

Pregled in kriteriji za izbiro toplotnoizolacijskih materialov

Review and Criteria for Choosing Thermal Insulation Materials

Radonjič G.¹, V. Musil, EPF Maribor

V preglednem članku opisujemo vrste in lastnosti najpomembnejših toplotnoizolacijskih materialov, smisel in pomembnost pravilnega izoliranja kot tudi ključne kriterije za določitev optimalne izolacije. Poleg pravilne izbire ustreznega toplotnoizolacijskega materiala je potrebno vselej sistematično pristopiti tudi k izračunu debeline izolacijskega sloja. Med toplotnoizolacijskimi materiali je dan večji poudarek trdim poliuretanskim (PUR) penam. Za izboljšanje kakovosti trdih PUR pen je potrebno dobro poznavanje zakonitosti prenosa toplote skozi njihovo porozno strukturo, kar omogoča doseganje nizkih vrednosti toplotne prevodnosti. Podani so tudi izrazi za določitev efektivne toplotne prevodnosti, kakor tudi možnosti substitucije penilcev in recikliranja pri proizvodnji PUR pen.

Ključne besede: toplotnoizolacijski materiali, optimalna izolacija, trde poliuretanske pene

The aim of our paper is to show the role and the significance of proper use of thermal insulation materials. We discuss different criteria for choosing the most proper insulation as well as the importance of the determination of economic thickness of insulation layer. Among many different insulation materials rigid polyurethane foam is distinguished as one of the most efficient. In order to improve the quality of such foamed material a good knowledge of the heat transfer phenomenon in its porous structure is necessary. We also discuss about some possibilities of freon substitution and polyurethane foam recycling.

Key words: thermal insulation materials, optimal insulation, rigid polyurethane foam

1. Uvod

Varčevanje s toplotno energijo in njena gospodarna raba sta danes bolj aktualni kot kdajkoli doslej, saj zmanjšanje porabe energije ni le vprašanje energetike, temveč tudi ekologije. Izolacija je še vedno eden najpreprostejših in najučinkovitejših načinov, s katerim lahko prihranimo veliko toplotne energije. Nekateri industrijski obrati, kot na primer tisti, ki vključujejo parovode ali kriogene sisteme, bi bili popolnoma negospodarni brez uporabe primerne izolacije. Toplotna zaščita zgradb, poleg prihranka toplotne energije, vpliva še na mikroklimatske razmere v njih.

Problematika izoliranja oziroma uporabe toplotnoizolacijskih materialov je v naših strokovnih publikacijah obravnavana dokaj redko. To je na nek način presenetljivo, saj je k izoliranju potrebno pristopiti sistematično. Kriterijev za izbiro najprimernejšega izolacijskega materiala je več, poleg upoštevanja le-teh pa je pomembno določiti tudi najprimernejšo debelino izolacijskega sloja. Tako je namen prispevka pregledno predstaviti vse tiste najpomembnejše dejavnike, ki vplivajo na to, da bo aplikativni učinek uporabljenega toplotnoizolacijskega materiala največji.

2. Kriteriji za izbiro toplotnoizolacijskega materiala

2.1 Toplotna prevodnost

Toplotna prevodnost mora biti čim nižja. Nizka toplotna prevodnost ne pomeni le tanjše izolacije, ampak pogojuje tudi nižjo temperaturo na izstopni strani toplotnega toka. Predvsem vplivajo na njeno vrednost struktura materiala, temperatura in vlaga.

2.2 Temperaturno območje uporabe

Tehnološki pogoji določajo, kateri toplotnoizolacijski materiali so primerni za učinkovito izoliranje. Pri tem predvsem mislimo na obratovalno temperaturo, saj vsi izolacijski materiali niso primerni za uporabo pri vseh temperaturah. Pri previsokih temperaturah lahko pride do strukturne nestabilnosti ali celo do vžiga. Pri višjih temperaturah se lahko vrednost toplotne prevodnosti tako poveča, da material ni več izolacijsko učinkovit.

Pomembna pa je tudi spodnja temperaturna meja, saj material lahko postane preveč krhek. Vendar pa je največji problem pri nizkih temperaturah predvsem možna kondenzacija vlage, kar bistveno poveča prenos toplote skozi izolacijski sloj. Glede na to so toplotnoizolacijski materiali razvrščeni po temperaturnih območjih uporabe¹:

¹ mag. Gregor RADONJIČ dipl. inž. kem. tehn.
Inštitut za tehnologijo, EPF Maribor
Raušagova 14, 62000 Maribor

(a) kriogeno območje (<-100°C): vakuumsko ploskovne izolacije, silikatni aerogel, penjeno steklo, trda poliuretanska pena. Bistveno je, da je primerno izbran tudi zaščitni sloj proti vdoru vlage v izolacijski material;

(b) nizkotemperaturno območje (-100°C do 25°C): steklena vlakna, mineralna vlakna, penjeni polimerni materiali;

(c) vmesno področje (25°C do 600°C): steklena vlakna, mineralna vlakna, trda poliuretanska pena, Ca-silikat. Vrednost toplotne prevodnosti se v tem temperaturnem območju bistveno spreminja s temperaturo;

(d) visokotemperaturno območje (>600°C): Ca-silikat, mineralna vlakna, ekspanzirani perlit, keramična vlakna.

2.3 Tlačna trdnost

Ustrezna tlačna trdnost je potrebna zaradi možnih udarcev, vibracij in podobno. S tem se zmanjšujejo stroški vzdrževanja.

Drugi pomembni kriteriji pri izbiri toplotnoizolacijskega materiala so še kemijska odpornost, absorpcija vode in vodne pare, cena ter oblika^{2,3}.

3. Vrste in lastnosti toplotnoizolacijskih materialov

Proizvajalci ponujajo na tržišču veliko različnih vrst izolacijskih materialov, namenjenih za raznovrstne tehnične rešitve. V nadaljevanju na kratko predstavljamo najznačilnejše toplotnoizolacijske materiale in nekatere njihove lastnosti. Pregled je opravljen na osnovi literaturnih virov¹⁻⁷ in na osnovi podatkov, dobljenih iz različnih tehnično-informativnih materialov proizvajalcev⁸.

Kalcijev silikat

Kalcijev silikat je mešanica apna in SiO₂ ter različnih vlaken (npr. steklenih) za ojačevanje. Ne vsebuje organskih snovi. Ima dobre mehanske lastnosti in je zelo obstojen v srednje- in visokotemperaturnem območju. V glavnem se uporablja pri visokih temperaturah.

Steklena vlakna/steklena volna

Steklena vlakna so materiali na osnovi silikatov in se med seboj razlikujejo v gostoti, obliki in temperaturni obstojnosti. Vsebnost vlage je nizka. Plošče so lahko nekaširane ali kaširane z aluminijско folijo ali natron papirjem.

Mineralna vlakna/mineralna volna

Izdelujejo jih na primer iz diabaza z dodatkom kamenin, ki dajejo zelo odporna in elastična vlakna, dobljena iz staljene kameninske mase. Kot vezivo se uporablja fenolna smola. So bolj temperaturno obstojna kot steklena vlakna, vendar je ponavadi dolžina vlaken krajša kot pri steklenih.

Keramična vlakna

Keramična vlakna so sestavljena iz približno 43-54% Al₂O₃ in 43-54% SiO₂, njihov premer je med 1 in 10 μm. Včasih so takšna vlakna med seboj povezana z organskimi vezivi. Uporabljajo se pri zelo visokih temperaturah.

Vermikulit

Vermikulit je mineral, po sestavi hidratiran aluminijev-železo-magnezijev silikat. Pri višjih temperaturah se lušči v plasti in zaradi nastajanja pare med plastmi ekspandira v zmca. Gostota takšnega vermikulita je tako bistveno manjša. Ni gorljiv, ni topen v vodi in organskih topilih, ima pa sposobnost adsorpcije vode. Vermikulit postane vodoodbojen in primeren za izoliranje, če je obdelan z bitumnom ali silikoni.

Penjeno steklo

Penjeno steklo vsebuje veliko število popolnoma zaprtih celic (premera 0,1-1mm) in je brez organskih snovi. Ker ne adsor-

bira vlage, je primerno za uporabo pri kriogenih sistemih. Ima sicer nekoliko višjo vrednost toplotne prevodnosti, vendar pa so druge lastnosti takšne, da je za določene aplikacije primernejše kot kakšen drugi izolacijski material.

Ekspanzirani perlit

Proizvajajo ga iz naravnega silikatnega minerala perlita, ki ga pri visokih temperaturah ekspandirajo na 4 do 20-kratno začetno prostornino, kar daje material z veliko celicami majhnega premera. Takšna struktura se lahko stabilizira z organskimi in anorganskimi vezivi in ojačitvenimi vlakni. Je slabo prepusten za vlago. Ima pa slabše mehanske lastnosti kot na primer kalcijev silikat.

Silikatni aerogel

Zanj je značilno, da vsebuje pore, ki imajo manjši premer kot je srednja prosta pot molekul zraka. Za zmanjšanje vrednosti toplotne prevodnosti dodajajo v aerogel saje ali TiO₂, s čimer se v materialu zmanjšuje prenos toplote s sevanjem. Zaradi zelo nizkih vrednosti toplotne prevodnosti, ki so posledica značilne strukture, se smatra za primeren substitut za trde poliuretanske pene.

Penobeton

Po zamešanju osnovnih komponent betona se dodaja pena in s količino le-te lahko spreminja gostota penobetona od 400 do 2000 kg/m³. Tako se zapolni ves spekter uporabe, od toplotnoizolacijskega do tipično nosilnega materiala.

Pluta

Pluta je naravni proizvod posebne vrste hrasta plutovca. Zanj je značilna posebna celična struktura. Notranjost celic je zapolnjena s plinom podobne sestave kot zrak, vendar brez CO₂. Je lahka, elastična, nepropustna za tekočine in pline, pri gorenju ne razvija strupenih plinov. Proizvajajo različne tipe plute (granulat, ekspanzirani granulat, aglomerat).

Penjeni polistiren

Sestavljajo ga zaprte celice, v katerih je zrak, ki zavzema do 98% prostornine. Struktura celic je odvisna od tehnološkega procesa proizvodnje. Kot penilo uporabljajo v glavnem pentan, ki je v primerjavi z drugimi penilci ekološko neoporečen. Penjeni polistiren ima nizko gostoto, majhno prepustnost in dobro obstojnost proti vlagi. Ima pa relativno nizko temperaturno obstojnost.

Fenol-formaldehidne pene

Proizvajajo jih različnih gostot. V primerjavi z drugimi sorodnimi polimernimi materiali imajo višjo vrednost toplotne prevodnosti. Vendar pa so negorljive in pri gorenju ne razvijajo strupenih hlapov.

Penjeni polietilen

Toplotnoizolacijske cevi iz penjenega polietilena proizvajajo s postopkom modificirane ekstruzije polietilena, pri čemer dobijo material z zaprtocelično strukturo. Je elastičen in gibek. Včasih uporabljajo še dodatke za zmanjšanje gorljivosti.

Penjeni poliuretani

Proizvajajo več različnih tipov poliuretanskih (PUR) pen, kot so mehke, trde in integralne. Trda PUR pena je med toplotnoizolacijskimi materiali v marsičem specifična. Skupaj s penjenim polistirenom predstavlja približno 90% vseh proizvedenih polimernih pen. Nekatero značilne lastnosti PUR pen bomo opisali nekoliko podrobneje v naslednjem poglavju.

V tabeli 1 podajamo nekatere lastnosti toplotnoizolacijskih materialov, ki jih v industriji in gradbeništvu največ uporabljajo. Vrednosti za toplotne prevodnosti so podane za temperaturo 20°C. Glede na to, da proizvajajo veliko različnih tipov oziroma izvedb istega materiala, so lastnosti podane največkrat v posameznih intervalih.

Tabela 1: Nekatere lastnosti toplotnoizolacijskih materialov
Table 1: Some properties of thermal insulation materials

Toplotnoizolacijski material	Temperaturno območje uporabe (°C)	Toplotna prevodnost (W/mK) pri 20°C	Gostota (kg/m ³)
Ca - silikat	650 - 900	-	160 - 320
Steklena vlakna	do 500	0,035 - 0,042	16 - 110
Mineralna vlakna	do 900	0,038 0,093 (300°C)	50 - 120
Keramična vlakna	1300 - 1400	-	8 - 348
Vermikulit	do 1300	0,060 - 0,065 0,155 (500°C)	50 - 120
Penjeno steklo	-270 do 480	0,050	128 - 160
Ekspandirani perlit	-165 do 900	0,034	50
Silikatni aerogel	-270 do 700	0,010 - 0,020	80 - 150
Penobeton		0,170 - 0,650	400 - 2000
Pluta	-200 do 95	0,040 - 0,046	105 - 200
Penjeni polistiren	-200 do 75	0,030 - 0,040	16 - 80
Fenol-formaldehidna pena	do 130	0,035	24 - 60
Penjeni polietilen	-40 do 90	0,029	40
Trda PUR pena	-200 do 120	0,023 - 0,035	20 - 200

Ob koncu pregleda najbolj uporabljenih toplotnoizolacijskih materialov omenjamo še izolatorje, katerih delovanje temelji na principu optičnih vlaken in jih nekateri že smatrajo za novo generacijo toplotnoizolacijskih materialov, namenjenih za ekstremne pogoje⁹.

4. Trda poliuretanska pena

Poliuretani so produkti reakcije izocianatov s polioli. PUR pena lahko nastane na kemijski način, kjer v reakciji nastajajoči CO₂ povzroča nastanek pene, ali na fizikalni način, to je z dodatkom lahko hlapnega ekspandirnega sredstva (freon). Po reakciji nastane material z veliko majhnimi, večinoma dvanajst ploskovnimi celicami, v katerih se nahaja freon, zrak ali CO₂. Takšna struktura z 90-97% zaprtih celic zagotavlja najnižjo toplotno prevodnost v primerjavi z ostalimi konvencionalnimi toplotnoizolacijskimi materiali na tržišču.

Za izboljšanje kakovosti trdih PUR pen z vidika nižje toplotne prevodnosti (in s tem boljšega izolacijskega učinka) je potrebno dobro poznati in opisati fizikalni proces (prenos toplote), ki poteka znotraj takšnih materialov. Postavljeni so bili nekateri matematični in geometrijski modeli za določitev efektivne toplotne prevodnosti¹⁰⁻¹². Efektivna toplotna prevodnost trdih pen je pravzaprav vsota toplotne prevodnosti celičnega plina (λ_g), toplotne prevodnosti plastične matrice (λ_s), prispevka, ki je posledica toplotnega toka sevanja znotraj pene (λ_r), in konvekcije znotraj zaprtih celic. V primeru trde PUR pene, kjer so premeri celic zelo majhni, je konvekcija zanemarljiva. Zato lahko zapišemo:

$$\lambda_{ef} = \lambda_g + \lambda_s + \lambda_r \quad (1)$$

Schuetz in Glicksman¹¹ sta postavila geometrijski model strukture pene, ki omogoča določitev izraza za efektivno toplotno prevodnost.

$$\lambda_{ef} = \lambda_g + \left(\frac{2}{3} - \frac{f_s}{3} \right) (1 - \delta) \lambda_s + \frac{16\sigma T_m^3}{3a_k} \quad (2)$$

Pri tem so f_s delež polimera v nosilnih vozliščnih segmentih celic, δ poroznost (delež celičnega plina), a_k srednji ekstinkcijski

koefficient, T_m srednja aritmetična temperatura in σ Stefan-Boltzmannova konstanta. Enačba (2) predstavlja dejansko kompromis med kompleksnostjo opisovanja prenosa toplote v peni in natančnostjo izračuna. Prispevki λ_g , λ_s in λ_r namreč izključujejo drug drugega. Zato je potrebno najti kompromisno optimalno rešitev. Vendar pa je kljub vsemu enačba (2) dovolj natančna za ocenitev efektivne toplotne prevodnosti trde PUR pene.

Da bi zmanjšali delež sevanja λ_r , so dodajali v PUR peno nizko prevodne delce, prevlečene z grafitom¹³. Takšni dodatki so zmanjšali vpliv sevanja, ne da bi se pri tem povečala prevodnost trdne faze.

Toplotna prevodnost trdih PUR pen se s časom spreminja zaradi staranja pene. To dejstvo je posledica difuzije molekul zraka v celice pene, kjer postopoma zamenjujejo molekule freona, ki difundirajo iz pene. Plinske molekule zraka difundirajo približno 20-krat hitreje v peno kot difundirajo freoni iz nje¹⁴. Raziskave so pokazale, da na staranje pene najbolj vplivajo gostota pene, oblika celic in prepustnost polimerne matrice¹⁵.

Vidimo, da je na področju inženiringa trdih PUR pen opravljenih veliko raziskav, kar vodi k zagotavljanju večje kakovosti takšnih izolacijskih materialov. Dejstvo je, da se povpraševanje po takšnih materialih v prihodnosti ne bo zmanjšalo, nasprotno, glede na energetske situacije bo interes kvečjemu večji. Inženiring toplotnoizolacijskih materialov pomeni pravzaprav prvo stopnjo pri optimizaciji le-teh, ki se mu v naslednjih fazah pridružijo še pravilna izbira materiala in določitev debeline izolacijskega sloja. Prej opisane raziskave so pomembne tudi zaradi tega, ker je pričakovati, da bodo trenutno uporabljeni freoni postali sčasoma v celoti prepovedani zaradi škodljivih vplivov v zemeljski atmosferi. V svetu potekajo tudi na tem področju številne raziskave, da bi našli zanje ustrezen substitut¹⁶⁻¹⁸. Najperspektivnejši substituti so na primer CHClFCF₃, CF₃CH₂F, CO₂, pentan idr.

Za reševanje problematike odpadkov trdih PUR pen je primeren postopek alkoholize oziroma glikolize, ki sodi v skupino postopkov kemijskega recikliranja odpadkov polimernih materialov¹⁹. Obstaja množica publikacij in patentov, ki obravnavajo alkoholizo odpadkov poliuretanov, pri čemer so spoznanja uresničili tudi v praksi. Naprave za alkoholizo obratujejo v ZDA, Franciji, Italiji in Nemčiji.

Podjetje ESO iz Velenja, ki ima že dolgo izkušnje pri razvijanju ekoloških programov, z najnovejšim projektom omogoča recikliranje freonov, če so le-ti bili uporabljeni kot penilec za proizvodnjo trdih PUR pen²⁰.

5. Ekonomična debelina izolacije

Zadnja stopnja pri optimiranju toplotnih izolacij je določitev debeline izolacijskega sloja. Izolacija v končni fazi pomeni določeno naložbo. Medtem ko z večanjem debeline izolacije znižujemo toplotne izgube, povečujemo višino naložbe v izolacijski material. Potrebno je torej poiskati minimum vsote obeh stroškovnih komponent. V ta namen obstajajo nekatere grafične in analitične metode^{21,22}. Določitev ekonomične debeline ni enostavna, saj nanjo vpliva vsaj dvajset neodvisnih spremenljivk, kar zahteva določene poenostavitve.

Čeprav je določitev ekonomične debeline izolacije lahko zamudno delo, pa je nujna vsaj približna določitev, saj le-ta pogojuje ugodno naložbo. Pri določevanju ekonomične debeline izolacije je včasih potrebno vključiti tudi numerične metode, še posebej, če gre za kompleksne oblike (kot na primer

pri izolaciji ventilov, prirobnic ipd)²². Potrebno je tudi paziti, da je presežena t.i. kritična debelina izolacije, kjer je toplotni tok maksimalen.

6. Zaključki

Kot je razvidno iz prispevka, je za uspešno izoliranje potrebno upoštevati različne dejavnike. K izbiri ustreznega in kakovostnega izolacijskega materiala moramo pristopiti sistematično in natančno. Optimizacija strukture toplotnoizolacijskega materiala v smislu zniževanja vrednosti toplotne prevodnosti in ekološke neoporečnosti je problem, s katerim se soočajo proizvajalci. Določitev ekonomične debeline izolacijskega sloja pa je pomembna z vidika ekonomičnosti naložbe v izoliranje. Skrbno moramo opraviti tudi montažo in vzdrževanje. Predvsem moramo vedeti, da je izoliranje naložba, ki se lahko hitro povrne. Ostaja pa dejstvo, da bodo tudi na tem področju vedno večje veljavo dobivali ekološko neoporečni materiali.

7. Literatura

- ¹ M. R. Harrison, C. M. Pelanne: Chem. Eng. 19, 1977, 62
² S. D. Probert, S. Giani: Applied Energy 2, 1976, 83
³ W. C. Turner: Energy Management Handbook, Ch.15, John Wiley and Sons, New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore 1982
⁴ J. Fricke, M. C. Arduini-Schuster, D. Büttner, H. P. Ebert, U. Heinmann, J. Hetfleisch, E. Hümmer, J. Kuhn, X. Lu: Thermal Conductivity 21, Ed. by C. J. Cremer, H. A. Fine, Plenum Press New York-London 1990
⁵ Mark, Bikales, Overberger, Menges: Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Vol. 3, John Wiley and Sons, New York-Chichester-Brisbane 1985
⁶ M. Zagorec: Polimeri 1, 1980, 59
⁷ G. Bocev, A. Ergič, G. Jurković: Polimeri 9, 1988, 323
⁸ Tehnično-informativni material proizvajalcev: TIM Laško, Nafta Lendava, Standard Operativa Ljubljana, Plama Podgrad, Krka-Novoterm Novo Mesto, Termika Ljubljana, ZRMK Ljubljana
⁹ Wen-Jei Yang, N. Zhang: Introducing the Next Generation in Insulation, Transport Phenomena in Thermal Engineering Vol.2, Proceedings of 6th ISTP, Seoul, May 1993; Begell House Inc. Publishers, New York-Wallingford, 1993, 1489
¹⁰ R. J. J. Williams, C. M. Aldao: Polym. Eng. Sci. 23, 1983, 293
¹¹ M. A. Schuetz, L. R. Glicksman: J. Cell. Plastics, March-April, 1984, 114
¹² A. Cunningham, D. J. Sparrow: Cellular Polymers 5, 1986, 327
¹³ L. R. Glicksman, M. Torpey, A. Marge: J. Cell. Plastics 28, 1992, 571
¹⁴ A. G. Ostrogorsky, L. R. Glicksman, D. W. Reitz: Int. J. Heat Mass Transfer 29, 1986, 1169
¹⁵ D. W. Reitz, M. A. Schuetz, L. R. Glicksman: J. Cell. Plastics, March-April, 1984, 104
¹⁶ B. R. Decaire, H. T. Pham, R. G. Richard, I. R. Shakland: J. Cell. Plastics 30, 1994, 11-33
¹⁷ B. R. Fellows, R. G. Richard, I. R. Shakland: Thermal Conductivity Data for some Environmentally Acceptable Fluorocarbons, Thermal Conductivity 21, Ed. by C. J. Cremer, H. A. Fine, Plenum Press, New York-London, 1990, 311
¹⁸ M. Mann, B. Phillips: Kunststoffe 79, 1989, 328
¹⁹ G. Menges, W. Michaeli, M. Bittner: Recycling von Kunststoffen, Carl Hanser Verlag, München-Wien 1992
²⁰ R. Finka: Gospodarjenje z odpadki, september, 1992, 20
²¹ M. Matić: Energija i ekonomija, Školska knjiga, Zagreb, 1993
²² G. Radonjič: Optimalna poliuretanska izolacija ventilov, Magistrska naloga, Tehniška fakulteta Maribor, november, 1992