicapai sampai sistem mencapai kesetimbangan dengan lingkungan (Utomo, 2020). Eksergi fisik merujuk pada komponen eksergi yang terkait dengan sifat fisik suatu sistem (Sundari *et al.*, 2015). Eksergi ini dapat diperoleh dari kombinasi keseimbangan energi dan entropi sistem yang ditunjukkan pada gambar 2.9 yang terdiri dari kombinasi sistem tertutup dengan lingkungannya.



Gambar 2.9 Kombinasi dari sistem tertutup dan lingkungannya
sumber: (Ramdhan, 2020).

Untuk dapat mengetahui kerja maksimum yang mampu diperoleh dari kombinasi pada sistem tersebut dengan menentukan batasan kombinasi sistem memungkinkan transfer energi berupa kerja antara sistem dan lingkungan. Serta memastikan kalau perpindahan panas yang terjadi baik dari maupun menuju ke sistem tidak mempengaruhi kerja yang dihasilkan (Ramdhan, 2020). eksergi fisik pada aliran tertentu dinyatakan pada rumus berikut.

$$\dot{E}_{x.ph} = \dot{m} \times e_{ph} \quad (2.5)$$

Dimana:

$$e_{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (2.6)$$

sehingga

$$\dot{E}_{x.ph} = \dot{m} \times [h - h_0 - T_0 (S - S_0)] \quad (2.7)$$

2.4.3. Eksergi Kimia

Komponen eksergi yang terkait dengan reaksi kimia dan perubahan dalam sistem kimia. ukuran maksimum kerja yang dapat diperoleh dari reaksi kimia. ini mencakup perubahan energi yang terkait dengan perubahan dalam struktur molekul, energi ikatan dan perubahan fase dalam zat zat kimia (Azwar, 2019). Perhitungan eksergi kimia menggunakan persamaan:

$$\dot{E}_{x.ch} = \dot{m} \times e_{ch} \quad (2.8)$$

Nilai eksergi molar (e_{ch}) pada air dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$e_{ch} = \frac{e^{-CH}}{M} \quad (2.9)$$

2.5. *Dead State* atau Keadaan Mati

Istilah yang digunakan dalam termodinamika dan analisis eksergi untuk merujuk pada kondisi dimana suatu sistem berada dalam kesetimbangan dengan lingkungan sekitarnya. Dalam keadaan mati, tidak ada potensi energi yang dapat digunakan untuk melakukan kerja. Nilai eksergi dalam keadaan mati adalah nol, dan keadaan ini digunakan sebagai titik referensi untuk analisis efisiensi sistem energi. Dengan memahami keadaan mati, insinyur dan ilmuwan dapat merancang dan mengoptimalkan sistem energi yang lebih efisien dan berkelanjutan (Wijaya *et al.*, 2012).

Keadaan mati biasanya diwakili oleh dua parameter utama yaitu temperatur dan tekanan. Keadaan mati sering didefinisikan pada suhu sekitar 300 K (27 °C). ini adalah suhu yang umum digunakan dalam banyak aplikasi teknis dan analisis termodinamika. *Dead state* juga biasanya diasumsikan pada tekanan atmosfer standar, yaitu 1,01325 bar (1 atm). Pada tekanan ini, semua gas dan zat berada dalam kondisi yang paling stabil dan tidak mengalami perubahan fase (Rifaldi, 2008). Syarat lain *dead state* atau keadaan mati ialah terdapat kesetimbangan termal, mekanik dan kimia serta kondisi fase stabil dan entropi maksimum. Memahami syarat syarat ini penting dalam analisis termodinamika dan eksergi, karena keadaan mati digunakan sebagai referensi untuk mengevaluasi efisiensi sistem dan proses energi. Dengan mempertimbangkan syarat ini, insinyur dan ilmuwan dapat merancang sistem energi yang lebih efisien dan berkelanjutan (Sunoto, 2017).

2.6. Kerusakan Eksergi

Destruction exergy merujuk pada kehilangan potensi kerja yang terjadi selama proses energi, yang disebabkan oleh berbagai faktor seperti irreversibilitas, gesekan, transfer panas yang tidak efisien dan reaksi kimia yang tidak sempurna. Dalam analisis eksergi, kerusakan eksergi menggambarkan seberapa banyak eksergi yang hilang dalam suatu sistem proses dan seringkali dinyatakan dalam bentuk entropi. Eksergi yang dihancurkan setara dengan peningkatan entropi, sesuai persamaan berikut

$$E_d = T_0 S_{gen} \geq 0 \quad (2.10)$$

Persamaan 2.11 mengindikasikan bahwa kerusakan eksergi tidak pernah dapat bernilai negatif. Dalam sistem nyata, selalu ada kerugian energi akibat irreversibilitas. Hanya dalam proses yang ideal dan reversibel, S_{gen} akan sama dengan nol dan dengan demikian E_d akan sama dengan nol. Persamaan tersebut juga digunakan untuk menganalisis efisiensi sistem energi dan proses. Dengan

menghitung E_d dan S_{gen} , insinyur dapat mengidentifikasi seberapa efisien suatu sistem dalam mengkonversi energi dan menemukan cara untuk mengurangi kerugian (Cengel *et al.*, 2019).

Eksergi suatu sistem dapat meningkat atau menurun, kerusakan eksergi yang terjadi dalam suatu proses adalah hal yang tak terhindarkan dan selalu positif atau nol. Memahami prinsip ini penting dalam analisis termodinamika dan desain sistem energi yang efisien dimana tujuan utama adalah meminimalkan kerugian energi dan memaksimalkan pemanfaatan eksergi. Prinsip penurunan eksergi dapat diringkas sebagai berikut:

$$E_{destroyed} \begin{cases} > 0 \text{ proses ireversibel.} \\ = 0 \text{ proses reversibel.} \\ < 0 \text{ proses impossible.} \end{cases}$$

Hubungan ini berfungsi sebagai kriteria alternatif untuk menentukan apakah termasuk suatu proses reversibel, proses ireversibel atau proses tidak mungkin (Cengel *et al.*, 2019).

2.7. Efisiensi Eksergi

Ukuran seberapa efektif suatu sistem atau proses dalam mengkonversi energi menjadi kerja berguna, dibandingkan dengan potensi kerja maksimum yang tersedia. Konsep ini sangat penting dalam analisis termodinamika dan rekayasa energi karena membantu mengevaluasi kinerja sistem, meminimalkan pemborosan energi dan mengidentifikasi peluang untuk perbaikan. Peningkatan efisiensi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar ataupun penggunaan bahan bakar yang lebih baik, seringkali membutuhkan pengeluaran tambahan untuk fasilitas dan operasional. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi dengan melakukan modifikasi atau perbaikan alat mungkin tidak diterapkan jika peningkatan biaya total akan terjadi (Michael *et al.*, 2014). Efisiensi eksergi dinyatakan dengan rumus:

$$\text{Efisiensi eksergi} = \frac{\text{eksergi yang dihasilkan}}{\text{eksergi masuk}} \times 100\% \quad (2.11)$$