

BAB II

DASAR TEORI

2.1 SIFAT-SIFAT TERMODINAMIKA AMMONIA-WATER MIXTURE

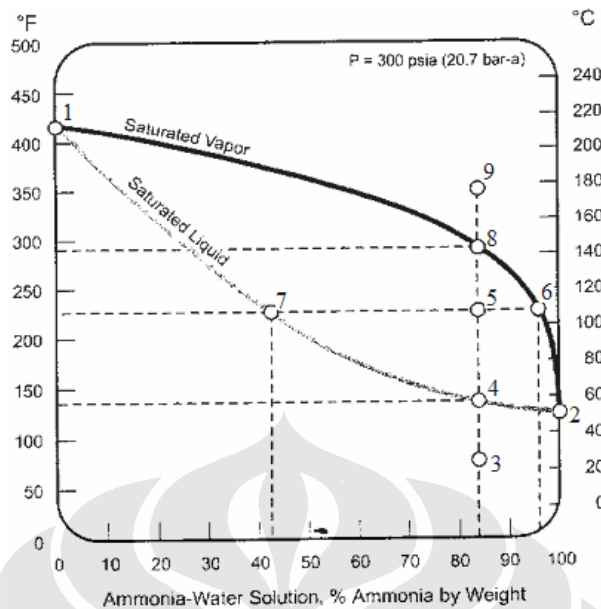
Campuran *ammonia-water* memiliki sifat fisika dan kimia yang tidak sama dengan fluida murni pembentuknya yaitu air dan amoniak. Jadi pencampuran keduanya akan menghasilkan fluida dengan sifat fisika dan kimia yang baru.

Esensi dari kemampuan *ammonia-water mixture* adalah untuk mendidih dan mengembun pada temperatur yang bervariasi. Amoniak memiliki titik didih dan titik embun yang rendah jika dibandingkan dengan air. Oleh karena itu, pencampuran amoniak dan air akan menjadi lebih *volatile* (mudah menguap). Maksudnya adalah ketika *ammonia-water* dipanaskan maka amoniak akan terlebih dulu mendidih maka akan terjadi distilasi. Juga sebaliknya ketika *ammonia-water* didinginkan maka air yang akan mengembun terlebih dulu.

Sifat unik inilah yang ditunjukkan pada gambar 2.1 dibawah ini. Dengan memahami diagram ini akan menjadi kunci mengenal siklus Kalina. Diagram tersebut memplot temperatur vs. konsentrasi *ammonia-water* pada 20.7 bar-a (temperatur ini ialah temperatur terendah dari kisarannya 20.7 – 31 bar-a)

Pada titik 1, 214 °C ialah titik saturasi (jenuh) air murni. Pada titik ini air akan mendidih atau uap mulai mengembun. Sama halnya juga pada titik 2, 51 °C ialah titik saturasi untuk amoniak.

Kurva bagian bawah diantara kedua titik tadi merupakan titik jenuh (saturate) cairan, atau titik didih konsentrasi berbeda pada *ammonia-water*. Disinilah letak awalnya penguapan terjadi ketika dipanaskan atau awal kondensasi/pengembunan terjadi ketika didinginkan. Kurva bagian atas merupakan titik jenuh (saturate) uap, atau titik embun (*dew*) penguapan komplit atau awal pengembunan terjadi.



Gambar 2.1. T - X diagram *ammonia-water mixture* [2]

Ketika campuran *ammonia-water* menguap atau mengembun, diagram fase tersebut akan menjelaskan prosesnya. Sebagai contoh pada titik 3, 84% cairan campuran *ammonia-water*, yang merupakan campuran pada umumnya untuk siklus Kalina. Ketika sumber panas dimasukkan, maka temperatur campuran tersebut mulai meningkat. Ketika mencapai temperatur 57 °C, titik 4, campuran mulai mendidih. Ingatlah yang pertama mulai mendidih adalah amoniaknya.

Setelah larutan ini mulai mendidih, tapi sebelum mencapai *fully vaporize*, larutan tersebut sebenarnya memiliki dua komponen terpisah – yakni uap dan cairan. Disebut dengan fase campuran/*mix-phase*. Sebagai contoh, pada temperatur 110 °C fase campuran, larutan konsentrasi 84% pada titik 5. komponen uap ditunjukkan pada titik 6, seperti yang telah dijelaskan fase campuran ini memiliki 96% uap amoniak. Untuk komponen cairan pada titik 7 mengandung sedikit konsentrasi amoniak yakni 42%.

Sumber panas memiliki temperatur maksimal yakni 116 °C. Proses penguapan *ammonia-water* akan berhenti di sekitar titik 5, dengan masih adanya cairan didalam uap. Oleh karena inilah digunakan separator (pemisah fase) untuk tipe Siklus Kalina KCS 34 dan 34g yang digunakan pada geotermal temperatur

rendah. Separator ini untuk memastikan bahwa yang masuk kedalam turbin adalah hanya uap saja pada titik 6.

Untuk penggunaan sumber panas yang tinggi, proses penguapan berlanjut dari titik 5 menuju kurva uap jenuh bagian atas pada temperatur 143 °C, titik 8. pada titik tersebut menandakan bahwa seluruh *ammonia-water* telah menguap, dan uap ini mengandung 84% amoniak. Dan uap ini akan menjadi *superheat* atau uap kering jika sumber panas memang benar-benar tinggi temperaturnya, titik 9. proses penguapan telah dijelaskan dengan komplit dan pada proses pengembunan maka prosesnya *ammonia-water* tinggal dibalik saja yakni didinginkan.

Fluida *ammonia-water* dapat disesuaikan untuk berbagai pemanfaatannya dengan merubah tekanannya atau dengan merubah campuran konsentrasi amoniaknya. Fleksibilitas ini untuk merubah fluida kerja sebagai penyesuaian dari sumber panas dan temperatur pendinginan adalah kunci dari pemanfaatan siklus Kalina.

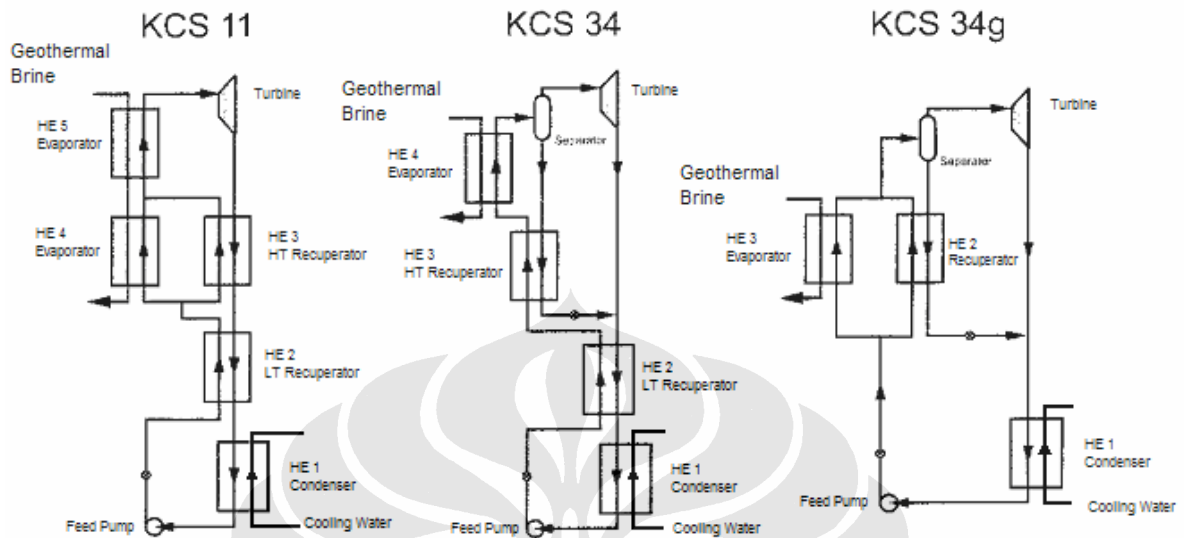
2.2 DESKRIPSI SIKLUS KALINA

Siklus Kalina merupakan penemuan oleh DR. Kalina seorang ilmuwan dari Rusia, Siklus Kalina merupakan pendekatan yang benar-benar baru untuk meningkatkan efisiensi konversi. Keunggulan siklus Kalina berada pada proses yang terjadi didalamnya dengan temperatur yang bervariasi dan dapat dicocokkan dengan temperatur jatuh pada sumber panas dengan kapasitas kalor yang terbatas, mengurangi pertumbuhan entropi pada alat penukar kalor oleh fluida utama. Kisaran temperatur pada proses pendidihan dari campuran *ammonia-water* dalam proses Kalina pada 100°C.

Kalina cycle dapat pula dijelaskan dengan menyatukan teknologi pada siklus Rankine dan juga teknologi AAR / *ammonia absorpsion refrigeration*. Karena kedua teknologi ini telah terbukti telah dikembangkan selama bertahun-tahun, maka siklus Kalina juga menghasilkan rancangan atau disain yang dapat dipercaya dan terstandarkan.

Sementara itu siklus Kalina bercirikan yang khas yakni memanfaatkan *ammonia-water mixture* sebagai fluida kerjanya. Maka setiap sistem didisain untuk mengeksplotasi fluida kerja untuk memperoleh efisiensi yang lebih besar.

Dalam disain ini menghasilkan *family* pada sistem siklus kalina. Setiap disain memiliki aplikasi sesuai pemakaiannya.



Gambar 2.2. Tipe Siklus Kalina [2]

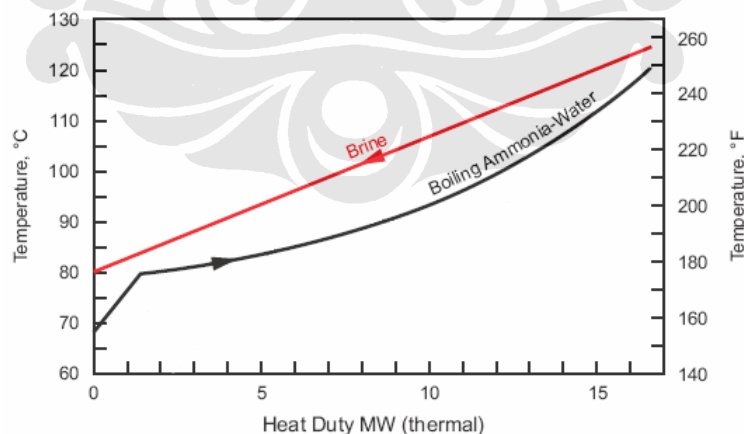
Dimulai dari kondenser, fluida kerja dengan 82 persen *ammonia-water*, cairan campuran dengan tekanan 5.5 bar-a dan temperatur 12.2 °C. dipompakan dengan *feed pump*. Fluida akan dipanaskan melalui *low temperature (LT)* dan *high temperature (HT) recuperators* menjadi 68°C sebelum masuk ke evaporator. Didalam evaporator, fluida kerja dipanaskan menjadi 118°C diambil dari air *brine* dengan temperatur 121°C. *Ammonia-water* akan menguap dengan kualitas 75 persen (75% uap, 25% cairan). Fluida dengan fasa-mix akan masuk ke separator dimana komponen uap (konsentrasi kaya amoniak) akan dipisahkan dari komponen cairannya (konsentrasi miskin amoniak).

Uap dengan tekanan tinggi akan menggerakkan turbin yang kemudian akan berekspansi dengan tekanan keluar yang rendah serta temperatur akan turun. Cairan yang miskin amoniak akan didinginkan di HT recuperator dimana energi yang dimilikinya digunakan untuk memanaskan fluida yang menuju evaporator. Aliran fluida miskin amoniak kemudian dikontrol oleh *valve* yang kemudian langsung masuk ke LT recuperator dan disatukan dengan uap yang kaya amoniak keluaran dari turbin. Aliran fluida ini akan *dispray* sehingga akan menghasilkan campuran dasar yakni 82 persen. Temperatur aliran fluida dari HT recuperator

adalah 48°C dan aliran uap keluar dari turbin 60°C, kedua aliran ini menjadi fluida fasa-mix, yang akan didinginkan di LT recuperator dimana nilai energinya digunakan untuk memanaskan aliran yang akan menuju evaporator. Sementara fluida ini mengalami pendinginan sebagian dari uap dari turbin mng-kondensasi, cairan yang keluar dari LT recuperator dikumpulkan dalam *drain tank* dan sementara itu uap yang masih tersisa akan langsung masuk ke kondenser. Uap ini memiliki konsentrasi amoniak tinggi, sedang cairan pada *drain tank* konsentrasi amoniaknya rendah. Temperatur dari kedua uap dan cairan ini adalah 38°C. cairan didalam *drain tank* dipompakan kedalam kondenser dan di-*spray*-kan ke uap kaya amoniak sehingga mengkondensasi dengan proses absorpsi. Proses ini akan terus berputar secara berurutan terus-menerus.

2.2.1 Proses Penguapan

Karena temperatur didih yang bervariasi, temperatur campuran *ammonia-water* meningkat. didalam alat penukar kalor (*heat exchanger*) dengan aliran berlawanan *counterflow*, akan mendekati garis lurus jatuh temperatur atas sensible sumber panas. Hal tersebut di ilustrasikan oleh profil kurva temperatur perpindahan kalor pada gambar 2.3. Gambar tersebut memperlihatkan proses perpindahan kalor didalam alat penukar kalor (APK) evaporator untuk menguapkan 84% *ammonia-water* pada 300 psia dengan menggunakan KCS 11.



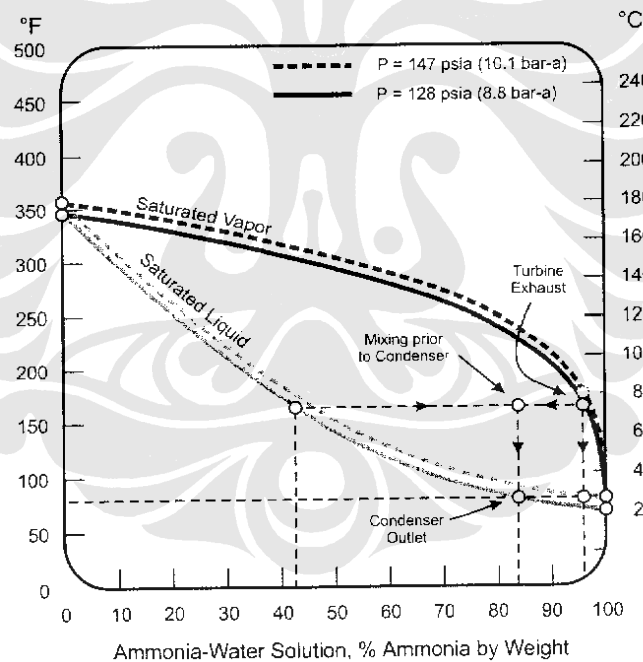
Gambar 2.3, T-Q diagram proses *boiling* [5]

Jika dibandingkan dengan fluida murni dengan temperatur titik didih yang konstan membuat perbedaan yang jauh dengan kurva sumber panas. Pada gambar

2.3 fluida *ammonia-water* memulai prosesnya pada temperatur 68°C dan terdapat *pinch point* sebesar 4°C pada suhu campuran 80°C . Dengan demikian hanya dibutuhkan lebih sedikit kalor untuk menguapkan campuran *ammonia-water* dibanding fluida murni, sehingga campuran ini cocok digunakan untuk sistem dengan *low temperature sources*.

Dari apa yang telah dibahas sebelumnya bahwa ketika fluida kerja dipergunakan, nilai kerja pada mesin kalor akan tergantung pada temperatur fluida, dan tidak lagi pada sumber panas yang sebenarnya. Cara yang paling sederhana dalam membandingkan efektifitas fluida kerja adalah dengan menggunakan temperatur fluida rata-rata sewaktu perpindahan kalor/panas untuk menghitung *losses*/ kerugian pasa siklus yang diakibatkan oleh fluida.

2.2.2 Proses Absorpsi – Kondensasi



Gambar 2.4. T-x diagram pada proses absorpsi-kondensasi [2]

Kembali ke titik 5, 6 dan 7 di diagram fase pada gambar 2.1. asumsikan pada titik-titik ini pada keadaan fluida *ammonia-water* akan memasuki separator . Uap kaya amoniak 96 persen langsung masuk ke turbin, sementara cairan miskin

amoniak 42 persen tidak melewati turbin. Kedua aliran ini akan kembali menyatu setelah dari turbin menjadi larutan 84 persen sebelum masuk ke *condenser*.

pemisahan uap/cairan yang berada di turbin KCS 34g dan KCS 34 menjadikan keuntungan dari penyerapan-pengembunan dalam bentuk tekanan lebih rendah relatif terhadap turbin. Mengarah pada gambar 2.4. yang menunjukkan diagram fase untuk dua skenario pengembunan yang mungkin. Titik 1 merupakan keluaran turbin mendekati kondisi uap jenuh. Jika larutan siklus tetap 96 persen amoniak, kemudian uap keluaran turbin akan mengembun dari titik 1 ke titik 5, pada 10.1 bar-a garis cairan jenuh. Bagaimanapun juga, jika campuran kaya dan miskin bersatu dari separator pada titik 4 sebelum masuk ke *condenser* di titik 2, kemudian hasil dari larutan 84 persen akan mengembun pada 8.8 bar-a kurva di titik 3. sehingga temperatur pengembunan sama pada kedua tekanan tersebut, 27 °C, amoniak 84 persen mengembun pada 1.3 bar-a *lower backpressure*, menghasilkan ekspansi lebih besar atas uap yang masuk ke turbin, 6 °C temperatur keluaran lebih dingin, dan 16 sampai 18 persen kerja bertambah pada turbin.

2.2.3 Proses Termodinamika Siklus Kalina

Hukum pertama dari termodinamika menyatakan bahwa efisiensi dari konversi kalor temperatur rendah menjadi kerja atau listrik. Menambahkan yang tadi, konversi kalor dari sumber panas dengan kapasitas kalor yang terbatas mempunyai tingkatan atas yang rendah untuk efisiensi disebabkan penurunan pada sumber temperatur sebagaimana kalor dipindahkan dari sumbernya. Untuk pembangkit daya dengan temperatur rendah akan sangat mahal jika digunakan untuk menangani laju temperatur yang besar untuk menghasilkan daya yang pas.

Dikarenakan komposisi *ammonia-water* dapat disesuaikan untuk sistem baik pada tingkat tekanan tinggi maupun tekanan rendah. Siklus Kalina memiliki batasan yang disebabkan oleh sifat kimiawi dari NH_3 yang akan menjadi tidak stabil pada temperatur diatas 300°C, dimana peng-karangan nitrida (*hardening*) akan menjadi masalah [2].

Sumber panas atau *heat sink* terbatas dan *sensible*. Oleh karena itu, temperatur dari sumber energi medium (spt. Air brine geotermal) mendingin

ketika memberikan energinya – temperaturnya bervariasi. Sama halnya juga medium *sink* (spt. Air atau udara) akan memanaskan dengan menyerap energi – juga temperaturnya bervariasi.

Mari kita asumsikan saja sumber panas geotermal dapat didinginkan dengan temperatur awalnya 149 °C menjadi turun ke 66 °C. Dan *heat sink* terpanaskan dari 21 °C menjadi 32 °C didalam *heat exchanger apparatus* (kondenser). Tenaga atau kerja yang secara potensial dihasilkan pada kondisi ini lebih besar daya yang dihasilkan bila dibandingkan pembangkit ORC [2].

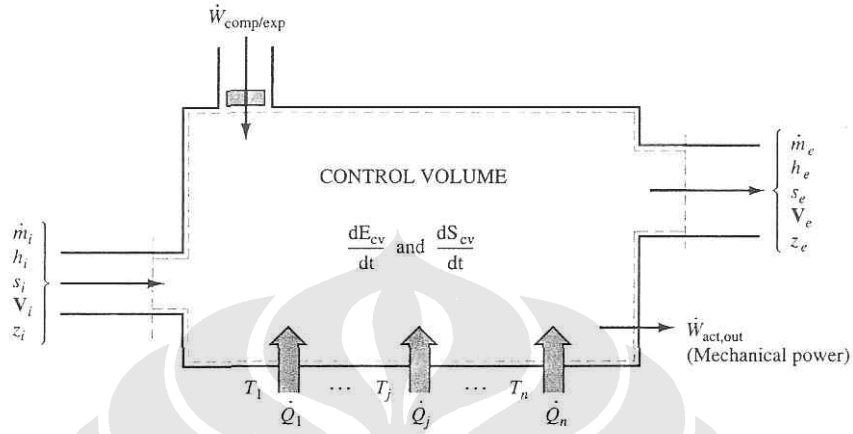
Idealnya pemanfaatan sumber panas dan medium *heat sink* secara langsung didalam siklusnya. Bagaimanapun juga hal tersebut tidaklah memungkinkan, setidaknya pada geotermal bertemperatur rendah. Mesin kalor seperti halnya turbin memerlukan medium yang bergerak diantara sumber panas dan *heat sink*, medium tersebut adalah fluida kerja. Sebuah turbin, didalam siklus tertutup, melakukan kontak langsung dengan fluida tersebut. Hal ini berarti kerja dari turbin, tidak hanya ditentukan dari temperatur sumber panas dan *heat sink* saja tetapi ditentukan juga oleh kalor yang dikandung oleh fluida kerja yang kontak langsung dengan turbin tersebut.

Jika tidak diperoleh nilai temperatur yang mendekati medium sumber panas dan *heat sink* maka hal terbaik yang harus dilakukan adalah mencari medium fluida kerja yang bisa menyerupainya.

2.3 KERJA DAN PRODUKSI ENTROPI

Kerja yang dirubah menjadi tenaga untuk sebuah sistem biasanya dihitung dengan menggunakan keseimbangan energi dan produksi entropi dihitung dari keseimbangan entropi. Nilai entropi biasanya berhubungan dengan penurunan dari performa dari sebuah sistem. Semakin besar produksi entropi, semakin jauh performa dari sebuah sistem menyimpang dari keadaan ideal. Untuk menjelaskan pengaruh dari produksi entropi pada kerja yang dipindahkan, akan sangat membantu untuk mengembangkan persamaan yang secara langsung berhubungan dengan konsep tersebut.

Persamaan untuk kerja yang *reversible* baik untuk sistem tertutup maupun sistem terbuka adalah dengan menggabungkan persamaan *steady-state* untuk keseimbangan energi dan keseimbangan entropi.



Gambar 2.5. Volume kendali terdapat perubahan energi oleh perpindahan kalor \dot{Q}_j pada temperatur permukaan T_j sepanjang permukaan kendali

Gambar diatas ini menunjukkan volume kendali (*control volume*) yang merubah energi oleh perpindahan kalor \dot{Q}_j pada temperatur permukaan T_j sepanjang permukaan kendali. Maka keseimbangan entropi untuk volume kendali adalah

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = \sum_{in} s_i \dot{m}_i - \sum_{out} s_e \dot{m}_e + \sum_{j=1}^n \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{cv} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana \dot{Q}_j/T_j merupakan nilai perpindahan entropi oleh perpindahan kalor.

Persamaan keseimbangan energi adalah

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_i \dot{m}_i - \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_e \dot{m}_e \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana \dot{W} mewakili nilai dari segala bentuk perpindahan kerja, termasuk juga kompresi dan kerja ekspansi.

Bagaimanapun juga, adalah penting untuk menentukan nilai dari bentuk transfer kerja yang bermanfaat /*useful* \dot{W}_u yang berhubungan dengan proses. *Useful work transfer* didefinisikan sebagai total perpindahan kerja dikurangi kerja

yang dilakukan oleh atmosfer. Jika kita ketahui tekanan lingkungan atau atmosfer dengan P_0 , yang akan bernilai konstan, maka kerja yang dilakukan oleh atmosfer terhadap sistem adalah $-P_0 dV$, dan

$$\delta W_u = \delta W - (-P_0 dV) \dots\dots\dots (2.3)$$

Untuk perubahan pada *state* terbatas /finite,

$$W_u = W + P_0 dV \quad \text{atau} \quad \dot{W}_u = \dot{W} + P_0 \frac{dV_{cv}}{dt} \dots\dots\dots (2.4)$$

Maka akan membuat hubungan yang dipakai untuk keseimbangan energi:

$$\dot{W} = \dot{W}_u - P_0 \frac{dV_{cv}}{dt} \dots\dots\dots (2.5)$$

Pada bagian kedua sebelah kanan merupakan kerja yang dilakukan oleh atmosfer.

Langkah berikutnya adalah mensubstitusikan persamaan [2.5] ke persamaan keseimbangan energi [2.2]. kemudian persamaan keseimbangan entropi [2.1] dikalikan dengan temperatur lingkungan T_0 . maka persamaan ini akan menjadi,

$$\frac{dT_0 S_{cv}}{dt} = T_0 \sum_{in} s_i \dot{m}_i - T_0 \sum_{out} s_e \dot{m}_e + T_0 \sum_{j=1}^n \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + T_0 \dot{\Phi}_{cv}$$

dan membuat keseimbangan entropi secara dimensional konsisten dengan persamaan energi. Kemudian format baru dari keseimbangan entropi diatas dikurangi dari format baru atas keseimbangan energi dan disusun kembali. Hasil akhir untuk nilai kerja bermanfaat \dot{W}_u adalah

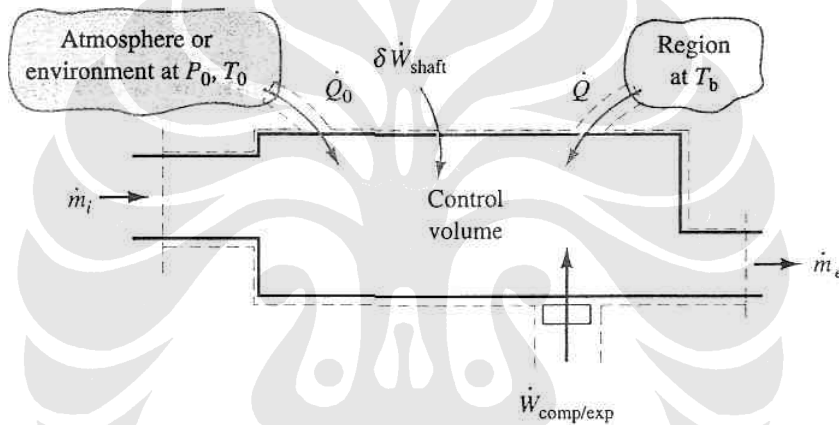
$$\begin{aligned} \dot{W}_u = & \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right)_e \dot{m}_e - \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right)_i \dot{m}_i \\ & - \sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) + \frac{d(E + P_0 V - T_0 S)_{cv}}{dt} + T_0 \dot{\Phi}_{cv} \dots\dots\dots (2.6) \end{aligned}$$

Persamaan [2.6] adalah hubungan yang secara langsung berkaitan dengan tenaga bersih yang bermanfaat dengan nilai produksi entropi didalam sistem. Persamaan general ini dalam bentuknya efek perpindahan massa, efek perpindahan kalor, berubah dalam volum kendali, dan *irreversibility*. Persamaan yang seperti inilah yang akan dirubah menjadi bentuk dimana setiap persamaan dinyatakan dengan fungsi *availability* / *exergi*.

Aplikasi pada persamaan [2.6] pada bagian dalam proses *reversible*, yang mana produksi entropi adalah nol. Memberikan persamaan general untuk nilai dari kerja bermanfaat *reversible* $\dot{W}_{rev,u}$, ketika $\dot{\alpha}_{cv} = 0$, persamaan [2.6] berkurang menjadi

$$\dot{W}_{rev,u} = \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) \dot{m}_e - \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) \dot{m}_i - \sum_{j=1}^n \dot{\mathcal{Q}}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) + \frac{d(E + P_0 V - T_0 S)_{cv}}{dt} \dots (2.7)$$

Persamaan ini akan digunakan pada tahap pengembangan berbagai bentuk dari fungsi *availability*.



Gambar 2.6. Skematik untuk pengembangan kerja-bermanfaat *reversible* dikaitkan dengan volume kendali yang merubah kalor semata-mata dengan lingkungan dan/atau reservoir termal lainnya.

Kesulitan akan ditemui pada term $\sum \dot{\mathcal{Q}}_j [1 - (T_0/T_j)]$ pada persamaan [2.6] dan [2.7], sehingga untuk mengatasi permasalahan ini, akan lebih baik jika T_j digantikan dengan sebuah angka temperatur konstan atau *uniform* pada batas */boundary* daerah aliran. Dalam hal ini persamaan [2.6] dapat dituliskan sebagai berikut

$$\dot{W}_u = \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) \dot{m}_e - \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) \dot{m}_i - \dot{\mathcal{Q}}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) + \frac{d(E + P_0 V - T_0 S)_{cv}}{dt} + T_0 \dot{\alpha}_{cv} \dots (2.8)$$

Dalam keadaan seperti ini dengan satu daerah temperatur T_b dan daerah lainnya yang termasuk atmosfer pada temperatur T_0 diperlihatkan pada gambar diatas. Keadaan dimana lingkungan berlaku sebagai satu-satunya penampung atau sumber dari perpindahan kalor merupakan hal penting dalam pengembangan konsep dari *availability* /exergi.

2.4 AVAILABILITY (EXERGY)

Persamaan untuk kerja aktual dan kerja *reversible* sering diformulasikan dalam term fungsi-*availability* untuk sebuah sistem terbuka dan sistem tertutup. Sampai saat ini adalah penting pertama kali untuk menentukan kerja potensial dari sebuah sistem pada *state* awal menuju *state* kesetimbangan dengan lingkungan sementara sejumlah kalor yang dipindahkan merupakan satu-satunya dengan lingkungan.

2.4.1 *Dead State*

Ketika sistem dan lingkungan berada pada kesetimbangan, tidak ada perubahan *state* pada sistem secara mendadak yang bisa terjadi, dan dari itu tidak ada kerja yang berjalan. Karena proses yang telah dijelaskan diatas memberikan kerja *reversible* maksimum atau kerja potensial yang berhubungan dengan *state* sebuah sistem. Ketika sistem dan lingkungannya telah mencapai kesetimbangan satu sama lain, sistem dikatakan pada kondisi *dead state*. Khususnya, sebuah sistem pada *dead state* secara termal dan mekanikal setimbang dengan lingkungan pada T_0 dan P_0 . nilai numerik (T_0 , P_0) direkomendasikan untuk *dead state* /*kedudukan mati* adalah yang berada pada atmosfer standar, 298.15 K dan 1.01325 bar (1atm)

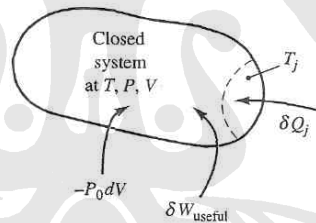
Syarat tambahan *dead state* adalah kecepatan dari fluida sistem tertutup atau arus fluida adalah nol dan energi gravitasi potensial juga nol. Syarat ini akan dipenuhi dengan merubah pengaturan beberapa ketinggian dari bumi, seperti level ketinggian dari air laut atau level dari tanah, menjadi nol. Pembatasan temperatur, tekanan, kecepatan, dan karakter ketinggian sebuah pembatasan *dead state* yang berhubungan dengan kesetimbangan termomekanikal dengan atmosfer. Hal ini pembatasan pada pengertian keseimbangan kimia dengan lingkungan, sebagai

contoh, tidak dipertimbangkan. Sehingga, massa-kendali tidak diperbolehkan untuk melewati atau bereaksi secara kimia dengan lingkungan. Kerja potensial pada sistem relatif terhadap *state-deadnya*, yang akan menukar kalor satu-satunya dengan lingkungan, disebut dengan *availability-termomekanikal* pada *state* tersebut.

Metode yang digunakan untuk mengevaluasi *availability* dan pertukaran *availability* untuk sistem tertutup dan sistem *steady-state* terbuka, seperti halnya proses perpindahan kalor. Perpindahan-*availability* berhubungan dengan interaksi kerja sudah sangat jelas. Interaksi kerja secara konsep adalah *reversible* pada titik dimana terjadi diperbatasan. Konsekuensinya, perpindahan-*availability* yang berhubungan dengan perpindahan kerja (tidak termasuk kerja terhadap lingkungan) sama dengan kerja-bermanfaat itu sendiri.

2.4.2 Availability untuk Sistem Tertutup

Situasi umum untuk sistem tertutup ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.



Gambar 2.7. Sistem tertutup

Perpindahan kalor δQ_j melewati batasan sistem pada temperatur T_j . Karena tidak ada aliran arus yang dihubungkan dengan sistem tertutup [*control mass* (cm)], persamaan [2.7] dikembangkan, sehingga kerja-bermanfaat netto menjadi

$$\dot{W}_u = \frac{d(E + P_0V - T_0S)_{cv}}{dt} - \sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) + T_0 \dot{\Phi}_{cv} \dots \dots \dots (2.9)$$

Catat bahwa E dapat digantikan dengan U untuk sistem *stationery*, dan simbol cs digantikan dengan cm.

Untuk penurunan perubahan *state*,

$$\delta \dot{W}_u = d(E + P_0V - T_0S)_{cv} - \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \delta \dot{Q}_j + T_0 \delta \dot{\Phi}_{cv} \dots \dots \dots (2.10)$$

Integrasi dari persamaan diatas antara *state* 1 dan 2 pada sistem tertutup menghasilkan

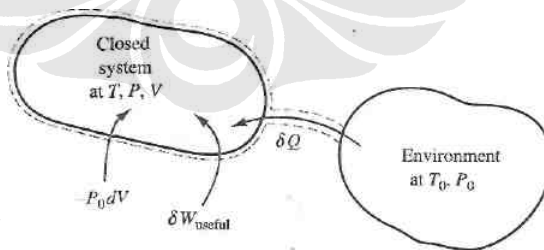
$$\begin{aligned} \dot{W}_u &= \Delta E + P_0 \Delta V - T_0 \Delta S - \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta \dot{Q} + T_0 \dot{\Phi}_{cm} \\ &= E_2 - E_1 + P_0 (V_2 - V_1) - T_0 (S_2 - S_1) - \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta \dot{Q} + T_0 \dot{\Phi} \end{aligned} \quad \dots \quad (2.11)$$

Terlihat T_i telah digantikan dengan T_b , temperatur batasan *uniform* dimana perpindahan kalor terjadi. Ini lah satu-satunya batasan pada pengembangan dari persamaan diatas. Dalam basis unit-massa dapat dituliskan menjadi

$$\begin{aligned} \dot{W}_u &= \Delta e + P_0 \Delta v - T_0 \Delta s - \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta q + T_0 \dot{\Phi}_m \\ &= e_2 - e_1 + P_0 (v_2 - v_1) - T_0 (s_2 - s_1) - \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta q + T_0 \dot{\Phi}_m \end{aligned} \quad \dots \quad (2.12)$$

Persamaan ini akan mengevaluasi dari kerja-bermanfaat *reversible* dengan mengatur $\sigma = 0$. Didalam kondisi ini, persamaan memprediksi nilai maksimum output kerja-bermanfaat atau nilai input minimum kerja-bermanfaat yang berhubungan dengan perubahan kedudukan yang diberikan.

Aplikasi dari persamaan [2.11] dan [2.12] pada dasarnya untuk menentukan perpindahan kerja-bermanfaat *reversible* yang terjadi ketika sistem tertutup merubah energi sebagai satu-satunya perpindahan kalor dengan lingkungan pada T_0 . keadaan seperti ini ditunjukkan oleh gambar dibawah ini,



Gambar 2.8. skematik pengembangan kerja *reversible*

dimana *boundary* /batasan digambar mengitari sistem tertutup dan wilayah perpindahan kalor. Perlu dicatat bahwa temperatur *boundary* T_b dimana perpindahan kalor terjadi adalah seragam dan konstan dengan nilai dari T_0 . untuk

itu, pengintegralan dari persamaan [2.11] dan [2.12] adalah nol. Jika keseluruhan proses adalah *reversible*, maka nilai dari σ juga nol. Sehingga persamaan [2.9] menjadi

$$W_{rev,u} = E_2 - E_1 + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) \dots\dots\dots (2.13)$$

Persamaan ini memberikan penjelasan hubungan dari *availability* pada sistem tertutup.

Availability atau *exergy* dari sebuah sistem tertutup pada *state* yang ditentukan didefinisikan sebagai kerja output maksimum yang bermanfaat yang mungkin diperoleh dari kombinasi sistem-atmosfer seperti halnya sistem berjalan dari *state* setimbang yang diberikan terhadap *dead state* oleh sebuah proses dimana letak perpindahan kalor terjadi hanya dengan atmosfer.

Untuk sistem tertutup yang berjalan dari *state* yang diberikan terhadap *dead state* dalam sebuah proses dimana perpindahan kalor terjadi hanya dengan lingkungan, kerja bermanfaat *reversible* diperoleh langsung dari persamaan [2.13], maka hasilnya adalah

$$W_{rev,u} = E_0 - U + P_0(V_0 - V) - T_0(S_0 - S) \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana E_0 , V_0 dan S_0 merupakan properties dari sistem tertutup pada *dead state*. Menurut standar konvensi penandaan, $W_u = W_{u,in} = -W_{u,out}$. Oleh karena itu, output kerja-bermanfaat *reversible* diberikan bernilai negatif, dari persamaan [2.14]. menjadi

$$W_{rev,u,out} = E - U_0 + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana "output *reversible*" menyatakan "output maksimum". Catat hasil ini hanya terbatas pada *dead state*. Persamaan ini kemudian mengukur *availability* pada sistem tertutup. *Availability* pada sistem tertutup diberikan simbol Φ dan dapat dihitung dari hubungan berikut ini

$$\begin{aligned} \Phi &= E - U_0 + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \\ \Phi &= (E + P_0V - T_0S) - (U_0 + P_0V_0 - T_0S_0) \dots\dots\dots (2.16) \end{aligned}$$

Dimana $E=U + KE + PE$ adalah total energi pada sistem tertutup. Dan kemudian *availability* spesifik /*specific availability* dapat dituliskan sebagai berikut

$$\phi = \frac{\Phi}{m} = e - u_0 + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimensi dan unit dari *availability* dan *availability* spesifik sama seperti energi dan energi spesifik, secara berurutan. Dengan menggunakan persamaan [2.16] sebagai *state* awal dan akhir 1 dan 2 pada sistem tertutup, didapat

$$\Delta\Phi = \Delta U + P_0\Delta V - T_0\Delta S = m(\Delta u + P_0\Delta v - T_0\Delta s) \dots\dots\dots (2.18)$$

Persamaan [2.18] akan digunakan pada pengembangan keseimbangan *availability*.

2.4.3 Perpindahan *Availability* Dikaitkan dengan Perpindahan Kalor

Perpindahan entropi yang dikaitkan dengan perpindahan kalor Q_j melintasi batasan sistem pada T_j digambarkan dengan nilai Q_j/T_j . perpindahan dari *availability* juga dikaitkan dengan perpindahan kalor. Pada temperatur T_R maka

$$W_{pot} = Q\eta_{carnot} = Q\left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right)$$

Dimana temperatur penampung adalah T_0 pada lingkungan dan W_{pot} bernilai positif. Tetapi kerja potensial pada energi relatif terhadap *dead state* adalah *availability*-nya. sehingga

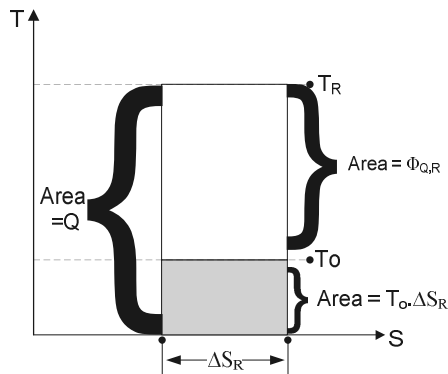
$$\Phi_{Q,R} = Q\left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right) \dots\dots\dots (2.19)$$

Dengan $\Phi_{Q,R}$ simbol dari perpindahan-*availability* berkaitan dengan perpindahan kalor Q masuk atau keluar pada sistem tertutup dengan temperatur T_R konstan.

Persamaan untuk $\Phi_{Q,R}$ memiliki intepretasi sebagai berikut pada TS diagram. Pertama, persamaan [2.19] dapat dituliskan seperti

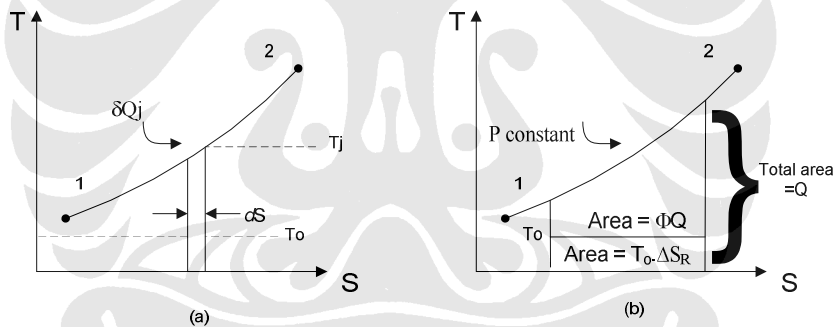
$$\Phi_{Q,R} = Q - T_0\left(\frac{Q}{T_R}\right) = Q - T_0\Delta S_R$$

Dimana ΔS adalah perubahan entropi selama proses *reversible* pada sistem tertutup pada temperatur konstan T_R . Setiap variabel persamaan diatas diwakili oleh area kotak pada gambar dibawah ini perpindahan kalor $Q = T_R \cdot \Delta S_R$.



Gambar 2.9. Plot T-S menunjukkan area mewakili perpindahan *availability* dikaitkan dengan perpindahan kalor dari sistem tertutup pada temperatur konstan T_R

Pada situasi umum dimana temperatur sistem tertutup bervariasi selama proses berlangsung, seperti perubahan temperatur konstan yang ditunjukkan pada diagram TS gambar (a) dibawah ini.



Gambar 2.10. Plot T-S menunjukkan area dari perpindahan *availability*

kita harus mempertimbangkan penambahan perpindahan kalor δQ_j dipindahkan dari sistem pada temperatur T_j . Kerja *reversible* untuk penambahan pada perpindahan kerja. Sehingga persamaannya adalah

$$\delta W_{rev} = \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \delta Q_j = \delta Q_j - \frac{T_0 \cdot \delta Q_j}{T_j}$$

Pada proses terbatas antar *state* 1 dan 2 kita harus integralkan persamaan. Hasil umumnya adalah

$$\Phi_Q = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \delta Q_j \dots\dots\dots (2.20)$$

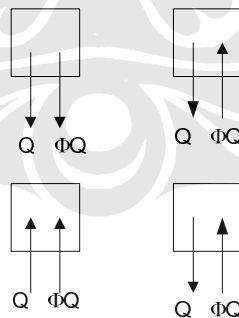
Dimana Φ_Q didefinisikan sebagai perpindahan-*availability* berkaitan dengan perpindahan kalor Q ke atau dari sistem tertutup atas uniform tetapi temperatur variabel T_j . Penekanan pada temperatur batasan adalah uniform dimana perpindahan kalor terjadi, temperatur *boundary* dapat diwakili oleh T_b , sehingga persamaannya menjadi

$$\Phi_Q = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q \dots\dots\dots (2.21)$$

Untuk perpindahan *availability* ϕ_Q pada basis unit massa, dapat ditulis dengan

$$\phi_Q = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \delta q_j \dots\dots\dots (2.22)$$

Hal penting dari persamaan [2.20] dan [2.22]: jika sistem temperatur T_A lebih besar dari T_0 , maka sistem mendapat *availability* katika perpindahan kalor ke sistem, dan sebaliknya. Bagaimanapun juga, jika temperatur sistem T_A lebih kecil dari T_0 , kemudian kerugian *availability* sistem ketika perpindahan kalor ke sistem dan menambah *availability* ketika perpindahan kalor keluar. Jadi aliran energi dan aliran *availability* berlawanan arah, ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.11. Arah perpindahan kalor Q dan perpindahan *availability* Φ_Q

2.4.4 Keseimbangan *Availability* untuk Massa Kendali

Persamaan [2.9] dikembangkan untuk mencari nilai kerja-bermafaat W_u berkaitan dengan sistem tertutup dimana perpindahan kalor Q_j melintasi permukaan kendali pada temperatur uniform T_b hasilnya adalah

$$\dot{W}_u = -\sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) + \frac{d(E + P_0V - T_0S)_{cv}}{dt} + T_0 \dot{\Phi}_{cm}$$

Untuk sistem tertutup *stationery*, energy kinetik dan energi potensial tidak berubah, dan E dapat digantikan dengan U. Untuk perubahan finite pada *state* pada kasus ini adalah

$$\dot{W}_u = -\int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta \dot{Q} + (\Delta U + P_0 \Delta V - T_0 \Delta S) + T_0 \dot{\Phi}_{cm} \dots\dots\dots (2.23)$$

Tapi term pertama bagian kanan didefinisikan oleh persamaan [2.20] sebagai Φ_Q , dan term kedua bagaian kanan didefinisikan oleh persamaan [2.18] sebagai $\Delta\Phi$ dan yang terakhir didefinisikan sebagai *irreversibility* I_{cm} didalam sistem tertutup. Maka persamaan tersebut menjadi

$$\Delta\Phi_{cm} = \Phi_Q + W_u - I_{cm} \dots\dots\dots (2.24)$$

Disini I_{cm} mengukur *availability destruction*/ penghancuran ketersediaan didalam sistem tertutup. Dengan kata lain, persamaan tersebut menyatakan bahwa

$$\left(\begin{array}{c} \text{availability} \\ \text{change of a} \\ \text{controll mass} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{availability} \\ \text{transfer with} \\ \text{heat transfer} \\ \text{into system} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{availability} \\ \text{transfer with} \\ \text{useful work} \\ \text{into system} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{awailability} \\ \text{destruction} \\ \text{within CMs} \end{array} \right)$$

Dengan demikian persamaan [2.23] dan [2.24] menyatakan keseimbangan *availability* untuk massa kendali melintasi perpindahan kalor dan interaksi kerja.

Semua *irreversibility* akan menghancurkan *availability* dan dapat dievaluasi langsung dari keseimbangan *availability* dengan menuliskan persamaan [2.24] dengan format

$$I_{cm} = W_u - (\Delta\Phi_{cm} - \Phi_Q) \dots\dots\dots (2.25)$$

Sebagai tambahan, persamaan diatas dapat ditulis sebagai interaksi kerja. Untuk proses reversibel, dimana $I_{cm} = 0$.

$$W_{rev,u} = (\Delta\Phi_{cm} - \Phi_Q)$$

Substitusi pada persamaan diatas untuk $W_{rev,u}$ ke persamaan [2.25] akan menghasilkan

$$I_{cm} = W_u - W_{rev,u} \dots\dots\dots (2.26)$$

Kedua hubungan diatas untuk I adalah ekivalen terhadap persamaan [2.24]. dan juga berguna dalam menghasilkan persamaan spesifik untuk *irreversibility* terhadap proses perpindahan kalor yang berasal dari persamaan [2.24]. untuk wilayah perpindahan kalor, baik $\Delta\Phi_{cm}$ dan W_u bernilai nol. Oleh sebab itu perpindahan kalor antara dua wilayah dengan temperatur diketahui, keseimbangan *availability* berkurang menjadi

$$I_Q = \Phi_{Q,in} - \Phi_{Q,out} \dots\dots\dots (2.27)$$

Perpindahan *availability* ini dikaitkan dengan perpindahan kalor pada *boundary* wilayah perpindahan-kalor semata-mata menentukan *irreversibility* didalam wilayah.

Peningkatan dalam prinsip entropi pada sistem terisolasi menyatakan bahwa

$$\Delta S_{isol} = \sigma_{isol} \geq 0$$

Sama halnya, ketika Q dan W adalah nol pada sistem terisolasi, keseimbangan *availability* oleh persamaan [2.24] berkurang menjadi

$$\Delta\Phi_{isol} = -I_{isol} \dots\dots\dots (2.28)$$

Karena I_{isol} harus selalu bernilai positif pada proses aktualnya, nilai *availability* berubah untuk sistem terisolasi menjadi negatif, maka

$$\Delta\Phi_{isol} \leq 0 \dots\dots\dots (2.29)$$

Ini adalah rumus untuk peningkatan pada prinsip entropi sistem terisolasi

2.5 ANALISIS AVAILABILITY VOLUME-KENDALI

Rumus untuk kerja-*reversible* dan arus *availability* akan menghadirkan keseimbangan *availability* untuk volume kendali pada *steady state*.

2.5.1 Kerja-Reversible untuk Volume Kendali Steady-State

Pengembangan secara umum pada kerja *reversible* untuk volume kendali *steady state* berasal dari pengembangan persamaan [2.9]. pada gambar 2.1 menunjukkan volume kendali yang memiliki perpindahan kalor Q_j pada temperatur *boundary* T_j . persamaan umum untuk kerja-bermanfaat pada situasi ini dari persamaan [2.6],

$$\dot{W}_u = \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) \dot{m}_e - \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) \dot{m}_i - \sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) + \frac{d(E + P_0 V - T_0 S)_{cv}}{dt} + T_0 \dot{\Phi}_{cv} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Jika situasi menjadi keadaan *steady state*, proses *steady-flow* (sf), term terakhir pada bagian kanan pada persamaan diatas adalah nol, hal ini dari pengertian *steady state*. Konsekuensinya,

$$\dot{W}_{sf} = \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) \dot{m}_e - \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) \dot{m}_i - \sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) + T_0 \dot{\Phi}_{cv} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

Dengan sf menandakan bahwa keadaan yang mewakili "*steady state, steady flow*". Perlu dicatat kalau kerja-bermafaat dan kerja shaft adalah sama pada kasus ini, karena $P_0 \Delta V = 0$. kerja *reversible* berhubungan dengan proses *reversible* internal dengan nilai $\dot{\Phi}_{cv}$ adalah nol. Oleh karena itu volume kendali dalam keadaan *steady state*,

$$\dot{W}_{sf,rev} = \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) \dot{m}_e - \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) \dot{m}_i - \sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

Akhirnya, untuk sistem dimana massa masuk pada *state 1* dan meninggalkan volume kendali pada *state 2*, persamaan diatas dapat dituliskan dalam basis unit massa, sbb

$$w_{sf,rev} = \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) - \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right) - \sum_{j=1}^n q_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

Persamaan [2.31] dan persamaan [2.32] mampu untuk mengevaluasi kerja *reversible* untuk volume kendali *steady state*. Persamaan ini akan memberikan output kerja maksimum atau input kerja minimum seperti fluida-*compressible* melalui volume kendali.

2.5.2 Fungsi Availability untuk Volume Kendali

Pada *dead state* untuk aliran yang melalui volume kendali menyatakan tidak hanya keseimbangan termal dan mekanikal fluida pada temperatur T_0 dan P_0 tetapi juga energi kinetik pada *dead state* adalah nol relatif terhadap langkungan (fluida tidak bergerak). Tambahan, energi potensial harus bernilai minimum. Jadi, nilai ketinggian adalah sama dengan ketinggian tanah dari lingkungan. Dari dasar ini:

Arus / *stream availability* dari fluida dalam aliran *steady* didefinisikan sebagai output kerja maksimum yang dapat dicapai fluida pada perubahan *reversibly* dari kedudukan awal ke *dead state* dalam proses dimana sejumlah perpindahan-kalor terjadi semata-mata dengan atmosfer.

Dari dasar persamaan [2.32] arus *availability* diukur dengan $(h + ke + pe + T_0s)$ pada kedudukan awal relatif terhadap *dead state*. Arus *availability* memiliki simbol ψ untuk unit massa, dan Ψ untuk total massa, dan $\Psi = m.\psi$, maka

$$\begin{aligned} \psi &= (h + ke + pe + T_0s) - (h_0 + pe_0 + T_0s_0) \\ &= h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

Dimana z diukur relatif terhadap z_0 dan $pe_0 = z_0$.

Volume kendali dengan jumlah inlet dan outlet lebih dari satu, persamaan [2.31] dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\dot{W}_{sf,rev} = \sum_{out} \psi_e . \dot{m}_e - \sum_{in} \psi_i . \dot{m}_i - \sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

Dimana e dan i adalah *exit* dan *inlet* pada arus.

2.5.3 Keseimbangan Availability untuk Volume Kendali Steady State

Persamaan [2.6] dikembangkan untuk mencari nilai kerja-bermanfaat $\dot{W}_{net,u}$ yang dihubungkan dengan volume kendali *unsteady-state* dimana kalor yang dipindahkan Q_j melewati permukaan kendali pada temperatur T_j di beberapa lokasi. Ketika persamaan ini digunakan untuk situasi *steady state*, properti didalam persamaan ini *invariant* dengan waktu. Maka hasilnya, persamaan umum berkurang menjadi,

$$\dot{W}_{act,u} = \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right)_e \dot{m}_e - \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 S \right)_i \dot{m}_i - \sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) + T_0 \dot{\Phi}_{cv} \quad \text{(steady state)} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

Penyajian terakhir untuk term inlet dan exit dapat digantikan fungsi arus *availability*. Pada term akhir bagian kanan adalah perpindahan *availability* dikaitkan dengan perpindahan kalor $\dot{\Phi}_Q$, dan term akhir $T_0 \dot{\Phi}_{cv}$ mengukur *irreversibility* didalam volume kendali, sehingga hasilnya, setelah disusun,

$$\sum_{out} \psi_e \dot{m}_e - \sum_{in} \psi_i \dot{m}_i = \dot{\Phi}_Q - \dot{W}_{act} - \dot{I}_{cv} \quad \text{(steady state)} \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

Dalam kata-kata persamaan ini menyatakan

$$\left(\begin{array}{l} \text{Net rate of} \\ \text{transfer of} \\ \text{availability out of} \\ \text{a controll volume} \\ \text{with mass flow} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{rate of} \\ \text{availability} \\ \text{transfer with} \\ \text{heat transfer} \\ \text{into the CV} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{rate of} \\ \text{availability} \\ \text{transfer with} \\ \text{work transfer} \\ \text{into the CV} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{rate of} \\ \text{availability} \\ \text{destruction within} \\ \text{a control volume} \end{array} \right)$$

Baik persamaan [2.30] dan persamaan [2.35] mewakili keseimbangan *availability* untuk volume kendali *steady state*. Kerja shaft ke volume kendali selalu meningkatkan *availability* terhadap massa yang melintas, sementara internal *irreversibility* selalu menurunkan arus *availability*. Dalam unit massa untuk volume kendali dengan satu inlet dan satu exit maka persamaannya menjadi

$$\psi_2 - \psi_1 = \dot{\phi}_Q - w_{act} - i_{cv} \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

Dimana $\dot{\phi}_Q = \sum q_j (1 - T_0/T_j)$. Serupa pada pengembangan sistem tertutup, persamaan [2.36] dapat digunakan untuk menunjukkan bahwa

$$i_{sf} = w_{sf} - w_{ref,sf} \quad \text{atau} \quad \dot{I}_{sf} = \dot{W}_{sf} - \dot{W}_{ref,sf} \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

Ini merupakan metode untuk menentukan *irreversibility* dalam keadaan volume kendali *steady-state* adalah dengan mengevaluasi perbedaan antara kerja shaft aktual dan kerja *reversible*.

Rumus terakhir term $\sum Q_j (1 - T_0/T_j)$ pada persamaan [2.30] (atau term ekivalen $\dot{\phi}_Q$ pada persamaan [2.36]) akan sangat sulit untuk dievaluasi nilai \dot{Q} dan T_j tidak

diketahui pada setiap posisi di *boundary* dari volume kendali. Untuk menghindarinya, diasumsikan dengan alasan yang tepat untuk menggantikan variabel temperatur permukaan T_j dengan temperatur *boundary* T_b , sehingga

$$\Phi_{Q,R} = \sum_j \phi_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \approx \phi \left(1 - \frac{T_0}{T_b} \right) \dots\dots\dots (2.38)$$

Nilai dari T_b biasanya adalah rata-rata dari temperatur inlet dan outlet.

2.6 EFISIENSI HUKUM-KEDUA ATAU EFEKTIVITAS

Hukum pertama efisiensi η , mengekspresikan rasio dari kuantitas energi. Pada konsep *availability* menggunakan hukum kedua efisiensi η_{II} atau hukum kedua efektifitas ϵ . Pada hukum pertama mengatakan bagaimana energi digunakan dibandingkan dengan proses ideal sedangkan efektifitas mengindikasikan bagaimana *availability* digunakan sebaik-baiknya.

2.6.1 Hukum-Kedua Efisiensi

Hukum pertama dan kedua dari efisiensi berbeda satu sama lainnya. Hukum pertama berdasar pada prinsip kekekalan. Dilain sisi entropi dan *availability* dari pandangan hukum-kedua adalah sifat yang tidak kekal. Dengan kehadiran *irreversibility*, entropi dihasilkan dan *availability* dimusnahkan. Efek pembentukan diukur dengan produksi entropi σ , dan efek akhir diukur dengan *irreversibility I*. Oleh karena itu hukum-kedua efisiensi mengukur kerugian / *losses* selama proses berlangsung. Definisi umum dari hukum-kedua efektifitas (atau η_{II}) adalah

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\text{useful availability out}}{\text{availability in}} \dots\dots\dots (2.39) \\ &= 1 - \frac{\text{availability destruction and losses}}{\text{availability input}} \end{aligned}$$

Dimana kerugian menyatakan perpindahan *nonuseful* /tidak-bermanfaat melintasi *boundary*. Pendekatan selanjutnya, khususnya *useful* untuk perangkat *steady-state*, adalah

$$\eta_{II} = \varepsilon = \frac{\text{rate of availability output}}{\text{rate of availability input}} \dots\dots\dots (2.40)$$

Hukum kedua menekankan pada fakta bahwa bentuk dari dua kuantitas energi yang sama bisa saja memiliki nilai *availability* yang berbeda. Energi ini merupakan nilai "berat" menurut *availability*-nya. Tidak seperti hukum-pertama efisiensi, efektifitas mengukur kerugian dalam kapasitas kerja selama proses berlangsung. Catat, apa yang menjadi input, dan apa yang dihitung sebagai kerugian.

Sebagai contoh untuk penggunaan konsep *availability* pada analisa hukum-kedua, sebuah mesin kalor yang beroperasi diantara dua reservoir termal pada T_H dan T_L . Untuk keadaan siklus aktual (*reversible*) $W_{act} = \eta_{th,act} \cdot Q_H$. jika siklusnya adalah *reversible*,

$$W_{ref} = \eta_{Carnot} \cdot Q_H = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) Q_H$$

Karena *availability* dikaitkankan dengan kerja shaft adalah nilai dari kerja shaft itu sendiri, dapat didefinisikan efektifitas dari siklus *power* dengan rasio *availability*-nya W_{act}/W_{rev} . Maka,

$$\varepsilon = \frac{W_{act}}{W_{rev}} = \frac{\eta_{uh,act}}{\eta_{Carnot}} = \frac{\eta_{uh,act}}{1 - (T_L/T_H)} \dots\dots\dots (2.41)$$

2.6.2 Efektivitas untuk Proses *Steady-State*

Pada rumus keseimbangan *availability* keadaan *steady-state*

$$\Delta\psi = \phi_Q - w_{act} - i_{cv} \dots\dots\dots (2.36)$$

Nilai efektifitas ε_C untuk kompresor atau ε_P untuk pompa didefinisikan sebagai perubahan (peningkatan) dari *availability* fluida dibagi dengan input kerja aktual. Maka,

$$\varepsilon_C = \varepsilon_P \equiv \frac{\psi_e - \psi_i}{w_{act,in}} = 1 - \frac{i - \phi_Q}{w_{act,in}} \dots\dots\dots (2.42)$$

Dimana semata-mata perpindahan kalor hanya dengan lingkungan. Ketika perpindahan kalor diabaikan persamaan diatas berkurang menjadi

$$\varepsilon_C = \varepsilon_P \equiv \frac{\psi_e - \psi_i}{w_{act,in}} = \frac{w_{act,in} - i}{w_{act,in}} \quad (\text{adiabatik}) \quad \dots\dots\dots (2.43)$$

Untuk turbin didefinisikan ε_T berkebalikan dengan ε_C . Maka,

$$\varepsilon_T \equiv \frac{w_{act,out}}{\psi_i - \psi_e} = 1 - \frac{i - \phi_Q}{\psi_i - \psi_e} \quad \dots\dots\dots (2.44)$$

Dimana sejumlah perpindahan kalor dengan lingkungan. Untuk turbin adiabatik adalah

$$\varepsilon_T \equiv \frac{w_{act,out}}{-\Delta\psi} = \frac{w_{act,out}}{w_{act,out} + i} \quad (\text{adiabatik}) \quad \dots\dots\dots (2.45)$$

Keseimbangan *availability* untuk nozzle adalah $\psi_1 = \psi_2 + i$. Hukum-kedua efektivitas nozzle ε_N berdasarkan output/input adalah

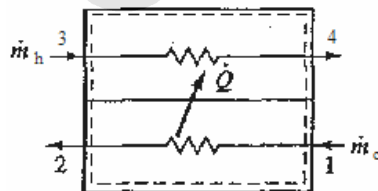
$$\varepsilon_N \equiv \frac{\psi_2}{\psi_1} = \frac{\psi_1 - i}{\psi_1} \quad (\text{adiabatik}) \quad \dots\dots\dots (2.46)$$

Kerugian *availability* pada nozzle subsonic biasanya sangat kecil. Persamaan ini juga dapat digunakan pada proses di throttling, karena sekali lagi q dan w adalah nol. Maka,

$$\varepsilon_{throttle} \equiv \frac{\psi_2}{\psi_1} = \frac{\psi_1 - i}{\psi_1} \quad \dots\dots\dots (2.47)$$

Dalam hal ini i bisa hampir besar relatif terhadap ψ_1 , yang menandakan kerugian yang besar dalam kerja potensial untuk fluida.

Kategori akhir, simak kalor berpindah diantara dua fluida tanpa bercampur. Gambar dibawah ini menunjukkan *steady-state* alat penukar kalor dengan aliran massa \dot{m}_h dan \dot{m}_c untuk aliran panas dan dingin.



Gambar 2.12. *steady-state* alat penukar kalor antara 2 fluida tanpa bercampur

Abaikan kalor yang berpindah kelingkungan, kerugian *availability* yang terjadi didalam alat adalah (1) kerugian karena perpindahan kalor melintasi

perbedaan temperatur finite (2) kerugian karena friksi. Nilai persamaan *availability* untuk keadaan ini adalah

$$0 = \dot{m}_c (\psi_2 - \psi_1) + \dot{m}_h (\psi_4 - \psi_3) + \dot{P}_{cv}$$

Cara mengukur efektivitas dari alat penukar kalor ini ditandai dengan meningkatkan *availability* pada aliran dingin dan menurunkannya *availability* pada aliran panas. Maka,

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_c (\psi_2 - \psi_1)}{-\dot{m}_h (\psi_4 - \psi_3)} \quad (\text{heat exchanger}) \dots\dots\dots (2.48)$$

Pertimbangan kedua adalah energi berpindah dengan percampuran dua atau lebih fluida secara kontak langsung. Skematiknya dapat dilihat pada gambar 2.20 untuk fluida yang bercampur: fluida dingin pada keadaan awal 1 dan fluida panas pada keadaan awal 2. keseimbangan fluidanya adalah

$$0 = \dot{m}_3 \psi_3 - \dot{m}_1 \psi_1 - \dot{m}_2 \psi_2 + \dot{P}_{cv}$$

Dimana $\dot{m}_c = \dot{m}_1$ dan $\dot{m}_h = \dot{m}_2$. Persamaan ini dapat dituliskan menjadi

$$\dot{m}_h (\psi_2 - \psi_3) = \dot{m}_c (\psi_3 - \psi_1) + \dot{P}_{cv}$$

Sama halnya dengan alat penukar kalor diatas, efektivitas untuk percampuran langsung dapat didefinisikan keuntungan *availability* dari fluida dingin yang masuk dibagi dengan penurunan *availability* dari fluida panas, sehingga

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_c (\psi_3 - \psi_1)}{\dot{m}_h (\psi_2 - \psi_3)} \quad (\text{mixing}) \dots\dots\dots (2.49)$$

2.7 RANCANGAN OPTIMISASI

Proses optimisasi diharapkan akan memperoleh sebuah hasil rancangan yang optimal atau subdomain dimana hasil optimal berada, dan rancangan akhir sistem diperoleh pada solusi dasar ini. Sebuah rancangan optimal juga harus memenuhi persyaratan dan batasan (*constraints*), sehingga rancangan yang dipilih adalah yang dapat diterima atau dapat berjalan (*workable*).

2.7.1 Objective Function

Dalam sebuah proses optimasi diperlukan spesifikasi dari nilai sebuah besaran atau sebuah fungsi yang akan menjadi bahan untuk dilakukan

maksimalisasi atau minimalisasi. Hal ini disebut sebagai *objective function*, dan menggambarkan aspek atau ciri-ciri yang merupakan bagian perhatian utama dari kondisi yang diberikan. *Objective function* yang akan dioptimalkan pada sistem termal biasanya berdasarkan pada sifat-sifat dibawah ini [3]:

1. berat
2. ukuran, volume
3. laju konsumsi energi
4. laju perpindahan kalor
5. efisiensi
6. overall profit
7. cost incurred
8. environmental profit
9. durability and dependability
10. safety
11. system performance, output delivered

proses optimisasi mencari nilai variasi rancangan untuk memperoleh objective function yang minimal atau maksimal, tanpa melebihi constraint.

2.7.2 Constraint

Nilai constraint diberikan pada permasalahan rancangan yang muncul dikarenakan adanya pembatasan pada kisaran variabel fisik, dan juga karena prinsip dasar konservasi energi yang harus terpenuhi. Pembatasan ini bisa karena ruang, peralatan, dan material yang digunakan. Yang berakibat pada batasan dimensi dari sistem, temperatur tertinggi yang bisa dicapai untuk keselamatan, tekanan yang diizinkan, laju aliran material, gaya yang dihasilkan dan lain-lain. Ada dua tipe constraint, *equality* dan *inequality* constraint. Seperti namanya *equality* /kesamaan, merupakan persamaan yang mungkin dapat dituliskan seperti

$$G_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

$$G_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

·

·

·

$$G_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

Sama juga halnya dengan *inequality* constraint mengindikasikan nilai maksimum dan nilai minimum dari fungsi dan mungkin dapat dituliskan seperti

$$H_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq C_1$$

$$H_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \geq C_2$$

$$H_3(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \geq C_3$$

⋮
⋮
⋮

$$H_l(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \geq C_l$$

Untuk itu baik nilai batas atas atau batas bawah dapat diambil sebagai *inequality* constraint. Sehingga constraint dapat diberikan dengan seperti $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$, $P_{\min} \leq P \leq P_{\max}$ dan seterusnya.

Untuk *equality* constraint bisanya dapat diperoleh dari hukum konservasi energi, contohnya seperti kondisi keadaan *steady-flow* didalam volume kontrol, dapat dituliskan seperti

$$\sum (\text{laju aliran massa})_{in} - \sum (\text{laju aliran massa})_{out} = 0$$

atau

$$\sum (\rho VA)_{in} - \sum (\rho VA)_{out} = 0$$

2.7.3 Operating Condition v.s. Component

Optimisasi akan berfokus pada sistem maka yang menyangkut permasalahan perangkat keras yang berkorelasi dengan sisi dimensi, material, komponen, dan lain-lain divariasikan untuk memperoleh hasil rancangan terbaik berkaitan dengan objective function.

Kondisi operasional bervariasi dari aplikasi satu dengan lainnya dan dari satu sistem ke sistem lainnya. Kisaran variasi pada kondisi ini dihasilkan oleh perangkat keras yang digunakan, seperti pemanas yang digunakan pada *furnace* maka panas input dan kisaran temperatur sudah fiks oleh spesifikasi peralatan pemanas tersebut. Kondisi operasional pada sistem termal biasanya pada variabel berikut ini:

1. laju kalor masuk
2. temperatur
3. tekanan

4. massa atau jalu aliran volume
5. kecepatan, rpm
6. komposisi kimia

semua variabel diatas yang megkarakteris operasional pada sistem termal mungkin di set dengan nilai yang berbeda, melebihi kisaran yang telah ditentukan sistem sehingga mempengaruhi output sistem. Akan sangat bermanfaat untuk mencari kondisi operasional optimum dan peforma sistem.

2.7.4 Mathematical Formulation

Dasar formulasi matematika untuk optimisasi permasalahan pada objective function dan constraint. Pertama pertimbangkan formulasi dalam bentuk umum dan perhatikan contoh dibawah ini. Langkah – langkah yang digunakan dalam memformulasikan permasalahan sebagai berikut:

1. tentukan variabel rancangan , x_i dimana $I = 1, 2, 3, \dots, n$
2. pemilihan dan pendefinisian dari objective function, U
3. menentukan constraint kesamaan, $G_i = 0$, dimana $I = 1, 2, 3, \dots, n$
4. menentukan constraint ketidaksamaan,
 $H_i \leq$ atau $\geq C_i$ dimana $i = 1, 2, 3, \dots, l$
5. konversi constraint kesamaan menjadi ketidaksamaan, jika diperlukan.

Penentuan nilai pada tiap variabel diatas sangat penting dalam melakukan optimasi.

2.8 METODE OPTIMASI

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan dalam menyelesaikan permasalahan optimasi pada sebuah sistem, setiap metode memiliki batasan dan juga keunggulan dari metode lainnya. Sehingga untuk sebuah permasalahan optimisasi, satu metode mungkin akan tepat sementara beberapa metode yang lainnya tidak dapat digunakan. Pemilihan metode bergantung pada sifat dasar persamaan yang ada dalam objective function dan constraint.

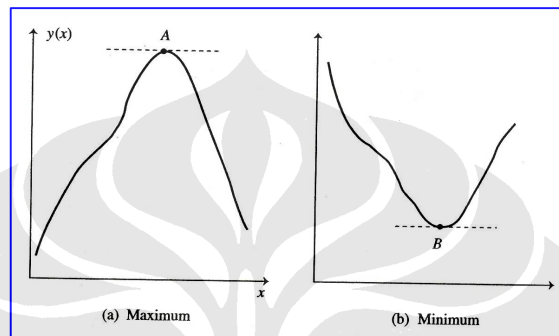
Berikut ini beberapa metode yang digunakan dalam melakukan optimasi:

1. Metode kalkulus

2. Metode penelusuran
3. dll.

2.8.1 Metode kalkulus

Menggunakan kalkulus untuk melakukan penentuan optimasi berdasarkan pada penurunan pada objective function dan constraint. Penurunannya dilakukan untuk mencari daerah maksimal dan minimal.



Gambar 2.13. Distribusi *objective function*, menunjukkan nilai maksimum dan minimum [3]

Metode yang menggunakan perhitungan seperti kalkulus adalah metode perkalian lagrange (*lagrange multiplier*). Objective function dan constraint di kombinasikan menjadi konstanta, yang disebut dengan peng-kali Langrange, untuk menghasilkan sistem persamaan aljabar. Persamaan ini kemudian diselesaikan secara analitik atau dengan secara numerik.

Kisaran pemakaian metode kalkulus untuk optimisasi sistem termal memiliki batasan karena kompleksitas yang akan muncul pada sistem ini. Penyelesaian secara numerik harus dilakukan pengenalan pada sifat sistem dan implisit, persamaan nonlinear yang melibatkan variabel sifat material sering terjadi.

2.8.2 Metode Penelusuran

Metode ini melibatkan pencarian dari solusi terbaik dari beberapa rancangan dapat dikerjakan. Variabel rancangan hanya mengambil pada nilai tertentu, kombinasi yang berbeda-beda dari variabel ini akan memperoleh kemungkinan rancangan yang cocok/ tepat. Jika variabel ini dapat divariasikan *continously* pada kiaran yang diperbolehkan, maka akan diperoleh rancangan yang

cocok dengan merubah variabel, sehingga rancangan optimal diantara beberapa rancangan tersebut.

Beberapa metode penentuan dikembangkan untuk optimisasi yang akan digunakan untuk optimasi sistem termal. Dikarenakan usaha untuk melibatkan eksperimental atau simulasi numerik untuk sistem termal, biasanya sistem yang kompleks, adalah penting untuk meminimalkan angka simulasi yang dijalankan atau iterasi yang diperlukan untuk memperoleh optimum [4].

Metode ini memiliki beberapa pendekatan tergantung pada permasalahan yang dihadapi, apakah ada constraint atau tidak dan juga pada apakah permasalahannya berada pada variabel tunggal atau variabel banyak (*multiple*).

Metode eliminasi, metode ini merupakan pendekatan dari metode penelusuran yang akan mengeliminasi *region* /daerah yang diperkirakan tidak ada nilai optimum didalamnya. Untuk permasalahan dengan variabel tunggal, metode penelusuran dengan pendekatan eliminasi adalah:

1. exhaustive search
2. dichotomous search
3. fibonacci search
4. golden section search

dari tiap pendekatan diatas memiliki karakter masing-masing, keunggulan, penggunaan. Untuk exhaustive search dapat pula digunakan pada permasalahan multivariabel.