

Az antropogén anyagok szerepe a biológiai szennyvíztisztításban

Oláh József* – Palkó György*
*Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.

1. Bevezetés

Az elmúlt 100 évben, a vegyipar nagymértékű fejlődése következtében a szennyvizekben olyan anyagok jelentek meg, amelyek a természetben nem keletkeznek és ezek anyagok általában nagyon nehezen bonthatók (refractory) bizonyos esetekben az eleveniszapos technológiával bonthatatlanak bizonyulnak. Az utóbbi 20 évben a vegyipari tevékenység következtében egyre több ún. természetidegen anyag (xenobiotikus) került a szennyvizekbe. Ezek az anyagok általában az aerob és anaerob biológiai rendszerekre toxikus hatást fejtenek ki és a részleges biológiai lebontást követően a tisztított szennyvizekkel a befogadóba, kerülnek, majd az ivóvíz bázisokat szennyezik, és így közvetlen veszélyt jelentenek az emberre is.

2. Az antropogén anyagok fogalom körének meghatározása

Az antropogén anyagok a természetben nem fordulnak elő így azok biológiai lebontási folyamata lassú és kicsiny hatékonyságú. Az eleveniszapos biológiai rendszernek ezekhez az anyagokhoz adaptálódni kell és ez a folyamat lassú és ennek következtében a lebontási folyamat kisebb határfokú.

Az antropogén anyagok jelentős része rákkeltő hatású, károsan hat az ember reprodukciós képességére, továbbá az immun- és hormon rendszerére.

Az *antropogén* eredetű kémiai anyagok fogalma alatt az embertől származó, az ember által létrehozott anyagokat értjük. Az *antropogén* meghatározás szélesebb fogalmi kört foglal magában. Jelen esetben az *antropogén* kifejezés alatt az ember ipari tevékenysége folytán a szennyvizekbe kerülő toxikus, nehezen bontható, sőt bizonyos esetekben biológiailag bonthatatlan, természet-idegen anyagokat értjük. A kifejezés fogalmi körébe nem soroljuk be a kommunális szennyvizet, mert az nagyrészt természetes szennyező anyagokat (fehérjék, szénhidrátok, zsírok) tartalmaznak. A természetes anyagok összetevőiből is felépülnek bonyolult biológiailag nehezen bontható anyagok (glüko-proteidek, cellulóz és triglicerid származékok stb.), de ezek az anyagok a természetben mindenütt megtalálhatók. Kétségtelen, hogy a kommunális szennyvizekben is megjelennek a modern kémiai ipar termékei (mosószeres, felület aktív anyagok, kozmetikai készítmények, gyógyszer maradványok stb.), de ezek az anyagok összességében a kommunális eredetű szennyvíz természetes jellegét alapvetően nem változtatják meg.

A szerves szintézis ipar vegyületei között egyre több az olyan vegyület, amelyek az élőszervezetek sejtjeire kifejezetten inhibitor, citotoxikus (sejtméreg) és biocid (élőszervezetet károsító) hatásúak.

Az antropogén eredetű anyagok veszélyt jelentenek az ember immun- és hormon rendszerére, reprodukáló képességére és sok esetben rákkeltő hatásúak. Vannak olyan antropogén anyagok (PCB; endoszulfát), amelyek a fentiekben megjelölt mind a négy tulajdonsággal rendelkeznek. A humán veszélyen túlmenően az antropogén anyagok biológiailag nehezen bonthatók, sok esetben az eleveniszapos biológiára toxikus hatást gyakorolnak.

A szakirodalomban a természetidegen anyagokat az *idegen* jelentésű *xeno* görög kifejezés előtagjából képezve *xenobiotikus* (angol: *xenobiotic*) anyagoknak is nevezik. Ismeretes még a biológiailag *bonthatlan* (angol: *non biodegradable*) és a *biológiai lebontásnak ellenálló* (angol: *refractory; persistent; recalcitrant molecules*) anyag megnevezés is. A vegyipari szennyvizekben megjelenő anyagok jellemzésére használják még a *veszélyes* (angol:

hazardous) anyagok megnevezést is. Ez a megnevezés általában a humán-veszély (általános toxikus hatás, rákkeltő, hormon- és immunrendszert károsító) forrásra utal. A fentiekben ismertetett kifejezések bizonyos esetekben talán kifejezőbbek, mert az adott természet idegen anyag csoport fő-tulajdonságát vagy jellegét jobban kiemeli, ezért ezeket a kifejezéseket a szakirodalomban szintén általánosan használják.

Az általunk használt *antropogén* anyagok körébe a fentiekben ismertetett valamennyi kifejezésekkel jellemzett anyag csoport beletartozik a kevésbé toxikus alifás savaktól az igen veszélyes PCB származékokig.

3. Az antropogén anyagok csoportosítása

A 1. táblázatban (Benedek, 1990; Field, 2001) rendszereztük a természetidegen anyagokat és összefoglaltuk a tulajdonságaikat is. Ezen természet idegen anyagokhoz a mikrobiológiai közösségek enzimszere nem adaptálódott ill. a természetes kiválasztódás, mutáció révén új, ilyen anyagok degradációjára specializálódott törzsek nem szaporodtak el.

1. táblázat A vízminőséget különösen veszélyeztető szerves eredetű antropogén vegyületek osztályozása és tulajdonságaik (Benedek, 1990; Field, 2001)

Sorszám	Vegyület megnevezése	Tulajdonság
1.	Fenolok és fenol-származékok (klór-fenol, monoklór-fenol, diklór-fenol, triklór-fenol, tetraklór-fenol, pentaklór-fenol, krezol, rezorcin, katechol)	a, c, d, f, g
2.	Halogénezett aromás szénhidrogének (klór-benzol származékok)	d, e, f, g
3.	Poliklórozott bifenilek (PCB)	c, e, f, g
4.	Poliklórozott dibenzo-dioxinok és dibenzo-furánok (PCDD/F)	c, d, f,
5.	Anionos, kationos és nem-ionos tenzidek	c, d, g
6.	Kőolaj és származékai	c, e, f, g
7.	Policiklikus aromás szénhidrogének (PAH) (naftalinok, antracén, fluoantracén, pirén, benzpirén, krizén stb.)	c, e, f, g
8.	Halogénezett alifás szénhidrogének (diklóretilén, diklórétán, triklórétán, kloroform stb.)	a, d, f, g
9.	Szerves savak (humin, fulvo- és ligninszulfonsav)	b, c, d, g
10.	Növényvédő-szerek: klórozott szénhidrogének, szerves foszforsav észterek, triazinok, DDT és származékai, aldrin, eldrin, összes HCH, triazinok, foszforsav észterek stb.	d, e, f
11.	Aldehidek, fertőtlenítőszeres és ketonok (metil-etil keton)	a, c, d, f, g
12.	Benzol és alkil-benzolok (BTEX) (benzol, toluol, xilol, i-propil benzol, i-propil toluol stb.)	a, c, d, f, g
13.	Merkaptánok, szerves szulfidok	a, c, e, f, g
14.	Amin-vegyületek: dimetil-amin, dimetil formamid	a, c, e, f, g
15.	Nitrilek	e, f, g
16.	Poliakrilamid és származékai	c, e, f, g
17.	Algatevékenységből származó metabolitok	b, f, g
18.	Egyéb vegyületek (piridin, piridin-bázisok glikolok, terahidro-furán stb.)	b, c, f, g

Jelmagyarázat: "a" könnyen illó, levegőztetéssel vízből kihajtható

"b" kicsapattal eltávolítható

"c" adszorpcióra hajlamos

"d" biológiailag nehezen bontható

"e" biocidok

“f” humán toxikológiai veszély

“g” íz és szagrontó anyagok

Az osztályozás ugyan kissé önkényesnek tűnik, de tartalmazza azokat a fontosabb vegyület csoportokat, amelyek a humán toxikológiai szempontból veszélyesek.

A 2. táblázatban a perzisztens (POP) anyagoknak az emberre kifejtett hatásait foglaltuk össze (Field, 2001). Számos anyag egyidejűleg az immun- és hormon rendszert károsítja, sőt még egyidejűleg rákkeltő hatású is lehet. A felsorolt anyagok az emberi környezetre nagy veszélyt jelentenek. Gyakran a tápanyag láncba beépülve jutnak az emberi szervezetbe.

2. táblázat Néhány fontosabb perzisztens (POP) anyag hatásának összefoglalása (Field, 2001)

Megnevezés	Hatások			
	Immunrendszer	Hormonrendszer	Reprodukáló képesség	Rákkeltő
Chlordane	X			X
Klórozott parfinok			X	X
Klórfenolok				X
Klórfenoxi herbicidek				X
DDT	X	X	X	X
DBCP			X	
Dieldrin			X	
Dioxin, TCDD	X		X	X
Endosulfát	X	X	X	X
Hexaklór-benzol	X		X	X
Hexaklór- ciklohexán, lindane			X	X
Metoxiklór		X	X	X
Mirex			X	X
Nonilfenol, nonilfenol-etoxilát	X			
PBB			X	
PCB (poliklórozott bifénilek)	X	X	X	X
Pentaklór-fenol	X		X	X
PAH				X
Vinil-klorid				X

4. Az antropogén anyagok hatása a szennyvizek biológiai tisztításra

A szennyvizek biológiai kezelése több mint fél évszázados múlta visszatekintő technológia, melynek eszközei, módszerei kiérlelték. A jelenlegi rendszerekben azonban a szénvegyületek közül csak az egyszerű szerkezetűek bonthatók, a szerkezetileg bonyolultabb és a halogénnel szubsztituált szénvegyületek lebontása azonban már nem ilyen egyszerű, és távolról sem tekinthető megoldottnak. A természetidegen anyagok kibocsátása a természetbe az iparosodás, urbanizáció és a modern mezőgazdasági módszerek elterjedésével párhuzamosan növekszik. Ezeknek az anyagoknak a mennyisége a szennyvizekben, élővizekben azok üledékében, ill. a talajban egyre nő.

A szennyvíztisztításban gyakran alkalmazott elv az, hogy az eleveniszapos életközösségnek elegendő időt hagyunk egy vegyületcsoporthoz (nehezen bontható, toxikus anyag) való alkalmazkodáshoz, azért, hogy azt előbb-utóbb lebontsa.

Azok a vegyületek, amelyeknél a hidrofil és az illékonyság jellege növekszik (pl. klórozott szénhidrogének, BTEX vegyületek, vinil-klorid) vizes közegben levegőztetés

hatására könnyen eltávolíthatók. Egyúttal ez azt is jelenti, hogy az ilyen jellegű szennyvizek biológiai tisztítása során jelentős „kilevegőztetési” hatással kell számolnunk. A „kilevegőztetés” hatására biológiai lebontás nélkül az illékony vegyületek a levegőbe távoznak. A kisebb illékonyságú hidrofil vegyületek (fenolok) levegőztetés hatására nem távoznak a vizes oldatból és így biológiai lebontásuk biztosítható. A kisebb illékonysággal rendelkező hidrofób anyagok (di-klórbenzolok, PAH) levegőztetés hatására nem távoznak a vizes rendszerből, inkább adszorpcióval kötődnek az eleve szilárd részhez.

Ismeretes, hogy a heterotróf szervezetek az evolúciós folyamatban alkalmazkodtak a természetben előforduló olyan természetes szerves-anyagok hasznosításához, amelyekkel normális ökológiai feltételek között találkozhatnak. Ezek különböző növényi vagy állati eredetű anyagok: szénhidrátok (hexozok, pentozok, cellulóz, pentozánok, lignin, kitin), nitrogén tartalmú anyagok (aminosavak, polipeptidek, szilárd fibrilláris fehérjék, nukleinsavak), lipidek és komponenseik (glicerin, zsírsavak, növényi és állati olajok), továbbá zsírok és zsírszerű anyagok (foszfolipidek, lipoproteidek).

A szerves szintézis útján előállított vegyi anyagot a mikroorganizmusok a talajban, a befogadó élővizekben vagy a szennyvíztisztító berendezésekben lebontják, vagyis a természetben vannak olyan mikroorganizmusok, amelyek képesek adaptálódni ezekhez a vegyületekhez.

A kezdetben azt gondolták, hogy a szintetikus szerves-anyagok legtöbbje semmiféle lebontási folyamatnak nem vethető alá. Később aztán az ilyen „hozzá nem férhető anyagok” listája csökkent, ugyanis a mikroorganizmusokra és azok lebontási reakcióira vonatkozó ismeretek bővültek, s jelenleg az a nézet, hogy valamennyi antropogén anyag mikroorganizmusokkal lebontható. Feltétlenül meg kell jegyezni, hogy a fenti általános megállapítás nem tehet bennünket elbizakodottá, mert ezen anyagok keveréke az eleve szilárd biológiai szinergikus toxikus hatást fejt ki és a lebontási sebesség értékei is kicsinyek. Ezek a problémák a szennyvíztisztítási technológiát sokszor megoldhatatlan feladat elé állítják. Ezek az anyagok általában az aerob és az anaerob biológiai rendszerekre toxikus hatást fejtenek ki és a részleges biológiai lebontást követően a tisztított szennyvizekkel a befogadóba kerülnek, majd az ivóvíz bázisokat szennyezik, és így közvetlen veszélyt jelentenek az emberre is.

Az ipari szennyvizek tisztításánál a mikroorganizmusok sokasága játszik szerepet, amelyek heterotróf bioszintézisre képesek, mert csak szerves vegyületeket képesek lebontani. Lényegesen kisebb számú mikroorganizmus képes alkalmazkodni kőolaj-szénhidrogének és a vegyipari termékek lebontásához. Általánosságban elmondható, hogy a biológiailag bontható szerves-anyagok, ha toxikus hatást fejtenek ki, de a baktérium populáció részben adaptálódik, ezekhez a szubsztrátokhoz. A szerves-anyagok biológiai bonthatóságával kapcsolatban megállapítható:

- nagy molekulású anyagok nehezebben oxidálhatók, mint a kis molekulásúak,
- nagy koncentrációk esetén a biológiai oxidáció lassúbb, mint kisebb koncentrációknál,
- általában a három értékű szénatomokat biológiailag nem vagy nagyon lassan lehet oxidálni,
- az alifás szénhidrogének könnyebben oxidálódnak, mint az aromások,
- a telítetlen komponensek könnyebben oxidálhatók, mint telítettek,
- szubsztituált és addicionált csoportok csökkentik a biológiai oxidáció esélyeit.

Néhány anyagcsoportra vonatkozóan a biológiailag bontható és nehezen /vagy nem-bontható vegyületeket *3. táblázat (Jørgensen, 1979)* tartalmazza. Ez egyben azt is jelenti, hogy a nehezen bontható anyagok jelentős része (éterek, aromások, tri-fenol stb.) erősen toxikus hatást fejt ki a biológiai rendszerre.

3 táblázat Néhány anyagcsoportra vonatkozóan a biológiailag bontható és a nehezen bontható anyagok összefoglalása (Jørgensen, 1979)

Biológiailag bontható szerves-anyagok	Biológiailag nehezen/vagy nem bontható szerves-anyagok
Alifás savak	Éterek
Alifás alkoholok	Etilén klór-hidrin
Alifás első- és másodrendű alkohol	Isoprén
Alifás aldehidek	Butadién
Alifás észterek	Metil-vinil keton
Alkil benzolszulfonát	Naftolok
Aminok	Polimerizált termékek
Mono- és di-klórfenolok	Polipropilén, benzol szulfonát
Glikolok	Aromások: alkil, aril, csoportokkal
Ketonok	Harmadrendű benzol szulfonát
Nitrilek	Tri-, tetra-, és penta-klórfenol származékok
Sztirén	
Fenil acetát	

Az 3. táblázatban a biológiai bonthatóság és a nehezen bonthatóság fogalmak nincsenek számszerűsítve egyszerűen a technológiai tapasztalat alapján történt az osztályozás (Jørgensen 1979).

Viszonylag nagy a kémiai és biológiailag egyaránt nehezen oxidálható szerves vegyületek száma. Ez azt jelenti, hogy ha ilyen vegyületek kerülnek a nyers szennyvízbe, akkor a tisztított szennyvíznek is magas lesz a maradék KOI értéke és ezen anyagok egy része lebontás nélkül, távozik a tisztított szennyvízzel. Természetesen ezek a maradék-anyagok és a bontási termékek egy része természetben lassan bomlik, más része viszont nem. Sajnálatos, hogy a lassú lebomlás már a befogadóban megy végbe. A tisztított szennyvízzel távozó bonthatatlan anyagok sok esetben a befogadót, mint ivóvízbázist is veszélyeztetik.

A lebontási sebesség és a szubsztrát koncentráció elvi összefüggését a 1. ábra (Rüffer *et al.*, 1985) mutatja. Az alábbi alap-eseteket különböztethetjük meg (a felsorolás az ábrán lévő görbék számozásával megegyezik):

1. Kicsiny szubsztrát koncentráció értékeknél nincs gátlás, nagyobb koncentrációnál lehetséges a gátlás. Ez az összefüggés érvényes minden biológiailag jól bontható anyagra.
2. Kicsiny koncentrációnál nincs gátlás. A lebontás egy maximum görbét ír le, ami azt jelenti, hogy koncentráció elérése után a mérgezés olyan mértékűvé válik, mely a további lebontást megakadályozza.
3. A szubsztrát bonthatatlan.
4. Kicsiny koncentrációban indifferens (bonthatatlan) anyag, nagyobb koncentrációban pedig toxikus.

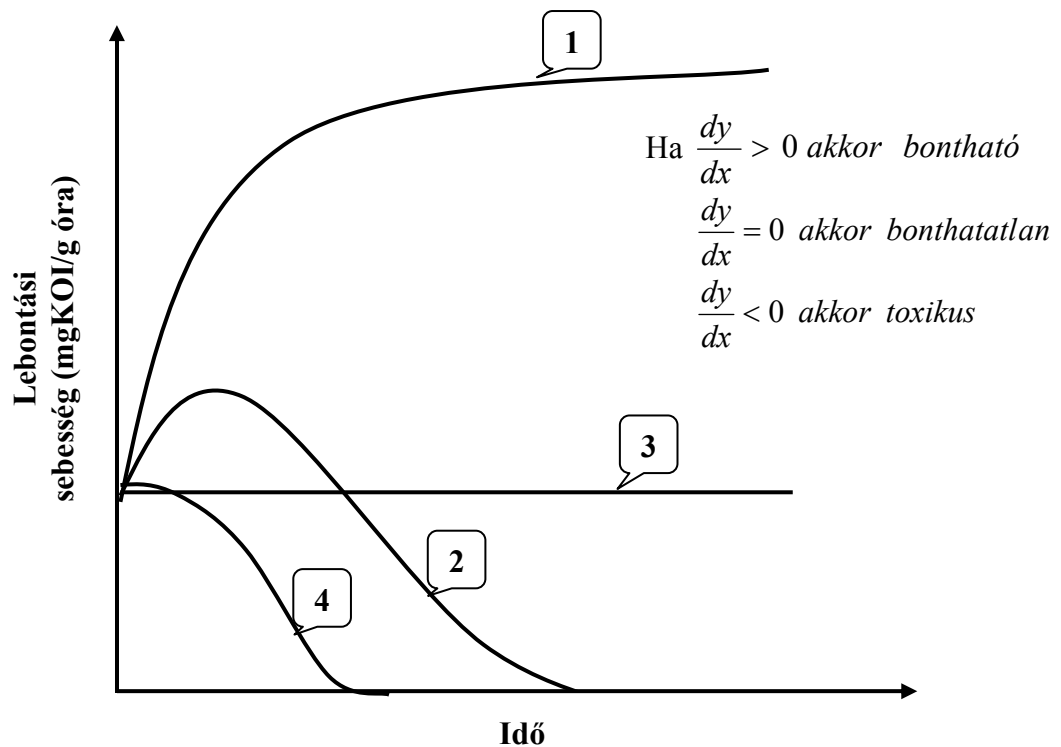
Az antropogén anyagok bonthatóságánál a 2., 3 és a 4. eset fordul elő. Ritkán ezek kombinációja is előfordulhat. Ilyen eset, lehet például az, amikor egy anyag a kezelés megkezdésekor bonthatatlannak bizonyul, majd egy bizonyos kezelési idő után kis sebességgel a baktériumok elkezdik azt bontani.

5. A szerves-eredetű antropogén anyagok biológiai lebontása

Az ipari tevékenység következtében a szennyvizekbe kerülő szintetikus szerves-anyagok (klórozott szénhidrogének, klór-fenolok, nitro-fenolok, növényvédő-szerek, alkil-benzol-szulfonát származékok stb.) mennyiségének növekedésével a jövőben is számolnunk kell.

Ezek a nehezen bontható, toxikus anyagok azonban az esetek zömében biológiailag lebonthatók csak a lebomlási sebességük jóval kisebb, mint pl. a fehérjék vagy a szénhidrátok lebontási sebessége. A szennyvizekben már jelenleg is több mint 55 ezer különböző szintetikus vegyület fordulhat elő. Mindegyik vegyület biodegradációjához meg kellene találni az optimális körülményeket, és a legmegfelelőbb mikroorganizmusokat, de ez a valóságban üzemi körülmények között nem valósítható meg.

Az ipari eredetű szennyvizek tisztításakor a szennyvíz minőségének gyakori változásával kell számolni és ennek következtében az eleveniszap biocönózisában is gyakori változások, következnek be. Természetesen a biocönózis változás a lebontási aktivitás változását is magával vonja.



1.ábra A lebontási sebesség és a szubsztrát koncentráció elvi összefüggése (Rüffer és Verink, 1985)

Pitter (1976) adaptált iszapokkal nagyszámú szerves vegyület (nitro-fenolok, klór-fenolok, alifás- és hidroaromás szénhidrogének stb.) bonthatóságát vizsgálta és megállapította a vizsgált vegyületeknek az 1 g iszapra vonatkoztatott bonthatóságát (mg KOI /g óra).

Az ipari szennyvizek esetében fajta és összetétel szerint hihetetlen nagyszámú variáció létezik, ezért az eleveniszapos rendszerre gyakorolt toxikus hatás nem jellemezhető egyszerű sémával. Toxikus anyagok kedvezőtlen hatása az esetek többségében a biológiai lebontás csökkenésében, vagyis az elfolyó, tisztított szennyvíz minőségének és az eleveniszap ülepedésének nagyfokú romlásában jelentkezik.

A toxikus hatás azonban bekövetkezhet adszorpció (pl. nehézfémek), só-koncentráció-növekedés, pH eltolódás, hőmérsékletingadozás, másodlagos mérgező anyagcsere termékek hatása következtében is. Természetesen ezekben az esetekben is a biológiai lebontás jelentős romlásával kell számolni.

5.1 Az adaptáció szerepe a toxikus anyagok biológiai lebontásában

A xenobiotikus anyagok biokémiai lebontása, azért nehéz, mert az eleveniszapos populáció enzimszere ezen anyagokhoz nem alkalmazkodott ill. a természetes kiválasztódás révén az ilyen új anyagok lebontására a specializálódott törzsek nem szaporodtak el.

Egy új nehezen bontható toxikus anyag bejutása után az eleveniszapos rendszer bizonyos kezdeti idő-késéssel reagál (Fleit, 1988). Ez idő alatt a populáció adaptálódik és szelektálódik az adott vegyület lebontásához. Valamely anyag lebontásának, biológiai oldalról három feltétele van:

- a "megfelelő" mikroorganizmus jelenléte,
- a reakció megvalósítását végző enzim létrejötte,
- olyan környezeti feltételek, melyek az enzimreakció végbemeneteléhez szükségesek (pl. pH, hőmérséklet).

Adaptáció az organizmus, ill. ezek populációjában létrejövő olyan változás, pl. fiziológiai módosulás, amely révén az organizmus alkalmazkodik a megváltozott környezeti feltételekhez. Az adaptáció mechanizmusa két eltérő mechanizmusra vezethető vissza. Az egyik nem genetikustermészetű, tehát az előbb említett fiziológiai mechanizmus a mikroorganizmus meglévő genetikai potenciálján belül hoz létre megváltozott metabolikus tevékenységet (enzimindukció). Az adaptív folyamat létrejöhet viszont-genetikus mechanizmussal is, vagyis mutáció és olyan organizmus szelekció révén, amellyel az új mikrobiális sejt az adott környezeti feltételeknek már megfelel. Ha egy nehezen bontható, toxikus anyag kerül az eleveniszapos reaktorba, akkor annak lebontása több adaptációs folyamat együttes és bonyolult összefüggő eredménye.

E szabályozásnak három szintjét különíthetjük el. A genetikai szabályozást /G/, mely a sejtek örökítő anyagának, a DNS-nek mennyiségi és/vagy minőségi megváltozásával kapcsolatos. Az enzimszintű szabályozást /E/, mely a sejten belüli metabolikus folyamatok változásaiban nyilvánul meg. Végül a külső, környezeti szabályozást /K/, mely a sejt belső és a sejteken kívüli környezet közötti kapcsolatot jelenti és elsősorban ökológiai jellegű.

A kedvező természetű mutációt hordozó sejtek gyorsabban szaporodnak, mint az eredeti sejt tömeg és így átalakul az egész sejt-kultúra. Mesterségesen két irányból lehet előmozdítani az adaptációt:

- a szaporodást elősegítő beavatkozásokkal (megfelelő tápanyag összetétel, ko-szubsztrát biztosítása),
- a genetikai adaptációs folyamat elősegítése. Ez lehet beoltás, in situ mutagnézis (pl. UV sugárzás vagy kémiai mutagén anyag beadagolása) a rendszerbe.

5.1.1 Enzim-szintű adaptáció

Az egyes enzimek szubsztrát specifikusa igen eltérő. Vannak tág és szűk szubsztrát megkötő képességű enzimek. Hogyan lehetséges olyan anyagok lebontása bizonyos enzimek által, mely anyag nem eredeti szubsztrátja az enzimnek?

Kérdésre a válasz: ahogy az idegen anyag közeledik az enzim molekulához, indukálja annak a konformációnak a létrejöttét, melyhez kapcsolódása másodlagos erővel /pl. hidrogén hidakkal/ a legvalószínűbb, így a fehérje konformációk sokaságából mintegy kiválasztódik a legjobban kötő aktív centrum.

Az anropogén anyagokon tenyésztett baktériumtörzseknek a szennyvíztelep bioreaktorába történő adagolása felveti azt a kérdést, hogy a kérdéses törzs mennyi ideig tudja kifejteni a kevert kultúrában hatását? A megfigyelés azt mutatja, hogy a szelekció olyan erős, hogy a kevert kultúrát alkotó sok más baktériumfaj a speciálisan adaptált kultúrát rövid idő (1-3 nap) alatt elnyomja és annak újra adagolása szükségessé válik. Ennek következtében speciális bontó baktériumok adagolása eléggé leszűkül. Hazai gyakorlatban ilyen adaptált készítmények adagolásáról nincs tudomásunk.

5.1.2 A környezeti tényezők és az adaptáció kapcsolata

Az eleveniszapos szennyvíztisztítás baktérium populációjának változásában alapvetően két folyamat játszik szerepet (*Blaim et al., 1984*): az egyik ökológiai populáció-dinamikai jellegű, amelynek hatására a domináns és a kísérő fajokban arányeltolódás következik be, a másik folyamat sejtszintű és a sejten belüli (intracelluláris) átrendeződést eredményez. A baktérium fajokban arány eltolódást okozhat pl. a szennyvíz koncentrációjának, minőségének és az iszapkor értékének a megváltozása. A sejtszintű átrendeződéshez tartozik, pl. a mutáció, a kromoszómák újrendeződése, enzimszintézis átépülése, új enzimek kiválasztása stb.

Toxikus hatást fejtenek ki mindazon anyagok, amelyek koncentrációjuktól függően kisebb nagyobb mértékben mérgezőek a biológiai szennyvíztisztításban működő szervezetek számára. Az esetek jelentős részében az eleveniszapban, azonban jelen vannak olyan szervezetek, amelyek a mérgező anyag lebontásához szükséges enzimekkel potenciálisan rendelkeznek.

Az eleveniszapos szennyvíztisztító telepeken a különböző eredetű szennyvizek tisztítása során a különböző mértékű szerves-anyag terhelés és a terheléshez beállított iszapkor következtében eltérő fizikai-kémiai körülmények alakulnak ki, amelyek közepette a mikroorganizmusok különböző csoportjai fejlődnek ki.

A populáció átalakulásában a szubsztrát változás nagy szerepet játszik, jó példa erre *Blaim et al., (1984)* megfigyelése, amely szerint a kommunális szennyvíz a jó hatásfokú eleveniszapos tisztításánál az *Alcaligenes* és a *Pseudomonas* fajok az összes baktérium számnak 39 és 43 %-át, *Zoogloea* pedig mindössze csak 3 %-át képviselte. A szerves vegyipari eredetű (gazolin, intermedier, növényvédő-szer) szennyvizek hatására a tisztítási hatásfok csökkent és a mérgező anyagoknak jobban ellenálló *Zoogloea* fajok váltak uralkodóvá, hiszen ilyen esetben az összes baktérium szám 41 %-át is elérték, míg az *Alcaligenes* és a *Pseudomonas* fajok csak 10 % és 37 %-ot képviseltek.

A legközismertebb környezeti tényezőkkel, mint a pH, hőmérséklet, oxigén koncentráció, recirkuláció, a makro és mikro tápanyagok hatása, szerepe és jelentősége az üzemeltető szakemberek számára jól ismert.

A külső tényezők közül a lökészerű (tranzien) tápanyag és hidraulikai terhelésváltozások a baktériumok adaptációs folyamatát alapvetően befolyásolják. A folyamatos változó terhelések miatt a biológiai rendszer is állandó adaptációs fázisba kerül, ami természetesen az elfolyó, tisztított szennyvíz minőségére is nagy befolyással van (*Öllös, 1994*).

A tápanyagterhelés hirtelen (200 %) változása, az elfolyó szennyvíznél, csak kismértékű vízminőség romlást eredményez. Ez azt jelenti, hogy a Monod egyenlet által leírt görbe lineáris szakaszán üzemel a telep, tehát a tápanyag eltávolítási sebesség arányos a tápanyag koncentrációjával. A szubsztrát koncentráció növekedését követi a lebontási sebesség növekedése és ez által nem romlik a tisztított szennyvíz minősége. A hidraulikai tranzien folyamat kioltására a levegőztető medencék, csak részben alkalmasak, ezért ha a tápanyag koncentráció- és a hidraulikai terhelésváltozás együtt jár, akkor a szennyvízhozam kiegyenlítése indokolt lehet. A hidraulikai terhelés-változás közvetlenül befolyásolja a levegőztető medencében az iszap koncentrációt, tápanyag/baktérium arányt és az iszapkort. A fenti tényezők hatására változik a populáció összetétele, a kisebb generációs fajok túlsúlyba kerülnek és a nehezebben bontható szerves-anyagok lebontási- hatásfoka csökken.

5. 1. 3 Adaptáció "genetikai" szinten.

Az adaptív és a nem adaptív jelenségek kialakulásában a mutációnak - a sejt gén-apparátusában bekövetkező változásnak - igen fontos a szerepe. A mutációk következtében sok fontos ismérv változik meg, pl. az aminosavak és vitaminok önálló szintetizálási képessége, enzimek képzésére való képesség. A mutáció lehet spontán és indukált mutáció. A spontán mutáció önmagától jön létre. Az indukált mutációk akkor lehetségesek, ha a mikroorganizmusokra fizikai, vagy kémiai mutagén faktorok hatnak. A szintetikus szerves-vegyületek lebontásánál gyakran előfordul, hogy a baktériumkultúránál csak fenotipikus változékonyság következik be. Ezt az enzimszintézis átépülése kíséri, amely a mikrobapopulációnak lehetőséget ad egy új szintetikus vegyület hasznosítására akkor is, ha ez a tulajdonság nem örökletes.

Sok esetben egy új szubsztrát (pl. Cl-fenol) lebontó-képesség kialakuláshoz a baktérium sejt biokémiai apparátusának igen bonyolult átalakulása szükséges, amihez egyetlen mutáció nem elegendő. Ilyen körülmények között a mutációk egész integrált sorozata megy végbe, amely a baktériumok fokozatos alkalmazkodását eredményezi.

A mutáció egyik fontos esetét a kromoszómáik újrendeződését ("crossing over") Stahl (1987) részletesen tárgyalja: ennek eredményeképpen a két kettős láncú DNS-molekula között rekombináció játszódik le, ami azt jelenti, hogy ha a rekombináció helyén kiinduló kromoszómák azonosak is, de a DNS-lánc más része különböző genetikai információt hordoz, így a folyamat a baktérium tulajdonságok (aktivitás, szubsztrát specifikáció változása stb.) új kombinációját hozza létre. A prokariotáknál a kromoszómák újrendeződésén túlmenően nagy szerepe van az extrakromoszómális elemekben (plazmidok, transzpozonok stb.) rejlő variabilitásnak is.

A sejtek biológiai, biokémiai változói mellett meg kell említeni a szakirodalomból ismert néhány fizikai-kémiai módszert (pl. ultrahang, enzimkészítmény adagolása stb.) amelyek hatására a sejt biológiai, biokémiai és fizikai-kémiai tényezői (sejtszám, enzim készlet, tápanyag transzport stb.) és a biológiai aktivitás megváltozik.

Az adaptáció folyamata genetikai szinten az alábbiak szerint mehet végbe:

- A katabolikus plazmidok lehetővé teszik, hogy a bakteriális populáció tartalmazzon olyan replikonokat, amelyek a toxikus anyagok lebontását kódolják, anélkül azonban, hogy ezt a kódot az összes egyedi baktériumnak tartalmaznia kellene. Ha az adott plazmidot tartalmazó populációhányad szelekciós előnyhöz jut azáltal, hogy a plazmidban kódolt enzim segítségével olyan szubsztrátot képes bontani, melyet a populáció zöme nem, úgy a plazmid relatív gyakorisága megnő a populációban és a toxikus anyag lebontása felgyorsul.
- In vivo plazmidálás. Ez esetben a plazmidok átkerülésének az egyik mikrobiális életközösségből a másikba és egyik legfontosabb evolúciós mechanizmus, mely lehetőséget nyújt olyan új törzsek in vivo kifejlődésére, melyek nehezen bontható toxikus eredetű anyagok lebontására is képesek.
- Rekombináns DNS technikák alkalmazása. Az in vivo laboratóriumi klónozási technikák jelenlegi eredményei szerint ígéretes stratégiák lehetnek a széles szubsztrát specifitású (kezdeti lebontási lépést kódoló gén) enzimek fejlesztése, melyek pl. az aromás vegyületek számos csoportját képesek bontani (pl. orto-gyűrű nyitási mechanizmussal).

A xenobiotikus anyagok biológiai lebontásában meghatározó szerepe van a baktériumok plazmid felvételének. A plazmidok kicsiny DNS hurkok, amelyek a baktériumsejtekben szaporodnak és sejtosztódáskor a baktérium genomjához hasonlóan átkerülnek az utódsejtekbe. A plazmidok extrakromoszómális genetikai elemek (DNS hurkok), amelyek a sejt kromoszómájától függetlenül replikációs képességgel rendelkeznek.

Bizonyos körülmények között az egyik baktérium-sejt átadhatja plazmidját a másiknak, s ezzel a "befogadó" (recipiens) sejt egy csapásra egész sor olyan tulajdonságokra tehet szert, amelyeknek "születésekor" még nem volt birtokában. Az így szerzett új tulajdonságok között gyakran szerepel az antibiotikum-rezisztencia, xenobiotikus anyagok lebontó képessége. A plazmid felvétel következtében a baktériumok új sejtjei sokszor képesek antropogén szerves-anyagokat lebontani, és bontási termékeket a sejt energia ciklusába bekapcsolni.

A plazmidok a vírusoknál egyszerűbb szerveződésűek, amelyek csaknem valamennyi baktériumban megtalálhatók. Tulajdonképpen olyan kettős szálú DNS-ből álló, gyűrű alakú molekulák ezek, amelyek a fő kromoszómától függetlenül sokszorozódnak a gazdasejten belül és annak osztódása alkalmával szabályszerűen öröklődnek át az utódokra.

Jelenlétük nem létfontosságú a gazda sejt számára és előfordulhat, hogy a baktérium sorozatos osztódása során egyszerűen elvesznek. A baktériumsejtet érő veszteség pótolhatatlan: új plazmid regenerálására ugyanis nincs mód, viszont egy másik baktériumtól még

“beszerezhető”. A plazmidok a sejt genomjának csupán kis részét alkotják, általában 1 – 3% - át teszik ki. Valamennyi plazmid képes saját másolatának számát szabályozni, ellenőrizni, továbbá a baktérium sejtek közötti konjugáció különböző fajok közötti plazmid kicserélődéshez vezethet. Az ilyen kicserélődés járhat azzal az eredménnyel is, hogy az egyik fajból a vele versengésben álló másik fajba átkerült plazmid ez utóbbiban olyan géneket visz át, amelyek annak (recipiens) életben maradását az átadó (donor) rovására biztosítják. Ez a folyamat tulajdonképpen egy adaptációs folyamatnak tekinthető. Ma már *a plazmid átvitelt tekintik az adaptáció legfontosabb módjának.*

A szennyeződések elhárításában a génmanipulációs eszközök gyors térhódítását - a mindent lebontó "szuperbaktérium" létrehozását – a következő tényezők korlátozzák (Fleit, 1988):

- a lebontási reakciók gyakran sok lépésből állnak, amelyek enzimeit alig ismerjük,
- az újonnan létrehozott organizmus valószínűen sok előnytelen tulajdonsággal rendelkezik (pl. érzékenység a környezet változásaira gyenge túlélő képesség szabadföldi környezetben),
- különféle szennyezőknek, legalábbis lebontásuk kezdetén külön-külön "egyedi" baktériumokat kellene létrehozni,
- számos súlyos aggály merülhet fel a génszerkezeti úton előállított baktériumok környezetbe történő kijuttatásával kapcsolatban.

5.1.4 Adaptációs kísérleti eredmények

Az adaptációra vonatkozóan a szakirodalomban számtalan közlemény található. Következőkben néhány példán szeretnénk érzékeltetni az adaptáció igen bonyolult összefüggéseit.

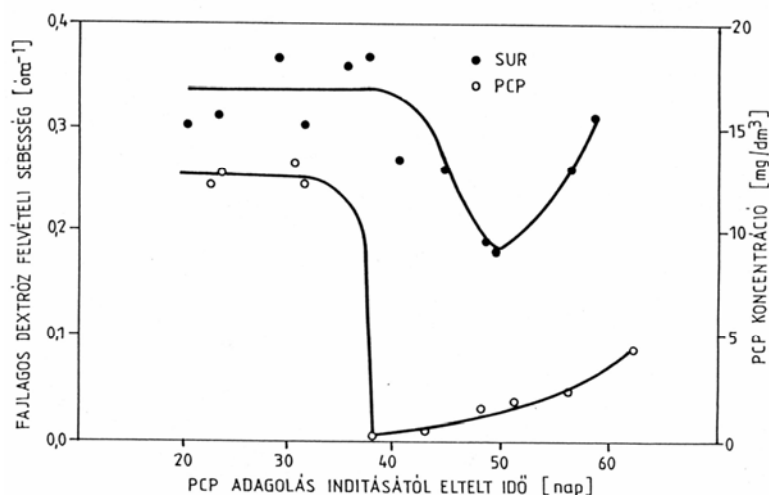
Hickman et al., (1984) a pentaklór-fenolnak (PCP) a dextróz mellett lejátszódó eleveniszapos lebontását tanulmányozták (2. ábra). Az eleveniszapnak a pentaklór-fenolhoz történő adaptációja igen hosszadalmas volt, mintegy 40 napot vett igénybe. A nagy kiindulási dextróz lebontási sebesség (300 mg g⁻¹ óra⁻¹) 38 nap után lecsökkent, mert a baktériumok jó részt a PCP lebontására álltak át.

A 2. ábrából látható, hogy az eleveniszapos biológiára rátáplált (15 mg/L) és az elfolyó pentaklór-fenol (PCP: 13 mg/L) koncentráció az első tíz napon át alig mutat különbséget, majd az adaptáció hatására a 30. napon megkezdődik a lebontás és 38. napon az elfolyó szennyvízben 1 mg/L érték alá csökken a PCP koncentrációja. A PCP adagolást tovább folytatva az 50 nap körül elkezd romlani az elfolyó tisztított szennyvíz minősége, azaz nő az elfolyó vízben a PCP koncentráció. Ez azt jelenti, hogy a PCP rátáplálás hatására túl léptük a kritikus-koncentrációt és a biológia kezd lemérgeződni. Késleltetve ezt a folyamatot követi a dextróz (SUR) lebontási sebességének a lefutása. A dextróz ebben az esetben kiegészítő ko-szubsztrát szerepet töltött be, vagyis a PCP lebontás növekedésével a SUR értéke csökken, mert a baktériumok dextróz helyett részben PCP-t bontanak le. Az elfolyó vízben a PCP koncentrációjának növekedésével (a mérgeződés kezdete) a baktériumok dextróz fogyasztása megnő (SUR), mert PCP helyett a baktériumok újra a dextróz bontására állnak át.

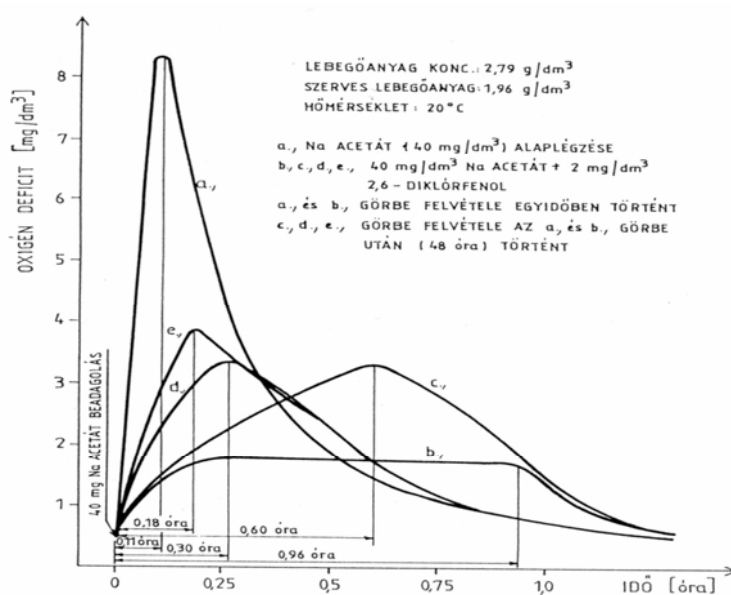
A D - pesti eleveniszapnak a 2,6-diklór-fenolhoz történt adaptációját a 3. ábra (Oláh, 1993) mutatja be. Az iszap szerves hányadának alaplégzését Na-acetát-ra vonatkoztatva az a./ görbe tünteti fel (185 mg/g óra). Ezt követően 12 óránként négy alkalommal a 40 mg/L Na-acetát beadagolással együtt 2 mg/L 2,6-diklór fenolt is beadagoltunk. Az első beadagolás után (b./ görbe) Na-acetát lebontási sebessége erőteljesen romlott (21 mg Na-acetát/g óra). A 2,6-diklór fenol beadagolást folytatva Na-acetát lebontási ideje csökkent (c, d, e, görbék) és közelítette a kiindulási lebontási idő értékét. Tehát az eleveniszapos rendszer a di-klór fenolhoz adaptálódott. Természetesen a kiindulási alaplégzésnél mért lebontási sebességet a többszöri di-klórfenol adagolás után sem érték el (113 mg Na-acetát/g óra), de a biológiai rendszer lebontó képessége jelentősen javult.

A légzőgörbékhez tartozó lebontási idők az adagolás előre haladásával egyre csökkentek, és ez egyértelműen az adaptációnak tulajdonítható.

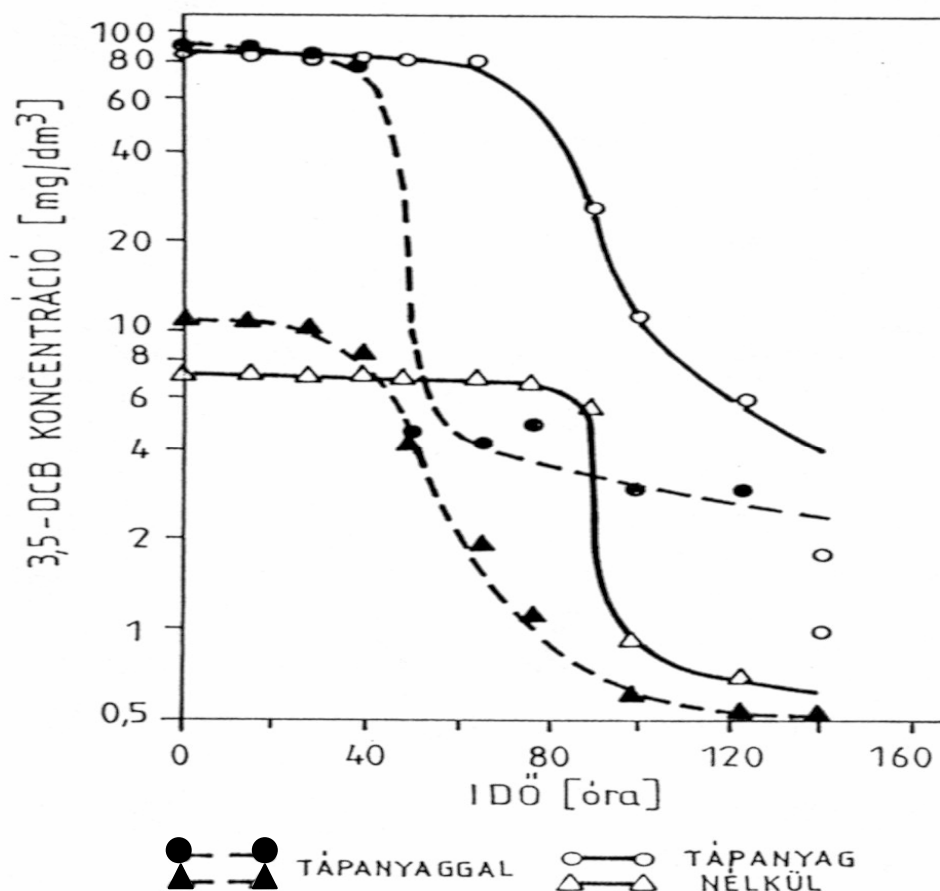
Kim et al., 1986) nyomán az eleveniszap 3,5-diklór-benzoáthoz történő adaptációját az 4. ábra érzékelteti. Az ábra egyértelműen bizonyítja, hogy a külső tápanyagforrás jelenlétében az adaptáció felgyorsul, vagyis nő a lebontási sebesség. Az 5. ábra két különböző kiindulási diklór benzoát koncentrációknál (90 és 8 mg/L) mutatja be a lebontást. A lebontási kísérletet kiegészítő tápanyag jelenlétében („sötét” színű jelek), illetve tápanyag nélkül („világos” színű jelek) végezték. A kiegészítő tápanyag jelenlétében a lebontás hatékonyabbnak bizonyult. Ez a megállapítás teljesen összhangban van a 2,6- diklór-fenolnál tapasztaltakkal (4. ábra).



2. ábra Az eleveniszap pentaklór-fenol (PCP) és a dextróz lebontási sebességének (SUR) alakulása az idő függvényében (folyamatos-kísérlet: Hickman et al., 1984)



3. ábra Na-acetát és a 2,6-diklór-fenol adagolás során felvett oxigén légzőgörbék a D-pesti eleveniszap esetében (Oláh, 1993)



4. ábra A 3,5-diklórbenzoát (3,5-DCB) lebontása szakaszos rendszerben külső tápanyag jelenlétében és nélküle (Kim et al., 1986)

6. A biológiai bontás során várható toxikus hatás becslése

Xu et al., (1998) QSAR (angol neve: Quantitative Structure Activity Relationship) modell segítségével szerves kémiai eredetű anyag keverékeknek a mikroorganizmusokra kifejtett toxikus hatását lehet modellezni. A modell egyszerű anyag keverékektől a több komponensű anyag keverékek által kifejtett 50 %-os toxicitási hatást írja le. A szerzők azt tapasztalták, hogy 6 – 8 – 10 komponensű keverék 50 %-os inhibíciót előidézhethet már az egyes komponensek egyedi IC_{50} koncentrációinak 5 %-a is.

A szerzők a toxicitási vizsgálatokhoz két baktérium kultúrát (Polytox és eleveniszap) használtak fel. A vizsgálatokat 66 kémiai vegyület esetében egyes, kettős, egységes és nem egységes keverék típusok kialakításával végezték el. A kiválasztott 66 vegyület tipikus környezetszennyező anyagoknak (aromások, halogén alifások, alkánok, alkoholok, ketonok és éterek) tekinthetők.

Irodalomjegyzék

- Benedek, P.* (1990): Biotechnológia a környezetvédelemben, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 42 – 48
- Blaim, H. – Seiler, H. – Baumgarten, J.* (1984): Microbial population in an activated sludge treatment plant of a chemical combine. *Z. Wasser – Abwasser – Forschung*, 17, 37 - 41
- Field, J. A.* (2001): Review of scientific literature on microbial dechlorination and chlorination of key chlorinated compounds. Report prepared for EUROCHLOR. Department of Chemical & Environmental Engineering University of Arizona, USA
- Fleit, E.* (1988): Biotechnológiai módszerek a víz- és szennyvíztisztításban. Kézirat. (587), 49-88
- Hickman, G.T. - Novak, J.T.* (1984): Acclimation of activated sludge to pentachlorophenol. *Jour. Water Pollut. Control Fed.* 56, (4), 364-369
- Jørgensen, S.E.* (1979): *Industrial Waste Water Management* Elsevier Scientific Publishing company. Amsterdam-Oxford-New York. 157- 159.
- Kim, C. J. - Maier, W. J.* (1986): Acclimation and biodegradation of chlorinated organic compounds in the presence of alternate substrates. *Jour. Pollut. Control Fed.* 58, (2), 157-164
- Oláh, J.* (1993): Toxikus szerves-vegyipari szennyvizek biológiai tisztítása. In: A biológiai szennyvízkezelés újabb irányzatai. Környezetgazdálkodási Intézet, Környezetvédelmi Tájékoztató Szolgálat. Kézirat. Munkaszám: 196 (587), Budapest, 70 - 145
- Pitter, P.* (1976): Determination of biological degradability of organic Substances. *Water Research*, 10, 231-235
- Rüffer, H. – Verink, J.* (1985): Test zur der biologischen Abbaubarkeit. In: *Lehr- und Handbuch der Abwasser Technik. Band IV.* Verlag von Wilhelm Ernst Sohn, Berlin, 146 - 160
- Stahl, F.W.* (1987): A kromoszómák közötti újrendeződés. *Tudomány a Scientific American magyar kiadása. III. évf. 4.,* 44-56.
- Xu, S. – Nirmalakhandan, N.* (1998): Use of QSAR models in predicting joint effects in multi-component mixtures of organic chemicals. *Water Research*, Vol.32, No.8., 2391 – 2399

Összefoglalás

Az *antropogén* eredetű kémiai anyagok fogalma alatt az embertől származó, az ember által létrehozott anyagokat értjük. Az *antropogén* meghatározás szélesebb fogalmi kört foglal magában. Jelen esetben az *antropogén* kifejezés alatt az ember ipari tevékenysége folytán a szennyvizekbe kerülő toxikus, nehezen bontható, sőt bizonyos esetekben biológiailag bonthatatlan, természet-idegen anyagokat értjük.

Az antropogén eredetű anyagok veszélyt jelentenek az ember immun- és hormon rendszerére, reprodukáló képességére és sok esetben rákkeltő hatásúak.

Biokémiai lebontásuk, azért nehéz, mert a természetben nem fordulnak elő. Ezen természet idegen anyagokhoz a mikrobiológiai közösségek enzimrendszere nem adaptálódott ill. a természetes kiválasztódás, mutáció révén új, ilyen anyagok degradációjára specializálódott törzsek nem szaporodtak el. A humán veszélyen túlmenően az antropogén anyagok biológiailag nehezen bonthatók, sok esetben az eleveniszapos biológiára toxikus hatást gyakorolnak.

A szerves vegyipar egyre több természetidegen (xenobiotikus) vegyületet állít elő, amelyek egy része a gyártás során a szennyvízbe kerül. Egy új nehezen bontható toxikus anyag bejutása után az eleveniszapos rendszer bizonyos kezdeti idő-késéssel reagál. Ez idő alatt a populáció adaptálódik és szelektálódik az adott vegyület bontásához.

Summary

Xenobiotics: organic compounds, produced via chemical synthesis, which *never before existed* in natural environments. Industrial activities introduce a wide variety of xenobiotic aromatic compounds into the biosphere.

Indeed, xenobiotic chemicals may also enter municipal treatment plants either as part of an industrial discharge or as a component of urban run-off or drainage into a sewerage system. Organic compounds that do not easily degrade and are left remaining as potential contaminants are called *refractory compounds*.

Persistent Organic Pollutants (POPs) and Persistent, Bio-accumulative and Toxic (PBT) substances are carbon-based chemicals that resist degradation in the environment and accumulate in the tissues of living organisms, where they can produce undesirable effects on human health or the environment at certain exposure levels.

Since xenobiotics chemicals often enter municipal activated sludge (due to industrial discharge into sewerage system or due to urban run-off) their fate and distribution has to be predicted.

The bacterial degradation and detoxification of xenobiotic compounds requires the production of enzymes that are capable of recognizing and converting compounds which do not occur at significant concentrations in nature.