KIMYO SANOATIDA “YASHIL KIMYO” TAMOYILLARINI QO‘LLASH ISTIQBOLLARI

Togayeva Rano Pardayevna
G‘uzor 3-son texnikumi o'qituvchisi
https://doi.org/10.5281/zenodo.22303168

Annotatsiya. Ushbu maqolada kimyo sanoatida “yashil kimyo” tamoyillarini qo‘llashning zamonaviy holati va istiqbolli yo‘nalishlari ilmiy-nazariy hamda amaliy jihatdan tahlil qilingan. Tadqiqotda kimyoviy ishlab chiqarish jarayonlarida chiqindilar hosil bo‘lishining oldini olish, xomashyo va energiya resurslaridan samarali foydalanish, xavfli kimyoviy moddalarni ekologik xavfsiz muqobillar bilan almashtirish, atom iqtisodiyotini oshirish, katalitik jarayonlardan foydalanish hamda qayta tiklanuvchi xomashyolarni ishlab chiqarishga jalb etish masalalariga alohida e’tibor qaratilgan. Shuningdek, yashil kimyo tamoyillarini aylanma iqtisodiyot, raqamli texnologiyalar, sun’iy intellekt, energiya tejamkor texnologiyalar va chiqindilarni qayta ishlash tizimlari bilan integratsiyalash imkoniyatlari ko‘rib chiqilgan. Tadqiqot natijalari yashil kimyo texnologiyalarini kimyo sanoatiga joriy etish ekologik xavfsizlikni oshirish, ishlab chiqarish chiqindilarini kamaytirish, tabiiy resurslardan oqilona foydalanish, energiya sarfini optimallashtirish va korxonalarning iqtisodiy samaradorligini yaxshilash imkonini berishini ko‘rsatadi. O‘zbekiston kimyo sanoatida mazkur tamoyillarni bosqichma-bosqich joriy etish barqaror, resurs tejamkor va ekologik xavfsiz ishlab chiqarish tizimini shakllantirishning muhim omili sifatida baholanadi.

Kalit so‘zlar: yashil kimyo, kimyo sanoati, barqaror rivojlanish, ekologik xavfsizlik, chiqindilarni kamaytirish, atom iqtisodiyoti, kataliz, energiya samaradorligi, qayta tiklanuvchi xomashyo, aylanma iqtisodiyot, resurs tejamkor texnologiyalar, ekologik texnologiyalar, kimyoviy ishlab chiqarish, raqamli texnologiyalar, sun’iy intellekt.

Аннотация. В данной статье анализируется текущее состояние и перспективные направления применения принципов «зеленой химии» в химической промышленности с научной, теоретической и практической точек зрения. Исследование сосредоточено на предотвращении образования отходов в процессах химического производства, эффективном использовании сырья и энергетических ресурсов, замене опасных химических веществ экологически чистыми альтернативами, повышении эффективности ядерной экономики, использовании каталитических процессов и вовлечении возобновляемого сырья в производство. Также рассматриваются возможности интеграции принципов зеленой химии с циркулярной экономикой, цифровыми технологиями, искусственным интеллектом, энергосберегающими технологиями и системами переработки отходов. Результаты исследования показывают, что внедрение технологий зеленой химии в химическую промышленность позволяет повысить экологическую безопасность, сократить производственные отходы, рационально использовать природные ресурсы, оптимизировать энергопотребление и повысить экономическую эффективность предприятий. Постепенное внедрение этих принципов в химическую промышленность

Узбекистана рассматривается как важный фактор формирования устойчивой, ресурсосберегающей и экологически чистой производственной системы.

Ключевые слова: зеленая химия, химическая промышленность, устойчивое развитие, экологическая безопасность, сокращение отходов, ядерная экономика, катализ, энергоэффективность, возобновляемое сырье, циркулярная экономика, ресурсосберегающие технологии, экологические технологии, химическое производство, цифровые технологии, искусственный интеллект.

Abstract. This article analyzes the current state and promising directions of applying the principles of "green chemistry" in the chemical industry from a scientific, theoretical and practical perspective. The study focuses on the prevention of waste generation in chemical production processes, the efficient use of raw materials and energy resources, the replacement of hazardous chemicals with environmentally friendly alternatives, increasing the nuclear economy, the use of catalytic processes, and the involvement of renewable raw materials in production. It also considers the possibilities of integrating the principles of green chemistry with the circular economy, digital technologies, artificial intelligence, energy-saving technologies, and waste recycling systems. The results of the study show that the introduction of green chemistry technologies into the chemical industry allows for increased environmental safety, reduced production waste, rational use of natural resources, optimization of energy consumption, and improvement of the economic efficiency of enterprises. The gradual introduction of these principles in the chemical industry of Uzbekistan is considered an important factor in the formation of a sustainable, resource-saving, and environmentally friendly production system.

Key words: green chemistry, chemical industry, sustainable development, environmental safety, waste reduction, nuclear economy, catalysis, energy efficiency, renewable raw materials, circular economy, resource-saving technologies, environmental technologies, chemical production, digital technologies, artificial intelligence.

Kirish. Bugungi kunda jahon iqtisodiyotining jadal rivojlanishi, sanoat ishlab chiqarish hajmining ortishi va aholining turli kimyoviy mahsulotlarga bo‘lgan ehtiyojining kengayishi kimyo sanoatining strategik ahamiyatini yanada oshirmoqda. Kimyo sanoati zamonaviy iqtisodiyotning deyarli barcha tarmoqlari, jumladan, qishloq xo‘jaligi, farmatsevtika, oziq-ovqat sanoati, energetika, qurilish, to‘qimachilik, avtomobilsozlik va elektronika uchun zarur bo‘lgan xomashyo, materiallar va mahsulotlarni yetkazib beruvchi muhim tarmoqlardan biri hisoblanadi. Biroq kimyoviy ishlab chiqarishning kengayishi bilan bir qatorda tabiiy resurslardan foydalanishning ortishi, energiya sarfining ko‘payishi, atmosferaga chiqariladigan zararli moddalar, oqova suvlar, qattiq va suyuq sanoat chiqindilarining hosil bo‘lishi kabi ekologik muammolar ham kuchayib bormoqda. Shu sababli zamonaviy kimyo sanoati oldida ishlab chiqarish hajmini oshirish bilan bir vaqtda ekologik xavfsizlik, resurslardan oqilona foydalanish va inson salomatligini muhofaza qilishni ta’minlash vazifasi turibdi. An’anaviy kimyoviy texnologiyalarning asosiy xususiyatlaridan biri xomashyoni qayta ishlash jarayonida katta miqdorda ikkilamchi mahsulotlar va chiqindilarning hosil bo‘lishidir. Ayrim texnologik jarayonlarda yuqori harorat va bosimdan, toksik reagentlardan, organik erituvchilardan hamda katta miqdordagi suv va energiya resurslaridan foydalaniladi. Ishlab chiqarishning yakuniy bosqichida hosil bo‘ladigan chiqindilarni tozalash, zararsizlantirish yoki saqlash esa qo‘shimcha

moliyaviy xarajatlarni talab etadi. Shu nuqtayi nazardan, faqat ishlab chiqarishdan keyingi chiqindilarni tozalashga asoslangan yondashuv ekologik muammolarni to‘liq hal qila olmaydi. Zamonaviy ilmiy yondashuv esa ifloslanishni keyinchalik bartaraf etishdan ko‘ra, uning ishlab chiqarish jarayonining o‘zida paydo bo‘lishining oldini olishga ustuvor ahamiyat beradi. Ana shunday sharoitda “yashil kimyo” konsepsiyasi kimyo sanoatini ekologik va iqtisodiy jihatdan barqaror rivojlantirishning muhim ilmiy-amaliy yo‘nalishlaridan biri sifatida namoyon bo‘lmoqda. “Yashil kimyo” kimyoviy mahsulotlar va jarayonlarni xavfli moddalarni ishlatish yoki hosil qilishni kamaytiradigan yoki imkon qadar bartaraf etadigan tarzda loyihalashga asoslangan yondashuvdir. Mazkur konsepsiyaning asosiy maqsadi kimyoviy jarayonlarning ekologik xavfini ishlab chiqarishning dastlabki bosqichidanoq kamaytirish, xomashyo va energiyadan samarali foydalanish hamda inson salomatligi uchun xavfsizroq mahsulotlarni yaratishdan iborat.

“Yashil kimyo”ning ilmiy-nazariy asoslari XX asr oxirida shakllanib, Paul Anastas va John Warner tomonidan ishlab chiqilgan 12 ta asosiy tamoyil bilan tizimlashtirilgan. Ushbu tamoyillar chiqindilarni oldini olish, atom iqtisodiyotini oshirish, kamroq xavfli kimyoviy sintezlardan foydalanish, xavfsizroq kimyoviy mahsulotlarni loyihalash, xavfsiz erituvchilar va yordamchi moddalarni tanlash, energiya samaradorligini oshirish, qayta tiklanuvchi xomashyolardan foydalanish, keraksiz hosilalarni kamaytirish, katalitik jarayonlarni rivojlantirish, mahsulotlarning foydalanishdan keyin xavfsiz parchalanishini ta’minlash, real vaqt rejimida tahlil qilish hamda avariyalar xavfini kamaytirishni qamrab oladi. Mazkur tamoyillar kimyoviy ishlab chiqarishning alohida bir bosqichini emas, balki butun texnologik jarayonni ekologik nuqtayi nazardan qayta ko‘rib chiqishni nazarda tutadi. Yashil kimyoning muhim jihatlaridan biri — chiqindilarni boshqarish konsepsiyasidan chiqindilarning oldini olish konsepsiyasiga o‘tishdir. An’anaviy yondashuvda ishlab chiqarish jarayonida hosil bo‘lgan chiqindilarni tozalash yoki zararsizlantirish asosiy vazifa sifatida qaralsa, yashil kimyoda ishlab chiqarish texnologiyasi shunday loyihalanadiki, natijada chiqindining o‘zi imkon qadar kam hosil bo‘ladi. Bu esa nafaqat atrof-muhitga tushadigan yuklamani kamaytiradi, balki xomashyo, energiya va chiqindilarni boshqarish xarajatlarini qisqartirish orqali korxonaning iqtisodiy samaradorligini ham oshirishi mumkin. Kimyo sanoatida yashil kimyoning yana bir muhim yo‘nalishi atom iqtisodiyotini oshirish bilan bog‘liq. Kimyoviy reaksiyalarda ishlatiladigan xomashyo tarkibidagi atomlarning qanchalik katta qismi maqsadli mahsulot tarkibiga o‘tishi jarayonning resurs samaradorligini belgilaydi. Yuqori atom iqtisodiyotiga ega bo‘lgan reaksiyalarda qo‘shimcha mahsulotlar va chiqindilar miqdori kamayadi. Shu sababli yangi kimyoviy texnologiyalarni ishlab chiqishda nafaqat mahsulot unumdorligi, balki reagentlarning qanchalik samarali ishlatilishi, hosil bo‘ladigan ikkilamchi mahsulotlarning miqdori va jarayonning umumiy ekologik ko‘rsatkichlari ham hisobga olinishi zarur. Energiya samaradorligi ham yashil kimyo tamoyillarini amaliyotga tatbiq etishning muhim yo‘nalishlaridan biridir. Kimyo sanoatidagi ko‘plab texnologik jarayonlar yuqori harorat va bosim sharoitida amalga oshiriladi. Natijada katta miqdorda elektr energiyasi va issiqlik energiyasi sarflanadi. Energiya sarfining yuqoriligi nafaqat ishlab chiqarish tannarxining oshishiga, balki energiya ishlab chiqarish jarayonlari bilan bog‘liq issiqxona gazlari emissiyasining ko‘payishiga ham olib kelishi mumkin. Shu sababli past harorat va bosimda ishlaydigan texnologiyalarni yaratish, katalizatorlardan foydalanish, issiqlikni qayta tiklash, energiya oqimlarini optimallashtirish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini kimyoviy ishlab chiqarish bilan integratsiyalash yashil kimyoning istiqbolli yo‘nalishlari hisoblanadi. Katalitik

texnologiyalarni rivojlantirish yashil kimyoning amaliy imkoniyatlarini yanada kengaytiradi. Katalizatorlar kimyoviy reaksiyalarning tezligini oshirish bilan bir qatorda, ayrim hollarda jarayonlarni yumshoqroq harorat va bosim sharoitida amalga oshirish imkonini beradi. Natijada energiya sarfi kamayishi, reaksiyaning selektivligi oshishi va qo‘shimcha mahsulotlar hosil bo‘lishi qisqarishi mumkin. Hozirgi vaqtda geterogen kataliz, biokataliz, fermentativ jarayonlar, nano-katalizatorlar va qayta ishlatiladigan katalizatorlar asosida yangi texnologiyalarni yaratish yashil kimyo tadqiqotlarining muhim yo‘nalishlaridan biriga aylanmoqda. Qayta tiklanuvchi xomashyolardan foydalanish ham kimyo sanoatining uzoq muddatli barqarorligi uchun muhim ahamiyatga ega. An’anaviy kimyo sanoati ko‘p hollarda neft, tabiiy gaz va boshqa qazilma resurslarga tayanadi. Ushbu resurslarning cheklanganligi hamda ularni qazib olish va qayta ishlash jarayonlarining ekologik oqibatlari muqobil xomashyo manbalarini izlashni talab etmoqda. Biomassa, o‘simlik moylari, kraxmal, sellyuloza, lignin va qishloq xo‘jaligi chiqindilaridan kimyoviy mahsulotlar olish imkoniyatlarini kengaytirish mazkur muammoning istiqbolli yechimlaridan biri bo‘lishi mumkin. Bunda xomashyoning qayta tiklanuvchanligi bilan bir qatorda, uning hayotiy sikli, suv va yer resurslariga ta’siri ham kompleks ravishda baholanishi lozim. Yashil kimyo tamoyillarining rivojlanishi aylanma iqtisodiyot konsepsiyasi bilan ham bevosita bog‘liq. Aylanma iqtisodiyotda mahsulot ishlab chiqarishdan foydalanishgacha bo‘lgan jarayon bir tomonlama “xomashyo–mahsulot–chiqindi” modeli asosida emas, balki resurslarni imkon qadar uzoq vaqt iqtisodiy aylanishda saqlashga asoslangan yopiq sikl sifatida qaraladi. Kimyo sanoatida bunday yondashuv ishlab chiqarish chiqindilarini ikkilamchi xomashyoga aylantirish, texnologik suvni qayta ishlatish, katalizatorlarni regeneratsiya qilish, polimer materiallarni qayta ishlash va kimyoviy komponentlarni qayta ajratib olish imkoniyatlarini kengaytiradi.

Mazkur tadqiqotning maqsadi kimyo sanoatida “yashil kimyo” tamoyillarini qo‘llashning ilmiy-nazariy va amaliy imkoniyatlarini tahlil qilish, ularning ekologik hamda iqtisodiy samaradorligini aniqlash va O‘zbekiston kimyo sanoati uchun istiqbolli yo‘nalishlarni asoslashdan iborat. Tadqiqotning ilmiy yangiligi shundan iboratki, kimyo sanoatida “yashil kimyo” tamoyillarini qo‘llash ekologik xavfsizlik, resurs samaradorligi, energiya tejamkorligi, texnologik innovatsiyalar va iqtisodiy samaradorlikning o‘zaro bog‘liqligi asosida kompleks yondashuv sifatida ko‘rib chiqiladi. Tadqiqotning amaliy ahamiyati esa olingan ilmiy xulosalar va tavsiyalardan kimyo korxonalarini modernizatsiya qilish, ekologik xavfsiz texnologiyalarni tanlash, chiqindilarni kamaytirish dasturlarini ishlab chiqish, energiya samaradorligini oshirish hamda yashil kimyo yo‘nalishida ilmiy-tadqiqot loyihalarini shakllantirishda foydalanish mumkinligi bilan belgilanadi. Shunday qilib, kimyo sanoatida “yashil kimyo” tamoyillarini keng joriy etish zamonaviy sanoat rivojlanishining muhim strategik yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Ushbu yondashuv ekologik muammolarni kamaytirish bilan bir qatorda, xomashyo va energiyadan oqilona foydalanish, ishlab chiqarish tannarxini optimallashtirish, yangi innovatsion mahsulotlarni yaratish va kimyo sanoatining xalqaro raqobatbardoshligini oshirish uchun yangi imkoniyatlar yaratadi. Shu sababli yashil kimyoni rivojlantirish ekologik xavfsizlik va iqtisodiy taraqqiyotni birlashtiruvchi istiqbolli ilmiy-texnologik platforma sifatida qaralishi lozim.

Adabiyotlar tahlili. “Yashil kimyo” konsepsiyasi zamonaviy kimyo fanining ekologik xavfsizlik, resurslardan oqilona foydalanish va barqaror ishlab chiqarishni ta’minlashga yo‘naltirilgan eng muhim ilmiy yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Mazkur konsepsiyaning shakllanishi kimyoviy ishlab chiqarishning atrof-muhitga ta’sirini kamaytirish zarurati bilan

bevosita bog‘liq. Dastlab kimyo sanoatida ekologik muammolar asosan ishlab chiqarish jarayonidan keyin hosil bo‘lgan chiqindilarni tozalash va zararsizlantirish orqali hal etilgan bo‘lsa, yashil kimyo yondashuvi ifloslanishni uning manbasida, ya’ni kimyoviy jarayonni loyihalash bosqichidayoq oldini olishni nazarda tutadi. Yashil kimyoning nazariy asoslari Paul Anastas va John Warner tomonidan tizimlashtirilgan bo‘lib, ular kimyoviy mahsulot va jarayonlarni loyihalashning 12 ta asosiy tamoyilini taklif qilgan. Ushbu tamoyillar chiqindilarni oldini olish, atom iqtisodiyotini oshirish, xavfsizroq kimyoviy sintezlardan foydalanish, xavfsizroq kimyoviy mahsulotlarni yaratish, xavfsiz erituvchilar va yordamchi moddalarni tanlash, energiya samaradorligini oshirish, qayta tiklanuvchi xomashyolardan foydalanish, keraksiz hosilalarni kamaytirish, katalizatorlardan foydalanish, foydalanishdan keyin xavfsiz parchalanadigan mahsulotlarni yaratish, real vaqt rejimida tahlil qilish va kimyoviy avariyalarning oldini olishni qamrab oladi. Ushbu tamoyillar yashil kimyoning nafaqat nazariy, balki sanoat texnologiyalarini loyihalash uchun amaliy metodologik asosini ham tashkil etadi. Anastas va Eghbali tadqiqotlarida yashil kimyoning rivojlanishi kimyoviy sintezni xavfsizroq, kam chiqindili va resurs jihatdan samarali qilish bilan bog‘liqligi ko‘rsatib berilgan. Mualliflarning fikricha, yashil kimyo an’anaviy kimyoviy texnologiyalarni faqat ekologik jihatdan “tozalash” emas, balki kimyoviy jarayonlarning o‘zini qayta loyihalashni talab qiladi. Bunda ishlab chiqarishning ekologik ko‘rsatkichlari texnologik jarayonning keyingi bosqichida emas, balki dastlabki loyihalash bosqichida hisobga olinishi lozim. Kimyoviy jarayonlarning ekologik samaradorligini baholash masalasida Trost tomonidan ilgari surilgan atom iqtisodiyoti konsepsiyasi alohida ahamiyatga ega. Atom iqtisodiyoti kimyoviy reaksiyada ishlatiladigan boshlang‘ich moddalarning atomlari qanchalik katta ulushda maqsadli mahsulot tarkibiga kirishini baholashga imkon beradi. Atom iqtisodiyoti yuqori bo‘lgan reaksiyalarda ikkilamchi mahsulotlar va chiqindilar miqdori kamayadi. Shu sababli mazkur ko‘rsatkich yangi kimyoviy texnologiyalarni loyihalashda muhim mezonlardan biri sifatida qaraladi. Sheldon tadqiqotlarida kimyoviy jarayonlarning ekologik samaradorligini baholashda E-factor, ya’ni ma’lum miqdordagi mahsulot ishlab chiqarish uchun hosil bo‘ladigan chiqindi massasini aniqlash ko‘rsatkichi muhim o‘rin tutishi ta’kidlangan. E-factor konsepsiyasi chiqindilarni faqat ekologik muammo sifatida emas, balki ishlab chiqarishda yo‘qotilayotgan resurs sifatida ham ko‘rish imkonini beradi. Muallif yashil kimyo samaradorligini baholashda E-factor, atom iqtisodiyoti va Process Mass Intensity (PMI) kabi massaga asoslangan ko‘rsatkichlardan foydalanish mumkinligini ko‘rsatadi. Biroq bunday ko‘rsatkichlarni hayotiy siklni baholash (LCA) va iqtisodiy samaradorlik ko‘rsatkichlari bilan birgalikda qo‘llash zarur. Sheldon va hamkorlarining keyingi tadqiqotlarida chiqindilarni minimallashtirish yashil kimyoning asosiy vazifalaridan biri sifatida ko‘rib chiqilgan. E-factor sanoat va ilmiy tadqiqotlarda keng qo‘llaniladigan indikator bo‘lib qolayotganligi, biroq uning samaradorligi tizim chegaralarini to‘g‘ri belgilash va chiqindining ekologik xavflilik darajasini hisobga olish bilan oshishi qayd etilgan. Yashil kimyo ko‘rsatkichlarini rivojlantirish bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlarda atom iqtisodiyoti, E-factor, Process Mass Intensity, Reaction Mass Efficiency, Eco-Scale va boshqa ko‘rsatkichlarning afzalliklari hamda cheklovlari tahlil qilingan. Tadqiqotchilar faqat bitta ko‘rsatkichdan foydalanish kimyoviy jarayonning haqiqiy ekologik samaradorligi to‘g‘risida to‘liq tasavvur bermasligini ta’kidlaydi. Xususan, massaga asoslangan indikatorlar chiqindining toksikligi yoki ekotizimga ta’sirini to‘liq aks ettirmasligi mumkin. Shu sababli ekologik baholashni hayotiy sikl tahlili, xavflilik ko‘rsatkichlari va iqtisodiy mezonlar bilan birlashtirish maqsadga muvofiq.

So‘nggi yillardagi ilmiy tadqiqotlarda yashil kimyo tushunchasi yanada kengayib, “yashil va barqaror kimyo” konsepsiyasiga yaqinlashmoqda. UNEP tomonidan ishlab chiqilgan Green and Sustainable Chemistry Framework Manual yashil kimyoni kimyoviy jarayonlarni ekologik jihatdan xavfsiz qilish bilangina cheklamay, kimyoviy mahsulotlarning butun hayotiy sikli, xomashyo manbalari, ishlab chiqarish, foydalanish va utilizatsiya bosqichlarini kompleks baholash zarurligini ko‘rsatadi. UNEP yondashuvida kimyoviy xavflarni minimallashtirish, xavfsiz va barqaror muqobillarni ishlab chiqish, resurslardan barqaror foydalanish, ishlab chiqarish samaradorligini oshirish va ekologik xavfsiz mahsulotlar yaratish asosiy maqsadlar sifatida belgilangan. UNEP tomonidan ishlab chiqilgan yondashuvda “benign by design”, ya’ni mahsulot va materiallarni imkon qadar dastlabki loyihalash bosqichidanoq xavfsizroq qilib yaratish tamoyiliga alohida e’tibor beriladi. Bu yondashuv kimyoviy mahsulotlarning faqat samaradorligini emas, balki ularning inson salomatligi va atrof-muhit uchun xavflilik darajasini ham hisobga olishni talab qiladi. Bundan tashqari, xavfli moddalarning oddiygina boshqa, lekin yangi ekologik yoki toksik xavflarni keltirib chiqarishi mumkin bo‘lgan moddalar bilan almashtirilishi yetarli emas. Muqobil modda umumiy hayotiy sikl nuqtayi nazaridan ham xavfsiz va barqaror bo‘lishi kerak. Yashil kimyoning muhim yo‘nalishlaridan biri kataliz hisoblanadi. Katalitik jarayonlar kimyoviy reaksiyalarni nisbatan yumshoq sharoitlarda olib borish, selektivlikni oshirish va qo‘shimcha mahsulotlar hosil bo‘lishini kamaytirish imkonini beradi. Shu sababli katalizatorlardan foydalanish energiya va xomashyo sarfini kamaytirish bilan birga chiqindilar miqdorini qisqartirishga ham xizmat qilishi mumkin. Sheldonning tadqiqotlarida kataliz yashil kimyoning amaliyotdagi eng muhim vositalaridan biri sifatida ko‘rsatilgan. Katalizning rivojlanishi bilan bir qatorda biokataliz ham barqaror kimyo uchun istiqbolli yo‘nalish sifatida shakllanmoqda. Fermentlar va boshqa biologik katalizatorlar yuqori selektivlik bilan ishlashi, ayrim jarayonlarda yumshoq harorat va bosim sharoitlarini talab qilishi hamda an’anaviy kimyoviy katalizatorlarga muqobil bo‘lishi mumkin. Shu sababli biokataliz farmatsevtika, oziq-ovqat, biotexnologiya va nozik organik sintez kabi yo‘nalishlarda yashil kimyoning muhim texnologik vositasiga aylanmoqda.

Erituvchilarni tanlash masalasi ham yashil kimyo adabiyotlarida muhim o‘rin egallaydi. Kimyoviy jarayonlarda erituvchilar ko‘pincha reaksiya muhitini ta’minlash, moddalarni ajratish va tozalash uchun katta miqdorda ishlatiladi. Shu sababli toksik, uchuvchan va ekologik xavfli erituvchilarni suv, etanol va boshqa nisbatan xavfsiz muqobillar bilan almashtirish, shuningdek, erituvchi sarfini kamaytirish yashil texnologiyalarning muhim yo‘nalishi hisoblanadi. Zamonaviy tadqiqotlarda ion suyuqliklar, chuqur evtektik erituvchilar va boshqa yangi avlod erituvchilarining imkoniyatlari ham o‘rganilmoqda. Yashil kimyoning yana bir muhim yo‘nalishi — qayta tiklanuvchi xomashyolardan foydalanish. An’anaviy kimyo sanoatining neft va tabiiy gazga yuqori darajada bog‘liqligi resurslarning cheklanganligi va ekologik ta’sir bilan bog‘liq muammolarni keltirib chiqaradi. Shu sababli biomassa, sellyuloza, lignin, kraxmal, o‘simlik moylari va qishloq xo‘jaligi chiqindilaridan kimyoviy mahsulotlar ishlab chiqarish bo‘yicha tadqiqotlar kengaymoqda. Biroq adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, “qayta tiklanuvchi xomashyo”ning o‘zi avtomatik ravishda “yashil” mahsulotni anglatmaydi. Xomashyoni yetishtirish uchun suv, yer, o‘g‘it va energiya sarfi, uni tashish, qayta ishlash hamda yakuniy mahsulotning utilizatsiyasi ham hisobga olinishi kerak. Shu sababli biomassa asosidagi texnologiyalarni baholashda hayotiy siklni tahlil qilish muhim ahamiyat kasb etadi. Sheldon va hamkorlarining yashil kimyo metrikalariga oid tadqiqotlari ham massaga asoslangan

ko‘rsatkichlarni LCA va iqtisodiy baholash bilan to‘ldirish zarurligini ko‘rsatadi. Aylanma iqtisodiyot konsepsiyasi yashil kimyoning zamonaviy rivojlanish tendensiyalari bilan chambarchas bog‘langan. An’anaviy iqtisodiyotdagi “xomashyo–ishlab chiqarish–iste’mol–chiqindi” modeli o‘rniga resurslarni imkon qadar uzoq vaqt iqtisodiy aylanishda saqlashga asoslangan yopiq siklli model taklif qilinmoqda. Kimyo sanoatida bu ishlab chiqarish chiqindilarini qayta ishlash, katalizatorlarni regeneratsiya qilish, texnologik suvni qayta ishlatish, polimerlarni qayta ishlash va chiqindilardan yangi kimyoviy xomashyo olish orqali amalga oshirilishi mumkin. Sheldonning yashil kimyo va barqarorlik metrikalariga bag‘ishlangan tadqiqotlarida yashil kimyo, bioasosli iqtisodiyot va aylanma iqtisodiyot o‘rtasidagi bog‘liqlik alohida ko‘rsatib berilgan. Muallifning ta’kidlashicha, resurs samaradorligi va chiqindilarni loyihalash bosqichidayoq kamaytirish aylanma iqtisodiyotning muhim asoslaridan biridir.

Umuman olganda, ilmiy adabiyotlar tahlili “yashil kimyo”ni kimyo sanoatini ekologik jihatdan takomillashtirishning tor doiradagi vositasi sifatida emas, balki kimyoviy mahsulotning butun hayotiy siklini qamrab oluvchi kompleks ilmiy-texnologik paradigma sifatida qarash zarurligini ko‘rsatadi. Zamonaviy tadqiqotlarda chiqindilarni kamaytirish, resurs va energiya samaradorligi, xavfsiz kimyoviy mahsulotlar, qayta tiklanuvchi xomashyo, aylanma iqtisodiyot va raqamli texnologiyalar o‘zaro integratsiyalashgan holda o‘rganilmoqda. UNEPning yashil va barqaror kimyo bo‘yicha frameworki ham kimyoning 2030-yilgacha bo‘lgan barqaror rivojlanish kun tartibi bilan uyg‘unligini ta’minlashga qaratilgan. Shu bilan birga, mavjud adabiyotlarda O‘zbekiston kimyo sanoatining o‘ziga xos xomashyo bazasi, suv va energiya resurslari, mineral o‘g‘itlar va polimerlar ishlab chiqarish xususiyatlari sharoitida “yashil kimyo” tamoyillarini kompleks baholash masalasi yetarlicha tizimlashtirilmagan. Shu sababli mahalliy kimyo sanoati uchun yashil texnologiyalarni tanlashda ekologik ko‘rsatkichlar bilan bir qatorda iqtisodiy samaradorlik, texnologik imkoniyat, mahalliy xomashyo bazasi va ishlab chiqarish infratuzilmasini hisobga oluvchi kompleks yondashuvni ishlab chiqish ilmiy jihatdan dolzarb hisoblanadi. Mazkur ilmiy bo‘shliq tadqiqotning keyingi bosqichida “yashil kimyo” tamoyillarini O‘zbekiston kimyo sanoatining muayyan yo‘nalishlariga moslashtirish, ularning ekologik-iqtisodiy samaradorligini baholash va amaliy joriy etish mexanizmlarini ishlab chiqish zarurligini ko‘rsatadi.

Muhokama. Tadqiqot natijalari va ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, kimyo sanoatida “yashil kimyo” tamoyillarini joriy etish faqat ekologik muammolarni kamaytirishga qaratilgan texnologik chora emas, balki kimyoviy ishlab chiqarishning butun modelini takomillashtirishga xizmat qiluvchi kompleks strategik yondashuvdir. Zamonaviy sharoitda kimyo sanoati oldida bir vaqtning o‘zida bir nechta vazifalar — ishlab chiqarish hajmini oshirish, mahsulot sifatini yaxshilash, tannarxni kamaytirish, energiya va xomashyo sarfini optimallashtirish hamda atrof-muhitga salbiy ta’sirni minimallashtirish vazifalari turibdi. “Yashil kimyo” ushbu vazifalarni bir-biridan ajratmasdan, yagona texnologik va ekologik tizim doirasida hal etish imkonini beradi. An’anaviy kimyoviy ishlab chiqarish modelida ekologik muammolar ko‘pincha ishlab chiqarish jarayoni tugaganidan keyin hal qilinadi. Masalan, gazsimon chiqindilarni filtrlash, oqova suvlarni tozalash, qattiq chiqindilarni zararsizlantirish yoki ularni maxsus poligonlarda saqlash kabi jarayonlar ishlab chiqarishning majburiy qo‘shimcha bosqichiga aylanadi. Bunday yondashuvda ifloslanish allaqachon yuzaga kelgan bo‘ladi va uni bartaraf etish qo‘shimcha energiya, reagent, uskunalar va moliyaviy mablag‘larni talab qiladi. Yashil kimyo esa muammoni ishlab chiqarishdan keyingi bosqichda emas, balki texnologiyani

loyihalash bosqichida hal qilishga intiladi. Shu sababli chiqindilarning oldini olish tamoyili mazkur konsepsiyaning eng muhim jihatlaridan biri hisoblanadi. Tahlillar shuni ko‘rsatadiki, chiqindilar miqdorini kamaytirishning eng samarali yo‘li ishlab chiqarish jarayonining selektivligini oshirishdir. Reaksiya maqsadli mahsulot hosil bo‘lishiga qanchalik yo‘naltirilgan bo‘lsa, ikkilamchi mahsulotlar va chiqindilar miqdori shunchalik kamayadi. Bu jarayonda atom iqtisodiyoti muhim ko‘rsatkich sifatida namoyon bo‘ladi. Atom iqtisodiyoti yuqori bo‘lgan kimyoviy reaksiyalar xomashyo tarkibidagi atomlardan maksimal darajada foydalanishga imkon beradi. Natijada ishlab chiqarishda yo‘qotiladigan materiallar miqdori kamayadi va bir birlik mahsulotga to‘g‘ri keladigan chiqindi massasi qisqaradi. Biroq faqat mahsulot unumdorligining yuqori bo‘lishi jarayonni avtomatik ravishda “yashil” deb baholash uchun yetarli emas. Masalan, reaksiya yuqori unum bilan amalga oshirilishi mumkin, biroq katta miqdorda toksik erituvchi, xavfli reagent yoki yuqori energiya sarfini talab qilishi ehtimoli mavjud. Shuning uchun kimyoviy jarayonlarning ekologik samaradorligini baholashda atom iqtisodiyoti bilan bir qatorda E-factor, Process Mass Intensity (PMI), energiya sarfi, suv iste’moli, toksiklik va hayotiy sikl ko‘rsatkichlarini ham kompleks ravishda hisobga olish maqsadga muvofiq.

Muhokama natijalari shuni ko‘rsatadiki, energiya samaradorligi kimyo sanoatida yashil kimyoning eng muhim amaliy yo‘nalishlaridan biridir. Ko‘plab kimyoviy jarayonlarning yuqori harorat va bosimda olib borilishi katta miqdorda energiya talab qiladi. Energiya sarfining yuqoriligi ishlab chiqarish tannarxining oshishiga olib kelish bilan birga, energiya ishlab chiqarish jarayonlari bilan bog‘liq issiqxona gazlari emissiyasini ham oshirishi mumkin. Shu sababli kimyoviy jarayonlarni past harorat va bosimda amalga oshirish imkonini beruvchi yangi katalitik tizimlarni ishlab chiqish alohida ahamiyatga ega. Katalizatorlardan foydalanish ushbu muammoning samarali yechimlaridan biri hisoblanadi. Katalizator kimyoviy reaksiyaning faollashuv energiyasini kamaytirish orqali jarayonni nisbatan yumshoq sharoitlarda amalga oshirish imkonini beradi. Natijada energiya sarfi kamayishi, mahsulotga nisbatan selektivlik oshishi va qo‘shimcha mahsulotlar hosil bo‘lishi qisqarishi mumkin. Shu nuqtayi nazardan, katalitik texnologiyalarni rivojlantirish yashil kimyoning nazariy tamoyillarini real sanoat jarayonlariga tatbiq etishning muhim mexanizmi sifatida baholanadi. Ayniqsa, qayta ishlatiladigan katalizatorlar va ularni regeneratsiya qilish texnologiyalarining rivojlanishi muhimdir. Katalizatorning bir martalik ishlatilishi natijasida qo‘shimcha chiqindi va xarajatlar yuzaga kelishi mumkin. Agar katalizatorni ishlab chiqarish jarayonidan keyin ajratib olish, qayta tiklash va yana ishlatish imkoniyati mavjud bo‘lsa, ishlab chiqarishning umumiy ekologik va iqtisodiy samaradorligi ortadi.

Biokataliz ham istiqbolli yo‘nalish sifatida alohida e’tiborni talab qiladi. Fermentlar va mikrobiologik tizimlar ko‘plab kimyoviy reaksiyalarni yuqori selektivlik bilan amalga oshirish imkonini beradi. Biokatalitik jarayonlar ayrim hollarda nisbatan past harorat va bosimda amalga oshirilishi mumkinligi sababli energiya sarfini kamaytirishga xizmat qiladi. Farmatsevtika, oziq-ovqat, kosmetika va nozik organik sintez kabi sohalarda biokatalizdan foydalanish yashil kimyo tamoyillarini amaliyotga tatbiq etish uchun katta imkoniyat yaratadi. Yashil kimyoning muhim masalalaridan yana biri erituvchilarni tanlash bilan bog‘liq. Kimyoviy ishlab chiqarishda erituvchilar reaksiyalarni amalga oshirish, moddalarni ajratish, tozalash va kristallash jarayonlarida keng qo‘llaniladi. Biroq ayrim organik erituvchilarning uchuvchanligi, toksikligi va yong‘in xavfi ishlab chiqarish hamda ekologik xavfsizlikka salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Shu sababli xavfsizroq erituvchilarga o‘tish yoki erituvchilardan foydalanishni maksimal darajada

kamaytirish muhim strategik yo‘nalishdir. Suv asosidagi texnologiyalar ushbu muammoning istiqbolli yechimlaridan biridir. Suvning nisbatan xavfsiz, keng tarqalgan va iqtisodiy jihatdan qulay erituvchi bo‘lishi ko‘plab jarayonlarda uni muqobil erituvchi sifatida ko‘rib chiqishga imkon beradi. Biroq suvning barcha kimyoviy reaksiyalar uchun universal erituvchi emasligi sababli muayyan texnologiya uchun erituvchi tanlashda reaksiya mexanizmi, mahsulotning eruvchanligi, energiya sarfi va keyingi ajratish bosqichlari ham hisobga olinishi kerak.

Qayta tiklanuvchi xomashyolardan foydalanish masalasi ham tadqiqot doirasida muhim ahamiyat kasb etadi. Kimyo sanoatining neft, tabiiy gaz va boshqa qazilma resurslarga yuqori darajadagi bog‘liqligi uzoq muddatli istiqbolda resurslar xavfsizligi va ekologik barqarorlik masalalarini yuzaga keltiradi. Shu sababli biomassa, sellyuloza, lignin, o‘simlik moylari, kraxmal va qishloq xo‘jaligi chiqindilaridan kimyoviy mahsulotlar olish imkoniyatlarini rivojlantirish maqsadga muvofiq. O‘zbekiston sharoitida mazkur yo‘nalish alohida istiqbolga ega. Mamlakatda qishloq xo‘jaligi faoliyati natijasida katta hajmda o‘simlik qoldiqlari va boshqa biomassa resurslari hosil bo‘ladi. Ularni oddiy chiqindi sifatida utilizatsiya qilish o‘rniga kimyoviy xomashyo sifatida qayta ishlash orqali qo‘shimcha qiymat yaratish mumkin. Masalan, sellyulozali materiallardan bioasosli polimerlar, organik kislotalar va boshqa kimyoviy mahsulotlar olish imkoniyatlari mavjud. Bunday yondashuv qishloq xo‘jaligi va kimyo sanoati o‘rtasida resurs almashinuvini kuchaytirishi mumkin. Biroq qayta tiklanuvchi xomashyodan foydalanishda ehtiyotkorlik zarur. Biomassani “yashil” deb baholashdan oldin uning yetishtirilishi, yig‘ib olinishi, tashilishi va qayta ishlanishi jarayonlarida sarflanadigan energiya, suv, yer resurslari va boshqa omillar hisobga olinishi kerak. Shu sababli qayta tiklanuvchi xomashyoga asoslangan texnologiyalarni baholashda hayotiy sikl tahlili muhim vosita bo‘lib xizmat qiladi. Tadqiqotda aylanma iqtisodiyot va yashil kimyo o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlik ham muhim deb baholandi. An’anaviy “xomashyo–mahsulot–chiqindi” modeli resurslarning bir martalik ishlatilishiga asoslangan bo‘lsa, aylanma iqtisodiyot resurslarni imkon qadar uzoq vaqt iqtisodiy aylanishda saqlashni nazarda tutadi. Kimyo sanoatida ushbu yondashuv ishlab chiqarish chiqindilarini qayta ishlash, texnologik suvni qayta ishlatish, katalizatorlarni regeneratsiya qilish, polimerlarni qayta ishlash va ikkilamchi xomashyodan yangi mahsulotlar olish orqali amalga oshirilishi mumkin. Aylanma iqtisodiyotga o‘tish ayniqsa polimer sanoatida dolzarbdir. Plastik materiallarning uzoq vaqt davomida atrof-muhitda saqlanib qolishi ularni qayta ishlash va qayta foydalanishning samarali mexanizmlarini ishlab chiqishni talab qiladi. Mexanik qayta ishlash bilan bir qatorda kimyoviy qayta ishlash, depolimerizatsiya va monomerlarni qayta tiklash texnologiyalarining rivojlanishi kelajakda polimer chiqindilarini qiymatli xomashyoga aylantirish imkonini berishi mumkin.

Mineral o‘g‘itlar ishlab chiqarish nuqtayi nazaridan ham yashil kimyo tamoyillari katta ahamiyatga ega. O‘g‘itlar qishloq xo‘jaligining hosildorligini oshirish uchun zarur bo‘lsa-da, ularni ishlab chiqarish va qo‘llash jarayonlarida resurs samaradorligi va ekologik xavfsizlik masalalari mavjud. Shu sababli o‘g‘itlarni ishlab chiqarishda energiya sarfini kamaytirish, xomashyoni samarali o‘zlashtirish, chiqindilarni kamaytirish va mahsulotning ekologik ta’sirini optimallashtirish muhimdir. Kelajakda sekin ajralib chiqadigan, o‘simlik tomonidan samaraliroq o‘zlashtiriladigan va yo‘qotishlarni kamaytiradigan o‘g‘itlarning rivojlanishi yashil kimyo tamoyillari bilan uyg‘unlashishi mumkin. Bunday mahsulotlarni yaratishda kimyoviy tarkib bilan bir qatorda ularning tuproq, suv va ekotizimlarga ta’sirini ham baholash talab etiladi. Ekologik va iqtisodiy samaradorlikning uyg‘unligi yashil kimyoning amaliyotga joriy etilishidagi asosiy

masalalardan biridir. Yangi ekologik texnologiyalarni joriy qilish dastlab kapital qo‘yilmalarni talab qilishi mumkin. Zamonaviy reaktorlar, katalitik tizimlar, filtrlar, sensorlar va avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlarining narxi yuqori bo‘lishi ehtimoli mavjud. Shu sababli korxonalar qisqa muddatli xarajatlar bilan bir qatorda uzoq muddatli iqtisodiy samarani ham hisobga olishi lozim. Masalan, energiya tejamkor texnologiya dastlab qimmat bo‘lishi mumkin, biroq keyingi yillarda energiya xarajatlarining kamayishi orqali dastlabki investitsiyani qoplash imkonini beradi. Xuddi shuningdek, chiqindilarni qayta ishlash tizimiga kiritilgan investitsiya chiqindilarni utilizatsiya qilish xarajatlarini kamaytirishi va ikkilamchi xomashyodan qo‘shimcha daromad olish imkonini yaratishi mumkin. Shu nuqtayi nazardan, yashil kimyo loyihalarini baholashda hayotiy sikl xarajatlari va umumiy iqtisodiy samaradorlikni hisobga olish muhimdir. Faqat boshlang‘ich investitsiya miqdoriga asoslangan qaror uzoq muddatli iqtisodiy samarani to‘liq aks ettirmasligi mumkin.

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, O‘zbekiston kimyo sanoatida yashil kimyoni rivojlantirish uchun bir qator tashkiliy va texnologik to‘siqlar mavjud. Jumladan, ayrim korxonalarda texnologik uskunalarning eskirganligi, zamonaviy monitoring vositalarining yetishmasligi, yashil texnologiyalar bo‘yicha malakali mutaxassislar ehtiyoji va ilmiy ishlanmalarni sanoatga tezkor joriy etish mexanizmlarining yetarli darajada shakllanmaganligi muhim muammolar qatoriga kiradi. Mazkur muammolarni hal qilish uchun oliy ta’lim muassasalari, ilmiy-tadqiqot institutlari va sanoat korxonalari o‘rtasidagi hamkorlikni kuchaytirish zarur. Universitetlarda yashil kimyo, ekologik muhandislik, sanoat ekologiyasi va barqaror kimyoviy texnologiyalar bo‘yicha amaliy yo‘naltirilgan ta’lim dasturlarini rivojlantirish malakali kadrlar tayyorlashga xizmat qiladi. Bundan tashqari, sanoat korxonalarida yashil kimyo bo‘yicha ichki ekologik ko‘rsatkichlar tizimini joriy etish maqsadga muvofiq. Har bir ishlab chiqarish jarayoni uchun xomashyo sarfi, energiya sarfi, suv sarfi, chiqindi miqdori, toksik moddalar ulushi, qayta ishlangan chiqindilar ulushi va karbon emissiyasi kabi ko‘rsatkichlarni muntazam monitoring qilish texnologik samaradorlikni baholash imkonini beradi. Muhokama shuni ko‘rsatadiki, yashil kimyoga o‘tishning samarali modeli bosqichma-bosqich amalga oshirilishi kerak. Birinchi bosqichda mavjud texnologik jarayonlarning ekologik va resurs samaradorligi baholanadi. Ikkinchi bosqichda eng katta ekologik yuklamaga ega jarayonlar aniqlanadi. Uchinchi bosqichda kam chiqindili, energiya tejamkor va xavfsiz texnologik muqobillar tanlanadi. To‘rtinchi bosqichda yangi texnologiyalar sinovdan o‘tkazilib, iqtisodiy va ekologik samaradorligi baholanadi. Yakuniy bosqichda esa muvaffaqiyatli texnologiyalar sanoat miqyosida kengaytiriladi. Umuman olganda, muhokama natijalari “yashil kimyo”ning kimyo sanoati uchun uchta asosiy strategik natijani ta’minlashi mumkinligini ko‘rsatadi. Birinchidan, ekologik natija — chiqindilar, toksik moddalar, suv va havo ifloslanishini kamaytirish. Ikkinchidan, resurs natijasi — xomashyo, suv va energiyadan samaraliroq foydalanish. Uchinchidan, iqtisodiy natija — ishlab chiqarish xarajatlarini optimallashtirish, yangi mahsulot va texnologiyalarni yaratish hamda korxonalarning raqobatbardoshligini oshirish. Shu sababli yashil kimyoni faqat ekologik standartlarni bajarish vositasi sifatida emas, balki kimyo sanoatining innovatsion rivojlanish strategiyasi sifatida qarash lozim. Uning samarali joriy etilishi uchun texnologik modernizatsiya, ilmiy-tadqiqot ishlari, raqamlashtirish, qayta tiklanuvchi xomashyodan foydalanish, aylanma iqtisodiyot va ekologik-iqtisodiy monitoring o‘zaro integratsiyalashishi zarur. O‘zbekiston sharoitida esa ushbu jarayonni mahalliy xomashyo bazasi, mavjud ishlab chiqarish infratuzilmasi, suv va energiya resurslari, qishloq xo‘jaligi

chiqindilari hamda ichki bozor ehtiyojlarini hisobga olgan holda tashkil etish maqsadga muvofiq. Ayniqsa, mineral o‘g‘itlar, polimerlar, neft-kimyo, maishiy kimyo va bioasosli materiallar ishlab chiqarish yo‘nalishlarida yashil texnologiyalarni bosqichma-bosqich joriy etish katta amaliy natija berishi mumkin. Natijada kimyo sanoatida “yashil kimyo” tamoyillarining qo‘llanilishi ishlab chiqarish va ekologik xavfsizlik o‘rtasidagi qarama-qarshilikni kamaytirib, resurs tejamkor, kam chiqindili, energiya samarador, xavfsiz va iqtisodiy jihatdan barqaror kimyoviy ishlab chiqarish tizimini shakllantirishga xizmat qiladi.

Xulosa. Olib borilgan tahlillar shuni ko‘rsatadiki, kimyo sanoatida “yashil kimyo” tamoyillarini qo‘llash zamonaviy sanoat ishlab chiqarishini ekologik, iqtisodiy va texnologik jihatdan takomillashtirishning muhim yo‘nalishlaridan biridir. Kimyo sanoatining jadal rivojlanishi natijasida xomashyo va energiyaga bo‘lgan talabning ortishi, ishlab chiqarish chiqindilarining hosil bo‘lishi, suv resurslaridan foydalanish va atrof-muhitga chiqariladigan zararli moddalar miqdorining oshishi ushbu sohada yangi, ekologik xavfsiz texnologiyalarni joriy etishni talab qilmoqda. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, “yashil kimyo”ning asosiy ustunligi ekologik muammolarni ishlab chiqarishdan keyingi bosqichda bartaraf etish emas, balki ularning yuzaga kelishining oldini olishga qaratilganligidadir. Shu sababli chiqindilarni kamaytirish, atom iqtisodiyotini oshirish, xavfsizroq reagent va erituvchilardan foydalanish, energiya sarfini kamaytirish, qayta tiklanuvchi xomashyolardan foydalanish hamda katalitik jarayonlarni rivojlantirish kimyo sanoatini modernizatsiya qilishning muhim yo‘nalishlari sifatida belgilanadi. Kimyoviy jarayonlarning ekologik samaradorligini baholashda faqat mahsulot unumdorligi bilan cheklanib qolmasdan, E-factor, Process Mass Intensity, atom iqtisodiyoti, energiya sarfi, suv iste’moli, toksiklik va hayotiy siklni baholash kabi ko‘rsatkichlardan kompleks foydalanish maqsadga muvofiq. Bunday yondashuv kimyoviy ishlab chiqarishning haqiqiy ekologik va iqtisodiy samaradorligini yanada aniqroq baholash imkonini beradi. Umuman olganda, “yashil kimyo” tamoyillarini kimyo sanoatiga joriy etish ekologik xavfsizlikni ta’minlash bilangina cheklanmay, ishlab chiqarish samaradorligi va korxonalarning iqtisodiy raqobatbardoshligini oshirishga ham xizmat qiladi. Kelajakda yashil kimyo, aylanma iqtisodiyot, qayta tiklanuvchi energiya, biotexnologiya, raqamli texnologiyalar va sun’iy intellektning integratsiyasi natijasida kimyoviy ishlab chiqarishning yangi, kam chiqindili va resurs tejamkor modeli shakllanishi kutiladi. Shu sababli O‘zbekistonda yashil kimyoni rivojlantirish uchun ilmiy-tadqiqot institutlari, oliy ta’lim muassasalari va sanoat korxonalari o‘rtasidagi hamkorlikni kuchaytirish, yashil texnologiyalar bo‘yicha innovatsion loyihalarni moliyalashtirish, zamonaviy laboratoriya va ishlab chiqarish infratuzilmasini rivojlantirish hamda ushbu yo‘nalishda yuqori malakali mutaxassislar tayyorlash maqsadga muvofiqdir. Natijada kimyo sanoatining ekologik barqarorligi, resurslardan foydalanish samaradorligi va xalqaro raqobatbardoshligini oshirish uchun mustahkam ilmiy-texnologik asos yaratiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Anastas, P. T., & Eghbali, N. (2010). Green chemistry: Principles and case studies. Chemical Society Reviews, 39(1), 301–312.
2. Sheldon, R. A. (2007). The E factor: Fifteen years on. Green Chemistry, 9(12), 1273–1283.
3. Clark, J. H., & Tavener, S. J. (2007). Alternative solvents: Shades of green. Organic Process Research & Development, 11(1), 149–155.
4. Lancaster, M. (2016). Green Chemistry: An Introductory Text (3rd ed.). Royal Society of Chemistry.
5. Sheldon, R. A., & Woodley, J. M. (2018). Role of biocatalysis in sustainable chemistry. Chemical Reviews, 118(2), 801–838.
6. Zimmerman, J. B., Anastas, P. T., Erythropel, H. C., & Leitner, W. (2020). Designing for a green chemistry future. Science, 367(6476), 397–400.
7. Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2003). Design through the 12 principles of green engineering. Environmental Science & Technology, 37(5), 94A–101A.
8. Constable, D. J. C. (2014). Green chemistry metrics: An approach to evaluating process sustainability. Green Chemistry, 16, 105–114.
9. Jiménez-González, C., Ponder, C. S., Broxterman, Q. B., & Manley, J. B. (2004). Using the right green yardstick: Why process mass intensity is used in the pharmaceutical industry to drive more sustainable processes. Organic Process Research & Development, 8(5), 959–970.
10. Poliakoff, M., Fitzpatrick, J. M., Farren, T. R., & Anastas, P. T. (2002). Green chemistry: Science and politics of change. Science, 297(5582), 807–810.
11. Sheldon, R. A. (2016). The E factor 25 years on: The rise of green chemistry and sustainability. Green Chemistry, 18, 3180–3183.
12. Horváth, I. T., & Anastas, P. T. (2007). Innovations and green chemistry. Chemical Reviews, 107(6), 2169–2173.
13. Anastas, P. T., & Warner, J. C. (2009). Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press.
14. United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). Green and Sustainable Chemistry: Framework Manual. United Nations Environment Programme.
15. European Commission. (2022). Safe and Sustainable by Design Chemicals and Materials. European Commission.
16. National Research Council. (2005). Sustainability in the Chemical Industry: The Role of Green Chemistry. National Academies Press.
17. Royal Society of Chemistry. (2023). Green Chemistry: An Introduction to the Principles and Practice of Sustainable Chemistry. Royal Society of Chemistry.
18. Li, C. J., & Trost, B. M. (2008). Green chemistry for chemical synthesis. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(36), 13197–13202.
19. Sheldon, R. A., & Sanders, J. P. M. (2015). Toward a circular economy: The role of biobased chemicals. Green Chemistry, 17, 1–15.