1. A hőszigetelés elmélete

1.1. A hővezetés

1.1.1. A hővezetés alapjai

A hővezetési számítások előtt bizonyos előfeltételeket el kell fogadnunk. Feltételezzük, hogy a hőt vezető test két oldalán fellépő hőfokkülönbség csak egyirányú, és az erre merőleges felületeken a hőmérséklet konstans. Ebben az esetben fennáll a hőáramsűrűség kiszámítására Fourier alaptörvénye:

(1) $q = -\lambda \cdot \frac{d\vartheta}{dx}$ [W/m^2]

ahol	Q	- a hőáramsűrűség [W/m2]
	λ	- a hővezetési tényező [W/(mK)]
	ϑ	- a hőmérséklet [°C]
	X	- a vastagság [m]

Az (7) egyenlet általában azokra az anyagokra vonatkozik, melyek kizárólag hővezetéssel szállítják a hőt (pl. fémek), de jól alkalmazható pl. a hőszigetelő anyagok esetében is, melyekben a hővezetés mellett a hősugárzás és a hőáramlás is szerepet játszik. Mivel méréstechnikailag ezek nem elválaszthatóak, ezért hővezetési tényezőről beszélünk a hőszigetelő anyagok esetében is.

1.1.1.1. Egyrétegű, párhuzamos síkok által határolt szerkezetek (sík falak) hővezetési egyenlete

Fourier alaptörvénye szerint a sík, egyrétegű falon áthaladó hőáramsűrűséget az alábbi egyenlettel lehet felírni:

(2) $U = \frac{\lambda}{d}$ [W/(m^2·K)], illetve

(3) $\frac{1}{U} = \frac{d}{\lambda}$ [(m^2·K)/W] segítségével

(4) $q = \frac{\lambda}{d} \cdot (\vartheta_{si} - \vartheta_{se}) = \Lambda \cdot (\vartheta_{si} - \vartheta_{se})$ [W/m^2], vagyis

(5) $q = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_{se}}{R}$ [W/m^2],

ahol	q	- a hőáramsűrűség [W/m2]
	λ	- a fal hővezetési tényezője [W/(m·K)]
	ϑsi	- a belső, melegebbik felület hőmérséklete [$°C$]
	ϑse	- a külső, hidegebbik felület hőmérséklete [$°C$]
	d	- a fal vastagsága [m]
	U	- a hővezetési együttható $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$,

ennek reciproka pedig

R - a hővezetési ellenállás $\left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right]$

1.1.1.2. Többrétegű, párhuzamos síkok által határolt szerkezetek (sík falak) hővezetési egyenlete

Hasonlóképpen a többrétegű falakra, ha a rétegek száma n:

$$R' = \sum_{j=1}^{n}\left(\frac{d_j}{\lambda_j}\right) = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \ldots\ldots + \frac{d_n}{\lambda_n} \qquad \left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right] \tag{6}$$

melyet az (11) egyenletbe helyettesítve

$$q = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{d_j}{\lambda_j}\right)} \qquad \left[\frac{W}{m^2}\right] \tag{7}$$

ahol d_j - az egyes rétegek vastagsága a felületre merőlegesen [m]

λ_j - az egyes rétegek hővezetési tényezője $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$

1.1.1.3. Egyrétegű, koncentrikus hengerpalástok által határolt szerkezetek (csőfalak)

Hasonlóképpen csövekre vonatkozóan:

$$U_l = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{ln\frac{D_a}{D_i}} \qquad \left[\frac{W}{m \cdot K}\right], \qquad \text{illetve} \tag{8}$$

$$R_l = \frac{ln\frac{D_a}{D_i}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \qquad \left[\frac{m \cdot K}{W}\right] \qquad \text{segítségével} \tag{9}$$

$$q_l = U_l \cdot (\vartheta_{si} - \vartheta_{se}) \qquad \left[\frac{W}{m}\right], \qquad \text{vagyis} \tag{10}$$

$$q_l = \frac{(\vartheta_{si} - \vartheta_{se})}{R_l} \qquad \left[\frac{W}{m}\right], \tag{11}$$

ahol q_l - a csőfal vonalmenti hőáramsűrűsége $\left[\frac{W}{m}\right]$

U_l - a csőfal vonalmenti hővezetési együttható $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$

, ennek reciproka pedig

R_l - csőfal vonalmenti hővezetési ellenállás $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$

1.1.1.4. Többrétegű koncentrikus hengerpalástok által határolt szerkezetek (csőfalak)

Hasonlóképpen a több, koncentrikus rétegből álló csőfalra, ha a rétegek száma n:

$$R'_{lR} = \frac{1}{2 \cdot \tau} \cdot \sum_{j=1}^{n}(\frac{1}{\lambda_j} \cdot ln\frac{D_{aj}}{D_{ij}} = \frac{1}{2 \cdot \tau} \cdot (\frac{1}{\lambda_1} \cdot ln\frac{D_{a1}}{D_{i1}} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot ln\frac{D_{a2}}{D_{i2}} + \cdots + \frac{1}{\lambda_n} \cdot ln\frac{D_{an}}{D_{in}}) \tag{12}$$

ahol	D_{ij}	- a többrétegű cső j-ik rétegének belső [m]
	D_{aj}	- a többrétegű cső j-ik rétegének külső átmérője [m]

Több rétegű cső hőárama:

(13) $$q_{l,R} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_{se}}{R_{l,R}} = \frac{(\vartheta_{si} - \vartheta_{se}) \cdot 2 \cdot \pi}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln\frac{D_1}{D_i} + \frac{1}{\lambda_2} * \ln\frac{D_2}{D_1} + \ldots + \frac{1}{\lambda_n} * \ln\frac{D_a}{D_{j+1}}} \qquad \left[\frac{W}{m}\right]$$

ahol	ϑ_{si}	- a külső oldal hőmérséklete [°C]
	ϑ_{se}	- a belső oldal hőmérséklete [°C]

1.2. A hőátadás

Egy test felülete által a környezetbe juttatott, vagy onnan felvett hő konvekciós és sugárzásos részből tevődik össze:

A keletkező hőáramsűrűséget az alábbi képlettel lehet felírni:

(14) $q = q_r + q_{cv}$, ahol

ahol	q_r	- az áramlási hőáramsűrűség $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
	q_{cv}	- a sugárzási hőáramsűrűség $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

A q_r és q_{cv} nem biztos, hogy azonos előjelűek, hiszen előfordulhat például olyan eset, amikor egy fal áramlás segítségével hőt ad le a környezetének, de egyúttal a környező sugárzó felületekről hőt vesz fel. A q hőáramsűrűség használata, a h összegzett hőátadási tényező segítségével az alábbi formában írható fel:

(15) $$q = h \cdot (\vartheta_{se} - \vartheta_a) \qquad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

, illetve csőfelületek esetén

(16) $$q_1 = \pi \cdot D_e \cdot h \cdot (\vartheta_{se} - \vartheta_a) \qquad \left[\frac{W}{m}\right]$$, ahol

(17) $$h = h_{rr} + h_{cv} \qquad \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$$

ahol	h_{cv}	- a konvekciós rész (áramlási hőátadási tényező)
	h_r	- a sugárzási rész (sugárzási hőátadási tényező)

1.2.1. Áramlási hőátadási tényező

Az a hőáramsűrűség, mely egy Δϑ hőmérsékletkülönbség hatására egy test felülete és a felületével közvetlenül érintkező folyékony vagy gáz halmazállapotú közeg között kicserélődik, az alábbi képlettel írható fel:

$$(18) \qquad q = \frac{\Phi}{A} = h_{cv} \cdot \Delta\vartheta \qquad \left[\frac{[W}{m^2}\right]$$

ahol
- Φ - a hőáram [W]
- q - a hőáramsűrűség $\left[\frac{[W}{m^2}\right]$
- A - a felület m^2]
- $\Delta\vartheta$ - a testfelület és a közeg közötti hőmérsékletkülönbség [°C]
- h_{cv} - az áramlási hőátadási tényező $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$

Ez a képlet hőleadás és hőfelvétel esetén egyaránt érvényes. A Δθ hőmérsékletkülönbség vagy ismert, vagy pedig meg kell becsülni, majd értékét iteráció útján pontosítani kell. Tisztázni kell, hogy a hőáramlás csupán a hőmérsékletkülönbség miatt jön létre, vagy pedig a folyékony illetve légnemű közeg maga is áramlásban van-e. Az első esetben szabad, a másodikban kényszeráramlásról van ugyanis szó.
Hőtechnikai számításokhoz – mivel a felület és a közeg viszonylag kis hőmérsékletkülönbsége feltételezhető – elégséges az alábbi képleteket alkalmazni:

- **Épületben** / amennyiben a felület és a levegő közötti hőmérséklet különbség Δϑ < 100 K /**:**

Függőleges csővezeték és lamináris, szabad konvekció ($D_e^3 \cdot \Delta\vartheta \leq 10$ [m^3K]) az épületen belül az alábbiak szerint számítható:

$$(19) \qquad h_{cv} = 1{,}32 \sqrt[4]{\frac{\Delta\vartheta}{D_e}} \qquad \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$$

ahol D_e a szigetelés külső átmérője [m],
Δϑ a hőmérsékletkülönbség a levegő és a felület között [K]

Függőleges csővezeték és turbulens, szabad konvekció ($D_e^3 \cdot \Delta\vartheta > 10$ [m^3K]) az épületen belül az alábbiak szerint számítható:

$$(20) \qquad h_{cv} = 1{,}74 \sqrt[3]{\Delta\vartheta} \qquad \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$$

Látható, hogy ezen esetben a hőátadási tényező független az átmérőtől.

Vízszintes csővezeték és lamináris, szabad konvekció ($D_e^3 \cdot \Delta\vartheta \leq 10$ [m^3K]) az épület belül az alábbiak szerint számítható:

(21) $$h_{cv} = 1{,}25\sqrt[4]{\frac{\Delta\vartheta}{D_e}} \qquad \left[\frac{W}{m^2K}\right]$$

Vízszintes csővezeték és turbulens, szabad konvekció ($D_e^3 \cdot \Delta\vartheta > 10$ [m^3K]) az épület belsejében az alábbiak szerint számítható:

(22) $$h_{cv} = 1{,}21\sqrt[3]{\Delta\vartheta} \qquad \left[\frac{W}{m^2K}\right]$$

- **Épületen kívül:**

Mind vízszintes, mind függőleges csővezeték esetén, épületen kívül az alábbi összefüggés érvényes:

Lamináris légáramlás esetén ($D_e \cdot v \leq 8{,}55 * 10^{-3}\ \frac{m^2}{s}$):

(23) $$h_{cv} = \frac{8{,}1 \cdot 10^{-3}}{D_e} + 3{,}14 \cdot \sqrt{\frac{v}{D_e}} \qquad \left[\frac{W}{m^2K}\right]$$

Turbulens légáramlás esetén ($D_e \cdot v > 8{,}55 * 10^{-3}\ \frac{m^2}{s}$):

(24) $$h_{cv} = 8{,}9 * \frac{v^{0,9}}{D_e^{0,1}} \text{ vagy } \left(\propto_k = 2 \cdot v + 3 \cdot \sqrt{\frac{v}{D_e}} \right) \qquad \left[\frac{W}{m^2K}\right]$$

ahol D_e - a szigetelés külső átmérője [m],
v - a légsebesség $\left[\frac{m}{s}\right]$

1.2.2. Sugárzási hőátadási tényező

A_1 és A_2 felület között sugárzásos hőcsere jön létre, ha felületük T_1 és T_2 hőmérséklettel jellemezhető, amely a két felület közötti hőáramlás következtében jön létre:

(25) $$\dot{Q}_{r12} = C_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot A_1 \qquad [W]$$

ahol C_{12} - a sugárzási együttható $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right]$,
A_1 - a felület $[m^2]$

Ha $T_1 > T_2$ az A_1 felület leadja a hőt az A_2 felületnek és a hőáram pozitív, ha $T_1 < T_2$ a

$\dot{Q}_{r12}$ hőáram negatív, azaz az A_1 felület felveszi a meleget az A_2 felülettől. A C_{12} sugárzási tényező függ a testek sugárzási tulajdonságaitól, alakjától, méretétől, egymáshoz képesti helyzetétől, valamint fel kell tételezni, hogy a két felület közötti médium a sugárzást teljesen átereszti (pl. a levegő).

A sugárzási tényező két szabadon álló, nem konkáv felület között (nyílt rendszer) az alábbi:

(26) $$C_{12} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot C_s \cdot \varphi_{12}}{1-(1-\varepsilon_1)\cdot(1-\varepsilon_2)\cdot\varphi_{12}^2 \cdot \frac{A_1}{A_2}}$$

ahol ε_1, ε_2 - a felületek emissziós tényezője

C_S a fekete test sugárzási állandója [5,67 $W/(m^2 \cdot K^4)$]

φ_{12} a két felület közötti sugárzási együttható

Két párhuzamos, végtelen hosszúnak tekinthető felület között:

(27) $\rho_{12} = \sqrt{1 + \frac{h^2}{b^2}} + \frac{h}{b}$ használásával,

ahol h - a két felület távolsága [m]

b - a felületek szélessége [m]

ha a felületek távolsága elhanyagolhatóan kicsi a felületek szélességéhez képest, akkor

$\frac{A_1}{A_2} \approx 1$ és mivel, $\frac{h}{b} \approx 0$ ezért $\varphi_{12} \approx 0$, vagyis

(28) $C_{12} = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}-1}$ [$W/(m^2 \cdot K^4)$]

Ha az 1-gyel jelzett felület magába zárja a 2-vel jelzett felületet és A_1 elhanyagolhatóan kicsi A_2-höz képest, mint pl. szabadban vagy zárt térben vezetett csövek esetén, akkor $\varphi_{12} = 1$, és $A_1/A_2 \approx 0$, amiből

(29) $C_{12} = \varepsilon_1 . C_S$

Sugárzási hőátadási tényezőre az alábbi összefüggés érvényes:

(30) $\alpha_r = a_{12} \cdot C_{12}$ $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$

ahol

- hőmérsékletfaktor: $a_{12} = \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$ [K^3]
- sugárzási faktor: $C_{12} = \varepsilon \cdot \sigma$ $\left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$

ahol σ a Stefan-Boltzmann állandó fekete testek esetében : $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \frac{W}{m^2 K^4}$

ε a test emissziós tényezője

200 K alatti hőmérséklet különbség esetén az alábbi közelítés használható:

(31) $a_r=4*(T_m)^3$

ahol T_m a felületi hőmérséklet és a környezet sugárzási hőmérsékletének számtani átlaga : $T_m=0{,}5\cdot(\vartheta_o+\vartheta_l)$

1.2.3. Külső hőátadási tényező közelítése

A külső hőátadási tényező (h_{se}) az alábbi egyenletekkel közelíthető:

(32) vízszintes csövek esetében: $h_{se} = A + 0{,}05\cdot\Delta\vartheta$,

(33) függőleges csövek és falak esetében: $h_{se} = B + 0{,}09\cdot\Delta\vartheta$,

ahol $\Delta\vartheta$ a fal illetve cső felületének és környezet hőmérsékletének különbsége, A és B a felület anyagától és minőségétől függő változó, az alábbi táblázat szerint:

Felület anyaga, minősége	**A**	**B**	**ε**	**$Cr*10^{-8}$ (W/(m2*K)**
alumínium, fényes, hengerelt	2,5	2,7	0,05	0,28
alumínium, oxidált	3,1	3,3	0,13	0,74
horganyzott lemez, fényes	4,0	4,2	0,25	1,47
horganyzott lemez, poros	5,3	5,5	0,44	2,49
acél, ausztenites	3,2	3,4	0,15	0,85
alu-cink ötvözet	3,4	3,6	0,18	1,02
nem fém felület	8,5	8,7	0,94	5,33

1.2.4. Külső hőátadási ellenállás

(34) $R_{se} = \frac{1}{h_{se}\cdot\pi\cdot D_e}$

1.2.5. Belső hőátadási tényező

Általánosságban, ha a csővezetékben folyékony közeg található az R_f hőátviteli ellenállás elhanyagolható.

A belső hőátviteli tényezőnek levegő, illetve füstgáz vezetékek esetében a párakicsapódás elkerülése érdekében van jelentősége. A közeg sugár irányú hőmérsékletcsökkenése függ a közeg és a csőfala közti hőátvezetési tényezőtől.

Csővezetékben történő áramlásnál érvényes:

(35) $h_i = h_{ki} + h_{ri}$ $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

ahol,

- h_{ri} elhanyagolható
- $h_{ki} = 0{,}04 * Pe^{0{,}75} * \frac{\lambda}{d}$ $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

a Pecletsche szám értéke:

(36) $Pe = \frac{w * d_o * \rho * c_p}{\lambda}$

ahol	w	- a közeg sebessége $\left[\frac{m}{s}\right]$
	d_o	- a cső átmérője [m]
	ρ	- az áramló közeg sűrűsége $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
	c_p	- az áramló közeg specifikus hőkapacitása $\left[\frac{J}{kgK}\right]$
	λ	- az áramló közeg hővezetési tényezője $\left[\frac{W}{mK}\right]$

1.3. A hőátbocsátás

1.3.1. A hőátbocsátási tényező

Az előző egyenletekben nem vettük figyelembe a szilárd fal, valamint a külső és belső oldalon levő folyékony vagy légnemű közeg találkozásánál fellépő hőátadást. **Hőátbocsátásról** van szó akkor, amikor a hő egy nem szilárd halmazállapotú közegből egy szilárd testen keresztül újra egy nem szilárd halmazállapotú közegbe jut. A hőáramot a **hőátbocsátási tényező** segítségével lehet felírni:

(37) $q = U \cdot (\vartheta_a - \vartheta_i)$

ahol	U	- a hőátbocsátási tényező $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
	ϑ_a	- a melegebbik közeg hőmérséklete [°C]
	ϑ_i	a hidegebbik közeg hőmérséklete [°C]

1.3.1.1. Többrétegű, párhuzamos síkok által határolt szerkezetek

A hőátbocsátási tényező reciprokát hőátbocsátási ellenállásnak nevezzük, és több rétegű sík falakra az alábbi egyenlettel írhatjuk fel:

(38) $\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R + \frac{1}{h_{se}} = R_{si} + R + R_{se}$

1.3.1.2. Többrétegű, koncentrikus hengerpalástok által határolt szerkezetek

A (43) és (44) egyenletekhez hasonlóan felírható a több rétegű csőfalak hőátbocsátási ellenállása, illetve tényezője is:

A hőátbocsátási tényező:

(39) $$U_{l,R} = \frac{1}{\frac{1}{\pi \cdot h_i \cdot D_i} + R_{l,R} + \frac{1}{\pi \cdot h_{se} \cdot D_e}} \qquad \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$$

A hőátbocsátási ellenállás:

(40) $$\frac{1}{U_{l,R}} = \frac{1}{\pi \cdot h_i \cdot D_i} + R_{l,R} + \frac{1}{\pi \cdot h_{se} \cdot D_e} = \frac{1}{\pi \cdot h_i \cdot D_i} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot ln \frac{D_e}{D_i} + \frac{1}{\pi \cdot h_{se} \cdot D_e} \qquad \left[\frac{m \cdot K}{W}\right]$$

ahol	h_i	- a cső belső felületének hőátviteli együtthatója $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
	h_{se}	- a külső felület hőátviteli együtthatója $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
	λ	A szigetelőréteg „ üzemi „ hővezetési tényezője $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
	D_i	A cső külső átmérője = szigetelőréteg belső átmérője [m]
	D_e	A szigetelés külső átmérője [m]

A hőátbocsátási tényező korrekciója (Verein Deutsche Ingeneur:VDI 2055, 2008) szerint

Egyéb hőhidak hatása a “k” hőátbocsátási tényező értékének korrekciójával vehetők figyelembe az alábbi módon:

(50) $$U' = U \cdot (1 + \sum_{j=1}^{n} z_j + \sum_{j=1}^{n} z_j^* \qquad \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$$

ahol z_j értékeivel a nem egyenletes kiosztású hőhidakat – pl. homloktárcsákat, födém- és faláttöréseket – , valamint a berendezés kialakításától függő, részben vagy teljesen hőszigetelt pl. szerelvényeket, karimás csőkötéseket, felfüggesztéseket vagy alátámasztásokat, könyököket, és elágazásokat, a z_j* értékeivel pedig a nem hőszigetelt szerelvényeket lehet figyelembe venni. Csőszigetelés esetén

(51) $z = n \cdot (U_{WB} \cdot A_{WB})/(U_R \cdot l)$, ha a hőhíd hőátbocsátási tényezője ismert,

(52) $z = n \cdot \Delta l/l$, ha a hőhíd egy egyenértékű csőhosszal helyettesíthető.

Hasonlóképpen a síkfalú szerkezeteknél:

(53) $z = n \cdot (U_{WB} \cdot A_{WB})/(U \cdot A)$, ha a hőhíd hőátbocsátási tényezője ismert,

(54) $z = n \cdot \Delta A/A$, ha a hőhíd egy egyenértékű felülettel helyettesíthető.

ahol	U_{WB}	- a hőhíd hőátbocsátási tényezője $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$

A_{WB}	a hőhíd keresztmetszeti felülete [m^2]
A	a teljes hőátadási felület [m^2]
U	a sík fal hőátbocsátási tényezője $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
U_R	a csőszigetelés hőátbocsátási tényezője $\left[\frac{W}{m\cdot K}\right]$
l	a vizsgált csővezeték teljes hossza [m]
Δl	egyenértékű csőhossz [m]
ΔA	egyenértékű hőátadási felület [m^2]
n	az egyforma hőhidak száma

A U_{WB} és a $U_{WB}\cdot A_{WB}$ értékeire a VDI 2055 számítási közelítéseket is közöl, melyek hely hiányában itt nem kerülnek ismertetésre. A különböző szerelvények egyenértékű csőhosszát és a csőfelfüggesztések z_i* értékeit a VDI 2055-ből lehet megtudni, vagy a fenti számításokhoz szükséges adatokat a szerelvények gyártóitól kell beszerezni.

Egy rétegben szigetelt csővezetékek folyóméterre eső hőáramát az alábbiak szerint határozzuk meg:

(41) $$q_{l,R} = \frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{R_{l,R}} = U_{l,R} \cdot (\vartheta_M - \vartheta_L) \qquad \left[\frac{W}{m}\right]$$

Átrendezést követően:

(42) $$q_{l,R} = \frac{\pi \cdot (\vartheta_M - \vartheta_L)}{\frac{1}{h_i \cdot D_i} + \frac{1}{2\cdot\lambda} \cdot ln\frac{D_e}{D_i} + \frac{1}{h_{se} \cdot D_e}} \qquad \left[\frac{W}{m}\right]$$

ahol	$q_{l,R}$	- hőáram a csővezeték méterére vetítve $\left[\frac{W}{m}\right]$
	ϑ_M	- közeghőmérséklet, a belső oldal hőmérséklete [ºC]
	ϑ_L	- levegő hőmérséklete [ºC]
	ϑ_o	- a felület hőmérséklete [ºC]
	h_i	- a cső belső felületének hőátviteli együtthatója $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
	h_{se}	- a külső felület hőátviteli együtthatója $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
	λ	- a szigetelőréteg „ üzemi „ hővezetési tényezője $\left[\frac{W}{m\cdot K}\right]$
	D_i	- a cső külső átmérője = szigetelőréteg belső átmérője [m]
	D_e	- a szigetelés külső átmérője [m]

1.3.1.3. Csővezeték hőmérséklet eloszlásának számítása

Az egyes rétegek hőmérséklet különbségének számítása a réteg hő ellenállásából adódik. Egy rétegű szigetelés hőmérséklet eloszlása az alábbiak szerint számítható (a belső hőátvitel elhanyagolása mellett):

(43) $$\Delta\vartheta_M = \frac{q_{l,R}}{\pi} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot 2} \cdot ln\frac{D_0}{D_i} \qquad [K]$$

(44) $\Delta\vartheta_o = \frac{q_{l,R}}{\pi} \cdot \frac{1}{h_a \cdot D_a}$ [K]

1.3.1.4. Csővezetékek és több rétegű szigetelések hőáramának számítása

Kétrétegű szigetelés esetében:

(45) $q_{l,R} = \frac{\pi \cdot (\vartheta_M - \vartheta_M)}{\frac{1}{h_i + D_i} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot ln\frac{D_1}{D_i} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot ln\frac{D_o}{D_1} + \frac{1}{h_o + D_o}}$ $\left[\frac{W}{m}\right]$

Több rétegű csőszigetelés esetében az egyes rétegekben a hőmérséklet esésének értékét az alábbi egyenletekkel számíthatóak ki:

(46) $\Delta\vartheta = \frac{q_{l,R}}{\pi} \cdot \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot ln\frac{D_1}{D_i} + \frac{q_{l,R}}{\pi} \cdot \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot ln\frac{D_2}{D_1} + \frac{q_{l,R}}{\pi} \cdot \frac{1}{h_o \cdot D_o}$ [K]

(47) $\Delta\vartheta_i = q_{l,R} \cdot R_{i.l,R} = q_{l,R} \cdot \frac{1}{h_i * \pi * D_i}$ [K]

(48) $\Delta\vartheta_1 = q_{l,R} \cdot R_{1,l,R} = q_{l,R} \cdot \frac{1}{2 * \pi * \lambda_1} \cdot ln\frac{d_2}{d_1}$ [K]

(49) $\Delta\vartheta_1 = q_{l,R} \cdot R_{2,l,R} = q_{l,R} \cdot \frac{1}{2 * \pi * \lambda_2} \cdot ln\frac{d_3}{d_2}$ [K]

(50) $\Delta\vartheta_o = q_{l,R} \cdot R_{o.l,R} = q_{l,R} \cdot \frac{1}{h_o * \pi * d_o}$ [K]

1.3.1.5. Hőmérsékletesés csővezetékben

A hőmérsékletesés meghatározásakor megkülönböztetünk áramló folyadék esetében hosszirányú hőmérsékletesést, illetve egy időbeli hőmérsékletesést nyugvó folyadékban.

Axiális hőmérsékletesés csővezetékben:
Az alábbi közelítő képlettel számítható:

(51) $\Delta\vartheta = \frac{q_l \cdot l \cdot 3{,}6}{\dot{m} \cdot c_{p,M}}$ [K]

ahol	$\Delta\vartheta$	- hőmérsékletesés [K]
	q_l	- hőáramsűrűség a csővezetékben $\left[\frac{W}{m}\right]$
	l	- csővezeték hossza [m]
	3,6	- korrekciós tényező (mértékegységek miatt) $\left[\frac{kJ}{W \cdot h}\right]$
	$c_{p,M}$	- a közeg specifikus hőkapacitása $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$

$\dot{m}$ - a közeg tömegárama $\left[\frac{kg}{h}\right]$

Tehát a hőmérsékletesés, nemcsak a szigetelésanyagának, hanem az áramlási sebesség, a közeg sűrűségének, tömegáramának és a hőmérséklet függvénye.

Időbeli hőmérsékletesés nyugvó közegben, mely az alábbi közelítő képlettel számítható:

(52) $$\Delta\vartheta = \frac{\dot{Q} \cdot t \cdot 3{,}6}{\dot{m} \cdot c_{p,M}} \quad [K]$$

ahol
- $\Delta\vartheta$ - hőmérsékletesés [K]
- $\dot{Q}$ - az összes hőveszteség $[W]$
- t - állásidő [h]
- 3,6 - korrekciós tényező (mértékegységek miatt) $\left[\frac{kJ}{W \cdot h}\right]$
- $c_{p,M}$ - a közeg specifikus hőkapacitása $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$
- $\dot{m}$ - a közeg tömeg $\left[\frac{kg}{h}\right]$

Az axiális és az időbeli hőmérsékletesés **pontos** meghatározására az alábbi egyenletek szolgálnak:

(53) $$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{M,A} + \Delta\vartheta_{M,E} \quad [K]$$

ahol
- $\Delta\vartheta_{M,A}$ - a közeghőmérséklete a kihűlés kezdetekor [K]
- $\Delta\vartheta_{M,E}$ - a közeghőmérséklete a kihűlés végén [K]
- $\Delta\vartheta_{L}$ - a környezeti hőmérséklet [K]

A pontos hőmérsékletesés értéke:

(54) $$\Delta\vartheta_{M,A} - \Delta\vartheta_{L} = \left(\vartheta_{M,A} - \vartheta_{L}\right) \cdot \left(1 - e^{\frac{\Delta\vartheta}{(\vartheta_{M,A} - \vartheta_{L})}}\right) \quad [K]$$

(55) $$\Delta\vartheta_{M,A} - \Delta\vartheta_{L} = \left(\vartheta_{M,A} - \vartheta_{L}\right) \cdot \left(1 - e^{\frac{q_l \cdot l \cdot 3{,}6}{\dot{m} \cdot c_{p,M}}}\right) \quad [K]$$

1.3.1.6. A megengedett lehűlési idő megadott hőmérsékletváltozás esetén.

(56) $$\vartheta_v = \frac{\left(\vartheta_{M,A} - \vartheta_L\right) \cdot \dot{m} \cdot c_p \cdot ln \frac{(\vartheta_{M,A} - \vartheta_L)}{(\Delta\vartheta_{M,E} - \vartheta_L)}}{q_l \cdot 3{,}6 \cdot A} \quad [h]$$

1.3.1.7. Lehűlési idő meghatározása vízközegű csővezetékben a befagyás megakadályozása érdekében.

Nyugvó közegben a befagyás megkezdésének ideje:

$$(57)\qquad \vartheta_v = \frac{(\vartheta_{M,A}-\vartheta_L)\cdot(\dot{m}_M\cdot c_{pM}+\dot{m}_{CS}\cdot c_{pCS})\cdot ln\frac{(\vartheta_{M,A}-\vartheta_L)}{(\Delta\vartheta_{M,E}-\vartheta_L)}}{q_{l,R}\cdot 3{,}6\cdot l}$$

ahol

l	– a csővezeték hossza [m]	
$q_{l,R}$	- hosszirányú hőáram sűrűség	$\left[\frac{W}{m}\right]$
$\vartheta_{M,A}$	- a közeghőmérséklete a kihűlés kezdetekor [K]	
$\Delta\vartheta_{M,E}$	- a közeghőmérséklete a kihűlés végén [K]	
$\Delta\vartheta_L$	- a környezeti hőmérséklet [K]	
3,6	- korrekciós tényező (mértékegységek miatt)	$\left[\frac{kJ}{W\cdot h}\right]$
$c_{p,M}$	- a közeg specifikus hőkapacitása	$\left[\frac{kJ}{kg\cdot K}\right]$
$c_{p,CS}$	- a cső specifikus hőkapacitása	$\left[\frac{kJ}{kg\cdot K}\right]$
$\dot{m}_{pM}$	- a közeg tömege	$\left[\frac{kg}{h}\right]$
$\dot{m}_{pCS}$	- a cső tömege	$\left[\frac{kg}{h}\right]$

Nyugvó közegben a befagyási ideje:

$$(58)\qquad \vartheta_f = \frac{f}{100}\cdot\frac{\rho_j\cdot\pi\cdot d_i^2\cdot h_j}{q_{j,l}\cdot 3{,}6\cdot 4}\qquad [h]$$

$$(59)\qquad q_{j,l} = \frac{\pi\cdot(-\vartheta_L)}{\frac{1}{2\cdot\lambda}\cdot ln\frac{d_a}{d_i}}\qquad \left[\frac{W}{m}\right]$$

ahol

f	- a megfagyott víz százalékos részaránya	[%]
d_i	- a belső csőátmérő [m]	
d_a	- a külső csőátmérő [m]	
h_j	- a jégképződés entalpiája = 334 kJ/kg,	
ρ_j	- a jég sűrűsége 0 °C, ρ_j = 920 kg/m^3	

1.3.1.8. Földbe fektetett vezetékek hővesztesége

Földbe fektetett szigetelt csővezeték folyóméterre vonatkoztatott hőárama:

$$(60)\qquad q_{l,E} = \frac{\vartheta_i-\vartheta_{sE}}{R_l'+R_E}$$

ahol

ϑ_i	- a közeg hőmérséklete [°C]	
ϑ_{sE}	- a talaj átlag hőmérséklete [°C]	
R_l'	- a szigetelés lineáris hő ellenállása	$\left[\frac{m\cdot K}{W}\right]$

R_E	- a talaj lineáris termikus ellenállása $\left[\frac{m \cdot K}{W}\right]$	
λ_E	- a talaj hővezetési tényezője $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	
H_E	- a cső középpontjának távolsága a talaj felszínétől	[m]

(61) $$R_E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_E} \cdot arcosh \frac{2 \cdot H_E}{D_i} \qquad \left[\frac{m \cdot K}{W}\right]$$

ha $\frac{H_E}{D_i} > 2$, akkor

(62) $$R_E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_E} \cdot ln \frac{2 \cdot H_E}{D_i} \qquad \left[\frac{m \cdot K}{W}\right]$$

(63) $$R_l^{'} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln\left(\frac{D_{ej}}{D_{ij}}\right)\right) \qquad \left[\frac{m \cdot K}{W}\right]$$

Biatorbágy, 2009. szeptember 30.

Metz Rezső