

**UGLERODLI ADSORBENTLARNI ISHLAB CHIQRISH MUAMMOLARI,
XOMASHYO BAZASI VA EKOLOGIK YECHIMLAR****Amanov Baxodir Sharifovich****Karimov Xaitoli Xursanovich***Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti katta o‘qituvchilari***Xoliqov Kamoliddin Abdug‘aniyevich***Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti
assistenti***Annotatsiya**

Ushbu maqolada polimer chiqindilaridan, xususan PET shisha idishlaridan faollashtirilgan ko‘mir va boshqa ko‘mirli adsorbentlar olishning zamonaviy holati tahlil qilingan. Suvni tozalashda, havo filtratsiyasida va sanoat gazlarini tozalashda ko‘mirli adsorbentlarning ahamiyati, ularni ishlab chiqarish texnologiyalari va hozirgi global bozor tendensiyalari ko‘rib chiqilgan. 2020-2025 yillar davomida nashr etilgan ilmiy tadqiqotlar asosida ko‘mirli adsorbentlarning xususiyatlari va ularni ekologik jihatdan ahamiyatligi muhokama qilingan. Maqolada shuningdek, termik va kimyoviy faollashtirish metodlari, ularning afzalliklari va kamchiliklari taqqoslangan.

Kalit so‘zlar: *ko‘mirli adsorbentlar, faollashtirilgan ko‘mir, PET chiqindilari, suvni tozalash, termik faollashtirish, kimyoviy faollashtirish, ekologiya, nanoporali materiallar.*

Kirish

Ko‘mirli adsorbentlar-zamonaviy ekologiya va sanoat kimyosining eng muhim materiallaridan biri bo‘lib, ularning ahamiyati yil sayin ortib bormoqda. Ular suvni va havoni turli ifloslantiruvchilardan tozalashda, farmatsevtika, oziq-ovqat sanoatida, oltingugurt va azot birikmalarini tutib qolishda keng qo‘llaniladi. Jahon bozorida faollashtirilgan ko‘miring hajmi 2023 yilda 4,1 milliard AQSh dollarini tashkil etdi va 2030 yilga qadar yillik 8,3% o‘sishi bashorat qilinmoqda (Grand View Research, 2024).

O‘zbekistonda sanoat chiqindilari, xususan polimer chiqindilari bilan ifloslangan suv havzalari va tuproqlarni tozalash davlat ekologiya dasturlarining ustuvor yo‘nalishiga aylanib bormoqda. 2022-2025 yillardagi “Yashil iqtisodiyot” strategiyasi doirasida polimer chiqindilardan qo‘shimcha qiymatga ega mahsulotlar, xususan ko‘mirli adsorbentlar ishlab chiqarish alohida e’tibor qaratilmoqda (O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi, 2022).

Ushbu maqolaning maqsadi-ko‘mirli adsorbentlarni polimer chiqindilardan olishning ilmiy-texnologik asoslarini, xomashyo bazasini va ekologik ahamiyatini zamonaviy adabiyotlar asosida tizimli tahlil qilishdan iborat. [1]

Global muammo, YUNESKO ma‘lumotlariga ko‘ra, 2024 yil holatiga ko‘ra dunyodagi 2,2 milliard kishi sifatli ichimlik suvdan to‘liq foydalanish imkoniga ega emas. Sanoat oqava suvlarda og‘ir metallar, organik bo‘yoqlar, neft mahsulotlari, pestitsidlar va dori-darmon qoldiqlari aniqlangan bo‘lib, ular an‘anaviy mexanik va biologik tozalash usullari bilan to‘liq olib tashlanmaydi (WHO, 2023).

Xususan, azoboyoqlar, fenollar va xlorli uglevododlar o‘ta xavfli ifloslanish manbalari sifatida e‘tirof etilgan. Bu moddalar suv muhitida parchalanmay, baliqlar va boshqa suv tirik organizmlariga zaharli ta‘sir ko‘rsatadi. Adsorbsiya usuli-ana shu muammoni hal qilishda eng samarali yondashuvlardan biri hisoblanadi.

O‘zbekistonda suvni ifloslantiruvchi manbalar, O‘zbekistonda suvni ifloslantiruvchi asosiy manbalar qatoriga quyidagilar kiradi: kimyo va to‘qimachilik sanoati korxonalarini, qishloq xo‘jaligi pestitsidlari va mineral o‘g‘itlar, aholi yashash joylari oqava suvlari, neft-gaz qazib olish va qayta ishlash komplekslari. Davlat ekologiya qo‘mitasining 2023 yilgi hisobotiga ko‘ra, Amudaryo va Sirdaryo havzalarida ruxsat etilgan me‘yordan 3-7 barobar ortiq og‘ir metal ionlari aniqlangan. Bu esa mahalliy sharoitda samarali va arzon adsorbentlar ishlab chiqarishning dolzarbligini tasdiqlaydi. [2]

Polimer chiqindilari: xomashyo imkoniyatlari, Polietilentereftalat (PET)-eng ko‘p tarqalgan polimer materiallaridan biri. Jahon miqyosida 2023 yilda 100 million tonnadan ortiq PET ishlab chiqarilgan, shundan 30% dan kamrog‘i qayta ishlangan (PlasticsEurope, 2024). O‘zbekistonda yiliga taxminan 350 000 tonna plastik chiqindi hosil bo‘ladi, ularning ko‘p qismi PET shishalar hisoblanadi.

PET ning kimyoviy tarkibi ($C_{10}H_8O_4$)n uni piroliz va faollashtirish orqali yuqori sifatli ko‘mirli material olishga imkon beradi. Bu jarayon bir vaqtning o‘zida chiqindilarni kamaytirish va yuqori qo‘shimcha qiymati bo‘lgan mahsulot yaratish imkonini beradi-bu esa “doiraviy iqtisodiyot” tamoyiliga to‘liq mos keladi. [3]

Boshqa polimer xomashyolari,

PET dan tashqari, quyidagi polimer chiqindilari ham ko‘mirli adsorbentlar uchun istiqbolli xomashyo hisoblanadi:

Polipropilen (PP)-yuqori tozalik darajasidagi ko‘mir olish uchun

Poliakrilonitril (PAN)-keng tarqalgan “faollashtirilgan karbon nona” tolalar ishlab chiqarishda

Fenoloformaldegid qatronlari-o‘ta rivojlangan g‘ovakli tuzilma hosil qilishda

Lignosellyuloza chiqindilari (qo‘shimcha: paxta chigiti, g‘o‘zapoya) O‘zbekiston uchun qo‘shimcha mahalliy xomashyo

Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, O‘zbekiston qishloq xo‘jaligi chiqindilari (g‘o‘zapoya, paxta chigiti po‘chog‘i) ham ko‘mirli adsorbentlar uchun samarali xomashyo bo‘lib, ular yiliga 4 million tonnadan ortiqni tashkil etadi (O‘zbekiston Qishloq xo‘jaligi vazirligi, 2023).

Termik faollashtirish, Termik faollashtirish ikki bosqichdan iborat: karbonizatsiya (piroliz) va faollashtirish. Karbonizatsiya jarayonida polimer xomashyo 400-800 °C da inert muhitda (azot yoki argon gazi) qizdiriladi, natijada organik moddalar parchalanib, ko‘mirli qoldiq hosil bo‘ladi. Ikkinchi bosqichda ushbu qoldiq 700-1000 °C da suv bug‘i yoki CO₂ bilan ishlov beriladi.[4]

Zamonaviy tadqiqotlar (Zhang et al., 2023; Kim & Park, 2024) termik faollashtirish bilan olingan materiallar BET sirt yuzasi 800-1500 m²/g ni tashkil etishini va ular ayniqsa organik bo‘yoqlar va og‘ir metallarni adsorbtsiyalashda samarali ekanligini isbotlagan.[5]

Kimyoviy faollashtirish, Kimyoviy faollashtirish jarayonida xomashyo termik ishlov berishdan oldin yoki keyin kimyoviy reagentlar-ZnCl₂, KOH, H₃PO₄, NaOH bilan ishlov beriladi. Bu usul termik faollashtirishga qaraganda pastroq haroratda (400-600 °C) amalga oshiriladi va odatda kattaroq sirt yuzasiga ega materiallar hosil qiladi.

Li et al. (2024) tadqiqotiga ko‘ra, KOH bilan kimyoviy faollashtirilgan PET asosidagi ko‘mir 2100 m²/g gacha BET sirtiga ega bo‘lib, metilen ko‘kisini 450 mg/g samaradorlik bilan adsorbtsiyalagan-bu an’anaviy tijorat ko‘miridan 1,8 barobar yuqori natijaga erishiladi.[6]

Faollashtirish usullarini taqqoslash

4.1-jadval. Termik va kimyoviy faollashtirish usullarining asosiy ko‘rsatkichlari taqqoslanishi.

Ko‘rsatkich	Termik faollashtirish	Kimyoviy faollashtirish
Harorat diapazoni	700-1000 °C	400-600 °C
BET sirt yuzasi (m ² /g)	800-1500	1200-2100
Chiqim foizi	15-25%	30-45%
Asosiy aktivlovchi agent	H ₂ O bug‘, CO ₂	KOH, ZnCl ₂ , H ₂ PO ₄

Ko‘rsatkich	Termik faollashtirish	Kimyoviy faollashtirish
Ekologik xavflilik	Past	O‘rta (reagent qoldiqlari)
Tannarxi (nisbiy)	Past	O‘rta
Asosiy qo‘llanishi	Gaz tozalash	Suvni tozalash

Adsorpsiya mexanizmlari va asosiy xususiyatlar

Ko‘mirli adsorbentlarning samaradorligi ularning g‘ovakli tuzilmasi va sirt kimyosi bilan belgilanadi. G‘ovaklar o‘lchamiga ko‘ra uch turga bo‘linadi: mikrog‘ovaklar (< 2 nm), mezog‘ovaklar (2-50 nm) va makrog‘ovaklar (> 50 nm). Mikrog‘ovaklar asosan gaz fazadagi ifloslanuvchilarni ushlab qolishda, mezog‘ovaklar esa suvdagi organik molekulalar va bo‘yoqlarni adsorbsiyalashda hal qiluvchi rol o‘ynaydi.[7]

Ko‘mirli adsorbentlardagi adsorpsiya jarayoni asosan quyidagi mexanizmlar orqali amalga oshadi: van-der-Vaals kuchlari, gidrofobik o‘zaro ta‘sir, elektrostatik jalb etish va π - π o‘zaro ta‘sir. Bu mexanizmlarning kombinatsiyasi keng spektrli ifloslanuvchilarni olib tashlash imkonini beradi.[8]

Langmuir va Freundlich adsorpsiya izotermlarini tahlil qilish asosida olingan zamonaviy ma‘lumotlar (Wang et al., 2024) ko‘rsatdiki, PET asosidagi faollashtirilgan ko‘mir uchun Langmuir maksimal quvvati metilen ko‘kisi uchun 350-450 mg/g, qo‘rg‘oshin ionlari (Pb^{2+}) uchun 200-280 mg/g ni tashkil etgan-bu tichorat ko‘miridan sezilarli darajada yuqori.

Chiqindilarni kamaytirish, Polimer chiqindilari, xususan PET shishalarni ko‘mirli adsorbent ishlab chiqarishda xomashyo sifatida ishlatish ikki muhim ekologik muammoni bir vaqtda hal qiladi: plastik chiqindilar miqdorini kamaytirish va suvni tozalash uchun samarali material yaratish. Hayot siklini baholash (LCA) tadqiqotlari (Morales-Torres et al., 2024) ko‘rsatdiki, PET asosidagi ko‘mir ishlab chiqarish tijorat ko‘mirga nisbatan CO_2 emissiyasini 40-60% gacha kamaytiradi.[9]

Regeneratsiya va qayta foydalanish, Ishlatilgan ko‘mirli adsorbentlarni regeneratsiya qilish iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq. Zamonaviy usullarga termal regeneratsiya (yonmaydigan ifloslanuvchilar uchun), kimyoviy regeneratsiya (kislota yoki ishqor bilan yuvish) va elektrokimyoviy usullar kiradi.

Tadqiqotlar ko‘rsatdiki, to‘g‘ri regeneratsiya bilan ko‘mirli adsorbentlar samaradorligini 5-7 ta sikl mobaynida 85-95% saqlab qoladi.

O‘zbekiston sharoitida regeneratsiya qilingan adsorbentlarni qo‘shimcha qishloq xo‘jaligi yerlarini yaxshilashda, tuproq konditsioneri sifatida foydalanish ham istiqbolli yo‘nalish hisoblanadi-“biochar” texnologiyasiga o‘xshash yondashuv.

Zamonaviy ilmiy tendensiyalar (2020-2025)

So‘nggi besh yil davomida ko‘mirli adsorbentlar sohasida bir qator muhim ilmiy yutuqlar qayd etildi:

Nanoko‘mirli adsorbentlar (nanoporali karbon materiallar): BET sirt yuzasi 3000 m²/g gacha bo‘lgan materiallar sintez qilindi (Hu et al., 2023)

Magnit ko‘mirli kompozitlar: Fe₃O₃ nanozarralar bilan aralashtirish orqali magnit maydon yordamida adsorbentni suvdan ajratib olish texnologiyasi ishlab chiqildi

Fotokatalitik faollik: TiO₂ yoki ZnO bilan ko‘mirli material kombinatsiyasi yorug‘lik ta‘sirida ifloslanuvchilarni parchalash imkonini beradi

Selektiv adsorpsiya: funksional guruhlar bilan modifikatsiya qilib, muayyan ionlarga nisbatan selektivlikni 10 barobar oshirish mumkinligi isbotlandi

Sun‘iy intellekt va mashina o‘rganish: adsorpsiya parametrlarini optimallashtirish va materiallar xususiyatlarini bashorat qilishda AI usullaridan foydalanish (Chen et al., 2024)

O‘zbekiston olimlarining bu yo‘nalishdagi ishlari ham rivojlanmoqda. Toshkent davlat texnika universiteti va O‘zMU tadqiqotchilari 2023-2024 yillarda g‘o‘zapoya va paxta chigitidan faollashtirilgan ko‘mir olish texnologiyasini muvaffaqiyatli sinovdan o‘tkazdi, natijalar xalqaro jurnallarda chop etildi.

Global bozor tahlili va iqtisodiy ko‘rsatkichlar; Faollashtirilgan ko‘mir global bozori 2023 yilda 4,1 mlrd. AQSh dollari hajmida baholangan bo‘lib, 2024-2030 yillar uchun CAGR (yillik o‘rtacha o‘sish ko‘rsatkichi) 8,3% deb bashorat qilinmoqda. Asosiy bozor segmentlari suvni tozalash (45%), havo tozalash (20%), oziq-ovqat va farmatsevtika (18%) va boshqalar (17%) ni tashkil etadi.[10]

Geografik jihatdan Osiyo-Tinch okeani mintaqasi yetakchi pozitsiyani egallab, global iste‘molning 42% ini tashkil etdi. Hind, Xitoy va Janubi-Sharqiy Osiyo mamlakatlari yangi ishlab chiqarish quvvatlarini keng miqyosda faollashtirmoqda. O‘zbekiston uchun bu tendensiya mintaqaviy eksport salohiyatini ko‘rsatadi-ayniqsa qo‘shni Qozog‘iston, Qirg‘iziston va Tojikiston bozorlarida.

O‘zbekistonda faollashtirilgan ko‘mir talabi ichki bozor ehtiyojlarini hisobga olsak, yiliga 2000-3000 tonna atrofida baholanmoqda, ammo hozircha asosiy qism import hisobiga qoplanmoqda. Bu mahalliy ishlab chiqarishni rivojlantirish uchun katta imkoniyat yaratmoqda.

Hal etilmagan muammolar;

Polimer chiqindilari asosidagi ko‘mirli adsorbentlar sohasida hali hal etilmagan bir qator texnologik muammolar mavjud:

Piroliz jarayonida hosil bo‘luvchi gazsimon va suyuq chiqindilarni zararsizlantirish

Kimyoviy faollashtirish jarayonida ishlatilgan reagentlarni qayta tiklash va utilitatsiya qilish

Ishlab chiqarish texnologiyasini kichik miqyosdagi korxonalariga moslashtirish (scale-up muammosi)

Turli hududlardagi PET chiqindi tarkibining nostandartligi, bu esa mahsulot sifatining barqaror bo‘lmasligiga olib keladi

Kelajak yo‘nalishlari; Kelgusi 5-10 yil ichida ko‘mirli adsorbentlar sohasidagi quyidagi tendensiyalar kuchayishi kutilmoqda: sanoat-laboratoriya hamkorligining chuqurlashuvi, texnologiyalarning tijoratlashtirish sur‘atining oshishi, bio-asosli xomashyoga o‘tish, raqamli monitoring tizimlarini adsorpsiya qurilmalariga integratsiya qilish.

O‘zbekiston uchun alohida istiqbolli yo‘nalish-Orol dengizi havzasida suvni tozalash muammosini mahalliy ishlab chiqarilgan ko‘mirli adsorbentlar yordamida hal etish. Bu yondashuv ham ekologik, ham ijtimoiy-iqtisodiy jihatdan katta ahamiyatga ega.

Xulosa

Ushbu maqola ko‘mirli adsorbentlarning zamonaviy holati, ularni polimer chiqindilari, xususan PET shisha idishlaridan olish texnologiyalari va ekologik ahamiyatini keng ko‘lamda tahlil qildi. Asosiy xulosalar quyidagilardan iborat:

Ko‘mirli adsorbentlar suvni va havoni tozalashda eng istiqbolli va samarali materiallar qatoriga kiradi; ularning global bozori jadal sur‘atda o‘smoqda

PET va boshqa polimer chiqindilari ko‘mirli adsorbentlar uchun arzon va ekologik jihatdan qulay xomashyo manbai hisoblanadi

Kimyoviy faollashtirish termik faollashtirishga qaraganda yuqoriroq BET sirt yuzasiga ega materiallar beradi, ammo reagentlarni utilitatsiya qilish muammosini hal etish talab etiladi

Zamonaviy tadqiqotlar nanomateriallar, magnit kompozitlar va AI yordamida optimallashtirish yo‘nalishlarida jadal rivojlanmoqda

O‘zbekiston uchun mahalliy polimer va qishloq xo‘jaligi chiqindilari asosida ko‘mirli adsorbentlar ishlab chiqarish muhim ekologik va iqtisodiy imkoniyat yaratmoqda

Kelgusi tadqiqotlarning asosiy yo‘nalishi O‘zbekiston sharoitiga moslashtirilgan faollashtirish texnologiyasini optimallashtirish va olingan materiallarning samaradorligini amaliy suvni tozalash tizimlarida sinab ko‘rishga yo‘naltirilishi lozim.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Chen, X., Liu, Y., & Wang, Z. (2024). Machine learning-assisted optimization of activated carbon from polymer waste. *Carbon*, 218, 118-132.
2. Grand View Research. (2024). *Activated Carbon Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2024-2030*. San Francisco: GVR.
3. Hu, J., Zhang, Q., & Li, H. (2023). Nanoporous carbon materials derived from PET bottles: Synthesis and adsorption performance. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130-145.
4. Kim, S., & Park, J. (2024). High-surface-area activated carbons from PET waste: Effect of activation parameters. *Chemical Engineering Journal*, 475, 146-159.
5. Li, R., Cao, M., & Chen, W. (2024). KOH-activated PET-derived carbon for ultra-efficient methylene blue removal. *Bioresource Technology*, 391, 129-141.
6. O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi. (2022). "Yashil iqtisodiyot" Strategiyasi: 2022-2030. Toshkent: Qonunchilik palatasi.
7. PlasticsEurope. (2024). *Plastics - the Facts 2024: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Brussels: PlasticsEurope.
8. WHO. (2023). *Progress on drinking water, sanitation and hygiene 2000-2023*. Geneva: World Health Organization.
9. Zhang, L., Chen, D., & Wu, Y. (2023). Steam activation of PET-derived carbon: pore structure and surface chemistry. *Fuel Processing Technology*, 247, 107-119.
10. Термическая обработка пэт и пэ для углефикации (2025). Коллоидная химия: инновации и решения для химической технологии, экологии и промышленности. В.577-581