

Capitolul 4

PRINCIPIUL III AL TERMODINAMICII EXERGIA ŞI ANERGIA

Principiul III al termodinamicii se bazează pe generalizarea datelor experimentale şi face posibilă determinarea valorică a funcţiilor de stare. Principiul III al termodinamicii a fost formulat, pentru prima dată, de Walther Nernst, este cunoscut şi sub denumirea de "Teorema lui Nernst" şi are următorul enunţ: *Izoterma de zero absolut coincide cu adiabata*. Mai târziu, Max Planck a reformulat enunţul Principiului III în felul următor: *Atunci când temperatura absolută a unui sistem termodinamic tinde către zero, şi entropia acestuia tinde către zero*.

$$S_0 = \lim_{T \rightarrow 0} S \rightarrow 0$$

Consecinţele Principiului III al termodinamicii sunt următoarele:

1. temperatura de zero absolut este imposibil de atins;
2. căldurile specifice şi coeficienţii termodinamici se anulează atunci când temperatura tinde către zero absolut.

Exergia şi **anergia** reprezintă componente ale energiei. **Exergia** este acea parte a energiei care poate fi transformată integral în altă formă de energie, în timp ce **anergia** este netransformabilă.

Principiile termodinamicii pot fi enunţate cu ajutorul exergiei şi anergiei astfel:

Principiul I: *Pentru orice proces termodinamic, suma dintre exergie şi anergie rămâne constantă*.

Principiul II: ***Este imposibil de transformat anergia în exergie.***

Într-un proces reversibil, exergia rămâne constantă, în timp ce într-un proces ireversibil, o parte din exergie se transformă în anergie. O formă de energie este cu atât mai valoroasă cu cât ponderea exergiei faţă de anergie este mai mare. Energia mediului înconjurător este în totalitate anergie.

Exergia şi anergia căldurii. Se consideră o maşină termică funcţionând ciclic şi care produce lucru mecanic. Sursa rece este reprezentată de mediul înconjurător iar procesele se consideră reversibile.

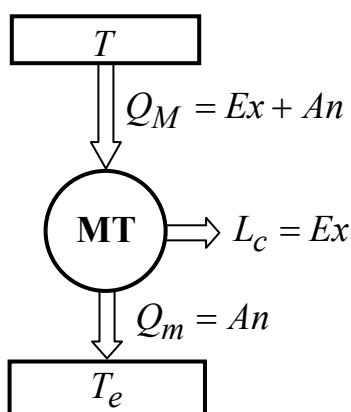


Fig. 4.1: Schema maşinii termice

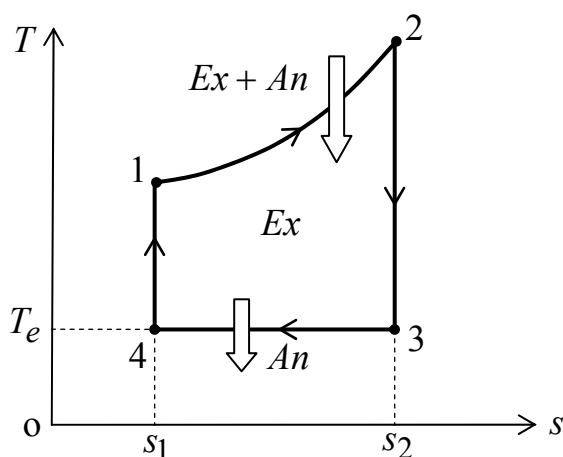


Fig. 4.2: Ciclul maşinii termice în diagrama $T-s$

Q_M este căldura primită în procesul 1-2 de la sursa caldă, formată din exergie şi anergie:

$$Q_M = Q_{12} = Ex + An \quad [\text{J}]$$

Q_m este căldura cedată mediului înconjurător la temperatura constantă T_e , formată numai din anergie:

$$Q_m = Q_{34} = An \quad [\text{J}]$$

Conform Principiului I al termodinamicii, se obţine:

$$Q_M = L_c + Q_m \quad [\text{J}]$$

$$Ex + An = L_c + An$$

$$L_c = Ex = Q_{12} - An \quad [\text{J}]$$

În cazul proceselor reversibile, variaţia entropiei pe ciclu este nulă.

$$\Delta S_c = \Delta S_{12} + \Delta S_{34} = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta S_{12} = -\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \\ \Delta S_{34} = \frac{Q_m}{T_e} = \frac{An}{T_e} \end{array} \right\} \Rightarrow -\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \frac{An}{T_e} = 0$$

Rezultă că anergia are următoarea expresie:

$$An = T_e \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad [\text{J}]$$

iar exergia se poate scrie sub forma:

$$Ex = Q_{12} - T_e \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_e}{T}\right) \delta Q \quad [\text{J}]$$

Randamentul exergetic se defineşte ca raportul dintre exergie şi căldura primită de maşina termică de la sursa caldă (în procesul 1-2):

$$\eta_{ex} = \frac{Ex}{Q_{12}} = \frac{Ex}{Ex + An} \quad [-]$$

Se consideră un sistem termodinamic deschis din care fluidul iese la parametrii mediului înconjurător. Sistemul efectuează lucru mecanic şi cedează căldură mediului înconjurător.

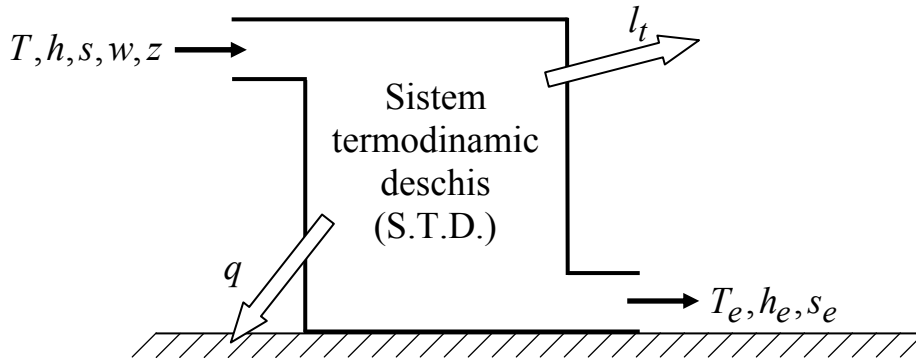


Fig. 4.3: Exergia şi anergia unui sistem termodinamic deschis

Curentul de fluid la intrarea în sistem are energia specifică formată din exergie specifică şi anergie specifică:

$$e = h + \frac{w^2}{2} + g z = ex + an \quad [\text{J/kg}]$$

Aplicând principiul I al termodinamicii la sistemul analizat, rezultă:

$$-q - l_t = \left(h_e + \frac{w_e^2}{2} + g z_e \right) - \left(h + \frac{w^2}{2} + g z \right)$$

Energia cinetică specifică (masică) şi energia potențială specifică (masică) se consideră nule pentru mediul înconjurător:

$$\frac{w_e^2}{2} = 0 \quad \rightarrow \quad w_e = 0$$

$$g z_e = 0 \quad \rightarrow \quad z_e = 0$$

Rezultă:

$$l_t = (h - h_e) + \frac{w^2}{2} + g z - q$$

În condiții ideale, cedarea căldurii către mediul înconjurător este reversibilă, se realizează la diferențe infinite mici de temperatură și deci putem scrie:

$$q = T_e \Delta s = T_e (s_e - s) \quad [\text{J/kg}]$$

Exergia specifică pentru curentul de fluid la intrarea în sistem reprezintă lucrul mecanic tehnic efectuat. Rezultă că:

$$ex = l_t = (h - h_e) + \frac{w^2}{2} + g z + T_e (s - s_e) \quad [\text{J/kg}]$$

Anergia specifică pentru curentului de fluid la intrarea în sistem va fi:

$$an = h + \frac{w^2}{2} + g z - ex \quad [\text{J/kg}]$$

$$an = h_e - T_e (s - s_e) \quad [\text{J/kg}]$$

Remarcă: Energia cinetică și energia potențială sunt forme de energie complet transformabile și deci reprezintă exergie.

Exergia și anergia entalpiei se definesc ca partea transformabilă, respectiv netransformabilă a entalpiei și se notează cu ex_h , respectiv an_h :

$$h = ex_h + an_h \quad [\text{J/kg}]$$

$$ex_h = h - h_e + T_e (s - s_e) \quad [\text{J/kg}]$$

$$an_h = h_e - T_e (s - s_e) \quad [\text{J/kg}]$$

Rezultă că lucrul mecanic tehnic efectuat de sistem reprezintă suma dintre exergia entalpiei, energia cinetică și energia potențială:

$$l_t = ex_h + \frac{w^2}{2} + g z \quad [\text{J/kg}]$$

Pierderile de exergie au loc în cadrul proceselor ireversibile și reprezintă partea de exergie transformată în anergie.

Variația exergiei specifice (masice) a unui sistem termodinamic deschis care evoluează între stările 1 și 2, este:

$$\Delta ex_{12} = ex_2 - ex_1 \quad [\text{J/kg}]$$

$$\Delta ex_{12} = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(w_2^2 - w_1^2) + g(z_2 - z_1) - T_e(s_2 - s_1)$$

În cazul unui proces adiabatic ($q_{12} = 0$), conform Principiului I, lucrul mecanic tehnic va fi:

$$(l_{t12})_s = h_1 - h_2 + \frac{1}{2}(w_1^2 - w_2^2) + g(z_1 - z_2)$$

Ținând cont de variația exergiei specifice, lucrul mecanic tehnic poate fi scris sub forma:

$$(l_{t12})_s = ex_1 - ex_2 - T_e(s_2 - s_1)$$

Dacă procesul este reversibil ($s_2 = s_1$), lucrul mecanic tehnic efectuat de sistem va fi egal cu variația exergiei între starea inițială și cea finală.

$$(l_{t12})_s = ex_1 - ex_2$$

Dacă procesul este ireversibil ($s_2 > s_1$), lucrul mecanic tehnic efectuat de sistem va fi mai mic, diferența reprezentând **pierdere de exergie**:

$$ex_{p12} = T_e(s_2 - s_1) \quad [\text{J/kg}]$$

Ireversibilitatea internă este cauzată de frecările care apar la curgerea fluidelor. Se consideră un sistem termodinamic deschis care primește căldură și efectuează lucru mecanic.

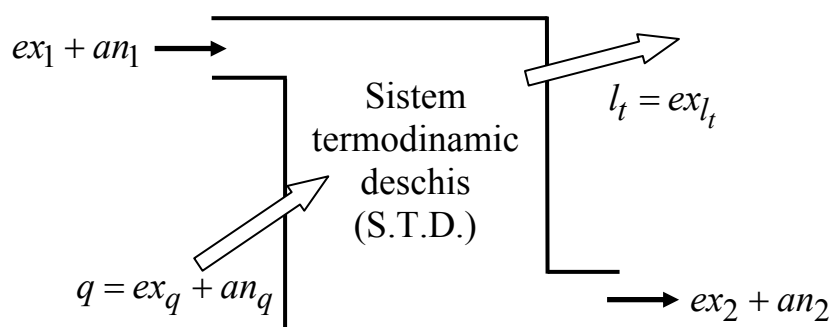


Fig. 4.4: Ireversibilitate internă
pentru un sistem termodinamic deschis

Bilantul total de energie, scris sub formă de exergii şi anergii, va fi:

$$ex_1 + an_1 + ex_q + an_q = ex_2 + an_2 + ex_{l_t}$$

Lucrul mecanic tehnic efectuat de sistem va fi:

$$l_t = ex_{l_t} = ex_1 - ex_2 + ex_q - (an_2 - an_1 - an_q)$$

sau

$$l_t = ex_{l_t} = ex_1 - ex_2 + ex_q - ex_p$$

unde ex_p reprezintă pierderea de exergie cauzată de ireversibilitatea internă:

$$ex_p = an_2 - an_1 - an_q \quad [\text{J/kg}]$$

$$ex_p = T_e \int_1^2 \frac{\delta l_f}{T} \quad [\text{J/kg}]$$

unde δl_f este lucrul mecanic elementar de frecare.

Remarcă: Pierderea de exergie datorată ireversibilităţii interne este cu atât mai mare cu cât procesul termodinamic se desfăşoară la temperaturi mai scăzute.

Ireversibilitatea externă este cauzată de faptul că schimbul de căldură are loc la diferenţe finite de temperatură. Ca exemplu, se analizează transferul căldurii dintre doi agenţi termici prin peretele unui schimbător de căldură.

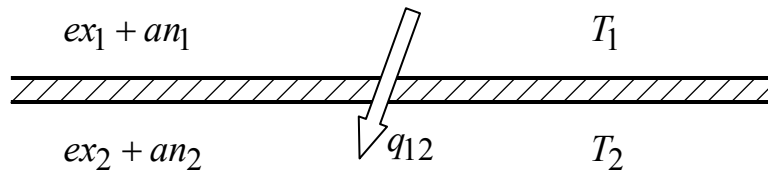


Fig. 4.5: Ireversibilitatea externă

Căldura transmisă prin peretele schimbătorului de căldură poate fi exprimată astfel:

$$q_{12} = ex_1 + an_1 = ex_2 + an_2 \quad [\text{J/kg}]$$

Pierdere de exergie este egală, pe de o parte, cu diferenţa dintre exergia cedată de agentul primar şi cea primită de cel secundar şi, pe de altă parte, cu diferenţa dintre anergia primită de agentul secundar şi cea cedată de agentul primar:

$$ex_p = ex_1 - ex_2 = an_2 - an_1 = \frac{T_e}{T_2} q_{12} - \frac{T_e}{T_1} q_{12} \quad [\text{J/kg}]$$

$$ex_p = T_e \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} q_{12} \quad [\text{J/kg}]$$

Remarcă: Pierdere de exergie datorată ireversibilităţii externe este direct proporţională cu diferenţa dintre temperaturile agenţilor şi invers proporţională cu produsul lor. Pierdere de exergie este cu atât mai mare cu cât schimbul de căldură are loc la temperaturi mai mici ale agenţilor termici şi cu cât diferenţa dintre temperaturile celor doi agenţi este mai mare.