

OSOBINE AEROGELA I MOGUĆNOST PRIMENE U ZAŠTITNOJ ODEĆI VATROGASACA

Saša Spaić¹

Rezime: U radu su prikazane osobine, vrste i način dobijanja aerogelova, posebno silikatnih aerogelova. Hidrofobnost, mala gustina i izuzetno niska toplotna provodljivost su osobine zbog kojih se već decenijama primenjuju u svemirskim letelicama, vazduhoplovnoj industriji, vojnoj industriji, elektronici. Iznenadujuće, ali istraživanja primene aerogelova u zaštitnoj odeći vatrogasaca zastupljenija su tek u novije vreme. Glavni razlozi su, verovatno, visoka cena ovih materijala, kao i izražena krtoš. Ipak, poslednjih godina raste broj radova koji se bave ovom problematikom. Najčešće se radi o inkorporaciji silikatnih aerogelova u poroznu strukturu unutrašnjeg termoizolacionog sloja zaštitnog odeli vatrogasaca i uporednom testiranju sa netretiranim vatrogasnim odelima koja su u primeni (ili uzorcima laminiranih tkanina koje se koriste za njihovu izradu). Aerogelovima se dodaju i drugi materijali, izraženih toplotnoizolujućih karakteristika, sa ciljem da se postigne pojačanje željenog efekta. Rezultati istraživanja su ohrabrujući, u smislu dobijanja vatrootporne odeće niže mase i boljih termoizolujućih karakteristika u odnosu na postojeću.

Ključne reči: silicijum-dioksidni aerogelovi, odeli za zaštitu od požara

PROPERTIES OF AEROGEL AND THE POSSIBILITY OF APPLICATION IN THE PROTECTIVE CLOTHES OF FIREFIGHTERS

Abstract: The paper presents the properties, types and method of obtaining aerogels, especially silicate aerogels. Hydrophobicity, low density and extremely low thermal conductivity are properties that have been used for decades in space vehicles, the aviation industry, the military industry, and electronics. Surprisingly, research into the use of aerogels in protective clothing for firefighters has only recently become more common. The main reasons are, probably, the high price of these materials, as well as their pronounced fragility. However, in recent years, the number of works dealing with this issue has been growing. Most often, it is about the incorporation of silicate aerogels into the porous structure of the internal thermal insulation layer of firemen's protective suit and comparative testing with untreated firefighter suits that are in use (or samples of laminated fabrics used for their production). Other materials with pronounced heat insulating characteristics are added to aerogels, with the aim of achieving the enhancement of the desired effect. The results of the research are encouraging, in terms of obtaining fire resistant clothing of lower mass and better thermal insulating characteristics compared to the existing one.

Key words: silica aerogels, fire protection suits

1. UVOD

Aerogel je najlakši (najmanje gustine) materijal u čvrstom stanju na svetu. Veoma je krto i lomljiv tako da kada se na parče ovog materijala deluje pritiskom prsta on se raspada na hiljade delića pretvarajući se u prašinu. Kada se u obliku prašine aplicira na bilo koju površinu, uključujući ljudsko telo, ona postaje 100% hidrofobna i sasvim vodootporna. Može se proizvesti tako da bude čak i hidrofilan, upijajući do 25 puta veću masu vode od sopstvene, pa takav nalazi primenu u zaštiti muzejskih eksponata i lekova od vlage. Prilikom proizvodnje može se formirati u različitim oblicima, a prilikom ispuštanja na čvrstu podlogu proizvodi zvuk sličan zvuku prazne limene konzerve za pivo i sokove. To je čvrsti materijal najniže termičke konduktivnosti i najbolji termoizolator na svetu, od temperatura tečnog azota (-196°C), do temperature plamena gasnog plamenika (1500°C). NASA (National Aeronautics and Space Administration of USA) ga koristi za izolaciju svemirskih letelica. Sastoji se od 99% vazduha i 1% amorfnog silicijum-dioksida, ili slično, zavisno od svrhe za koju se proizvodi. Glavno ograničenje kod šire primene ovog materijala za izolaciju je njegova krtoš i visoka cena (proces i materijali koji se koriste u proizvodnji čine ga trenutno skupljim od zlata). Rešenje, za određene namene, je pronađeno u kombinovanju silicijum-dioksidnih penastih materijala zatvorenih

¹Doktor hemijskih nauka, Visoka tehnička škola strukovnih studija u Novom Sadu, Školska 1, Novi Sad, spaic@vtsns.edu.rs

ćelija sa aerogelom. Pore aerogela su veličine 2-50 nm, pa se prilikom izlaganja vidljivoj svetlosti (380-750 nm), zraci kraće talasne dužine (plavo, ljubičasto, UV) delimično rasipaju dajući mu mutno-plavkasti izgled, dok je za IC-zračenje potpuno transparentan [1], [2], [3], [4].

Aerogel izolacija se koristi u vazduhoplovnoj industriji dugi niz godina, često u obliku debelih slojeva aerogela suspendovanog u strukturu debele tkanine. Nedavno su kompanije počele da razmatraju upotrebu aerogela u elektronici. Većina izolacija od aerogela ima oblik aerogela od silicijum-dioksida nanesenog u ili na podlogu, kao što je netkani materijal. Ovo obično dovodi do neravnomerne raspodele aerogela po celoj strukturi, što može izazvati varijacije u toplotnoj provodljivosti izolacije aerogela, kao i osipanje čestica aerogela, pošto aerogel nije vezan za strukturu [4].

Materijal je prvi put sintetisan krajem treće decenije dvadesetog veka, od strane američkih profesora hemije Semjuela Kistlera i Čarlsa Lernda [3], [5]. Suština rada se sastojala u tome da se iz gela izdvoji rastvarač i zameni sa vazduhom. To nije bilo moguće izvesti prostim isparavanjem rastvarača, jer bi se tom prilikom usled kontrakcija uništila porozna struktura gela (skela, kostur, skelet osnove), već je gel osušen pri superkritičnim uslovima. Prvo je napravljen gel u vodenom rastvoru, potom je voda zamenjena sa etanolom, koji je potpuno mešljiv s vodom pri čemu ne rastvara gel strukturu, na kraju je etanol uklonjen superkritičnim sušenjem, jer ima povoljnije kritične parametre od vode (etanol: $t_c=243^\circ\text{C}$, $p_c=64$ bar; voda: $t_c=374^\circ\text{C}$, $p_c=220$ bar; [6]). Superkritično sušenje je izvedeno u sledećim fazama: dostizanje kritičnih temperature i pritiska u zatvorenom autoklavu - nema razlike između gasovite i tečne faze rastvarača, spuštanje pritiska pri temperaturi višoj od kritične - rastvarač napušta gel u vidu gasa, uklanjanje aerogela iz toplotnog izvora, provera osobina proizvedenog aerogela [3], [5].

Postoje tri najčešća tipa aerogelova: silicijum-dioksidni, ugljenični i metal-oksidni. Silicijum-dioksidni aerogelovi su najviše istraživani i praktično primenjivani. Ugljenični aerogelovi su crni i dodirrom podsećaju na ugalj. Imaju veliku specifičnu površinu i električnu provodljivost. Metal-oksidni aerogelovi su sačinjeni od metalnih-oksida. Koriste se kao katalizatori za hemijske reakcije, za proizvodnju eksploziva i ugljeničnih nanocevi. Uglavnom imaju izraženu obojenost [3].

Na odlične karakteristike toplotne izolacije aerogela utiče njihova nanoporozna struktura koja predstavlja barijeru sudaru molekula gasa. Ovi molekularni sudari dovode do prenosa toplote u mirnom gasu. Brži (topliji) pokretni molekuli se sudaraju sa sporijim (hladnijim) pokretnim molekulima i prenose deo svoje toplotne energije. Ovaj proces sudara se može sprečiti barijerom tako da se molekuli neće sudarati jedan sa drugim, već će se sudarati sa barijerom od koje se odbijaju i stoga zadržavaju svoju toplotnu energiju. Prosečna udaljenost koju molekul gasa pređe pre nego što se sudari sa drugim molekulom se definiše kao srednji slobodni put. Da bi se sprečili ovi sudari, barijere treba razdvojiti rastojanjem manjim od srednjeg slobodnog puta. Srednja slobodna putanja molekula gasa u aerogelu je manja nego u slobodnom prostoru. Kao rezultat usporenog kretanja molekula gasa u aerogelu, toplotna provodljivost gasa u aerogelu je oko polovine manja od gasa u slobodnom prostoru. Aerogelovi su postojali na temperaturama do 1650°C [7].

Zbog porozne strukture, opšte je prihvaćeno da prenos toplote u silicijum-dioksidnim aerogelovima uključuje provođenje toplote preko čvrstog skeleta osnove, provođenje toplote kroz gasnu fazu i toplotno zračenje. Doprinos konvekcije gasa u silicijum-dioksidnim aerogelovima se uvek zanemaruje jer ekstremno male pore (obično na nanometarskoj skali) potpuno potiskuju proces konvektionog prenosa toplote. Dakle, prenos toplote u silicijum-dioksidnim aerogelovima pokazuje izražen efekat veličine. Osim toga, aditivi u mikronskoj skali kao što su ojačana vlakna i sredstva za zamućenje će uticati na provodljivost toplote preko čvrstog skeleta osnove i radijativnog prenosa toplote, utičući tako na efektivnu toplotnu provodljivost aerogel kompozita. Silicijum-dioksidni aerogelovi pokazuju odlične performanse toplotne izolacije na niskim temperaturama; međutim, prenos toplote zračenja u silicijum-dioksidnim aerogelovima značajno pogoršava njihov izolacioni učinak na visokim temperaturama. Na primer, kada se temperatura poveća sa 300 K na 600 K, toplotna provodljivost čistog silicijum-dioksidnog aerogela sa gustinom od 100 kgm^{-3} može porasti sa 0,008 na $0,143\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ usled naglog povećanja prenosa toplote toplotnog zračenja. Da bi se smanjio prenos toplote zračenjem na visokoj temperaturi, sredstva za zamućenje koja bi mogla da apsorbuju ili

raspršuju elektromagnetno zračenje, kao što su TiO_2 čestice, čestice SiC , čestice ugljenika i listovi grafena, uvek se dopiraju u silicijum-dioksidne aerogelove [8].

Vatrogasci su tokom operacija gašenja požara izloženi visokim temperaturama i zračenju toplote [9]. Postavlja se pitanje da li bi prednje opisane termoizolacione karakteristike silicijum-dioksidnih aerogelova mogle da se primene za poboljšanje karakteristika zaštitne odeće vatrogasaca.

2. MOGUĆNOST PRIMENE SILICIJUM-DIOKSIDNIH AEROGELOVA U ZAŠTITNOJ ODEĆI VATROGASACA

Odelo za zaštitu od požara su neophodna oprema za vatrogasce. Ona trebaju ne samo da odolevaju raznim toplotnim opasnostima već i da smanjuju stepen akumulacije toplote u ljudskoj koži, dajući vatrogascima vremena da reaguju i izbegnu ili smanje opekotine kože. Da bi se osiguralo da su vatrogasci zaštićeni od spoljnog toplotnog fluksa i plamena, tradicionalna protivpožarna odeća obično ima višeslojnu strukturu, uglavnom sastavljenu od spoljašnjeg sloja, vodootpornog prozračnog (dišljivog) sloja i termoizolacionog sloja. Za spoljni sloj se obično biraju vlakana sa prirodnim usporivačima plamena da bi se izbeglo oštećenje kože tela toplim zračenjem ili plamenom, kao što je npr. vatrootporni pamuk i slični materijali. Vodootporni dišljivi sloj, kako i ime sugeriše, ima vodootporna prozračna funkciju. Politetrafluoroetilenski (PTFE, poznatiji kao teflon) film je najčešće primenjivani vodootporni prozračni materijal. Termoizolacioni sloj štiti ljudsko telo blokirajući dejstvo toplote iz okoline i koristi vlakna otporna na plamen i njihove mešavine (kao što su aramidna vlakna) za izolaciju od toplote [9].

Razvoj vatrogasne odeće smanjene mase stalni je izazov, ali bez ugrožavanja njenih odličnih izolacionih performansi. Nažalost, višeslojni dizajn vatrootporne odeće ima za posledicu povećanje njene mase i ograničenje pokretljivosti. Dakle, hitan je zahtev razviti novu vrstu lagane tkanine sa pouzdanim funkcijama usporivača plamena i toplotne zaštite, koja može efikasno smanjiti termički stres i bolje obezbediti vatrogasce u vrelim i vlažnim sredinama. Aerogel je trenutno najlakši materijal, sa najnižom toplotnom provodljivošću. Ukoliko se aerogel može kombinovati sa tkaninama, dobiće se vatrootporna odeća sa boljom termičkom zaštitom. Silicijum-dioksidni (silikatni) aerogel je odličan izolacioni materijal ($\lambda < 0,02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) [9].

Popunjavanjem praznina između vlakana u strukturi, aerogelovi se mešaju (kombinuju) sa poroznim tkaninama (uključujući tkane i netkane tkanine), što se smatra jednostavnim i efikasnim metodom za poboljšanje toplotne izolacije i mehaničkih performansi materijala. Netkane tkanine se uglavnom sastoje od pojedinačnih vlakana ili vlaknastih mreža, uglavnom listova, mreža ili šipki od upletenih vlakana, orijentisanih ili nasumično orijentisanih, spojenih različitim metodama (mehaničkim, termičkim i hemijskim). Jedinstvene strukturne karakteristike netkanih materijala daju im brojne prednosti, kao što su izražena elastičnost, velika otpornost na kompresiju i odlične performanse toplotne izolacije. Pored toga, netkane tkanine imaju visoku poroznost, malu masu i jaku propusnost, koja se može iskoristiti za razvoj lagane odeće sa dovoljnom prozračnošću. Stoga se netkani tekstili široko primenjuju u oblastima zaštitne odeće [9].

Aramidna vlakna i njihovi netkani tekstili sa odličnim performansama pokazali su veliki potencijal u oblastima kao što su vojna industrija, nova energetska vozila i 5G komunikacija. Prema različitim hemijskim strukturama, mogu se podeliti na para-aramid (1414) [10] i meta-aramid (1313) [11]. Para-aramidna vlakna imaju odličnu otpornost na habanje, otpornost na sečenje i otpornost na metke i široko se koriste u sigurnosnoj zaštiti od metaka, zameni materijala izraženog trenja i drugim oblastima. U poređenju sa para-aramidnim vlaknima, meta-aramidna vlakna imaju nisku kristaličnost, nizak modul i veliko izduženje, a imaju odličnu otpornost na plamen, visoku temperaturnu otpornost, izolacione karakteristike i hemijsku stabilnost, kao i prijatnost prilikom rukovanja i nošenja ovakvih tkanina u pogledu amortizovanja vreline i vlažnosti. Aramid 1313 ima veliki potencijal u domenu vatrootpornih i visokotemperaturnih izolacija [9].

Bez obzira na intenzivnu upotrebu aerogela u raznim oblastima, primena aerogela u odeći vatrogasaca nije istraživana tako intenzivno. Jin et al. su pripremili prototip zaštitne odeće za vatrogasce koristeći kompozitnu toplotnu barijeru od aerogela, i uporedili termičke zaštitne

performanse odeće vatrogasaca tretirane aerogelom i postojeću odeću za vatrogasce, koristeći instrumentalizovanu lutku. Otkrili su da se termičke zaštitne performanse povećavaju srazmerno količini aerogela sadržanog u tkaninama i da razvijena odeća od aerogela pokazuje izraženije termičke zaštitne performanse od postojeće odeće za vatrogasce u testovima na instrumentalizovanoj lutki. Njihovi rezultati sugerišu da je primena aerogela u odeći vatrogasaca moguća [12].

Nove aerogel silikatne/aramidne kompozitne netkane tkanine (SiO_2/AF) Xue et al. su pripremili kombinovanjem AF - aramidne tkanine (aramid fabric) i SiO_2 aerogela, korišćenjem sol-gel metode i tehnologije oblaganja potapanjem/natapanjem. Poliiimidne (PI) i zeolit imidazolatne strukture-L (ZIF-L) korišćene su kao materijali za ojačanje izolacije za proizvodnju četiri vrste laminiranih (slojevitih) tkanina, naime, spoljni sloj + vodootporni prozračni sloj + različiti izolacioni slojevi (AF, SiO_2/AF , 0,8 % $\text{SiO}_2/\text{AF}/\text{PI}$ i 0,12 % $\text{SiO}_2/\text{AF}/\text{ZIF-L}$, respektivno). Pored toga, kao kontrolna grupa uzeta je vatrogasna uniforma. Rezultati su pokazali da su performanse izolacije kompozitnih tkanina bile bolje od onih iz kontrolne grupe. A uzorak spoljni sloj + vodootporni prozračni sloj + 0,12 % $\text{SiO}_2/\text{AF}/\text{ZIF-L}$ laminirana tkanina, je pokazao najnižu toplotnu provodljivost ($0,038 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), najbolje performanse zaštite od toplotnog zračenja ($246,04 \text{ kWm}^{-2}$) i odličnu otpornost na habanje (stopa gubitka mase 0,46%). Ovi rezultati su otvorili mogućnost za široku primenu SiO_2/AF kompozita u oblasti odeće otporne na toplotu [9]. Poliiimidne (PI) [13] i zeolit imidazolatne strukture-L (ZIF-L) [14], su u navedenom istraživanju korišćene zbog svojih izuzetnih termičkih karakteristika.

3. ZAKLJUČAK

Silikatni aerogelova poznati su već skoro sto godine. Zbog svojih izuzetnih osobina (hidrofobnost, mala gustina i izuzetno niska toplotna provodljivost) našli su primenu u mnogim naprednim tehnologijama. Osobina niske termičke konduktivnosti i praktično zanemarljive konvektivnosti pripisuju se nanoporoznoj strukturi, sa veličinama pora koje su manje od srednjeg slobodnog puta molekula gasa (vazduha). Radijativni prenos toplote kroz ove aerogelove nije zanemarljiv, posebno na visokim temperaturama, ali se može smanjiti dopiranjem zamućujućih materija (TiO_2 čestice, čestice SiC, čestice ugljenika i listovi grafena), koje mogu da apsorbuju ili raspršuju upadno elektromagnetno zračenje.

Dodatkom aerogela, u izolacioni sloj zaštitne odeće vatrogasaca, termičke zaštitne performanse povećavaju se srazmerno količini aerogela sadržanog u tkaninama, a razvijena odeća od aerogela pokazuje izraženije termičke zaštitne performanse od postojeće odeće za vatrogasce u testovima na instrumentalizovanoj lutki. Termootporne poliiimidne (PI) i zeolit imidazolatne strukture-L (ZIF-L), takođe su kombinovane sa silikatnim aerogelovima u termoizolacionom sloju uzoraka laminiranih tkanina koje se koriste za izradu zaštitne odeće vatrogasaca. Uzorak spoljni sloj + vodootporni prozračni sloj + 0,12 % $\text{SiO}_2/\text{AF}/\text{ZIF-L}$ laminirana tkanina, je pokazao najnižu toplotnu provodljivost ($0,038 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), najbolje performanse zaštite od toplotnog zračenja ($246,04 \text{ kWm}^{-2}$) i odličnu otpornost na habanje (stopa gubitka mase 0,46%). Ovi rezultati su otvorili mogućnost za široku primenu SiO_2/AF kompozita u oblasti odeće otporne na toplotu.

4. LITERATURA

- [1] <https://youtu.be/Qa-tTMJ8fkA?si=EQdfyzqwiLQ3mELY>, Mart 2025.
- [2] <https://www.iqsdirectory.com/articles/foam-fabricating/closed-cell-foam.html>, Mart 2025.
- [3] <https://science.howstuffworks.com/aerogel.htm>, Mart 2025.
- [4] <https://www.gore.com/products/thermal-aerogel>, Mart 2025.
- [5] Kistler S.S.: *Coherent Expanded Aerogels and Jellies*, Nature 127(3211): 741, 1931, <https://www.nature.com/articles/127741a0#preview>, Mart 2025.
- [6] Radošević N.: *Hemijsko-tehnološki priručnik - knjiga 1*, Hemijski i fizički podaci i veličine, Rad, Beograd, 1987.
- [7] Goud V.S.: *Aerogel and its Applications in Textiles*, The Indian Textile Journal: 90-99, 2011, https://www.researchgate.net/publication/257603214_Aerogel_and_its_Applications_in_Textiles, Mart 2025.

- [8] Zhu C.Y., Xu H.B., Zhao X.P., Gong L., Li Z.Y.: *A review on heat transfer in nanoporous silica aerogel insulation materials and its modeling*, Energy Storage and Saving 1: 217-240, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.003>
- [9] Xue R., Chang Y., Liu F.: *Fabrication and performance evaluation of aramid laminated fabrics incorporated with silica composite aerogel for protective clothing*, Ceramics International 50(7,A): 10348-10354, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.12.346>
- [10] <http://www.xintiancheng.com/En/ProductView.asp?ID=27> , Mart 2025.
- [11] <http://www.xintiancheng.com/En/ProductView.asp?ID=26> , Mart 2025.
- [12] Jin L., Hong K., Yoon K.: *Effect of Aerogel on Thermal Protective Performance of Firefighter Clothing*, Journal of Fiber Bioengineering and Informatics 6(3): 315-324, 2013, doi:10.3993/jfbi09201309
- [13] <https://web.archive.org/web/20200320223857/> , http://proofresearchacd.com/wp-content/uploads/2015/10/PROOF-ACD_data_sheet_900HT_update_10-16-15v2.pdf , Mart 2025.
- [14] Kouser S., Hezam A., Khadri M.J.N., Khanum S.A.: *A review on zeolite imidazole frameworks: synthesis, properties, and applications*, Journal of Porous Materials 29: 663–681, 2022, <https://doi.org/10.1007/s10934-021-01184-z>