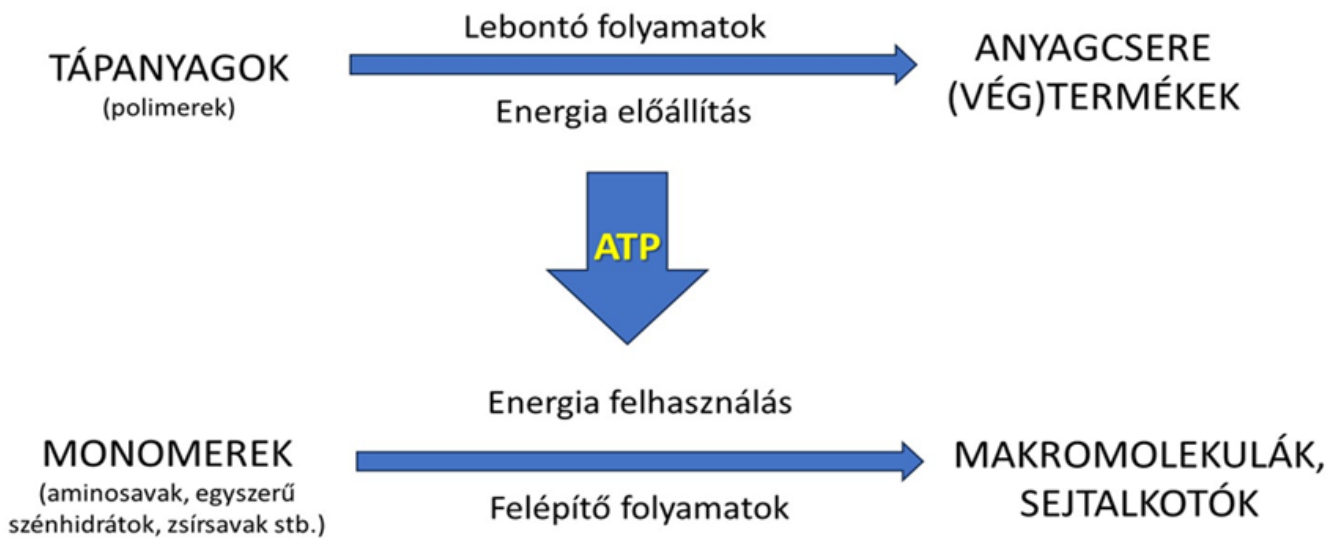
6.6. Biológiai lebontás, a mikroorganizmusok kiemelkedő szerepe a lebontási folyamatokban

Környezetünk szerves és szervetlen anyagainak biológiai bontása, átalakítása – történjék akárhány lépésben is – utolsó lépéseiben mindig sejtes és molekuláris szinten történik.

A különböző anyagok lebontási sémáját a sejtek szintjén az 19. ábra szemlélteti. A cél, hogy a különböző tápanyagokból (szénhidrátok, zsírok, fehérjék) a lebontó folyamatok (katabolizmus) során energia keletkezzék, amely energiát a felépítő folyamatok (anabolizmus) a makromolekulák és sejtalkotók felépítésére fordíthatnak.



19. ábra. Biológiai lebontás a sejtek szintjén

A környezetben számos anyag lebontása mikroorganizmusok által történik (pro- és eukarióta szervezetek: baktériumok, gombák stb.). Az állati szervezetek sokszor az anyagok fizikai aprítását végzik el (pl. növényi levelek megrágása termeszek által), bár bizonyos emésztő enzimeikkel képesek zsírok, fehérjék stb. lebontására. A növényi cellulóz és lignin lebontására az állatok nem/ritkán képesek. A nagyméretű polimerek lebontása a környezetben általában extracelluláris enzimekkel kezdődik (cellulázok, lipázok, egyéb hidrolázok stb.), hiszen ezek a molekulák túl nagyok ahhoz, hogy a sejtek egyszerűen felvegyék őket.

PÉLDA:

Ez történik pl. a komposztálás során is (44. kép). A komposztálás egy biológiai folyamat, melynek során pl. a növényi hulladékok, melléktermékek szerves anyagait élő szervezetek humusz-szerű termékké alakítják át. A mezőgazdaságban, különösen a kertészetekben régóta ismert és alkalmazott módszer. Komposztnak nevezzük azt a morzsalékos, sötétbarna színű, földszerű, magas szerves anyag tartalmú anyagot, amely szerves hulladékokból, maradványokból elsősorban mikroorganizmusok tevékenységének hatására jön létre, megfelelő környezeti tényezők mellett (oxigén, nedvességtartalom).

A cellulóz és a lignin (növényi sejtfal fő alkotói) nehezen bontható szubsztrátok, annak ellenére, hogy a Földön a leggyakoribb szerves anyagokhoz tartoznak. A cellulóz lebontása két fő szakaszban zajlik: fizikai aprítás és (bio)kémiai bontás. A két szakasz gyakran átfed (pl. kérődző állatok bendőjében, földigiliszta bélcsatornájában stb.), aerob és anaerob környezetben egyaránt megvalósulhat. A cellulóz lebontását a celluláz enzimek végzik: ez egy enzim csoport, az egyes enzimek a lebontás más-más lépését katalizálják. A teljes degradációhoz ezek kooperatív működése szükséges. A lignin alapstruktúrájában a propanofenol játszik fontos szerepet, nem specifikus enzimek szintetizálják, hanem fenolprekurzorok, reaktív szabadgyökök közvetítésével végbemenő polikondenzáció eredménye, sok multidimenzionális kötést tartalmaz. A lignin a cellulóz vázba épül a növényi sejtfal anyagába és a hemicellulózzal együtt képződik, tehát nem megfelelő bomlásakor káros anyagok is képződhetnek.

44. kép. Kerti fa komposztáló (Fotó: Tóth Erika).

A komposztálás során pl. ezen nehezen bontható szubsztrátok is átalakulnak. Komposztálás folyamata során fontos a megfelelő szén/nitrogén arányt megtartani, illetve megfelelő nedvesség tartalmat biztosítani.

A komposztálás kezdeti szakaszában a bomlás intenzív hőtermeléssel is jár, ezért nem kell megijedni,

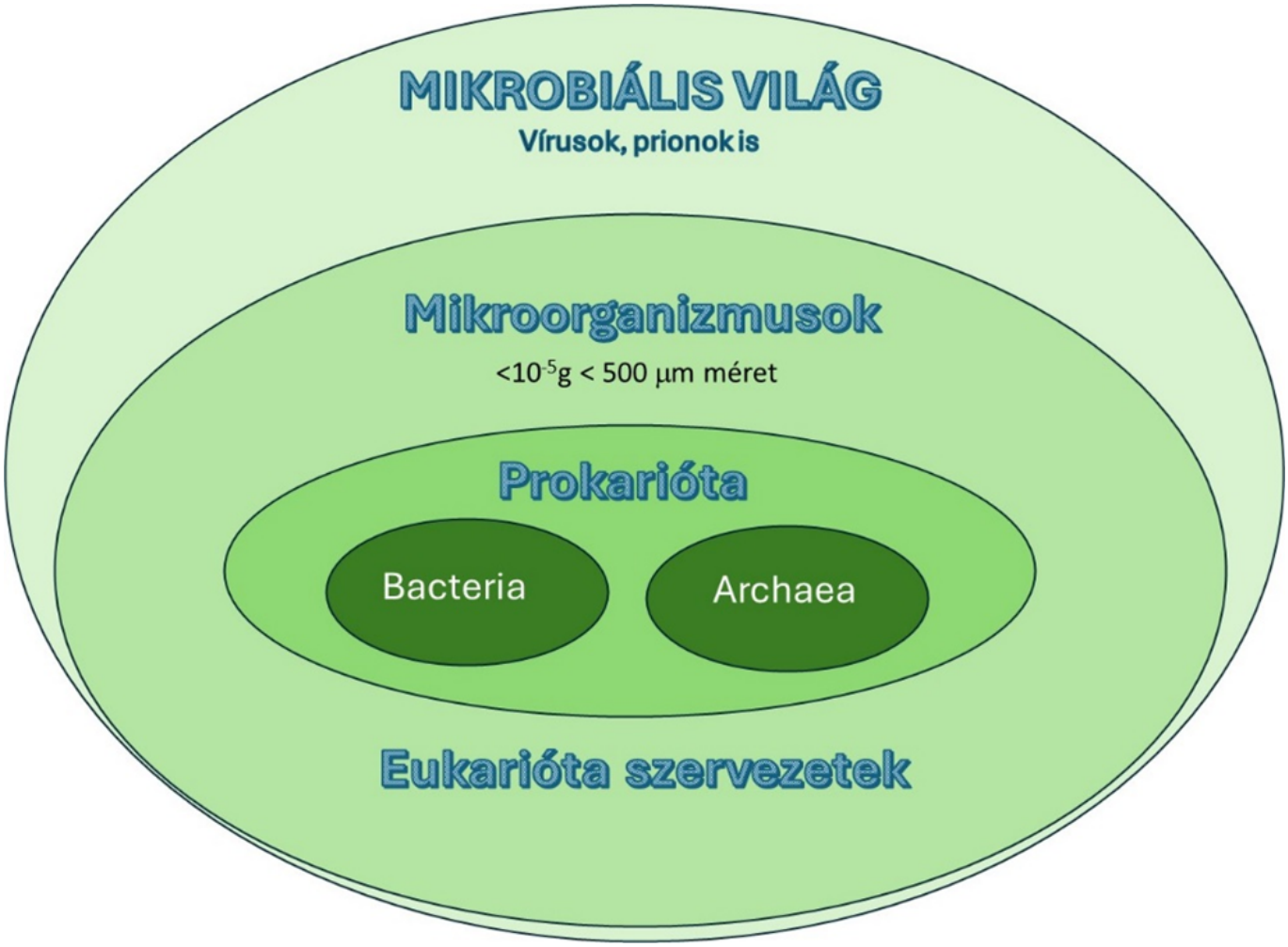
hogy a komposztunk felmelegszik – ráadásul a megemelkedett hőmérsékleten (60-70° C) a kórokozók is többnyire elpusztulnak. Ebben az első fázisban a fehérjék, egyszerű cukrok, keményítő bomlása történik meg. Ezt követi a hőmérséklet csökkenése után, a nehezen bomló cellulóz és kissé a lignin bontása is. Az érési fázisban a hőmérséklet tovább csökken, pl. giliszták kezdik az anyagot lazítani, keverni, és a humuszképződés tulajdonképpen befejeződik.

FIGYELEM! Mi NEM kerülhet a komposztálandó anyagok közé?

- olaj és zsírmaradék, állati eredetű hulladékok (pl. hús, csont – fertőzésveszély!)
- szintetikus anyagok
- festék, lakk, egyéb mérgező anyag
- beteg (fertőzött) növények, növénydarabok
- húsevő állatoktól származó alom
- magas nehézfémtartalmú növények (pl. nagy forgalmú utak szegélyéről)

FONTOS: A komposztálandó anyagokat pár hetente érdemes forgatni (aerob körülmények között gyorsabb a lebomlás, a rothadási folyamatok is kevésbé indulnak be).

Közben tekintsük át, „kik” is azok a mikroorganizmusok (20. ábra), milyen anyagcsere folyamatokkal vesznek részt a Föld életében és miért is nélkülözhetetlenek a környezet egészsége számára.



20. ábra. A mikrobák világa

A mikroorganizmusok világát, a szabad szemmel láthatatlan, vagy alig látható szervezetek alkotják. Közöttük is a legkisebbek – az önálló életre képtelen – fehérje szerkezetű prionok, a 20-400 nm nagyságú – és kizárólag gazdaszervezetben szaporodni képes – nukleinsavakból (DNS-ből vagy RNS-ből) és fehérjékből álló vírusok, valamint a már mikrométeres nagyságrendet elérő, önálló életre képes prokarióta szervezetek.

Méretüket tekintve ide sorolhatunk még több eukarióta felépítésű, de mikroszkópikus méretű gombát, algát és egysejtű szervezetet is.

A bioszféra működését tekintve a prokarióták különös szereppel bírnak: szinte mindenütt ott vannak és kis méretüknek köszönhetően, akár a szelek szárnyán, akár vízzel vagy a legkülönbözőbb vektorokkal mindenhova eljutnak és eljuthatnak. Ezen szervezetek mozgatják Földünk nagy biogeokémiai (elemkörforgalmi) ciklusait. Nagy biokémiai és élettani aktivitásuknak köszönhetően pedig, akár kis ad hoc közösségekbe szerveződve is a lehető leggyorsabban elkezdik az anyagok bontását, átalakítását.

A prokarióta szervezetek – fosszilis maradványok bizonysága szerint – már több mint 3,5 milliárd évvel ezelőtt megjelentek (ld. még élet kialakulása a Földön c. fejezet). Ők voltak Földünk úttörő szervezetei, s mintegy másfél milliárd éven át a kizárólagos benépesítői is. Ez idő alatt az adott környezeti viszonyoknak, a rendelkezésükre álló anyag és energiaforrásoknak megfelelően, anyagcsere folyamataik differenciálódása és káprázatos sokféleségének kialakulása is megtörténhetett. Ennek a hosszú folyamatnak az egymásra épülő lépései során bizonyos tápanyag források kimerülhettek, miközben más anyagcsere termékek feldúsulhattak, és ezzel újabb anyagcsere folyamatok felé utat nyitottak.

Az energiaforrások kihasználása is egyre hatékonyabbá vált. Az eredendően anoxikus környezetet a mai oxidatív légkör váltotta fel, amelyben az oxigéntermelő cianobaktériumoknak is jelentős szerep jutott. Ezt követte újabb és energetikailag jóval hatékonyabb anyagcsere utak létrejötte, s ezzel a földi élet robbanásszerűen felgyorsuló evolúciós folyamatainak az alapja lett.

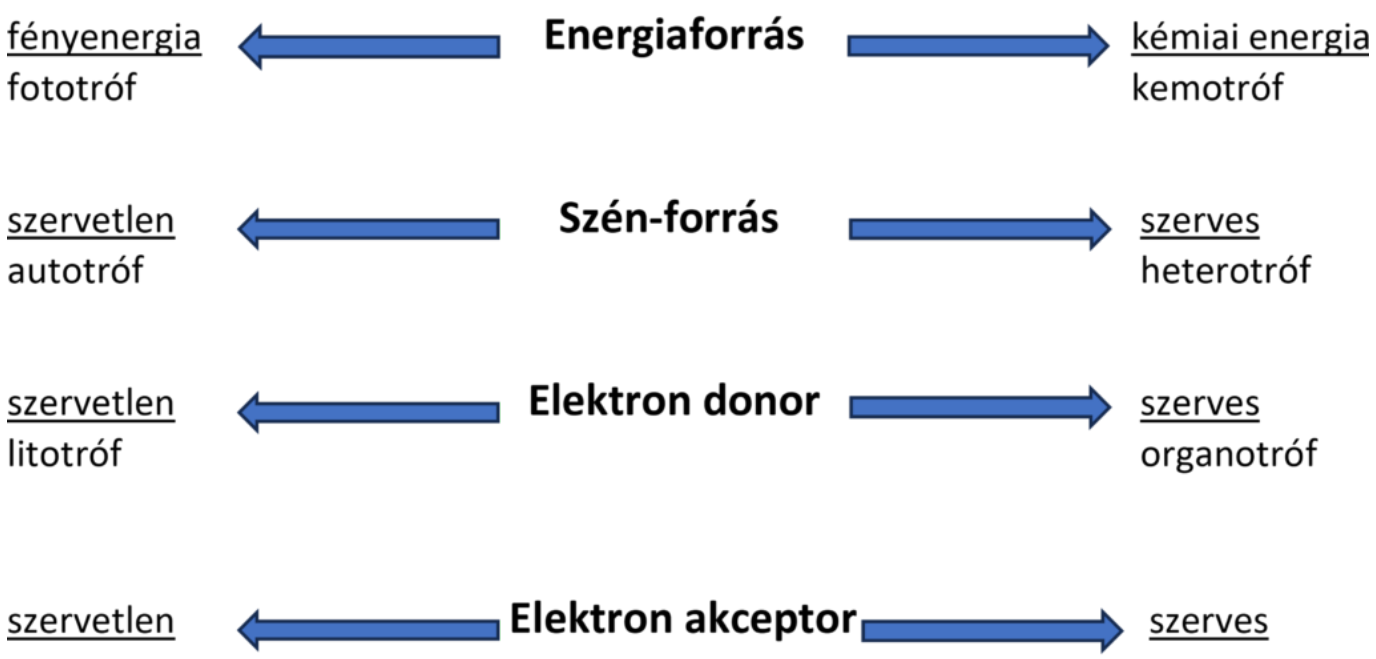
A prokarióta anyagcsere útvonalak sokfélesége

A különböző prokarióta szervezetek, a környezetünkben fellelhető valamennyi szerves és szervetlen tápanyag bontására, átalakítására képesek – amennyiben termodinamikailag kedvezőek a feltételek. Nem csak energiaforrásaik, hanem az energianyerő folyamataik sokfélesége is egyedülálló. Sejtanyagaik felépítéséhez, működéséhez és szaporodásukhoz azonban nekik is megfelelő építő molekulákra, energiára és redukáló képességre van szükségük. Az általuk végzett lebontó reakciók feladata pedig ezeknek a megteremtése.

A sejtnek mindenekelőtt energia kell, ami forrását tekintve, lehet a fény vagy kémiai energia. A fényenergiát hasznosító (fototróf) szervezetek fotofoszforilációval, klorofill molekuláik fény hatására gerjesztett elektrontranszport folyamata, vagy fény hajtotta protonpumpa során állítanak elő energiát. A kémiai energia különböző szerves vagy szervetlen anyagok átalakítása során képződik. A kémiai energiát hasznosító (kemotróf) szervezetek energiatermelésének alapja a különböző oxidációs-redukciós reakciók lépéseiből álló folyamatok sora. Ezek egyes lépéseiben az egyik fél elektront ad le (oxidálódik), míg a másik tőle elektront vesz fel (redukálódik). Minél nagyobbazelsődleges elektrondonor és a végső elektronakceptor közötti redoxpotenciál különbség, annál több energia képződik.

Az így nyert energiát mind a fototróf, mind a kemotróf szervezetek ATP formájában raktározzák. A lebontó folyamatok másik feladata, a sejt redox egyensúlyának ($NAD^+/NADH+H^+$) fenntartása. Mivel a felvett tápanyagok a sejt makromokekuláinál sokszor oxidáltabbak, a felépítő anyagcseréhez és a makromolekulák bioszintéziséhez megfelelő redukáló erőt kell biztosítani.

Energiatermelő folyamataik során a sejtek különböző szénforrásokat, elektrondonorokat és akceptorokat használhatnak. Ennek alapján az anyagcsere fő típusai az alábbiak szerint alakulnak (21. ábra).



21. ábra. Anyagcserefolyamatok sokfélesége a prokarióta szervezeteknél.

A fényenergiát hasznosító szervezetek ezek szerint lehetnek:

1. fotolitotróf-autotróf szervezetek (ha szervetlen elektron donort és szervetlen szénforrást, pl. CO_2-ot használnak. Ilyenek pl. a bíbor- kénbaktériumok, a cianobaktériumok és az algák.)

2. fotoorganotróf szervezetek (ha szerves elektron donort, és szénforrásként CO_2-t vagy szerves vegyületet hasznosítanak, mint pl. a bíbor nemkén baktériumok).

A kemotróf mikroorganizmusok energiakonzerváló folyamatainak sokszínűsége az elektrondonorok és akceptorok sokféleségében rejlik.

A légzőknél az elsődleges elektrondonor lehet szervetlen (litotrófok) vagy szerves (organotrófok) vegyület, míg a végső elektronakceptor általában szervetlen vegyület. Annak függvényében, hogy a terminális elektronakceptor szerepét az O_2, vagy más redukálható szervetlen anyagok (pl. NO_3^-, SO_4^{2-}, Fe^{3+}, CO_2) töltik be,különítjük el az aerob és az anaerob légzőket. Az anaerob anyagcserét folytató erjesztőknél (vagy fermentálóknál) mind az elektrondonor, mind az -akceptor szerves vegyület. A kemotróf szervezetek fő anyagcsere típusait a 4. táblázat mutatja be.

4. táblázat. A kemotróf mikroorganizmusok fő anyagcsere típusai.

Elsődleges elektrondonor ↓	Végső elektronakceptor		
	Szervetlen anyagok *		Szerves anyagok
	O_2 (Aerob légzők) *	NO_3^-, SO_4^{2-}, Fe^{3+}, CO_2 (Anaerob légzők) *	
Szervetlen anyagok NH_3, NO_2^-, S^{2-}, Fe^{2+}, H_2	Kemolitotróf ▲ aerob légzők pl. nitrifikálók	Kemolitotróf ▲ anaerob légzők pl. nitrátlégzők	Halorespiráció
Szerves anyagok	Kemoorganotróf ▲ aerob légzők pl. metilotrófok számos prokariota	Kemoorganotróf ▲ anaerob légzők pl. CO_2 légzők szulfátlégzők	Fermentálók ▲ pl. tejsavas fermentálók *

(A táblázatban az autotróf szervezetek piros, míg a heterotrófok kék betűkkel jelöltek. Az energia előállítás módját a csillagok színe jelzi: zöld * az elektrontranszport foszforilációt, piros * a szubsztrát szintű foszforilációt. A redukáló erő biztosítása: elsődleges elektron donorok által piros háromszöggel, fordított elektrontranszporttal ATP rovására kék háromszöggel jelölt (Forrás: Márialigeti, K. (szerk.) 2013. Bevezetés a prokarióták világába.)

A prokarióta szervezetek nagy túlélők, és akadnak olyanok is, amelyek különböző környezeti feltételek mellett, különböző anyagcsere folyamatokat folytathatnak. Teszik ezt mindig annak a függvényében, hogy energiatermelésük mindig a lehető legeredményesebb legyen, az adott körülmények között a legtöbb energiát nyerjék a folyamatok során. Tehát: NAGYON „OKOSAK”!

A katabolikus folyamatok által nyert energia, és az ezek során képződött, vagy a környezetből felvett molekulák biztosítják az alapot a sejt felépítő folyamataihoz, a bioszintézisekhez. Az autotróf szervezetek szerves szénvegyületeiket főként a szén-dioxid redukciójával nyerik. A heterotróf mikrobáknál a lebontó folyamatok köztestermékei, a bioszintézisek fontos szénforrásai. Bármelyik is legyen, sejtanyagaik felépítéséhez mind az autotróf, mind a heterotróf szervezeteknek rendelkezni kell azon „kulcsvegyületekkel”, amelyekre a legfontosabb bioszintetikus utak épülnek.

Noha a lebontó folyamatok sokszínűségéhez képest az anabolikus utak sokfélesége némileg csekélyebb, a mikroorganizmusok anyagcsere változatossága lenyűgöző. Az általuk képviselt energianyerő mechanizmusok közül mi emberek – az izom tejsavas fermentációját leszámítva – csak eggyel, a kemoorganotróf aerob légzéssel élünk. De mégis, az ezeket irányító közös termodinamikai törvények, a közel azonos a központi anyagcsere utak és azok biokémiai folyamatai, látható és láthatatlan élővilágunk egységét tükrözik. Az aerob és anaerob lebontási folyamatok részletes ábráit

a Függelék tartalmazza.

A bontható szubsztrátok sokfélesége

A mikroorganizmusok a környezetükben található szerves és szervetlen tápanyagok széles skáláját hasznosítják – és bármerre is nézzünk, a tápanyagok óriási tárháza áll rendelkezésükre.

Sejtanyagaik legnagyobb része szerves vegyület. Az ezekhez szükséges szén-szén kötések kiépítéséhez, mint korábban írtuk, az autotróf mikrobák környezetük szervetlen szénforrásait (CO_2) hasznosítják. A heterotrófoknak azonban kész szerves vegyületek kellenek. Az aerob és fakultatív anaerob szervezetek növekedéséhez, szaporodásához szén és energiaforrásként akár egyetlen vegyület is elegendő lehet, az anaerob szervezetek azonban ezt aligha valósíthatják meg.

Valójában az élőlények által létrehozott valamennyi természetes vegyület tápanyagforrásuk lehet. Legyenek azok akár egyszerű szerves molekulák, akár biopolimerek (fehérjék, nukleinsavak, poliszacharidok), vagy más komplex szerves vegyületek (pl. lipidek). Ezek kiváló energiaforrások és a mikrobák még a legellenállóbbak bontására is képesek lehetnek. Ilyenek pl. a növényi pektinek, a cellulóz és a lignin (ld. komposztálás fejezet), az ízeltlábúak vázát alkotó kitin, vagy a bakteriális tokanyagok és lipopoliszacharidok. De ide sorolhatók még a különböző környezeti fizikai-kémiai hatásokra módosult vegyületek is (pl. kerogén) és akár a „természetidegen” anyagokat is.

Ezeket a nagyméretű szerves polimereket azonban extracelluláris enzimeikkel még a sejten kívül építőegységeikre kell bontani, a monomereket képesek aztán a mikroorganizmusok tovább metabolizálni, a tápanyagok sejtanyagokká konvertálása vagy további bontása már sejten belül történik.

Az szerves vegyületek mellett azonban nagy jelentőséggel bírnak környezetük szervetlen anyagai is. Tápanyagként ugyanis minden mikroorganizmus igényel valamilyen nitrogén-, foszfor- és kénforrást, de sejtjeik zavartalan működéséhez pl. vasra, magnéziumra és más mikroelemekre is szükségük lehet. Kiválóan alkalmazkodnak a változó környezeti viszonyokhoz és a rendelkezésükre álló anyag- és energiaforrásokhoz. Ez köszönhető egyrészt anyagcsere rendszereik sokféleségének, másrészt annak, hogy a tápanyagok bontásához szükséges enzimek szintézise mindig a rendelkezésükre álló szubsztrátoknak megfelelően alakul. A különböző szubsztátok bontásának szabályozásakor ugyanis az időegység alatt felszabaduló energia mennyisége a meghatározó. Így pl. több szénforrás esetén a baktérium elsőnek mindig a számára kedvezőbbet, a könnyebben bonthatót, a nagyobbenergiaértékűt hasznosítja.(Ha pl. glükóz és laktóz is a rendelkezésükre áll, előbb a glükózt hasznosítja, és amikor az már elfogyott, akkor kezdi a laktózt bontani.)

Nem szabad azonban figyelmen kívül hagynunk, hogy az anyagok bontása és hasznosítása, általában különböző mikrobák alkotta közösségek együttműködésének az eredménye. Az élőhelyük

mikrokörnyezetében az egyes sejtek rendelkezésére álló szubsztrátok mennyisége és milyensége térben és időben is állandó változásban lehet.

Lássuk be tehát, hogy mivel a mikroorganizmusok képesek lehetnek szerves és szervetlen anyagok lebontására, átalakítására, fény- illetve kémiai energia hasznosítására is az általuk végzett reakciók sokasága a Föld energiaforgalmában valóban nélkülözhetetlen (ld. még biogeokémiai ciklusok c. fejezetet).