

# Formelsamling i Energiteknik

Version 2025-03-13 17:04

Olof Björkqvist och Marcus Eriksson

Formler och beteckningar utgående från Soleimani Mohseni m. fl., 2018 och Alvarez, 2006

Korrekturfel och förbättringsförslag kan rapporteras till Olof Björkqvist <olof.bjorkqvist@miun.se>  
Detta verk är publicerat under en Creative Commons Erkännande-DelaLika 4.0 Internationell Licens (CC BY-SA 4.0)

Institutionen för naturvetenskap, design och hållbar utveckling (NDH)  
Mittuniversitetet

# Innehåll

1	Generella formler	2
2	Värmelära	4
3	Värmeöverföring	6
4	Strömningslära	11
5	Pumpsystem	13
6	Värmeväxlare	16
7	Kraft- och kylprocesser	19
8	Vindenergi	21
9	Ekonomi	23
10	Underhållsteknik	25
11	Fysikaliska data för några viktiga ämnen	30
	Symboler	31
	Referenser	33

# Kapitel 1

## Generella formler

### Beteckningar

Acceleration,  $\text{m/s}^2$  ( $a$ )  
Arbete, J ( $W$ )  
Area  $\text{m}^2$  ( $A$ )  
Densitet,  $\text{kg/m}^3$  ( $\rho$ )  
Effekt, generellt, W ( $P$ )  
Energi, J ( $E$ )  
Hastighet,  $\text{m/s}$  (kan även betecknas  $V$ ) ( $v$ )  
Höjd, m (kan även betecknas  $z$ ) ( $h$ )  
Kraft, N ( $F$ )  
Längd, m ( $L$ )  
Massa, kg ( $m$ )  
Massflöde,  $\text{kg/s}$  (kan även betecknas  $q_m$ ) ( $\dot{m}$ )  
Sträcka, m ( $s$ )  
Tid, s ( $t$ )  
Tryck, Pa ( $p$ )  
Tyngdacceleration,  $\text{m/s}^2$  ( $g$ )  
Verkningsgrad eller effektivitet, dimensionslöst ( $\eta$ )  
Volym,  $\text{m}^3$  ( $V$ )  
Volymitet, specifik volym,  $\text{m}^3/\text{kg}$  ( $v$ )

### Formler och samband

**Area:**  $A = L \cdot L$  ( $\text{m}^2$ )

**Volym:**  $V = L \cdot L \cdot L$  ( $\text{m}^3$ )

**Massflöde:**  $\dot{m} = \frac{dm}{dt}$  ( $\text{kg/s}$ )

**Hastighet:**  $v = \frac{dL}{dt}$  ( $\text{m/s}$ )

**Acceleration:**  $a = \frac{dv}{dt}$  ( $\text{m/s}^2$ )

**Newtons andra lag:**  $F = m \cdot a$  (N)

**Arbete:**  $dW = F \cdot ds$  (J, Nm)

**Arbete vid konstant kraft:**  $W = F \cdot s$  (J, Nm)

**Lägesenergi:**  $E = m \cdot g \cdot h$  (J, Nm)

**Rörelseenergi**  $E = \frac{m \cdot v^2}{2}$  (J, Nm)

**Effekt:**  $P = \frac{dW}{dt}$  (W, Watt)

**Densitet:**  $\varrho = \frac{m}{V}$  (kg/m<sup>3</sup>)

**Volymitet:**  $v = \frac{V}{m}$  (m<sup>3</sup>/kg)

**Tryck:**  $p = \frac{F}{A}$  (Pa, Pascal, N/m<sup>2</sup>)

**Verkningsgrad:**  $\eta = \frac{\text{Nyttig avgiven energi}}{\text{Tillförd energi}}$

# Kapitel 2

## Värmelära

### Beteckningar

Allmänna, universella gaskonstanten  $8,314, \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$  ( $R_u$ )

Antal mol ( $n$ )

Entropi,  $\text{J}/\text{K}$  ( $S$ )

Exergi,  $\text{J}$  ( $X$ )

Gibbs fria energi,  $\text{J}$  ( $G$ )

Isobar specifik värmekapacitet,  $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$  ( $c_p$ )

Isokor specifik värmekapacitet,  $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$  ( $c_v$ )

Specifik värmemängd,  $\text{J}$  ( $q$ )

Massa,  $\text{kg}$  ( $m$ )

Specifik entropi,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  ( $s$ )

Specifik gaskonstant,  $\text{J}/\text{K}$  ( $R$ )

Specifik värmekapacitet,  $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$  ( $c$ )

Sträcka,  $\text{m}$  ( $s$ )

Temperatur,  $\text{K}$  eller  $^{\circ}\text{C} - ^{\circ}\text{C}$  (kan även betecknas  $t$ ) ( $T$ )

Tryck,  $\text{Pa}$  ( $p$ )

Verkningsgrad eller effektivitet, dimensionslöst ( $\eta$ )

Volym,  $\text{m}^3$  ( $V$ )

Värmemängd,  $\text{J}$  ( $Q$ )

### Grundläggande formler och definitioner

**Allmänna gaslagen:**  $p \cdot V = m \cdot R \cdot T$ , eller  $p \cdot V = n \cdot R_u \cdot T$   
där  $R_u$  = Allmänna gaskonstanten och  $n$  = antal mol

**Värme vid konstant tryck:**

$dQ = m \cdot c_p \cdot dt$ .  $Q \approx m \cdot \overline{c_p} \cdot \Delta T$  då  $c_p$  varierar lite.

**Värme vid konstant volym:**

$dQ = m \cdot c_v \cdot dt$ .  $Q \approx m \cdot \overline{c_v} \cdot \Delta T$  då  $c_v$  varierar lite.

**Samband mellan  $c_p$ ,  $c_v$  och  $R$  för ideala gaser:**

$c_p - c_v = R$  samt  $\frac{c_p}{c_v} = \kappa$ .

**Volymändringsarbete:**  $dW = F \cdot ds = p \cdot A \cdot ds = p \cdot dV$

**Tekniskt arbete:**  $dW_t = -p \cdot dV$ ;  $dw_t = -p \cdot dv$

Miunustecknet definierat att avgivet arbete vid expansion är  $>0$

**Entalpi:**  $h = u + p \cdot v$

$$dq = dh - v \cdot dp$$

**Entropi:**  $ds = \left( \frac{dq}{dT} \right)_{rev}$

**Gibbs fria energi:**  $G = H - T \cdot S$

$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$  för en isoterm process.

**Exergi:**  $X_{\text{värme}} = \left( 1 - \frac{T_{\text{omgivning}}}{T_{\text{källa}}} \right) \cdot Q$

$$X_{\text{arbete}} = W_t = W - p \cdot (V_2 - V_1)$$

## Termodynamiska processer

**Isokor process:**  $V = \text{konstant}$

$$Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T$$

$$w = v \cdot \Delta p \dots$$

**Isobar process:**  $p = \text{konstant}$

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$w = 0$$

**Isoterm process:**  $T = \text{konstant}$

$$Q = W = m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} =$$

$$= m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$w = R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = R \cdot T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = T \cdot (s_2 - s_1) \text{ för en ideal gas.}$$

**Adiabat och isentrop process:**

$$\Delta Q = 0 \text{ och } \Delta s = 0$$

$$q = 0$$

$$w_t = i_2 - i_1$$

**Carnotprocess:**  $\eta_c = \frac{\Delta s \cdot (T_1 - T_2)}{\Delta s \cdot (T_1 - 0)} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

## Kapitel 3

# Värmeöverföring

### Beteckningar

Area  $\text{m}^2$  ( $A$ )  
Termisk diffusivitet,  $\text{m}^2/\text{s}$  ( $\alpha$ )  
Diameter, m (kan även betecknas  $d$ ) ( $D$ )  
Diameter, m (kan även betecknas  $d$ ) ( $D$ )  
Frekvens, Hz, (kan också betecknas  $\nu$ ) ( $f$ )  
Hastighet, m/s (kan även betecknas  $V$ ) ( $v$ )  
Ljusets hastighet, m/s ( $c$ )  
Ljusets hastighet i vacuum  $2,998 \cdot 10^8$ , m/s ( $c_0$ )  
Isobar specifik värmekapacitet, J/kg·K ( $c_p$ )  
Kinematisk viskositet,  $\text{m}^2/\text{s}$  ( $\nu$ )  
Massflöde, kg/s (kan även betecknas  $q_m$ ) ( $\dot{m}$ )  
Nusselts tal, dimensionslöst ( $Nu$ )  
Prandtls tal, dimensionslöst ( $Pr$ )  
Reynolds tal, dimensionslöst ( $Re$ )  
Svartkropps strålningseffekt,  $\text{W}/\text{m}^2$  ( $E_b$ )  
Stefan-Boltzmanns konstant  $5,67 \cdot 10^{-8}$  ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) ( $\sigma$ )  
Våglängd, m ( $\lambda$ )  
Våt omkrets (fluidberörd omkrets), m ( $O$ )  
Temperatur, K eller °C – °C (kan även betecknas  $t$ ) ( $T$ )  
Tjocklek, gränsskiktstjocklek, m ( $\delta$ )  
Värmeeffekt, W ( $\dot{Q}$ )  
Värmeledningstal,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (kan även betecknas  $k$ ) ( $U$ )  
Värmeledningstal, värmekonduktivitet,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  ( $\lambda$ )  
Värmemotstånd, K/W ( $R$ )  
Värmeövergångstal,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  ( $\alpha$ )

### Värmeledning

Värmeledning genom plan vägg:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} = \lambda \cdot A \frac{T_1 - T_2}{\delta} = \\ &= \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{\delta}{\lambda \cdot A}\right)} = \left| \frac{\delta}{\lambda \cdot A} = R \right| = \frac{T_1 - T_2}{R}\end{aligned}$$

där  $T_1$  och  $T_2$  är temperaturena på väggens varma respektive kalla yta.

### Värmeledning genom kompositvägg med konvektionsöverföring:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= U \cdot A \cdot (T_i - T_u) = \\ &= \frac{(T_i - T_u) \cdot A}{\left( \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_u} \right)} = \\ &= \frac{(T_i - T_u)}{\left( \frac{1}{\alpha_i \cdot A} + \frac{\delta_1}{\lambda_1 \cdot A} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 \cdot A} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n \cdot A} + \frac{1}{\alpha_u \cdot A} \right)} = \\ &= \frac{(T_i - T_u)}{R_{tot}} \\ R_{tot} &= \frac{1}{\alpha_i \cdot A} + \frac{\delta_1}{\lambda_1 \cdot A} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 \cdot A} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n \cdot A} + \frac{1}{\alpha_u \cdot A} = \frac{1}{U \cdot A} \text{ (K/W)}\end{aligned}$$

där  $T_i$  och  $T_u$  är temperaturena i väggens varma respektive kalla omgivning, långt från väggen.

Notera att värmemotståndet  $R_{tot}$  även kan definieras som

$$R_{tot} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_u} \text{ (K/(W} \cdot \text{m}^2))}$$

I det fallet blir  $\dot{Q} = \frac{A \cdot (T_i - T_u)}{R_{tot}}$

### Termisk diffusivitet

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \text{ m}^2/\text{s}$$

## Konvektion

### Dimensionslösa tal

$$\begin{aligned}\text{Reynolds tal: } Re &= \frac{v_m \cdot d_h}{\nu} = \\ &= \left| \mu = \frac{\nu}{\rho} \right| = \frac{v_m \cdot d_h \cdot \rho}{\mu}\end{aligned}$$

$$d_h \text{ (hydrauliska diametern) } = \frac{4 \cdot \text{tvärsnittsarean}}{\text{våt omkrets}} = \frac{4 \cdot A}{O}$$

$$v_m \text{ (medelhastigheten) } = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A}$$

$$\text{Prandtls tal: } Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} = \frac{c_p \cdot \nu \cdot \rho}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha}$$

där  $\alpha$  i uttrycket  $\frac{\nu}{\alpha}$  är ämnets termiska diffusivitet.

$$\text{Nusselts tal: } Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda}$$

Korrelationer för Nusselts tal, dimensionslöst ( $Nu$ ) finns till exempel i Soleimani Mohseni m. fl., 2018 och Alvarez, 2006. Några generellt användbara korrelationer är:

### Externt flöde, plan platta

$$\overline{Nu}_L = (0,037 \cdot Re_L^{4/5} - 871) \cdot Pr^{1/3}$$

$$\text{Då: } Re_{x,c} = 5 \cdot 10^5, Re_L \leq 10^8 \text{ och } 0,6 \leq Pr \leq 60$$



### Internt flöde, rör (Dittus-Boelters korrelation)

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re_D^{4/5} \cdot Pr^n$$

$$\text{Då: } 0,6 \leq Pr \leq 160, \quad Re_D \geq 10^5, \quad \frac{L}{d} \geq 10$$

$$n = 0,4 \text{ då } T_s > T_m$$

$$n = 0,3 \text{ då } T_s < T_m$$

### Samband mellan tryckfall och värmeöverföringskoefficient för cirkuära rör

#### Konstanta röregenskaper, variabelt volymflöde

<i>Laminärt flöde</i>	<i>Turbulent flöde</i>
$P_f \propto v \propto \dot{V}$	$p_f \propto v^{1,75} \text{ till } 2$
$\alpha \propto v^0 \text{ till } 0,3$	$\alpha \propto v^{0,8}$

#### Konstant volymflöde, variabel rördiameter

<i>Laminärt flöde</i>	<i>Turbulent flöde</i>
$p_f \propto d^{-4}$	$p_f \propto d^{-(4,75 \text{ till } 5)}$
$\alpha \propto d^{-1}$	$\alpha \propto d^{-1,8}$

## Strålning

### Våglängd

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$c = \frac{c_0}{n} \text{ där } n = \text{index}$$

### Fotonenergi

$$e = h \cdot v = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$\text{där } h = \text{plancks konstant} = 6,626069 \cdot 10^{-34} J \cdot s$$

### Svartkroppsstrålning

$$E_b(T) = \sigma \cdot T^4 \text{ där } \sigma = \text{Stefan Boltzmanns konstant} = 5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$$

### Emissivitet

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda(\lambda, T) \cdot E_{b,\lambda}(T, \lambda) \cdot d\lambda}{\sigma \cdot T^4}$$

## Absorptans, reflektans och transmittans

$$\text{Absorptans} = \alpha = \frac{\text{absorberad strålning}}{\text{total strålning}}$$

$$\text{Reflektans} = \rho = \frac{\text{reflekterad strålning}}{\text{total strålning}}$$

$$\text{Transmittans} = \tau = \frac{\text{transmitterad strålning}}{\text{total strålning}}$$

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G}$$

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G}$$

$$\tau = \frac{G_{trans}}{G}$$

där  $G$  = totalt inkommande strålning ( $W/m^2$ )

$$G_{abs} + G_{ref} + G_{trans} = G$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Opak kropp  $\tau = 1 \rightarrow \alpha + \rho = 0$

Svart kropp:  $\tau = 0; \rho = 0; \alpha = \varepsilon = 1$

Kirchoffs lag:  $\varepsilon_\lambda(T) = \alpha_\lambda(T)$

då en yta är i termodynamisk jämvikt

## Vinkelfaktorer

$F_{i \rightarrow j}$  = andelstrålning som lämnar yta i och träffar yta j

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \text{ där ytan i är helt omsluten av N ytor.}$$

$F_{11}$  är strålning som yta i utbyter med sig själv

Superpositionsregeln:

$$F_{1 \rightarrow (2+3)} = F_{12} + F_{13}$$

$$A_1 \cdot F_{1 \rightarrow (2+3)} = A_1 \cdot F_{12} + A_1 \cdot F_{13}$$

$$(A_1 + A_2) \cdot F_{1 \rightarrow (2+3)} = A_2 \cdot F_{12} + A_3 \cdot F_{13}$$

Reciprocitetslagen

$$A_1 \cdot F_{12} = A_2 \cdot F_{21}$$

## Värmeutbyte mellan svarta ytor:

$$\dot{Q}_i = \sum_{j=1}^N A_i \cdot F_{ij} \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T_j^4)$$

**Värmeutbyte mellan gråa ytor:**

$$\varepsilon_{res} = F_{12} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$$

Vid stora parallella plattor

$$\varepsilon_{res} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Då ytan  $A_1$  är helt omsluten

$$\varepsilon_{res} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

**Sammanfatt värmeöverföring:**

$$\alpha_{svart} = \sigma \cdot \beta$$

$$\beta = \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$$

$$\alpha_s = \varepsilon \cdot F_{12} \cdot \alpha_{svart}$$

*sammanfatt värmeövergångskoefficient:*

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_{konv}$$

# Kapitel 4

## Strömningslära

### Beteckningar

Area  $\text{m}^2$  ( $A$ )

Densitet,  $\text{kg}/\text{m}^3$  ( $\varrho$ )

Dynamisk viskositet,  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$  eller  $\text{Pa}\cdot\text{s}$  eller  $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$  ( $\mu$ )

Engångsförlustkoefficient, motståndstal, dimensionslöst ( $\xi$ )

Hastighet,  $\text{m}/\text{s}$  (kan även betecknas  $V$ ) ( $v$ )

Höjd,  $\text{m}$  (kan även betecknas  $z$ ) ( $h$ )

Hastighet,  $\text{m}/\text{s}$  (kan även betecknas  $V$ ) ( $v$ )

Kinematisk viskositet,  $\text{m}^2/\text{s}$  ( $\nu$ )

Massflöde,  $\text{kg}/\text{s}$  (kan även betecknas  $q_m$ ) ( $\dot{m}$ )

Omkrets,  $\text{m}$  ( $O$ )

Sträcka,  $\text{m}$  ( $s$ )

Tryck,  $\text{Pa}$  ( $p$ )

Tryckfallskoefficient, friktionsfaktor (kan även betecknas  $f$ ) ( $\lambda$ )

Tyngdacceleration,  $\text{m}/\text{s}^2$  ( $g$ )

### Formler och samband

#### Kontinuitetsekvationen för endimensionell stationär strömning

$$\varrho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \varrho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \triangleq \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

#### Kontinuitetsekvationen vid konstant densitet:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \triangleq \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

#### Bernoullis ekvation

$$\frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 + \frac{p_1}{\varrho} = \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + \frac{p_2}{\varrho} \quad (\text{J/kg})$$

$$\frac{v_1^2 \cdot \varrho}{2} + \varrho \cdot g \cdot h_1 + p_1 = \frac{v_2^2 \cdot \varrho}{2} + \varrho \cdot g \cdot h_2 + p_2 \quad (\text{Pa})$$

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_1 + \frac{p_1}{\varrho \cdot g} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + \frac{p_2}{\varrho \cdot g} \quad (\text{m})$$

där uttrycken  $p \cdot A \cdot ds = p \cdot dV$  är volymändringsarbete eller tryckenergi (J) och

$$\frac{p \cdot A \cdot ds}{m} = \frac{p \cdot dV}{m} = \frac{p}{\varrho} \quad \text{är volymändringsarbete eller tryckenergi per kg (J/kg)}$$

### **Toricellis teorem. Utströmning ur vätskebehållare**

$$v_{ut} = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Utströmning från behållare under tryck:

$$v_{ut} = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho} \cdot 2 \cdot g \cdot h}$$

### **Stagnationstryck, dynamiskt tryck och statiskt tryck**

$$\text{Stagnationstryck: } p_{stat} + \frac{\rho \cdot v_c^2}{2}$$

$$\text{Dynamiskt tryck: } p_{dyn} = \frac{\rho \cdot v_c^2}{2}$$

$$\text{Statiskt tryck: } p_{stat} = \rho \cdot g \cdot h \text{ (tryck över atmosfärsstryck)}$$

$$\text{Statiskt tryck: } p_{stat} = \rho \cdot g \cdot h + p_{atm} \text{ (absoluttryck)}$$

$$\text{Totalt tryck: } p_{stat} + p_{dyn}$$

### **Laminär eller turbulent strömning**

$$Re = \frac{v_m \cdot d_h}{\nu} = \frac{(v_m \cdot d_h)}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)}$$

$$d_h \text{ (hydraulisk diameter)} = \frac{4 \cdot A}{O}$$

### **Tryckförluster vid friktion i rör**

$$p_f = \lambda \cdot \frac{L}{d_h} \cdot \frac{\rho \cdot v_m^2}{2}$$

# Kapitel 5

## Pumpsystem

### Beteckningar

Hastighet, m/s (kan även betecknas  $V$ ) ( $v$ )  
Hastighet, m/s (kan även betecknas  $V$ ) ( $v$ )  
Hastighet, m/s (kan även betecknas  $V$ ) ( $v$ )  
Hastighet, m/s (kan även betecknas  $V$ ) ( $v$ )  
Arbete, J ( $W$ )  
Arbetseffekt, W ( $\dot{W}$ )  
Area m<sup>2</sup> ( $A$ )  
Densitet, kg/m<sup>3</sup> ( $\rho$ )  
Diameter, m (kan även betecknas  $d$ ) ( $D$ )  
Engångsförlustkoefficient, motståndstal, dimensionslöst ( $\xi$ )  
Höjd, m (kan även betecknas  $z$ ) ( $h$ )  
Längd, m ( $L$ )  
Massa, kg ( $m$ )  
Massflöde, kg/s (kan även betecknas  $q_m$ ) ( $\dot{m}$ )  
Maximal sughöjd (*net positive suction head*) ( $NPSH$ )  
Strömningsförlust, m ( $h_f$ )  
Temperatur, K eller °C – °C (kan även betecknas  $t$ ) ( $T$ )  
Tryck, Pa ( $p$ )  
Tryckfallskoefficient, friktionsfaktor (kan även betecknas  $f$ ) ( $\lambda$ )  
Tyngdacceleration, m/s<sup>2</sup> ( $g$ )  
Varvtal ( $n$ )  
Volym, m<sup>3</sup> ( $V$ )  
Volymitet, specifik volym, m<sup>3</sup>/kg ( $v$ )  
Volymflöde, m<sup>3</sup>/s ( $\dot{V}$ )  
Verkningsgrad eller effektivitet, dimensionslöst ( $\eta$ )  
Uppfordringshöjd, m ( $H$ )

### Formler och samband

Teoretiskt pumparbete vid en isokor process:  $w = v \cdot \Delta p$

## Energiekvationen för pumpar och fläktar

$$\begin{aligned} p_1 + \varrho \cdot g \cdot h_1 + \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{pump} &= \\ &= p_2 + \varrho \cdot g \cdot h_2 + \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{f12} \\ \Delta p_{flakt} &= (p_2 - p_1) + \varrho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{f12} \approx \\ &\approx p_2 - p_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{f12} \\ &\text{om } \varrho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \text{ är litet} \end{aligned}$$

## Uppfördringshöjd:

$$\begin{aligned} H_{pump} &= \frac{p_{ut} - p_{in}}{\varrho \cdot g} + \frac{v_{ut}^2 - v_{in}^2}{2 \cdot g} + h_{ut} - h_{in} + \Delta h_f = \\ &= \frac{p_{0,ut} - p_{0,in}}{\varrho \cdot g} + h_{ut} - h_{in} + \Delta h_f \end{aligned}$$

där  $p_{ut} - p_{in}$  = ökningen av det statiska trycket i pumpen,  $p_{0,ut} - p_{0,in}$  = ökningen av totaltrycket i pumpen och  $\Delta h_f$  = friktionsförluster i rörsystemet.

## Kavitation och NPSH

$$\begin{aligned} NPSH &= \frac{p_{0,s} - p_{\ddot{a}}}{\varrho \cdot g} = \frac{p_a - p_{\ddot{a}}}{\varrho \cdot g} - h_s - h_{fs} \\ NPSH &\geq NPSH_{erf} \end{aligned}$$

$p_{0,s}$  = absoluta totaltrycket vid pumpinloppet,  $p_{\ddot{a}}$  = vätskans ångbildningstryck vid aktuell temperatur,  $p_a$  = lufttryck vid en öppen vätskeyta,  $h_s$  = höjdskillnad mellan vätskeyta och pumpinlopp, samt  $h_{fs}$  = strömningsförluster i sugledningen.  $NPSH_{erf}$  är pumpens minsta NPSH vid ett givet driftfall.

## Pumparbete:

$$\dot{W} = \frac{\dot{W}_n}{\eta_{tot}} = \frac{\dot{V} \cdot \varrho \cdot g \cdot H}{\eta_{tot}} = \frac{\dot{m} \cdot g \cdot H}{\eta_{tot}} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_t}{\eta_{tot}}$$

där  $\Delta p_t$  är totala tryckökningen i pumpen.

## Likformighetslagar

$$\begin{aligned} \dot{V} &\propto n \cdot D^3 \\ \dot{m} &\propto n \cdot \varrho \cdot D^3 \\ H &\propto n^2 \cdot D^2 \\ \dot{W} &\propto n^3 \cdot \varrho \cdot D^5 \end{aligned}$$

## Strömningshastighet för inkompressibla medier:

$$v_m = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A}$$

där  $v_m$  är fluidens medelhastighet och  $A$  rörets tvärsnittsarea.

## Driftfall vid parallell- och seriekopplade pumpar

Kopplingsfall	Pump 1	Pump 2	Kombinerat fall
Parallellkoppling	$H_1 = H_{tot}$ $\dot{V}_1 = \dot{V}_{tot} - \dot{V}_2$	$H_2 = H_{tot}$ $\dot{V}_2 = \dot{V}_{tot} - \dot{V}_1$	$H_{tot} = H_1 = H_2$ $\dot{V}_{tot} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2$
Seriekoppling	$H_1 = H_{tot} - H_2$ $\dot{V}_1 = \dot{V}_{tot}$	$H_2 = H_{tot} - H_1$ $\dot{V}_2 = \dot{V}_{tot}$	$H_{tot} = H_1 + H_2$ $\dot{V}_{tot} = \dot{V}_1 = \dot{V}_2$

## Strömningsförluster:

$$h_f \approx konst \cdot \dot{V}^2$$

Strömningsförluster som beror på friktion i cirkulära rör:

$$h_f = \frac{\lambda \cdot L \cdot v_m^2}{2 \cdot d \cdot g} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L \cdot \dot{V}^2}{\pi^2 \cdot d^5 \cdot g}$$

$$p_f = \rho \cdot g \cdot h_f = \rho \cdot \frac{\lambda \cdot L \cdot v_m^2}{2 \cdot d} = \rho \cdot \frac{8 \cdot \lambda \cdot L \cdot \dot{V}^2}{\pi^2 \cdot d^5}$$

där  $v_m$  är fluidens medelhastighet

Strömningsförluster som beror på engångsförluster i ventiler, rörböjar etc:

$$h_f = \frac{\sum \xi \cdot v_m^2}{2 \cdot g}$$

$$p_f = \rho \cdot g \cdot h_f = \rho \cdot \frac{\sum \xi \cdot v_m^2}{2}$$

där  $\sum \xi$  är summan av engångsförlustkoefficienterna för systemet.

Strömningsförluster i cirkulära rör som beror på både friktions- och engångsförluster:

$$h_f = \left( \lambda \cdot \frac{L}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{v_m^2}{2 \cdot g} = \left( \lambda \cdot \frac{L}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{8 \cdot \dot{V}^2}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g}$$

$$p_f = \rho \cdot g \cdot h_f = \rho \cdot \left( \lambda \cdot \frac{L}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{v_m^2}{2} = \rho \cdot \left( \lambda \cdot \frac{L}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{8 \cdot \dot{V}^2}{\pi^2 \cdot d^4}$$



# Kapitel 6

## Värmeväxlare

### Beteckningar

Area  $\text{m}^2$  ( $A$ )

Isobar specifik värmekapacitet,  $\text{J/kg}\cdot\text{K}$  ( $c_p$ )

Verkningsgrad eller effektivitet, dimensionslöst ( $\varepsilon$ )

Massa,  $\text{kg}$  ( $m$ )

Massflöde,  $\text{kg/s}$  (kan även betecknas  $q_m$ ) ( $\dot{m}$ )

Temperatur,  $\text{K}$  eller  $^{\circ}\text{C}$  –  $^{\circ}\text{C}$  (kan även betecknas  $t$ ) ( $T$ )

Värmeledningstal,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  (kan även betecknas  $k$ ) ( $U$ )

Värmemängd,  $\text{J}$  ( $Q$ )

Värmeeffekt,  $\text{W}$  ( $\dot{Q}$ )

### Värmebalanser

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \dot{m}_k \cdot c_{p,k} \cdot (T_{k,in} - T_{k,ut}) = \\ &= \dot{m}_v \cdot c_{p,v} \cdot (T_{v,in} - T_{v,ut}) = \\ &= U \cdot A_s \cdot \Delta T_{lm}\end{aligned}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

*Motströmsvärmeväxlare*      *Medströmsvärmeväxlare*

$$\Delta T_1 = T_{v,in} - T_{k,ut} \qquad \Delta T_1 = T_{v,in} - T_{k,in}$$

$$\Delta T_2 = T_{v,ut} - T_{k,in} \qquad \Delta T_2 = T_{v,ut} - T_{k,ut}$$

### Försmutsning och beläggningar

$$\frac{1}{U_s} = \frac{1}{U_r} + \frac{\delta_s}{\lambda_s}$$

där index-s betyder smutsig (belagd) yta och index-r betyder ren yta.

## NTU-metoden

### Värmeväxlareffektivitet

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\text{Verklig överförd värmeeffekt}}{\text{Teoretiskt maximalt överförd värmeeffekt}} \\ &= \frac{C_v \cdot (T_{v,in} - T_{v,ut})}{C_{min} \cdot (T_{v,in} - T_{k,in})} = \frac{C_k \cdot (T_{k,ut} - T_{k,in})}{C_{min} \cdot (T_{v,in} - T_{k,in})} \\ &= \frac{C_{max} \cdot (|T_{in} - T_{ut}|)_{min}}{C_{min} \cdot (T_{v,in} - T_{k,in})} = \frac{C_{min} \cdot (|T_{in} - T_{ut}|)_{max}}{C_{min} \cdot (T_{v,in} - T_{k,in})} = \frac{(|T_{in} - T_{ut}|)_{max}}{(T_{v,in} - T_{k,in})}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= C_k \cdot (T_{k,ut} - T_{k,in}) \\ &= C_v \cdot (T_{v,in} - T_{v,ut})\end{aligned}$$

$C = \dot{m} \cdot c_p$  för varma respektive kalla flödet

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} \cdot (T_{v,in} - T_{k,in})$$

där  $C_{min} = \{C_v, C_k\}_{min}$  dvs minsta  $\dot{m} \cdot c_p$  för  $C_v$  eller  $C_k$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

$$NTU = \frac{U \cdot A_s}{C_{min}} \text{ där } A_s \text{ är värmeväxlarens värmeöverförande yta.}$$

### Motströms värmeväxlare

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1 - C_r)}}{1 - C_r \cdot e^{-NTU \cdot (1 - C_r)}} \text{ då } C_r < 1 \\ \varepsilon &= \frac{NTU}{1 - NTU} \text{ då } C_r = 1\end{aligned}$$

### Medströms värmeväxlare

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1 + C_r)}}{1 + C_r}$$

### Tubvärmeväxlare

1 mantelpass, 2, 4, ... tubpass

$$\varepsilon_1 = 2 \cdot \left[ 1 + C_r + \sqrt{1 + C_r^2} \cdot \frac{1 + e^{(-NTU \cdot \sqrt{1 + C_r^2})}}{1 - e^{(-NTU \cdot \sqrt{1 + C_r^2})}} \right]^{-1}$$

n mantelpass, 2n, 4n ... tubpass

$$\varepsilon = \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_1 \cdot C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \cdot \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_1 \cdot C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$$

### Tvärströms värmeväxlare, enkelt pass

Uttrycken  $\exp[\dots]$  i sambanden nedan motsvarar  $e^{[\dots]}$

**Båda fluiderna oblandade**

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[ \frac{NTU^{0,22}}{C_r} \cdot (\exp(-C_r \cdot NTU^{0,78}) - 1) \right]$$

**C<sub>max</sub> blandad, C<sub>min</sub> oblandad**

$$\varepsilon = \frac{1}{C_r} \cdot (1 - \exp\{-C_r \cdot [1 - \exp(-NTU)]\})$$

**C<sub>max</sub> oblandad, C<sub>min</sub> blandad**

$$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ \frac{1}{C_r} \cdot [1 - \exp(-C_r \cdot NTU)] \right\}$$

**Alla värmeväxlare då C<sub>r</sub> = 0**

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}$$

# Kapitel 7

## Kraft- och kylprocesser

### Beteckningar

Kyl- eller värmefaktor, dimensionslöst ( $COP$ )

Massflöde, kg/s (kan även betecknas  $q_m$ ) ( $\dot{m}$ )

Verkningsgrad eller effektivitet, dimensionslöst ( $\eta$ )

Volymitet, specifik volym,  $m^3/kg$  ( $v$ )

Värmeeffekt, W ( $\dot{Q}$ )

Specifik entalpi, J/kg (kan även betecknas  $i$ ) ( $h$ )

Specifik entropi, J/(kg·K) ( $s$ )

Ånghalt kg ånga / kg vatten, dimensionslöst (kan även betecknas  $\nu$ ) ( $x$ )

### Ångkraftprocessen

#### Index

$f$	fuktig ånga
$is$	isentrop
$t1$	tillstånd efter kondensor
$t2$	tillstånd efter matarvattenpump
$t3$	tillstånd efter överhettare
$t4$	tillstånd efter turbin
$'$	mättad vätska; ingående flöde
$''$	mättad ånga; utgående flöde

#### Ånghalt:

$$x = \frac{h_f - h'}{h'' - h'} = \frac{s_f - s'}{s'' - s'} = \frac{v_f - v'}{v'' - v'}$$

#### Entalpi i fuktiga området:

$$h_f = x \cdot h'' + (1 - x) \cdot h' = x \cdot (h'' - h') + h' = x \cdot r + h'$$

#### Termisk verkningsgrad:

$$\eta_t = \frac{(h_{t3} - h_{t4}) - (h_{t2} - h_{t1})}{h_{t3} - h_{t2}} = 1 - \frac{h_{t4} - h_{t1}}{h_{t3} - h_{t2}}$$

**Turbinens isentropverkningsgrad:**

$$\eta_{is} = \frac{h_{t3} - h_{t4}}{h_{t3} - h_{t4,is}}$$

**Värmebalans förvärmare:**

$$\dot{m}_{1,in} \cdot h_{1,in} + \dot{m}_{2,in} \cdot h_{2,in} = \dot{m}_{1,ut} \cdot h_{1,ut} + \dot{m}_{2,ut} \cdot h_{2,ut}$$

**Massbalans blandningsförvärmare:**

$$\dot{m}_{1,in} + \dot{m}_{2,in} = \dot{m}_{3,ut}$$

## Kylmaskiner och värmepumpar

### Index

<i>is</i>	isentrop
<i>t1</i>	tillstånd efter förångare
<i>t2</i>	tillstånd efter kompressor
<i>t3</i>	tillstånd efter kondensor
<i>t4</i>	tillstånd efter ventil
<i>L</i>	Tillfört värme i förångaren
<i>H</i>	Avgivet värme i kondensorn
<i>R</i>	Kylmaskin
<i>HP</i>	Värmepump

**Värmebalanser:**

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_{köldmedium} \cdot (h_{t1} - h_{t4})$$

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{köldmedium} \cdot (h_{t2} - h_{t3})$$

**Köldfaktor och värmefaktor:**

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{kompressor}}$$

$$COP_{HP} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{kompressor}}$$

**Kompressorernas isentropverkningsgrad:**

$$\eta_{is} = \frac{h_{t2,is} - h_{t1}}{h_{t2} - h_{t1}}$$

# Kapitel 8

## Vindenergi

### Beteckningar

Axiell induktionsfaktor ( $a$ )

Effektkoefficient ( $C_p$ )

Verkningsgrad eller effektivitet, dimensionslöst ( $\eta$ )

Uppfordringshöjd, m ( $H$ )

### Formler och samband

#### Vindens energiflöde

*Vindens momentana effekt*

$$P_{kin} = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3$$

*Vindens medeleffekt*

$$\overline{P_{kin}} = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot \overline{v^3}$$

*Vindens medeleffekt på en plats*

$$\overline{P_{kin}} = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot \overline{v^3} \cdot EPF$$

*Kubikfaktor (Energy Pattern Factor)*

$$EPF = \frac{\overline{v^3}}{\overline{v}^3}$$

*Turbulensintensitet (10 minuters mätning, samplingsfrekvens minst 1 Hz)*

$$TI = \frac{sd(v)}{\overline{v}}$$

#### Vindhastighetens höjdberoende

$$v_2 = v_1 \cdot \left( \frac{h_2 - h_0}{h_1 - h_0} \right)^\alpha$$

$h_0 =$  nollplansförskjutning  $\approx 75\%$  av vegetationshöjden

## Horisontalaxlade vindturbiner

*Axiella induktionsfaktorn*

$$a = 1 - \frac{v_{turbin}}{v}$$

där  $v_{turbin}$  = vindhastighet genom turbinen

och  $v$  = den ostörda vindens hastighet

*Effektkoefficienten för ideal turbin*

$$C_p = 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2$$

## Vertikalaxlade vindturbiner

Nyckeltal

# Kapitel 9

## Ekonomi

### Beteckningar

Antal år (kan även betecknas  $x$ ) ( $n$ )  
Annuitet, kr ( $A$ )  
Annuitetsfaktor, dimensionslöst (kan även betecknas  $a$ ) ( $f_A$ )  
Grundinvestering, kr ( $G$ )  
Inflation, % ( $q$ )  
Livscykelkostnad, kr ( $LCC$ )  
Intäktsöverskott, kr/år ( $a$ )  
Intäkt eller kostnad, kr ( $C$ )  
Nusummeffaktor, dimensionslöst ( $f_N$ )  
Nuvärde, kr ( $N$ )  
Restvärde, kr ( $R$ )  
Ränta, % ( $r$ )  
Slutvärde, kr (även  $K_n$ ) ( $SV$ )  
Återbetalningstid (payback), år ( $T$ )

### Index

$0$     Värde vid tidpunkt 0 (idag)  
 $n$     Värde vid tidpunkt  $n$   
 $N$     Nuvärde

### Formler och samband

#### Nuvärde

$$N = K_n \cdot (1 + r)^{-n} = SN \cdot (1 + r)^{-n}$$



### Nuvärdesmetoden

$$N = \sum_{i=1}^n C_i \cdot (1+r)^{-n}$$

$$N = \sum_{i=1}^n a \cdot (1+r)^{-n} = f_N \cdot a$$

om det årliga intäktsöverskottet är konstant.

$$f_N = \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} = \frac{1}{f_A}$$

### Annuitetsmetoden

$$A = f_A \cdot N$$

$$f_A = \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} = \frac{1}{f_N}$$

### Slutvärde

$$K_n = SV = N \cdot (1+r)^n$$

### Realränta

$$r_r = \frac{1+r}{1+q} \approx r - q$$

där  $r$  är den nominella räntan eller kalkylräntan.

### Omvandling från årsränta till annan räntebas

$i$  = andel av år.

$i = 4$  motsvarar t ex omvandling från årsränta till kvartalsränta

$r_i$  = omräknad ränta, t ex kvartalsränta

$$r_i = (1+r)^{\frac{1}{i}} - 1 \approx \frac{r}{i}$$

där  $r$  är årsräntan.

### Paybackmetoden

$$\text{Generellt: } \sum_{i=0}^T C_i = 0$$

$$\text{Diskonterad paybackmetod: } \sum_{i=0}^T C_i \cdot (1+r)^{-i} = 0$$

$$T = \frac{G}{a} \text{ om det årliga intäktsöverskottet är konstant.}$$

### Life Cycle Cost (LCC)

$$LCC = G + \sum_{i=0}^n K_{N,i} - \sum_{i=0}^n I_{N,i} - R_N$$

# Kapitel 10

## Underhållsteknik

### Beteckningar

Anläggningsutnyttjande, h ( $A$ )  
Felintensitet, h ( $\lambda$ )  
Kvalitetsutbytbyte, h ( $K$ )  
Mean repair time, h ( $MRT$ )  
Mean waiting time, h ( $MWT$ )  
Mean down time, h ( $MDT$ )  
Mean time to failure, h ( $MTTF$ )  
Mean time between failure, h ( $MTBF$ )  
Mean time to repair, h ( $MTTR$ )  
Tillgänglighet, h ( $T$ )  
Utrustningseffektivitet ( $TAK$ )

### Definitioner

Begrepp och nyckeltal definieras i svensk standard SS-EN 13306 och SS-EN 15341. Dessa är sammanfattade i SSG rapport "Underhållseffektivitet, terminologi och nyckeltal".

Formler och beteckningar utgår från Hagberg och Henriksson, 2018, *Underhåll - Underhållsdokumentation*, 2009, *Underhåll - Underhållsterminologi*, 2017 och *Underhåll - Nyckeltal för underhåll*, 2007

### Definitioner enligt SS-EN standard

Viktiga definitioner enligt SSG rapport "Underhållseffektivitet, terminologi och nyckeltal (2015)" är:

- Enhet: Del, komponent, anordning, delsystem, funktionell apparat, utrustning eller system som kan individuellt beskrivas och beaktas.
- Fel: Upphörande av förmågan hos en enhet att utföra en krävd funktion.
- Funktionsfel: Tillstånd hos en enhet karakteriserat av oförmåga att utföra en krävd funktion, exkluderat en oförmåga som kan uppstå vid förebyggande underhåll eller annan planerad åtgärd eller brist på stödfunktioner
- Underhåll: Kombination av alla tekniska, administrativa och ledningens åtgärder under en enhets livstid avsedda att vidmakthålla den i, eller återställa den till, ett sådant tillstånd att den kan utföra krävd funktion.

- Förebyggande underhåll: Underhåll som genomförs vid förutbestämda intervall eller enligt förutbestämda kriterier och i avsikt att minska sannolikheten för fel eller degradering av en enhets funktion.
- Förutbestämt underhåll: Förebyggande underhåll som genomförs i enlighet med bestämda intervaller eller efter en bestämd användning, men utan att föregås av tillståndskontroll.
- Tillståndsbaserat underhåll: Förebyggande underhåll som består av kontroll och övervakning av en enhets tillstånd avseende dess funktion och egenskaper, samt därav föranledda åtgärder
- Förutsägbart underhåll: Tillståndsbaserad underhållsåtgärd som genomförs som följd av en förutsägelse om en enhets försämrade funktion baserad på analys och utvärdering av viktiga egenskaper.
- Förbättring: Kombination av alla tekniska, administrativa samt ledningens åtgärder, avsedda att förbättra en enhets tillförlitlighet, utan att ändra dess krävda funktion.
- Modifiering: Kombination av alla tekniska, administrativa och ledningens åtgärder, avsedda att ändra en enhets funktion.
- Avhjälpande underhåll: Underhåll som genomförs efter det att funktionsfel upptäckts och med avsikt att få enheten i ett sådant tillstånd att den kan utföra krävd funktion.
- Uppskjutet avhjälpande underhåll: Avhjälpande underhåll som inte genomförs omedelbart efter att ett funktionsfel upptäckts utan senareläggs i enlighet med givna underhållsdirektiv.
- Akut avhjälpande underhåll: Underhåll som genomförs omedelbart efter det att funktionsfel upptäckts för att undvika oacceptabla konsekvenser
- Operatörsunderhåll: Underhåll som genomförs av en enhets användare eller operatör

### Definitioner från Hagberg och Henriksson "Underhåll i världsklass"

- Stopptid: = Väntetid + reparationstid
- Totalt disponibel tid<sub>x</sub>: = Obelagd tid + Totalt disponibel tid<sub>y</sub>
- Obelagd tid = planeringsfaktorn
- Totalt disponibel tid<sub>y</sub> = Planerad produktionstid
- Tillgänglig tid av planerad produktionstid är Totalt disponibel tid<sub>y</sub> - Stopptid
- MRT = Mean repair time: Tid att utföra reparation
- MWT = Mean waiting time: Väntetid fram till reparation
- MDT = Mean down time: Genomsnittligt stopptid

### Nyckeltal

Standard SS-EN 15341 beskriver nyckeltalen i tre grupper:

- E - Ekonomiska nyckeltal
- O - Organisatoriska nyckeltal
- T - Tekniska nyckeltal

Nyckeltalen är sedan indelade i olika nivåer.

### Ekonomiska nyckeltal

$$\mathbf{E1:} \frac{\text{Total underhållskostnad}}{\text{Återanskaffningsvärde}} \cdot 100$$

$$\mathbf{E3:} \frac{\text{Total underhållskostnad}}{\text{Total produktioh}}$$

$$\mathbf{E15:} \frac{\text{Kostnad för avhjälpande underhåll}}{\text{Total underhållskostnad}} \cdot 100$$

$$\mathbf{E16:} \frac{\text{Kostnad för förebyggande underhåll}}{\text{Total underhållskostnad}} \cdot 100$$

$$\mathbf{E17:} \frac{\text{Kostnad för tillståndsbaserat underhåll}}{\text{Total underhållskostnad}} \cdot 100$$

$$\mathbf{E18:} \frac{\text{Kostnad för förutbestämt underhåll}}{\text{Total underhållskostnad}} \cdot 100$$

$$\mathbf{E19:} \frac{\text{Kostnad för förbättring}}{\text{Total underhållskostnad}} \cdot 100$$

### Tekniska nyckeltal

#### Enligt SS\_EN standard

$$\mathbf{T1:} \frac{\text{Total drifttid}}{\text{Total drifttid} + \text{Driftstopp på grund av underhåll}} \cdot 100$$

$$\mathbf{T17:} MTBF = \frac{\text{Total drifttid}}{\text{Totalt antal fel}} = MTTF + MDT$$

$$\mathbf{T21:} MTTR = MDT = \frac{\text{Total tid för återställande}}{\text{Totalt antal fel}} = MRT + MWT$$

#### Enligt Hagberg och Henriksson, Underhåll i världsklass

Operativ prestation:

$$= \left( \frac{\text{Enheter}}{\text{Maskintimme}} \right) \cdot \left( \frac{\text{Maskintimmar}}{\text{År}} \right) = \text{enheter/år}$$

Tillgänglighet:

$$T = \frac{\text{Totalt disponibel tid} - \text{Obelagd tid}}{\text{Totalt disponibel tid}}$$

Tillgänglighet i seriekopplade funktioner:

$$T = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot \dots \cdot T_n$$

Tillgänglighet i parallellkopplade funktioner:

$$T = 1 - (1 - T_1) \cdot (1 - T_2) \cdot (1 - T_3) \cdot \dots \cdot (1 - T_n)$$

Funktionssäkerhet:

$$MTTF = \frac{\text{Verkligt utnyttjad drifttid}}{\text{Antalet fel}}$$

Underhållsmässighet:

$$MRT = \frac{\text{Total reparationstid}}{\text{Antalet fel}}$$

Underhållssäkerhet:

$$MWT = \frac{\text{Total väntetid}}{\text{Antalet fel}}$$

Genomsnittligt stopptid:

$$MDT = MTTR = MRT + MWT$$

Felintensitet:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}$$

Tillgängligheten:

$$\begin{aligned} T &= \frac{MTTF}{MTTF + MRT + MWT} = \\ &= \frac{1}{1 + MDT \cdot \lambda} = \\ &= \frac{1}{1 + (MRT + MWT) \cdot \lambda} \end{aligned}$$

Genomsnittsproduktion:

$$= \frac{\text{Totalt tillverkad volym under mätperioden}}{\text{Tillgänglig tid under mätperioden}}$$

### **T.A.K - beräkning**

Tillgänglighet:

$$T = \frac{\text{Totalt tillgänglig tid} - \text{Stopptid}}{\text{Totalt tillgänglig tid}}$$

Anläggningsutnyttjande:

$$A = \frac{\text{Bruttoproduktion}}{\text{Totalt tillgänglig tid} \cdot T \cdot \text{Maximal produktionshastighet}}$$

Kvalitetsutbyte:

$$K = \frac{\text{Bruttoproduktion} - \text{Defekt produktion}}{\text{Bruttoproduktion}}$$

Utrustningseffektivitet:

$$TAK = T \cdot A \cdot K$$

## Organisatoriska nyckeltal

### Enligt SS\_EN standard

$$\text{O4: } \frac{\text{Arbetstimmar underhåll som utförs av produktionsoperatör}}{\text{Totalt antal arbetstimmar som utförs av direkt underhållspersonal}} \cdot 100$$

$$\text{O5: } \frac{\text{Planerade och schemalagda arbetstimmar för underhåll}}{\text{Totalt antal tillgängliga timmar}} \cdot 100$$

$$\text{O9: } \frac{\text{Arbetstimmar underhåll som utförs av produktionsoperatör}}{\text{Totalt antal arbetstimmar som utförs av produktionsoperatörer}} \cdot 100$$

$$\text{O16: } \frac{\text{Arbetstimmar avhjälpande underhåll}}{\text{Totalt antal arbetstimmar för underhåll}} \cdot 100$$

$$\text{O17: } \frac{\text{Arbetstimmar akut avhjälpande underhåll}}{\text{Totalt antal arbetstimmar för underhåll}} \cdot 100$$

$$\text{O18: } \frac{\text{Arbetstimmar förebyggande underhåll}}{\text{Totalt antal arbetstimmar för underhåll}} \cdot 100$$

$$\text{O19: } \frac{\text{Arbetstimmar tillståndsbaserat underhåll}}{\text{Totalt antal arbetstimmar för underhåll}} \cdot 100$$

$$\text{O20: } \frac{\text{Arbetstimmar förutbestämt underhåll}}{\text{Totalt antal arbetstimmar för underhåll}} \cdot 100$$

## Tillgänglighet

Tillgängligheten för en komponent:

$$0 \leq T \leq 1$$

Systemtillgänglighet för seriekopplade komponenter:

$$T_{system} = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdots T_n$$

Systemtillgänglighet för parallellkopplade komponenter:

$$T_{system} = 1 - (1 - T_1) \cdot (1 - T_2) \cdot (1 - T_3) \cdots (1 - T_n)$$

## Kapitel 11

# Fysikaliska data för några viktiga ämnen

Fysikaliska data för några viktiga ämnen							
Ämne	$p$ <i>bar</i>	$T$ $^{\circ}C$	$M$ <i>kg/kmol</i>	$\rho$ <i>(kg/m<sup>3</sup>)</i>	$c_p$ <i>kJ/(kg · K)</i>	$\lambda$ <i>W/(m · K)</i>	$\mu$ <i>Pa · s · 10<sup>6</sup></i>
Luft	1	20	28,96	1,189	1,005	0,0254	18,1
Vatten	1	20	18,016	988,2	4,181	0,597	1005

# Symboler

$A$	Anläggningsutnyttjande, h.
$A$	Annuitet, kr.
$A$	Area $\text{m}^2$ .
$C$	Intäkt eller kostnad, kr.
$COP$	Kyl- eller värmefaktor, dimensionslöst.
$C_p$	Effektkoefficient.
$D$	Diameter, m (kan även betecknas $d$ ).
$E$	Energi, J.
$E_b$	Svartkropps strålningseffekt, $\text{W}/\text{m}^2$ .
$F$	Kraft, N.
$G$	Grundinvestering, kr.
$G$	Gibbs fria energi, J.
$H$	Uppfordringshöjd, m.
$K$	Kvalitetsutbytbyte, h.
$L$	Längd, m.
$LCC$	Livscykelkostnad, kr.
$MDT$	Mean down time, h.
$MRT$	Mean repair time, h.
$MTBF$	Mean time between failure, h.
$MTTF$	Mean time to failure, h.
$MTTR$	Mean time to repair, h.
$MWT$	Mean waiting time, h.
$N$	Nuvärde, kr.
$NPSH$	Maximal sughöjd ( <i>net positive suction head</i> ).
$Nu$	Nusselts tal, dimensionslöst.
$O$	Våt omkrets (fluidberörd omkrets), m.
$O$	Omkrets, m.
$P$	Effekt, generellt, W.
$Pr$	Prandtls tal, dimensionslöst.
$Q$	Värmemängd, J.
$R$	Restvärde, kr.
$R$	Värmemotstånd, K/W.
$R$	Specifik gaskonstant, J/K.
$R_u$	Allmänna, universella gaskonstanten 8,314, J/(mol·K).
$Re$	Reynolds tal, dimensionslöst.
$S$	Entropi, J/K.
$SV$	Slutvärde, kr (även $K_n$ ).
$T$	Återbetalningstid (payback), år.



$T$  Tillgänglighet, h.  
 $T$  Temperatur, K eller °C – °C (kan även betecknas t).  
 $TAK$  Utrustningseffektivitet.  
 $U$  Värmeledningstal,  $W/(m^2 \cdot K)$  (kan även betecknas k).  
 $V$  Volym,  $m^3$ .  
 $W$  Arbete, J.  
 $X$  Exergi, J.  
 $\alpha$  Termisk diffusivitet,  $m^2/s$ .  
 $\alpha$  Värmeövergångstal,  $W/(m^2 \cdot K)$ .  
 $\delta$  Tjocklek, gränsskiktstjocklek, m.  
 $\dot{Q}$  Värmeeffekt, W.  
 $\dot{V}$  Volymflöde,  $m^3/s$ .  
 $\dot{W}$  Arbetseffekt, W.  
 $\dot{m}$  Massflöde, kg/s (kan även betecknas  $q_m$ ).  
 $\eta$  Verkningsgrad eller effektivitet, dimensionslöst.  
 $\lambda$  Felintensitet, h.  
 $\lambda$  Tryckfallskoefficient, friktionsfaktor (kan även betecknas f).  
 $\lambda$  Värmeledningstal, värmekonduktivitet,  $W/(m \cdot K)$ .  
 $\lambda$  Våglängd, m.  
 $\mu$  Dynamisk viskositet,  $kg/(m \cdot s)$  eller Pa·s eller  $N \cdot m^{-2}$ .  
 $\nu$  Kinematisk viskositet,  $m^2/s$ .  
 $\sigma$  Stefan-Boltzmanns konstant  $5,67 \cdot 10^{-8} (W/(m^2 \cdot K))$ .  
 $\varepsilon$  Verkningsgrad eller effektivitet, dimensionslöst.  
 $\rho$  Densitet,  $kg/m^3$ .  
 $\xi$  Engångsförlustkoefficient, motståndstal, dimensionslöst.  
 $a$  Axiell induktionsfaktor.  
 $a$  Intäktsöverskott, kr/år.  
 $a$  Acceleration,  $m/s^2$ .  
 $c$  Specifik värmekapacitet, J/kg·K.  
 $c$  Ljusets hastighet, m/s.  
 $c_0$  Ljusets hastighet i vacuum  $2,998 \cdot 10^8$ , m/s.  
 $c_p$  Isobar specifik värmekapacitet, J/kg·K.  
 $c_v$  Isokor specifik värmekapacitet, J/kg·K.  
 $f$  Frekvens, Hz, (kan också betecknas  $\nu$ ).  
 $f_A$  Annuitetsfaktor, dimensionslöst (kan även betecknas  $a$ ).  
 $f_N$  Nusummeffaktor, dimensionslöst.  
 $g$  Tyngdacceleration,  $m/s^2$ .  
 $h$  Höjd, m (kan även betecknas  $z$ ).  
 $h$  Specifik entalpi, J/kg (kan även betecknas  $i$ ).  
 $h_f$  Strömningsförlust, m.  
 $m$  Massa, kg.  
 $n$  Antal mol.  
 $n$  Varvtal.  
 $n$  Antal år (kan även betecknas x).  
 $p$  Tryck, Pa.  
 $q$  Inflation, %.  
 $q$  Specifik värmemängd, J.  
 $r$  Ränta, %.  
 $s$  Sträcka, m.  
 $s$  Specifik entropi, J/(kg·K).  
 $t$  Tid, s.  
 $v$  Hastighet, m/s (kan även betecknas  $V$ ).  
 $v$  Volymitet, specifik volym,  $m^3/kg$ .  
 $x$  Ånghalt kg ånga / kg vatten, dimensionslöst (kan även betecknas  $\nu$ ).

# Referenser

- Alvarez, H. (2006). *Energiteknik* (3. utg.). Studentlitteratur.
- Hagberg, L., & Henriksson, T. (2018). *Underhåll i världsklass* (Upplaga 2). OEE Consultants AB.
- Soleimani Mohseni, M., Bäckström, L., & Eklund, R. (2018). *Formelsamling i energiteknik*. Studentlitteratur AB.
- Underhåll - Nyckeltal för underhåll* (15341:2007). (2007). Svenska institutet för Standarder (SIS).
- Underhåll - Underhållsdokumentation* (13460:2009). (2009). Svenska institutet för Standarder (SIS).
- Underhåll - Underhållsterminologi* (13306:2017). (2017). Svenska institutet för Standarder (SIS).