



**Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem**
Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszer-tudományi Tanszék

Ipari hulladékok enzimes kezelése

Készítették:

Kövesi Balázs

Molnár Cintia Petra

Szabó Bendegúz

2018. október 24.

1. Bevezetés:

A xenobiotikumok és szerves szennyezőanyagok kibocsátása a különböző iparágak terjeszkedésével párhuzamosan növekszik, ezáltal a szennyvíztisztítás elvárt szintjének elérése a hagyományos módszerek alkalmazásával egyre nehezebbé, költségesebbé válik. Az ipari és kommunális szennyvíz környezetbe történő kieresztésére vonatkozó szigorú szabályok tehát gazdasági szempontból is szükségessé tették a hulladékkezelés alternatív módjainak fejlesztését.

Bizonyos növényi, illetve mikroorganizmus eredetű enzimek egyes nehezen eltávolítható szennyező anyagok kicsapását vagy átalakítását katalizálják. Ezen enzimek alkalmazása jelentősen gyorsabbá, hatékonyabbá teszi a hulladék kezelésének folyamatát. A szennyvíztisztítás folyamatai két csoportba sorolhatóak: fizikai-kémiai, illetve biológiai folyamatok. Az enzimes megoldás a két kategória határán helyezkedik el: a kezelés kémiai folyamatait biológiai eredetű katalizátorok gyorsítják.

Az enzimes eljárás a hagyományos biológiai módszerekhez képest számos lehetséges előnnyel bír. Ennek oka az enzimek szélesebb körű alkalmazhatósága. A szennyvízkezelés során használt enzimek képesek egyes biológiailag ellenálló szennyezők átalakítására, széles pH-, hőmérséklet- és ionkoncentráció tartományon működnek, továbbá nagy és kis szennyezőanyag-koncentráció esetén egyaránt alkalmazhatóak. Enzimes eljárással megszűnik a biotermészeti akklimatizációjához szükséges időkiesés, csökken az iszaptérfogat, és összességében könnyebben irányíthatóvá válnak a folyamatok.

A szennyezőanyagok enzimes lebontásához kapcsolódó széleskörű kutatás rengeteg új lehetőség felfedezéséhez vezetett a szennyvíztisztítás, a szilárd szemét kezelése és a talajmegújítás területén. Előadásunk célja az ipari hulladék kezelésében szerepet játszó enzimek rövid összefoglalása.

2. Fenol vegyületek:

Az aromás vegyületek (pl.: fenol, aromás aminok) alkotják a szennyezőanyagok egyik jelentősebb csoportját. Rengeteg iparág szennyvizében megtalálhatóak (pl.: kőolaj finomítók, műanyag gyártás, festék gyártás, textilipar, papírgyártás). A legtöbb aromás vegyület mérgező, így a szennyvizet meg kell tisztítani ezekről.

2.1 Peroxidázok:

A peroxidázok olyan oxidoreduktázok, amit számos növény és mikroorganizmus képes termelni. Sok reakciót katalizálnak, de az aktiválásukhoz szükséges a hidrogén-peroxid jelenléte. A hidrogén-peroxid először eloxidálja az enzimet, ami viszont oxidálja a szubsztrátot.

2.1.1 Torma peroxidáz (HRP):

Amint a torma peroxidázt (HRP: Horseradish peroxidase) aktiválta a H_2O_2 , akár fenolok, bifenolok, anilinek és heteroaromás vegyületek oxidálására is képes. A reakciótermékek egy nem-enzimes úton polimerizálódnak, ami vízben oldhatatlan csapadék képződéséhez vezet. Ez ülepítéssel vagy szűréssel könnyedén eltávolítható. A HRP széles pH- és hőmérséklet tartományban megőrzi aktivitását. Olyan sokat tudunk erről a peroxidázzról, hogy már matematikai modellek is vannak rá. Tudományos körökben rengeteg időt szántak a HRP-katalizált vizes oldatban lévő fenol eltávolítás optimalizálására. A kezelési költség csökkentésében a következőknek volt fontos szerepe: megfelelő reaktor kiválasztása, enzim immobilizáció, adalékok és adszorbensek hozzáadása.

2.1.2 Lignin peroxidáz (LiP):

A lignin peroxidáz a fehér farontó gombák extracelluláris enzimrendszerének egyik része. A HRP-hez nagyon hasonló a működése. A lignin depolimerizálásában is jelentős szerepe van. A fenol eltávolítására szolgáló optimum eléréséhez szükséges a magas enzim koncentráció, magas pH (mert alacsony pH-n inaktiválódik) és a H_2O_2 jelenléte.

2.1.3 Egyéb peroxidázok:

- Klór-peroxidáz
- Mangán peroxidáz

2.2 Polifenol oxidázok:

A peroxidázokhoz hasonlóan, aromás vegyületek oxidálására alkalmas enzimek. Két alosztálya van; tirozinázok és lakkázok. Mindkét enzimcsoport aktivitásához szükséges bimolekuláris oxigén jelenléte, ellenben nincs szükségük koenzimre.

2.2.1 Tirozináz:

A tirozináz két egymást követő reakciót katalizál; monofenolok hidroxilezését (o-difenol) és a keletkezett o-difenolok dehidrogénezését (o-kinon). Mindkét lépéshez szükséges a molekuláris oxigén jelenléte. A kinonok instabil vegyületek, amik nem-enzimes polimerizáción mennek keresztül. Vannak olyan sikeres kísérletek, ahol ezeket a termékeket kitozán segítségével adszorbeálták. Wada et al. immobilizált tirozináz és kitozán keverékét használta, amivel két óra alatt 100%-os sikert ért el a fenol eltávolításában. Ezenfelül a tirozináz még 10 ciklus után is megtartotta az aktivitását. Akkor miért nem ezt a módszert alkalmazzuk a legtöbbszőr? Mert nagyon drága.

2.2.2 Lakkáz:

A lakkáz egy olyan, gombák által termelt polifenol oxidáz, ami polimerizációs reakción keresztül tudja csökkenteni a fenol vegyületek toxicitását. Reaktív anionos szabad gyökökkel oxidálja a fenol vegyületeket (Payne, Sun, and Sohrabi 1992).

3. Papíripar:

3.1 Peroxidok és lakkázok:

Az ún. Kraft folyamat a papírgyártás azon szakasza, mely során a fából tiszta cellulóz szálak izolálásával fa-pép keletkezik. A faforgács, a reagensek (NaOH, Na₂S) és a forró gőz egy túlnyomáson tartott emésztő reaktorba kerülnek, ahol 2-4 óra elteltével, az elhasznált komponensek és a részlegesen lebomlott lignin eltávolításával alakul ki a sötétbarna fapép (Paper Task Force 1995).

A Kraft folyamat során keletkező pép 5-8 tömeg% visszamaradó lignint tartalmaz. Ez a megmaradó lignin felelős a pép barna színéért. A papírgyártás következő lépése a fehérités, mely során szelektívebb kémiai adalékok alkalmazásával eltávolítják a maradék lignint a pépből. A fehéritéshez elsősorban klórt és különböző klór-oxidokat alkalmaznak. A fehérités folyamatának szennyvize ebből kifolyólag súlyosan mérgező és mutagén klórozott szerves lignin-származékokat tartalmaz (Garg and Tripathi 2011).

A legtöbb lignin-oxidáló enzimet az ún. fehér rothasztó gombák termelik. A *C. versicolor* (lepketapló) gombából izolált torna-peroxidáz és lignin-peroxidáz enzimek egyaránt alkalmasnak bizonyultak a Kraft üzemek szennyvizének elszintelenítésére. Mindkét enzim esetében az immobilizált forma eredményesebb volt a szabad enzimmél (Ferrer, Dezotti, and Durán 1991). A lignin peroxidázzal homológ szerkezetű mangán peroxidáz enzim szintén szerepet játszhat a lignin maradványok bomlásában. A lignin peroxidázok a lignin nem-fenolos aromás gyűrűit oxidálják spontán lebomló szerves kationokká hidrogén-peroxid jelenlétében. A mangán-függő peroxidázok a fenolos ligninalkotó egységek gyűrűit képesek oxidálni kelátképző ionok hidrogén peroxid jelenlétében. A tényleges oxidálószer ebben az esetben a Mn³⁺ kofaktor. (Bajpai, Anand, and Bajpai 2006).

A lakkáz enzimek (réz tartalmú oxidáz enzimcsalád) kis molekulatömegű fenolok polimerizációját katalizálják, mely következtében a klorofenolok és klórozott lignin származékok molekulatömege növekszik, elősegítve ezek oldószeres (pl. polietilenimin, PEI) kicsapását (Milstein et al. 1988).

3.2 Celluláz enzimek:

A celluláz enzimek a pépesítő és festékmentesítő eljárások iszapjának kezelésében hasznosíthatóak. Az iszapban maradó szerves anyagok párhuzamos hidrolizáció és fermentáció (simultaneous hydrolysis and fermentation, SHF) során etanollá alakíthatóak, mely csökkenti a keletkező szennyvíz térfogatát (és a kezelésével járó költségeket), miközben értékesíthető termék jön létre.

Az elsődleges derítő iszap (primary clarifier sludge, PCS) fermentálható cukrokká történő hidrolizációjának sebessége a hozzáadott celluláz enzimek koncentrációjával arányos. A hidrolízishez cellobiohidroláz, celluláz és β-glükozidáz enzimek keverékét alkalmazták. Az újrahasznosító és tintamentesítő folyamatokból származó alacsony értékű

cellulózszármazékok fermentálható cukrokká történő hidrolizációja szintén sikeresnek bizonyult celluláz enzimek keverékének alkalmazásával (Moritz, and Andersen 1994).

4. Peszticidek:

A peszticid fogalom kártevő-ellenes vegyületek széles skáláját foglalja magában. Ide tartoznak a gomba-, rovar- és rágcsáló ellenes szerek, gyomirtók, növényi növekedés szabályozók. 1997-es adatok alapján a peszticidekre vonatkozó keresletet világszerte több mint félmilliárd dollár értékűre becsülték, amely a teljes világpiaci kereslet 2%-ának felelt meg (Aktar, Sengupta, and Chowdhury 2009).

A peszticidek iparának környezetre mért negatív hatása elsősorban a gyártás során keletkező hulladékból, a tárolók méregtelenítéséből, a felszíni és a talajvizek szennyeződéséből adódik. A peszticid-ipar hulladékának kezelésére általános módszerek az égetés, kémiai semlegesítés és a földelés, de ezen módszerek alkalmazásának határt szab a magas költség, a veszélyes melléktermékek keletkezése, illetve a kémiai reagensek környezetbe való kieresztése. A peszticidekkel kezelt talaj regenerációjában biológiai rendszerek (mikroorganizmusok alkotta ökoszisztémák) is kiveszik a részüket, ezek azonban különösen érzékenyek a sok terhelés hatásaira nézve (Caldwell and Raushel 1991).

A foszfortriészteráz enzimek (parathion hidrolázok, fémtartalmú enzimek, melyek az organofoszfátok triészter kötéseit hasítják) képesek egyes peszticidek (metil- és etil parathion, diazinon, fensulfothion, coumaphos és chlorpyrifos) hidrolizációjára (Caldwell and Raushel 1991). Sokféle baktérium termel parathion hidroláz enzimeket, például egyes *Pseudomonas* fajok, *Flavobacterium*ok és *Streptomyces* ősbaktériumok rekombináns törzsei (Coppella et al. 1990). Ezen organikus foszfátvegyületek teszik ki a mezőgazdasági peszticidek jelentős hányadát, és évente több százezer mérgezéssel hozhatóak kapcsolatba.

A coumaphos nevű tiofoszfát insecticidet a szarvasmarhák különböző megbetegedéseiről felelős kullancsok ellen alkalmazzák. A kezelés során az állatokat megmártják a vegyületet tartalmazó nagyméretű kádakban. A coumaphos anaerob körülmények között megválíkló klórcsoportjától, és potasan keletkezik, amely hidrolizációval chlorferonná és methylumbelliferonná alakul (Smith et al. 1991). Ezek a termékek oldhatósága jobb a kiindulási szubsztráténál, és UV besugárzással és ózonnal kezelhető (Summerfelt 2003). A coumaphost a parathion hidroláz enzimek a kémiai hidrolízisnél jóval nagyobb sebességgel képesek hidrolizálni, továbbá megfelelő koncentrációban alkalmazva a potasan köztitermék specifikus lebontására képesek, miközben a coumaphost érintetlenül hagyják. Ilyen módon alkalmazva növeli a coumaphos hasznos élettartamát, és csökkenti a keletkező szennyezőanyag koncentrációját. A potasan intermedier ugyanis toxikus a marhákra nézve, így az enzimes kezelés hiányában a kádak tartalmát gyakran cserélni kell (Smith et al. 1991).

5. Cianid szennyezés:

Becslések szerint különböző ipari folyamatok során évente 3 millió tonna cianidot használnak, többek között kémiai alapanyagok, szintetikus szálak, gumi és egyes gyógyszerek gyártásához, ércet mosásához, kőszén feldolgozásához, és fémbevonáshoz. A cianid anyagcsere gátló hatású (esszenciális enzimek fém kofaktoraihoz köt) potenciálisan halálos toxin, eltávolítása nagyon fontos (Karam and Nicell 1997). A cianidok kezelésének hagyományos, kémiai-fizikai folyamatai csak szabad, vagy fémekhez gyengén kötött cianidok ártalmatlanítására alkalmasak, a savképzés és/vagy oxidáció során költséges és környezeti szempontból veszélyes anyagokat alkalmaznak. A biodegradáció gyorsabb, hatékonyabb és gazdaságosabb. A biodegradáció mechanizmusai az egyes mikrobák cianid-tűrő képességének következménye.

A cianid biodegradációjának 5 általános útvonala van: a hidrolitikus, oxidatív, redukzív, szubsztitúció és szintézis útvonal. Az első három esetben az enzimkatalizált konverzió eredménye egyszerű szerves vagy szervetlen molekulák, melyek később ammóniává, metánná, szén-dioxiddá, formiáttá és más szerves savakká alakíthatóak. A másik két útvonal során a cianid mikrobák C és N-forrásaként asszimilálódik.

5.1 Hidrolitikus útvonal:

Öt enzim katalizálja: cianid hidratáz, nitril hidratáz, tiocianát hidroláz, nitriláz és cianidáz. Az első három enzim specifikus szubsztrátjaik közvetlen hidrolízisére képesek, mely során a C-N hármast kötés felhasad és formamid keletkezik. A másik kettő ammóniává, illetve szerves savvá alakítja a cianidokat, melyek asszimilálódnak.

5.2 Oxidatív útvonal:

5.2.1 Cianid monoxygenáz és cianáz:

A cianázok sokféle mikroorganizmusban megtalálható, indukálható enzimek. A cianidot elsőként cianáttá oxidálják, majd azt ammóniává és bikarbonáttá alakítják. *Pseudomonas pseudoalcaligenes* baktériumokból izolálták, melyek a cianidot kizárólagos N-forrásként is képesek asszimilálni.

5.2.2 Cianid dioxygenase:

A cianid dioxygenázok oxidálószerként a légköri oxigént hasznosítják. Működésükhöz redukált koenzimek (NADPH) jelenlétét igénylik.

5.3 Reduktív útvonal:

5.3.1 Nitrogenázok:

A redukzív útvonal enzimeit a nitrogenázok. A cianid degradációnak ezen módja anaerob körülmények között mehet végbe. A nitrogenázok egyes baktériumok légköri nitrogén megkötésére alkalmazzák. Az enzim a hármast kötést hasítja, majd a nitrogént (egyesével) három hidrogén atomhoz köti bonyolult folyamatban. A nitrogenáz enzimek Mo és Fe -fehérjék és ATP jelenlétét igénylik. Az ammónia glutamát aminálásával asszimilálódik.

Az enzim működéséhez nagy mértékű kémiai energia, és redukáló ágensek (in vitro: ditionit, in vivo: ferredoxin) szükségesek. Az ammóniumion, aminosavak és oxigén gátolja a nitrogénázok működését.

5.4 Rodanázok és cianoalanin szintázok:

A cianidot szubsztitúció útvonalán a rodanáz enzimek tiocianáttá, a szintézis útvonalon a cianoalanin szintáz enzim cianoalaninná alakítják, mely vegyületek asszimilálódnak az enzimeket termelő baktériumokban. Ezek az útvonalak enzimei in vitro körülmények között nem alkalmasak a cianid szennyeződés biodegradációjára (Gupta, Balomajumder, and Agarwal 2010).

6. Élelmiszer feldolgozás:

Az élelmiszer feldolgozás hatalmas iparág, amely világszerte a hulladékok jelentős hányadáért felelős, azonban az élelmiszeripari hulladékok gyakran alakíthatóak át értékesíthető termékekké (takarmány, nem élelmiszer termékek).

6.1 Proteázok:

A proteázokat régóta széles körben alkalmazzák a hal- és húsipar hulladékának kezelésénél. A proteázok képesek oldhatóvá tenni egyes fehérjéket a hulladék folyamatokban, mely állapotállományok táplálására alkalmazható folyékony koncentrátumokat vagy szárított termékeket eredményez. A proteázok az oldhatatlan fehérjéket soklépéses reakcióban hidrolizálják, mely során lehasítják a fehérje felületén elhelyezkedő hidrofób polipeptideket.

*Bacillus subtilis*ből származó alkalikus proteázok a baromfi vágóhidak toll-hulladékának lebontásában is sikeresnek bizonyult. A baromfik súlyának 5%-át tollak teszik ki, melyek magas fehérjetartalmú takarmánnyá alakíthatóak a merev keratin struktúra elemésztésével. NaOH-os előkezelés után a tollak teljes oldása is megvalósítható. Az eredmény egy sűrű, szürke, proteinben gazdag por, mely takarmány-kiegészítőként alkalmazható.

6.2 Amilázok:

Az amilázok elsősorban a keményítő feldolgozásban a párhuzamos elcukrosítás és fermentáció során, illetve a keményítőtartalmú hulladékok kezelésénél alkalmazzák. A rizsfeldolgozás szennyvizéből amilázok segítségével etanol nyerhető. Emellett az amilázok csökkentik a rizsfeldolgozás iszapjának kezelési idejét.

Alfa amiláz és glükóamilázok párhuzamos alkalmazásával keményítőszármazékok (sajt savóban vagy burgonya-hulladékban) könnyen biodegradálható műanyagokká alakíthatóak. Elsőként az alfa-amiláz a hosszú keményítő molekulákat kisebb fragmensekké darabolja, melyeket a glükóamiláz cukorra alakítja. A cukrok tejsavas fermentációját követően a tejsavat tisztítják, majd polimerizálják. Az így termelt biodegradálható műanyagok bomlásának sebessége különböző tejsav-izomerek pontos adagolásával befolyásolható. A biodegradálható műanyagokból talajtakaró ponyvák és komposzt-tartók

készíthetőek, továbbá „programozható” fertőtlenítőszer és peszticid kézbesítési rendszerek alkotóelemei lehetnek (Coleman 1990).

6.3 Egyéb enzimek az élelmiszeripari hulladékok feldolgozásában:

A pektinészteráz és pektin liáz enzimek (*Clostridium* fajok) képesek bontani a szomszédos növényi sejtek falát rögzítő pektinjét, mely eljárás során az egyes élelmiszeripari melléktermékek (pl.: almatörköly) alkoholokká (pl.: butanollá) alakíthatóak.

L-galactonolakton oxidáz, melyet a *Candida norvegensis* élesztőből izoláltak, a savóban található galatóz (laktóz hidrolízis terméke) L-askorbinsavvá alakítására alkalmazható.

A laktázok szintén fontos szerepet játszanak a tejipari hulladékok értékesíthető melléktermékké történő átalakításában. A savófehérjéktől elválasztott, magas laktóz tartalmú permeátum enzimes degradáció során értékesíthető monoszacharid-szirupokká alakíthatók.

A *Serratia marcescens* baktériumok kitináz enzime a kitin SCP-vé történő átalakításában vesz részt (Karam and Nicell 1997).

7. Szilárd hulladék és iszapkezelés:

Az elmúlt évtizedben növekvő érdeklődés mutatkozott a cellulóz enzimátikus hidrolízise kapcsán. Nevezetesen a lignocellulóz és cellulózhulladékok hasznos energiaforrásként történő átalakítása cukrok, etanol, biogáz vagy más energetikai végtermékek előállítására révén. (Duduta, Clarke, and Wood 2017) Európában megközelítőleg 400 ezer tonna szilárd városi hulladékot (MSW = municipal solid wastes) termelnek naponta. (Mata-Alvarez, Macé, and Llabrés 2000) Számos beszámolót jelentettek az MSW szerves frakciójában lévő cellulóz enzimátikus hidrolízisének lehetséges módszereiről, annak érdekében, hogy fermentálható cukrok és végül etanol vagy butanol előállítható legyen. Ezt megvalósították úgy, hogy *Trichoderma reesei* törzsből, *Penicillium* törzsből és termofil gombából származó cellulázokat használtak az MSW szerves frakciójából származó hidrolizátumok előállítására, amelyeket ezt követően közvetlenül használták a fermentációs táptalaj alapjaként.

Gomba enzim preparátumot Ekonázt használtak MSW degradációjának vizsgálatára. Az Ekonáz főleg endo-1,4- β -D-glükanázt, cellobiohidrolázt és exo-1,4- β -D-glükozidázt tartalmaz számos más enzim mellett. Az Ekonáz használata fokozta a MSW lebomlását, valamint a cellulóz lebomlását. Karbohidráz-, lipáz- és proteinázaktivitással rendelkező enzimerméket használtak a szennyvíziszap víztelenítésének javítása, és a préselés során felszabaduló vízmennyiség növelése, így az összterfogat csökkentése céljából. Az enzim hozzáadásának célja a vízkötő makromolekulák hasítása volt.

Foszfát tartalmú iszapok jelentős mennyiségű duzzadó agyagszerű anyagot tartalmaznak, melyeknek kicsi részecskeméretük van, valamint lassú ülepedési viselkedésük miatt csak nagyon nehezen vízteleníthetőek. A peroxidázos előkezelés erősebb mechanikai

kötődést váltott ki az iszaprészecskék között, valamint a peroxidáz jelentősen elősegítette az algák és a penész növekedését. Mindezek együttesen a részecskék fokozott aggregációját váltották ki, és így egy erős, nagy viszkozitású gélszerkezetet hoztak létre, ami igencsak előnyös az utóülepítésekénél.

8. Nehézfémek eltávolítása:

A nehézfémek, például az arzén, a réz, a kadmium, az ólom és a króm többek között veszélyes szennyezők, amelyek számos ipari és bányászati hulladékáramban, valamint szilárd hulladékokban, települési szennyvíziszapokban és hulladéklerakóban található. Például a kadmium a keverés, olvasztás, elektrolízis és pigmentgyártás során keletkező hulladékokban van jelen, míg más fémeket használnak az atomenergia, a védelmi és az üzemanyag-újrafeldolgozó iparban.

Egy feljegyzés szerint sikerült megoldani a kadmium, az ólom, a réz, az urán és a stroncium eltávolítását folyékony elektrolizáló és egyéb ipari hulladékokból. Az eljárás során poliakrilamid gélbe rögzítettek Citobakter sejteket, amelyeken keresztül fémtartalmú oldatokat áramoltattak. A sejthez kötődő foszfátot glicerol-2-foszfát szubsztráttal indukáltak egyedüli foszforforrásként, így inorganikus foszfát szabadul fel, amely meghaladja a növekedéshez szükséges mértéket. Ez utóbbi viszont a fémhez kapcsolódik, és oldhatatlan fémfoszfátot képez a sejtfelszínen. Több, mint 90%-os fém eltávolítást figyeltek meg, és a fém visszanyerhető az immobilizált sejtekből, amelyeket újra fel tudtak használni. (Duduta, Clarke, and Wood 2017)

Egy másik kísérlettel bizonyították, hogy a növekvő Zn, Cu és Pb koncentrációk a talajban az MSW komposzt hozzáadásával valószínűleg hozzájárultak a foszfát és ureáz aktivitás csökkenéséhez, míg más enzimek (dehidrogenáz, kataláz, proteáz) nem érintettek. (Crecchio et al. 2004)

9. Egyéb potenciális alkalmazások:

9.1 Talajszennyezések eltávolítása:

Lehetőség van arra, hogy fokozzák a xenobiotikumok természetes lebomlási folyamatát - kötődjenek és beépüljenek a humuszba úgy, hogy enzimeket, például a lakkázt adnak a szennyezett talajokhoz. A *Trametes versicolor*-ból, *Rhizoctonia praticolab*-ból és más gombákból származó lakkázokat használtak a különböző klórozott fenolok és aromás aminok oxidatív megkötésére. A xenobiotikumok stabilnak tűnnek, miután beépültek a talajba. Minimálisan és fokozatosan felszabadulnak, ami nem jelenthet egészségügyi veszélyt, és a felszabadult vegyületek természetes folyamatokkal mineralizálódhatnak vagy újra kötődhetnek a humuszhoz.

9.2 A felületaktív anyagok lebomlása:

A felületaktív anyagok olyan szerves anyagok, amelyek meglehetősen nagy poláris molekulákkal rendelkeznek és a mosószerek alapvető összetevői. Az egyik *Pseudomonas* törzsből nyert alkil-szulfátáz immobilizálva hatékonyan lebontja a felületaktív anyagokat. Az enzimről kimutatták, hogy specifikus az elsődleges alkil-szulfátok esetében. Képes teljesen lebontani az alkil-szulfátot és az alkil-etoxi-szulfát felületaktív anyagokat. (Duduta, Clarke, and Wood 2017)

Felhasznált Irodalom:

- Aktar, Wasim, Dwaipayan Sengupta, and Ashim Chowdhury. 2009. "Impact of Pesticides Use in Agriculture: Their Benefits and Hazards." *Interdisciplinary Toxicology*.
<https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>.
- Bajpai, Pratima, Aradhna Anand, and Pramod K. Bajpai. 2006. "Bleaching with Lignin-Oxidizing Enzymes." *Biotechnology Annual Review* 12 (06): 349–78. [https://doi.org/10.1016/S1387-2656\(06\)12010-4](https://doi.org/10.1016/S1387-2656(06)12010-4).
- Caldwell, Steven R., and Frank M. Raushel. 1991. "Detoxification of Organophosphate Pesticides Using a Nylon Based Immobilized Phosphotriesterase from *Pseudomonas Diminuta*." *Applied Biochemistry and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/BF02922126>.
- Coleman, R. 1990. "Biodegradable Plastics from Potato Waste Double Savings to Environment." *Agricultural Engineering* 71.
- Coppella, Steven J., Neslihan Delacruz, Gregory F. Payne, Burton M. Pogell, Marilyn K. Speedie, Jeffrey S. Karns, Edward M. Sybert, and Michael A. Connor. 1990. "Genetic Engineering Approach to Toxic Waste Management: Case Study for Organophosphate Waste Treatment." *Biotechnology Progress*. <https://doi.org/10.1021/bp00001a012>.
- Crecchio, Carmine, Magda Curci, Maria D.R. Pizzigallo, Patrizia Ricciuti, and Pacifico Ruggiero. 2004. "Effects of Municipal Solid Waste Compost Amendments on Soil Enzyme Activities and Bacterial Genetic Diversity." *Soil Biology and Biochemistry* 36 (10): 1595–1605.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.016>.
- Duduta, Mihai, David R. Clarke, and Robert J. Wood. 2017. "A High Speed Soft Robot Based on Dielectric Elastomer Actuators." *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* 50: 4346–51. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989501>.
- Duff, Sheldon J.B., John W. Moritz, and Kari L. Andersen. 1994. "Simultaneous Hydrolysis and Fermentation of Pulp Mill Primary Clarifier Sludge." *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450720611>.
- Ferrer, Irene, Marcia Dezotti, and Nelson Durán. 1991. "Decolorization of Kraft Effluent by Free and Immobilized Lignin Peroxidases and Horseradish Peroxidase." *Biotechnology Letters*.
<https://doi.org/10.1007/BF01033413>.
- Garg, Satyendra K., and Manikant Tripathi. 2011. "Strategies for Decolorization and Detoxification of Pulp and Paper Mill Effluent." *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8453-1_4.

- Gupta, Neha, Chandrajit Balomajumder, and V. K. Agarwal. 2010. "Enzymatic Mechanism and Biochemistry for Cyanide Degradation: A Review." *Journal of Hazardous Materials* 176 (1–3): 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.038>.
- Karam, Jean, and James A. Nicell. 1997. "Potential Applications of Enzymes in Waste Treatment." *J. Chem. T Ech. Biotechnol.* 69: 141–53. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989501>.
- Mata-Alvarez, J., S. Macé, and P. Labrés. 2000. "Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. An Overview of Research Achievements and Perspectives." *Bioresource Technology* 74 (1): 3–16. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00023-7).
- Milstein, O., A. Haars, A. Majcherczyk, J. Trojanowski, D. Tautz, H. Zanker, and A. Huettermann. 1988. "Removal of Chlorophenols and Chlorolignins from Bleaching Effluent by Combined Chemical and Biological Treatment." *Water Science and Technology*.
- Paper Task Force. 1995. "White Paper No. 5: Environmental Comparison of Bleached Kraft Pulp Manufacturing Technologies." *Time*, no. 5.
- Payne, Gregory F., Wei Qiang Q Sun, and Afshin Sohrabi. 1992. "Tyrosinase Reaction/Chitosan Adsorption for Selectively Removing Phenols from Aqueous Mixtures." *Biotechnology and Bioengineering*. <https://doi.org/10.1002/bit.260400904>.
- Richins, Richard D., Irina Kaneva, Ashok Mulchandani, and Wilfred Chen. 1997. "Biodegradation of Organophosphorus Pesticides by Surface-Expressed Organophosphorus Hydrolase." *Nature Biotechnology*. <https://doi.org/10.1038/nbt1097-984>.
- Smith, Jeffrey M, Gregory F Payne, Janice A Lumpkin, and Jeffrey S Karns. 1991. "Enzyme-Based Strategy For." *Biotechnology and Bioengineering* 39: 741–52.
- Summerfelt, Steven T. 2003. "Ozonation and UV Irradiation - An Introduction and Examples of Current Applications." In *Aquacultural Engineering*. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(02\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00069-9).
- Venugopal, V., M. D. Alur, and D. P. Nerkar. 1989. "Solubilization of Fish Proteins Using Immobilized Microbial Cells." *Biotechnology and Bioengineering* 33.

Kérdések:

1. A tirozináz két egymást követő reakciót katalizál. Mik ezek és milyen reakciótermékek keletkeznek?
2. Miért van szükségük a peroxidázoknak a hidrogén-peroxid jelenlétére?
3. Írja le a proteázok és amilázok 1-1 lehetséges alkalmazását az élelmiszeripari hulladékok kezelésében.
4. Melyek a papíripari hulladékok kezelésében résztvevő legfontosabb enzimek, és milyen reakciót katalizálnak?
5. Milyen nehézségei vannak a foszfát tartalmú iszap víztelenítésének, és milyen enzimes megoldása van?
6. Írja le a nehézfémek eltávolításának enzimes megvalósítását!