

## Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

GTAMP 53.37.29  
 ЭОЖ: 669.715

[DOI: 10.4411/s031-019-374](https://doi.org/10.4411/s031-019-374)

Б.Болсұлы

*Қарағанды индустриалды университеті, Теміртау, Қазақстан  
 (E-mail: b.bolsuly@fttu.edu.kz)*

### Жасыл химия және қоршаған орта Экологиялық таза катализаторларды әзірлеу

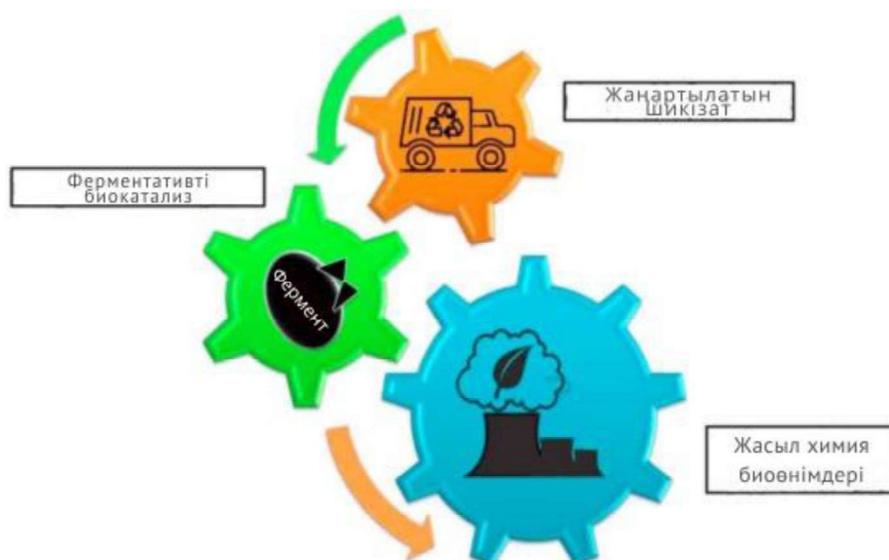
Биотехнологиялық маршруттары бар жасыл өнімдерді дамытумен бірге тұрақты болашаққа деген дүниежүзілік алаңдаушылық өнеркәсіптік салаларда жасыл катализатор деп те аталатын биокатализді пайдалануды күшейтті. Жасыл химияның дамуы негізінен биокатализатормен, оның жаңартылатын көздерден негізгі синтезіне байланысты байланысты. Жасыл катализатордың әртүрлі химиялық реакцияларды катализдейтін әлеуеті бар, сондықтан қоршаған ортаға қауіпті химиялық механизмдер үшін маңызды балама болып табылады. Осы контексте бұл шолудың мақсаты биокаталитикалық әдістердің қысқаша кіріспесін, маңыздылығын және ілгерілеуін өнеркәсіптік перспективамен бірге, негізінен кең ауқымды қолданбалар үшін ұсыну болып табылады. Осы шолуда көрсетілген метагеномика мен есептеу құралдарының жасыл дамуы тұрақты болашақ үшін жақсартылған қасиеттері бар жаңа ферменттердің прогрессиясына әкелетін жылдам өсуді дамытты. Дегенмен, ол жан-жақты зерттеуді және коммерциялық жеткізуді талап етеді, өйткені биокатализ тәсілі алдағы бірнеше онжылдықта фармацевтика, ауыл шаруашылығы, денсаулық сақтау және химия өнеркәсібін қоса алғанда кең салалардағы химиялық трансформацияда маңызды рөл атқарады. Осы себептердің барлығына байланысты мақсат - ферментативті тәсілдерге жасыл химияны интеграциялаудың маңыздылығын, сонымен қатар осы бағыттағы қиындықтар мен алға шығудың маңыздылығын қысқаша баяндау.

*Түйін сөздер:* Жасыл катализ, Ферментативті биокатализ, Тұрақтылық, Химия өнеркәсібі.

### *Kipicne*

Жаһандық экономиканың өсу қарқыны және химия өнеркәсібінің тұрақты жақсаруы байқалады. Бәсекеге қабілеттілік болжамының айтарлықтай өсуі және жасыл ресурстардың айтарлықтай төмендеуі алдағы көптеген жаңартылатын көздердің қолжетімсіздігінің ықтимал қаупіне әкелді [1]. Нәтижесінде, химия өнеркәсібі химиялық технологияны жаппай қолдану нәтижесінде қоршаған ортаны сақтауға және тұрақты дамуға қауіпті әсерге қатысты елеулі қарама-қайшылықтарға тап болды. Осы контексте химиялық түрлендіру тиімділігінің күрт өсуіне ие болу үшін жаңа баламаларға ықпал ететін бірнеше әдістер пайда болды [2]. Қол жетімді әртүрлі жасыл әдістердің ішінде ферменттер қауіпті қалдықтарды азайтудағы өзгерістерге әкелетін және химия өнеркәсібін сүйемелдейтін тұрақты және экологиялық болашаққа жақындататын ең перспективалы жасыл катализатор болып табылады. 1-суретте ферментативті био-катализ процесінің өнімді түрде тұрақты болмау мәселесін еңсеру үшін жасыл химиямен байланыстыру жолдары көрсетілген. Ол әдетте экологиялық қауіпті шикізат пен процестерді алмастыратын химиялық қосылыстарды, жоғары өнімді және селективті ферментативті жолдармен тиімді және экологиялық таза тәсілге айналдыру үшін жасыл әдістерді пайдаланады, сонымен бірге қажетті қосымша тазарту қадамдарын және өтпелі зиянды қалдықтардың пайда болуын азайтады [3].

**Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»**



1-сурет. Соңғы өнеркәсіптік дәуір: Жасыл химиямен байланыста ферментативті биокатализ.

*Әдістер мен материалдар*

Жасыл катализатор әдетте биокатализатор ретінде ферменттерді пайдалануды, қалпына келтіруді және қайта өңдеуді бейнелейді. Олар шығындарды азайту, әлеуетті тиімділікті арттыру, қоршаған ортаға әсер етуді азайту және жасыл химияны дамыту үшін жалпы әдістің тұрақтылығын шешуге ықпал ету арқылы химиялық түрлендіру үшін тиімді түрде ерекшеленеді [4]. Жасыл химияның 12 қағидасымен байланыста ферментативті биокатализ төменде 2-суретте көрсетілгендей өнімдерді әзірлеу және өңдеу үшін әлеуетті құрал болып табылады [5].

**Жасыл химия принципі мен ферментативті катализ арасындағы корреляция**



2-сурет. Жасыл химияның 12 ережесімен ферментативті био-катализдің корреляциясы.

## **Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»**

Ферментативті маңыздылығы биокатализатордың химиялық реакциямен және бағалы ферменттердің синтезіне қажетті жануарлар, өсімдіктер, микроорганизмдер сияқты жаңартылатын көздермен салыстырғандағы өнімділік жылдамдығына тікелей тәуелді [6]. Химия, тамақ, тоқыма, қағаз, биоотын, фармацевтика, ауыл шаруашылығы, ағынды суларды тазарту, денсаулық сақтау және т.б. сияқты әртүрлі өнеркәсіптердің биокатализаторға (ферменттер немесе тұтас жасушалар) бейімділігі ферментативті қасиеттердің жоғарылығына байланысты. Ферментативті тәсіл жұмсақ реакция жағдайларын, төмен энергия сұранысын талап етеді, изомерлену және қайта реттеу мәселелерін жоғары селективтілікпен, белсенділікпен және ерекшелікпен азайтады, нәтижесінде соңғы өнім ағындары неғұрлым таза болады [7]. Сонымен қатар, биокатализаторлар химиялық, аймақтық және стереоселективтілікті көрсету арқылы жанама өнім түзілуінің төмендеуімен қатар функционалды топтың активтенуін айтарлықтай төмендетеді алады [8]. [9] 3-суретте көрсетілген биокатализаторлардан негізінен өнеркәсіптік ауқымда өндірілетін бірнеше биополимерлер бар.

Бірнеше коммерциялық синтезделген өнімдердің химиялық реакциясы мен процесінің баламасы жасыл тәсілдермен жүзеге асырылады, мысалы, пенициллин және цефалоспорин сияқты жартылай синтетикалық антибиотиктердің өнеркәсіптік өндірісі, қағаз өнеркәсібіндегі талшықтардың революциясы және ең құнды фермент-липазаларды пайдалану. дәстүрлі химиялық реакциялардың бірнеше түрлеріндегі икемділігіне байланысты [10,11]. Сондай-ақ биоэнергияны өндіруге арналған өсімдік микробтық отын жасушалары (PMFC) сияқты жасыл құралдар энергия өндіруге арналған ферменттердің көмегімен жасыл химияда маңызды рөл атқарады [12]. *R. Leguminosarum*, *Azotobacter* және т.б. сияқты микробтық штаммдардың болашақта тұрақты энергия өндірісі үшін экономикалық құндылық пен жасыл тәсілдің артуына әкелетін кернеудің генерациясының әлеуеті бар [[13,14]]. Жақында биокатализаторлардың әлемдік нарығы айтарлықтай өсті. 2015 жылы нарық 8,18 миллиард долларға тең болды және 2024 жылға қарай шамамен 17,59 миллиард долларға дейін өседі деп күтілуде [15]. Нарық перспективалы болжамды көрсетсе де, ферменттер нарығы әртараптандырылған жоқ, өйткені 4000-ға жуық белгілі ферменттердің тек 200-і ғана коммерциялық мақсатта қолданылады және тек 20-сы өнеркәсіпте өндіріледі [16]. Сондықтан алдағы бірнеше жылда бұл саладағы ілгерілеушіліктер мен сұраныстардың ықтимал көлемін қарастыру өзекті.

Жақында жүргізілген зерттеулер ақуыз инженериясындағы әдістерді көрсетті, биоинформатика әдісімен бірге метагеномиканы зерттеу био-катализаторларды болашақта дамыту үшін химиялық заттардың құнын және қолданылуын айтарлықтай төмендетті. Бұл шолуда біз ферменттік биокатализді жақсартудың әртүрлі тәсілдерін, дамуын, болашақтағы көлемін және жасыл химиядағы елеулі үлесін талқылаймыз.

### *Нәтижелер мен пікірталас*

Зерттеу нәтижелері бойынша биокатализаторларды қолдану жасыл химия саласында маңызды рөл атқаратыны анықталды. Ферментативті катализаторлар дәстүрлі химиялық катализаторларға қарағанда жоғары селективтілік пен тиімділік көрсетеді. Олар жұмсақ реакциялық жағдайларды талап етіп, энергияны аз тұтынады және қалдықтардың түзілуін азайтады. Биокатализаторлар фармацевтика, ауыл шаруашылығы, химия өнеркәсібі, ағынды суларды тазалау және биоотын өндірісі сияқты көптеген салаларда қолданылады. Оларды пайдалану өндірістің экологиялық қауіпсіздігін арттырады.

Зерттеу ферментативті катализаторлардың жасыл химияның 12 қағидасымен тығыз байланысты екенін көрсетті. Олар экологиялық зиянды химиялық процестерді алмастырып, тұрақты өндірістік тізбекті дамытуға мүмкіндік береді. Биокатализаторлардың нарығы қарқынды дамып келеді. 2015 жылы оның көлемі 8,18 миллиард долларды құраса, 2024 жылға қарай 17,59 миллиард долларға жетеді деп болжануда. Дегенмен, коммерциялық мақсатта қолданылатын ферменттер саны әлі де шектеулі.

Жаңа биокатализаторларды әзірлеуде метагеномика, биоинформатика және ақуыз инженериясы әдістері маңызды рөл атқарады. Бұл тәсілдер ферменттердің белсенділігі мен тұрақтылығын арттырып, олардың кең ауқымды өндірісін қамтамасыз етеді. Биокатализаторлардың қолданылуы қоршаған ортаға теріс әсерді азайтып, қалдықтардың түзілуін төмендетеді. Олар химиялық өндірістердегі зиянды процестерді алмастыра отырып, табиғи ресурстарды үнемдеуге мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, биокатализаторларды қолдану жасыл химияның дамуына елеулі үлес қосады. Олар экологиялық таза өндірісті қамтамасыз етіп, химия өнеркәсібінің тұрақты

## **Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»**

дамуына ықпал етеді. Сонымен қатар, болашақта ферменттердің коммерциялық қолдану аясын кеңейту және жаңа биокатализаторларды әзірлеу маңызды міндеттердің бірі болып табылады.

### *Қорытынды*

Биотехнологиядағы ілгерілеу тұрақтылыққа қажетті химиялық трансформация үшін жасуша зауыттары ретінде жұмыс істейтін микробтармен бірге потенциалды биокатализаторлар, энергияны аз тұтынатын әдістер сияқты әртүрлі жасыл технологиялар мен процестердің көмегімен экологиялық таза болашаққа әкелуі керек. Көбінесе химиялық өнімдер немесе өнеркәсіптер химиялық катализге сүйенеді, бірақ талқыланғандай, ферментативті биокатализ химиялық заттардың қоршаған ортаға қауіпті әсерін азайтуда болашақ бола алады және жасыл химияның барлық принциптерін ескере отырып, жақсы өнім алуға әкелуі мүмкін. Биокатализаторлар әдетте табиғи ресурстар мен микроорганизмдерден өндіріледі және реакция арзан шикізатты жоғары құнды өнімге тиімдірек айналдырудың синтетикалық химиялық жолдарына сәйкес келеді. Бұл қондырғы молекулалық биология, гендік инженерия, биохимия, тұрақтылық, белсенділік, спецификалық және құны сияқты биокатализ қасиеттерін жақсарту арқылы инженерлік ферменттерді өндіруді жеңілдететін есептеу әдісі сияқты әртүрлі домендердің көмегімен жақында дамыды. тиімді макромолекулалар. Сонымен қатар, қорғасын ферменті одан да белсенді, тұрақты, қайта пайдалануға жарамды және т.б. болуы үшін иммобилизация технологиясының маңыздылығын атап өткен жөн. Өңдеу әдістемелері үшін әртүрлі ферментативті синтездерге қатысты жинақталған білімдер келесі жаңа әдістерге негіз болуы керек. жақсырақ және қолайлы жасыл технологиялар. Зерттеуді биоинженерияға ауыстыру қажет, онда ферменттердің дизайны мен синтезі нақты қажетті қолдану арқылы жүзеге асырылады. Сондықтан көптеген жетістіктер әлі де іздестірілуде және жасыл химия принциптерімен байланыста биокатализатор мен биотехнология перспективасында қолданылуы мүмкін.

### Әдебиеттер тізмі

- 1 Fasciotti, M. Perspectives for the use of biotechnology in green chemistry applied to biopolymers, fuels and organic synthesis: from concepts to a critical point of view. *Sustain. Chem. Pharm.* 2017, 6, 682–689.
- 2 Lokko, Y.; Heijde, M.; Schebesta, K.; Scholtès, P.; Van, M. M. Biotechnology and the bioeconomy towards inclusive and sustainable industrial development. *N. Biotech.* 2018, 40, 5–10.
- 3 Virgen-Ortiz, J. J.; Peirce, S.; Tacias-Pascacio, V. G.; Cortes-Corberan, V.; Marzocchella, A.; Russo, M. E., et al. Reuse of anion exchangers as supports for enzyme immobilization: reinforcement of the enzyme-support multiinteraction after enzyme inactivation. *Process Biochem.* 2016, 51, 1391–1396.
- 4 Ottone, C.; Romero, O.; Urrutia, P.; Bernal, C.; Illanes, A.; Wilson, L. Enzyme biocatalysis and sustainability. In *Nanostructured Catalysts for Environmental Applications*; Piumetti, M., Bensaid, S., Eds.; Springer: Cham, 2021; 10.1007/978-3-030-58934-9\_14.
- 5 Sun, H.; Zhang, H.; Lui, E.; Zhao, H. Biocatalysis for the synthesis of pharmaceuticals and pharmaceutical intermediates. *Bioorg. Med. Chem.* 2017, 1–10.
- 6 Robinson, P. K. Enzymes: principles and biotechnological applications. *Essays Biochem.* 2015, 59, 1–41, 10.1042/bse0590001.
- 7 Azerad, R. Chemical biotechnology – better enzymes for green chemistry. Editorial overview. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2001, 12, 533–534.
- 8 Rowbotham, J. S.; Ramirez, M. A.; Lenz, O., et al. Bringing biocatalytic deuteration into the toolbox of asymmetric isotopic labelling techniques. *Nat. Commun.* 2020, 11, 1454, 10.1038/s41467-020-15310-z.
- 9 Alcalde, M.; Ferrer, M.; Plou, F. J.; Ballesteros, A. Environmental biocatalysis: from remediation with enzymes to novel green processes. *Trends Biotechnol.* 2006, 24(6), 281–287, 10.1016/j.tibtech.2006.04.002.
- 10 Wu, S.; Snajdrova, R.; Moore, J. C.; Baldenius, K.; Bornscheuer, U. T. Biocatalysis: enzymatic synthesis for industrial applications. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2021, 60(1), 88–119, 10.1002/anie.202006648.
- 11 Szymczak, T.; Cybulska, J.; Podleśny, M.; Frąc, M. Various perspectives on microbial lipase production using agri-food waste and renewable products.

## **Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»**

Б.Болсулы

### **Зеленая химия и окружающая среда. Разработка экологически чистых катализаторов.**

Вместе с развитием зеленых продуктов с биотехнологическими маршрутами, мировая озабоченность устойчивым будущим усилила использование биокатализа, также называемого зеленым катализатором, в промышленных отраслях. Развитие зеленой химии в основном связано с биокатализатором и его основным синтезом из возобновляемых источников. Зеленый катализатор имеет потенциал для катализа различных химических реакций, поэтому он является важной альтернативой опасным для окружающей среды химическим механизмам. В этом контексте целью данного обзора является краткое введение, значимость и прогресс биокаталитических методов с промышленной перспективой, в основном для широкомасштабных применений. Зеленое развитие метагеномики и вычислительных инструментов, представленных в этом обзоре, способствовало быстрому росту новых ферментов с улучшенными свойствами для устойчивого будущего. Однако это требует всестороннего изучения и коммерческого внедрения, поскольку метод биокатализа играет важную роль в химической трансформации в таких областях, как фармацевтика, сельское хозяйство, здравоохранение и химическая промышленность, в предстоящие десятилетия. В связи со всеми этими причинами цель состоит в кратком изложении важности интеграции зеленой химии с ферментативными подходами, а также значимости преодоления трудностей и продвижения в этом направлении.

*Ключевые слова:* Зеленый катализ, Ферментативный биокатализ, Устойчивость, Химическая промышленность.

B.Bolsuly

### **Green Chemistry and the Environment. Development of Environmentally Friendly Catalysts.**

Green chemistry and the environment development of environmentally friendly catalysts Global concern for a sustainable future, combined with the development of green products with biotechnological routes, has intensified the use of biocatalysis, also known as the green catalyst, in industrial fields. The development of green chemistry is associated mainly with the biocatalyst, due to its basic synthesis from renewable sources. The green catalyst has the potential to catalyze various chemical reactions and is therefore an important alternative for chemical mechanisms that are hazardous to the environment. In this context, the purpose of this review is to present a brief introduction, importance and advancement of biocatalytic methods together with an industrial perspective, mainly for a wide range of applications. The green development of metagenomics and computing tools shown in this review has fostered rapid growth leading to the progression of new enzymes with improved properties for a sustainable future. However, it requires comprehensive research and commercial delivery, as the biocatalysis approach will play an important role in chemical transformation in broad industries, including pharmaceuticals, agriculture, healthcare, and the chemical industry, over the next few decades. For all these reasons, the objective is to briefly outline the importance of integrating green chemistry into enzymatic approaches, as well as the challenges and the importance of moving forward in this area.

*Key words:* Green Catalysis, Enzymatic Biocatalysis, Sustainability, Chemical Industry.

## **Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»**

### References

- 1 Fasciotti, M. Perspectives for the use of biotechnology in green chemistry applied to biopolymers, fuels and organic synthesis: from concepts to a critical point of view. *Sustain. Chem. Pharm.* 2017, 6, 682–689.
- 2 Lokko, Y.; Heijde, M.; Schebesta, K.; Scholtès, P.; Van, M. M. Biotechnology and the bioeconomy—towards inclusive and sustainable industrial development. *N. Biotech.* 2018, 40, 5–10.
- 3 Virgen-Ortíz, J. J.; Peirce, S.; Tacias-Pascacio, V. G.; Cortes-Corberan, V.; Marzocchella, A.; Russo, M. E., et al. Reuse of anion exchangers as supports for enzyme immobilization: reinforcement of the enzyme-support multiinteraction after enzyme inactivation. *Process Biochem.* 2016, 51, 1391–1396.
- 4 Ottone, C.; Romero, O.; Urrutia, P.; Bernal, C.; Illanes, A.; Wilson, L. Enzyme biocatalysis and sustainability. In *Nanostructured Catalysts for Environmental Applications*; Piumetti, M., Bensaid, S., Eds.; Springer: Cham, 2021; 10.1007/978-3-030-58934-9\_14.
- 5 Sun, H.; Zhang, H.; Lui, E.; Zhao, H. Biocatalysis for the synthesis of pharmaceuticals and pharmaceutical intermediates. *Bioorg. Med. Chem.* 2017, 1–10.
- 6 Robinson, P. K. Enzymes: principles and biotechnological applications. *Essays Biochem.* 2015, 59, 1–41, 10.1042/bse0590001.
- 7 Azerad, R. Chemical biotechnology – better enzymes for green chemistry. Editorial overview. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2001, 12, 533–534.
- 8 Rowbotham, J. S.; Ramirez, M. A.; Lenz, O., et al. Bringing biocatalytic deuteration into the toolbox of asymmetric isotopic labelling techniques. *Nat. Commun.* 2020, 11, 1454, 10.1038/s41467-020-15310-z.
- 9 Alcalde, M.; Ferrer, M.; Plou, F. J.; Ballesteros, A. Environmental biocatalysis: from remediation with enzymes to novel green processes. *Trends Biotechnol.* 2006, 24(6), 281–287, 10.1016/j.tibtech.2006.04.002.
- 10 Wu, S.; Snajdrova, R.; Moore, J. C.; Baldenius, K.; Bornscheuer, U. T. Biocatalysis: enzymatic synthesis for industrial applications. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2021, 60(1), 88–119, 10.1002/anie.202006648.
- 11 Szymczak, T.; Cybulska, J.; Podleśny, M.; Frąc, M. Various perspectives on microbial lipase production using agri-food waste and renewable products.