



Szerkesztette

Bélafiné Bakó Katalin és Lajtai-Szabó Piroska

Biokatalízis az élelmiszeriparban és a könnyűiparban



Pannon Egyetemi Kiadó 2026

Biokatalízis az élelmiszeriparban és a könnyűiparban

Szerkesztette

Bélafiné Bakó Katalin és Lajtai-Szabó Piroska

Biokatalízis az élelmiszeriparban és a könnyűiparban

Szerkesztette

Bélafiné Bakó Katalin és Lajtai-Szabó Piroska

Pannon Egyetemi Kiadó 2026

Biokatalízis az élelmiszeriparban és a könnyűiparban

A jelen digitális kiadás alapjául a 2021-ben megjelent
Biokatalízis az élelmiszeriparban és a könnyűiparban
(Pannon Egyetemi Kiadó, Veszprém) című mű szolgált

Szerkesztette

Bélafiné Bakó Katalin és Lajtai-Szabó Piroska

A kötetet lektorálta

Dr. Gubicza László

Kiadja a Pannon Egyetemi Kiadó
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.

ISBN 978-963-396-317-3



© Pannon Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2026

Anyanyelvi lektor: Bélafi-Zihár Dóra
Borítóterv és kiadványszerkesztés: Vipler Nikolett
A kiadásért felelős a Pannon Egyetem rektora

Tartalomjegyzék

Előszó	5
1. Tejipar	6
2. A gabonafeldolgozás enzimes eljárásai	28
3. Gyümölcsfeldolgozás	39
4. Természetes aromák előállítása	43
5. Húsipar	51
6. Dohányfeldolgozás	65
7. Söripar és borászat	75
8. Prebiotikumok	86
9. Édesítőszer	97
10. Állateledelek és takarmányok	104
11. Enzimek alkalmazása a tisztítószerknél	110
12. Textilipar	117
13. Biokatalízis a papíriparban	132
14. Enzimek a bőrfeldolgozásban	138
15. Biológiai szennyvíztisztítás	143
16. Hulladékhasznosítás	151
17. Egyéb alkalmazási lehetőségek	174
Fogalomtár	182

Előszó

A biokatalizátorokat már igen régóta, 6–8 ezer éve használja – jöllehet nem tudatosan – az emberiség élelmiszereinek feldolgozása során. A legelső „technológiák” közé tartozott a sörfőzés, a kenyérsütés, a sajt- és borkészítés. Később, i. e. 2000 körül kezdődött az ecetgyártás, amely az első szándékosan előidézett (!) biológiai oxidációt jelentette.

A tudatos biokatalizátor-felhasználás jóval későbbi jelenség történelmünkben, amikor tudományos igényességgel kezdték el vizsgálni ezeket a biofolyamatokat, s alkalmazni őket a különféle technológiáknál. A biokatalizátorok nagy léptékű ipari alkalmazását azonban csak az 1960-as évek hozták meg az élelmiszeriparban (keményítő hidrolízise amilázokkal és glükóamilázzal), a könnyűiparban pedig inkább a '80-as évekre tehető elterjedésük.

E jegyzet az enzimek és mikrobák élelmiszeripari és könnyűipari alkalmazásával foglalkozik. Magyarországon – tudásunk szerint – még nem jelent meg ebben a témakörben könyv vagy jegyzet, így kiadványunk hiánypótlónak számít, s főként a felsőoktatásnak szánjuk, de reményeink szerint más érdeklődő olvasók is haszonnal forgathatják.

Jegyzetünk első részében sorra vesszük a hazai élelmiszeripari ágazatok nagy részét (beleértve a dohányipart is), ahol biokatalizátorokat használnak. Külön fejezetet szentelünk az aromáknak és a prebiotikumoknak, melyek ugyan nem képviselnek külön ágazatot, de az utóbbi időszakban szerepük megnövekedett, s alkalmazásuk több szakágban is jelentősnek mondható. Az állati eledelek biofolyamatok segítségével történő gyártásáról szóló fejezet átmenetet képez az élelmiszeripar és a könnyűipar között, igazából mindkét területhez tartozhat.

Ezután a „klasszikus” könnyűipari technológiák következnek (textil, papír, bőr). Szintén a könnyűiparhoz sorolható a tisztítószeret gyártó ipar, mely a felhasznált enzimek mennyiségét tekintve az egyik legjelentősebb ágazat, így összeállításunkban ennek is külön fejezetet szentelünk.

A szennyvíztisztításról és a hulladékhasznosításról szóló fejezetek leginkább általánosan használható irányelveket, technikákat mutatnak be, amelyek több ágazatban is alkalmazhatók.

Végül az utolsó fejezetben különleges és érdekes egyedi példákat sorolunk fel a biokatalízis alkalmazására az egyes ágazatoknál.

Reméljük, hogy kiadványunk elnyeri olvasóink tetszését.

Veszprém, 2021. január

Bélafiné Bakó Katalin
Lajtai-Szabó Piroska
Szerkesztők

1. Tejipar

*Pásztorné Huszár Klára, Csehi Barbara, Nyulasné Zeke Ildikó Csilla,
Visy Anna, Friedrich László Ferenc¹*

1.1 Bevezetés

Az egészséges és kiegyensúlyozott étrend fontos elemeként szerepel a tej és a tejtermékek fogyasztása. Felmerülhetnek kérdések azonban a termékek felnőttkori fogyasztásánál. A viták ellenére az epidemiológiai vizsgálatok megerősítik a tej emberi táplálkozásban betöltött jelentőségét, és megerősítik fogyasztásának szerepét számos szív- és érrendszeri betegség megelőzésében, a rák egyes formáiban, az elhízásban és a cukorbetegségben [Csehi, 2019].

A tej különleges helyet foglal el az állati eredetű termékek között. Olyan élelmiszer, mely az ember számára (csak rövid időre), de elegendő tápanyagot és energiát tartalmaz az életfenntartáshoz. A tej legnagyobb része víz, ezenfelül tartalmaz még zsírt, fehérjét, szénhidrátot és ásványi anyagokat (1.1. táblázat).

Megállapították, hogy a tejszír az összes lipid közül a legkönnyebben emészthető, megtalálhatók benne a rövid szénláncú zsírsavak is, melyek elősegítik a bélfal regenerációját. Az n-6-, n-3-zsírsavak aránya 2,5 : 1-hez, mely optimális. A tejfehérjék között számos bioaktív fehérje található, melyek opioid agonisták, opioid antagonisták, antimikrobiotikusak, immunstimulálók, immunmodulálók, antihipertenzív hatásúak, ezenfelül előfordulnak TCT-aggregációt gátló és LDL-csökkentő fehérjék is [Csehi, 2019]. A kérődzők tejében („kazeintej”) előforduló fehérjék többsége kazein, míg az anyatej és az egypatás állatok teje („albumintej”) savófehérjéket tartalmaz nagyobb mennyiségben.

1.1. táblázat: Néhány tejfélése átlagos összetétele

Megnevezés	Víz [g/100 g]	Szárazanyag [g/100 g]	Zsír [g/100 g]	Összes fehérje [g/100 g]	Cukor [g/100 g]	Hamu [g/100 g]
<i>Kazeintej</i>						
Tehéntej	87,4	12,6	3,8	3,5	4,6	0,8
Kecsquetej	86,8	13,2	4,0	3,8	4,5	0,9
Juhtej	80,5	19,5	8,2	5,3	5,0	0,9
Bivalytej	80,9	19,1	7,9	5,9	4,5	0,8
<i>Albumintej</i>						
Kancatej	90,1	9,9	0,6	2,2	6,8	0,4
Szamártelj	90,9	9,1	1,2	1,5	6,0	0,4
<i>Anyatej</i>	<i>87,6</i>	<i>12,4</i>	<i>4,5</i>	<i>1,3</i>	<i>6,3</i>	<i>0,3</i>

1 Szent István Egyetem, Élelmiszertudományi Kar,
Hűtő- és Állattermék Technológiai Tanszék
1118 Budapest, Ménesi út 43-45.
pasztorne.huszar.klara@uni-mate.hu

s különböző patológiás hatásokra a legkönnyebben károsodik. Az előbbi sajátosságok miatt a laktóz felszívódásának zavara a leggyakoribb malabszorpció [Varga, 2007].

A laktózintolerancia (laktózmalabszorpció) olyan emésztési zavar, ahol a tejcukor részben vagy egyáltalán nem emészthető meg a vékonybélben. A laktóz tehát továbbjut a vastagbélbe, ahol az ott lévő baktériumok bontják le, és a keletkező anyagcseretermékek okozzák a hasi diszkomfortot, puffadást, hasmenést. A laktáztermelés az emlősállatokban és az emberben is az anyatejes táplálás időszakában, illetve a kisgyermekkorban a legaktívabb, az emberek 65%-ánál korral csökken a tejcukorbontási képesség. A laktáz enzim aktivitásának csökkenése nem visszafordítható. A tejcukoremésztési képesség, azaz az egyéni toleranciaszint változó [Pálfi, 2018]. A felnőtt lakosság többségének valamilyen mértékben csökkent a tejcukoremésztési képessége.

A laktózemésztési zavarban szenvedők étrendjének a tejcukoremésztés függvényében laktózzsегénynek kell lennie. Az étrend a kiegyensúlyozott, egészséges táplálkozás irányelveinek megfelelően napi ½ liter laktózmentes tejet vagy ennek megfelelő tejterméket tartalmaz. Az élelmiszeripar előállít laktózmentes tejet, tejfölt, joghurtot, vaját, tehéntúrót, túródesszertet, vagyis szinte minden normál tejterméknek van laktózmentes alternatívája. Az egyéb élelmiszercsoportokból az egyéni tolerancia függvényében választhatók a tejcukormentesek. A laktózzsегény étrend betartását megkönnyítik a gyógyszerárban kapható, laktázenzimet tartalmazó készítmények.

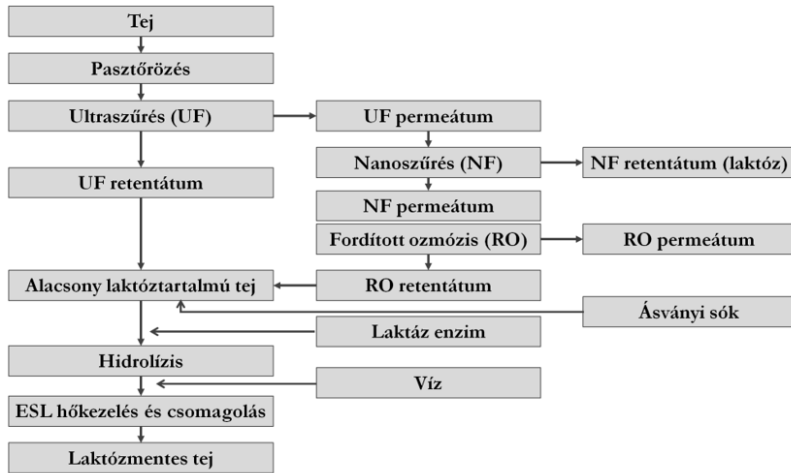
A béta-galaktózidáz enzimet izolálták állati és növényi szövetekből, baktériumokból, élesztőgombákból (pl. *Kluyveromyces lactis*, *K. fragilis*) és penészgombákból (pl. *Aspergillus niger*, *A. oryzae*) [Harju, 2012]. A β-galaktózidáz előállítására ma az ipar mikroorganizmusokat használ, ugyanis több törzs termeli ezt az enzimet. Az élelmiszeripar szempontjából jelentős az *Aspergillus oryzae*, az *A. niger* és a *Kluyveromyces lactis*. Az *Aspergillusok* penészeredetű laktáz enzimjének pH-optimuma pH 4–5 közé esik, hőmérsékleti optimuma ~55 °C. Extracellulárisan termeli a laktáz enzimet, emiatt az enzimelőállítás költsége viszonylag alacsony, azonban az alacsony pH-érték miatt tejben nem alkalmazható. A savanyú savó (tejipari melléktermék) laktóztartalmának csökkentésére viszont használható.

A *K. lactis* élesztő intracellulárisan termeli a laktázt, emiatt költségesebb az enzim kivonása. Viszont a pH-optimuma pH 6–7 közötti, hőmérséklet-optimuma ~35 °C, emiatt tejben és tejtermékekben jól alkalmazható a laktóz hidrolízisére [Pécs, 2016].

A tejipar napjainkban sokféle terméket állít elő laktózmentes formában is, ezért fontos tudnunk, mit is takar a laktózmentes megnevezés. A laktózmentes kifejezés azt jelenti, hogy a termék tejcukortartalma kevesebb, mint 0,1 g/100 cm³ vagy 0,1 g/100 g.

A megfelelő mértékű laktóztartalom-csökkentés többféle technológiai eljárással elérhető: kromatográfiás módszerrel, membránszeparációval (elsősorban ultraszűréssel), enzimes hidrolízissel, illetve ezek kombinációjával (1.2. ábra).

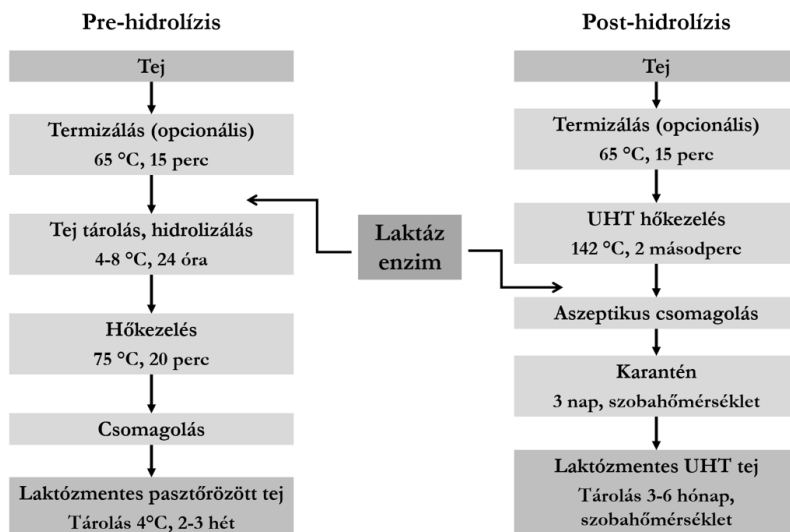
Ultraszűréssel eltávolítható a tejcukor egy része, viszont sok más értékes anyag, például a vízoldható vitaminok, ásványi anyagok és a fehérjék is távozhatnak. További membránszeparációs lehetőségek az ultraszűrés és a diaszűrés kombinálása, a fordított ozmózis, a nanoszűrés, valamint a háromszoros ultraszűrés és a retentát visszahígítása. A tejcukor a retentátban 33–34%, a visszaállított (rekonstituált) tejben már csak 1,6%, amit ezután enzimatikusan bontanak le. Ezzel az eljárással a normál tejhez hasonló édességű tej állítható elő [Kátay, 2020].



1.2. ábra: Laktózmentes tej előállítása membránszűrés és enzimes hidrolízis kombinálásával
[Tossavainen, 2003]

Kromatográfiás elválasztással is kivonható a tejcukor, ahol a folyamat során egy erre a célra kifejlesztett speciális gyantát tartalmazó oszlopon vezetik át a tejet vagy a savót, és így a laktóztartalom akár 0,01% alá is csökkenthető [Kátay, 2020]. A kromatográfiás eljárás fő hátránya, hogy időigényes a folyamat, és drága a berendezés.

Magyarországon a legelterjedtebb módszer az enzimes hidrolízis, melynek során a mikroorganizmusokból kivont β -galaktozidáz enzim a tejhez adagolva a tejcukrot glükózra és galaktózra bontja. Az enzimes hidrolízis történhet a hőkezelés előtt vagy után (1.3. ábra).



1.3. ábra: Prehidrolizált, poszthidrolizált laktózmentes tejtermékgyártás folyamata [Dekker, 2019]

A hőkezelés előtti laktózbontás (pre-hidrolízis) 32–38 °C-os hőmérsékleten történik, és több óra hosszát tart. A művelet mikrobiológiai szempontból kockázatos lehet, ha nem megfelelőek a higiéniai körülmények (alapanyag és műszaki körülmények). A mikrobiológiai kockázat csökkenthető, ha a hidrolízist hűtött körülmények között (10 °C alatt) végzik, de ebben az esetben a reakciósebesség jelentősen lassul, a folyamat sokkal hosszabb időt vesz igénybe (kb. 24 óra). A hőkezelést megelőző laktózbontásnál nagyobb enzimkoncentrációra van szükség, mint a hőkezelés után hidrolizált termékek előállításakor. A hőkezelés (UHT) során a laktózhidrolizált tej hajlamosabb a Maillard-reakcióra, mint a normál tej, mert a laktózból keletkező glükóz és galaktóz reakcióképesebb, mint a laktóz önmagában [Kátay, 2020].

A hőkezelés után végzett laktózbontás (poszt-hidrolízis) részben kiküszöböli az előbb ismertetett technológia hátrányait. Ekkor a már UHT-kezelt tejbe in-line juttatják be a steril enzimet, ami a kötelező karanténtárolás alatt a hidrolízis révén egyrészt garantáltan lecsökkenti a tejcukor mennyiségét a laktózmentes termékek követelményeként elvárt 0,1–0,01% szint alá, másrészt ezzel elkerülhető a nem kívánatos Maillard-reakció [Harju, 2012]. További előnye, hogy hosszú távon költséghatékonyabb, mivel kevesebb enzimkészítményre van szükség [Kátay, 2020].

Alaktózmentes tej előállításának nagy költsége – mely körülbelül kétszerese a hagyományos tej előállításának – csökkenthető úgy is, hogy az enzimet a gyártó által javasolt koncentrációban, vagy bizonyos készítményeknél annak kétszeresét alkalmazva, 2 °C-on (a gyakorlatban 6 °C-on) adjuk a tejhez. Ezen a kis hőmérsékleten kb. 1 napig tart a laktóz hidrolízise, amely során 95–98%-ban lebomlik glükózzá és galaktózzá [Horner, 2011].

Az enzimes hidrolízis elvégzése után a kapott tej íze a szokásosnál kissé édesebb, de nem túl édes. Irodalmi adatok szerint a tárolás során a laktózhidrolizált tartós tej 40–50%-kal gyorsabban romlott meg, ami azzal magyarázható, hogy a keletkezett monoszacharidok

kémiai reakciói gyorsabbak, mint a tejcukoré. 10 °C alatti hűtőtároláskor ez a gyorsabb romlás azonban alig észrevehető.

Az enzimek ma már számos előállító cégtől beszerezhetők. Az enzimgalmazók általában kész technológiai leírást adnak készítményeik mellé (adagolási mennyiség, hőmérséklet, idő), illetve speciális termék esetén segítséget nyújtanak az enzim adagolási mennyiségének meghatározásában is [Kátay, 2020].

Néhány iparban használatos laktázenzim-készítmény és gyártó: GODO-YNL2 (DYL; Danisco A/S, Dánia); Validase VYL és Validase VFL (Valley Research, USA); Enzeco Lactase NL (EYL; Enzyme Development Corporation, USA); Ha-Lactase 5200 (Chr. Hansen, Dánia); Saphera® and Lactozym® Pure (Novozymes, Dánia); Maxilact® (DSM, Hollandia).

Az elmúlt két évtizedben sokat fejlődött az enzimek előállítási módja, második generációs laktázenzimek is megjelentek, ezáltal bővültek a gyártók technológiai lehetőségei, egyúttal a beszerzési ár is csökkent. Az első nemzedék az ún. semleges pH-értéken működő laktáz enzimek köre, melyek semleges vagy ahhoz közeli pH-értéken fejtik ki laktózbontó hatásukat, majd savasabb környezetben (~pH 5) fokozatosan inaktívvá válnak. Ebből adódóan főként semleges pH-értékű tejtermékek (laktózmentes tej, ízesített tejkészítmények, desszertek) előállításához használhatók ezek az enzimek. Kezdetben a laktózmentes savanyított termékek gyártástechnológiáját a savanyítási folyamat közben bekövetkező inaktivitás miatt két szakaszban végezték. Először az alapanyag, a tej és a tejszín teljes vagy részleges laktózbontása történt, majd a laktózmentesített alapanyaghoz adták a starterkultúrát [Kátay, 2020].

Az újabb laktázenzimek már jól tolerálják a savanyú pH-jú közeget is, így az aktív laktózbontás folyamata 4,3 vagy akár kisebb pH-értékig is folytatódik anélkül, hogy a laktáz enzim inaktíválódna. A savanyított termékeknél ezenkívül a tejsavbaktérium-kultúrák anyagcseréjükhöz és szaporodásukhoz tejcukrot használnak fel, így akár 60%-kal csökkentik a lebontandó tejcukor mennyiségét. Ez az arány jelentős enzimmegtakarítást, és így költségcsökkentést eredményez. A gyártási folyamat időtartama lerövidül, hiszen az enzim adagolását követően szinte azonnal bekultúrázható tejsavbaktérium-szintenyzéssel az alapanyag tej (tejföl-, kefir-, joghurt- és túrókészítéshez) [Kátay, 2020].

Mivel az enzimmészítmények igen drágák, ezért a technológia kialakításánál az enzim visszanyerésére, újrafelhasználására törekednek. A visszanyerés megvalósítható ultraszűréssel, melynek lényege, hogy a nagy molekulájú enzimfehérjét a reaktorban elhelyezett vagy hozzá kapcsolt membránnal visszatartják, és regenerálás után újra felhasználják.

A probléma megoldására további alternatívát jelent a rögzített enzimek alkalmazása. Amennyiben a laktózbontás immobilizált (rögzített) enzimekkel történik, akkor a laktáz enzimet adszorpcióval, kovalens vagy ionos kötéssel szilárd hordozóhoz rögzítik, vagy szol-gél-rögzítési technikákkal természetes (pl. alginát) vagy mesterséges (pl. polisztirol) makromolekulákhoz kapcsolják, vagy mikrokapszulázzák. Az immobilizálás előnye, hogy az enzim visszanyerhető és újra felhasználható, és a rendszer működési ideje akár több ezer óra is lehet. Ezek az enzimmészítmények szélesebb pH-tartományt tolerálnak, és jobb a hőstabilitásuk [Selvarajan, 2019]. Ugyanakkor a rögzítés során az enzimaktivitás általában csökken, valamint a gazdasági számításoknál az immobilizálási eljárás költségeit is figyelembe kell venni.

1.3. Transzzglutamináz enzim alkalmazási lehetőségei a tejiparban

Az enzimek másik nagy csoportja a termékgyártást segíti oly módon, hogy alkalmazásukkal az adalékanyagok mennyisége csökkenthető, vagy akár el is hagyható. Az egyik ilyen enzim a mikrobiális transzzglutamináz enzim.

A mikrobiális transzzglutamináz enzim (röviden: mTG) az enzimosztályozás szerint a transzferázok csoportjába, azon belül pedig az acil-transzferázok alcsoportjába tartozik, ennek megfelelően ún. aciltranszfer-szerepet lát el, melynek lefolyása három különböző kémiai reakcióhoz vezethet. Ezek az aciltranszfer-reakció, a keresztkötés és a dezaminálás.

Ezek közül élelmiszer-mátrixban legfontosabb a keresztkötés kialakítása a lizin ϵ -aminocsoportja és a glutamin γ -karboxil-amid-csoportja között. A reakció során ϵ -(γ -glutamil)-lizin izopeptidkötés alakul ki, és ammónia szabadul fel. Ez a keresztkötés nagyon stabil, és ellenáll a hőkezelésnek is. Az mTG az élelmiszerekben lévő fehérjék többségével azok szubsztrátspecifitálásának függvényében lép reakcióba, és így fejt ki állománymódosító és fehérje-visszatartó szerepét. Jó példa erre a savófehérjék és a kazeinfehérjék közti keresztkötés kialakítása, melynek révén a tejipari állománymódosító anyagok kiválthatók, illetve kevesebb értékes összetevő (pl. savófehérje) kerül a melléktermékekbe [Darnay, 2016].

A mikrobiális transzzglutamináz enzimet 1987 óta használják hivatalosan. Az enzimet legjobban termelő mikroba a *Streptomyces mobaraensis* volt, ezért ennek alkalmazása terjedt el ipari méretekben. A mTG széles pH-tartományban (pH 5–9) mutat aktivitást, pH-optimuma pH 5–7 közé tehető. A mTG 0–60 °C hőmérséklet-tartományban aktív, optimuma 45–55 °C körüli, 70 °C-tól kezd koagulálódni, amely irreverzibilis szerkezetváltozás az enzim fokozatos inaktiválódásához vezet [Darnay, 2016].

Miután az élelmiszer (pl. túró) kívánt szerkezete, állománya kialakult, le kell állítani az enzim működését, hogy a kialakult szerkezetet megtartsuk. Ennek legegyszerűbb módja a megfelelő ideig és hőmérsékleten történő hőkezelés. Az inaktiváláshoz vizsgálatok szerint 70 °C feletti hőmérsékletre és akár 10 perc hőkezelésre is szükség lehet. A nyers tejben van egy felismert, de szerkezetileg még nem azonosított mTG-gátló vegyület, ezért az mTG alkalmazása csak pasztörözött tejben hatásos [Darnay, 2016].



1.4. ábra: Az mTG élelmiszeripari alkalmazásának lehetőségei
[Motoki, 2000; Darnay, 2016]

Élelmiszeripari alkalmazása azért terjedt el széles körben, mert az enzim nem szubsztrátspecifikus, emiatt felhasználása igen sokrétű lehet, amit a következő ábra mutat be (1.4. ábra).

Az mTG-vel kezelt tejtermékekben az enzim fehérjehálót hoz létre úgy, hogy a tejben lévő szabad aminos és a tejfehérje-mátrix között keresztkötést alakít ki. A savanyított tejtermékek esetén a kialakuló szabályos fehérjeháló a joghurt savóeresztését (szinerézis) csökkenti, emellett a térháló által biztosított állomány lehetővé teszi kis zsírtartalmú joghurt esetén is a megfelelő gélzilárdság kialakulását. A trappista sajt gyártása során a kihozatal növelése, a tejkomponensek nagyobb arányú hasznosítása és ezzel a savó mennyiségének, ill. hasznosanyag-tartalmának csökkentése érdekében használják az enzimet. Az ömlesztett sajtok hőstabilitása javul, így az enzimkezelt termék állománya a hőkezelés ellenére is változatlan marad [Darnay, 2016].

1.4. Oltós alvasztású sajtok

Az oltós alvasztású, érlelt sajt a Magyar Élelmiszerkönyv definíciója alapján tejből, a jellegének megfelelő kultúra hozzáadásával, enzimes alvasztással, a tejfehérje részleges vagy teljes koagulálásával, savóelvonással – membránszeparációs technológiával gyártott sajt esetén permeátelvonással – előállított szilárd vagy félszilárd termék, amelyben a savófehérje–kazein arány nem haladja meg a tejben lévő, és amelyet rövidebb-hosszabb idejű érlelés után fogyasztanak [Magyar Élelmiszerkönyv, 1-3/51-1].

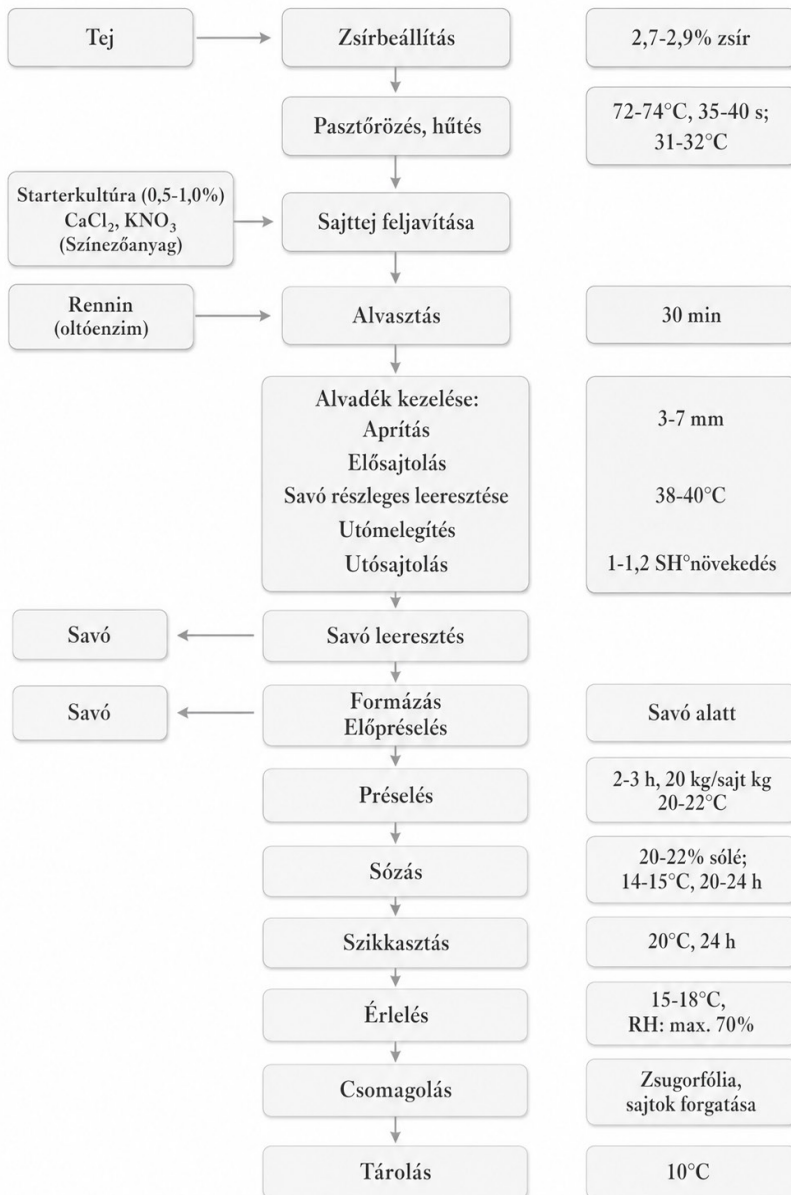
Az oltós alvasztású sajt tartalmazhat tejet, tejszínt, író, savót, ill. olykor ezek keverékéből áll. Hozzáadhatók ízesítők, színezők és más élelmiszeradalék-anyagok, illetve baktérium-, némely esetben penész- és élesztőszintenyészetek hozzáadásával készítik el. A sajttej vagy üsttej a sajt alapanyaga. A kazeint elsősorban enzimes úton, hidrolízis révén koagulálják, de történhet ez savanyítással, hődenaturációval is. Jelentős tejalkotók még a sajtban: tejszír, tejcukor, tejsav és sói, ásványi sók, víz stb. A koagulált fehérjét (mely magába foglalja a tejalkotókat) alvadéknak nevezzük. Az alvadékból általában formázás, préselés, sózás után nyerik a sajtot, amelyet vagy érlelve, vagy érlelés nélkül fogyasztanak. Az oltós alvasztású sajtok gyártási folyamatát szemlélteti az 1.5. ábra.

Az oltós alvasztású sajtokat három szempont szerint szokás csoportosítani: a tej eredete, a sajt zsírtartalma vagy a sajt állománya szerint. A tej eredete szerint megkülönböztethető tehén-, juh-, kecske- stb. vagy kevert tejből készített sajt. A zsírtartalom alapján a sajtokat úgy csoportosítják, hogy a szárazanyagban mennyi zsír van. Így beszélhetünk nagy zsírtartalmú, zsíros, félzsíros, kis zsírtartalmú és sovány sajtokról. Az oltós alvasztású sajtokat főként állományuk alapján különböztetjük meg. Vannak extra kemény és kemény, félkemény és lágy sajtok (1.2. táblázat).

1.2. táblázat: Oltós alvasztású sajt készítmények alcsoportjai [Szakály, 2001]

Kemény sajtok	Félkemény sajtok	Lágy sajtok
Reszelni való sajtok (pl.: Parmezán)	Erjedési lyukas sajtok (pl.: Trappista)	Rúzsflórával érő sajtok (pl.: Pálpusztai)
Erjedési lyukas sajtok (pl.: Pannónia)	Röglyukas sajtok (pl.: Óvári)	Fehér nemespenészzel érő sajtok (pl.: Camembert)

Cheddarozással gyártott sajtok (pl.: Cheddar)	Zöld nemespenésszel érő sajtok (pl.: Márvány)	Belsőérésű lágy sajtok (pl.: Sport)
	Hevített, gyúrt sajtok (pl.: Parenyica)	Sólében érlelt sajtok (pl.: Feta)



1.5. ábra: Az oltós alvasztású sajtok gyártástechnológiája

Enzimkészítmények

A tej alvasztásához, szol-gél átalakulásához enzimes hidrolízisre van szükség. A kereskedelmi forgalomban különböző erősségű, állományú, kiszerezésű és forrású oltók szerezhetők be.

Léteznek állati eredetű és mikrobiológiai eredetű tejtöltő enzimek. Az állati eredetű oltóenzimeket általában a borjak, illetve szarvasmarhák oltógyomrából vonják ki. A tisztítást és oldatbeállítását követően a kappa-kazeinre specifikus enzimkészítményt kapunk, melynek használatával jó minőségű alvadék állítható elő. A mikrobiológiai eredetű készítmények forrása lehet pl. *Aspergillus niger*, *Aspergillus awamori* vagy *Rhizomucor miehei* gomba. A *Rhizomucor miehei* által termelt enzimet sajátosságaiból fakadóan inkább friss sajtok készítéséhez ajánlják, mivel az jelentősen befolyásolja a sajt érzékszervi, valamint állománybeli tulajdonságait.

A sajttej kezelése

A sajttej kezelése a tej tisztításából, a zsírtartalom beállításából, valamint a tej pasztörözéséből és hűtéséből áll. A sajttej tisztítását két lépcsőben, előszűréssel és finomtisztítással végzik.

A tej zsírtartalmát a sajt kívánt zsírtartalmának figyelembevételével kell beállítani. Mivel a sajt szerkezete a fehérjéből, azon belül elsősorban a kazeinből alakul ki, a gyártott sajt mennyiségét, és így a szükséges zsír mennyiségét (tehát a tej zsírtartalmát is) a sajttej fehérjetartalma, ezen belül a kazeintartalma határozza meg. Kisebb fehérjetartalmú tej esetén tehát a zsírtartalmat valamivel kisebb értékre kell beállítani.

Magyarországon csak hőkezelt tejből készült terméket lehet forgalomba hozni, így szükséges a tej hőkezelése. A pasztörözést 72–74 °C-on, 36–40 s hőtartással végzik. A pasztörözés előnye, hogy a tejben lévő mikroorganizmusok elpusztítása révén az érlelés sokkal biztonságosabb. Hátránya, hogy a tej nyers jellege károsodik, a savófehérjék egy része denaturálódik, és a kalcium- és foszforsók oldhatatlanná válnak, ezáltal romlik a tej alvadóképessége. Hőkezelés után a sajttejet a starterkultúra hőmérséklet-optimumánál 1–2 °C-kal nagyobb hőmérsékletre hűtik. Ez mezofil starterkultúrák használatakor 28–32 °C.

A következő lépés a sajttej érlelése. A sajttej érlelésének az a célja, hogy megteremtse a sajtgyártásban alkalmazott kultúrák működésének optimális feltételeit. Amennyiben a sajttejet a gyártás meggyorsítása érdekében előérlelik, a pasztörözött tejet 8–12 °C-ra hűtik, és 0,1–0,2% mezofil kultúrával (pl. vajkultúrával) beoltva 12–18 óra hosszat tárolják. Az előérlelés alatt megindul elsősorban a tejcukor lebontása, és a mikrobák olyan anyagokat termelnek, amelyek később tápanyagul szolgálnak a sajt érésében szerepet játszó mikrobáknak. Az elért savfok emelkedése csupán kb. 0,1–0,3 SH°. Az előérlelés egyrészt a minőséget, másrészt a gyártást egalizálja [Szakály, 2001; Ketting, 1987].

A sajttej feljavítása

A sajttej feljavításának segédanyagok hozzáadásával több célja van:

- a pasztörözés és a tej eredeti mészhíánya következtében csökkent alvadóképesség helyreállítása,
- a pasztörözés után *Coli aerogenes*-szel ill. *Clostridium*mal való fertőződés ellensúlyozása,
- az erjedési készség erősítése.

Az alvadóképességet CaCl_2 adagolásával javítják. Száz liter tejhez 10–25 g CaCl_2 -ot adnak a hőkezelés során oldhatatlanná vált Ca-sók pótlására.

A pasztőrözött sajttej gyakran fertőződik coliform baktériumokkal, amelyek nagymértékű elszaporodásuk esetén a sajtok ún. korai (prés alatti) puffadását idézhetik elő, mivel hidrogént termelnek. Ezek gátlására sok helyen K- vagy Na-nitrátot alkalmaznak, annak ellenére, hogy a nitrátok az ember egészségére károsak, valamint a tej alvadási készségét is rontják, keserű ízt és egyenetlen színeződést okoznak a sajtban. A jó higiéniai gyakorlattal rendelkező sajtüzemekben, ahol a reinfekció nem számottevő, ma már nem alkalmazzák a nitrátokat.

A sajttej érlelése

A sajttejet ezután érlelik. A gyártandó sajtajtának megfelelő starterkultúrát adnak a tejhez (lásd 1.3. táblázat). A mezofil starterkultúrák hőmérséklet-optimuma 20–40 °C között van, a termofilek 45 °C-ig képesek szaporodni, működni.

1.3. táblázat: A sajtgyártáshoz leggyakrabban használt starterkultúrák

Sajtszoport	Színtenyészet
Lágy sajtok	Mezofil keverékkultúra (vajkultúra) <i>Brevibacterium linens</i> <i>Penicillium camemberti</i> <i>Penicillium candidum</i>
Félkemény sajtok	Mezofil keverékkultúra (vajkultúra) <i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i> <i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> <i>Leuconostoc mesenteroides</i> ssp. <i>dextranicum</i> <i>Lactobacillus casei</i> <i>Brevibacterium linens</i> <i>Penicillium roqueforti</i>
Kemény sajtok	Mezofil keverékkultúra (vajkultúra), főleg előérleléshez <i>Streptococcus salivarius</i> ssp. <i>thermophilus</i> <i>Lactobacillus delbrueckii</i> ssp. <i>helveticus</i> <i>Lactobacillus delbrueckii</i> ssp. <i>lactis</i> <i>Lactobacillus casei</i> <i>Propionibacterium shermanii</i>

A starterkultúrák működésük során savat (tejsavat) termelnek, bontják a fehérjéket, és a nemkívánatos mikroorganizmusokat elnyomják. Erjedési lyukas sajtoknál CO₂-t termelnek az erjedési lyukak kialakításához. A starterkultúrák alakítják ki a sajttípusra jellemző tulajdonságokat, ízt, aromát.

A starterkultúrát felhasználás előtt vagy egy külön erre a célra használt kultúrafőző tankban elszaporítják, és ezt az ún. tömegkultúrát adják a tejhez, vagy ún. DVS (*direct vat set*), liofilezett starterkultúrát használnak. A DVS-kultúra, mivel semmilyen előkészítést nem igényel, hanem a csomagolásból közvetlenül a sajttejbe kell keverni, nagyon biztonságos, a fágfertőzés teljesen kizárható. A starterkultúrákat külön erre specializálódott laboratóriumoktól és cégektől lehet beszerezni.

A tej alvasztása

Alvadás (koaguláció) során a tej szolállapotból gélállapotba alakul át, hogy az adott sajtra jellemző szárazanyag-tartalom kialakuljon a savóelvonás révén. Az oltós alvasztású sajtoknál az alvadáshoz oltóenzim hozzáadásával segítik elő, gyorsítják. Ezt „édes alvadásnak” is nevezik.

A sajtgyártásban a tej alvasztására korábban szinte kizárólagosan a borjúgyomorból készített oltóenzimet (rennin) használták. Az állati eredetű enzimek közül egyre nagyobb tömegben használták fel a pepszint is. A pepszin említhető gyomrának nyálkahártyájában keletkező, jellegzetes fehérjebontó enzim. A csak pepszinnel alvasztott tej alvadéka kevésbé szilárd, mint a borjúgyomor-oltóval alvasztotté. A pepszint így különböző arányban keverték kimozinnal. Az utóbbi időben a biotechnológia fejlődésének köszönhetően egyre terjed a mikroba (*Mucor miehei*, *Mucor pusillus* és *Endothia parasitica*) eredetű oltóenzimek használata. Előtérbe kerülésüket magyarázza, hogy az oltóenzim mikrobiológiai úton sokkal olcsóbban állítható elő, és gyártási, alapanyag-beszerzési problémák sincsenek. Szintetikus kimozint is lehet alkalmazni a tej beoltására. Ezt rekombináns DNS-technikával *Escherichia coli*, *Kluyveromyces lactis* vagy *Aspergillus niger* felhasználásával állítják elő. Az oltóenzim hatékonyságát több tényező is befolyásolja, pl. a pH, a hőmérséklet.

Az oltós alvadás mechanizmusa

A tejben a kazeinmicellák aggregációját (összekapcsolódását) többek között a micellák felszínén lévő felületaktív fehérje, a κ -kazein akadályozza meg. Az oltós alvadás az oltóenzim (rennin, kimozin) által okozott destabilizáció miatt megy végbe, három jól elkülöníthető szakaszban (1.6. ábra).

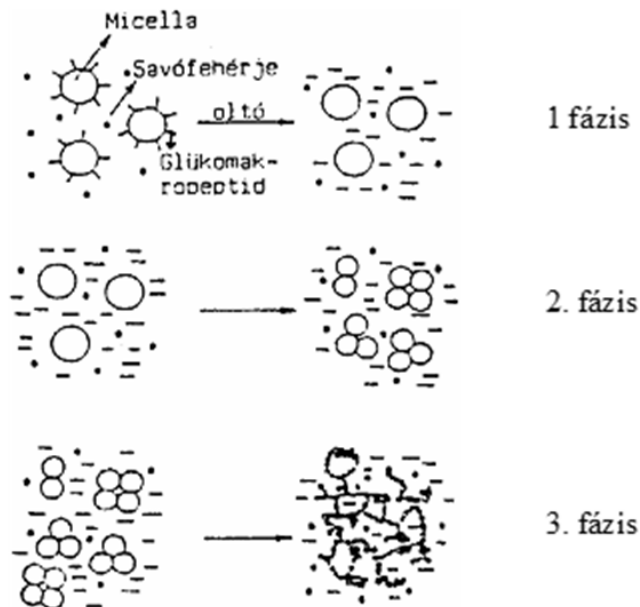
Az első szakaszban az oltóenzim lehasítja a micellák felületén elhelyezkedő κ -kazeinről a glükomakropeptid-láncot. A hidrolízis után visszamaradó rész a para- κ -kazein. A tej semlegeshez közeli pH-ján a κ -kazein kb. 80–90%-ának kell hidrolizált állapotban lennie ahhoz, hogy az aggregáció bekövetkezhesen.

A második fázisban a szérumban lévő Ca-ionok összekötik a reakcióképes para- κ -kazein-molekulákat, és rajtuk keresztül a kazeinmicellákat, így több micellából álló aggregátumok képződnek.

A harmadik szakaszban a micellaaggregátumokból kialakul a térhálószerű gél szerkezet. Az alvadás előrehaladtával párhuzamosan nő az alvadék Ca-tartalma.

Az oltós alvadás lényegesen gyorsabban zajlik le, mint a savas alvadás. Ideje – sajttypustól és az enzim aktivitásától függően – 30–120 perc.

Az alvadási folyamat velejárója a szinerezis jelensége, ami az alvadék zsugorodását jelenti. A kialakult gél szerkezetben lévő molekulák közötti kötőerő az idő múlásával egyre erősebb lesz, ezért azok egyre közelebb kerülnek egymáshoz. Ennek az a következménye, hogy a micellaaggregátumok közötti térből szérum (víz/savó) préselődik ki. A jelenség mindig fellép, függetlenül attól, hogy az alvadáshoz mi idézte elő. A kazeinmicella-fonalak rövidülését, tehát az alvadék zsugorodását és így a szérum eltávolítását gyorsítani lehet a felület növelésével (az alvadék aprításával), melegítéssel, savanyítással és préseléssel. A felsorolt módszerek a mechanikailag kötött és a hidrátburokban lévő víz egy részének eltávolítását segítik elő. A kémiaiilag kötött víz a szokásos élelmiszeripari technológiai eljárásokkal nem távolítható el.



1.6. ábra: Az oltós alvadás folyamata

Az édes és savanyú alvadéknak nemcsak a szerkezete és a Ca-tartalma különböző, hanem a savanyú alvadék egy idő után a savó tetején gyűlik össze, míg az édes alvadék aprítás után gyorsan leülepszik, és össze is tapad, ami a sajtgyártás során gondot okozhat [Szakály, 2001; Ketting, 1987].

Az alvadék kidolgozása

Az alvadék kidolgozásának célja, hogy a víztartalmat a sajttípusnak megfelelő értékre csökkentsék, valamint a sajt jellegét kialakító mikrobiológiai folyamatokat irányítsák. Az alvadék kidolgozásának szakaszai: az alvadék aprítása, az elősajtolás, az utómelegítés és az utósajtolás. Egyes sajtféleségek készítésekor az utómelegítés és az utósajtolás művelete elmarad.

Az alvadék aprításának célja az alvadék összfelületének növelése, hogy a kisebb alvadékrögökben található savó útja rövidebbé váljon, ezáltal a savó elkülönülése az alvadéktól gyorsabb legyen.

Az elősajtolással (az alvadékrögök és a savó kevertetésével) megakadályozzuk az alvadékrögök leülepedését, valamint az elősajtolás a mechanikai behatás és a folyamatos tejsavképződés révén elősegíti a savó további elválását.

Általában a kemény és félkemény sajtok gyártásánál alkalmazunk utómelegítést. Az utómelegítés célja a további savóeltávolítás elősegítése, ezáltal az alvadék szárítása, nedvességtartalmának csökkentése, az alvadék méretének és savanyításának szabályozása. A hő elősegíti az alvadék zsugorodását (szinerézist), ezáltal a savó kiválását.

Az utómelegítési hőmérséklet a sajttej baktériumflórájától és a sajt víztartalmától függően az egyes sajtféleségekre jellemző. Bizonyos körülmények között azonban a hőmérsékletet változtatni kell, de csak a sajttej érlelésénél alkalmazott mikrobák optimális hőmérsékleti határain belül, vagyis a változtatás nem lehet olyan nagymértvű, hogy a sajttej mikroflórájának működését gátolja.

Az utómelegítés befejezése után következik az utósajtolás, melynek célja a savó további kiválásának elősegítése az alvadékrögökből, elsősorban a tejsav folyamatos termelődése, kisebb mértékben a mechanikai hatás következtében. Az alvadékrögöket mindaddig keverik, míg a gyártott sajtféleségnek megfelelő szárazsági fokot eléri.

Az alvadékmosás célja az alvadékrögök tejcukor- és savtartalmának csökkentése a sajttészta túlsavanyodásának elkerülése érdekében, valamint a sajt jellegének kialakítása. Az alvadékmosását szükségessé teheti a sajttej elégtelen mérszartalma, a sajttej túl nagy savfoka, a kidolgozás alatti túl élénk tejsavas erjedés, a sajt jellegének kialakítása és az állomány biztosítása.

Savóleeresztés, az alvadék formázása, előpréselése

Ha az alvadék elérte a szükséges savasságot és keménységet, a savót leeresztik. Az alvadék formázásával adják meg a sajtok jellegzetes alakját és nagyságát. A formázás alatt az eddig önállóan lévő alvadékrögökből megkezdődik az egységes zárt vagy röghézagos sajtszerkezet, sajttészta kialakítása. Ehhez az alvadékrögöket, a sajt típusától függően, kisebb-nagyobb erővel tömöríteni kell, össze kell „ragasztani”. A formázás végén a sajtok belső szerkezete hézagos, de a rögök már nem bonthatók újra szét.

A zárt tésztájú sajtokat gázt nem termelő starterkultúrákkal készítik, mint pl. a *Lactococcus lactis* ssp. *cremoris* és a *Lactococcus lactis*. A speciális gyártástechnológia során a sajttésztaiban keletkezhetnek mechanikai lyukak, de ezektől eltekintve a sajt állománya egységes, zárt. A zárt tésztájú sajtok közé tartozik pl. az ún. „cheddarozással” – ami egy különleges alvadékezelési módszer – készült Cheddar sajt, valamint a hevített-gyúrt sajtok csoportja is (mozzarella, parenyica).

Az erjedési lyukas sajtoknál az alvadék nem érintkezhet a levegővel. Ezt úgy érik el, hogy a sajtot savó alatt formázzák és előpréselik. Az erjedési lyukak a gáztermelő baktériumok tevékenységének köszönhetően alakulnak ki. Az alvadékban mikroszkopikus méretű, savóval teli üregek alakulnak ki. Ezekben gázképző baktériumok vannak, amelyek CO₂-ot termelnek. A gáz először az üregekben lévő savóban oldódik, de a további gáztermelés hatására helyi túltelítettség következik be, aminek eredményeként apró lyukak keletkeznek, a gáz ezekben kezd gyűlni. Később, amikor a gáztermelődés már szubsztráthiány miatt leállt, a diffúzió lesz a legfontosabb folyamat. A diffúzió következtében egyes lyukak megnagyobbodnak, a kisebbek pedig teljesen eltűnnek. A nagyobb lyukak növekedése a kisebbek rovására a felületi feszültséggel kapcsolatos törvények következménye. Eszerint kisebb nyomásra van szükség egy nagyobb lyuk megnöveléséhez, mint egy kisebbéhez.

A sajtok préselése

Az alvadék formázása utáni következő lépés a sajtok préselése. A préselés célja az alvadékrögök összetömörítése, a közük bezáródott és a kiszivárgó savó eltávolítása. A préselésnek a sajtok végső alakjának és sima felületének kialakítása, illetve a kéregképződés megindítása is a célja [Szenes, 1995].

A préselés során a sajtban végbemenő mikrobiológiai tevékenységnek köszönhetően elkezdődik a megfelelő térsztaállomány kialakulása. A mikrobák zavartalan tevékenységéhez a préselés alatt megfelelő hőmérsékletet kell biztosítani. A tejcukorból a tejsavbaktériumok által lebontott tejsav az alvadékrögök további szinerézisét teszi lehetővé. A préselés alatt a tejcukor lebomlik, így a préselés végére a pH 5,0–5,2-re csökken. A préseléskor ügyelni kell arra, hogy a sajtoknak nem szabad lehűlniük, ezért a préselő helyiségeket megfelelő – sajttípustól függően 20–22, 23–25 vagy 35–37 °C-os – hőmérsékleten kell tartani.

A préselés alatt célszerű elvégezni a sajtok pH-jának ellenőrzését, hiszen ha a pH-érték 5 alá csökken, betúrósodás alakulhat ki. 5,2-es pH-érték felett pedig puffadásra hajlamosakká válhatnak a sajtok. A puffadás veszélye egyes sajtok esetében, mint például a márványsajt vagy a teasajt, nem áll fenn, mert a márványsajt 4,7-es pH-jú, míg a teasajt pH-ja 5 felett van [Molnár, 1999].

A sajtok préselése különböző nyomáson történik. Általános szabályként elmondható, hogy minél keményebb egy sajt, vagy minél alacsonyabb a víztartalma, annál nagyobb nyomást kell alkalmazni. A préselés mértéke a sajtok érésére is kihatással van, hiszen az erősen, nagy nyomással préselt sajtok esetében kevés mennyiségű savó marad vissza, ezáltal szárazabbá válnak. Az alacsonyabb víztartalmú sajtok éréséhez hosszabb időre van szükség, mert az érés kialakító folyamatok lassabban játszódnak le. Ezzel szemben a kisebb nyomással préselt félkemény sajtok esetében gyorsabb érési folyamat jellemző. A magasabb víztartalom miatt élenkebben zajlanak le az erjedési folyamatok.

A présnyomás növelésével a préselési idő lerövidíthető. Normál körülmények között azonban a nagyobb présnyomás nem helyettesíthető hosszabb préselési idővel. A préselési időnek és a nyomásnak összhangban kell lennie. A nyomás hatására a savó a sajttérsztából kiszorul, azonban ahhoz, hogy az összes feleslegben lévő savó eltávozzon, időre van szükség. A préselés előrehaladtával a sajtok egyre rugalmasabbá válnak. A sajtok színe is változik a száradásukkal párhuzamosan; a jól préselt sajt sárga, tapintása rugalmas [Fenyvessy, 2012].

A sajtok sózása

A sajtok sózásának célja az íz kialakítása, a starterkultúra aktivitásának lassítása, a nedvességelvonás, a sajtkegk kialakítása és a tartósítás. Egyes sajtok esetében a mikrobiális tevékenységek megakadályozására is szolgál a sajtok sózása. A sózásnak három módszerét alkalmazzák: az alvadéksózást, a szárazsózást és a sólében való sózást. A sajtok sótartalma általában ~0,5–2%.

A sajt sózása a minőségének megőrzését is szolgálja, vagyis tartósító eljárásnak is mondható. A klasszikus tartósítási módszerek közül az erjesztéses, a vízelvonásos és a sózásos eljárást együttesen, de egymástól függetlenül alkalmazzák a sajtgyártás során.

A sólében történő sózás a leggazdaságosabb és legáltalánosabb sózási mód. A sózás során a sajtól a savó távozik, miközben a só a sajtba diffundál. A só diffúzióját befolyásolja a sajt mérete, szerkezete és összetétele. A sólének három tulajdonságát, a sólé töménységét, pH-értékét, valamint a hőmérsékletét kell figyelemmel kísérni a megfelelő sózás elérése érdekében.

A sólé hőmérséklete is igen fontos tényező, hiszen ha túl hideg a sófürdő, az a savóelfolyást lassítja, ami az előírtnál magasabb víztartalmat eredményez a sajt esetében. A só diffúzióját is lelassítja, ami kevesebb só felvételét is jelenti, így nem lesz kellően szilárd a kéreg. Ezenkívül

a tejsavas erjedési folyamatot is megállítja, hiszen 2 °C alatti hőmérsékleten a tejsavbaktériumok életműködése leáll. Túl meleg sófürdőben a savölfolyás gyors, és a sófelvétel is túlzott mértékben zajlik, ezáltal a sajtok kérge erőteljesen megszilárdul. A tejsavas erjedés rendellenes mértékben felfokozódik, és ennek hatására sok lyuk keletkezik. A tej utófertőződése esetén könnyen meg is puffadhat a sajt.

Az érésben fő szerepet betöltő tiszta kultúrák tevékenységét az alacsony $\leq 1,5\%$ -os töménységű nátrium-klorid nem gátolja, viszont 2,5%-os töménység felett már gátló hatással bír. A különböző tejsavbaktériumok más és más sótúrésszel jellemezhetők, így például a *Lc. lactis ssp. lactis* általában sótűrőbb, mint a *Lc. lactis ssp. cremoris*. Abban az esetben, ha a kultúrák tevékenységét a sózás gátolja, akkor a maradék laktózt a tejsavbaktériumok bontják le, ami a vártnál lassabb ütemű pH-csökkenést fog eredményezni. A propionsavbaktériumok is különböző sóérzékenységgel jellemezhetők. A tapasztalatok alapján a *Propionibacterium shermanii*-nak van a legnagyobb sótűrése, hiszen még az 5–6%-os koncentrációt is elviseli. Már kisebb, 1–2%-os konyhasóoldattal a vajsavbaktériumok tevékenységét meg lehet akadályozni. 1,5%-os koncentráció felett bakteriosztatikus hatással rendelkezik, és a vajsavas puffadás sem lép már fel ilyen koncentráció esetén.

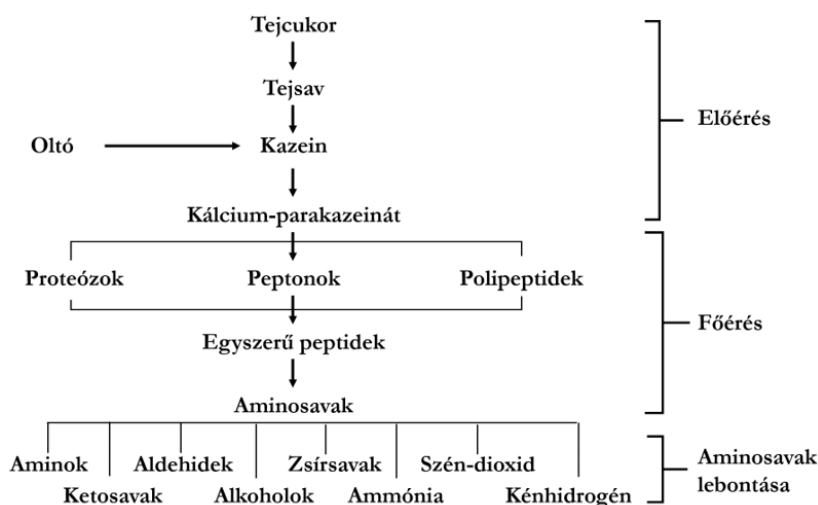
A sózásnak elsősorban a mikrobatevékenységet gátló hatása az alvadék sózása során jellemző, ahol a só eloszlása már a sózás kezdetén egyenletes. A só kultúraaktivitást gátló tulajdonsága a vízáktivitásra gyakorolt hatásának köszönhető. A nátrium-klorid hatására a sajt szárazanyagának emelésével párhuzamosan csökken a sajt vízáktivitása, vagyis csökken a baktériumok számára hozzáférhető víz mennyisége. A sózás hatására az alvadék pH-jának csökkenése, valamint a szinerezis is tovább folytatódik. Emellett csökken az üregekben és a fehérjeburokban kötött víz mennyisége is. Csökken a fehérjemicellák átmérője is, amely folyamat az éréssel jár, és a fehérjemicellák összeforrását eredményezi. A sajtokban a sózás végére lezajlik a tejcukorbontás jelentős része, amit a sajttészta pH-értékének további csökkenése mutat. Lágy sajtok esetében a sózás végére 4,6–4,8-as, félkemény sajtoknál 5,2–5,3-as, a kemény sajtoknál pedig 5,0–5,1-es pH-érték alakul ki.

A sajtokban lejátszódó proteolízis első szakaszában az oltóenzimnek van hatása. Ez a hatás elsősorban az α -s1-kazein bontásában játszik szerepet. A só az alvasztóenzimek hidrolízisét kisebb-nagyobb mértékben befolyásolja. A proteolízis a sózott sajtok esetében gyorsabban megy végbe, valamint nagyobb mértékű, mint a sótlan sajtoknál. A sótartalom különösen a bakteriális úton bontott β -kazein degradációját képes befolyásolni. Alacsonyabb sótartalom esetében gyorsabban és kifejezettebben megy végbe a degradáció. A sajtok keserű ízét okozó nagymolekulájú peptonok és proteázok a β -kazein hidrolízise révén jönnek létre. A β -kazein bomlását szelektíven befolyásolja a só, így jelentős szerepet tölt be a keserű íz kialakulásának megakadályozásában. Alacsonyabb sótartalom esetén nagyobb a valószínűsége annak, hogy keserűíz-anyagok keletkeznek. A sótartalom befolyásolja a lipolízist is. Kisebb sótartalom esetén intenzívebb, magasabb sótartalom mellett gátolt [Szakály, 2001].

A sajtok érése

A kemény, félkemény és lágy sajtok készítésekor a sózás után kapott nyers sajt vagy zöld sajt jellemzően még íztelen és nehezen emészthető. A sajtban csak rövidebb-hosszabb idejű érés alatt mennek végbe azok a bonyolult folyamatok, melyek eredményeként kialakul a sajt jellege [Ketting, 1987].

Technológiai szempontból elő-, fő- és utóérésre oszthatjuk a sajtok érését (1.7. ábra). Előéréskor a tejsavbaktériumok működése tölt be elsődleges szerepet. Az első napokban jellemzően tejsavas erjedés zajlik, de megindul a fehérjék bomlása is. A fehérjebomlás eredményeként albumózok és peptonok keletkeznek. A lágy és félkemény sajtok esetében elmondható, hogy az előérés időszakában indul meg és fejeződik be a lyukképződés. A főérés időszakában fehérjebomlás történik. A fehérjékből polipeptidok, peptidok, aminosavak és ammónia keletkezik a bomlás eredményeként. Emellett aminok és szerves savak is keletkeznek. Ebben a fázisban indul meg a sajt jellegét kialakító aromaanyagok kialakulása is, és a lyukképződés ebben a szakaszban fejeződik be. Az utóérés során keletkeznek a hosszabb érésű félkemény sajtok, de különösképp a kemény sajtok jellegzetes íz- és zamatanyagai [Somogyi, 2011].



1.7. ábra: Az érés szakaszai

A sajt állománya szempontjából az elsődleges meghatározó tényezők a pH, valamint az inaktív kazein és a nedvesség aránya. A tapasztalatok alapján elmondható, hogy az állományt meghatározó proteolízis mértékét elsősorban az oltó és a sajt plazma mennyiségével lehet kontrollálni, de a só–nedvesség aránya és a tárolási hőmérséklet is befolyásolja a proteolízis mértékét. A pH változása is meghatározó tényező a sajt állományának módosulásában. Az állományt befolyásolja az oltó és a tejeredetű kimozin mennyisége, valamint a fehérje savómegkötő képessége is. Az alvadék nyúlósága függ a pH-tól és a koloidális kalcium-foszfáttól, ami a pH-változást indítja meg [Lawrence, 1987].

A megfelelő minőségű sajtok elkészítésében igen fontos szerepet tölt be az érlelés, ezért az érlelőhelyiségek kialakításánál ügyelni kell arra, hogy azokban a gyártott sajtfeleségnek megfelelő hőmérsékletet állandó szinten lehessen tartani. Emellett igen fontos a megfelelő páratartalom beállítása és szabályozása is. Különböző sajtfeleségek különböző páratartalmat és hőmérsékletet igényelnek az érés során. A lágy sajt esetében 14–16 °C-os hőmérsékletű és 85–95%-os páratartalmú érlelőre van szükség. A félkemény sajtoknál 15–17 °C-os hőmérséklet

és 85–90% relatív páratartalom biztosítása szükséges a megfelelő érlelés elvégzéséhez. Fontos odafigyelni arra, hogy az érlelőhelyiségben penész ne nőjön, hiszen a penész a magas páratartalom miatt megjelenik a falakon, és az állványokra áterjedve a sajtokat is ellepheti.

Laktóz bomlása

A gyártás végére, ill. a gyártást követő egy napon belül a laktóz egyrészt távozik a savóval, másrészt az erjesztés során a baktériumok tejsavvá stb. bontják. A tejsav lehasítja a kalciumot a Ca-sókról és a Ca-para-kazeináról, és Ca-laktátokat képez. A propionsav-baktériumok az erjedési lyukakat okozó CO₂-t képezik a laktátokból. A vajsavbaktériumok szintén lebontják a laktátokat, és szerves savakat képeznek, amelyek a sajt aromájának kialakításában fontosak.

A sajtkészítés alatt bekövetkező tejcukorbontás ütemének és mértékének meghatározó szerepe van a későbbi folyamatokra. Az elégtelen vagy túlzott tejcukorbontás esetén az érlelés későbbi szakaszában a folyamatok nem megfelelő irányban haladnak. Gyenge savtermelés következtében az alvadék kiszáradása nem lesz megfelelő, túlsavanyodás esetén pedig betűrósodás alakul ki. A tejsavbaktériumok tevékenységük során a tejcukrot tejsavvá, illósavakká, aldehidekké, szén-dioxiddá és egyéb aromaanyagokká bontják.

A kemény sajtok esetében viszonylag kevés tejcukor megy át a tejből, hiszen a tejcukor jelentős része a savóval együtt távozik. A félkemény sajtok esetében a fennmaradó tejcukor bontása néhány nap alatt megtörténik. Lágy sajtoknál ez a folyamat sajttípustól függően egy-két hetet is igénybe vehet. A keletkező tejsav a sajtban lévő kalciumról és a kalcium-para-kazeináról kalciumot hasít le, azonban a tejsav egy része cserebomlás következtében kalcium-laktátot képez.

A kemény és félkemény sajtoknál a tejsav közel teljes mennyisége kalcium-laktáttá alakul, mert kevés tejcukor áll rendelkezésre, így kevesebb tejsav keletkezik. A kevesebb tejsav kevesebb kalcium megkötésére képes. A félkemény és kemény sajtok gyártásakor ezáltal kevesebb kalcium távozik el a savóval a lágy sajtokhoz viszonyítva. A félkemény sajtok esetében 2% körüli kalciumtartalom figyelhető meg.

A keletkező laktátból az érés során a propionsav-baktériumok szén-dioxidot termelnek, ami a kemény sajtok lyukazottságának kialakításában játszik fontos szerepet. A vajsavbaktériumok is végeznek laktátbontást, méghozzá a bomlás során ecet-, propion- és hangyasav keletkezik. A vajsavbaktériumok által végzett tevékenységnek köszönhetően olyan észterek keletkeznek, amelyek a sajt aromájának kialakításában játszanak szerepet. De a tejsavból keletkező bomlástermékek is fontos szerepet töltenek be a sajt ízvilágának kialakításában. A diacetil a savanyútej-sajtok jellegzetes aromaanyaga, de a cheddar típusú sajtok aromája is a diacetilnek köszönhető [Balatoni, 1981].

Fehérjék bomlása az érés során

A sajtérés során végbemenő folyamatok közül a döntő kémiai átalakulások a fehérjefázisban játszódnak le.

Az enzimek hatására a fehérjetérhálót alkotó kazeinláncok a proteolitikus enzimek (proteázok) hatására bomlanak. A hasadás a peptidkötéseknél következik be, így a fehérjéből peptonok, polipeptidek, majd peptidek keletkeznek. A peptidázok tovább bontják a peptideket aminosavakra. A mikroorganizmusok az aminosavakat katabolizálják, ennek során aldehidek, alkoholok, karboxilsavak, kéntartalmú vegyületek keletkeznek, amelyek nagy része izkialakító.

A kis szénatomszámú aldehidek fontos aromaanyagok. Az izovaleraldehid a Cheddar sajt jellegzetes összetevője. Az oxialdehidek közül az édeskés ízű glicerinaldehid fordul elő a kemény sajtokban. Egyértékű első- és másodrendű, továbbá két- és háromértékű alkoholok mutathatók ki a sajtokban (pl. Roquefort sajt). A vajon kívül a sajtoknak is aromakomponense a diketonokhoz tartozó diacetil. A propionsav az emmentáli jellegzetes aromaanyaga. Elsősorban a friss sajtok ízének meghatározója a tejsav. A kén-hidrogén a sajtok alapízének fontos komponense. A fehérje-bomlástermékek közül az ammónia elsősorban a rúzzsal és a nemespenésszel érő sajtokra jellemző, de minden sajtféleség tartalmazza. A tirozin kristályokat képez az érlelt sajtokban, mint pl. a Parmigiano Reggiano-ban.

A sajtok érettségét a fehérjebomlás terjedelmével és mélységével szokták jellemezni. A fehérjebomlás terjedelme az összes nitrogénre vonatkoztatott nitrogén %-a, amelyet a fehérjebomlás bármilyen fokon érintett. A fehérjebomlás mélysége az oldható nitrogénnek az összes nitrogénre vonatkoztatott mennyisége százalékban [Csapó, 2002].

Zsírok bomlása az érés során

A zsírfázisban a sajterés során a trigliceridek hidrolízise következhet be a sajtféleségtől függően. Előrehaladottságát a zsírfázis „savfokával” jellemezhetjük, ami a hidrolízis mértékével arányos. A lipolízis során a lipázenzim a tejsírt glicerinre és zsírsavakra bontja.

A legtöbb sajt esetében az érés alatti lipolízis nem jelentős, és nem is kívánatos. A tej eredetű zsírbontó enzim, amelyet originális lipáznak neveznek, a pasztörözés hatására inaktiválódik, ami azt jelenti, hogy a pasztörözött tejből készített sajt esetében nincs hatása. Az oltóenzim sem rendelkezik zsírbontó aktivitással, sőt a tejsavbaktériumok lipolitikus és észterifikáló képessége is csekély. A tej eredeti, pasztörözést is túlélő baktériumai közül a mikrokokkusok és a pediokokkusok lipolitikus aktivitását bizonyították be, azonban ez az aktivitás még nem eléggé ismert. A sajtban jelen lévő lipáz döntő többségben pszichotróf baktériumokból származik. Ezek a bakteriális eredetű lipázok a pasztörözés hőmérsékletét is túlélnek, a zsírgolyócskák felszínén adszorbeálódva kerülnek a sajtba. A pszichotrófok lipázai nagyobb szerepet töltenek be a sajtok érésében, mint a pszichotrófok proteázai, amelyek a savóval együtt távoznak. A lipolízisnek elsősorban a Roquefort és a kékpenésszel érlelt sajtok esetében van szerepe, ahol a zsír 25%-a kerül lebontásra. Béta-oxidációval és dekarboxilezéssel kisebb szénatomszámú metil-ke-tonok és zsírsav-laktonok keletkeznek, amelyek a sajtok pikáns, kissé „csípős” ízét adják [Szakály, 2001].

A sajtok csomagolása

A késztermékek kereskedelmi forgalomba bocsátása előtti utolsó lépés a sajtok csomagolása. A csomagolás célja a minőségmegőrzés szempontjából:

- védje a sajtot a fizikai szennyeződésektől (pl. mechanikai hatásoktól, fénytől)
- megakadályozza a vízvesztést (a sajt beszáradását)
- gátolja a káros mikrobatevékenységet a sajt felszínén
- praktikus felhasználást biztosítson (pl. szeletelt kiszerelés).

A csomagoláshoz csak egészségügyileg ellenőrzött, engedélyezett anyagokat szabad használni. Lényeges, hogy a csomagolóanyagtól a sajt ne kapjon mellékízt. Egyes sajtokat a csomagoláshoz – a csomagolástól elkülönített helyiségben – elő kell készíteni (pl. penészgátló bevonat). Csomagolás közben ügyelni kell a higiénára, hogy kiküszöböljék a reinfekció lehetőségét, pl. UV-lámpás csírátlánítással.

A csomagolt sajtokat ezután gyűjtőcsomagolásba teszik, majd lehetőleg szigetelt falú vagy hűthető tehergépkocsikban szállítják. Általános irányelv, hogy a sajtok nem alkalmasak fagyasztott formában történő tárolásra, mert a sajt állománya károsodik, elveszti rugalmasságát, vízeresztővé válik, és keserű ízhiba alakulhat ki.

Irodalomjegyzék

- Balatoni M. és Ketting F. (1981): *Tejipari kézikönyv*, pp. 429–459.
- Csapó J. és Csapóné Kiss Zs. (2002): *Tej és tejtermékek a táplálkozásban*. Mezőgazda Kiadó, Budapest, pp. 390–410.
- Csehi B. (2019): *Nagy hidrosztatikus nyomáskezelés hatása állati eredetű termékek fehérjeszerkezeti és fiziko-kémiai tulajdonságaira*. Doktori disszertáció, Szent István Egyetem, Budapest.
- Darnay L. (2016): *Mikrobiális transzglutamináz alkalmazhatósága tej- és húsipari termékeknél*. PhD-dolgozat, Szent István Egyetem, Budapest.
- Dekker P. J. T., Koenders D. és Bruins M. J. (2019): Lactose-Free Dairy Products: Market Developments, Production, Nutrition and Health Benefits. *Nutrients*, 11(3), 551.
- Fenyvessy J. és Csanádi J. (2012): *Tejipari technológia*. Universitas Szeged Kiadó, Szeged, pp. 209–236.
- Harju M., Kallionen H. és Tossavainen O. (2012): Lactose hydrolysis and other conversion in dairy products: technological aspects. *International Dairy Journal*, 22, pp. 104–109.
- Horner T. W., Dunn M. L., Eggett D. L. és Ogden L. V. (2011): β -Galactosidase activity of commercial lactase samples in raw and pasteurized milk at refrigerated temperatures. *Journal of Dairy Science*, 94, pp. 3242–3249.
- Kátay G. (2020): Laktózmentes élelmiszerek előállítása. In: Szűcs V. (szerk.): *Élelmiszeripari kézikönyv 5. – Laktózmentes élelmiszerek*. Nemzeti Agrárgazdasági Kamara.
- Ketting F. (1987): *Szakágazati technológia – Tejipar II*. Mezőgazdasági Kiadó, pp. 73–147.
- Lawrence R. C., Creamer, L. K. és Gilles J. (1987): Texture Development During Cheese Ripening. *Journal of Dairy Science*, 70(8), 1748–1760.
- Magyar Élelmiszerkönyv (2010). <https://elelmiszerlanc.kormany.hu/magyar-elelmiszerkonyv>
- Molnár A. és Molnár J. (1999): *A sajtkészítés ABC-je*. Litográfiai Nyomda, pp. 149–168.
- Motoki M. és Kumazawa Y. (2000): Recent Research Trends in Transglutaminase Technology for Food Processing. *Food Science and Technology Research*, 6(3), 151–160.
- Pálfi E. és Polonkai K. (2018): A gyógyszerészek szerepe az allergiás megbetegedések megelőzésében és kezelésében – Táplálékallergia, tejcukoreméztési zavar és cöliákia. *Gyógyszerészet*, 62, pp. 88–98.
- Pécs M. (2016): *Ipari enzimek*. Egyetemi jegyzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.
- Selvarajan E., Nivetha A., Subathra D. C. és Mohanasrinivasan V. (2019): Nanoimmobilization of β -Galactosidase for Lactose-Free Product Development. In: Gothandam K., Ranjan S., Dasgupta N. és Lichtfouse E. (eds.): *Nanoscience and Biotechnology for Environmental Applications*. Environmental Chemistry for a Sustainable World. Springer, New York.
- Somogyi I. (2011): *Tejipari technológia II*. VM Vidékfejlesztési, Képzési és Szaktanácsadási Intézet, Budapest, pp. 3–55.
- Szakály S. (2001): *Tejgazdaságtan*. Dinasztia Kiadó, Budapest, pp. 263–320.

Szenes E.-né (1995): *Tejfeldolgozás kisüzemben*. Integra-Projekt Kft., Budapest, pp. 77–93.

Tossavainen O. és Sahlstein J. (2003): *Process for producing a lactose-free milk product* (WO Patent No. WO2003094623A1). World Intellectual Property Organization.

Varga Zs. (2007): *Fermentált tejkészítmények előállításának lehetőségei tejcukorérzékeny és galaktozémiás betegek számára*. PhD-dolgozat, Budapesti Corvinus Egyetem.

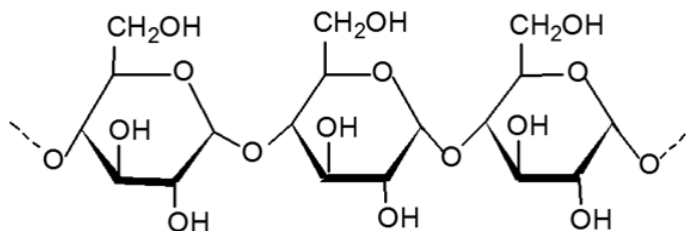
2. A gabonafeldolgozás enzimes eljárásai

Gubicza László, Tóth Gábor²

A világon termelt legfőbb gabonafélék a búza, a rozs, a rizs, az árpa, a köles és a zab. A gabonák az emberiség legfontosabb ételkészítményforrásai közé tartoznak. Az ipari országokban a kenyérfogyasztásból eredő tápanyagellátás fedezi a napi szénhidrátszükséglet 50%-át, a fehérjeigény mintegy egyharmadát és a B-vitamin-szükséglet 50–60%-át. A gabonafélék a fentiekén kívül még fontos ásványianyag- és nyomelemforrások is [Internet 1].

2.1. A keményítő

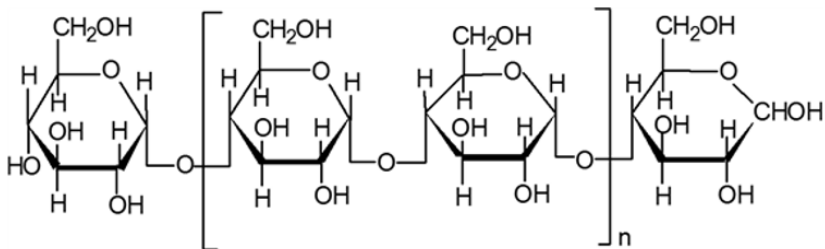
A keményítő a cellulóz után a Földön a legnagyobb mennyiségben képződő szerves anyag. Felhasználási köre, jó oldhatósága miatt, igen nagymértékű. A **keményítő** a magasabb rendű növények tartalék tápanyaga, sok ételkészítményben fordul elő, és a legfontosabb szénhidrátforrás az emberi táplálkozás során. A keményítő nem egységes vegyület, hanem két glükóz-polimer, az **amilóz** és az **amilopektin** keveréke alkotja. A 2.1. ábra a keményítőlánc részletét mutatja [Internet 2].



2.1. ábra: A keményítőlánc részlete

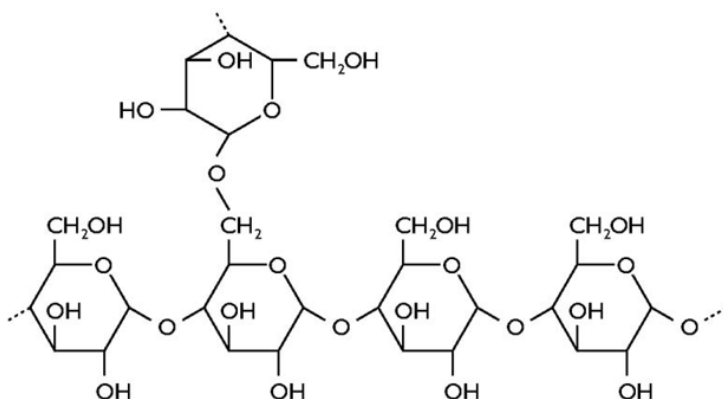
A keményítő alkotói közül az **amilóz** elágazás nélküli szénláncú, kb. 100–300 glükóz-molekulából, α -(1 $\rightarrow$ 4) kötéssel kapcsolódó α -D-glükopiranozil egységekből épül fel (2.2. ábra). Az amilóz forró vízben oldódik, az oldatot lehűtve azonban irreverzibilis kicsapódás játszódik le. Az amilóz α -amiláz-, β -amiláz- és *glükóamiláz*enzimekkel hidrolizálható. A glikozidkötések bonthatók továbbá savas hidrolízissel is. A keményítő amilóztartalma függ az eredetétől is, értéke általában 20–30% között mozog.

2 Pannon Egyetem, Mérnöki Kar,
Bio-, Környezet- és Vegyészmérnöki Kutató-fejlesztő Központ,
Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatócsoport
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.
gubicza.laszlo@mk.uni-pannon.hu



2.2. ábra: Az amilóz szerkezete

A másik alkotó, az **amilopektin** szintén glükózegységekből épül fel, de az amilóztól eltérően elágazó szerkezetű (2.3. ábra).



2.3. ábra: Az amilopektin szerkezete

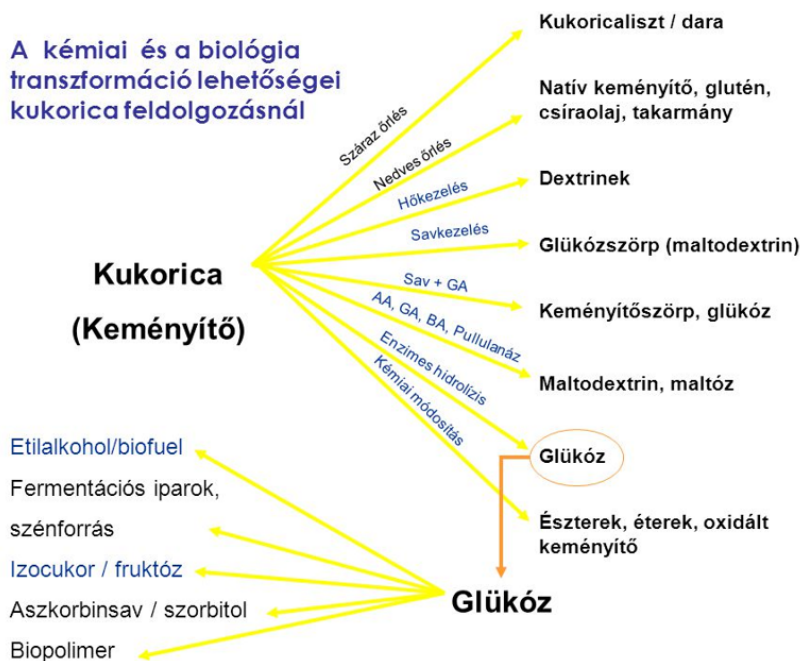
Az $\alpha(1\rightarrow4)$ kötések mellett $\alpha(1\rightarrow6)$ kötések is tartalmaz. Általában 15–30 $\alpha(1\rightarrow4)$ kötéssel kapcsolódó glükóz után találunk egy $1\rightarrow6$ típusú kötést tartalmazó elágazást. Az $1\rightarrow4$ kötések az α - β - és *glükoamiláz*, az $1\rightarrow6$ szénatomnál kapcsolódó kötések pedig az *izoamiláz* enzim bontja. A különböző eredetű keményítők amilopektintartalma szintén változó, általában 70–80% között van.

A keményítő a növényekben 0,002–0,15 mm nagyságú szemcsék alakjában található, amelyek sűrűsége az eredettől függően 0,5 g/cm³ körül változik. A kereskedelmi natív keményítő a légtér páratartalmától függően 12–20% vizet tartalmaz, ebből 8–10% monohidrátot alkotva nagyon erősen kötődő szerkezeti víz. Erőteljes szárítással eltávolítva megszűnik a keményítő kristályos szerkezete. A keményítő vizes szuszpenzióját melegítve meghatározott hőmérsékletnél a rendszer duzzadása fokozódik, és jelentősen megnő a viszkozitása; a csirizesedésnek nevezett folyamat során pedig a keményítő szerkezete irreverzibilisen megváltozik, ugyanis a keményítő szuszpenzió pasztaszerű anyaggá változik, amit csiriznek nevezünk. A keményítő csirizesedési hőmérséklete, duzzadásának mértéke élelmiszertechnológiai szempontból nagyon jelentős. Keményítőcsiriznél lehűlés után a retrogradációnak vagy öregedésnek is

nevezett folyamat figyelhető meg. A nagy amilopektintartalmú keményítőkből készült gélnél az öregedés nagyon lassú folyamat. A keményítőtől öregedése okozza a sütőipari termékek morzsalékosságát is. Ha a kenyér még nem száradt ki, a morzsalékos szerkezet ismételt felmelegítéssel megszüntethető, a retrogradáció azonban az előzőnél gyorsabban megy végbe. A keményítő csirizesedése rendkívül fontos folyamat, mivel a keményítő duzzadása révén nő a térfogat, sűrűsödik az állomány, jelentősen megváltozik a kolloidszerkezet, és az elcsirizesedett keményítőt az emésztőenzimek is könnyebben lebontják.

2.2. A keményítő kémiai és biológiai transzformációjának lehetőségei [Csapó, 1981]

A 2.4. ábra példaként a kukoricakeményítő kémiai és biológiai feldolgozásának lehetőségeit vázlatosan mutatja be. Látható, hogy már az őrlés megválasztása is nagymértékben befolyásolja az előállított termékeket: a száraz őrlés mellett a nedves őrlés sokkal több termék kialakítására nyújt lehetőséget.



2.4. ábra: A kukoricakeményítő kémiai és biológiai transzformációjának lehetőségei

A kémiai transzformáció során többek között észterek, éterek és oxidált keményítő állítható elő. Az enzimes hidrolízis terméke a glükóz, amiből számos további termék (pl. etanol, izocukor) állítható elő. Az enzimes hidrolízis és az izocukorgyártás legfontosabb lépéseit és az alkalmazott paramétertartományokat külön fejezetben tárgyaljuk.

2.3. A különböző keményítőforrások és kinyerésük [Whistler, 1984; BeMiller, 2009; Villar, 2017]

A keményítőgyártás legfontosabb lépése a keményítőfrakció elválasztása a többi növényi sejtalkotótól, ez az egyes növények esetében különböző. A következőkben az EU-ban termelt három legfontosabb keményítőtartalmú növény, a kukorica, a burgonya és a búza közül a legnagyobb volumenű enzimes feldolgozást alkalmazó, kukoricából történő keményítő-előállítás ismertetjük. A kukorica betakarítása az időjárás függvényében 22–28% nedvességtartalommal történik. Feldolgozása történhet azonnal vagy 60 °C-on, 13% nedvességtartalomra történő szárítás után. A kukorica tehát tárolható, és egész évben feldolgozható. (Feldolgozása így – a cukorrépától eltérően – nem kampányjellegű.) A feldolgozóüzembe érkező kukoricát ellenőrzésnek vetik alá. Vizsgálják mennyiségét, keményítő- és szárazanyag-tartalmát, mikrobiológiai tulajdonságait. A nagyobb szennyezéseket rostálással, a port és a könnyebb szennyezéseket levegő befúvatásával (aspirálással) távolítják el. A további feldolgozásra kétféle eljárás ismert, a nedves és a száraz eljárás.

A száraz, régebben gyakran használt eljárásnál („száraz őrlés”) a kukoricaszemet három frakcióra bontják fel:

- az olajtartalmú, csirában gazdag frakció: a feldolgozott kukorica 10%-a, olajtartalma 20–22%;
- a lisztes frakció: a feldolgozott kukorica 35%-a, keményítőtartalma 60%, fehérjetartalma 10,5–11,5%;
- a grízes frakció: a feldolgozott kukorica 55%-a, keményítőtartalma 80%, olajtartalma 1,3%, rosttartalma 0,5%.

A nedves eljárásnál a megtisztított kukoricát 0,2–0,4% kénessavtartalmú vízben 55 °C-on több napon át áztatják. Az áztatás alatt, melynek paramétereit és módjait a későbbiekben részletesen tárgyaljuk, a kukoricaszem megduzzad, és a benne tárolt keményítő kinyerhetővé válik. Az áztatás célja a kemény endosperm előkészítése a keményítő kivonására. Az áztatás közben a szem megduzzad, s közel 50%-os nedvességtartalmú lesz. Ezt a nedves kukoricát őrlik úgy, hogy előbb a csirát, majd finom őrlés után a héjrészeket és a kukoricakorpát távolítják el belőle sűrűség szerint, ill. ívszítán végzett osztályozással. Ezután speciális szeparátorokban a fehérje és a keményítő elválasztása következik. Az áztatás legfontosabb paramétereit: 48–52 °C, 30–50 h, 0,2–0,4 g SO₂/kg kukorica, pH = 3,9–4,1, folytonos ellenáramú diffúzió. A nedves eljárásból nyert kb. 40% szárazanyag-tartalmú keményítőtej a kiinduló alapanyaga a további feldolgozásnak.

2.4. A keményítő feldolgozása

A keményítő tulajdonságai fizikai és kémiai eljárásokkal változtathatók, a technológiai igényeknek megfelelően javíthatók [Eliasson, 2000]. A megváltoztatott tulajdonságú terméket módosított keményítőnek nevezzük. A különböző gabonafélékből kinyert keményítő feldolgozása savas és enzimes úton történhet. Tekintettel arra, hogy kíméletessége és hatékonysága miatt az enzimes eljárások egyre jobban kiszorítják a savas eljárásokat, itt részletesen csak az előbbieket tárgyaljuk.

Keményítőbontó enzimek

A keményítő bontásában számos enzim vesz részt, amelyek a poliszacharidláncok különböző pontjain hidrolizálják az α -1,4, illetve α -1,6 kötéseket. A gabonafeldolgozás során használt enzimek az általuk katalizált reakció alapján az alábbiak szerint csoportosíthatók [Badenhuizen, 1959; Simpson, 2012]:

- endoamilázok (α -amiláz)
- exoamilázok (β -amiláz, glükóamiláz, α -glükozidáz)
- szénláncelágazásnál bontó enzimek (izoamiláz, pullulanáz)
- transzferázok (amilomaltáz, ciklodextrin-glikoziltranszferáz)

A kukoricakeményítő enzimes lebontása

A keményítő enzimes lebontásával glükóz állítható elő [Sharma, 2018; Haros, 2014]. A kukorica nedves eljárással történő feldolgozása során nyert kb. 40% szárazanyag-tartalmú keményítőtejet első lépésben elfolyósítják. Az alkalmazott enzimet három részletben adagolják (legtöbbször α -amilázt), és Ca^{2+} -ionokat adnak 50–100 ppm koncentrációban. Innen jut a zagy a gőzinjektorba, ahol (a csirizesedés elkerülése céljából) néhány másodpercre 140 °C-ra hevítik. A következő lépésekben, a folyósító és dextrinizáló tartályban már alacsonyabb hőmérsékletet tartanak, a reakcióidő viszont hosszabb. A reakció 6,0–6,5-es pH-érték mellett játszódik le. Az enzimet szabad formában alkalmazzák, és nem nyerik vissza. A teljes reakcióidő 2,5–3 óra, ezalatt a dextrözegyenérték (DE) az 1–3-as értékről 18–25-re növekszik. (A glükóz DE-értéke 100, a maltózé 53, a maltotriózé 36 és a keményítőé 0. Vagyis minél nagyobb a polimerizációs fok, annál alacsonyabb a DE-érték.)

A főbb paramétereket a 2.1. táblázatban foglaltuk össze.

2.1. táblázat: A keményítő elfolyósításának főbb paraméterei

Paraméter	Hőfeltárás	Elfolyósítás	Dextrinizálás
Hőmérséklet (°C)	135–142	100	85
Reakcióidő (h)	0,2–0,5	20–30	120–150
Enzim (l/t)	0,2	0,5	0,3
DE-érték (-)	1–3	10–15	18–25

A következő lépésben, az elcukrosítás során alkalmazott glükóamiláz enzim kevésbé hőtűrő, ezért a folyósított keményítőoldatot (szárazanyag-tartalma 40–42%) 60 °C-ra hűtik vissza. A cukrosító tartályt követő ülepítőben elválasztják a csíraolajat, majd egy dobszűrő alkalmazása után steril szűrőgyertyán, illetve kation- és anioncserélőkön áthaladva kapják a 96–98 dextrözegyenértékű glükózoldatot, ami számos további átalakítás kiindulási anyaga. A folyamat ideje lényegesen hosszabb, mint az elfolyósításé, 45–55 órával kell számolni.

Az alkalmazott glükóamiláz enzimet szabad és rögzített formában egyaránt felhasználják. Az enzim számára optimális pH-érték 4,2–4,5, vagyis savasabb, mint az előző érték. Az élelmiszeripari felhasználás szempontjából elengedhetetlen a steril szűrés alkalmazása, míg a kation- és anioncserélőnek akkor van különleges jelentősége, ha a keményítőszirupot izocukorrá dolgozzák fel. Az ott alkalmazott enzim számára ugyanis a Ca^{2+} -ion katalizátorméreg, ezért eltávolítása elengedhetetlen. Az elcukrosítás főbb paramétereit a 2.2. táblázatban összegezzük.

2.2. táblázat: Az elcukrosítás főbb paramétereit

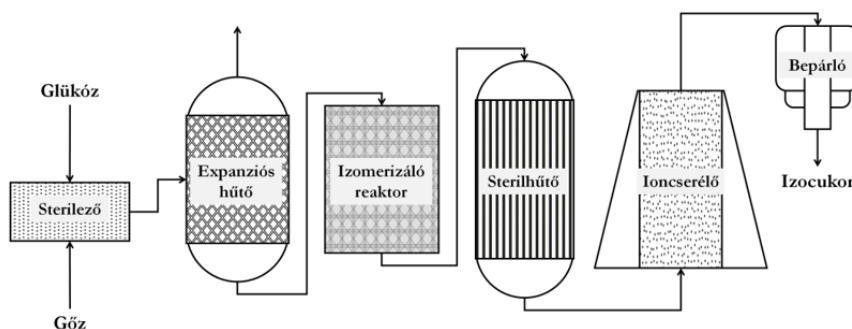
Az elfolyósított keményítő szárazanyag-tartalma	40–42%
DE	18–25
Enzim	<i>Aspergillus niger</i> glükóamiláz
Reakcióidő	45–55 h
Szennyezők	színanyagok, fémek, szerves savak, nitrogénvegyületek, mikroorganizmusok

2.5. A glükóz felhasználása

A glükóz felhasználása rendkívül széles körű (2.4. ábra), számos anyagot állítanak elő belőle nagy mennyiségben, ugyanakkor rendkívül értékes, de csak kis mennyiségben felhasznált anyagok kiinduló vegyülete is. A továbbiakban a két legnagyobb felhasználási területet, az izocukor- és etanolgyártást mutatjuk be [Ramesh, 2019].

Izocukor előállítása kukoricakeményítőből

A kukoricakeményítő elcukrosításával nyert 96–98 dextrózegyenértékű glükózoldatot használják fel izocukor előállítására (2.5. ábra). A glükóz átalakítására fruktózzá azért van szükség, mert az utóbbi édesebb. Ha a szacharóz édességét 1-nek vesszük, akkor a glükózé 0,9, a kristályos fruktózé pedig 1,7. Az izomerizáció egyensúlyi folyamat, amit a glükóz-izomeráz enzim katalizál. Ez egy drága enzim, amit rögzített formában alkalmaznak. Alkalmazása előtt teljes ioncserére van szükség, mert a Ca^{2+} mérgező az izomeráznak. MgSO_4 és Na-hidrogén-szulfid (vagy Na-piroszulfid) adagolása szükséges a mikrobiológiai stabilitás megőrzése céljából. Az izomerizációt sorba kapcsolt kolonnákban végzik, egy-egy kolonnát 100–110 napig lehet használni. A reakció hőmérséklete 42–45 °C, enyhén lúgos pH mellett, a tartózkodási idő 0,8–4,0 óra. Az egyensúlyi reakciót 42% fruktóztartalomig játszatják le. Az izomerizáció után újabb ioncsere történik a hozzáadott vegyszerek eltávolítására.



2.5. ábra: A glükóz izomerizálása fruktózzá

(1 – sterilizáló, 2 – expanziós hűtő, 3 – enzimes reaktor, 4 – steril szűrő, 5 – ioncserélő, 6 – bepárló)

Az izocukrot általában 71,5%-ig töményítik, így 1 liter izocukor 1 kg kristálycukornak felel meg. Valamivel olcsóbb, mint a kristálycukor, de jobban adagolható, könnyebben kezelhető.

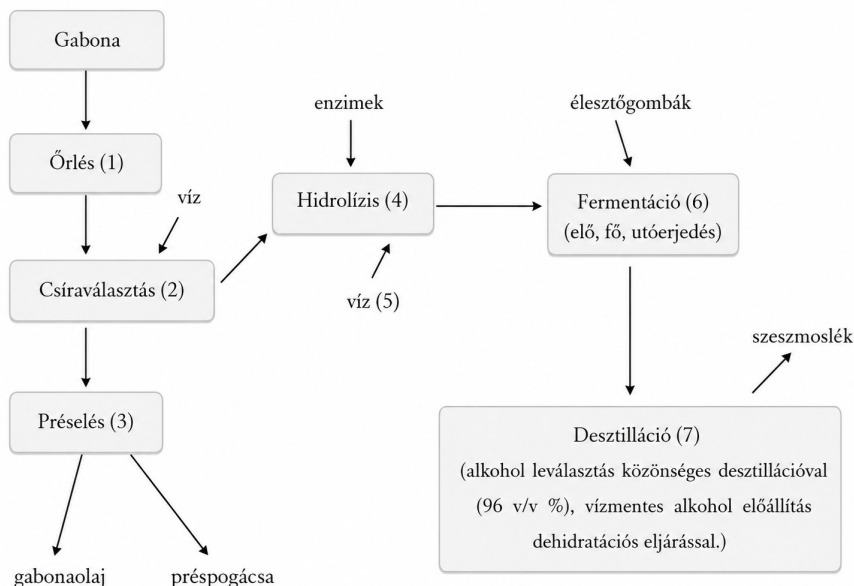
Bioetanol előállítása keményítőtartalmú gabonákból

A bioetanol (víztelenített alkohol) olyan alkoholalapú alternatív üzemanyag, amelyet cukor-, keményítő-, cellulóz- és hemicellulóztartalmú növényi alapanyagokból állítanak elő úgy, hogy a keményítőt, a cellulózt, valamint a hemicellulózt először cukorrá, majd a cukrot alkohollá alakítják át erjesztéssel, végül a keletkező alkoholt lepárlással választják el. A bioetanol előállítására világszerte alapvetően két eljárás terjedt el: a cukortartalmú növények cukortartalmából, illetve a keményítőtartalmú növények keményítőjéből hagyományos szeszipari technológiával történő alkoholgyártás. A lignocellulóz-alapú, „második generációs” bioetanol-gyártás gazdaságosan üzemelő technológiai napjainkban vannak kialakulóban [Popp, 2018].

A számunkra érdekes eljárásnál a gabonamagot először mechanikusan őrlik (1), hogy a hüvelyfalat feltörjék és feltárják a keményítőt (2.6. ábra). A nagyméretű gabonafermentációs üzemekben gyakran alkalmaznak gabonacsíra-eltávolítást (2) is. Az így kapott olajban gazdag gabonacsírat szárítják és préselik (3), hogy a gabonaolajat kinyerjék belőle, az olajpogácsa pedig állati takarmányozásra alkalmazható.

A szuszpenziót ezután hidrolizálják (4) a cukrok felszabadítása érdekében. A vizes szuszpenziót előmelegítik, pH-értékét 7-re állítják be, és bakteriális enzimmal kezelik. Az elegyet az enzimképződéshez kedvező hőmérsékletre (93 °C) melegítik, és itt általában 15 perc és néhány óras időtartam között tartózkodik. Majd ezt a szuszpenziót megfelelő hőmérsékletre hűtik, a pH-t 3–5 közé beállítják, és enzimet kevernek hozzá katalizátorként. A szuszpenziót 60–70 °C között tartják folyamatos keverés mellett mindaddig, amíg a hidrolízis teljes mértékben lezajszódik. A hidrolízis végén nitrogéntartalmú vegyületet és más nyomelemeket adnak az elegyhez attól függően, hogy milyen élesztőt alkalmaznak a fermentáció folyamán. A megfelelő mennyiségű ásványi nyomelemet a betáplált vízzel (5) juttatják a rendszerbe. Az ezt követő fermentációt (6) 27–32 °C-on, 4–5 pH mellett hajtják végre élesztő hozzáadásával, 48–72 óra időtartam között.

Az erjesztés befejezésével a cefre a feldolgozott nyersanyag cukortartalmától és a technológiától függően 8–10% etanolt tartalmaz. Az etanol kinyerését desztillációval végzik, a végtermék etanol-koncentrációja 96 v/v% körüli. A vízmentes alkohol előállítása dehidratációs eljárással (azeotróp desztilláció, membrános vagy molekulaszűrőssel történő elválasztás), esetleg a költségesebb vákuumdesztillációval valósítható meg.



2.6. ábra: Gabonaalapú bioetanolgyártás

Az etanol-előállítás teljes folyamatában számos olyan melléktermék keletkezik, amelynek célirányos felhasználása növeli az alkoholdermelés hatékonyságát és gazdaságosságát, ezért indokolt ezek bemutatása is. A bioetanol-előállítás folyamatának első melléktermékei a termelés alapanyagát képező növények fel nem használt részei (szalma, kukoricaszár). Ezen termékek jól hasznosíthatók fűtési célra, második generációs etanol- vagy biogázüzemekben, vagy hagyományos módon, a talajerő-utánpótlásban [Internet 3].

A nedves őrlést alkalmazó technológiánál képződik a kukorica-csíraolaj, amely az élelmiszeripar és a kozmetikai ipar már régóta bevált alapanyaga. A csíra kukoricaolajjá történő feldolgozásakor jó minőségű extrahált dara is keletkezik. A kukoricahéj pedig önmagában is jól értékesíthető takarmány, elsősorban hobbiállatoknak adják. Ugyancsak a nedves őrlésnél keletkezik a nagy sikértartalmú örlemény (CGM), mely 60% fehérjét tartalmaz. A CGM magas fehérje- és színezőanyag- (xantofill-) tartalma miatt a baromfiágazatban jól hasznosítható, de a sertéságazatban is elterjedt takarmány.

A másik takarmányozási célú melléktermék ennél az eljárásnál a sikértartalmú állati táp (Corn Gluten Feed), amely maradék növényi rostokat és cseppfolyós részeket tartalmaz, ennek fehérjetartalma mintegy 20%. A gyártás során a hőkezelés hatására a fehérje 30–35 százaléka védett fehérjévé válik, ezért a tejelő tehén takarmányozásában kiváló fehérjepótlást jelent, és a megmaradó cukor egy része karamellizálódik, ezáltal kellemes íz- és illatanyagot kölcsönöz a terméknek, vagyis javítja etethetőségét.

A glutén funkcionális élelmiszerek alapanyagául is szolgálhat, mivel koleszterincsökkentő hatása van. Takarmányként nedves vagy száraz állapotban is etethető. A szárított terméknek fehérjetartalom alapján többféle (21, 41 vagy 60%-os) változata kapható a forgalomban.

Kukoricaeredetű melléktermék a „szemaszörp”, amit a híg moszlék és a kukoricaáztató víz

30%-ra történő besűrítésével állítanak elő. Keményítőértéke átlagosan 211 g/kg, nyersfehérje-tartalma 98 g/kg. Aminosav-összetételét ki kell egyensúlyozni, lizinben a legszegényebb, aminosavainak legnagyobb hányada glutaminsav.

Az alacsony alkoholtartalmú ipari szesz szerves oldószerek gyártásához, a bőríparban, az ecet, a denaturált szesz, esetleg a szélvédőüveg-lemosó adalék gyártására használható. A kozmaolaj magasabb rendű alkoholok (főleg propil-, butil- és izobutil-alkoholok) elegye, melyet a kozmetikai és a háztartási vegyipar felhasználhat.

Valamennyi melléktermék takarmányozási célú felhasználása során ugyanakkor korlátként jelentkezik a melléktermékek rendkívül változó összetétele és nyersrosttartalma. Nem szabad azt sem figyelmen kívül hagyni, hogy gyakran fertőzött (pl. *Fusarium sp.*) növényeket használnak fel bioetanol előállítására, valamint a gyártási folyamat során vegyi anyagokkal kezelik, ezért használatuk előtt elengedhetetlen az ökotoxikológiai vizsgálat. Trágyaként történő felhasználás esetén komposztálással jó minőségű, a talaj termékenységét növelő adalékanyag állítható elő. A komposztált termék beoltható nitrogénkötő és egyéb baktériumkultúrával. A melléktermék felhasználása azért is fontos, mert csökkentheti a környezeti terhelést.

2.6. Módosított keményítők, keményítőszármazékok

A keményítőfeldolgozás során a glükóz mellett számos egyéb termék keletkezik (2.4. ábra), melyek különböző élelmiszeripari célokra felhasználhatók.

A keményítő vizes szuszpenziójának a csirizesedésnél magasabb hőmérsékleten történő hőkezelésével és az ezt követő szárítással készül a duzzadó keményítő, mely hideg vízzel is jól duzzad, és megfelelő koncentrációban gél képez [Kearsley, 1995; Gotlieb, 2005]. Részleges lebontással és a csirizesedési hőmérséklet alatti hőkezeléssel állítják elő a híg folyós keményítőt, mely kedvezőbb oldhatóságú, nem képez gél, és nagyon lassan öregedik.

A keményítő lebontásakor különböző hosszúságú poliszacharidlánc-töredékek keletkeznek, amelyek molekulatömege tág határok között változik. Ezt a kevésbé pontosan meghatározott összetételű és tulajdonságú vegyületcsoportot nevezik dextrinnek. Jóddal adott színreakciója a dextrin típusától, azaz a polimerizációs foktól függ. A dextrinek közé tartoznak a ciklodextrinek, melyek nem redukáló, gyűrűs szerkezetű glükózpolimerek. Képződésük úgy értelmezhető, hogy a *Bacillus macerans* enzimrendszere megfelelő számú glükóz csoportot hasít ki az amilózból úgy, hogy egyúttal a kihasadó oligoszacharid első és utolsó tagja között újabb glikozidkötést hoz létre. Élelmiszeripari szempontból fontos tulajdonságuk, hogy a molekulák belsejében másodlagos kötőerőkkel megköthetők különféle vegyületek, pl. aromaanyagok, és csak vizes közegben hidrolizálnak le onnan. A ciklodextrinbe zárt aroma így szobahőmérsékleten teljesen szagtalan, vízben feloldva viszont a kötés megszűnése miatt az illat érezhetővé válik.

A keményítő hidroxilcsoportjai megfelelő körülmények között szerves savak mellett enzimekkel is észterizálhatók. A keményítő-foszforsav-diészter csirizesedési hőmérséklete magasabb, mint a natív keményítőé, nagyon előnyös tulajdonsága, hogy hosszabb főzés során sem csökken az adagolásával gyártott termék viszkozitása. Állományjavítóként mindkét észter alkalmas mártásokba, pudingokba és öregedéskésleltetőként sütőipari termékekbe.

A keményítőmolekula glükózegységeinek hidroxilcsoportjait más vegyületek hidroxilcsoportjaival megfelelő körülmények között reagáltatva keményítőéter képződik.

Élelmiszeripari szempontból a 2-hidroxi-etil-, 3-hidroxi-propil- és a karboxi-metil-keményítők jelentősek. A 2-hidroxi-etil- és a 3-hidroxi-propil-csoportnak köszönhetően a keményítő csirizesedési hőmérséklete csökken, oldhatósága, duzzadóképessége nő, öregedése lassul. Alkalmasak fagyasztott ételek és konzervek állományának javítására. A karboxi-metil-éter-keményítő felhasználható emulziók stabilizálására is [Owens, 2001].

A keményítő átalakítható térhálós szerkezetű rendszerré, ha megfelelő polifunkciós vegyületet (pl. trinátrium-metafoszfát, foszfor-oxiklorid, etilén- és propilén-oxid) adagolunk hozzá. A többfunkciós vegyület két vagy három keményítőmolekula-részt összekapcsolva növeli az elágazások számát, térhálós szerkezetet hoz létre, és növeli az átlagos molekulaméretet. A hálós szerkezet kismértékű kialakítása növeli a viszkozitást, aminek következtében extrém pH-viszonyok mellett is stabil viszkozitás érhető el adagolásával.

Köszönetnyilvánítás

A munkát részben a GINOP-2.2.1-15-2017-00048 azonosítószámú, „Innovatív fejlesztések a gabonaalapú élelmiszeripari és ipari kutatások területén” című projekt támogatta.

Irodalomjegyzék

- Badenhuizen N. P. (szerk.) (1959): *Chemistry and Biology of the Starch Granule*. Springer Verlag, Wien.
- BeMiller J. és Whistler R. (szerk.) (2009): *Starch: Chemistry and Technology*. Elsevier, London.
- Csapó J. és Csapóné Kiss Z. (1981): *Élelmiszer-kémia*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Eliasson A.-C. (szerk.) (2000): *Starch in Food*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
- Gotlieb K. F. és Capelle A. (szerk.) (2005): *Starch Derivatization*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen.
- Haros M., Perez O. E. és Rosell C. M. (2014): Effect of Steeping Corn with Lactic Acid on Starch Properties. *Cereal Chemistry*, 81, pp. 10–14.
- Internet 1: *Élelmiszer-kémia – Keményítők*. Elérhető: https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0059_elelmiszerkemia/ch12s05.html (letöltve: 2020. 05. 22.).
- Internet 2: *Élelmiszer-kémia*. Elérhető: https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/2011_0001_521_Elelmiszer_kemia/ch02s04.html (letöltve: 2020. 05. 22.).
- Internet 3: *Bioetanol és a második generációs biohajtóanyagok*. Elérhető: https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/20110085_bioetanol_es_a_masodik_generacios_biohajtóanyagok/ch07s06.html (letöltve: 2020. 05. 22.).
- Kearsley M. W. és Dziedzic S. Z. (szerk.) (1995): *Handbook of Starch Hydrolysis Products and Their Derivatives*. Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht.
- Owens G. (szerk.) (2001): *Cereals Processing Technology*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
- Popp J. és Bai A. (2018): Megújuló energiaforrások, különös tekintettel a bioüzemanyaggyártásra. *Magyar Tudomány*, 179, pp. 1197–1207.
- Ramesh R. és Ramachandran S. (szerk.) (2019): *Bioethanol Production from Food Crops*. Academic Press, Cambridge.
- Sharma H. K. és Panesar P. S. (szerk.) (2018): *Technologies in Food Processing*. Apple Academic Press, New Jersey.
- Simpson B. K. (szerk.) (2012): *Food Biochemistry and Food Processing*. Wiley-Blackwell, Oxford, UK.
- Villar M. A. (szerk.) (2017): *Starch-Based Materials in Food Packaging*. Academic Press, London.
- Whistler R. L., BeMiller J. N. és Paschall E. F. (1984): *Starch: Chemistry and Technology*. Academic Press, San Diego.
- Zargaraan A., Kamaliroosta L., Yaghoubi A. S. és Mirmoghtadaie L. (2016): Effect of Substitution of Sugar by High Fructose Corn Syrup on the Physicochemical Properties of Bakery and Dairy Products: A Review. *Nutrition and Food Science Research*, 3, pp. 3–11.

3. Gyümölcsfeldolgozás

Bélafiné Bakó Katalin, Lajtai-Szabó Piroska³

Bár a táplálkozástudomány kérdései sok esetben meglehetősen vitatottak, abban szinte minden szakember egyetért, hogy a gyümölcsök és zöldségek fogyasztása hozzájárul egészségünk megőrzéséhez, hiszen jelentős vitamin-, ásványianyag- és nyomelemforrások, ezáltal erősítik az immunrendszert, segítenek számos betegség kialakulásának megelőzésében, valamint magas rosttartalmuk könnyíti az emésztést. Elsősorban nyersen ajánlott a fogyasztásuk, de nagy mennyiségben kerülnek értékesítésre feldolgozott formában is, ide sorolhatók a lekvárok, dzsemek, szörpök és ivólevek. A különböző gyümölcs- és zöldséglevelek jelentős részét teszik ki az előállított termékeknek, az Agrárstatisztikai Információs Osztály által közzétett elemzések szerint évi több mint 110 millió liter gyümölcs- és zöldséglevet állítanak elő hazánkban (2016-os adat) [Csoltai, 2017].

3.1. Pektinázok

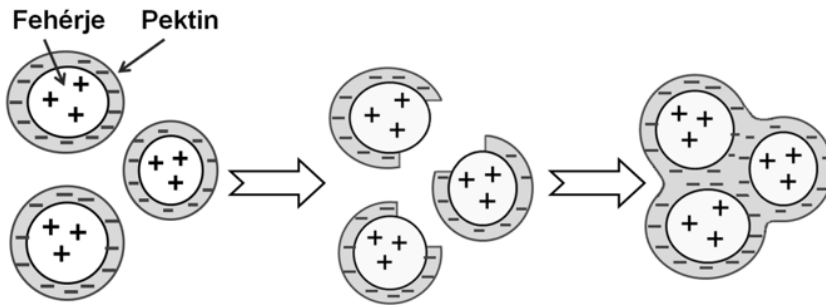
A gyümölcsök feldolgozhatóságát nagymértékben befolyásolja pektintartalmuk. Ez a vegyület szinte minden növényi sejtfalban megtalálható heteropoliszacharid (lásd 12. fejezet), melynek galakturonsavból álló alapláncához az elágazásoknál ramnóz, galaktóz, arabinóz és xilóz kapcsolódik, feladata pedig a sejt mechanikai szilárdságának növelése [Kiss, 2009]. A pektin pozitív élettani hatásokkal rendelkezik, hozzájárul a bélrendszer megfelelő működéséhez, és csökkenti a vérnyomást [Polgár, 2010]. A lekvárok, dzsemek készítésénél elősegíti a gélesedést, ezért alacsony pektintartalmú alapanyagok esetében gyakran más növényekből kivont pektin adagolásával érik el a kívánt állagot [Pécs, 2016].



3.1. ábra: A gyümölcslé előállításának egyszerűsített folyamata

Ezzel szemben a gyümöcslégyártás folyamatát (3.1. ábra) kedvezőtlenül befolyásolja a magas pektintartalom. Egyrészt vízvisszatartó tulajdonsága révén csökkenti a préselés során kinyerhető lé mennyiségét, tehát rontja a feldolgozás határfokát. Másrészt a kolloidként jelen lévő fehérjéket, rostokat stabilizálja, ezáltal zavarossá válik a folyadék, nehezen szűrhető, tükrösíthető. A feldolgozás megkönnyítése érdekében pektinbontó enzimeket, pektinázokat adagolnak az összezúzott gyümölcshöz, ami a sejtfal szerkezetének megbontása révén segíti a préselést, és csökkenti a gélképződést [Pécs, 2016].

³ Pannon Egyetem, Mérnöki Kar,
Bio-, Környezet- és Vegyészmérnöki Kutató-fejlesztő Központ,
Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatócsoport
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.
belafine.bako.katalin@mk.uni-pannon.hu



3.2. ábra: Pektináz enzimek hatása

A pektináz enzimek alkalmazása a derítési műveletre is pozitív hatással van, a jelenség magyarázatát a 3.2. ábra szemlélteti. A préseléssel kapott gyümölcslé nagy mennyiségben tartalmaz lebegő anyagokat, melyek pozitív felületi töltésű fehérjékből és az őket körülvevő negatív töltésű pektinburokból állnak. Az azonos töltésű szemcsék között fellépő elektrosztatikus taszítás gátolja az aggregátumokképződését, így ezek a lebegő anyagok nehezen ülepedhetnek. A pektináz enzimek azonban részlegesen megbontják a pektinburokot, ezáltal részben szabaddá válik a pozitív töltésű fehérje. Az ellentétes töltésű felületek vonzásának köszönhetően a fehérjék közös pektinburokban összetapadnak, az így kialakuló agglomerátumok pedig már jól ülepednek, a derített gyümölcslé ultraszűrő membrán segítségével tükrösre szűrhető [Kiss, 2009].

A pektin lebontásában részt vevő hidrolázok között találhatók exo- és endo-poligalakturonázok is, előbbiek a lánc végéről vágnak le egy galakturonsav-molekulát, az endoenzimek pedig a lánc belsejében hasítják az α -1,4-glikozidos kötéseket. A hosszú pektinmolekulák feldarabolásában liáz enzimek is részt vehetnek, ezek hidrolízis helyett transz-eliminációval hasítanak. A pektinbontó enzimek harmadik csoportjába a pektinészterázok tartoznak, melyek a pektin metilészter-kötéseit bontják [Pécs, 2016]. Az iparban a fenti enzimeket együttesen, enzimkomplekként alkalmazzák, előállításuk *Aspergillus niger* vagy *Aspergillus aculeatus* penészgombák fermentációjával történik [Polgár, 2010].

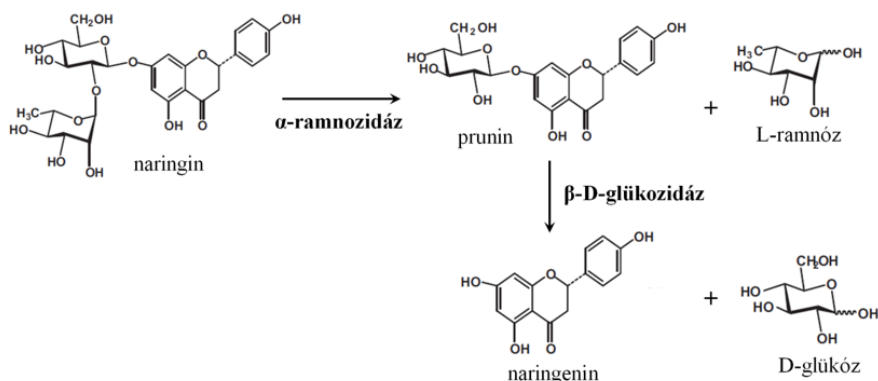
3.2. Naringináz

A flavonoidok oxigéntartalmú heterociklusos vegyületek, melyek nagyfokú kémiai változatosságot mutatnak: az alapváz szerkezeti izomériájából és a sokféle szubsztitúciós lehetőségéből adódóan több mint 4000 flavonoid vegyület létezik. Élettani hatásuk szempontjából kiemelkedőek közülük a citrusfélékben megtalálható flavonoidok, ezen belül is a naringin, mely gyulladáscsökkentő és antioxidáns hatású, csökkenti a vérzsírszintet, alkalmazzák elhízás, cukorbetegség, magas vérnyomás kezelésére [Alam, 2014]. Ugyanakkor ez a vegyület felelős elsődlegesen a citrusfélék, különösen a grépfrút keserű ízéért, jelentősen csökkentve ezáltal a gyümölcslé élvezeti értékét. A fogyasztói igényeknek megfelelően a termesztők kevésbé keserű fajtákat válogatnak ki, emellett elterjedt a naringin mennyiségének a gyümölcslé-előállítás során történő szabályozása is [Huang, 2017].

Számos eljárást dolgoztak ki a naringintartalom csökkentése érdekében, ide sorolhatók

az adszorpciós technikák, ciklodextrin- vagy polisztirolgyantás kezelések és egyéb kémiai eljárások [Huang, 2017]. A felsorolt technológiák alkalmazhatóságát több tényező is korlátozza: az adszorpciós oszlopot, illetve az ioncserélő gyantát regenerálni kell, a felhasznált vegyszer pedig ronthatja a gyümölcsle minőségét, emellett az eljárások nem specifikusak, a naringin mellett egyéb íz-, illat- és aromakomponenseket is eltávolíthatnak. A gyártók ezért manapság elsősorban az enzimes technológiát részesítik előnyben [Puri, 2000].

A naringin bontását alfa-ramnozidázból és flavonoid-béta-glükozidázból álló enzimkomplex végzi kétlépéses folyamatban (3.3. ábra). Először a ramnozidáz lehasít egy ramnózt a naringinről, majd a visszamaradó pruninról egy glükózegységet hasít le a glükozidáz enzim. Az így kapott naringenin keserű ízhatása csupán harmada a kiindulási naringinének [Puri, 2000].



3.3. ábra: Naringin enzimes hidrolízise [Puri, 2011]

Naringináz enzimek megtalálhatók számos baktérium-, élesztő- és egyéb gombafajban. Ipari fermentációk során *Aspergillus niger* és *Penicillium decumbens* fajokat alkalmaznak termelő törzsként. A gyümölcslevek kezelésénél szabad és rögzített formában is használhatók az enzimkomplexek [Zhu, 2017].

Irodalomjegyzék

- Alam M. A., Subhan N., Rahman M. M., Uddin S. J., Reza H. M. és Sarker S. D. (2014): Effect of citrus flavonoids, naringin and naringenin, on metabolic syndrome and their mechanisms of action. *Advances in Nutrition*, 5(4), pp. 404–417.
- Csoltai V. (2017): *Egyes élelmiszeripari termékek árumérlege 2016*. Agrárgazdasági Kutatóintézet, Statisztikai jelentések, XXIV. évf. 1. szám.
- Huang W., Zhan Y., Shi X., Chen J., Deng H. és Du Y. (2017): Controllable immobilization of naringinase on electrospun cellulose acetate nanofibers and their application to juice debittering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, pp. 630–636.
- Kiss K. (2009): *Pektinek kinyerése és enzimes hidrolízise*. Doktori (PhD-) értekezés, Pannon Egyetem, Veszprém.
- Pécs M. (2016): *Biatermék technológia – Ipari enzimek*. Oktatási segédanyag, BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék, Budapest.
- Polgár A., Beszédes S., Szabó G. és Hodúr C. (2010): Mikrohullámú kezelések hatásának vizsgálata pektin enzimes lebontása során. *Élelmiszer Tudomány Technológia*, LXIV. évf., 2. különszám.
- Puri M. és Banerjee U. C. (2000): Production, purification, and characterization of the debittering enzyme naringinase. *Biotechnology Advances*, 18(3), pp. 207–217.
- Puri M., Kaur A., Schwarz W. H., Singh S. és Kennedy J. F. (2011): Molecular characterization and enzymatic hydrolysis of naringin extracted from kinnow peel waste. *International Journal of Biological Macromolecules*, 48(1), pp. 58–62.
- Zhu Y., Jia H., Xi M., Li J., Yang L. és Li X. (2017): Characterization of a naringinase from *Aspergillus oryzae* 11250 and its application in the debitterization of orange juice. *Process Biochemistry*, 62, pp. 114–1.

4. Természetes aromák előállítása

Gubicza László, Tóth Gábor⁴

Illatos, aromás komponenseknek nevezzük a kis molekulatömegű, szobahőmérsékleten magas gőznyomással rendelkező molekulákat, melyek szagingert idéznek elő. Az érzékelhető illat jellemzően nem egy, hanem több illékony molekula kombinációja, melyek közül néhány domináns, mint pl. a vanília aromában a vanillin [Pandey, 2008].

Az aroma- és illatanyagok szerepe fontos, világviszonylatban jelentős helyet foglalnak el az élelmiszeripar, a gyógyszeripar, a kozmetikai ipar és a vegyipar piacán. 2014-ben 21,4 milliárd dollárról (USA), 2018-ra 25 milliárd dollárra (USA) emelkedhetett a felhasznált aroma- és illatanyagok kereskedelme [IAL Consultants, 2014].

Az aromakomponensek előállításának egyik lehetséges útja a természetes forrásból való extrakció. Ennek korlátozó tényezője a célkomponens kis koncentrációjú jelenléte a növényben, ami megnöveli az oldószer mennyiségét, és így az eljárás költségét is.

A másik út a kémiai szintetizálás. Ez számos nemkívánatos tulajdonsággal rendelkezik, mint pl. a termékben megjelenő oldószermaradványok, a racém elegy kialakulása, mely jelentős tisztítási költséget generál, az alacsony szelektivitás, a szélsőséges paraméterigény, a mellékreakciók és a jelentős környezeti terhelés.

A fogyasztók érdeklődése, köszönhetően a környezettudatosságnak és az egészségtudatosságnak, a kémiai úton szintetizált komponensek helyett a természetes úton előállított aromák és illatanyagok felé fordult [Try, 2018; Sanromán, 2006]. A felmerült jelentős igény biztosításához a kutatók új biokonverziós folyamatokat és rendszereket fejlesztettek ki. Ennek alapja, hogy mind az alapanyag, mind a katalizátor természetes forrásból származik. Köszönhetően a jogi környezet megváltoztatásának, az ilyen, biotechnológiai úton előállított aromakomponenseket is természetes aromaként lehet kezelni. Ezek szerint minden olyan aromakomponenst, amely növényi, állati vagy mikrobiális eredetű, természetes aromának kell tekinteni [Try, 2018].

4.1. Mikrobiológiai előállítás

Abiotechnológiai, mikrobiológiai előállítás jellemzően bioszintézis vagy biotranszformáción alapul. Mindkét esetben valamilyen mikroorganizmus (baktérium, gomba, élesztő) játszik kulcsszerepet, miközben valamilyen újrahasznosított alapanyagból értékes komponenseket állítanak elő, környezetkímélő és energiahatékony folyamat során. Erre szemléltet néhány példát a 4.1. táblázat [Akacha, 2014].

⁴ Pannon Egyetem, Mérnöki Kar,
Bio-, Környezet- és Vegyészmérnöki Kutató-fejlesztő Központ,
Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatócsoport
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.
gubicza.laszlo@mk.uni-pannon.hu

4.1. táblázat: Mikrobiális aroma-előállítás

Aroma-komponens	Íz/illat, aroma	Faj	
		Gomba	Élesztő
2-fenil-etanol	rózsaaroma	<i>Pleurotus sapidus</i> <i>Polyporus sp.</i>	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> <i>Kluyveromyces marxianus</i>
dihidro-geroniol	rózsaillat	<i>Mycena pura</i> <i>Ceratocystis moniliformis</i>	<i>Kluyveromyces lactis</i>
gamma-dekalakton	őszibarack	<i>Sporobolomyces sp.</i>	<i>Rhodotorula glutinis</i>
benzaldehyd	keserű mandula	<i>Armillaria mellea</i> <i>Tyromyces sambuceus</i>	-

4.2. Bioszintézis

A bioszintézis, más néven „de novo szintézis” során a mikroorganizmusok teljes metabolizmusát felhasználva, egyszerű táptalajból kiindulva komplex aromakomponens kerül a tápoldatba, mint termék. A mikroorganizmusok az egyszerű szénhidrátokat, zsírokat, fehérjéket felhasználva képesek a mikro- és makrotápanyagokat illatanyaggá és aromaanyaggá alakítani.

A biokatalitikus aromaanyag-előállítás – hasonlóan más fermentálási művelethez – érzékenyen reagál a környezeti paraméterekre. Számos fizikai, kémiai, biológiai és genetikai faktor befolyásolja az optimális termékképződést. Egy előre jól megválasztott upstream és downstream folyamattal ezek a körülmények biztosíthatók.

A legfontosabb környezeti paraméterek között a pH-t, a hőmérsékletet és a rendelkezésre álló szénforrást mint tápanyagot érdemes megemlíteni. A pH-változás jellemzően a mikroorganizmusok metabolizmusának és növekedésének következménye. A felhasznált tápanyagokból a metabolizmus során különböző szerves savak képződnek, amelyek csökkentik a pH-t, ezért ennek szabályozása a fermentálás során kiemelkedő jelentőségű [Akacha, 2014].

A hőmérséklet is számos biológiai és biokémiai reakció befolyásoló tényezője. A mikroorganizmus növekedési hőmérséklet-optimuma jellemzően eltér a termékképződési hőmérséklet-optimumtól. Az optimális hőmérséklet kiválasztásánál figyelembe kell venni az illékony aromakomponensek elválasztását is.

Számos kutatás számol be olyan tapasztalatokról, amelyek szerint a rendszerbe vitt szénforrás minőségi és mennyiségi változtatása eltérő termékképződést eredményez [Pandey, 2008; Akacha, 2018].

4.3. Biotranszformáció

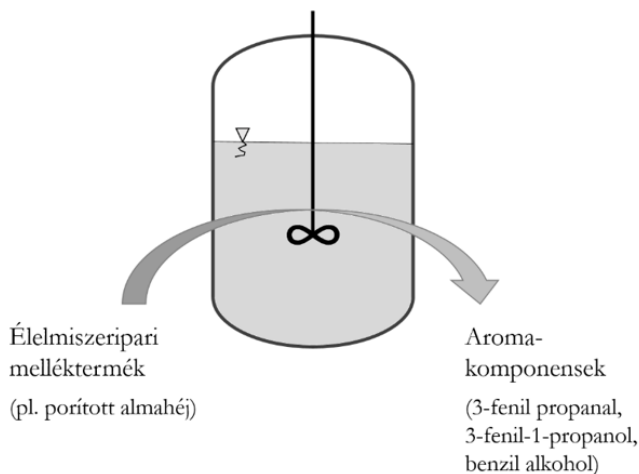
A mikrobiológiai biotranszformáció során fontos, hogy a mikroorganizmus növekedéséhez szükséges paraméterek megközelítőleg azonosak legyenek a termék, az aroma képződési paramétereivel, vagyis a mikroorganizmus képes legyen a kívánt termékképződési feltételek mellett is növekedni. Ezen túl fontos kritérium az is, hogy a sejt rendelkezzen az aromaanyag-

előállításához szükséges redoxrendszerrel. Ez lehetővé teszi a termék előállítását, illetve az elhasznált kofaktor regenerálását [Try, 2018; Pandey, 2008].

Megvalósítására két reaktortípus terjedt el a gyakorlati kivitelezések során: a folyadékfázisú és a szilárd fázisú fermentor.

Folyadékfázisú fermentáció (submerged fermentation)

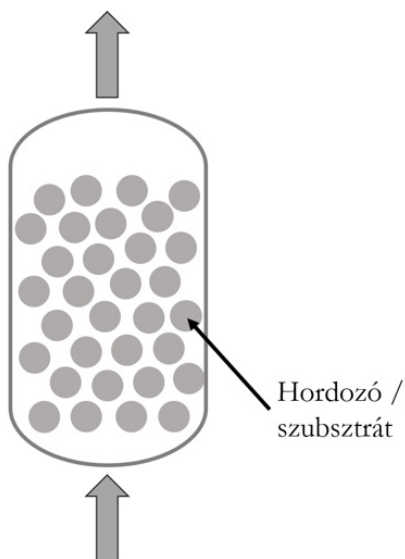
A fermentáció folyadékfázisban zajlik, ahol a porított mezőgazdasági vagy élelmiszeripari hulladékot használják fel szubsztrátként a mikroorganizmusok, és különböző aromakomponenseket állítanak elő. Ilyen hulladék pl. almahéj, narancshéj, kávézacc stb. Az aromakomponens ebben az esetben a folyadékfázisban dúsul fel, ahonnan további szeparációs művelettel lehet a terméket koncentrálni. Alacsony produktivitása miatt nem terjedt el széles körben a gyakorlati alkalmazások során [Try, 2018; Pandey, 2008; Akacha, 2014]. Egy ilyen reaktort szemléltet a 4.1. ábra.



4.1. ábra: Folyadékfázisú fermentáció

Szilárd fázisú fermentáció

Az aromakomponens előállítását ebben az esetben immobilizált mikroorganizmusok végzik, és így az illékony aromatermék gázfázisban dúsul fel. A rendszer nagy előnye, hogy az alkalmazott mezőgazdasági és élelmiszeripari hulladék nem csak szubsztrát, hanem a mikroorganizmusok hordozóanyaga is lehet. A megfelelő katalitikus folyamat biztosításához elengedhetetlen a termékspecifikus szubsztrát-/hordozóválasztás (4.2. táblázat). További követelmények a hordozóval szemben: a szabad víz hiánya miatt biztosítani kell a folyamathoz szükséges vizet, mikroelemeket, és azt, hogy a rögzített mikroorganizmusok képesek legyenek a szubsztrátot a hordozó anyagából felvenni [Pandey, 2008; Akacha, 2014; Try, 2018; Soccol, 2017]. Egy ilyen reaktort szemléltet a 4.2. ábra.



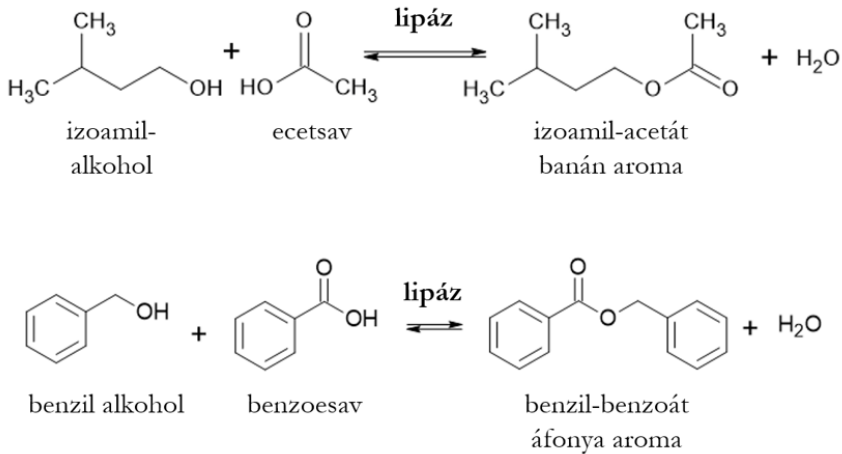
4.2. ábra: Szilárd fázisú fermentor

4.2. táblázat: Példák aromák mikrobiológiai előállítására különböző szubsztrátok felhasználásával

Mikroorganizmus	Szubsztrát	Aroma
<i>Ceratocystis fimbriata</i>	cukornád bagasz	banánaroma
	kávézacc	etil-acetát
	kávézacc	gyümölcsaroma
<i>Neurospora sp.</i>	zselésített rizs	banánaroma
<i>Trichoderma viride</i>	agar	kókuszaroma

4.4. Aromakomponensek enzimkatalitikus előállítása

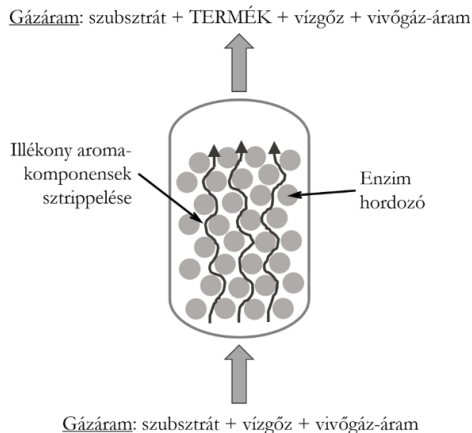
A több ezer ismert enzim közül kb. 200 db olyan van, amit aromaanyagok előállítása során alkalmaznak. Nagy előnyük, hogy magas szelektivitással, nagy hatékonysággal és reakciósebességgel rendelkeznek, ugyanakkor az enzimizolálási és -kinyerési nehézségek, valamint a termék/szubsztrát/enzim oldódási problémák gátolják a rendszer elterjedését. A legismertebb enzimkatalitikus reakciók közé az alifás és aromás észterek előállítása sorolható [Sa, 2017]. Ezek közül egyet-egyet szemléltet a 4.3. ábra.



4.3. ábra: Az izoamil-acetát és a benzil-benzoát képződési reakcióegyenlete

Mindkét esetben hidrolitikus enzimek, nem konvencionális közegben (szerves oldószer, gázfázis) történő használata terjedt el, főként immobilizált enzimek segítségével. Ennek oka egyrészt a termékinhibíció elkerülése, ugyanis az észterezés során aromakomponens és víz keletkezik, így szerves oldószerben a reakció a termékkepződés irányába tolódik el. Másrészt a gázfázisú enzimes reakció során keletkezett illékony komponens reaktorból való eltávolítása megnöveli a termék mennyiségét, és egyszerűsíti a termékkoncentrációt [Hui, 2010; Sanromán, 2006; Khan, 2015].

A szilárd fázisú reakció során a keletkezett termékek a hordozó felületéről a gázfázisba jutnak. Ezt a transzportfolyamatot egy, az illékony termékben szegény, de vízgőzzel telített gázárammal lehet sztrippelni (4.4. ábra). A reaktor tetején távozó gázkeverékből a termék jellemzően kondenzációval, adszorpcióval vagy az illékony komponensre szelektív membrános technikával nyerhető ki.



4.4. ábra: Az illékony komponensek eltávolítása a reaktorból

4.5. Példák egyedi aromakomponensek előállítására

Etil-acetát szintézise szerves oldószerben [Gubicza, 2000; Hazarika, 2002; Krishna, 2000]

A természetes etil-acetát mint aromaészter előállításánál természetes eredetű kiindulási anyagokat, ecetsavat és etanolt alkalmaztak, és az észterezési reakciót a Novozym 435 rögzített lipáz enzim katalizálta. A berendezés kialakításánál a vízkoncentráció állandó értéken tartása igen fontos (a reakcióelegy optimális víztartalma 0,4%), folyamatosan és szabályozható módon kell eltávolítani a reakcióban képződő nagy mennyiségű vizet. Ez megoldható pl. zeolitos adszorpcióval vagy pervaporációval. Amennyiben oldószerként n-pentánt választottunk, az n-pentán-víz elegy azeotróp forráspontja 34,6 °C, így heteroazeotróp desztilláció is alkalmazható a víz eltávolítására [Gubicza, 1996]. A sav/alkohol molarány az 1:3-as értéknél volt optimális [Kelemen-Horváth, 1998].

Izoamil-acetát előállítása nem konvencionális közegben

A természetes izoamil-acetát előállítása is megvalósítható természetes forrásból származó ecetsav és izoamil-alkohol reakciójával, a *Candida antarctica* lipáz B rögzített enzim segítségével [Vulfson, 2001; Romero, 2007]. Az enzimes folyamat több nem konvencionális, környezetbarát reakcióközegben, ionos folyadékban (pl. [bmim]PF₆, [hmim]PF₆), szuperkritikus széndioxidban és oldószermentes közegben [Welton, 2006] is végbemegy, akár 95% körüli hozammal.

Irodalomjegyzék

- Akacha N. B. és Gargouri M. (2014): Microbial and Enzymatic Technologies Used for the Production of Natural Aroma Compounds: Synthesis, Recovery Modeling, and Bioprocesses. *Food and Bioproducts Processing*, 94, pp. 675–706.
- Ehrenstein U., Kabasci S., Kümmel R., Dörmö N., Bélafi-Bakó K. és Gubicza L. (2003): Development of an integrated process for the production of natural aroma esters. *Chemie Ingenieur Technik*, 75, pp. 291–294.
- Erbeldinger M., Mesiano M. J. és Russell A. J. (2000): Enzymatic catalysis of formation of Z-aspartame in ionic liquid – An alternative to enzymatic catalysis in organic solvents. *Biotechnology Progress*, 16, pp. 1129–1131.
- Gubicza L. (1996): Lipase-catalysed production of natural flavour esters. In: *Bulgarian–Hungarian Workshop '96*, Veszprém, pp. 57–61.
- Gubicza L., Kabiri-Badr A., Keoves E. és Bélafi-Bakó K. (2000): Large-scale enzymatic production of natural flavour esters in organic solvent with continuous water removal. *Journal of Biotechnology*, 84, pp. 193–196.
- Gubicza L., Nemestóthy N., Fráter T. és Bélafi-Bakó K. (2003): Enzymatic esterification in ionic liquids integrated with pervaporation for water removal. *Green Chemistry*, 5, pp. 236–239.
- Hazarika S., Goswami P., Dutta N. N. és Hazarika A. K. (2002): Ethyl oleate synthesis by porcine pancreatic lipase in organic solvents. *Chemical Engineering Journal*, 85, pp. 61–68.
- Hernández F. J., de los Ríos A. P., Gómez D., Rubio M. és Villora G. (2006): A new recirculating enzymatic membrane reactor for ester synthesis in ionic liquid/supercritical carbon dioxide biphasic systems. *Applied Catalysis B: Environmental*, 67, pp. 121–126.
- Hui Y. H. (2010): *Handbook of Fruit and Vegetable Flavors*. John Wiley & Sons, Inc.
- IAL Consultants (2014): *An Overview of the Global Flavours and Fragrances Market*. 9th Edition. http://www.ialconsultants.com/uploads/CUBE_press_release/2014-11-06/F_FPressRelease2014.pdf
- Karra-Chaabouni M., Ghamgui H., Bezzine S., Rekik A. és Gargouri Y. (2006): Production of flavour esters by immobilized *Staphylococcus simulans* lipase in a solvent-free system. *Process Biochemistry*, 41, pp. 1692–1698.
- Kelemen-Horváth I., Bélafi-Bakó K. és Gubicza L. (1998): Production of bioflavours by enzymatic esterification. In: *Proceedings of the Indo-Hungarian Symposium on Applied Biotechnology in the Chemical and Pharmaceutical Industry*, Calcutta, India, pp. 77–86.
- Khan N. R. és Rathod V. K. (2015): Enzyme-catalyzed synthesis of cosmetic esters and its intensification – A review. *Process Biochemistry*, 50, pp. 1793–1806.
- Krishna S. H., Manohar B., Divakar S., Prapulla S. G. és Karanth N. G. (2000): Optimization of isoamyl acetate production by using immobilized lipase from *Mucor miehei* by response surface methodology. *Enzyme and Microbial Technology*, 26, pp. 131–136.
- Magyar Élelmiszerkönyv (2010). <https://elelmiszerlanc.kormany.hu/magyar-elelmiszerkonyv>
- Pandey A., Soccol C. R. és Larroche C. (2008): *Current Developments in Solid-State Fermentation*. Asiatech Publishers Inc., New Delhi.

Romero M. D., Calvo L., Alba C. és Danésfar A. (2007): A kinetic study of isoamyl acetate synthesis by immobilized lipase-catalyzed acetylation in n-hexane. *Journal of Biotechnology*, 127, pp. 269–277.

Sa A. G. A., Meneses A. C., Araújo P. H. H. és Oliveira D. (2017): A review on enzymatic synthesis of aromatic esters used as flavor ingredients for food, cosmetics and pharmaceutical industries. *Trends in Food Science & Technology*, 69, pp. 95–105.

Sanromán A. M. és Longo M. A. (2006): Production of Food Aroma Compounds: Microbial and Enzymatic Methodologies. *Food Technology and Biotechnology*, 44, pp. 335–353.

Soccol C. R., Ferreira da Costa E. S., Letti L. A. J., Karp S. G., Woiciechowski A. L. és Vandenberghe L. P. (2017): Recent developments and innovations in solid-state fermentation – A review. *Biotechnology Research and Innovation*, 1, pp. 52–71.

Swatoski R. P., Holbrey J. D. és Rogers R. D. (2003): Ionic liquids are not always green: hydrolysis of 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate. *Green Chemistry*, 5, pp. 361–365.

Tonova K., Lazarova Z., Nemestóthy N., Gubicza L. és Bélafi-Bakó K. (2006): Lipase-catalysed esterification in a reversed micellar system. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 12, pp. 175–180.

Try S., Voilley A., Chunhieng T., De Coninck J. és Waché Y. (2018): Aroma compounds production by solid-state fermentation: importance of in situ gas-phase recovery systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, pp. 7239–7255.

Ulbert O., Bélafi-Bakó K., Tonova K. és Gubicza L. (2005): Thermal stability enhancement of *Candida rugosa* lipase using ionic liquids. *Biocatalysis and Biotransformation*, 23(3–4), pp. 177–183.

Vulfson E. N., Halling P. J. és Holland H. L. (2001): *Enzymes in Nonaqueous Solvents: Methods and Protocols*. Humana Press, Totowa.

Wasserscheid P., van Hal R. és Bösmann A. (2002): 1-n-Butyl-3-methylimidazolium ([bmim]) octylsulfate – an even „greener” ionic liquid. *Green Chemistry*, 4, pp. 400–404.

Welton T. (2006): All solutions have a solvent. *Green Chemistry*, 8, pp. 13–13.

5. Húsipar

*Friedrich László, Pásztorné Huszár Klára, Csurka Tamás,
Tóth Adrienn, Jónás Gábor, Darnay Livia⁵*

5.1. Vágóállatok izomszövetének post mortem biokémiája

A hús normál érési folyamatai

A hús az emberi táplálkozásban a legfontosabb fehérjeforrás. Körülbelül 20%-át izomfehérjék: aktin és miozin teszik ki, melyek táplálkozás-élettani szempontból meghatározóak. Az – elsősorban emlős – állatok izomszövete képes leghatékonyabban fedezni esszenciális aminosav-szükségletünket. A nyers hús minőségét több, egymással kölcsönhatásban lévő tényező befolyásolja: a vágóállat faja és fajtája, illetve genotípusa, a takarmányozás, az állat tartásának és vágásának körülményei, a hűtés és hűtőtárolás paraméterei, sőt a hús-zsír arány tekintetében az évszak is. Jelen fejezetben az állat tartásának és vágásának körülményei által a hús színére, színtabilitására, víztartó képességére és állományára gyakorolt hatást ismertetjük, melyeknek az állatok vágás utáni pH-ját befolyásoló biológiai és kémiai folyamatok állnak a háttérben.

A vágás után három szakaszra különíthetjük el az érési folyamatokat: pre-rigor, rigor és post-rigor. Az első részben, a pre-rigor szakaszban, melyet magyarul a hullamerevség előtti szakasznak nevezünk, olyan változások mennek végbe, amelyek hatására csökken a húsban az ATP és a kreatin-foszfát mennyisége. A hús itt még puha. A középső, rigor mortis, azaz hullamerevségi állapotban a vágás előtt még különálló aktin- és miozinszálak egymásba csúsznak, aktomiozin-komplexet alkotva, és a hús glikogéntartalmát felhasználva energiát állítanak elő az elhasznált ATP helyére. Ezalatt történik meg a fehérjék részleges denaturációja, valamint a tejsavképződés miatt a pH jelentős csökkenése az élő sertésre jellemző 7,2 értékről 5,6–5,7 értékre. Ebben az állapotban a hús kemény és merev. A post-rigor állapotban, azaz a hullamerevség utáni szakaszban a húst folyamatos puhulás jellemzi, melyet az abban található fehérjebontó enzimek váltanak ki. Az inozin-foszfátból ATP (energia) keletkezik. A proteolízis már a korai post mortem állapotban elkezdődik. Ennek köszönhetően áll be a hús véglegesnek tekinthető pH-ja sertéshús esetén 5,7–5,8 értékre [Szűcs, 2002].

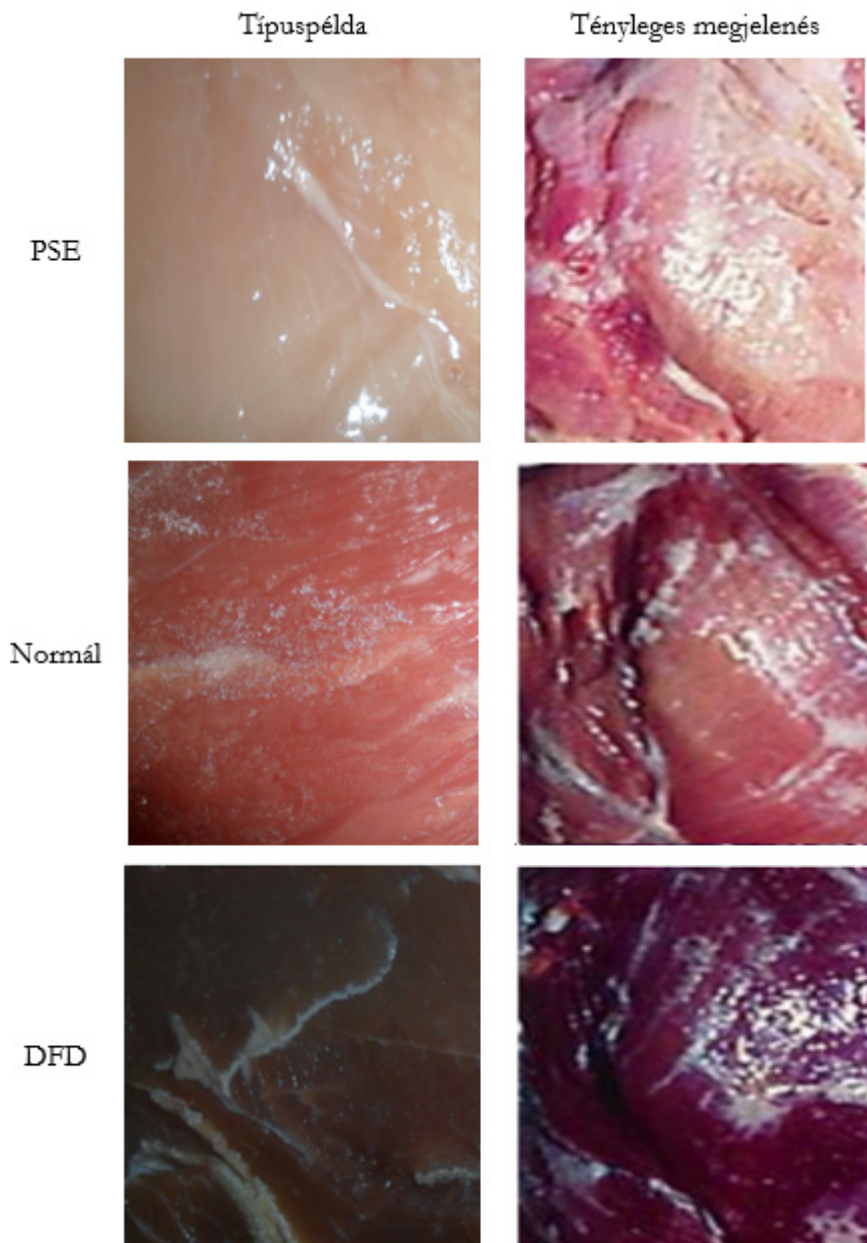
A normál hús pH-ja vágás után folyamatosan csökken, annak köszönhetően, hogy az izomszövetekben glikogén formájában tárolt energiát a test felhasználja és tejsavvá alakítja. Ennek következtében sertés esetén az érett hús pH-ja 6,4, valamint L* (világossági tényező) értéke 54 lesz, tömegének pedig 10%-át veszti el léeresztés formájában [Warriss, 2000]. A mikrobiológiai állapottól függően a pH a tárolás során változik. A tárolás első napjaiban néhány tized egységnyi emelkedés tapasztalható a pH-ban 5,9 értékig, majd a tejsavbaktériumok számától és intenzitásától függően a tejsavképzés által a pH csökken.

5 Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem,
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet,
Állattermék és Élelmiszertartósítási Technológia Tanszék
1118 Budapest, Ménesi út 43–45.
Friedrich.Laszlo.Ferenc@uni-mate.hu

PSE

PSE (pale, soft, exudative) húshibáról beszélünk, amikor közvetlenül vágás előtt akut vagy rövid ideig tartó, nagy stressz éri az állatot [Adzitey & Nurul, 2011]. Stresszfaktor lehet például a vágásra hajtás előtti verés, az ösztöke használata, az állatok túlszűfolttsága vagy az új állományban kialakuló harc a fogadó karámban, illetve olyan állatvédelmi szabályok nem megfelelő betartásából eredő problémák, mint a nem megfelelő kábítás és/vagy szúrás, a karám előtt hiányzó vagy nyitott guillotine-kapu és az állatok bármilyen módon történő bántalmazása.

A vágás előtti stressz hatására az izmokban található glikogént az állat rövid idő alatt felhasználja, a feszült izomrostok anaerob viszonyai között tejsavvá alakítja. A hús pH-értéke alacsonyabb lesz az átlagnál, és a hús hőmérséklete a stressz hatására nő: a comb termikus középpontjában meghaladhatja a 42 °C-ot is. Ennek a két tényezőnek az együttes hatása okozza az egyes húsfelhérjék denaturációját, illetve izoelektromos pontjuk – jelen esetben 5,2 körüli pH-érték – elérését, amelyek így elvesztik hidrátkurkukat [Friedrich, 2008]. Az izomszövet víztartalmának egy részét nem tudja megtartani, így darabolás után a felszíne nedves lesz, míg beltartalmát tekintve a normálnál kisebb lesz a víztartalma. A miofibrilláris komponensek víztartalmukat az extracelluláris térbe engedik, majd onnan a fizikai behatás után az izomszöveten kívülre kerülnek, a rostok zsugorodnak. A léeresztés mértéke sertéshús esetén 13–15% [Warriss, 2000]. A miofibrillumok és a szarkoplazma törésmutatói megváltoznak, különbségük nő a vízvesztés, az oxidáció és a koaguláció hatására, amely a hús színének változásával jár. A szint a lilás-vörös mioglobin és a vörös oxi-mioglobin helyett a barna metmioglobin határozza meg elsősorban. Így lesz a hús sápadtabb színű (5.1. ábra): sertés esetén az L* (világossági szintényező) értéke 60–66 [Warriss, 2000]. A PSE hús előnye, hogy alacsony pH-ja és víztartalma miatt mikrobiológiai romlása lassabb, valamint szárazáru gyártásához ideális. Utóbbinak oka, hogy a sertés esetén a hús léeresztésének mértéke 3–5%, vagy szélsőséges esetben még több.



5.1. ábra: Különböző típusú húsok színe [Adzitey, 2011]

DFD

A DFD (dark, firm, dry) húshiba esetén az ante mortem állapotban krónikus vagy hosszan tartó stressznek teszik ki az állatot [Adzitey, 2011]. Ilyen lehet például az állatok nagy távolságra történő szállítása, több mint fél napon keresztül tartó éheztetés vagy az állattartó telepen történő túlszűfoltás. A hosszan tartó stressz az izomszövetben tárolt glikogén kimerüléséhez vezet, így a vágás utáni állapotban nem lesz elegendő glikogén a húsban ahhoz, hogy lezajljának a természetes érési folyamatok, azaz normál mennyiségű tejsav keletkezzen, és így kialakuljon a normál hús 5,8-as pH-ja. A húsfehérjék nagy része denaturálatlan marad, a húsfehérjék relatíve magas pH-n nagy mennyiségű vizet kötnek meg, így téve az izomrostokat duzzadtá és keménnyé. A léeresztés mértéke sertéshús esetén 2% alatti [Warriss, 2000].

Ezáltal a szarkoplazma és a miofibrilláris fehérjék törésmutatójának különbsége alacsony lesz, valamint a vízzel teli izomszövet nagyobb mértékben nyeli el a fényt, emiatt színe igen sötétté válik (5.1. ábra). A zárt szerkezet az oxigén penetrációjának mértékét is csökkenti, ami lehetővé teszi, hogy a keskeny, vörös oxi-mioglobinnal telt húsréteg alatt található lilás-vörös mioglobinos hús színe határozza meg a hús színét: sertés esetén az L* (világossági szintényező) értéke 42–48 [Warriss, 2000]. A vízzel telt, magasabb pH-jú izomrostok előnyösebbek a mikroorganizmusok szaporodása szempontjából.

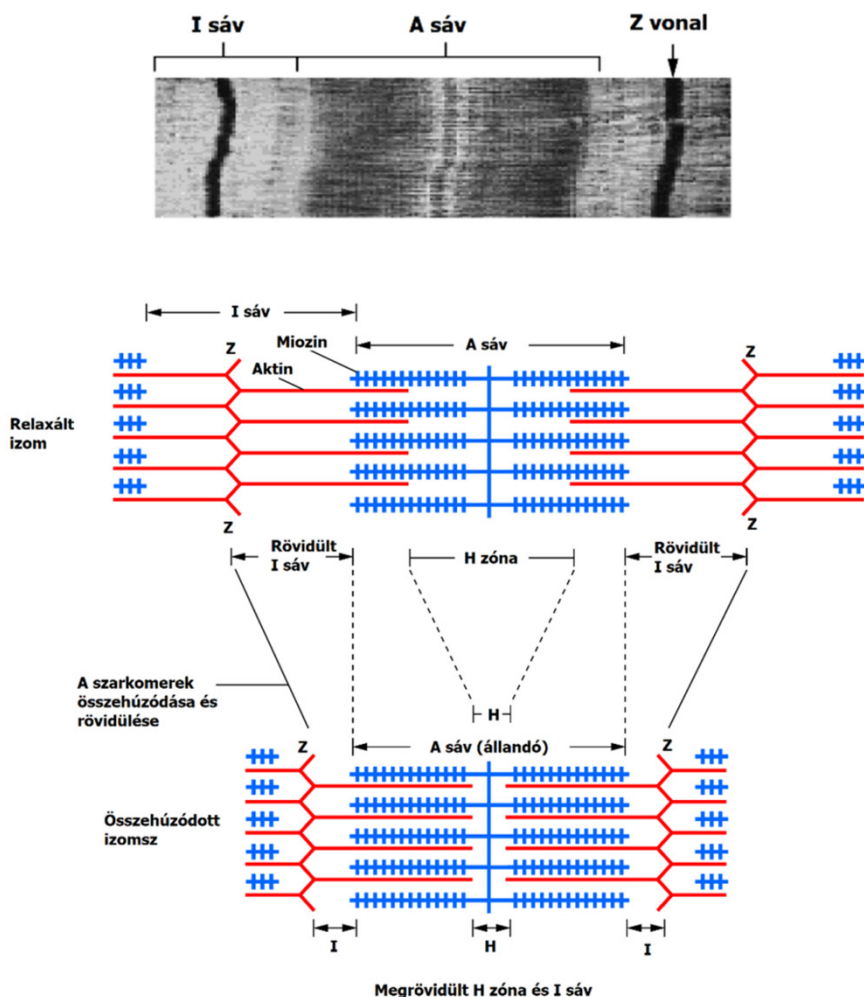
5.2. Starterkultúrák és biokatalizátorok szerepe a húsipari technológiában**Érlelés: húsok érési és érlelési folyamatai**

Az érlelés a nyers hús érését, érlelését, valamint a „nyers” érlelt töltelikes húskészítmények (szalámik, kolbászok) érlelését, szárítását is jelenti. A húsok érlelése nem más, mint a hús vágás utáni hűtött helyen való tárolása, azután is, hogy egységes hőmérséklet állt be aerob és anaerob körülmények között. Ennek megfelelően beszélhetünk száraz és nedves érlelésről kérődzők, különös tekintettel a nemesmarhahús esetén. Ez a folyamat a proteolitikus enzimhatás kiteljesedését szolgálja. Érleléssel lehet elérni a hús porhanyósságát. A hús érlelési ideje állatfajtánként változik. A hosszú érlelési idő jelentős költségekkel jár, ezért gyakran előfordul, hogy nem alkalmaznak megfelelő érlelést. A puhulás folyamatában többféle enzim hatásával kell számolni. A lizoszómába zárt katepszinek felszabadulva a pH csökkenésekor lebontják az aktint és a miozint. Ezek a kontraktilis fehérjék ténylegesen a katepszinek szubsztrátjai, viszont sokáig nem mutatták ki azok lebomlását, és a puhulás sincs összefüggésben a katepszinek aktivitásával. A katepszinek hosszabb tárolási idő eltelte után vagy savas kezelés következtében válnak aktívvá. Egy multikatalitikus enzimrendszer is közreműködik, melynek aktivitása 7,5–8,0 pH között és 45 °C hőmérséklet körül optimális. Ez a hőmérsékletérték természetesen az érlelés során nem releváns.

A legtöbb bizonyítékból következtetve az mondható el, hogy a porhanyósodás a vázfehérjék (titin, nebulin, dezmin, valamint a Z-vonalak) lebomlásával függ össze. Ezt a lebontó folyamatot a kalpainenzimek végzik, amelyek a citoszolban találhatók.

A kalpainok jelentős része a Z-vonal környékén, kisebb része az A- és I-zónában helyezkedik el (5.2. ábra). Az izomsejtben kalpasztatinok is jelen vannak, amelyek kalpain-gátló hatással rendelkeznek. Tehát a hús érése során végbemenő szerkezeti változások a következők:

- a Z-vonal és az I-zóna kontinuitása megszakad, ezáltal a miofibrillumok fragmentálódnak,
- a dezmin, a titin és a nebulin kisebb fragmentekre bomlanak.



5.2. ábra: Az izomszövet képe [Wilson, 2017]

Az ideális puhulás feltételeit izolált kalpainok vizsgálata alapján dolgozták ki. A kalpainokat a kalciumionok aktiválják, amelyek a rigor állapotban szabadulnak fel. A rendelkezésre álló kalciumion-koncentráció mellett a kalpain I teljesen aktiválódik. A kalpain II viszont több kalciumot igényel ahhoz, hogy elérje a teljes aktivitást, ezért csak 30%-ban lesz jelen aktivált állapotban. Marhahúsban – ahol a megfelelő érlelés hosszú ideje miatt ez különösen fontos – 6,3-as pH elérésekor kezd működni a kalpain I (körülbelül 6 órával a vágás után), ellentétben a kalpain II-vel, amely csak nagyjából 16 órával a vágás után kezd aktiválódni. Az enzimek fokozatosan inaktiválódnak azt követően, hogy a kalciumionok aktivizálták őket. Emiatt a hús nem tud a „végtelenségig” puhulni. A porhanyósodás a kezdetekben gyors (marhahúsban felerészben már 1 nap alatt végbemehet), viszont ezt követően lelassul. A puhulás a rigor állapota előtt nem nyomon követhető, mert a hullamerevség és a pH-csökkenés okozta

állományváltozás elfedi. Ezt követően a kalpainok mennyiségétől függ a porhanyósodás mértéke. A kalpainok mennyiségét az eredeti mennyiség és az inaktíválódás foka határozza meg. A húserés után maradó úgynevezett háttérragósság a kötőszóval, a miofibrillumok rövidülésével, az intramuszkuláris zsírral és a víztartó képességgel (duzzadás, zsugorodás) függ össze. Kedvezően befolyásolja a porhanyósságot a kis mennyiségű és a sok oldható kötőszövetet tartalmazó kollagén, a nagyfokú márványozottság, a jó víztartó képesség és a nagy szarkomerhosszúság [Szűcs, 2002].

Érlelés: szárazáruk érlelési folyamatai

A nyers, fermentált húskészítmények (például kolbászok, téliszalámik) olyan, szemcséből összeálló húskészítmények, amelyek nem esnek át hőkezelésen, ezáltal az azokban megtalálható mikrobióta jelentősen eltér más húskészítményekétől. Részben ez is oka a jellegzetes érzékszervi jellemzőiknek. A húsmassza fermentációja mellett felületi penésznövekedés is kívánt tulajdonság lehet az ilyen termékeknél. Az érlelt termékek vízáktivitása 0,95 alatt található, hagyományos érlelés esetén 0,9 alatti értéket vesz fel. A legalacsonyabb vízáktivitás, amelyen még humánpatogén baktérium (koaguláz-pozitív *Staphylococcus aureus*) toxint képes termelni, a 0,86-os érték. A hagyományos érlelés 75%-os páratartalom alatt történik. Az egyes technológiai hőmérsékleteket az Európai Parlament és a Tanács 853/2004/EK rendelete rögzíti.

A húskészítmények között megtalálhatók a gyorsérlelésű termékek, melyek készülhetnek starterkultúrával vagy kémiai savanyítószerekkel. Például szalámifélék gyártása történik ilyen módszerekkel. Fontos a megfelelő szeletelhetőség, a jó érzékszervi tulajdonságok (szín, íz, illat), valamint a mikrobiológiai stabilitás kialakítása. Ehhez elengedhetetlen a pH-érték 5,3 alá csökkentése, melyet gyorsérlelésű termékek esetén a starterkultúra mellett szénhidrát hozzáadásával érnek el. A fehérjék vízkötő képessége jelentősen csökken izoelektromos pontjukhoz közeledve, így a szárazáruk könnyebben leadja a vizet. Az alacsony pH gátolja a nem kívánt mikroorganizmusok növekedését, valamint komoly technológiai szerepe van: rögzíti a húsmassza szemcséit és biztosítja a megfelelő szeletelhetőséget. Ez úgy történik, hogy a tejsav koagulálja a hús- és zsírszemcsék közti fehérjeoldatot, amelyből egy szilárd térhálós szerkezet keletkezik. A hazai és nemzetközi szinten is igen változatos kolbász- és szalámiféleségek rendelkeznek a húskészítmények közül talán a legszélesebb körű mikrobiótával, amelyet elsősorban az alapanyagok minősége, az előállítás higiénája, valamint a fermentálásban részt vevő mikroorganizmus-kultúra befolyásol. Utóbbi tekintetében beszélhetünk spontán és starterkultúrák fermentációról. Fontos megjegyezni, hogy a starterkultúrák természetes módon fermentált kolbászokból izolált baktériumokat tartalmaznak, melyek közt gyakoriak a *Micrococcus*, *Pediococcus*, *Leuconostoc*, hetero- és homofermentatív *Lactobacillus* fajok, illetve tartalmazhatnak élesztőgombákat is (pl. *Debaryomyces hansenii*). A *Micrococcus*ok a nitrátot nitritté redukálják, a *Lactobacillus*ok és *Pediococcus*ok elsősorban tejsavképző és káros mikroorganizmusokat gátló hatásuk miatt előnyösek, ráadásul kedvező hatásúak az emberi bélflórára is (pl.: a *Lactobacillus acidophilus*). A nitrittartalmú pácsó nem gátolja a starterkultúrát a veszélyes baktériumoktól eltérően. A szénhidrátok erjesztése csökkenti a pH-t. A lipolitikus aktivitás fontosabb – különösen a karbonilok képzése –, amely az aroma kialakításában játszik szerepet [Deák, 2006].

A savtermelést befolyásolja a hőmérséklet, a sókoncentráció, a pH, a nitritkoncentráció, a hozzáadott szénhidrát típusa és mennyisége, a fűszerek és egyéb adalékanyagok típusa és mennyisége, az alapanyag mikrobiotájának összetétele és kezdeti csíraszama, valamint a starterkultúra összetétele, kezdeti csíraszama és aktivitása. A gyorsérlelés starterkultúrával akár néhány hét vagy nap alatt végbemegy, emellett a starterkultúrában használt, általában tejsavbaktériumok, mikrokokuszok (a termék felületén esetlegesen élesztők és penészek) kívánatos aromaanyagokat, illetve a nem kívánt mikroorganizmusokat gátló vagy elpusztító anyagokat (baktericid) termelnek. A gyorsérlelés technológiája az érlelési időt harmadára-ötödére csökkenti.

Kémiai savanyítószerekkel történő gyorsérlelés esetén a megfelelő állománykialakítás (fehérjekeaguláció) érdekében a savnak csak a betöltés után néhány órával szabad érintkeznie és reakcióba lépnie a hús- és zsírszemcsék közt található fehérjékkel. Emiatt az ipar glükono-delta-laktont (GDL) alkalmaz, mely csak a húsban lévő víz hatására hidrolizál. Az ekkor keletkezett glükonsav a töltés után néhány órával hozza létre a fehérjetérhálót, amely magába zárja a húskészítmény más összetevőit. Lehetséges még a szerves savak (például citromsav, tejsav) bevonása különleges bevonóanyagokkal (például részlegesen hidrogénezett növényi olajjal), amelyek a hús víztartalmában feloldódnak, vagy magasabb hőmérsékleten (50–60 °C) megolvadnak. Kémiai savanyítószerekkel néhány óra alatt kialakul az alacsony pH (5,2–5,3), így az érés és a vízleadás nagymértékben felgyorsul.

Pácolás

A pácolás olyan művelet, melynek során a húsokba vagy szalonnába nem hús jellegű összetevőket és adalékanyagokat (konyhasó, nitrit, foszfátok, hidrokolloidok) juttatnak be és oszlatnak el egyenletesen. Az adalékanyagok vándorlása a szövetekben diffúzióval történik [Körmendy, 1991].

A húskészítmények víztartó képességének, állományának, színének, aromájának és eltarthatóságának kialakításában az adalékanyagok (elsősorban a pácsók) vesznek részt. A só és a foszfát hatására a fehérjeláncok eltávolodnak egymástól, nő a köztük lévő távolság, amely lehetővé teszi azok duzzadását és kioldódását, javítja a víztartó képességet. A duzzadt rostok több fényt nyelnek el, így sötétebb, vörösebb lesz a pácolt hús színe. A peptidláncok közötti térben, kötött állapotban jelen lévő víz megkötését a peptidek oldalláncainak töltöttsége teszi lehetővé, amely másodrendű kölcsönhatások révén vesz fel hidrátburkot. Bármilyen irányú töltésfelesleg esetében a láncok közötti tér nő, a vízkötő képesség pedig javul. A kloridionok továbbá 5,2-es pH-érték felett negatív töltésfelesleget okoznak.

Megfelelő mennyiségű sóoldattal a fehérjeláncok oldatba vihetők. A szarkoplazmafehérjék már híg sóoldatban (0,3–0,6 mol/dm³) is oldódnak. A pirofoszfát ATP-analóggént képes fokozni a miozin oldódását és a miofibrillumok duzzadását a konyhasóval együtt. 5,8%-os konyhasókoncentráció mellett maximális a duzzadás mértéke. A pirofoszfát továbbá a miozinnalábok depolarizációja által segíti a miozin kioldódását, így jelenlétében feleannyi konyhasó is elég a maximális duzzadás eléréséhez, viszont önmagában nem javítja a víztartó képességet. A pácolás hatékonysága több fizikai tényező változtatása, valamint tumblerezés vagy masszírozás, illetve a páclé tús pácolóval történő, izomrostok közé juttatása segítségével fokozható. A pácolt termékeknél rendkívül fontos a tumblerezés (vagy masszírozás) során képződő fehérje-exszudátum. Az exszudátum egy nagyjából 10% fehérjetartalommal rendelkező fehérjeoldatba ágyazott duzzadt izomrost- és miofibrillum-törmelék. Az exszudátum

jellemzőit a miozintartalma határozza meg. Úgy képződik, hogy a páclé és a húspanban található nedvek közti ozmózisnyomás-különbség hatására a húsból nagy fehérjetartalmú húslé áramlik ki, amely keveredik a sóval, a sóoldat pedig ellentétes irányba áramlik, a hús belseje felé. Ennek a két oldatnak a keveredése az exszudátum. Itt egy szol-gél-átalakulás megy végbe: a gélesedés a feltárt fehérje, a pácsó, a foszfát és a víz közegében jön létre. Az exszudátum hőkezelés hatására koagulálódik, denaturálódik, így a húsdarabokat összeragasztja, a keletkezett kéreg a hőkezelési veszteséget csökkenti, mivel lezárja a belső húsrétegekből szivárgó nedvesség útját. Természetesen az utóbbi jelenségnek „nyers” érlelt termékek esetén nincs relevanciája [Friedrich, 2008].

5.3. Modern fejlesztések a húsipari biokatalitikus folyamatokban

A nagy hidrosztatikus nyomású kezelés hatásai a hús éréseire

Az utóbbi évtizedekben a fogyasztók érdeklődésének középpontjában egyre inkább a kíméletesen kezelt termékek, azaz a természetes állapotukban leginkább megőrzött élelmiszerek állnak. Emiatt az élelmiszerek nem termikus kezelésének legfőbb célja a természetes érzékszervi tulajdonságok, valamint makro- és mikrotápanyag-tartalmuk megőrzése lett. A HHP (high hydrostatic pressure), azaz a nagy hidrosztatikus nyomású kezelés során a folyékony vagy szilárd élelmiszereket 100 és 1000 MPa közötti hidrosztatikus nyomásnak teszik ki, ezáltal tartósító hatást váltva ki. Előnye, hogy a légmentesen és flexibilis csomagolásban lévő élelmiszerben, a közvetítő folyadékba merülve a hidrosztatikus nyomás a Pascal-elv szerint pillanatszerűen és egész tömegében egyenletesen (izosztatikusan) érvényesül, így a hatása más tartósítási módszerekkel ellentétben gyakorlatilag nem függ az élelmiszer alakjától vagy méretétől.

A HHP kezelés hatása az alkalmazott nyomás szintjén kívül függ a nyomásnövelés és a nyomáscsökkenés sebességétől, a kezelési hőmérséklettől (beleértve az adiabatikus melegedést is), az induló termék hőmérséklettől, a kezelés időtartamától, a berendezésben kialakuló hőmérséklet-eloszlástól, a termék vízáktivitásától, pH-jától és összetételétől. A gyakorlatban a kezelés időtartama néhány másodperctől akár 20 percet meghaladó időtartamig terjedhet, bár gazdasági szempontokat figyelembe véve előnytelen, ha a 20 percet meghaladja a kezelési időtartam. Az élelmiszer veszít a térfogatából a nyomáskezelés hatására, és a nyomás elengedésekor kitágul. Így a csomagolóanyag megválasztásakor figyelembe kell venni, hogy melyik anyag képes több mint 15%-os térfogatváltozást elviselni anélkül, hogy megsérülne [Balla, 2007].

A HHP kezelés hatására az érzékszervi tulajdonságok jelentősen nem változnak, tehát a termék íze és aromaanyagai megmaradnak természetes állapotukban. A fehérjék elsődleges szerkezetére a HHP nincs hatással. Az α -hélixek vagy β -redők a hidrogénhidak károsodásával bomolhatnak le, viszont ehhez nagyon nagy nyomásértékekre van szükség. A nyomás hatására bekövetkező fehérjeszerkezeti változások az aminosav-láncok közötti nem kovalens kötések változásából fakadnak. Ezek a kötések adják a fehérjék harmadlagos szerkezetét. Ezekre kis részben 200, nagy részben 300 MPa körüli nyomásérték van hatással. A fehérjék negyedleges szerkezetét a nem kovalens kötések tartják össze. Ezek a kötések rendkívül nyomásérzékenyek, már a 150 MPa-os nyomás is elegendő a fehérjék károsodásához. Ez magyarázza, hogy az összetett enzimek érzékenyebbek a nyomásra, mint az egy molekulából állók.

Előfordulhat, hogy a nyomáskezelés hatására egyes enzimek aktiválódnak, mások

pedig inaktiválódnak. Az aktiválódás oka a szöveti károsodás és a megnövekedett szubsztrátmennyiség, ezek azonban nagyon ritka jelenségek, legtöbbször a nagy nyomású kezelés hatására az enzimek inaktiválódása figyelhető meg. Minél nagyobb nyomáson kezelünk egy élelmiszert, annál valószínűbb, hogy az enzimek elváltozása irreverzibilis lesz. Ez függ az enzim típusától, a pH-tól, a szubsztrát koncentrációjától és hőmérsékletétől. Az inaktiválódás bekövetkezhet az enzim és a szubsztrát között beállt változás miatt vagy az aktív centrumban bekövetkezett deformálódásból kifolyólag [Hendrickx, 1998].

A húsok esetében 100–150 MPa közötti nyomáskezelés alkalmazható. Azáltal, hogy a nyomáskezelés aktiválja a katepszin nevű proteolitikus enzimet és roncsolja az izomfehérjék kapcsolódási pontjait, képes felpuhítani a pre-rigor állapotban lévő húst. Ezek a hatások megfigyelhetők a marha-, sertés-, csirke- és nyúlhús esetében is. A mikrobaszám hatékonyan csökkenthető egy 250 MPa-os kezeléssel a füstölés előtt marhahússzeletben, illetve a szalonnában. Marhahúsnál az emészthetőség javulása volt megfigyelhető a húsfehérjéknél, ami a hőkezeléssel ellentétben nem vonja maga után a húsfehérje biológiai értékének romlását, illetve a fehérjeszerkezet roncsolódását [Balla, 2007].

Tóth (2014) vizsgálatai alapján elmondható, hogy a hús érése során a 130–175 MPa-val történő HHP-kezelése tartósító hatású, ezáltal késlelteti a romlási folyamatok bekövetkezését, növeli a hús léeresztését, szemmel látható színváltozást okoz a b* (sárga-kék szinténnyező) tekintetében (az L* világossági tényező és az a* vörös-zöld szinténnyező esetében nem), valamint jelentős az állományjavító hatása. 300 MPa felett már az L* és az a* egyértelműen változik.

Az ultrahang alkalmazásának hatásai a hús érésére és pácolására

Az 1 Wcm⁻²-nél nagyobb intenzitású ultrahangot nevezzük aktív ultrahangnak. Ismert jelensége a kavitáció, vagyis a mikroméretű buborékok szétpattanása, amelyek sokkoló erejű hullámokat hoznak létre [Phull, 2003].

A marhahús érlelése során lejátszódó folyamatok a hús további kezelhetőségére, technológiai viselkedésére is kihatnak. Az aktív ultrahang alkalmazása során olyan mechanikai hatások érik a kezelt húst, amelyek során a membránrendszer sérül, ezáltal könnyítve a multikatalitikus enzimrendszer kiteljesedését. Az aktív ultrahang alkalmazásával a kisebb molekulatömegű fehérjefrakciók számának emelkedése tapasztalható, amely a proteolitikus enzimek felszabadulását jelzi. Ezen hatások elősegítik a porhanyósodási folyamatot, valamint a kialakuló mechanikai hullámok hatással vannak az izom szerkezetére is.

A 3 Wcm⁻² intenzitású ultrahang alkalmazása során a marhahús membránjának ionkiáramlása megnő. Az alkalmazott ultrahangos kezelési idő növelésével arányosan emelkedik az ionkiáramlás mértéke is. Ultrahang segítségével a mikrobiológiai szempontokból kifolyólag igen előnyös 0–1 °C hőmérsékleten a marhahús megfelelő porhanyósságához szükséges 14–17 napos érlelési időt le lehet rövidíteni 7–8 napra [Vén, 2010]. A passzív ultrahang lehetőséget biztosít az érlelt húskészítmények, valamint a szárazáruk (például téliszalámi) érlelésének roncsolásmentes nyomon követésére [Friedrich, 2008].

A 4 Wcm⁻² intenzitású aktív ultrahang alkalmazása a pácolás során már megközelíti a tumblerezés által létrehozott diffúziós tényezőt, de nem éri el azt, viszont aktív ultrahang segítségével egyenletesebb sóeloszlást, valamint egyenletesebb és puhább állományt érhetnek el a húskészítmények teljes keresztmetszetében. Minél hosszabb a kezelési idő, illetve minél nagyobb a kezelés intenzitása, annál egyenletesebb lesz az állomány, illetve a sóeloszlás. Az ultrahanggal kezelt sonkák esetén a páclé mennyisége nem befolyásolja a pácolás

hatékonyságát, valamint a sonkák állománya rághatóság szempontjából előnyösebb lesz. Az ultrahangok és a tumblers technológiák kombinálásával magas pácbevitelű, gyors pácolási technológia érhető el [Friedrich, 2008].

A transzglutamináz enzim hatásai húsipari termékekre

A mikrobiális transzglutamináz (mTG) az élelmiszeripar több területén is alkalmazható enzim, hiszen számos, az élelmiszerekben előforduló fehérje átalakítását katalizálja (5.1. táblázat). Az 1. fejezetben (Tejipar) már ismertettük az enzim általános jellemzőit, így ebben a részben főleg a húsipari vonatkozásokat mutatjuk be.

A húsfehérjék közül a miozin és a zselatin kiváló szubsztrátja az mTG-nek. A szójafehérjék magas szubsztrátspecifitásuk miatt a húsipari termékek enzimkezelésének lehetőségeit bővítik [Hwang, 2004]. Az mTG keresztkötése hatására az oldható fehérjék oldhatatlan, nagy molekulatömegű polimerekké válnak, ezzel lehetővé téve a restruktúrált húsok előállítását [Sun, 2009]. Az izomfehérjék, különösen a miozin, és az mTG között keresztkötések jönnek létre, melyek erősebbé teszik az így kialakult fehérjehálót [Huang, 1992].

5.1. táblázat: Az mTG szubsztrátspecifitása élelmiszerekben előforduló fehérjék esetén [Darnay, 2016]

Szubsztrát		Szubsztrátspecifitás
Tejfehérje	kazein Na-kazeinát α -laktalbumin β -laktalbumin	jó jó alig alig
Húsfehérje	mioglobín zselatin kollagén miozin	alig jó közepes jó
Tojásfehérje	ovalbumin	alig
Búzafehérje	gliadin glutenin	közepes közepes
Szójafehérje	11S globulin 7S globulin	közepes közepes

Hús-, illetve haltermékek esetében az mTG növeli a termék keménységét, ezzel jelentősen befolyásolva annak minőségét [Sakamoto, 1994]. Sok esetben úgy találták, hogy az mTG a kazeinattal együtt tudja leginkább kifejteni a hatását [Motoki, 1998; Kuraishi, 2001]. Ez esetben só/foszfát felhasználása nélkül is el tudták érni a megfelelő vízkötő képességet, és a szerkezet is ellenállóbb lett a hőhatással szemben a kialakult, kovalens természetű izopeptidkötéseknek köszönhetően [Motoki, 1998]. A húsipari alkalmazása a restruktúrált húsoknál a legkézenfekvőbb. Ez esetben a gasztronómia vékony steakek és különböző húsok összeragasztására használja a hidegkötő (angol: cold-set binding)

tulajdonságából adódóan. A darabolás-csontozás közben kitermelt kisebb húsok összeragasztására is felhasználható. Mindazonáltal az egészségtudatosabbá váló vásárlók miatt nagyobb piaci lehetőség rejlik a csökkentett só- és/vagy foszfáttartalmú termékek előállításában [Darnay, 2016].

Az mTG-t fehér- és vöröshúsoknál egyaránt alkalmazzák. A fehér húsok közül például a pulykamell [Ashie, 1999], csirkemell [Muguruma, 2003], a halak közül a csíkos márna (*Mugil cephalus*) [Ramírez, 2006] és a Brazíliában közkedvelt fehér árnyékhal (*Micropogonias furnieri*) esetén [Goncalves, 2010] végeztek kutatásokat. A vörös húsok közül a marhahúsnál [Ionescu, 2008; Dindero, 2006] és a sertéshúsnál [Flores, 2007] egyaránt megfelelő állománymódosítónak bizonyult.

A hús szerkezete mikrobiális transzglutamináz enzim segítségével javítható, mivel az enzim az oldható fehérjék esetén fejti ki aktivitását. A gyártáskor alkalmazott sókeverék segít oldatba vinni a húsfehérjéket. A nitrítés sókeverék hozzáadása a nedves pácolási technológia során, a tumblerezés közben történik. Az elsőrendű kötések kialakításával igény szerinti méretű és alakú húсару készíthető [Dimitrakopoulou, 2005]. Restruktúrált, szárított sonka esetében Romero és társai (2010) az enzimkészítményeket a hús felszínén alkalmazva, az így „összeragasztott” sonkafelületeket vizsgálták vákuumcsomagolást, 7 °C-on történő tárolást és nyolcnapos, 15 °C-on és 80%-os relatív páratartalom mellett történő szárítást követően. A pásztázó elektronmikroszkóppal végzett vizsgálatok során azt figyelték meg, hogy nyolc hét alatt tömör szöveti szerkezet alakult ki, amelyet vastaggá vált izomrostok hálózta be, és a két felület határai elmosódtak. Ezt tükrözte a mintákban mért kötési erő értéke is, amely a nyolcnapos szárítás alatt a porként és a vizes oldatként alkalmazott enzimadagolás esetén egyaránt megháromszorozódott.

Kuraishi és társai (1997) arra a megállapításra jutottak, hogy az mTG alkalmazása hűtött, nyers húsnál célszerű. Hattel és társai (2005) szerint az enzimkészítményt vizes oldatban 1:4 arányban kell alkalmazni, mert ezzel biztosítható, hogy az mTG-t a kötőfelületre egyenletesen fel lehessen vinni, és ezáltal hibátlan metszéslapja lehet a terméknek. Felhívták a figyelmet arra is, hogy a túl magas vízaktivitás az enzim hatékonyságát rontja, mert a szabad víz megakadályozza az izopeptidkötés kialakulását, mely a húsrészek összetapadását eredményezné. A pácolás során tehát a szabad víz megkötése elengedhetetlen. Ezenkívül bizonyíték született arra is, hogy az mTG által katalizált intra- és intermolekuláris kovalens kötések során kialakuló miofibrilláris fehérjepolimerek helyrehozzák (restaurálják) a PSE hús állományát [Milkowski, 1999].

Az mTG hatással van a gyorsérlelésű szárazárúkra, mert jobb szeletelhetőséghez vezet, és biztosítja a formatartást akár egyedi formák esetén is. Nem befolyásolja a pH alakulását, és nem hat sem a vízaktivitás, sem a szárítási veszteség alakulására. Mindazonáltal a cukortartalmat célszerű csökkenteni, ha az enzimkészítmény maltodextrint tartalmaz [Budemann, 2002].

Az mTG felhasználható vörösarúk esetében is hazai kutatás alapján. Alkalmazása már a húspép állományára is hatással van. Az mTG túlادagolása légzárványok kialakulásához, egyenetlen metszéslaphoz, ezáltal az érzékszervi jellemzők negatív irányú változásához vezet, így az enzim maximális koncentrációja 0,6 U/g lehet. A nyers húspép és a hőkezelt termék keménysége között a pácókoncentráció függvényében lineáris összefüggés van, amit az enzimkezelés szorosabbá tesz. Az enzim állománymódosító hatása 0–0,7% foszfátkoncentráció mellett szignifikáns, és 11–20%-os keményedést eredményez a késztermékben. 0–0,3%-os foszfátadagolás mellett az enzimkezelés hatására nő a frankfurti virsli vízkötő

képessége, valamint 0,3%-os foszfátkoncentráció felett a metszéslap homogenitása, rugalmassága és roppanóssága alapján az enzimkezeléssel jobb érzékszervi tulajdonságok érhetők el [Darnay, 2016].

Irodalomjegyzék

- Adzitey F. és Nurul H. (2011): Pale soft exudative (PSE) and dark firm dry (DFD) meats: causes and measures to reduce these incidences – a mini review. *International Food Research Journal*, 18(1).
- Ando H., Adachi M., Umeda K., Matsuura A., Nonaka M., Uchio R., Tanaka H. és Motoki M. (1989): Purification and characteristics of a novel transglutaminase derived from microorganisms. *Agricultural and Biological Chemistry*, 53, pp. 2613–2617.
- Ashie I. N. A. és Lanier T. C. (1999): High pressure effects on gelation of surimi and turkey breast muscle enhanced by microbial transglutaminase. *Journal of Food Science*, 64, pp. 704–708.
- Balla Cs. és Siró I. (szerk.) (2007): *Élelmiszer-biztonság és -minőség*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Budemann A. (2002): *Enzyme – die Katalysatoren des Lebens*. Előadás a GDL Kongresszuson, Osnabrück.
- Darnay L. (2016): *Mikrobiális transzglutamináz alkalmazhatósága tej- és húsipari termékeknél*. Doktori (PhD-) értekezés, Szent István Egyetem.
- Deák T., Kiskó G., Maráz A. és Mohácsiné Farkas Cs. (2006): *Élelmiszer-mikrobiológia*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Dimitrakopoulou M. A., Ambrodiadis J. A., Zetou F. K. és Bloukas J. G. (2005): Effect of salt and transglutaminase (TG) level and processing conditions on quality characteristics of phosphate-free, cooked, restructured pork shoulder. *Meat Science*, 70, pp. 743–749.
- Dondero M., Figueroa V., Morales X. és Curotto E. (2006): Transglutaminase effects on gelation capacity of thermally induced beef protein gels. *Food Chemistry*, 99(3), pp. 546–554.
- Flores N. C., Boyle E. A. E. és Kastner C. L. (2007): Instrumental and consumer evaluation of pork restructured with Activa™ or with Fibrimex™ formulated with and without phosphate. *Food Science and Technology*, 40, pp. 179–185.
- Friedrich L. (2008): *Ultrahangalkalmazása húskészítmények minősítésében és gyártástechnológiájában*. Doktori értekezés, Budapest.
- Gonçalves A. A. és Passos M. G. (2010): Restructured fish product from white croaker (*Micropogonias furnieri*) mince using microbial transglutaminase. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 53(4), pp. 987–995.
- Hattel M., Güniker R. és Janssen T. (2005): Herstellen von Rohschinken „Meterware”. *Kulmbacher Notizen*, 36, p. 12.
- Hendrickx M., Ludikhuyze L., Van den Broeck I. és Weemaes C. (1998): Effect of high pressure on enzymes related to food quality. *Trends in Food Science & Technology*, 9, pp. 197–203.
- Huang Y. P., Seguro K., Motoki M. és Tawada K. (1992): Cross-linking of contractile proteins from skeletal muscle by treatment with microbial transglutaminase. *Journal of Biochemistry*, 112, pp. 229–234.
- Hwang D.-C. (2004): *Transglutaminase Cross-linked Soy Protein Composition, Fish and Meat Products and Analogues Thereof*. Európai szabadalom, EP 1 459 635 A1.

Ionescu A., Aprodu I., Daraba A. és Porneala L. (2008): The effects of transglutaminase on the functional properties of the myofibrillar protein concentrate obtained from beef heart. *Meat Science*, 79(2), pp. 278–284.

Kuraishi C., Yamazaki K. és Susa Y. (2001): Transglutaminase: its utilization in the food industry. *Food Reviews International*, 17, pp. 221–246.

Motoki M. és Seguro K. (1998). Transglutaminase and its use for food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 9(5), 204–210.

Milkowski A. L. és Sosnicki A. A. (1999): *Method for Treating PSE Meat with Transglutaminase*. Amerikai szabadalom, US 5928689 A.

Phull J. E. és Mason T. J. (2003): The development and evaluation of ultrasound for the treatment of bacterial suspensions: a study of frequency, power and sonication time on cultured *Bacillus* species. *Ultrasonics Sonochemistry*, 10(6), pp. 315–318.

Szücs E. (2002): *Vágóállat- és húsmínőség*. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest.

Tóth D. (2014): *Marhahús érlelési technológiájának fejlesztése a nagy hidrosztatikus nyomáskezelés alkalmazásával*. Szakdolgozat, Budapest.

Vén C. (2010): *A marhahús érésének vizsgálata, az érlelési technológia fejlesztése*. Doktori értekezés, Budapest.

Warriss P. D. (2009): The effects of live animal handling on carcass and meat quality. In: *Meat Science: An Introductory Text* (2. kiadás), pp. 97–112.

Wilson J. (2017): *Biology and Chemistry Tuition*. Milngavie, Bearsden, West End Glasgow.

6. Dohányfeldolgozás

Beszédes Sándor, Jákoí Zoltán⁶

6.1. Bevezetés

A dohánynövény (*Nicotiana tabacum* L.) alapanyagból történő élvezeti cikkek előállítása a fogyasztók egészségtudatosságának fokozódásával több országban visszaszorul, illetve a termesztés és a gyártási kapacitások koncentrálnak. Az ipari feldolgozás az előállított árucikkek magas ára, nagy hozzáadott értéke és a magas adótartalma miatt azonban továbbra is jelentős gazdasági tényezőnek tekinthető [Radoczné, 2008]. Megfelelő termőhelyi és klimatikus viszonyok mellett a dohánynövény nagy biomassza-termelési potenciállal rendelkezik, ezért a növényi biomassza alapú biohajtóanyag-előállítás egyik alapanyaga is lehet.

A klasszikus felhasználási célú dohány komplex élvezeti értékének többek között az aromássága, illata, színe és a felhasználáskor keletkező füst „minősége” egyaránt meghatározója. A jelenleg termesztésben lévő fajtái közül a legtöbb az ún. nagylevelű ökotípusba sorolható, a Virginia (nagylevelű világos, cigarettadohány) és a Burley (nagylevelű barna, eredetileg pipadohány) a leggyakoribb, de megtalálható a Kentucky, Latakia, Criollo, Shade, Perique és egyéb speciális (pl. ipari Y1, USA), helyi fajták (pl. Pallagi fajták), illetve az ún. kislevelű Oriental fajták [Pusztai, 2003].

A dohánynövény fajtája, valamint a termőhelyi és klimatikus viszonyok mellett a feldolgozási technológia – elsősorban a szárítás és a fermentáció – is jelentősen befolyásolja a minőségi paramétereket. A feldolgozási technológia egyes lépéseinek (pl. hőközlés, enzimes folyamatok, szinkialakítás, nedvességelvonás) hatékonysága elkülönülten nem vizsgálható. A nedvességtartalom csökkenésének mértéke, illetve ennek üteme, továbbá a termikus hatások egyaránt befolyásolják a fermentáció során végbemenő enzimes folyamatokat. Természetesen ezekben a folyamatokban a dohánynövény szöveti, természetes enzimjei, illetve a felületre kerülő mikroorganizmusok által termelt enzimek is szerepet játszhatnak. A feldolgozás során a szín, aroma és állag kialakítása mellett célként fogalmazódik meg a későbbi romlási folyamatok gátlása is.

6.2. Szárítás

A friss, zöld dohány nem alkalmas dohányipari termék, például cigarettadohány vagy pipadohány előállítására, elsősorban a zöld növényhez hasonló fanyar, csípős aromája és illata miatt. A leszüretelt levelek a kereskedelmi forgalomba hozás előtt többlépéses feldolgozási folyamaton mennek keresztül, melynek első művelete a szárítás.

Az alkalmazott szárítási technológia az előállított termék és a feldolgozott dohány fajtájának függvénye. Az eljárás fő célja a zöld növény akár 82–85%-os nedvességtartalmának 6–13%-ra csökkentése. A szárításnál a füstölésen, illetve természetes légáramú és mesterséges szárításon alapuló eljárásokat alkalmaznak, amelyek közül az utóbbi kettő a gyakoribb.

Természetes szárításnál a szárítási körülmények, illetve a függesztett dohánylevelek levegő

6 Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézet
6725 Szeged, Moszkvai krt. 9.
beszedes@mk.u-szeged.hu

általi körüláramlása nem irányított. A jellemzően 15–35 °C hőmérséklettartományú 4–10 hetes időszak alatt a cukortartalom jelentősen lecsökken. A teljes szárítási periódus körülbelül első harmada a színkialakítási szakasz, a további időszakban az erezetből távozik a nedvesség. A légáramlás alacsony mértéke mellett, a környezeti hatások következtében esetlegesen létrejövő magas páratartalom romlási jelenségeket és kedvezőtlen szín kialakulását okozhatja.

A mesterséges szárításnál elsősorban a klorofillnak a természetes eljárashoz képest nagyobb arányú és gyorsabb lebomlását célozzák a szárítást befolyásoló paraméterek megfelelő megválasztásával. A jellemzően 1–2 hetes időtartamú szárítás során a hőmérsékletet folyamatosan növelik [Peele, 1995]. A mesterséges szárítási eljárással legtöbbször cigarettadohányt állítanak elő, amelynek a természetes eljárással nyert termékhez képest magasabb a cukortartalma.

A szárítás során a légzési intenzitás az első néhány napban növekszik, majd az ezt követő 1–2 hetes periódusban már csökken. A dohány feldolgozása során a levelek vastagsága változik, elsősorban a levegő páratartalmának megfelelő mértékben csökken [Feng, 2013].

A dohány nedvességtartalmának csökkenése, illetve a levél szerkezetének változása miatt a további feldolgozás (pl. töltés) megkönnyítése céljából a szárítási szakaszt követően ún. puhításra van szükség, amelyet a hőmérséklet csökkentésével és a páratartalom növelésével érnek el. A feldolgozás során a dohány fizikai tulajdonságai már a megfelelő idejű színkialakítási fázis alkalmazásával is javíthatók [Chen, 2019b].

6.3. Fermentáció

A dohány szárítást követő fermentációjának fő célja az előállított végtermék szempontjából kedvező szín, aroma és állag kialakítása. A dohány feldolgozása tulajdonképpen egy szilárd fázisú fermentációs eljárás, amely néhány héttől akár 2–3 évig is tarthat az előállítandó termék jellegétől függően.

A fermentáció során az asztagokba rakott, szárított dohánylevelek tömege csökken, a halom hőmérséklete emelkedik. A dohány hosszabb idejű (több hónapos, illetve éves) fermentálása és érlelése során a nedvességtartalmat általában 9–13% között kontrollálják [Villemur, 2009]. Különbféle biokémiai, enzimatis és bakteriális folyamatok eredményeként létrejönnek a kívánt aromát és színt biztosító vegyületek, a nikotintartalom pedig csökken.

A dohány fermentációja során végbemenő változásokat több elmélettel – oxidáció, enzimes folyamatok, mikrobiális folyamatok – is magyarázták [Yang, 2018]. Összességében a polifenolok és karotinoidok oxidációja révén a zöld növény leveleinek sárgulása, illetve barnulása, továbbá a nedvességtartalom és a cukrok koncentrációjának csökkenése, a kemé-nyitótartalom lebomlása, az olajtartalom növekedése, az íz-, aroma- és füstaromaképző tulajdonságok javulása történik.

6.4. A feldolgozás alatti kémiai és biokémiai változások

Kémiai, összetételi változások

A levélben lévő pigmentek, illetve ezek lebomlási termékei elsősorban a termék előállításra használt dohányalapanyag színét és aromáját befolyásolják [Yang, 2018]. A zöld dohány pigmentjei elsősorban a klorofill-a, klorofill-b, lutein, α -karotin, neoxantin és violaxantin. A nedvességelvonási szakaszban és a fermentáció során kialakuló szín szempontjából

a klorofill, a karotinoidok, a klorofillid, a protoporfirin és a magnézium-protoporfirin mennyisége meghatározó. A zöld dohányban a feofitin nem található meg, ennek kialakulása a szárítási eljárás során történik. A fermentációval előállított tétel homogenitása – kémiai paramétereit tekintve – nehezen biztosítható, mivel egyazon növény esetében a levélpozíciótól függően a teljes klorofilltartalom jelentős eltéréseket mutathat [Siva Raju, 2015].

Technológiai és termékminőségi szempontból a nagyobb arányú klorofill-lebomlás nagyobb mértékű aromakialakító komponens keletkezését okozza. A feldolgozás során ezért már a szárítási eljárás megválasztása is befolyásolja a kialakítható aromát. A megfelelően irányított mesterséges szárítás tökéletesebb és gyorsabb klorofill-lebomláshoz vezet, amely a termék szempontjából elvárt sárgás színt eredményezi. A fenolos komponensek közül a klorogénsavból és a rutinból képződnek barna színárnyalatú termékek [De Jong, 1972].

A karotinoidok bomlása a klorofillhoz hasonló tendenciával változik az idő függvényében, azonban a koncentrációváltozás aránya elmarad attól. A két vegyületcsoport lebomlási üteme közötti különbség eredményezi a szárítás során a levelek zöld színének sárgává változását. A karotinoidok – illetve azok bomlástermékei – a szín és már igen kis koncentrációban a füst aromájának kialakítása szempontjából is lényegesek. A mesterséges szárítás során a karotinoidok főként β -karotinra, luteinre, neoxantinra és violaxantinra bomlanak. A karotinoid eredetű vegyületek adják az illékony aromakomponensek kb. 10%-át, amellyel a klorofill-bomlástermékek után a második legjelentősebb vegyületcsoportnak tekinthetők. Bomlásuk a színekialakítási fázisban, 38–40 °C hőmérséklettartományban a leggyorsabb [Qiu, 2003].

Az egyes összetevők változási üteme a dohánylevél érettségi állapotának is függvénye: a feldolgozás során az érett levelekben a klorofill-lebomlás mértéke kisebb, mint a kevésbé érettekben. A feldolgozás alatti biokémiai változások szempontjából lényeges, hogy a levél öregedésével a lignifikáció fokozódik, a zöld növényt tekintve a fotoszintetikus hatékonyság és a peroxidáz (POD) aktivitás is csökken [Chen, 2019]. Emellett az idő előrehaladtával, a levelek fehérje- és nitrogéntartalma is csökken. A cigarettadohány minősége szempontjából lényeges továbbá, hogy a levelek öregedésével az oldható cukrok, a redukáló cukor és a klorofilltartalom, valamint a lipidperoxidáció során keletkező malondialdehid (MDA) mennyisége is növekszik.

A szárítási szakaszban a vízzoldható fehérjetartalom növekvő tendenciát mutat, ez azonban a további fermentáció során megfordul. A vízzoldható formába került fehérjék aminosavakká történő hidrolízise az oldható fehérjetartalom csökkenését okozza. Az említett folyamat alacsonyabb pH-tartományban nagyobb mértékű [Chen, 2019].

A szárítás és fermentáció teljes folyamatát tekintve egyértelmű pH-csökkenési tendencia figyelhető meg az idő függvényében. A pH általában 4,4–5,8 tartományban változik, azonban ettől eltérő kémhatás is kialakulhat a feldolgozott dohány fajtájától, a fermentációs eljárás típusától és az ott alkalmazott körülményektől függően [Sun, 2011]. Az alacsonyabb pH kedvezőbb érzékszervi tulajdonságokat eredményez, mivel a savas karakterű komponensek csökkentik a dohányból keletkező füst mennyiségét és javítják annak aromáját [Frankenburg, 1946; Kaburaki, 1962].

A fermentációs folyamat előrehaladtával a nikotintartalom és a nitrózaminok mennyisége folyamatosan csökken. A dohány, illetve a dohányfüst aromájának kialakításában a C_2 – C_8 és egyéb illékony szerves savak (VOC) szerepe meghatározó, amelyek koncentrációja erősen fajtafüggő.

Az illékony savak, mint például a metil-valerát koncentrációja a fermentáció folyamán folyamatosan növekszik. A nikotin a dohányban a fajtától, termőhelytől és az évjárártól függően

kb. 1,2–3%-ban van jelen, és a koncentrációja az első hat hónapban csökken lényegesen [Zhou, 2019].

6.1. táblázat: Összetevők változása a szárítási és érlelési folyamat alatt (Virginia típus)
[Leffingwell, 1999]

Összetevő (szárazanyag %-ában)	Zöld	Sárgítás	Érlelt
Keményítő	29,30	12,40	5,52
Redukáló cukrok	6,68	15,92	16,47
Fruktóz	2,87	7,06	7,06
Szacharóz	1,73	5,22	7,30
Nyersrost	7,28	7,16	7,24
Teljes nitrogén	1,08	1,04	1,05
Fehérje-nitrogén	0,65	0,56	0,51
Nikotin	1,10	1,02	0,97
Oxálsav	0,96	0,92	0,85
Citromsav	0,40	0,37	0,38
Almasav	8,62	9,85	8,73

A dohányban megtalálható alkoholok, aldehidek, ketonok és esszenciális olajok átalakulnak, ennek következtében az érlelési időszak folyamán az illékony szerves savak, egyéb illékony szerves vegyületek és aromaanyagok koncentrációja növekszik [Sun, 2011]. Az ammónia, illetve az aromakialakítás szempontjából lényeges keményítő, valamint vízzoldható formában lévő cukrok és redukáló cukrok mennyisége a hagyományos dohányfermentáció során folyamatosan csökken (6.1. táblázat). Mindezek ellenére a Maillard-reakciók termékeinek koncentrációja az érlelési folyamat során növekedő tendenciát mutat.

A mesterséges szárítású, fermentált dohány meghatározó aromakomponensei közé tartozik például a metil-butanol, piridin, furfurool, furfuril-alkohol, benzaldehid, benzil-alkohol, fenil-acetaldehid, metil-piridin, acetil-pirrolin, linalol, ciklopentén-származékok és a feniletil-alkohol [Sun, 2011].

Enzimes folyamatok

A dohány feldolgozása során olyan enzimek által katalizált biokémiai folyamatok és ezáltal összetételei és szerkezeti változások mennek végbe, amelyek – megfelelően irányított folyamatok esetén – az előállított termék színét, további feldolgozhatóságát és a belőle képződő füst aromáját javítják. A dohány fermentációjával kapcsolatban leggyakrabban a polifenol-oxidáz (PPO) és a peroxidáz (POD) aktivitására terjednek ki a vizsgálatok. Ezen enzimek mellett a biokémiai változásokban, illetve a szín és aroma kialakításában szerepük van az amilázoknak, proteázoknak, illetve a fenilalanin-ammónia-liáznak (PAL) is.

A PAL a növény természetes védelmi rendszerének része, amely segítségével a dohány kedvezőtlen körülmények esetén fenolos komponenseket termel [Tso, 2006]. A PAL a fenilalaninból az ammónia eliminálásával fahéjsavat állít elő, amely a későbbiekben

benzaldehiddé, benzil-alkohollá és egyéb aroma-, illetve ízanyagokká alakul.

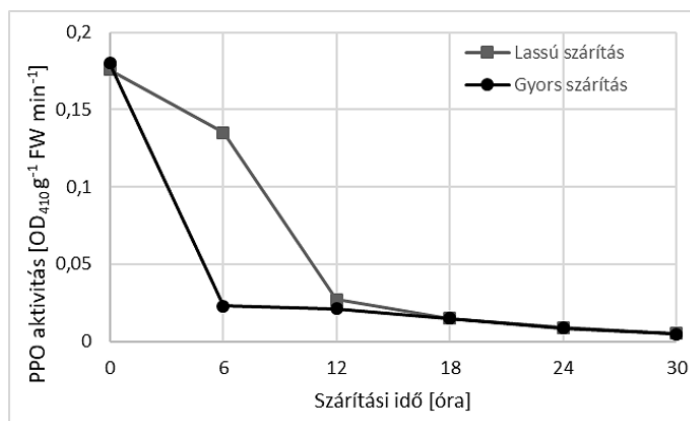
A PPO enzimek – melyek például a zöldségek és gyümölcsök esetében az enzimes barnulásért is felelősek – a kloroplasztiszban, membránokhoz kötve találhatók meg, és a polifenolos komponensek oxidálásával polimerizációra hajlamos kinonvegyületeket képeznek. A dohány esetében a jelenlétük a szín és egyéb minőségi paraméterek kialakítása szempontjából nagy jelentőségű [Szedljk, 2010].

A dohánylevelek sárgulása, illetve barnulása elsősorban a klorofill lebomlása, illetve a fenolos komponensek oxidációjának következménye. Zöld növényben a polifenolok szintézisében a PAL szerepe a meghatározó, míg a feldolgozás során a polifenol-lebomlásban a polifenol-oxidázoké. Több PPO enzim rendelkezik tirozinázaktivitással is [Sullivan, 2015]. A POD a hidrogén-peroxid bontásával megvédi a sejtmembránt, illetve gátolja a fenolos vegyületek oxidációja miatt kialakuló barnulási folyamatot.

A növényi szövetekben lévő nedvességtartalom csökkenésével az enzimek aktivitásában a következő változási tendenciák figyelhetők meg:

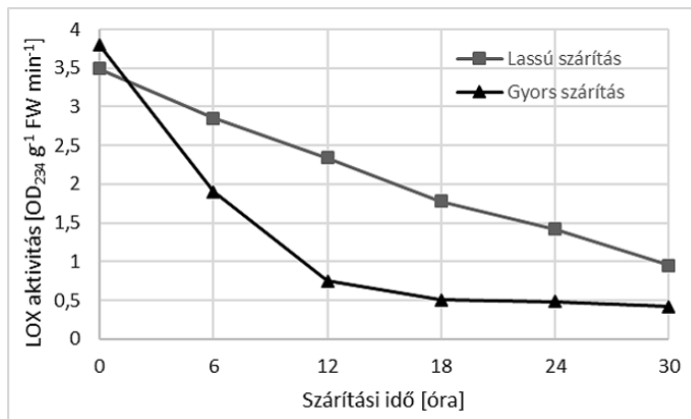
- a polifenol-oxidáz (PPO) aktivitás gyorsan gyengül, mesterséges szárításnál az első 3–7 nap alatt megszűnik;
- a peroxidáz (POD) aktivitás a szárítás első 1–2 napjában fokozódik, a zöld dohányéhoz képest akár megkétszereződik, ezt követően azonban folyamatosan csökken;
- a lipoxigenáz (LOX) aktivitás általában 24–36 óra alatt az eredeti 15–20%-ára esik vissza;
- a fenilalanin-ammonia-liáz (PAL) aktivitása az első 12–18 óra után növekedő tendenciát mutat.

A természetes szárítási eljárásoknál (lassú szárítás) a PPO-aktivitás az 1–2. napon lassabb ütemben csökken, mint a mesterséges (gyors) szárításnál, majd a szárítási időszak további részében folyamatosan csökken (6.1. ábra). A megfelelően irányított mesterséges szárítás végére a dohánylevelekben a PPO-aktivitás már nem mutatható ki, illetve a POD-aktivitás is alacsony.



6.1. ábra: PPO-enzim aktivitása gyors, ill. lassú szárítási folyamat alatt [Song, 2010]

A lipoxigenáz (LOX) aktivitása magasabb hőmérséklettartományban romlik, így a nedvességelvonási és fermentációs folyamatokban az alkalmazott eljárás típusa is befolyásolja a változásának ütemét (6.2. ábra).



6.2. ábra: LOX-enzim aktivitása gyors, ill. lassú szárítási folyamat alatt [Song, 2010]

A fenolos vegyületek szárítás során tapasztalható oxidációja, valamint az ezekből történő színanyag-képződés révén a fenolos vegyületek össz mennyisége kisebb lesz. A fermentációs szakaszban az oldható formában lévő fenolos vegyületek koncentrációja tovább redukálódik, annak ellenére, hogy a PPO-aktivitás a szárítási időszak végére kb. a 15%-ára esik vissza, további néhány hetes időszak után pedig már nem számottevő [Sheen, 1969]. Ezért a szárításhoz hasonlóan a fermentációs szakasz esetében is feltételezhető, hogy a fenolos vegyületek koncentrációjának csökkenésében elsősorban a légköri oxigén szerepe meghatározó.

A fermentációs szakaszban a karotinoid-bomlástermékek közül a legnagyobb mennyiségben jelenlévő két vegyület, a β -karotin, illetve a lutein koncentrációjának változása jól korrelál a lipoxigenáz (LOX) és a polifenol-oxidáz (PPO) aktivitásának változásával. Továbbá a fenilalanin-ammonia-liáz szárítási szakaszban tapasztalható aktivitásnövekedése elősegíti a karotinoidok lebontását is [Qiu, 2003]. A LOX a sejtmembránok lipidjeinek oxidálásával azok permeabilitását növeli, a malondialdehid (MDA) koncentrációja növekszik, és a PPO jelenlétében barnulási jelenség következik be. Mivel a lipoxigenáz magasabb hőmérsékleten nem stabil, és a színanyagok, zsírok és ketonok bontásával illat- és aromaanyag-típusú vegyületeket képez, a végtermék-dohány minősége szempontjából a fermentációs időszakban a hőmérséklet és a hőtartási időszakok hossza, továbbá a felmelegítési sebesség megválasztása egyaránt lényeges.

A levelek esetében a fermentáció alatt megjelenő minőségrontó hatású szürke foltok, illetve barnulás elsősorban a 46 °C feletti hőmérséklet-tartományban számottevő, ahol a sejtmembránok szelektív permeabilitása megváltozik. Amennyiben ezen kritikus hőmérséklet felett a nedvességtartalmat csak részlegesen vonják el, a PPO a polifenolos vegyületekből kinonokat képez, amelyekből a barna színért felelős komponensek jönnek létre.

A nemkívánatos színreakciók elkerülése céljából a színekialakítási és nedvességelvonási fázisban a 42–46 °C-os hőmérséklettartományban a felmelegítést kíméletesen célszerű

végezni. Az enzimés barnulási folyamatnak kitett levelekben az összes cukor-, valamint a redukálócukor-koncentráció csökken, míg az összes nitrogén-, fehérje- és nikotintartalom növekszik. A dohány alacsony cukortartalma csípős aromát okoz, míg a nagy cukortartalom a savas karaktert erősíti, üres ízt eredményez, és a termék fogyasztásakor több kátrányt képez.

A dohánylevelek érésével azok keményítőtartalma növekszik. A feldolgozás során a keményítő lebontása már a fonnyasztási szakaszban elkezdődik, amely a szárítási és fermentációs szakasz végéig tart. A dohányfeldolgozás során a keményítőtartalom az amilázok és az amilofoszforiláz hatására csökken, redukáló cukrok képződése mellett. A keményítő lebontásában szerepet játszó enzimek aktivitása a színelőállítás szakaszban és a tényleges száradási szakaszban mutat maximumot [Wang, 2006].

6.5. Jellemző mikroorganizmusok a dohányfeldolgozásban

A fermentációs folyamatot egyesek elsősorban a kémiai változások által meghatározottnak tartják, azonban a mikrobiológiai és enzimés folyamatok nagyban hozzájárulnak a szín és aroma kialakulásához [Jensen, 1950]. A mikroorganizmus-közösségek részt vesznek mind a szén ciklusokban, mind a nitrát-metabolizmusban, illetve a kitin mineralizációjában, a cellulóz és a xilán lebontásában, továbbá az aromakialakításban is.

Adohánylevél felszínén baktériumok, sugárgombák (*Kineosporia*, *Actinomyces*, *Mycobacterium*), illetve gombák (*Aspergillus*, *Trichoderma*) egyaránt megtalálhatók. A mikrobiomot maga a fermentáció, illetve annak időtartama egyaránt befolyásolja. A fermentált dohányleveleken az eredeti mikroflórában nem szereplő fajok (pl. *Mucor* és *Penicillium*) is előfordulhatnak [Qiu, 2003]. A fermentáció alatti kémiai változások és a nedvességtartalom visszaesése a folyamat végére az összcsíraszámot, valamint a fajok és törzsek sokféleségét csökkentik.

A mikrobiális közösség összetételét a dohányalapanyag nedvességtartalma és a fermentáció hőmérséklete is befolyásolja. A Toszkán típusú dohány esetében például a fermentáció kezdeti szakaszában, a még enyhén savas kémhatású és mezofil körülmények között működő *Debaryomyces*, *Lactobacillus*, *Aerococcus*, *Weissella* és *Staphylococcus* fajok jellemzőek. A néhány hetes fermentációs időszak végére a hőmérséklet eléri a 65 °C-ot. A proteolitikus enzimek aktivitása következtében jelentős mennyiségű ammónia szabadul fel, amely hozzájárul a klasszikus cigarettadohánytól eltérő, alkalikus aromájú füst kialakulásához. Az alkalikus körülmények kialakulásával és a hőmérséklet növekedésével a *Bacillus* fajok válnak meghatározóvá. A pH-nak a fermentációs folyamat közbeni további növekedése (pH > 8,5) már a halotoleráns és alkalofil *Corynebacteria* és *Yania* fajoknak kedvez. Azonban ezek a fermentációs körülmények már a dohány minőségét csökkentő, kockázatos komponensek képződését is lehetővé teszik, mint például a nitrózaminok vagy az oxálsav [Di Giacomo, 2007].

Mesterséges szárítás esetében az alapanyag elcukrosítását alapvetően a termofil mikroorganizmusok (főként *Bacillus* fajok) végzik. A *Bacillus* fajok elsősorban az aromakialakításban, illetve a füstképzési tulajdonságok javításában játszanak szerepet. A *Bacillus thuringiensis* jelenléte a tárolás alatt a kártevők visszaszorítását teszi lehetővé. A *Bacillusok* mellett a legnagyobb számban jelenlévő *Pseudomonas* fajok az aromakialakítás mellett a nikotin lebontásában is részt vesznek [Huang, 2010].

A dohány esetében az alkaloidok degradációjára is alkalmazhatnak mikroorganizmusokat. A dohánynövény által termelt alkaloidok közül a nikotin a legnagyobb mennyiségben jelen lévő komponens, továbbá kimutatható a nornikotin és az anabazin is. A nikotin koncentrációjának

csökkentése az élvezetikk-gyártás, illetve a dohány eredetű növényi hulladék komposztálása esetében is előnyös lehet. A nikotin lebontására képes ún. nikotinoofil mikroorganizmusok között megtalálható a *Bacterium nicotinovorum*, a *Bacillus nicotinobacter*, illetve az *Arthrobacter oxidans* és egyéb *Pseudomonas* fajok is. A nikotin metabolizmusa történhet nornikotinná alakítással vagy a nikotin demetilálásával is. Egyes fajok rendelkeznek specifikus nikotin-oxidáz, hidroxí-nikotin-oxidáz és keton-oxidáz enzimekkel is [Eberhardt, 1995].

Újabb vizsgálatok rámutattak, hogy a cigarettadohány tartalmaz patogén mikroorganizmusokat, mint például a *Clostridium*, a *Staphylococcus*, a *Legionella* és a *Serratia* nemzetségbe tartozó fajokat, amelyek kitehetik akár a teljes dohány-mikrobiom 7%-át is. Azonban a mikrobaközösség összetétele a dohány típusától, továbbá a szárítás és fermentáció módjától is függ [Zhou, 2019].

A dohányipari hulladékok és melléktermékek, illetve a dohánynövény szára biológiai lebontáson alapuló hasznosítását (például komposztálás, enzimes hidrolízisen és fermentáción alapuló bioetanol-előállítás) a nagy lignintartalom megnehezíti. A *Moniliales* és *Aspergillus* fajok ideális körülmények között elméletileg képesek a lignocellulóz lebontására, azonban a magas ligninarány, illetve például a nikotin jelenléte korlátozza a gyakorlati alkalmazhatóságukat és csökkenti a hatékonyságukat. Ígéretes megoldás lehet bizonyos fehérkorhasztó gombafajok alkalmazása, amelyek lignin peroxidáz, celluláz, endo- és exoglukanáz, manganáz-peroxidáz és lakkáz enzimeik révén a dohány-biomassza hatékony bontására képesek [Su, 2016].

Irodalomjegyzék

- Chen Y., Ren K., He X., Liu J., Yao G., Xiong K. és Jin Y. (2019): Dynamic changes in physiological and biochemical properties of flue-cured tobacco of different leaf ages during flue-curing and their effects on yield and quality. *BMC Plant Biology*, 19, e555.
- Chen Y., Zhou J., Ren K., Zou C., Liu J., Yao G., He J., Zhao G., Huang X., Hu B., Chen Y., Xiong K. és Jin Y. (2019): Effects of enzymatic browning reaction on the usability of tobacco leaves and identification of components of reaction products. *Scientific Reports*, 9.
- De Jong D. W. (1972): Detergent extraction of enzymes from tobacco leaves varying in maturity. *Plant Physiology*, 50, pp. 733–737.
- Eberhardt H.-J. (1959): The biological degradation of nicotine by nicotinophilic microorganisms. *Beiträge zur Tabakforschung International / Contributions to Tobacco Research*, 16, pp. 119–129.
- Feng Z., Shi Quan S., Fu Shan F., Jie R. és Tou Jie X. (2013): Curing characteristics and suitable harvest maturity of fresh flue-cured tobacco leaves in Ankang tobacco growing areas. *Journal of Hunan Agricultural University*, 39(2), pp. 145–149.
- Frankenburg W. (1946): Chemical changes in the harvested tobacco leaf. Chemical and enzymic conversions during curing process. *Advances in Enzymology and Related Areas of Molecular Biology*, 6, pp. 309–387.
- Giacomo M., Paolino M., Silvestro D., Vigliotta G., Imperi F., Visca P., Alifano P. és Parente D. (2007): Microbial community structure and dynamics of dark fire-cured tobacco fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*, 73, pp. 825–837.
- Huang J., Yang J., Duan Y., Gu W., Gong X., Zhe W., Su C. és Zhang K. Q. (2010): Bacterial diversities on unaged and aging flue-cured tobacco leaves estimated by 16S rRNA sequence analysis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 88, pp. 553–562.
- Jensen C. O. és Parmele H. B. (1950): Fermentation of cigar-type tobacco. *Industrial and Engineering Chemistry*, 42(3), pp. 519–522.
- Kaburaki Y. és Sato Y. (1962): Gas chromatographic analysis of volatile organic acids in tobacco leaves. *Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan*, 36, pp. 865–869.
- Leffingwell J. (1999): Leaf chemistry – basic chemical constituents of tobacco leaf and differences among tobacco types. In: Davis D. L. és Nielsen M. T. (szerk.): *Tobacco: Production, Chemistry, and Technology*. Blackwell Publishing, Oxford, pp. 265–284.
- Peele D. M., Danehower D. A. és Goins G. D. (1995): Chemical and biochemical changes during flue-curing. *Recent Advances in Tobacco Science*, 21, pp. 82–133.
- Pusztai P. (2003): *Szántóföldi növénytermesztés*. Szaktudás Kiadó Ház Rt., Budapest, 259 p.
- Qiu L., Zhao M., Li F., Qi W., Zhang W., Yue X. és Cui J. (2003): Changes in biological activity during artificial fermentation of flue-cured tobacco. *Tobacco Science*, 46, pp. 24–27.
- Radoczné K. T., Kürthy Gy., Pesti Cs. és Bukai A. (2008): *A dohánypiac helyzete és a dohánytermelés lehetséges jövője Magyarországon és az Európai Unióban a KAP reform tükrében*. Agrárgazdasági Tanulmányok, 2008/3. Agrárgazdasági Kutató Intézet, Budapest, 142 p.
- Sheen S. J. és Calvert J. (1969): Studies on polyphenol content, activities and isozymes of polyphenol oxidase and peroxidase during air-curing in three tobacco types. *Plant Physiology*, 44, pp. 199–204.

- Siva Raju K., Damodar Reddy D. és Murthy T. G. K. (2015): Effect of genotype and leaf position on pigments and their degradation derivatives in burley tobacco. *Tobacco Research*, 42(2), pp. 66–71.
- Song Z., Li T. S., Zhang Y. G., Cao H. J., Gong C. R. és Zhang W. J. (2010): The mechanism of carotenoid degradation in flue-cured tobacco and changes in the related enzyme activities at the leaf-drying stage during the bulk curing process. *Agricultural Sciences in China*, 9, pp. 1381–1388.
- Su Y., Xian H., Shi S., Zhang C., Manik S. M. N., Mao J., Zhang G., Liao W., Wang Q. és Liu H. (2016): Biodegradation of lignin and nicotine with white rot fungi for the delignification and detoxification of tobacco stalk. *BMC Biotechnology*, 16, 81.
- Sullivan M. L. (2015): Beyond brown: polyphenol oxidases as enzymes of plant specialized metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 5, Article 783.
- Sun J. G., He J. W., Wu F. G., Tu S. X., Yan T., Si H. és Xie H. (2011): Comparative analysis on chemical components and sensory quality of aging flue-cured tobacco from four main tobacco areas of China. *Agricultural Sciences in China*, 10(8), pp. 1222–1231.
- Szedljak I., Köhegyi K. Sz. és Kosáry J. (2010): Biochemical studies on curing and fermentation processing periods of different tobacco plant (*Nicotiana tabacum* L.) cultivars. *Beiträge zur Tabakforschung International / Contributions to Tobacco Research*, 24, pp. 24–28.
- Tso T. C. (2006): Tobacco research and its relevance to science, medicine and industry. *Beiträge zur Tabakforschung International / Contributions to Tobacco Research*, 22, pp. 133–146.
- Yang Y., Peng Q., Ou M., Wu Y. és Fang J. (2018): Research progress in tobacco fermentation. *Journal of Biosciences and Medicines*, 6, pp. 105–114.
- Villemur R., Lacasse M. és Morin A. (2009): Monitoring the bacterial and fungal biota of eleven tobacco grades stored at three different locations. *Beiträge zur Tabakforschung International / Contributions to Tobacco Research*, 23(6), pp. 368–376.
- Wang H. Z., Yuan H. W. és Gu H. Y. (2006): Effects of temperature and humidity on starch degradation and related enzyme activities of flue-cured tobacco during flue-curing process. *Acta Agronomica Sinica*, 32, pp. 313–316.
- Zhou J., Yu L., Zhang J., Zhang X., Xue Y., Liu J. és Zou X. (2019): Characterization of the core microbiome in tobacco leaves during aging. *MicrobiologyOpen*, e984.

7. Söripar és borászat

*Nguyen Duc Quang, Csernus Olivia, Farkas Csilla,
Bujna Erika, Rezessyné Szabó Judit, Hoschke Ágoston⁷*

A sör és a bor előállítása talán az emberiség egyik legrégebbi mestersége. Egyes források szerint [Levin, 2006; Gomaa, 2018] az ősi egyiptomiak 6000–8000 évvel ezelőtt már készítettek sört és bort spontán fermentációval. Azóta ezen szeszes italok nagyon fontos szerepet játszanak az életünkben. Mindkét élelmiszernek közös pontja, hogy az előállításuknál az élesztő anyagcsere tevékenységét használják ki a cukor alkoholos erjesztésére. Amíg a bor esetén szőlő az alapanyag, addig a sörnél gabona, elsősorban árpa. Ez lényeges különbséget eredményez a kétfajta ital előállításában, hiszen amíg a boroknál a szőlőbogyóban levő cukrok közvetlenül erjeszthetők, addig az árpában lévő keményítő csak a lebontást követően.

Jelenleg a söripar az egyik legnagyobb élelmiszeripari ágazat a világon. A Statista [www.statista.com] becslése szerint 2018-ban világszerte 2 milliárd hektoliter sört állítottak elő. A legnagyobb termelő országok: Kína, az Egyesült Államok és Brazília. A bor termelési volumene jelentősen elmarad a söripar méretétől, világszerte kb. 293 millió hektoliter az előállított mennyiség. A három legnagyobb bortermelő ország Olaszország, Franciaország és Spanyolország [www.statista.com].

A modern élelmiszergyártásban a biotechnológia fejlődésével az enzimek/biokatalizátorok alkalmazása nélkülözhetetlen a technológiai előnyei miatt. Ebben a fejezetben a sörkészítésben és a borászatban alkalmazott enzimes technológiákra fókuszálunk.

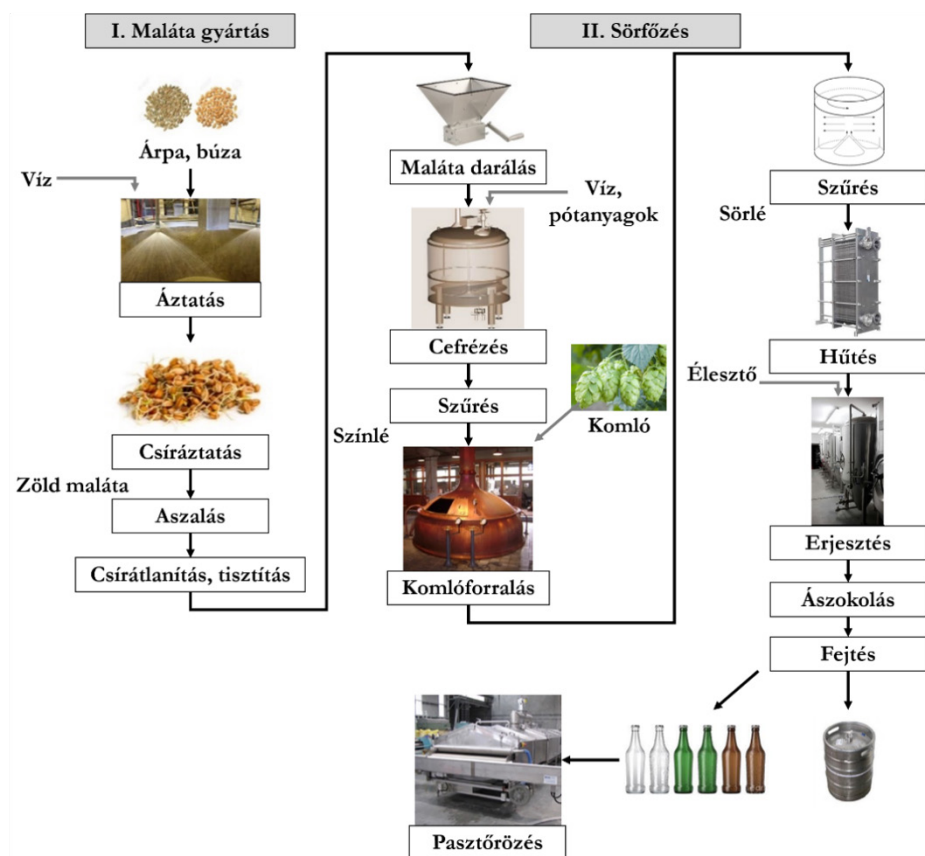
7.1. Sör

A sörkészítési folyamat (7.1. ábra) fő lépései: malátázás, cefrézés, cefreszűrés, komlózás, erjesztés, ászokolás, fejtés, pasztörözés, palackozás/csomagolás.

A malátázás klasszikusan a gabona csíráztatása, amelynek során különböző enzimek aktiválódnak és szintetizálódnak, miközben különböző kémiai és biológiai átalakulások játszódnak le. A sörgyártás során a malátázás fő célja az α -amiláz-képződés aktiválása, a fontos lebontó enzimek (α -amiláz, β -amiláz, β -glükánáz, proteáz, fitáz stb.) aktivitásának növelése és a lebontó folyamatok megindítása. Az α -amiláz és a β -amiláz részben a keményítőt fogja lebontani erjeszthető cukrokká, amelyeket a sörélesztők (*Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces carlsbergensis*) alakítanak át etanollá.

A malátázás nagyon egyszerű folyamat, amely az áztatással kezdődik. A friss, egészséges és megtisztított gabonaszemeket beáztatják az áztatókádban 12–18 °C-on 1–2 napig, amely idő alatt az árpaszem nedvességtartalma eléri a 42–45%-ot. Mivel az árpaszemek már 39–40% nedvességtartalomnál kezdenek csírázni, így enyhe levegőztetést is alkalmaznak az áztatás során. A csíráztatás klasszikus biológiai folyamat, amelyben a megfelelő nedvesség mellett a gibberellinsav (egyfajta növényi növekedési hormon) meggyorsítja a növekedést és az enzimszintézist. Az ipari malátázásnál exogén gibberellinsavat is alkalmazhatnak a megfelelő és egyenletes minőség elérésére.

⁷ Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem,
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet,
Biomérnöki és Erjedézipari Tanszék
1118 Budapest, Ménesi út 45.
nguyen.duc.quang@uni-mate.hu



7.1. ábra: A sörgyártás műveleti folyamata

A csíráztatás általában 15–20 °C-on aktív levegőztetéssel történik, 4–6 napot vesz igénybe, ezalatt a gabonaszemekben levő enzimek feltárlják a keményítőt. A csíráztatás közben a malátarakást többször át kell forgatni, hogy minden egyes gabonaszem kellő mennyiségű levegőt, hőt és nedvességet kapjon. Ezt követi a malátaaszalás (tulajdonképpen szárítás), amely leállítja a csírázást és elősegíti az aroma- és színanyagok képzését. A malátaaszalást 60–110 °C-on végzik 4–6% nedvességtartalomig, amely kb. 1 napot vesz igénybe. A malátázás után a maláta őrlésével, majd a cefrézéssel folytatódik a sörgyártás. A malátaőrlés egyszerű fizikai eljárás, amely malom vagy daráló segítségével kivitelezhető.

A cefrézés már bonyolultabb lebontó biokémiai (enzimes) folyamatokból áll, amely meghatározza a sör minőségét. Az eljárás célja a megfelelő és kedvező összetételű cefre előállítása az élesztők számára. A megfelelő mennyiségű őrlött malátát bemérik a cefrézőüstbe, majd a receptben meghatározott mennyiségű (részben forró) vizet engednek hozzá, és összekeverik. A söriparban általában kétféle cefrézési eljárást alkalmaznak: infúziós és dekokciós cefrézést.

Az infúziós eljárásnál csak egy üstöt használnak, és különböző hőmérsékletű pihenőszakaszokat tartanak. Az első pihenőszakasz (fehérjebontó szakasz) általában 45–55 °C,

ahol a proteázok a legaktívabbak. Ezen enzimek a fehérjéket rövidebb láncú oligopeptidekre és aminosavakra bontják. Szintén e hőmérséklet-tartományban aktívak a β -glükánázok, amelyek a malátában található β -glükánokat bontják le. Amíg a fehérjék fontos szerepet játszanak a sörhab képzésében, addig a β -glükán problémát okozhat a színsörle szűrhetőségében. A második szakasz (60–65°C, β -amiláz hőmérsékleti optima) a cukrosítás, amelyben a β -amiláz hatása elsődleges. A folyamat átlagosan 1 órát vesz igénybe. A β -amiláz a keményítő nem redukáló végéről indulva maltózegységeket hasít le, amelyek már erjeszthetők az élesztő által. Minél nagyobb a cefre maltóztartalma, annál nagyobb alkoholtartalmú sör állítható elő. A harmadik enzimes szakasz a folyósítás, amelyben az α -amiláz a keményítőmolekulákat rövidebb malto-oligoszacharidokra és határdextrinekre bontja. Ezek nem erjeszthető cukrok, de fontos szerepet játszanak az ízek kialakításában és a habtartósság biztosításában. Az infúziós cefrézés utolsó szakaszában a cefre hőmérsékletét 78–80 °C-ra emelik, a keményítő teljes mértékű csirizedése és a színle szűrésének elősegítése céljából.

A dekokációs eljárásnál két különböző cefrézőedényt (cefrézőkád és forralóüst) használnak, és a fenti enzimes pihenőszakaszok céljainak megfelelően hagyományosan háromcefrés eljárást alkalmaznak. A maláta bekeverése után a kádból a cefre 1/3 sűrűbb részét átvezetik a forralóüstbe, és lassú hőmérséklet-emeléssel (kb. 1 °C/perc) forrásig melegítik. A cefre 2/3-a pedig a kádban ázik (savas pihenő). A forralóüstben 68 °C-on tartanak egy cukrosítási pihentetőt (kb. 10–15 perc). Ennek az oka, hogy így tudják kihasználni a sűrű cefrében lévő enzimek (proteáz, α -amiláz, β -amiláz, β -glükánáz stb.) aktivitását a fehérjék, a keményítő és a β -glükánok bontására. A cefreforralás világos söröknél 10–20 perc, barna söröknél 30–45 perc. Ezt követően a forró cefrét lassan, keverés mellett visszavezetik a cefrézőkádba. A főzés hatására a keményítőtartalmú sejtek felszakadnak, a keményítő elcsirizedik, és az enzimek számára könnyen lebonthatóvá válik. A forralt cefre és a kádban lévő mennyiség egyesítése után kb. 50–55 °C-os lesz a cefre hőmérséklete, amely a fehérjepihenő szakasz hőmérsékletének felel meg. A feltárt részecskék, kioldott fehérje- vagy keményítőszemcsék miatt az enzimek általában jobban dolgoznak, mint az infúziós eljárásnál.

Kb. 15 perc után újra átvezetik a cefre (főleg a sűrű részének) 1/3-át a forralóüstbe, és a fent említett módon melegítik forralásig. Ebben az esetben is tartanak cukrosítási pihentetőt 68 °C-on kb. 15 percig. A forralás után a sűrűcefrét visszaszivattyúzzák a cefrézőkádba, vigyázva, hogy ne kapjanak hősokkot a cefrében lévő enzimek. Az egyesített teljes cefre hőmérséklete 62–67 °C, ami a cukrosítás tartománya. A cukrosítási és lebontó folyamatok ebben az esetben is jobban és gyorsabban mennek végbe, hiszen a malátafrakciók jobban feltárodnak.

A harmadik cefrézési ciklusnál (harmadik forralás) szintén a cefre 1/3-át vezetik át a forralóüstbe, de itt már nem a sűrű, hanem a híg és oldott anyagban dús részt. Továbbá a harmadik forralásnál a magas hőmérséklet miatt már nem kell cukrosítási pihenőt tartani. A visszakeveréssel a cefre hőmérséklete eléri a 76–78 °C-ot, amely hatására a maradék keményítő is elcsirizedik. A kétcefrés eljárásnál kihagyják az első ciklust oly módon, hogy 50 °C-on történik a becefrzés (bekeverés), és 10 percig tart a fehérje- és β -glükán-pihenőszakasz. A többi rész hasonló módon történik. A gyakorlatban még vegyes cefrézési eljárást is alkalmaznak, amelyben igyekeznek kombinálni és kihasználni mindkét alapeljárás előnyeit. A cefrét ezt követően leszűrik, és az édescefrét összegyűjtik.

A sörgyártásban a maláta magas ára miatt gyakran alkalmaznak pótanyagokat, amelyek segítségével csökkenthető a maláta mennyisége, növelhető a cefre extraktartalma stb. Ilyen pótanyag lehet a kukorica, az árpa, a rizs, a rozs, a búza, a burgonya, az izocukor stb.

A pótanyagok az eltérő tulajdonságaik miatt módosított cefrézési eljárást vagy exogén enzimek (pl. α -amiláz, glükóamiláz, β -amiláz stb.) alkalmazását igénylik. A gyakorlatban mikrobaeredetű „brew-enzymes” ipari enzimkomplexet alkalmaznak a gabonaeredetű pótanyag kiegészítése esetén. A „brew-enzymes” legalább három enzimet tartalmaz: bakteriális α -amiláz, semleges proteáz és β -glükánáz, amelyek segítségével elérhető a megfelelő extrakttartalom, aminosav- és oldható nitrogéntartalom, valamint a cefre szűrési sebességének növelése.

A sörfőzés következő művelete a komlózás, illetve komlóforralás, amelyben tulajdonképpen a komlóban lévő anyagokat (keserű ízű alfasavak, valamint illat- és aromaanyagokért felelős illóolajok) forralással oldják be az édescefrébe. A sör keserősége főleg a használt komló alfasav-tartalmától, mennyiségétől és a forralás idejétől függ, ami hatással van a sör aromájára és színére is. A sörgyártásban a komlóforralás még további változásokat idéz elő, pl. sterilizálás, fehérjekicsapás, illóanyagok eltávolítása, a cefre sűrítése, enzimaktiválás stb.

A komlózott cefrét szűrést és hűtést követően sörélesztővel erjesztik (erjesztési művelet), melynek során az élesztősejtek a cefrében lévő erjeszthető cukrokat (maltóz, szacharóz és glükóz) konvertálják etanollá anaerob körülmények között. Mivel ez exoterm folyamat, így jelentős mennyiségű hő szabadul fel, amely melegíti a cefrét, ezáltal lelassítja, és túl magas hőmérséklet esetén blokkolja az erjedést. Emiatt a sörgyártásban gondoskodni kell a hő elvezetéséről (hűtési rendszer kialakítása). Régen, amikor még nem léteztek megfelelő hűtési rendszerek, főleg télen tudtak sört gyártani.

A söröket az erjesztési eljárás alapján csoportosítják:

- spontán erjesztésű sörök (gyakorlatilag csak Belgiumban);
- felső erjesztésű sörök (Ale típusú, az erjesztés során az élesztő a sörle tetején lebeg);
- alsó erjesztésű sörök (Lager típusú, az erjesztés során az élesztő az erjesztőkád alján gyűlik össze).

A főerjesztés általában az ale söröknél 18–22 °C-on, a lagereknél pedig 9–15 °C-on történik 4–7 napon át, az élesztő- és sörfajtától függően. E művelet eredménye a „fickósör”, ami még fogyaszthatatlan, ezért utóerjesztésre vagy másodlagos erjesztésre (ászokolás) van szükség. Az ászokolás során az íz- és aromaanyagok képzése mellett az egyik fontos feladata az élesztősejteknek a diacetil bontása, amely az erjedés során keletkezik kémiai úton az α -acetolaktáttól oxidatív dekarboxilezéssel. A diacetil kellemetlen ízű komponens, amely már 0,5 ppm-es koncentrációban is érzékelhető, így eltávolítása feltétlenül szükséges. Az ászokolás során emellett íz- és aromaanyagok képződnek, megfelelő mennyiségű szén-dioxid keletkezik, és kialakul a letisztult készsör. A hideg komlózást is ilyenkor szokták elvégezni. A gyakorlatban a folyamatot alacsony hőmérsékleten (közel 0 °C-on) végzik néhány hétig, de akár hónapokig. Az ászokolás után gyakorlatilag kész a sör, amelyet a fejtés, palackozás és pasztörözés követ.

Ahogy a modern élelmiszergyártás, a söripar is széleskörűen alkalmaz különböző enzimeket a termelés hatékonyabbá tételében, a megfelelő érzékszervi tulajdonság elérésében, az adott technológiai lépés/művelet kivitelezésében, különleges vagy extraminőségű termék előállításában stb. Mivel a malátázás során keletkező enzimkészlet nem mindig elegendő a megfelelő minőségű sör előállításához, ezért enzimkiegészítést is szoktak alkalmazni a söriparban (α -amiláz, β -amiláz, pullulanáz, proteázok, hemicellulázok és β -glükánáz).

Amilázok

Mind az α -amiláz, mind a β -amiláz meghatározó szerepet játszik a sörgyártásban, hiszen segítségükkel a keményítő lebontható kisebb molekulájú termékekre, pl. határdextrinekre, oligoszacharidokra, maltózra és glükózra, amelyeket azután a csíra vagy a sörélesztő felhasznál. A malátázás során, amikor indul az élet (csírázás), akkor a csírának szüksége van tápanyagokra, így aktiválja a keményítőtörő enzimeket kódoló géneket, és elkezdődik az enzimek, köztük az α -amiláz és a β -amiláz szintézise.

Az α -amiláz 40–45 kDa molekulatömegű enzim, a sörgyártásban a keményítő folyósításához alkalmazzák [Nguyen, 2007]. A malátaeredetű α -amilázok pH- és hőmérsékleti optimuma pH 5,0–5,5, valamint 50–85 °C között található. Természetesen alacsonyabb hőmérsékleten is működik, de kisebb aktivitással. Az aktív konformáció formálásához minden egyes fehérjemolekulának legalább egy kalciumionra (Ca^{2+}) van szüksége. Továbbá kalciumkofaktor jelenlétében sokkal jobban tűri a hőhatást. Az árpa eredetű α -amiláz elég jó hőtűrő képességgel rendelkezik, a cefrézés során és még a komlóforralás első szakaszában is aktív. A jó minőségű malátában előforduló α -amiláz elegendő a benne lévő keményítő folyósításához. Az exogén α -amilázra (főleg a termofil baktériumeredetűekre) csak akkor van szükség, ha nem jól vezeték a cefrézési folyamatot, pótanyagokat alkalmaztak, vagy speciális söroket állítanak elő.

A β -amiláz kb. 58 kDa molekulatömegű hidroláz, melyet a cukrosítás során alkalmaznak. Aktivitása jelentősen függ a nem redukáló végek számától. A malátaeredetű β -amiláz pH 5,5–6,0 és 40–70 °C tartományban mutat maximális aktivitást. A β -amiláz általában hőérzékenyebb az α -amiláznál, emiatt a cukrosítási folyamat is alacsonyabb hőmérsékleten zajlik, és több időt vesz igénybe. A β -amiláz hőtűrő képessége rekombináns géntechnológiával javítható.

Az exogén α -amilázokat (*B. licheniformis*, *B. subtilis*) és β -amilázokat (*B. licheniformis*) a cefrézésben alkalmazzák a keményítő folyósítására (szűrés/derítés elősegítésére) és a cefre extrakttartalmának (alkoholtartalmának) növelésére (7.1. táblázat).

Az amilázok működésének szabályozása/kézben tartása kulcsfontosságú a kívánt minőségű sör előállításánál, mivel az aktuális alkoholtartalom nagyban függ az erjeszthető cukortartalomtól. A nagyobb erjeszthető cukortartalmú (szénhidrátban gazdag pótanyag hozzáadása) cefréből magasabb alkoholtartalmú sör állítható elő. Az alacsony alkoholtartalmú sörök gyártásánál csökkenteni kell a β -amiláz működését. Az utóbbi időben jelentősen megnövekedett az igény a kis kalóriatartalmú sörök (*low-calorie beers*) vagy light sörök iránt világszerte, de főleg az Amerikai Egyesült Államokban. E típusú söroket úgy állítják elő, hogy a cefrézésben és az erjesztésben is alkalmaznak exogén glükóamilázt és pullulanázt a keményítő cukrosításának elősegítésére, ezáltal csökkentik a sör extrakttartalmát. Az ászokolás után kondicionált vízzel hígítják vissza a sört, és így módon alacsony alkohol- és extrakttartalmú végterméket kapnak.

Proteázok

A malátában több mint 40 fajta proteáz enzim található. Az endopeptidázok hatására a fehérjék oldhatósága növekszik, ami a sörgyártásban fontos, mert a fehérjék szabályozzák a habképzést és a habtartósságot, valamint csökkentik a sörlé viszkozitását (szűrés/derítés). A karboxipeptidázok a peptidlánc végéről indulva hasítanak le aminosavakat, amelyek fontosak a csíra és az élesztősejtek számára, hiszen a növekedésükhöz és élettévesenységükhöz

szükséges fehérjék/enzimek vagy különböző biokémiai komponensek szintézisében nélkülözhetetlenek.

A malátaeredetű proteázok hőmérsékleti optimuma 50–52 °C. A sörcefrézési eljárásokban általában ez a hőmérséklet-tartomány a proteázpihenő-szakasz. A proteázok kb. 70–75 °C-on már inaktíválódnak. A technológiákban savas közeget (pH 5,0–6,0) javasolnak, de viszonylag széles pH-tartományban képesek működni (akár pH 10-nél is).

7.1. táblázat: Söripari enzimek / biokatalizátorok

Enzim	Műveleti hatás	Forrás	Folyamat és alkalmazási pont
α -amiláz	Folyósítás Derítés, szűrés elősegítése Cefrézési hiba javítása	Endogén enzim (maláta), <i>B. licheniformis</i> , <i>B. subtilis</i> ,	Malátázás, cefrézés (gabonafeltárás, dekokciós rendszer, cefrézőkád, cefreszűrő)
β -amiláz	Keményítő folyósítása Cukrosítás fokozása, Erjesztés elősegítése	Endogén enzim (maláta, árpa), <i>B. licheniformis</i>	Malátázás, cefrézés
gomba α -amiláz	Erjesztési hatékonyság növelése	<i>Aspergillus</i> sp.	Erjesztés (erjesztőtartály, cefreszűrő)
β -glükánáz	Viszkozitás csökkentése, Derítés, szűrés elősegítése	<i>Trichoderma</i> sp. <i>Orpinomyces</i> sp.	Malátázás, cefrézés, erjesztés (cefrező, erjesztő)
proteáz	Erjesztés elősegítése Sör tárolhatóságának növelése	<i>Aspergillus</i> sp.	Malátázás, cefrézés, tárolás (cefrező)
α -acetolaktát- dekarboxiláz (ALDC)	Ászokolási idő rövidítése	<i>Bacillus subtilis</i> rekombináns fehérje	Másodlagos erjesztés (ászokolótartály)
glükoamiláz	Erjeszthető cukor növelése	<i>Aspergillus niger</i>	Cefrézés, erjesztés (cefrező, erjesztő)

A cefrézés során a proteázok segítségével lebonthatók a sejtalfehérjék, hatékonyabbá téve a keményítő felszabadítását. A sörben lévő glutén eltávolítására exogén proteázt használnak [Kabashima, 1998]. A papain eredetű prolil-endoropeptidázt szintén alkalmazzák olyan sör előállítására, amelyet a cöliákiában szenvedők is fogyaszthatnak (allergén fehérjék eltávolítása). A proteáz túladagolására vigyázni kell, mert jelentősen befolyásolja a sör minőségét és a hab stabilitását.

Glükánáz

A β -glükánáz az egyik legfontosabb enzimszoport a söriparban, speciálisan a malátázásban és a cefrézésben. Az árpaszem héjában nagy mennyiségben található cellulóz és hemicellulóz, amelyek stabil szerkezetet és védelmet biztosítanak a magvak számára. A malátázásnál és a cefrézésnél a β -glükánok technológiai akadályt jelentenek a keményítő kiszabadításában és a cefreszűrésben. A β -glükánáz- és xilánáz-enzimek lebontják a glükánokat, illetve a xilántípusú

polimereket, ezáltal csökkentik a sörcéfre viszkozitását, és támogatják a proteázok aktivitását a csírázás folyamán. Az endogén β -glükánázok pH- és hőmérsékleti optimuma pH 6,0 és 45–50 °C között található. A cefrézésnél, ha a hőmérséklet nagyobb 60 °C-nál, inaktiválódnak és denaturálódnak, ezért a proteáz-pihenőszakaszban szokták alkalmazni. A malátázás során szintetizálódnak, de exogén (*Trichoderma-eredetű*) β -glükánázokat is használnak a light sör előállítására, cefreszűrés elősegítésére, vagy az ászokolásnál a protoglükánok hidrolízisére [Bamforth, 2017].

Egyéb enzimek

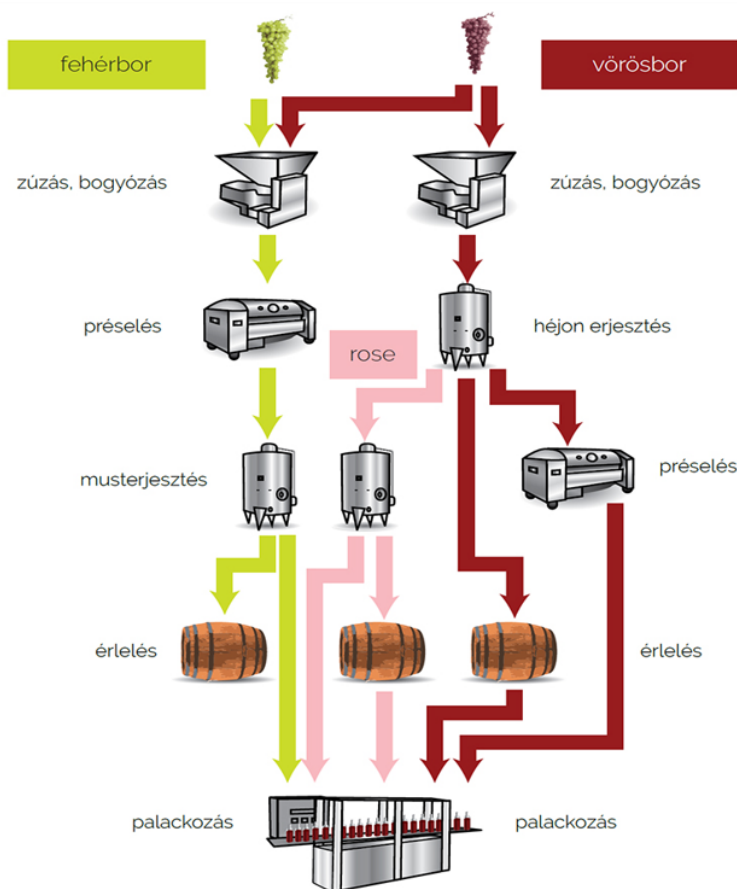
A sörkészítésben az egyik időigényes folyamat (néhány hónap) az ászokolás, ahol másodlagos erjesztés zajlik. Az ászokolás során az élesztősejtek lebontják a kellemetlen ízű diacetilt, amely az erjedés során keletkezik az α -acetolaktátból. A diacetil képződése ugyanakkor megelőzhető α -acetolaktát-dekarboxiláz enzim alkalmazásával, mely az α -acetolaktátot 2,3-butándiollá alakítja. A sörgyártásban az ászokolás idejének csökkentésére a Maturex (Novozymes) enzimméztményt alkalmazzák, amely tartalmazza az α -acetolaktát dekarboxilázt. Az enzim pH- és hőmérsékleti optimuma pH 5–7 és 25–40 °C közötti tartományban található. Az ajánlott dózis a fermentáció elején 1–5 g/hl cefre, a fermentáció végén pedig 0,4–1 g/hl.

7.2. Borászat

Magyarországon a szőlő- és borgazdaság még mindig meghatározó szerepet játszik a mezőgazdaságban. A Központi Statisztikai Hivatal [www.ksh.hu] adatai szerint hazánk szőlőtermesztése kb. 70 ezer hektáron történik, és 2017-ben kb. a mezőgazdaság bruttó kibocsátásának 6–7%-át adta. A Hegyközségek Nemzeti Tanácsának [www.hnt.hu] adatai szerint Magyarországon 392 ezer tonna borszőlőt szüreteltek 22 borvidéken 2018-ban, ebből 3,75 millió hektoliter bor készült.

A szőlő betakarításakor az egész fürtöket szedik le, így a bor készítése a bogyózással (szőlőbogyók leválasztása a fűtről) kezdődik, hiszen anélkül a fűtkocsányban található csersav rontja a must minőségét (7.2. ábra). Ezután a szőlőbogyókat zúzzák. A bogyózó zúzó cefreszivattyú egybeépítve szolgálja a szőlőfeltárás és a cefreszállítás összehangolt feladatait.

A fehérboroknál a sajtolással, míg a vörös- vagy rozéboroknál a héjon erjesztéssel folytatódik a borkészítési művelet. A fehérboroknál az erjesztés előtt végzik a préselést, a vörösboroknál pedig utána. A préselés eredményeként folyadékfázisú mustot vagy bort, valamint szilárd fázisú törkölyt kapnak. Azután a bor fahordóba kerül, ahol az érlelés zajlik. Az érlelést pincékben végzik hideg körülmények között. A bor minősége jelentősen függ az érlelési időtől, hiszen ez idő alatt számos biokémiai folyamat történik, íz-, valamint illatkomponensek tűnnek el, alakulnak át vagy éppen szintetizálódnak.



7.2. ábra: A borkészítés sémája [boraszatportal.hu]

A modern borászatban már széles körben alkalmazzák az ipari enzimekésztményeket [Herald, 2018], hiszen számos technológiai előnnyel járnak, pl. musthozam növelése, szín- és aromaanyagok kioldása, szűrés elősegítése, macerálási idő rövidítése stb. (7.2. táblázat).

Pektináz

A szőlőbogyó héjában a cellulóz szálak összekapcsolódnak a hemicellulóz szálakkal és a pektinnel, hálószerkezetet kialakítva, amelyet fehérjék stabilizálnak. Egyes szőlőfajták nagy pektintartalma – a pektin vízviszatarító képessége miatt – akadályozza a sajtolhatóságot, ezért ilyenkor ajánlatos a cefre pektinbontó enzimes kezelése. A must enzimes kezelése a könnyen sajtolható fajták esetében is ajánlatos, mert csökken a must viszkozitása és gyorsul a spontán tisztulás. Fehér fajták feldolgozásához olyan enzimekésztmény is választható, amely a pektinbontáson kívül β -glükózidáz-aktivitással is rendelkezik. Készülők feldolgozásához maceráz enzimeket használhatunk, melyek a pektinázaktivitáson kívül celluláz-/hemicelluláz-aktivitással is rendelkeznek, így erőteljes szín- és tanninextrakciót valósítanak meg.

7.2. táblázat: A borkészítés során alkalmazott enzimek és hatásai

Alkalmazás	Enzimbérlítmény	Eredet	Hatás
cefkezelés, mustülepítés	pektinészteráz PE pektinliáz PL poligalakturonáz PG	<i>Aspergillus niger</i>	csökkenti a cefre viszkozitását, növeli a színlékihozatal, alacsonyabb présnyomáson, rövidebb préselési idővel lehet dolgozni
héjon áztatás	β -glükózidáz	<i>Aspergillus niger</i>	növeli a borok aromaintenzitását
héjon erjesztés	pektináz másodlagos aktivitásokkal (celluláz, hemicelluláz)	<i>Aspergillus niger</i>	javitja a préselhetőséget, növeli a színanyagok mennyiségét, stabilitását

A kereskedelembe kapható pektináz enzimkészítmények tulajdonképpen enzimkomplexek (7.3. táblázat), amelyek különböző aktivitással rendelkeznek:

- poligalakturonáz (endo- és exo-)
- pektinliáz
- pektinészteráz
- acetilészteráz

β -Glükózidáz

A borászatban a β -glükózidáz használata igen előnyös az aromaprofil javítása szempontjából. A borokban az aromaanyagok túlnyomó többsége alkoholos hidroxilcsoportot tartalmaz, de nagyrészt nem illékony formában, hanem β -glükozidos kötésben. A β -glükózidáz hidrolitikus aktivitása az aromaanyagok felszabadítása szempontjából döntő jelentőségű. A borok saját β -glükózidáz-aktivitása azonban elenyésző, ezért szükséges exogén β -glükózidáz alkalmazása. Az exogén módon alkalmazott β -glükózidáz kizárólag az aromaprofil szempontjából fontos hidroxilvegyületeket szabadítja fel. A β -glükózidázt a borászatban leginkább a terpénalkoholokban gazdag, muskotályos boroknál alkalmazzák [Eperjesi, 1998].

A glükozidos kötésben lévő monoterpének nemcsak a szőlőbogyó saját β -glükózidáz-aktivitásának következtében szabadulhatnak fel, hanem a bogyó felületén lévő penészgombákban jelen lévő enzimek (β -glükózidáz) hatására is. Az enzim pH-optimuma 5,0 érték körül van, így aktivitása nagy részét az érés utolsó szakaszában elveszti. Ennek következtében sem a természetes körülmények között működő enzimek, sem az alkoholos erjedés során jelenlévő borélesztőben működő β -glükózidáz-aktivitás nem elegendő minden terpén-glikozid hidrolizálására, így a borkészítés során nem szabadulhat fel a feldolgozott szőlő teljes aromakészlete. Az aromaanyagok felszabadulásának folyamata meggyorsítható, ha az erjesztést β -glükózidáz-aktivitással is rendelkező fajélesztővel végzik, vagy a borhoz β -glükózidázt tartalmazó enzimkészítményt adagolnak.

A borászati fajélesztők törzsszelekciónak legújabb kritériumai között szerepel a β -glükózidáz-aktivitás, vagyis a terpén-glikozidok hidrolízise. Egyes élesztőtörzsek jelentős β -glükózidáz-enzimaktivitással jellemezhetők, így a szőlő elsődleges aromaanyagait, a terpénalkoholokat képesek felszabadítani glikozidjaikból. Az ilyen törzsek alkalmazásával a szőlő fajtajellege jobban érvényesíthető a kiejedt borban [Magyar, 2010].

Egyéb enzimek

A malolaktikus fermentációnál a tejsavbaktériumok az almasavat tejsavvá és szén-dioxiddá erjesztik. A Kokoferm Kft. által forgalmazott Uvaferm és Lallemand tejsavbaktérium-kultúrák használatával mind a fehérborokban, mind a vörösborokban felgyorsul az almasavbontás. Elsősorban a vörösborok minőségjavítására használják, de egyes fehér fajtáknál is kedvező eredményt ad. Az almasav lebontását az almasav-dekarboxiláz vagy malolaktikus enzim végzi, amely csak tejsavbaktériumokban ismert. A savtartalom csökkenésével és a savösszetétel megváltozásával a pH emelkedik, a bor lágyabb karakterűvé válik.

7.3. Biztonsági szabályozások

Csak azok az exogén enzimek alkalmazhatók sör és bor előállításában, amelyek megfelelnek a szigorú biztonsági követelményeknek, pl. rendelkeznek GRAS (*generally recognized as safe*) státusszal, vagy az EFSA (European Food Safety Authority) által jóváhagyott készítmények stb. A genetikailag módosított élesztők használata csak néhány országban (USA, Kanada, Kína) engedélyezett, az EU és Magyarország is kifejezetten tiltja az alkalmazásukat.

7.3. táblázat: Borászati enzimek készítmények

Terméknév	Termékjellemző	Ajánlott dózis
Lallzyme C	fehérszőlők pektinbontása, musttisztítás	2–3 g/hl
Lallzyme HC	fehérszőlők pektinbontása, héjon áztatás, musttisztítás	1–2 g/hl
Lallzyme C-MAX	problémás pektintartalmú fajták és évjáratok pektinbontó, musttisztító enzime	1–2 g/hl
Lallzyme CUVÉE-BLANC	macerációs és aroma-felszabadító enzim fehér fajták áztatásához	2 g/hl
Lallzyme OE	kékszőlők pektinbontása, színkinyerés, aromafokozás, teltebb ízérzet	1 g/q
Lallzyme EX-V	érett tanninú kékszőlők macerációs és színextrakciós enzime	2 g/q
Lallzyme β	illatos és buké fehér fajták borainak aromafokozásához	3–5 g/hl
Lallzyme MMX	derítési, szűrhetőségi problémák esetén, ill. a teltségérzet, <i>mouthfeel</i> fokozására	vörösborok seprőn tartása 4–5 g/hl fehérborok seprőn tartása 3 g/hl
Everzym GPC	pektinbontó enzimgranulátum	0,5–2 g/hl
Everzym Arom	pektinbontó enzim, másodlagos β-glükozidáz-aktivitással	1–3 g/hl
Everzym Color	pektináz, másodlagos hemicelluláz- és proteázaktivitással, mely optimalizálja a színkivonási folyamatot	1–5 g/hl vörös cefréhez
Trenolin Mash DF Erbslöh	fehérborok készítéséhez pektinbontó és β-glükozidáz enzim	1–4 ml/100 kg
Trenolin Color DF, Erbslöh	vörösborok készítéséhez pektinbontó enzim, maceráló mellékaktivitással a színyanyagok és a tanninok kioldódásához	1–4 g/100 kg

Irodalomjegyzék

- Bamforth C. W. (2017): Progress in brewing science and beer production. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 8, pp. 161–176.
- Eperjesi I., Kállay M. és Magyar I. (1998): *Borászat*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Gomaa A. M. (2018): Application of enzymes in brewing. *Journal of Nutrition and Food Science Forecast*, 1, Article 1002.
- Harald C. és Kiro M. (2018): Enzymes for wine fermentation: current and prospective applications – a review. *Fermentation*, 4, Article 52.
- Kabashima T., Fujii M., Meng Y., Ito K. és Yoshimoto T. (1998): Prolyl endopeptidase from *Sphingomonas capsulata*: isolation and characterization of the enzyme and nucleotide sequence of the gene. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 358, pp. 141–148.
- Levin R. E. (2006): Food microbiology. In: Shetty K., Pometto A. L. és Paliyath G. (szerk.): *Food Biotechnology*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, pp. 3-17.
- Magyar I. (2010): *Borászati mikrobiológia*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Nguyen D. Q., Rezessy-Szabó J. M., Hoschke Á. és Bhat M. K. (2007): Microbial starch-degrading enzymes and their applications. In: Givens I. és Bhat M. K. (szerk.): *Polysaccharides and Polysaccharidases in Food and Agriculture*. Research Signpost, Kerala, India, pp. 77–120.
- Rogers J. C. (1985): Two barley alpha-amylase gene families are regulated differently in aleurone cells. *Journal of Biological Chemistry*, 260, pp. 3731–3738.

8. Prebiotikumok

*Bujna Erika, Styevkó Gabriella, Rezessyné Szabó Judit,
Hoschke Ágoston, Nguyen Duc Quang⁸*

A vastagbél mikrobiótája kulcsfontosságú szerepet játszik egészségünk megőrzésében, melyet jól megalapozott klinikai vizsgálatok is alátámasztanak [Roberfroid, 2010]. Ebből adódóan nagy érdeklődés övezi azon funkcionális élelmiszer-összetevők alkalmazását, melyek által befolyásolható a bélmikrobióta összetétele, és javítható az egészségi állapot. Ezek közé sorolhatók a probiotikumok és a prebiotikumok. A probiotikumok – melyek biztonságos, jótékony élettani hatású élő mikroorganizmusok, ellenállnak a gyomor savas környezetének, és képesek szaporodni és kolonizálni a vastagbélben – életképessége prebiotikum alkalmazásával tovább fokozható. Számos tanulmány bizonyítja, hogy a prebiotikum-fogyasztás statisztikailag is kimutathatóan jelentős változásokat eredményez a bélmikrobióta összetételében, különösen a jótékony hatású (*Lactobacillusok*, *Bifidobacteriumok*) mikroorganizmusok számát növelve [Roberfroid, 2008; Andersen, 2011; Maccaferri, 2012; Shimizu, 2013; Toward, 2012]. A prebiotikumok egyre növekvő ipari alkalmazása szükségessé teszi a nagyléptékű gyártási technológiák kidolgozását, melyek enzimkatalizált folyamatok. Ezen lehetőségeket foglaltuk össze ebben a fejezetben.

8.1. A prebiotikumok jelentősége, koncepció

A prebiotikumok olyan nem emészthető élelmiszer-összetevők, melyek kedvezően befolyásolják a gazdaszervezet egészségi állapotát, a bélben lévő jótékony hatású baktériumok szaporodásának és/vagy aktivitásának szelektív támogatásával [Gibson, 1995]. Prebiotikumnak nevezhető egy élelmiszer-összetevő, ha a következő kritériumoknak megfelel:

- ellenáll a gyomorban uralkodó savas közegnek, az emésztőenzimeinek, és felszívódás nélkül jut el a vastagbélbe,
- szubsztrátum a bélmikrobiótának, de főleg a jótékony baktériumok számára,
- a vastagbélben szelektíven támogatja a gazdaszervezetre jótékony hatású mikroorganizmusok növekedését/aktivitását.

Fontos továbbá, hogy stabil maradjon az élelmiszer előállítása során. A gyomorsavval szembeni ellenálló képesség esetén nem szükségeszerű, hogy teljesen emészthetetlen legyen az adott prebiotikum, viszont garantálni kell, hogy jelentős részben eljusson a vastagbélbe, ahol szelektív szubsztrátumként szolgál a jótékony baktériumoknak. Bár minden kritérium fontos, a szelektivitás a legkritikusabb, hiszen ettől lehet valamely komponens prebiotikumká [Roberfroid, 2007]. A prebiotikum-koncepció mögött tehát az a feltevés áll, hogy alkalmazásukkal stimulálhatók a bélben honos baktériumok (lokalpatrióta-effektus) ahelyett, hogy külső forrásból vinnénk be törzseket a szervezetbe, mint a probiotikumok esetén [Wang, 2009]. További előnye a prebiotikumoknak a probiotikumokkal szemben, hogy nem élő anyagok, és általában kémiaiilag változatlan formában érik el a vastagbelet.

8 Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem,
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet,
Biomérnök és Erjedéssipari Tanszék
1118 Budapest, Ménesi út 45.
Bujna.Erika@uni-mate.hu

Prebiotikumként alkalmazhatók a nem emészthető szénhidrátok, néhány peptid és fehérje, valamint bizonyos lipidek. Jelenleg a nem emészthető szénhidrátok a legelterjedtebbek, melyek közül a di-, oligo- és poliszacharidok, a rezisztens keményítő és a cukoralkoholok lehetnek prebiotikumok [Al-Sheraji, 2013]. Kémiai szerkezetük miatt a nem emészthető oligoszacharidokat (NDO) az emberi szervezet bizonyos enzimek hiánya miatt nem képes bontani, s csak korlátozott számú baktérium képes felvenni őket. A béltraktusban jelenlévő baktériumok közül leginkább a *Bifidobacteriumok* és *Lactobacillusok* hasznosítják azokat, ezáltal kedvező hatást gyakorolnak az emberi szervezet működésére.

Az ipari jelentőségű prebiotikumok elsődlegesen glükóz-, galaktóz-, xilóz- és fruktózzomonomerekből épülnek fel (8.1. táblázat). A NDO-k, bár nem látják el a szervezetet monoszacharidokkal, indirekt energiaforrásként szolgálnak, és anyagcsere-szabályozó szerepet töltenek be [Mussatto, 2007].

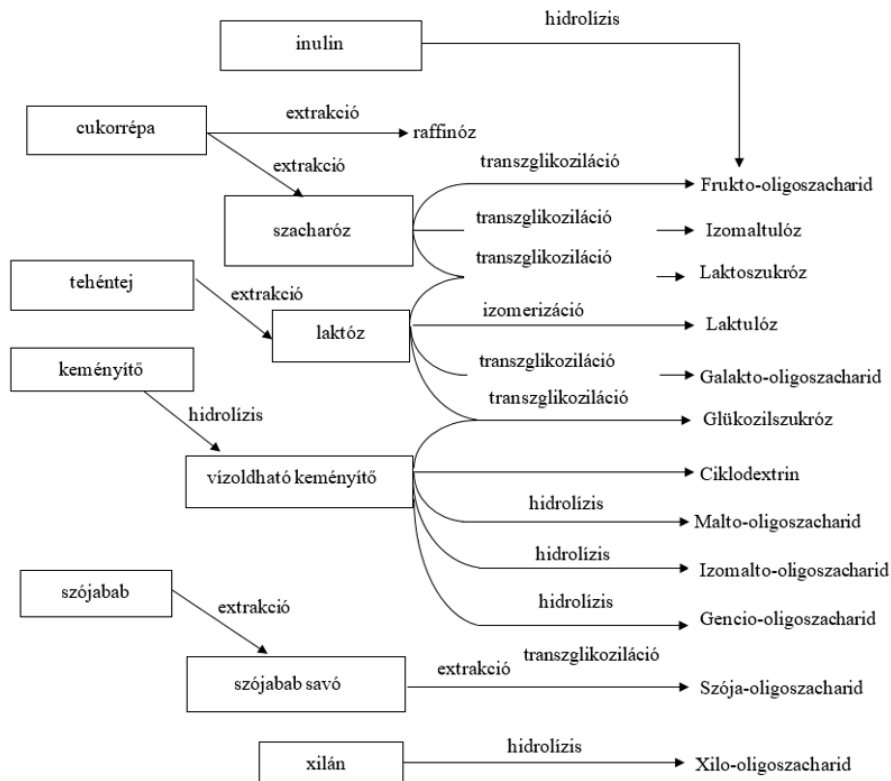
8.1. táblázat: Prebiotikus oligoszacharidok és szerkezetük [Mussatto, 2007 nyomán]

Oligoszacharidok típusa	Szerkezet	Kötés
Frukto-oligoszacharidok	(Fruktóz) n – Glükóz	β -1,2
Galakto-oligoszacharidok	(Galaktóz) n – Glükóz	β -1,4; β -1,6
Izomalto-oligoszacharidok	(Glükóz) n	α -1,6
Laktulóz	Galaktóz – Fruktóz	β -1,4
Szója-oligoszacharidok	(Galaktóz) n – Glükóz – Fruktóz	α -1,6
Laktoszukróz	Galaktóz – Glükóz – Fruktóz	β -1,4
Xilo-oligoszacharidok	(Xilóz) n	β -1,4
Gentio-oligoszacharidok	(Glükóz) n	β -1,6

8.2. Prebiotikumok előállítása

A funkcionális oligoszacharidok egyre növekvő alkalmazása szükségessé teszi a nagyléptékű gyártási technológiák kidolgozását. Előállításuk különböző módokon valósítható meg: extrakcióval, valamint kémiai és biotechnológiai eljárásokkal.

A nem emészthető oligoszacharidok megtalálhatók a természetben különböző növényi forrásokban (cikória, hagyma, fokhagyma, spárga, articsóka, póréhagyma, banán, paradicsom), illetve élelmiszeripari nyersanyagokban (tej, méz), így kinyerésük is megvalósítható. Mennyiségük azonban nem jelentős, s szezonális jelenlétük a piacon megnehezíti nagyléptékű előállításukat ezen alapanyagokból.



8.1. ábra: Prebiotikus oligoszacharidok ipari előállításának lehetőségei
[Mussatto, 2007 nyomán]

Az oligoszacharidok előállítása során a kémiai módszerek alkalmazása nem terjedt el, melynek elsődleges oka a keletkezett termékek heterogén szerkezete, a szintézis kisfokú specifitása és a bonyolult, többlépéses gyártástechnológia. Az enzimes oligoszacharid-előállítás előnye a kémiai szintézishez képest, hogy akár egy lépésben is megoldható egyes oligoszacharidok specifikus előállítása, nem keletkezik melléktermék, továbbá széles reakciókörülmény-tartományban megvalósíthatók a reakciók. Régió- és sztereospecifitás jellemzi az enzimes reakciót, így izomerek sem alakulnak ki. Az oligoszacharid-szintézist katalizáló enzimek fermentációs úton történő előállításával, majd rögzítésével az enzim újrahasznosítható, illetve az eljárás folyamatossá tehető, ezáltal csökkennek a költségek, gazdaságosabbá válik az előállítási folyamat [Moracci, 2001; Maitin, 2007]. A biotechnológiai úton megvalósítható oligoszacharid-előállítási lehetőségek a polisacharidok enzimes lebontása, valamint mikrobák általi vagy enzimes szintézis cukrokból. A prebiotikus oligoszacharidok előállításának lehetőségeit a 8.1. ábra szemlélteti.

Frukto-oligoszacharidok (FOSs)

A fruktánok olyan szénhidrátok, melyekben a glikozidos kötések nagy részét fruktozil-fruktóz kötések alkotják. A fruktánok lehetnek inulin- vagy levántípusúak. Az inulin típusúak β -2,1-D-fruktofuranozil egységekből épülnek fel, növényekben és gombákban szintetizálódnak, míg a leván típusúaknál β -6,2-D fruktofuranozil egységek találhatók, és a növények mellett inkább baktériumok, például a *Streptococcus mutans* szintetizálják őket [Patel, 1994].

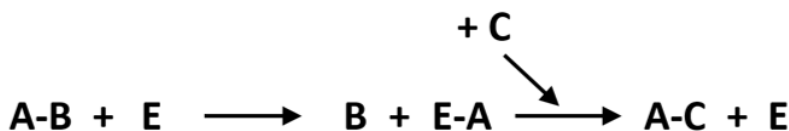
A frukto-oligoszacharidokat élelmiszeripari célra az inulin irányított enzimikus hidrolízisével vagy a szacharóz transzglikolizálásával állítják elő.

Az inulin extrakciója már iparilag megvalósított, melyhez a fruktánokat nagyobb mennyiségben tartalmazó növények, mint a cikória és a csicsóka gumóját használják kiindulási nyersanyagként [Hu, 2007]. A fruktánok mennyisége és polimerizációs foka nagymértékben függ az adott növénytől és a tárolási feltételektől [Modler, 1994]. A kidolgozott extrakciós technológia hasonló a cukorrépa-alapú szacharóz-előállításához [Niness, 1999]. Az extrakcióval kinyert inulinból endo-inulináz enzimikus hidrolízissel rövidebb szénláncú frukto-oligoszacharidok állíthatók elő. Az exo-inulináz az inulin hidrolízisét β -D-fruktóz-egységek lehasításával végzi 90–95% hozammal, így főként magas (ultra-high) fruktóztartalmú szirupok előállítására alkalmazzák [Martins, 2019].

Az inulin különböző formákban kapható kereskedelmi forgalomban: natív inulinként (átlagos polimerizációs fok: DP 30–60), továbbá a rövidebb frakciókat (DP 2–10) tartalmazó terméket oligofruktózként vagy rövid szénláncú frukto-oligoszacharidként is nevezik, míg a 60-nál nagyobb polimerizációs fokú inulinszármazékot HP inulinként tartják számon [Kriokova, 2017].

Különböző polimerizáltsági fokú frukto-oligoszacharidok állíthatók elő szacharózból transzfruktozilációs reakcióval β -fruktofuranozidáz vagy β -D-fruktozil-transzferáz alkalmazásával. A reakció során a szacharóz molekuláról egy fruktóz kerül át egy másik szacharóz molekulára. A reakció termékei a kesztóz (GF2), nisztóz (GF3) és fruktozil-nisztóz (GF4), melyekben a fruktózmolekulák a szacharózhoz β -2,1-glikozidos kötéssel kapcsolódnak.

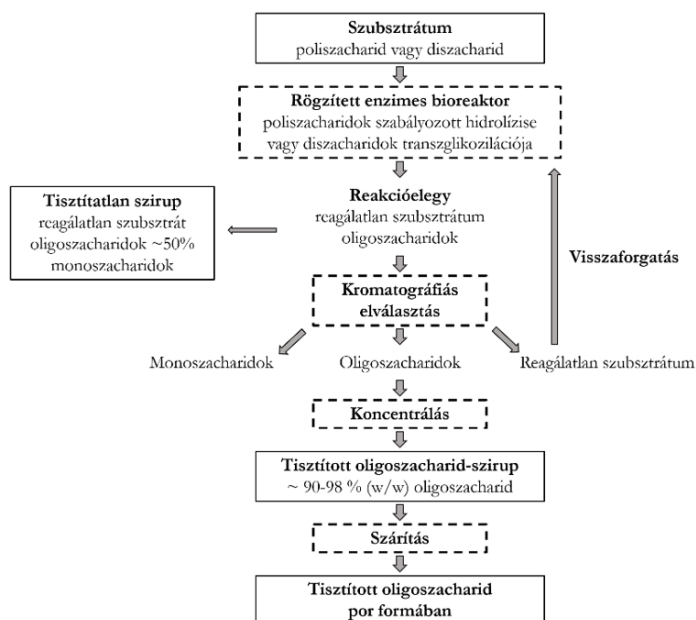
A glikozil-transzferázok a monoszacharidok sztereo- és regiospecifikus átvitelét katalizálják egy donor molekuláról egy akceptor molekulára [Hu, 2002; Weijers, 2008]. A folyamat a 8.2. ábra alapján valósul meg. Különösen gyakoriak azok a glikozil-transzferázok, amelyeknek működéséhez aktivált donor molekulára (pl. cukor-nukleotid-foszfátra) van szükség [Breton, 2006].



8.2. ábra: Transzferázreakció (A-B – donor szénhidrát vagy glikozid, E – glikozil-transzferáz, C – akceptor molekula) [Monsan, 1995].

A szintézis során kapott frukto-oligoszacharidok összetételét számos paraméter befolyásolja, például az enzim forrása, a szubsztrátkoncentráció, a pH és a hőmérséklet, továbbá a reakció ideje, illetve ezek együttes hatása. A frukto-oligoszacharidok ipari előállítására mikrobaeredetű fruktozil-transzferázokat alkalmaznak, melyek közül legjelentősebbek az *Aspergillus niger*, *Aureobasidium pullulans* és *Aspergillus japonicus* gombából származók. Az említett enzimek 50–65 °C-on, 4,5–5,5 közötti pH-tartományban működnek optimálisan [Casci, 2006].

A kiindulási szubsztrátkoncentrációt tekintve általánosan elmondható, hogy a nagyobb szacharózkoncentráció (>40%) növeli a rövid szénláncú frukto-oligoszacharidok keletkezését (pl. kesztóz, nisztóz), kevés glükózt eredményezve. Ezzel szemben a kis szacharózkoncentráció nagyobb polimerizáltságú frukto-oligoszacharidok előállítását indukálja, és a keletkező glükóz mennyisége is nagyobb [Romano, 2016].



8.3. ábra: Prebiotikus oligoszacharidok ipari előállításának általános sémája
[Crittenden, 2009 nyomán]

Az oligoszacharidok ipari előállítása során alkalmazhatnak szakaszos rendszert enzimdát felhasználásával, vagy a folyamat rögzített enzimes bioreaktorban, folyamatos rendszerben valósul meg. A prebiotikus oligoszacharidok ipari előállításának általános sémáját a 8.3. ábra szemlélteti. A frukto-oligoszacharidok szintézise során melléktermékként fruktóz és glükóz keletkezik, és szacharóz is visszamarad a reakcióelegyben. A nem kívánatos szénhidrátok kromatográfiás eljárással távolíthatók el a termékből [Crittenden, 1996; Kuhn, 2012], majd koncentráció után a termék típusától függően szárítással fejezik be a prebiotikum előállítását [Casci, 2006].

Galakto-oligoszacharidok (GOSs)

A laktóz egy glükózból és egy galaktózból álló diszacharid, az emlősök tejének legfontosabb összetevője 2–10% tartalommal. Fontos szerepet játszik az élelmiszer- és gyógyszeriparban, azonban a világ felnőtt lakosságának kb. 70%-a nem képes lebontani, eztáltal kellemetlen tüneteket okozva a szervezetben (lásd 1. fejezet). β -galaktozidáz enzim alkalmazásával lebontható a tej laktóz tartalma, illetve értékes galakto-oligoszacharidok szintetizálhatók transzgalaktozilációs reakcióval [Nguyen, 2015]. A szintézis mellett a frukto-oligoszacharidokhoz hasonlóan a galakto-oligoszacharidok is kinyerhetők növényekből, különösen a hüvelyesek tartalmaznak belőlük nagyobb mennyiséget.

Az oligoszacharid-előállításához szubsztrátumként általában tejsavóból kinyert, nagy koncentrációjú laktózt alkalmaznak. A nagy laktóztartalom és az alacsony víztartalom kedvezően hat a galakto-oligoszacharidok szintézisére, ezek befolyásolják legnagyobb mértékben a szintézist, függetlenül az enzimforrástól [Meyer, 2015]. Általában legalább 30% laktóztartalom szükséges ahhoz, hogy a hidrolízis helyett oligoszacharidok szintézise valósuljon meg. A galakto-oligoszacharidok szintézisét befolyásolják továbbá a reakciókörülmények (hőmérséklet, pH, reakcióidő) és az enzim forrása (pl. *Aspergillus oryzae*, *Sulfolobus solfataricus*, *Lactobacillus reuteri*). A reakció fő termékei triszacharidok (4- vagy 6-galaktozil-laktóz), de szintetizálódhat négyes vagy annál nagyobb polimerizáltságú oligoszacharid is [Mussatto, 2007; Gosling, 2010; Torres, 2010].

Az enzim 4 alegységet tartalmaz, mérete 36 kDa és 362 kDa közötti lehet. A pH-optimum 4,0 és 9,0 közötti tartományban van, a hőmérséklet-optimum galakto-oligoszacharid-szintézishez 40 °C-tól akár 95 °C-ig is terjedhet, ez utóbbit egy termofil baktérium (*Pyrococcus furiosus*) β -galaktozidáz enzime esetén állapították meg. Általában a gombaeredetű laktázok pH-optimuma 2,5–4,5 közötti, míg az élesztők és baktériumok esetén a semlegeshez közeli érték (6–7, illetve 6,5–7,5) a jellemző. Nagyobb hozam érhető el semleges pH-értéken alkalmazott élesztő- vagy baktériumeredetű enzimmal, mint savas pH-n működő gombákkal [Casci, 2006]. Lehetőség van rögzített enzimek alkalmazására is, melynek egyik legfontosabb előnye lehet a hordozómátrix védő hatása révén megnövelt hőstabilitás [Gaur, 2006].

Xilo-oligoszacharidok (XOSs)

A xilo-oligoszacharidok főként Japánban terjedtek el. Szerkezetüket tekintve xilózmolekulák kapcsolódnak össze β -1,4-kötéssel. A többi prebiotikumhoz képest savtűrőbbek, így üdítőitalokban alkalmazzák őket.

A xilo-oligoszacharid-előállítás szubsztrátumát, a xilán poliszacharidot extrakcióval nyerik ki hemicellulóztartalmú melléktermékekből, főként kukoricacsutkából [Crittenden, 1996; Yang, 2005]. A Japánban alkalmazott Suntory-eljárás során lúgos előkezelést használnak a kukoricacsutkából történő hemicellulóz-felszabadítására. A vízzel való mosást cukrosítás követi, mely során endo-1,4- β -xilanázzal 75–80% oligoszacharid-tartalmú oldatot nyernek. Ultraszűrést követően reverz ozmózist hajtanak végre, két részre választva a terméket. A koncentrátum, mely több mint 95% oligoszacharidot tartalmaz, tisztítást követően Xylooligo 95 terméként kerül forgalmazásba. A permeátumon, mely 60–70% oligoszacharidot tartalmaz, újabb reverz ozmózis műveletet hajtanak végre. Ezt követően a koncentrátumból több mint 70% oligoszacharid-tartalommal a Xylooligo 70 termék hozható létre.

Számos mikroba termel xilanáz enzimet, melyek tulajdonságai a forrástól függően változnak. *Trichoderma reesei*, *T. harzianum*, *T. viride* és *T. koningii* a leginkább alkalmazott mikroorganizmusok, mind cellulolitikus, mind xilanolitikus enzimforrások. Xilo-oligoszacharid-előállításnál fontos a kis exo-xilanáz- és/vagy β -xilozidáz-aktivitás, hogy elkerüljék a xilóz keletkezését. Az endo-1,4- β -xilanáz optimális működési paraméterei a fent említett mikrobák esetén 40–45 °C hőmérséklet és pH 4,5–6. Élelmiszeripari célra a DP2–4 (xilobióz, xilotrióz, xilotetraóz) termékek a legkedvezőbbek [Casci, 2006].

Izomalto-oligoszacharidok

Az izomalto-oligoszacharidok (IMOs) α -1,6-glikozidos kötéssel kapcsolódó glükózmolekulákból állnak (néhány típusuk α -1,4-kötést is tartalmazhat). Piacvezetők a funkcionális élelmiszer-összetevők között Japánban. Az izomalto-oligoszacharidokról elmondható, hogy az emberi szervezet is képes azok nagyon lassú bontására, de legnagyobb részük eljut a vastagbélig.

Egyik népszerű termék az Isomalto-900, melyet kukoricakeményítőből állítanak elő, és izomaltózt, izomaltotriózt, valamint panózt tartalmaz [Crittenden, 1996]. A keményítőből származó dextránok könnyen átalakíthatók izomalto-oligoszachariddá enzimes transzferreakcióval. Első lépésben a keményítő folyósítása történik α -amilázzal és pullulanázzal, majd a második lépésben a folyósított keményítő kezelése β -amiláz és α -glükozidáz enzim felhasználásával történik. Az α -glükozidáz által katalizált transzglikoziláció révén az α -1,4-kötésű malto-oligoszacharid átalakul α -1,6-kötésű izomalto-oligoszachariddá. A felszabadult glükózt eltávolítják a nagyobb termék koncentráció érdekében. A maximális IMO-koncentráció a végső reakcióelegyben 40% körüli, és kb. 40% a maradék glükóz mennyisége is [Casci, 2006].

Az α -glükozidáz által katalizált transzglikozilációs reakció során az enzim egy glikozidszármazékról (donor) glikozilegységet visz át egy hidroxilcsoportot tartalmazó akceptormolekulára. A végső hozam fokozható a donor- és akceptorkoncentráció növelésével, a vízáktivitás csökkentésével, a végső termék reakcióközegből történő folyamatos eltávolításával, illetve a megfelelő szerkezetű akceptormolekula kiválasztásával, amellyel befolyásolható a keletkezett termék glikozidos kötésének típusa is.

Laktoszukróz

A laktoszukróz egy szacharóz- és egy laktózmolekulából létrejött oligoszacharid [Rastall, 2000]. Fruktofuranozidáz enzimmel végzett transzfruktozilációval állítható elő, melynek során a szacharóz fruktóz része a laktóz glükóz egységének 1. C-atomjához kapcsolódik glikozidos kötéssel, nem redukáló oligoszacharidot képezve.

Ez egy alacsony kalóriájú, mesterséges oligoszacharid, mely emészthetetlen, s a vastagbélbe jutva növeli a bifidobaktériumok számát. Az *Arthrobacter* sp. K-1 eredetű β -fruktofuranozidáz a laktoszukróz transzferreakcióval történő előállítását katalizálja, továbbá a szacharóz és a laktoszukróz hidrolízisét végzi. A reakciót a glükóz és a laktóz nem kompetitív módon gátolja [Pilgrim, 2001].

8.3. Prebiotikumok élettani hatásai

A prebiotikum-fogyasztás szervezetre gyakorolt jótékony élettani hatásai a vastagbél baktériumai általi hasznosítás eredményeként érvényesülnek. A vastagbélben megvalósuló fermentációs folyamat során rövid szénláncú zsírsavak (SCFA-k) (pl. ecetsav, propionsav, vajsav) termelődnek, a pH csökkenését eredményezve, mely a patogén baktériumok szaporodását gátolja, a probiotikus baktériumokét pedig indukálja. Az SCFA-k a humán vastagbél hámsejtjeiben felszívódva stimulálják azok növekedését, valamint a só és a víz felszívódását. Növelik az ozmotikus nyomást, ezáltal a széklet nedvességtartalmát, miáltal a székrekedés enyhítésében játszik szerepet [Qiang, 2009].

A rövid szénláncú zsírsavak gyulladáscsökkentő hatásúak, továbbá a lipogenezis szabályozásában is szerepet játszanak, hozzájárulva további kedvező hatásokhoz az emberi szervezetben. A vajsav esetén megállapították, hogy *in vitro* körülmények között gátolja a vastagbél ráksejtjeinek szaporodását, és képes elindítani a rákos sejtek normál sejttypussá történő visszaalakulását [Lim, 2005]. Az oligoszacharidok antikarcinogén hatása összefüggésben van a sejtszintű immunitás növekedésével, a sejtfal összetételével és a bifidobaktériumok által extracellulárisan termelt anyagokkal [Mussatto, 2007; Qiang, 2009]. A prebiotikus oligoszacharid típusától és a bélmikrobióta összetételétől függően a termelődő SCFA-k mennyisége és aránya változhat [Mussatto, 2007; Rivière, 2016].

A prebiotikumoknak hatásuk van a hasmenés kialakulásának megelőzésében, mely közvetlen összefüggésben állhat a probiotikumok kórokozó baktériumokra gyakorolt gátló hatásával [De Vrese, 2007; Qiang, 2009]. Szintén a probiotikumok jelenlétének következtében folsav és B-vitaminok (B₁, B₂, B₆, B₁₂) szintetizálódnak.

Az emésztőrendszeri, légzőszervi, húgyúti és ivarszervi fertőzések megelőzésének alapja, hogy gátolják a baktériumok megtapadását az epitelsejtek felületén [Mussatto, 2007; Crittenden, 2009]. A kórokozó mikroorganizmusok az oligoszacharidokhoz kötődnek a gazdaszervezet sejtjei helyett, megvédve ezáltal a szervezetet a fertőzéstől [Shetty, 2007].

Indukálják az ásványi anyagok felszívódását (pl. vas, kalcium és magnézium), ugyanis a nem emészthető oligoszacharidok által megkötött ásványi anyagok sem szívódnak fel, így eléri a vékonybelet, ahol a szénhidrátmátrixból felszabadulva szívódnak fel. A vastagbélben felszívódó kalcium nagymértékben csökkentheti a csonttrikulás kialakulásának kockázatát, és elősegíti a csontsűrűség és a csonttömeg növekedését [Loo, 2006; Qiang, 2009].

Jótékony hatással rendelkeznek továbbá a szénhidrát- és lipidanyagcserére azáltal, hogy csökkentik a vér koleszterin-, triglicerid- és foszfolipid-koncentrációját, így mérsékelve a diabétesz, illetve az elhízás kialakulásának kockázatát. Általában édeskések, kis kalóriatartalmúak, így a diétázók, illetve a cukorbeteg is fogyaszthatják [Crittenden, 1996]. Egyes kutatók szerint a vérszérum koleszterinkoncentrációja összefügg a bélmikrobióta váltoásaival. Bizonyos *Lactobacillus acidophilus* baktériumok asszimilálják a koleszterint, míg más mikrobák gátolják a koleszterin bélfalon keresztüli felszívódását. Más vélemények szerint a lipidanyagcsere változása a máj metabolikus alkalmazkodásának következménye, amit a rövid szénláncú zsírsavak indukálnak [Mussatto, 2007; Crittenden, 2009].

A jótékony hatások mellett a nem emészthető oligoszacharidok túlzott mértékű fogyasztása flatulenciát (fokozott bélgázképződést) vagy hasmenést okozhat, továbbá a vastagbélben zajló anyagcsere-tevékenység következtében a szervezet számára nem hasznosítható gázok (H₂, CO₂, CH₄) is keletkeznek [Mussatto, 2007].

Irodalomjegyzék

- Al-Sheraji S. H., Ismail A., Manap M. Y., Mustafa S., Yusof R. M. és Hassan F. A. (2013): Prebiotics as functional foods: a review. *Journal of Functional Foods*, 5, pp. 1542–1553.
- Andersen J. M., Barrangou R., Hachem M. A., Lahtinen S., Goh Y. J., Svensson B. és Klaenhammer T. R. (2011): Transcriptional and functional analysis of galactooligosaccharide uptake by *lacS* in *Lactobacillus acidophilus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, pp. 17785–17790.
- Breton C., Šnajdrová L., Jeanneau C., Koča J. és Imberty A. (2006): Structures and mechanism of glycosyltransferases. *Glycobiology*, 16, pp. 29–37.
- Casci T. és Rastall R. A. (2006): Manufacture of prebiotic oligosaccharides. In: Gibson G. R. és Rastall R. A. (szerk.): *Prebiotics: Development and Application*. John Wiley & Sons Ltd., England, pp. 29–56.
- Crittenden R. és Playne M. J. (2009): Prebiotics. In: Lee Y. K. és Salminen S. (szerk.): *Handbook of Probiotics and Prebiotics*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, pp. 533–582.
- Crittenden R. G. és Playne M. J. (1996): Production, properties and applications of food-grade oligosaccharides. *Trends in Food Science & Technology*, 7, pp. 353–361.
- De Vrese M. és Marteau P. R. (2007): Probiotics and prebiotics: effects on diarrhea. *Journal of Nutrition*, 137, pp. 803S–811S.
- Filice M. és Marciello M. (2013): Enzymatic synthesis of oligosaccharides: a powerful tool for a sweet challenge. *Current Organic Chemistry*, 17, pp. 701–718.
- Gaur R., Pant H., Jain R. és Khare S. K. (2006): Galacto-oligosaccharide synthesis by immobilized *Aspergillus oryzae* β -galactosidase. *Food Chemistry*, 97, pp. 426–430.
- Gibson G. R. és Roberfroid M. B. (1995): Dietary modulation of the human colonic microbiota: introducing the concept of prebiotics. *Journal of Nutrition*, 125, pp. 1401–1412.
- Gosling A., Stevens G. W., Barber A. R., Kentish S. E. és Gras S. L. (2010): Recent advances refining galactooligosaccharide production from lactose. *Food Chemistry*, 121, pp. 307–318.
- Hu J., Jin Z. Y. és Wang J. (2007): Extraction and purification of inulin from Jerusalem artichoke. *Food Science and Technology*, 4.
- Hu Y. és Walker S. (2002): Remarkable structural similarities between diverse glycosyltransferases. *Chemistry & Biology*, 9, pp. 1287–1296.
- Kim J. H., Lee D. H. és Lee J. S. (2001): Production of galactooligosaccharide by β -galactosidase from *Kluyveromyces marxianus* var. *lactis* OE-20. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 6, pp. 337–340.
- Kriukova Y., Jakubiak-Augustyn A., Ilyinska N., Krotkiewski H., Gontova T., Evtifeyeva O., Özçelik T. és Matkowski A. (2017): Chain length distribution of inulin from dahlia tubers as influenced by the extraction method. *International Journal of Food Properties*, 20(Suppl.), pp. S3112–S3122.
- Kuhn R. C., Mazutti M. A. és Filho F. M. (2012): Kinetic and mass transfer effects for adsorption of glucose, fructose, sucrose and fructooligosaccharides into X zeolite. *LWT – Food Science and Technology*, 48, pp. 127–133.

- Lim K. H. és Counter C. M. (2005): Reduction in the requirement of oncogenic Ras signaling to activation of PI3K/AKT pathway during tumor maintenance. *Cancer Cell*, 8, pp. 381–392.
- Loo J. van (2006): Inulin-type fructans as prebiotics. In: Gibson G. R. és Rastall R. A. (szerk.): *Prebiotics: Development and Application*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, pp. 57–100.
- Maccaferri S., Klinder A., Brigidi P., Cavina P. és Costabile A. (2012): Potential probiotic *Kluyveromyces marxianus* B0399 modulates the immune response in Caco-2 cells and peripheral blood mononuclear cells and impacts the human gut microbiota in an in vitro colonic model system. *Applied and Environmental Microbiology*, 78, pp. 956–964.
- Maitin V. és Rastall R. A. (2007): Enzymatic synthesis of oligosaccharides: progress and recent trends. In: Shetty K., Paliyath G., Pometto A. L. és Levin R. E. (szerk.): *Functional Foods and Biotechnology*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Martins G. N., Ureta M. M., Tymczyszyn E. E., Castilho P. és Gomez-Zavaglia A. (2019): Technological aspects of the production of fructo- and galacto-oligosaccharides: enzymatic synthesis and hydrolysis. *Frontiers in Nutrition*, 6, Article 78.
- Meyer T. S. M., Miguel A. S. M., Fernández D. E. R. és Ortiz G. M. D. (2015): Biotechnological production of oligosaccharides – applications in the food industry. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, pp. 25–78.
- Modler H. W. (1994): Bifidogenic factors: sources, metabolism and applications. *International Dairy Journal*, 4, pp. 383–407.
- Monsan P. és Paul F. (1995): Enzymatic synthesis of oligosaccharides. *FEMS Microbiology Reviews*, 16, pp. 187–192.
- Moracci M., Trincone A. és Rossi M. (2001): Glycosynthases: new enzymes for oligosaccharide synthesis. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 11, pp. 155–163.
- Mussatto S. I. és Mancilha I. M. (2007): Non-digestible oligosaccharides: a review. *Carbohydrate Polymers*, 68, pp. 587–597.
- Nguyen D. Q., Bujna E., Styevkó G., Rezessy-Szabó J. M. és Hoschke Á. (2015): Fungal biomolecules for food industry. In: Vijai K. és Gupta S. (szerk.): *Fungal Biomolecules: Sources, Applications and Recent Developments*. John Wiley & Sons, Oxford, UK, pp. 11–38.
- Niness K. R. (1999): Inulin and oligofructose: what are they? *Journal of Nutrition*, 129, pp. 1402S–1406S.
- Palcic M. M. (1999): Biocatalytic synthesis of oligosaccharides. *Current Opinion in Biotechnology*, 10, pp. 616–624.
- Patel V., Saunders G. és Bucke C. (1994): Production of fructooligosaccharides by *Fusarium oxysporum*. *Biotechnology Letters*, 16, pp. 1139–1144.
- Pilgrim A., Kawase M., Ohashi M., Fujita K., Murakami K. és Hashimoto K. (2001): Reaction kinetics and modeling of the enzyme-catalyzed production of lactosucrose using β -fructofuranosidase from *Arthrobacter* sp. K-1. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 65, pp. 758–765.
- Qiang X., YongLie C. és QianBing W. (2009): Health benefit application of functional oligosaccharides. *Carbohydrate Polymers*, 77, pp. 435–441.
- Rastall R. A., Fuller R., Gaskins H. R. és Gibson G. R. (2000): Colonic functional foods. In: Gibson

G. R. és Williams C. M. (szerk.): *Functional Foods: Concept to Product*. CRC Press – Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, pp. 71–94.

Rivière A., Selak M., Lantin D., Leroy F. és De Vuyst L. (2016): Bifidobacteria and butyrate-producing colon bacteria: importance and strategies for their stimulation in the human gut. *Frontiers in Microbiology*, 7, Article 979.

Roberfroid M., Gibson G. R., Hoyles L., McCartney A. L., Rastall R., Rowland I., Wolvers D., Watzl B., Szajewska H., Stahl B., Guarner F., Respondek F., Whelan K., Coxam V., Davicco M. J., Leotoing L., Wittrant Y., Delzenne N. M., Cani P. D., Neyrinck A. M. és Meheust A. (2010): Prebiotic effects: metabolic and health benefits. *British Journal of Nutrition*, 104(Suppl. 2), pp. S1–S63.

Roberfroid M. (2007): Prebiotics: the concept revisited. *Journal of Nutrition*, 137, pp. 830S–837S.

Roberfroid M. B. (2008): Prebiotics: concept, definition, criteria, methodologies, and products. In: Gibson G. R. és Roberfroid M. B. (szerk.): *Handbook of Prebiotics*. CRC Press, pp. 57–86.

Romano N., Santos M., Mobili P., Vega R. és Gómez-Zavaglia A. (2016): Effect of sucrose concentration on the composition of enzymatically synthesized short-chain fructo-oligosaccharides as determined by FTIR and multivariate analysis. *Food Chemistry*, 202, pp. 467–475.

Rouzaud G. C. M. (2007): Probiotics, prebiotics, and synbiotics: functional ingredients for microbial management strategies. In: Biliaderis C. G. és Izydorczyk M. S. (szerk.): *Functional Food Carbohydrates*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, pp. 479–510.

Shetty K., Paliyath G., Pometto A. L. és Levin R. E. (szerk.) (2007): *Functional Foods and Biotechnology*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.

Shimizu K., Ogura H., Asahara T., Nomoto K., Morotomi M., Tasaki O. és Sugimoto H. (2013): Probiotic/synbiotic therapy for treating critically ill patients from a gut microbiota perspective. *Digestive Diseases and Sciences*, 58, pp. 23–32.

Thammarutwasik P., Hongpattarakere T., Chantachum S., Kijroongrojana K., Itharat A., Reanmongkol W., Tewtrakul S. és Ooraikul B. (2009): Prebiotics – a review. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 31, pp. 401–408.

Tonkova A. (1998): Bacterial cyclodextrin glucanotransferase. *Enzyme and Microbial Technology*, 22, pp. 678–686.

Torres D. P. M., Gonçalves M. P. F., Teixeira J. A. és Rodrigues L. R. (2010): Galacto-oligosaccharides: production, properties, applications, and significance as prebiotics. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9, pp. 438–454.

Toward R., Montandon S., Walton G. és Gibson G. R. (2012): Effect of prebiotics on the human gut microbiota of elderly persons. *Gut Microbes*, 3, pp. 57–60.

Van der Maarel M. J. E. C., Van der Veen B., Uitdehaag J. C. M., Leemhuis H. és Dijkhuizen L. (2002): Properties and applications of starch-converting enzymes of the α -amylase family. *Journal of Biotechnology*, 94, pp. 137–155.

Wang Y. (2009): Prebiotics: present and future in food science and technology. *Food Research International*, 42, pp. 8–12.

Weijers C. A. G. M., Franssen M. C. R. és Visser G. M. (2008): Glycosyltransferase-catalyzed synthesis of bioactive oligosaccharides. *Biotechnology Advances*, 26, pp. 436–456.

Yang R., Xu S., Wang Z. és Yang W. (2005): Aqueous extraction of corn cob xylan and production of xylooligosaccharides. *LWT – Food Science and Technology*, 38, pp. 677–682.

9. Édesítőszer

Hodúr Cecilia⁹

A mézet, az édes gyümölcsöket és azokat a növényeket, amelyeknek egyéb részei édes ízűek, ősidőktől fogva ismeri és fogyasztja az emberiség. Az Ázsia déli részein honos cukornád kisajtott levét már a történelem előtti időben is használta a bennszülött lakosság. Kr. u. 300 körül jöttek rá Indiában, hogyan lehet szilárd cukrot készíteni a cukorszirupból, ezzel megnyílt a cukor nagyobb elterjedésének lehetősége. Hazánk régi oklevelei több helyen említik a „nádmézet” a királyi udvarok és más előkelőségek kedvelt csemegéi között, az adatok egészen a XIV. századig nyúlnak vissza.

Egy berlini gyógyszerész, Marggraf az európai növények összetételét vizsgálva, 1747-ben megállapította, hogy a burgundi répa édes ízét a nádcukor okozza, és ezt elő is állította belőle. Tanítványa, Achard javaslata alapján 1802-ben meg is nyílt az első répacukorgyár Sziléziában. Napóleon szárazföldi zárata folytán Európa-szerte nagy kutatómunka indult meg a cukornak hazai növényekből való előállítására, de csak a répából való cukorgyártás vált be. Az 1830-as években Magyarországon is sorra alapították a cukorgyárakat. A rendszerváltás előtt fennálló 12 hazai cukorgyárból ma már egyedül a kaposvári üzem működik.

A nádcukor (szacharóz) mellett egyre elterjedtebb a különféle természetes és mesterséges édesítőszer gyártása, mely sok esetben igen szoros kapcsolatban áll a biotechnológiával [Ferrier, 2006]. Felhasználásuk nagyon széles körű az élelmiszeriparban (üdítőitalok, gyümölcslevek, tészták, rágógumi) és a gyógyszeriparban is, ahol elsősorban azért használják őket, hogy leplezzék a hatóanyag ízét, beburkolják a pirulákat, vagy azért, hogy beállítsák a folyadékok konzisztenciáját [Priya, 2011].

Az ideális édesítőszer maradéktalanul teljesíti az alábbi követelményeket:

- kis koncentrációban is hatásos,
- széles hőmérséklet-tartományban stabil,
- hosszan tartó alkalmazása sem jelent egészségügyi kockázatot,
- alacsony energia-bevitelt jelent,
- egyszerű technológiával, reprodukálhatóan és olcsón gyártható.

9.1. Cukoralkoholok

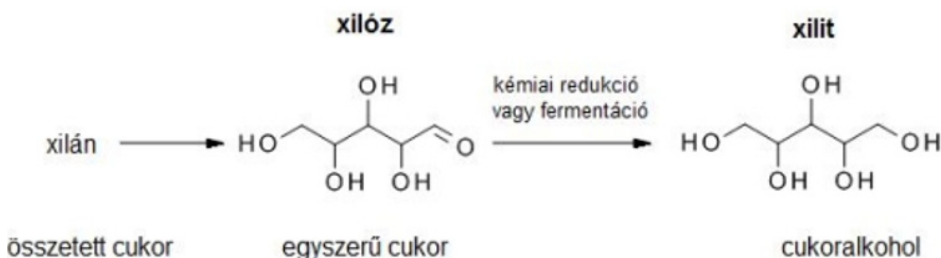
A cukoralkoholok szénhidrátok redukciójakor képződő polialkoholok (többértékű alkoholok). A folyamat során a cukrok oxocsoportja (aldehid- vagy ketocsoport) alakul át alkoholos hidroxilcsoporttá. A cukoralkoholok színtelen, kristályos vegyületek. Vízben jól, alkoholban kevésbé oldódnak, éterben oldhatatlanok. Számos cukoralkohol édes ízű. A cukroktól eltérően a cukoralkoholok jellemzően nem okoznak fogromlást, mivel a szuvasodást előidéző, szájban található baktériumok nem konvertálják őket savakká, ezáltal funkcionális ételmezei előnyöket biztosítanak [Patra, 2009], továbbá, mivel ezek rosszul szívódnak fel a vékonybélben, átlagosan csak 8,4 kJ/g energiát szolgáltatnak, ami körülbelül fele a tipikus cukrok által biztosított energiának. A nem teljes felszívódás következményeként azonban

⁹ Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézet
Szeged, Moszkvai krt. 9.
hodur@mk.u-szeged.hu

a túlzott fogyasztás esetén puffadáshoz vagy hashajtó hatáshoz vezethetnek [Godshall, 2007]. A cukoralkoholok édessége a szacharóz 30–100%-án belül változhat, ennél fogva az edesebb íz érdekében gyakran keverik nagy intenzitású édesítőszerekkel. A cukoralkoholok közül a leggyakoribb termékek: az eritrol, a szorbit, a mannit és a xilit.

A cukoralkoholok előállításánál a biológiai eljárások a kémiai módszerek alternatívájaként biztonságosabb és zöldebb megközelítést jelentenek. Különösen az eritritolt nagy mennyiségben állítják elő fermentációval glükózból [Godshall, 2007], mert az eritrit rendkívül drága kiindulási alapanyag lenne a kémiai úton történő előállításához. A fermentáció alapanyaga répacukor vagy melasz, ill. keményítő. A gyártási folyamathoz felhasznált mikroorganizmusok: *Moniliella pollinis*, *Trichosporonoides megachiliensis* vagy *Aureobasidium sp.* A xilitol biotechnológiai termelése lehetséges élesztősejtek (vagyis *Candida spp.*, *Pichia spp.*) vagy mesterségesen módosított törzsek (*Saccharomyces spp.*, *Escherichia coli*, tejsavbaktériumok) segítségével is, de a kereskedelmi termelés a mai napig a kémiai hidrogénezésen alapul [Chen, 2010; Godshall, 2007; Monedero, 2010].

A xilit természetesen előfordul egyes gyümölcsökben és zöldségekben, azonban az ezekből történő kivonása nem gazdaságos. Az ipari méretű gyártás xilózból történik; a xilózt pedig hemicellulóztartalmú alapanyagokból (keményfa, kukoricacsutka stb.) aprítást követő, magas hőmérsékleten végrehajtott sósavas hidrolízissel állítják elő. A xilózt ezután vagy vegyi úton redukálják, vagy fermentációval alakítják xilitté. A vegyi redukció Raney-féle nikkeltalízátoron, nagy nyomáson és magas hőmérsékleten történő hidrogénezéssel történik (9.1. ábra).



9.1. ábra: Xilit képződése xilánból

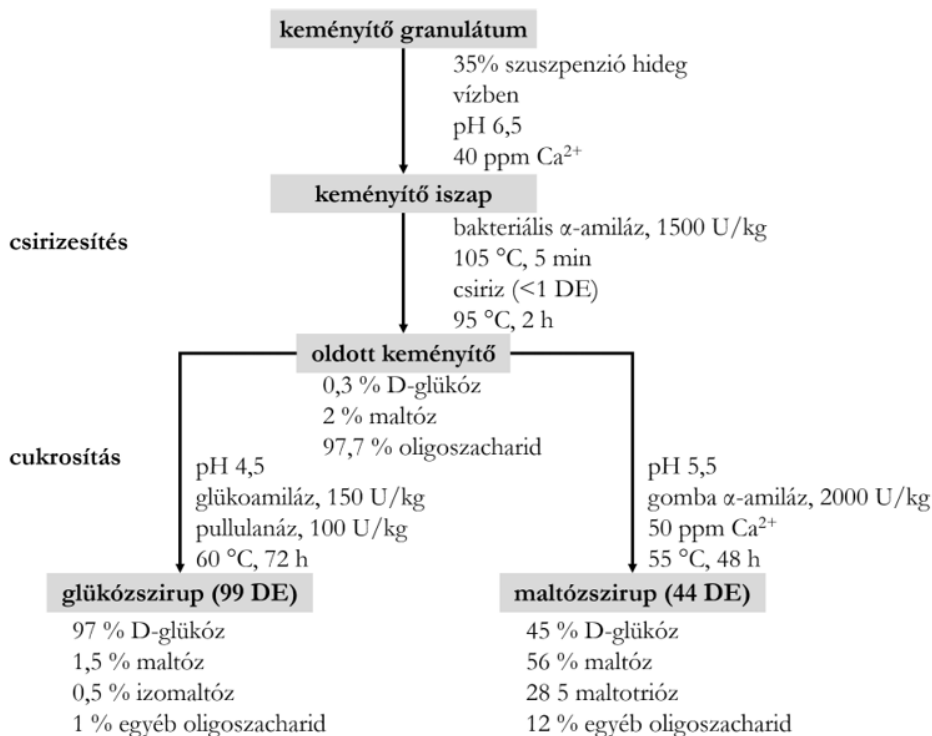
A fermentáció lefutását számos tényező befolyásolja: a hőmérséklet, az oldott oxigén-szint, az inokulum életkora, a pH, a kevertetés sebessége. Általánosan megfigyelhető, hogy az élesztőtörzsek hatékonyabb, termelékenyebb xilit-előállítók a gombáknál és a baktériumoknál. Az élesztők természetes úton, köztitermékként állítanak elő xilitet. A *Candida boidinii* élesztőtörzs azért különleges, mert xilóz-reduktáz enzime képes a NADPH és a NADH koenzimként történő felhasználására is. A törzs rendelkezik xilóz-izomeráz enzimmel, így képes egy lépésben átalakítani a D-xilózt D-xilózzá. A *C. boidinii* további előnyös tulajdonsága, hogy nem patogén, így biztonságosan használható az élelmiszeriparban fermentációs célokra [Illés, 2014]. További hatékonyan használható mikroorganizmusok: *Bacillus subtilis*, *Candida maltosa*, *C. pelliculosa*, *C. tropicalis*, *Corynebacterium sp.*, *Cryptococcus sp.* A tápközeg összetétele esetében pl. a glükóz csak a sejtek növekedéséhez kell, nagy mennyiségben viszont gátolja a xilit termelését. A szemi-aerob körülmények adják az ideális

hozamot; aerob körülmények között alacsony a xilithozam, mert a légzési lánc miatt jelentős a NAD⁺ regeneráció, viszont anaerob körülmények között etanolos erjedés játszódik le. Az optimális pH-érték 4,5–6,0, az optimális hőmérséklet 30 °C. A kristályosítást megelőzően egy aktív szén és ultraszűrővel történő tisztítás elengedhetetlen.

A szorbitol biotechnológiai előállítása többnyire a *Zymomonas mobilis*ra támaszkodik [Akinterinwa, 2008; Liua, 2010]. Ezen túlmenően a módosított tej-savbaktériumokat (*Lactobacillus casei* és *Lact. plantarum*) is sikeresen alkalmazzák [Monedero, 2010].

9.2. Keményítőtől készült édesítőszer

Ahogy azt a 2. fejezetben bemutattuk, a keményítő hidrolízise számos termékhez vezet, mint például az oligoszacharidok, a maltodextrinek és glükózsirupok, a kristályos fruktóz és dextróz. A keményítőalapú édesítőszeret dextróz-ekvivalenciájuk (DE) alapján osztályozzák, és halmazállapotuktól, édesítőerejüktől, egyéb tulajdonságaiktól függően az élelmiszeripar különböző területein hasznosítják. A keményítő feldolgozását a 9.2. ábra szemlélteti, a technológia részletes leírása a 2. fejezetben található.



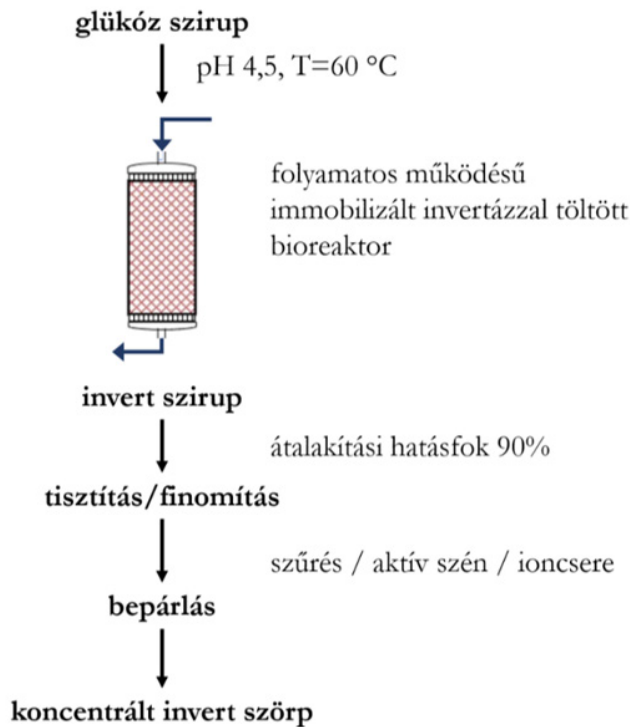
9.2. ábra: Keményítőfeldolgozás enzimes folyamata

9.3. Invert cukrok

Az invertcukrot a szacharóz hidrolíziséből nyerik, és mint ilyen, egyenlő arányban (50:50) tartalmaz glükózt és fruktózt. Az invertszirup édesítőképesége meghaladja a szacharózét, mivel a fruktóz édesebb, mint a szacharóz, míg a glükóz kevésbé édes, mint a szacharóz, és kellemes aromát kölcsönöz az élelmiszeripari termékeknek. Édesítő szerepe mellett a folyékony invertszirupot gyakran használják az élelmiszeriparban sütőipari termékeknel azok nedvességtartalmának megőrzése céljából, valamint a folyékony invertszirup hozzájárul az élelmiszerek eltarthatóságának javításához [Godshall, 2007].

A szacharóz-inverziót savgyantás eljárással, sav- vagy enzimkatalizált hidrolízissel hajthatjuk végre. A savgyantás eljárást alig alkalmazzák, mivel számos szennyeződés származik a folyamatból, bár a zeolitok alkalmazása érdekes eredményeket mutatott [Moreau, 2000].

A tipikus savas hidrolízis eljárást úgy hajtják végre, hogy a szacharóz oldatot 90–100 °C hőmérsékletre melegítik, és ásványi savat (azaz kénsavat, sósavat) adnak hozzá, hogy a pH 1,0–2,0-ra csökkenjen. Az oldatban kevertetett reaktorban, 45–75 perces tartózkodási idő alatt lejátszódik a teljes szacharóz-inverzió. Az invertcukor pH-ját ezután 6,0-ra állítják be. A kapott oldatot szűréssel tisztítják, ehhez a hőmérsékletet 75 °C-ra csökkentik, a kapott szirupot tovább tisztítják aktív szénnel és ioncserélő gyantákon. Ezután a szirupot a kívánt koncentrációra bepárolják.



9.3. ábra: Invert szirup előállítás

Az enzimikus eljárás során alkalmazott invertáz lehet intra- vagy extracelluláris természetű. Az optimális pH 3,5 és 5,5 között, a hőmérséklet pedig 25 °C és 90 °C között van, leggyakrabban 4,5 pH és 55 °C körül. Ezenkívül az invertáz hatékonyabbnak bizonyult, mint a H⁺, a szacharózhidrolízis katalizátoraként [Fernandes, 2010; Whitaker, 2004]. Az enzimikus hidrolízist célszerűen folyamatos üzemben hajtják végre, szilárd hordozón immobilizált invertázzal, például polisztirollal keverve agglomerált dietil-amino-etil-cellulózzal (DEAE-cellulóz), kalcium-alginnáttal, Eupergittel és kitozán gyöngyökkel, amelyeket ágyoszlopra rögzítenek [Fernandes, 2010; Serna-Saldivar, 2008] (9.3. ábra). A tartózkodási idő a biokatalizátoroktól, a szubsztrát koncentrációjától és az inverziós szinttől függ. Az invertcukor-szirup tovább feldolgozható szűréssel, aktív szénrel és ioncserélő oszlopokkal végzett tisztítás céljából a tárolás előtt.

Az inulin hidrolízisében részt vevő enzimeket inulinázoknak nevezik, és elsősorban *Aspergillus spp.*, *Kluyveromyces spp.*, *Streptomyces spp.* és *Bacillus stearothermophilus* baktériumokból izolálják [Basso, 2010; Fernandes, 2010; Singh, 2010]. Az endoinulinázok elősegítik az (2→1)-p-o-fruktozidos kötések endohidrolízisét az inulinban, ezáltal véletlenszerűen hidrolizálják a poliszacharid belső kötéseit, tipikusan viszonylag alacsony polimerizációs fokot eredményezve. Az exoinulinázok elősegítik a nem redukáló (2→1)- és (2→6)-kapcsolódott p-o-fruktofuranóz-maradékok hidrolízisét az inulinban és az abból származó fruktánokban, ezáltal egymást követően szabadítva fel a fruktózmolekulákat [Fernandes, 2010; Singh, 2010].

Ioncserélő gyantákat és zeolitkatalizátorokat használnak a teljes inulinhidrolízishez. Egy tipikus ioncserélőgyanta-folyamatban az inulin 5–10% meleg vizes oldatát szivattyúzzák át egy erősen savas kationcserélő gyantát tartalmazó oszlopon. Ennek eredményeként egy 2–3-nál nagyobb pH-val rendelkező oldat keletkezik, amelyet 70–100 °C-on hidrolizálnak. Körülbelül 15 perc tartózkodási idő lehetővé teszi a teljes hidrolízist. A szirupot ezután szobahőmérsékletre hűtik, szűrik, egymás után aktív szénnel és gyenge anioncserélő gyantán keresztül feldolgozzák, ezáltal a folyadék pH-ját 6,5–7,0-ra növelik, és végül 40–70% szilárdanyag-tartalmúra töményítik. Az oligofruktánokat tartalmazó édes fruktózsirup valóban „egészséges” édesítőszerként használható, különösen idős emberek és cukorbetegek számára. A lé kivonása után kapott pép gazdag fehérjében, és takarmányként felhasználható. Az immobilizált inulinázokat főleg kevertetett szakaszos reaktorokban és folyamatos működésű, töltöttágyas reaktorokban alkalmazzák. Kevésbé általános a fluidágyas reaktorok és a héjcsöves membránreaktorok használata [Ricca, 2010]. A reaktor üzemeltetését általában 40–60 °C-on, pH 4,5–5,5 mellett, 2,5%–10% közötti szubsztrátkoncentrációval végzik. Az enzimet ioncserélő gyantákon rögzítik, a töltött ágyas reaktorok felezési ideje folyamatos működés közben 30–70 napon belüli érték. A 14 napos működés után 90%-nál nagyobb konverziós hozamokat jelentettek, 1,25 órás tartózkodási idővel [Ricca, 2010].

9.4. Szintetikus édesítőszer

Szintetikusan előállított, nagyon erős édes ízérzetet keltő édesítőszer közé tartozik az aszpartám, a ciklamát, a szacharin és az aceszulfám-K. Ezek közös jellemzője az intenzív édes ízhatás és a zero kalóriaérték [Godshall, 2007].

Az aszpartám egy dipeptid: N-L-aszpartil-L-fenilalanin-metilészter. A termolizín enzimen alapuló gyártási folyamatban, megfelelő körülmények között az enzim a fordított reakciót katalizálja, vagyis azt, amely az aszpartám prekursorának (Z-L-Asp-L-Phe-metilészter)

szintézisét eredményezi, kezdve D,L-Phe-metilészterből és L-Asp-ból. A hidrogenolízis után a védőcsoport eltávolítása céljából a prekuzort aszpartámmá alakítják [Bommarius, 2004]. A termolizin regiospecifikus jellege kiküszöböli az L-aszparaginsav 3-karboxil-csoportjának védelmének szükségességét. Ennek ellenére az α -aminocsoport védelmére továbbra is szükség van a poli-L-aszparaginsav szintézisének megakadályozása miatt [Bucke, 1990]. Ezen túlmenően a termolizin nem vagy alig mutat észterolitikus aktivitást; ennél fogva a peptid édes ízéhez elengedhetetlen metilészter-csoport megmarad [Bommarius, 2004].

Az aszpartám folyamatos gyártása immobilizált termolizinnel, szilárd hordozókban, térhálósított enzimkristályokban vagy membránreaktorokban történhet, valamint vizes/szerves kétfázisú rendszerekben vagy akár alacsony víztartalmú rendszerekben is megvalósítható [West, 2007]. A megközelítéstől függetlenül a sikeres szintézis kulcsfontosságú kérdése az a kompromisszum, amelyet a kezdeti reakciósebesség és a végső hozam értéke között kell meghozni [West, 2007]. Extrém egészségkárosító hatása van, amit elsősorban annak köszönhet, hogy a szervezetben formaldehiddé alakul. Széles körű mellékhatásokkal bír a testi és a mentális egészség terén.

Az aszpartám származéka, az aceszulfám-K szintén mesterséges édesítőszerként használt vegyület. Állatkísérletek alapján a 3 legerősebben rákkeltő hatású anyag egyikeként tartják számon. Világszerte számos szervezet követeli a betiltását.

A ciklamátot az emberi szervezet mérgező ciklohexil-aminná alakítja. Már 1969-ben kimutatták rákkeltő hatását, az Egyesült Államokban a mai napig tiltólistán szerepel. Az EU-ban ipari lobbiknak köszönhetően engedélyezték, de a megengedett beviteli mennyiség így is csak 0,007 g/testsúlykg. Olcsó előállítás miatt gyakori mesterséges édesítőszer.

Irodalomjegyzék

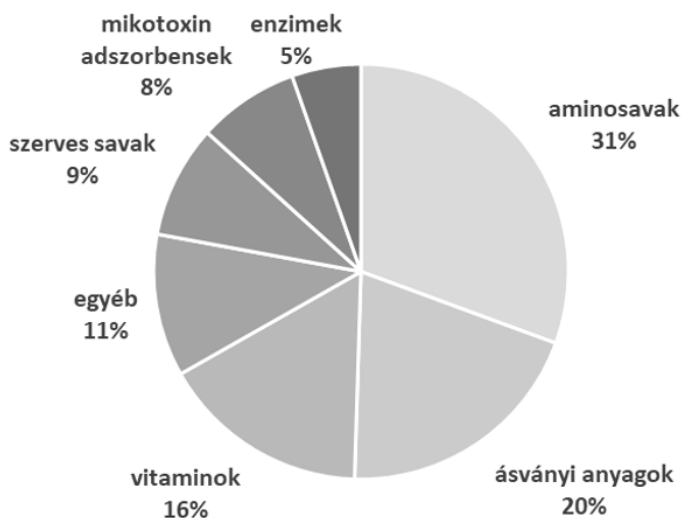
- Akinterinwa O., Khankal R. és Cirino P. C. (2008): Metabolic engineering for bioproduction of sugar alcohols. *Current Opinion in Biotechnology*, 19, pp. 461–467.
- Basso A., Spizzo P. és Ferrario V. (2010): Endo- and exo-inulinases: enzyme–substrate interaction and rational immobilization. *Biotechnology Progress*, 26, pp. 397–405.
- Bommarius A. S. és Riebel-Bommarius B. R. (2004): *Biocatalysis: Fundamentals and Applications*. 1st ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Chen X., Jiang Z. H., Chen S. és Qin W. (2010): Microbial conversion and production of D-xylitol and its detection and application. *International Journal of Biological Sciences*, 6, pp. 834–844.
- Ferrier R. J. (2006): An historical overview. In: Levy D. E. és Fügedi P. (szerk.): *The Organic Chemistry of Sugars*. Taylor & Francis.
- Godshall M. A. (2007): The expanding world of nutritive and non-nutritive sweeteners. *International Sugar Journal*, 69, pp. 12–20.
- Illés B. (2014): *Xilit előállítás Candida boidinii mikroorganizmus segítségével rázatott lombikban illetve fermentorban*. TDK-dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.
- Liu C., Dong H., Zhong J. és Bao J. (2010): Sorbitol production using recombinant *Zymomonas mobilis* strain. *Journal of Biotechnology*, 148, pp. 105–112.
- Monedero V., Pérez-Martínez G. és Yebra M. J. (2010): Perspectives of engineering lactic acid bacteria for biotechnological polyol production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86, pp. 1003–1015.
- Moreau C., Durand R., Alies F., Cotillon M. és Frutz T. (2000): Hydrolysis of sucrose in the presence of H-form zeolites. *Industrial Crops and Products*, 11, pp. 237–242.
- Patra F., Tomar S. K. és Arora S. (2009): Technical and functional applications of low-calorie sweeteners from lactic acid bacteria. *Journal of Food Science*, 74, pp. R16–R23.
- Priya K., Gupta V. R. M. és Srikanth K. (2011): Natural sweeteners: a complete review. *Journal of Pharmaceutical Research*, 4, pp. 2034–2039.
- Ricca E., Calabrò V., Curcio S., Basso A. és Gardossi L. (2010): Fructose production by inulinase covalently immobilized on Sepabeads in batch and fluidized bed bioreactor. *International Journal of Molecular Sciences*, 11, pp. 1180–1189.
- Serna-Saldivar S. R. és Rito-Palomares M. A.: Production of invert syrup from sugarcane juice using immobilized invertase. Amerikai szabadalom, US 7435564.
- Singh R. S. és Singh R. P. (2010): Production of fructo-oligosaccharides from inulin by endoinulinases and their prebiotic potential. *Food Technology and Biotechnology*, 48, pp. 435–450.
- West S. (2007): Production of flavours, flavour enhancers, and other protein-based speciality products. In: Rastall R. A. (szerk.): *Novel Enzyme Technology for Food Application*. Woodhead Publishing Ltd., Abington, MA, pp. 183–204.
- Whitaker J. R. (2004): Factors affecting enzyme activity in foods. In: Yada R. Y. (szerk.): *Proteins in Food Processing*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 270–291.

10. Állateledelek és takarmányok

Lajtai-Szabó Piroška, Bélafiné Bakó Katalin¹⁰

Az élelmiszeripar és a könnyűipar egyfajta határterületének tekinthető a takarmányok, állateledelek gyártása. Az emberi fogyasztásra szánt élelmiszerekhez hasonlóan a takarmányok esetében is az optimális összetétel, tápérték és emészthetőség elérésére kell törekedni. Ez egyrészt az állattartás körülményeinek jogszabályi és etikai vonatkozásai miatt lényeges, másrészt közvetetten az állati eredetű élelmiszerek minőségét is meghatározzák a takarmány jellemzői.

A takarmány minőségét elsődlegesen annak összetétele határozza meg. A víztartalom elérheti akár a 80–90%-ot is (pl. zöldtakarmányok, cukorgyári répaszelet, moslék esetében), ugyanakkor elterjedtek a légszáraz (8–14% vizet tartalmazó) takarmányok (pl. gabona- és hüvelyes magvak, széna stb.) is. A szárazanyag-tartalom hatással van a takarmány energiatartalmára és tárolhatóságára, befolyásolja az emésztési és felszívódási folyamatokat. A szárazanyag fő összetevői a fehérjék, lipidek, nyersrostok, vitaminok, ásványi anyagok és egyéb, biológiailag aktív anyagok, valamint a mesterségesen előállított adalékanyagok [Schmidt, 2003].



10.1. ábra: Takarmánykiegészítőkből származó bevétel százalékos aránya termékszegmensenként [Internet 1]

10 Pannon Egyetem, Mérnöki Kar,
Bio-, Környezet- és Vegyészmérnöki Kutató-fejlesztő Központ,
Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatócsoport
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.
lajtai-szabo.piroska@mk.uni-pannon.hu

A takarmánykiegészítők olyan adalékanyagok, melyek segítenek a termelés fokozásában, az állatok egészségének megőrzésében, valamint javítják a takarmány és az állati termékek minőségét. Ez történhet többek között az emészthetőség növelésével, a táplálóanyagok védelmével, illetve az emésztőrendszer természetes baktériumközösségére kifejtett hatással [Schmidt, 2003]. A fehérjeforrás iránti igény miatt az aminosavak teszik ki a felhasznált adalékanyagok legnagyobb hányadát a bevételből (10.1. ábra), ugyanakkor a leggyorsabban növekvő szektort az enzimek képviselik [Internet 1].

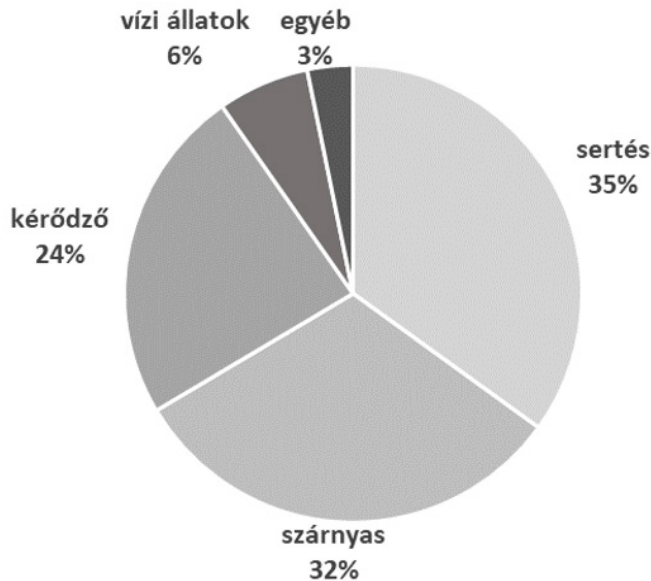
Az adalékanyagok előállításában számottevő szerep jut a biotechnológiai eljárásoknak, hiszen az antibiotikumok, szerves savak, aminosavak, vitaminok és aromák gyártása többnyire fermentációs úton, mikroorganizmusok vagy enzimek felhasználásával történik. Az antibiotikumokat régebben elterjedten alkalmazták hozamfokozóként, manapság azonban környezet- és egészségvédelmi okokból (az antibiotikum-rezisztencia terjedésének csökkentése érdekében) szinte kizárólag gyógyászati célra használhatók. A szerves savak felhasználása ezzel szemben növekvő tendenciát mutat, egyre nagyobb mértékben használják őket a takarmányok tartósítására, a bélflóra pH-értékének szabályozására. A növényi eredetű fehérjék bizonyos esszenciális aminosavakat csak kis mennyiségben tartalmaznak, ezek pótlása jórészt mikrobiális fermentációval előállított aminosavakkal történik [Schmidt, 2003].

10.1. Pre- és probiotikumok

A pre- és probiotikumok nemcsak az emberi táplálkozásban, hanem a takarmányozásban is fontos szerephez jutnak. A probiotikumok élő mikroorganizmusokat tartalmaznak, melyek védik a bélhámot, különböző szerves savakat, antimikrobiális vegyületeket és enzimeket termelnek. Általában rövid ideig tartózkodnak az emésztőrendszerben, ezért rendszeresen pótolni kell őket. Baktérium- és gombafajokat egyaránt széles körben alkalmaznak probiotikumként, legismertebb típusaik a *Lactobacillus* és a *Bifidobacterium* baktériumnemzetség tagjai, valamint a *Saccharomyces cerevisiae* és *Aspergillus oryzae* gombák. Élő mikrobakultúrák mellett a bélrendszer természetes mikroflórájának speciális szubsztrátjait, az ún. prebiotikumokat is használhatják adalékanyagként. A jórészt oligoszacharid típusú vegyületek hozzájárulnak a bélflóra baktériumainak szaporodásához és a fertőzések elkerüléséhez. A pre- és probiotikumokat egyaránt tartalmazó készítményt szimbiotikumnak nevezik [Schmidt, 2003]. A prebiotikumok részletes leírása a 8. fejezetben olvasható.

10.2. Enzimekészítmények

Az adalékanyagok speciális, biokatalitikus aktivitással rendelkező csoportja az enzimekészítmények. Az egyes állatfajok emésztőrendszerei és tápanyag-igénybeli különbségeiből fakadóan eltérő mértékben szükséges enzimeket adagolni a takarmányhoz. A 10.2. ábrán látható diagram azt mutatja be, hogy a főbb állatcsoportok takarmányában használt enzimek a teljes felhasznált mennyiség piaci értékének hány százalékát teszik ki. Az adatok alapján a sertés- és a baromfiágazat takarmánya tartalmazza a legtöbb enzimet, de a kérődzők táplálékában is jelentős mértékben jelen vannak. Az akvakultúrákban alkalmazott biokatalizátorok mennyisége a kérődzőkre jellemző érték mintegy negyedének felel meg [Internet 1].



10.2. ábra: Takarmányenzimek globális piaca 2013-ban [Internet 1]

Az enzimeket eleinte csak az ún. antinutritív anyagok lebontására használták, melyek növelik a beltartalom viszkozitását, nehezítik a tápanyagok felszívódását, ezáltal rontják a takarmányemészthetőségét és hasznosítását [Choct, 2006]. Ide tartoznak bizonyos glikozidok, pl. a β -glükán és az arabinoxilán, alkaloidák és toxikus fehérjék. Ezeket a vegyületeket az állat emésztőrendszere nem képes lebontani, a táphoz adagolt enzimkészítmények azonban megoldást jelenthetnek a problémára. A gabonafélék közül az árpa kevésbé értékesíthető a broilerek (pecsenyecsirke) számára, mint a kukorica, azonban a takarmányhoz β -glükánázt keverve ez a különbség szinte teljesen megszüntethető [Dublec, 2011].

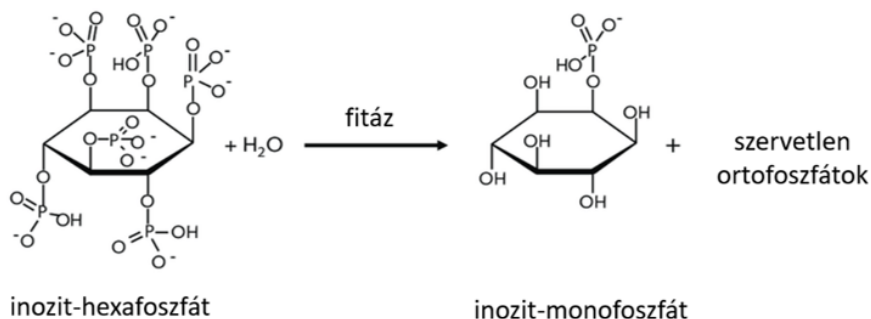
A monogasztrikus (együregű gyomrú) állatok, pl. sertés, baromfi számára a növények sejtfalát alkotó cellulóz emészthetetlen, lebontásához adalékanyagot kell alkalmazni. Bár a kérődzők a bélflórájuk által termelt enzimeknek köszönhetően képesek a cellulóz emésztésére, enzimkészítményekkel azonban tovább fokozható a hidrolízis hatékonysága. A takarmány kiindulási cellulóz-tartalmától függően 5–10%-os testtömeg-növekedés érhető el sertésben és baromfiban. A poliszacharidok és egyéb, nehezen emészthető sejtfalalkotók biokatalitikus lebontása egyúttal hozzáférhetővé teszi az állat emésztőenzimei számára a sejtek belsejében található fehérjéket, zsírokat, egyéb tápanyagokat, így azok hasznosulása is fokozható ezzel a módszerrel [Dublec, 2011].

A szénhidrátok mellett fontos tápanyag-összetevők a fehérjék, melyeknek elsődleges forrásai a különböző hüvelyesek és olajos magvak, pl. szója, napraforgó, repce stb. Az említett növényeket az egyes állatfajok eltérő mértékben képesek hasznosítani, az elégtelen emésztés pedig egyfelől csökkenti az elfogyasztott takarmány hasznosulását, másrészt puffadást és egyéb rendellenességeket okoz [Philipps-Wiemann, 2018]. A táplálékhoz kevert proteázok részt vesznek a fehérjék hidrolízisében, lebontják a lektineket (speciális szénhidrátkötő fehérjék) és a tripszin-inhibitorokat, valamint a keményítő- és fehérjemolekulák közti keresztkötések

felszakításával elősegítik a fehérjék és a keményítő emésztését. A fehérjebontó enzimeket viszonylag ritkán alkalmazzák önálló adalékanyagként, azonban sok enzimkomplex tartalmaz proteázokat a cellulázok, xilanázok stb. mellett [Ugwuanyi, 2016].

Az akvakultúrákban általánosan használt fehérjeforrás, a halliszt jelentősen növeli a haltenyésztés költségeit. Ugyanakkor a megfelelő minőségű és mennyiségű fehérje elfogyasztása elengedhetetlen a halgazdaságok fenntartásához. A költségek csökkenthetők alternatív fehérjeforrások alkalmazásával, valamint proteázokkal, melyek növelik a fehérjebontás hatékonyságát [Ugwuanyi, 2016].

A proteázok nemcsak a haszonállatok takarmányának adalékanyagai lehetnek, de állateledelek gyártásához is alkalmazzák őket. A száraz tápok izletességének fokozása érdekében gyakran használnak különböző fehérjehidrolizátumokat. Ezeket az adalékanyagokat állati szövetekből (húsból vagy húsipari melléktermékből) enzimes elfolyósítással állítják elő, a kapott hidrolizátumok pedig növelik a kutya- és macskaeledelek ízintenzitását [Philipps-Wiemann, 2018].



10.3. ábra: Inozit-hexafoszfát hidrolízise [Troesch, 2013]

A gabona és az olajos magvak foszfortartalmának jelentős része fitát (inositol-hexafoszfát) formájában van jelen. A fitinsavas kötést a szárnyasok és a sertések enzimeji nem képesek hidrolizálni, ezért a fitinsavban lévő foszfor nem hasznosul, a trágya magas foszfáttartalma pedig növeli a környezetterhelést [Dublecz, 2011]. A takarmányhoz adagolt fitáz enzim hatására felszabadul a vegyületben lévő foszfor (10.3. ábra), ezáltal javul a tápanyagfelvétel és csökken a környezetszennyezés. A fitáz az egyik legelterjedtebben használt adalékanyag, a szárnyastakarmányok 90%-ában, a sertéstakarmányok 70%-ában megtalálható [Internet 2]. Halgazdaságokban szintén előszeretettel alkalmazzák, mivel növeli az elérhető foszfor mennyiségét, továbbá a fitát-protein komplexek lebontása révén a fehérjék hasznosulását is elősegíti. A haltápokhoz adagolt fitáz az ásványi anyagok hozzáférhetőségét is fokozza, így azok mesterséges utánpótlása részben vagy teljesen kiváltható vele [Ugwuanyi, 2016].

Az adalékanyagként használt enzimeket fermentációs úton, többnyire gombák, pl. *Trichoderma* és *Aspergillus* fajok segítségével állítják elő. Az egyik leggyakrabban alkalmazott fermentációs törzs a *Trichoderma reesei*, a kinyert enzimekszármazék általában többféle vegyület hidrolízisére képes, xilanáz és fitáz mellett gyakran β -glükánáz- és cellulázaktivitás is kimutatható [Internet 3]. Enzimadalékok használata esetén hátrányként jelentkezhet, hogy változhat a takarmány tárolhatósága, továbbá a hőkezelési eljárásnál figyelembe kell venni az enzim hőstabilitását [Dublecz, 2011].

10.3. Silózás

Nemcsak a takarmányok készítése és felhasználása során játszik fontos szerepet a biokatalízis, de a tartósítás széles körben elterjedt módszere, a silózás is megfelelően kontrollált mikrobiális tevékenységen alapul. Az anaerob erjesztés célja a növényi légzés leállítása, valamint a káros mikroorganizmusok tevékenységének gátlása. Ennek érdekében a tejsavtermelő baktériumok számára kedvező környezeti körülményeket kell biztosítani. Az általuk termelt szerves savak lecsökkentik a pH-t, és gátolják a takarmány romlásáért felelős mikrobák metabolizmusát. A tejsavtermelők legismertebb képviselői a *Lactobacillus*, *Pediococcus* és *Leuconostoc* nemzetségbe tartozó fajok.

Irodalomjegyzék

- Choct M. (2006): Enzymes for the feed industry: past, present and future. *World's Poultry Science Journal*, 62(1), pp. 5–15.
- Dublecz K. (2011): *Takarmányozástan*. Debreceni Egyetem, Nyugat-magyarországi Egyetem, Pannon Egyetem.
- Internet 1: Scott M. (é. n.): *Outlook for the Enzyme Industry*. Elérhető: <https://www.feedadditives-global.com/wp-content/uploads/Day-1-16.40-Marian-Scott.pdf> (letöltve: 2020. 05. 22.).
- Internet 2: *Feed Phytase Solutions*. Elérhető: <http://animalnutrition.dupont.com/productsservices/feed-enzymes/feed-phytase-solutions/> (letöltve: 2020. 05. 22.).
- Internet 3: *Takarmányenzimek*. Elérhető: <https://panadditiv.hu/takarmanyenzimek/> (letöltve: 2020. 05. 22.).
- Philipps-Wiemann P. (2018): Proteases – animal feed. In: *Enzymes in Human and Animal Nutrition*. Academic Press, Chapter 14.
- Schmidt J. (szerk.) (2003): *A takarmányozás alapjai*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Troesch B., Laillou A. és Fowler A. (2013): Absorption studies show that phytase from *Aspergillus niger* significantly increases iron and zinc bioavailability from phytate-rich foods. *Food and Nutrition Bulletin*, 34(2), pp. 90–101.
- Ugwuanyi J. O. (2016): Enzymes for nutritional enrichment of agro-residues as livestock feed. In: *Agro-Industrial Wastes as Feedstock for Enzyme Production*. Academic Press, Chapter 10.

11. Enzimek alkalmazása a tisztítószerknél

Pámel Fanni¹¹

Enzimeket rendkívül széles körben alkalmaznak a vegyiparban, az élelmiszeriparban, az állati takarmányok gyártásában, a gyógyszerek előállítása során, a bőriparban és sok más területen is. Az élelmiszeriparban ősidők óta kihasználják előnyös tulajdonságaikat például sajt vagy sör gyártására, azonban tisztítószerként történő felhasználásuk csak 1914-ben kezdődött el. Ekkor állatokból izolált tripszin felhasználásával állítottak elő detergenset. Mikroba által (fermentációs úton) történő termelésük 1960-tól terjedt el igazán [Liu, 2017; Olsen, 1998].

A különböző mosó- és tisztítószeres már régtől ismertek, melyek a bennük lévő detergens segítségével a zsíros szennyeződések eltávolítására képesek. Mivel a ruhákat és a különböző kisebb háztartási eszközöket gyakran más, fehérje- és szénhidrátjellegű szennyezők vonják be, melyek eltávolítására az egyszerű detergens nem elegendő, ezért új megoldásra volt szükség. Ekkor kezdtek különböző fehérje- és szénhidrátbontó enzimeket adagolni a termékekbe.

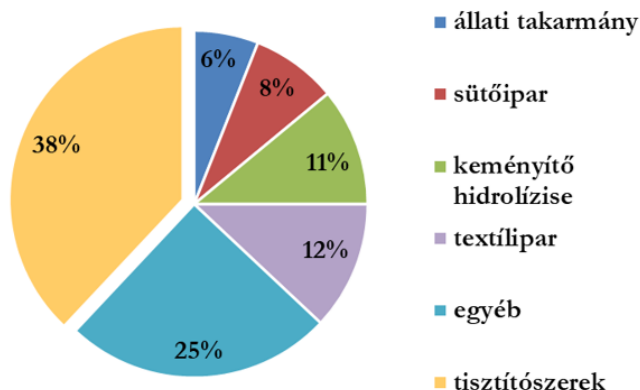
Miután az első enzim tisztítószer piacra került, olyan nagy népszerűsége tette, hogy a háziasszonyok körében, hogy nagyobb volumenű gyártásuk is megkezdődhetett. Az igazi áttörést a mosóporokban felhasznált proteázok hozták meg. Az első ipari, baktériumeredetű *Bacillus-proteáz* 1959-ben dobták piacra, majd akkor nőtt ki magát igazán, amikor a dán Novozymes is megkezdte gyártását [Hänninen, 2010].

A mosószerenzimek nagy sikerét követően néhány probléma is felmerült a használatukból adódóan. A tisztítandó ruhák gyakran szennyezetté váltak azáltal, hogy a nyers fehérjebontó enzim nem tisztított formában került a mosószerbe. Sok esetben az is előfordult, hogy túladagolták a tablettázott formulát, mivel nem voltak ahhoz hozzászokva, hogy ilyen kis mennyiségű mosószer alkalmas a foltok tisztítására. Ezáltal kezdetben az enzimek kinyerése nem bizonyult olyan gazdaságosnak, mint amire számítottak.

1971-ben a tisztítószer-iparnak egy válságot is át kellett vészelnie. A probléma abból eredt, hogy az évek során elterjedt a mosószeres por formában történő árusítása. Ez azt vonta maga után, hogy a finom por a levegőben könnyen szétterjedt, és a nyálkahártyán keresztül felszívódva, valamint a bőrrel érintkezve számos esetben allergiás reakciót okozott [Hänninen, 2010]. Később emiatt mikrokapszulákat, valamint granulátumokat alakítottak ki, amelyek a levegőben nem terjedtek, viszont a vízben való jó oldódási tulajdonságuk megmaradt. Ma már számos eltérő formátumban kerülnek piacra mosószeres, így mindenki kiválaszthatja a számára megfelelőt.

11 Pannon Egyetem, Mérnöki Kar,
Bio-, Környezet- és Vegyészmérnöki Kutató-fejlesztő Központ,
Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatócsoport
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.
pamelfanni96@gmail.com

Enzimek felhasználása iparágak szerint



11.1. ábra: Felhasznált enzimek iparágak szerinti megoszlása [Pécs, 2016]

Az iparban alkalmazott enzimek nagy része hidrolitikus aktivitású, feladatuk a természetes anyagok degradációja a különböző technológiákban. Ahogy a 11.1. ábrán látható, a legnagyobb mennyiségben a különböző tisztítószerекben használják fel az enzimeket.

Az enzimetartalmú detergensек legfontosabb képviselői a háztartási mosószerек, mosogatószerек, valamint az ipari tisztítószerек. A háztartási mosószerек elsősorban proteázokat tartalmaznak, de sok esetben amilázok, cellulázok és lipázok is megtalálhatók bennük. A folyékony és porállagú mosószer eltérő ionerősségű mosóközeget eredményez, amit szintén figyelembe kell venni az enzim kiválasztásakor. A mosogatószerекnél előtérbe kerülnek a lipázok (a zsíros szennyeződések miatt), de itt is fontos szerepük van a proteázoknak. Az ipari tisztítószerек felhasználásai közé tartozik pl. az egészségügyben a kórházi berendezések, felületek, orvosi eszközök, készülékek tisztítása, illetve más élelmiszer-higiéniai szempontból fontos felületek kezelése, lemosása (pl. vágóhidakon és húsfeldolgozó üzemekben a vérrel szennyezett felületek kezelése). Az itt alkalmazott enzimek típusát a szennyezés fajtája, valamint a felhasználás egyéb körülményei is befolyásolják [Pécs, 2016].

11.1. Enzimek alkalmazásának előnyei és nehézségei

A mosás során fennálló környezet nem kifejezetten kedvező az enzimek számára. Ennek legfőbb oka, hogy viszonylag magas, 40–90 °C-os környezetet alkalmaznak, a közeg erősen lúgos, akár 12-es pH-jú is lehet, valamint jelen lehetnek inaktíváló hatású komponensek is.

A tisztítószerек különböző adalékokat is tartalmaznak a hatékonyabb és látványosabb eredmény elérése végett. Gyakran alkalmazott detergensек a kationos tenzidek, az alkohol-szulfátok és az alkohol-éter-szulfátok. Vízlágyítóként alkalmaznak zeolitokat, nátrium-karbonátot, nátrium-citrátot stb. Fehérítőként jelen lehet nátrium-perborát, nátrium-perkarbonát stb. Ezek mellett tartalmazhatnak még különböző stabilizátorokat, habzásgátló anyagokat, optikai fehérítőket, korróziógátló anyagokat, illatanyagokat és színezékeket is. Töltőanyagként folyékony mosószerекben a víz, porállagú termékekben pedig a nátrium-szulfát használata terjedt el.

Mivel ilyen sokféle hatóanyag kerül az egyes mosószerекbe, ezért nehéz olyan enzimet találni, amely minden körülménynek megfelel, és elviseli az adott adalékok által nyújtott környezeti viszonyokat.

A biológiai úton előállított tisztítószerек legnagyobb előnye viszont, hogy alacsonyabb hőmérsékleten is képesek eltávolítani a szennyezőket, valamint csökkentik a vízfogyasztást. Ezáltal úgy váltak környezetbarát és gazdaságilag is kedvező megoldássá, hogy hatékonyságuk nem csökkent. További előnyük a környezetvédelem szempontjából, hogy megújuló forrásból származnak, és a mosószerекbe történő beépítésükkel csökkenthető az egyéb vegyszerek mennyisége, valamint kevesebb oldószer és toxikus komponens kerül felhasználásra [Gürkök, 2019].

Az, hogy az enzimес mosószerек alacsonyabb hőmérsékleten is alkalmazhatók, előnyös számunkra, mivel így az érzékenyebb anyagok, például a gyapjú és a selyem is könnyedén tisztíthatók, valamint a festett anyagok, például egy farmer is jobban megőrzi színét.

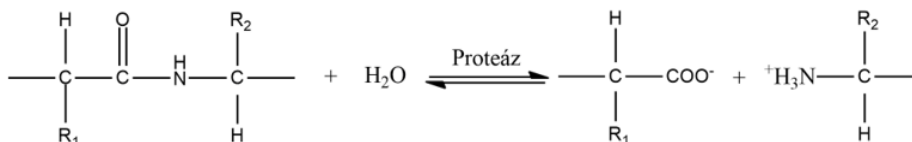
11.2. Tisztítószerекben használt enzimek

A mai mosószerек több enzim kombinációját tartalmazzák, például lipázokat, amilázokat, cellulázokat, viszont a legnagyobb mennyiségben használt enzimek az alkális proteázok maradtak [Singh, 2016].

Proteázok

A proteázok, más néven peptidázok, az összes élő szervezetben megtalálhatók, és esszenciális szerepet töltenek be a metabolikus folyamatokban. A fehérjék peptidkötéseit hidrolízis útján bontják először kisebb polipeptidekre, majd aminosavakra [Gürkök, 2019]. A reakció három részfolyamatból áll (11.2. ábra):

- Az enzim és a szubsztrát között létrejön az átmeneti komplex.
- A peptidkötés hasítása, az N-terminális peptid leválása.
- Nukleofil támadás a még kötött peptidre, valamint az enzim eredeti formában való visszanyerése.



11.2. ábra: Peptidkötés hidrolízise

Mivel a mosás során a felületeken kevés fehérjeeredetű szennyeződés figyelhető meg, és a rendszer távol áll a kémiai egyensúlytól, ezért a nagyobb molekulák szintézise elhanyagolható, a folyamat nagyobb valószínűséggel zajlik a bomlás irányába.

A proteázok több szempont szerint csoportosíthatók [Gürkök, 2019]:

- a proteázt termelő organizmus szerint:
 - állati eredetű,
 - növényi eredetű,
 - mikrobiális eredetű,
- támadási pontjuk alapján:
 - endopeptidázok,
 - exopeptidázok,
- az enzim pH-optimuma alapján:
 - alkálikus (tripszin, kimotripszin),
 - neutrális (cisztein-endopeptidázok),
 - savas proteázok (pepszin),
- az aktív centrumban található funkciós csoportok szerint:
 - szerin-,
 - cisztein-,
 - aszparaginsav-,
 - treonin-, vagy
 - fém (metallo) proteázok.

A legtöbb esetben a tisztítószerек többféle proteázt tartalmaznak, ami hatékonyabb szennyezéscsökkentést tesz lehetővé.

A legtöbb sejt esetében az optimális működéshez a neutrális pH-tartomány az ideális. Ebből kifolyólag enzimeik is ezekhez a körülményekhez szoktak. Mivel emiatt kevésbé tűrik a szélsőséges körülményeket, ezért a neutrális proteázok felhasználása nem terjedt el nagymértékben, főleg a sütőiparban és a húsiparban alkalmazzák őket.

A savas proteázok közé tartoznak az aszparaginsav-, valamint a glutaminsav-proteázok. Ezeket az enzimeket főleg emésztést segítő étrend-kiegészítőkben alkalmazzák, de ipari méretekben a tej alvasztására, sajtgyártásra hasznosítják.

A tisztítószerек között főként az alkálikus proteázok játszanak fontos szerepet. Az ebbe a csoportba tartozó proteázok pH=8–12 között működnek aktívan, pH-optimumuk 9–11 között van. Optimális hőmérséklet-tartományuk 50–70 °C közötti. A lúgos proteázok ugyan nem fémproteázok, többségük mégis fémiot igényel aktivitásához és stabilitásához. Az ezt elősegítő ionok közé tartozik a Ca^{2+} , Mg^{2+} és a Mn^{2+} .

Alapvetően elmondható, hogy nagy a hőstabilitásuk, ezért jó detergentsek, valamint jól bírják a lúgos közeget, tehát alkális stabilitásuk is ideális. Azonban belátható, hogy minden szennyeződés más összetételű és biológiai tulajdonságú, valamint a különböző textileken más-más mértékben fér hozzá a proteáz a foltokhoz. Emiatt a különféle szennyező komponensek eltávolítása eltérő mechanizmussal megy végbe [Aaslyng, 1991].

Ahhoz, hogy egy proteáz megfelelő tisztítószer-komponens legyen, megfelelő pH- és hőmérséklet-tartománnyal kell rendelkeznie (20–70 °C, pH=7–11), valamint a tisztítószer többi komponensével is kompatibilisnek kell lennie. Emellett fontos, hogy ne csak egy adott típusú szennyeződésre legyen specifikus, hanem lehetőleg alkalmas legyen különféle szerkezetű fehérjeláncok bontására is.

Ipari méretekben azokat az enzimeket termelik, melyek jól bírják a szélsőséges körülményeket, illetve megfelelnek a fentebb támasztott követelményeknek. Ezek bakteriális enzimek, melyek jellemző csoportja a szubtilizinek csoportja. Neve a *Bacillus subtilis*-től ered, azonban ipari léptékű termelésre a *Bacillus amyloliquefaciens* és a *Bacillus licheniformis* törzsek alkalmasak.

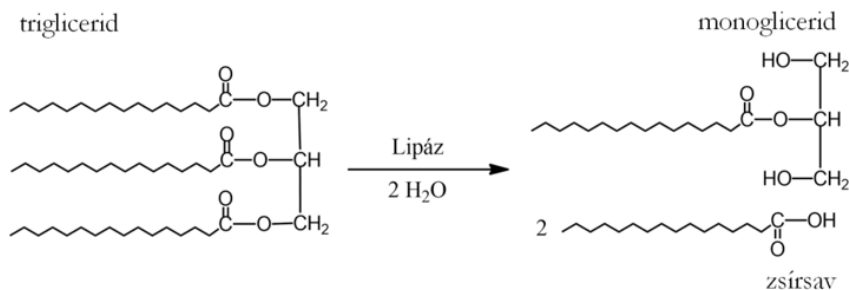
A szubtilizinek szerinproteázok. Katalitikus helyük három aminosavból áll, ezek alkotják a katalitikus triádot. Ezek az aminosavak a szerin, a hisztidin és az aszparaginsav. Az összes detergensként használt szubtilizin mérete 27 kDa körül van [Maurer, 2004]. Mind mosógépekben, mind pedig mosogatógépekben előszeretettel alkalmazzák őket. Funkciójuk a tipikus szennyeződések által megjelenő fehérjefoltok lebontása, például a vér, tej, tojás és különböző szőszok által okozott szennyeződések eltávolítása.

A szubtilizinek fontosságát az is bizonyítja, hogy 2002-ben az Európai Unióban az előállított és a felhasznált tiszta enzimek mennyisége 900 tonna volt.

Lipázok

A lipázok triacil-glicerín-hidrolázok, melyek a karbonsavakban lévő észterkötések hasítására képesek. A triglicerideket hidrolízis útján di-, mono-gliceridekké és zsírsavakká bontják (11.3. ábra), mindhárom észterkötés hasítása esetén pedig a zsírsavak mellett glicerín keletkezik.

Az olajos szennyeződések rosszul oldódnak vízben, külön fázist alkotnak. A végbemenő reakció ezáltal részlegesen heterogén fázisú, csakúgy, mint maga a katalízis. A lebontó folyamat a víz–olaj határretegen megy végbe. A reakció sebességét befolyásolja a zsírsav szénláncának hossza. A közepes és a hosszú szénláncú zsírsavészterek hidrolízise általában gyorsabban végbemegy, mint a rövid szénláncú társaiké. A hossz mellett a kettős kötések száma és helyzete is befolyásolja a folyamatot.



11.3. ábra: Triglicerid részleges hidrolízise

A lipázok többféle zsírsavmolekula átalakítására képesek, azonban bizonyos mértékben régióspecifitás és sztereospecifitás jellemzi őket. A régió-specifitás azt jelenti, hogy a glicerín két szélső szénatomján lévő, tehát a primer alkoholcsoportok észtereit az enzim több nagyságrenddel gyorsabban hidrolizálja, mint a közbelső szénatomon lévő csoportot. Ugyan sok enzim a glicerinszármazékokra specifikus, vannak olyanok is, amelyek más alkoholos vegyületek észtereit is képesek elbontani.

A lipázok között több hőstabil enzim is található. Ilyenek például a *Thermus aquaticus* és a *Thermus thermophilus*, melyekkel magasabb hőmérsékleten, 50–70 °C között lehet dolgozni. Ez mindenképpen előnyös a szennyeződések eltávolítása szempontjából, ugyanis ezáltal a diffúziós anyagátadás és a lipidek oldhatósága nő, valamint a befertőződés veszélye lecsökken. Ez lehetővé teszi az élelmiszer-, papír-, gyógyszer- és bőriparban való alkalmazásukat is.

Becslések szerint minden évben kb. 1000 tonna lipázt használnak fel 13 milliárd tonna detergens előállításához.

A kereskedelembe kerülő lipázok nagy százaléka mikrobiális eredetű, mivel ezek termelése oldható meg ipari méretekben. A gombák, az élesztők és a baktériumok között is találhatók olyan törzsek, melyek lipázt termelnek. A fonalas gombák körében ilyen például az *Aspergillus* vagy a *Penicillium*. Az élesztők esetében a különböző *Candida* törzsek végzik ezt a feladatot, a baktériumok között pedig a *Pseudomonas*ok és a *Thermus*ok említhetők meg, melyek közül az előbbi szerves közegben is jól alkalmazható.

A legtöbb enzim működését a fémionok jelenléte befolyásolja. A kétértékű ionok előnyösek, mivel elősegítik a fehérje leválását a sejtről és növelik az aktivitást. Ezzel ellentétben a nehézfém-ionok gátolják ezen enzimek működését.

További enzimkészítmények

Az említett két fő enzim típuson kívül a tisztítószerекben alkalmaznak még mannázokat, melyek a mannán gerincben jelenlévő β -1,4 kötéseket hidrolizálják. A mannán mannózmolekulákból felépülő vázanyag. Főként a csokoládéban, paradicsomban, fagyaltban és a testápolási szerekben található meg, mint sűrítőszer vagy stabilizátor. A mannánszennyeződések eltávolítása nehéz feladat, mivel hidrogénkötéseken keresztül adszorbeálódnak a pamutruhák cellulózsálaihoz. Mannáz enzim segítségével a vízben oldhatatlan mannán vízdoldható mannózzá alakítható, így a mosás során öblítéssel eltávolítható [Kumari, 2019].

Az amilázok keményítő eredetű szennyeződések eltávolítására alkalmasak. A keményítő a gélesedési folyamat révén – egyéb anyagokat is megkötve – a tisztítandó felülethez tapad, ezért lebontása fontos a hatékony tisztítás érdekében. Az iparban főként *Bacillus licheniformis* és *Bacillus amyloliquefaciens* fermentációjával állítják elő [Pécs, 2016].

Ezenkívül cellulázok is hasznosíthatók a mosószerekben, pl. textilek tisztítására, a szín fényerejének védelmére és szövetlágyításra. Felhasználásukkal a szövetek úgy tisztíthatók meg, hogy az anyag felülete csak kis mértékben sérül [Kumari, 2019].

Összességében elmondható, hogy az enzimes detergensек jobb tisztítási tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a szintetikus változatok. Alacsonyabb hőmérsékleten nagyobb aktivitást mutatnak, valamint környezetvédelmi szempontból is előnyösebbek. A folteltávolítás után is megtartják aktivitásukat, a ruhák szövetminőségét és élénk színét kevésbé károsítják.

A felületaktív anyagok és enzimek együttes hatásának köszönhetően a szennyeződések hatékonyabban távolíthatók el a textilsálákból, így nem meglepő a hatalmas mennyiségben történő felhasználásuk.

Irodalomjegyzék

- Aaslyng D., Gormsen E. és Malmos H. (1991): Mechanistic studies of proteases and lipases for the detergent industry. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 50, pp. 321–330.
- Gürkök S. (2019): Microbial enzymes in detergents: a review. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 10(9), pp. 75–81.
- Hänninen O. P. (2010): *Medical and Health Sciences*. Vol. IV. EOLSS Publishers.
- Liu X. és Kokare C. (2017): Microbial enzymes of use in industry. In: *Biotechnology of Microbial Enzymes: Production, Biocatalysis and Industrial Applications*. Elsevier, pp. 267–298.
- Maurer K. H. (2004): Detergent proteases. *Current Opinion in Biotechnology*, 15(4), pp. 330–334.
- Olsen H. S. és Falholt P. (1998): The role of enzymes in modern detergency. *Journal of Surfactants and Detergents*.
- Pécs M. (2016): *Biotechnológia – Ipari enzimek*. Oktatási segédanyag, BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék, Budapest.
- Singh R., Kumar M., Mittal A. és Mehta P. K. (2016): Microbial enzymes: industrial progress in the 21st century. *3 Biotech*, 6(2).

12. Textilipar

Csiszár Emília¹²

12.1. Bevezetés

A textilipar, hasonlóan a könnyűiparhoz tartozó más iparágakhoz (pl. papíripar, bőripar stb.), nagy múltra tekint vissza, és folyamatosan fejlődő tevékenysége révén évezredek óta az emberiség szolgálatában áll. Bár a szálak és rostok kinyerésére és feldolgozására szolgáló folyamatok jelentősen változtak az elmúlt korokban, a textilipari termékek előállítása ma is különböző technológiai lépések sorozatával valósul meg. A textiltechnológia a nyersanyag, vagyis a szálanyag létrehozásától (pl. szintetikus szálak) és/vagy elsődleges feldolgozásától (pl. a természetes szálak kikészítése) kezdve kiterjed a végtermék (pl. fonal, cérna, kelme, konfekcionált termék stb.) előállítására, továbbá a textiltermékek használatával összefüggő szolgáltatásokra (pl. textiltisztítás) és a használat utáni újrahasznosításra is.

2015-ben a világ szálanyag-fogyasztása 95,6 millió tonna volt, és ennek kb. 1/3-a természetes szál. A természetes szálanyagokból – a kedvező használati és egyedülálló viselési tulajdonságaiknak köszönhetően – főként ruházati termékeket és lakástextiliákat gyártanak. Legfontosabb és legnagyobb mennyiségben termelt természetes szál a pamut, amelynek termelése az elmúlt 60 évben folyamatosan nőtt. 2030-ra valószínűleg eléri a 25,9 millió tonna/év értéket. Az elmúlt évtizedekben a szintetikus szálak térhódítása figyelhető meg, ami elsősorban az alacsony árak tulajdonítható. Az előállításuk tömegtermeléssel és mindig az adott célra legmegfelelőbb tulajdonságok kialakításával valósul meg.

A hagyományos nedves textilkikészítési technológiák (12.1. ábra) vizes közegben zajlanak. Mindegyik folyamatban heterogén fázisú reakciók sorozata játszódik le, amelyek révén a szálanyag eredeti tulajdonságai jelentősen megváltoznak, és a végcélnek, azaz a felhasználói igényeknek megfelelő új tulajdonságok alakulnak ki. A textilkikészítési technológiák víz-, vegyszer- és energiaigényesek, jelentős mennyiségű meleg és esetenként színes szennyvizet bocsátanak ki, amelynek magas a szervesanyag-tartalma és az ionkoncentrációja, a pH-ja pedig eltér a semlegestől.



12.1. ábra: A pamut hagyományos nedves textilkikészítési technológiájának legfontosabb részfolyamatai

12 Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
csiszar.emilia@vbk.bme.hu

Az elmúlt időszakban az ipar számos területén a hagyományos eljárásokat felváltották a környezetbarát, biotechnológiai úton megvalósított technológiák. A textilkikészítésben is hasonló változások játszódtak le, a folyamatot textil-biotechnológiának nevezzük [Nierstrasz, 2010]. A textil-biotechnológia a vegyszeres textilkikészítési folyamatok helyettesítésére alkalmas enzimmatalizált folyamatokat vizsgálja, és a kilencvenes évek közepétől kezdődően az elmúlt két évtizedben ez volt a textilipari kutatás-fejlesztés legdinamikusabban fejlődő területe. A természetes szálak fő alkotói (cellulóz, hemicellulóz, fehérjék stb.) enzimmatalizált reakcióban módosíthatók, így számos lehetőség adódik a biokatalizátorok alkalmazására (12.2. ábra). A kutatások hajtóereje főként a környezetvédelmi előírások szigorodása, az energia és a víz árának folyamatos növekedése, valamint az új és szokatlan tulajdonságú textíliák iránt megnövekedett fogyasztói igény volt.



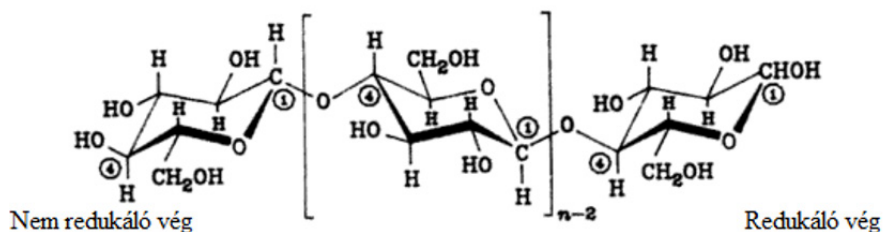
12.2. ábra: A cellulózalapú szálanyagok enzimes textiltechnológiai folyamatai [Shahid, 2016]. Színek: narancs: ipari technológia; türkizkék: meglévő technológia; sárga: fejlesztés alatt lévő technológia

Ebben a fejezetben a cellulózalapú szálanyagokra koncentrálunk. Bemutatjuk a szerkezeti polimereket és a szálak legfontosabb jellemzőit, továbbá az alkalmazott enzimeket és az enzimmel segített textiltechnológiai folyamatokat. Röviden kitérünk más szálanyagok ígéretes enzimes folyamatainak bemutatására is.

12.2. A cellulózalapú szálanyagok szerkezeti polimerjei

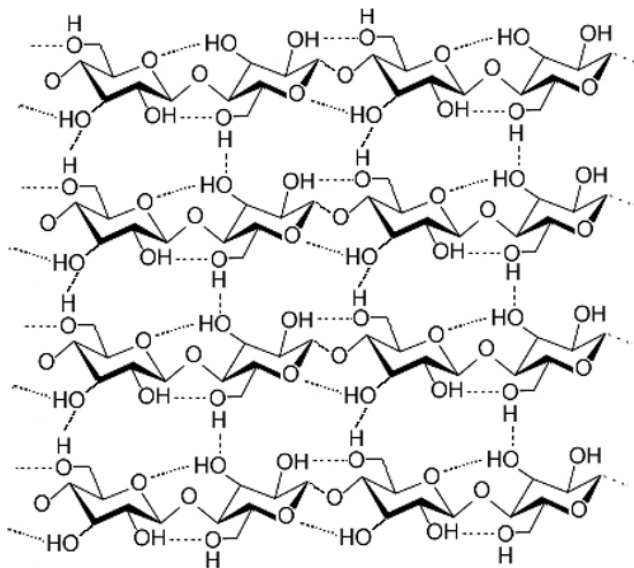
Cellulóz

A növényi eredetű szálanyagok legfontosabb szerkezeti polimerje a cellulóz, ami az egyik legfontosabb természetes polimer. A cellulóz nagy molekulatömegű lineáris homopolimer, ami D-glükóz-egységekből áll, amelyek $\beta(1 \rightarrow 4)$ glikozidkötéssel kapcsolódnak egymáshoz (12.3. ábra). Minden glükopiranoz-egységben három szabad hidroxilcsoport van, és a közöttük létrejött intramolekuláris hidrogénkötések stabilizálják a glikozidkötést, továbbá hozzájárulnak a merev molekulaszervezet kialakulásához. A glikozidkötés savas vagy enzimmatalizált hidrolízise révén a cellulóz glükózra bontható. A cellulóz redukáló típusú poliszacharid.



12.3. ábra: A cellulóz molekula szerkezete [Ek, 2009]

Az egymás mellett futó cellulóz molekulákat is hidrogénkötések rögzítik, és elősegítik a cellulóz síkok kialakulását (12.4. ábra). A síkok aggregációja révén nagy szakítószilárdságú elemi fibrillák képződnek, amelyek egymásra rakódásával mikro- és makrofibrillák alakulnak ki.



12.4. ábra: Intra- és intermolekuláris hidrogénkötések a cellulózban
[Laghi, 2013]

Hemicellulózok

A hemicellulózok olyan poliszacharidok, amelyek polimerizációs foka 200-nál kisebb, glükózból vagy más monoszacharidokból (mannóz, galaktóz, xilóz és arabinóz) épülnek fel (heteropolimerek), továbbá oldalcsoportokat és elágazásokat is tartalmazhatnak. Vegyszerekkel és hővel szemben kevésbé ellenállóak, mint a cellulóz. A legfontosabb hemicellulózok a xilánok. A pamutszál legkülső rétegében található kis mennyiségű hemicellulóz mannóz-, fukóz- és xilóz-monoszacharidokból épül fel. A lenből extrahált hemicellulózok cukoranalízise alapján megállapítható, hogy a lenben a xilánok, a glüko- és galaktomannánok, valamint a galakturonánok a legfontosabb nem cellulóz poliszacharidok.

A hemicellulózok hidrogénkötéssel kapcsolódnak a cellulóz molekulákhoz, és beborítják a cellulóz fibrillákat. Kitöltik a fibrillák közti teret, és ezáltal a cellulóz fibrillák speciálisan „kereszt kötött” hálózatát alakítják ki a sejtfalban. Holocellulóznak nevezzük a cellulóz és a hemicellulózok összességét [Ek, 2009].

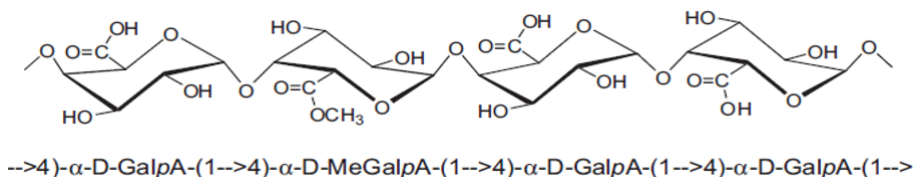
Lignin

A lignin a polifenolok csoportjába tartozó térhálós makromolekula, ami a fás anyagok fontos alkotója. Az aromás és alifás szerkezeti egységek változatos összekapcsolódása következtében a lignin a legbonyolultabb szerkezetű természetes polimer. Összetartja a fás növények sejtjeit, továbbá biztosítja a sejtfal megfelelő merevségét és rugalmasságát [Ek, 2009].

A lignin és a hemicellulózok (főként xilánok) között kovalens kötés jön létre a bioszintézis során, a hemicellulózok pedig hidrogénkötéssel kapcsolódnak a cellulózhoz. A lignin, a hemicellulózok és a cellulóz által létrehozott szerkezetet lignin–szénhidrát komplexnek nevezzük. A lignin–szénhidrát komplex a növényi sejt egy speciális hálózatának tekinthető, ahol a szénhidrátalkotók között a lignin a keresztkötő ágens. A lignin és a hemicellulózok izolálása a molekulák degradációja nélkül nem lehetséges [Ek, 2009].

Pektin

A pektin savas karakterű, nem cellulóz poliszacharid, amely meghatározza a kialakuló sejtfal növekedését, szerkezetét és porozitását, továbbá a sejtek expanzióját, ionmegkötő és védekezőképességét. A pektin változatos szerkezetű blokk-kopolimer, amelyben többféle eltérő molekulaszakaszok figyelhetők meg. A legjellemzőbb molekulaszakaszok D-galakturonsavból $\alpha(1\rightarrow4)$ -es kapcsolással jönnek létre. A karboxilcsoportok egy része metil-észterként van jelen (12.5. ábra), az O-2 és O-3 csoportok pedig részlegesen acetilezve vannak [Ek, 2009].



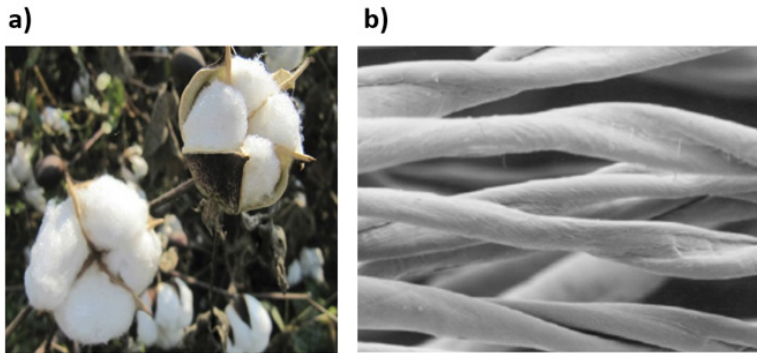
12.5. ábra: A pektinmolekula szerkezete [Ek, 2009]

A pektinben lévő glikozidkötés savakkal és lúgokkal szemben érzékeny, továbbá pektináz enzimek is katalizálják a hidrolitikus bontását. Ha a pektinben kevés a metilészter, a szabad karboxilcsoportok képesek a jelenlévő kalciumionokkal erős ionos kötést kialakítani, ezáltal a molekulaláncok összekapcsolódnak. A sok metilésztert tartalmazó pektin kevésbé stabil, hidrolízisre érzékeny, és degradációja könnyebben végbemegy. A pamut tömegének átlagosan 0,7–1,2%-a, a len 1–9%-a pektin [Agrawal, 2005].

12.3. A legfontosabb cellulózalapú szálanyagok

A pamut

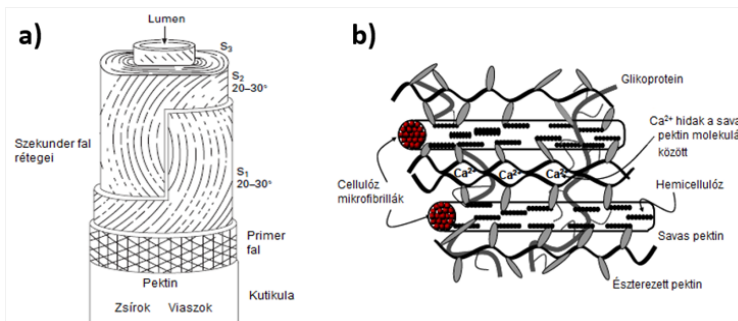
A textilipari célra felhasznált szálanyagok kb. 50%-a pamut, ami a gyapotcserje magszála. Az érett szál a tok nyílása után bekövetkező száradás során alakul ki (12.6. ábra).



12.6. ábra: (a) A gyapotcserje a tok nyílása után; (b) Az érett pamutszál hosszanti elektronmikroszkópos képe [Gordon, 2007]

A pamut elemi szál egyetlen, a végén hegyesedő, hosszú sejt, amely réteges szerkezetű (12.7. ábra). Az egyes rétegek speciális szerepet töltenek be a szál fejlődése során, összetételük és morfológiájuk is különbözik, és más, a felhasználás szempontjából fontos szál tulajdonságok kialakulásáért felelősek [Rusznák, 1988].

A pamutszál primer és szekunder falra tagolható. A primer fal hálós szerkezetű (12.7. ábra), rugalmas és duzzadásra képes. Cellulózból és nem cellulóz alkotókból áll, a cellulóz fibrillákat xiloglükán és pektin veszi körül. A primer fal tömegének kb. 15%-át glikoproteinek teszik ki, amelyeknek a poliszacharid láncai részét képezik annak a mátrixnak, amelybe a cellulóz fibrillák beágyazódnak. A primer fal rugalmas és duzzadásra képes [Tripp, 1951; Agrawal, 2005].



12.7. ábra: (a) A pamut elemi szál szerkezete [Gordon, 2007];
(b) A primer fal cellulóz- és nem cellulóz típusú alkotóinak elhelyezkedése és a közöttük lévő kölcsönhatások [Agrawal, 2005]

A szekunder fal (12.7. ábra) nagy polimerizációs fokú és szűk molekulatömeg-eloszlású cellulózból áll. A szál növekedése során a szekunder fal a primer fal belső felületére koncentrikusan lerakódó cellulóz rétegekből alakul ki, miközben a lumen (bélüreg) fokozatosan csökken. A koncentrikus rétegekben az elemi fibrillák mikro- és makrofibrillákká aggregálódnak, a fibrillák orientáltsága az egyes rétegeken belül gyakran változik. A szál közepén lévő bélüreg protoplazmát és sejtfoliadékat tartalmaz. A szál külső rétegében viaszok, pektinek, fehérjék és egyéb kísérőanyagok is találhatóak [Tripp, 1951]. A nyers pamut krémszíne a polifenoloknak tulajdonítható [Gordon, 2007].

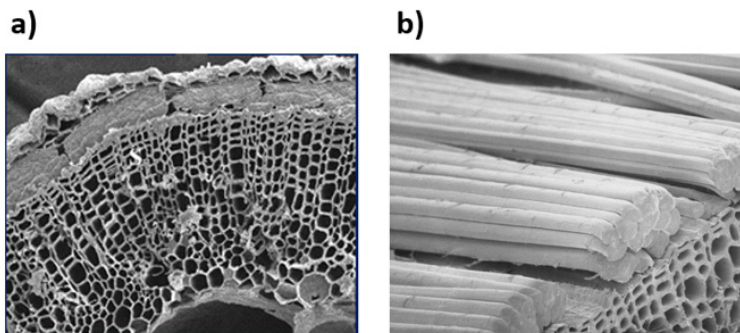
A viaszos anyagokból álló kutikula hidrofób védőréteggé borítja be a szálat, biztosítja a nedvesség és egyéb komponensek megtartását, továbbá a szál fizikai, kémiai és biológiai hatásokkal szembeni ellenállását. A viaszos anyagok (azaz a „pamutviasz”) fő alkotói nagy móltömegű alkoholok és zsírsavak szabad és észterezett formában. A pamut viasztartalmának nagy részét a nedves textilkikészítési folyamatok első szakaszában (előkészítés) eltávolítják, hogy a szálfelület hidrophil legyen. A visszamaradó pamutviasz a további feldolgozást és a felhasználást segíti. Inhomogén eloszlása miatt a szál összességében hidrophil [Gordon, 2007].

Bár a pamutmaghéj-maradványok nem alkotórészei az elemi szálnak, mégis a pamut nem cellulóz kísérőanyagai közé sorolandók. Kémiaiilag a pamutmaghéj cellulózból, hemicellulózokból és ligninből áll. A fonalak és kelmék mindig tartalmaznak maghéjmaradványokat, amelyeket el kell távolítani az előkészítés során, mivel a cellulóztól eltérő színük és morfológiájuk miatt rontják a szövet esztétikai hatását [Csiszár, 1998].

A len

A textilipari feldolgozásra kerülő lenrostot a növény (*Linum usitatissimum*) szárából a feltárás során nyerik ki. A szárban a kéreg alatt kb. 20 rostköteg van, ami kötegenként 10–40 elemi szálat tartalmaz (12.8. ábra). Az elemi szálatokat pektin tartja össze. A rostkötegeket is pektin kapcsolja a szomszédos sejtekhez, és mechanikai, biológiai vagy kémiai feltáráskor ezt a kapcsolatot bontják, hogy a rostkötegek szabadabbá váljanak (12.8. ábra) [Akin, 2007].

A lenrost szögletes keresztmetszetű elemi sejtekből épül fel, cellulóztartalma kb. 70%. A rostkötegeket alkotó elemi sejtek primer fala viaszt, pektint és lignint tartalmaz. A ligninnek fontos szerepe van a szekunder fal fibrillás szerkezetének összetartásában, és ezáltal befolyásolja a szál szakítószilárdságát is. A hemicellulóz-alkotók döntően glükomannánok és xilánok. A fehérjék a primer falban és a lumenben találhatóak [Sharma, 1991].



12.8. ábra: SEM-felvételek (a) a lenkóró keresztmetszetéről és (b) a pektináz enzimes feltárás után szabadabbá vált rostkötegekről [Akin, 2007]

A rostszerkezet és az elemi sejteket összetartó pektinréteg miatt a len merevebb, mint a pamut. Az elemi szálakat összetartó pektin a kémiai kezelések során kioldódhat, és a rostköteg elemi sejtekre eshet szét, ami jelentős szakítószilárdság-csökkenést okozhat. A lenszövetek gyűrődnek, rugalmatlanok, rossz a kopási ellenállásuk. A rossz gyűrődésfeloldás és a gyenge kopásállóság speciális kikészítéssel javítható [Vigo, 1994].

12.4. Enzimes textiltechnológiák

A textiliparban sikeresen alkalmazott enzimek döntően a hidrolázok (amilázok, cellulázok, proteázok, pektinázok és lipázok) és az oxidoreduktázok (főként lakkázok) csoportjába tartoznak. A kereskedelmi forgalomban lévő hidrolitikus enzimeket sülteszett (szubmerz, folyadékfázisú) fermentációval (SF) termeltetik, ami könnyebben kézben tartható és jobban szabályozható, mint a szilárd fázisú (SSF). Ugyanakkor az SSF termelékenysége nagyobb, a végtermék koncentrációja magasabb, a fermentum sokáig tárolható, nem képződik szennyvíz, alacsonyabb a beruházási és működtetési költsége, és a feldolgozási műveletek egyes esetekben elhagyhatók. Az SSF szerepe a lignocellulózok ipari felhasználása során folyamatosan nő. Az összes ipari enzim kb. 17%-át a textil-, bőr- és szőrmeipar használja [Sevella, 2011; Shahid, 2016; Cavaco-Paulo, 2003; Eriksson, 1998].

Enzimes írtelenítés

Az amiláz enzimekkel végzett írtelenítés a legrégebbi és legsikeresebb enzimes textiltechnológia. A keményítő irányag hidrolitikus degradációja során kisebb molekulatömegű fragmentumok keletkeznek, amelyeket az enzimes kezelést követő mosás során távolítanak el a szövetből. A folyamatban elsősorban az α - és β -amiláz, valamint a glükóamiláz enzimek hatékonyak. Az írtelenítés hatékonysága elsősorban az enzimkomplex α -amiláz-aktivitásától függ [Eriksson, 1998; Karmakar, 1999].

Az α -amiláz működéséhez kalciumion szükséges, emiatt kemény vízben végzik az írtelenítést. A kalciumion valószínűleg az enzim aktív helyeit stabilizálja azáltal, hogy a beépülésével kialakuló keresztkötés rögzíti a molekulaszervezetet. A kalcium növeli az enzim hőstabilitását, tenzidekkel szembeni ellenálló képességét, valamint lassítja az α -amiláz spontán aktivitáscsökkenését. A hőstabilitás fontos, hiszen magasabb hőmérsékleten a szál és a keményítő irányag duzzadása fokozódik, ami javítja az enzim hozzáférhetőségét és a hidrolízis hatékonyságát [Nierstras, 2010].

Az írtelenítésre használt amilázok aktivitása általában a pH 5,5–7,0 tartományban és 25–55 °C között maximális. Hőstabil amilázokkal 95 °C fölött is lehet írteleníteni, így alkalmazhatók a folyamatos technológiákban. Az enzimoldat nemionos nedvesítőszert is tartalmaz. Az enzimes írtelenítés során a cellulóz nem károsodik, a folyamatnak lényegesen kisebb az energia- és vízigénye, mint a vegyszeres (savval, lúggal vagy oxidálószerrel végzett) folyamatnak, a keletkező szennyvíz mennyisége kisebb, vegyszermentes és könnyebben kezelhető [Karmakar, 1999].

Bio-előkészítés

A bio-előkészítés a hagyományos lúgos főzés környezetbarát alternatívája. Célja a cellulózalapú szálanyagok természetes kísérőanyagainak enzimmel segített eltávolítása, és ennek révén jó és egyenletes nedvszívó képességű textília előállítás.

A nyers pamut enzimes előkészítése során a pektin degradációja a fő folyamat. A pektináz enzimek a kutikula mikropórusain és repedésein keresztül eljutnak a kutikula és a primer fal pektinben gazdag rétegéhez (12.7. ábra), és katalizálják annak degradációját. Mivel a pektin mátrixpolimer, a degradációja révén a többi kísérőanyag is eltávozik a felületről. Ennek révén bekövetkezik a viaszos kutikula „lehámozódása”. A folyamat nem teljes, de megfelelő mértékű ahhoz, hogy a szálfelület jól nedvesedő legyen. Nemionos nedvesítőszer alkalmazása nagymértékben segíti az enzim hozzáférhetőségét a hidrofób szálfelületen lévő szubsztrátmolekulákhoz [Nierstras, 2010].

A pektinázok az ipari enzimek kb. 10%-át teszik ki, és általában celluláz kísérőenzim-tartalommal kerülnek forgalomba [Pedrolli, 2009]. A savas közegben aktív pektináz enzimeket általában fonalas gombák (pl. *Aspergillus niger*) termelik, a lúgos közegben hatékony enzimeket pedig főként baktériumok. A pektinben lévő kalciumionok komplexbe vitele (pl. EDTA-komplekképzővel) fokozhatja az enzimes degradációt, mivel növeli a szubsztrátum hozzáférhetőségét az enzimmolekula számára. Ugyanakkor a komplexképző az enzimmolekula szerkezetét és működését is befolyásolhatja, és az enzimaktivitás csökkenhet. Ez különösen olyan enzimek esetén fordul elő, amelyek tartalmaznak (általában két vegyértékű) fémionokat (pl. Mg, Ca, Zn, Fe, Cu, Mo). Számos bakteriális pektát-liáznak a működéshez szüksége van kalciumionra, és ezekre az EDTA inhibitorként hat [Agrawal, 2005].

Lúgos közegben a felületen lévő kísérőanyagok duzzadnak, és nő a hozzáférhetőségük; a degradációt követően a viaszos bomlástermékek a jelenlévő felületaktív anyagokkal jól emulgeálhatók, és a lúgos oldatban tarthatók. További előny, hogy a lúgos bio-előkészítést általában a szintén lúgos közegben végzett fehérítés követi. A forgalomban lévő és alkalikus közegben aktív pektináz enzimeket elsősorban a pamut kötött kelmék szakaszos bio-előkészítésére ajánlják. A savas közegben aktív pektinázok is hatékonyak a pektin hidrolízisében. A len bio-előkészítésére, vagyis a len nem cellulóz kísérőanyagainak eltávolítására a pamutnál bevált enzimeket alkalmazzák.

A bio-előkészített szövet nedvesedőképessége jó, fehérsége azonban elmarad a hagyományosan főzött szövetétől. A bio-előkészítést követő hidrogén-peroxidos fehérítés után viszont már megegyezik a fehérség a hagyományosan főzött szövet fehérségével. Mivel csak a viasz egy része távozik a felületről, a kelme fogása lágyabb, mint a hagyományosan főzötté. A szakítószilárdság nem csökken, hiszen a cellulóz nem degradálódik.

A bio-előkészítés kidolgozásának fő hajtóereje a lúgos főzés vegyszerigényének, valamint a lúgos kezelést követő öblítő lépések nagy vízigényének csökkentése volt. Mivel a bio-előkészítést enyhén lúgos közegben végzik, az öblítő lépések száma jelentősen csökkenthető, ami 50–70%-kal kisebb vízfelhasználást eredményez. A folyamat hátránya a hosszú reakcióidő, továbbá az, hogy a bio-előkészítés a pamutmaghéjak eltávolítására nem alkalmas, mivel a maghéjak lignin–holocellulóz rendszerének bontása és a maghéj degradációja pektináz enzimekkel nem lehetséges [Nierstras, 2010].

Biofehérítés

A biofehérítés során a hagyományos oxidációs fehérítés célját, vagyis a cellulózalapú szálanyagok színes kísérőanyagainak degradációját és/vagy eltávolítását enzimkatalizált reakciókkal érjük el. Főként a xilanázok (endo-1,4- β -D-xilanáz, β -xilozidáz), valamint a lignin degradációját katalizáló oxidatív enzimek eredményesek a folyamatban. További enzimek a xilánmolekula rövid oldalláncainak lehasításában és az acetilcsoportok hidrolízisében vesznek részt. Számos gomba (pl. *Trichoderma harzianum*) és baktérium (pl. *Bacillus subtilis*) képes xilanázokat termelni. A gombaeredetű xilanázok általában savas vagy semleges közegben működnek. A bakteriális xilanázok között vannak savas és lúgos közegben eredményes és hőstabil enzimfajták is.

A xilanáz enzimes kezelés indirekt fehérítési módszer, mivel a xilanáz nem hat a színért felelős ligninre, de a lignintartalom csökkenését eredményezi. Hőstabil, lúgos közegben aktív és cellulázmentes xilanáz enzimeket (főként endo-xilanázokat) alkalmaznak a folyamatban. Egyik lehetséges mechanizmus szerint a xilanáz a ligninhez kémiaiilag kötődő xilán hidrolízisét katalizálja a lignin–szénhidrát komplexben. A xilánok hidrolízise révén módosul a szubsztrátum szerkezete, és nő a hozzáférhetősége az enzimes kezelést követő kémiai kezelések vegyszereivel szemben. Ennek révén a lignin eltávolítása eredményesebbé válik, és javul a világosság.

A pamutmaghéjban is a xilánok a legfontosabb hemicellulóz-alkotók. A xilanázok egyrészt közvetlenül a xilán enzimkatalizált degradációja révén segítik a maghéjdegradációt, másrészt közvetett módon hatnak, és a lignin–szénhidrát komplex megbontásával lehetővé teszik a lignin kioldódását az enzimes kezelés után alkalmazott vegyszeres folyamatokban. A lignin eltávolítását a visszamaradó maghéjfragmentumok világosodása is bizonyítja. A papíriparban (lásd 13. fejezet) alkalmazzák a xilanáz enzimes kezelést mint előfehérítést, és bizonyították, hogy a vegyszerfelhasználás a xilanázos kezelést követő kémiai fehérítés során kb. 10–20%-kal csökkenthető [Ek, 2009].

Egy másik ígéretes biofehérítési technológia a barna színű lignin enzimkatalizált degradációján alapul. A ligninben lévő fenil-propán egységeket összekapcsoló szén–szén és éterkötések bontása redoxreakciókkal lehetséges. Hatékony ligninbontó enzimeket a fehérkorhadást okozó gombák (pl. *Phanerochaete chrysosporium*) termelnek. A lignin degradációját katalizáló oxidatív enzimek fontos képviselői a lignin-peroxidázok (LiP), a mangán-peroxidázok (MnP) és a lakkázok (Lac). A *Ph. chrysosporium* képes az enzimek katalitikus ciklusához szükséges hidrogén-peroxidot biztosító glioxál-oxidáz enzim termelésére is. Feltételezhető, hogy a lignin enzimes degradációja redoxmediátorok segítségével zajlik, amelyek molekulamérete megfelelően kicsi ahhoz, hogy a pórusokon keresztül elérjék a sejtfal lignifikált régióit, és ott katalizálják az aromás gyűrű oxidációját. A folyamat ipari alkalmazását és széles körű elterjedését az enzimek magas ára akadályozza [Eriksson, 1990; Ruiz-Duenas, 2009].

A legtöbb izolált és jellemzett lakkáz gombaeredetű. Hosszú ideig a LiP-t, ma inkább a lakkázt tekintik a lignin biodegradációjában legfontosabb enzimnek. A lakkáz működéséhez ugyanis csupán oxigénre van szükség, míg a peroxidázokéhoz hidrogén-peroxidra. Legeredményesebb a delignifikáció a három enzim együttes alkalmazásával. Feltételezik, hogy a lignin degradációjának kezdeti szakaszában a lakkázok hatnak, és amikor már vannak peroxid-bomlástermékek a rendszerben, akkor megkezdik működésüket a peroxidázok.

A pamutmaghéj lignin–holocellulóz rendszere szubsztrátspecifikus – hidrolitikus (celluláz, xilanáz, pektináz), továbbá lakkáz- és lignin-peroxidáz-aktivitással rendelkező – enzimkomplexszel eredményesen degradálható. A hidrolitikus és oxidatív enzimek a len lignintartalmú kiséőanyagainak eltávolításában is hatékonyak.

A cellulóزالapú szálanyagok biofehérítése témakörben a legtöbbet vizsgált enzim a glükóz-oxidáz (GOD), mely a β -D-glükózt enyhén savas közegben (pH 4,5–7) és 40 °C körüli hőmérsékleten glükonsavvá oxidálja hidrogén-peroxid keletkezése közben. A glükonsav képes az oldatban jelenlévő fémionok komplexálására, és ezáltal stabilizálja a keletkező hidrogén-peroxidot.

A hidrogén-peroxid savas közegben inaktív, fehérítésre nem alkalmas. Fehérítő hatást vagy lúgos közegben és magas hőmérsékleten képes kifejteni, vagy aktivátorokkal (pl. MgSO_4 , vízüveg, karbamid; tetraacetil-etilén-diamin /TEAD/ stb.) alacsonyabb hőmérsékleten és semlegeshez közeli pH-n. A fehérítéshez tehát a glükóz-oxidázos enzimes reakciót követően a hidrogén-peroxidot tartalmazó oldat pH-ját és hőmérsékletét a fehérítéshez szükséges értékekre (pH 10–11; 90–95 °C) módosítják, vagy különböző aktivátorokat adagolnak.

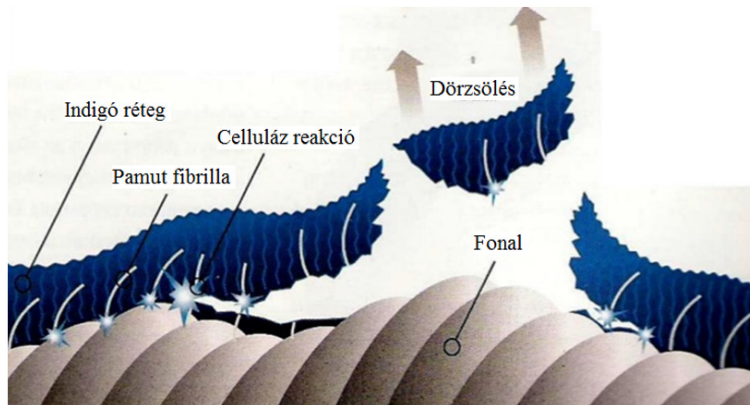
A keményítő iranyag enzimes lebontásából származó glükóz is felhasználható a hidrogén-peroxid generálására, és így a folyamat környezetvédelmi és gazdasági szempontból is jelentős lehet. A keletkező glükózkoncentráció glükóamiláz enzimekkel fokozható. Nagyobb glükózkoncentrációval (kb. 5 g/l) a hidrogén-peroxid-koncentráció is növelhető, ami fontos a megkívánt fehérség eléréséhez [Bankar, 2009].

Biokikészítés

A szálanyagok végső, a felhasználó számára fontos tulajdonságainak kialakításában is eredményesen alkalmazhatók enzimek. A biokikészítés célja jó minőségű, kiváló felületi tulajdonságú textiltermékek előállítása környezetet károsító vegyszeres kezelés nélkül. Cellulózalapú szálanyagok biokikészítése során a legfontosabb enzimek a cellulázok (endo-1,4- β -D-glükánázok, cellobiohidrolázok stb.), amelyek endo- és exoenzimekből álló enzimrendszerek. Az ipari cellulázok döntően gombaeredetűek, és kiemelkedő jelentőségűek a *Trichoderma*- és *Aspergillus*-fajok. A cellobióz hidrolízisét glükózzá az 1,4- β -glükózidáz katalizálja, amely szigorúan véve nem tartozik a cellulázok közé, hiszen a cellulózra nem hat. Az endo- és exocellulázok működésére a szinergizmus a jellemző [Kück, 1995; Miettinen-Oinonen, 2004].

A biokikészítés legsikeresebb példája az enzimes farmerkoptatás (biostoning), amely a nyolcvanas évek végétől kezdve szinte teljesen kiszorította a korábban alkalmazott kőmosást. A farmerszövetet indigóval színezik, amely a szálfelületen kötődik meg, és gyenge a dörzsállósága. A celluláz enzimek is a szálfelületen hatnak. Az enzimkatalizált degradáció és az alkalmazott intenzív mozgatás (dörzsölés) együttes hatása a szálfelület legkülső rétegének eltávolítását („leborotválását”) eredményezi. A felületen megkötődött indigómolekulák is szabaddá válnak, és a kezelőoldatba távoznak, vagy a folyamat során a szálfelületről leválasztott finom cellulóz por felületén kötődnek meg (12.9. ábra). Az intenzív mozgatás (pl. forgódobos mosógépben) elengedhetetlen része a folyamatnak, mivel nagymértékben fokozza az enzimes hidrolízist, és elősegíti a bomlástermékek és a színezék eltávolítását a szálfelületről. Az enzimes farmerkoptatás során számolni kell azzal, hogy a szabaddá vált indigómolekulák bizonyos mértékben visszarakódhatnak a szálfelületre (backstaining), amit például a farmernadrág

zsebének kékes elszíneződése is jelez. A folyamat kedvezőtlen, hiszen rontja a koptatással elért hatást, mivel csökkenti a színezett és koptatott részek közötti kontrasztot. A 12.1. táblázat az enzimes farmerkoptatás jellemző paramétereit tartalmazza [Kück, 1995; Polaina, 2007].



12.9. ábra: A celluláz enzimes farmerkoptatás mechanizmusának sematikus ábrázolása [Agrawal, 2017]

Korábban *T. reesei* teljes cellulázokat (endo- és exoenzimek) alkalmaztak, amelyekkel rövid kezelési idővel lehetett hatékony indigóeltávolítást elérni. Jelenleg endoglükánázban gazdag enzimeket használnak, amelyek előnye a teljes cellulázokkal szemben, hogy a farmerszövet szakítószilárdság-vesztése és az indigó-visszarakódás mértéke is mérsékelte.

A farmerkoptatáshoz hasonlóan más színezett konfekcionált termékek (pl. pulóver, póló stb.) esetén is új, a közelmúlt divatirányzatának megfelelő tulajdonságok (viseletes, kopott hatást keltő kelme felület; puha, lágy fogás; tompa és hamvas szín) alakíthatók ki enzimekkel (12.1. táblázat, Biokikészítés). Az enzimes fakítás során elsősorban a varratok mentén és a vastagabb kelmerészeknél, szegélyeknél csökken a színmélység, és jelentős színhalványulás érhető el.

12.1. táblázat: A celluláz enzimes farmerkoptatás és biokikészítés paramétere [Gupta, 2014]

Paraméter	Enzimes farmerkoptatás	Biokikészítés
pH	4,8–8,0	4,5–8,0
Hőmérséklet	30–55 °C	40–65 °C
Kezelési idő	15–60 perc	30–60 perc
Fürdőarány	8:1–20:1	8:1–15:1
Enzimkoncentráció (szövet tömegre von.)	0,5–3%	0,5–2%
Segédanyag	Felületaktív anyag a backstaining mérséklésére	Nemionos felületaktív anyag

Sikeres ipari biokikészítési technológia a cellulóزالapú szálanyagok pillingesedési hajlamának csökkentése (biopolishing) is. A folyamat során celluláz enzim kezelésével és az intenzív mozgatás révén keltett megfelelő mértékű nyíró hatással a felületből kiálló laza, rövid szálvégeket és fibrillákat távolítják el. Az alkalmazott fürdőáramnak fontos szerepe van a folyamatban: minél kisebb, annál nagyobb felületi dörzsölés érhető el. Bármely celluláz enzim kezelés során a cellulóزالapú kelmék fogása és esése is jelentősen javul. A merev len- és lentartalmú szövetek esetén endoglükánázban gazdag enzimek készítményeket alkalmaznak, amelyekkel még könnyű lentermékek lágyítása (biofinishing) is megvalósítható jelentős cellulóz degradáció nélkül [Gupta, 2014].

Egyéb enzim technológiák

A hancsrostok (len és kender) feltárása (áztatása), vagyis a növény szárában lévő és textilipari szempontból értékes rostkötegek (12.8. ábra) kinyerése az egyik legrégebbi mikrobiológiai folyamat. A rostkötegeket pektin kapcsolja a szár többi részéhez. A feltárás során a szár részlegesen degradálódik, így a rostkötegek elválaszthatók a szomszédos szövetektől. Jelenleg a harmatáztatás a legelfogadottabb feltárási eljárás, amelyben a harmat, az esővíz és a napsütés hatására a növény szárában termelődő mikroorganizmusok elvégzik a pektin lebontását. A folyamat időjárásfüggő, nehezen kontrollálható, időigényes és változó rostminőséget eredményez. Sikertült azonosítani a harmatáztatásban részt vevő gombatörzseket, amelyek a pektin degradációját katalizáló enzimeket (pl. endo-poligalakturonázok) termelik. Ma már kaphatók kereskedelmi forgalomban olyan enzimek készítmények, amelyekkel a len feltárása enyhén savas közegben és 40–50 °C-on, komplexképző jelenlétében hatékonyan elvégezhető. Az enzim feltárást pektinázban gazdag és cellulázaktivitással is rendelkező enzimkeverékekkel a leghatékonyabb, továbbá kiváló és állandó rostminőséget biztosít.

A szintetikus szálak textilkikészítési technológiájában is alkalmazhatók enzimek. Elsősorban a poliészter [poli(etilén-tereftalát)] enzim kezelését vizsgálták, és bizonyították, hogy számos enzim (pl. lipázok, kutinázok, észterázok) eredményesen alkalmazható a szál felület hidrofilitásának növelésére. A folyamat során a szál felületén lévő észtercsoportok bomlanak. A keletkező hidroxil- és karboxilcsoportok növelik a felületi energiát, nő a szálanyag nedvességhelvétele, továbbá az új funkciók csoportoknak köszönhetően javul a színezékhelvétel is [Nierstras, 2010].

Új kutatási irányok az enzim textiltechnológiák területén

Az utóbbi időben a kutatások egyre inkább az enzim folyamatok kombinálását és ezáltal rövidebb, valamint víz- és energiatakarékosabb technológiák kidolgozását célozzák. Az enzimgyártó cégek olyan – különböző aktivitású – enzimek készítményeket ajánlanak, amelyeknek a pH- és hőmérséklet profilja átfed, így lehetséges az együttes alkalmazásuk. Az irtelenítés és a bio-előkészítés kombinálása során például az α -amiláz enzim irtelenítést és a pektináz-hemicelluláz, illetve a pektináz-hemicelluláz-celluláz enzimekkel végzett bio-előkészítést egy lépésben alkalmazták üzemi körülmények között, enyhén savas pH-n, komplexképző jelenlétében. Vannak már a bio-előkészítés és biokikészítés, továbbá a színezés és biokikészítés egyidejű megvalósítására alkalmas enzimek is.

Jelentős kutatási potenciál összpontosul a biofehérítésre és a színes szennyvizek hatékony enzimes elszíntelenítésére is. Speciálisan a hancsrostokra alkalmas enzimek és technológiák

fejlesztése is a célok között szerepel. Az enzimek immobilizálása jelentős gazdasági haszonnal járhat. Mivel az immobilizálás (pl. nanoanyagok felületén) általában növeli az enzimek stabilitását, a folyamat technológiai szempontból is előnyös lehet. Fontos cél még a textil biotechnológia területén az üzemelés felgyorsítása, vagyis a laboratóriumi és félüzemi kísérletekben eredményes enzimes folyamatok ipari megvalósítása. Ezt segíthetik az enzimes folyamatok hatékonyságának javítását célzó kutatások, például kisfrekvenciás ultrahang vagy plazmakezelés alkalmazásával, hiszen a rövidebb enzimes folyamatokat könnyebb a meglévő ipari technológiákba integrálni [Shahid, 2016].

Az enzimes textiltechnológiák környezeti hatásai

A cellulózalapú szálanyagok hagyományos nedves textilkikészítési technológiája víz-, vegyszer- és energaintenzív folyamatok sorozatából áll. A hagyományos textiltechnológiákban kb. 8000 különböző vegyszert használnak, és az éves vegyszerfelhasználás kb. 6 millió t. A nedves textilkikészítési folyamatok a textilipar teljes energiafogyasztásának kb. 38%-át használják fel, ami döntően a szárításra és a kezelőoldatok felmelegítésére fordítódik. A kezelések általában lúgos közegben zajlanak, és a folyamat végén, a lúg eltávolításához nagy mennyiségű öblítővizet használnak. A technológiák tehát elsősorban a szennyvíz révén hatnak közvetlenül a környezetre. 1 kg textil előállításához átlagosan 50–100 l víz szükséges [Slater, 2003; Muthmu, 2017].

Az enzimek általában semlegeshez közeli pH-n és 40–60 °C hőmérsékleten működnek eredményesen. A bio-előkészítést követően például nincs szükség semlegesítésre. Ennek köszönhetően az öblítéshez felhasznált víz mennyisége 20–50%-a, a folyamat időigénye pedig kb. 50%-a a vegyszeres előkészítés értékeinek. Továbbá a szennyvíz valamennyi mért jellemzője kisebb (teljes szervesanyag-koncentráció /TOC/ 20%-kal, kémiai /COD/ és biológiai oxigénigény /BOD/ 41 és 31%-kal), mint amit a lúgos főzés után mértek.

A kombinált enzimes irtelenítés–bio-előkészítés gazdaságosságát és környezeti hatásait összevetve az enzimes irtelenítés–lúgos főzés értékeivel megállapítható, hogy 1 tonna pamutra vonatkoztatva a költségmegtakarítás 226 euró, 6000 literrel kevesebb vízre van szükség, továbbá az energiamegtakarítás 615 kWh. Az eredmények tehát egyértelműen jelzik, hogy a kombinált enzimes folyamat gazdasági és ökológiai hatása kedvezőbb, mint az enzimes irtelenítése és a lúgos főzése.

Irodalomjegyzék

- Agrawal B. J. (2017): Bio-stoning of denim – an environmental-friendly approach. *Current Trends in Biomedical Engineering and Biosciences*, 3, Article ID 555612.
- Agrawal P. B. (2005): *The Performance of Cutinase and Pectinase in Cotton Scouring*. PhD Thesis, University of Twente, The Netherlands.
- Akin D. E., Condon B., Sohn B., Foulk J. A., Dodd R. B. és Rigsby L. L. (2007): Optimization for enzyme-retting of flax with pectate lyase. *Industrial Crops and Products*, 25, pp. 136–146.
- Bankar S. B., Bule M. V., Singhal R. S. és Ananthanarayan L. (2009): Glucose oxidase – an overview. *Biotechnology Advances*, 27, pp. 489–501.
- Cavaco-Paulo A. és Gübitz G. M. (2003): *Textile Processing with Enzymes*. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- Csiszár E., Szakács G. és Rusznák I. (1998): Combining traditional cotton scouring with cellulase enzymatic treatment. *Textile Research Journal*, 68, pp. 163–167.
- Ek M., Gellerstedt G. és Henriksson G. (2009): *Pulp and Paper Chemistry and Technology. Vol. 1: Wood Chemistry and Wood Biotechnology*. Walter de Gruyter GmbH & Co., Berlin.
- Eriksson K.-E. L., Blanchette R. A. és Ander P. (1990): *Microbial and Enzymatic Degradation of Wood Components*. Springer-Verlag, Berlin.
- Eriksson K.-E. L. és Cavaco-Paulo A. (1998): *Enzyme Applications for Fiber Processing*. ACS Symposium Series 687, American Chemical Society, Washington, DC.
- Gordon S. és Hsieh Y.-L. (2007): *Cotton Science and Technology*. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- Gupta V., Schmoll M., Herrera-Estrella A., Upadhyay R. S., Druzhinina I. és Tuohy M. G. (2014): *Biotechnology and Biology of Trichoderma*. Elsevier, Amsterdam.
- Karmakar S. R. (1999): *Chemical Technology in the Pre-treatment Processes of Textiles*. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Kück U. (1995): *The Mycota. Vol. 2: Genetics and Biotechnology*. Springer, Berlin.
- Laghi L. (2013): *Cellulose strand.svg* [kép]. Wikimedia Commons. Elérhető: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cellulose_strand.svg (letöltve: 2020. 05. 22.).
- Miettinen-Oinonen A. (2004): *Trichoderma reesei Strains for Production of Cellulases for the Textile Industry*. PhD Thesis, VTT Publications 550, Espoo.
- Muthu S. S. (2017): *Textiles and Clothing Sustainability. Sustainable Textile Chemical Processes*. Springer, Singapore.
- Nierstrasz V. A. és Cavaco-Paulo A. (2010): *Advances in Textile Biotechnology*. Woodhead Publishing Limited, Oxford.
- Pedrolli D. B., Monteiro A. C., Gomes E. és Carmona E. C. (2009): Pectin and pectinases: production, characterization and industrial application of microbial pectinolytic enzymes. *The Open Biotechnology Journal*, 3, pp. 9–18.
- Polaina J. és MacCabe A. P. (2007): *Industrial Enzymes*. Springer, Dordrecht.
- Ruiz-Dueñas F. J. és Martínez Á. T. (2009): Microbial degradation of lignin: how a bulky

recalcitrant polymer is efficiently recycled in nature and how we can take advantage of this. *Microbial Biotechnology*, 2, pp. 164–177.

Rusznák I. (1988): *Textilkémia*. Tankönyvkiadó, Budapest.

Sevella B. (2011): *Biomérnöki műveletek és folyamatok*. Typotex Kiadó, Budapest.

Shahid M., Mohammad F., Chen G., Tang R.-C. és Xing T. (2016): Enzymatic processing of natural fibers: white biotechnology for sustainable development. *Green Chemistry*, 18, pp. 2265–2281.

Sharma H. S. S. és Van Sumere C. F. (1991): *The Biology and Processing of Flax*. M Publications, Belfast.

Slater K. (2003): *Environmental Impact of Textiles: Production, Processes and Protection*. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.

Tripp V. W., Moore A. T. és Rollins M. L. (1951): Some observations on the constitution of the primary wall of the cotton fiber. *Textile Research Journal*, 21, pp. 886–894.

Vigo T. L. (1994): *Textile Processing and Properties: Preparation, Dyeing, Finishing and Performance*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands.

13. Biokatalízis a papíriparban

Bélafiné Bakó Katalin¹³

13.1. Bevezetés

A mai modern papírgyártás alapanyaga a fa és a hulladékpapír. A fából kiinduló technológiai folyamat három lépésből áll:

- alapanyag-előkészítés,
- lapkészítés a papírgépen,
- kiserelés.

Az alapanyag-előkészítés első fázisában a fa áztatása és hántolása után az aprítás és a pépesítés következik, ahol kémiai úton választják szét a fa rostjait finomabb szálakra, főként a cellulóz szálakat összeragasztó lignin oldásával. A pépet átmossák, majd egy őrlési művelet „szálasítja” a rostszalakat (foszlatás).

A használt papír újrafeldolgozásánál is először aprítják az alapanyagot, majd a vizes pépesítés és a tisztítás következik. A használt papírban található adalékanyagok eltávolítása az egyik legfontosabb lépés, mivel főként a nyomtatás során bekerülő tintától kell megszabadulni. A tisztított papírpépet adják hozzá a fából kapott cellulóz péphez. Ezeket a lépéseket csomótlanítás, keverés, hígítás, további tisztítás és osztályozás követheti.

A második fázisban a cellulózpéphez különböző töltő-, adalék- és segédanyagokat kevernek attól függően, hogy a célterméknek milyen fizikai és kémiai tulajdonságokkal kell rendelkeznie. A hozzáadott anyagok módosíthatják a papír átlátszóságát, fehérségét, növelik a szilárdságát, szabályozzák a nedvszívó képességét stb. A cellulózpépet homogénre keverik, ez a papírpép lesz a lapkészítés kiinduló anyaga.

A lapkészítés során a papírgépen a folyékony, híg (0,5–1%-os) papírpépet egy mozgó szitaszövetre terítik, majd hengerek közé vezetik (préslés), így szárazanyag-tartalma már 50% körülire nő, s a szárítószakaszon a víztartalom 4–5%-ra csökken. Végül a papírszalagot simítják. A kiserelésnél a papírszalagot ún. tamburra (henger alakú vasdobra) tekercselik fel, majd ebből állítják elő hosszvágással a felhasználói igénynek megfelelő méretű tekercseket.

Az alapanyag-előkészítés első fázisában zajló műveletek meglehetősen sok vizet, energiát és vegyszert igényelnek, rengeteg szennyvizet termelnek, egészségkárosító anyagok keletkeznek, a szaghatás sem elhanyagolható stb. Egyszóval távolról sem környezetbarát az eljárás [Singh, 2016]. A papíripari technológia bizonyos lépéseinél azonban lehetőség van biokatalizátorok alkalmazására, melyekkel a fenti hátrányok egy része kiküszöbölhető.

A pépesítés után nyert nyers cellulóznak sárgás színe van, amit a visszamaradt lignin és a kromofórok okoznak. A nem kívánt színanyagok eltávolítása történhet biotechnológiai úton, enzimek és mikrobiák segítségével, így kiváltható a nagy vegyszerigényű klóros fehérités [Szendefy, 2006]. A használt papír tintátlanítása a másik nagy terület, ahol biokatalizátorok használhatók. Végül a fából kiinduló papírgyártásnál a gyantatartalom okozta szurokszerű kiválások megakadályozására lehet enzimes kezelést alkalmazni.

13 Pannon Egyetem, Mérnöki Kar,
Bio-, Környezet- és Vegyészmérnöki Kutató-fejlesztő Központ,
Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatócsoport
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.
belafine.bako.katalin@mk.uni-pannon.hu

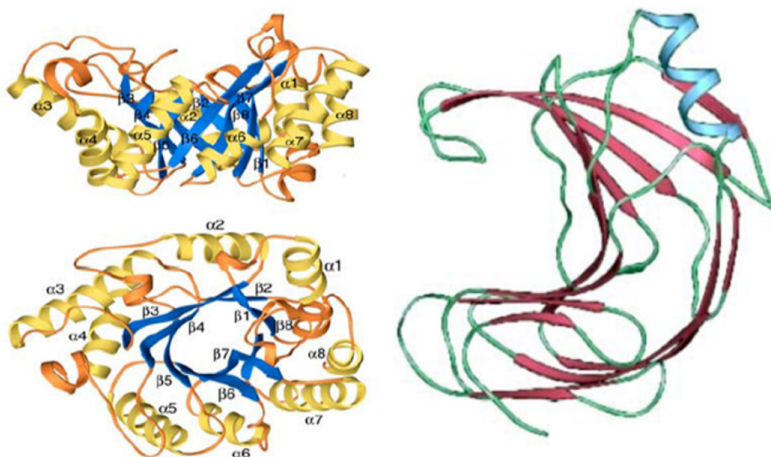
13.2. Fehérités

A nyers cellulóz hagyományos fehéritése során klórt, illetve klór-dioxidot használnak. A klór kémiai reakcióba lép a vízzel, s a felszabaduló oxigén a színezékrészeket elroncsolja. Eközben a cellulózban visszamaradt ligninből klórlignin, a lebontási termékekből klórfenolok képződnek, amelyek a lúgos oldatban feloldódnak, s kimoshatók a rostok közül.

A természetben előforduló fehérén korhasztó gombák (pl. *Trametes versicolor*) a lignint emésztik, így az elkorhadt fa fehér lesz. E folyamatban részt vevő oxidoreduktáz- és hidrolitikus enzimek lehetnek alkalmasak az ipari felhasználásra, s a klór helyettesítésére.

A lignin-peroxidáz [Yakubu, 2019; Grönqvist, 2003] és a mangánfüggő peroxidáz a lignin nemfenolos és fenolos alegységeit oxidálja. Magas árak miatt egyelőre még csak korlátozottan alkalmazzák őket.

A lakkázok aromás vegyületek oxidációját katalizálják, s már félüzemi méretben is alkalmazták őket a delignifikációs folyamatban. A lakkáz enzimek nemcsak a lignintartalmat csökkentik, hanem hatékonyan bontanak le olyan toxikus anyagokat, amelyek a papírmalomból kerülnek a szennyvízbe: többféle fenolos vegyületet és klórlignin-származékot.



13.1. ábra: Xilanáz szerkezete (katalitikus domén) [Szendefy, 2006]

A hemicellulázok közül a xilanázokat használják eredményesen a fehéritésnél [Szendefy, 2006], napjainkban ez az egyetlen, a papíripar üremeiben is alkalmazott biofolyamat. Mindenképpen cellulázmentes (vagy kevés cellulázt tartalmazó) xilanáz készítményt használnak, hogy a xilanázos kezelés fehéritő hatása mellett a rostok (és a papír) mechanikai szilárdsága ne romoljon [Viikary, 2003]. Keményfából kiinduló papírgyártásnál hatékonyabb a művelet, mivel azok hemicellulóz-tartalma több mint 90%-ban xilán. Amennyiben a xilán mellett jelentős mennyiségben található más hemicellulóz, úgy további enzimek (pl. mannanáz) alkalmazásával lehet növelni a folyamat hatékonyságát. A xilanázok egyik családjának (endoxilanáz) szerkezetét mutatja a 13.1. ábra.

A kereskedelmi forgalomban lévő xilanázok előállítására [Teshapun, 2003] többféle mikrobiális forrás is rendelkezésre áll:

- *Thermomonospora fusca*
- *Trichoderma reesei*
- *Trichoderma longibrachiatum*
- *Trichoderma koningii*
- *Aspergillus niger*
- *Bacillus sp.*

A xilanázokat alkalmazzák elemi klórtól mentes és teljesen klórmentes fehérítési technológiákban. A fehérítés klórigényét mindenképpen jelentősen csökkenteni lehet. Manapság már igény mutatkozik arra is, hogy teljesen klórmentes papír alapanyagot állítsanak elő, amely xilanázok segítségével oldható meg.

13.3. Tintátlanítás

A tintátlanításhoz különféle mikrobiológiai forrásból származó cellulázokat, hemicellulázokat, xilanázokat lehet alkalmazni, amelyek vagy közvetlenül a szálon, vagy a tintafilmen hatnak [Yakubu, 2019]. Az enzimeket termelő törzsek közül néhány példát a 13.1. táblázat mutat be. A cellulóz, ill. hemicellulóz részleges enzimikus hidrolízisével a szál és a tinta közötti kötést bontani lehet, s így a tintarészecskék leoldhatók [Lee, 2007]. Az enzimek a kisebb fonaldarabkákat is képesek eltávolítani a tintarészecskék felületéről, így a részecskék hidrofóbicitása kissé megváltozik, s lehetővé válik szeparációjuk a flotációs, mosási lépésben.

13.1. táblázat: Biotintátlanító enzimek és forrásuk

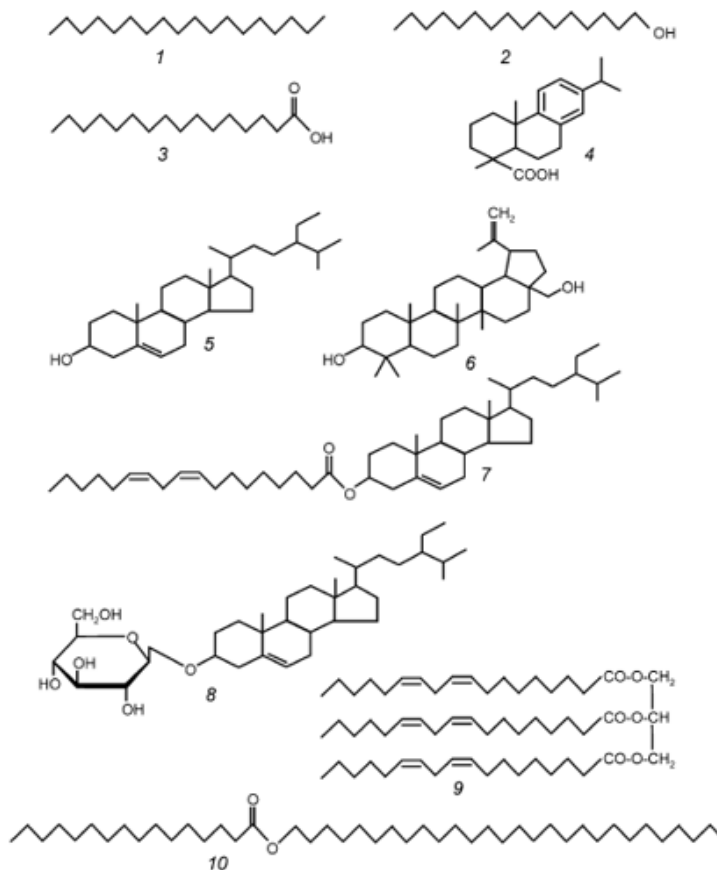
Mikroorganizmus	Enzim	Felhasználás
<i>Trichoderma harzianum</i>	celluláz, xilanáz	magas tintátlanítási hatékonyság, jobb száradási képesség
<i>Aspergillus niger</i>	celluláz, hemicelluláz	növelt tintátlanító hatásfok
<i>Streptomyces</i> fajok	xilanáz	biofehérítés
<i>Bacillus altitudinis</i>	xilanáz	biotintátlanítás és biofehérítés
<i>Aspergillus niger</i>	xilanáz	régi újságpapírok tintátlanítása, fényesebb felület

Az enzimikus tintátlanítás hatékonysága nemcsak a biokatalizátor „képességeitől” függ, hanem egyrészt a kiinduló anyag szennyezettségétől és tulajdonságaitól, másrészt a működési körülményektől (pH, hőfok, kezelési időtartam stb.). Ez utóbbiak optimalizálása nagyban segítheti a folyamatot.

A biotintátlanítás tagadhatatlan előnyöket jelent a hagyományos kémiai módszerhez képest: kevesebb lúgot kell alkalmazni, a szálak fényesebbek és erősebbek lesznek, megelőzhető a lúg okozta sárgulás, és nagymértékben csökkenthető a környezetszennyezés.

13.4. Szuroklerakódások kezelése

A fából kiinduló papírgyártás során a fa lipofil összetevői súlyos problémákat okozhatnak. A feldolgozási lépéseknél ezekből a vegyületekből ragacos, szurokszerű lerakódások (angolul *pitch*) képződhetnek. Ezeket a – sokszor csak gyantaként emlegetett – anyagokat már azonosították [Gutiérrez, 2009], s az alkotó vegyületek az alkánok, zsíralkoholok, zsírsavak, gyantasavak, terpének, trigliceridek és viaszok csoportjába tartoznak. Néhány konkrét példát a 13.2. ábra szemléltet.



13.2. ábra: Példák gyantaösszetevőkre [Gutiérrez, 2009]
 (1 oktadekán, 2 1-hexadekanol, 3 palmitinsav, 4 abietinsav, 5 szitoszterol,
 6 betulinol, 7 szitoszteril-linoleát, 8 szitoszteril 3-glükopiranozid,
 9 trilinolein, 10 oktakozil-hexadekanoát)

Ennek megakadályozására hagyományosan egyrészt a kiinduló nyersanyagot (fa- vagy faforgács-alapanyagot) hosszabb ideig tárolják, mivel így a növényi szövetekben zajló hidrolitikus és oxidatív folyamatok következtében csökken a lipofil extrakttartalom. Másrészt a feldolgozás folyamán a szurokszerű részecskéket kémiai kezelésnek vetik alá, ahol ionos és nemionos detergensekkel, kationos polimerekkel és más adalékokkal szabadulnak meg a nemkívánatos anyagoktól. Alternatívaként gombák és enzimek segítségével lehet javítani e folyamatok hatékonyságát.

A gombák közül kereskedelmi forgalomban elérhető pl. az *Ophiostoma piliferum* szintelen törzse (Cartapip), amely viszonylag gyorsan nő a nem steril faforgácson, metabolizmusa során elfogyasztja a gyantában lévő lipofil vegyületek egy részét, így a szurokszerű anyagok koncentrációja csökkenthető [Farrell, 1997].

Az enzimek közül a lipázokat alkalmazzák leginkább. Ez az enzim az észterkötések hidrolízisét képes katalizálni. Például a kifejezetten papírgyártáshoz kifejlesztett Resinase készítmény segítségével [Farrell, 1997] a trigliceridek mellett más komponensek, pl. az észterezett szterolok, gyantasavak, zsíralkoholok és alkánok koncentrációját is jelentősen lehetett csökkenteni, különösen, ha az enzimés kezelést környezetbarát felületaktív anyagokkal kombinálva végezték. A lipázok mellett lakkázokkal is folynak kísérletek a nemkívánatos anyagok eltávolítására.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetet mond Parádi Vandának a papíripari technológiáról szóló összefoglaló tanulmányáért.

Irodalomjegyzék

- Farrell R. L., Hata K. és Wall M. B. (1997): Solving pitch problems in pulp and paper processes by the use of enzymes of fungi. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 57, pp. 198–215.
- Grönqvist S., Suurnäkki A., Niku-Paavola M. L., Kruus K., Buchert J. és Viikari L. (2003): Lignocellulose processing with oxidative enzymes. In: Mansfield S. D. és Saddler J. N. (szerk.): *Application of Enzymes to Lignocellulosics*. ACS Symposium Series 855, American Chemical Society, Washington, DC, pp. 46–65.
- Gutiérrez A., del Río J. C. és Martínez Á. T. (2009): Microbial and enzymatic control of pitch in the pulp and paper industry. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 82, pp. 1005–1018.
- Lee C. K., Darah I. és Ibrahim C. O. (2007): Enzymatic deinking of laser-printed office waste papers: some governing parameters on deinking efficiency. *Bioresource Technology*, 98(8), pp. 1684–1689.
- Singh G., Capalash N., Kakur K., Puri S. és Sharma P. (2016): Enzymes: applications in the pulp and paper industry. In: Dhillon G. S., Singh G. és Kaur S. (szerk.): *Agro-Industrial Wastes as Feedstock for Enzyme Production*. Elsevier, pp. 157–172.
- Szendefy J. (2006): *Xilanáz enzimek előállítása szilárd fázisú fermentációval és papíripari hasznosításuk*. PhD-értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.
- Techapun C., Poosaran N., Watanabe M. és Sasaki K. (2003): Thermostable and alkaline-tolerant microbial cellulase-free xylanases produced from agricultural wastes and the properties required for use in pulp bleaching bioprocesses: a review. *Process Biochemistry*, 38, pp. 1327–1340.
- Viikari L. (2003): Lignocellulose-modifying enzymes for sustainable technologies. In: Mansfield S. D. és Saddler J. N. (szerk.): *Application of Enzymes to Lignocellulosics*. ACS Symposium Series 855, American Chemical Society, Washington, DC, pp. 30–44.
- Yakkubu A., Saikia U. és Vyas A. (2019): Microbial enzymes and their application in the pulp and paper industry. In: Yadav A. N. (szerk.): *Recent Advancement in White Biotechnology through Fungi*. Springer Nature, Switzerland.

14. Enzimek a bőrfeldolgozásban

Lajtai-Szabó Piroska, Bélafiné Bakó Katalin¹⁴

A bőrgyártás az egyik legrégebbi múltra visszatekintő, több mint hétezer éves mesterség. A régészeti leletek alapján már az őskorban is feldolgozták kezdetleges szinten az elejtett állatok bőrét. Egyes természetközeli népek a mai napig olyan ősi technikákkal dolgoznak, mint a napon vagy tűz felett történő szárítás, puhítás zsírral, füstölés és fahamus cserzés. Az első „biotechnológiai” tekinthető eljárás i. e. 400 körülre tehető, amikor a zsidók és az egyiptomiak magas csersavtartalmú növényi részeket használtak cserzőanyagként [Internet 1]. Az ókori Görögországban, majd később a középkorban is alkalmaztak proteáz enzimeket az áztatás és a pácolás során. Mivel akkoriban állati fekália szolgált enzimeforrásként, a bőrök feldolgozásával foglalkozó tímárműhelyek a város szélére, a vízfolyások legalsó részére települtek, hogy csökkentsék a városban a szaghatást és a járványveszélyt [Pécs, 2016]. A növényi eredetű cserzőanyagok használata mellett igen elterjedt volt a kálium-alumínium-szulfáttal, hétköznapi nevén timsóval történő kezelés (feltehetőleg innen ered a tímár elnevezés is), valamint a meszes szőrtelenítés [Internet 2].

A nagymértékű vegyszerhasználat a céheket felváltó bőrgyárakra is jellemző volt, a hulladékáramokkal kibocsátott szennyezők pedig komoly környezetterhelést jelentettek, különösen a magas szulfid- és krómtartalmuk miatt. A szigorodó környezetvédelmi szabályozásoknak köszönhetően az utóbbi évtizedekben előtérbe kerültek a csökkentett vegyszerigényű eljárások, melyekben fontos szerepet játszanak az enzimek. Bár az ilyen irányú kutatások már a huszadik század elején elkezdődtek – a német Rohm GmbH 1910-ben szabadalmaztatta enzimes pácolási eljárását –, az ipari léptékű alkalmazásig több mint hetven év telt el [Choudhary, 2004]. Jelenleg a bőrfeldolgozási technológia számos részfolyamatában részt vesznek az enzimek, ahogy a 14.1. táblázatban látható.

14.1. táblázat: Enzimek használata a bőrfeldolgozásban [Pécs, 2016]

Feldolgozási lépés	Alkalmazott enzim	Funkció
tartósítás	-	nyers bőr tartósítása
áztatás	lúgos / hasnyálmirigy-proteáz	nem fibrilláris fehérjék lebontása
szőrtelenítés	lúgos / semleges proteáz	szőrök eltávolítása
zsírtalanítás	lipáz és proteáz	zsírok eltávolítása
pácolás	tripszin, savas proteáz	puhaság, rugalmasság fokozása
cserzés	– (korábbi kezelések hatnak)	cserzés hatékonyságának növelése

14 Pannon Egyetem, Mérnöki Kar,
Bio-, Környezet- és Vegyészmérnöki Kutató-fejlesztő Központ,
Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatócsoport
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.
lajtai-szabo.piroska@mk.uni-pannon.hu

Az alábbiakban csupán az általános technológia főbb, enzimeket is alkalmazó fázisait mutattuk be. A feldolgozandó alapanyagtól és az adott gyártástechnológiától függően további lépésekkel, illetve az itt leírtaktól eltérő eljárásokkal is találkozhatunk az iparban.

Fontos megemlíteni, hogy a vegyszeres kezelésekhez képest az enzimes technológiák alapvetően költségesebbek, és az enzimek érzékenysége miatt precízebb szabályozást igényelnek. Ugyanakkor a technológia kisebb vegyszerigénye környezetvédelmi és munkavédelmi szempontból egyaránt előnyös, továbbá az enzimek hatékonyabbá teszik a bőr feldolgozását, így alkalmazásuk kedvező alternatívát jelent a hagyományos eljárások mellett.

14.1. Tartósítás

Az állatok levágása és az így kapott nyersbőr feldolgozása általában nem egy helyen és nem rögtön egymás után történik, a két folyamat között több nap is eltelhet. A tárolás és szállítás során megfelelő kezelések nélkül elkezdődne a bőr bomlása a rajta található mikroorganizmusok és az általuk termelt enzimek hatására. Ennek megakadályozása érdekében tartósítási eljárásra van szükség, mely megakadályozza a minőségi romlást, és előkészíti a bőrt a feldolgozásra. A konzerválás során a nyersbőrt sós vízbe merítik, majd szárítják, és a húsoldalt sózzák. A tartósítás száraz, jól szellőző helyen történik, szabályozott hőmérséklet és páratartalom mellett. Ebben a fázisban nem használnak enzimeket, éppen a jelenlévő enzimek működésének megakadályozására törekszenek [Pécs, 2016; Choudhary, 2004].

14.2. Áztatás

Az üzembe érkező bőrkötet első lépésben hidratálni kell a további feldolgozás előtt. A mosáshoz és áztatáshoz használt víz felületaktív anyagokat és lipáz enzimet tartalmaz, így az áztatólé kioldja a sókat és eltávolítja a szennyezéseket. A pontosan tervezett és szabályozott folyamatban a sóval kezelt bőr nedvességtartalma 45%-ról 52% feletti értékre emelkedik. A kollagéncsontok megduzzadnak, ami jobb hozzáférést biztosít a vegyszerek és enzimek számára a feldolgozás további fázisaiban. Ezt a folyamatot elősegítik az áztatóléhez adagolt enzimkészítmények, melyek tripszint és egyéb proteáz enzimeket tartalmaznak. Alkalmazásuk számos előnnyel jár: csökkentik a vegyszerigényt és az áztatáshoz szükséges időt, a nem fibrilláris fehérjék lebontásával pedig hatékonyabbá teszik az eljárást. Az érhalózaton keresztül akár a bőr legbelső rétegébe is képesek behatolni. Az áztatás 10–20 °C-on történik az enzimeknek megfelelő lúgos közegben, amit mésztej adagolásával biztosítanak [Pécs, 2016; Choudhary, 2004].

14.3. Szőrtelenítés

Az áztatást követően a szőrszálak, karmok és egyéb keratinalapú részek eltávolítása történik. A szőrtelenítés a szőrtüsző gyengítésén, illetve a szőrszálak elbontásán alapul. A hagyományos eljárás során 10–12% mésztejből és szerves szulfidokból vagy tioglikolsavból álló, erősen lúgos oldatban áztatják a bőrt. A keratin nagy mennyiségben tartalmaz ciszteint, az aminosavakat összekötő diszulfidhidak pedig biztosítják a szerkezet stabilitását, ezért a vegyszeres kezelés célja az említett kötések felszakítása. A technológia során keletkező hulladékáram azonban 60 000 mg/L értékű kémiai oxigénigényével jelentősen hozzájárul a gyár szennyezőanyag-kibocsátásához [Pécs, 2016; Choudhary, 2004].

A szulfidok jelentős része kiváltható proteáz enzimek segítségével. A keratinázok külön csoportba tartoznak a fehérjebontó enzimeken belül, hiszen a diszulfidhidakkal stabilizált, kompakt szerkezetű keratint a proteáz enzimek nem képesek lebontani. A keratináz termelésére alkalmas mikroorganizmusokat speciális táptalajon tenyésztik, melybe feldarabolt madártollat kevernek, így izolálják a megfelelő törzseket [Pécs, 2016]. Az általánosan használt proteáz enzimek azonban nem a szőr anyagát támadják meg, hanem a szőrszálat körülvevő fehérjéket bontják le. A szőrtüsző gyengítésével, a gyökér szerkezetének megbontásával a szőrszál meglazul, így könnyen lemosható lesz.

Bár a bőr felépítésében részt vevő elasztint és kollagént egyedi aminosav-összetételüknek és negyedleges szerkezetüknek köszönhetően kisebb affinitással támadják meg a proteolitikus enzimek, nem megfelelő készítmények használata vagy az egyéb üzemeltetési paraméterek kedvezőtlen értéke a bőr bomlásához, minőségi romlásához vezethet. A hatékony szőrtelenítéshez pontosan meg kell határozni a szükséges enzim mennyiséget és reakcióidőt, továbbá szabályozni kell a hőmérsékletet és a pH-t. Ezek értéke függ a választott enzimtől, az optimum jellemzően 8–11 közötti pH és 30–37 °C közötti tartományban van. A termelő törzsek között találhatók *Bacillus*- és *Alcaligenes* baktériumok, de elterjedten használnak gombákat is, elsősorban *Streptomyces*- és *Aspergillus*-fajokat. Olyan szőrmék esetében, ahol a durvább szőrzet miatt hosszabb ideig tartó kezelésre van szükség, a húsoldalt egy védő festékréteggel vonják be [Pécs, 2016; Choudhary, 2004].

14.4. Zsirtalanítás és pácolás

A szőrtelenítés után további kezelések szükségesek a bőrben maradt vegyszerek eltávolítása, valamint állagának javítása (puhaság, rugalmasság fokozása) érdekében. A kívánt hatást mechanikai eljárásokkal és pácolással érik el, melyet 7,5–8,5 közötti pH-tartományban, proteáz enzimekkel végeznek. Bár a bőrfeldolgozási technológia korábbi lépései során a zsír eltávolítása részben megtörtént, a bőr típusától függően további zsirtalanításra lehet szükség, hogy a cserzés során használt vegyszerek behatolhassanak a bőrbe, valamint egyenletesen festhető legyen a termék. Többféle zsirtalanítási eljárással találkozhatunk az iparban, úgymint vizes emulzióképzés, oldószeres extrakció vagy nyomással történő zsirtalanítás. Ezek nem feltétlenül elkülönülő lépések, gyakran a pácolással együtt zajlanak. A hagyományos vegyszeres páclé mellett elterjedőben vannak az enzimes oldatok, melyek lipázt és kis mennyiségben proteázt tartalmaznak. A kettős enzimkészítmény képes a zsírsejtek falának megbontására és a kiszabaduló zsírok hidrolízisére, ami jelentősen megkönnyíti az emulzióképzést és ezáltal a zsírok eltávolítását. Bár a savas közegben aktív *Rhizopus*-lipáz megfelelő hatékonysággal képes a zsírok lebontására, a kívánt kémhatás biztosítása érdekében egy plusz savas áztatási lépésre van szükség. A bakteriális lipázok, valamint az *Aspergillus niger* által termelt enzim ezzel szemben lúgos közegben aktív, így a proteázokkal közös áztatólében lehet őket használni [Pécs, 2016; Choudhary, 2004].

14.5. Cserzés

A bőrfeldolgozás utolsó fázisa a cserzés, melynek célja a bőr mechanikai tulajdonságainak javítása, valamint ellenálló képességének fokozása. A cserzőanyagok – jellemzően króm-tartalmú vegyületek – a kollagénrostokon belül keresztkötéseket alakítanak ki, így stabilizálják a szerkezetet, savas és enzimes hidrolízissel szemben ellenállóvá teszik a bőrt, valamint

csökkentik a vízfelvevő képességet. A krómvegyületeknek köszönhetően egyenletesebben színezhető lesz a termék. Bár a cserzési eljárás során nem alkalmaznak enzimeket, a korábbi lépések meghatározzák, hogy a cserzőanyagok milyen mértékben képesek behatolni a kollagénrostokba, így közvetetten a cserzésben is fontos szerepet játszanak az enzimek [Pécs, 2016; Choudhary, 2004].

Irodalomjegyzék

Choudhary R. B., Jana A. K. és Jha M. K. (2004): Enzyme technology applications in leather processing. *Indian Journal of Chemical Technology*, 11, pp. 659–671.

Internet 1: *Leather*. Encyclopaedia Britannica. Elérhető: <https://www.britannica.com/topic/leather> (Letöltve: 2020. május 22.)

Internet 2: *A bőrgyártás technológiája*. Magyar Elektronikus Könyvtár. Elérhető: <https://mek.oszk.hu/02100/02115/html/5-632.html> (Letöltve: 2020. május 22.)

Pécs M. (2016): *Biotermék technológia – Ipari enzimek*. Oktatási segédanyag, BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék, Budapest.

15. Biológiai szennyvíztisztítás

Kertész Szabolcs, Veréb Gábor¹⁵

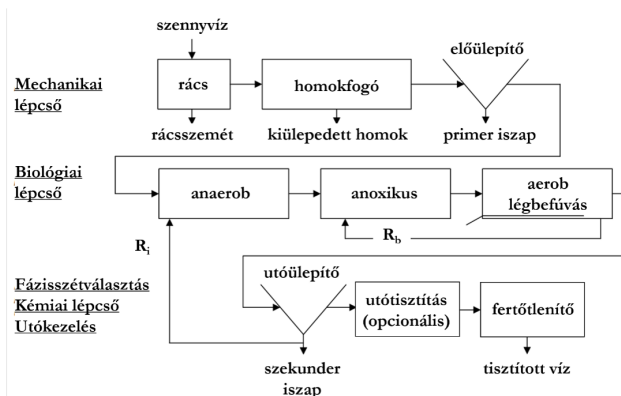
15.1. Szennyvíztisztítás

Az élelmiszeriparban és a könnyűiparban keletkező szennyvizek szennyező anyagainak eltávolítására és ártalmatlanítására minőségi átalakítás szükséges, hogy a további befogadókban ne okozzanak károsodást, vagy ne befolyásolják hátrányosan a későbbi felhasználást sem. Ezt különböző szennyvíztisztítási fokozatok segítségével lehet elérni, melyek célja, hogy minimális energia-, illetve anyagráfordítással ériék el a megfelelő tisztasági hatékonyságot, és a keletkező szilárd melléktermék, a szennyvíziszap is minél jobban hasznosítható legyen, például biogázfejlesztésre és/vagy akár talajjavító anyagként.

A szennyvíztisztításnak számos típusa létezik, melyek első-, másod- és harmadfokú tisztításból állhatnak. Az elsőfokú, más néven elsődleges vagy mechanikai tisztítás során a durva, nagyobb méretű szennyeződések és a finom lebegő szemcséket távolítják el kőfogókkal, rácsokkal, szitákkal, homokfogókkal, ülepitőkkel, valamint olaj- és zsírfogókkal (15.1. ábra: Mechanikai lépcső).

A másodfokú, más néven másodlagos vagy biológiai tisztítás során a vízben oldott szerves és szervetlen anyagokat, valamint a még a rendszerben maradt kisebb méretű lebegő anyagokat távolítják el mikroorganizmusok segítségével (15.1. ábra: Biológiai lépcső).

A harmadfokú, harmadlagos, avagy fizikai-kémiai tisztítás során pedig a kolloid méretű szemcséket és a biológiai úton nem eltávolítható oldott anyagokat, így a foszfor jelentős részét, illetve, ha van, a maradék nitrogéntartalmat is képesek leválasztani szűréssel, derítéssel, kicsapatással vagy egyéb kombinált módszerekkel, melyek tartalmazhatnak például ózonkezelést, UV-kezelést, klóradozást, ioncserét, membrános eljárásokat vagy adszorpciót is. E fokozat része lehet a szennyvíz patogén mikroorganizmusainak ártalmatlanítása, vagyis a fertőtlenítés is (15.1. ábra: Kémiai lépcső).



15.1. ábra: A szennyvíztisztítás folyamata [Internet 2]
(R_i: iszaprecirkuláció, R_b: belső recirkuláció)

15 Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar,
Folyamatmérnöki Intézet
6725 Szeged, Moszkvai krt. 9.
kertes@mk.u-szeged.hu

Bár a továbbiakban döntően a biológiai szennyvíztisztítást részletezzük, meg kell említeni, hogy sok esetben a kombinált tisztítási eljárások hatékonyabbak, esetleg a fajlagos költségeket is csökkenthetik. Például bizonyos szennyvíztípusok kezelésénél a biológiai és a kémiai kezelési módszerek kombinálásával gazdaságosabb és környezetkímélőbb tisztítás érhető el [Ahmed, 2017; Paździor, 2019].

15.2. A szennyvizek szervesanyag-tartalmának mérőszámai

Többféle módszer is alkalmas a különböző szennyezett és terhelt vizekben, szennyvizekben lévő szerves anyagok kimutatására, melyek mennyisége adott körülmények között az oxidálásukhoz szükséges oxigénmennyiséggel vagy a szerves széntartalommal jól jellemezhető. Három különböző mérőszámot lehet definiálni (lásd a fogalomtárat): a biológiai és a kémiai oxigénigényt (*BOI*, *KOI*; angolul: *BOD*, *COD*, mértékegységük: mg/l vagy g/l) és a teljes szerves széntartalmat (*TOC*).

A három mutatószám között van összefüggés, azonban ez nagymértékben függhet a szennyvíz minőségétől. Általánosságban elmondható, hogy a *KOI* értéke többnyire a legmagasabb, mert ennek mérése során szerves anyagok is oxidálódhatnak, illetve a biológiai bomlás sok esetben kevésbé hatékony folyamat a nehezen lebontható komponenseket tartalmazó szennyvizek esetén. A *TOC* pedig megfelelően kivitelezett mérés esetén ténylegesen csak a szerves széntartalomról ad információt, nem terhelt a *KOI*-mérésre jellemző pozitív hibával [Internet 1].

15.3. Biológiai szennyvíztisztítás

A mechanikai szennyvíztisztításon átesett tisztítandó szennyvizet, függetlenül a kezelendő szennyvíz típusától, a következő, biológiai szennyvíztisztítási fokozatba vezetik, ahol az még szerves és lebegőanyagokat is igen változó mennyiségben tartalmazhat. Ez a másodlagos szennyvíztisztítási fokozat döntően a sokféle mikroorganizmusban lejátszódó számos biokémiai reakción alapszik. Ez a tisztítási folyamat lényegében a természetben is megfigyelhető, például az élővizekben, de a talajban lejátszódó folyamatokhoz is nagyon hasonlít. Ezért a toxikus anyagokat tartalmazó szennyvizek kezelése nehézkes lehet ezen eljárásokkal, mivel a mikroorganizmusok tevékenységét ezek gátolhatják, sőt pusztulásukat is okozhatják [Tian, 2020].

A biológiai tisztítási módszereknél az egyik csoportosítási szempont lehet, hogy maga az eljárás természetközeli vagy mesterséges körülmények között zajlik-e. A természetes megoldások többnyire nagyon helyigényesek, és általában elég hosszú (több hónap vagy év) lehet a tisztítás időtartama. Ilyen megoldások például a tavas, halastavas vagy az ún. zónás, szűrőmezős, illetve gyökérszénázás szennyvíztisztítók. A mesterséges megoldások pedig a koncentráltabb, iparban elterjedtebb, helytakarékos és gyorsabb megoldásokat jelentik, melyek részletesen kifejtésre kerülnek. Bizonyos esetekben a kezelendő szennyvízre tekintettel, a megfelelő tisztítási hatékonyság érdekében speciális kombinált eljárásokat is alkalmazhatnak. Ilyen átmenet például a mesterséges buborékoltatással intenzifikált gyökérszénázás biológiai szennyvízkezelés.

A mikroorganizmusok tevékenységét alapvetően két részre oszthatjuk: vagy közvetlen bontással bonyolult, összetett molekulákból egyszerűbb molekulákat hoznak létre, vagy a molekulákat saját sejtjeikbe építik be, mellyel életfolyamataikat fedezik és szaporodnak is. A mikroorganizmusoknak a szerves anyagok lebontása alapján két fő típusát különböztetjük

meg: aerob és anaerob szervezetek. Az előbbieket működéséhez szükséges az oxigén (azaz intenzív oxigénellátást igényelnek), utóbbiakéhoz nem (külső oxigénbevitel nem szükséges). Bizonyos esetekben ezek kombinációi is megoldást jelenthetnek, mint amilyen az anoxikus tisztítás. Az anoxikus szervezetek esetén, bár közvetlen levegőbevezetés nincs, de az aerob mikrobiológiai szennyvízkezelés során keletkező nitrátgazdag szennyvíz recirkulációjával a magas nitráttartalom biztosított lesz, ami egyes baktériumfajoknak oxigénforrást jelent oldotttoxigén-tartalom hiánya esetén is.

A biológiai szennyvíztisztítási eljárásokra általánosan jellemző az alacsonyabb működtetési költség, habár a speciális körülmények miatt extra energiaigényük is lehet, továbbá egyedi berendezésigényük, ami magasabb beruházási költségeket jelenthet a hagyományos eljárásokhoz képest [Paździor, 2019].

15.4. Aerob biológiai szennyvíztisztítási eljárások

A mesterséges aerob tisztítási eljárásoknak két jelentősebb típusa van. Ezek az eleveniszapos és a csepegtetőtestes biológiai tisztítófokozatok, attól függően, hogy a lebontást végző mikroorganizmus-közösség lebegtetve vagy egy felülethez rögzítve található-e.

Előbbinél a mikroorganizmusok a folyamatosan áramoltatott iszap segítségével szuszpendált formában (pehelyszerűen) lebegnek, gyakran egy levegőztetett kialakítású medencében, annak érdekében, hogy ne tudjanak leüledni. Ezt az eleveniszapos eljárást már évtizedek óta hatékonyan használják, és még napjainkban is a legelterjedtebb biológiai eljárások közé tartozik [Arden, 1914; Suresh, 2018]. Az eleveniszapos medencéket többnyire egy utóülepítő egészíti ki, mely lehetőséget biztosít a mikroorganizmusok elválasztására a kezelt víztől, majd az eleveniszap egy részének visszavezetésére (recirkulációjára), illetve a fölösiszap elvezetésére (mely további kezelést igényel).

A csepegtetőtestes biológiai tisztításnál a mikroorganizmusok nagy felületű természetes vagy mesterséges anyagokon vannak rögzítve biológiai film vagy úgynevezett biofilm formájában. A biofilmet felépítő mikroorganizmusok segítségével a biológiailag bontható szerves anyagok oxidációs folyamatai játszódhatnak le, melyekben a szerves szénvegyületek döntő része is átalakul, így a szennyvíz színe megváltozik, zavarossága és részben a szaghatása is lecsökken (hasonlóan az eleveniszapos kezeléshez).

Az oxidációs folyamatok során több lépcsőben történik az ammónium- és a szerves nitrogénformák gyors hidrolízise, illetve az ammóniumformák oxidációja nitráttá. Ez részben már a csatornahálózatban is végbemehet, amit egy kétlépcsős folyamat követ, amelyet kétféle autotróf anyagcseréjű mikrobacsoport végez (*Nitrosomonas* és *Nitrobacter* fajok) (15.2. ábra). A nitrifikációt a nitritáció és a nitrátáció együttesen eredményezi, melyek nagyon érzékenyek a környezeti körülményekre. Működésük csak elegendő oxigén mellett, megfelelő hőmérsékleten és pH-értéken játszódik le. Különböző inhibitorok jelenléte pedig gátló tényező lehet [Internet 3].

	<u>Nitrifikáció</u>	<u>Denitrifikáció</u>
Lejátszódó folyamat:	$\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$	$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$
Mikrobafajok:	<i>Nitrosomonas</i> , <i>Nitrobacter</i>	<i>Pseudomonas</i> , <i>Achromobacter</i> , <i>Micrococcus</i>

15.2. ábra: A nitrifikáció és a denitrifikáció folyamata [Internet 5].

5.5. Anoxikus folyamatok

Az anoxikus biológiai folyamatokról azért fontos beszélni, mivel a szennyvíztisztításban a denitrifikáció, mely során a nitrát nitrogéngázzá redukálódik, csak anoxikus kialakítású terekben játszódik le. A nitráttá történő oxidáció nem oldja meg a nitrogéneltávolítás problémáját, a nitrogén továbbra is vizes fázisban marad, ami a befogadó víztestben eutrofizációt okozhat. Ezért egyes denitrifikáló mikroorganizmusokkal (*Pseudomonas*- és *Micrococcus*-fajokkal), melyek a nitrát oxigénjét oxidációra tudják felhasználni, át kell alakítani a nitrátot ártalmatlan elemi nitrogénné. Az anoxikus kialakítású medencékben, reaktorokban tehát van egyes mikroorganizmusok számára hozzáférhető oxigén, például nitrát vagy szulfát formájában, de oldott oxigén formájában nincs. Ezen alternatív légzésformákkal rendelkező mikroorganizmusok fakultatív anaeroboknak tekinthetők, hiszen az ezekben található oxigént mint elektron-akceptort fel tudják használni a saját biológiai oxidációjukhoz [Internet 4].

15.6. Anaerob biológiai szennyvíztisztítási eljárások

A biológiai szennyvíztisztításhoz tartozó anaerob kezelés során (melyet sok esetben előkezelésként alkalmaznak még az anoxikus és az aerob medencék előtt) hatékonyabb a foszforeltávolítás, illetve adott esetben (utókezelés, iszapkezelés) a szerves anyagok olyan stabil végtermékké alakulhatnak, mint amilyen a szén-dioxid vagy a metán. Nagy előnye, hogy az aerob eljárásokhoz képest kevesebb iszap keletkezik, a költségesebb levegőztetési szakaszt részben tehermentesíti (vagy adott esetben akár elhagyhatóvá teszi), a szennyvíziszap kezelése során pedig energia nyerhető vissza belőle (biogáz formájában). Hátrányuk, hogy a mikrobiális folyamatok összetettebbek és bonyolultabbak lehetnek, valamint a toxikus anyagokra érzékenyebben reagálhatnak, mint az aerob rendszerek.

15.7. Az anaerob és aerob folyamatokat befolyásoló tényezők

Számos tényező befolyásolhatja a biológiai szennyvíztisztítás hatékonyságát, mint például a jelenlévő mikrobák mennyisége, az oxigénellátás mértéke, az anyagcsere-folyamatok sebessége, a szennyvíz tartózkodási ideje a tisztítóban, a hőmérséklet, a szervesanyag-terhelés, valamint a szennyezők anyagi minősége. Az enzimes reakciók hatékonyságára a pH-érték és a biológiai oxidáció is nagy hatással van. Különböző vegyületek toxikusak lehetnek az egyes mikroorganizmusokra nézve (pl. nehézfémek), vagy egyes szervetlen sók késleltethetik a folyamatokat [Simándi, 2011].

15.8. A biológiai tisztítást követő lépés

A folyamat végére a mechanikai szennyvízkezelést messze meghaladó tisztítási hatásfokot érünk el, az oldott szennyezőanyagok jelentős része lebomlik, de a tisztítást végző mikroorganizmusok jelen lesznek a vízben. Emiatt egy fázisztválasztás során a mikrobapelyheket leválasztják, és lebegőanyag-mentessé válik a víz. Azonban, hogy az eleveniszap ne mosódjon ki a rendszerből, azt recirkulációval visszajuttatják. A lépés megvalósítható például Lipcsei- vagy Dorr-típusú ülepítőberendezésekkel [Internet 4].

15.9. Fonalsodás jelensége

A biológiai szennyvíztisztítás egyik gyakran előforduló nehézsége lehet, hogy az iszap fonalsodni kezd, amit iszapduzzadásnak is neveznek. Ez a jelenség úgy alakul ki, hogy a kompakt iszappelyhek szerkezete megváltozik, sokkal lazább lesz a hosszú, fonalszerű formák, filamentumok létrejötte miatt, melyeket az ún. fonalas mikroorganizmusok (baktériumok és gombák) növesztenek. A fonalsodás a nem megfelelő tápanyag-ellátás következtében alakulhat ki, mivel célja, hogy a tápanyag eljusson az adott részhez, ezenkívül az alacsony oxigénkoncentráció, az alacsony szervesanyag-, nitrogén- vagy foszfortartalom, illetve az alacsony pH is hozzájárulhat a folyamat kialakulásához. Kismértékű fonalsodás előfordulhat, de egy bizonyos arány felett azok az utóülepítő hatásfokát jelentős mértékben lerontják [Internet 4].

15.10. További biológiai tisztítási módszerek

SBR tisztítási technológia

Az SBR-reaktorokat (Sequencing Batch Reactor) használó szennyvíztisztítási technológiát az időben szétválasztott, ciklikusan ismétlődő szennyvíztisztítási folyamatok jellemzik. Egyre szélesebb körű használatuk oka az egyszerű kialakításukon és működtetésükön túl a lökészerű, hirtelen érkező terhelések könnyű kezelése is. Használatukkal magas tisztítási hatékonyság érhető el rövid idő alatt. Abdulgader és társai laboratóriumi méretű SBR-reaktorral tejipari szennyvizek tisztításánál 96% fölötti KOI-csökkentést értek el 18 órás kezeléssel [Abdulgader, 2009]. Hátrányként említik azonban a magas iszapprodukciót és a gyengén ülepíthető iszaptartalmat is [Abdulgader, 2020]. Ezeknél a reaktoroknál általában a kezelendő szennyvizet folyamatos jelleggel vezetik be, a tisztított víz kivezetése pedig szakaszos. A kezelendő szennyvíz mechanikai tisztítás után jut egy kiegyenlítő medencébe, ahol viszonylag hosszú tartózkodási időt biztosítanak, és innen juttatják át azt az SBR-medencébe. A biológiai tisztítási folyamatok sorrendje így anaerob, aerob, anoxikus, majd aerob jellegű. Ezt ülepítés követi, mely során a tisztított, felülúszó részt dekantálják, a leülepedett iszaptól pedig fölősiszap-elvétel történhet. Nagy előnyük még, hogy a szennyvíztisztító telepek üzeme akár teljesen automatizálható [Internet 3].

Membrán-bioreaktorok

Napjainkban a biológiai szennyvíztisztítási fokozatban az eleveniszapos és a csepegtetőtestes eljárásokon túl egyre inkább elterjedőben van a membrán-bioreaktorok (MBR) használata [Munirasu, 2016]. Gyakran az eleveniszapos eljárás után vagy szimultán módon, egy reaktortérben mikroszűrést (MF) vagy ultraszűrést (UF) alkalmaznak jó minőségű, baktérium- és vírusmentes szűrletek előállítására, melyek minősége a szigorú határértékeknek is megfelel. Az MF/UF-alapú membrán-bioreaktorok szűrletének további tisztításával ivóvíz-tisztaságú szűrt víz is előállítható [Wu, 2013].

Mivel a bioreaktorokban, különösen magas szervesanyag-tartalom esetén, jelentős problémát okozhat a membránok eltömődése és a koncentráció-polarizáció, ezért az eltömődést csökkentő stratégiák és eljárások a fenntartható, hosszú távú működtetés szempontjából rendkívül fontosak [Hube, 2020]. Például a membránszeparációs eljárásokat nagy hatékonyságú oxidációs eljárásokkal kombinálva a jövőben még szélesebb körben elterjedhet a technológia [Veréb, 2019, 2020].

Fotoszintetikus rendszerek

Napjainkban a biológiai kezelési eljárások egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek akár olyan szennyvizek kezelésében is, melyek toxikus és egyéb veszélyes anyagokat is tartalmaznak. Nincs egy konkrét módszer, ami egy lépésben a legtöbb komponenst eltávolítaná, ezért nagyon fontos, hogy a szennyezőanyag-biomassza kölcsönhatásokat is analizáljuk. A fotoszintetikus rendszerek alkalmazása, mint amilyen a mikroalgák és cianobaktériumok használata, „természet ihlette” technikáknak tekinthető, és képesek a nitrátok bontására, átalakítására, így a víz- és szennyvíztisztításban is használhatók. A mikroalga-alapú víztisztítási technológia, bár még korai stádiumban van, hatékony lehet a vizekben található nitrátok eltávolításában is [Rezvani, 2019]. Sőt a hagyományos eljárások sokszor nem elég hatékonyak a szennyezések, nehézfémek, nitrogénnel és foszforral terhelt szennyvizek kezelésében, ezért is kísérleteznek például mikroalgákkal, melyek a toxikus anyagok csökkentésében játszhatnak fontos szerepet [Rajasulochana, 2016]. Az algák használata a következő célok esetén alkalmazható a szennyvíztisztításban:

- biológiai oxigénigény csökkentése,
- nitrogén- és/vagy foszforeltávolítás,
- *E. coli* baktériumok gátlása,
- nehézfémek eltávolítása.

Ráadásul a keletkező biomassza hatékonyan használható metántermelésre, komposztálásra, folyékony üzemanyagok előállítására vagy a mezőgazdaságban, esetleg akár állatok takarmányozására is [Rajasulochana, 2016].

Köszönetnyilvánítás

A könyvfejezet összeállítása a „Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózat – RING 2017” című, EFOP-3.6.2-16-2017-00010 jelű projekt részeként a Széchenyi 2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

Abdulgader M., Yu Q. J., Zinatizadeh A. A., Williams P. (2009): Biological treatment of milk processing wastewater in a sequencing batch flexible fibre biofilm reactor. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 4, pp. 698–703.

Abdulgader M., Yu Q. J., Zinatizadeh A. A., Williams P. és Rahimi Z. (2020): Performance and kinetics analysis of an aerobic sequencing batch flexible fibre biofilm reactor for milk processing wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 255, Article 109793.

Ahmed M. B., Zhou J. L., Ngo H. H., Guo W., Thomaidis N. S. és Xu J. (2017): Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 323, pp. 274–298.

Ardern E. és Lockett W. T. (1914): Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 33, pp. 523–539.

Barótfi I. (2003): *Környezettechnika*. Mezőgazda Lap- és Könyvkiadó Kft., Budapest. ISBN: 978-963-9239-50-0.

Hube S., Eskafi M., Hrafnkelsdóttir K. F., Bjarnadóttir B., Bjarnadóttir M. Á., Axelsdóttir S. és Wu B. (2020): Direct membrane filtration for wastewater treatment and resource recovery: a review. *Science of the Total Environment*, 710, Article 136375.

Internet 1: *Települési és ipari szennyvizek kezelése* (PDF). Elérhető: <http://kkft.bme.hu/attachments/article/43/TOC.pdf> (letöltve: 2020. 01. 07.).

Internet 2: *Biológiai szennyvíztisztítás* (ábra). Elérhető: <https://wapp.hu/wp-content/uploads/biologiai-szennyvizisztitas-02.png> (letöltve: 2020. 01. 13.).

Internet 3: *A biológiai szennyvíztisztítás*. Elérhető: <https://www.vgfszaklap.hu/lapszamok/2011/majus/2036-a-biologiai-szennyvizisztitas> (letöltve: 2020. 01. 15.).

Internet 4: *Biológiai szennyvíztisztítás*. Elérhető: <https://wapp.hu/technologiak/biologiai-szennyvizisztitas/> (letöltve: 2020. 01. 13.).

Internet 5: *Nitrification and Denitrification*. Elérhető: <https://www.marylandbiochemical.com/products/bioremove-5900/nitrification-and-denitrification/> (letöltve: 2020. 01. 10.).

Munirasu S., Haija M. A. és Banat F. (2016): Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment – a review. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, pp. 183–202.

Pądzior K., Bilińska L. és Ledakowicz S. (2019): A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 376, Article 120597.

Rajasulochana P. és Preethy V. (2016): Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – a comprehensive review. *Resource-Efficient Technologies*, 2, pp. 175–184.

Rezvani F., Sarrafzadeh M.-H., Ebrahimi S. és Hee-Mock O. (2019): Nitrate removal from drinking water with a focus on biological methods: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, pp. 1124–1141.

Simándi P. (2011): *Szennyvíztisztítási technológiák I*. Szent István Egyetem.

Suresh A., Grygolowicz-Pawlak E., Pathak S., Soon Poh L., Abdul Majid M. B., Dominiak D., Bugge T. V., Gao X. és Ng W. J. (2018): Understanding and optimization of the flocculation process in biological wastewater treatment processes: a review. *Chemosphere*, 210, pp. 401–416.

Tian X., Song Y., Shen Z., Zhou Y., Wang K., Jin X., Han Z. és Liu T. (2020): A comprehensive review on toxic petrochemical wastewater pretreatment and advanced treatment. *Journal of Cleaner Production*, 245, Article 118692.

Veréb G., Kálmán V., Gyulavári T., Kertész Sz., Beszédes S., Kovács G., Hernádi K., Pap Zs., Hodúr C. és László Zs. (2019): Advantages of TiO₂/carbon nanotube modified photocatalytic membranes in the purification of oil-in-water emulsions. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(4), pp. 1167–1174.

Veréb G., Gayir V. E., Santos E. N., Fazekas Á., Kertész Sz., Hodúr C. és László Zs. (2020): Purification of real car wash wastewater with complex coagulation/flocculation methods using polyaluminum chloride, polyelectrolyte, clay mineral and cationic surfactant. *Water Science and Technology*, in press, pp. 1–8.

Wu B., Kitade T., Chong T. H., Uemura T. és Fane A. G. (2013): Impact of membrane bioreactor operating conditions on fouling behavior of reverse osmosis membranes in MBR–RO processes. *Desalination*, 311, pp. 37–45.

16. Hulladékhasznosítás

Veréb Gábor, Kertész Szabolcs¹⁶

16.1. Bevezetés

Az ipari és mezőgazdasági tevékenységek, valamint a fogyasztói társadalom hatalmas mennyiségű hulladékot termel, melynek kezelésével, környezetterhelésének minimalizálásával a hulladékgazdálkodás foglalkozik. Az ún. hulladékhierarchia legfontosabb eleme természetesen a hulladékképződés megelőzése, de ha ez nem lehetséges, akkor a körkörös gazdaságok kialakítására kell törekedni a hulladék újrahasználatára, újrafeldolgozására és egyéb hasznosítása révén, az egészséges környezet és a fenntartható nyersanyag-gazdálkodás biztosítása érdekében.

A korszerű hulladékgazdálkodási technológiák között is szerepel számos biokatalitikus- és biotranszformációs eljárás, melyek célja – a hulladékról alkotott 2012. évi CLXXXV. törvénnyel [Jogszabály 1] összhangban –, hogy a szerves hulladékok is a lehető legnagyobb mértékben kerüljenek anyagában történő, illetve energetikai újrahasznosításra (megfelelő kezelést és átalakítást követően), valamint hogy ezáltal minél kevésbé terheljék a környezetet. Az említett törvény egyik alapelveként értelmében „elő kell segíteni a biológiailag lebomló hulladék elkülönített gyűjtését és hasznosítását annak érdekében, hogy a hasznosítás után a természetes szervesanyag-körforgásba minél nagyobb tisztaságú anyag kerülhessen vissza, valamint a hulladéklerakókon lerakásra kerülő települési hulladék biológiailag lebomló tartalma csökkenjen” [Jogszabály 1].

Ezen célokhoz megfelelően a 23/2003. (XII. 29.) KvVM rendelet [Jogszabály 2] szabályozza a biológiai kezelésre, valamint stabilizálásra felhasználható hulladékok körét (16.1. táblázat). Jelen fejezetben – a teljesség igénye nélkül – az említett törekvéseket lehetővé tevő, illetve elősegítő komposztálás, a biogázfejlesztés és a bioetanol-előállítás témái kerülnek részletes kifejtésre.

16.1. táblázat: A 23/2003. (XII. 29.) KvVM rendelet [Jogszabály 2] 1. sz. mellékletének rövidített tartalma a biológiai kezelésre, valamint stabilizálásra felhasználható hulladékok köréről

- | |
|--|
| <p>1. Mezőgazdasági, kertészeti, vízkultúrás termelésből, erdőgazdaságból, vadászatból, halászatból, élelmiszer-előállításból és -feldolgozásból származó hulladékok</p> <ul style="list-style-type: none">• hulladékká vált állati- és növényi szövetek,• állati ürülék, vizelet és trágya (beleértve a szennyezett szalmát és a hígtrágyát),• állati eredetű élelmiszerek előkészítéséből és feldolgozásából származó hulladékok,• fogyasztásra vagy feldolgozásra alkalmatlan gyümölcs, zöldség és gabonafélék,• étolaj, kakaó, kávé, tea és dohány előkészítéséből és feldolgozásából, konzervgyártásból, élesztő- és élesztőkivonat-készítésből, melaszfeldolgozásból származó hulladékok,• cukorgyártási, tejipari, sütő- és cukrászipari hulladékok, valamint a szeszfőzés hulladékai stb. |
|--|

¹⁶ Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar,
Folyamatmérnöki Intézet
6725 Szeged, Moszkvai krt. 9.
verebg@mk.u-szeged.hu

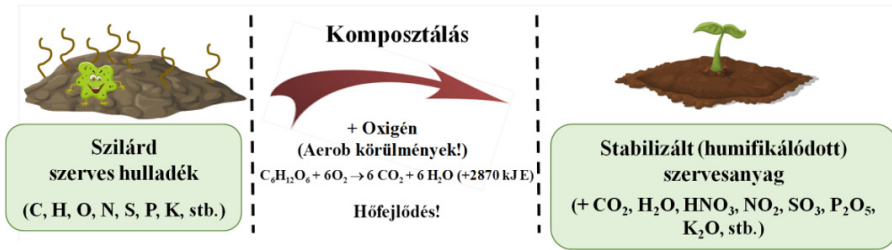
2. Fafeldolgozásból és falemez-, bútor-, cellulózrost-szuszpénzió-, papír- és kartongyártásból származó hulladékok • fafeldolgozásból, falemez- és bútorgyártásból származó hulladékok, • fakéreg, parafahulladék, faforgács, fűrészáru-darabolási hulladékok, • cellulózrost-szuszpénzió-, papír- és kartongyártási, feldolgozási hulladékok, • hasznosításra szánt papír és karton válogatásából származó hulladékok,
3. Bőr-, szőrme- és textilipari hulladékok
4. Hulladékká vált csomagolóanyagok, közelebből nem meghatározott abszorbensek, törlőkendők, szűrőanyagok és védőruházat
5. Hulladékekezelő létesítményekből, szennyvizet keletkezésük telephelyén kívül kezelő szennyvíztisztítókból, illetve az ivóvíz- és iparivíz-szolgáltatásból származó hulladékok • anaerob kezeléséből származó hulladékok, • állati és növényi hulladék anaerob kezeléséből származó kirohasztott anyagok, • települési és ipari szennyvíztisztításból származó iszapok, • durva és finom szűrésből származó szilárd hulladékok stb.
6. Települési hulladékok (háztartási hulladékok és az ezekhez hasonló kereskedelmi, ipari és intézményi hulladékok), beleértve az elkülönítetten gyűjtött hulladékokat is • papír és karton, biológiailag bomló konyhai és étkezési hulladékok, étolaj, zsír stb.

16.2. Komposztálás

A komposztálás alapjai

A komposztálás a szerves hulladékok hozzáadott értékű termékekké alakításának egyik lehetséges módszere, definíció szerint a biohulladékok ellenőrzött körülmények között, oxigén jelenlétében történő autotermikus és termofil biológiai bontása/átalakítása, mikro- és makroorganizmusok segítségével [Jogsabály 2]. A komposztálás a szilárd fázisú fermentációk (SSF: Solid State Fermentation) közé sorolható (nem steril) eljárás, mivel vízzeloldhatatlan, illetve vízben csak korlátozottan oldódó biomassa kerül átalakításra a megfelelő mikroorganizmusok révén úgy, hogy a mikroorganizmusok elszaporodása és azok anyagcsere-folyamatai is a szilárd részecskék felületén, illetve a részecskék közötti térben mennek végbe [Pandey, 2003]. A folyamat végterméke, maga a komposzt, egy olyan stabilizált biomassa, amely a növények tápanyagellátásának, illetve a talaj tápanyag-szolgáltató képességének javítására szolgál, így kiválóan alkalmas rekultivációra és talajerő-utánpótlásra egyaránt.

A komposztálás jelentős alapanyagai a különböző ipari és lakossági szennyvizek kezelése során keletkező (anaerob rothasztással és/vagy víztelenítéssel előkezelt) szennyvíziszapok, valamint a mezőgazdasági, élelmiszeripari és könnyűipari szilárd szerves hulladékok is (16.1. táblázat). Megfelelő körülmények biztosítása mellett a komposztálás folyamata (16.1. ábra) során a kiindulási szerves anyagok oxidatív átalakulása megy végbe, a szerves anyag egy része mineralizálódik, szén-dioxiddá, vízzé és szerves ionokká alakul. Mivel a folyamat exoterm, jelentős hőfejlődéssel jár, így a komposztálással a szervesanyag-stabilizáláson túl, a sok esetben jelen lévő patogén mikroorganizmusok ártalmatlanítása is megvalósítható.

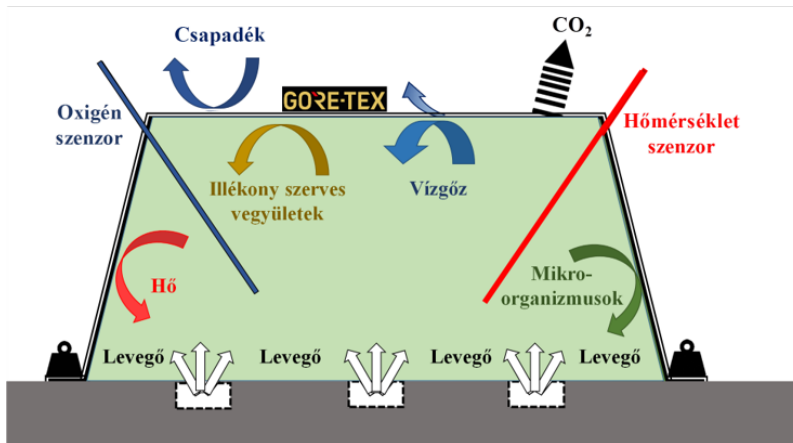


16.1. ábra: A komposztálás folyamatának egyszerűsített összefoglalása

Körülmények

Számos fontos paraméter van, amelyeket célszerű ellenőrizni, illetve adott esetben beállítani már a komposztálás előtt (a különböző biomasszák megfelelő arányú keverésével vagy hozzáadott anyagokkal), és szabályozni a komposztálás alatt a jó komposztminőség elérése és a korai érés érdekében. A legfontosabb paraméterek a nedvességtartalom, a pH, a C/N arány, a porozitás, a hőmérséklet és az oxigénkoncentráció [Ryckeboer, 2003; Raza, 2016; Lim, 2017; Barthod, 2018; Zouitina, 2019].

Az optimális nedvességtartalom 50–55% közötti. Az alacsonyabb értékek a baktériumoknak nem kedvezők, vagy akár a pusztulásukat is eredményezhetik, míg a magasabb értékek anaerob körülményekhez vezethetnek, melyek üvegházhatású gázok (pl. metán) és kellemetlen szagot okozó gázok (pl. H_2S) termelődését is eredményezhetik. A magas nedvességtartalom az intenzív kipárolgás okozta hőmérsékletcsökkenés miatt is kedvezőtlen, mivel az akár a mikrobiológiai aktivitás csökkenéséhez is vezethet.



16.2. ábra: Komposztálás a körülmények javítását szolgáló membránborítással

A hőmérséklet szempontjából tehát a magasabb hőmérséklet biztosítása kedvezőbb, melynek elérésére szigetelések és féligáteresztő membránok nyújtanak lehetőséget (16.2. ábra). A Gore-Tex® membránok jellemzően pár tized mm vastag politetrafluor-etilén (PTFE avagy teflon) anyagú féligáteresztő membránokat tartalmazó takarórétegek, melyeken keresztül a csapadék nem tud bejutni, de a mikrobiológiai átalakulás során képződő vízgőz egy része képes kidiffundálni. Ezzel a takarással csökkenthető a szaghatás is, illetve a kórokozók kijutását is meggátolja, ami munkavédelmi és környezet-egészségügyi szempontból is igen kedvező.

Mivel a komposztálás aerob folyamat, kulcsfontosságú a megfelelő mennyiségű oxigén biztosítása, ami történhet a prizmák forgatásával (bár ez gyakran jelentős hővesztéshez vezet), vagy korszerűbb megoldás esetében kompresszorral és megfelelő csőhálózattal biztosított levegőztetéssel is (16.2. ábra), mely egy oxigénszenzor és egy számítógép segítségével akár automatizálható is.

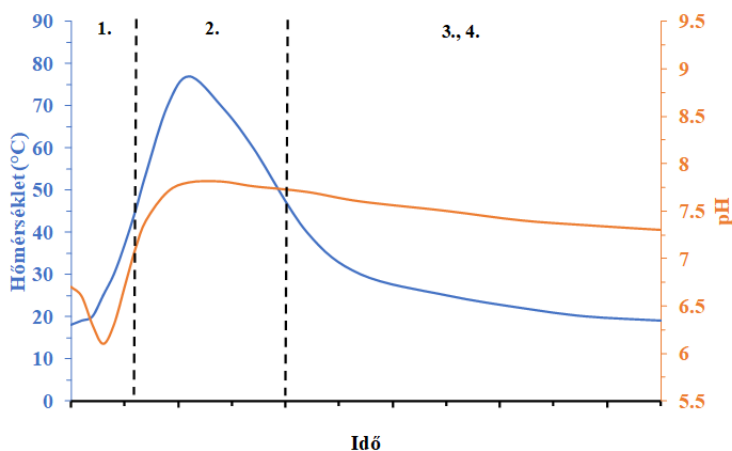
A mikroorganizmusoknak elszaporodásuk során energiára és tápanyagokra (C, P, N, K) van szükségük. Energiaforrásként szénre, míg a sejtanyagaik felépítéséhez nagy mennyiségű nitrogénre van szükségük, így ezek arányát a komposztálási folyamatok sebességének maximalizálása érdekében célszerű kb. 25–30/1-re állítani, de mindenképpen törekedni kell arra, hogy 50 alatt legyen, hiszen a túl alacsony nitrogéntartalom a folyamat lassulását eredményezi, így adott esetben célszerű a magas nitrogéntartalmú szerves anyaggal (például szarvasmarha-trágyával) való keverés. A folyamat végére többnyire 20/1 alá szokott csökkenni ez az arány.

A pH-érték szempontjából a 6–8 közötti érték az optimális, nem megfelelő érték esetében ismét a különböző szerves hulladékok keverése nyújthat egyszerű megoldást.

A térkitöltési viszonyok szempontjából a minél nagyobb porozitásra kell törekedni, a nagy hozzáférési felület és az oxigén egyenletes eloszlásának biztosítása céljából. Szennyvíziszapok esetében a biomassa eredeti állapotában is megfelelően nagy porozitással rendelkezik (igaz, az optimális nedvességtartalom érdekében célszerű a száraz mezőgazdasági hulladékkal való keverés), de a darabos biohulladékok esetében megfelelő aprítással kell biztosítani a kellően nagy porozitást (még a keverést megelőzően).

A komposztálás szakaszai

A megfelelő körülményeket biztosítva a komposztálás folyamata négy nagyobb szakaszra osztható, melyeket döntően a 16.3. ábrán bemutatott hőmérsékletviszonyok és pH-értékek jellemeznek [Ryckeboer, 2003; Raza, 2016; Lim, 2017].



16.3. ábra: A komposztálás egyes szakaszainak jellemző hőmérséklete és pH-értéke

Az első egy kezdeti (bevezető) mezofil szakasz (<45 °C), amely néhány órát, esetleg pár napot vehet igénybe. Ebben a fázisban a biomassa pH-értéke kezdetben jellemzően enyhén savas, és a könnyen lebontható szerves anyagokból képződő szerves savak miatt a folyamat legelején további pH-csökkenés figyelhető meg. Ebben a szakaszban a mezofil gombák és baktériumok (pl. *Bacillus*, *Cellulomonas*, *Enterobacter*, *Micrococcus*, *Nitrobacter*, *Nitrosomonas*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Streptomyces* stb.) a szerves anyagok domináns lebontói.

A baktériumok a rájuk jellemző nagy felület/térfogat arány, a kis generációs idő és a tápanyagok felvételét elősegítő számos enzim termelése következtében versenyelőnyhöz jutnak a gombákhoz képest. Így a komposztálás ezen szakaszában – amelyet a szubsztrát elérhetőségének és az egyéb paramétereknek a gyors változása jellemez – a baktériumok száma általában sokkal intenzívebben nő (és sokkal magasabb is), mint a gombáké. Következésképpen a baktériumok felelősek a komposzt kezdeti bomlásáért és a hőtermelésért is, feltéve, hogy biztosított a nekik kedvező, 50–60%-os nedvességtartalom és a közel semleges pH (alacsony nedvességtartalom vagy pH esetén előtérbe kerülhet a gombafajok jelentősége). A prokarióták széles köre termel amilázenzimeket is, amelyek lehetővé teszik a keményítő lebontását, amely szintén fontos ezen kezdeti szakaszban.

A második (lebomlási) szakasz a termofil fázis (45–70 °C), mely jellemzően több napig, de akár több hétig (pl. az élelmiszeripari hulladékok esetében) vagy hónapokig (pl. faipari hulladékok esetében) is eltarthat. Amint a hőmérséklet 30 °C fölé emelkedik, és a pH-érték is áttolódik az enyhén lúgos tartományba (a fehérjék bomlása során képződő ammónia miatt), elkezdenek jelentősen elszaporodni az *Actinomyces* (elsősorban a *Streptomyces*) fajok, melyek a talaj és a komposzt jellegzetes „földillatáért” is felelős geozmint termelik (a számukra

optimális pH-tartomány 7–8 között van). Ezen baktériumok nagyon fontos szerepet játszanak a komposztálásban, ugyanis szén- és nitrogénigényük fedezésére enzimeik segítségével képesek lebontani a természetes polimereket, a növényi eredetű cellulózt és hemicellulózt, illetve a gombákból és a talajfaunából származó kitint és lignint, valamint egyes xenobiotikumokat is.

Ebben a szakaszban a kezdeti mezofil fázishoz képest a degradáció felgyorsul, a mezofil mikroorganizmusok inaktiválódnak vagy elpusztulnak, miközben a termofil baktériumok és gombák száma és a fajok sokfélesége is növekszik. A gombáknak a cellulóz és a lignin lebontására való képessége általában nagyobb, mint a legtöbb baktériumé. A termofil gombák (pl. *Fusarium*, *Agaricus* és *Aspergillus* fajok) optimális hőmérséklete 40–55 °C, de 60 °C feletti hőmérsékleten elpusztulnak vagy spórákként élhetik túl a magas hőmérsékletet. A termofil *Actinomyces* fajok változatossága a számukra optimális 45–55 °C-os hőmérsékleten a legnagyobb, de 60 °C fölött már nekik is csökken a jelentőségük. Ugyanakkor egyes (nem spóráképző) baktériumok (pl. *Hydrogenobacter*, *Thermus* fajok) 70 °C feletti hőmérsékleten (akár 82 °C-ig) is életképesek.

Ezen termofil szakasz biztosítja a kórokozók termikus inaktiválását, mely a keletkező termék vonatkozásában fontos mind a növényi higiénia, mind az emberi betegségek szempontjából. Általában minél magasabb a hőmérséklet, annál hatékonyabb a kórokozók elpusztítása, de egyes tanulmányok szerint az *Actinomyces* fajok által kifejtett antagonisták hatások is kulcsfontosságú szerepet játszhatnak.

A termofil fázist ismét egy **mezofil fázis (átalakulási szakasz)** követi, amely során jellemzően az első mezofil fázistól különböző mikroorganizmusok szaporodnak el. A szubsztrát kimerülésével a termofil organizmusok aktivitása és ezzel párhuzamosan a hőmérséklet is csökkenni kezd. A mezofil szervezetek újra el tudnak szaporodni, és noha az összes élő mikroorganizmus-szám 1–2 nagyságrenddel is csökkenhet a termofil fázishoz képest, a taxonómiai sokféleség növekszik. Számos olyan baktérium jelenik meg, amelyek fontosak a komposzt érésében, a hidrogén, az ammónia, a nitrit és a kén oxidációjában egyaránt.

Végül a komposztálás folyamatában a hőmérséklet folyamatos csökkenése mellett **az utolsó „érlelési” fázis (avagy stabilizációs szakasz)** zárja a sort, amely szintén több hétig vagy akár hónapokig is eltarthat, és amelyet döntően a gombák elszaporodása jellemez. Ezen fázisban megy végbe a szerves anyag humifikálódása. Az *Arthrobacter* nemzetséghez tartozó baktériumfajok száma utal a komposzt érettségének fokára, illetve vizsgálatok igazolják, hogy a fajok sokfélesége párhuzamba állítható a végtermék stabilitásával is. A komposzt érettségi szintje befolyásolja annak felhasználhatóságát a mezőgazdaságban, hiszen az éretlen komposzt a talajban lévő mikrobiális aktivitás megnövelésével ideiglenes oxigénhiányhoz és akár fitotoxicitáshoz vezethet.

A komposztálás kivitelezésének módszerei

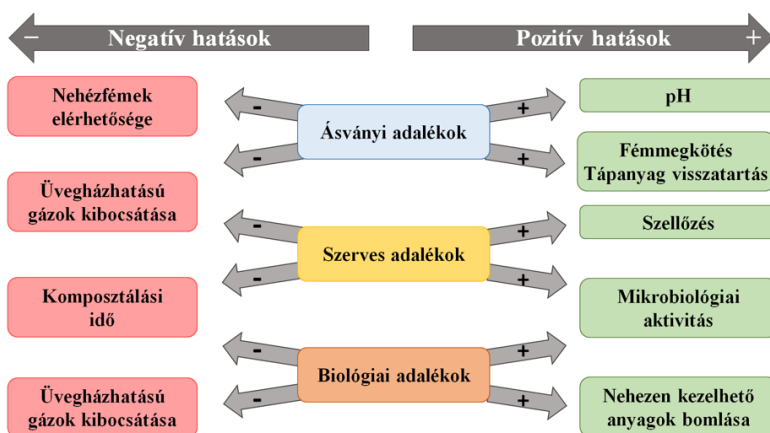
A komposztáló rendszereket három fő típusba lehet osztályozni: az ún. prizmás rendszerekre, a levegőztetett rendszerekre és a reaktoros (avagy tartályos) rendszerekre. A prizmás rendszerek rendkívül idő- és területigényesek, de viszonylag alacsony beruházási és üzemeltetési költséggel járnak. A membránszigeteléssel ellátott, számítógép-vezérléssel levegőztetett rendszerek már jelentősen csökkentik a terület- és az időigényt egyaránt, de azon országokban, ahol korlátozott a földterület elérhetősége, a komposztáló reaktorok

a vonzóbbak, hiszen ebben az esetben a legkisebb a területigény és a leggyorsabb a folyamat, bár ez a módszer a legdrágább, mind beruházási, mind üzemeltetési szempontból. A legújabb kutatások a kétlépcsős rendszerek előnyeit is igazolják, melyek kombinálják a tartályos és a prizmás rendszereket, így viszonylag rövid komposztálási idő és alacsony költségek mellett jelentősen kisebb területigényt és kisebb üvegházhatást okozó gázkibocsátást eredményeznek a jó minőségű komposztok előállítása során [Ryckeboer, 2003; Raza, 2016; Zouitina, 2019].

A komposztálás technológiai kivitelezésének fejlesztésein túl számos olyan hozzáadható segédanyag is szóba jöhet, mellyel javíthatjuk a komposztálás folyamatát a rövidebb komposztálási idő és a jobb termék-előállítás reményében. Számos kutatómunka elemzi különféle komposzt-alapanyagok esetében a hozzáadott ásványi, szerves és biológiai adalékanyagok lehetséges negatív és pozitív hatásait, melyeket a 16.4. ábra foglal össze [Barthod, 2018].

Hozzáadott ásványi anyagok lehetnek például a mész, az agyag és néhány ipari hulladék is, mint például a vörösiszap, a salakanyagok vagy a hamu, melyek alkalmasak a túlságosan savas biomassza lúgosítására. A zeolitok, illetve a bentonit a nehézfém-tartalom megkötését segítik.

A szerves adalékok csoportjába sorolhatók többek között a szalma, az érett komposzt, a zöldhulladék, a faipari hulladékok, a trágyák és a kukoricatermesztés hulladékai is. Ezen adalékanyagok kiválasztásakor elsősorban a nedvességtartalomra és a megfelelő C/N-arány beállítására kell ügyelni.



16.4. ábra: Az adalékanyagok lehetséges negatív és pozitív hatásai
[Barthod, 2018]

A biológiai segédanyagok többnyire komposztokból izolált *Alcaligenes*-, *Bacillus*-, *Clostridium*-, *Enterococcus*- és *Lactobacillus*-mikroorganizmusok, melyek segítik az ammónia asszimilációját és a lignocellulóz bontását, de eredményesen alkalmaztak többek között földigilisztákat is a komposztminőség javítására.

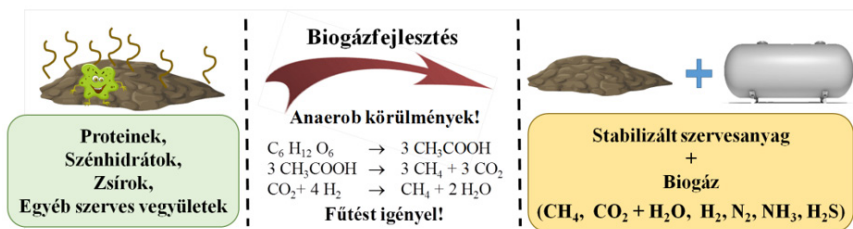
16.3. Biogázfejlesztés

A biogázfejlesztés alapjai

A mezőgazdasági, élelmiszeripari és könnyűipari (valamint a kommunális eredetű) szerves hulladékok, illetve szennyvíziszapok egy másik fontos kezelési módszere, amikor anaerob körülményeket biztosítva biogázt állítunk elő, ugyancsak megfelelő mikroorganizmusok segítségével. A folyamat kulcselemei a metanogén mikroorganizmusok, melyeknek egyik fő anyagcsereterméke a metán, mely zárt rendszerben gyűjtve számos módon hasznosítható energiahordozó.

A biogáznak a 23/2003. (XII. 29.) KvVM rendelet szerinti definíciója: metánból, szén-dioxidból és egyéb, nyomokban előforduló gázokból álló keverék, amely a biohulladék elsősorban irányított anaerob lebontásával keletkezik, és melyet zárt rendszerben kell felhasználni a környezetvédelmi és tűzvédelmi előírások betartása mellett [Jogszabály 2].

A biogázfejlesztés folyamatában (16.5. ábra) a kiindulási szerves anyagok anaerob körülmények közötti átalakulása révén keletkező gáz nagy mennyiségű metánt (50–75%) és szén-dioxidot (25–50%), illetve ezen kívül vízgőzt (H_2O), hidrogént (H_2), nitrogént (N_2), ammóniát (NH_3) és kén-hidrogént (H_2S) is tartalmaz. A folyamat endoterm, így fűtést igényel, és a metanogén mikroorganizmusok számára kedvező (40–60 °C-os) hőmérséklet kialakítása jelen esetben is elősegíti a patogén mikroorganizmusok ártalmatlanítását. Így a folyamat végén visszamaradó stabilizált szilárd szerves anyag adott esetben akár közvetlenül felhasználható talajerő-utánpótlásra, de komposztálás révén ezen biomassza tulajdonságai is tovább javíthatók, és sok esetben magas minőségű termék (minősített komposzt) állítható elő. A minősített komposzt tulajdonságainak kritériumait jelenleg a terménővelő anyagok engedélyezéséről, tárolásáról, forgalmazásáról és felhasználásáról szóló 36/2006. (V. 18.) FVM rendelet szabályozza [Jogszabály 3].



16.5. ábra: A biogázfejlesztés folyamatának egyszerűsített összefoglalása

Körülmények

A biogázfejlesztés folyamata rendkívül összetett, és számos tényező befolyásolja, beleértve az alapanyag jellemzőit és a folyamat paramétereit is. Ezért ezeket a tényezőket célszerű már a folyamattervezés során is figyelembe venni, illetve egy részüket folyamatosan ellenőrizni és szabályozni kell, ugyanis az egyik legfontosabb tényező a folyamat körülményeinek stabilitása. A fermentációs körülmények változása csökkent gázkihozatalt, kisebb metánkoncentrációt vagy akár a biogáztermelés megállását is eredményezheti. A legfontosabb paraméterek a hőmérséklet, a pH, a C/N-arány, a szerves anyagok (tápanyagok) anyagi minősége, a nedvességtartalom, a tartózkodási idő és az egyes gátló tényezők mértéke [Kougias, 2018; Mirmohamadsadeghi, 2019; Panigrahi, 2019].

A biogázfejlesztés számára optimális hőmérsékletet és annak minél kisebb ingadozását is minden esetben megfelelő fűtéssel és szigeteléssel kell biztosítani. A kívánt hőmérséklet a technológia jellegétől függően 20–40 °C (mezofil technológia; optimális érték: 35 °C) vagy 50–60 °C (termofil technológia; optimális érték: 55 °C). Az üzemi hőmérséklet kiválasztása és stabil szinten történő szabályozása kiemelkedő jelentőségű, mivel ez a paraméter nagy hatással van a mikroorganizmusok működésére. A hőmérséklet ingadozása az illékony zsírsavak (VFA – volatile fatty acids) felhalmozódásához és a biogáztermelés ezzel egyidejű csökkenéséhez vezet. Közismert, hogy a termofil körülmények a kisebb tartózkodási időn túl is számos előnyt jelentenek a mezofil feltételekhez képest, melyeket a „A biogázfejlesztés kivitelezésének részletei” című alfejezet részletezi [Kougias, 2018; Mirmohamadsadeghi, 2019; Panigrahi, 2019].

A következő nagyon fontos paraméter a kezelt biomassza pH-értéke, melynek optimális tartománya 6,5–7,5, vagyis a folyamat semleges körüli pH-t igényel. Ha a pH-érték kívül esik ezen a tartományon, akkor az a metántermelés drámai csökkenéséhez vezethet, ugyanis pont a metántermelő metanogén baktériumok a legérzékenyebbek erre a paraméterre. A pH-érték változását eredményezheti a folyamat során a szerves savak felhalmozódása (savasodás), mely csökkenti a pH-t, míg az emelkedett ammónia-koncentráció növeli azt. A pH-érték szabályozható, és az alacsony pufferkapacitás növelhető a szerves anyag bevezetésének mérséklésével, megfelelő szerves anyagok keverésével, illetve NaOH, Na₂CO₃ vagy Ca(OH)₂ adagolásával [Kougias, 2018; Mirmohamadsadeghi, 2019; Panigrahi, 2019].

Mivel a mikroorganizmusok számára jelen esetben is a kezelendő biomassza szénttartalma jelenti az energiaforrást, és a nitrogéntartalma (mint a sejtek nélkülözhetetlen alkotóeleme) limitálja a szaporodásukat, a biogázfejlesztésben is fontos a megfelelő C/N-arány, melynek 20–30 közötti értékűnek kell lennie (az optimum: C/N=25/1). Ezen arány beállításához ügyelni kell a különböző eredetű biohulladékok megfelelő keverésére [Kougias, 2018; Panigrahi, 2019].

A víztartalom alapján kétféle típust lehet megkülönböztetni: a száraz és a nedves eljárást. Előbbi esetén 50–75%, míg utóbbi esetében 85–90% körül van a nedvességtartalom. A száraz eljárás előnye, hogy kisebb a szükséges reaktortérfogat, kisebb a víz- és energiafogyasztás, valamint kevesebb a maradékiszap is. Figyelembe véve ezeket az előnyöket, a száraz eljárás szélesebb körben alkalmazott módszer, bár egyes esetekben a nedves módszerekkel jobb gázkihozatal valósítható meg [Kougias, 2018; Mirmohamadsadeghi, 2019; Panigrahi, 2019; Zhang, 2013].

Az eddig részletezett fontos üzemeltetési paraméterek optimális értékeinek tömörített összefoglalását mutatja be a 16.2. táblázat.

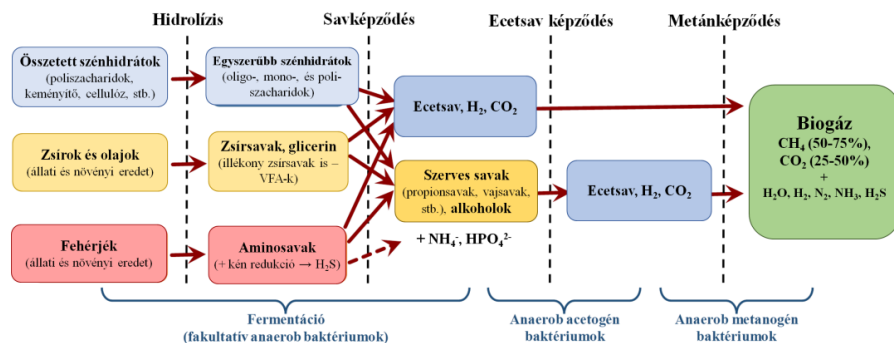
16.2. táblázat: A biogázfejlesztés fontosabb üzemeltetési paramétereinek optimális értékei

Paraméter	Érték
Hőmérséklet	Mezofil: 20–40 °C (optimum: 35 °C) Termofil: 50–60 °C (optimum: 55 °C)
Tartózkodási idő	Mezofil: 20–25 nap Termofil: ~15 nap
pH-érték	Optimális: 6,5–7,5
C/N-arány	20/1–30/1 (optimum: 25/1)
Nedvességtartalom	Száraz eljárás: 50–75% Nedves eljárás: 85–90%

Fontos megemlíteni, hogy egyes vegyületek jelentős gátló hatást fejthetnek ki, melyek csökkent biogáztermelést vagy akár a folyamat leállítását is eredményezhetik. Az egyik leggyakoribb inhibitor a megnövekedett ammóniakoncentráció, mely magas fehérjetartalmú biohulladék vagy – szennyvíziszap esetében – nem jól üzemelő nitrifikáció következtében jelentkezhet. Erre a metanogén baktériumok a legérzékenyebbek. Ugyancsak toxikusnak tekinthetők a folyamatra nézve a hosszú láncú zsírsavak (LCFA – long chain fatty acids), melyeket elsősorban a különböző agráripari (pl. vágóhídi) és élelmiszeripari (pl. étolaj-előállítás) hulladékok tartalmaznak magas koncentrációban. Az LCFA negatívan hat a hidrolízisre, a szerves savak és az ecetsav termelésére, valamint a metántermelésre egyaránt, de hatásuk kevésbé kártékony, mint az ammóniáé, ugyanis a metanogén baktériumok viszonylag toleránsak ezen vegyületekre (a többi mikroorganizmushoz képest). Végül, a biogázüzemek egy további problémája lehet a habzás (vagy habképződés), mely elsősorban a rossz keverés vagy a szerves anyag túlterhelés eredményeként keletkező speciális bio-felületaktív anyagok következtében jelentkezhet. A habzási problémák több napig vagy akár hetekig is, 20–50%-os biogáztermelési veszteséget okozhatnak. A folyamatot elsősorban ún. habzásgátló vegyi anyagok hozzáadásával lehet visszaszorítani vagy megakadályozni [Kougias, 2018; Panigrahi, 2019].

A biogázfejlesztés folyamatának szakaszai

A bomlási folyamat négy nagyobb szakaszra osztható, de a legtöbb gyakorlati alkalmazásban ezen folyamatok időben és térben nem elkülönülten mennek végbe. A teljesség kedvéért megjegyzendő, hogy ma már léteznek olyan többlépcsős – akár mezofil és termofil körülményeket is alkalmazó – kombinált eljárások is, ahol a most részletezésre kerülő szakaszokat ténylegesen elkülönítik térben és/vagy időben. Az egyes folyamatok összefoglalása látható a 16.6. ábrán.



16.6. ábra: A biogázfejlesztés folyamatának szakaszai

Első szakasz (hidrolízis): A fakultatív anaerob baktériumok (*Clostridia*, *Micrococcus*, *Streptococcus* stb.) a komplex (sok esetben vízdoldhatatlan) makromolekuláris szerves anyagokat, így a komplex szénhidrátokat (mint például a cellulózt), a fehérjéket és a zsírokat kisebb molekulájú köztitermékeké bontják (depolymerizálják, illetve hidrolizálják) különböző enzimek (celluláz, cellobiáz, amiláz, xilanáz, lipáz stb.) segítségével. A folyamatok eredményeképpen egyszerűbb szénhidrátok (főleg monoszacharidok), aminosavak és hosszú láncú zsírsavak keletkeznek. Ez a fázis két további egységre tagolható: először az ún. baktériumkolonizáció megy végbe (a hidrolitikus baktériumok befedik a szilárd részecskék felületét), majd ezt követően kezdődik meg a szerves anyag lebontása [Kougias, 2018; Panigrahi, 2019; Merlin, 2014; Campanaro, 2016].

Második szakasz (savképzés – acidogenezis): Az első fázis köztitermékeiből, az ugyancsak fakultatív anaerob savképző baktériumok (*Streptococcus*, *Lactobacillus*, *Bacillus*, *Salmonella* stb.) rövidebb láncú zsírsavakat, szerves savakat (pl. propionsav, vajsav, de már ezen fázisban is képződhet akár ecetsav is), alkoholokat, szén-dioxidot, hidrogént és ammóniát hoznak létre. Ez a legkönnyebben és leggyorsabban lezajló fázis. Ezenkívül érdemes szót ejteni arról, hogy az ebben a fázisban képződő savak a pH csökkenését eredményezhetik, ami bár kedvező lenne ezen fázis mikroorganizmusainak, de a metántermelő baktériumoknak egyáltalán nem. Ebből adódik, hogy célszerű lehet az egyes szakaszokat térben és időben elkülöníteni az adott szakaszra jellemző mikroorganizmus-kultúra számára kedvezőbb feltételek biztosítása érdekében [Kougias, 2018; Panigrahi, 2019; Merlin, 2014; Campanaro, 2016].

Harmadik szakasz (ecetsavképzés – acetogenezis): Ezen fázisban ecetsavat, szén-dioxidot és hidrogént termelnek az anaerob ecetsav-baktériumok (pl. *Syntrophomonas*, *Clostridium*, *Acetobacterium*, *Thermoanaerobacter* fajok), melyek enzimei többnyire rendkívül oxigénérzékenyek, viszonylag lassan szaporodnak, érzékenyek a szervesanyag-terhelés ingadozására és a környezeti változásokra is, így a környezeti feltételekhez való alkalmazkodásuk igencsak időigényes [Kougias, 2018; Panigrahi, 2019; Merlin, 2014; Campanaro, 2016].

Negyedik szakasz (metánképzés – metanogenezis): Az utolsó szakaszban a metanogén mikroorganizmusok hatására metán, szén-dioxid és víz képződik. A metanogén baktériumok a metánt metabolikus melléktermékként termelik, amikor a hidrogénből, szén-dioxidból, metilezett szénhidrogénekből és ecetsavból nyerik ki energiaigényüket és szénforrásukat egyaránt. A metántermelés egyrészt az ecetsavmolekulák biodegradációja

révén ($\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$), másrészt a szén-dioxid hidrogénnel történő redukciója révén ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) megy végbe. A folyamatban számos speciális enzim vesz részt, így pl. a metanofuránkoenzim, a metil-koenzim-M-reduktáz, a foszfortranszacetiláz és az acetát-kináz. A metanogének nagyon érzékenyek a környezeti változásokra, leginkább a pH-értékre, és inkább enyhén lúgos környezetet részesítenek előnyben, sőt, ha a pH 6 alá esik, akkor a metántermelés akár teljesen meg is állhat. Mivel a hidrolízis és a savképzés mikroorganizmusai akár egy nagyságrenddel gyorsabban növekednek, mint a metanogének, a metanogenezis a folyamat sebességszabályozó faktora [Kougias, 2018; Panigrahi, 2019; Merlin, 2014; Campanaro, 2016].

A biogázfejlesztés kivitelezésének részletei

A kezelendő biomasszát a legtöbb esetben egy nagy térfogatú tárolómedencébe gyűjtik (mely többnyire földbe ágyazott – akár zárt – betonmedence a kedvező hőszigetelés biztosítása érdekében), és abból biztosítják a folyamatos ellátást. Előkezelésként a darabosabb, kis hozzáférési felülettel rendelkező biomasszákat megfelelő eszközökkel aprítják, míg a higiéniai szempontból nem megfelelő anyagok (pl. ételmaradékok, vágóhídi hulladék) esetén fertőtlenítés is szükséges lehet például hőkezeléssel. Az aktuális fejlesztési irányzatok kapcsán meg kell említeni, hogy számos előkezelési módszert vizsgálnak – így például oxidációs [Beszedes, 2009; Le, 2019; Ahmad, 2019], mikrohullámú [Beszedes, 2009, 2011a, 2011b], vagy akár enzimátikus [Emadian, 2020; Hosseini, 2019] előkezeléseket is –, melyekkel a kisebb reakcióidő, a hatékonyabb gázkihozatal, a kedvezőbb gázösszetétel és/vagy a kevesebb mennyiségű, jobb minőségű iszapmaradék elérése a cél. A biomassza előkészítésének része a megfelelő C/N-arány, pH és nedvességtartalom beállítása is.

A biogáztermelő üzemek legfontosabb egysége maga a reaktor, avagy erjesztőkamra, mely egy folyadék-, gáz- és hőszigetelt tartály, és mely többnyire hengeres formájú a kisebb hőleadási felület biztosítása érdekében. A reaktorban elhelyezett függőleges vagy vízszintes tengelyű keverőberendezések és/vagy a keletkező biogáz fúvókákon keresztül kivitelezett recirkuláltatása biztosítja a biomassza folyamatos homogenizálását. A reaktor fontos részei a fűtőelemek és a hőcserélők is. A kezelés időtartama (15-től akár 50 napig) nagymértékben függ az alkalmazott hőmérséklettől (mezofil vagy termofil körülmények), a biomassza anyagi minőségétől és a pH-tól is.

A termofil körülmények számos előnyt jelentenek a mezofil feltételekhez képest [Kougias, 2018; Panigrahi, 2019]:

- Nagyobb a reakciósebesség, így könnyebben ellenáll a nagyobb szervesanyag-terheléseknek.
- A nagyobb reakciósebesség miatt rövidebb a tartózkodási idő is (~15 nap, míg a mezofil biogázfejlesztést többnyire 20–25 napos tartózkodási idő jellemzi).
- Elősegítheti a hosszú láncú zsírsavak (LCFA – long chain fatty acids) hatékonyabb lebomlását.
- Jobb a folyamat energiamérlege, mert bár a nagyobb hőmérséklet többletenergiát igényel, de nagyobb a gázkihozatal, és a termékre jellemző CH_4/CO_2 -arány is kedvezőbb.
- A fertőtlenítési hatékonysága is kedvezőbb a magas hőmérsékletből adódóan, ami a maradék iszap további felhasználásának szempontjából kedvező.
- A hatékonyabb bomlás következtében kevesebb is az iszapmaradék, mely a szállítási költségeket is csökkenti.
- A beruházási költség is kedvezőbb lehet a kisebb reaktorméret miatt.

Az elérhető előnyök igen hosszú listájának ellenére természetesen a hátrányoktól sem mentes a termofil módszer sem [Kougias, 2018; Panigrahi, 2019]:

- A folyamat instabilitásának nagyobb a kockázata, különösen magas ammóniaterhelés és csökkent víztelenítés esetén. A termofil módszer érzékenyebben reagál a hőmérséklet-ingadozásra is, így nagyobb gondosságot igényel a fűtés és az iszap bevezetése/elvezetése szempontjából is.
- Kevésbé jelentős hátrány, hogy a termelés során több hőenergiát igényel, hiszen a jobb metánkihozatalból ez a többletenergia-igény többnyire fedezhető (illetve megfelelő szigeteléssel és hőcserével a többletenergia-igény csökkenthető).
- Ezenkívül a beoltási és beüzemelési időszak is problematikus.

Mindezen hátrányok és nehézségek ellenére egyre inkább előtérbe kerülnek a termofil biogázfejlesztő üzemek, illetve vizsgálják a két módszer előnyeit ötvöző kombinált technológiákban rejlő lehetőségeket is [Kougias, 2018; Panigrahi, 2019].

A keletkezett biogázt megfelelő tartályban tárolják, majd tisztítás (melyet a következő alfejezet tárgyal) után a helyszínen vagy sűrítés (komprimálás) és szállítás után más helyszínen hasznosítják. A helyszínen közvetlenül hasznosítható hőenergia formájában, amennyiben az égetése során keletkező hőt használják fel a reaktor és az üzem szolgálati helyiségeinek fűtésére, vagy szolgálati meleg víz előállítására, esetleg távfűtés biztosítására. Ezenkívül megfelelő tisztítást követően villamos energiát termelő gázmotorok üzemanyagaként vagy akár CNG-üzemű gépjárművek üzemanyagaként is hasznosítható (utóbbi esetben kiemelten fontos a kén-hidrogén előzetes eltávolítása). A folyamat során keletkező iszapmaradék az esetlegesen szükséges mechanikus víztelenítés után adott esetben akár közvetlenül vagy komposztálást követően felhasználható talajerő-utánpótlásra vagy rekultivációra.

A biogáz utókezelése

Mivel a biogáz a metán mellett akár 25–50% szén-dioxidot, illetve ezen kívül jelentősnek tekinthető vízgőzt és kén-hidrogént is tartalmaz, így a fűtőértéke (18–26 MJ/m³) jelentősen elmarad a földgáz fűtőértékétől (35,8 MJ/m³), ami nem helyi felhasználás esetén (a szállítás során) jelentős többletköltséget eredményez. A biogáz többi szennyező anyaga, legfőképp a kén-hidrogén pedig káros hatást gyakorol a felhasználó berendezések szerkezetére, így például a motorok, kazáncsővek és kémények korróziójához vezet az égés során képződő kén-dioxid, kénessav és kénsav miatt. Így, ha az előállított nyers biogázból eltávolítják a szennyeződések, akkor a tisztított gáz biometánként szélesebb körben értékesíthető, és alkalmassá válik villamos energiát termelő gázmotorokban történő felhasználásra vagy akár jármű-üzemanyagként történő hasznosításra. A biogázüzemű gépjárművek nemcsak a fosszilis energiahordozók felhasználásának mértékét csökkentik, de a benzin- és gázolaj-hajtású gépjárművekhez képest kisebb szénhidrogén-, nitrogén-oxid- és szén-monoxid-kibocsátást is eredményeznek [Kougias, 2018; Sahota, 2018].

A **biogáz-tisztítási módszerek** 5 nagyobb csoportja ismert: az abszorpció, az adszorpció, a mikrobiológiai, a membrántechnológiai és a kriogén eljárások [Sahota, 2018; Adnan, 2019; Sun, 2015; Dumont, 2015]:

Az **abszorpció** módszerek közül a legegyszerűbb megoldás a vízzel történő abszorpció, melyre azon egyszerű oknál fogva van lehetőség, hogy a biogáz CO₂- és H₂S-tartalma jobban oldódik a vízben, mint a metán. A szennyezők megkötéséhez magas nyomást (9–12 bar)

alkalmaznak, majd csökkentett nyomáson (2–4 bar) kerül sor a deszorpcióra. A vízen kívül szerves oldószereket (pl. metanolt vagy dimetil-étert) alkalmazó módszerek is léteznek. A fizikai abszorpción túl kémiai abszorpciót is alkalmazhatunk aminoldatok (monoetanolamin (MEA), diglikolamin (DGA), dietanol-amin (DEA) és keverékeik) segítségével, melynek előnye a kisebb (<0,1%) metánveszteség és az alacsonyabb nyomás [Kougias, 2018; Sahota, 2018].

A szennyező anyagok szilárd részecskék felületén történő megkötésén alapuló **adszorpció**s megoldások többnyire zeolitokat, aktív szenet vagy szilikátadszorbeneket alkalmaznak. Az adszorbens telítődését követően annak regenerálása szükséges. Ezen deszorpció lépést nyomáscsökkentéssel és/vagy hőmérséklet-növeléssel lehet kivitelezni [Sahota, 2018].

A biogáz tisztítására a különböző komponensek (anyagi minőségtől és molekulamérettől függő) szelektív transzportján alapuló **membránszeparációs technikák** is felhasználhatók, főként a membrános gázszerparáció. A gyakorlatban többnyire csak a szén-dioxid és a metán elválasztására használják, egy előzetes kén-hidrogén-eltávolítást követően [Sahota, 2018; Sun, 2015].

A kén-hidrogén előzetes eltávolítására (az előzőekben már tárgyalt abszorpción és adszorpción kívül) **biotechnológiai módszerek** is alkalmasak. A kén-hidrogén megkötésére és átalakítására alkalmazott ún. biofilterek többnyire biofilm formájában immobilizált mikroorganizmusokat (pl. *Thiobacillus*, *Acidithiobacillus*, *Achromatium*, *Thioplaca*, *Thermotrix*, *Thiothrix* fajokat) tartalmaznak. A H_2S megkötése és átalakulása a következők szerint megy végbe:

- a H_2S abszorpciója (gázfázisból vizes fázisba történő átalakítás),
- diffúzió a biofilmbe,
- adszorpció a biofilm által,
- biológiai lebontás.

Utóbbi lépésben oxigén jelenlétében a H_2S -t a mikrobák beépítik anyagcseréjükbe, illetve elemi kénné és szulfáttá alakítják [Dumont, 2015].

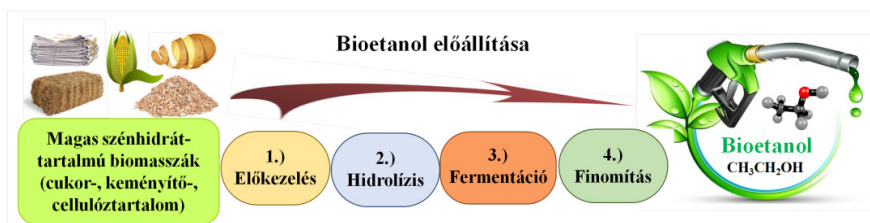
Jelenleg igen innovatív megoldása a biogáztisztításnak az ún. **kriogén technika** alkalmazása, mely a különféle gázok kondenzációs hőmérséklete közötti különbségen alapul. A nyers biogázt lehűtve és nyomás alá helyezve a CO_2 cseppfolyósítható, majd egy desztillációs lépést alkalmazva hajtjuk végre a szétválasztást. A kezelés előtt a H_2S és a víz előzetes eltávolítása szükséges a fagyás és más problémák elkerülése érdekében. A módszernek igen magas mind a beruházási, mind az üzemeltetési költsége, de nagy tisztaságú (97–99%) metánt és szén-dioxidot eredményez, nagyon alacsony (<2%) metánveszteség mellett [Sahota, 2018; Adnan, 2019; Sun, 2015].

16.4. Bioetanol-előállítás

A bioetanol előállításának alapjai

Bioetanolnak általában a valamilyen alkalmas biomasszából, biológiai úton előállított etil-alkoholt ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) nevezzük, de a jelenleg hatályos 279/2017. (IX. 22.) Kormányrendelet [Jogszabály 4] (a bioüzemanyagok és folyékony bio-energiáhozozók fenntarthatósági követelményeiről és igazolásáról) értelmében a bioetanolnak minősített terméknek feltétele az is, hogy az az Európai Gazdasági Térségben (biomasszából) előállított etanol legyen. Az előállítására leginkább alkalmas alapanyagok az olyan magas cukortartalmú növények, mint a cukorrépa vagy a cukornád (első generációs bioetanol), azonban az ilyen típusú mezőgazdasági termékek nem élelmezési célú felhasználása komoly etikai kérdéseket vet fel („élelmszer vagy üzemanyag?”). Jelen fejezetben azonban szigorúan a hulladékhasznosítás témakörénél maradv az összetett szénhidrátokat – elsősorban lignocellulózt – tartalmazó mezőgazdasági, élelmszeripari és könnyűipari melléktermékek ilyen célú felhasználását elemezzük (második generációs bioetanol). A teljesség érdekében meg kell említeni, hogy intenzív kutatások folynak a mikro- és makroalgákon alapuló ún. harmadik generációs bioetanol [Dave, 2019] előállításával kapcsolatban is.

Az eljárás négy főbb fokozatra osztható, melyek a megfelelő fizikai, fiziko-kémiai, kémiai és/vagy biológiai módszerekkel kivitelezett előkezelések (a lignocellulóz szerkezetének fellazítása), az előkezelt biomassza enzimátikus hidrolízise (cukrosítás), a kinyert cukortartalom fermentációja etanollá, majd a kapott ún. „nyerszesz” finomítása, azaz vízmentesítése (16.7. ábra).



16.7. ábra: A bioetanol-előállítás folyamatának egyszerűsített összefoglalása

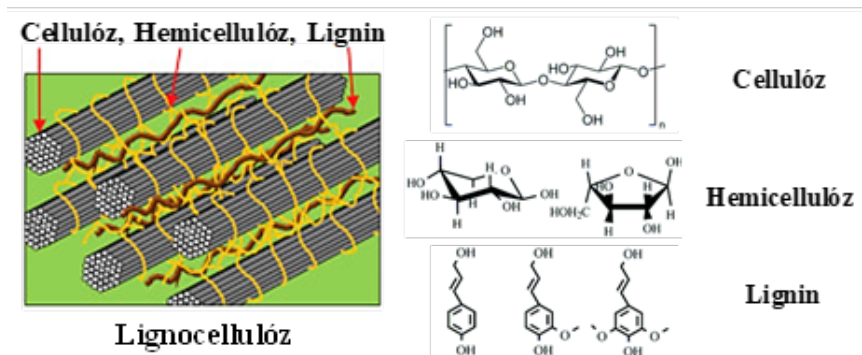
A folyamat végtermékeként keletkező bioetanol elsősorban benzinüzemű gépjárművek üzemanyagaként hasznosítják, hozzákeverve azt a benzinhez különféle arányokban (E5, E10, E20, E85, E100). Magyarországon – az Európai Unió megújulóenergia-irányelvéhez igazodva – a kötelező bioüzemanyag-részarány mértéke a 2020. január 1. és 2020. december 31. közötti időszakban 8,2%, ezen belül a 95-ös kísérleti oktánszámú motorbenzin esetében a kötelező bioetanol-részarány mértéke 6,1% [Jogszabály 4].

Érdemes megjegyezni a téma kapcsán, hogy bár a bioetanol magas oktánszámmal (106–108) rendelkezik (vagyis nagy a kompressziótűrése, ami számos szempontból előnyös), de viszonylag alacsony energiatartalmú energiahordozó (21 MJ/l), összehasonlítva a motorbenzin 32 MJ/l-es, a dízelgázolaj 36 MJ/l-es, illetve a biogáz 50 MJ/kg-os energiatartalmával [Jogszabály 4].

A lignocellulóz

A mezőgazdaság, az élelmiszeripar és a könnyűipar is nagy mennyiségben termel magas lignocellulóztartalmú hulladékot (pl. gyapotszárak, kenderpozdorja, különböző szalmák, kukoricacsutka, kukoricaszár, cukorcirok-bagasz, kókuszdióhéj, rizshéj, erdészeti hulladékok stb.). A lignocellulóz (16.8. ábra) három legfontosabb alkotóeleme a cellulóz (a teljes szárazanyag 40–60%-a), a hemicellulóz (20–40%) és a lignin (10–25%), mely polimerek a szárazanyag-tartalom 85–90%-át teszik ki, ezen túl ásványi anyagok, olajok, fehérjék és más szénhidrátok is megtalálhatók benne [Kang, 2014; Rastogi, 2017; Robak, 2018].

A cellulóz rendkívül ellenálló (vízben oldhatatlan és kémiaiilag stabil), nagyrészt kristályos szerkezetű, egyenesláncú poliszacharid, melynek hosszú láncmolekuláit β -glükóz-monomerek alkotják, amelyeket inter- és intramolekuláris hidrogénhid kötések rendeznek fonalszerű rostos kötegekbe. A hemicellulóz a cellulózláncokat burkoló, kisebb molekulatömegű, elágazó láncú amorf poliszacharid, mely főleg pentózokból (pl. D-xilóz, L-arabinóz) és hexózokból (pl. D-glükóz, D,L-galaktóz) épül fel. A hemicellulózt kovalens kötések kötik össze a ligninnel, ami pedig fenolos vegyületek polimerizációjából keletkező, ugyancsak amorf, elágazó szerkezetű aromás polimer, és ez a felelős többek között a növényi sejtfal merevségéért is [Kang, 2014; Rastogi, 2017; Robak, 2018].



16.8. ábra: A lignocellulóz szerkezete [Vasco-Correa, 2016]

A lignocellulóz feldolgozását nehezíti, hogy a cellulóz a kristályos szerkezete miatt rendkívül ellenálló az enzimikus emésztéssel szemben, míg a nem kristályos forma inkább hajlamos az enzimikus hidrolízisre. További nehézséget jelenthet, hogy a lignin irreverzibilisen adszorbeálhatja az enzimeket, gátolva azok hatását. A biomassza hatékony enzimikus hidrolíziséhez célszerű tehát megbontani a cellulóz kristályszerkezetét, a szerkezetet fel kell lazítani, és a lignint és a hemicellulózt el kell választani a hozzáférhető felület növelése és a lignin enzimgátlásának kiküszöbölése érdekében [Rastogi, 2017].

A bioetanol előállításának lépései

Előkezelések

Az előkezelések fő céljai az alábbiak lehetnek [Rastogi, 2017]:

- A cellulóz kristályossági és polimerizációs fokának csökkentése és a lignocellulózok porozitásának növelése az enzimatis hidrolízis, így ezáltal a redukáló cukorkihozatal és végső soron a bioetanol-kihozatal hatékonyságának növelése érdekében.
- A cukrok (különösen a pentózok) lebontásának megakadályozása, ugyancsak a termékkerihozatal növelése érdekében.
- A későbbi fermentációs folyamatokat gátló nem kívánatos köztitermékek képződésének minimalizálása a tartózkodási idő csökkentésének és a termékkerihozatal növelésének érdekében.
- A lignin visszanyerése további termék-előállítás céljából.
- Az energiateljesítmény minimalizálása és a költséghatékonyság növelése.

Az alkalmas előkezelési eljárások köre függ természetesen az alapanyag típusától, annak fizikai tulajdonságaitól és kémiai összetételétől.

Az olyan **fizikai előkezelésekkel**, mint például az aprítás, a darálás vagy az őrlés, jelentősen csökkenthető a szemcseméret, így a porozítás és a hozzáférési felület is növelhető. Ezen módszerek közös jellemzője a viszonylag magas energiaigény. Ugyancsak a fizikai előkezelések közé sorolható az ún. „hidrotermolízis”, melynek során a kezelendő biomasszát vízzel keverik, majd nyomás alatt, 200 °C körüli hőmérsékleten hőkezelik, aminek következtében a ligninnek és a hemicellulózoknak egy része beoldódik a vizes fázisba. Kémiai előkezelések kiegészítő fizikai előkezeléseként alkalmazható akár gamma- vagy mikrohullámú sugárzás is [Rastogi, 2017; Robak, 2018; Alvira, 2010; Chen, 2016; Sun, 2016].

A **kémiai előkezelések** [Rastogi, 2017; Robak, 2018; Alvira, 2010; Chen, 2016; Sun, 2016; Yang, 2019] lazítják a lignocellulóz szerkezetét, valamint eltávolítják és/vagy megbontják a hemicellulózt és a lignint. Az előkezelés történhet tömény, illetve híg sav (pl. kénsav, oxálsav) vagy lúg (pl. nátrium-hidroxid, kálium-hidroxid, ammónium-hidroxid) felhasználásával.

A savas előkezelés lehet egylépcsős, töménysavas kezelés, mely 100 °C alatti hőmérsékleten elvégezhető, vagy alkalmazható kétlépcsős, híg savas előkezelés is, mely esetben először a hemicellulózt hidrolizálják viszonylag alacsonyabb hőmérsékleten (100–120 °C), majd a hidrolizált hemicellulóz elválasztása után következik egy további, magas hőmérsékletű kezelés (180–200 °C), mely módszerrel jobb cukorkihozatal érhető el.

A lúgos előkezelés (pH>10) alacsonyabb hőmérsékleten (T<100 °C) is elvégezhető, és a lúgok a hemicellulóz oldása (a hemicellulózok közötti észterkötések elszappanosítása) révén és a lignin szerkezetének módosítása révén a cellulóz duzzadását és a kristályosság csökkenését is eredményezik. A kezelés hatékonysága azonban nagymértékben függ a nyersanyag lignintartalmától, így a mezőgazdasági, illetve élelmiszeripari eredetű melléktermékekre jól hasznosítható, míg a fás anyagok kezelésére kevésbé alkalmas.

Mindkét esetben indokolt azonban – gazdasági és környezetvédelmi szempontok miatt egyaránt – a sav, illetve a lúg visszanyerése a fermentáció előtt.

Számos ún. ionos folyadék is alkalmas lehet a biomasszák előkezelésére (pl. 3-metil-N-butilpiridinium klorid), melyekkel a cellulóz oldható, illetve a kristályosságának mértéke csökkenthető. Az imidazolium-sók a leggyakrabban vizsgált ilyen anyagok, de az

újrahasznosítás nehézségei, az inhibitorok keletkezése és a magas költségvonzatok miatt a módszer széles körű gyakorlati alkalmazása további vizsgálatokat igényel.

A **fiziko-kémiai előkezelések** [Rastogi, 2017; Robak, 2018; Alvira, 2010; Chen, 2016; Sun, 2016] kombinálják a fizikai és a kémiai hatásokat. Az egyik leghatékonyabbnak tartott módszer az ún. gőzrobbantásos technológia, melynek alkalmazása során nagynyomású (7–50 bar) telített gőzzel (170–220 °C) kezelik a biomasszát katalizáló mennyiségű kénsav hozzáadása mellett, majd a nyomást pillanatszerűen elengedik, és a hirtelen bekövetkező nyomásesés szétfeszíti, gyakorlatilag szétrobbantja a biomassza részecskéit és rostjait. Ezenkívül a folyamat során a hemicellulóz acetilcsoportjainak autohidrolízise is végbemegy, ezáltal növelve a cellulóz hozzáférhetőségét az enzimek számára. Ez az előkezelés rendkívül előnyös a keményfa és a mezőgazdasági maradványok előkezelésére. Természetesen a hátrányoktól sem mentes ez a módszer sem, így például gyakran képződhetnek a későbbi fermentációra nézve gátló hatású ún. inhibitor komponensek (pl. furfural, hangyasav, ecetsav, aromás komponensek stb.). Ezek mennyiségének csökkentését szolgálja a katalizáló mennyiségű kénsav hozzáadása, mely a hemicellulóz hidrolízisét is javítja.

A hasonló elven működő ún. ammóniás robbantásos technológia (AFEX – Ammonia Fiber Explosion) során nagy mennyiségű ammóniát adnak a biomasszához, melyet ez esetben is nyomás alatt melegítenek, és ebben az esetben is a túlnyomás hirtelen elengedése vezet a rostok szétrobbanásához. Az ammónia adagolásának előnye, hogy az ammónia illékonyasága következtében, a folyamat végén könnyen visszanyerhető, illetve a rostokban maradó ammónia a fermentáció során akár hasznos is lehet a mikroorganizmusok számára.

A nedves oxidációs eljárás alkalmazása során levegő, víz és hidrogén-peroxid hozzáadásával, magas hőmérsékleten (200 °C > T > 120 °C) történik az előkezelés, amelynek következtében a hemicellulóz pentózmonomerekké bomlik, a lignin oxidálódik, miközben a cellulóztartalomban alig történik változás. A módszer hatékonysága az oxigénnyomástól, a hőmérséklettől és a reakcióidőtől is függ. A tiszta oxigén éghető jellege és a hidrogén-peroxid magas költsége azonban jelentős limitáló tényező a gyakorlati alkalmazás számára.

A **biológiai előkezelések** [Rastogi, 2017; Alvira, 2010; Sun, 2016] különböző mikroorganizmusokat, leginkább gombákat, például fehér-, barna- és lágy penészgombákat (*Trametes*, *Polyporus*, *Pleurotus*, *Cyathus* fajokat) alkalmaznak a lignocellulóz lignintartalmának elválasztására, mely az általuk termelt oxidoreduktáz enzimek révén megy végbe. Noha a biológiai előkezelésnek számos előnye van, például kevésbé energiaigényes, nem igényel vegyi anyagokat, és enyhe körülményeket alkalmaz (nem kell magas hőmérséklet és/vagy nyomás), de a módszer nagy hátránya az időigényesség, illetve hogy a folyamat során nemcsak a lignin bomlik, hanem részben a cellulóz és a hemicellulóz is, ami cukorvesztéshez vezet.

Enzimatisz hidrolízis és fermentáció

A megfelelő előkezelések után az enzimatisz hidrolízis során különböző celluláz- és hemicellulázenzimek (enzimkomplexek) alkalmazásával törekszünk a kezelt biomassza glükóz- és xilóztartalmának maximalizálására, melyek már a fermentációs lépés alapanyagai lesznek. Ezen enzimeket elő lehet állítani külön reaktorban (vagy akár meg is vásárolhatók), majd az enzimadagolást követően a hidrolízis kivitelezhető a fermentáció előtt, térben és időben elkülönítve attól, de kivitelezhető a két folyamat szimultán is egy reaktortérben, így ezt a két lépést egy közös fejezetben tárgyaljuk. A cukrosításhoz nagy mennyiségű enzim kell,

ami így jelentős költségvonzattal járhat (a teljes költségnek akár a 40–50%-a is lehet), azonban a költségek számottevően csökkenthetők az enzimek helyszíni előállításával (pl. *Trichoderma*, *Penicillium*, *Saccharomyces* és *Aspergillus* fajokkal), főleg, ha annak előállítására a helyszínen rendelkezésre álló szénforrást használjuk [Rastogi, 2017; Chen, 2016].

Az ún. SHF technológia (Separate Hydrolysis and Fermentation) egy kétlépcsős eljárás, melyben (ahogy a neve is utal rá) a hidrolízis és az erjesztési folyamatok szeparáltan mennek végbe, vagyis az enzimekkel először monomer egységekké (glükózzá és xilózzá) bontják a biomasszát, majd ezeket a cukrokat erjesztik bioetanollá. Ennek az eljárásnak az a fő előnye, hogy mind az enzimatis hidrolízis, mind a fermentáció számára külön-külön biztosíthatók az egyes folyamatok számára optimális körülmények, mindazonáltal az enzimaktivitást gátló cukrok felhalmozódása jelentős hátrány, amely csökkentheti a kinyerhető bioetanol mennyiségét [Rastogi, 2017; Chen, 2016].

Az ún. SSF technológia (Simultaneous Saccharification and Fermentation) pedig egylépcsős eljárás, mely egy reaktortérben valósítja meg a biomassza cukrosítását és a felszabadult cukrok egyidejű fermentációját. A módszer nagy előnye, hogy a biomasszából képződő cukrok gyorsan etanollá alakulnak, ezáltal csökkentve a cukorfelhalmozódást a közegben. Ennek az eljárásnak a legnagyobb hátránya, hogy a folyamat paramétereinek beállításakor figyelembe kell venni a különböző folyamatok számára optimális körülményeket, és kompromisszumot kell kötni, vagy esetleg alternatív megoldásokat kell találni. Például az enzim hidrolízishez az 50 °C körüli hőmérséklet lenne a legkedvezőbb, de az etanolos erjesztéshez használt mikrobák számára a 28–37 °C az optimális. Mivel a fehérjetartalom enzimatis átalakítása jelenleg nem megoldható ezen alacsony hőmérsékleten, ennél a szimultán módszernél speciális hőtoleráns mikrobákat kell alkalmazni a fermentációhoz [Rastogi, 2017; Chen, 2016].

Az ún. SSCF technológia (Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation) szintén egy egylépcsős eljárás, melynek különlegessége, hogy vegyes élesztőkultúrákat alkalmaz, így egy időben lehetővé téve a hexózok és a pentózok fermentációját. A módszer előnyei az alacsony költség, a rövidebb tartózkodási idő, az alacsonyabb szennyeződéskockázat és az enzimatis hidrolízis során fellépő kisebb mértékű gátló hatás [Rastogi, 2017; Chen, 2016].

A teljesség kedvéért megemlítendő az ún. közvetlen mikrobiális átalakítás (DMC – Direct Microbial Conversion), avagy a konsolidált biofeldolgozás (CBP – Consolidated Bioprocessing), mely integrálja az összes reakciót, amely a biomassza etanollá történő átalakításához szükséges. Ez a módszer nagymértékben különbözik a korábbiaktól, mivel csak egyetlen mikrobiális közösséget használ az enzimek előállításához és a fermentációhoz, vagyis az enzimek előállítása, az enzimatis hidrolízis és a fermentáció is egy lépésben zajlik termofil mikroorganizmusok segítségével. A módszer hátránya, hogy a termofil mikrobáknak viszonylag alacsony a bioetanol-toleranciájuk (<2%), ami komoly akadályt jelent ipari alkalmazásokban [Rastogi, 2017; Chen, 2016].

Nyersszesz finomítása

Bármely (az előzőekben tárgyalt) fermentációs folyamat alkalmazása után szükséges a sejt tömeg elválasztása/visszanyerése, melyet centrifugálással lehet megoldani. A leválasztott sejt tömeg egy részét visszavezetik a további fermentációkhoz, míg a felesleges sejt tömeget hasznosítani lehet biogáztermelés és komposztálás révén. Fontos kiegészítés, hogy a lecentrifugált fermentléből akár az enzimek is visszanyerhetők megfelelő pórusátmérőjű/vágási értékű membránszeparációs eljárások csatolásával [Ábel, 2013].

A folyamat zárólépése a centrifugálással (és esetlegesen membránszűréssel) tisztított „nyersszesz” többfokozatú desztillációja (rektifikálása), mellyel 95–96%-os alkohol nyerhető ki (ugyanis az ún. azeotrópos etanol–víz elegynek alacsonyabb a forráspontja, mint a tiszta etanolnak), és a további koncentráció már csak vízelvonó anyagokkal (úgynevezett szárító ágensekkel, mint például az égetett mésszel), speciális ún. azeotrópos desztillációval (benzol hozzáadását követő többlépcsős desztillációval) vagy membrándesztillálással oldható meg.

Köszönetnyilvánítás

A könyvfejezet összeállítása a „Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózat – RING 2017” című, EFOP-3.6.2-16-2017-00010 jelű projekt részeként a Széchenyi 2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap és Magyarország Kormánya társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Abdulgader M., Yu Q. J., Zinatizadeh A. A. és Williams P. (2009): Biological treatment of milk processing wastewater in a sequencing batch flexible fibre biofilm reactor. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 4, pp. 698–703.
- Adnan A. I., Ong M. Y., Nomanbhay S., Chew K. W. és Show P. L. (2019): Technologies for biogas upgrading to biomethane: a review. *Bioengineering*, 6(4).
- Ahmad A. (2019): Effect of ozonation on biodegradation and methanogenesis of palm oil mill effluent treatment for the production of biogas. *Ozone: Science & Engineering*, 41(5), pp. 427–436.
- Alvira P., Tomás-Pejó E., Ballesteros M. és Negro M. J. (2010): Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresource Technology*, 101(13), pp. 4851–4861.
- Ábel M., Szabó G., Poser O., László Z. és Hodúr C. (2013): Enzyme recovery and fouling mitigation by ultrasound-enhanced ultrafiltration. *Desalination and Water Treatment*, 51(25–27), pp. 4921–4926.
- Barthod J., Rumpel C. és Dignac M.-F. (2018): Composting with additives to improve organic amendments: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2).
- Beszédes S., Kertész S., László Z., Szabó G. és Hodúr C. (2009): Biogas production of ozone and/or microwave-pretreated canned maize production sludge. *Ozone: Science & Engineering*, 31(3), pp. 257–261.
- Beszédes S., László Z., Szabó G. és Hodúr C. (2011a): Effects of microwave pretreatments on the anaerobic digestion of food industrial sewage sludge. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 30(3), pp. 486–492.
- Beszédes S., László Z., Horváth Z. H., Szabó G. és Hodúr C. (2011b): Comparison of the effects of microwave irradiation with different intensities on the biodegradability of sludge from the dairy and meat industry. *Bioresource Technology*, 102(2), pp. 814–821.
- Campanaro S., Treu L., Kougias P. G., De Francisci D., Valle G. és Angelidaki I. (2016): Metagenomic analysis and functional characterization of the biogas microbiome using high-throughput shotgun sequencing and a novel binning strategy. *Biotechnology for Biofuels*, 9, Article 26.
- Chen H. és Fu X. (2016): Industrial technologies for bioethanol production from lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, pp. 468–478.
- Dave N., Selvaraj R., Varadavenkatesan T. és Vinayagam R. (2019): A critical review on production of bioethanol from macroalgal biomass. *Algal Research*, 42, Article 101606.
- Dumont E. (2015): H₂S removal from biogas using bioreactors: a review. *International Journal of Energy and Environment*, 6(5), pp. 479–498.
- Emadian S., Kuzulcan M., Küçüker M. A., Demirel B. és Onay T. T. (2020): Enzymatic pretreatment of chicken manure for improved biogas yield. In: Springer International Publishing, Cham, pp. 357–358.
- Hosseini Koupaie E., Dahadha S., Bazayr Lakeh A. A., Azizi A. és Elbeshbishy E. (2019): Enzymatic pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production – a

review. *Journal of Environmental Management*, 233, pp. 774–784.

Jogszabály 1: 2012. évi CLXXXV. törvény a hulladékról (2020. 01. 14-én hatályos állapot).

Jogszabály 2: 23/2003. (XII. 29.) KvVM rendelet a biohulladék kezeléséről és a komposztálás műszaki követelményeiről.

Jogszabály 3: 36/2006. (V. 18.) FVM rendelet a terménynövelő anyagok engedélyezéséről, tárolásáról, forgalmazásáról és felhasználásáról (2020. 01. 14-én hatályos állapot).

Jogszabály 4: 279/2017. (IX. 22.) Korm. rendelet a bioüzemanyagok és folyékony bio-energiahordozók fenntarthatósági követelményeiről és igazolásáról (2020. 01. 14-én hatályos állapot).

Kang Q., Appels L., Tan T. és Dewil R. (2014): Bioethanol from lignocellulosic biomass: current findings determine research priorities. *The Scientific World Journal*, Article 298153.

Kougias P. G. és Angelidaki I. (2018): Biogas and its opportunities – a review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 12(3).

Le T. M., Vo P. T., Do T. A., Tran L. T., Truong H. T., Le T. T. X., Chen Y.-H., Chang C.-C., Chang C.-Y., Tran Q. T., Thanh T. és Do M. V. (2019): Effect of assisted ultrasonication and ozone pretreatments on sludge characteristics and yield of biogas production. *Processes*, 7(10), Article 743.

Lim L. Y., Bong C. P. C., Lee C. T., Klemeš J. J., Sarmidi M. R. és Lim J. S. (2017): Review on the current composting practices and the potential of improvement using two-stage composting. *Chemical Engineering Transactions*, 61, pp. 1051–1056.

Merlin Christy P., Gopinath L. R. és Divya D. (2014): A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, pp. 167–173.

Mirmohamadsadeghi S., Karimi K., Tabatabaei M. és Aghbashlo M. (2019): Biogas production from food wastes: a review on recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 7, Article 100202.

Pandey A. (2003): Solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13, pp. 81–84.

Panigrahi S. és Dubey B. K. (2019): A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy*, 143, pp. 779–797.

Rastogi M. és Shrivastava S. (2017): Recent advances in second generation bioethanol production: an insight to pretreatment, saccharification and fermentation processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, pp. 330–340.

Raza S. és Ahmad J. (2016): Composting process: a review. *International Journal of Biological Research*, 4(2), p. 102.

Robak K. és Balcerek M. (2018): Review of second generation bioethanol production from residual biomass. *Food Technology and Biotechnology*, 56(2), pp. 174–187.

Ryckeboer J., Mergaert J., Vaes K., Klammer S., De Clercq D., Coosemans J., Insam H. és Swings J. (2003): A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. *Annals of Microbiology*, 53(4), pp. 349–410.

Sahota S., Shah G., Ghosh P., Kapoor R., Sengupta S., Singh P., Vijay V., Sahay A., Vijay V. K. és Thakur I. S. (2018): Review of trends in biogas upgradation technologies and future perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 1, pp. 79–88.

Sun Q., Li H., Yan J., Liu L., Yu Z. és Yu X. (2015): Selection of appropriate biogas upgrading technology – a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, pp. 521–532.

Sun S., Sun S., Cao X. és Sun R. (2016): The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. *Bioresource Technology*, 199, pp. 49–58.

Vasco-Correa J., Ge X. és Li Y. (2016): Biological pretreatment of lignocellulosic biomass. In: Mussatto S. I. (szerk.): *Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery*. Elsevier, Amsterdam, pp. 561–585.

Yang H., Shi Z., Xu G., Qin Y., Deng J. és Yang J. (2019): Bioethanol production from bamboo with alkali-catalyzed liquid hot water pretreatment. *Bioresource Technology*, 274, pp. 261–266.

Zhang Y. és Banks C. J. (2013): Impact of different particle size distributions on anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management*, 33(2), pp. 297–307.

Zouitina M., Echarrafi K., El Hassani I. és El Haji M. (2019): Optimization of solid waste composting: a literature review and perspective for fast composting. In: *E3S Web of Conferences*, 91, Article 03013, pp. 73–83.

17. Egyéb alkalmazási lehetőségek

Bélafiné Bakó Katalin, Lajtai-Szabó Piroska¹⁷

A jegyzet korábbi fejezeteiben megismerhettük az élelmiszeripar és a könnyűipar főbb, biokatalizátorokat alkalmazó területeit a teljesség igénye nélkül. A könyv zárásaként néhány további érdekességet mutatunk be röviden, gondolatébresztő jelleggel, melyek jól példázzák a biokatalizátorok alkalmazhatóságának sokszínűségét.

17.1. Enzimek a sütőiparban

A sütőipar által előállított termékeknel – legyen az kenyérféle, finom pékáru (pl. kifli, zsemle, pogácsa), keksz, ostya vagy sütemény stb. – a búzaliszt a legfontosabb összetevő, s ezzel egyidejűleg az alkalmazható enzimek szubsztrátja is. Hagyományos úton a lisztből, élesztőből és vízből kevert (kenyér)tészta belsejében a dagasztás és a pihentetés során sokféle biofizikai és biokémiai folyamat játszódik le, amelyeket a búzában és az élesztőben jelen lévő enzimek katalizálnak. Amennyiben az egész gyártási technológiát szabályozottabb módon szeretnénk végezni, plusz enzimeket adagolhatunk a bekeverésnél [Melim Miguel, 2013], s ezzel rövidíthető a tészta kelési és pihentetési ideje, kompenzálhatók egyes lisztminőségi hibák, módosítható a sütési eljárás, lassítható a morzsalékosodás, s elkerülhető egyes kémiai adalékok használata.

A liszthez, illetve a bekevert tésztához hozzáadott enzimek képesek

- a kenyérgyártásnál módosítani a megkelt tészta reológiáját, textúráját, gázvisszatartó képességét és a kenyérhéj ropogósságát,
- cukrászsütemények, kekszek készítésénél javítani a tészta reológiai tulajdonságait és puhaságát,
- javítani a termékek ízvilágát,
- elkerülni az akrilamid-képződést.

A keményítőtőntő amilázok tevékenysége révén csökken a tészta viszkozitása (részleges elfolyósítás), és erősödik a gázvisszatartó képessége, így a termék térfogata nő, és belsejének puhasága javul [Leman, 2009]. Továbbá több redukáló cukor lesz jelen, ami lehetővé teszi a Maillard-reakció lejátszódását, javítva az aromaprofil és a héj színét. Egyes amilázok a keményítőtőntől fermentálható cukrokat biztosítanak az élesztők számára, így azok hatékonyabban működhetnek. A kekszek és a sütemények tésztájának konzisztenciáját is javíthatják az amilázok, így rövidebb idő szükséges a gyúráshoz.

A proteázok a liszt fehérjetartalmát módosítják, főként a glutént. Proteázok adagolásával szintén rövidül a kenyértészta gyúráshoz szükséges idő, illetve javítható a tészta homogenitása, a kenyér textúrája és aromája. Kekszek és sütemények esetén a proteáz hatására a glutén elasticitása csökkenthető, így könnyebb hajtogatni és nyújtani a tésztát.

A sütőiparban a fentiekén túl lipázokat és hemicellulázokat is alkalmaznak, amelyek szintén hozzájárulhatnak a tészta feldolgozásának megkönnyítéséhez, illetve a sütőipari termékek ízvilágának javításához.

¹⁷ Pannon Egyetem, Mérnöki Kar,
Bio-, Környezet- és Vegyészmérnöki Kutató-fejlesztő Központ,
Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatócsoport
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.
belafine.bako.katalin@mk.uni-pannon.hu

Az aszparagináz enzim nemrégiben került a sütőipari enzimek közé. Megállapították ugyanis, hogy bizonyos sütőipari termékeknél akrilamid-képződés következhet be, ami káros az egészségre, s ennek prekürzora a jelen lévő aszparagin aminosav. Az aszparagináz enzim képes az aszparagint aszparaginsavvá átalakítani, így alkalmazásával megelőzhető az akrilamid keletkezése.

17.2. Invertáz

Az invertáz enzim a szacharóz molekulát hasítja glükózzá és fruktózzá, s ezt a folyamatot hívják inverzióknak. A szacharóz vízben való oldhatósága szobahőfokon jóval kisebb, mint a glükóze vagy a fruktóze, s ezt használja ki az édesipar egyes termékeiben.

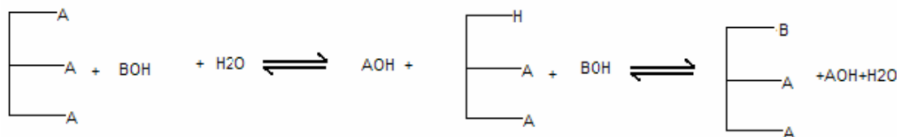
Az invertáz enzimet alkalmazni lehet ún. fondantkészítményekben [Jordan, 2019], pl. mentás lapocskák előállításánál, ahol az a cél, hogy a töltelék a termék elkészülte után kissé megpuhuljon. Ilyenkor a szacharózból (és glükózszirupból) kiinduló kemény fondantmagot egyszerűen be lehet vonni csokoládéval, nem sérül meg, viszont a fondantba adagolt invertáz enzim hatására a szacharóz fokozatosan hidrolizál, az oldhatóság növekszik, s a belső fondantmag puhulni fog. (Hasonlóképpen és általánosan fel lehet használni az enzimet arra is, hogy egyes édesipari készítmények kiszáradását megelőzzük, pl. marcipántermékeknél.)

Egy másik alkalmazási lehetőség a kristályosodás szabályozása, ahol a végtermékben a töltelék egy része folyadék halmazállapotú, pl. a konyakos meggyenél. Ezeknél a magot (meggy) telített cukoroldatban juttatják az előkészített csokoládéformába, ott megszilárdul, kikristályosodik, lezárják, s ezután az előzetesen adagolt invertáz elfolyósítja a szacharózt, így a meggyet végül a várt, folyékony állapotú közeg veszi körül, amikor elfogyasztják.

17.3. Kakaóvaj-alternatíva előállítása lipáz segítségével

A kakaóvaj trigliceridmolekuláiban főként palmitinsav és sztearinsav található, s ez az összetétel felelős a 37°C -os olvadáspontért, ami annyira kellemes teszi a csokoládétermékeket, amikor fogyasztáskor a szánkban elolvadnak. A drága kakaóvaj helyettesítésére (*substitute*), illetve azzal egyenértékű (*equivalent*) termék előállítására lipázos átészterezést alkalmazhatunk [Aravindan, 2006], egészen pontosan annak is az acidolízis nevű válfaját.

E reakciónál a kiinduló triglicerid egyik vagy akár több zsírsavmolekulája is lecserélhető egy másik zsírsavra megfelelő körülmények között (17.1. ábra).



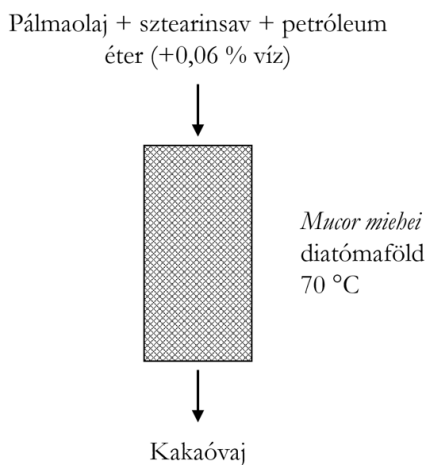
17.1. ábra: Triglicerid lipázos átészterezése

Amennyiben olcsó pálmaolajból indulunk ki, és sztearinsavval végezzük az átészterezést rögzített lipáz enzim (pl. a *Mucor miehei* törzsből) jelenlétében szerves oldószerben (17.2. ábra), a kívánt összetételhez igen közeli trigliceridkeveréket kaphatunk (17.1. táblázat), amely fizikai-kémiai tulajdonságait tekintve nagyon közel áll a kakaóvajhoz. A gyártási folyamat hátránya, hogy szeparációs és tisztítási lépéseket igényel a reakció után.

17.1. táblázat: A pálmaolaj, a kakaóvaj és az enzimes termék jellemző triglicerid-összetétele (St = sztearát (18:0), P = palmitát (16:0), O = oleát (18:1), Ln = linolát (18:2))

Triglicerid	Pálmaolaj (%)	Enzimes termék (%)	Kakaóvaj (%)
StStSt	5	3	1
POP	58	16	16
POSt	13	39	41
StOSt	2	28,5	27
StLnSt	9	8	8
StOO	4	4	6

Hasonló eredményre juthatunk, ha a Lipozyme enzimekészítményt használjuk [Undurranga, 2001], ami viszont oldószermentes közegben is alkalmazható (pl. töltött ágyas reaktorban), így az élelmiszeripar számára vonzóbb termék nyerhető.

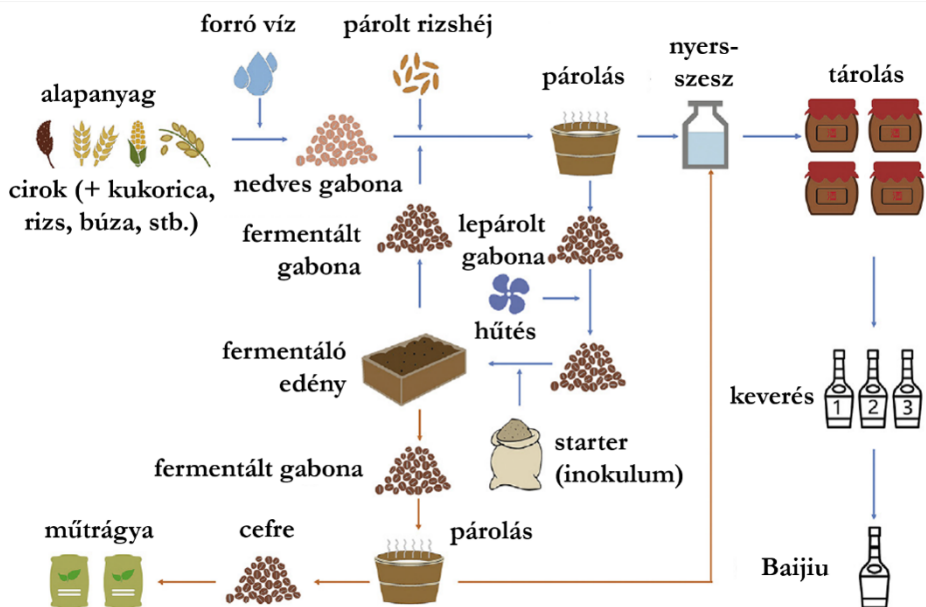


17.2. ábra: Kakaóvaj előállítása

17.4. Baijiu – kínai likőr

A világ egyik legősibb alkoholpárlata a kínai Baijiu, melyből napjainkban is több mint 4 milliárd litert fogyasztanak évente, bár jórészt csak az ázsiai országokban ismert. Hagyományos előállítása szimultán elcukrosításon és fermentáción alapuló, összetett eljárás, melynek főbb lépéseit mutatja a 17.3. ábra [Jin, 2017].

Az eljárás fontos részét képezi a starterkultúra elkészítése, mely különböző alkoholos erjesztésre képes mikroorganizmusokból tevődik össze. A mikrobakonzorcium összetétele a fermentált ital típusától függően sokféle lehet, jellemző fajai többek között az *Aspergillus oryzae*, valamint a *Saccharomyces*- és *Rhizopus*-fajok. A fermentációban részt vevő fajok (és azok enzimei) az alkoholtermelés mellett különböző íz- és aromaanyagokkal gazdagítják a terméket, ezért a mikrobiális folyamatok ismerete és szabályozása elengedhetetlen a megfelelő minőség elérése érdekében [Jin, 2017].



17.3. ábra: Baijiu hagyományos előállítása [Jin, 2017]

A hagyományos eljárást a kor igényeinek megfelelően kezdi felváltani a modernizált, szigorúan ellenőrzött és szabályozott technológia, melynek továbbra is elengedhetetlen részét képezik a mikroorganizmusok [Jin, 2017].

17.5. Halfeldolgozás

A tejiparnál (1. fejezet) és a húsiparnál (5. fejezet) bemutatott transzglutamináz enzimek a halfeldolgozásnál is szerephez jutnak [Park, 2005]. Ezek az enzimek képesek a proteineket mintegy „összeragasztani”. Különleges termékek gyártásánál használják őket. Ilyen például a filézett (szálkamentes) hal előállítás, ahol az előzetesen megtisztított és szálkátlanított hal belsejébe transzglutamináz enzimet adagolva a hal textúrája oly mértékben javítható, mintha teljesen frissen fogták volna. Ezt a szálkamentes halat biztonsággal fogyaszthatják az idősebbek, kórházi betegek és a gyerekek is.

Az enzimmel akár a molekuláris gasztronómia vizeire is evezhetünk: az Ázsiában népszerű halpasztából (surimi) kiindulva az enzim segítségével szokatlan ételeket formázhatunk, pl. az eredetire meghökkentően hasonló garnélarákokat (17.4. ábra).



17.4. ábra: Garnélarák-imitáció

17.6. Savas proteázok felhasználása a távol-keleti országokban

Ázsia keleti részében több mint két évezrede készítenek és fogyasztanak szója-, illetve gabonaalapú fermentációs termékeket. A teljesség igénye nélkül néhányat feltüntettünk a 17.2. táblázatban, a felhasznált mikroba megjelölésével.

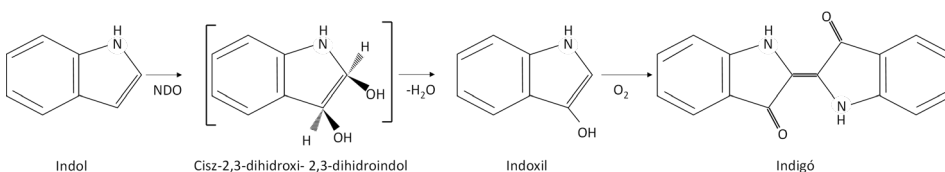
Ezekben a biofolyamatokban az a közös, hogy mindegyiknél a mikrobák (főként penészgombák) savas proteázai végzik a fermentáció oroszlánrészét (tehát leginkább a nyersanyag fehérjetartalmát módosítják), valamint szinte kizárólag egészséges átalakításokról van szó, sejtmentes készítményt (tisztá enzimet) nem alkalmaznak. Így a sejtben jelen levő további enzimek is szerepet játszhatnak a folyamatban, lehetővé téve a késztermékek rendkívül széles arzenálját.

17.2. táblázat: Távol-keleti fermentációs termékek

Név	Mikroorganizmus	Alapanyag	Fő felhasználók
Shoyu, szójaszós	<i>Aspergillus oryzae</i> , <i>Lactobacillus</i> és élesztő	szójabab és búza	Kína, Japán, Fülöp-szigetek
Miso	<i>Aspergillus oryzae</i> , <i>Saccharomyces rouxii</i>	szójabab, néha rizsszel vagy más gabonával	Kína, Japán
Ketjap	<i>Aspergillus oryzae</i>	fekete szójabab	Indonézia
Hamanatto	<i>Aspergillus oryzae</i>	szójabab	Japán
Tempeh	<i>Rhizopusok</i>	szójabab	Indonézia
Sufu (szójalepény)	<i>Actinomucor</i> és <i>Mucor</i> fajok	szójabab	Kína, Tajvan
Ragí	<i>Mucor</i> és <i>Rhizopus</i>	rizs	Indonézia, Kína

17.7. Színezékek – indigó

A textiliparban alkalmazott színezékek közül sok növényi forrásból származik, jó párat ma már szerves szintetikus úton állítanak elő, de van néhány, amelyet mikrobiológiai módszerekkel (is) lehet gyártani. Az indigó az egyik ilyen színezék [Braun, 2018; Han, 2008], amit indolból kiindulva tud szintetizálni számos baktérium (pl. *Pseudomonas*-, *Comamonas-törzsek* [Qu, 2012]) a naftalin-dioxigenáz (NDO) enzim segítségével (17.5. ábra).



17.5. ábra: Indigó szintézise

A folyamat során az indolból először cis-2,3-dihidroxi-2,3-dihidroindol keletkezik, ami dehidratálódik, végül dimerizálódik.

17.8. Tojásfehérje glükózmentesítése

A tojásfehérje-por előállítását célzó feldolgozási lépéseknél az elválasztott tojásfehérjét általában porlasztva szárítják. A jelen lévő glükóz azonban magasabb hőmérsékleten a proteinekkel reakcióba léphet (Maillard-reakció), ami barnulást okoz, s a termék minőségét rontja. Ezt megelőzendő a tojásfehérjéből a glükózt enzimes úton lehet eltávolítani a glükóz-oxidáz segítségével. A bio-oxidáció során a glükóz glükonsavvá alakul át, miközben hidrogén-peroxid képződik, amit a kataláz enzim képes lebontani. Az enzimduót együtt kell alkalmazni a hatékony művelet megvalósításához. Az enzimkomplex szimultán termeléséhez pl. *Aspergillus* penészeket használnak [Kilara, 1973; Sisak, 2006].

A folyamathoz megfelelő oxigénellátásra van szükség, de a hagyományos levegőztetési technikák erős habzást okoznak, így speciális oxigén-bejuttatási módszereket (pl. perforált csövet vagy membránt) célszerű alkalmazni.

17.9. Rovaralapú fermentált termékek

Számos kultúrában régóta bevett szokás a különböző rovarok fogyasztása, az utóbbi években pedig egyre több országban foglalkoznak rovaralapú termékek előállításával. Növekvő népszerűségük oka egyrészt magas tápértékük, másrészt környezetvédelmi fenntarthatóságuk, hiszen tenyésztésük jóval kevesebb termőföldet, vizet és energiát igényel, valamint kevesebb szennyezőanyag kibocsátásával jár, mint a hagyományos állattartás [Castro-López, 2020].

Pozitív tulajdonságaik ellenére továbbra is alacsony az elfogadottságuk azon országokban, ahol korábban nem voltak jelen a gasztronómiában. Ennek megoldása érdekében a gyártók igyekeznek olyan feldolgozási módszereket kifejleszteni, melyek révén a késztermékben nem felismerhető formában lesznek jelen a rovarok, valamint ízben és állagban is közel állnak a fogyasztók által már jól ismert élelmiszerekhez [Melgar-Lalanne, 2019].

A lehetséges feldolgozási technikák része lehet a fermentáció, mely alapjaiban megegyezik a növényi nyersanyagok fermentációjával. A főként szénhidrátokból álló növényekkel szemben azonban a rovarok nagy mennyiségű fehérjét tartalmaznak, valamint sok esetben ellenálló külső vázzal (pl. kitinpáncéllal) rendelkeznek. A feldolgozás megkönnyítése érdekében ezért általában főzési és / vagy mechanikai előkezelésre van szükség, továbbá a hatékony fermentáció érdekében vegyes baktérium- és gombafajokból álló konzorciumot alkalmaznak, melyek képesek a komplex mátrix lebontására [Castro-López, 2020].

17.3. táblázat: Fermentációval előállított, rovaralapú termékek [Castro-López, 2020]

Ország	Feldolgozott faj	Termék
Japán	lódarázs	sócsú (égetett szesz)
Korea	selyemhernyó	makkori (hagyományos koreai bor)
USA	hangyafajok	sör
Franciaország	fekete katonalégy	liszt
Dél-afrikai Köztársaság	fekete katonalégy	zsírtalanított liszt

A kereskedelmi forgalomban már kapható, emberi fogyasztásra vagy takarmányozásra szánt termékekre láthatunk példákat a 17.3. táblázatban.

Irodalomjegyzék

- Aravindan R., Anbumathi P. és Viruthagiri T. (2006): Lipase applications in food industry. *Indian Journal of Biotechnology*, 6, pp. 141–158.
- Braun T. (2018): Indigókémia és indigó-kékfestés térben és időben. *Magyar Kémikusok Lapja*, 73(10), pp. 317–323.
- Castro-López C., Santiago-López L., Vallejo-Cordoba B., González-Córdova A. F., Liceaga A. M., García H. S. és Hernández-Mendoza A. (2020): An insight to fermented edible insects: a global perspective and prospective. *Food Research International*, 137, Article 109750.
- Han X., Wang W. és Xiao X. (2008): Microbial biosynthesis and biotransformation of indigo and indigo-like pigments. *Chinese Journal of Biotechnology*, 24, pp. 921–926.
- Jin G., Zhu Y. és Xu Y. (2017): Mystery behind Chinese liquor fermentation. *Trends in Food Science & Technology*, 63, pp. 18–28.
- Jordan D. (2019): Working with enzymes in confections. *The Manufacturing Confectioner*, 2019/1, pp. 47–52.
- Kilara A. és Shahani K. M. (1973): Removal of glucose from eggs: a review. *Journal of Milk and Food Technology*, 36(10), pp. 509–514.
- Leman P., Goesaert H. és Delsour J. A. (2009): Residual amylopectin structures of amylase-treated wheat starch slurries reflect amylase mode of action. *Food Hydrocolloids*, 23, pp. 153–164.
- Melgar-Lalanne G., Hernández-Álvarez A. J. és Salinas-Castro A. (2019): Edible insects processing: traditional and innovative technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), pp. 1166–1191.
- Melim Miguel A. S., Martins-Meyer T. S., da Costa Figueiredo E. V., Paulo Lobo B. W. és Dellamora-Ortiz G. M. (2013): Enzymes in bakery: current and future trends. In: Muzzalupo I. (szerk.): *Food Industry*. IntechOpen, pp. 287–321.
- Park J. W. (szerk.) (2005): *Surimi and Surimi Seafood*. Taylor & Francis, Boca Raton, FL.
- Qu Y., Zhang X., Ma Q., Ma F., Zhang Q., Li X., Zhou H. és Zhou J. (2012): Indigo biosynthesis by *Comamonas* sp. MQ. *Biotechnology Letters*, 34, pp. 353–357.
- Sisak Cs., Csanádi Z., Rónay E. és Szajáni B. (2006): Elimination of glucose in egg white using immobilized glucose oxidase. *Enzyme and Microbial Technology*, 39(5), pp. 1002–1007.
- Undurraga D., Markovits A. és Erazo S. (2001): Cocoa butter equivalent through enzymic interesterification of palm oil. *Process Biochemistry*, 36, pp. 933–939.

Fogalomtár

α -amiláz (EC 3.2.1.1): endoamiláz típusú enzim, az amilóz- és amilopektinláncon belül elhelyezkedő α -1,4-glikozidkötést bontja. A hidrolízis hatására különböző lánc hosszúságú, α -konfigurációjú oligoszacharidok és az elágazó oligoszacharidokat alkotó α -dextrinek keletkeznek.

β -amiláz (EC 3.2.1.2): exoamiláz típusú enzim, az amilóz- és amilopektinláncok végén hidrolizálja az α -1,4-glikozidkötést, így a keletkező végtermék maltóz és β -dextrin. Emellett az α -konfigurációjú maltózt β -konfigurációjúvá konvertálja.

β -glükánáz (EC 3.2.1.6): a hidrolázokon belül a glikozidázok közé tartozó enzim, a β -D-glükánok 1,3- és 1,4-glikozidos kötéseit bontja. Takarmányokban egyes gabonafélék emészthetőségének növelésére, sörfőzés során pedig az árpában lévő keményítő felszabadítására és a cefre viszkozitásának csökkentésére használják.

β -glükozidáz (EC 3.2.1.21): a hidrolázokon belül a glikozidázok közé tartozó enzim, nem redukáló láncvégekről hasít le β -D-glükóz-egységeket. Borászatban az aromaanyagok felszabadításának elősegítésére alkalmazzák.

a* (vörös-zöld színtényező): hússzínmérésnél a „pirosság / zöldesség” mértékének kifejezésére szolgáló érték. (Az a*, b* és L* tényezők egy háromdimenziós derékszögű koordinátarendszerben a három tengelynek felelnek meg, konkrét értékeik pedig kijelölik a színingertér azon pontját, mely az adott húsminta színére jellemző.)

Aktin: a sejtvázs felépítésében részt vevő fehérje, melynek feladata a sejt alakjának fenntartása, magasabb rendű élőlényekben pedig fontos szerepet játszik az izomsejtek összehúzódásában. Filamentális polimerje a globuláris monomerek dinamikus hozzáépülésével és leválásával jön létre.

Alvadás (tej alvadás): koagulációs folyamat, melynek során a tej szol állapotból gél állapotba kerül a kazeinmicellák aggregációja révén.

Amilomaltáz (EC 2.4.1.25): transzferáz típusú keményítőtó bontó enzim, mely az α -1,4-glikozidkötés bontása után új glikozidkötést hoz létre.

Amilopektin: glükózmolekulákból α -1,4 és α -1,6 kötésekkel felépülő, elágazó szénláncú polimer, a keményítő egyik alkotója az amilóz mellett.

Amilóz: kb. 100–300 glükózmolekulából α -1,4 kötéssel felépülő, elágazásmentes szénláncú polimer, a keményítő egyik alkotója az amilopektin mellett.

Aromakomponensek: kis molekulatömegű, szobahőmérsékleten magas gőznyomású molekulák, melyek szagingert váltanak ki.

Ászokolás: másodlagos erjesztési művelet a sörfőzésben, melynek során az élesztő felveszi és átalakítja a fermentáció során keletkezett nem kívánatos diacetilt, valamint különböző íz- és aromaanyagok keletkeznek.

Aszpartám: szintetikus előállított édesítőszer; kémiai szerkezetét tekintve dipeptid (L-aszpartil-L-fenilalanin-metilészter).

b* (sárga-kék színtényező): hússzínmérésnél a „kéesség / sárgaság” mértékének kifejezésére szolgáló érték. (Az a*, b* és L* tényezők egy háromdimenziós derékszögű koordinátarendszerben a három tengelynek felelnek meg, konkrét értékeik pedig kijelölik a színingertér azon pontját, mely az adott húsminta színére jellemző.)

Biogáz: szerves hulladék anaerob, biológiai lebontása során keletkező, főként metánból és szén-dioxidból álló gázkeverék.

Biológiai oxigénigény (BOI, angol rövid. BOD): víz / szennyvíz minősítésére szolgáló mérőszám, mértékegysége mg/L vagy g/L. A biológiai oxigénigény az adott idő alatt felhasznált oxigénmennyiség, amelyet a vízben lévő mikroorganizmusok aerob körülmények között a szerves anyagok biokémiai bontásához felhasználnak. Mérése során adott térfogatú mintát meghatározott ideig (5 vagy 21 nap), állandó hőmérsékleten (jellemzően 20 °C-on), sötétben inkubálnak, és közvetve mérik a kezdeti oxigénkoncentráció csökkenését, amelynek változása arányos a mikrobák által lebontott szervesanyag-tartalommal.

Cefrézés: a maláta darálását követő sörkészítési lépés, melynek célja a megfelelő összetételű cefre előállítása az élesztők számára. Az őrölt malátát meghatározott mennyiségű vízzel összekeverik a cefrézőüstben, majd különböző hőfokokon lejátszódik a cefrézés három szakasza: a pihenés, a cukrosítás és a folyósítás.

Cellulázok (EC 3.2.1.1–9): hidroláz típusú enzimek, a cellulóz poliszacharid lebontását katalizálják. Az endo-1,4- β -D-glükánázok véletlenszerűen hasítják a cellulóz molekula glikozidos kötéseit, a keletkező oligomerek végéről pedig a cellobiohidrolázok hasítanak le cellobióz-egységeket.

Ciklodextrin-glikoziltranszferáz (EC 2.4.1.19): transzferáz típusú keményítőbontó enzim, mely az α -1,4-glikozidkötés bontása után új glikozidkötést hoz létre.

Cserzés: a bőrfeldolgozási technológia utolsó lépése, melynek során cserzőanyagok felhasználásával javítják a bőr mechanikai tulajdonságait.

Csirizedés: a keményítő vizes szuszpenzióját melegítve a keményítő szerkezete egy meghatározott hőmérsékletnél irreverzibilisen megváltozik, és nagy viszkozitású, pasztaszerű anyag (csiriz) keletkezik. Ezt a folyamatot nevezzük csirizedésnek, a hozzá tartozó (a keményítő típusára jellemző) hőfokot pedig csirizedési hőmérsékletnek.

Dextróz-egyenérték (DE): a keményítő feldolgozása során a cukorszirup dextróz tartalmát dextrózegeenértékben (DE) adják meg. A DE a szirup redukáló képessége, szárazanyagra vonatkoztatott glükózban kifejezve. (A glükóz DE-értéke 100, a maltózé 53, a maltotriózé 36 és a keményítőé 0. Vagyis minél nagyobb a polimerizációs fok, annál alacsonyabb a DE-érték.)

DFD (dark, firm, dry = sötét, feszes, száraz) húshiba: krónikus vagy hosszan tartó stressznek teszik ki az állatot, melynek hatására az izomszövetben tárolt glikogén jelentős része felhasználódik. Mivel a vágás után nem lesz elegendő glikogén a természetes érési folyamatok lejátszódásához, különböző húshibák alakulnak ki.

Eutrofizáció (növényi túlburjánzás): azon biológiai folyamatok összessége, melyek során döntően az állóvizekben a tápanyagdúsulás hatására nagymértékben elszaporodnak az elsődleges termelő szervezetek, mint például a fitoplanktonok vagy a gyökerező hínár- és mocsári növények.

Fehérités: a textiliparban a lúgos főzés után alkalmazott oxidációs folyamat, amelynek célja a színes kisértőanyagok elszíntelenítése. Az oxidációs fehéritéshez leggyakrabban hidrogén-peroxidot vagy nátrium-hipokloritot alkalmaznak lúgos közegben (pH=10,5–11,5). A hidrogén-peroxidos fehéritést 80–100 °C hőmérsékleten, a hipokloritosat pedig szobahőmérsékleten végzik.

Feltárás: a háncrestok (len, kender) kinyerése a növény szárából mechanikai, biológiai és kémiai módszerek alkalmazásával.

Fenilalanin-ammónia-liáz (PAL, EC 4.3.1.24): a liázok közé tartozó enzim; az általa katalizált reakció során fenilalaninból fahéjsav (fenilpropénsav) és ammónia keletkezik.

Fitáz (EC 3.1.3.62): foszfátészter-kötést hidrolizáló enzim, az inozit-hexafoszfátban (fitátban) található fitinsavas kötést bontja. Állateledetek adalékanyagaként alkalmazzák a hasznosítható foszfor mennyiségének növelése céljából.

Fordított ozmózis (reverz ozmózis, RO): nyomáskülönbségen alapuló membránszeparációs eljárás, melyet főként víztisztítási eljárásokban alkalmaznak. Ha két eltérő koncentrációjú oldatot egy, az oldott anyag számára nem átjárható membránnal választunk el, a koncentrációkülönbség kiegyenlítése érdekében oldószer áramlik spontán a hígabb oldat felől a töményebb felé. Ha az ozmózisnyomásnál nagyobb külső nyomást gyakorlunk a töményebb oldatra, a vízáramlás iránya megfordul, ezt nevezzük fordított ozmózisnak.

Fruktán (frukto-oligoszacharid, FOS): egy glükózegységből és a hozzá kapcsolódó két vagy több fruktózegységből álló szénhidrát, melyben a glikozidos kötések nagy részét fruktozil-fruktóz kötések alkotják. A homológ sor első három tagja a kesztóz (GF₂, vagyis egy glükóz és két fruktóz alkotja), a nisztóz (GF₃) és a fruktozil-nisztóz (GF₄). A fruktánokat prebiotikumként alkalmazzák.

Galakto-oligoszacharid (GOS): egy glükózegységből és a hozzá kapcsolódó két vagy több galaktózegységből álló, prebiotikus hatású szénhidrát, melyben a monoszacharid-egységek β -1,4 és β -1,6 kötésekkel kapcsolódnak egymáshoz. Laktózból transzglükózilációval állítható elő.

Glükoamiláz (EC 3.2.1.20 és 3.2.1.3): exoamiláz típusú enzim, a keményítő bontása során keletkező, hosszú szénláncú poliszacharidok végén bontja az α -1,4-glikozidkötést, a hidrolízis végterméke glükóz.

Glükóz-izomeráz (EC 5.3.1.9): a glükóz fruktózzá való átalakulását (izomerizációját) katalizáló enzim, melyet az izocukor-előállítás során alkalmaznak. Elsősorban *Bacillus coagulans* baktériummal termeltetik, de sok más faj képes az enzim előállítására.

Glükóz-oxidáz (EC 1.1.3.4): oxidoreduktáz típusú enzim, mely a β -D-glükózt oxigén jelenlétében glükonsavvá oxidálja. A folyamat első lépésében D-glükono- δ -lakton és hidrogénperoxid keletkezik, majd a D-glükono- δ -lakton vízzel reagálva glükonsavvá alakul.

GRAS státusz (generally recognised as safe): „általánosan biztonságosnak tartott” státusz; az USA gyógyszereket és élelmiszereket bevizsgáló szervezete, az FDA (Food and Drug Administration) által adott minősítés, amely szerint egy adott vegyület az emberi egészségre ártalmatlan, élelmiszerekben / gyógyszerekben / kozmetikumokban stb. biztonságosan felhasználható.

Héjon erjesztés: vörösbornál a mustot a ledarált szőlőszemekkel együtt erjesztik, így az erjedés során képződő alkohol hatására kioldódnak a szín-, íz- és cserzőanyagok, melyek meghatározzák a vörösbor jellegét. Rozébornál a kékszőlő cefréjét erjesztik (vagy erjedés előtt áztatják), majd az erjedés intenzívvé válása előtt a mustot elválasztják a szilárd fázistól, és a fehérborokra jellemző módon kezelik.

Heteropolimer: különböző monomerekből (kis molekulás anyagokból) felépülő makromolekula (pl. hemicellulózok).

Holocellulóz: a teljes szénhidrátfrakció (például a fás anyagokban), vagyis a cellulóz és a hemicellulózok közös neve.

Homopolimer: azonos monomerekből (kis molekulás anyagokból) felépülő makromolekula (pl. cellulóz).

Intermolekuláris: molekulák közötti (pl. kötés).

Intramolekuláris: molekulán belüli (pl. kötés).

Inulin: β -2,1-D-fruktofuranozil-egységekből felépülő, frukto-oligoszacharid típusú vegyület.

Inulináz (EC 3.2.1.7 és 3.2.1.80): a glikozidázok közé tartozó enzim, mely az inulin (fruktozán típusú poliszacharid) hidrolízisét katalizálja, a reakció során pedig fruktóz keletkezik.

Inulináz (β -fruktozidáz / fruktofuranozidáz, EC 3.2.1.80): a hidrolázokon belül a glikozidázok közé tartozó enzim, mely fruktánok nem redukáló láncvégéről hasít le β -D-fruktóz-egységeket. Az iparban frukto-oligoszacharidok (prebiotikumok) előállítása során alkalmazzák.

Invertáz (EC 3.2.1.48): a glikozidázok közé tartozó enzim, mely a szacharóz hidrolízisét katalizálja, a reakció során pedig glükóz és fruktóz keletkezik. Az élelmiszeriparban invertcukor előállítására használják.

Invertcukor: a szacharóz sav- vagy enzimkatalizált hidrolízisével előállított édesítőszer, mely egyenlő arányban tartalmaz glükózt és fruktózt.

Ionos folyadék: szobahőmérsékleten folyékony halmazállapotú szerves só.

Írezés: a pamut láncfonalakat (hosszirányban futó fonalak) írezik a szövést megelőzően, hogy a fonalszakadást kiküszöböljék a szövés során. Általában egy rugalmas keményítőbevonatot hoznak létre a fonalfelületen, ami összetartja a fonalat alkotó elemi szálakat, növeli a szakítószilárdságot és a kopásállóságot, és csökkenti a súrlódást. A keményítő irányg mennyisége a szövet tömegének 8–16 %-a. Nem írezik a nagy szakítószilárdságú és sima felületű lenfonalakat.

Írtelenítés: a láncfonalak felületére felvitt irányg (főként keményítő) a szövést követően feleslegessé válik. Eltávolítása az írtelenítés feladata. A keményítő irányg lebontását leggyakrabban amiláz enzimekkel végzik. Az írtelenítés az előkészítés első részfolyamata.

Izoamiláz (EC 3.2.1.68): az amilopektin α -1,6-glikozidkötését hidrolizáló enzim. Csak a láncelágazásnál hasít, az egyenes szénláncokat nem bontja.

Izocukor: glükózoldat enzimes izomerizációjával kapott cukorszirup, mely glükóz és fruktóz elegyből áll. A glükóz átalakításával nyert fruktóz relatív édessége jóval magasabb, mint a glükózé, tehát izocukor alkalmazásával édesebb íz érhető el, mint ugyanannyi glükózzal vagy szacharózzal.

Izoelektromos pont: az a pH-tartomány, ahol a fehérjék oldalláncainak pozitív és negatív töltéseinek száma azonos lesz, így kifelé semleges töltést vesznek fel.

Izomalto-oligoszacharid (IMO): α -1,6-glikozidos kötéssel kapcsolódó glükózmolekulákból álló szénhidrát, melyet prebiotikumként használnak.

Kalpain (EC 3.4.22.17): Ca^{2+} -aktivált intracelluláris cisztein-proteáz enzim (neve a „kalciumaktivált papain” kifejezésből ered). A szubsztrátfehérjéinek specifikus proteolízisével irreverzibilisen módosítja azok funkcióját és aktivitását.

Karotinoidok: izoprénvázas vegyületek, konjugált kettőskötés-rendszerük révén delokalizált elektronokat tartalmaznak, melyeket a látható fény energiája képes gerjeszteni, ezért természetes pigmentként funkcionálnak. Ide sorolható többek között a likopin, α - és β -karotin, valamint a violaxantin.

Katepszin (EC 3.4.21.20–52, 3.4.22.1–51 stb.): lizoszomális proteolitikus enzim, legtöbb típusa endopeptidáz, de létezik exopeptidáz is. Fehérjebontó aktivitása révén fontos szerepet játszik a sejthalál szabályozásában, bizonyos immunrendszeri folyamatokban és a homeosztázis fenntartásában.

Keményítőtej: a kukoricaszemek nedves eljárással történő feldolgozása során kapott, kb. 40% szárazanyag-tartalmú frakció, a folyékonycukor-előállítás alapanyaga.

Kémiai oxigénigény (KOI, angol röv. COD): víz / szennyvíz minősítésére szolgáló mérőszám, mértékegysége mg/L vagy g/L. A kémiai oxigénigény azt az oxigénmennyiséget jelenti, mely a mintában található összes oxidálható anyag kémiai lebontásához szükséges. Mérése során ismert mennyiségű, erős oxidálószer és kénsavat adnak a mintához, majd ezt melegítik (100–150 °C) adott ideig, a feltárás után pedig titrimetriás vagy kolorimetriás módon meghatározzák az elreagált oxidálószer mennyiségét, ami arányos a szervesanyag-tartalommal.

Keratináz (EC 3.4.4.25): speciális hidroláz típusú enzim, mely a többi proteázzal ellentétben képes a diszulfidhidakkal stabilizált keratin lebontására. Felhasználható a bőrgyártás során, kozmetikumokban, valamint állati eredetű hulladékok lebontására.

Klorofillok: négy pirrolgyűrűből álló porfirinvázis vegyületek, kettőskötés-rendszerük delokalizált elektronjait adott hullámhosszú fény képes gerjesztetni. A növényekben és bizonyos mikroorganizmusokban fotoszintetikus pigment szerepét töltik be, a különböző típusaik (klorofil-a és -b, feofitin stb.) eltérő hullámhosszú fényt abszorbeálnak.

Klorogénsav: polifenolok közé tartozó vegyületcsoport (fenolkarbonsavaknak fenolkarbonsavakkal képzett észterei), mely nagyobb mennyiségben (10–500 mg/100g) fordul elő kávéban, napraforgóban és articsókában. Egyes tanulmányok szerint segíthet a szív- és érrendszeri betegségek megelőzésében, de pozitív élettani hatásai egyelőre nem bizonyítottak.

Komlózás: a cefrézést követő művelet a sörfőzésben, melynek során a komlóban lévő íz-, illat- és aromaanyagokat forralással beoldják az édescefrébe.

Komposztálás: a biohulladékok ellenőrzött körülmények között, oxigén jelenlétében történő autotermikus biológiai lebontása mikro- és makroorganizmusok segítségével.

Kőmosás: a koptatott vagy viseletes hatást keltő farmert korábban ipari mosodában horzsakővel (habkővel) való együttmosással érték el. A kő által kifejtett dörzsölés az indigószínezék részleges eltávolítását eredményezi a szövetfelületen hozzáférhető szálak felületéről, és ennek következtében láthatóvá válik a fonal fehér belső része. Egy farmernadrág koptatásához 1–2 kg habkő alkalmazása szükséges.

L* (világossági tényező): a hússzín jellemzésére szolgáló érték, amely megmutatja, hogy a hús a megvilágító fény hány százalékát veri vissza. (Az a*, b* és L* tényezők egy háromdimenziós derékszögű koordináta-rendszerben a három tengelynek felelnek meg, konkrét értékeik pedig kijelölik a színingertér azon pontját, mely az adott húsminta színére jellemző.)

Lakkáz (EC 1.10.3.2): oxidoreduktáz típusú enzim, a lignin polimerizációjában és depolimerizációjában vesz részt.

Laktáz (β -galaktozidáz, EC 3.2.1.23): laktóz (tejcukor) hidrolízisét katalizáló enzim. A laktózban található egyes szénatom β -térállású glikozidos kötését hasítja, a reakció során glükóz és galaktóz keletkezik.

Laktoszukróz: egy szacharóz- és egy laktózmolekulából létrejött, prebiotikus hatású oligoszacharid. Fruktofuranozidáz enzimmel végzett transzfruktozilációval állítható elő.

Laktózintolerancia (laktóz-malabszorpció): emésztési zavar, melynél a tejcukor részben vagy egyáltalán nem emészthető meg a vékonybélben. A vastagbélbe továbbjutva a bélbaktériumok lebontják, anyagcsere-termékeik pedig puffadást, hasmenést okoznak.

Leván: β -6,2-D-fruktofuranozil-egységekből felépülő, frukto-oligoszacharid típusú vegyület.

Lignifikáció (elfásodás): biokémiai folyamat, melynek során a növényi sejttel cellulózvázában lignin és egyéb anyagok rakódnak le, így a sejttel megvastagodik. Elsősorban a szállító- és szilárdítószövetekre jellemző.

Lignin-peroxidáz (EC 1.11.1.14): oxidoreduktáz típusú enzim, a lignin oxidatív lebontását katalizálja. Fontos szerepet játszik a lignintartalmú növényi részek korhadási folyamataiban. Papíripari alkalmazása – magas ára miatt – egyelőre korlátozott.

Lipáz (pl. EC 3.1.1.3): hidroláz típusú enzim, a glicerinsztereket hasítja zsírsavakra és gliceridekre. Előállítására többnyire penészgombák (*Aspergillus*, *Rhizopus* stb.) fermentációjával történik.

Lipoxigenázok (LOX, EC 1.13.11.12–1.13.11.77): oxidoreduktáz típusú enzimek, melyek erő gyümölcsökben és sérült szövetekben telítetlen zsírsavakból (pl. linolénsavból) képeznek aromaanyagokat.

Lúgos főzés: a textilanyagok előkészítésének második részfolyamata, melynek célja a nem cellulóz kísérőanyagok – elsősorban a nedvesedést gátló felületi viaszréteg – eltávolítása forró nátrium-hidroxid- vagy nátrium-karbonát-oldattal. A hatékony kísérőanyag-eltávolításhoz 1 kg pamuthoz 30 g nátrium-hidroxid szükséges. A len lúgos főzésekor 1 kg lenre 25 g nátrium-hidroxidot használnak, amelynek a fele helyettesíthető szódával.

Maillard-reakció: aminosavak és redukáló cukrok között hő hatására végbemenő reakció. Szerepe van a hőnek kitett ételek barnulásában, a főzés / sütés során különböző íz- és illatanyagok keletkezésében.

Malátázás: a sörkészítési folyamat első lépése, a gabona csíráztatása. Az eljárás célja a keményítőkészítésben részt vevő enzimek (főként amilázok) aktivitásának növelése, a lebontó folyamatok megindítása.

Mannáz (EC 3.2.1.25): a hidrolázokon belül a glikozidázok közé tartozó enzim, mely a mannózból felépülő mannánban bontja a β -1,4 kötéseket.

Mikrobiális transzglutamináz (mTG) (EC 2.3.2.13): acil-transzferáz típusú enzim, aciltranszfer-reakciót, keresztkötést és dezaminálást képes katalizálni. Élelmiszeripari szempontból legjelentősebb a lizin ϵ -aminocsoportja és a glutamin γ -karboxil-amid csoportja közötti keresztkötés kialakítása, melynek eredményeként ammónia felszabadulása mellett ϵ -(γ -glutamil)-lizin izopeptidkötés alakul ki. Az enzimkatalizált reakció fehérje-visszatartó és állományjavító hatású.

Miofibrillum: az izomrost kontraktilis alapegysége, mely aktinból és miozinból épül fel.

Miozin: az aktinváz motorfehérjeje, a sejten belüli irányított anyagmozgatást végzi, valamint magasabb rendű élőlényekben lehetővé teszi az izomsejtek kontrakcióját.

Naringin: a citrusfélékben megtalálható flavonoid (oxigéntartalmú heterociklusos vegyület), mely számos kedvező élettani hatással rendelkezik, pl. gyulladáscsökkentő, antioxidáns hatású.

Naringináz (EC 3.2.1.40): naringin hidrolízisét katalizáló enzimkomplex. Első lépésben a naringint bontja az α -ramnozidáz pruninra és L-ramnózra, majd a prunint hidrolizálja a β -D-glükózidáz naringeninre és D-glükózra.

Pasztörözés: tej, sör, gyümölcsle stb. tartósítására szolgáló hőkezelési eljárás, melynek során a patogén és romlást okozó mikroorganizmusok jelentős része elpusztul. Az alkalmazott hőmérséklet 60–90 °C közötti, a hőtartás időtartama pedig néhány másodperctől fél óráig változhat az eljárás típusától függően (magasabb hőfokhoz rövidebb hőkezelési idő tartozik).

Pektin: galakturonsavból, ramnózból, galaktózból, arabinózból és xilózból felépülő heteropoliszacharid, melynek feladata a növényi sejttel mechanikai szilárdságának biztosítása. A monomerek α -D-(1→4) kötésekkel kapcsolódnak, gyakran metilcsoporttal észterezve.

Pektináz (EC 3.2.1. és 4.2.2.): a pektin bontását katalizáló enzim. Típusai közé tartoznak az exo- és endo-poligalakturonázok (EC 3.2.1.15, α -1,4-glikozidos kötés hidrolízise), liázok (EC 4.2.2.2 és EC 4.2.2.9, transzelimináció) és pektinészterázok (EC 3.1.1.11, pektin-metilészter kötéseinek hidrolízise).

Peroxidáz (POD, kataláz, EC 1.11.1.6): az oxidoreduktázok közé tartozó enzim, mely a hidrogén-peroxid bontását katalizálja, ezáltal védi a sejtmembránt, valamint növényi sejtekben gátolja a fenolvegyületek oxidációjából eredő barnulást.

Pervaporáció: membránszeparációs eljárás, melynek során az elválasztandó folyadékelegy a primer oldalon atmoszférikus nyomáson érintkezik a membránnal, a szekunder oldalon pedig gőzfázisként nyerhető ki a permeátum.

Pillingesedés: a fonalakból kiálló elemi szálvégződéses a szövet-, illetve kelmefelületen csomósodást, bolyhosodást okoznak, továbbá noppokat képeznek, ezáltal rontják a termék esztétikai hatását.

Polifenol-oxidázok (PPO, EC 1.14.18.1, 1.10.3.1, 1.10.3.2): oxidoreduktáz típusú, réztartalmú enzimek, melyek a fenol–kinon átalakulást katalizálják. Növényi sejtekben a kloroplasztiszokban és peroxiszmákban található meg, fontos szerepet játszanak a biotikus és abiotikus stresszhatásokkal szembeni védekezésben egyaránt.

Post-rigor: az állat levágása utáni átalakulások harmadik, a hullamerevség utáni szakasza, melynek során megindul a fehérjebontás, a hús fokozatosan puhul.

Prebiotikum: olyan nem emészthető élelmiszer-összetevő, mely a jótékony hatású bélbaktériumok szaporodásának és/vagy aktivitásának szelektív támogatásával kedvező hatást gyakorol a gazdaszervezetre.

Pre-rigor: az állat levágása utáni átalakulások első szakasza, a hús még puha, nem állt be a hullamerevség.

Probiotikum: magasabb rendű élőlények emésztőrendszerében élő baktérium, mely jótékony hatást gyakorol a gazdaszervezetre (pl. védi a nyálkahártya integritását, gátolja a patogén mikroorganizmusok szaporodását stb.).

Proteázok: a hidrolázok osztályába tartozó, fehérjebontó enzimek (EC 3.4. alkategória). Két nagy csoportba sorolhatók aszerint, hogy a fehérjében belül bontják-e a peptidkötéseket (endopeptidázok), vagy a lánc végéről hasítanak le aminosavakat (exopeptidázok).

PSE (pale, soft, exudative = sápadt, halvány, vizenyős) húshiba: közvetlenül vágás előtt akut vagy rövid ideig tartó, nagy stressz éri az állatot, melynek hatására az izom glikogéntartalmát az állat rövid idő alatt átalakítja tejsavvá. A fehérjék egy része denaturálódik, különböző húshibák alakulnak ki.

Pullulanáz I. és II. (EC 3.2.1.41 és 3.2.1.135): keményítőtó bontó enzimek. Az I. típus a szénlánc elágazásánál hasít, valamint az α -1,6-glikozidkötéssel kapcsolódó maltotriózegységekből álló poliszacharidot, a pullulánt is bontja. A II. típusú pullulanáz enzim egyaránt bontja az α -1,4 és α -1,6 kötést, ezért α -amiláz-pullulanáznak vagy amilopullulanáznak is nevezik. A bontáskor elsősorban maltóz és maltotrióz keletkezik.

Rigor: az állat levágása utáni átalakulások második szakasza, melynek során beáll a hullamerevség (rigor mortis), a pH csökken, a húsfehérjék denaturálódnak.

Rost: a rostok elemi szálakra bontható sejtkötegekből állnak (pl. lenrost, kenderrost).

Rutin: kis molekulatömegű polifenol típusú vegyület (flavonoid-glikozid), többek között a citrusfélékben, hajdinában és egyes gyógynövényekben fordul elő. Vénás elégtelenség, kapilláris-károsodások kezelésére használt gyógyszer hatóanyaga.

Starterkultúra: élelmiszeriparban alkalmazott baktérium- vagy gombaszíntenyészetek, melyek részt vesznek a termék tulajdonságainak (íz, szín, aroma, állag stb.) kialakításában.

Szál: a szálak különálló egységek, amelyek roncsolódás nélkül tovább nem bonthatók (pl. pamutszál, gyapjuszál).

Szarkomer: a miofibrillum periodikusan ismétlődő szakasza, az izom funkcionális egysége.

Sztrippelés (kihajtás): a gáznyeléssel ellentétes irányú anyagátadási művelet, melynek során a folyadékelegyből az illó komponenseket gázfázisba viszik inert gáz segítségével.

Tejsavó: tejipari melléktermék; a tej alvasztásakor a szilárd alvadékfázistól elválasztott folyadék.

Teljes szerves széntartalom (TOC): víz / szennyvíz minősítésére szolgáló mérőszám. A teljes szerves széntartalom mérése során először az összes széntartalmat határozzák meg, ennek során a kötésekben lévő szén szén-dioxiddá alakul át valamilyen oxidáció hatására, amelynek mennyiségét többnyire infravörös detektorral mérik. Ezután a szervesetlen széntartalmat határozzák meg (sósav vagy foszforsav hozzáadásának segítségével), és a két mennyiség különbsége adja meg a teljes szerves széntartalmat.

Természetes aroma: növényi, állati vagy mikrobiális eredetű aroma.

Termolizin (EC 3.4.24.27): a hidrolázokon belül a metalloendopeptidázok közé tartozó enzim, legfontosabb termelő törzse a *Bacillus thermoproteolyticus* baktérium. Az élelmiszeriparban aszpartám előállítása során alkalmazzák, emellett felhasználják diagnosztikai célokra, gyógyszeripari és egyéb szintézisekre.

Törköly: a borkészítés során a szőlő préselésekor visszamaradó szilárd fázis (héj, mag stb.).

Tumblerezés (masszírozás): a pácolás hatékonyságának fokozására használt húsipari eljárás. A kezelendő húst egy forgódobba (ún. tumblerbe) helyezik, majd a különböző irányokban történő többszöri átforgatás révén a hús szerkezetét fellazítják, és a páclevet belemasszírozzák a húsba.

Végkikészítés: a nedves textiltechnológiák (kikészítés) utolsó művelete, amelynek célja a felhasználás szempontjából fontos végső tulajdonságok (pl. lángállóság, gyűrődésmentesség, méret- és formatartás stb.) kialakítása.

Vízaktivitás: az adott élelmiszer felett a víz parciális gőznyomásának és a vele azonos hőmérsékletű víz telítési gőznyomásának hányadosa. A vízaktivitás megadja a mikroorganizmusok (vagy enzimek) számára hozzáférhető víz mennyiségét.

Xilanázok (EC 3.2.1.1–8): a hidrolázokon belül a glikozidázok közé tartozó enzimek, melyek a xilán hidrolízisét katalizálják. Az endo-1,4- β -D-xilanázok véletlenszerűen hasítják a xilánban lévő β -1,4-kötéseket, a keletkező xilo-oligoszacharidokat pedig a β -xilozidázok hidrolizálják D-xilózzá. Az iparban xilo-oligoszacharidok (prebiotikumok) előállítására, valamint a papír- és textiliparban biofehérítés során alkalmazzák.

Xilit: természetes édesítőszerként használt, öt szénatomszámú cukoralkohol. Előállítása xilózból történik kémiai redukcióval vagy fermentációval.

Xilo-oligoszacharid (XOS): xilózmonomerekből β -1,4-kötésekkel felépülő oligoszacharid, melyet prebiotikumként használnak (pl. üdítőitalokban).

