

# Verknadsgrader

av Ivar S. Ertesvåg og Olav Bolland, NTNU

jan. 2000

Verknadsgrader finst det mange av, og terminologien varierer. Når folk frå eit avgrensa fagområde diskuterer seg i mellom, har dei ei sams oppfatning av definisjon og ordbruk. Men det er ikkje sikkert at definisjonar og ordbruk er heilt dei same, sjølv på nært tilgrensande fagområde. Her vil vi drøfte dei viktigaste definisjonane, og freiste å systematisere dei. Vi skal seie litt om kva du må hugse på når du brukar verknadsgrader – og kva du må spørje om når andre brukar dei. Først vil vi sjå på kvifor og korleis vi brukar verknadsgrader.

## Kvifor vi brukar verknadsgrader

Vi har sett at verknadsgrader er høvet mellom det vi kan nyte og det vi må yte. Vi brukar verknadsgrader

1. til å samanlikne ulike anlegg eller innretningar som brukar same energiform inn, og som har same energiform ut. Vi kan samanlikne eit brenselfyrt kraftverk med eit anna, men ikkje med eit kraftvarmeverk eller eit varmeverk (varmesentral). Vi kan samanlikne eit vasskraftverk med eit anna, men ikkje med eit vindkraftverk.
2. til å kunne rekne energikostnader (resursar, økonomi) for den «nyttige» energien. Vi ser kor mykje energi vi får ut samanlikna med den tilførte energien vi må betale for.
3. for å kunne rekne miljøkostnader/utslepp for å framskaffe den «nyttige» energien. Dette kan ein sjå direkte (t.d. for CO<sub>2</sub>), eller vi kan få ein peikepinn (for t.d. NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> og CO).

## Mange definisjonar

Alle verknadsgrader er definerte som ei energimengd dividert på ei anna energimengd; eller ei eksenergimengd dividert på ei anna eksenergimengd. Mengda over brøkstreken er den vi ønskjer, og mengda under streken er innsatsen. Mengdene kan vere rekna over eit tidsrom (joule eller wattimar), eller som rate (dvs. pr. tidseining; watt).

Vanlegvis vert verknadsgrader noterte med  $\eta$  (gresk bokstav eta), med ulike merketeikn. For verknadsgrader med eksergi er det litt variasjon; oftast  $\eta$ ,  $\psi$  (psi), eller  $\varepsilon$  (epsilon).

Verknadsgrader kan grupperast i to:

1. nyttig energi ut av systemet dividert på energi tilført systemet.
2. det du faktisk får ut av systemet, dividert på det du kunne ha fått ut om prosessen var ideell. I dei tilfella vi må tilføre arbeid (t.d. ein kompressor), vil vi snu om på denne brøken.

**Systemgrensa er viktig:** I alle tilfelle må vi klargjere nøye kva vi reknar som nyttig energi ut og nyttig energi inn, og kvar vi har lagt systemgrensa. Dette med ulike systemgrenser er drøfta m.a. i termodynamikk-boka (Moran og Shapiro, 1998: avsnitt 2.5.1). Sjå også figuren nedanfor.

## Første hovudsetnings verknadsgrad, energi-verknadsgrader.

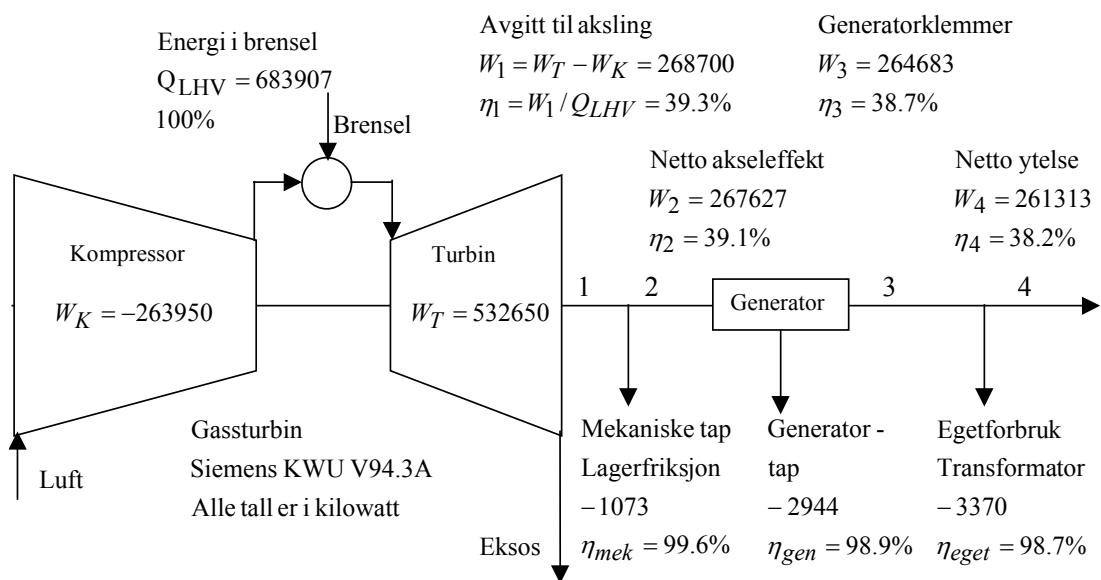
### Termisk verknadsgrad: arbeidsgrad

Termisk verknadsgrad er i utgangspunktet definert for sykliske varmekraftmaskiner. (Sjå om sirkelprosessar i ei termodynamikk-bok.) Då er termisk verknadsgrad  $\eta$  eller  $\eta_{th}$  definert

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_H}$$

Her er  $Q_H$  tilført varmemengd og  $W_{net}$  er netto avgjeve arbeid. Det er det vi vil ha, dividert på det vi må tilføre i ein arbeidsmaskin.

Det vi må betale (pengar) for, er ofte brennverdien i brensllet, og då er det nedre brennverdi som vert rekna. Då er det praktisk å setje inn nedre brennverdi  $H_{R,n}$  i staden for  $Q_H$  i definisjonen ovanfor. Storleiken vert framleis kalla termisk verknadsgrad. Dette vert rett når brensllet brenn i sjølve arbeidsmediet, som i (vanlege) gassturbinar og forbrenningsmotorar. Då er det forbrenningsluft og røykgass som er arbeidsmediet. Når brensllet brenn fullstendig, vert brennverdien omgjort til termisk energi.



**Figur: Gassturbinsystem: Døme på at ulike plassering av systemgrensa gjev ulike verknadsgrad.**

Det finst også forfattarar som brukar øvre brennverdi i definisjonen ovanfor, men det er ikkje vanleg i Europa.

For prosessar der varme vert overført frå røykgass (forbrenningsprodukt) til eit arbeidsmedium, vert det ikkje heilt rett å setje inn brennverdien som tilført varme. Varmeoverføringa i varmevekslaren vil aldri vere fullstendig. Dette gjeld til dømes dampmaskiner, Stirling-motorar og lukka gassturbin-syklusar. Dette kan vi løyse ved å utvide systemgrensa for definisjonen, slik at også forbrenningsromet eller brennkammeret kjem med. På den andre sida vil definisjonen ikkje vere slik han står i termodynamikk-bøkene.

På same måten kan definisjonen utvidast til maskiner som ikkje er sirkelprosessar. Det mest nærliggjande dømet er brenselceller (ein elektrokjemisk prosess). Eit anna døme er kalla MHD (eng.: «magneto-hydrodynamics», ein termo-elektromagnetisk prosess). Begge desse teknologiane er gjennomløpsprosessar. Eit problem med å utvide definisjonen til desse prosessane, er at dei aldri kan ha fullstendig reaksjon, og difor må ha ein etterprosess.

## Carnot-verknadsgrad

Ein Carnot-prosess er den teoretisk beste sirkelprosessen som verkar mellom to temperaturar,  $T_H$  og  $T_L$ , som begge er konstante. Den beste prosessen er ein fullstendig reversibel prosess. Carnot-verknadsgraden er termisk verknadsgrad for ein reversibel prosess, og dette gjeld for alle reversible sirkelprosessar.

$$\eta_c = \left( \frac{W_{net}}{Q_H} \right)_{reversibel} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Den siste likskapen kan vi vise ved hjelp av 1. og 2. hovudsetning. Carnot-verknadsgraden gjev ei øvre grense for kva du kan få ut av ein sirkelprosess. Men det gjeld ikkje for prosessar som ikkje er sirkelprosessar, t.d. brenselceller.

For ein varmestraum ved temperatur  $T$  er eksergi dividert på varme lik Carnot-verknadsgraden (eller Carnot-faktoren), mot omgjevnadene,  $(1-T_0/T)$ .

Legg merke til at varme ofte kjem frå, og vert avgjeve til, arbeidsmedium der temperaturen endrar seg; dvs. at  $T_H$  og  $T_L$  ikkje er konstante. Då må vi sjå på høvet mellom eksergi-endring,  $\Delta\varepsilon$  (eng.: «flow exergy»), og entalpiendring,  $\Delta h$ , for massestraumen (arbeidsmediet). Dette vert vanlegvis ikkje kalla for ei «verknadsgrad», men det kan vere nyttig å ta det med her likevel. Dette eksergi-energi-høvet kallar vi gjerne (energi)kvalitetsgrad eller **energikvalitet**.

For ein massestraum som endrar temperatur frå  $T_1$  til  $T_2$  ved konstant trykk (t.d. nedkjøling av ein røykgass), og der spesifikk varmekapasitet er rekna konstant, har vi

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta h} = 1 - \frac{T_0}{T_2 - T_1} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Legg også merke til at det er eksergiendring for den massestrømmen vi ser på, ikkje eksergi som er avgjeven frå/motteken av eit anna arbeidsmedium – eksergitapet ved overføringa kjem imellom.

### **Total verknadsgrad: varmegrad; energiverknadsgrad**

Termisk verknadsgrad fortel kor stor del av den tilførte varmen som vert omgjort til arbeid. Ho er nyttig for å samanlikne prosessar som gjev arbeid. Men kva når det «nyttige» ikkje er arbeid? Då ser vi på «varmeverdien» til den «nyttige» energien.

Døme: I ein dampkjel som leverer damp til ein prosess går varmen til å fordampe vatn. Arbeidet er lite å snakke om. Den nyttige energien er den termiske energien som gjer at dampen er damp og ikkje vatn. Eit anna døme er romoppvarming. I begge desse tilfella er termisk verknadsgrad lik null.

Ein finn det tenleg å definere ein energiverknadsgrad som er utnytta energi dividert på tilført energi. Verknadsgraden kan gjelde for større system, t.d. eit kraftverk, eller for mindre delar, t.d. eit brennkammer. I alle tilfelle må ein definere kva som er «nyttig» og kva som er «tilført».

$$\eta_{en} = \frac{W_{net} + Q_{net} + \Delta H_{net}}{Q_H}$$

Her er  $W_{net}$  og  $Q_{net}$  det vi reknar som netto levert arbeid og varme, og  $\Delta H_{net}$  er entalpiauke i eit arbeidsmedium (vatn til fjernvarme, damp, o.fl.). Ein eller to av desse kan naturlegvis vere null. Om vi reknar varme eller entalpiauke, er avhengig av korleis vi har definert systemgrensa vår. Alle desse energimengdene kan gjerast om til varme. Som ovanfor er  $Q_H$  tilført («betalt for») varme, eller gjerne brennverdien i brensløt.

«**Mekaniske**» verknadsgrader kan vi bruke som samlenemning på ulike verknadsgrader som er definerte for innretningar der både tilført og avgjeven energi er mekanisk energi (kinetisk energi, potensiell energi, arbeid). Døme er kraftoverføringar, vassturbinar, pumper. Herunder kjem hydraulisk verknadsgrad, skovlverknadsgrad, mekanisk verknadsgrad, o.fl. Differansen mellom inngang og utgang er friksjonstap, lekkasjar o.l. Definisjonar og ordbruk kan ein finne i spesiallitteraturen på dei ulike fagområda.

**Elektriske verknadsgrader** vert definerte når «nyttig» energi er elektrisk energi. Ulike system gjev ulike definisjonar. Tilført energi kan vere mekanisk arbeid (dersom systemet er ein generator), potensiell energi (vasskraftverk med dam), brennverdi (brenselfyrt varmekraftverk), jordvarme (geotermisk kraftverk), osv.

**Isentrop verknadsgrad og polytrop verknadsgrad** er definerte særskilt for einskildkomponentar (ikkje sirkelprosessar) som kompressor, pumpe, turbin/ekspander, dyse, o.fl. Desse verknadsgradene samanliknar den faktiske prosessen med ein ideell (isentrop) prosess. Her nemner vi dei for oversynet skuld, sjå meir i bøker om termodynamikk og strøymingslære.

**Varmepumper** hentar varme ved ein låg temperatur  $T_L$ , brukar noko arbeid  $W$ , og leverer varme  $Q_{ut}$  ved ein høgare temperatur  $T_H$ . Sidan det er varmen som er «nyttig» og arbeidet vi betalar for, skulle energiverknadsgrada verte lik  $Q_{ut}/W$ . Dette høvet vert helst ikkje kalla verknadsgrad, men varme(pumpe)-faktor (eng.: «coefficient of performance», «COP»). Sjå i ei termodynamikk-bok (til dømes Moran og Shapiro, 1998, avsnitt 10.6):

$$\gamma = \frac{Q_{ut}}{W}$$

Denne verdien er større enn 1, og vil vere avhengig av  $T_L$  og  $T_H$ . Den maksimale verdien, for ein reversibel prosess, er  $\gamma_{rev} = T_H/(T_H - T_L) = (\eta_C)^{-1}$ . Når ein reknar ut denne, er det **viktig å presisere** om temperaturane gjeld arbeidsmediet, eller om det er temperaturane der varmen er henta frå (t.d. luft, vatn) og levert til (t.d. romtemperatur).

## Andre hovudsetnings verknadsgrad, eksergi-verknadsgrader

Denne er definert som utnytta eksergi delt på tilført eksergi.

$$\eta_{II} = \frac{E_{ut}}{E_{inn}}$$

Dette kan brukast for alle system; vi må berre rekne ut eksergien i dei aktuelle energimengdene (eksergi i varme, i massestrumar, i innelukka masse, arbeid).

For varmekraftmaskiner kan dette uttrykkjast som høvet mellom termisk verknadsgrad og Carnot-verknadsgrad (= reversibel termisk verknadsgrad):

$$\eta_{II} = \frac{W_{net}}{W_{rev}} = \frac{W_{net} / Q_H}{W_{rev} / Q_H} = \frac{\eta_{th}}{(\eta_{th})_{rev}} = \frac{\eta_{th}}{\eta_C}$$

Eksergien i den tilførte varmen  $Q_H$  er lik det reversible arbeidet,  $W_{rev}$ , for ein maskin som avgjev varme mot temperaturen i omgjevnadene. Eksergien ut er det nyttige arbeidet som faktisk er utført.

**Varmepumper:** For å kunne samanlikne prosessar mellom ulike temperaturar, kan ein samanlikne den faktiske varmefaktoren med den reversible, og definere verknadsgrada

$$\eta_{vp} = \frac{\gamma}{\gamma_{rev}} = \frac{Q_{ut}}{Q_{ut,rev}} = \frac{W_{rev}}{W}$$

Dei to siste likskapane kan vi vise med første hovudsetning for varmpumpa. Dette vert altså den varmen vi faktisk får, dividert på den varmen vi kunne ha fått om prosessen var ideell (reversibel).

Nokre verknadsgrader kunne vi ført opp både som energi-verknadsgrader, og som eksergi-verknadsgrader. Det gjeld mellom andre dei verknadsgradene der definisjonen berre inneheld arbeid, kinetisk, potensiell eller elektrisk energi.

## Litt om språk

Verknad, norrønt verknaðr, kjem av verka: *arbeide* og verk: *arbeid, handling, gjerning*. Orda har samanheng med yrke og orka. Virkning (bokmål) har same opphav. I denne samanhengen har nok ordbruken sterk tilknytning til tysk ordbruk: «Wirkungsgrad». Det heiter «verkningsgrad» på svensk, «virkningsgrad» på dansk og «rendement» på fransk. Grad kjem av latin «gradus»: *steg*. «Efficiency» på engelsk kjem av latin «efficienta», frå «ef» av «ex»: *ut av* og «ficere»: *lage, utøve, oppnå*.

## Referert litteratur:

M.J. Moran og H.N. Shapiro: *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 3<sup>rd</sup> ed., Wiley, Chichester 1998. (Lærebok i Termodynamikk 1 og 2, NTNU.)