

# Teoria bazo de varmoprocesoj en domkonstruktoj

## La bazaj nocioj kaj grandoj uzataj en konstrua varmeteĥniko

2010-4-22

Ĉi tiu notico estas skribita kadre de la terminologia diskuto en la Konstru-Forumo kaj en starigota kolektivo. Aŭtoris Jan Werner (CZ) kun la konsultiĝo de Fabien van Mook (NL). En la teksto esperantaj terminoj proponataj de Jan Werner estas uzataj. Se Fabien van Mook proponas alternativon, ĝi estas unuloke indikita laŭ la skemo „A (JW) # B (FvM)“.

**Varmo** ( $Q$ ) estas energio liverata konsekvence de temperatura diferenco. Energion estas eble liveri ankaŭ per okazigo de laboro kaj per transporto de materio. La energetika kontribuo liverata pere de varmo, en la energi-sistemo ne estas distingebla disde kontribuoj liverataj alimaniere. La unuo de energio en la internacia sistemo de mezurunuoj SI estas ĵulo, reale derivita unuo por laboro, simbolo J; difino:  $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

La varmostaton de iu substanco esprimas **temperaturo**. Oni distingas:

- termodinamikan temperaturon,
- celsian temperaturon.

**Termodinamika temperaturo** ( $T$ ) estas difinita per du punktoj: je 0 K molekuloj plej malmulte vibras kaj moviĝas (laŭ la termodinamikaj leĝoj) kaj je 273,16 K estas la temperaturo de la trifaza punkto de akvo. Je la trifaza punkto okazas la nura kombino de temperaturo (273,16 K) kaj premo (611,73 Pa), je kiu glacio, (likva) akvo kaj akvovaporo kunestas en ekvilibra miksaĵo.

**Celsia temperaturo** ( $\Theta$ ) estas difinita per la rilato

$$\Theta = T - 273,15$$

kie  $\Theta$  estas celsia temperaturo en °C (celsia grado),  
 $T$  termodinamika temperaturo en K (kelvino).

En anglosaksaj landoj ankoraŭ uzatas la **skalo farenhejta**. Ties fiksaj punktoj estas 32 °F (0 °C) kaj 212 °F (100 °C). La rilato al la skalo celsia estas esprimebla per la ekvacio:

$$\theta_f = \frac{9}{5} \theta + 32$$

kie  $\theta_f$  estas temperaturo en °F,  
 $\theta$  temperaturo en °C.

**Varmospezo** ( $\Phi$ ) estas kvanto de varmo (J), kiu en tempounuo (s) transiras al aŭ el sistemo. Ĝi estas difinita per la kvociento:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

kie  $\Phi$  estas varmospezo en J/s = W,  
 $dQ$  liverita varmo en J,  
 $dt$  dum la tempo  $dt$  en s.

**Area varmospezo** ( $q$ ) esprimas kvanton de varmo en J, kiu trairas areon  $1 \text{ m}^2$  starigitan orte al la direkto de la varmotransiĝo dum unu sekundo (s). La grandeco estas nomata ankaŭ „denso de varmospezo“<sup>1</sup>. Ĝi estas difinita per la kvociento de la varmospezo per la areo, tra kiu la spezo orte trairas:

$$q = \frac{d\Phi}{dA} ; \text{ laŭ la leĝo Fourier: } q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

kie  $q$  estas area varmospezo en W/m<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> FvM malkonsilas ĉi tiun esprimon.

|                     |                                                       |
|---------------------|-------------------------------------------------------|
| $d\Phi$             | varmospezo en W,                                      |
| $dA$                | areo en m <sup>2</sup> ,                              |
| $\lambda$           | koeficiento de varmokondukto <sup>2</sup> en W/(m·K), |
| $\Delta T/\Delta x$ | temperatura gradiento en K/m.                         |

**Temperatura gradiento** esprimas la ŝanĝon de la temperaturo cirkaŭ certa loko en certa direkto. Kiam ni konsideras la ŝanĝojn ne infinitezime, temperatura gradiento povas esti kalkulata per la temperatura diferenco ( $\Delta T$ ) inter du izotermaj lokoj kaj ties distanco  $\Delta x$ , en la direkto laŭ la varmospezo (alivorte: en la direkto orte al la izotermaj linioj):

$$\frac{\Delta T}{\Delta x}; \quad \text{laŭ vektora simboliko } \textit{grad } T$$

kie  $\Delta T$  estas temperatura diferenco en K aŭ °C ĉe la distanco  $\Delta x$  en m.

Temperatura gradiento en la senco de malkresko estas indikata per minusa signo, oni povas ĝin nomi temperatura sinko ( $-\Delta T/\Delta x$ ). La minusa signo fontas el la fakto, ke la temperatura fluo okazas kontraŭ la direkto de la temperatura gradiento.

**Varmokonduktivo (JW) # varmokondukteco (FvM) ( $\lambda$ )** esprimas povon<sup>3</sup> de substanco kondukti varmon. Varmokondukto estas proceso de egaliĝo de molekulaj vibroj kaj moviĝoj inter najbaraj molekuloj. Diferencoj de moviĝoj kaj vibroj estas ja esprimataj de temperaturaj diferencoj. Ili do kaŭzas la varmokondukton. Sed oni distingu varmokondukton disde aliaj meĥanismoj de varmotransiĝo per tio, ke ĉe kondukto energio estas transigata inter molekuloj, kiuj nepre troviĝas unu apud la alia, kaj kiuj ne translokiĝas unu relative al la alia. Pro tio varmokondukto estas la nura meĥanismo de varmotransiĝo en solida materialo (ĉar la molekuloj havas fiksitaĵojn). En likvoj kaj gasoj ne nur varmokondukto okazas sed ankaŭ precipe varmotransiĝo per konvekto (intermiksigo de „bobeloj“ da fluido en la fluo). Varmokonduktivo de donita materialo estas area varmospezo ĉe temperatura gradiento en K/m:

$$q = -\lambda \cdot \textit{grad } T \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{q}{-\textit{grad } T}$$

kie  $q$  estas area varmospezo en W/m<sup>2</sup>,  
 $\lambda$  koeficiento de varmokondukto en W/(m·K),  
 $-\textit{grad } T$  temperatura gradiento en K/m,

**Varmokonduktanco (de konstrukto) ( $\Lambda$ )** estas kvociento de area varmospezo  $q$ , kiu iras tra la konstrukto, kaj temperatura diferenco  $\Delta T$  inter ambaŭ surfacoj de la konstrukto:

$$\Lambda = \frac{q}{\Delta T} \quad \rightarrow \quad q = \Lambda \cdot \Delta T$$

La varmokonduktanco  $\Lambda$  estas inverse proporcia al varmorezistanco  $R$ :

$$\Lambda = \frac{1}{R}$$

Se la konstrukto konsistas el unu homogenan tavolo kun diko  $\Delta x$  kaj varmokonduktivo  $\lambda$ , la varmokonduktanco egalas al:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\Delta x}$$

kie  $\Lambda$  estas area varmokonduktanco en W/(m<sup>2</sup>·K),  
 $q$  area varmospezo en W/m<sup>2</sup>,  
 $\Delta T$  temperatura diferenco en K,

<sup>2</sup> Ĉi tie kaj plue en la teksto estis skribita „koeficiento de varmokonduktivo“. Laŭ FvM oni diru aŭ „varmokonduktivo“ # „varmokondukteco“ aŭ „koeficiento de varmokondukto“.

<sup>3</sup> Ĉi tiu priskribo de la granda per la vorto "povo" estas laŭ FvM nur unu el pluraj manieroj. Ekzakta difino estas: „varmokonduktivo en certa punkto de materialo estas la vektoro de la aera varmospezo dividita per la vektoro de la temperatura gradiento“ (Vidu ekzemple H. Hens (raportisto), „Condensation and energy: Sourcebook“, raporto en la kadro de IEA Annex 14, Leuven: KU Leuven, 1991, <http://www.ecbcs.org/annexes/annex14.htm>.)

|           |                                                                        |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|
| $R$       | varmorezistanco en $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ,            |
| $\lambda$ | koeficiento de varmokondukto en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . |

**Varmorezistivo (JW) # varmorezisteco (FvM) ( $r$ )** estas granda inversa al varmokonduktivo. Difinita ĝi estas per la kvociento de negativa temperatura gradiento dividita per vektora area varmospezo:

$$r = \frac{1}{\lambda} ; \quad r = - \frac{\text{grad } T}{q}$$

|     |                  |       |                                                                                                                                                                        |
|-----|------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| kie | $r$              | estas | varmorezistivo en $(\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$ ,                                                                                                               |
|     | $\lambda$        |       | varmokonduktivo en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,                                                                                                              |
|     | $q$              |       | area varmospezo en $\text{W}/\text{m}^2$ ,                                                                                                                             |
|     | $\text{grad } T$ |       | temperatura gradiento kiel diferenco de surfacaj<br>temperaturoj $\Delta T$ en la distanco $\Delta x$ , resp. en la distanco<br>egala al dikeco de traktata materialo. |

**(Area) varmorezistanco** (de konstrukto) ( $R$ ) estas inversa valoro de varmokonduktanco  $\Lambda$ . Ĉe izotropa tavolo konstrukto kun diko  $d$  validas kvocienta rilato de la diko dividita per  $\lambda$ :

$$R = \frac{1}{\Lambda} ; \quad R = \frac{d}{\lambda}$$

La varmorezistanco  $R$  estas esprimebla ankaŭ pere de area varmospezo  $q$ , kiu fluas tra tavolo konstrukto. Rekte proporcia ĝi estas al la temperatura diferenco  $\Delta T$  inter la interna kaj ekstera surfacoj de la konstrukto kaj inverse proporcia ĝi estas ĝuste al la area varmospezo  $q$ . La rilaton montras la formuloj:

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{d} = \frac{\Delta T}{\frac{d}{\lambda}} = \frac{\Delta T}{R} ; \quad R = \frac{\Delta T}{q}$$

|     |            |       |                                                                   |
|-----|------------|-------|-------------------------------------------------------------------|
| kie | $R$        | estas | varmorezistanco en $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ,       |
|     | $\Lambda$  |       | area varmokonduktanco en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , |
|     | $q$        |       | area varmospezo en $\text{W}/\text{m}^2$ ,                        |
|     | $\Delta T$ |       | temperatura diferenco en K,                                       |
|     | $d$        |       | diko de unutavola konstrukto en m.                                |

Per varmokonduktivo kaj per varmorezistivo oni esprimas proprecon de (homogena) materialo. Atentu ke varmokonduktanco kaj varmorezistanco rilatas al konstrukto, kiu povas konsisti el unu aŭ pluraj materialoj. En konstruaĵoj la ĉi-kuntekste gravaj konstruktoj estas muroj, vandoj, tektoj, tegmentoj k.t.p. Ili estas precipe ebenaj strukturoj, tra kiuj varmo iras precipe orte al la ebena, pro temperaturaj diferencoj inter du enaj spacoj aŭ inter ena spaco kaj ekstera klimato.

**Koeficiento de surfaca varmotransiĝo ( $h$ )** esprimas komunikon de varmo inter fluido (gasoj aŭ likvoj) kaj solida vando. Ĝi egalas arean varmospezon inter fluido kaj vando ĉe unita temperatura diferenco inter ili.

$$h = \frac{q}{T_s - T_a}$$

|     |       |       |                                                                                                                                   |
|-----|-------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| kie | $h$   | estas | koeficiento de surfaca varmotransiĝo sur interna kaj<br>ekstera flankoj de konstrukto en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , |
|     | $q$   |       | area varmospezo inter aero (fluido) kaj surfaco de<br>vando en $\text{W}/\text{m}^2$ ,                                            |
|     | $T_s$ |       | temperaturo de surfaco en $^{\circ}\text{C}$ ,                                                                                    |
|     | $T_a$ |       | temperaturo de aero en $^{\circ}\text{C}$ .                                                                                       |

La koeficiento de surfaca varmotransiĝo  $h$  konsideras konvektion kaj/aŭ radiadon de varmo ĉe la surfacoj, plu ĝi dependas ankaŭ de la proprecoj de la apudvanda medio kaj de kurbiĝo kaj kliniĝo de la vando. Tiajn konsiderojn oni do bone priskribu. La koeficienton oni determinas malfacile, ĉar ĝi varias en vastaj limoj depende de la speco de fluado (vidu la sekvantan tabelon). Kalkule fiksita koeficiento de surfaca varmotransiĝo nur rare koincidas kun la valoroj akiritaj eksperimente.

Tabelo: Koeficiento de surfaca varmotransiĝo  
por diversaj medioj (F. Mrlík 1993)

| Fluida medio           | Koeficiento de surfaca varmotransiĝo $h$<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Trankvila aero         | 3,5 – 12,0                                                          |
| Fluanta aero           | 12,0 – 580,0                                                        |
| Fluanta likvo          | 230,0 – 5800,0                                                      |
| Bolanta likvo          | 4600,0 – 7000,0                                                     |
| Kondensanta akvovaporo | 8100,0 – 14 000,0                                                   |

**Koeficiento de varmtransmisio (JW) # interzona varmokonduktanco (FvM) (U)** esprimas komunikadon de varmo inter du fluoj (aeroj) dividitaj inter si per rigida vando. Ĝi egalas varmospezon  $\Phi$  ĉe stacionara stato dividitan per la areo kaj temperatura diferenco inter la fluoj (aeroj) en ambaŭ flankoj de la sistemo:

$$U = \frac{\Phi}{(T_{ai} - T_{ae}) A}$$

kie  $U$  estas koeficiento de varmtransmisio en W/(m<sup>2</sup>·K),  
 $\Phi$  varmospezo (denso) en W,  
 $T_{ai}$  temperaturo de interna aero en °C,  
 $T_{ae}$  temperaturo de ekstera aero en °C.

En aplikoj praktikataj en la konstrua varmteĥniko la koeficiento de varmtransmisio de plurtavola konstrukto estas esprimata per la kvociento, en kies denominatoro estas sumo de du rezistancoj ĉe surfaca varmotransiĝo ( $R_i$  kaj  $R_e$ ) kaj varmorezistanco  $R$  de la konstrukto:

$$U = \frac{1}{R_i + R + R_e} ; \quad U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_{se}}}$$

kie  $U$  estas koeficiento de varmtransmisio en W/(m<sup>2</sup>·K),  
 $R_T$  varmorezistanco ĉe varmtransmisio en (m<sup>2</sup>·K)/W,  
 $h_{si}$  koeficiento de surfaca varmotransiĝo sur interna flanko de konstrukto en W/(m<sup>2</sup>·K),  
 $h_{se}$  koeficiento de surfaca varmotransiĝo sur ekstera flanko de konstrukto en W/(m<sup>2</sup>·K),  
 $d_k$  diko de k-a tavolo de la konstrukto en m,  
 $\lambda_k$  koeficiento de varmokondukto de k-a tavolo de la konstrukto en W/(m·K).

**Varmokapacito (C)** esprimas povon de korpo aŭ de sistemo akumuli varmon. La varmkapacito estas varmo bezonata por varmigi donitan korpon je unu grado (1 K aŭ 1 °C). Ĝi estas difinita per kvociento de alkondukita varmo kaj de la koneksa varmoŝanĝo:

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

kie  $C$  estas varmkapacito en J/K,  
 $dQ$  alkondukita varmo en J,  
 $dT$  pliiĝo (variero) de varmo en K kaŭzita per la alkonduktita varmo.

**Specifa varmkapacito (JW) # laŭmasa varmkapacito (FvM) (c)** estas varmo bezonata por varmigi masunuon (1 kg) de donita substanco je unu grado (1 K aŭ 1 °C). Ĝi estas difinita per kvociento de varmkapacito  $C$  per la maso  $m$  de la esplorata substanco:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{1}{m} \left( \frac{dQ}{dT} \right)$$

kie  $c$  estas specifa varmkapacito en J/(kg·K),

|     |                          |
|-----|--------------------------|
| $C$ | varmkapacito en J/K,     |
| $m$ | maso de substanco en kg, |
| $Q$ | alkondukita varmo en J,  |
| $T$ | temperaturo en K.        |

**Varmodifuzivo (JW) # varmodifuzeco (FvM) (a)** esprimas rapidon de temperatura egaligo en korpo. Ju pli granda estas la valoro de  $a$ , des pli rapide ĉiuj lokoj de donita korpo varmiĝas aŭ malvarmiĝas kaj la korpo akiras ĉie la saman temperaturon. La granda povas esti nomata ankaŭ kiel temperaturo konduktivo<sup>4</sup>. La varmodifuzivon esprimas varmkonduktivo dividita per denso (volumena maso) kaj specifa varmkapacito:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

|     |           |       |                                                    |
|-----|-----------|-------|----------------------------------------------------|
| kie | $a$       | estas | varmodifuzivo en m <sup>2</sup> /s,                |
|     | $\lambda$ |       | koeficiento de varmokondukto en W/(m·K),           |
|     | $c$       |       | specifa varmokapacito en J/(kg·K),                 |
|     | $\rho$    |       | denso, resp. volumena maso, en kg/m <sup>3</sup> . |

**Varmabsorbivo (JW) # varmabsorbeco (FvM) (b)** esprimas povon de materialo (kun difinita humido) akceptadi (absorbi) aŭ liberigadi varmon. Varmabsorbivon prezentas la dua radiko de la produkto de varmokonduktivo, specifa varmokapacito kaj denso. Ju pli granda estas la valoro de  $a$ , des malpli rapide la materialo absorbas varmon, ankaŭ malpli rapide la akumulitan varmon liberigas.

Ekzistas ankaŭ kazo, kie aperas nur la sola produkto sen radikilo<sup>5</sup>:

$$b = \sqrt{\lambda c \rho} \quad ; \quad b = \lambda \cdot c \cdot \rho$$

|     |           |       |                                                                                                          |
|-----|-----------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| kie | $b$       | estas | varmabsorbivo en (W <sup>2</sup> ·s)/(s <sup>3</sup> ·K), resp. J/(m <sup>2</sup> ·K·s <sup>1/2</sup> ), |
|     | $\lambda$ |       | koeficiento de varmokondukto en W/(m·K),                                                                 |
|     | $c$       |       | specifa varmokapacito en J/(kg·K),                                                                       |
|     | $\rho$    |       | denso (volumena maso) en kg/m <sup>3</sup> .                                                             |

### Kromaj grandoj laŭ ISO 7345

| Grando      | Simbolo | Unuo           |
|-------------|---------|----------------|
| longo       | $l$     | m              |
| diko, larĝo | $d$     | m              |
| diametro    | $D$     | m              |
| areo        | $A$     | m <sup>2</sup> |

| Grando   | Simbolo | Unuo              |
|----------|---------|-------------------|
| volumeno | $V$     | m <sup>3</sup>    |
| tempo    | $t$     | s                 |
| maso     | $m$     | kg                |
| denso    | $\rho$  | kg/m <sup>3</sup> |

### Indicoj laŭ ISO 7345

|                 |    |                 |    |                 |   |
|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|---|
| interna         | i  | ekstera surfaco | se | kontakto        | c |
| ekstera         | e  | kondukto        | cd | gasa/aera spaco | g |
| surfaca         | s  | konvekto        | cv | ĉirkaŭa         | a |
| interna surfaco | si | radiado         | r  |                 |   |

<sup>4</sup> FvM demandas ĉu tio estas ĝenerale konsentita.

<sup>5</sup> Sed tiu kazo ne sekvas internaciajn normojn.

## Nomoj de la grandoj en kelkaj naciaj lingvoj

La sekvanta listo estas ordigita laŭ la sinsekvo de grandoj en la antaŭa parto. La gvida lingvo estas Esperanto, sekvas la ĉeĥa (cs), la germana (de) kaj la angla (en). En la Jarlibro de TAKE 2009<sup>6</sup> krome estas pluraj ekvivalentoj en la lingvoj: hispana (es), franca (fr), nederlanda (nl) kaj pola (pl).

1. **varmo** –  $Q$   
cs – teplo  
de – Wärme  
en – heat
2. **temperaturo** –  $T, \Theta$   
cs – teplota  
de – Temperatur  
en – temperature
3. **termodinamika temperaturo** –  $T$   
cs – termodynamická teplota  
de – thermodynamische Temperatur  
en – thermodynamic (absolute) temperature
4. **celsia temperaturo** –  $\Theta$   
cs – Celsiova teplota  
de – Celsiustemperatur  
en – Celsius temperature
5. **varmospezo** –  $\Phi$   
cs – tepelný tok  
de – Wärmestrom  
en – heat flow rate
6. **area varmospezo** –  $q$   
cs – (plošná) hustota tepelného toku  
de – Wärmestromdichte  
en – density of heat flow rate
7. **temperatura gradiento** –  $\text{grad } T$   
cs – teplotní gradient  
de – Temperaturgradient  
en – temperature gradient
8. **varmokonduktivo (JW) # varmokondukteco (FvM)** –  $\lambda$   
cs – tepelná vodivost  
de – Wärmeleitfähigkeit  
en – thermal conductivity
9. **varmokonduktanco** –  $\Lambda$   
cs – tepelná propustnost  
de – Wärme-durchlaßkoeffizient  
en – thermal conductance
10. **varmorezistivo (JW) # varmorezisteco (FvM)** –  $r$   
cs – tepelná rezistivita  
de – Wärmewiderstand  
en – thermal resistivity
11. **varmorezistanco** –  $R$   
cs – tepelný odpor  
de – Wärmedurchlaß-widerstand  
en – thermal resistance

---

<sup>6</sup> Fabien van Mook: Terminoj pri varmotransiĝo el ISO 7345, p. 51-78.

12. **koeficiento de surfaca varmotransiĝo** –  $h$   
cs – součinitel přestupu tepla na vnitřní/vnější straně konstrukce  
de – Wärmeübergangs-koeffizient  
en – surface coefficient of heat transfer
13. **koeficiento de varmotransmisio (JW) # interzona varmokonduktanco (FvM) –  $U$**   
cs – součinitel prostupu tepla  
de – Wärmedurchgangs-koeffizient  
en – thermal transmittance
14. **varmokapacito** –  $C$   
cs – tepelná kapacita  
de - Wärmekapazität  
en – heat capacity
15. **specifa varmokapacito (JW) # laŭmasa varmokapacito (FvM) –  $c$**   
cs – měrná tepelná kapacita  
de – spezifische Wärmekapazität  
en – specific heat capacity
16. **varmodifuzivo (JW) # varmodifuzeco (FvM) –  $a$**   
cs – teplotní vodivost  
de – Temperatur-leitfähigkeit  
en – thermal diffusivity
17. **varmabsorbivo (JW) # varmabsorbeco (FvM) –  $b$**   
cs – tepelná jímavost  
de – Wärmeeindring-koeffizient  
en – thermal effusivity