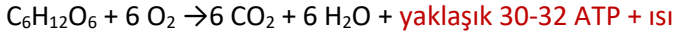


OKSİJENLİ (AEROBİK) SOLUNUM

-Enerji verici organik besin monomerlerinin oksijen kullanılarak inorganik moleküllere (CO₂, H₂O ve NH₃) kadar parçalanması ile açığa çıkan enerjiyle ATP sentezlenmesine **oksijenli solunum** denir. www.biyolojiportali.com

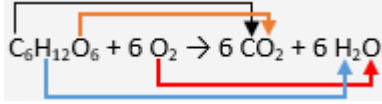
-Prokaryot canlıların sitoplazmalarında başlar hücre zarı kıvrımlarında (mezozom), ökaryot canlılarda ise yine sitoplazmada başlar mitokondride devam eder.

-Genel denklemi:



-Glikozun yapısına katılan atomların radyoaktif izotopları kullanılarak oksijenli solunum reaksiyonlarında oluşan ürünlerin kaynağı belirlenebilmiştir.

Buna göre glikozun atomlarının ve oksijenin oluşan ürünlere geçişini şöyle gösterebiliriz:



Mitokondri

-Prokaryot canlılar ve memeli olgun alyuvarlarının dışında oksijenli solunum yapan tüm hücrelerde bulunur.

-Mitokondriler hücrenin enerji santralleridir. Oksijenli solunum ile ATP üretir.

-Substrat düzeyinde fosforilasyon ve oksidatif fosforilasyon ile ATP sentezlenir.

-Çift zarlıdır.

-Dış zar düz, iç zar kıvrımlıdır. Kıvrımlı bu yapıya **krista** denir.

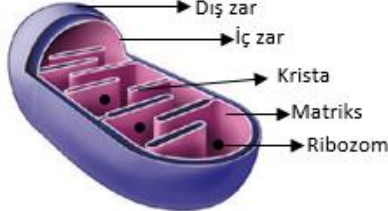
-Krista üzerinde ETS enzimleri (enerji üretiminde görev alan enzimler) vardır.

-Kristadaki kıvrımlar mitokondrinin yüzeyini genişletir.

Böylece daha fazla ATP üretilir.

-Kendisine ait DNA, RNA ve ribozomu vardır.

-Kıvrımların arasını matriks adı verilen sıvı doldurur. DNA, RNA, ribozom ve solunum enzimleri matriks içinde bulunur.



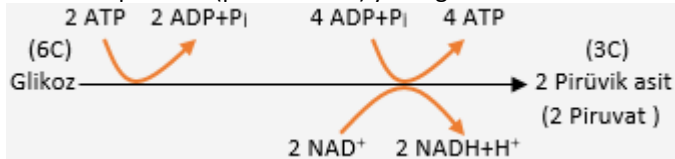
--Mitokondride oksijenli solunum ile ATP üretildiğine göre, mitokondri etkinliği artan bir hücrede;

-O₂ tüketimi artar. Enerji verici olarak kullanılan glikoz, yağ asidi ve gliserol gibi monomerlerin miktarı azalır. Yoğunluk azalır. CO₂ artar. pH düşer. Asitlik artar. Üretilen ATP artar. Isı artışı olur. H₂O miktarı artar. Osmotik basınç azalır. Turgor basıncı artar.

Oksijenli solunum evreleri:

-Glikoliz), Krebs döngüsü ve ETS (Elektron Taşıma Sistemi) olmak üzere üç evrede incelenir.

1. Glikoliz: Bütün hücresel solunum tepkimeleri glikoliz ile başlar. Glikoliz, Glikozun hücrenin sitoplazmasında enzimlerle 2 molekül piruvata (pirüvik aside) yıkıldığı evredir.



2. Krebs döngüsü (Sitrik asit döngüsü=karbon yolu):

Glikolizin son ürünü olan piruvatlar ve NADH'lar ortamda oksijen varsa, mitokondri matriksine (mitokondri iç sıvısına)

geçer. **(Oksijenin dolaylı etkisi)**

NOT: Dikkat edelim, oksijenli solunum sırasında glikoz mitokondri içine girmez. Glikolizde 2 molekül piruvata parçalanır ve piruvatlar mitokondri içine alınır. Ancak piruvatlar krebs döngüsüne girmek için tam hazır değildirler. Önce krebs döngüsüne hazırlık (pirüvik asit oksidasyonu) aşaması gerçekleşir. Bu sırada; -2 piruvattan birer molekül CO₂ ayrılır. (CO₂, glikozun şimdiye kadarki yıkımında oluşan ilk atık üründür) ve 2 asetik asit (sirke asidi) oluşur. Bunun birer çift hidrojenin elektron ve protonları NAD⁺ tarafından tutulur. Yani NAD⁺, indirgenerek 2 tane NADH oluşur. Sonunda her bir asetik asit, koenzim A (CoA)'ya tutunur. Böylece krebsi başlatacak molekül olan 2 tane Asetil koenzim A (Asetil Co A) oluşur. Asetil Co A, krebs döngüsünü başlatan temel moleküldür. Koenzim A, asetik asidin krebs döngüsünün ilk reaksiyonuna girmesine neden olur.

-Piruvatın asetil Co A'ya dönüşümü ortamda oksijen olduğunu gösterir.



Şekil: Krebs döngüsüne hazırlık (pirüvik asit oksidasyonu)

-Krebs döngüsü, asetik asit

-İlk defa İngiliz bilim insanı Hans Krebs (Hans Krebs) tarafından 1937 yılında açıklandığından bu reaksiyonlara Krebs döngüsü denilmiştir.

-İlk oluşan ürün sitrik asit olduğundan dolayı sitrik asit döngüsü de denilmektedir.

-Krebs döngüsü prokaryotların sitoplazmasında, ökaryotların mitokondri matriksinde gerçekleşir.

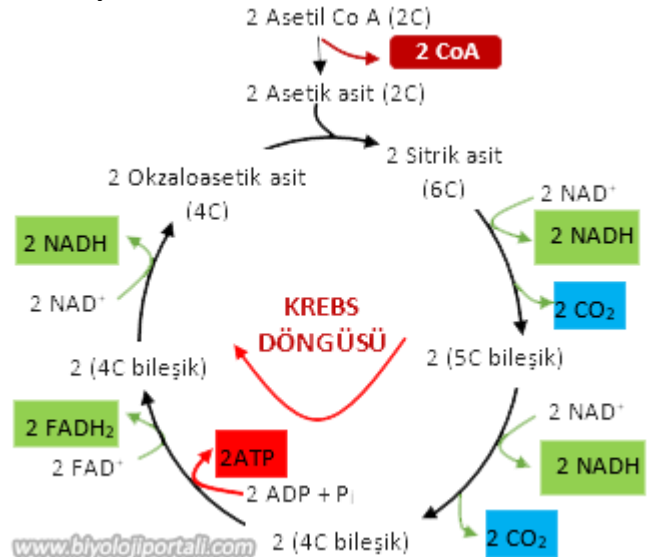
-Krebs'te gerçekleşen olaylar: [Rakamlar 1 molekül glikoz (2 asetil Co A içindir. 2 asetil Co A için iki tur döner.)]

1. İlk olarak, Asetil Co A'dan CoA ayrılır, asetik asit 4 C'lu okzaloasetik asit ile birleşerek 2 molekül 6 C'lu sitrik asit oluşturur. www.biyolojiportali.com

2. Sitrik asitlerin her birinden birer olmak üzere 2 molekül CO₂ ayrılır. 2 NADH oluşur. Sonuçta 5 C'lu iki bileşik oluşur.

3. 2 molekül 5 C'lu bileşikten birer CO₂ daha ayrılır. 2 NADH daha oluşur. Böylece 2 tane 4 C'lu bileşik oluşur.

4. 4C'lu bileşik tekrar okzaloasetik asiti oluşturarak bir krebs tamamlanır. Yeni bir krebs başlar. Bu sırada substrat düzeyinde fosforilasyon ile 2 ATP üretilir. 2 FADH₂, 2 NADH daha oluşur.



Sonuç olarak krebste 1 glikoz (2 asetil Co A veya asetik asit şeklinde de ifade edebiliriz) kullanılarak;

- 6 NADH ve 2 FADH₂, substrat düzeyinde fosforilasyon ile 2 ATP, 4 CO₂ üretilir. 6 Molekül H₂O harcanır.

3. Elektron Taşıma Sistemi (ETS):

- Prokaryotların mezozom adı verilen zar kıvrımlarında, ökaryotların mitokondri kristallerinde gerçekleşir.

-Oksijen doğrudan görev yapar. H⁺ ve elektronları ile birleşerek su oluşturur. www.biyolojiportali.com

-Tepkimeler sırasında NADH ve FADH₂ yükseltgenir. Tekrar elektron taşıyıcı olarak kullanılır.

-En fazla ATP oksidatif fosforilasyon ile bu evrede üretilir.

-ETS: Enerji verici organik moleküllerdeki hidrojenlerin proton (H⁺) ve elektronlarına (e⁻) ayrıldıktan sonra ETS elemanlarınca oksijene kadar taşınarak ATP sentezlediği evredir.

-Mitokondrinin iç zarında yer alan protein ve proteine bağlı protein olmayan moleküllerden oluşur.

-ETS'nin bu elektron tutucu elemanları elektron çekme gücüne göre en zayıf olandan kuvvetli olana göre I ve IV arası numaralarla sıralanır.

- ETS elemanları, bu aşamaya kadar oluşturulan NADH ve FADH₂ moleküllerinin getirdiği elektronları alır.

-ETS'de taşınan elektronların enerjisi kademe kademe sisteme aktığı için elektronları enerji düzeyi azalır.

-Enerjisi en yüksek olan elektron ETS'nin I. elemanı tarafından tutulur. Daha sonra indirgenme yükseltgenme tepkimeleri ile III. ve IV. elemanlara doğru akar. Bu sırada enerjilerini sisteme bırakır. Bir kısım enerji de ısı olarak ortama verilir.

-Bu enerji ile matriksteki hidrojen iyonları (proton veya H⁺) ETS'nin I-III ve IV. elemanları üzerinden zarlar arası boşluğa pompalanır. Hidrojen iyonlarının geçişiyle de matriks ile zarlar arası boşluk arasında proton derişimi farklılığı oluşturulur.

-Enerjisi en az olan en zayıf elektronu ETS'nin IV. elemanından elektron ilgisi en yüksek olan (bir başka ifade ile elektronegatifliği en yüksek olan) **son elektron tutucu oksijen** alır, ATP sentaz enziminin oluşturduğu kanaldan matrikse pompalanan H⁺ları ile birleşerek su oluşur.

-ETS molekülleri aracılığı ile elektronların oksijene taşınması ve ATP'nin sentezlenmesine **oksidatif fosforilasyon** denir.

-Oksidatif fosforilasyonla ATP üretimi, 1960 yılında **Peter Mitchell** tarafından ileri sürülen Kemiozmozis hipotezine dayandırılarak açıklanmaktadır.

Kemiozmozis hipotezi

-“Zar yüzeyleri arasındaki proton derişim farkı ATP sentezini sağlar” şeklinde ifade edilir.

- Yüksek enerjili elektronların ETS'de aktarımı sırasında açığa çıkan serbest enerjinin bir kısmı ısı olarak ortama verilirken büyük bir kısmı matriksteki protonları ETS molekülleri aracılığı ile iç ve dış zar arasındaki boşluğa pompalamada kullanılır.

Mitokondrinin iç zarı protonlara geçirgen olmadığından bu olaylar zarlar arası boşlukta proton yoğunluğunu artırır.

Ayrıca protonlar, elektrik yükü taşıdıklarından zarlar arasındaki boşluk ile matriks arasında elektriksel yük farkının oluşmasına neden olur.

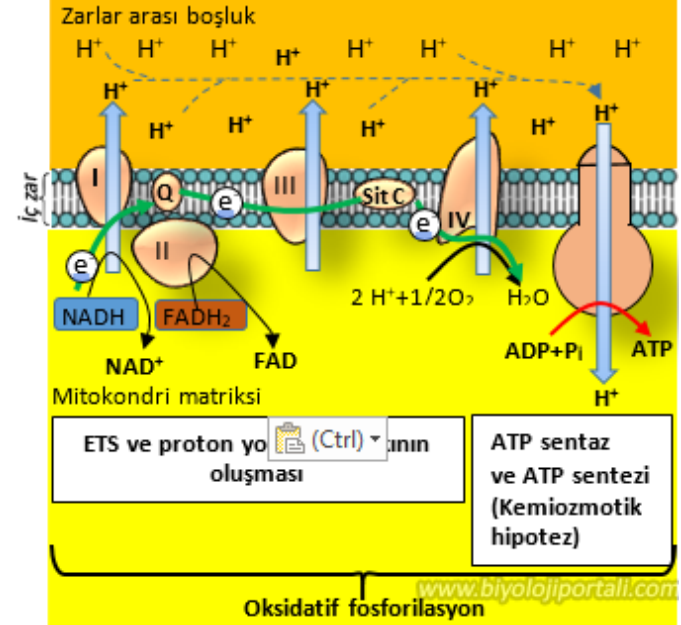
-Bu derişim ve elektriksel yük farkı bir potansiyel enerji oluşturur.

-Oluşan bu enerji (proton hareket kuvveti), H⁺ iyonlarının ATP Sentaz'ın içine girerek enzimin bir değirmen gibi dönmesini sağlar. ATP Sentaz'ın matrikste bulunan alt birimi dönme kuvveti ile ATP sentezi gerçekleştirir.

-Kemiozmozik modele göre organik moleküllerdeki bir çift elektron ETS'ye NADH ile girerse, toplam 2,5 ATP, FADH₂ ile girerse 1,5 ATP sentezi gerçekleşmektedir.

Böylece bir glikoz molekülünün CO₂'ye kadar indirgenmesi ile sonuçlanan yıkım tepkimelerinde **toplam 30-32 ATP** sentezi gerçekleşmektedir. ATP sayısındaki bu farklılık, sitoplazmada glikolizle oluşturulan NADH moleküllerinin değişik dokularda ETS'ye farklı mekanizmalarla katılmalarından kaynaklanmaktadır.

Örneğin iskelet kası ve beyin hücrelerinde 30; karaciğer, böbrek ve kalp hücrelerinde 32 ATP üretilir.



Kemiozmozik hipoteze göre mitokondrilerde ATP üretiminin şematik gösterimi

NOT: 1. Oksijenli solunumda ETS elemanlarının görev alması ve organik moleküllerin inorganik birimlerine kadar ayrıştırılabilmesi nedeniyle elde edilen enerji miktarı fermantasyona oranla çok daha fazladır (yaklaşık 15 kat).

2. Hücre içi enerji fazlalığı olduğunda (ATP/ADP oranı yükseldiğinde) hücrelerin solunum tepkimeleri yavaşlar, enerji yetersizliğinde (ATP/ADP oranı düştüğünde) ise enzimlerin etkinliği artırılarak enerji üretimi hızlanabilmektedir. www.biyolojiportali.com

Oksijenli solunumda suyun oluşumu

Bir çift hidrojen atomunun ETS'de son elektron tutucu molekül olan O₂ ile birleşmesi sonucu bir molekül su oluşur. Glikolizden başlayarak Krebs sonuna kadar 10 NADH ve 2 FADH₂'nin getirdiği H'lerin elektron ve protonları ile birleşen O₂, 12 molekül su oluşturur. Bunların 6 tanesi kreşte harcadığından kalan 6 molekül su ortama verilir.

Oksijenli solunumda CO₂ oluşumu

Bir molekül glikozdan kreşte hazırlık (pirüvik asit oksidasyonu) evresinde 2 CO₂, Krebs döngüsünde de 4 CO₂ olmak üzere 6 CO₂ oluşur ve dışarıya verilir.

Oksijenli solunumda ATP üretim şekilleri

1. Substrat düzeyinde fosforilasyon ile bir molekül glikozdan;

-Glikolizde toplam 4 ATP, NET 2 ATP üretilir.

-Krebs döngüsünde TOPLAM ve NET 2 ATP üretilir.

O halde substrat düzeyinde fosforilasyon ile TOPLAM 6 ATP, NET 2 ATP üretilmiş oldu.

2. Oksidatif fosforilasyon ile bir molekül glikozdan;

-NAD ile ETS'ye taşınan bir çift H atomundan 2,5, FAD ile taşınan bir çift hidrojen atomundan 1,5 ATP üretilir.

-Buna göre; 10 NADH oluştuğuna göre 10x2,5= 25 ATP,

-2 FADH₂ oluştuğuna göre 2x1,5= 3 ATP,

TOPLAM 28 ATP üretilmiş olur.

Sonuç olarak 1 molekül glikozdan;

TOPLAM: 6+28=34 ATP üretilir. NET : 4+28=32 ATP üretilir.