

Bősze Péter, Lippai Mónika

Magyarul is megy?

Az alábbi szövegcsiszolás eltér a szokványostól. Az idézett mondatoknak nem a helytelenségeit vesszük górcső alá; nem az irány kérdéseivel foglalkozunk, hanem azt vizsgáljuk, hogy az idegen nevezetek javasolt magyar megfelelői alkalmazhatók-e a magyar szövegezésben. A magyarítás nem önmagáért való; a javasolt magyar nevezetek csak akkor helytállóak, ha gördülékenyen beilleszkednek a magyar mondatokba, a szakmai magyarázatokban teljességgel használhatók. Ebben az összeállításban a vegytan területéről választottunk három, lépten-nyomon és nem csak a vegytanban használt nevezetet.

OXIDATION, REDUCTION, OXIDOREDUCTION (REDOX)

oxidation (oxidáció) kifejezésnek csak nevében van köze az oxigénhez, eredetileg ugyanis azonosították az oxigénfelvétellel, valamely atom/molekula oxigénnel vegyülésével. Az égési folyamatok mind ide tartoznak, ilyenkor oxidok keletkeznek. Például magnéziumból égetéssel (hőkezeléssel) magnézium-oxid keletkezik, és energia szabadul fel.

Később a hidrogénnel hozták összefüggésbe: oxidation = hidrogénleadás, ami voltaképpen protonátadás, miközben 1 elektron szabadul fel. (→hidrogén)

Az *oxidation* folyamat lényege az elektronleadás; ez bármely vegyi folyamatban végbemehet, tehát oxigén nélkül is. Leginkább hidrogénleadással valósul meg. Az oxidation elnevezés azonban megmaradt. Magyarul *elektronleadás*nak nevezzük. (→elektronleadás)

Az oxigén jelenlétében végbemenő elektronleadást a szakirodalom *égés*nek nevezi.

égés vegytani fogalomként éghető anyagok vegyfolyamata oxigén felhasználásával. Lényege az oxigén elektronleadása.

reduction (redukció) az oxidation ellentett folyamata, például magnézium-oxidból energia hozzáadásával magnézium keletkezik, azaz visszanyerjük a magnéziumot. Ezért nevezik *reduction*nak, ami a latin *reductio* (visszanyerés) szóból származik.

A reduction folyamat lényege az elektronfelvétel; a magyar elnevezése is *elektronfelvétel*.

oxidoreduction (más néven *redox*) az oxidation és a reduction együttes végbemenetele. A vegyfolyamatokban a kettő mindig együtt zajlik le: az egyik atom/molekula/ion átad, a másik átvesz elektront. Az oxidation és a reduction az oxidoreductionnak tehát egy-egy részfolyamata;

vegyfolyamatban külön egyik sem létezik. Például a magnézium-oxid keletkezésekor 2 magnézium 4 elektront ad le (oxidation), 2 Mg^{2+} keletkezik. Az oxigén 4 elektront vesz fel (reduction), 2 O^{2-} jön létre. Ezek egyesülnek magnézium-oxiddá.

Az oxidoreduction folyamatában tehát elektronátadás/-átvételtől van szó, magyarul egyszerűen elektronátmenet a neve.

oxidation number (oxidation state) azoknak az elektronoknak a száma, amelyeket egy atom másik atommal kötésében felvesz vagy lead. A kötésben részt vevő atomok mindegyikéhez tartozik egy oxidation number. Például a vasatom (Fe) esetében az oxidation number lehet +3, ha Fe^{3+} formában létesít kötést, azaz 3 elektront kell felvennie a kötés létrehozásához. De lehet +2 is, ha Fe^{2+} -ionként létesít kötést. Az O^{2-} száma -2; azt jelzi, hogy 2 elektront ad le a kötésben. Az elnevezésben ellentmondás van, mert az oxidation elektronleadást jelent, de az oxidation number fogalmába az elektronleadás és az elektronfelvétel is beletartozik. Az elektronleadhatóság és -felvehetőség voltaképpen az elektronság, ezért *elektronsági szám*¹ lehet a magyar megfelelő. Ekként nincs benne ellentmondás.

A hazai szakirodalomban ezek a szakszavak magyarosan írva (*oxidáció, redukció, oxidoredukció*) terjedtek el, ekként használják őket. Sőt, számos változat is használatos:

oxidál: elektront ad le

oxidáló: elektronleadásra készítő

oxidálódik: elektronhiányossá válik; veszít (ad le) elektront

oxidált: elektronhiányos, elektronvesztett

oxidálószer: elektronelvonó szer

oxidációs szám: elektronsági szám

redukál: elektront vesz fel

redukáló: elektronfelvétellel készítő

redukálódik: elektrontöbblet lesz

redukált: elektrontöbblet

redukálószer: elektronátadó szer

redox ciklus: elektronátmenet-kör

redoxpár: elektronátmenet-pár

redoxipotenciál: elektronátmenetség

antioxidáns: elektronleadás-gátló, gyökfogó

A példákat a hazai szakirodalomból vettük azzal a szándékkal, hogy az oxidáció, redukció szó és származékaik helyettesíthetők-e a javasolt magyar megfelelővel.

Példák:

▪ „A redukció és az oxidáció folyamata mindig együtt játszódik le, ezért is hívják az elektronátadással járó folyamatokat redoxireakcióknak. [...] Minden redoxireakcióhoz egymásnak megfelelő redoxipárok tartoznak...”

▪ Az elektronleadás és az elektronfelvétel folyamata mindig együtt játszódik le, ezért is nevezzük ezeket elektronátmeneti folyamatoknak. Minden elektronátmenethez egymásnak megfelelő elektronleadó-felvevő párok tartoznak.

▪ „Redoxifolyamatoknak vagy redoxireakcióknak nevezzük azokat a kémiai reakciókat, melyek az *oxidációfok* (lásd: oxidációs szám) megváltozásával járnak. Ezekben a folyamatokban az egyik reakciópartner *felvesz*, a másik pedig *veszít*, *lead* elektronokat. Az elektront leadó partner *oxidálódik*, oxidációs száma nő. Ezek a reakciópartnerek a *redukálószerkek*. Az elektront felvevő partner *redukálódik*, oxidációs száma csökken. Ezek az *oxidálószerkek*.”

▪ Elektronátmeneti folyamatoknak nevezzük azokat a vegyefolyamatokat, amelyek az elektronsági szám megváltozásával járnak. A vegyefolyamat egyik tagja *felvesz*, a másik *lead*, *veszít* elektronokat. Az elektront leadó elektronhiányossá válik, nő az elektronági száma. Ezek a vegyefolyamati tagok az elektronleadó szerkek. Az elektronfelvevő tag elektrontöbblet lesz, csökken az elektronsági száma. Ezek az elektronátadó szerkek.

▪ „A *redoxpotenciál* az oxidáló (illetve redukálóképesség) mértéke, önmagában nem, csak más rendszerek *redoxpotenciáljához* képest értelmezhető: mindig a pozitívabb *redoxpotenciálú* rendszer képes oxidálni a negatívabbat. Általában, minél pozitívabb egy *redoxpotenciál*, annál oxidálódóbb a rendszer. A *redoxpotenciál* csak a redoxegyensúlyra ad felvilágosítást.”

▪ Az elektronátmenetség az elektronleadó/elektronfelvevő képesség mértéke, amely csak más rendszerek elektronátmenetségéhez viszonyítva értelmezhető, csak az elektronátmenet egyensúlyáról tájékoztat. A pozitívabb elektronátmenetségű rendszer ad át elektront a negatívabbnak. Általában minél pozitívabb az elektronátmenetség, a rendszer annál kifejezettebben ad át elektront.

▪ „Az élő szervezetekben számos oxidoreduktáz enzim (pl.: a NADH dehidrogenáz) kofaktora.”

▪ Az élő szervezetekben számos elektronfelvevő/-leadó enzim (például az NADH dehidrogenáz) tartozék csoportja.

▪ „Ez már önmagában jelentős energiahasznosítást jelent, de ehhez hozzáadódik még, hogy a NAD^+ -ot alkalmaz oxidálószerként, melynek redukációjával 2,5 ATP termeléséhez felhasználható NADH keletkezik.”

▪ Ez már önmagában jelentős energiahasznosítás, de hozzáadódik még, hogy NAD^+ -ot alkalmaz elektronelvonóként, amelyből az elektron felvételével 2,5 ATP termeléséhez felhasználható NADH keletkezik.

Egyszerűen: Ez már önmagában jelentős energiahasznosítás, amelyhez hozzáadódik még, hogy az elektront az NAD^+ veszi át, a keletkezett NADH pedig 2,5 ATP termeléséhez használható fel.

▪ „A cink és a sósav egyesülésekor cink-klorid és hidrogén keletkezik.”
...[A] cink erős sav hatására oxidálódik, míg a sav protonjai hidrogénné redukálódnak, amely gázként szabadul fel.”

▪ ...[A] cink erős sav hatására elektront ad le, míg a sav protonjai elektronfelvétellel hidrogénné alakulnak, amely gázként szabadul fel.

(Szembeszökően egyszerűbb, egyértelműbb a magyar nevezetekkel írt változat, és semmit nem von le a „szakmaiságból”.)

▪ „Fő szerepe az oxigénzállításban, a szövetek oxigénellátásában és a sejtek oxidációs folyamataiban van.”

▪ Fő szerepe az oxigénzállításban, a szövetek oxigénellátásában és a sejtek elektronátadási folyamataiban van.

▪ A piruvát oxidatív dekarboxilációja.

Megjegyzés. A dekarboxiláció a karboxilcsoport eltávolítása a molekuláról. Egyezményesen magyarosan mondjuk dekarboxilezéseként, hasonlóan, mint defoszforilezés, demetilezés stb. Természetesen karboxilcsoport-eltételnek vagy egyszerűen karboxilelvonásnak is nevezhetjük.

▪ A piruvát karboxilelvonása elektronleadással. A piruvát elektronvesztő dekarboxilezése.

▪ Oxidatív foszforiláció – *elektronátadással járó foszforilezés*.

▪ Redukált
redukált koenzimek – *elektrontöbblet társenzimek*

▪ Quinones are oxidized derivatives of aromatic compounds.

▪ A kinonok a gyűrűs vegyületek elektronleadással keletkezett termékei / elektronvesztett termékei.

▪ A fenolok oxidációra érzékenyek, már a levegő is lassan oxidálódnak.

▪ A fenolok hajlamosak elektronleadásra, már a levegővel érintkezve is képesek lassan elektronokat veszíteni.

▪ A folyamat β -oxidációval megy végbe.

▪ A folyamat β -elektronleadással megy végbe.

▪ NAD, NADP (nikotinsavamid-adenin-dinukleotid, nikotinsavamid-adenin-dinukleotid-foszfát) nukleotid felépítésű (D-ribózt és adenoizint tartalmazó) társenzim (nukleotid társenzim). Az NAD és az NADP is elektronátvevő enzimekkel (dehidrogenázok) társul, ezért nevezzük társenzimnek. Az elektronvesztett formákat NAD^+ , NADP^+ , az elektronfelvett formákat *NADH*, *NADPH* írással jelöljük. Az NAD^+ a biológiai folyamatok egyik legjelentősebb elektronfelvevő molekulája.

▪ Az NADH-t oxidálja – az NADH-ból elvon 2 elektront.

▪ NADH dehydrogenase is an enzyme that converts nicotinamide adenine dinucleotide (NAD) from its reduced form (NADH) to its oxidized form (NAD^+).

▪ Az NADH-dehidrogenáz olyan enzim, amely átalakítja a nikotinamid-adenin-dinukleotid (NAD) elektrontöbbletű formáját (NADH) elektronvesztett alakjává (NAD^+).

▪ Az Fe^{2+} -iont tartalmazó vas(II)-vegyületek redukáló tulajdonságúak (legerősebben lúgos közegben), könnyen oxidálódnak stabilabb vas(III)-vegyületekké. Bár a vas oxidációs száma vegyületeiben leggyakrabban +2 vagy +3, egyes vegyületeiben (a ferrátokban) a vas oxidációs száma +6 is lehet.

▪ Az Fe^{2+} -ionot tartalmazó vas(II)-vegyületek elektronfelvevő tulajdonságúak (legerősebben lúgos közegben), elektronfelvétellel könnyen alakulnak át állékonyabb vas(III)-vegyületekké. Bár a vas elektronsági száma a vegyületeiben leggyakrabban +2 vagy +3, egyes vegyületeiben (a ferrátokban) +6 is lehet.

▪ Oxidálószer: „Az elektront felvevő részecske (amelyik tehát redukálódik) a másik részecskétől vonja el az elektront, tehát oxidálja azt, vagyis oxidálószer. Az oxigén egy oxidálószer. A nagy elektronvonzó képességű atomok általában oxidálószer.”

▪ Elektronelvonó szer, egyszerűen elektronelvonó, olyan atom, amely elektront vesz el másik atomtól, elektrontöbbletté válik. A másik atomot elektronátadásra készíti, elektronhiányossá teszi. Az oxigén elektronelvonó szer. A nagy elektronvonzó képességű atomok általában elektronelvonó szer.

▪ Oxidative stress, magyarul *elektronártmány** kóros elektronvesztés, amit az okozhat, hogy szabadgyökök sokasodnak a sejtben, a sejt károsodik.

▪ Biological oxidation: a sejtben végbemenő elektronleadási folyamat (sejtlégzés).

▪ A *redoxpotenciál* az oxidáló (illetve redukálóképesség) mértéke, önmagában nem, csak más rendszerek *redoxpotenciáljához* képest értelmezhető: mindig a pozitívabb *redoxpotenciálú* rendszer képes oxidálni a negatívabbat. Általában, minél pozitívabb egy *redoxpotenciál*, annál oxidálóbb a rendszer.

A *potencia* jelentése valamiféle képesség, a *potenciál* valamiféle teljesítő képesség. A *redox* magyarul elektronátmenet, ekként a redoxpotenciál elektronátmeneti képesség, *elektronátmenet-készség*, egyszerűen: *elektronátmenetség*.

▪ Az *elektronátmenetség* az elektronleadó, illetve elektronfelvevő képesség mértéke, önmagában nem, csak más rendszerek elektronátmenetségéhez viszonyítva értelmezhető: mindig a pozitívabb elektronátmenetségű rendszer képes elektront átadni a negatívabbnak. Általában minél pozitívabb a rendszernek az elektronátmenetsége, annál több elektront ad át.

▪ A glutation képes oxigéntartalmú molekulák befogására, és felelős a sejtekben a megfelelő redoxipotenciál fenntartásáért.

▪ A glutation képes oxigéntartalmú molekulák befogására, biztosítva a sejtekben a megfelelő elektronátmenetség fenntartását.

▪ A redoxreakciónál az elektronok az egyik redoxipartner (donor) elektronhójaitól származnak, és a másik redoxipartner (akceptor) elektronhójára mennek át.

▪ Az elektronátmenet folyamataiban az elektronok az átadó vegylet elektronhójáról tevődnek át az elektronfelvevő vegylet elektronhójára.

ENZIMNEVEK

Az oxidation és a reduction szó szerepel vegyületek, enzimek nevében is. A vegyületek neveit az IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) tartja nyilván, határozza meg. A magyar nevezetek is az IUPAC-

nevezéktant követik. Ezeket az orvosi nyelvben is ekként használjuk. Például oxidázok, redukázok, oxidoreduktázok, peroxidázok stb.

▪ A biokémiában az oxidoreduktázok olyan enzimek, amelyek a H^+ és az elektronok átadásával katalizálják az oxidációs-redukciós reakciókat.

▪ A biokémiában az oxidoreduktázok olyan enzimek, amelyek a H^+ és az elektronok átadásával serkentik az elektronátmeneti folyamatokat.

▪ Monooxigenázok olyan reakciókat katalizálnak, amelyekben az egyik oxigénatom beépül az oxidálandó szubsztrátba, a másik pedig vízzel redukálódik.

A monooxigenázok által serkentett folyamatokban az egyik oxigénatom kötődik az elektronvesztő vegyletbe, a másik elektronfelvétellel vízzel alakul.

ÖSSZEGRZÉS

A példából megállapítható, hogy magyarul is megy. A magyar nevezetek nemcsak megfelelően helyettesítik az idegeneket, hanem mindenki számára egyértelműek, és nemegyszer pontosabbak is. Például az oxidációs szám fogalmába az elektronleadás és az elektronfelvétel is beletartozik, holott az oxidáció csak elektronátadást jelent. Az elektronsági szám elnevezés magában foglalja mind a kettőt. A magyarítás célja – az idegen szavak mellőzésén kívül – az egyszerű, egyértelmű fogalmazás.

Szembetűnő még, hogy a vegytan már túllépett az atomok, molekulák szintjén: részecskéikkel magyaráz.

MEGHATÁROZÁSOK A MAGYAR NEVEZETEK SZERINT

elektronleadás* (**elektronvesztés**) *oxidation* (oxidáció) atom, molekula vagy ion egy/több elektronjának leadása; az elektront leadó atom pozitív ionná válik; növekszik az elektronátmenet-száma. Vegyofolyamatban a leadott elektront másik atom, molekula, ion veszi fel; a folyamat csak így mehet végbe, vagyis elektronátmenet formájában. Az atom stb. egyébként az elektront magas hőmérséklet vagy egyéb energiaforrás, például foton hatására is leadhatja, és ionná válhat.

biológiai elektronleadás (**biológiai elektronvesztés**) *biological oxidation* a szervezetben végbemenő elektronleadás, a sejtek energiaátalakításának folyamatai, például →sejtlégzés.

elektronvesztés-gátlók, gyökfogók *antioxidants* (antioxidáns) elektronvesztési (szabadgyök-keletkezési) folyamatokat gátló molekulák, a szabadgyökszint egyensúlyállapotának megtartásában meghatározók. A sejtek elektronvesztés-gátló (gyökfogó) rendszere enzimekből és nem enzim molekulákból tevődik össze.

▪ A legjelentősebb elektronvesztés-gátló enzimek a szuperoxid-diszmutázok (SOD), a katalázok, a glutation-peroxidázok (GPx), a glutation-reduktázok (GR). A háromféle SOD (SOD1, SOD2,

SOD3) a szuperoxid-anion (O_2^-) oxigénmolekulává és hidrogén-peroxidá (H_2O_2) alakítását végzi, a hidrogén-peroxidot pedig a kataláz és a glutation-peroxidáz vízzé és oxigénmolekulává alakítja; az utóbbi folyamatban elektronhiányos glutation-diszulfid (GSSG) keletkezik, amelyet aztán a glutation-reduktáz az NADPH-tól vett hidrogénnel állít vissza glutationná. A glutation-peroxidáz és a glutation-reduktáz a glutation- (GSH-) enzimek családjába tartozik. Az SOD-k a fémionok (Cu és Mn) jelenlétében tevődnek.

- A nem enzim természetű gyökfogók közé tartozik a C-vitamin, az E-vitamin, az A-vitamin, a β -karotin és más karotinoidok, a szelénium, a cink, a taurin és a GSH. Ezeknek mind jelentős szerepük van a szabadgyökök egyensúly állapotának fenntartásában. A táplálékban (zöldségekben, gyümölcsökben stb.) lévő sokféle elektronvesztés-gátló közül csak három, az A-, a C- és az E-vitamin hatásos a szervezetben, a többi csak laboratóriumi vegyületekben akadályozza a szabadgyökök képződését.

elektronelvonó szer (oxidálószer) olyan vegyület, amelyik az elektronátmeneti folyamatban elektront vesz fel (elektron többletet vesz); az elektront másik vegyületből vonja el, az elektronhiányossá válik. Erős elektronelvonó szerek az oxigén, ózon, klór, fluor, bróm, hidrogén-peroxid (H_2O_2) stb. Az elektronelvonó szerek fertőtlenítő hatásúak.

elektronsági szám ^{*} *oxidation number, oxidation state* (oxidációs állapot, oxidációs szám) azoknak az elektronoknak a száma, amelyeket egy atom lead vagy felvesz ahhoz, hogy egy másik atomhoz kötődjék, elektronkötést hozzon létre. Azt fejezi ki, hogy az atom hány elektront leadására, cseréjére vagy felvételére képes az adott molekulában. Például a magnéziumatom elektronátadási száma majdnem mindig +2, mert Mg^{2+} -ion formájában 2 elektront vehet fel a kötés kialakítására; 2 elektron hiánya van. Hasonlóan, az oxigénatom elektronátadási száma általában -2, mert vegyületeiben legtöbbször 2 elektront adhat le. Az elektronsági számból tehát könnyen felismerhető, hogy az adott atom elektronátadóként vagy elektronfelvevőként vesz részt elektronátadási folyamatban.

Az ion elektronsági száma a töltésszáma. Az elem elektronsági száma = 0. A molekula és az ionvegyület elektronsági száma egyenlő az atomjai, illetve ionjai elektronsági számának összegével, például az Mg^{2+} és az O^{2-} egymással alkotott vegyületében az elektronsági számok összege: +2 és -2 = 0; azaz a vegyület elektronsemleges. Hasonlóan a magnézium-hidroxid ($Mg(OH)_2$) ionvegyület esetében: Mg^{2+} ($O^{2-}H^+$)₂ = +2 és -1 kétszer = 0. Az összetett ionok összetett elektronsági száma a töltésszámuk.

elektronfelvétel ^{*} *reduction* atom, molekula vagy ion által egy/több elektron felvétele, aminek következtében elektrontöbblettű atom/ion/molekula keletkezik. Az elektronátvételt az elektronleadás ellentéte, de annak folyománya: valamely atom, molekula vagy ion egy/több leadott elektronjának az átvétele.

elektronátmenet *oxidation-reduction [redox] reaction, oxidoreduction* (oxidoredukció, redoxifolyamat, redoxireakció) egy vagy több elektron átadása, átvétele egyetlen vegyületekben; elektronáramlás megy végbe. Az egyik molekula elektront ad le (oxidation) (elektronátadó molekula), a másik elektront vesz fel (reduction) (elektronfelvevő molekula).

Az elektronátadó atom pozitív (pozíon), az elektronfelvevő negatív (negion) töltésűvé válik. Például magnézium és oxigén vegyületek magnézium-oxid keletkezik (MgO), amely Mg^{2+} - és O^{2-} -ionokból álló ionvegyület. A magnézium ad át 2 elektront (oxidation), amit az

oxigén felvesz (reduction), majd a keletkezett ionok rácsálózatba rendeződve rögzült ionvegyületet formálnak.

Az elektronáramlással járó biológiai folyamatok létezésünk alapjai, a sejtműködéshez szükséges energia ezekkel képződik. A biológiai elektronátmeneti folyamatok rendszerint többlépcsősök, a molekulák változása rendkívül gyors egymásutánban megy végbe, és összetett. Miután az elektron legtöbbször nem önmagában, hanem proton kíséretében, azaz hidrogénatom formájában adódik át, ezért általában nincs lényeges töltésváltozás, például amikor a glükóz bontásában elektronok hidrogénatom formájában adódnak át az NAD-nak, nem lesz a „maradék” szénhidrát töltött.

elektronátmenetség *oxidation reduction potential, ORP* az elektronleadó/elektronfelvevő képesség mértéke, amit voltban (V) adunk meg, és ORP-vel jelölünk. Értéke mindig csak más rendszer elektronátmenetségéhez viszonyítva értelmezhető. Az elektronátmenet egyensúlyáról tájékoztat. A pozitívabb elektronátmenetségű rendszer ad át elektront a negatívabbnak. Minél pozitívabb a rendszer vagy szer ORP-értéke, annál kifejezettebben ad át elektront.

elektronelvonó más atomtól elektront átvevő atom. Ilyenek a nagy elektronvonzó képességű atomok, például jellemzően az oxigén. A sejtekben az egyik legjelentősebb elektronfelvevő az NAD^+ . Az oxigénnel végbemenő elektronelvonást a vegyészetben égésnek nevezzük.

elektronelvonó szer olyan anyag (készítmény), amely elektronelvonó anyagot tartalmaz.

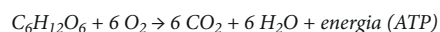
elektronátmenet ^{*} *oxidative stress* a szabadgyökök túlzott többlete a sejtben. Következése: sejtkárosodás. Keletkezhet a szabadgyökök fokozott képződése miatt, de a gyökélgátlók (antioxidánsok) hiányos tevékenységéből eredően is. Például az energiatermecszi szuperoxid-dizmutáz vagy a peroxibontacsban a katalázok csökkent működése miatt. (→szabadgyök)

égés éghető anyagok vegyületei oxigénnel.

durranógáz 2 rész hidrogénből (H_2) és 1 rész oxigénből (O_2) álló gázkeverék, amely robbanásveszélyes. A durranógáz vízzé alakul át (durranógáz-vegyülés).

sejtlégzés *cellular respiration* a sejtek energianyerése elektronátmenettel, és az energia elraktározása ATP-ben. A sejtek ugyanis bizonyos anyagok elektronleadással (égetés, oxidation) történő átalakításával képesek energiát nyerni, amit az ADP-nek ATP-vé alakítására használnak fel. Nevezik a sejtlégzést *biológiai égetésnek* (*biológiai elektronleadásnak*) is, illetve *elektronleadásos foszforilezésnek* (oxidative phosphorylation), mivel az elektronleadásból nyert energiából az ADP foszforileződik ATP-vé.

A sejtek szokásosan a glükóz (szőlőcukor, $C_6H_{12}O_6$) elektronleadással járó lebontásából keletkező energiát használják az ATP előállítására oxigén felhasználásával, miközben - végtermékként - szén-dioxid és víz keletkezik:



A szén-dioxid a kilégzéssel távozik; a víz a sejtben hasznosul, az energia az ADP-ATP átalakulásban használatos fel.

- A sejtlégzés az energiatermecszi belső hártájában megy végbe, szorosan kapcsolódva a hártaközi térrel és az alapállománnyal; elektronszállító részvételével.

■ A sejtlegzés vegyfeladata – rendre a cukor vízzé és szén-dioxiddá alakítása – négy lépésből áll; úgy mondjuk, hogy a sejtlegzésnek négy szakasza van:

- Első a cukorbontás (glikolízis): a szőlőcukor (glükóz) bontása piruváttá.

A szőlőcukor bontásának folyamatában 1 molekula glükózból 2 molekula piruvát lesz, miközben 2 NADH és 2 ATP keletkezik. (→glikolízis)

- A második a glükóz bontásából származó piruvát átalakulása acetyl-KoA-vá az energiatermecs alapállományában.

Ehhez a piruvátnak a sejtplazmából be kell jutnia az energiatermecsbe: a 3 szénatomos piruvátból 2 szénatomos acetát keletkezik, amely szállítóval, a koenzim-A-val (KoA) kötődik (acetyl-KoA) egy enzimhármassal, a piruvát-dehidrogenáz együttes közreműködésével. A levált szénatom CO_2 formájában a kilégzéssel távozik. A folyamat elektronleadással jár. Az elektront az NAD^+ veszi fel, $\text{NADH} + \text{H}^+$ keletkezik. Az acetyl-KoA csatlakozik a citrátkörhöz, társul az oxálacetáttal.

- A harmadik szakasz a citrátkör (Krebs-kör, Szent-Györgyi-Krebs-kör), amely energiatermelő körfolyamat, az anyagcsere-folyamatok sokaságában vesz részt, az energiatermecs alapállományában megy végbe. (→citrátkör)

- A negyedik szakasz a *végző elektronleadás** (terminal oxidation), amelyben a sejtlegzés első három szakaszában keletkezett $\text{NADH} + \text{H}^+$ és FADH_2 társenzimek által kötött elektronok energiájának közvetett felhasználásával az ADP foszforileződik, ATP keletkezik.

- A vegyfeladatban az ATP-szintáz és a légzési lánc (elektron szállító lánc, electron transport chain, ETC) vesz részt.

A légzési láncot az energiatermecs belső hártáján átnyúló fehérjeössztesek alkotják. A hártáátjáró fehérjeössztesek az energiatermecs alapállománya és hártaközi tere között létesítenek összeköttetést; I, II, III és IV római számmal jelöljük őket.

- A fehérjeössztes I az *NADH-KoQ-reduktáz*, más néven *NADH-dehidrogenáz* (*NADH:ubiquinone oxidoreductase*) vas-kén központot tartalmazó, elektronfelvétel-átadó teleenzim; NADH -t kötő *KoQ-reduktáz*. Átnyúlik a belső hártán. Az NADH -ból elvon két elektront, NAD^+ és H^+ (proton) keletkezik. A folyamat az energiatermecs alapállományában zajlik. A felszabaduló energiával az enzim a H^+ -t (protont) átjuttatja a hártán a hártaközi térbe. A 2 elektront az enzim társenzime, az ubikinon (*KoQ₁₀*) veszi fel két H^+ protonnal együtt, így KoQH_2 (ubikinol) jön létre.

- A fehérjeössztes II a *szukcinát-KoQ-reduktáz*, más néven *szukcinát-dehidrogenáz* (*succinate:ubiquinone oxidoreductase*) kicsei, 4 alegységes teleenzim egy FAD és 3 vas-kén tartozékcsoporttal. A fehérjeössztes II a belső hártá belső részében van, kisebb részével az alapállomány felé néz, köti a citrátkörben lévő szukcinátot, és elvon belőle 2 elektront, így a szukcinát fumaráttá alakul. Az elektronokat az FAD köti, amelyből még két proton felvételével FADH_2 keletkezik. Az FADH_2 elektronjai az enzim szintén az ubikinonra (*KoQ₁₀*) tevődnek át; ubikinol (KoQH_2) keletkezik. Az ubikinont az enzim köti (az enzim vegylete), így kerül kapcsolatba az FADH_2 -vel. A *szukcinát-dehidrogenáz* nem juttat át H^+ -t a hártán.

- A fehérjeössztes III a *KoQH₂-citokró-m-c-reduktáz*, más néven *ubikinol-citokró-m-c-reduktáz* (*ubiquinol:cytochrome c oxidoreductase*) **háromféle** hemet és egy vas-kén központi rész tartalmaz, 11 alegységből áll. Kettőst alkotva hidalja át a belső hártát. A citokró-m-b alegységei veszik át az elektronokat a KoQH_2 -től (ubikinoltól), és teszik át egyesével a citokró-m-c-re, a citokró-m-c1 alegységük közreműködésével. A fehérjeössztes III, a fehérjeössztes I-hez hasonlóan, H^+ -t juttat a hártaközi térbe.

- A fehérjeössztes IV a citokró-m-c-oxidáz (*cytochrome c oxidase*) 13 alegységből és sajátos oxigénkötő helyből áll. Csak két alegységnek van tevékeny központja; az egyikben két rézion alkotja (Cu_2) a központot. Ez veszi át a fehérjeössztes III-tól a citokró-m-c által szállított elektront, amely a hem-A-ra (citokró-m-A) jut, onnan pedig az oxigénkötő helyhez. Ez az egyetlen a négy fehérjeössztes közül, amelyik az elektront az oxigénnel tudja társítani. A fehérjeössztes IV szintén átjuttatja a H^+ -t a belső hártán a hártaközi térbe.

Mindegyik elektronátadás során jelentős energia válik szabaddá, amelyet fehérjeössztes I, III és IV a H^+ belső hártán való átjuttatására használ fel az alapállományból a hártaközi térbe, vagyis a protonátjuttatáshoz szükséges energia az elektronátmeneti folyamatokból származik. A fehérjeössztes I és III 2-2 elektron áthaladásakor becslések szerint 4-4 protont (H^+) juttat a hártaközi térbe. A fehérjeössztes IV a 4 elektron oxigénnel társításakor pedig 4-et. Ezért ha a 2 elektron az NADH -ból adódik le, 10 H^+ , ha FADH_2 -ből, akkor 6 H^+ átjuttatásával számolunk, az utóbbiban ugyanis a fehérjeössztes I nem vesz részt.

- A sejtlegzésben 1 molekula glükózból a legkedvezőbb esetben (elméleti szinten) 36 ATP és 2 GTP keletkezik, ez utóbbiak szintén ATP-vé alakulnak:

- 2 ATP képződik a glikolízis C_6 -szakaszában, amelyben kialakul még 2 $\text{NADH} + \text{H}^+$ is;

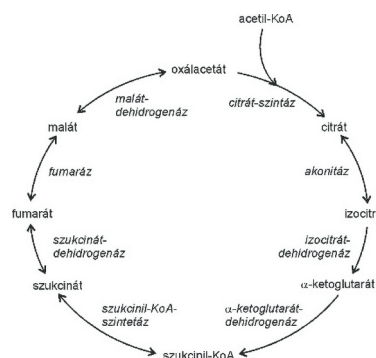
C_3 -szakaszában (AcKoA-képződés), vagyis a piruvát acetilsoporttá alakulásában szintén 2 $\text{NADH} + \text{H}^+$ jön létre.

- A citrátkörben 2 GTP, 6 $\text{NADH} + \text{H}^+$ és 2 FADH_2 keletkezik egy glükózból kiindulva.

■ Az NADH^+ és az FADH_2 által hordozott elektronok energiájából a végző elektronleadásban ATP képződik. Egyetlen $\text{NADH} + \text{H}^+$ révén körülbelül 3 ATP, egy FADH_2 révén pedig 2 ATP formálódik. Összesen 10 $\text{NADH} + \text{H}^+$ és 2 FADH_2 képződött; ezekből tehát 34 ATP jön létre. Ehhez adódik hozzá a glikolízis során termelt 2 ATP.

- A sejtlegzés a magvas sejtek egész anyagcseréjének, a sejt létezésének alapvető energiaforrása. Nélküle nincsenek élő magsejtűek. Izom- és vörösvértestekben, valamint sejtártmányban oxigénfüggetlen ATP-képzés is végbemehet, de ez csak rövid ideig tartja életben a sejtet, másrészt csak akkor, ha más sejtek besegítenek, például a tejsavas erjedés során felszaporodó laktáttól elektront vonnak el a sejtlegzési folyamatokban.

citrátkör (Krebs-kör, Szent-Györgyi-Krebs-kör, citromsavkör) *tricarboxylic acid (TCA) cycle* a sejtlegzés harmadik szakasza (→sejtlegzés), energiatermelő körfolyamat, amely az anyagcsere-folyamatok sokaságában vesz részt, az energiatermecs alapállományában megy végbe. Lévéen körfolyamat, nincs kezdete, sem vége; különböző molekulák más-más pontjain kapcsolódhatnak bele. Talán az acetyl-koenzim-A (acetyl-KoA) társulása a leggyakoribb, amely a 4 szénatomos oxálacetáthoz (oxálacetsav) csatlakozik. A 2 szénatomos acetát kötődik az oxálacetáthoz, és 6 szénatomos citrát keletkezik a citrát-szintetáz közreműködésével; a KoA szabaddá válik, újrahaznosul.



A citromsavkör

A következő lépésben a citrát elektronleadással átalakul (izocitráton keresztül) az 5 szénatomos α -ketoglutaráttá és CO_2 -vé; az elektront az NAD^+ veszi fel, $\text{NADH} + \text{H}^+$ keletkezik. Az α -ketoglutarátból 4 szénatomos szukcinil-KoA képződik, KoA kötődésével. Ez szintén elektronleadással jár, itt is $\text{NADH} + \text{H}^+$ jön létre és CO_2 szabadul fel. A további vegyületek a körben mind 4 szénatomosak. A szukcinil-KoA szukcináttá alakul; a KoA leválik és energia szabadul fel, amely elegendő a GDP foszforilezéséhez, GTP-vé alakításához.

A szukcinátból 2 elektron leadásával fumarát lesz, az elektronokat az FAD veszi fel, FADH_2 keletkezik.

A fumarátból malát lesz, a malátból pedig oxalacetát, és ezzel zárul a kör. A szukcinil-KoA-oxalacetát szakasz egyes lépései visszafordíthatók, a többi nem. A citrátkör egésze megfordíthatatlan.

A citrátkör végeredményben a piruvátból származó 2 szénatomos acetylcsoport bontása elektronelvonással úgy, hogy mind a két szénatom CO_2 -vé alakul; a szükséges oxigént vízmolekulából nyeri, hidrogénjeit az NAD^+ és az FAD veszi fel. A folyamat tiszta mérlege: az energiatermecs alapállományában lévő oxalacetáthoz több lépésben, köztes termékeken keresztül hozzáadjuk a következőket: $\text{acetyl-KoA} + 3 \text{NAD}^+ + \text{FAD} + \text{GDP} + \text{P}_i$. Visszanyerődik a KoA, keletkezik 2 molekula CO_2 , valamint 3 $\text{NADH} + \text{H}^+$, 1 FADH_2 és 1 GTP. A 3 $\text{NADH} + \text{H}^+$ körülbelül 9, az FADH_2 pedig 2 ATP létrejöttéhez szükséges energiát hordoz.

A citrátkör azonban nemcsak a sejtlegzésben vesz részt, hanem az anyagcsere-folyamatok zömében is:

- Aminosavak lebontásában és újrahasonosításában cukorforrásként. 18-féle aminosavból keletkezik glükóz, kizárólagosan a citrátkörön keresztül. Néhány (Ala, Gly, Ser, Cys, Thr, Trp) piruvátra bomlik, majd oxalacetáttá alakul. A Glu, Gln, Arg, His, Pro α -ketoglutarátra, a Met, Ile, Val, Thr szukcinil-KoA-ra, az Asp, Asn, Phe, Tyr fumarátra vagy oxalacetátra (Asp, Asn) bomlik. Ezekből a molekulákból pedig szükség esetén megfelelő enzimek glükózt tudnak létrehozni. Ennek az éhezési állapotban van nagy jelentősége, mert ekkor a fehérjékből származó aminosavak a vér által a sejtekhez szállított megfelelő mennyiségű cukor forrásai.

A néhány aminosavból keletkező piruvát a glükóz bontásából keletkező piruváttal egyezően be is juthat a citrátkörbe, ahol az ismertett módon energia szabadulhat fel belőlük.

- A zsírsavak energiájának kinyerésében. A zsírsavak lebontásából acetyl-KoA keletkezik, ez pedig szintén a citrátkörön keresztül járul hozzá az ATP képződéséhez.

- Felépítő folyamatokban. Ezekben a citrátkörből kilépő molekulák vesznek részt, például a zsírsavak felépítésében a citrát, aminosavak keletkezésében az α -ketoglutarát, a porfirinváz kialakításában a szukcinil-KoA.

anyagcsere metabolism (metabolizmus) a sejtekben végbemenő olyan vegyfolyamatok, amelyek energiát biztosítanak a sejt létezéséhez (mozgás, növekvés, osztódás), működéséhez és a sejt szerves molekuláinak előállításához. A szervezet anyagcsere-folyamatai során felhasznált energiát pedig táplálékfelvétel biztosítja. A sejtek a felvett molekulákat részben beépítik, átalakítják saját molekuláikká (anabolizmus, építő anyagcsere), részben lebontják energia kinyerésére (catabolizmus, bontó anyagcsere). Az anyagcsere során egyebek mellett sok elektronátmeneti vegyfolyamat is zajlik.

Az energia nyérése nagyrészt a sejtlegzés során valósul meg. Egy szerűen összegezve: átváltozó elektronleadással CO_2 -vé bomlik, a leadott elektronokat átvevők, az NAD^+ és az FAD veszi fel, NADH és FADH_2 keletkezik. Az NADH és az FADH_2 által szállított elektronok energiája soklépéses folyamat végén elősegíti az ADP foszforileződését ATP-vé. Az energia az ATP-ben raktározódik, és használódik fel az energiaigényes vegyfolyamatokban. Két formája az oxigén és a nem oxigén anyagcsere.

lélegzés respiration gázcsere a tüdőknél: az oxigénből levegő (21 százalék oxigén, 0,04 százalék szén-dioxid) belégzése a tüdőknél, bentartása rövid ideig, majd a levegő kilégzése, amely 16 százalék oxigént és 0,4 százalék szén-dioxidot tartalmaz. A tüdőhólyagocskákban megy végbe a gázcsere, mintegy 140 négyzetméter felületen. Ez biztosítja az oxigént a szénvegyületek égetéséhez, vízzé és szén-dioxiddá alakításához, miközben energia keletkezik és használódik fel a sejtek működésében. A keletkezett szén-dioxid pedig ékként távozik.

koenzim-Q (KoQ) coenzyme Q elektronfelvevő és -leadó társenzim; kinon része (erre utal a Q) és izoprén egységekből álló oldallánc van. A kinon része képes egyesével felvenni elektront és protont, tehát elektronátmeneti folyamatokban vesz részt. Az oldallánccal hártályhoz kötődik. Egyes formái az oldallánccban lévő izoprén egységek számában térnek el; a különböző formákat számokkal jelöljük. Emberben a koenzim-Q₁₀, az ubikinon a legjelentősebb. (\rightarrow ubikinon)

ubikinon (koenzim-Q₁₀, KoQ) coenzyme Q 10 társenzim, -1,4benzokinon: kinon része és 10 izoprén egységből álló oldallánc van. (A Q a kinonra, a 10 az oldallánccban lévő izoprén egységek számára utal.) Oldallánccal kötődik az energiatermecs belső hártályához, kinon összetevője pedig 2 elektront és 2 protont vesz fel egyesével. Az elektron felvételével először a páratlan elektronú szemikinon (szabadgyök) keletkezik, és ebből lesz újabb elektron és protonok felvételével az ubihidrokinon (QH_2 , ubikinol, KoQH_2). A folyamat visszafordítható: a KoQH_2 egymás után átad 2 elektront a citokrómoknak, visszaalakul ubikinonná. 2 proton szabadul fel, amelyek kijutnak a hártályból. Az ubihidrokinon tehát részben elektronátadó, részben protonátadó (sav).

Az ubikinon folyvást elektronfelvevő/-leadó vegyületekben vesz részt **KoQ-reduktáz** társenzimként. Meghatározó a légzési láncban; az elektronokat szállítja a fehérjeösszetes I-ről és II-ről a fehérjeösszetes III-ra. (\rightarrow sejtlegzés) Fontos szerepe van még más anyagcsere-folyamatokban is. Hidrokinon formában (ubihidrokinon) gyökfogy: valamely szabadgyöknek ad át hidrogént.

FAD (flavin-adenin-dinukleotid) flavin adenine dinucleotide elektronátmeneti folyamatok enzimeinek tartozékcsoportja, elektron szállító. A riboflavin (B_2 -vitamin) és az ADP (adenozin-difoszfát) egyesülésével jön létre: a riboflavin alkoholos OH-csoportja hidrogénjének helyére kötődik az ADP. Az FAD összegképlete: $\text{C}_{27}\text{H}_{33}\text{N}_9\text{O}_{15}\text{P}_2$. **Dehidrogenázokhoz** (más néven: **KoQ-reduktázokhoz**) **kötődve vesz fel** 2 elektront és 2 protont (hidrogént), FADH_2 -vé ($\text{FADH} + \text{H}^+$) alakul. Az FAD először 1 elektront és 1 protont vesz fel, szemikinon keletkezik; újabb elektron és proton felvételével jön létre az FADH_2 .

A folyamat visszafordítható: az FADH_2 egymás után átad két elektront és protont, és visszaalakul FAD -dá, miközben energia szabadul fel. Az FADH_2 tehát energiahordozó, részben elektronátadó, részben protonátadó (sav).

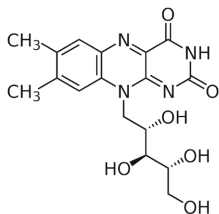
Az FAD -nak fontos szerepe van a légzési láncban: a fehérjeösszetes II (szukcinát-KoQ-reduktáz) tartozékcsoportja; a szukcinátból felvesz 2 elektront, FADH_2 -vé alakul, a szukcinátból pedig a citrátkörben fumarát lesz. Az FADH_2 2 elektronját az ubikinon (KoQ_{10}) veszi fel az enzimből, és viszi tovább a végső elektronleadás szakaszába, amelyben az FADH_2 -által leadott elektronok energiája körülbelül 2 ATP keletkezéséhez használódik fel. Lényeges szerepe van az FAD -nak még a zsírsavak β -elektronátadásában is.

FMN (flavin-mononukleotid) flavin mononukleotide riboflavin-5-foszfát. Elektron szállító, számos elektronfelvétel/leadó enzim (dehidrogenázok) tartozékcsoportja. A riboflavinból (B_2 -vitamin) keletkezik, a riboflavin alkoholos OH-csoportja hidrogénjének helyére foszfát kapcsolódik a riboflavin-kináz segítségével.

Enzimhez kötődve felvesz 2 elektront és 2 protont (hidrogéniont), FMNH_2 -vé alakul. Az FAD -hoz hasonlóan, először 1 elektront és 1 protont vesz fel, páratlan elektronú szemikinin (FMNH^\cdot) keletkezik; újabb elektron és proton felvételével jön létre az FMNH_2 .

Tartozékcsoportja még a kékfény-jelfogóknak (blue-light photoreceptors), jelzést közvetít.

riboflavin (B_2 -vitamin) riboflavin vitamin B_2 sárga, vízdékony, könnyen felszívódó vegyület, háromtagú gyűrűrendszerből (gyűrűs rész; flavinnak nevezzük) és ribitolcsoportból (elektron több D-riboz) áll, amely a középső gyűrű N-atomjához kötődik (N-ribitol rész). Nevét a ribóz és a latin flavus (sárga) szóból kapta.



A ribóz végén elsődleges alkoholos OH-csoport van. Ha ennek hidrogénje helyére ADP (adenozin-difoszfát) kötődik, FAD (flavin-adenin-dinukleotid), ha foszfát, FMN (flavin-mononukleotid) képződik. ($\rightarrow\text{FAD}$, FMN)

A riboflavin számos anyagcseré-folyamatban működik közre.

glikolízis (cukorbontás) glycolysis a sejtlegzés első szakasza, a szőlőcukor (glükóz) bontása piruváttá (1 molekula glükózból 2 molekula piruvát keletkezik elektronleadással); energiefelzabarással jár. A keletkezett energia az ATP és az NADH képződéséhez használódik fel.

A sejtbe került glükóz leggyakoribb módosulása a hatos szénatomon való foszforileződése, glükóz-6-foszfát (glükóz-6-P, G6P) keletkezése. Ez ATP felhasználásával, hexokináz vagy glükokináz közreműködésével megy végbe. A *hexokináz* jelen van minden sejtben, nem fajlagos a glükózra, tevékenységét a glükóz-6-foszfát gátolja. A *glükokináz* glükózfajlagos, a vércukorszintet érzékelő sejtekben (például májsejtek, a hasnyálmirigy β -sejtjei) keletkezik, illetve a bélmájsejtekben is képződik; ezek a bélüreg cukormennyiségét érzékelik. A glükóz-6-foszfát nem gátolja.

A sejtbe került glükóz szorbitolon keresztül fruktózzá is alakulhat (poliol útvonal); ez rendszerint glükóztöbbletben (hyperglycemia) következik be.

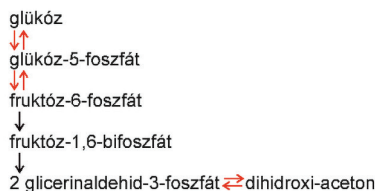
A glükóz foszforileződése akadályozza meg, hogy a glükóz kijusson a sejtől, a nem foszforilezett glükóz ugyanis elhagyhatja a sejtet. A foszfátcsoport kapcsolásával a glükóz negatív töltésűvé válik, ami meggátolja, hogy a glükóz szállítására képes hárfafehérje megkösse, ezért marad a sejtben.

A glükóz-6-foszfát nem csak a glikolízisben alakul tovább: keletkezhet belőle glikogén, glikolipid, glikoprotein stb. is, a sejt szükséglete szerint. Folyamatos a glükóz-6-foszfát és a fruktóz-6-foszfát egymásba alakulása a *hexóz-foszfát izomeráz/foszfoglukóz-izomeráz közreműködésével*. Ezek az izomerázok; egyensúlyi állapotban vannak.

A cukorbontás a sejt plazmában megy végbe két lépésben:

- Az első lépés a C_6 -szakasz, amelyben a 6 szénatomos glükózból két 3 szénatomos molekula keletkezik.

Ennek a szakasznak a kezdete a glükóz-6-foszfát keletkezése és átalakulása fruktóz-6-foszfáttá. A fruktóz-6-foszfátból újabb foszfát kapcsolásával és a gyűrűszerkezet átalakulásával fruktóz-1,6-bifoszfát keletkezik; szintén ATP felhasználásával. Az átalakulást a *foszfofruktokináz-1* sarkallja, amely a C_1 -en foszforilez. Ez már visszafordíthatatlan folyamat. A fruktóz-1,6-bifoszfát keletkezését az AMP és a fruktóz-2,6-bifoszfát serkenti (térserkentők), az ATP, a citrát és a zsírsavak gátolják (térgátlók).

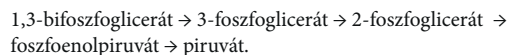


A következőben a 6 szénatomos fruktóz-1,6-bifoszfátból 2 trióz-foszfát, dihidroxi-aceton (ketotrióz) és glicerinaldehid-3-foszfát (aldotrióz) keletkezik a trióz-foszfát-izomeráz segítségével. Ezek a triózok átalakulhatnak egymásba, egyensúlyi állapotban vannak (aldóz-ketóz izomerizáció). A sejt a cukorbontásban azonban csak a glicerinaldehid-3-foszfátot használja fel, ezért úgy lehet tekinteni, hogy 2 glicerinaldehid-3-foszfát jön létre.

A glükózbontásnak ebben a szakaszában nincs elektronleadás, és 2 ATP használódik fel, annak reményében, hogy több keletkezik, ezért ezt „befizetési” szakasznak nevezik.

- A második lépés a C_3 -szakasz; ebben a 2 glicerinaldehid-3-foszfát 2 piruváttá ($\text{C}_3\text{O}_3\text{H}_4$) alakul elektronleadással. 2 NAD^+ 2-2 elektront vesz fel, 2 NADH + H^+ keletkezik; valamint a kötött foszfát leadásával és egy szervesen foszfátion felhasználásával 2 ADP-ből 2 ATP jön létre.

A glicerinaldehid-3-foszfát a glicerinaldehid-3-foszfát-dehidrogenáz közreműködésével 1,3-bifoszfogliceráttá alakul. Az enzim társenzime az NAD^+ , amely a glicerinaldehid-3-foszfáttól felvesz 2 elektront, NADH + H^+ lesz belőle. Az 1,3-bifoszfoglicerátból több lépcsőben lesz piruvát, amelynek során 2 ATP keletkezik:



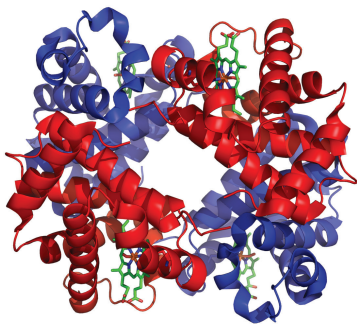
Egy glicerinaldehid-3-foszfát piruváttá alakulása során tehát két különböző lépésben 2 ATP képződik, és mivel 1 glükózból 2 glicerinaldehid-3-foszfát jön létre, a glükóz piruváttá alakításakor összesen 4 ATP keletkezik, tehát kettővel több, mint amennyi felhasználódik. A befizetés megtérül, sőt, kettővel több ATP keletkezik; a második szakaszt „kifizetési” szakasznak is hívjuk.

A piruvát AcCoA -vá alakul a piruvát-dehidrogenáz közreműködésével az energiatermésben; 1 piruvátból 1 NADH + H^+ jön létre és 1 CO_2 szabadul fel. Az AcCoA kapcsolódik a citrátkörhöz (\rightarrow citrátkör, sejtlegzés)

hem *heme* (hemeprotein, haemprotein, hemoprotein, haemoprotein, heme protein) olyan porfirinvázas fehérje, amelyet a pirrolgyűrű nitrogénjei kétértékű vasionhoz (Fe^{2+}) kapcsolódva hoznak létre. (\rightarrow pirrol, porfin) A vasion két szabad kötésének egyike más molekulával (globinnal [hemoglobin], katalázokkal, citokrómmal [citokróm-450]), a másik kétatomos gázokkal (O_2 , NO, CO) kötődik. A hem képzésére minden sejt képes, legtöbbször a vörösvértestekben (csontvelő) és a májsejtben keletkezik. Az energiatermecsben a szukcinil-koenzim-A és glicin egyesüléséből delta-aminolevulinsav keletkezik, amely porfobilinogénné alakul. Ebből a sejt plazmában tetrapirrollánc jön létre, ennek záródásával keletkezik a protoporfirin, amelybe az energiatermecsben a ferrokataláz építi be a kétértékű vasiont.

A hem a lépben bomlik le: a vasion elválik, a gyűrűs szerkezet megtartásával először zöld biliverdin, majd sárga bilirubin keletkezik. A hemanyagcserét szabályozó enzimek zavarából súlyos betegségek (\rightarrow sárgaság, porfiria, fényérzékenység, idegrendszeri zavarok) jöhetnek létre.

hemoglobin (Hb) *hemoglobin, haemoglobin, Hb* oxigénszállító fehérje, hem-vasat tartalmaz, a vörösvértestek alkotóeleme. A hemoglobin azonban nemcsak oxigént, hanem más gázt (CO, CO_2 , NO stb.) is képes kötni. Az oxigén nélküli hemoglobin a deoxi-hemoglobin, az oxigént kötő hemoglobin az oxihemoglobin. Ha az oxigén elvesz 1 elektront a HbFe^{2+} terhére, szuperoxid-anionná (O^-) válik, a HbFe^{2+} pedig 1 elektront leadva HbFe^{3+} -ionná alakul. Ezt nevezzük methemoglobinnak (met-Hb), amely nem képes oxigént kötni. Oxigénkötvé elektronleadással válik; az Fe^{3+} - Fe^{2+} visszaalakulást az NADH-függő-met-Hb-reduktáz serkenti: a methemoglobinnal deoxihemoglobinnal, az NADH-ból pedig NAD^+ keletkezik. Az oxigént kötő hemoglobin (oxihemoglobin) az R- (relaxed) állapotú hemoglobin, élénk vörös színű. Az oxigénhiányos (deoxihemoglobin) a T- (tense) állapotú hemoglobin, szederjes színű.



A hemoglobin négy, közel egyforma alegységből ($\alpha 1$ és $\alpha 2$ [kékkel jelölt rész], valamint $\beta 1$ és $\beta 2$ globin [pirosan jelölt rész]) tevődik össze. Mindegyik alegység globin fehérjével kötődött hemből épül fel; az oxigént és más gázokat a hemben lévő kétértékű vasion (Fe^{2+}) köti (hem-vas; HbFe^{2+}) és szállítja (hem-vas mag, zölden jelölt rész). Az Fe^{2+} kötődik a hem 4 pirrolgyűrűjének nitrogénjeivel és a globin egyik hisztidin oldalláncának nitrogénjével. A hatodik

kötőhelye szabad, ez köti a gázokat. Az Fe^{3+} -ban nincs hatodik hely, ezért nem képes oxigént kötni. A globinok nyolc α -csavarmentből állnak, β -lemezt nem tartalmaznak. Az alegységek kettősöket alkotnak: az $\alpha 1$ a $\beta 1$ alegységgel, az $\alpha 2$ a $\beta 2$ -vel társul. A kettősök hosszanti tengely mentén egybevágóan kapcsolódnak: az $\alpha 1$ az egyikből a másik $\beta 2$ -jével; a $\beta 1$ pedig az $\alpha 2$ -vel úgy, hogy középen bemélyedés, a *központi vízvájolat** (central water cavity) keletkezik az oxigén szállítására (ábra forrása: Wikipédia).

Egy-egy hemoglobin tehát 4 vasiont tartalmaz, ezért 4 oxigén megkötésére képes. Az Fe^{2+} az oxigént megfordíthatóan, gyenge kötéssel kapcsolja, a születés után a tüdőből a szövetekhez szállítja, amelyekben leadja.

A hemoglobin szerkezete függ az oxigénellátás körülményeitől: más az ébrényben, a magzatban és a születés után. Ennek alapján háromfélé: ébrényi hemoglobint (HbE, embryonic Hb), magzati hemoglobint (HbF, foetal Hb) és felnőtt hemoglobint (HbA, adult Hb) különböztetnek meg – ezek a globin összetevőjűnkben térnek el. A magzati hemoglobin, a HbF $\alpha 1$ -, $\alpha 2$ -, $\gamma 1$ - és $\gamma 2$ -globinból áll, az oxigénkötvő hajlama nagyobb, mint a HbA-é. A deoxi-HbF az anyai oxihbA-tól kapja az oxigént a méhlepényben, és szállítja a magzati keringésben. Az ébrényi hemoglobinnak két formája ismert: a Gower-hemoglobin-1, amely két dzéta és két epsilon globint ($\zeta 2$, $\epsilon 2$) tartalmaz, és a Gower-hemoglobin-2-, amelynek két alfa és két epsilon globinja van ($\alpha 2$, $\epsilon 2$). Az ϵ - és ζ -globin az ébrényi globin, az ébrény szikzacskójában képződik. Ismert még ritkán előforduló másféle hemoglobin is, ezek is a globinokban különböznek, például a HbA2 ($\alpha 2$, $\Delta 2$), HbH, amely génmutasítások következtében kialakuló kóros hemoglobin stb.

A hemoglobin a vörös csontvelőben képződik a vörösvértestek érése során; az előregedett vörösvértestek szétesése után bilirubinná alakul, a vasiont pedig a transferrin fehérje köti, és a keringéssel a csontvelőbe szállítja újrafelhasználásra.

Az oxigénfelvétel/-leadás meghatározó szabályozója a BPG (2,3-bifoszfoglicerát), amely térszabályozó, kötőhelye a központi vájolatban van, a négy globinlánc együtt alakítja ki, 8 sókötés rögzíti. A hemoglobinhoz kötődve csökkenti az oxigénfelvétel képességét, így segíti elő az oxigén leadását. A BPG a glikolízis mellékterméke. Mennyisége magaslaton növekszik, miként üdült tüdőátgátlásban is. 1 hemoglobin 1 BPG-t köt, kötőhelye a hemoglobin T-állapotában válik szabadná. Egyszerre oxigént és BPG-t kötő hemoglobin nem lehet.

vas *iron* (Fe, rendszáma 26, atomtömege 55,849 g/mol) a szervezetben legnagyobb mennyiségben lévő mikroelem. Fő szerepe az oxigénszállításban, a szövetek oxigénellátásában és a sejtek elektronszállító folyamataiban van. A hemoglobin, a citokróm és a légzési lánc egyes enzimeinek társtartozéka. Az oxigénnel kétértékű ionként – Fe^{2+} ; ferro-, Fe(II) – képes kötni, a háromértékű vas – Fe^{3+} , ferri-, Fe(III) – nem köt oxigént.

vegyérték elavult fogalom, mert kötésformák szerint mást-mást jelent, ennek ellenére használják. Hagyományos értelmezése: az a szám, amely kifejezi, hogy valamely elem egy atomja hány hidrogénatomot képes lekötni vagy vegyületeiben helyettesíteni. Ebben a fogalomkörben a kötésszámot, a töltésszámot stb. használjuk.