

# Litt om energi, varme, temperatur og eksergi

Ivar S. Ertesvåg  
l.aman., dr.ing.  
Insituutt for mekanikk, termo-  
og fluiddynamikk, NTNU  
ivar.s.ertesvag@mtf.ntnu.no

mars 1997 (rev. juli 2000)  
Dette notatet ligg på  
www.mtf.ntnu.no/people/ivarse/energi

## 1 Litt om termodynamiske uttrykk

Dette notatet er mest ei opprømsing av definisjonar og matematiske uttrykk. Det er meint som repetisjon og formelsamling. For dei som ikkje kan det frå før, er det eit innblikk, ikkje ei full innføring.

Energi finst i mange former, t.d. potensiell, kinetisk, elektrisk, kjemisk og termisk energi, arbeid og varme. Etter første hovudsetning er alle energiformer jamstilte og likeverdige. Etter andre hovudsetning har ulike energiformer ulik kvalitet. Denne kvaliteten måler vi etter evna til å gjere arbeid. Ei energimengd kan teoretisk gje ei viss mengde arbeid; dette kallar vi **eksergi** (tidlegare lærebocker brukar også nemningar som "maksimalt arbeid", "tilgjengeleg energi", "arbeidsevne"). Ein reversibel prosess kan gje dette arbeidet frå den energimengda det er snakk om. Resten av energien kan aldri gjerast om til arbeid.

Dersom vi har ei energimengd som vi overfører reversibelt frå ein tilstand til ein annan, vil eksergien vere den same. Dersom overføringa skjer ved ein irreversibel prosess (t.d. over ein endeleg trykkdifferanse eller temperaturdifferanse, eller det er friksjon i systemet), vil noko av eksergien (eller arbeidsevna) gå tapt. Dette tapte arbeidet eller tapte eksergien kallar vi **irreversibilitet**.

Eksergi i ei energimengd og irreversibilitet i ein prosess kan vi kvantifisere ved hjelp av første og andre hovudsetning.

### Eksergi i varme

Eksergi i ei *varmemengd*  $Q$  [J] avgiven ved ein temperatur  $T$  [K] er

$$E^Q = Q \left( 1 - \frac{T_o}{T} \right) \quad [J].$$

Her er  $T_o$  temperaturen i omgjevnadene. Dette er også det teoretisk minste arbeidet som må til for å levere varmemengda  $Q$  [J] ved temperaturen  $T$ , dvs. ei varmepumpe.

For ein varmestraum  $\dot{Q}$  [J/s] vert uttrykket for  $\dot{E}^Q$  [J/s] likeins. Uttrykket i parentes er identisk med Carnot-verknadsgraden (Carnot-faktoren); dvs. det største arbeidet vi kan få ved å veksle varme frå temperaturen  $T$  til temperaturen  $T_o$  [K] i omgjevnadene.

Ved ei varmeoverføring (utan arbeid)  $\dot{Q}$  frå temperatur  $T_1$  til temperatur  $T_2 < T_1$  er eksergitapet eller irreversibiliteten:

$$i = \dot{E}_1^Q - \dot{E}_2^Q = \dot{Q} \left( 1 - \frac{T_o}{T_1} - 1 + \frac{T_o}{T_2} \right) = \dot{Q} T_o \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

Dette gjeld t.d. i ein varmevekslar.

### Eksergi i elektrisitet og mekanisk energi

Eksergi i *elektrisk energi* er lik energimengda:  $\dot{E}_e = \dot{W}_e$ .  
Det same gjeld arbeid, kinetisk og potensiell energi.

### Eksergi i strøymande medium

Med *strøymande medium* meiner vi t.d. gass eller væske som strøymer i eller ut av eit røyr (t.d. damp til ein prosess, varmt vatn til oppvarming), arbeids- eller varmemedium som sirkulerer i ein syklisk prosess (gasskraftver, kjøleskap, m.m.).

Eksergi i eit *strøymande medium* (arbeids- eller varmemedium), dvs. ein massestrøm  $\dot{m}$  [kg/s] inn/ut av eit ope system:

$$\epsilon = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad [J/kg]$$

$$\dot{E} = \dot{m}\epsilon \quad [J]$$

Her er  $h$  spesifikk entalpi [J/kg] og  $s$  spesifikk entropi [J/(kgK)] for mediet;  $h_o = h(T_o, P_o)$  og  $s_o = s(T_o, P_o)$ ;  $P_o$  [Pa] er trykket i omgjevnadene.

### Eksergi i ei masse

Eksergien i ei *masse*  $m$  [kg] (lukka system) vert uttrykt noko annleis enn for ein massestrøm. Dette følgjer av definisjonen og av hovudsetningane:

$$\xi = (u - u_o) + P_o(v - v_o) - T_o(s - s_o) \quad [J/kg]$$

$$\Xi = m\xi \quad [J]$$

Her er  $u$  spesifikk indre energi [J/kg] og  $v$  spesifikt volum [m<sup>3</sup>/kg];  $u_o = u(T_o, P_o)$  og  $v_o = v(T_o, P_o)$ .

### Entalpi, indre energi og entropi

For vanlege arbeids- og varmemedium (t.d. vatn/damp, kuldemedium) finn vi verdjar for  $h$ ,  $u$  og  $s$  frå tabellar eller funksjonar. Generelt er desse storleikane funksjon av to andre eigenskapar, t.d. temperatur og trykk eller temperatur og spesifikt volum.

For ideell gass er  $h = h(T)$  og  $u = u(T)$  (altså uavhengig av trykk). Då er

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT$$

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT$$

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Her er  $C_p$  og  $C_v$  [J/kg/K] spesifik varmekapasitet ved konstant trykk og ved konstant volum;  $R$  [J/kg/K] er gasskonstant for gassen.

Dersom vi, som ei forenkling, reknar konstant  $C_p$  og  $C_v$ , har vi

$$h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1)$$

$$u_2 - u_1 = C_v(T_2 - T_1)$$

$$s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

For væsker og faste stoff gjeld tilnærma  $C_p = C_v = C$ , og

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} C \frac{dT}{T}, \text{ og elles som ovanfor.}$$

For *fasoevergang* (reversibel) gjeld

$$s_2 - s_1 = \frac{h_2 - h_1}{T_s} \quad (\text{konstant trykk})$$

$$s_2 - s_1 = \frac{u_2 - u_1}{T_s} \quad (\text{konstant volum})$$

For eit reint stoff skjer prosessen ved konstant temperatur  $T_s$  [K]. For smelting/storkning er  $\Delta h \approx \Delta u$ . For blandingar av fleire stoff skjer fasoevergangen over eit temperaturintervall, slik at uttrykk vert noko meir samansette.

Dei samanhangane som er lista opp her gjeld for system utan kjemiske reaksjonar.

## 2 Døme: Varmekraftverk og kraft-varmeverk

Ein skil gjerne mellom *varmekraftverk*, som berre skal produsere elektrisk energi, og *kraft-varmeverk*, som attåt elektrisk energi også skal levere varmt vatn/damp til oppvarming eller prosessar (også kalla "kogenerering"). Eit *varmeverk* leverer berre varme, ikkje elektrisk energi. Det kan vere fjernvarme, nærvarme, eller ein sentralfyr.

Dei mest effektive (dvs. mest påkostade) moderne fastbrenselfyrtre (kolfyrtre) kraftverka gjev elektrisk energi lik omlag 40–45 % av brenselenergien (nedre brennverdi). For gassfyrtre kraftverk er talet omkring 55–60%. Resten av energien går ut med kjølevatn og røykgass. I slike oppgåver er det vanlegvis ikkje gjort greie for kva som er med i reknestykket; dvs. om tap ved oppstart/nedkøyring, eigenforbruk, brenselhandsaming (t.d. knusing, transport) m.m. er rekna inn.

Ved å utnytte spillvarmen til oppvarming eller prosessvarme kan opp mot 90 % av brenselenergien utnytast til varme og elektrisk energi. Men då vert elektrisitetsdelen mindre. Den samla *eksergi/leveransen* kan også vere mindre enn for eit reint kraftverk.

Ein stor del av eksergitapet skjer i forbrenninga; varmeveksling over store temperaturdifferansar er ei

anna stor kjelde til irreversibilitet.

### Tre alternativ for kraftverk og kraft-varmeverk

Vi har eit fastbrenselfyrt anlegg, der innfyrt brenselenergi (brennverdi til brensløt) er sett til 100% (eller 100 energi-einingar, om ein vil).

- 1) leverer 40 % elektrisk energi; ikkje varme.
- 2) leverer 30 % elektrisk energi; 40 % termisk energi som vatn til fjernvarme (tur 120 °C, retur 80 °C).
- 3) leverer 25 % elektrisk energi; 20 % termisk energi som damp ved 500 °C, 20 bar (retur: vatn 80 °C, 1 bar) og 20 % termisk energi som vatn til fjernvarme (tur 120 °C, retur 80 °C).

### Energianalyse

Etter 1. hovudsetning har vi størst utbytte i tilfelle 2, 70 % av brenselenergien. I tilfelle 3 får vi 65 %, og i tilfelle 1 40 %.

### Eksergianalyse

Vi kan rekne ut eksergiinnhaldet i dei tre tilfella, og let omgjevnadene ha  $T_o = 273 \text{ K}$  (0 °C):

- 1) el.energi = eksergi, 40 %
- 2) vatn ved 120 °C kan teoretisk avgje ei varmemengd  $h - h_o = 504 \text{ kJ/kg}$ , som inneheld ei eksergi-mengd  $\epsilon = 86 \text{ kJ/kg}$ , eller 17 % eksergi. Verdiane for entalpi og entropi hentar vi frå tabellverk, t.d. ei termodynamikk-bok. Returvatnet, 80 °C, kan framleis avgje ei varmemengd på 335 kJ/kg, og har ein eksergi på 41 kJ/kg, eller 12 % av varmemengda. For oppvarming frå 80 til 120 °C må det tilførast ei varmemengd på 169 kJ/kg, og ei eksergiemengd på 45 kJ/kg som er 27 % av den tilførte varmemengda.

Samla eksergi (elektrisitet og vatn) *ut frå* kraft-varmeverket er (30%) + 0,27 · (40%) = 41%, dvs. rekna av brenselenergien.

Tek vi omsyn til at fjernvarmen berre vert nytta til romvarme (20 °C), vert eksergiemengda 7 % (ikkje 27 %) av energimengda. Den *leverte* eksergien vert redusert til 33 %.

- 3) damp ved 500 °C, 20 bar kan teoretisk avgje ei varmemengd  $h - h_o = 3468 \text{ kJ/kg}$  som inneheld ei eksergiemengd  $\epsilon = (h - h_o) - T_o(s - s_o) = 1439 \text{ kJ/kg}$ , eller 41,5 % eksergi. Returvatnet, 80 °C, må tilførast ei varmemengd på 3133 kJ/kg, og ei eksergiemengd på 1397 kJ/kg som er 45 % av varmemengda.

Samla eksergi (el., damp og vatn) *ut frå* kraft-varmeverket er (25%) + 0,45 · (20%) + 0,27 · (20%) = 40%, rekna av brennverdien. Når fjernvarmen er rekna som romvarme (sjå ovanfor), vert dette redusert til 35 %.

Her har eg valt alle tala "runde", for å gjere reknedømet enkelt. Tala er såleis noko tilfeldige, men dei er ikkje urealistiske. Sjølv om dei kan vere litt annleis i praksis, vil poenget vere det same: Eit

kraft-varmeverk med fjernvarme gjev ikkje noko særleg meir eksergi enn eit reint kraftverk, og det kan like gjerne gje mindre. Den moglege utnyttinga hjå sluttbrukaren vert mindre.

Dersom elektrisiteten skal brukast til direkte oppvarming, vil naturlegvis tilfelle 2 kome best ut, det som gjev mest energi ut. Men – som vi veit – lyspærer, datamaskiner, kaffitrukturar, elektrolyseommar og elektromotorar verkar dårleg på fjernvarme. Det vert dessutan eit spørsmål om kva ein skal gjere med fjernvarmen utanfor varmesesongen. I ei samfunnsmessig vurdering av dei ulike tilfella, må ein også ta med bruk av varmepumper til oppvarming i tilknytning til det tre tilfella. Då ville el-energien kunne omformast til omlag 3–5 gongar så mykje varme til romoppvarming.

### 3 Oppvarming og smelting av fast stoff

Eg brukar aluminium (Al-99) som døme, og reknar spesifikk varmekapasitet  $C = 0.9 \text{ kJ}/(\text{kgK})$  (kons- tant), smeltepunkt  $T_s = 660^\circ\text{C}$  (933 K), smeltevarme  $h_s = u_s = 400 \text{ kJ}/\text{kg}$ . Det fordampar ved  $2450^\circ\text{C}$ .

Vidare reknar eg at det ikkje utvidar seg vesentleg (eller rettare: at utvidinga ikkje har noko å seie for analysen), at spesifikk varme er konstant og lik for fast og flytande aluminium, og at det har ein definert smelte-temperatur. Vi tenkjer oss at massen har ein start-temperatur på  $T_1 = 573 \text{ K}$  ( $300^\circ\text{C}$ ) og vert varma opp til  $T_2 = 1273 \text{ K}$  ( $1000^\circ\text{C}$ ), og at omgjevnadene har  $T_o = 273\text{K}$  ( $0^\circ\text{C}$ ).

Tilført energi vert:  $\Delta u = u_2 - u_1 = C(T_2 - T_1) + u_s = 1030 \text{ kJ}/\text{kg}$ .

Tilført eksergi er:

$$\epsilon_2 - \epsilon_1 = C(T_2 - T_1) + u_s - T_o C \ln \frac{T_2}{T_1} - T_o \frac{u_s}{T_s} = 717 \text{ kJ}/\text{kg}, \quad \text{eller } 70 \% \text{ av den tilførte energien.}$$

Dette inneber at 30 % av oppvarminga kan dekkjast med lågverdig varme, resten (70 %) må dekkjast med høgverdig energi (elektrisk energi – anten direkte eller for å drive ei varmepumpe).

Dette reknedømet føreset ideelle prosessar; dvs. tapsfrie og reversible prosessar. I eit praktisk tilfelle vil ein del av eksergien gå tapt i overføringa mellom kraft-varmeverk og massen som skal varmast opp. Reknedømet vert såleis eit grensetilfelle for den praktiske prosessen; ein kan ikkje på nokon måte få til noko betre.

### 4 Kjemisk eksergi: eksergi i brensel og materialar

Dei samanhengane som er lista opp ovanfor, gjeld for system utan kjemiske reaksjonar og blandingar der samansetjinga ikkje vert endra.

Kjemisk eksergi for brensel har eg skrive om i eit anna notat. Du kan også lese om det i ei bok om eksergianalyse eller termodynamikk.

For å omdanne aluminiumoksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) til råaluminium, må det tilførast  $31.0 \text{ MJ}$  energi pr. kg aluminium. Dette er entalpidifferansen når vi tenkjer oss ein ideell, teoretisk prosess utan varmetap eller andre energilekkasjar i prosessen. Vi tenkjer oss også at stoffa før og etter prosessen har same temperatur ( $25^\circ\text{C}$ ). Etter *første hovudsetning* kan vi bruke energi frå spillvarme til dette. Men ser vi på den kjemiske eksergien og brukar *andre hovudsetning*, må det tilførast  $29.1 \text{ MJ}$  eksergi. Altså må 94 %

av energien vere elektrisk energi eller annan høgverdig energi. Denne mengda ( $29.1 \text{ MJ}/\text{kg}$ ) er altså den *teoretisk minste* eksergimengda som må til for å lage aluminium av oksid. Dersom reduksjons- middelet er reint karbon, vil det tilføre  $10.9 \text{ MJ}$  eksergi pr. kg aluminium. Resten,  $18.2 \text{ MJ}$ , må vere elektrisitet. Ein praktisk prosess krev også oppvarming og smelting, som vi så på ovanfor. Vidare vil ein reell prosess alltid måtte medføre ein del tap.