

A hőveszteség csökkentésének módszerei II.

Methods for reducing heat loss II.

Prof. Dr. habil. TIMÁR Imre¹, Dr. Borbély Tibor², Dr. habil. ÁRPÁD István Walter³

¹ egyetemi tanár, Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, 8200 Veszprém, Egyetem u. 10.,

timar.imre@mk.uni-pannon.hu, tel.: +36 88 624 462;

² egyetemi docens, ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, H-1053 Budapest, Egyetem tér 1–3.

tel.: +36 94 504 354, bt@inf.elte.hu, https://www.elte.hu

³ egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.,

arpad.istvan@eng.unideb.hu, ORCID: 0000-0002-5052-852X

Abstract

Heat loss in structures can be reduced in two ways: by reducing the specific heat transfer surface area and by thermal insulation. We present the possibility of reducing the specific heat transfer surface area and the application of optimal sizing in the case of thermal insulation. Using an example, we determine the optimal insulation layer thickness for pipelines at different external temperatures.

Keywords: optimization of thermal insulation

Kivonat

A konstrukciók hőveszteségét kétféle módon lehet csökkenteni: a fajlagos hőátadási felület csökkentésével és hőszigeteléssel. Bemutatjuk a fajlagos hőátadási felület csökkentési lehetőségét, valamint az optimális méretezés alkalmazását hőszigetelés esetén. Példa kapcsán meghatározzuk az optimális szigetelő réteg vastagságát csővezetékknél különböző külső hőmérsékletek mellett.

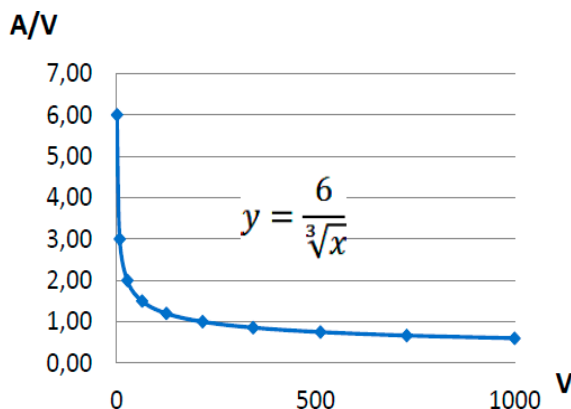
Kulcsszavak: hőszigetelés optimalálása

1. BEVEZETÉS

A hőszigetelés célja, hogy a kialakuló hőáramot minél alacsonyabb szinten tartsa. A hőveszteségek csökkentésének egyik hatékony módszere a hőszigetelés [1]-[2].

2. A HŐVESZTESÉGEK CSÖKKENTÉSE

A hőveszteségeket kétféle módon lehet csökkenteni: a fajlagos hőátadási felület csökkentésével, hőszigeteléssel. Térfogatra számítva a legkisebb fajlagos felülete a téglatestek közül a kockának van, hengeres testeknél pedig azoknak a hengeres testeknek, ahol a magasság/átmérő (H/D) arány egy. A testek méretének növelésével a fajlagos felületük csökken (1. ábra). Ahogy csökken a fajlagos felület, úgy csökken a fajlagos hőveszteség is. Ennek oka, hogy az energiacsere (a hőveszteség) a felületen történik. Az 1. ábrán jól látható, hogy kocka esetén, a görbe elején rohamosan csökken a fajlagos felület. E csökkenést az $y = 6 / \sqrt[3]{x}$ függvénnyel lehet leírni.



1. ábra. A felszín és a térfogat aránya arányának változása a térfogat függvényében kocka esetén

3. A HŐSZIGETELŐ ANYAGOK

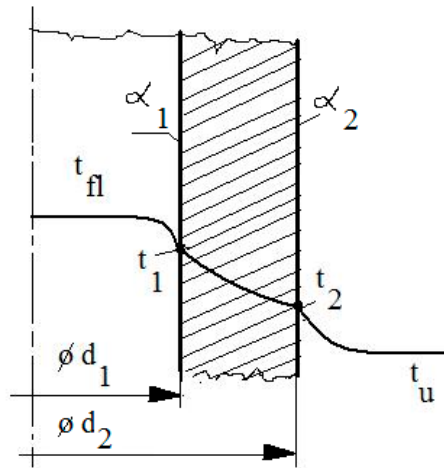
A egyes hőszigetelő anyagok hővezetési tényezői rendkívül eltérők. A gyakorlatban azokat az anyagokat tekintjük hőszigetelőnek, melyek hővezetési tényezője kisebb $0,1 \text{ W/mK}$ -nél. A hőszigetelő anyagok között kiemelkedő helyet foglal el a mesterséges szerves anyagok közé tartozó poliuretánhab, mivel a nagy molekulájú poliuretán termékek tulajdonságait kémiai és fizikai úton lehet szabályozni, hogy különböző anyagjellemzőket (sűrűséget, hővezetési tényezőt) lehet elérni.

A habosítóanyagok függvényében különböző hővezetési tényezőket értek el, közülük ki kell emelni a DIN 52612 szerint mért $\lambda = 0,018 - 0,024 \text{ W/(mK)}$ értékeket. Figyelemre méltó tulajdonsága, hogy tág hőmérséklet-tartományban használható, -30°C -tól $+90^\circ\text{C}$ -ig. Emellett speciális termékeknél az alkalmazási tartomány jelentősen kibővíthető -140°C -tól $+140^\circ\text{C}$ -ig [3].

4. A TERMIKUS ELLENÁLLÁS

4.1. A hengeres fal termikus ellenállása

A hengeres falban a 2. ábrán látható hőmérsékleteloszlás alakul ki:



2. ábra. A hengeres fal

A hengeres fal hővezetésének termikus ellenállása

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{d_2}{d_1},$$

ahol, λ a cső hővezetési tényezője, l a cső hossza. A hőátadás termikus ellenállása

$$R_a = \frac{1}{\alpha A},$$

ahol α a hőátadási tényező, A a hőátadó felület. Az l hosszúságú és d átmérőjű hengeres fal esetén

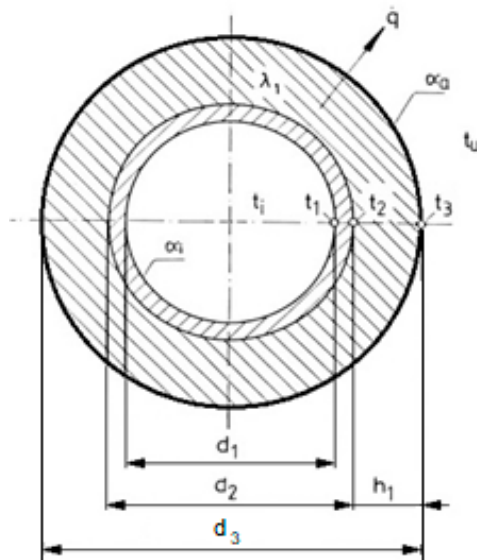
$$R_a = \frac{1}{\alpha d \pi l}.$$

A 3. ábra jelöléseit használva a cső belső és a külső falán a hőátadás termikus ellenállása

$$R_{ab} = \frac{1}{\alpha_1 d_1 \pi l}, \quad R_{ak} = \frac{1}{\alpha_a d_3 \pi l}.$$

4.2 A hengeres fal kritikus szigetelőréteg vastagsága

A továbbiakban a 3. ábrán látható egyrétegű hőszigeteléssel ellátott csövet vizsgáljuk.



3. ábra. Egyrétegű hőszigeteléssel ellátott cső

Hengeres vezeték esetén vastagabb szigetelés esetén megnő a hőleadó felület. A 3. ábra jelöléseit használva a hőáram az alábbi összefüggés alapján számítható:

$$\dot{Q} = \frac{t_i - t_u}{\frac{1}{\alpha_i d_1 \pi l} + \frac{1}{2\pi \lambda_{cs} l} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi \lambda_1 l} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_a d_3 \pi l}}$$

Ha a meleg közeget szállító csővezeték acélból készül, akkor ennek hővezetési tényezője ($\lambda_{cs} = 52,335$ W/(mK) 100 °C-on) csaknem két nagyságrenddel nagyobb a szigetelés hővezetési tényezőjénél, ezért $t_1 \approx t_2 \approx t_i$ közelítés gyakorlati szempontból elfogadható. A cső belső falán a jó hőátadás miatt $t_i \approx t_1$ a cső belső falán a hőátadás termikus ellenállása, valamint a csőfal vezetésének termikus ellenállása elhanyagolható. Ennek alapján a hőszigetelő réteg és a külső felületen a hőátadás termikus ellenállása

$$R = \frac{1}{2\pi \lambda_1 l} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_a d_3 \pi l}$$

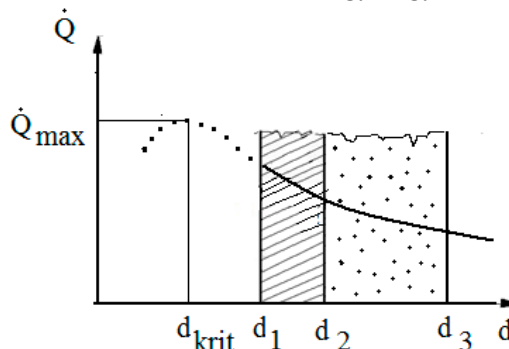
A fenti összefüggést deriválva meghatározhatjuk annak szélsőértékét

$$\frac{\partial R}{\partial d_3} = \frac{1}{2\pi \lambda_1 l} \frac{1}{d_3} - \frac{1}{\alpha_a \pi d_3^2 l} = 0,$$

innen

$$d_{krit} = \frac{2\lambda_1}{\alpha_a}$$

Itt két eset lehetséges: a kritikus átmérő lehet kisebb vagy nagyobb, mint a cső külső átmérője.



4.. ábra. A kritikus átmérő kisebb, mint cső belső átmérője

A 4. ábráról látható, hogy amennyiben a kritikus átmérő kisebb, mint a cső külső átmérője akkor a szigetelés vastagságának növelése a hőveszteség csökkenését eredményezi, tehát a hőszigetelés hatékony lesz.

4.3. Csővezeték egyrétegű hőszigetelésének optimalizálása

Az egyes rétegek hővezetésének termikus ellenállását a 3. ábra alapján írjuk fel. A csőfal termikus ellenállása

$$R_{cs} = \frac{1}{2\pi\lambda_{cs}l} \ln \frac{d_2}{d_1},$$

ahol λ_{cs} a cső anyagának hővezetési tényezője.

A szigetelőréteg termikus ellenállása

$$R_1 = \frac{1}{2\pi\lambda_1l} \ln \frac{d_2 + 2h_1}{d_2},$$

ahol λ_1 aszigetelőréteg hővezetési tényezője és h_1 a vastagsága.

A csőben levő t_i hőmérsékletű meleg közeg és a t_l hőmérsékletű fal között hőátadás megy végbe, melynek termikus ellenállása Newton-féle hőátadás egyenletének felhasználásával

$$R_{ab} = \frac{1}{\alpha_i\pi d_1l},$$

ahol α_i a hőhordozó közeg és a csőfal közti hőátadási tényező. Hasonlóképpen a t_3 hőmérsékletű külső falfelület és a t_u hőmérsékletű környezet közt lejátszódó hőátadás termikus ellenállása

$$R_{ak} = \frac{1}{\alpha_a\pi(d_2 + 2h_1)l},$$

ahol α_a a külső hengeres felület és a környezet közt értelmezett hőátadási tényező. A hőátadás és a hővezetés termikus ellenállásainak felhasználásával a kialakult hőáram

$$\dot{Q} = \frac{t_i - t_u}{R_{ab} + R_{cs} + R_1 + R_{ak}}$$

A termikus ellenállások meghatározása után rátérünk a célfüggvény és a korlátozási feltételek megfogalmazására.

4.4. A célfüggvény megfogalmazása

Célunk az 3. ábrán látható, poliuretánhab szigeteléssel ellátott csővezeték optimális szigetelőréteg vastagságainak (h_1) meghatározása oly módon, hogy minimális legyen az anyagköltség és a hőveszteség költsége. Esetünkben a célfüggvény három részből tevődik össze: a cső anyagköltségéből K_{cs} , a szigetelés anyagköltségéből K_{sz} és a hőveszteség költségéből $K_{hő}$

$$K = K_{cs} + K_{sz} + K_{hő}.$$

A költségfüggvény egyes tagjait egy méter hosszra vonatkoztatjuk, így a cső fajlagos költsége $k_{cs} = K_{cs}/l$.

A hőszigetelés költsége a szigetelőréteg egy méter hosszra vonatkoztatott költségéből és a szigetelés külső felületét borító köpeny anyagköltségéből tevődik össze. A fajlagos szigetelési költség

$$k_{sz} = \frac{[(d_2 + 2h_1)^2 - d_2^2] \pi}{4} k_1 + [(d_2 + 2h_1)\pi + c_a] k_a,$$

ahol k_1 a szigetelőréteg fajlagos költsége (PE/m³), k_a a köpeny fajlagos anyagköltsége (PE/m²) és c_a a köpenyátfedés értéke (m).

A fajlagos hőveszteség értéke az alábbiak szerint számítható

$$k_{h\delta} = \frac{Q}{l} \tau k_{hf},$$

ahol τ a csővezeték üzemelési ideje (s) és k_{hf} a fajlagos hőkölttség (PE/J).

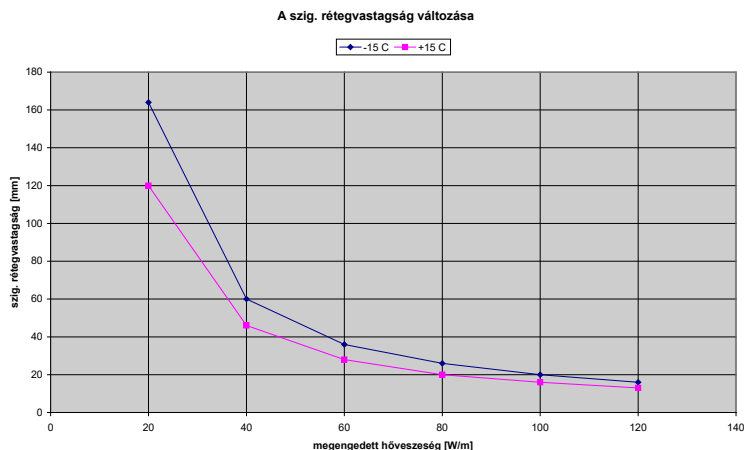
4.5. A korlátozási feltételek megfogalmazás

A megengedett hőveszteség korlátozása, a külső falhőmérséklet (t_3) korlátozása.

A módszer kis módosítással tetszőleges számú szigetelő rétegnél is használható. A továbbiakban bemutatjuk a módszer gyakorlati alkalmazását.

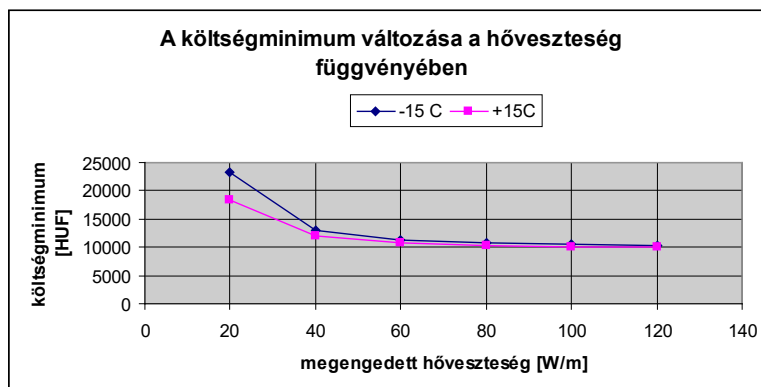
4.6. Az optimalizációs probléma megoldása, eredmények

Mivel az anyagok hővezetési tényezője a hőmérséklet függvénye, ezért számításaink során a középhőmérsékletre vonatkoztatott értékével számolunk. A szigeteléssel ellátott csőben 150 °C-os gőz áramlik. A csővezeték a szabadban helyezkedik el és a szélesség 10 m/s, $d_1=0,159$ m; $d_2=0,168$ m; $c_u=0,01$ m; $k_l=5100$ Ft/m³; $k_m=900$ Ft/m²; $k_{cs}=700$ Ft/m; $k_{hf}=7 \cdot 10^{-7}$ Ft/J; $l=10$ m; $q_{meg}=20, \dots, 120$ W/m; $t_u=-15^\circ\text{C}$ és $+15^\circ\text{C}$; $t_i=150^\circ\text{C}$; $\alpha_a=48$ W/m²K; $\alpha_i=105,5$ W/m²K; $\lambda_l=0,021$ W/mK; $\lambda_{cs}=52,3$ W/mK; $\tau=168$ h. A megfelelő értékek és összefüggések felhasználásával a megfogalmazott feladatot genetikus algoritmussal oldottuk meg a MATLAB alkalmazás segítségével a különböző paraméterek esetén [4].



5. ábra. A szigetelőréteg vastagságának változása a megengedett hőveszteség függvényében

Az 5. ábra a szigetelőréteg h_{lopt} vastagságának változását mutatja kétféle t_u környezeti hőmérséklet mellett, a megengedett hőveszteség függvényében. A szigetelőréteg vastagsága a környezeti hőmérséklet (t_u) csökkenésekor nő, és amikor nagyobb hőveszteséget engedünk meg, akkor csökken.



6. ábra. A költségminimumok változása a megengedett hőveszteség függvényében

A 6. ábra a költségminimumok változását mutatja kétféle t_u környezeti hőmérséklet mellett, a megengedett hőveszteség függvényében.

5. ÖSSZEGEZÉS

Ismertettük a hőszigetelésre alkalmazott anyagok tulajdonságait és alkalmazási lehetőségeit. Bemutattuk a kritikus szigetelő réteg vastagságának meghatározását. Ezt követően kiszámítottuk a poliuretán habbal szigetelt csővezeték optimális szigetelő rétegének vastagságát.

IRODALOM

- [1] Cammerer, J. S.: Der Wärme und Kälteschutz in der Industrie. Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- [2] Timár, I.: Optimization of thermal insulation for sandwich constructions. New Requirements for Structures and their Reliability. Prague, June 7-8 1994, Vol.2, p.: 325-330.
- [3] Stamm, K., Witte, H.: Sandwichkonstruktionen Berechnung, Fertigung, Ausführung. Springer –Verlag, Wien, 1974
- [4] I. W. Árpád, J. T. Kiss és D. Kocsis, „Role of the volume-specific surface area in heat transfer objects: A critical thinking-based investigation of Newton's law of cooling,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER*, 1. kötet 227, pp. 1-9, (2024)