

SILIKAGELNING KIMYOVIY TARKIBI, TUZILISHI VA FIZIK-
KIMYOVIY XOSSALARI

Tursunov S.A. *Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti*
“Kimyo muhandisligi” kafedrası tayanch doktoranti.

sarvarbektursunov3226@mail.ru

Xodjamkulov S.Z. *Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar*
universiteti “Kimyo muhandisligi” kafedrası doktori.

Karimov M.U. *Toshkent kimyo texnologiyalari ilmiy-tadqiqot instituti.*

Texnika fanlari doktori, professor,

masudkarimov27@gmail.com

ANNOTATSIYA

Mazkur tadqiqot ishida silikogelning olinishi, fizik-kimyoviy xossalari, sintez usullari hamda gazlarni adsorbsiyalash jarayonlaridagi qo'llanilishi o'rganilgan. Silikogelning yuqori solishtirma sirt maydoni, rivojlangan g'ovak tuzilishi va adsorbsion xossalari uni gazlarni tozalash hamda karbonat angidridni ajratib olish jarayonlari uchun istiqbolli material sifatida tavsiflaydi.

Tadqiqotda silikogel sintezining sol-gel, gidrotermal, cho'ktirish va sanoat chiqindilaridan foydalanishga asoslangan usullari tahlil qilinib, ularning afzallik va kamchiliklari qiyosiy baholangan. Sol-gel jarayonining kinetik va strukturaviy nazorati, pH muhitining ta'siri hamda gidroliz va polikondensatsiya reaksiyalarining material xossalari ta'siri yoritilgan. Shuningdek, silika aerogellari va yuqori sirt maydoniga ega gibril materiallarning sorbsion xususiyatlari o'rganilgan.

Olingan natijalar silikogel va uning modifikatsiyalangan shakllari karbonat angidridni adsorbsiyalashda yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko'rsatadi. Tadqiqot natijalari CO₂ gazini tutib qolish va qayta ishlash uchun yangi avlod sorbentlarini yaratishda ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: silikogel, adsorbsiya, karbonat angidrid, sorbent, sol-gel, g'ovak tuzilma, aerogel, modifikatsiyalangan silikogel, CO₂ yutilishi.

KRIRISH

Silikogel o'zining rivojlangan g'ovak tuzilishi, yuqori solishtirma sirt maydoni va adsorbsion xossalari tufayli zamonaviy fan va texnikaning muhim materiallaridan biri hisoblanadi. U namlikni yutuvchi modda, adsorbent, katalizator va katalizator tashuvchisi sifatida keng qo'llaniladi. Tuzilishi jihatidan silikogel kremniy dioksidining uch o'lchamli g'ovak tarmog'idan tashkil topgan bo'lib, yuqori adsorbsion sig'imi bilan ajralib turadi.

Silikogelning fizik-kimyoviy xossalari uning sintez sharoitlariga bog'liq bo'lib, ushbu omillar orqali materialning g'ovakligi, sirt maydoni va sorbsion samaradorligini

boshqarish mumkin. Ayniqsa, modifikatsiyalangan silikogellar gazlarni ajratish va tozalash jarayonlarida yuqori samaradorlikni namoyon etadi.

Bugungi kunda silikogel kimyo, neft-gaz, energetika, farmatsevtika va ekologiya sohalarida keng qo'llanilib, gazlarni tozalash, karbonat angidridni adsorbsiyalash va namlikni nazorat qilish kabi jarayonlarda muhim ahamiyat kasb etadi. Shu sababli yuqori sorbsion xossalarga ega yangi turdagi silikogellarni yaratish va ularning xossalarini o'rganish dolzarb ilmiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi.[1]

Kristall kvartsni amorf silika geliga aylantirishning yangi yondashuvi taklif qilindi, bu an'anaviy qaytarilish bosqichlariga ehtiyoj sezmasdan alkoksisilanlarni to'g'ridan-to'g'ri sintez qilish imkonini beradi. Ushbu usulda kvarts qayta ishlanadigan NH_4F bilan reaksiyaga kirishib, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ hosil qiladi, keyinchalik u NH_4OH yordamida cho'ktiriladi, so'ngra filtrlash va quritish amalga oshiriladi. Olingan silika geli 200°C da spirt bilan to'g'ridan-to'g'ri reaksiyaga kirishib, alkoksisilanlarni hosil qilishi mumkin, bunda minimal reagent yo'qotilishi va energiya sarfi asosiy talab hisoblanadi [2].

Boshqa bir yondashuvda, alyuminiy ftorid ishlab chiqarish jarayonida hosil bo'lgan chiqindi silika geli LTA tipidagi zeolitning gidrotermal sintezi uchun kashshof sifatida ishlatilgan. Sulfat kislota bilan tozalashdan so'ng, natriy silikat tayyorlandi va 10 mkm gacha bo'lgan kubik zarrachalarga va yuqori ion almashinuv qobiliyatiga ega bir fazali LTA zeolitini olish uchun ishlatildi.

Sanoat silika geli 95°C da uzluksiz aralashtirish ostida 1 og'irlik% sulfat kislota yordamida kislota bilan ishlov berish orqali ham tozalanishi mumkin. Keyin material filtrlanadi, neytral pH darajasiga qadar yuviladi va yuqori tozalikdagi amorf silika olish uchun 100°C dan yuqori haroratda kamida 3 soat quritiladi. [3].

An'anaviy ravishda, silika geli natriy silikat eritmasini kislotalash orqali sintezlanadi, bu esa gidrogel hosil bo'lishiga olib keladi. Keyinchalik bu cho'kma silika kserogeli hosil qilish uchun yuviladi va quritiladi. Yuqori g'ovakliligi va kuchli namlikni adsorbsiyalash qobiliyati tufayli silika geli turli sanoat jarayonlarida keng qo'llaniladi [4].

Sol-gel usuli SiO_2 sintezining yana bir samarali usuli bo'lib, unda material $100\text{--}150^\circ\text{C}$ da quritilib, Si–O–Si tarmoq tuzilishini hosil qiladi. Bunday silika gel qoplamalari olovga chidamli matolarga muvaffaqiyatli qo'llanilgan bo'lib, issiqlik o'tkazuvchanligini kamaytiradigan, ko'mir hosil bo'lishini kuchaytiradigan va olovga chidamlilik va issiqlik barqarorligini yaxshilaydigan issiqlikdan himoya qiluvchi qatlam hosil qiladi [5].

Quyidagi ikki tadqiqotchi M.S. Mikhailova va N.A. Medvedeva boshqalar tomonidan olib borilgan tadqiqot ishlari shuni ko'rsatdiki, bunda alyuminiy ftorid

ishlab chiqarish chiqindilaridan olingan silika geli zeolit NaA sintezi uchun birgalikda tozalash va gidrotermal jarayon orqali qo'llanilganda, olingan material xossasi yuqori ion almashinuv qobiliyatiga va kuchli suv bug'ining adsorbsiya xususiyatlariga ega ekanligi aniqlashdi. bu usulning chiqindilarni qayta ishlash va sanoat uchun qimmatli materiallar ishlab chiqarish salohiyatini ta'kidlaydi [6].

Kremniy sintezi usullari va materiallarining qiyosiy tahlili

An'anaviy tavsifiy hisobotlardan farqli o'laroq, kremniy sintezi usullarini tanqidiy taqqoslash strukturaviy xususiyatlar, energiya sarfi, masshtablashuvchanlik va qo'llanilish potentsialida sezilarli farqlarni ochib beradi.

Sol-gel usuli g'ovaklikni, sirt maydonini va kimyoviy funktsionallikni aniq nazorat qilish qobiliyati tufayli eng keng qo'llaniladigan yondashuv hisoblanadi. pH, prekursor turi (masalan, TEOS) va gidroliz/kondensatsiya tezligi kabi parametrlarni sozlash orqali moslashtirilgan xususiyatlarga ega materiallarni olish mumkin. Biroq, bu usulning cheklovlari bor, jumladan, uzoq ishlov berish vaqti, sintez sharoitlariga sezgirlik va qoldiq gidroksil guruhlari tufayli strukturaviy nuqsonlarning paydo bo'lishi. Ushbu kamchiliklarga qaramay, sol-geldan olingan materiallar yuqori bir xillikni namoyish etadi va ayniqsa biosensorlar, kataliz va dori yetkazib berish tizimlari kabi ilg'or dasturlar uchun mos keladi.

Aksincha, gidrotermal usul zeolitlar (masalan, LTA va NaA) kabi kristalli va yuqori tartibli materiallarni sintez qilish uchun ko'proq mos keladi. Bu usul kristall tuzilishi va ion almashinuv qobiliyatini yaxshiroq boshqarish imkonini beradi, bu esa uni sanoat adsorbsiyasi va ajratish jarayonlari uchun afzallik beradi. Biroq, odatda yuqori harorat va bosimni talab qiladi, bu esa sol-gel texnikalariga nisbatan energiya sarfini oshiradi va uskunalar talabini murakkablashtiradi.

Natriy silikatning kislotalar bilan reaksiyasini o'z ichiga olgan cho'ktirish usuli soddaligi, arzonligi va masshtablanishi tufayli sanoatda keng qo'llaniladi. Bu yuqori g'ovaklilik va yaxshi adsorbsiya xususiyatlariga ega silika gelini ishlab chiqarish imkonini beradi. Shunga qaramay, sol-gel usullariga nisbatan u g'ovak tuzilishi va zarrachalar bir xilligi ustidan kamroq nazoratni ta'minlaydi, bu esa uni yuqori samarali materiallarda qo'llanilishini cheklaydi.

Ayniqsa, istiqbolli yondashuv - bu kristall kvartsni NH_4F yordamida amorf silika geliga aylantirish, bu an'anaviy qayta tiklash bosqichlariga ehtiyojni yo'q qiladi. Bu usul reagentni qayta ishlash va material yo'qotilishini kamaytirish nuqtai nazaridan foydalidir, energiya sarfi asosiy xarajat omili hisoblanadi. Biroq, uning sanoat masshtablanishi va strukturaviy sozlanishi hali ham qo'shimcha tadqiqotlarni talab qiladi.

Barqarorlik nuqtai nazaridan, chiqindilardan olingan kremniy sintezi (masalan, alyuminiy ftorid ishlab chiqarish yoki biokarbon) aniq ekologik va iqtisodiy foyda keltiradi. Bu usullar xom ashyo xarajatlarini kamaytiradi va chiqindilarni qayta ishlashga hissa qo'shadi. Biroq, ular ko'pincha qo'shimcha tozalash bosqichlarini talab qiladi va tarkibi o'zgaruvchanligidan aziyat chekishi mumkin, bu esa takrorlanuvchanlik va materialning ishlashiga ta'sir qilishi mumkin.

Ilg'or materiallar nuqtai nazaridan, superkritik quritish bilan birgalikda sol-gel orqali sintez qilingan aerogellar eng yuqori o'ziga xos sirt maydoni va eng past zichlikni namoyish etadi, bu ularni issiqlik izolyatsiyasi va adsorbsiya qo'llanilishi uchun ideal qiladi. Biroq, ularning yuqori ishlab chiqarish qiymati va past mexanik mustahkamligi asosiy muammolar bo'lib qolmoqda. Ushbu cheklovlarni bartaraf etish uchun ko'pincha kompozit strategiyalar (masalan, polimer yoki tolali mustahkamlash) talab qilinadi.

Umuman olganda, hech bir sintez usuli universal darajada ustun emas. Tanlov mo'ljallangan qo'llanilishga bog'liq: sol-gel usullari yuqori samarali va funktsional materiallar uchun optimal, kristalli tuzilmalar uchun gidrotermal usullar, keng ko'lamli sanoat ishlab chiqarishi uchun yog'ingarchilik va barqaror rivojlanish uchun chiqindilardan olingan yondashuvlar. Shuning uchun, kelajakdagi tadqiqotlar bir nechta usullarning afzalliklarini birlashtirgan holda ularning cheklovlarini minimallashtiradigan gibrid va optimallashtirilgan sintez strategiyalariga qaratilishi kerak.

Sol-gel jarayonining kinetik va strukturaviy nazorati

Sol-gel jarayoni orqali sintezlangan materiallarning tuzilishi va xususiyatlari gidroliz va polikondensatsiya reaksiyalarining kinetikasi bilan kuchli bog'liq. Xususan, reaksiya muhitining pH qiymati reaksiya tezligini tartibga solishda hal qiluvchi rol o'ynaydi, bu esa o'z navbatida hosil bo'lgan gelning g'ovakliligi va morfologiyasini belgilaydi. Oddiy sharoitlarda odatda donador tuzilmalar hosil bo'ladi, kislotali muhit esa ko'proq chiziqli va kuchsiz o'zaro bog'langan tarmoqlarning rivojlanishiga yordam beradi. Shunga ko'ra, aniq pH nazorati sol-gel texnologiyasi yordamida tayyorlangan kremniy asosidagi materiallarning strukturaviy va funktsional xususiyatlarini moslashtirish uchun asosiy parametrdir.

Bundan tashqari, sol-geldan olingan kremniydagi gidroksil ($-OH$) va alkoksi guruhlarining konsentratsiyasi TEOS gidrolizi va kondensatsiya reaksiyalarining nisbiy tezligi bilan belgilanadi. Gidroliz tezligining oshishi gidroksil guruhlarining yuqori konsentratsiyasiga olib keladi, tezlashtirilgan kondensatsiya esa ularning mavjudligini kamaytiradi. Qoldiq funktsional guruhlarining mavjudligi keyingi issiqlik

bilan ishlov berish paytida strukturaviy nuqsonlarni keltirib chiqarishi mumkin, shu bilan sintez sharoitlarini qat'iy nazorat qilish muhimligini ta'kidlaydi [7].

Bundan tashqari, shaffof kremniy monolitlari va nanostrukturali yupqa plyonkalarining hosil bo'lishi sol-gel kimyosi doirasida o'rganildi. Sol-kserogel o'tishi va kapsulalangan molekulalarning xatti-harakati optik spektroskopiya texnikasi yordamida real vaqt rejimida kuzatildi. Yupqa plyonka ishlab chiqarish, strukturaviy nazorat va maqsadli molekulyar immobilizatsiya uchun turli xil yondashuvlar ham o'rganildi. Olingan natijalar sol-gel jarayonlarining material hosil bo'lish mexanizmlarini chuqurroq tushunish, shuningdek, optik sensorlarni ishlab chiqish va fermentlar kabi biologik faol molekulalarni funktsional holatda kapsulalash uchun salohiyatini namoyish etadi [8].

Silika aerogellari va yuqori o'ziga xos sirt maydoni materiallari

Ushbu tadqiqotda gidrofob silika aerogellari ikki bosqichli sol-gel usuli orqali sintez qilindi va ularning strukturaviy va fizik-kimyoviy xususiyatlari turli analitik usullar yordamida o'rganildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, aerogellarning teksturasi va sorbsiya xususiyatini alkoksid prekursor nisbatini sozlash orqali samarali sozlash mumkin. Olingan materiallar yuqori moy sorbsiya qobiliyati bilan birga juda past namlikni yutish (0–1 g/g) ni ko'rsatdi va 10 daqiqa ichida maksimal 11,5 g/g ga yetdi [9].

Silika-uglerod nanotubasi (CNT) gibrid aerogellari bir bosqichli sintez va an'anaviy sol-gel yo'llari yordamida tayyorlandi. Gel hosil bo'lgandan so'ng, namunalar atrof-muhit bosimi bilan quritish yoki o'ta kritik CO₂ bilan quritishga duchor qilindi. Olingan aerogellar yaxshi rivojlangan mezoporali tuzilishga ega bo'lib, ma'lum bir sirt maydoni 133–535 m²/g va g'ovak o'lchamlari 3,55 dan 9,46 nm gacha bo'lgan. Bundan tashqari, ular 600 °C gacha yuqori issiqlik barqarorligini va suv bilan aloqa qilish burchaklari 154° dan oshadigan ajoyib supergidrofobiklikni namoyish etdilar [10].

XULOSA

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatdiki, silikogel yuqori solishtirma sirt maydoni, rivojlangan g'ovak tuzilishi va yaxshi adsorbsion xossalari tufayli gazlarni ajratish hamda tozalash jarayonlarida keng qo'llaniladigan samarali sorbent hisoblanadi. Silikogelni sintez qilishning sol-gel, gidrotermal, cho'ktirish va chiqindilarni qayta ishlashga asoslangan usullari mavjud bo'lib, har bir usul o'ziga xos afzallik va cheklanishlarga ega.

Tahlillar natijasida sol-gel usuli silikogelning g'ovak tuzilishi va sirt xossalarini boshqarish imkoniyati yuqori bo'lgan eng istiqbolli usullardan biri ekanligi aniqlandi. Shu bilan birga, sanoat chiqindilaridan silika olish va undan sorbentlar sintez qilish iqtisodiy hamda ekologik jihatdan samarali yo'nalish hisoblanadi.

Shuningdek, modifikatsiyalangan silikogellar karbonat angidridni adsorbsiyalashda yuqori samaradorlikka ega bo'lib, ularning CO₂ ga nisbatan selektivligi va adsorbsion sig'imi oddiy silikogellarga nisbatan yuqoriroq ekanligi qayd etilgan. Bu esa ularni sanoat chiqindi gazlarini tozalash va issiqxona gazlari emissiyasini kamaytirishda qo'llash imkoniyatlarini kengaytiradi.

Shunday qilib, yuqori sorbsion xossalarga ega bo'lgan modifikatsiyalangan silikogellarni sintez qilish, ularning tuzilishi va adsorbsion xususiyatlarini o'rganish karbonat angidridni ushlash texnologiyalarini takomillashtirishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Rice Husk Ash as a Renewable Source for the Production of Value Added Silica Gel and its Application: An Overview Ram Prasad * , and Monika Pandey Department of Chemical Engineering & Technology, Banaras Hindu University, Varanasi 221005, India https://eprints.undip.ac.id/35715/1/bcrec_v7n1_y2012_1216_p1-25.pdf
2. J. Feng, Z. Li, X. Liu et al., Preparation of silica gel from quartz for direct synthesis of alkoxysilanes, *Silicon*, 17 (2025) 1767–1775.
3. I.N. Pyagay, Y.A. Svakhina, M.E. Titova et al., Effect of hydrogel molar composition on the synthesis of LTA-type zeolites in the utilization of technogenic silica gel, *Silicon*, 16 (2024) 4811–4819.
4. I. Hraiech, B. Zallama, S. Belkhiria et al., Experimental description of adsorption and desorption isotherms of silica gel under variable temperature and relative humidity in a fixed bed reactor, *Sci. Rep.*, 15 (2025) 29041
5. T.M. Daget, B.B. Kassie, M.T. Abate et al., Eco-friendly flame-retardant finishing of polyester fabrics using diammonium hydrogen phosphate, gelatin and silica gel for cultural heritage preservation, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 114 (2025) 1095–1108.
6. M.S. Mikhailova, N.A. Medvedeva and A.O. Vozyakov, Production of silicon dioxide by the sol–gel method and control of process parameters, *Dokl. Chem.*, 517 (2024) 124–130.
7. J.I. Zink, Spectroscopic studies of molecules in sol–gel silica monoliths and thin films, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 114 (2025) 261–273.
8. L.A. Polevoi, D.A. Sandzhieva, A.E. Baranchikov et al., New hydrophobic oil sorbents based on silica aerogels, *Theor. Found. Chem. Eng.*, 58 (2024) 1042–1054.

9. E. Yapıcı, B. Keçeci and S. Yücel, Synthesis and hydrophobic modification of silica-CNT hybrid aerogels via one-pot and sol-gel methods using sustainable precursor, J. Porous Mater., 32 (2025) 2197–2210.
- 10.K. Baskaran, M. Ali, K. Gingrich et al., Sol-gel derived silica: A review of polymer-tailored properties for energy and environmental applications, Prog. Mater. Sci., (2022).