A hőveszteség csökkentésének módszerei I.

Methods for reducing heat loss Part I

Dr. habil. ÁRPÁD István Walter[1], Prof. Dr. habil. TIMÁR Imre[2]

[1] egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.; arpad.istvan@eng.unideb.hu, ORCID: 0000-0002-5052-852X
[2] egyetemi tanár, Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, 8200 Veszprém, Egyetem u. 10., timar.imre@mk.uni-pannon.hu, tel.: +36 88 624 462

Abstract

The heat loss of structures can be reduced in two ways: by thermal insulation and by reducing the volume-specific heat transfer surface area. The latter method is less well known in practice. One way to reduce the volume-specific heat transfer surface area is to change the geometry of the structure, and the other way is to increase the size of the structure. The article presents the possibilities for reducing the volume-specific heat transfer surface area, and then demonstrates the combined effect of using different thermal insulation thicknesses and increasing the size through sensible heat storage tanks design example. The final structure to be selected can be determined by applying optimization according to the economic objective function, which also takes energy efficiency into account, among the options.

Keywords: new form of Newton's law of cooling formula, volume-specific surface area, cooling and heating rate of objects, economies of scale, energy efficiency of sensible heat storage

Kivonat

A konstrukciók hőveszteségét kétféle módon lehet csökkenteni: a hőszigeteléssel, és a térfogat-fajlagos hőátadási felület csökkentésével. Ez utóbbi módszer kevésbé ismert a gyakorlatban. A térfogat-fajlagos hőátadási felület csökkentés egyik módja a konstrukció geometriájának megváltoztatása, a másik módja pedig a konstrukció méretének növelése. A cikk bemutatja a térfogat-fajlagos hőátadási felület csökkentési lehetőségeket, majd egy érzékelhető hőtároló tervezési példán keresztül bemutatja a különböző hőszigetelés vastagság alkalmazásának és a méretnövelésnek együttes hatását. A konstrukciós lehetőségek közül az energiahatékonyságot is figyelembe vevő gazdasági célfüggvény szerinti optimálás alkalmazásával lehet majd végül meghatározni a kiválasztandó végleges konstrukciót.

Kulcsszavak: Newton-féle lehűlési törvény új alakja, térfogat-fajlagos felület, tárgyak hűlési és melegedési sebessége, mérethatékonyság, érzékelhető hőtároló energiahatékonysága

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

- A felület, $[m^2]$
- Bi Biot szám, $Bi = \frac{h \cdot L}{k_{object}}$
- C_{object} a tárgy hőkapacitása állandó nyomáson, $\left[\frac{kJ}{°C}\right]$
- c_p a tárgy fajlagos hőkapacitása állandó nyomáson, $\left[\frac{kJ}{kg\ °C}\right]$
- c_p^V a tárgy térfogat-fajlagos hőkapacitása állandó nyomáson, $c_p^V = c_p \cdot \rho\ \left[\frac{kJ}{m^3\ °C}\right]$
- D átmérő, $[m]$
- Fo Fourier szám (egyfajta dimenziómentes időnek is tekinthető), $Fo = \frac{\alpha \cdot \tau}{L^2}$
- H magasság, $[m]$
- h a hőátadási tényező, $\left[\frac{W}{m^2\ °C}\right]$
- h^* a térfogat-fajlagos hőkapacitással korrigált hőátadási tényező, $h^* = \frac{h}{c_p\ \rho} = \frac{h}{c_p^V}\ \left[\frac{m}{s}\right]$
- k a hővezetési tényező, $\left[\frac{W}{m\ °C}\right]$
- L a jellemző hosszúság (méret), $[m]$
- m a tárgy tömege, $[kg]$
- Q az entalpia (a tárgy belső energiája, a hőtartalma), $[kJ]$
- Q_{loss} a hőveszteség, $[kJ]$
- R a sugár, $[m]$
- T a hőmérséklet, $[K]$ vagy $[°C]$

V a térfogat, $[m^3]$

görög betűk

α a tárgy hődiffúzivitása, $\alpha = \frac{k_{object}}{c_p^V} \left[\frac{m^2}{s}\right]$

δ a hőszigetelő réteg vastagsága, $[m]$

η energetikai hatásfok (energiahatékonyság), [%]

Θ a hőmérsékleti eltérésváltozó, $[K]$ vagy [°C]

ρ a tárgy sűrűsége, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

τ az idő, $[s]$

Ψ korrekciós tényező, jellemzi a tárgy hőmérsékleti mezőjének egyenlőtlenségét,

ω a tárgy térfogat-fajlagos felülete, $\omega = \frac{A}{V}$ $\left[\frac{m^2}{m^3}\right]$

1. BEVEZETÉS

A hőenergia alkalmazása nemcsak az iparban, de a mindennapi életben is széles körben elterjedt. Ezért az ezzel kapcsolatos ismeretek sokakat közvetlenül is érint. Az ipari hőenergia-gazdálkodásban vagy a naphő hasznosításában kulcsszerepet játszanak a hőtároló berendezések. A hőtároló berendezések energetikai hatékonysága alapvetően befolyásolja ezek gazdaságosságát. A hőveszteség az energiagazdálkodás egyik lényeges területe. A hőveszteség mértékét azonban nem csak abszolút értékben szükséges figyelni, hanem a teljes energiatartalomhoz viszonyítva is, azaz milyen arányban veszítjük el a hasznosítandó energiánkat egy adott esetben. A hőenergia veszteséget pedig kétféle módon lehet csökkenteni, egyrészt hőszigetelő réteg alkalmazásával, másrészt az objektum, a létesítmény térfogat-fajlagos felületének csökkentésével. Ez utóbbi módszer, ami arányaiban csökkenti a hőveszteséget, mint lehetőség, nem ismert eléggé, mert nem tanítják és a szakirodalom sem foglalkozik vele. Nincsenek olyan hőtani cikkek, ahol a térfogat-fajlagos hőátadó felület, mint paraméter vagy akár, mint változó szerepelne, és ennek a paraméternek a változásai milyen hatással vannak a tárgy, a berendezés viselkedésére. Természetesen az „*A*” hőátadó felülettel foglalkoznak a hőtani cikkek, de már nem térnek ki az „ω” térfogat-fajlagos felületre. A cikk bemutatja a legújabb elméleti alapokat, amelyek ismeretében a hőtechnikai berendezések és akár más létesítmények, hőátadó tárgyak energiahatékonysága növelhető. Végül a cikk tervezési példát mutat be arról, hogyan lehet meghatározni, milyen fő méretekkel rendelkezzenek a különböző elvárt hőteljesítményt hosszútávon biztosítani képes érzékelhető hőtárolók.

2. A SZAKIRODALMI ELŐZMÉNYEK

2.1. A Newton-féle lehűlési törvény új alakja

A tárgyak hővesztesége egy instacionárius folyamat. A hőmérsékletváltozás sebességét a Newton-féle lehűlési törvény adja meg:

$$\Theta(\tau) = \Theta(0) \cdot e^{-\frac{h \cdot A}{C_{object}} \cdot \tau} \tag{1}$$

ahol

$\Theta(\tau)$ a tárgy hőmérsékletének a környezeti hőmérsékletétől való eltérése a τ időpillanatban [°C],

$\Theta(0)$ a tárgy hőmérsékletének a környezeti hőmérsékletétől való eltérése τ=0 időpillanatban [°C].

A hőmérsékletkülönbség az idő múlásával exponenciálisan változik, és határesetben (egyensúlyban) eltűnik:

$$\lim_{\tau \to \infty} T_{object}(\tau) = T_{environment} \tag{2a}$$

$$\lim_{\tau \to \infty} \Theta(\tau) = 0. \tag{2b}$$

Az (1) képlet az un. „lumped-heat-capacity system” modellt írja le, ami azt jelenti, hogy a tárgy hőmérsékleti eloszlása a tárgy belsejében és a felületen minden időpillanatban egyenletes. Ez azt jelenti, hogy bár a hőmérséklet időben változik, de mindenütt a tárgy belsejében és a felületén is ugyanaz a hőmérséklet van egy adott időpillanatban. A jó hővezetésű tárgyak, pl. a fémek viselkedését lehet így jól közelíteni. A rosszabb hővezetésű tárgyaknál Kondratiev javaslatára egy Ψ korrekciós tényezőt alkalmaznak a képletben [1]. A Ψ korrekciós tényező jellemzi a tárgyban a hőmérsékleteloszlást. Ezek a tárgyak lassabban hűlnek ki, mert a tárgy belső hőellenállása lassítja a felületre való energia kijutást. A képlet ezekben az esetekben a következőképpen alakul:

$$\Theta(\tau) = \Theta(0) \cdot e^{-\Psi \frac{h \cdot A}{C_{object}} \cdot \tau} \tag{3}$$

A Newton-féle lehűlési törvény képletét dimenziómentes számokkal is kifejezik:

$$\Theta(\tau) = \Theta(0) \cdot e^{-Bi \cdot Fo} . \tag{4}$$

Az (1) és a (4) képlet egymásba átalakítható. A két képlet alkalmazásának összehasonlításával ez a cikk a terjedelmi korlát miatt nem foglalkozik.

Árpád és mtsi. [2] cikkükben a Newton-féle lehűlési törvény egy új alakját adták meg, amely érthetőbben mutatja meg mely paraméterektől függ valójában a tárgyak hűlése és így a hővesztesége. A lehűlési törvény új kifejezése a következő [2], [3]:

$$\Theta(\tau) = \Theta(0) \cdot e^{-h^* \cdot \omega \cdot \tau}, \tag{5}$$

ahol

$h^* = \frac{h}{c_p^V}$ a térfogat-fajlagos hőkapacitással (c_p^V) korrigált konvekciós hőátadási tényező. A korrekcióra a tárgy (a szilárd anyag) tulajdonságainak (c_p, ρ) figyelembevétele érdekében van szükség. A hűlés (a hőveszteség) sebessége szempontjából h^* a jellemző hőtechnikai paraméter.

$\omega = \frac{A}{V}$ a tárgy térfogat-fajlagos felülete, ami a hűlés (hőveszteség) sebessége szempontjából a jellemző geometriai paraméter.

A “non-lumped-heat-capacity system” modellre ennél a képletnél is alkalmazható a Kondratiev-féle Ψ korrekciós tényező, hasonlóan az előzőekben leírtakhoz:

$$\Theta(\tau) = \Theta(0) \cdot e^{-\Psi \cdot h^* \cdot \omega \cdot \tau}. \tag{6}$$

2.2. A térfogat-fajlagos hőátadó felületet (ω) befolyásoló tényezők

A térfogat-fajlagos felület (ω) a geometriai alaktól (erről tanítanak), és a térfogattól függ (ezt azonban nem szokták tanítani, lásd 1. táblázat). Az 1. táblázat tartalmazza a gömb, az azonos átmérőjű és magasságú henger (D=H) és a kocka térfogat-fajlagos felületének meghatározási képletét, amely az egyes geometriai testek térfogatától függ.

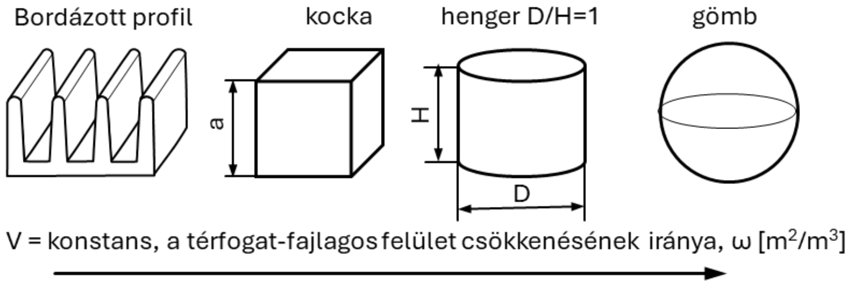
1.táblázat

A különböző geometriájú tárgyak térfogat-fajlagos felületének függése a mérettől (a térfogattól)

	gömb	**henger D/H=1**	**kocka**
„V” térfogat, [m^3]	$V = \frac{D^3\pi}{6}$	$V = \frac{D^2\pi}{4} \cdot H = \frac{D^3\pi}{4}$	$V = a^3$
„A” felület, [m^2]	$A = D^2\pi$	$A = 2 \cdot \frac{D^2\pi}{4} + D\pi \cdot H = \frac{3 \cdot D^2\pi}{2}$	$A = 6 \cdot a^2$
„ω” térfogat-fajlagos felület (A/V), [m^2/m^3]	$\omega = \frac{6}{D} = \frac{6}{\sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \cdot V}}$ $\omega \approx \frac{4.84}{\sqrt[3]{V}}$	$\omega = \frac{6}{D} = \frac{6}{\sqrt[3]{\frac{4}{\pi} \cdot V}}$ $\omega \approx \frac{5.54}{\sqrt[3]{V}}$	$\omega = \frac{6}{a} = \frac{6}{\sqrt[3]{V}}$

2.2.1. Az azonos térfogatú, de különböző geometriai alakú tárgyak térfogat-fajlagos felülete

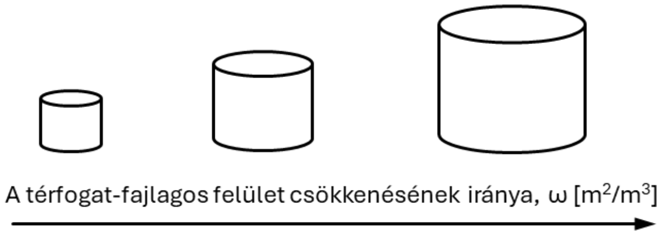
A legkisebb térfogatfajlagos felülettel rendelkező geometriai tárgy a gömb (1. ábra, 1. táblázat).



1. ábra. *Azonos térfogatú, de különböző alakú geometriai testek térfogat-fajlagos felületének csökkenési sorrendje*

2.2.2. Különböző térfogatú, de azonos geometriai alakú tárgyak térfogatfajlagos felülete

A különböző méretű (térfogatú), de azonos geometriai alakú tárgyak térfogatfajlagos felülete nem azonos. Minél nagyobb a tárgy mérete, annál kisebb a tárgy térfogatfajlagos felülete (3. ábra).



2. ábra. *Azonos geometriai alakú, de eltérő térfogatú testek térfogat-fajlagos felületének csökkenési sorrendje*

A 2.2.1 és a 2.2.2. fejezetekben leírtakat figyelembe kell venni a hőtárolók és a hőátadó tárgyak tervezésekor és üzemeltetésekor.

3. MÉRETHATÉKONYSÁG AZ ÉRZÉKELHETŐ HŐTÁROLÁSBAN – SZÁMÍTÁSI PÉLDA

Vegyünk egy föld alatti érzékelhető hőenergia-tároló (USTES, Underground Sensible Thermal Energy Storage) létesítményt [4], amely egy hő tárolására szolgáló, földbe ágyazott hengeres (H/D=1) tartály. Két esetet veszünk figyelembe. Az elsőben a hőt a hőtároló tartályból folyamatos, állandó 4 kW teljesítményű kimenettel, a másik esetben 1 MW teljesítményű kimenettel nyerik ki. Mindkét esetben a hőtároló tartályt úgy kell megtervezni (méretezni), hogy hőmérséklete a téli 6 hónap (180 nap) alatt 80 °C-ról 15 °C-ra változzon. A környező talaj hőmérsékletét télen állandó 10 °C-osnak feltételezzük. A tartály akkor tekinthető „üresnek", amikor hőmérséklete eléri a 15 °C-ot. A felhasznált hőszigetelő anyag hővezető képessége 0,04 W/(m °C). A hőtároló anyag (nedves homok) átlagos térfogatspecifikus hőkapacitása 2,5 MJ/(m^3 °C) [2], [3].

A megadott feladatra alkalmas hőtároló tartályok mérete és a hőszigetelésük vastagsága számítással becsülhető, ami lehetővé teszi a különböző hőtároló tartályok energiahatékonyságának kiszámítását az alábbiak szerint [2], [3].

A probléma megoldásához használt egyszerűsítési kritériumok:

- A hőtároló tartály hőszigetelését is a környezet részének tekintjük, így a termikus ellenállása egyben a környezet termikus ellenállása is; ilyen értelemben a szigetelőrétegben lévő hő is hőveszteség, valamint a hőszigetelés vastagsága miatti méretnövekedést nem vesszük figyelembe a hőtároló tartály méretének növekedésében.
- Legyen a tárgy hőszigetelését körülvevő környezet ($T_{environment}$ vagy T_{soil}) hőmérséklete állandó a folyamat során. Tehát legyen a talaj hőmérséklete állandó 10 °C.

- Az egyszerűség kedvéért tekintsük a hőszigetelő réteget sík falnak. Nagy hőtároló létesítmények esetében ez nem okoz jelentős számítási hibákat.
- A „lumped-heat-capacity system” modellt alkalmazzuk a hőtároló viselkedésére. Ez azt jelenti, hogy a tartály belső hőellenállását elhanyagoljuk. Ezzel elérjük azt, hogy a gyakorlatban ennél csak lassabban hűlhet ki a tároló. Tulajdonképpen egyfajta biztonsági számítás.

Az ismert, a kiindulási adatok:

$\Theta_{object}(0) = 80°C - 10°C = 70°C$ (initial condition)
$\Theta_{object}(180) = 15°C - 10°C = 5°C$
$k_{insulation} = 0.04\ W/(m\ °C)$
$c_p^V = c_p \cdot \rho_{object} = 2.5\ MJ/(m^3\ °C)$
$P_1 = 4\ kW$; $P_2 = 1\ MW$

A hőtároló energiamérlege:

$$\frac{dQ_{object}}{d\tau} = -\dot{Q}_{loss} - P \qquad (7a)$$

$$dQ_{object} = c_p \cdot m \cdot d\Theta_{object} = c_p \cdot \rho_{object} \cdot V \cdot d\Theta_{object} = c_p^V \cdot V \cdot d\Theta_{object} \qquad (8)$$

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{k_{insulation}}{\delta_{insulation}} \cdot A \cdot \left(T_{object} - T_{environment}\right) = \frac{k_{insulation}}{\delta_{insulation}} \cdot A \cdot \Theta_{object}(\tau) \qquad (9)$$

$$c_p^V \cdot V \cdot \frac{d\Theta_{object}}{d\tau} = -\frac{k_{insulation}}{\delta_{insulation}} \cdot A \cdot \Theta_{object} - P \qquad (7b)$$

$$\frac{d\Theta_{object}}{d\tau} = -\frac{k_{insulation}}{c_p^V \cdot \delta_{insulation}} \cdot \frac{A}{V} \cdot \Theta_{object} - \frac{P}{c_p^V \cdot V} \qquad (7c)$$

Az egyenlet a következő alakra átrendezve:

$$T_1 \cdot \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = a \qquad (7d)$$

ahol $T_1 = \frac{c_p^V \cdot \delta_{insulation}}{k_{insulation} \cdot \omega}$, $y(\tau) = \Theta_{object}(\tau)$, $a = -\frac{\delta_{insulation}}{k_{insulation} \cdot \omega} \cdot \frac{P}{V}$, and $\omega = \frac{A}{V} = \frac{5.54}{\sqrt[3]{V}}$ (lásd az 1. táblázatot).

A differenciálegyenletet Laplace-transzformációval oldjuk meg:

$$T_1 \cdot \left(s \cdot y(s) - y(0)\right) + y(s) = \frac{a}{s} \qquad (9a)$$

ahol $y(0) = 70$.

Az egyenlet átrendezve:

$$y(s) = a \cdot \frac{1}{s \cdot (T_1 \cdot s + 1)} + T_1 \cdot 70 \cdot \frac{1}{(T_1 \cdot s + 1)}, \qquad (9b)$$

majd ebből az inverz Laplace-transzformációval kapjuk meg az időfüggvényt:

$$y(\tau) = a \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_1}}\right) + 70 \cdot e^{-\frac{\tau}{T_1}}, \qquad (10a)$$

$$\Theta_{object}(t) = -\frac{\delta_{insulation}}{k_{insulation} \cdot \frac{5.54}{\sqrt[3]{V}}} \cdot \frac{P}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{insulation} \cdot \frac{5.54}{\sqrt[3]{V}}}{c_p^V \cdot \delta_{insulation}} \cdot t}\right) + 70 \cdot e^{-\frac{k_{insulation} \cdot \frac{5.54}{\sqrt[3]{V}}}{c_p^V \cdot \delta_{insulation}} \cdot t} \qquad (10b)$$

A $\Theta_{object}(180) = 5°C$-ot és a hőszigetelő réteg különböző vastagságait behelyettesítve a (10b) egyenletbe megkapjuk az adott hőszigetelő réteghez tartozó hőtároló térfogatot. A számítás eredményeit a 2. táblázat mutatja.

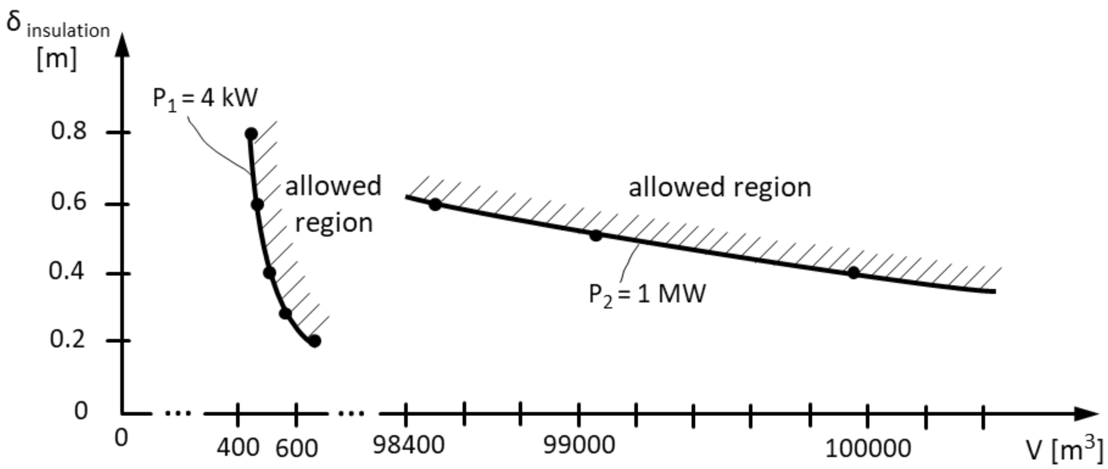
Az eredmények egyértelműen azt mutatják, hogy a nagyobb hőtároló tartály energiahatékonysága lényegesen magasabb, mint a kisebb hőtároló tartályé. Ez azt mutatja, hogy a „méretgazdaságosság” érvényesül ebben az energiatárolási módszerben. Ezenkívül látható, hogy a méret „szigetel”, mivel a méret növekedése csökkenti a térfogat-fajlagos hőátadási felületet.

Kis mérettartományban a rendszer nagyon érzékeny a térfogatváltozásokra, amelyeket csak a szigetelés vastagságának jelentős változása tud kompenzálni. Fordítva is igaz, hogy a szigetelés vastagságának kis változásai a méret-fajlagos hőveszteség nagy eltéréseit eredményezik (2. táblázat és 3 ábra).

2. táblázat

A tervezési példa számított megoldásai (a megoldási lehetőségek)

	$P_1 = 4$ kW				$P_2 = 1$ MW			
$\delta_{insulation}$ [m]	V [m^3]	H or D [m]	ω [m^2/m^3]	η [%]	V [m^3]	H or D [m]	ω [m^2/m^3]	η [%]
0.2	646	9.4	0.640	31.3	104 300	51.0	0.118	91.0
0.3	546	8.9	0.677	57.4	101 400	50.5	0.119	94.0
0.4	500	8.6	0.697	69.4	99 900	50.3	0.119	95.6
0.5	475	8.5	0.709	75.9	99 100	50.2	0.120	96.5
0.6	458	8.4	0.718	80.4	98 500	50.1	0.120	97.1
0.7	447	8.3	0.724	83.2	98 100	50.0	0.120	97.5
0.8	438	8.2	0.729	85.6	97 800	49.9	0.120	97.8



3. ábra. *A lehetséges megoldások tartománya*

Az adott igényeket és feltételeket kielégítő konstrukciós lehetőségek közül az energiaveszteséget, az energiahatékonyságot is figyelembe vevő gazdasági célfüggvény szerinti optimálás alkalmazásával lehet majd végül meghatározni a kiválasztandó végleges konstrukciót. Ez a további lépés a feladat megoldásában.

4. ÖSSZEGZÉS

A fenntartható fejlődés és az energia-gazdaságosság szempontjából az ipari hulladékhő vagy a naphő hasznosítása nagy jelentőséggel bír [5]. Ezen a területen alkalmazható technológia az un. az érzékelhető hőenergia tárolás. Ez a cikk bemutatja az idevágó legújabb hőtani ismereteket és egy tervezési példán keresztül bemutatja, hogyan lehetséges jó energiahatékonyságot elérni ezzel az energiatárolási technológiával.

A környezet mindig hatással van a tárgyra, a berendezésre. Ez a hatás a tárgy és a környezet közötti felületen keresztül megy végbe. Ha a tárgy méretéhez képest kicsi a környezettel érintkező felület, azaz a tárgy térfogat-fajlagos felülete kicsi, akkor a környezet hatása is kicsi lesz a tárgyra nézve. Az érzékelhető hőtárolás esetén a környezeti hatás a hőveszteség megjelenése. Ahhoz, hogy a hőveszteség arányaiban kicsi legyen, a térfogat-fajlagos hőveszteség kicsi legyen, a térfogat-fajlagos felületet kell csökkenteni és/vagy a tárgyat hőszigetelni kell. A térfogat növelése ugyanolyan hatással jár, mint a hőszigetelés vastagságának növelése a térfogat-fajlagos hőveszteség szempontjából. Ugyanakkor azt is kimutattuk, hogy a térfogat-fajlagos hőátadó felület és a térfogat közötti kapcsolat nem lineáris, így ugyanolyan méretnövekedés esetén a térfogat-fajlagos hőátadó felület a méret tartománytól függően eltérő mértékben csökken; fordítva, ugyanolyan méretcsökkenés esetén a térfogat-fajlagos felület nem minden méret tartományban növekszik ugyanolyan mértékben. Ezt figyelembe kell venni a hőátadó tárgyak, berendezések, hőtárolók tervezésekor. Nagy méretek esetén a rendszer nem annyira érzékeny a térfogat vagy a szigetelés vastagságának változásaira, mint a kis méretek esetén. A bemutatott számítások eredményei azt mutatják, hogy minél nagyobb a hőtároló, annál nagyobb az energiahatékonyság. Így a „méretgazdaságosság” elve a hőtárolásra is vonatkozik.

A „lumped-heat-capacity system” modell egyszerűsége miatt alkalmas előzetes mérnöki tervezésre. Ez azért is lehetséges, mert a környezeti paraméterek bizonytalansága is nagy [6].

A cikk legjelentősebb eredménye a tervezési szakirodalom bővítése. Ezen túlmenően a tanulmány számos gyakorlati alkalmazáshoz kapcsolható. Például megerősíti, hogy a nagyobb épületek, például a többlakásos házak energiahatékonysága sokkal jobb, mint az azonos vastagságú és anyagú szigetelésű kis családi házaké, mivel a méret is befolyásolja a fajlagos felületet, az energiahatékonyságot.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

[1] V. P. Isachenko, V. A. Osipova és A. S. Sukomel, Heat transfer, 1987.

[2] 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)

[3] I. W. Árpád, *Habilitációs értekezés,* Veszprém: Pannon Egyetem Mérnöki Kar, 2025.

[4] B. Koçak, A. I. Fernandez and H. Paksoy, "Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects," *Solar Energy,* pp. Volume 209, Pages 135-169, https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.081, 2020.

[5] Q. Chen, Y. Wang, J. Zhang és Z. Wang, „The knowledge mapping of concentrating solar power development based on literature analysis technology,” *Energies,* 2020 (13, 8).

[6] J. P. Holman, Heat transfer, 10th ed., New York: McGraw-Hill, ISBN 978–0–07–352936–3, 2010.