

A szerves mikroszennyezőkkel kapcsolatos kémiai ismeretek áttekintése

A szennyező anyagok veszélyt jelentenek az élő szervezetekre, valamint az ökoszisztémára. Alapvetően három tényező határozza meg egy szennyező anyag káros hatásának súlyosságát: az anyag koncentrációja, a kémiai tulajdonsága, a környezetben való tartós fennmaradása.

A „mikro” prefixum (előtag) arra utal ezen szennyezőanyag-csoportnak a nevében, hogy csupán $\mu\text{g/l}$ koncentrációban ($1 \mu\text{g/l} = 10^{-6} \text{ g/l}$) kifejezhető mennyiségben vannak jelen a környezetben (például felszíni vizekben, felszín alatti vizekben, talajban), azonban esetenként még a ng/l ($1 \text{ ng/l} = 10^{-9} \text{ g/l}$) koncentrációt sem éri el.

Csoportosítás, elnevezés

Kémiai szempontból a mikroszennyezők alapvetően két csoportba sorolhatók: szervetlen (1), szerves (2) mikroszennyezők. A szervetlen mikroszennyezők lehetnek elemek (például fémhigany), valamint vegyületek (például higanyvegyületek, arzénvegyületek, kadmiumvegyületek). Mivel a szerves anyagok közé a szén vegyületei tartoznak – kivéve a szén-monoxidot, a szén-dioxidot, a szénsavat és sóit (karbonátok, hidrokarbonátok), a kéksavat (HCN) és sóit (cianidok), a ciánsavat (HOCN) és sóit (cianátok), a karbidokat (például CaC_2) –, a szerves mikroszennyezők közé sem sorolható be minden, a környezetben kis mennyiségben megtalálható széntartalmú szennyező anyag. A környezetben kimutatott szerves mikroszennyezők száma lényegesen nagyobb, mint a szervetleneké.

A szerves vegyületek felépítése

A szerves mikroszennyező anyagok vizsgálatához elkerülhetetlen a felépítésükkel és szerkezetükkel kapcsolatos alapfogalmak ismerete. A szerves vegyületekben leggyakrabban előforduló atomokat organogén elemeknek nevezzük, ezek: C, H, O, N, S, P és a halogének (F, Cl, B, I). A szerves vegyületekre általában a szén és az organogén elemek közötti kovalens kötések jellemzőek. Azt a vegyületet, amelyben a szénatomhoz kovalens kötással egy nem organogén elem (például Hg, As, Si, Cd, Sn) kapcsolódik, elemorganikus vegyületnek nevezzük, például ilyenek a fémorganikus vegyületek, de nem soroljuk ide a karbidokat, például CaC_2 [17].

A biogén elemek köre ennél sokkal szélesebb (30 körül van a számuk), ideértjük azon elemeket, amelyek atomjai előfordulhatnak a szerves vegyületekben.

Funkciós csoportok

A szerves vegyületek esetében funkciós csoportnak azt a heteroatomot, illetve heteroatomokat tartalmazó molekularészt nevezzük, amely elsősorban meghatározza az adott vegyület

tulajdonságait (enélkül szénhidrogén lenne és akként is viselkedne). A funkciós csoportoknak jelentős szerepük van a szerves vegyületek elnevezésében.

Az igen sokféle funkciós csoportot legkönnyebben az összetételük alapján csoportosíthatjuk:

- szénhidrogéncsoportok: alkil (például metil, etil), aril (például fenil);
- halogénezett csoportok: halogenid (például klorid, fluorid);
- oxigéntartalmú csoportok: hidroxil, oxo, aldehid, észter, peroxid;
- nitrogéntartalmú csoportok: amid, amin (amely lehet primer, szekunder, terciér), azid, azo, cianát, cianid, nitro, nitrozo;
- kéntartalmú csoportok: tiol, tioéter, diszulfid, szulfonsav, tiocianát (más néven rodanid).

Csoportosítás

A szerves vegyületek kémiai csoportosítása többféle szempont szerint is történhet, a leggyakrabban az összetétel, az alapváz és a funkciós csoport szerinti tagolás közös alkalmazása, amely szerint a fontosabb csoportok:

- szénhidrogének, ezen belül: nyílt láncú szénhidrogének (alkánok, alkének, alkinek), aliciklusos szénhidrogének (cikloalkánok, cikloalkének), aromás szénhidrogének;
- oxigéntartalmú szerves vegyületek, ezen belül: hidroxivegyületek (alkoholok, fenolok), oxovegyületek (aldehidek, ketonok, karbonsavak, észterek), éterek;
- nitrogéntartalmú szerves vegyületek, ezen belül: aminok, amidok, aminosavak;
- halogéntartalmú szerves vegyületek;
- elemorganikus és fémorganikus vegyületek;
- makromolekulás szerves vegyületek, ezen belül: szénhidrátok, lipidek, fehérjék, nukleinsavak, műanyagok.

Elnevezés

A szerves vegyületek elnevezésére gyakran alkalmazzák a köznapi nyelvben is használatos triviális (más néven tradicionális) neveket. Ezek előnye, hogy általában rövidek, viszont nagy hátrányuk, hogy nincsenek kapcsolatban a szerves vegyület szerkezetével, így ezek a nevek nem utalnak a vegyületek funkciós csoportjaira és jellegzetes tulajdonságaikra. Az a célszerű, ha az elnevezés egyértelmű kapcsolatban van a vegyület szerkezetével, ilyenek a szisztematikus nevek. Ezeknél viszonylag könnyen, a névalkotás szabályainak ismeretében levezethető a névből a vegyület szerkezete. A szisztematikus elnevezések latin eredetű tudományos nevek, ezért nemzetközileg is elfogadottak, és a különböző anyanyelvű országokban is érthetők. A szerves kémiai nevezéktanban a szisztematikus elnevezések közül az úgynevezett szubsztitúciós (helyettesítési) neveket használják a leggyakrabban.

Fizikai és kémiai tulajdonságok

Egy vegyület sorsa a környezetben (stabilitása, átalakulása, szállítódása) nagymértékben függ az adott vegyület fizikai (például illékonyság, oldhatóság, megoszlási hányados, adszorpciós képesség) és kémiai tulajdonságaitól (például hidrofíl/hidrofób jelleg, oxidációs állapot, kém-

hatás, stabilitás), valamint a környezet tulajdonságaitól (például a vizek redoxipotenciálja, kémhatása, oldott- és lebegőanyag-tartalma; a talajok szerkezete, szorpciós folyamatai, kémhatása, nedvességtartalma).

Illékonyság

Az illékonyság (volatilitás) a folyékony, illetve szilárd halmazállapotú anyagoknak az elpárolgásra való készségét jelenti, amely az anyagok gőznyomásával függ össze.

A gőznyomás a gázfázis nyomása, amely egy adott hőmérsékleten egyensúlyt tart az anyag szilárd vagy folyékony halmazállapotú fázisa által gyakorolt nyomással. A szilárd és a folyékony anyagok hőmérsékletfüggő gőznyomással rendelkeznek, amit a Clausius–Clapeyron-egyenlet ír le.

A gázkeverékekben minden gáz saját parciális nyomással rendelkezik. Az illékony szerves vegyületek nagy gőznyomással rendelkeznek, szobahőmérsékleten és normál légköri nyomáson könnyen gázfázisba kerülnek. A nagy gőznyomás mellett kis vízdoldhatóság is jellemzi őket.

Az EU-ban használt meghatározás szerint a VOC (*volatile organic compounds*, vagyis illékony szerves vegyületek) közé a 240 °C forráspont alatti komponensek tartoznak, amelyeknek gőznyomása 20 °C-on nagyobb 0,01 kPa-nál. A WHO a VOC-ken belül megkülönbözteti a kifejezetten illékony szerves vegyületeket (VVOC, *very volatile organic compounds*), amelyek forráspontja 100 °C alatti; továbbá közepesen illékony szerves vegyületeknek (SVOC, *semi volatile organic compounds*) tekinti a 260 °C és 380 °C közötti forráspontúakat.

Oldhatóság, gőznyomás, megoszlási hányados

Oldhatóság alatt a telített oldat koncentrációját értjük. Az oldhatóság függ az oldandó anyag és az oldószer anyagi minőségétől, a hőmérséklettől, valamint gáz oldódása esetén a komponens parciális nyomásától. A vízben való oldódás lehet tisztán fizikai folyamat, de bekövetkezhet kémiai reakció is (például elektrolitos disszociáció, sav-bázis reakció).

A gázok tisztán fizikai oldódását folyadékokban abszorpciónak (beoldódásnak) nevezzük, amely korlátolt, a gázok nagy többségénél kismértékű. A gázoknak egy folyadékban való oldhatóságát az oldott és a nem oldott gáz közötti egyensúly határozza meg, Henry törvénye szerint.

A gázok oldhatósága csökken a hőmérséklet emelésével, vagyis kellően magas hőmérsékleten a gáz a folyadékból kiűzhető. Különböző anyagok (például szervesetlen sók) harmadik komponensként az oldathoz adva a vízben oldott gázokra kisőző hatást gyakorolnak, vagyis csökkentik a gáznak a vízben való oldódását.

Folyadékok egymásban való oldhatósága a folyadékok anyagi minőségétől és a hőmérséklettől függ. Vannak egymásban gyakorlatilag korlátlan mértékben oldódó folyadékok (például etanol és víz, benzol és toluol), és vannak egymásban egyáltalán nem oldódók (például éter és víz). A folyadékok kölcsönös oldhatósága egymásban annál nagyobb, minél hasonlóbb a szerkezetük (hasonló a hasonlóban elv), vagyis a poláros anyagok poláros oldószerben (például víz), az apoláros anyagok apoláros oldószerben (például éter, olaj, szén-tetraklorid) oldódnak jól. Egy vegyület oldószerkedvelő karakterét liofilnak, az oldószergyűlölőt liofóbnek nevezzük. Ha az oldószer a víz, akkor a hidrophil és hidrofób, ha az oldószer egy apoláros szerves anyag (például zsír, olaj, éter, benzol), akkor a lipofil és lipofób kifejezéseket használjuk. A szerves

mikroszennyezők esetében nagy jelentősége van a vízőldékony (hidrofil), illetve a zsíróldékony (lipofil) jellegnek. A lipofil karakter jellemzésére az oktanol-víz megoszlási hányadost (K_{ov}) használjuk, amely az oktanolos fázisban (hidrofób) mért koncentráció, és a vizes fázisban (hidrofil) mért koncentráció hányadosa. Így minél nagyobb a K_{ov} , annál zsíróldékonyabb (illetve annál kevésbé vízőldékony) a vegyület. A gyakorlatban a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében az oktanol-víz megoszlási hányados logaritmusát alkalmazzák ($\log K_{ov}$).

A szilárd anyagok oldhatósága folyadékokban szinte mindig korlátozott, és nagymértékben függ az oldószer és oldandó anyag minőségétől. Állandó hőmérsékleten és nyomáson a telített oldat koncentrációja adott oldószerben állandó érték, független a szilárd anyag mennyiségétől és fizikai állapotától. A szilárd anyag mennyisége és szemcsemérete az oldandó anyag és az oldószer érintkezési határfelületét, így az oldódás sebességét határozza meg. A szilárd anyagok oldhatósága függ a hőmérséklettől: endoterm oldáshőjű anyagok esetében ($Q_o > 0$, vagyis amikor az oldódás során az oldat lehűl) a melegítés növeli az oldhatóságot, exoterm oldáshőjű anyagok esetében ($Q_o < 0$, vagyis amikor az oldódás során az oldat felmelegszik) a hűtés növeli az oldhatóságot.

Adszorpció képesség

Az adszorpció (felületi megkötődés) a gázok vagy folyadékok szilárd felületen való megkötődését jelenti. Az adszorpció lehet tisztán fizikai megkötődés, de a szilárd felület (adszorbens) és a megkötődő anyag (adszorptívum) között kémiai reakció is létrejöhet, ez esetben kemisorpcióról beszélünk. Az adszorpció mértéke az adszorbens fizikai és kémiai tulajdonságaitól (például fajlagos felület, felületi funkciók csoportok száma és jellege), valamint az adszorptívum sajátosságaitól függ (például funkciók csoportok száma és jellege, vízőldékonyság). Az adszorbent az adszorpciós kapacitással, az adszorptívumot az adszorpciós hajlammal jellemezhetjük. A deszorpció az adszorpcióval ellentétes irányú folyamat. A fizikai adszorpció egyik jellegzetes sajátossága a megfordíthatóság, ilyenkor az adszorpció és a deszorpció egymás mellett, ellentétes irányban játszódik le, és egyensúlyra vezet.

Sav-bázis tulajdonság, kémhatás, pH

Az egyes anyagok savas vagy bázisos jellege nemcsak a kémiai felépítésüktől függ (például szerves vegyületek esetében a savas vagy bázikus funkciók csoportoktól), hanem a kémiai rendszerben jelen lévő másik anyag sajátosságaitól is. Brønsted protolitikus elmélete szerint savak azok a vegyületek, amelyek proton (H^+ -ion) leadására képesek. Brønsted–Lowry elmélete szerint a protont felvenni képes vegyületek a bázisok. Hétköznapi értelemben azokat a vegyületeket nevezzük savnak, amelyek a vízmolekuláknak H^+ -iont adnak át, ezáltal a vizes oldat kémhatását savasabbá teszik (csökkentik a pH-t); a bázisok a vízben oldódva hidroxidiont (OH^- -iont) produkálnak, ezáltal a vizes oldat kémhatását lúgosabbá teszik (növelik a pH-t).

A kémhatás a vizes oldatok esetében definiált fogalom, amely az oldatban lévő oxóniumionok (H_3O^+ -ionok, tulajdonképpen a protonált vízmolekulák) és hidroxidionok arányától függ. A kémhatás egyszerűbb kifejezésére vezették be a pH (hidrogénion-kitevő, hidrogénion-exponens) fogalmát, amely az oldat oxóniumion-koncentrációjának tízes alapú negatív logaritmus:

$$pH = -\lg[H_3O^+].$$

A savakat és bázisokat osztályozhatjuk viszonylagos erősségük alapján, amelyet a vizes oldatban bekövetkező disszociációjuk egyensúlyi állandójából (K , disszociációs állandó) származtatunk (pK , disszociációs exponens). Minél erősebb egy sav vagy bázis, annál nagyobb a disszociációjának mértéke, vagyis annál nagyobb a K és annál kisebb a pK (savak esetén pK_a , bázisoknál a pK_b jelölést használjuk).

Oxidációs állapot, redoxipotenciál, potenciál-pH diagram

Az atomok oxidációs állapotának a leírására vegyületeikben előjeles egész számokat rendelünk azokhoz az elektronegativitás és néhány alapszabály alapján. Ezek az oxidációs számok. Ha változik az oxidációs szám, akkor az oxidációt (elektronleadás miatti oxidációsszám-növekedést) vagy redukciót (elektronfelvétel miatti oxidációsszám-csökkenést) jelez. A szerves vegyületeknél az oxidációs számot általában nem alkalmazzuk, jelentősége a szervetlen vegyületeknél és a fémeket tartalmazó szerves vegyületeknél (például fémorganikus mikroszennyezők) van, mivel a különböző oxidációs számú fémeket tartalmazó vegyületek gyakran eltérő toxicitással rendelkeznek.

Stabilitás, reakciókészség

A talajban, a természetes vizekben, a szennyvizekben, illetve a biológiai rendszerekben az egyes vegyületek stabilitását, reakciókészségét, mobilitását, biológiai hozzáférhetőségét a redoxi- és a pH-viszonyok jelentősen befolyásolják. A különféle elemekre elkészített potenciál-pH diagramok (más néven Pourbaix-diagramok) a vizes elektrokémiai rendszer lehetséges stabil, egyensúlyi fázisait ábrázolják. Alkalmasak arra, hogy a rendszerben mért pH és redoxipotenciál értékpár alapján meghatározzuk a diagramon azt a pontot, amely az adott rendszerre jellemző, hogy ismeretében eldönthessük, hogy mely vegyületforma az előforduló. Azonban például a szerves arzénvegyületeket egyetlen ilyen diagramon sem találhatjuk meg. Ennek oka abban keresendő, hogy a szerves vegyületek stabilitása a környezet redoxipotenciálján és kémhatásán túl számos egyéb tényezőtől is függ [18]. Így abiotikus környezetben a molekulaszervezettől és a funkciós csoportoktól, amihez biotikus környezetben társulnak a lebontásra, illetve átalakításra irányuló mikrobiológiai/biokémiai folyamatok.

Abiotikus környezetben a szerves vegyületek esetében a kémiai reaktivitás (reakciókészség) és az egyensúlyi helyzet (stabilitás) elsősorban a kémiai szerkezet függvénye. A telített szénhidrogének (alkánok, cikloalkánok) gyenge reakciókészségűek, aminek oka a C-C és C-H kötések egyenletes elektroneloszlása, a molekulák apoláros karaktere. A telítetlenség (többszörös kötések megléte), illetve a hidrogéneket helyettesítő heteroatomok megjelenése megváltoztatja a kötések és a molekula polaritását, ezáltal a vegyületek reakcióképességét. Vagyis a szerves vegyületek kémiai reaktivitása a funkciós csoportokhoz kapcsolódik (ezt fejezi ki a kémiai reaktivitás szubsztituens elmélete).

Szín

A szerves vegyületek színe a molekula szerkezetével van összefüggésben. A színes vegyületek tartalmaznak bizonyos atomcsoportokat, amelyek könnyen gerjeszthetők (a látható fény hullám-tartományán belül fényelnyelést produkálnak) és így a színesség tulajdonképpeni előidézői. Ezeket nevezzük kromofór atomcsoportnak. Lehetnek aromás gyűrűk vagy kettős kötés konjugációját (egyszeres és kettős kötések váltakozását) tartalmazó szénláncok, amelyekben heteroatom is van például azo-, nitrozo-, nitro-, szulfonsav-, karbonil-, cianid-csoportok formájában. Az auxokróm csoportok fényelnyelést nem produkálnak, de a kromofór csoportok fényelnyelését befolyásolják induktív, mezomer vagy sztérikus hatásukkal, például hidroxil-, amino-, halogenidcsoport [19].

Kémiai folyamatok

A mikroszennyezők környezetben való megoszlása elsősorban az őket érintő átalakulási és transzportfolyamatoktól függ. A transzportfolyamatokat az adott közegben uralkodó törvényszerűségek határozzák meg.

A különböző közegek közötti anyagátmenetek esetén a megoszlási folyamatok a befolyásolók (például párolgás/kondenzáció, oldódás/kristályosodás, megoszlás a folyadékfázisok között, határfelületi jelenségek). A környezetben lévő anyagok kémiai, fotokémiai, biokémiai folyamatokkal, illetve ezek kombinációjával alakulnak át. A fő kémiai reakciók: protonátmenettel járó reakciók (közömbösítés, hidrolízis), elektronátmenettel járó reakciók (redukció, oxidáció), helyettesítés, csapadékképzés, komplexképzés, amelyek közül a szerves mikroszennyezők esetében a redoxireakciók és a hidrolízis a döntő jelentőségű [20].

Fotokémiai reakciók

A fotokémiai reakciók közé azon folyamatok tartoznak, amelyeket gerjesztett elektronállapotú kémiai részecskék (atomok, ionok, molekulák) indítanak el. A fotokémiai reakciók jellegzetes, igen reaktív köztitermékei a gyökök (például az illékony szerves vegyületekből képződő peroxilgyökök: $\text{RO}_2\cdot$, ahol R egy tetszőleges hosszúságú szénláncot, $\cdot$ a gyök jelleget jelöli), amelyek általában láncreakciót váltanak ki, és reakciókra való erőteljes hajlamuk miatt az egészségre rendszerint károsak.

Redoxireakciók

A szerves vegyületek oxidációja a szénatom oxigénatommal való kötéseinek számának növekedését, míg redukciója a kötések számának csökkenését jelenti. A szerves mikroszennyező anyagok körében jelentős redoxifolyamat például a redukzív dehalogéneződés (például hexaklór-benzol, DDT esetében), amely a halogénatom kicserélődésével járó, a redoxipotenciáltól nagymértékben függő redukció.

Hidrolízis

A hidrolízis a közömbösítés fordítottja, a kémiai kötések vízmolekulák hatására bekövetkező felszakadását jelenti. A szerves mikroszennyezők közül a karbonsav-, illetve foszforsav-észterek és a szerves halogénvegyületek esetében jelentős folyamat. A tiofoszfátok (amelyek általános képlete $[RO]_3-PS$; például a paration nevű peszticid) és a foszforsavamidok nehezen hidrolizálnak (például a Scharadan néven forgalomba kerülő peszticid hatóanyaga a difoszforsav-dimetilamid). Számos inszekticidként használt alifás klórozott szénhidrogén viszonylag könnyen hidrolizál (például klór-propán), a C–Cl kötés polaritásából kifolyólag semleges vagy lúgos közegben, de az aromás származékok (például klórbenzol, klórfenol, [PCB](#), [PCDD](#)) abiotikus hidrolízise gyakorlatilag nem megy végbe. Ennek oka a klóratom és az aromás elektrongyűrű között kialakuló mezomer effektus. A többszörösen klórozott alifás szénhidrogének (például triklórmetán) a hidrolízissel szemben sokkal ellenállóbbak, mint a monoklórozott alkánok (például klórmetán), aminek oka több nagy méretű klóratom szférikus hatása.

Biokémiai reakciók

Az élő szervezetekben lejátszódó kémiai reakciókat biokémiai folyamatoknak nevezzük. Ez a megkülönböztetés azért fontos, mert az élő szervezetekben lejátszódó biokémiai reakciók mechanizmusa, kinetikája és energetikai viszonyai a biokatalizátoroknak (enzimeknek) köszönhetően jelentősen eltérhet az abiotikus kémiai rendszerekben végbemenőktől. A környezetben található anyagok a mikroorganizmusok tevékenységének hatására három úton alakulhatnak át: bioszintézissel (felépítés), biodegradációval (lebontás), biotranszformációval (átalakítás).

Az enzimek biokatalizátorok, amelyek lehetővé teszik, illetve felgyorsítják a biokémiai folyamatokat. Az enzimműködés lényege, hogy a szubsztrátum egy enzimszubsztrátum-komplexeen keresztül terméké alakul át, az enzim a reakció végén változatlanul marad vissza. A szubsztrátum a funkciós csoportjai segítségével az enzim aktív centrumában kötődik meg, amelynek közvetlen közelében koenzimek (hatáspecifikus segédanyagként vesznek részt a reakcióban, a szubsztrátumhoz kötődnek, átalakulnak, majd leválnak) és proszretikus csoportok találhatók (olyan koenzimek, amelyek erősen kötődnek az enzimhez, nem alakulnak át, és nem válnak le). Azonban a megfelelő funkciós csoportok hiányában, illetve kedvezőtlen méretű szubsztrátummolekula esetében a kölcsönhatás az aktív centrummal nem jöhet létre, így az átalakulásra sincs lehetőség.

A természetben előforduló szerves vegyületeket a mikroorganizmusok metabolizálni tudják, azonban az antropogén eredetű szerves mikroszennyezők esetében már más a helyzet. A szerves mikroszennyezők jelentős része xenobiotikum. A xenobiotikumok lebontására nem alakult ki a természetben mikrobiológiai metabolikus út, és a természetes szerves vegyületek degradációjára alkalmas utak esetükben nem mennek végbe. Ennek szerves anyagok esetében elsődleges oka az, hogy ezek a vegyületek a biodegradációnak ellenálló xenofór csoportokat tartalmaznak (például klorid-, bromid-, nitrit-, szulfonsav-, cianidcsoport). Egyes funkciós csoportok (például metil-, amino-, hidroxilcsoportok) az egyik molekulán xenofórként viselkednek, míg a másikon az elhelyezkedésük miatt elősegítik a lebontást.

Perzisztenciának nevezzük a mikrobiális lebontással szembeni ellenálló képességet. Minél perzisztensebb egy vegyület, annál nagyobb annak a veszélye, hogy a környezeti elemekben felhalmozódik, és bekerül az élő szervezetekbe. A nehezen lebomló, környezetben tartósan

megmaradó vagy perzisztens szerves szennyezők (POP, *persistent organic pollutants*) a környezeti körülmények között igen nagy fizikai és kémiai stabilitással rendelkeznek.

Fejezetzáró kérdések

1. Mi a jelentése: funkciós csoport, kromofór csoport, prosztetikus csoport, xenofór csoport?
2. Kémiai szempontból hogyan csoportosíthatjuk a szerves mikroszennyezőket?
3. Milyen tulajdonságok befolyásolják elsősorban egy szerves mikroszennyező esetében: a vízben való oldhatóságot, a mikrobiológiai lebonthatóságot, a színt, a reaktivitást, a bioakkumulációs képességet?
4. Mi a lényege az alábbi kémiai folyamatoknak: oxidáció, redukció, hidrolízis?
5. Mi az alapvető különbség a kémiai, fotokémiai és biokémiai folyamatok között?