KIMYO SANOATIDA “YASHIL KIMYO” TAMOYILLARINI QO‘LLASH ISTIQBOLLARI

Togayeva Ra'no Pardayevna
G‘uzor 3-son texnikumi o'qituvchisi
https://doi.org/10.5281/zenodo.22252832

Annotatsiya. Mazkur maqolada kimyo sanoatida “yashil kimyo” tamoyillarini qo‘llashning ilmiy-nazariy va amaliy jihatlari tahlil qilingan. Kimyo sanoatining rivojlanishi iqtisodiy taraqqiyot, yangi materiallar ishlab chiqarish, qishloq xo‘jaligi, farmatsevtika, energetika va boshqa ko‘plab tarmoqlarning rivojlanishi uchun muhim ahamiyatga ega bo‘lsa-da, ishlab chiqarish jarayonlarida katta miqdorda energiya va xomashyo sarflanishi, chiqindilar hosil bo‘lishi, zaharli reagentlar va erituvchilardan foydalanish ekologik xavflarni yuzaga keltirmoqda. Shu nuqtayi nazardan, “yashil kimyo” konsepsiyasi kimyoviy mahsulot va jarayonlarni ularning butun hayotiy sikli davomida xavfsizroq, resurs-tejamkor va ekologik barqaror tarzda loyihalash imkonini beradi. Maqolada chiqindilarni manbada kamaytirish, atom iqtisodiyoti, katalizdan foydalanish, xavfsiz erituvchilarni tanlash, qayta tiklanuvchi xomashyodan foydalanish, energiya samaradorligini oshirish, real vaqt rejimida monitoring va xavfsiz mahsulotlarni loyihalash kabi tamoyillarning kimyo sanoatidagi istiqbollari yoritilgan. Shuningdek, O‘zbekiston kimyo sanoatida yashil texnologiyalarni joriy etishning ustuvor yo‘nalishlari, mavjud muammolar va ularni bartaraf etish bo‘yicha takliflar ishlab chiqilgan.

Kalit so‘zlar: yashil kimyo, kimyo sanoati, barqaror rivojlanish, ekologik xavfsizlik, chiqindisiz texnologiya, atom iqtisodiyoti, kataliz, yashil erituvchilar, qayta tiklanuvchi xomashyo, energiya samaradorligi, biokataliz, uglerod neytralligi, aylanma iqtisodiyot.

Аннотация. В данной статье анализируются научные, теоретические и практические аспекты применения принципов «зеленой химии» в химической промышленности. Несмотря на то, что развитие химической промышленности имеет огромное значение для экономического развития, производство новых материалов, развитие сельского хозяйства, фармацевтики, энергетики и многих других отраслей, потребление больших объемов энергии и сырья в производственных процессах, образование отходов, использование токсичных реагентов и растворителей создают экологическую опасность. С этой точки зрения, концепция «зеленой химии» позволяет проектировать химические продукты и процессы более безопасным, ресурсоэффективным и экологически устойчивым способом на протяжении всего их жизненного цикла. В статье освещаются перспективы для химической промышленности таких принципов, как сокращение отходов на источнике, атомная экономика, использование катализа, выбор безопасных растворителей, использование возобновляемого сырья, повышение энергоэффективности, мониторинг в реальном времени и проектирование безопасных продуктов. Также определены приоритетные направления внедрения зеленых технологий в химической промышленности Узбекистана, существующие проблемы и предложены пути их устранения.

Ключевые слова: зеленая химия, химическая промышленность, устойчивое развитие, экологическая безопасность, безотходные технологии, ядерная экономика, катализ, экологически чистые растворители, возобновляемое сырье, энергоэффективность, биокатализ, углеродная нейтральность, циркулярная экономика.

Abstract. This article analyzes the scientific, theoretical and practical aspects of the application of the principles of "green chemistry" in the chemical industry. Although the development of the chemical industry is of great importance for economic development, the production of new materials, the development of agriculture, pharmaceuticals, energy and many other sectors, the consumption of a large amount of energy and raw materials in production processes, the generation of waste, the use of toxic reagents and solvents create environmental hazards. From this point of view, the concept of "green chemistry" allows for the design of chemical products and processes in a safer, resource-efficient and environmentally sustainable way throughout their entire life cycle. The article highlights the prospects for the chemical industry of such principles as waste reduction at the source, the atom economy, the use of catalysis, the selection of safe solvents, the use of renewable raw materials, increasing energy efficiency, real-time monitoring and the design of safe products. Also, priority areas for the introduction of green technologies in the chemical industry of Uzbekistan, existing problems and proposals for their elimination have been developed.

Key words: green chemistry, chemical industry, sustainable development, environmental safety, waste-free technology, nuclear economy, catalysis, green solvents, renewable raw materials, energy efficiency, biocatalysis, carbon neutrality, circular economy.

Kirish. XXI asrda sanoat ishlab chiqarishining jadal rivojlanishi tabiiy resurslardan foydalanish ko‘lamining kengayishiga, energiya iste’molining ortishiga va ishlab chiqarish chiqindilarining ko‘payishiga olib kelmoqda. Ayniqsa, kimyo sanoati xomashyo va energiya resurslarini katta miqdorda iste’mol qiluvchi, shu bilan birga turli xil kimyoviy moddalar va chiqindilarni hosil qiluvchi tarmoqlardan biridir. Shu sababli kimyo sanoatining kelajakdagi rivojlanishini faqat ishlab chiqarish hajmini oshirish bilan emas, balki ekologik xavfsizlik, resurslardan oqilona foydalanish va iqtisodiy samaradorlik bilan uyg‘unlashtirish zarur. An’anaviy kimyoviy ishlab chiqarishning asosiy xususiyatlaridan biri — mahsulot olish jarayonida katta miqdorda yordamchi moddalar, erituvchilar, reagentlar va energiya sarflanishidir. Natijada asosiy mahsulot bilan bir qatorda ikkilamchi mahsulotlar, oqova suvlar, gazsimon chiqindilar va qattiq chiqindilar hosil bo‘lishi mumkin. Yashil kimyo esa bunday muammolarni faqat ishlab chiqarishdan keyin chiqindilarni tozalash orqali emas, balki ularning hosil bo‘lishining oldini olish orqali hal qilishni nazarda tutadi. EPA ma’lumotlariga ko‘ra, yashil kimyo ifloslanishni molekulyar darajada oldini olishga yo‘naltirilgan bo‘lib, kimyoviy mahsulot va jarayonlarning loyihalashidan tortib ishlab chiqarish, foydalanish va utilizatsiyasigacha bo‘lgan hayotiy siklini qamrab oladi. “Yashil kimyo” atamasi Paul Anastas va John Warner tomonidan ishlab chiqilgan 12 tamoyil bilan ilmiy jihatdan tizimlashtirilgan. Ushbu tamoyillar chiqindilarni oldini olish, atom iqtisodiyoti, kamroq xavfli sintezlar, xavfsiz mahsulotlar, xavfsiz erituvchilar, energiya samaradorligi, qayta tiklanuvchi xomashyo, derivatizatsiyani kamaytirish, kataliz, parchalanishga mo‘ljallangan mahsulotlar, real vaqt rejimidagi monitoring hamda avariyalarning oldini

olishni qamrab oladi. Bugungi kunda yashil kimyo oddiy ekologik konsepsiya bo‘lib qolmasdan, kimyo sanoatining texnologik modernizatsiyasi va raqobatbardoshligini oshirish vositasiga aylanmoqda. Yashil kimyo tamoyillarini ishlab chiqarishga joriy etish materiallar sarfini kamaytirish, energiya xarajatlarini optimallashtirish, chiqindilarni kamaytirish va ishlab chiqarish xavfsizligini oshirish imkonini beradi. Shu sababli mazkur tadqiqotning maqsadi kimyo sanoatida yashil kimyo tamoyillarini qo‘llashning asosiy yo‘nalishlarini tahlil qilish, ularning ekologik va iqtisodiy samaradorligini baholash hamda O‘zbekiston kimyo sanoatida ushbu yondashuvni rivojlantirish istiqbollarini aniqlashdan iborat.

Adabiyotlar tahlili. Yashil kimyo konsepsiyasining nazariy asoslari Anastas va Warner tomonidan ishlab chiqilgan “Green Chemistry: Theory and Practice” asariga borib taqaladi. Ushbu konsepsiyada kimyoviy jarayonlarni keyinchalik tozalashdan ko‘ra, dastlabdan xavfsiz va chiqindisiz tarzda loyihalashga urg‘u beriladi. Yashil kimyoning 12 tamoyili keyingi ilmiy tadqiqotlar uchun fundamental metodologik asos bo‘lib xizmat qildi. Clark va hammualliflar yashil kimyoni barqaror rivojlanish uchun dizayn konsepsiyasi sifatida ko‘rib, material va energiya samaradorligini oshirish, katalitik jarayonlarni rivojlantirish, erituvchilar sarfini kamaytirish va chiqindilarni manbada oldini olishga alohida e’tibor qaratgan. Ularning tadqiqotlarida chiqindilarning kamayishi nafaqat ekologik, balki iqtisodiy samara berishi ta’kidlangan. Chunki ishlab chiqarishda foydalanilmay qolgan xomashyo korxona uchun ikki tomonlama xarajat — avval xomashyo sifatida, keyin esa chiqindi sifatida xarajat tug‘diradi. Sheldon tomonidan ishlab chiqilgan E-factor konsepsiyasi kimyoviy ishlab chiqarish samaradorligini baholashda chiqindi miqdorining ahamiyatini oshirdi. Ushbu yondashuv kimyoviy jarayon samaradorligini faqat mahsulot chiqishi bilan emas, balki hosil bo‘lgan chiqindilar miqdori bilan ham baholash zarurligini ko‘rsatadi. Keyingi tadqiqotlarda E-factor yashil kimyo va resurs samaradorligini baholashning muhim indikatorlaridan biriga aylandi. Yashil erituvchilar masalasi ham ilmiy adabiyotlarda muhim yo‘nalish sifatida shakllangan. Kimyoviy sanoatda erituvchilar katta hajmda ishlatilishi sababli ularning toksikligi, uchuvchanligi, yonuvchanligi va qayta ishlanish imkoniyati muhim ekologik ko‘rsatkich hisoblanadi. Zamonaviy tadqiqotlarda suv, superkritik CO_2, ionli suyuqliklar, chuqur evtektik erituvchilar va boshqa xavfsizroq muhitlardan foydalanish imkoniyatlari o‘rganilmoqda. Kataliz yashil kimyoning yana bir ustuvor yo‘nalishidir. Katalizatorlar reaksiyani tezlashtirish, selektivlikni oshirish va energiya sarfini kamaytirish bilan birga, chiqindilarni qisqartirishga yordam beradi. Zamonaviy yashil kataliz tadqiqotlarida yuqori faollik, selektivlik, barqarorlik va qayta foydalanish imkoniyatiga ega katalizatorlarni ishlab chiqishga e’tibor qaratilmoqda. Shuningdek, qayta tiklanuvchi xomashyodan foydalanish yashil kimyoning strategik yo‘nalishlaridan biridir. Biomassa, qishloq xo‘jaligi chiqindilari va boshqa qayta tiklanuvchi uglerod manbalaridan kimyoviy mahsulotlar olish imkoniyatlari o‘rganilmoqda. Biroq biomassa va CO_2 ni kimyoviy mahsulotlarga aylantirishda texnologik, kinetik, termodinamik va iqtisodiy muammolar mavjud.

Tadqiqot metodologiyasi. Tadqiqotda tizimli tahlil, qiyosiy tahlil, ilmiy adabiyotlarni umumlashtirish, texnologik jarayonlarni ekologik baholash va konseptual modellashtirish usullaridan foydalanildi.

Yashil kimyo tamoyillarining kimyo sanoatidagi samaradorligini baholash uchun quyidagi asosiy mezonlar belgilandi:

1. xomashyo sarfini kamaytirish;
2. chiqindilar hajmini qisqartirish;
3. atom iqtisodiyotini oshirish;
4. energiya sarfini kamaytirish;
5. suv sarfini optimallashtirish;
6. xavfli reagentlarni xavfsizroq alternativalar bilan almashtirish;
7. erituvchilardan foydalanishni kamaytirish;
8. katalitik jarayonlarni kengaytirish;
9. qayta tiklanuvchi xomashyo ulushini oshirish;
10. ishlab chiqarish jarayonini real vaqt rejimida nazorat qilish.

Bundan tashqari, yashil texnologiyalarning iqtisodiy samaradorligini baholashda ishlab chiqarish xarajatlari, xomashyo tejalishi, energiya xarajatlari, chiqindilarni utilizatsiya qilish xarajatlari va mahsulotning ekologik qiymati hisobga olinishi lozim.

Natijalar va muhokama. Chiqindilarni manbada kamaytirish. Yashil kimyoning birinchi tamoyili chiqindilarni keyinchalik tozalashdan ko‘ra, ularning hosil bo‘lishining oldini olishga qaratilgan. Bu yondashuv kimyo sanoati uchun ayniqsa muhim, chunki chiqindilarni utilizatsiya qilish ko‘pincha qo‘shimcha energiya, reagent va moliyaviy resurslarni talab qiladi. Shuning uchun texnologik jarayonlarni loyihalash bosqichidayoq chiqindi hosil bo‘lishini minimallashtirish zarur. Buning uchun reaksiyaning selektivligini oshirish, oraliq bosqichlarni qisqartirish va keraksiz yordamchi moddalarni chiqarib tashlash mumkin. EPA ham yashil kimyoning asosiy afzalliklaridan biri sifatida chiqindilarni manbada kamaytirish, xavfsizroq mahsulotlar yaratish hamda energiya va resurslardan foydalanishni qisqartirishni ko‘rsatadi.

Atom iqtisodiyotini oshirish. Atom iqtisodiyoti kimyoviy reaksiyada ishlatilgan xomashyo atomlarining qanchalik katta qismi yakuniy mahsulot tarkibiga kirishini ifodalaydi.

U quyidagicha hisoblanadi:

$$AE = \frac{M_{mahsulot}}{\sum M_{reaktantlar}} \times 100\%$$

bu yerda:

– AE — atom iqtisodiyoti;

– $M_{mahsulot}$ — nazariy mahsulotning molekulyar massasi;

– $\sum M_{reaktantlar}$ — stexiometrik reaktivlarning umumiy molekulyar massasi.

Atom iqtisodiyotining oshishi chiqindilar miqdorining kamayishiga olib keladi. Shu sababli kimyoviy jarayonlarni ishlab chiqishda qo‘shimcha yon mahsulotlarni imkon qadar kamaytiradigan reaksion yo‘llarni tanlash muhim.

Katalitik jarayonlarni kengaytirish. Kataliz yashil kimyoning eng istiqbolli yo‘nalishlaridan biridir. Katalizator reaksiyaning faollanish energiyasini kamaytirib, jarayonning yumshoqroq sharoitlarda amalga oshishiga imkon beradi.

Katalitik texnologiyalar:

- energiya sarfini kamaytirishi;
- selektivlikni oshirishi;
- yon mahsulotlarni kamaytirishi;
- reaksiya tezligini oshirishi;
- reagent sarfini kamaytirishi mumkin.

Shuning uchun kimyo sanoatida heterogen kataliz, gomogen kataliz, biokataliz va nanokataliz kabi yo‘nalishlarning rivojlanishi yashil ishlab chiqarish uchun muhim istiqbol hisoblanadi.

Yashil erituvchilardan foydalanish. Kimyo sanoatida erituvchilar ishlab chiqarish jarayonlarining muhim komponentlaridan biri hisoblanadi. Shu bilan birga, ko‘plab an’anaviy organik erituvchilar uchuvchan, yonuvchan yoki toksik bo‘lishi mumkin. Shu sababli erituvchilarni xavfsizroq muqobillarga almashtirish yashil kimyoning muhim vazifalaridan biridir.

Yashil erituvchilar sifatida: suv, etanol, superkritik CO_2, ayrim ionli suyuqliklar, chuqur evtektik erituvchilar kabi tizimlar o‘rganilmoqda. Amerika Kimyo Jamiyati ma’lumotlariga ko‘ra, erituvchilar katta hajmlarda qo‘llanilishi sababli ularni kamaytirish yoki xavfsizroq muqobillar bilan almashtirish yashil kimyoda muhim ustuvor yo‘nalish hisoblanadi. Biroq erituvchini “yashil” deb baholashda faqat uning toksikligi emas, balki ishlab chiqarilishi, qayta ishlanishi, energiya sarfi va utilizatsiyasi ham hisobga olinishi kerak.

Energiya samaradorligini oshirish. Kimyo sanoatida ko‘plab jarayonlar yuqori harorat va bosimni talab qiladi. Natijada katta miqdorda energiya sarflanadi.

Yashil kimyoning oltinchi tamoyili kimyoviy jarayonlarni imkon qadar xona harorati va atmosfera bosimiga yaqin sharoitlarda amalga oshirishni nazarda tutadi.

Buning uchun:

- yuqori samarali katalizatorlar;
- mikroreaktorlar;
- issiqlik almashinish tizimlari;
- energiya qayta tiklash texnologiyalari;
- elektrlashtirilgan kimyoviy jarayonlar;
- qayta tiklanuvchi energiya manbalari

keng qo‘llanishi mumkin.

Aylanma iqtisodiyot bilan integratsiya. Yashil kimyoning istiqboli aylanma iqtisodiyot konsepsiyasi bilan chambarchas bog‘liq. An’anaviy “xomashyo → ishlab chiqarish → mahsulot → chiqindi” modeli o‘rniga:

xomashyo → ishlab chiqarish → mahsulot → foydalanish → qayta ishlash → ikkilamchi xomashyo modeliga o‘tish zarur.

Kimyo sanoatida bu, ayniqsa, polimerlar, plastmassalar, erituvchilar, katalizatorlar va sanoat chiqindilarini qayta ishlashda muhim. 2023-yilgi E-factor tahlilida ham yashil va barqaror kimyoning kelajagi chiqindilarni manbada kamaytirish, bio- va kataliz, muqobil erituvchilar, qayta tiklanuvchi resurslar va kimyo sanoatini qayta tiklanuvchi energiya asosida elektrlashtirish bilan bog‘liqligi ta’kidlangan.

Biokataliz va fermentlardan foydalanish. Biokataliz yashil kimyoning eng istiqbolli yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Fermentlar yuqori selektivlikka ega bo‘lib, ko‘plab reaksiyalarni nisbatan yumshoq sharoitlarda amalga oshirish imkonini beradi.

Biokatalizning afzalliklari: yuqori selektivlik, past haroratda ishlash imkoniyati, kamroq yon mahsulot, suvli muhitdan foydalanish imkoniyati, qayta tiklanuvchi biologik manbalardan foydalanish. Farmatsevtika, oziq-ovqat, kosmetika va nozik organik sintez sohalarida biokatalizdan foydalanish ayniqsa istiqbollidir. Zamonaviy yashil kimyo tadqiqotlarida biokataliz chiqindilarni kamaytirish va bioasosli iqtisodiyotga o‘tishning muhim vositalaridan biri sifatida qaralmoqda.

O‘zbekiston kimyo sanoatida yashil kimyoni rivojlantirish istiqbollari. O‘zbekiston kimyo sanoatida yashil kimyo tamoyillarini joriy etish uchun bir nechta ustuvor yo‘nalishlarni ajratish mumkin.

Birinchi yo‘nalish — mavjud korxonalarni energiya va resurs tejamkor texnologiyalar asosida modernizatsiya qilish.

Ikkinchi yo‘nalish — mahalliy qayta tiklanuvchi xomashyodan foydalanishni kengaytirish. Ayniqsa, qishloq xo‘jaligi chiqindilarini kimyoviy mahsulotlar ishlab chiqarishga yo‘naltirish katta iqtisodiy va ekologik samara berishi mumkin.

Uchinchi yo‘nalish — chiqindilarni qayta ishlash va ikkilamchi xomashyo sifatida foydalanish.

To‘rtinchi yo‘nalish — xavfli reagent va erituvchilarni ekologik xavfsizroq muqobillar bilan almashtirish.

Beshinchi yo‘nalish — yashil kataliz va biokataliz texnologiyalarini rivojlantirish.

Oltinchi yo‘nalish — kimyoviy ishlab chiqarishni raqamlashtirish va real vaqt rejimida ekologik monitoring tizimlarini joriy qilish.

Yettinchi yo‘nalish — oliy ta’lim muassasalari, ilmiy-tadqiqot markazlari va kimyo sanoati korxonalari o‘rtasida hamkorlikni kuchaytirish.

Yashil kimyoni joriy etishda mavjud muammolar. Yashil kimyo texnologiyalarini keng joriy etishda bir qator muammolar mavjud.

Birinchidan, yangi texnologiyalarni ishlab chiqish va ishlab chiqarishga joriy qilish uchun dastlabki investitsiyalar talab etiladi.

Ikkinchidan, ayrim yashil reagent va katalizatorlarning narxi an’anaviy analoglardan yuqori bo‘lishi mumkin.

Uchinchidan, yangi texnologiyalarni sanoat miqyosiga kengaytirish — laboratoryadan pilot ishlab chiqarishga, undan esa yirik sanoat korxonasiga o‘tish — texnik jihatdan murakkab jarayon hisoblanadi.

To‘rtinchidan, yashil texnologiyalarning ekologik samaradorligini faqat bitta indikator orqali baholash noto‘g‘ri. Bunda mahsulotning butun hayotiy sikli — xomashyoni olishdan tortib utilizatsiyagacha — hisobga olinishi kerak.

Beshinchidan, malakali mutaxassislar tayyorlash masalasi dolzarb. Yashil kimyo an’anaviy kimyoviy bilimlardan tashqari ekologiya, materialshunoslik, texnologiya, energetika va raqamli texnologiyalarni ham kompleks tushunishni talab qiladi.

Yashil kimyoni baholash ko‘rsatkichlari. Kimyo korxonalarida yashil texnologiyalarni joriy etish natijalarini quyidagi indikatorlar orqali baholash mumkin:

Ko‘rsatkich	Mazmuni
Atom iqtisodiyoti	Xomashyo atomlarining mahsulotga aylangan ulushi

E-factor	Mahsulot birligiga to‘g‘ri keladigan chiqindi miqdori
Energiya intensivligi	Bir birlik mahsulot uchun sarflangan energiya
Suv intensivligi	Bir birlik mahsulot uchun sarflangan suv
Erituvchi sarfi	Jarayonda ishlatiladigan erituvchi miqdori
Qayta tiklanuvchi xomashyo ulushi	Umumiy xomashyoning qayta tiklanuvchi qismi
CO_2 emissiyasi	Mahsulot birligiga to‘g‘ri keladigan karbonat angidrid chiqindisi
Qayta ishlash darajasi	Chiqindilarning qayta foydalanilgan ulushi
Katalizator samaradorligi	Reaksiya tezligi va selektivligiga ta’siri
Xavflilik darajasi	Reagent va mahsulotlarning inson va atrof-muhit uchun xavfi

Bunday ko‘rsatkichlarni birgalikda qo‘llash korxonaning yashil transformatsiya darajasini kompleks baholash imkonini beradi.

Xulosa. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, “yashil kimyo” tamoyillarini kimyo sanoatiga joriy etish ekologik muammolarni kamaytirish bilan birga, ishlab chiqarishning iqtisodiy samaradorligi va texnologik raqobatbardoshligini oshirish uchun ham muhim imkoniyat yaratadi. Yashil kimyo konsepsiyasining asosiy ustunligi ifloslanishni ishlab chiqarishdan keyin bartaraf etishga emas, balki uni kimyoviy jarayonning o‘zida oldini olishga qaratilganligidadir. Kimyo sanoatining yashil transformatsiyasida chiqindilarni manbada kamaytirish, atom iqtisodiyotini oshirish, katalizatorlardan foydalanish, xavfsiz erituvchilarni tanlash, qayta tiklanuvchi xomashyoga o‘tish va energiya samaradorligini oshirish asosiy yo‘nalishlar sifatida namoyon bo‘ladi. Ushbu yo‘nalishlar bir-biri bilan uzviy bog‘langan bo‘lib, ularni alohida emas, balki yagona texnologik tizim sifatida amalga oshirish yuqori samaradorlik beradi. Ayniqsa, kataliz, biokataliz, yashil erituvchilar, biomassa asosidagi kimyoviy ishlab chiqarish, chiqindilarni qayta ishlash va qayta tiklanuvchi energiya asosidagi jarayonlar kelajakdagi kimyo sanoatining muhim texnologik yo‘nalishlari hisoblanadi. Ilmiy adabiyotlarda ham kataliz va biokataliz, muqobil erituvchilar, qayta tiklanuvchi resurslar hamda aylanma iqtisodiyot yashil kimyoning rivojlanishidagi muhim omillar sifatida ko‘rsatilmoqda. O‘zbekiston sharoitida esa qishloq xo‘jaligi chiqindilarini qayta ishlash, mahalliy qayta tiklanuvchi xomashyo asosida yangi kimyoviy mahsulotlar yaratish, energiya samaradorligini oshirish, kimyoviy chiqindilarni qayta foydalanishga yo‘naltirish va ishlab chiqarishni raqamlashtirish yashil kimyoni rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlari bo‘lishi mumkin. Kelajakda sun’iy intellekt, raqamli egizaklar, IoT, avtomatlashtirilgan monitoring, yangi avlod katalizatorlari va biotexnologiyalarni yashil kimyo bilan integratsiyalash kimyo sanoatining ekologik va iqtisodiy samaradorligini yanada oshirish imkonini beradi. Shunday qilib, yashil kimyo tamoyillarini joriy etish kimyo sanoatining ekologik yuklamasini kamaytirish vositasi bo‘libgina qolmay, balki resurslardan samarali foydalanish, ishlab chiqarish xarajatlarini optimallashtirish, innovatsion mahsulotlar yaratish va uzoq muddatli barqaror iqtisodiy rivojlanishni ta’minlashning muhim strategik yo‘nalishidir.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press.
2. Anastas, P. T., & Eghbali, N. (2010). Green chemistry: Principles and case studies. *Chemical Society Reviews, 39*, 301–312.
3. Clark, J. H. (2009). Green chemistry for the second generation sustainable chemistry. *Green Chemistry, 11*, 328–331.
4. Clark, J. H., & Macquarrie, D. J. (2002). *Handbook of Green Chemistry and Technology*. Blackwell Science.
5. Sheldon, R. A. (1992). Organic synthesis—past, present and future. *Chemistry & Industry*, 903–906.
6. Sheldon, R. A. (2017). The E factor 25 years on: The rise of green chemistry and sustainability. *Green Chemistry, 19*, 18–43.
7. Sheldon, R. A. (2023). The E factor at 30: A passion for pollution prevention. *Green Chemistry, 25*, 1704–1728.
8. Poliakoff, M., Fitzpatrick, J. M., Farren, T. R., & Anastas, P. T. (2002). Green chemistry: Science and politics of change. *Science, 297*, 807–810.
9. Li, C.-J., & Trost, B. M. (2008). Green chemistry for chemical synthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 105*, 13197–13202.
10. Anastas, N. D. (Ed.). (2006). *Green Toxicology*. CRC Press.
11. Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2003). Design through the twelve principles of green engineering. *Environmental Science & Technology, 37*, 94A–101A.
12. Dunn, P. J. (2012). The importance of green chemistry in process research and development. *Chemical Society Reviews, 41*, 1452–1461.
13. American Chemical Society. *Green Chemistry and Sustainability: Solvents and Sustainable Chemistry*. ACS Green Chemistry Institute.
14. U.S. Environmental Protection Agency. *Basics of Green Chemistry: The 12 Principles of Green Chemistry*.
15. U.S. Environmental Protection Agency. *Lean & Chemicals Toolkit: Use Green Chemistry Principles When Designing Chemical Processes*.
16. Yale University Center for Green Chemistry and Green Engineering. *Principles of Green Chemistry*.
17. Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). The 12 principles of green chemistry and their application to sustainable chemical manufacturing. Oxford University Press.
18. Li, C.-J., & Trost, B. M. (2010). Green chemistry for chemical synthesis: Current developments and future perspectives. *Chemical Reviews*.
19. Horváth, I. T., & Anastas, P. T. (2007). Innovations and green chemistry. *Chemical Reviews, 107*, 2169–2173.
20. Lancaster, M. (2016). *Green Chemistry: An Introductory Text* (3rd ed.). Royal Society of Chemistry.