

Ұ.М. Бисенова^{1,2*} , А.С. Кистаубаева¹ , М.А. Абдулжанова¹ 

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Қазақстан Республикасы Денсаулық сақтау министрлігі Медициналық және фармацевтикалық бақылау комитетінің «Дәрілік заттар мен медициналық бұйымдарды сараптау ұлттық орталығы» ШЖҚ РМК, Алматы, Қазақстан

*e-mail: bisenova_@mail.ru

АЛМАТЫ ОБЛЫСЫНЫҢ ЕКІ ЫСТЫҚ БҰЛАҚ КӨЗІНДЕГІ КЕРАТИНАЗАЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ БАР ТЕРМОФИЛЬДІ БАКТЕРИЯЛАРДЫҢ СИПАТТАМАСЫ

Кератин – көптеген протеолитикалық ферменттердің ыдырауына төзімді әрі ерімейтін ақуыз. Барлық құс қалдықтарының ішінде қауырсын және мамық шикізаты ерекше қызығушылық тудырады, өйткені оның құрамында 65%-ға жуық азықтық протеин (мамандандырылған протеин – кератин) бар. Биотехнологиялық әдістер үнемді және экологиялық таза болып саналатындықтан, қалдықтарды басқарудың қызықты баламасы микробтық кератинолитикалық гидролиз арқылы қауырсын қалдықтарының тағамдық құндылығын арттыру үшін оңтайлы болып табылады. Бұл зерттеуде кератинолитикалық белсенділігі бар микроорганизмдер шығаратын кератиназалар туралы жалпы ақпарат берілген. Кератинолитикалық бактериялар Қазақстандағы Алматы облысында орналасқан Керімағаш және Нұрлы-Арасаныстық көздерінен сегіз изолят бөлініп алынды. Kh5 және Nh2 екі изоляттары салыстырмалы жоғары белсенділік көрсетіп, сегіз изоляттан таңдалды және олардың шикі кератиназа белсенділігі ішінара сипатталды. Kh5 изоляты ең жоғары кератинолитикалық белсенділікті көрсетті. Әртүрлі рН пен температурада шикі кератиназаның зерттеу барысында Kh5 изоляты рН 5,5 көрсеткіш кезінде белсендірек екенін бақыланды, ал Nh2 изоляты үшін рН 6,0 оптималды көрсеткіш болды. Екі изолят Kh5 және Nh2 60°C аралығындағы тауық қауырсын кератинінің тиімді ыдырата алу қабілетін көрсетеді. Бөлініп алынған штаммдарды кератинолитикалық байы қалдықтардың биodeградациясына қолдануға болады.

Түйін сөздер: қауырсындар, кератиназа, кератинолитикалық белсенділік, жылу көздері.

U.M. Bissenova^{1,2*}, A.S. Kistaubayeva¹, M.A. AAbdulzhanova¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²«National Center for Expertise of Medicines and Medical Devices» of the Committee for Medical and Pharmaceutical Control of the Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: bisenova_@mail.ru

Description of thermophilic bacteria with keratinase activity from two hot springs in Almaty region

Keratin is an insoluble protein resistant to the degradation by many proteolytic enzymes. Among all poultry waste, feathers and down are of particular interest, as they contain about 65% feed protein (specialized protein – keratin). Biotechnological methods are considered economical and environmentally friendly, making microbial keratinolytic hydrolysis an optimal alternative for enhancing the nutritional value of feather waste. This study provides general information about keratinases produced by microorganisms with keratinolytic activity. Keratinolytic bacteria were isolated from eight isolates obtained from the hot springs of Kerimagas and Nurly-Arasan, located in the Almaty region of Kazakhstan. Two isolates (Kh5 and Nh2) showing relatively high activity were selected, and their crude keratinase activity was partially characterized. The Kh5 isolate demonstrated the highest keratinolytic activity. In the study of crude keratinase under various pH and temperature conditions, it was observed that the Kh5 isolate was most active at pH 5.5, while the Nh2 isolate showed optimal activity at pH 6.0. Both isolates (Kh5 and Nh2) effectively degraded chicken feather keratin at a temperature of 60°C. The distributed strains can be applied to the biodegradation of keratinolytic wastes.

Key words: feathers, keratinase, keratinolytic activity, thermal springs.

Ү.М. Бисенова^{1,2*}, А.С. Кистаубаева¹, М.А. Абдулжанова¹

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²РГП на ПХВ «Национальный центр экспертизы лекарственных средств и медицинских изделий»
Комитета медицинского и фармацевтического контроля Министерства здравоохранения

Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

*e-mail: bisenova_@mail.ru

Описание термофильных бактерий с кератиназной активностью из двух горячих источниках Алматинской области

Кератин – это нерастворимый белок, устойчивый к действию многих протеолитических ферментов. Среди всех отходов птицеводства перья и пух представляют особый интерес, так как содержат около 65% кормового белка (специализированного белка – кератина). Биотехнологические методы считаются экономичными и экологически чистыми, поэтому микробный кератинолитический гидролиз является оптимальной альтернативой для повышения питательной ценности отходов перьев. В данном исследовании представлена общая информация о кератиназах, выделяемых микроорганизмами с кератинолитической активностью. Кератинолитические бактерии были выделены из термальных источников Керимагаш и Нурлы-Арасан, расположенных в Алматинской области Казахстана. Из выделенных 8 изолятов были отобраны два (Kh5 и Nh2), которые показали относительно высокую кератиназную активность. Изолят Kh5 продемонстрировал наибольшую кератинолитическую активность. При исследовании неочищенной кератиназы в различных условиях pH и температуры было обнаружено, что изолят Kh5 наиболее активен при pH 5,5, а изолят Nh2 – при pH 6,0. Оба изолята (Kh5 и Nh2) эффективно разлагают кератин куриных перьев при температуре 60°C. Выделенные штаммы могут быть применены для биоразложения кератинолитических отходов.

Ключевые слова: перья, кератиназа, кератинолитическая активность, термальные источники.

Кіріспе

Кератиндер омыртқалылардың эпителий жасушаларында ең көп таралған ақуыздар болып табылады. Бұл ерімейтін талшықты ақуыз теріде, тырнақта, шашта, жүнде және қауырсында кездеседі [1]. Негізгі компонент кератин болып табылады, ол α -кератиннің бөлігі болып табылады, құрамында ақуызды талшықты құрылымы дисульфидті айқаспалы байланыстар, сутегі және гидрофобты байланыстары бар [2]. Сондықтан кератин суда ерімейді және оған трипсин, пепсин және папаин сияқты протеолитикалық ферменттерге төзімділігі жоғары [3].

Кератин қауырсындардың салмағының шамамен 90 %-ын құрайды, бұл ересек тауықтың жалпы салмағының 5-10% құрайды [4]. Мал терісін өңдеу зауыттары мен мал сою алаңдары кератин құрамды жүн, қауырсын, мал жүні, мүйіздер және т.б. қалдықтар қалуда. Сонымен қатар құс етін өңдеу зауыттары жанама өнім ретінде миллиондаған тонна қауырсын шығарады, бұл қоршаған ортаның проблемаласы [4,5]. Бұл ластануды азайтудың бір нұсқасы – мал азығы ретінде оны қайта пайдалану, қоршаған ортада жиналудың алдын алуға және белгілі бір аурулардың дамуын азайтуға көмектеседі [6,7].

Қауырсында әлеуетті протеин мен аминқышқылдары өте көп болса да, олардың кейбіреулері ғана мал азығы ретінде пайдаланылады, себебі толық қорытыла алмайтындықтан [8]. 16. Қауырсындың сіңімділігін арттыруға болады NaOH, бу және термиялық өңдеуді қолдану арқылы [9]. Дегенмен, бұл процесс көп энергияны қажет етеді [10] және аминқышқылды құрамдас бөлікті зақымдауы мүмкін, сапасы төмен жем шығаруы мүмкін [9,10]. Сондықтан кератин қалдықтарын өңдеудің балама әдісін табу керек [11].

Кейбір микроорганизмдер, мысалы, бактериялар, актиномицеттер, сапрофитті саңырауқұлақтар және дерматофиттер кератинді бұзады [12]. Бұл кератинді ыдырататын микроорганизмдер әртүрлі орталарда және қоршаған орта жағдайларында, соның ішінде ыстық бұлақтарда кездеседі, бұл олардың кератинді және басқа қатты субстраттарды қоса алғанда, ақуызды ыдырататын кең мүмкіндіктерін көрсетеді [13].

Кератиназалар (ЕС 3.4.21) – күрделі және бітеу ақуыздардың толық ыдырауына мүмкіндік беретін температурасы мен pH диапазоны кең протеаздардың жалғыз тобы. Кератиназаларды басқа протеаздардан ажырататын бірегей сипаттама олардың күрделі және ерімейтін субстраттарға (қауырсын, жүн, жібек, коллаген, эластин,

мүйіз, стратум мөлдір қабығы, шаш, азокератин, тырнактар) байланыстыру қабілеті болып табылады [14]. Ферменттерді адсорбциялау механизмі әлі толық түсінілмесе де, адсорбция сыйымдылығы неғұрлым жоғары болса, кератин гидролизінің дәрежесі де соншалықты жоғары болатыны белгілі [15]. Ферменттерді байланыстырып, дисульфидті байланыстарды кескеннен кейін кератин оның сәйкестігін өзгертеді және ферменттердің гидролитикалық әрекетіне арналған көптеген учаскелерді әшкерелейді [16]. Кератинолиттік микроорганизмдер жүргізетін ферментативті гидролиз қауырсын қалдықтарының тағамдық құндылығын арттырудың жақсы баламасы болып табылады [17]. Бұл зерттеуде кератинолитикалық бактерияларды Керімағаш және Нұрлы-Арасан ыстық бұлақтарынан оқшаулап, олардың шикі кератинозалық сипаттады.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Дақылдарды бөліп алу

Су үлгілері Қазақстандағы Алматы облысында орналасқан Керімағаш (Kh) және Нұрлы-Арасан (Nh) екі геотермалды су бұлақтарынан жиналды. Алынған үлгілерді дақылдау үшін оңтайландырылған R2A қоректік ортасы қолданылды (литрге шаққанда): $C_6H_{12}O_6$ – 0,5 г; K_2HPO_4 – 0,3 г; $C_3H_3NaO_3$ – 0,3 г; $C_6H_{10}O_5$ – 0,3 г; $MgSO_4$ – 0,024 г; ащытқы экстрактісі – 0,5 г; пептон – 0,5 г; казеин гидролизаты – 0,5 г. [18]. 100мл қоректік ортаға 1 мл су үлгілері және шөгінді үлгілері енгізіліп, 60°C температурада төрт күн бойы инкубацияланды. Бактериялық оқшаулау майсыздандырылған сүт агары арқылы жүргізілді. Ашық аймақ колониялары скринингтен өтіп, олардың протеолитикалық қабілетіне қарай таңдалды.

Кератин ерітіндісін дайындау

Барлығы 5 г тауық қауырсындары тазартылып, ұсақ кесектерге кесіліп, 250 мл диметилсульфоксидке (DMSO) малынған және дефлегматорда 100 °C температурада 2 сағат бойы қыздырылды. 500 мл ацетон қосылып, содан кейін -10 ° C температурада 2 сағат бойы сақталады. Суспензия 10000 айн/мин жылдамдықта 10 минут бойы 5 °C температурада центрифугаланды. Содан кейін түйіршіктер сүзгі қағазында дистилденген сумен екі рет жуылды. Түйіршіктер 40 °C температурада кептіріліп, ұнтақталды. Кератин ерітіндісі 1 г кератин ұнтағын 20 мл

0,05 M NaOH еріту арқылы дайындалды. 0,1 M HCl көмегімен pH 7-ге реттелді [19,20]. Содан кейін суспензия 1% кератин ерітіндісін алу үшін pH 6,5 200 мл фосфат буферінде қайта ерітілді.

Салыстырмалы кератинолитикалық сынама

Протеолитикалық изоляттардың кератинді гидролиздеу қабілеті сыналған. Әрбір изолят 1% кератині бар қауырсын ұнды агарда өсірілді [21,22]. Дақылдар 60°C температурада 48 сағат бойы инкубацияланды. Кератиннің гидролиз аймағы немесе кератинолитикалық индекс мөлдір аймақтың диаметрін бактериялар колониясының диаметріне бөліп, салыстыру арқылы өлшенді. Кератинолитикалық индекс ферменттің салыстырмалы күші ретінде қарастырылады. Кератинолитикалық индексі жоғары изоляттар әрі қарай зерттеу үшін таңдалды.

Кератинозалық бөліп алу

1 мл кератинолитикалық бактерия жасушалары ($\approx 10^8$ жасушалар/мл) 0,9% NaCl суспензиялары 1% кератині бар қауырсын ұны негізіндегі сорпада өсірілді pH 6,5. Дақылдар 72 сағат бойы 60°C температурада су ваннасында (150 айн/мин) инкубацияланды. Шикі ферментті бактерия культурасын бөлме температурасында 10 мин 10000 айн/мин центрифугалау арқылы алдынды. Жоғарғы қабат шикі кератинозалық ретінде жиналды [23].

Дәрекі кератинозалық талдауы

1 мл 1% кератин ерітіндісі 1 мл фосфат буфері (pH 6,5) және 1 мл шикі кератинозалық қоспасына қосылды. Қоспа бөлме температурасында 5 минут бойы алдын ала инкубацияланды, содан кейін 60°C температурада 10 минут бойы инкубацияланды. Ферментативті реакция 2 мл 10% үшхлорсірке қышқылын қосу арқылы тоқтатылды [24]. Содан кейін осы қоспаға 0,5 мл Фолин-Чиокалтео реагенті қосылды және көк түс толығымен дамығанша бөлме температурасында 30 минут бойы инкубацияланды. Абсорбция 660 нм спектрофотометрмен өлшенді. Ферменттік белсенділіктің бір бірлігі минутына 1 мг субстратты гидролиздейтін кератинозалық ферментінің мөлшері ретінде анықталады.

Бактериалды кератинозалық белсенділігіне pH пен температураның әсері

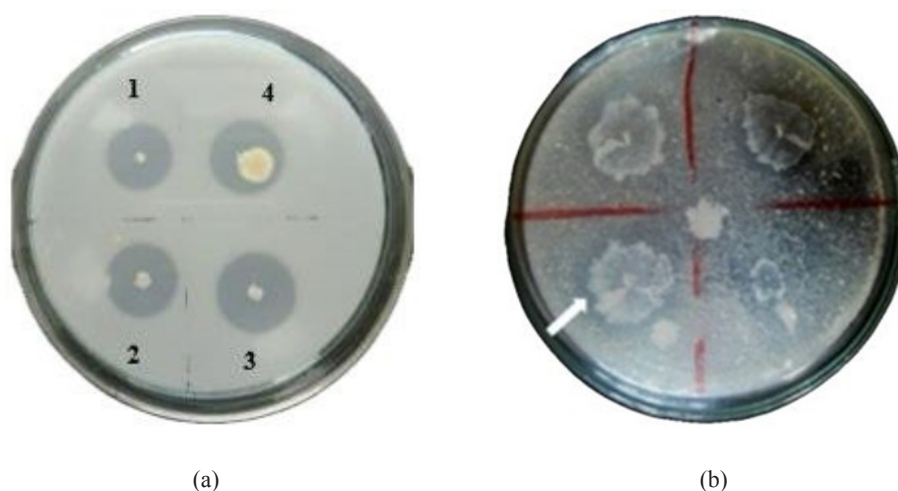
Кератинозалық белсенділігіне pH әсері әртүрлі pH 4,0, 4,5, 5,0, 5,5 мәндерінде қышқыл буфер арқылы өлшенді, 6,0, 6,5, 7,0, 7,5, 8,0, 8,5 фосфатты буфермен және 8,5, 9 Tris-HCl буферімен анықталды [25]. Реакция 60°C температурада 10 минут бойы жүргізілді. Температураның кератинозалық белсенділігіне әсері әртүрлі температурада өлшенді.

тиназаға әсерін анықтау үшін шикі ферменттер 40–80°C-қа дейінгі температурасы арасында бақыланды. Реакция рН 6,5 кезінде жүргізілді. Кератиназа белсенділігі жоғарыда сипатталғандай өлшенді.

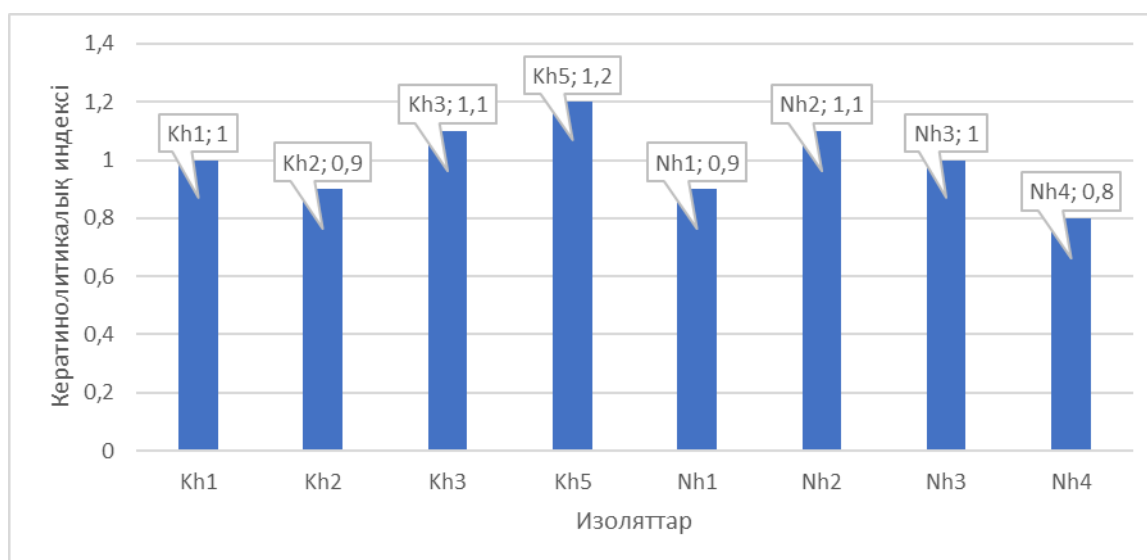
Зерттеу нәтижелері және оларды талдау

Зерттеуде нәтижесінде кератинолитикалық бактериялар Қазақстандағы Алматы облысында

орналасқан Керімағаш және Нұрлы-Арасан екі ыстық бұлақтарынан сегіз дақыл оқшауланған. Протеолитикалық бактериялар изоляты колониясының айналасында айқын аймақтың пайда болуы анықталды (1-сурет). Протеолитикалық бактерия изоляттары қауырсын ағарындағы кератинді ыдырату қабілеті бойынша өсті (2-сурет). Потенциалды изоляттардың айналасында кеңірек айқын аймақ бар екенін көрсетті қауырсынды ағарда өсетін колониялар.



1-сурет – 53°C температурада 48 сағат инкубациядан кейін изоляттардың гидролиздің айқын аймақтары (а) майсыздандырылған сүт агар петри табақшасында және (б) қауырсын ұнды агар петри табақшасында көрсетілген

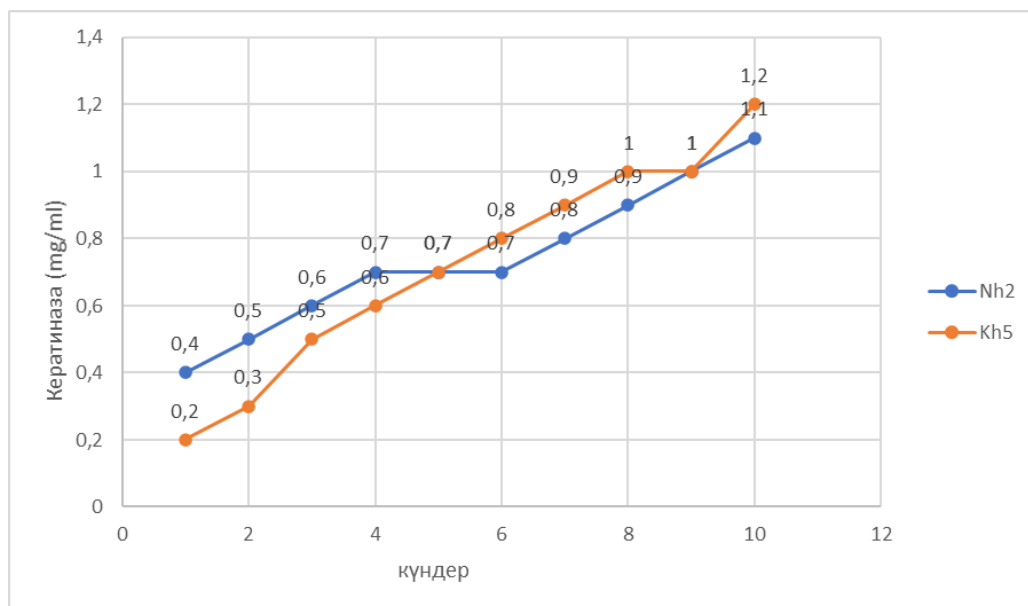


2-сурет – Кератиназаны Керімағаш (Kh) және Нұрлы-Арасан (Nh) ыстық көздерінен алынған бактериялы изоляттардың кератинолитикалық индексі ретінде талдау

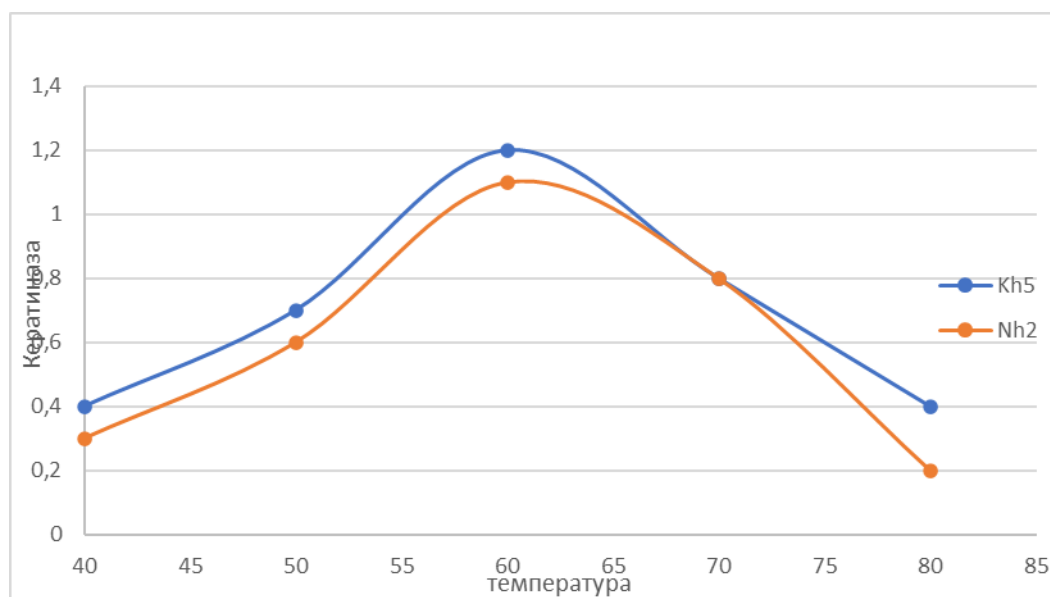
Нәтижелерде сегіз изоляттың әртүрлі дәрежедегі кератиназаны өндіру қабілетін көрсеткенін көрсетті (3-сурет). Екі Kh5 және Nh2 изоляттары кератинолитикалық әсері бар, кератинолитикалық қабілеті жоғары болып шықты. Индексі тиісінше 1,2 және 1,1. Бұл екі изолят одан әрі зерттеу үшін тандалынды.

Бактериалды кератиназаның өсудің pH диапазоны алғашымен оптималды өсу темпе-

ратурасында анықталды. Kh5 изолятына максималды температура 92 °C болса, Nh2 изолятына 72 °C анықталды. Бірақ бактериалды кератиназаның өсуіне оптималды температура 60°C екені анықталды (4-сурет). Kh5 изолятына pH көрсеткіші 4,5-9,0 дейінгі аралықта жақсы өседі. Оптималды pH көрсеткіші 5,5 болса, Nh2 изолятына Оптималды pH көрсеткіші 6.



3-сурет – 60 °C температурада pH 6,5 ортада 10 күннен кейін қауырсын сорпасындағы кератиназаның концентрациясы



4-сурет – Kh5 және Nh2 кератиназаларының жалпы белсенділігі pH 6,5 әртүрлі қоршаған орта температураларында

Нәтижесінде барлық оқшауламалар 60°C-та белсендірек болғанын көрсетті. Бактериялық оқшауламалар алынған ыстық бұлақтардағы судың температурасына жақын болғандықтан. Kh5 60°C-та белсендірек болды.

Қорытынды

Кератиназаларды өнеркәсіптің кейбір салаларында қолдану қазірдің өзінде белгілі, бұл ретте олар ауыл шаруашылығы мен тамақ қалдықтарын кәдеге жаратудың перспективалы құралы болып қала береді. Қазіргі уақытта қолда бар көптеген ферменттерді неғұрлым кеңінен пайдалануды шектейтін негізгі кедергі-

лер олардың күрделі табиғи субстраттардағы тиімділігі (қауырсындар мен сапасы төмен жүн сияқты), тұрақтылықтың төмендігі және/немесе өндірістің жоғары құны болып табылады. Осы ферменттерді жоғарыда аталған мақсаттарда пайдалануды үнемді ету мақсатында осы кедергілерді еңсерудің әртүрлі тәсілдері барған сайын байқалады.

Керімағаш және Нұрлы-Арасын ыстық бұлақтарының өнеркәсіптік маңызы бар ферменттер мен термозимдерді өндіретін құнды термофильді микроорганизмдердің бай көзі екенін көрсетті. Бұл микроорганизмдерді әртүрлі өнеркәсіптік және биотехнологиялық процестерде қолдануға болады.

Әдебиеттер

1. Barone, J. R., Schmidt, W. F., and Liebner, C. F. E. Thermally processed keratin films. *J. Appl. Polym. Sci.* 2005, 97, 1644–1651. doi: 10.1002/app.21901. *Journal of Applied Polymer Science | Wiley Online Library*
2. da Silva, R. R. Keratinases as an alternative method designed to solve keratin disposal on the environment: its relevance on agricultural and environmental chemistry. *J. Agric. Food Chem.* 2018, 66, 7219–7221. doi: 10.1021/acs.jafc.8b03152. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29968474/>
3. Williams, C. M., and Shih, J. C. H. Enumeration of some microbial groups in thermophilic poultry waste digesters and enrichment of a feather-degrading culture. *J. Appl. Bacteriol.* 1989, 67, 25–35. <https://enviromicro-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2672.1989.tb04951.x>
4. Wang, J., Hao, S., Luo, T., Cheng, Z., Li, W., Gao, F., et al. Feather keratin hydrogel for wound repair: preparation, healing effect and biocompatibility evaluation. *Colloids Surf. B Biointerf.* 2017, 149, 341–350. doi: 10.1016/j.colsurfb.2016.10.038, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927776516307597>
5. Tamreihao, K., Mukherjee, S., Khunjamayum, R., Devi, L. J., Asem, R. S., and Ningthoujam, D. S. Feather degradation by keratinolytic bacteria and biofertilizing potential for sustainable agricultural production. *J. Basic Microbiol.* 2019, 59, 4–13. doi: 10.1002/jobm.201800434
6. Kang, D., Herschend, J., Al-Soud, W. A., Mortensen, M. S., Gonzalo, M., Jacquiod, S., et al. Enrichment and characterization of an environmental microbial consortium displaying efficient keratinolytic activity. *Bioresour. Technol.* 2018, 270, 303–310. doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.006, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852418312434>
7. Tesfaye, T., Sithole, B., and Ramjugernath, D. Valorisation of chicken feathers: a review on recycling and recovery route—current status and future prospects. *Clean Technol. Environ. Policy* 2017, 19, 2363–2378. doi: 10.1007/s10098-017-1443-9, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-017-1443-9>
8. Adav, S. S., Subbaiah, R. S., Kerk, S. K., Lee, A. Y., Lai, H. Y., Ng, K. W., et al. Studies on the proteome of human hair – identification of histones and deamidated keratins. *Sci. Rep.* 2018, 8:1599. doi: 10.1038/s41598-018-20041-9, <https://www.nature.com/articles/s41598-018-20041-9>
9. Chaturvedi, V., Bhange, K., Bhatt, R., and Verma, P. Production of kartinases using chicken feathers as substrate by a novel multifunctional strain of *Pseudomonas stutzeri* and its dehairing application. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 2014, 3, 167–174. doi: 10.1016/j.bcab.2013.08.005 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1878818113000972>
10. Lange L., Huang Y., Busk P.K. Microbial Decomposition of Keratin in Nature—A New Hypothesis of Industrial Relevance. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2016, vol. 100, pp. 2083–2096 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26754820/>
11. Kim, W. K., and Patterson, P. H. Nutritional value of enzyme- or sodium hydroxide-treated feathers from dead hens. *Poult. Sci.* 2000, 79, 528–534. doi: 10.1093/ps/79.4.528 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10780649/>
12. Dias, G. J., Peplow, P. V., McLaughlin, A., Teixeira, F., and Kelly, R. J. Biocompatibility and osseointegration of reconstituted keratin in an ovine model. *J. Biomed. Mater. Res. Part A* 2010b, 92A, 513–520. doi: 10.1002/jbm.a.32394

13. Lai Y., Wu X., Zheng X., Li W., Wang L. Insights into the Keratin Efficient Degradation Mechanism Mediated by *Bacillus* sp. CN2 Based on Integrating Functional Degradomics. *Biotechnol. Biofuels Bioprod.*, 2023, vol. 16, p. 59. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37016453/>
14. Kazi YF, Kumar P and Soomro IH. Keratinolytic activity exhibited in an indigenous non-dermatophytic fungus strain *Cochliobolus lunatus* isolated from Khairpur Sindh Pakistan. *Afr Biotechnol*, 2013, 12:1669-1674. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/128816>
15. Su, C., Gong, J.-S., Sun, Y.-X., Qin, J., Zhai, S., Li, H., et al. Combining pro-peptide engineering and multisite saturation mutagenesis to improve the catalytic potential of keratinase. *ACS Synth. Biol.* 2019, 8, 425–433. doi: 10.1021/acssynbio.8b00442, <https://www.x-mol.net/paper/article/969323>
16. Papadopoulos, M. C. Effect of processing on high-protein feedstuffs: a review. *Biol. Wastes* 1989, 29, 123–138. [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(89\)90092-X](https://doi.org/10.1016/0269-7483(89)90092-X)
17. Shanmugasundaram, O. L., Syed Zameer Ahmed, K., Sujatha, K., Ponnmurugan, P., Srivastava, A., Ramesh, R., et al. Fabrication and characterization of chicken feather keratin/polysaccharides blended polymer coated nonwoven dressing materials for wound healing applications. *Mater. Sci. Eng.* 2018, C 92, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.06.020>
18. А.С. Машжан, Р. Хавьер-Лопес, А.О. Бисенбай, А.Б. Талипова, А.С. Кистаубаева Кератин құрамды қалдықтарды кератиназалық белсенділігі бар термофильді бактериямен ыдырату // *Микробиология және вирусология* – 2024. – Vol. 100.- № 3. – С. 96 -108
19. Rahayu S, Syah D and Suhartono MT. A preliminary study on keratinase from two indonesian isolates. *Animal Production*, 2010; 12: 60-68.
20. Пискаева, А. И. Оптимизация параметров культивирования консорциума микроорганизмов-деструкторов кератина в биотехнологических целях / А. И. Пискаева, А. Ю. Просеков // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология.* – 2016. – Т. 16. – С. 53-61.
21. Nnolim, N. E. *Bacillus* sp. FPF-1 produced keratinase with high potential for chicken feather degradation / N. E. Nnolim, A. I. Okoh, U. U. Nwodo // *Molecules.* – 2020. – Vol. 25, № 7. <https://doi.org/10.3390/molecules25071505>
22. Abd El-Aziz NM, Khalil BE, Ibrahim HF. Enhancement of feather degrading keratinase of *Streptomyces swerraensis* KN23, applying mutagenesis and statistical optimization to improve keratinase activity. *BMC Microbiol* 2023;23:158. <https://doi.org/10.1186/s12866-023-02867-0>
23. Abdelmoteleb A, Gonzalez-Mendoza D, Tzintzun-Camacho O, Grimaldo-Juárez O, Mendez-Trujillo V, Moreno-Cruz C, Ceceña-Duran C, Roumia AF. Keratinases from *Streptomyces netropsis* and *Bacillus subtilis* and their potential use in the chicken feather degrading. *Fermentation* 2023, 9(2):96. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020096>
24. Saeed M, Yan M, Ni Z, Hussain N, Chen H. Molecular strategies to enhance the keratinase gene expression and its potential implications in poultry feed industry. *Poult Sci.* 2024 May;103(5):103606. doi: 10.1016/j.psj.2024.103606.
25. Beti V., Maša V. Microbial Keratinases: Enzymes with Promising Biotechnological Applications. *Food Technol Biotechnol.* 2018 Sep;56(3):312–328. <https://www.ftb.com.hr/images/pdfarticles/2018/July-September/FTB-56-312.pdf>

References

1. Abd El-Aziz NM, Khalil BE, Ibrahim HF (2023) Enhancement of feather degrading keratinase of *Streptomyces swerraensis* KN23, applying mutagenesis and statistical optimization to improve keratinase activity. *BMC Microbiol* 23:158. <https://doi.org/10.1186/s12866-023-02867-0>
2. Abdelmoteleb A, Gonzalez-Mendoza D, Tzintzun-Camacho O, Grimaldo-Juárez O, Mendez-Trujillo V, Moreno-Cruz C, Ceceña-Duran C, Roumia AF (2023) Keratinases from *Streptomyces netropsis* and *Bacillus subtilis* and their potential use in the chicken feather degrading. *Fermentation* 9(2):96. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020096>
3. Adav, S. S., Subbaiah, R. S., Kerk, S. K., Lee, A. Y., Lai, H. Y., Ng, K. W., et al. (2018). Studies on the proteome of human hair – identification of histones and deamidated keratins. *Sci. Rep.* 8:1599. doi: 10.1038/s41598-018-20041-9
4. Barone, J. R., Schmidt, W. F., and Liebner, C. F. E. (2005). Thermally processed keratin films. *J. Appl. Polym. Sci.* 97, 1644–1651. doi: 10.1002/app.21901
5. Beti V., Maša V. (2018) Microbial Keratinases: Enzymes with Promising Biotechnological Applications. *Food Technol Biotechnol.* 2018 Sep;56(3):312–328. doi:10.17113/ftb.56.03.18.5658
6. Chaturvedi, V., Bhange, K., Bhatt, R., and Verma, P. (2014). Production of kertainases using chicken feathers as substrate by a novel multifunctional strain of *Pseudomonas stutzeri* and its dehairing application. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 3, 167–174. doi: 10.1016/j.cbac.2013.08.005

7. da Silva, R. R. (2018). Keratinases as an alternative method designed to solve keratin disposal on the environment: its relevance on agricultural and environmental chemistry. *J. Agric. Food Chem.* 66, 7219–7221. doi: 10.1021/acs.jafc.8b03152
8. Dias, G. J., Peplow, P. V., McLaughlin, A., Teixeira, F., and Kelly, R. J. (2010b). Biocompatibility and osseointegration of reconstituted keratin in an ovine model. *J. Biomed. Mater. Res. Part A* 92A, 513–520. doi: 10.1002/jbm.a.32394
9. Kang, D., Herschend, J., Al-Soud, W. A., Mortensen, M. S., Gonzalo, M., Jacquiod, S., et al. (2018). Enrichment and characterization of an environmental microbial consortium displaying efficient keratinolytic activity. *Bioresour. Technol.* 270, 303–310. doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.006
10. Kazi YF, Kumar P and Soomro IH. (2013) Keratinolytic activity exhibited in an indigenous non-dermatophytic fungus strain *Cochliobolus lunatus* isolated from Khairpur Sindh Pakistan. *Afr Biotechnol.* 12:1669-1674.
11. Kim, W. K., and Patterson, P. H. (2000). Nutritional value of enzyme- or sodium hydroxide-treated feathers from dead hens. *Poult. Sci.* 79, 528–534. doi: 10.1093/ps/79.4.528
12. Lai Y., Wu X., Zheng X., Li W., Wang L. (2023) Insights into the Keratin Efficient Degradation Mechanism Mediated by *Bacillus* sp. CN2 Based on Integrating Functional Degradomics. *Biotechnol. Biofuels Bioprod.*, vol. 16, p. 59.
13. Lange L., Huang Y., Busk P.K. (2016) Microbial Decomposition of Keratin in Nature—A New Hypothesis of Industrial Relevance. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 100, pp. 2083-2096.
14. Nnolim, N. E. *Bacillus* sp. (2020). FPF-1 produced keratinase with high potential for chicken feather degradation / N. E. Nnolim, A. I. Okoh, U. U. Nwodo // *Molecules*. – 2020. – Vol. 25, № 7. <https://doi.org/10.3390/molecules25071505>.
15. Papadopoulos, M. C. (1989). Effect of processing on high-protein feedstuffs: a review. *Biol. Wastes* 29, 123–138. doi: 10.1016/0269-7483(89)90092-X
16. Rahayu S, Syah D and Suhartono MT. (2010). A preliminary study on keratinase from two Indonesian isolates. *Animal Production*, 2010; 12: 60-68.
17. Saeed M, Yan M, Ni Z, Hussain N, Chen H. (2024) Molecular strategies to enhance the keratinase gene expression and its potential implications in poultry feed industry. *Poult Sci.* 2024 May;103(5):103606. doi: 10.1016/j.psj.2024.103606.
18. Shanmugasundaram, O. L., Syed Zameer Ahmed, K., Sujatha, K., Ponnmurugan, P., Srivastava, A., Ramesh, R., et al. (2018). Fabrication and characterization of chicken feather keratin/polysaccharides blended polymer coated nonwoven dressing materials for wound healing applications. *Mater. Sci. Eng. C* 92, 26–33. doi: 10.1016/j.msec.2018.06.020
19. Su, C., Gong, J.-S., Sun, Y.-X., Qin, J., Zhai, S., Li, H., et al. (2019). Combining pro-peptide engineering and multisite saturation mutagenesis to improve the catalytic potential of keratinase. *ACS Synth. Biol.* 8, 425–433. doi: 10.1021/acssynbio.8b00442
20. Tamreihao, K., Mukherjee, S., Khunjamayum, R., Devi, L. J., Asem, R. S., and Ningthoujam, D. S. (2019). Feather degradation by keratinolytic bacteria and biofertilizing potential for sustainable agricultural production. *J. Basic Microbiol.* 59, 4–13. doi: 10.1002/jobm.201800434
21. Tesfaye, T., Sithole, B., and Ramjugernath, D. (2017). Valorisation of chicken feathers: a review on recycling and recovery route—current status and future prospects. *Clean Technol. Environ. Policy* 19, 2363–2378. doi: 10.1007/s10098-017-1443-9
22. Wang, J., Hao, S., Luo, T., Cheng, Z., Li, W., Gao, F., et al. (2017). Feather keratin hydrogel for wound repair: preparation, healing effect and biocompatibility evaluation. *Colloids Surf. B Biointerf.* 149, 341–350. doi: 10.1016/j.colsurfb.2016.10.038
23. Williams, C. M., and Shih, J. C. H. (1989). Enumeration of some microbial groups in thermophilic poultry waste digesters and enrichment of a feather-degrading culture. *J. Appl. Bacteriol.* 67, 25–35. doi: 10.1111/j.1365-2672.1989.tb04951.x
24. А.С. Машжан, Р. Хавьер-Лопес, А.О. Бисенбай, А.Б. Талипова, А.С. Кистаубаева (2024). Кератин құрамды қалдықтарды кератиназалық белсенділігі бар термофильді бактериямен ыдырату // *Микробиология және вирусология* – 2024. – Vol. 100.- № 3. – С. 96 -108
25. Пискаева, А. И. (2016). Оптимизация параметров культивирования консорциума микроорганизмов-деструкторов кератина в биотехнологических целях / А. И. Пискаева, А. Ю. Просеков // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология*. – 2016. – Т. 16. – С. 53-61.

Авторлар туралы мәліметтер:

Бисенова Үлжан Мұхтарқызы (корреспондентный автор) – PhD студент, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: bisenova_@mail.ru)

Кистаубаева Аида Сериковна – биология ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: Aida.Kistaubaeva@kaznu.kz)

Абдулжанова Малика Анварбековна – PhD, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: malika_81_@mail.ru)

Information about authors:

Bissenova Ulzhan Mukhtarkyzy (corresponding author) – PhD student, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bissenova_@mail.ru)

Kistaubayeva Aida Serikovna – Candidate of Biological sciences, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Aida.Kistaubaeva@kaznu.kz)

Abdulzhanova Malika Anvarbegovna – PhD, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: malika_81_@mail.ru)

Келін түсті 21 желтоқсан 2024 жыл

Қабылданды 20 ақпан 2025 жыл