



Biokémia

Oktatási segédanyag a biokémia tantárgy előadásokon elhangzottak könnyebb elsajátításához.

Készítette:

Dr. Szóts Gábor

Lektorálta:

Dr. Olexó Zsuzsanna

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE



TARTALOM

ELŐSZÓ

I. A termokémia alapjai

Bevezetés

I./1. Termokémiai alapfogalmak

I./2. Összefoglalás

I./2.1. Ellenőrző kérdések

I./2.2. Tesztkérdések

II. Enzimek

Bevezetés

II./1. Enzimhatásról általában

II./2. Enzimreakciók

II./3. Enzim reakciók mechanizmusa

II./4. Koenzimek

II./5. Az enzim reakciók optimális feltételei

II./6. Izoenzimek

II./7. Multienzim rendszerek

II./8. Enzimgátlások

II./9. Enzimkinetika

II./10. Az enzim katalizálta folyamatok lépései

II./11. Köztitermék katalízis

II./12. Az anyagcsere folyamatok kulcsreakciói

II./13. Összefoglalás

II./13.1. Ellenőrző kérdések

II./13.2. Tesztkérdések

III. Anyagcsere folyamatok

Bevezetés

III./1. Anyagcseréről általában

III./1.1. Felépítő folyamatok

III./1.2. Lebontó folyamatok

III./2. Az energianyerési folyamatok összefoglalása

III./2.1. A szénhidrátok lebontása

III./2.2. Zsírok lebontása

III./2.3. Fehérjék lebontása

III./3. Az energiaszolgáltató rendszerek jellemzőinek leírása, az energianyerés fajtái a fizikai aktivitás ideje és intenzitásának függvényében

III./4. Összefoglalás

III./4.1. Ellenőrző kérdések

III./4.2. Tesztkérdések

IV. Irodalomjegyzék



ELŐSZÓ

A biokémia segédanyag célja, hogy lehetővé tegye a hallgatók számára az elvárt biokémia ismeretek könnyebb elsajátítását. A segédanyagban leírtak nagyban alapoznak a középiskolai biológia és kémiai tanulmányok során elsajátított ismeretek meglétére. Ezen anyag biztos ismerete megalapozását jelenti a későbbi tanulmányok során a szervezet energetikai viszonyaival foglalkozó tananyagrészeinek könnyebb megértéséhez. A tananyag elsajátításához tehát bizonyos alapvető biológiai, kémia ismeretek szükségesek, ennek érdekében összeállításra került egy kérdéssor, amely részletezi azon fejezeteket, témaköröket, amelyek esetleges hiánya nehézséget okozhat a biokémia tantárgy tanulása, elsajátítása során. Annak érdekében, hogy mindenki azonos szintről induljon, ennek a kérdéssornak az önálló tételszerű kidolgozása és ismerete az oktatási időszak elején alapkövetelmény.

A fejezetek végén rövid összefoglalást is megadunk az adott témakörben leírtakról és ellenőrző kérdéseket is összeállítottunk, amelyek lehetővé teszik az anyag önálló feldolgozását.

A segédlet önmagában természetesen részletesen nem tartalmazza a teljes tananyagot, hiszen az előadásokon való jelenlét mindenképpen szükséges a szükséges témakörök megismeréséhez és az összefüggések értelmezéséhez. Ezért ebben a segédletben csak az egyes lényeges témakörök ismeretének fontosabb részei vannak kiemelve, értelmezve. A mellékelt irodalomjegyzékben számos idevonatkozó legújabb és korábbi ismeret megtalálható, de ezek csak segítséget jelentenek az anyag megértéséhez.

Annak érdekében tehát, hogy mindenki, aki szeretne ebből a tantárgyból megfelelő ismereteket szerezni és sikeresen levizsgázni, ki kell dolgoznia a saját eddigi ismeretei, igényei és elvárásai szerint a kiadott vizsgakérdéseket. Ezért ebben a segédletben található szakmai anyag ismerete önmagában nem elegendő a sikeres vizsga teljesítéséhez, hanem mint nevében is utalunk rá „csak” egy segédanyag. A lényeg az alapok megismerése után az összefüggések megtalálása és egy biokémia szemlélet kialakítása, amely révén könnyebb lesz az erre épülő további szakmai ismeretek megértése, elsajátítása.



I. A termokémia alapjai

Bevezetés

Az élő szervezetekben lejátszódó anyagcsere folyamatok megértéséhez elengedhetetlen követelmény az energia, az energiaátalakulások, az energiaviszonyok törvényszerűségének megismerése. Ebben a fejezetben ismertetésre kerülnek azon termokémiai alapfogalmak és törvényszerűségek, amelyek ismeretében könnyebben megérthetőek a szervezetben lejátszódó biokémiai reakciók alakulásának iránya és mértéke.

I./1. Termokémiai alapfogalmak

Az energia, az anyag egyik legfontosabb tulajdonsága, legegyszerűbben kifejezve egy rendszer munkavégző képessége. Hivatalos mértékegysége a **J** (Joule) illetve 1 000-szerese a **kJ**, amit úgy határozhatunk meg, mint az az energiamennyiség, amit egy kilogramm tömegű testnek 1 Newton erővel 1 méterre történő elmozdításhoz szükséges. Régebben használták, sőt használják ma is a **cal**, illetve a **Kcal**-t, ami hőmennyiséget jelent. A kettő átszámolható egymásba $1\text{ kcal}=4,19\text{ kJ}$.

A klasszikus termodinamika törvényei két alapelvre épülnek. Az első alapelv az energia megmaradás és az energia különböző formáinak egymásba alakíthatósága.

Az energia megmaradás törvénye szerint: elszigetelt rendszerben – vagyis amikor a rendszer és a külvilág között sem anyag sem energiaáramlás sincs - a különböző energiafajták összege nem változik, csak átalakulnak egymásba. Az élő szervezet reakciói azonban nem elszigeteltek, ezért energia és anyag változással is járnak/járhatnak. Megváltozhat a rendszer belső energia tartalma (hőtartalma) és munkát is végezhet. A munka és a hőátadás az a két folyamat, ami által két test között energia átadás történik. A kiindulási és a végtermékek közti energiaváltozások az alábbi egyenlettel fejezhető ki:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

a Δ a kiindulási állapot és a reakció végső állapota között eltérést jelenti. A ΔU jelenti a teljes energiaváltozást, vagyis a kiindulási anyag (rendszer) belső energiájának változását. A ΔQ az energia-változás tehát a hő formájában, és ΔW az energia változás munka formájában megjelenő értékét. Közérthetőbben kifejezve: egy elszigetelt rendszerben (amikor tehát a rendszer és a külvilág között nincs se anyagáramlás, se energiaáramlás) az átalakulás közbeni hő változás értéke egyenlő a változás során felszabaduló vagy elnyelődő hő és a rendszeren vagy az általa végzett munka összegével. Amennyiben nincs munkavégzés, akkor a belső energiaváltozás csak a hő változás formájában észlelhető. Ezt nevezzük **entalpiának** (H) vagy hőtartalomnak. Az **entalpia változása** egy kémiai rendszer átalakulás során - állandó hőmérsékleten és nyomáson - felszabaduló vagy elnyelődő energiaváltozásával egyenlő. Ilyenkor nincs semmilyen munkavégzés. Az energia változást **kJ**-ban fejezzük ki.

Konkrét példán bemutatva, amikor a táplálékkal szervezetünkbe kerülő tápanyagok például a szőlőcukor (glukóz) lebontásra kerülnek, akkor a kiindulási anyagok átalakulnak köztes, illetve végtermékekké:



A reakció során az entalpiaváltozás $\Delta H = -2813 \text{ kJ}$ (-673 kcal)

A változás (ΔH) mértékét mindig a kiindulási anyagra vonatkoztatjuk, ha ez negatív érték, akkor **exoterm reakcióról** beszélünk (a kiindulási anyag energiataralma, vagyis a belső energia csökken), amennyiben pozitív, akkor **endoterm reakcióról** beszélünk (a kiindulási anyag energiataralma, vagyis a belső energia növekszik).

Ennek az értéknek az alakulása nem függ a kezdeti és a végső állapot közötti közbenső szakaszok számától és természetétől. (**Hess törvénye**).

A Hess-tétel, - avagy a **termokémia** főtétele - tehát kimondja, hogy egy kémiai reakció során az **entalpiaváltozás**, illetőleg a **reakcióhő** nagysága kizárólag attól függ, hogy milyen minőségű és állapotú anyagokból milyen végtermékek keletkeznek. Az entalpia mérésénél csak azt határozhatjuk meg, hogy van-e energiaváltozás és értéke mekkora (ΔH).

Erre az alapvető kérdésre ad választ a **termodinamika második alapelve**: minden olyan rendszerben, amely a kiindulás állapotból egy végső állapotba kerül, a belső energia változásának egy részét (ΔU) a változás során bekövetkező rendezettség mértéke szabja meg. Ezt nevezzük a rendszer **entrópiájának**, és ennek változását mérjük (ΔS).

Entrópiának nevezzük tehát egy rendszer rendezettségének mértékét és mindig valószínűbb - és így kisebb energia befektetéssel is jár - egy rendezetlen állapot, mint egy rendezett. Értéke többek között hőmérsékletfüggő.

A belső entalpiaváltozása ΔH (állandó hőmérsékleten és nyomáson) és az entrópia változása (ΔS) közti összefüggést az alábbi egyenlet írja le. (**Gibbs egyenlet**):

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

Az egyenletben ΔG jelenti, a rendszer un. szabad energia változását vagyis, hogy a kémiai változás során a belső entalpiaváltozásból mekkora érték fordítható munkavégzésre és mennyi az, ami a rendszer un. kötött energiája. ($T \cdot \Delta S$) T a hőmérséklet értéke Kelvinben megadva. A rendszer összes belső energiája és a kötött energiája közötti különbség a **szabad energia**. Ezzel tud a rendszer munkát végezni, ez leadható. A térfogat változással járó reakciók állandó nyomáson önként csak a szabad entalpia csökkenés irányában játszódhatnak le, amikor ΔG értéke < 0 , vagyis **exorganikus** folyamat esetében. Amennyiben ΔG értéke > 0 , akkor **endorganikus** folyamatról beszélünk, vagyis ebben az esetben a folyamat önként nem megy végbe. Az, hogy egy folyamat szabadon lezajlik vagy nem, függ a kezdeti és a végállapot potenciál különbségétől, vagyis a munkavégző képességétől.

$$\Delta P = P_2 - P_1$$

- amennyiben $P_2 < P_1$, akkor $\Delta P < 0$ és a folyamat önként végbe megy és munkavégzés történik.
- amennyiben $P_2 = P_1$, akkor $\Delta P = 0$, aminek következtében egyensúly áll be.
- amennyiben $P_2 > P_1$, akkor $\Delta P > 0$ és a folyamat spontán nem megy végbe, vagyis nem történik munkavégzés.

A leírtak jelentik az élő szervezetben lejátszódó anyagcsere-folyamat alapját, attól függően, hogy ennek milyen a mértéke és az előjele. Amennyiben tehát ennek értéke negatív előjelű, akkor a folyamat spontán, vagyis önként fog lejátszódni, amennyiben az értéke pozitív, akkor energiát kell befektetni, hogy a folyamat le tudjon játszódni. Az előjel mindig a kiindulási anyagra vonatkozik.

Egy példán bemutatva: a hegyekben a télen lesett nagy tömegű hó a tavaszi meleg hatására megolvad és lezúdul a völgybe, vagyis egy magas potenciállal rendelkező helyről egy



alacsony potenciállal rendelkező helyre érkeznek. Ez a folyamat önként végbe megy, és a magasságkülönbség jelenti a munkavégző képességet, a lezúduló víz mennyisége pedig annak mértékét. Amennyiben ezt a víz mennyiséget visszaszeretnénk szállítani a hegy tetejére, ez csak sok munkával vagyis energia befektetésével sikerülne. Az élő szervezetben ehhez hasonló módon történik az energianyerés. Elfogyasztjuk a magas energiával (az entalpia mértéke nagy) rendelkező tápanyagokat, azok a szervezetben lebontódnak kisebb energiatartalmú végtermékekké és a kettő különbsége jelenti azt az energiamennyiséget (ΔG), amit munkavégzésre, hőháztartásunk biztosítására, különböző anyagok szintézisére fordíthatunk. A keletkező energia mértéke tehát függ a kiindulási és a végtermékek energiatartalmától és a lebontott tápanyagok mennyiségétől.

I./2. Összefoglalás

Ebben a fejezetben ismertetésre kerültek azok az alapvető termokémiai alaptörvények melyek tudása elengedhetetlen annak érdekében, hogy jobban megértsük a szervezetben lejátszódó energia-felszabadító folyamatokat. Megértsük, hogy miképpen lehetséges, hogy a szervezetben uralkodó körülmények között is tudunk energiát előállítani az étkezések során elfogyasztott tápanyagokból. Alapvető követelmény, annak megismerése, hogy a folyamatok végbemenetele, azok iránya természeti törvényeken alapulnak. Ismertetésre kerültek a termokémia fő tételei, az energia megmaradás törvénye és Hess tétel.

Kulcsszavak: termokémia, entalpia, entrópia, szabad entalpia

I./2.1. Ellenőrző kérdések

1. Mit jelent az alapanyagcsere?
2. Az energia mértékegysége?
3. Az entrópia fogalma?
4. Az entalpia fogalma?
5. Mit mond ki az energia-megmaradás törvénye?
6. Mit mond ki a Hess-tétel?
7. Mi az összefüggés a szabad entalpia az entalpia a hőmérséklet és az entrópia között?
8. Mit jelent, amennyiben egy kémia folyamat exoterm, illetve endoterm?

I./2.2. Tesztkérdések

1. Mit mond ki a termokémia I. fő tétele?

A/ $U=W+Q$

B/ $E=Evég-Ekezdet$

C/ $H=U+p \times V$

D/ $F=U-T \times S$

E/ $G=U-T \times S$

2. Az energia hivatalos mértékegysége?

A/ Joule

B/ Kcal

C/ Newton

D/ LE



3. Mikor játszódik le egy kémiai folyamat önként?
- A/ A szabad entalpia értéke nagyobb, mint nulla
 - B/ A szabad entalpia értéke kisebb, mint nulla
 - C/ Amennyiben a folyamat során növekszik a rendszer hő tartalma.
4. Az energia megmaradás törvénye szerint:
- A/ Az energia nem vész el csak átalakul
 - B/ Elszigetelt rendszerben a különböző energiatípusok összege nem változik, csak átalakulnak egymásba.
 - C/ A különböző energiatípusok átalakulása során nem történik hő változás.
5. A Hess törvénye kimondja:
- A/ Egy kémiai reakció során az entalpiaváltozás, illetőleg a reakcióhő nagysága kizárólag attól függ, hogy milyen minőségű és állapotú anyagokból milyen végtermékek keletkeznek.
 - B/ Egy kémiai reakció során csak a kezdeti és a végállapot közötti átalakulások száma szabja meg a reakció hő nagyságát.
 - C/ Kémiai reakciók során a felszabaduló hő mennyisége és az entalpia változása csak a kiindulási és a végtermékek halmazállapotától.



II. Enzimek

Bevezetés

Az enzimek, biokatalizátorok, illetve az enzimműködés ismertetésének célja, hogy a hallgatók ismerkedjenek meg azokkal a folyamatokkal, körülményekkel, amelyek lehetővé teszik, hogy az élő szervezetben is le tudjanak játszódni azok a kémiai folyamatok, amelyek egyébként a szervezetben létező viszonyok között nem tudnának végbemenni. Az enzimreakciók megismerésével képesek lesznek a hallgatók azon természettudományi szemlélet kialakítására, megértésére, ami nélkül elképzelhetetlen, hogy a későbbi konkrét tananyag, annak összefüggérendszerre elsajátítható legyen.

II./1. Enzimhatásról általában

A sejtek normális működése, koordinációja komplex reakciókon keresztül lehetséges pl. enzimgátlások, enzimaktiválás stb., Az enzimműködés megértéséhez a - gyógyszerek működéséhez hasonlóan - a receptor elmélet segít minket abban, hogy el tudjuk képzelni ezeket a folyamatokat, amelyek a molekulák szintjén zajlanak le szervezetünkben. A gyógyszerek, a makromolekulák reakcióképes csoportjaihoz kötődnek térszerkezetük segítségével és ennek megváltozásával jönnek létre azok a hatások pl. izom összehúzódás, fájdalomcsillapítás, vérnyomás csökkentés, oxidáció, amelyek kiváltását el szeretnénk érni.

Az enzimek BOKATALIZÁTOROK, amelyek lehetővé teszik, ill. felgyorsítják a kémiai folyamatokat Az összehangolt anyagcsere folyamatok végbemenetele csak így lehetséges, mivel minden sejt egy saját, genetikailag kódolt enzimkészlettel rendelkezik. Csak ezáltal biztosítható a koordinált reakció folyamatok (anyagcsere utak) állandó a megváltozott körülményekhez való igazodása. Ezekhez a kölcsönhatásokhoz nagy AKTIVÁLÁSI ENERGIA szükséges, a reakciópartnereket aktív állapotba kell hozni. A szervezetben ezt a feladatot az enzimek végzik.

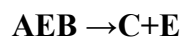
II./2. Enzimreakciók

A biokatalizátorok a reakciókat gyorsító anyagok, kis koncentrációban hatásosak és maradandó változás nélkül kerülnek ki a reakció végén. Vegyünk általánosságban két anyagot (A és B), amiből egy harmadik anyag (C) keletkezik.



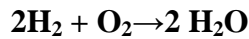
Ez a reakció lassú vagy esetleg végbe sem megy a szervezet körülményei között, például 36 °C-on.

Ha van katalizátor, vagyis enzim (E), akkor először A anyag kapcsolódik a katalizátorral: $A+E \rightarrow AE$, majd a keletkezett komplex már tud kapcsolódni a B anyaggal: $AE+B=AEB$, ez a komplex már át tud alakulni a végtermékké, vagyis C anyaggá, miközben az enzim leválik, és újra részt vehet egy másik folyamatban, hogy elősegítse ugyanezt a folyamatot.



Ez utóbbi folyamat már jóval gyorsabb és lényegesen kisebb energia befektetés szükséges hozzá.

Egy konkrét példán bemutatva: a víz keletkezése



Ez a folyamat szobahőmérsékleten lassú, azonban több száz °C-on platina elektródon robbanásszerűen játszódik le a reakció.

Az élő szervezetben ugyanez a reakció több lépésben zajlik le, de viszont testhőmérsékleten. Az élő szervezetben tehát le tudnak játszódni, biokatalizátorok, enzimek segítségével azok a folyamatok is, amelyek egyébként ilyen körülmények (testhőmérséklet) között nem tudnának végbemenni.

Miképpen lehetséges ez? Az enzimek olyan több lépésből álló, egymásra épülő reakciósorozatokban végzik az átalakítást, amelyek összességében jóval kisebb **aktiválási energiával**, vagyis energia befektetéssel ugyanabból a kiindulási anyagból ugyanahhoz a végtermékhez juthatunk. És van még egy nagyon lényeges dolog, mindez több száz, több ezerszeres sebességgel mehet végbe, ahhoz képest, amikor nincsenek jelen enzimek.

A biokatalizátorok a legtöbb esetben fehérjék, és térszerkezetük révén tudják biztosítani azokat a feltételeket, amelyek révén lejátszódnak ezek a katalizált folyamatok. Az élő szervezetben minden kémia folyamat enzimek által katalizált.

II./3. Enzim reakciók mechanizmusa

1. Az **enzim aktív centrumán** keresztül kapcsolódik ahhoz az anyaghoz - általánosságban nevezzük **szubsztrátnak**. - amit át fog alakítani. Ezt nevezzük **szubsztrát-specifitásnak**, vagyis az enzim ki tudja választani térszerkezet révén azt az anyagot, amit át fog alakítani.
2. Lezajlik a reakció. Ehhez szükség van még egy ún. koenzimre is, ami mintegy segédanyagként vesz részt a reakcióban, és meghatározza, hogy milyen folyamat alakuljon ki. Ezt nevezzük hatás-specifitásnak.
3. Leválik a termék. (gyorsabban és jóval kisebb energia befektetéssel)
4. Az enzim regenerálódik és kezdődhet egy újabb folyamat.

II./4. Koenzimek

A kémiai folyamatok lezajlása során, így sok enzimkatalizált reakciónál is elektronok vagy csoportok kerülnek át a szubsztrátról egy másik molekulára. Ezeket a folyamatokat segítik elő a **koenzimek**.

Csoportosításuk:

1. oldható koenzimek (szubsztráthoz kötődnek, kémiailag átalakulnak, majd ismét szabaddá válnak)
2. prosztetikus csoportok (erősen kötődnek az enzimhez és a reakció alatt is ott maradnak)

A koenzimek többnyire nem fehérjék, és vitaminokhoz hasonló szerkezetű, közvetítő anyagoknak tekinthetők vagy nagy energiát biztosíthatnak.

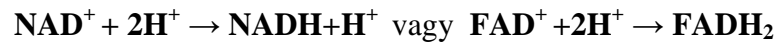
Besorolásukat a folyamatok nevére kapták, amiben részt vesznek, így például vannak

- redox koenzimek: NAD^+ , a (Nikotinsav Amid adenin Dinukleotid rövidítése), NADP^+ , FAD^+ koenzimQ, amelyek redukciós és oxidációs folyamatban vesznek részt vagy vannak



- csoportátvivő koenzimek, mint a koenzimA, amely az acetil (CH₃CO-) csoport szállításában vesz részt.

A redox folyamatokban résztvevő koenzimek szerkezetük átalakítása révén meg tudnak kötni egy vagy két hidrogén iont és a hozzá tartozó elektront - miközben redukálódnak - és elszállítják egy másik folyamathoz, ahol leadják, miközben oxidálódnak.



Hasonló a koenzimQ szerepe, amely 2H felvételével redukálódik, elszállítja a hidrogéneket, majd azt leadva visszaoxidálódik, hogy másik hidrogént tudjon megkötni. Ennek a folyamatnak a végső energia felszabadító folyamatban, a **terminális oxidációban** van jelentősége.

A csoportszállító koenzimek szintén hasonló módon egyik folyamatból át tudják szállítani a funkciós csoportokat egy másik folyamathoz.

koenzimA + acetil csoport → acetilkoenzimA

Ezeknek a koenzimeknek tehát egyrészt nagyon fontos szerepük van a kémia folyamatok során, mert nélkülük nem tudnának lezajlani ezek a reakciók, másrészt szabályozó szerepük is van. Ennek lényege, hogy amennyiben megfelelő koncentrációban rendelkezésre állnak ezek a molekulák, akkor elősegítik ezeket és végbe mehet a folyamat, amennyiben nincsenek vagy nem megfelelő koncentrációban vannak jelen, akkor lelassíthatják, illetve gátolhatják a folyamatokat.

ATP (Adenozintrifoszfát)

A koenzimekhez nagyon hasonló szerkezet miatt itt kerül sor az élő szervezet egyik legfontosabb energiaszolgáltató, energiaraktározó vegyületének az adenozin-trifoszfátnak az ismertetésére.

Az ATP a sejten belül a legfontosabb energiaszolgáltató vegyület (áll adeninből, mely egy szerves bázis, ribózból, mely egy öt szénatomos szénhidrát és három foszforsavból). Az ATP-nek két nagy energiájú kötése van. Ennek a kötésnek a felszakadásakor az egyik foszfátcsoporthoz leválik és keletkezik az ADP (adenozindifoszfát). Az ADP ugyanakkora energia-befektetéssel képes visszaalakulni egy foszfátcsoporthoz felvételével ATP-vé.



Az emberi szervezetben, nyugalomban (egy adott pillanatban/percben) átlagosan 2-10 mmol/l, vagyis kb. 50 gramm ATP van. A szervezet szükséglete nyugalomban 0,1 kg/perc, míg ez, aktív izommunka során 0,5 kg/perc értékre is növekedhet. Nyugalomban tehát, 24 óra alatt, egy 70 kg ember kb. 100-140 kg-t „fogyaszt”, azaz alakít át ADP-vé és foszfáttá az ATP-ADP ciklus során, ami azt jelenti, hogy kb. 3 000 x történik meg a fent bemutatott átalakulás. Ennek az általános energiahordozónak a jelentősége leginkább az izom összehúzódnál van, tekintettel arra, hogy ez az egyetlen olyan energiaszolgáltató, amelyet az izom képes összehúzódnak, illetve elernyedése során, mint energiaforrást felhasználni. Ezért határozzuk meg mindig az anyagcsere-folyamatok esetében ATP-ben az energiamérleget. A sejtekben az ATP/ADP aránya döntő tényező a sejt energiaállapotát illetően és emellett anyagcsere szabályozó szerepe van.



II./5. Az enzim reakciók optimális feltételei

Az enzimek által katalizált reakciók optimális végbemeneteléhez, - hogy leggyorsabban és a legkisebb energia befektetéssel menjenek végbe – bizonyos feltételeknek teljesülnie kell:

1./ **optimális hőmérséklet:** a kémiai folyamatok a hőmérséklet emelésével gyorsulnak, azonban az enzimek esetében ez csak egy határig lehetséges, mert mivel az enzimek kémiai szempontból fehérjék, így a magas hőmérséklet tönkre is teheti szerkezetüket, aminek következtében nem tudnak összekapcsolódni az átalakítandó anyaggal.

2./ **optimális pH:** minden enzimnek van egy optimális vegyhatása (pH-ja), amikor a leggyorsabban tud működni.

3./ **optimális koenzim koncentráció:** amennyiben túl kevés a koenzim mennyisége, akkor lelassulhat a reakció, vagy amennyiben túl sok, akkor pedig nem fog gyorsulni.

4./ **optimális szubsztrát – átalakítandó anyag - koncentráció:** ha az enzimek számához képest túl kevés az átalakításra váró anyag, akkor sem ideálisak a körülmények, vagy ha túl sok, akkor sem.

5./ **megfelelő ásványi anyagok (Ca, Mg, Cu, Zn) jelenléte:** az enzimek működése sok esetben bizonyos ásványi anyagok, mint enzimaktivátorok jelenlétéhez kötött.

II./6. Izoenzimek

Azokat az enzimeket, amelyek ugyanazt a reakció katalizálják, de kémiai felépítésükben némi eltérés van izoenzimnek nevezük. Ezeknek jelentősége a labordiagnosztikában van.

II./7. Multienzim rendszerek

Vannak olyan reakció sorozatok, amelyek végbemeneteléhez több enzim együttes jelenléte szükséges például a zsírok szintézise esetében.

II./8. Enzimgátlások

Vannak olyan anyagok (inhibitorok), amelyek végérvényesen, irreverzibilis módon vagy csak átmenetileg - reverzibilis módon - blokkolhatják az enzimek működését, ezeket **enzim gátlóknak** nevezük.

Két csoportba oszthatjuk őket:

1. **irreverzibilis gátlás:** ezek többnyire nehézfém ionok (Hg, Cu, Pb, Cn, Rd), amelyek az enzimfehérjék kén (S) tartalmú részeivel létesítenek kapcsolatot és végérvényesen roncsolják a kémiai szerkezetüket.
2. **reverzibilis gátlás:** amelyek az enzimek azon pontját blokkolják átmenetileg, ahova az átalakításra váró anyag is szeretne bekapcsolódni. Ez egy gyenge kölcsönhatást feltételez.

Két típusa létezik:

- az egyik a **kompetitív (versengő) gátlás**, mely esetben a gátló és az átalakításra váró anyag - aminek nagyon hasonló kémiai szerkezete van - versengenek, az enzim un. aktív centrumáért és átmenetileg koncentrációjuk függvényében gátolják a folyamatokat. Ehhez hasonló módon lassíthatják a folyamatokat a túl nagy



mennyiségben jelen lévő kiindulás és végtermékek is. Ez utóbbi esetben egyszerűen jelenlétük nem teszi lehetővé a tökéletes kapcsolódást.

- a másik az ún. **allosztérikus gátlás**, amikor a gátló anyag nem az aktív helyre kötődik, de bekapcsolódása révén megváltoztatja az aktív hely szerkezetét, aminek következtében nem tud bekapcsolódni az átalakításra váró anyag (szubsztrát). Ennek van egy ellentettje is, amikor egy anyag - nevezzük most aktiváló anyagnak - bekapcsolódása révén helyreállítja az aktív centrum szerkezetét és végbe tud menni a folyamat.

Ezeknek a gátló vagy aktiváló anyagoknak a kémiai folyamatok szabályozásában van jelentős szerepük.

II./9. Enzimkinetika

Az **enzimkinetika**: a kémia azon területe, amely az enzim katalizált reakciók sebességével foglalkozik. Reakciósebesség: időegység alatt végbemenő anyagátalakulás mértéke.

Egysége: katal, amely 1 mol anyag 1 mp alatt történő átalakítását jelenti, - kisebb egysége a μ katal és a nkatal. Tulajdonképpen ezt nevezzük az **enzimek katalitikus aktivitásának**.

II./10. Az enzim katalizálta folyamatok lépései

- 1./ A térszerkezet alapján az enzim-szubsztrát kapcsolat létrejötte. (kulcs-zár modell)
- 2./ A megfelelő térbeli orientáció kialakulása.
- 3./ Megszűnik a szubsztrátot körülvevő hidrát burok.
- 4./ A víz kivonása következtében jobbak lesznek a folyamat lejátszódásának feltételei.
- 5./ A kialakuló kémiai kölcsönhatások révén (proton vagy csoportok átadása, átvétele) stabilizálódik az átmeneti állapot.
- 6./ Egyre inkább csökken az aktiválási energia szintje
- 7./ Kialakulnak az új kémiai kötések és leválik az enzim, hogy egy újabb folyamatot segítsen elő.

A folyamatokban a legfontosabb lépés az átmeneti állapot stabilizálása.

II./11. Köztitermék katalízis

A több lépcsős folyamatok katalízise során minden egyes lépés aktiválási energiájának összege kisebb, mint a nem katalizált reakcióké, így a folyamat gyorsabban és kisebb energia-befektetéssel megy végbe. Egy három lépésből álló folyamat során az egyes részfolyamatok energiaigényének összege kisebb, mintha egy lépésben menne végbe:

$$e_1 + e_2 + e_3 < E$$

Az enzimek tehát kisebb aktiválási energiával rendelkező utakat nyitnak meg és így időegység alatt több anyagot (szubsztrátot) tudnak átalakítani.

II./12. Az anyagcsere folyamatok kulcsreakciói

A szervezetben lejátszódó többlépcsős folyamatok során a teljes folyamat sebessége, illetve a folyamatok iránya ún. **kulcsreakciók** függvénye. Ezeket a kulcsreakciókat többnyire az



enzimek aktivitása, illetve szabályozottsága szabja meg. Ezeknek az enzimeknek az aktivitása tehát döntő egy reakció lezajlása szempontjából. Ezeken a kulcsreakciókon keresztül történik a folyamatok szabályozása.

Ilyenek lehetnek például:

- 1./ Allosztérikus gátlás vagy allosztérikus aktiválás, az aktiváló vagy gátló anyag hozzákapcsolódik az enzimhez, melynek ezáltal megváltozik a térszerkezete és így tudja befolyásolni egy reakció lefolyását.
- 2./ Enzimek interkonverziója révén, vagyis hormonok által megvalósuló szerkezeti átalakulás
- 3./ Aktív enzimek keletkezése inaktívból.
- 4./ Enzimek szintézise enzimidukció révén, melynek következtében mind mennyiségileg is megnövekszik az enzimek száma, mind megváltozik az aktivitásuk szintje is.

Ezek a reakciók általában exorganikusak, így megfordíthatatlanok, vagyis irreverzibilisek.

Az allosztérikus aktiválást vagy gátlást az **energia telítettség** példáján mutatjuk be. Az energia szolgáltató reakciókban az ATP, ADP, AMP-nek szabályozó szerepe van, tulajdonképpen allosztérikus regulátorok. A magas ATP szint általában GÁTOL, a magas ADP-AMP szint általában AKTIVÁL. Mivel ezen nukleotidok (ATP, ADP, AMP) össz mennyisége állandó, ezért egy képlet fejezheti ki az „energia töltést” (ET)

$$ET = \frac{[ATP] + 1/2 [ADP]}{[ATP] + [ADP] + [AMP]}$$

a hányados (melynek értéke 1-0 között lehet), normál esetben (0,85), ha alatta van, aktiválja a folyamatokat, ha felette van, gátolja a folyamatokat.

Kulcsszavak: Biokatalizátorok, aktiválási energia, enzim reakciók mechanizmusa, koenzimek, enzimgátlások.

II./13. Összefoglalás

Az élő szervezetben lejátszódó kémiai folyamatok végbemenetele szempontjából elengedhetetlen, hogy ismertetésre kerüljenek az enzimek működésével, az enzimreakciók folyamatával, az enzim specifitásokkal kapcsolatos törvényszerűségek. Ismerni kell az enzim folyamatokat befolyásoló tényezőket, amelyek révén a lejátszódó enzim által katalizált reakciók szabályozódnak. Bemutatásra kerültek az enzimgátlások és az enzim kinetika alapvetései is.

II./13.1. Ellenőrző kérdések

1. Mit segítenek elő a biokatalizátorok?
2. Mi a feladatuk a biokatalizátoroknak?
3. Mit nevezünk szubsztrátnak?
4. Mit nevezünk aktív centrumnak?
5. Mit jelent a szubsztrátspecifitás?
6. Mit jelent a hatáspecifitás?
7. Mik azok az izoenzimek?
8. Mivel foglalkozik az enzimkinetika?
9. Mit jelent a közttermékkatalízis?



10. Miből épülnek fel az enzimek?
11. Az enzimhatás feltételei?
12. A koenzimek fajtái, szerepei?
13. Melyek a hidrogénszállító koenzimek?
14. Mi a feladata a NAD koenzimnek?
15. Mi a feladata a FAD koenzimnek?
16. Mi a feladata a koenzim A-nak?
17. Mi a feladata a koenzim Q-nak?
18. Mik azok az enziminhibitorok?
19. Mi az a kompetitív gátlás?
20. Mit jelent az allosztérikus gátlás?
21. Mit jelent az aktiválási energia fogalma?
22. A biokatalizátorok milyen módon csökkentik egy reakció aktiválási energiáját?
23. Miből áll az ATP?
24. Az ATP legfontosabb szerepe?

II./13.2. Tesztkérdések

1. Mi a szerepe a koenzimQ molekulának?
 - A: hidrogénszállítás
 - B: acetilcsoport szállítása
 - C: elektronszállítás
 - D: egyik sem
 - E: B és C együtt
 - F: A és C együtt

2. Az alábbiak közül melyik nem tartozik az enzimek optimális működését befolyásoló tényezők közé?
 - A:** megfelelő szubsztrát koncentráció, **B:** megfelelő hőmérséklet, **C:** megfelelő apoenzim koncentráció, **D:** megfelelő koenzim koncentráció

3. Mit nevezünk szubsztrát specifitásnak?
 - A/ Az enzim csak a számára kódolt anyagot képes megkötni.
 - B/ A lehetséges reakciók közül csak egyet katalizálnak, mert az aktivitási energia csak ebben a reakcióban csökken annyira, hogy az egyensúly beállhat.
 - C/ Az enzim csak a kötésre specifikus
 - D/ Az enzim csak egy reakcióra specifikus
 - E/ Az enzim felismeri a rá jellemző csoportokat és csak azokat alakítja át.
 - F/ Az enzim felismeri a megfelelő kötéseket és átalakítja őket

4. Az alábbiak közül melyik nem hidrogén szállító?
 - A/ NAD: nikotinsav – amid – adenin – dinukleotid
 - B/ NADP: nikotinsav – amid – adenin – dinukleotid - foszfát
 - C/ FAD: flavin – adenin – dinukleotid
 - D/koenzim Q
 - E/ koenzimA
 - F/ ubikinon

5. A kompetitív gátlás jellemzője?



- A/ a gátló anyag kapcsolódik az aktív centrumhoz és roncsolja annak szerkezetét
- B/ a gátló anyag kapcsolódik az enzimhez, és végérvényesen gátolja annak működését
- C/ a gátló anyag és a szubsztrát verseng az enzim aktív centrumáért
- D/ a végtermék gátolja a szubsztrát leválását

6. Az ATP áll?

- A/ adenin, ribóz, foszforsav
- B/ adenin, ribóz, 3 foszforsav
- C/ adenzin, 3 foszforsav, dezoxiribóz
- D/ adenin, dezoxiribóz, 3 foszforsav
- E/ adenin, 3 foszforsav



III. Anyagcsere folyamatok

Bevezetés

Az anyagcsere folyamatok biztosítják az élő szervezet számára azt az energiát, amely révén képesek vagyunk mozogni, biztosítani tudjuk a felépítő folyamatok energiaigényét, lehetővé tesszük a belső hőmérséklet állandóságát, illetve a szervezet számára alapvető un, homeosztázis vagyis a belső egyensúly állandóságának biztosításához szükséges ion egyensúly fenntartását.

A fejezet célja tehát, hogy a hallgatók legyenek tisztában az alapvető lebontó és felépítő folyamatok általános alapelveivel és annak részleteivel, ismerjék meg az energia felszabadító folyamatok során azokat az összefüggéseket, amelyek lehetővé teszik annak megértését. Legyenek tisztában, hogy az élő szervezetben miből, hol, milyen folyamatok révén, milyen alapelvek mentén és mennyi energia szabadítható fel.

A fejezetben leírtak segítségével képesek lesznek a hallgatók a későbbi tanulmányaik során felmerülő, az anyagcsere folyamatokkal összefüggő anyagrészek könnyebb értelmezésére.

III./1. Anyagcseréről általában

A sejtekben lejátszódó több száz kémiai folyamat (felépítő és lebontó) összessége. Az életfolyamatokhoz szükséges energiát a tápanyagok elfogyasztásával, annak lebontásával, átalakításából fedezzük. Ezen folyamatok formája és módja alapján megkülönböztetünk autotróf és heterotróf élőlényeket.

III./1.1. Felépítő folyamatok

A felépítő folyamatokat idegen szóval asszimilációnak nevezzük, ilyenkor, függően attól, hogy autotróf vagy heterotróf élőlényekkel állunk szemben különbséget kell tennünk a felépítő folyamatok lefolyását illetően.

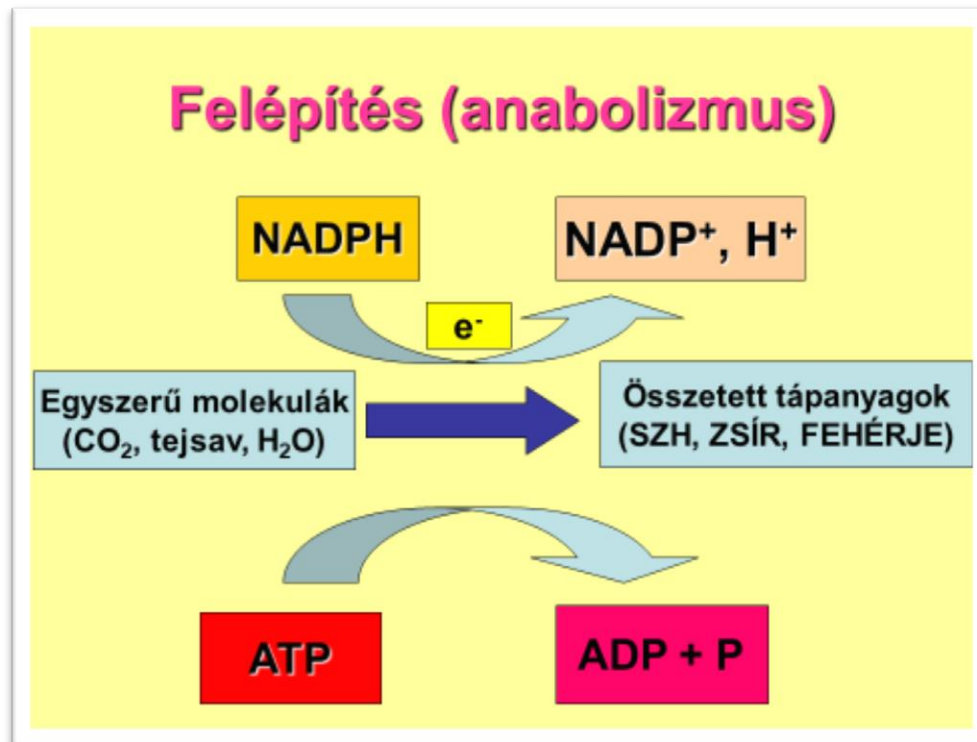
1. Autotróf élőlények esetében:

A kis energiatartalmú szerves vegyületekből → nagy energia tartalmú szerves vegyületek épülnek fel. A beépült energia külső energiaforrásból származik, fotoszintézis vagy kemoszintézis révén. Az ATP-ben raktározott energia felhasználásával építik fel a sejtek a szerves vegyületeket.

2. Heterotrof élőlények esetében:

Az idegen, külső nagy energiatartalmú szerves vegyületből → saját nagy energia tartalmú szerves vegyületek épülnek fel. A felépítéshez szükséges energia szintén ATP-ből, de saját belső forrásból származik.

Mindkét felépítő folyamatra jellemző, hogy kis energia tartalmú szerves vegyületekből szerves nagy energiatartalmú makrovegyületek képződnek. Ezek a folyamatok mindig elektron felvétellel járó **redukciót** jelentenek, és a hidrogén (proton és elektron) szállító a NADP⁺ koenzim. A felépítő folyamatok tehát mindig energiaigényes folyamatok, vagyis **endotermek**.

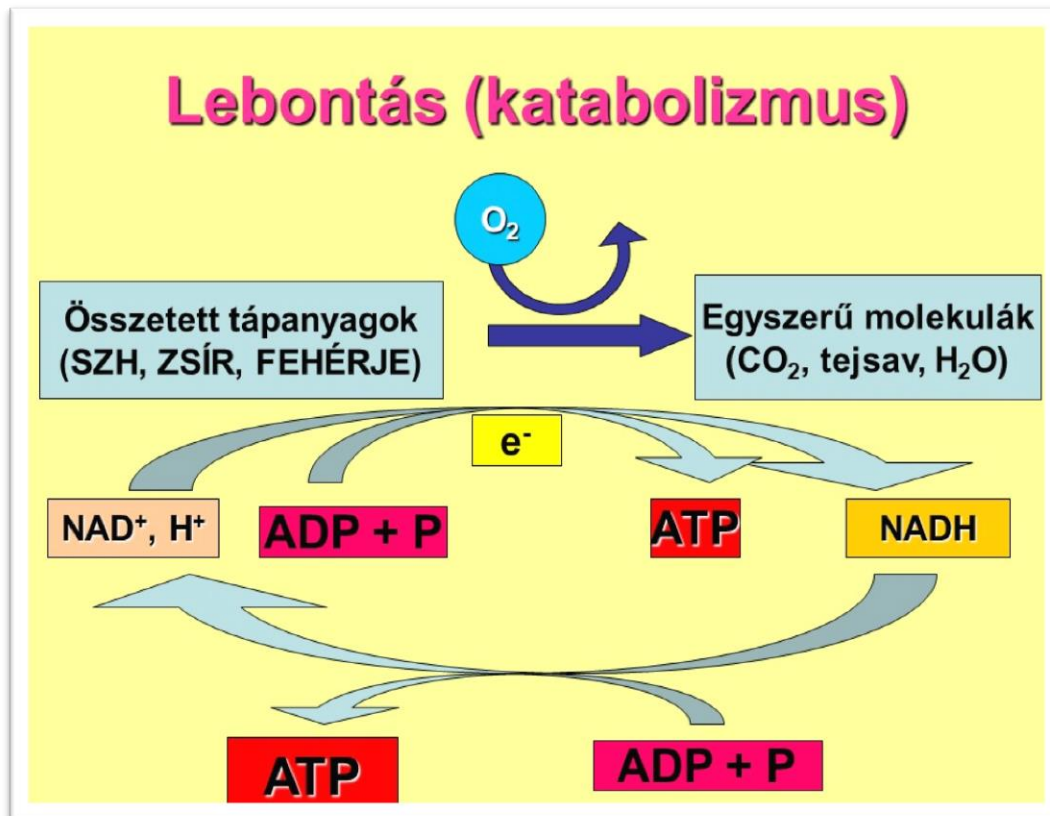


1. ábra A felépítő folyamatok sémájának bemutatása. (saját szerkesztés)

III./1.2. Lebontó folyamatok

A lebontó folyamatokat idegen szóval disszimilációnak nevezzük, ezekben az esetekben egy nagy energetikai potenciállal rendelkező vegyületből a lebontás során több kis energiatartalmú vegyülethez jutunk, miközben a kiindulási és a végtermékek közti energia különbséget többnyire ATP formájában kötjük meg.

A lebontó folyamatok többnyire elektron leadással járó **oxidációt** jelentenek. A hidrogén (proton és elektron) szállító koenzim lehet NAD⁺, FAD⁺ is a folyamatot katalizáló enzim függvényében. Ezeket a folyamatokat mivel oxigén jelenlétében zajlanak le, aerob folyamatoknak nevezzük. Azonban a lebontó folyamatoknak van egy másik formája, - amire csak a szénhidrátok lebontásánál van lehetőség -, amely oxigén hiányos, vagyis anaerob körülmények között zajlik le. Ebben az esetben nem beszélhetünk oxidációról, így ez is **redukció**. Ezekben az esetekben a lebontási köztitermék - például tejsav - még jelentős energiatartalommal bír, csak oxigén hiányában ezt nem tudjuk teljes mértékben hasznosítani. A lebontó folyamatok tehát mindig energia felszabadítással járó folyamatok, vagyis **exotermek**. A lebontás során tehát energia szabadul fel, amelyet többnyire ATP-ben tárolunk. Az ATP keletkezésének több formája létezik:



2. ábra A lebontó folyamatok sémájának bemutatása. (saját szerkesztés)

1./ Szubsztrát-szintű ATP keletkezés.

Az egyik, egyszerűbb esetben, egy foszforsavat tartalmazó vegyületről leválik a foszforsav és hozzákapcsolódik az ADP molekulához. Ezt nevezük **szubsztrát-szintű foszforilációnak**.

2./ Oxidatív foszforiláció

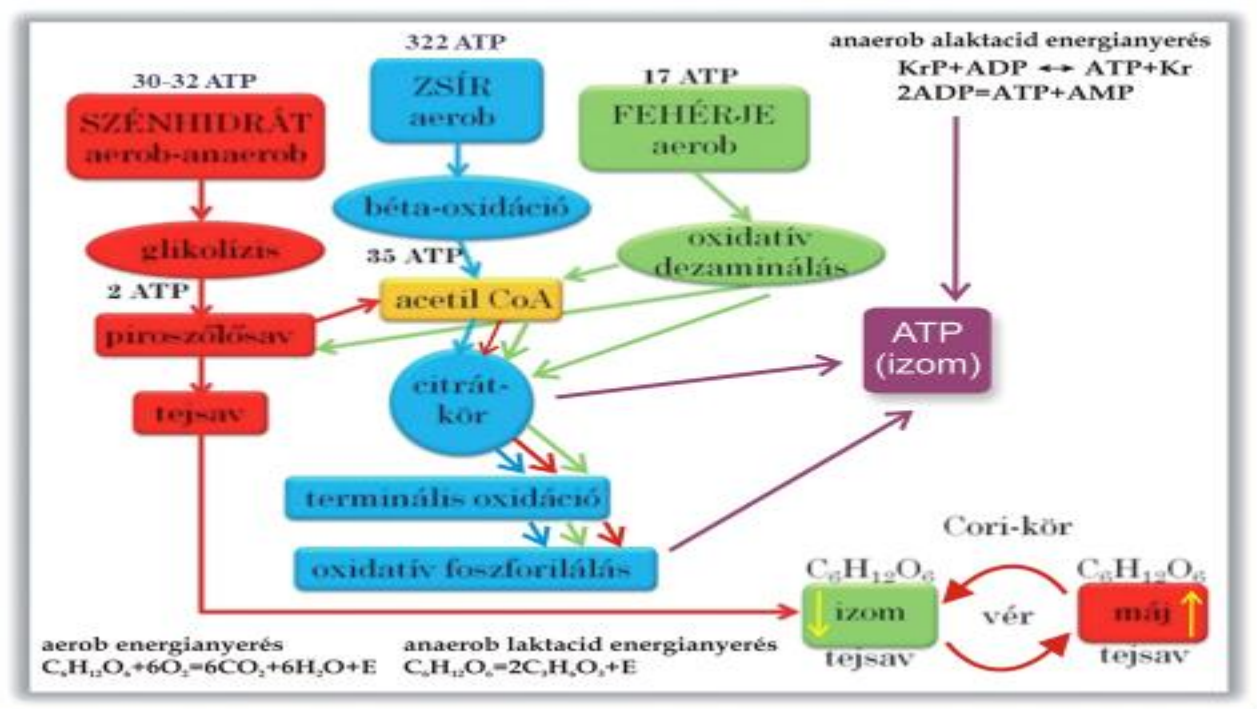
Ebben a jóval összetettebb esetben, a folyamatok során felszabaduló hidrogént NAD⁺ és FAD⁺ koenzim köti meg és fogja elszállítani a végső oxidációs folyamathoz, amit **oxidatív foszforilációnak** nevezünk. Ebben az esetben egy nagyon összetett többlépcsős folyamat során a tápanyagok hidrogénjét (proton és elektron) – amit a NAD⁺ és FAD⁺ szállít – eljuttatjuk a légzési oxigénhez. A két ion (hidrogén és oxigén) vízzé egyesül, amely folyamat során energia szabadul fel és indirekt módon (kemiozmozis), de ezt az energiát fordítjuk az ATP keletkezésére.

III./2. Az energianyerési folyamatok összefoglalása

Az energia-felszabadító folyamatok során tehát az energiában gazdag tápanyagok több lépcsőben, több helyszínen enzimek által katalizált reakciósorozatokon keresztül jutnak egyre kisebb energia tartalmú végtermékekké. A részfolyamatok közben egyrészt közvetlenül is keletkezik energiában gazdag ATP molekula, másrészt a tápanyagaink hidrogénjét hidrogénszállító koenzimek (NAD⁺, FAD⁺) kötik meg és szállítják, el a végső oxidáció színhelyére az ún. terminális oxidációhoz. Ezeket a folyamatokat mutatja be a 3. ábra. Az egyes tápanyagokat és a folyamatokat megjelenítő nyilakat eltérő színnel jelöltük. Az ábrából így kitűnik, hogy minden egyes tápanyag lebontásának első lépései önállóan zajlik le, míg



néhány lépés után két közös (citromsav-cilus, terminális oxidáció) folyamatba torkollanak bele.



3. ábra Az energianyerési folyamatok sematikus ábrája I. (saját szerkesztés)

III./2.1. A szénhidrátok lebontása

A szénhidrátok - például a hat szénatomos glukóz - lebontása a sejtek alapállományában kezdődik, első lépéseit nevezzük glikolízisnek. A tíz lépcsős **glikolízis** folyamata két részre bontható, az első lépés során két ATP befektetése során keletkezik két darab három szénatomos molekula, vagyis a lebontás első lépései energia-befektetéssel kezdődnek. Ettől a lépéstől kezdve a molekulaszám megduplázódik, hiszen a hat szénatomos glukózból két darab három szénatomos molekula keletkezett. Ettől a lépéstől kezdve már energiát (nettó 2 ATP) tudunk kinyerni a rendszerből. Ezeknek a folyamatoknak a végterméke a két molekula piroszőlősav, miközben a leváló hidrogéneket megköti a NAD^+ koenzim és keletkezik $NADH_2$ (pontosabban $NADH+H^+$).

Ennél a lépésnél, vagyis a piroszőlősav keletkezésétől, - függően attól, hogy van-e jelen megfelelő mennyiségű oxigén - ketté válik a reakció. A szénhidrátok lebontásának hatásfoka anaerob körülmények között 2 % körüli, aerob körülmények között 32 %.

Anaerob lebontás, (anaerob laktacid energianyerés)

Amennyiben nincs elegendő oxigén a folyamatok környezetében, - vagyis anaerob körülmények között – a **piroszőlősav** átalakul **tejsavvá** a folyamatban korábban keletkezett $NADH_2$ által szállított hidrogén megkötésével. Ezt a folyamatot nevezhetjük zsákutcának is, tekintettel arra, hogy kevés energia szabadul fel és a tejsavból leváló hidrogén savasítja a környezetét, ami csak korlátozott mértékig teszi lehetővé például a mozgást. Ez nagymértékben korlátozhatja a további energia kinyerését. Az így keletkezett tejsav még jelentős energiát tartalmaz, melynek kinyerése a Cori-kör segítségével valósul meg, amikor a tejsav vissza alakul glukózzá és újra lebontódhat.



Glukóz→2 tejsav+2 ATP

Aerob lebontás

Amennyiben van elegendő oxigén a folyamatok környezetében, - vagyis aerob körülmények között – a **piroszőlősav** tovább átalakul **acetilkoenzimA-vá** és a folyamat továbbiakban a citromsav-ciklusban (Szent-Györgyi-Krebs ciklus) folytatódik, melynek színtere már a mitokondriumok alapállománya. Ennek előnye, hogy egyrészt nem keletkezik tejsav, másrészt nem használódik el a NADH_2 . Ennek azért nagy a jelentősége az energianyerés szempontjából, mert minden egyes NADH_2 molekula, - amennyiben az általa szállított hidrogén el tud jutni a légzési oxigénhez - a **terminális oxidáció** folyamatában 2,5 ATP keletkezését teszi lehetővé molekulánként.



A citromsav-ciklusban, - mely mindhárom tápanyagunk közös második körfolyamata - a tápanyagaink szén atomjaiból CO_2 keletkezik, illetve még egy GTP (megfelel egy ATP-nek) molekula és a köztes vegyületek hidrogénjeit hidrogénszállító koenzimek kötik meg. Nevezetesen 3 NADH_2 és egy darab FADH_2 . A FADH_2 formájában szállított hidrogén, amennyiben el tud jutni a légzési oxigénhez – a **terminális oxidáció** folyamatában 1,5 ATP keletkezését teszi lehetővé molekulánként.



Tápanyagaink hidrogénjei, tehát, amennyiben van jelen elegendő oxigén, a végső un. **terminális oxidáció** folyamatában alakulnak át H_2O molekulává, miközben lépcsőzetesen energia szabadul fel, amit a mitokondriumok membrán közti terében található enzimrendszer révén ATP előállítására használunk fel. (Mitchell-féle kemiozmozis)

Összefoglalóan tehát elmondható, hogy a szénhidrátok lebontása során - függően attól, hogy mennyi oxigén áll rendelkezésre – két féle úton tudunk ATP-t előállítani.

1./ **Aerob módon** a glikolízis, a citromsav-ciklus, és a terminális oxidáció folyamatában. Ebben az esetben összességében 30-32 ATP nyerhető ki egy molekula glukózra vonatkoztatva.

2./ **Anaerob módon** a glikolízis végtermékének a piroszőlősav tejsavvá alakításakor. Ebben az esetben 2 ATP nyerhető ki egy molekula glukózra vonatkoztatva.

A főleg régebbi tankönyvekben eltérő értéket olvashatunk a különböző tápanyagok lebontása során felszabaduló ATP számát illetően. Ez az érték, az un. P/O hányadosból számolható ki, vagyis az ATP molekulába beépített foszfát (P) csoportok számát osztjuk – a keletkezéshez szükséges - egy oxigén (O) atomra vonatkoztatva. Régebben a NADH_2 –re vonatkoztatva 3 ATP, míg a FADH_2 –re 2 ATP-t számoltunk, az újabb kísérleti bizonyítékok alapján – függően attól, hogy milyen útvonalon történik a lebontás - ez kisebb számú ATP keletkezését jelenti. Ezért a bemutatott értékek NADH_2 esetében 2,5 ATP, míg FADH_2 esetében 1,5 ATP-vel lettek kiszámolva.

A fentiekből látható, hogy a szénhidrátok lebontása nagyon jó hatásfokkal (kb 32%) működik, és csak a szénhidrátok esetében, de lehetőségünk van oxigénhiányos környezetben is az energia kinyerésére. Erre az ad lehetőséget, hogy a glukóz molekulában a hidrogének és az



oxigén aránya hasonló. Azt is megfigyelhetjük, hogy az aerob és az anaerob szénhidrát lebontás energiamérlege között közel 15x a különbség.

III./2.2. Zsírok lebontása

A zsírok, - amelyek önmagukban is összetett vegyületek – glicerinből és 3 zsírsav molekulából állnak. Felépítésükre jellemző, hogy nagyon sok C atomot, nagyon sok hidrogént tartalmaznak viszont csak minimális számú oxigént. Ebből következik, hogy a zsírokat csak oxigén dús környezetben tudjuk lebontani.

A zsírok lebontását a lipáz enzim végzi és bontja glicerinre és zsírsavakra. A zsírsavak magas szénatom számú molekulák, így ezek bejuttatása a további lebontás színhelyére a mitokondrium alapállományába a karnitin molekula segítségével valósul meg (Carnitin-ciklus). A zsírsavak lebontását **β-oxidációnak** nevezzük.

Ez egy öt lépcsős folyamat, melynek lépései: aktiválás, hidrogén elvonás, vízfelvétel, hidrogén elvonás, láncszakadás.

Az öt lépcsős folyamat során keletkezik egy molekula $FADH_2$, egy molekula $NADH_2$, egy molekula acetilkoenzimA és marad egy két C atommal kevesebbet tartalmazó zsírsav. A maradék zsírsavval ismét lejátszódik a folyamat és ez addig tart, míg a végén már csak 4 szénatomos zsírsav marad, amely az utolsó lépcsőben ketté válik és keletkezik 2 molekula acetilkoenzimA. Ez a lebontás első fázisa. Ezután a keletkezett hidrogénszállító koenzimek ($FADH_2$ és $NADH_2$) tovább viszik a hidrogéneket a szénhidrátok lebontásánál már említett terminális oxidáció folyamatához. A minden egyes lépéssorozatnál keletkezett acetilkoenzimA pedig belép a közös útvonalnak tekinthető citromsav-ciklusba, ahol a korábbiakban a szénhidrátok aerob lebontásánál említett folyamatok játszódnak le.

Összefoglalva tehát: β-oxidáció, citromsav-ciklus, terminális oxidáció. A végtermékek ebben az esetben is CO_2 és H_2O .

A zsír lebontás energiamérlegét tekintve majdnem 10x az energianyerés a szénhidrátok aerob módját és majd 200x az anaerob módot tekintve. A palmitinsavakból ($C_{16}H_{32}O_2$) álló zsír ($C_{51}H_{98}O_6$) esetében tehát a kinyerhető energia mennyisége 322 ATP. A hátránya, hogy a zsírokat csak oxigén jelenlétében tudja a szervezet lebontani. A zsírsavakból kinyerhető energia hatásfoka – függően a zsírsav fajtájától – kb. 34 %, de ehhez kb 10%-al több oxigénre van szükség.

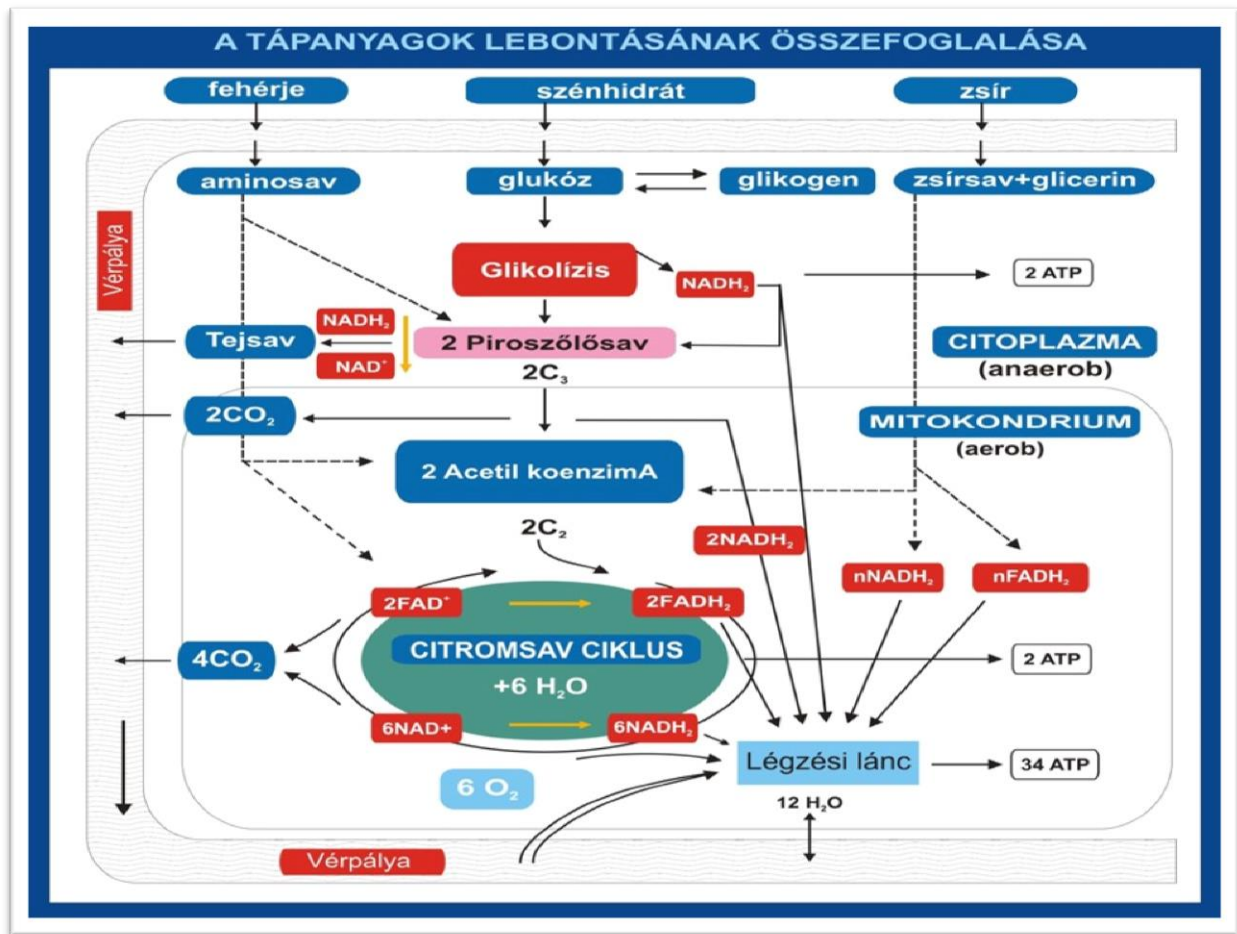
III./2.3. Fehérjék lebontása

A fehérjék feladata nem elsősorban az energianyerés, de éhezéskor és az erős fizikai igénybevételnél részt tudnak venni az energiaszolgáltató folyamatokban. A fehérjék aminosavakból állnak, az aminosavak szerkezetüket tekintve nagyon hasonló molekulák, mint a citromsav-ciklusban található vegyületek. Lebontás első lépése így három lehetséges úton tud bekapcsolódni a közös útvonalba, vagyis a citromsav-ciklusba és végül a terminális oxidációba.

1./ bizonyos aminosavak amino csoport (NH_2) vesztés – **dezaminálás** – vagy gyökcseréjén át alakulhatnak piroszölősavvá, amely a már említett folyamatokon keresztül alakul tovább. Erre jó példa az **alanin** → **piroszölősav** átalakulás, és innentől kezdve a piroszölősav már be tud lépni a citromsav-ciklus folyamatába.

2./ bizonyos aminosavak át tudnak alakulni acetilkoenzimA-vá (**lizin** → **acetilkoenzimA**) és szintén a citromsav-ciklusba belépve majd a terminális oxidáción keresztül vehetnek részt az energia-felszabadító folyamatokban.

3./ a citromsav-ciklus bizonyos vegyületein keresztül lépnek be ebbe a folyamatba. például **glutaminsav** → **α-ketoglutarát** átalakulás.



4. ábra Az energianyerési folyamatok sematikus bemutatása II. (saját szerkesztés)

III./3. Az energiaszolgáltató rendszerek jellemzőinek leírása, az energianyerés fajtái a fizikai aktivitás ideje és intenzitásának függvényében

A fizikai aktivitás megkezdésekor az izomsejtben tartalékoltnagyenergiájú foszforvegyületek (ATP és kreatinfoszfát) csak rövid ideig biztosítják az „üzemanyagot”, így a tevékenység terjedelme és intenzitása limitált. Ebben az esetben a terhelés intenzitása maximális 90-100% lehet és ilyen intenzitás mellett kb. 10-12 másodpercig tarthat. Ezen körülmények között percnként az energia felszabadulás kb. 370 KJ. Ha a terhelés időtartamát növelni szeretnénk, mindenképpen csökkenteni kell valamelyest az intenzitást. Az elhasználandó ATP - amely az izomműködés számára az egyedüli energiaforrás - biztosításhoz működésbe lép a kreatinfoszfát ADP átalakulás, illetve a miokináz enzim aktiválta 2ADP-ből való limitált ATP átalakulás. A további nagy intenzitású terhelés így behatárolt. A terhelés időtartamának növelése már csak az intenzitás jelentős csökkenése mellett lehetséges. Ebben az esetben döntően az energiát elsősorban a szénhidrátok lebontásának oxigén nélküli formája - anaerob glikolízis - biztosítja. Ilyen körülmények között a percnkénti energiakinyerés kb. 200 KJ. Az ilyen mértékű terhelés 2-5 percig tarthat és a megnövekedett tejsav termelés következtében fellépő acidózis limitálja. A még hosszabb idejű terhelés esetén az intenzitást mindenképpen csökkenteni (60-80%) kell és a megnövekedett energiaigényt, kezdetben a szénhidrátok majd



később a zsír oxigénes, aerob lebontása biztosítja, a jól ismert Szent-Györgyi-Krebs ciklus és a terminális oxidációban végbemenő folyamatok alapján. Ebben az esetben a kinyerhető energia mennyisége percenként kb. 125 KJ.

Elmondható tehát, hogy minél nagyobb a fizikai terhelés intenzitása, annál kevesebb lehetőségünk van az energia nyeresre - ezt viszont gyorsan elérhetjük. És ahogy csökkentjük a terhelés intenzitását, úgy növelhetjük az időtartamát, és egyre több lehetőségünk van – bár lassabban az energianyeresre.

Az eddigiekből következik tehát, hogy a különböző energianyeresi folyamatokat két nagy csoportba oszthatjuk, egyrészt az oxigén nélküli anaerob és az oxigén melletti aerob energianyeresre. Az anaerob energianyeresen belül is megkülönböztetünk anaerob alaktacid, és anaerob laktacid energianyeresét. Az aerob folyamatokat pedig aszerint csoportosíthatjuk, hogy szénhidrátból, zsírokból vagy esetleg fehérjékből nyerjük döntően az energiát. A különböző energianyeresi folyamatok között a kinyerhető energia mennyiségében és gyorsaságában is nagyságrendi a különbség.

A szénhidrát lebontását vizsgálva azt látjuk, hogy a hat szénatomos glükózból 2 ATP-nyi energia befektetésével 2 molekula 3 szénatomos piroszőlősav keletkezik és a kinyerhető energia 2 hasznos ATP. Ezután a folyamat a rendelkezésre álló oxigén mennyiségétől függően ketté válik. (Pasteur hatás). Amennyiben kevés a rendelkezésre álló oxigén mennyisége a piroszőlősav átalakul tejsavvá, hogy szabaddá tegye a glikolízisben korábban redukálódott hidrogénszállító koenzimet a NAD^+ -t. Ez tulajdonképpen a lebontás látszólagos zsákutcája, egyrészt mert feláldozunk egy NADH_2 molekulát, ami az energia felszabadító folyamatok szempontjából teljes oxidációt (terminális oxidáció) feltételezve 2,5 hasznos ATP keletkezését jelentené, másrészt tejsav keletkezik, ami később acidózist, vagyis savasodást eredményezhet az izomban, majd a vérben is. De meg kell hoznunk ezt az áldozatot, hogy gyorsan jussunk újabb – bár kevés – energiához. Ez az úgynevezett **anaerob laktacid** folyamat a sejtek alapállományában a citoplazmában játszódik le.

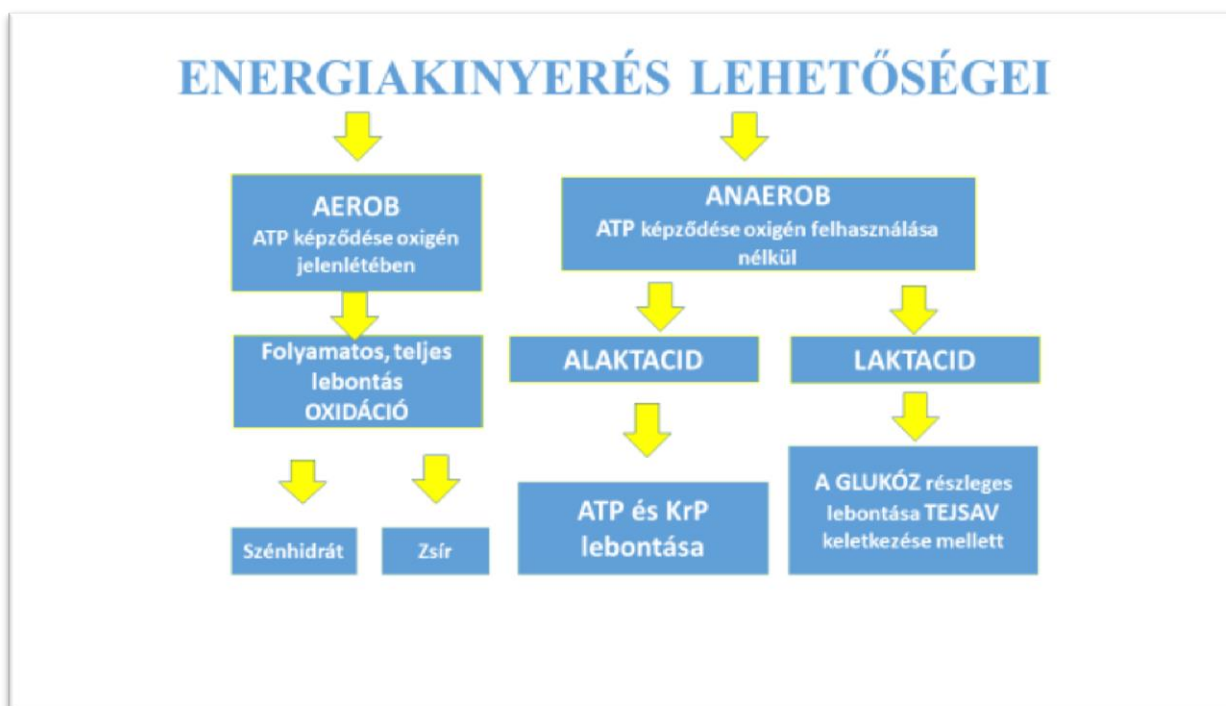
Elegendő oxigén jelenlétében a piroszőlősavból CO_2 vesztés közben és a koenzimA segítségével, acetilkoenzimA képződik. Ez a folyamat már a sejtek mitokondriumában játszódik le, hiszen itt állnak rendelkezésre azok az enzimek, amelyek lehetővé teszik ezeket a folyamatokat. Az acetilkoenzimA molekula belépve a Szent-Györgyi-Krebs ciklusba két molekula CO_2 -t és 4 molekula hidrogénszállító koenzim (3NADH_2 és 1FADH_2) kialakulást eredményezi. Ebben a folyamatban keletkezik még egy molekula GTP is, ami energia szempontjából egy ATP-nek felel meg.

A képződött szén-dioxid a tüdőn keresztül távozik a szervezetből, míg a hidrogénszállító molekulák (NADH_2 , FADH_2) a mitokondrium membránja közötti térben lejátszódó terminális oxidáció folyamatába kerül. Itt a vas és réz tartalmú citokróm rendszerek segítségével a hidrogén és annak elektronja eljut a légzési oxigénhez és H_2O keletkezik. A szervezet által felvett légzési oxigén fizikai terhelés során majd 90 %-a itt hasznosul. A kémiaiag nagyon bonyolult többlépcsős folyamatban fokozatosan felszabaduló energia következtében a hidrogén ionok egy része bepumpálódik a membrán közötti térbe. A membrán két oldalán ezért hidrogén ion különbség és pH különbség jön létre. (Mitchell-féle kemiozmozis). Amikor ez, a membrán két oldalán kialakuló nagyfokú potenciál különbség az ATP-szintetáz enzim segítségével kiegyenlítődik, ekkor ADP-ből és foszforsavból ATP szintetizálódik. Egy molekula NADH_2 -ből 2,5 ATP, míg egy molekula FADH_2 -ből 1,5 ATP keletkezhet. Ez a bemutatott folyamat az aerob energianyeres útja szénhidrátok esetében.



Mind a szénhidrátok, a zsírok, és a fehérjék lebontásakor is keletkezhet acetilkoenzima molekula, ami belépve a Szent-Györgyi-Krebs ciklusba – innen már azonos útvonalon – a terminális oxidáción keresztül H_2O keletkezése mellett eredményezhet sokkal több ATP-t, mint amit anaerob körülmények között nyerhetünk.

A nagyfokú terhelés után - nyugalomban vagy kisebb intenzitású terheléskor - felszaporodott tejsav a keringés és a légzés helyreálltakor a Cori-kör folyamatában a vér segítségével az izomból visszakerül a májba, ahol 1/6-nyi részének teljes oxidációja során felszabaduló energia segítségével a maradék 5/6 része visszaalakul glukózzá. A glukóz a vér segítségével ismét eljuthat az izomba és biztosítja az újabb terheléshez szükséges energiát. Ehhez hasonló folyamat segítségével aminosavakból is szintetizálható glukóz. (Alanin-ciklus)



5. ábra Az energianyerés lehetőségeinek összefoglalása (saját szerkesztés)

III./4. Összefoglalás

Az emberi szervezet működéséhez energia szükséges. Energiára van szükségünk a mozgáshoz, a megfelelő belső hőmérséklet biztosításához, a transzport folyamatokhoz, a különböző anyagok bioszintéziséhez. A szervrendszerek adaptációs sajátosságai mellett elengedhetetlen az anyag- és energiafoglalom vizsgálata. Az energianyerést, a munkavégzést elegendő oxigén rendelkezésre állása esetén döntően az *aerob*, míg a szükségesnél kevesebb oxigén esetén döntően az *anaerob* energianyerési utak teszik lehetővé. Ezeket a lehetséges energianyerési útvonalakat mutattuk be ebben a fejezetben, hiszen a különböző intenzitású erőfelfejtéseket vizsgáló eljárások megfelelő értelmezésére csak az energiaszolgáltató folyamatok ismeretében lehetséges.

Kulcsszavak: anyagcsere, felépítő,- lebontó folyamatok, ATP, szénhidrátok lebontás, glikolízis, citromsav ciklus, terminális oxidáció, zsírok lebontása, β -oxidáció, energiamérleg



III./4.1. Ellenőrző kérdések

1. Mit jelent, ha egy folyamat aerob, példával?
2. Mi a glikolízis kiindulási és végterméke, energiamérlege?
3. Hány féle módon lehetséges a szénhidrátok lebontása?
4. Mit jelent, ha egy folyamat anaerob, példával?
5. Mit jelent, ha egy folyamat aerob, példával?
6. A sejt melyik részében játszódik le a glikolízis?
7. Hány mol ATP-nyi energia szabadul fel a szénhidrátok anaerob lebontása során egy mol glukózból kiindulva?
8. Hány mol ATP-nyi energia szabadul fel egy mol glukóz aerob lebontása során?
9. Mivé alakul a piroszölősav oxigén jelenlétében?
10. Hány mol NADH₂ keletkezik egy mol acetilkoenzimA, citrátkörbe való belépése után?
11. Hány mol FADH₂ keletkezik egy mol acetilkoenzimA citrátkörbe belépése után?
12. Milyen folyamatban keletkezhet GTP molekula, szerepe?
13. A sejt melyik részében játszódik le a citrát ciklus?
14. Hány mol ATP-nyi energia szabadul fel egy molekula acetilkoenzimA-nak a citrát-körbe való belépése után teljes oxidációt feltételezve?
15. Mit jelent a terminális oxidáció kifejezés, szerepe, hol játszódik le?
16. Mit jelent az oxidatív foszforilálás kifejezés, szerepe, hol játszódik le?
17. Mi a szerepe a Cori-körnek, hol játszódik le?
18. Mik azok a citokrom enzimek?
19. Milyen folyamatokhoz szolgáltat alapanyagot a glukóz direkt oxidációja?
20. Melyik szervek között játszódik le a Cori-kör?
21. Az aerob szénhidrátlebontás előnyei, hátrányai?
22. Az anaerob szénhidrát lebontás előnyei, hátrányai?
23. Mit jelent az asszimiláció és mi a szerepe?
24. Mit jelent a disszimiláció és mi a szerepe?
25. Mit jelent a kemiozmosis, hol játszódik le és mi a szerepe?
26. Minek a révén keletkezik az ATP a kemiozmosis kapcsán?
27. Melyik az az enzim, amelyik bontja a zsírokat?
28. Mire bontja a zsírokat a lipáz nevű enzim?
29. Hol játszódik le a β -oxidáció szerepe, lépései?
30. Hogyan számoljuk ki a β -oxidáció energia mérlegét?
31. Egy 16-szénatomos zsírsavakból álló zsír molekula teljes lebontásakor kinyerhető energia mennyisége?
32. Az energia mértékegysége?
33. Mi befolyásolja a sportmozgások során az energia-felhasználás mértékét?
34. A tápanyagok lebontása során mennyi ATP szabadulhat fel molekulánként?
35. A három alaptápanyagunk energia értéke grammonként?
36. Mekkora energia szabadul fel az ATP egy-egy foszforsavjának lehasadásakor?
37. Mit jelent, ha egy folyamat anaerob alaktacid és mennyi energia szabadulhat fel ilyen folyamatokban percenként?
38. Mit jelent, ha egy folyamat anaerob laktacid és mennyi energia szabadulhat fel ilyen folyamatokban percenként?
39. Mit jelent az asszimiláció és mi a szerepe?
40. Mit jelent a disszimiláció és mi a szerepe?



III./4.2. Tesztkérdések

1. Melyik folyamat játszódik le a mitokondriumok plazma állományában?
A/ anaerob glikolízis
B/ ATP szintézis
C/ terminális oxidáció
D/ citromsav ciklus
E/ mindegyik
2. Az anaerob glikolízis révén kinyerhető energia, amennyiben glukózból indulunk ki?
A/ 15 ATP
B/ 12 ATP
C/ 24 ATP
D/ 38 ATP
E/ 2 ATP
3. A citromsav ciklusban hidrogénátvivő lehet?
A/ NADP⁺
B/ NAD⁺
C/ FADP⁺
D/ koenzimA
E/ B és C együtt,
F/ A és C együtt
4. Az aerob szénhidrát lebontás előnye
A/ a tejsav felszabadulása
B/ a sok kinyerhető energia
C/ a gyors energianyerés
5. Aerob szénhidrát lebontás során felszabadul
A: 390 ATP
B: 30-32 ATP
C: 2 ATP
D: 42 ATP
6. Mivé alakul a piroszőlősav oxigén jelenlétében?
A/ acetilkoenzimA
B/ tejsav
C/ NADH₂
D/ citromsav
7. A β -oxidáció lépései és sorrendje
A/ aktiválás, dehidrogénezés, víz felvétel, dehidrogénezés, láncszakadás
B/ aktiválás, dekarboxileződés, vízfelvétel, dekarboxileződés, láncszakadás
C/ dezaminálás, transzaminálás, vízfelvétel, transzaminálás, láncszakadás
D/ aktiválás, hidrogénezés, vízleadás, hidrogénezés, láncszakadás



IV. Irodalomjegyzék

Kötelező irodalom:

1. Dr. Györe Ágota: Biokémia, TF egyetemi jegyzet
2. Dr. Szóts Gábor (Szerk.): Biokémia, TF egyetemi jegyzet
3. Előadások anyaga

Ajánlott irodalom:

1. Ádám Veronika, Faragó Anna, Machovich Raymond, Mandl József: Orvosi biokémia, Semmelweis Kiadó, 2016,
2. Wildor Hollman: Sportmedizin, Schattauer Kiadó, 2009,
3. Don MacLaren: Biochemistry for Sport and Exercise Metabolism, Wiley-Blackwell Kiadó, 2012,
4. Horst de Marées: Sportphysiologie, Sport und Buch Strauss Kiadó 2017,
5. Jürgen Weineck: Sportbiologie, Spitta Kiadó 2010,
6. Hermann Heck: Energiestoffwechsel und medizinische Leistungsdiagnostik, Hofmann-Verlag Schorndorf, 1990,
7. Középiskolai kémia, biológia könyvek