

حدق 321

فسیولوجی بکٹیریا

Bacterial Physiology


Prep. By

Dr. Rabab Elamawi

# Bacterial Metabolism

## عمليات الأيض في البكتيريا

تعرف التفاعلات الأيضية للخلية بأنها مجمل ما يحدث من تفاعلات كيميائية في الخلية لغرض هدم وتحليل المواد الغذائية ومن ثم إعادة بناء مكونات الخلية وتقسم عملية الأيض إلى ::

- |            |  |            |                   |
|------------|--|------------|-------------------|
| metabolism |  | catabolism | 1- تفاعلات الهدم  |
|            |  | anabolism  | 2- تفاعلات البناء |

## (١) عمليات الهدم dissimilation or catabolism

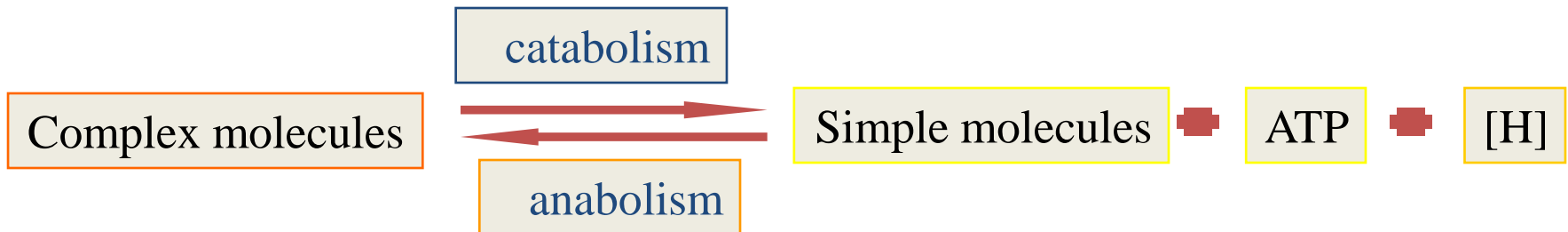
---

- وهي تتضمن تحليل مواد التفاعل المعقدة مثل البروتينات والدهون وعديدات التكسر إلى جزيئات أصغر يمكنها المرور إلى داخل الخلايا أو قيام الخلايا بهدم الجزيئات التي تدخل إليها بحيث يتم إحالتها جزيئات أصغر يمكن استخدامها من قبل الخلايا. (تبسيط الجزيئات المعقدة)

## • (٢) عمليات البناء assimilation or anabolism

---

- تتضمن عملية بناء المكونات الخلوية مثل جدار الخلية البكتيرية الأغشية ، الأحماض النووية (تعقيد المواد البسيطة – حيث يكون الهدف منها إصلاح المكونات الخلوية للخلايا أو إنتاج خلايا جديدة أثناء عملية الانقسام)



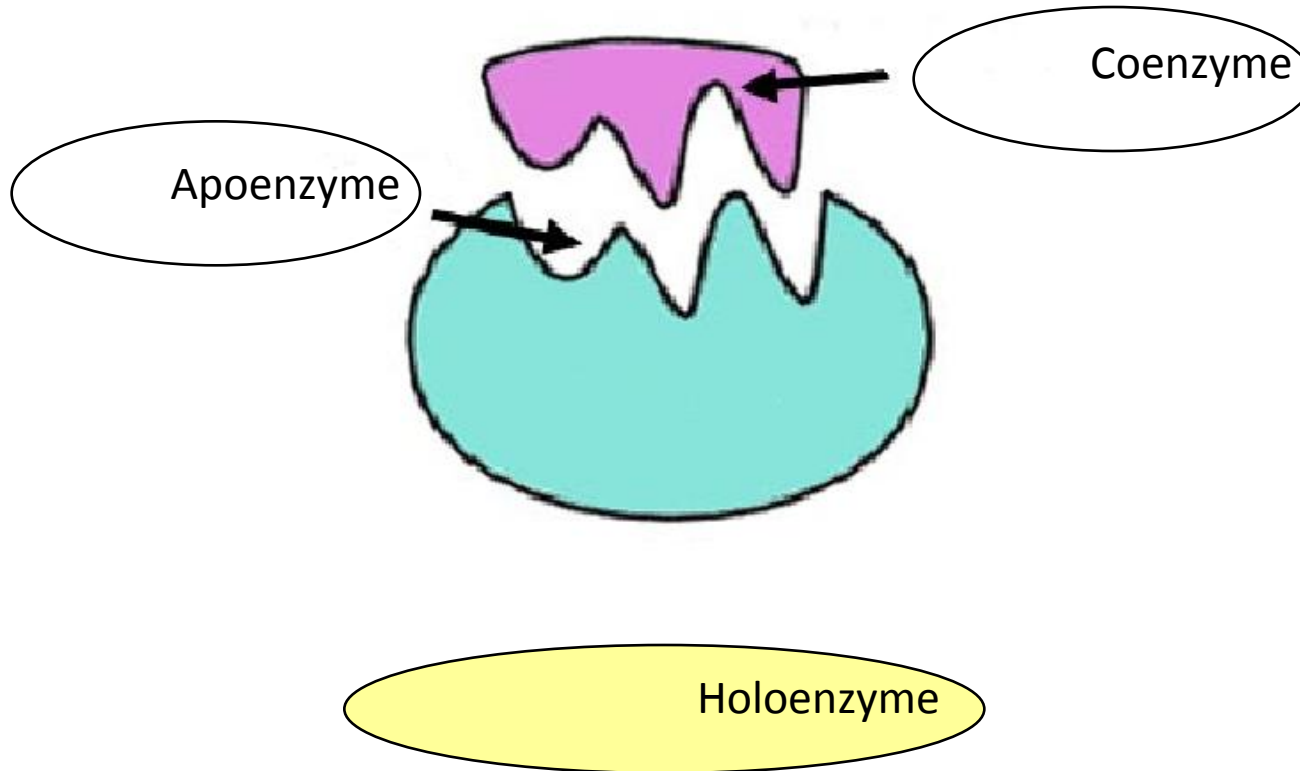
# أهمية دراسة التفاعلات الأيضية البكتيرية- Metabolism

- ١- دراسة النمو والأنشطة والكيميائية (الكيموحيوية)-نمو
- ٢- تفسير سبب حدوث تفاعلات معينة أثناء إجراء الدراسة الكيموحيوية
- ٣- كثير من المنتجات الأيضية يكون لها أهمية عملية – على سبيل المثال
  - \* التغيرات في تركيب الغذاء وما يترتب عليه من فساد الأغذية
  - \* التغيرات المطلوبة في الغذاء مثل منتجات الألبان
  - \* إنتاج بعض المواد ذات الأهمية الاقتصادية مثل الكحولات – الأحماض العضوية – المضادات الحيوية
  - \* إنتاج بعض المواد الغير مرغوب فيها والمسببة للأمراض مثل إنتاج السموم والانزيمات المدمرة للخلايا.

لا يحدث الايض بطريقه عشوائيه و لكن يكون كل تفاعل فيه محكوم بدقه  
بواسطه الانزيمات

الانزيمات عباره عن عامل مساعد حيوي اي انه ماده تزيد من معدل  
تفاعل كيميحيوي نوعي من دون ان تستهلك في التفاعل ويقلل وجود  
الانزيم طاقه التنشيط اللازمه لبدء اي التفاعل

وان اغلب الانزيمات تتكون من جزئين احدهما ذو طبيعة بروتينية ويعرف باسم apoenzyme والجزء الاخر غير بروتيني ويعرف بالمرافق الانزيمي coenzyme ولأجل سير التفاعل يلزم ان يكون الجزئين متحدين مكونين مايعرف بالتركيب الانزيمي الكامل haloenzyme



تختلف قوة الرابطة التي تربط جزيئي الانزيم معا فقد يكون هذا الارتباط وثيق بين الجزيئين — وقد يكون هذا الارتباط ضعيفا بحيث يمكن للجزء الغير البروتيني ( المرافق الانزيمي ) ان يتجول بين الجزيئات البروتينية المختلفة و عادة يطلق علي هذا الجزء الغير بروتيني من الانزيم المرافق الانزيمي و يعمل المرافق الانزيمي كحامل متنقل لايونات الهيدروجين وغيره من الايونات او المجاميع من انزيم الي اخر

الانواع البكتيرية التي تقوم بالعديد من التفاعلات الانزيمية تحتوي بالضرورة الى على نظام انزيمي يضم العديد من الانزيمات كل منها يتخصص في تفاعل معين ،

فعندما تنمو الخلية البكتيرية في بيئة ما فان النشاط الانزيمي الكيميائي يتمثل في تحليل المواد الغذائية المكونة للبيئة ومن ثم بناء مواد خلوية جديدة ولتحقيق مثل هذه العملية تفرز البكتريا نوعين من الانزيمات

- انزيمات خارجية **exoenzymes** تقوم بتحليل مواد البيئة

- انزيمات داخلية **endoenzymes** تقوم بعملية بناء مواد الخلية الجديدة

عادة يقترن اسم الانزيم باسم مادة التفاعل التي يعمل عليها مثل

**Pyruvic decarboxylases- succinic dehydrogenase**

وتمتلك الخلية البكتيرية عدد كبير من الانزيمات التي تقوم بالمساعدة في العديد من التفاعلات



# اقسام الانزيمات البكتيرية

تقسم الانزيمات البكتيرية تبعا للتفاعلات التي تقوم بها كعوامل مساعدة فمثلا الانزيمات التي تقوم بازالة الهيدروجين تسمى dehydrogenase والتي تقوم بازالة مجموعة هيدروكسيل تسمى decarboxylase و تمتلك الخلية البكتيرية عدد كبير من الانزيمات التي تقوم بالمساعدة في العديد من التفاعلات مثل

## 1- تفاعلات الاكسدة والاختزال oxidation and reduction

كيميائيا يطلق على المادة تأكسدت إذا ما فقدت الكترونات واختزلت اذا اكتسبت الكترونا وعلى العموم اذا تاكسدت مادة معينة فبالمقابل هناك مادة تختزل لان الالكترونات التي تفقدها مادة تكتسبها مادة اخرى وهي عموما تحصل بمساعدة الانزيمات المزيلة للهيدروجين dehydrogenase enzymes وان عملية الاكسدة ليست مقتصرة على اتحاد المواد بالاكسجين فانواع اخرى من البكتيريا تنمو في غياب الاوكسجين ولكنها قادرة على الحصول على طاقتها :

بعملية الاكسدة البيولوجية اللاهوائية التي لاتستعمل الاوكسجين والتي تسمى بالتخمير

fermentation

اما الاكسدة البيولوجية الهوائية تسمى بالتنفس respiration

## 2- تفاعلات التحلل المائي hydrolysis

انزيمات التحلل المائي تعمل على تحليل البروتين الى احماض امينية والدهون الى احماض شحمية وجلسرين والكاربوهيدرات الى سكريات متعددة وسكريات احادية

## 3- تفاعلات ازالة مجموعة الامين deamination

وهي تتم على مرحلتين فعلى سبيل المثال يقوم انزيم L-glutamic acid deaminase بازالة الهيدروجين من الحامض الاميني ومن ثم يحدث تحلل مائي محررا الامونيا

## 4- ازالة مجموعة الكربوكسيل decarboxylation

حيث تتم ازالة مجموعة الكربوكسيل من الاحماض الامينية بواسطة انزيمات carboxylase

ما هي العوامل التي تؤثر علي دراسة النشاط الانزيمي ؟

- ١- سرعة مرور مواد التفاعل خلال الجدر الخلوية وإزالة نواتج التفاعل بفعل نظم إنزيمية أخرى
- ٢- أاختلافات بين الظروف الفزيوكيمائية physio-chemical conditions بداخل وخارج الخلايا
- ٣- التداخل بين التفاعلات المعقدة العديدة وهذا يسبب صعوبة في الحكم على التفاعل إذا كان تم نتيجة فعل أنزيم واحد أو مجموعة من الإنزيمات

وهي تلامس التفاعلات التي تنكسر فيها رابطة معينة في جزيئات المادة المتفاعلة وتضاف في نفس الوقت عناصر الماء (  $H-OH$  ) إلى المواد الناتجة، وغالباً ما تكون مثل هذه التفاعلات عكسية

تقسم إنزيمات هذه الطائفة تبعاً لطبيعة المادة المتفاعلة التي تتحلل مائياً و أهم هذه الأقسام:

الإنزيمات المحللة للبييدات (اللياز) : تحفز التحليل المائي للبييدات  
تكتب المعادلة العامة للتحلل المائي للغليسيريد الثلاثي إلى غليسرول  
وأحماض دهنية

الإنزيمات المحللة للإسترات الفوسفاتية (الفوسفاتاز) :  
تحفز التحليل المائي للروابط الإستيرية الفوسفاتية و مثال عن ذلك التحلل  
المائي للجلوكوز 6 فوسفات

❖ الإنزيمات المحللة للبروتينات : هي التي تهاجم الرابطة الببتيدية في البروتينات أو الببتيدات.

❖ كربوكسي بيبتيڊاز Carboxy Peptidases\_ هي التي تحفّز التحليل المائي

للروابط الببتيدية ابتداءً من الطرف الذي يحتوي على مجموعة كربوكسيل حرة

❖ و أمينوبيبتيڊاز Amino Peptipases\_ هي التي تحفّز التحليل المائي للروابط

الببتيدية ابتداءً من الطرف الحاوي على مجموعة أمينو حرة

❖ أندوبيبتيڊاز Endopeptidase هي التي تحفّز التحلل المائي للروابط الببتيدية

الداخلية في جزيء البروتين و تدعى الإنزيم الببسين و التربسين و الكيموتريبسين.



## Carbohydrases الأنزيمات المحللة للكربوهيدرات :

إنزيمات التحليل المائي للسكريات:

و هي التي تحفّز التحليل المائي للروابط الجليكوسيدية في السكريات المركبة و المتعددة و منها إنزيمات الأميلاز و الأنفرتاز (تحليل مائي للسكرز) و المالتاز و اللاكتاز ... الخ.

### ملخص

مجموعة كبيرة من الإنزيمات التي تساعد تفاعلات التحليل المائي حيث يشمل إنزيمات الهضم مثل إنزيم الأميليز الذي يحلل النشا وأنزيم السكريز و إنزيمات الليباز و إنزيمات البروتيز.

## تحليل السليلوز

تقوم الكائنات الحية الدقيقة بافراز إنزيمات سليلولاز Cellulase  
تحلل السليلوز إلى سيلوبيوز Cellobiose ثم يعمل عليه أنزيم  
سيلوبياز Cellobase إلى سكر جلوكوز.

أقترح حديثاً أن تحلل السليلوز يكون

سيلولوز ← سيلوبيوز ← جلوكوز ← ثاني اوكسيد الكربون

وذلك باستخدام : انزيم السليلولاز ثم انزيم السيلوبيوز ثم انزيمات مؤكسدة.

## الظروف التي تؤثر علي تكوين الانزيمات بالخلايا

المحتويات الانزيمية للخلايا الحيوانية تكون ثابتة نسبيا حيث طبيعة ووضع هذه الخلايا يجعلها اقل عرضة للتغيرات البيئية الشديدة الخلايا البكتيرية تكون اكثر عرضة لتاثيرات التغيرات الحادة البيئية بدرجة واضحة

الكائن البكتيري الواحد لايمتلك كل الانزيمات اللازمة للتفاعل مع كل الظروف البيئية في وقت واحد

مثال البكتيريا تستطيع العيش في الظروف الهوائية و غير الهوائية حيث تكون مجهزة بانزيمات الاكسدة عند نموها في الظروف الهوائية و تمتلك انزيمات التخمر في الظروف الغير الهوائية



تعريف المحتوي الانزيمي الحقيقي للخلايا البكتيرية هو قدرتها الانزيمية الفعلية التي توافق العوامل البيئية التي تنمو عليه الخلية و من هذه العوامل

1- التركيب الكيماوي للبيئة

2-العوامل الفيزيوكيميائية السائدة اثناء النمو مثال التهوية و درجة الحموضة

pH

3-عمر المزرعة البكتيرية

3- عمر المزرعة البكتيرية يتاثر التكوين الانزيمي في الخلايا في المراحل النمو المختلفة و يرجع ذلك للتغيرات الفزيائية و الكيميائية التي تحدث اثناء النشاط الايضي الخلوي

ويوجد نوعين من الاختلاف في المحتويات الانزيمية نتيجة لعمر المزرعة

- 1- تكون الخلايا ذات نشاط انزيمي مرتفع في الفترات الاولى من النمو ثم يتناقص هذا النشاط باستمرار النمو ثم ينخفض فجأة بعد حدوث الانقسام الخلوي
- 2- ان تكون المزارع اقل نشاطا ثم يزداد النشاط تدريجيا حتي يصل الي قمته عندما تتوقف الخلايا عن الانقسام وعند نهاية النمو ينخفض النشاط الانزيمي كليا نتيجة موت الخلايا او اكسدة او هضم البروتينات من الانزيمات التي تتاثر بعمر المزرعة

Decarboxylases - proteases dehydrogenases

تختص بهدم المواد او انتاج الطاقة اي مرتبطة بالعمليات الهدمية و ليست البنائية

## التركيب الكيماوي للبيئة

يتكون في البكتيريا نوعان من الانزيمات هما

الانزيمات الاساسية تتكون بصفة دائمة بغض النظر عن وجود ملدة التفاعل في البيئة و لا يحدث فيه فقد

### الانزيمات التكيفية

تتكون فقط في وجود مادة الفاعلها التخصصية (تتكون عند الحاجة ) و يختفي نشاطها عندما يتم زراعتها علي اوساط لا تحتوي علي مادة التفاعل الجديدة وتتناسب سرعة اختفاء الانزيم طرديا مع المدة التي تستغرقها الخلية لتكوين هذه الانزيمات و تحتاج الخلية لزمان اطول لزراعتها مرات عديدة علي وسط خالي من المادة حتي تفقد قدرتها علي تكوين الانزيم التكيفي وتسمى العملية العكسية لتكوين الانزيم التكيفي باسم **فقد التكيف الانزيمي** enzymatic deadaptation

# التغذية في البكتيريا

عند تصنيف البكتيريا في مجاميع الغذائية يتوقف ذلك علي عاملين  
اساسيين هما

(1) مصدر الطاقة

(2) مصدر الكربون الاساسي الذي تعتمد عليه البكتيريا

# 1) بناء علي مصدر الطاقة

## Chemosynthetic (Chemotrophic)

البكتيريا الكيميائية  
تستعمل المواد الكيميائية  
كمصدر للطاقة

## Photosynthetic (phototrophic)

البكتيريا الممثلة للضوء  
تستعمل الضوء  
كمصدر للطاقة

# 2) بناء علي مصدر الكربون الاساسي الذي تعتمد عليه البكتيريا

## Heterototrophic bacteria

بكتيريا غير ذاتية التغذية  
تستخدم المواد العضوية  
كمصدر للكربون

## Autototrophic bacteria

بكتيريا ذاتية التغذية  
تستخدم ثاني اكسيد الكربون  
كمصدر وحيد واساسي للكربون

**اولا: البكتيريا اتي تستخدم CO2 كمصدر وحيد واساسي للكربون اي انها تستطيع تكوين مواد عضوية من ثاني اكسيد الكربون ومادة مانحة للهيدروجين و ذلك باستخدام طاقة من اي من المصدرين الاتيين :**  
**1- ضوء الشمس وتعرف باسم البكتيريا ذاتية التغذية الضوئية**

## **Photosynthetic Autotrophic bacteria**

**2- كيميائية نتيجة اكسدة بعض المواد الاعضوية البسيطة و تعرف باسم البكتيريا ذاتية التغذية الكيميائية**

## **Chemosynthetic Autotrophic bacteria**

**ثانيا : البكتيريا التي لا تستخدم CO2 كمصدر وحيد واساسي للكربون**  
**لكنها تستخدم مصادر كربونية عضوية كمصدر للكربون تعرف باسم**  
**Heterototrophic bacteria البكتيريا غير ذاتية التغذية**

**وتستخدم الطاقة من اي من المصدرين الاتيين:**  
**3- طاقة مصدرها ضوء الشمس وتعرف باسم**  
**البكتيريا غير ذاتية التغذية الضوئية**

## **Photosynthetic Heterototrophic bacteria**

**4- طاقة مصدرها الكربون العضوي وتعتمد علي طاقة كيميائية وتعمل المادة**  
**الكربونية العضوية في هذه الحالة كمصدر للكربون و الطاقة و تعرف باسم**  
**البكتيريا غير ذاتية التغذية الكيميائية**

## **Chemosynthetic Heterototrophic bacteria**

# البناء الضوئي و البناء الكيميائي البكتيري

من المعروف ان البلاستيدات الخضراء التي توجد في الطحالب و النباتات فقط و لا توجد في البكتيريا و الفطريات . لذا فان البكتيريا الخضراء المزرقه و بقية البكتيريا التي تقوم بعملية البناء الضوئي توجد بها صبغيات صغيرة هي المسئولة عن عملية البناء الضوئي و ذلك في اغشية مميزة يطلق عليها الحوامل الصبغية Chromotrophs

هناك مجموعة من البكتيريا تستطيع ان تكون المواد العضوية اللازمة لها من خلال تثبيت الكربون ضوئيا او كيميائيا و لهاتين العمليتين مواصفات خاصة و تختلف كل منهما عن عملية البناء الضوئي في النباتات الراقية



# اولا بكتيريا البناء الضوئي

1- بكتيريا الكبريت الخضراء 2- بكتيريا الكبريت الارجوانية

3- البكتيريا اللاكبريتية

تتميز هذه الانواع من البكتيريا بتواجد الاصباغ البنائية فيما يسمى الحاملات الملونة وهي جسيمات تحتوي علي اغشية يصل قطرها من 500 – 600 انجستروم و تقوم هذه الاجسام الحاملة الملونة بعملية الفسفرة الضوئية Photophosphorylation و تحتوي علي كلوروفيلات و كاروتينيدات و سيتوكرومات و كينونات و بروتينات و مركبات اخري متعددة لازمة لاتمام عملية البناء الضوئي و تختلف في اشكالها بحسب نوع البكتيريا ولا توجد بها جرنات

و صبغات بكتيريا البناء الضوئي تتרכب اساسا من الكلورفيل البكتيري  
Bacterialchlorophyll 650

وفي حالة البكتيريا الخضراء فانها تحتوي علي نوعين من الكلوروفيلات

Chlorobium chlorophyll 660 & Chlorobium chlorophyll 650

وهذه البكتيريا تحتوي علي ما يسمى بالوحدة البنائية مثلها في ذلك  
النباتات الراقية و تحتوي علي بعض الكاروتينيدات (32 نوعا)

# Mechanism of bacterial photosynthesis

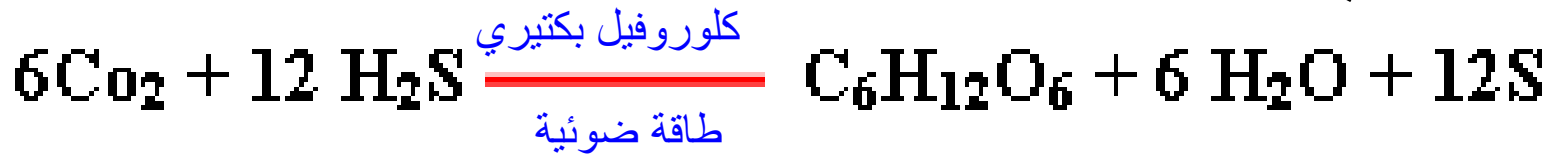
## ميكانيكية البناء الضوئي البكتيري

تنقسم عملية البناء الضوئي الي

1- تفاعل الضوئي light reaction 2- تثبيت الكربون CO2

### 1- تفاعل الضوئي

تقوم بكتيريا البناء الضوئي باستخدام H<sub>2</sub>S بدلا من الماء و الطاقة الضوئية بتثبيت الكربون العضوي و لذلك لايتصاعد الاكسجين ولكن يتحرر الكبريت كما يتضح من المعادلة التالية



الضوء يعمل على تحليل H<sub>2</sub>S إلى هيدروجين وكبريت ثم يستعمل الهيدروجين في تفاعلات لا ضوئية لإختزال CO<sub>2</sub> إلى كربوهيدرات مع تحرر الكبريت

**تفاعل الضوئي** يتم فيها امتصاص الطاقة الضوئية بواسطة الصبغات وتحويلها إلى طاقة كيميائية تختزن مؤقتاً في جزيئات غنية بالطاقة

بالنسبة لحركة الالكترونات فانه يعتقد ان في بعض انواع بكتيريا البناء الضوئي هناك مسار واحد للاكترونات . ويقوم هذا المسار بما يعادل المسارين في النبات الراقى ( مسار الالكترونات في البناء و مسار الالكترونات في السلسلة التنفسية)

**الفسفرة الضوئية الدائرية** هي التي تسود في بكتيريا البناء الضوئي علي عكس النبات الذي يسود فيه الفسفرة الضوئية اللادائرية حيث تتم هذه الفسفرة الدائرية في غياب الاكسجين .

الوظيفة المفترضة للكلوروفيل البكتيري في البكتيريا ذاتية التغذية الضوئية الهوائية هو تنفيذ الفسفرة الضوئية حيث ان الأكسجين ينظم تكوين الصبغات في البكتيريا

البكتيريا الأرجوانية والخضراء تنمو بالتغذية الضوئية فقط تحت ظروف لاهوائية بسبب أن تكوين الصبغات في هذه الكائنات يثبط بواسطة الأكسجين

- تعيش هذه البكتريا فى طين البرك والمستنقعات حيث يتوافر كبريتيد الهيدروجين  $H_2S$  وهو مصدر للهيدروجين اللازم لإختزال  $CO_2$  لبناء الكربوهيدرات .

## 2- تثبيت الكربون CO2 او تفاعل الظلام

تتم التفاعلات التالية في عدم وجود الضوء اي في الظلام  
يتطلب التفاعل 3 جزيئات ATP و جزيئين من NADPH كي يتم اختزال جزئ  
واحد من ثاني اكسيد الكربون ومن ثم يستخدمه في تخليق الكربوهيدرات CH2O



اختزال ثاني اكسيد الكربون

التفاعلات اللاضوئية : تستخدم الجزيئات الغنية بالطاقة في بناء مركبات سكر ثلاثية  
الكربون بإضافة ثاني أكسيد الكربون الجوي في سلسلة من تفاعلات تشكل حلقة كالفن  
او احدي المسارات الاخرى ويتم في هذه المرحلة خزن الطاقة في السكريات والمركبات  
العضوية الأخرى الناتجة منها. مع ملاحظة أن التفاعلات الضوئية تحتاج للضوء و  
التفاعلات اللاضوئية لا تحتاج للضوء ، وتعتمد على نواتج التفاعلات الضوئية

## 2- تثبيت الكربون CO2 او تفاعل الظلام

المصدر الرئيس للكربون في بكتيريا البناء الضوئي هو ثاني اكسيد الكربون و بالمقارنة مع النباتات الراقية نجد ان :

1- تتم دورة كالفن في بعض البكتيريا البناء الضوئي ( تفاعلات الظلام ) مثل البكتيريا

*Rhodospirillum rubrum* , *Thiobacillus sp*

2- هناك مسار اخر لتثبيت الكربون وهو مسار الاحماض الكربوكسيلية الاختزالية حيث يتم تثبيت اربعة جزيئات في ثاني اكسيد الكربون . و فية يكون الناتج حمض الاكسالواسيتك و تحتاج هذه الدورة الي انزيمات دورة كريس ونجدها في لبكتيريا

*Chlorobium and chromatium*

3- بعض البكتيريا تستعمل مركبات عضوية لاختزال ثاني اكسيد الكربون اثناء عملية البناء الضوئي بها , حيث تستعمل هذه المركبات العضوية لانتاج الهيدروجين والذي يستغل في اختزال ثاني اكسيد الكربون

# عملية البناء الضوئي

## النبات الاخضر

## البكتيريا

تتم في وجود الضوء و الاكسجين

تتم في وجود الضوء فقط و غياب الاكسجين

توجد بلاستيدات

توجد حوامل صبغية

تمتص موجات قصيرة 450-700 نانوميتر

تمتص موجات طويلة 800-900 نانوميتر

تحتوي علي كلوروفيل (أ)

لا تحتوي علي كلوروفيل (أ) ولكن يوجد كلوروفيل بكتيري

الفسفرة الضوئية اللادائرية هي السائدة

الفسفرة الضوئية الدائرية هي السائدة

الكاروتينويدات بها حلقات كربونية

الكاروتينويدات علي شكل سلاسل كربونية

يتصاعد O<sub>2</sub> اثناء عملية البناء الضوئي

لا يتصاعد الاكسجين

الماء هو المانح للاكترونات

الماء غير مانح للاكترونات

CO<sub>2</sub> هو مصدر الكربون

CO<sub>2</sub> هو و مواد عضوية اخري مصدر الكربون

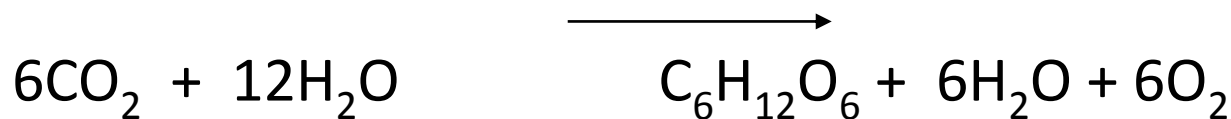
المستقبل النهائي للاكترونات NADH

المستقبل النهائي للاكترونات NAD

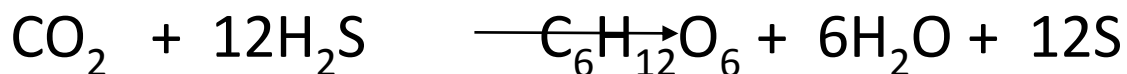


ناقشي الفروق بين التفاعلات الضوئية التي تحدث في النباتات الخضراء وتلك التي تحدث في بكتيريا الكبريت الأرجوانية والخضراء ؟

ج/ في النبات الأخضر: يحلل الضوء الماء إلى أكسجين يتصاعد وغاز هيدروجين يختزل  $\text{CO}_2$  إلى مواد كربوهيدراتية



في بكتيريا الكبريت الأرجوانية والخضراء: يحلل الضوء كبريتيد الهيدروجين إلى كبريت وهيدروجين وبناء على ذلك فإن الأكسجين المتصاعد يأتي من الماء والكبريت يتحرر من كبريتيد الهيدروجين



## ثانيا : البناء الكيميائي Chemosynthesis

هناك تثبيت لثاني اكسيد الكربون باستعمال الطاقة الكيميائية التي تنتج من اكسدة بعض المركبات غير العضوية , وهو ما يحدث في البكتيريا عديمة اللون و تنتج سكريات و تسمى هذه العملية لتخليق السكريات بالبناء الكيميائي و هو ما يعني بناء الكربون خلال اختزال ثاني اكسيد الكربون في الظلام باستغلال الطاقة الناتجة

### عن عملية الاكسدة Oxidation

من امثلة البكتيريا التي تقوم بالبناء الكيميائي

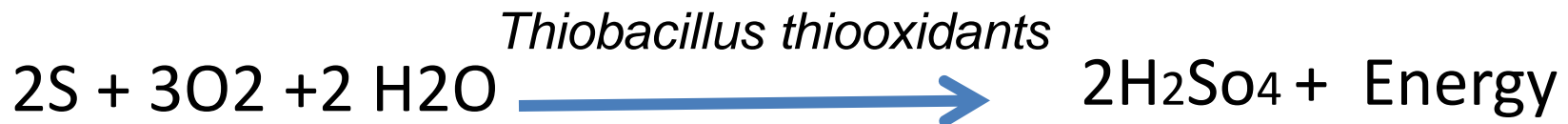
- 1- بكتيريا الكبريت الكيميائية -
- 2- بكتيريا الحديد الكيميائية -
- 3- بكتيريا النيترة
- 4- بكتيريا الهيدروجين و الميثان تستطيع اكسدة الهيدروجين ويتكون الماء وتنطلق طاقة التي تستخدم في اختزال ثاني اكسيد الكربون

## بكتيريا النيترة ( المواد النيتروجينية غير العضوية البسيطة )

بكتيريا النيتروزوموناس تستفيد من أكسدة الأمونيا الي نيتريت وتنطلق طاقة في تستخدم في اختزال (تثبيت) ثاني أكسيد الكربون .  
ثم قوم بكتيريا نيتروباكتير باكسدة النيتريت الي نترات و تعرفان ببكتيريا النيترة  
Nitrifying bacteria

## البكتيريا الكبريتية الكيميائية ( كبريتيد الهيدروجين)

تختلف عن البكتيريا ذاتية التغذية الضوئية في عدم احتوائها علي صبغات تمثيلية و تستطيع اكسدة الكبريت للحصول علي الطاقة اللازمة مثل  
*Thiobacillus thiooxidans*



## بكتيريا الحديد الكيميائية

تستطيع اكسده الحديد و مركباته و تنطلق الطاقه حيث تستغل في اختزال ثاني اكسيد الكربون مثل بكتيريا جاليونيلا Galionella



## بكتيريا الهيدروجين الكيميائية

تستطيع اكسده الهيدروجين ويتكون الماء و تنطلق الطاقه التي اختزال ثاني اكسيد الكربون



## البكتيريا غير ذاتية التغذية الضوئية

البكتيريا غير الكبريتية الارجوانية  
تستخدم الكحولات او الاحماض الدهنية كمصدر للهيدروجين لاختزال (تثبيت) ثاني  
أكسيد الكربون

## البكتيريا غير ذاتية التغذية الكيميائية

تعد غالبية انواع البكتيريا غير ذاتية التغذية , حيث تستمد الطاقة اللازمة لبناء مادتها  
البرتوبلازمية من تكسير مواد عضوية من الكائنات الحية الأخرى .

مثال

البكتيريا الرمية مثال - بكتيريا التحلل  
البكتيريا المتطفلة مثال - جميع البكتيريا المسببة للأمراض .  
البكتيريا المعيشة تكافلية مع غيرها من الأحياء مثال - بكتيريا العقد الجذرية

# التنفس

العملية التي تستخلص بها خلايا الكائن الحي الطاقة اللازمة لنشاطها من الطاقة المخزنة في الروابط الكيميائية للمواد الكربوهيدراتية .

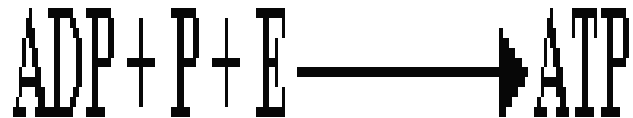
الطاقة المنطلقة من تكسير الروابط الكيميائية في جزئ الجلوكوز يخزن في مركبات خاصة تسمى عملة الطاقة وهي جزئيات (ATP) العملة الدولية للطاقة.

## تركيب جزئ ATP

يتكون ATP من ثلاث وحدات هي:

الأدينين (قاعدة نيروجينية)- سكر الريبوز (خماسي الكربون)- ثلاث مجموعات فوسفات.

يتحول ATP إلى ADP وتنطلق طاقة حوالي من 7 إلى 12 سعر حراري لكل مول .



عملية التنفس الخلوي هو مجموعة من العمليات التي تحدث داخل الخلية و التي بموجبها يتم تحويل المواد الغذائية المعقدة الي مركبات اقل تعقيدا في التركيب مع تحرير الطاقة الكامنة في تلك المواد علي دفعات .

و عملية التنفس هي عملية اكسدة للمواد الغذائية و اختزال للاكسيجين لتكوين الماء. من المواد الغذائية التي نستخدم في التنفس النشا و السكريوز و الجلوكوز وغيرها من السكاكر و المواد الدهنية و الاحماض العضوية وتحت ظروف معينة قد تستعمل البروتينات كمواد اولية للتنفس



ان عملية التنفس الخلوي عملية حيوية معقدة لكنها تتمثل اساسا في تلك التفاعلات الكيميائية المرتبطة و التي تحدث اثناء عملية اكسدة جزئ سكر الجلوكوز في مراحل رئيسية وهي :

Glycolysis

اولا : التحلل السكري

Pyruvic acid Oxidation

ثانيا : اكسدة حمض البيروفيك

Citric acid cycle

ثالثا : دورة حمض الستريك

electron transport system رابعا: نظام نقل الالكترونات



جميع الخلايا سواء البكتيرية والطحلبية والفطرية والنباتية أو الحيوانية تهدم المركبات الكربوهيدراتية (سكر الجلوكوز) بنفس الطريقة الي تسمى تحلل الجلوكوز glycolysis وبنفس الإنزيمات وعض النظر عما اذا كانت الخلية هوائية أو لا هوائية التنفس.

يعتمد تنفس الخلية على تحلل الجلوكوز ولذا ينقسم التنفس الى قسمين:

#### أ- التنفس اللاهوائي (Anaerobic respiration (fermentation))

هو تحلل الجلوكوز اللاهوائي ويوصف أيضا بالتخمير fermentation (البكتيريا ) وهو لايتطلب اكسجين لذلك فالطاقة المنطلقة منه منخفضة لعدم تحلل الجلوكوز الى ماء وثاني اكسيد الكربون.

#### ب- التنفس الهوائي Aerobic respiration

يحتاج هذا النوع من التنفس الى اكسجين وتكون النتيجة تحول سكر الجلوكوز الى ماء وثاني اكسيد الكربون وتنطلق منه طاقة تخزن في مركب ATP.

## التنفس الهوائي Aerobic respiration

يقصد به سلسلة التفاعلات التي يتم عن طريقها تحليل المادة العضوية (سكر الجلوكوز مثلا) الى ثاني اكسيد الكربون والماء في وجود الأكسجين وتتم هذه العملية في مرحلتين. المرحلة الأولى في السيتوبلازم والمرحلة الثانية في الميتوكوندريا في الخلايا حقيقية النواة أو في الميسوسومات في البكتريا



وينطلق من هذا التنفس كمية كبيرة من الطاقة تقدر بحوالي **687** كيلو كالورى بالمقارنة مع التنفس اللاهوائي الذي ينتج كمية قليلة من الطاقة تقدر بحوالي **58** كيلو كالورى.

## تحلل الجلوكوز اللاهوائي (التخمير) Anaerobic respiration

وهو تحليل الجلوكوز لا هوائيا (في غياب الأكسجين) من جزيء يحتوي على ستة ذرات من الكربون الى جزيئين يحتوي كل منهما على ثلاث ذرات من الكربون يعرف **بحمض اللاكتيك**, أو الى جزيئين يحتوي كل جزيء على ذرتين كربون (**كحول ايثيلي**) و2 جزيء ثاني اكسيد الكربون,

وذلك حسب نوع الخلية الحية التي تحلل سكر الجلوكوز. ويتم ذلك عبر سلسلة تتألف من عشرة انزيمات بحيث يتحول في نهايتها سكر الجلوكوز الى البيروفيت ومنه يمكن الحصول على حمض اللاكتيك أو الكحول أو Acetyl Co-enzyme الذي يعتبر وقود دورة كربس والتنفس الهوائي في وجود الأكسجين

ويتم ذلك في الميتوكوندريا أو الميسوسوم Mesosomes

\* هذا وتختلف البكتيريا اختلافا كبيرا في قدرتها التخمرية للمواد الكربوهيدراتية حيث أن بعض السكريات البسيطة قد تؤكسد بفعل البكتيريا ويكون الناتج حمض وغاز، بعض البكتيريا تخمر نفس السكر وينتج حمض فقط، بينما البعض الآخر يكون غير قادر على تخمير أو أكسدة هذا السكر،

على ماذا يدل ذلك؟

نواتج التخمر تختلف لعدة أسباب:

- |                  |                  |                |
|------------------|------------------|----------------|
| 1- نوع البكتيريا | 2- نوع الانزيمات | 3- نوع السكر   |
| 4- فترة التحضين  | 5- درجة الحرارة  | 6- درجة الـ PH |

بعض أنواع البكتيريا لديه القدرة على تخمر السكريات خلال 24 ساعة وبعضها قادر على تخميرها خلال 3 أيام وبعضها خلال أسبوع، ويتضح لدينا مما سبق أن عملية التخمير عملية هامة كدراسة تصنيفية تفريقية تميز بين الأنواع البكتيرية، من أشهر أنواع البكتيريا القادرة على تخمر السكريات خلال 24 ساعة بكتيريا القولون *E. coli*

## التنفس اللاهوائي (التخمّر) :

تتنفس البكتيريا والخميرة تنفسًا لا هوائيًا وذلك في حالة نقص أو إنعدام الأكسجين. عملية التخمّر لا تحتاج أكسجين ولكنها تتم في وجود مجموعة من الإنزيمات.

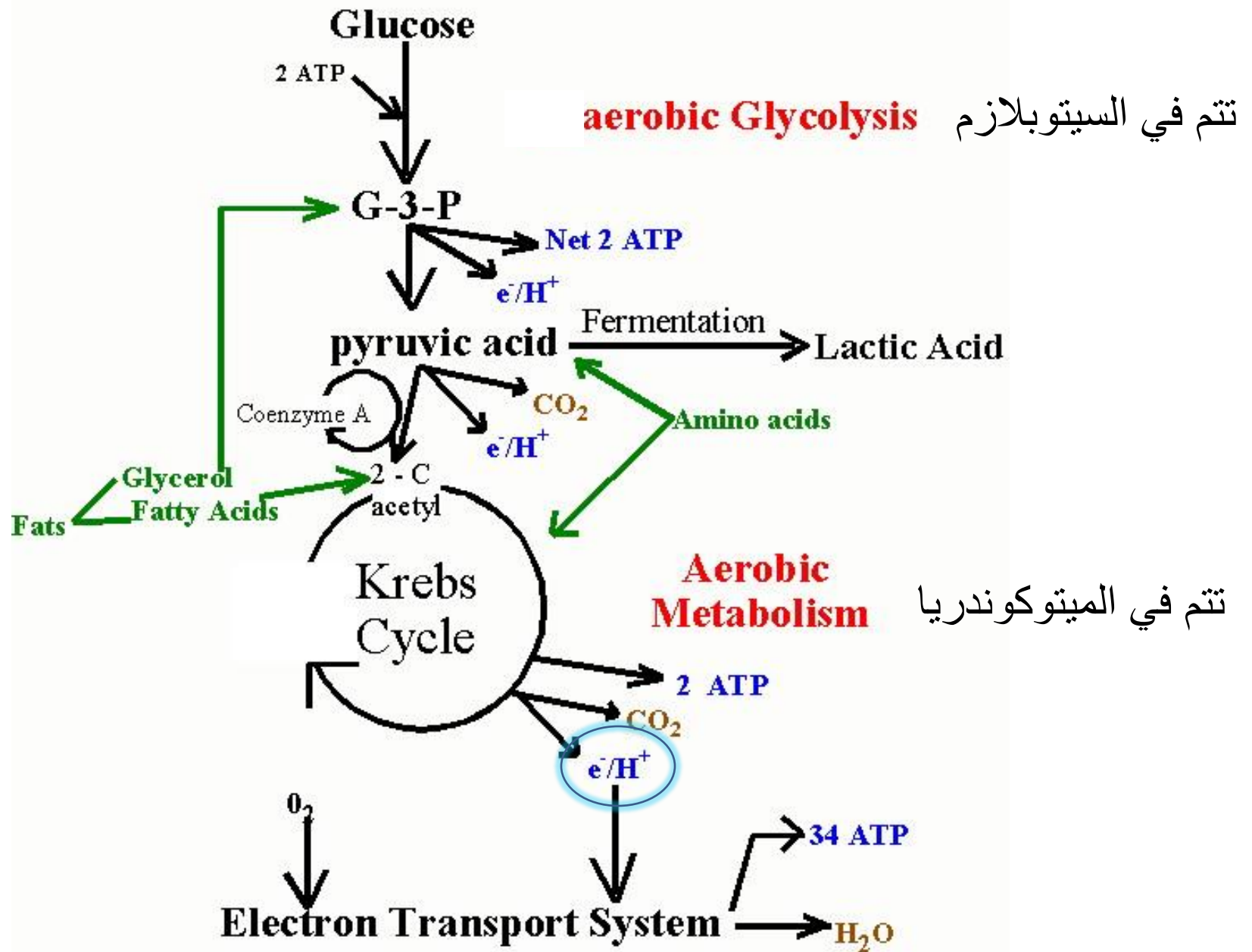
1-تمر عملية التنفس اللاهوائي بنفس المراحل الأولى من التنفس الهوائي حيث

يحدث انشطار الجلوكوز وتكوين 2 جزئ حمض بيروفيك وينتج عن ذلك **2ATP** يعاد استهلاك **2NADH** الناتجة أثناء انشطار الجلوكوز في التحولات التالية:

-تحول حمض البيروفيك في التنفس اللاهوائي حسب نوع الخلية

عند نقص الأكسجين يتحول حمض البيروفيك إلى حمض اللاكتيك, ثم وإذا توافر الأكسجين بعد ذلك فإن حمض اللاكتيك يتحول إلى حمض البيروفيك مرة أخرى ثم يتحول حمض البيروفيك إلى أستيل A - CO ليدخل في دورة كربس ويتغير التنفس اللاهوائي إلى التنفس الهوائي.

تحول حمض البيروفيك إلى حمض اللاكتيك يعرف ذلك بالتخمّر الحمضي .



ان عملية التنفس الخلوي عملية حيوية معقدة لكنها تتمثل اساسا في تلك التفاعلات الكيميائية المرتبطة و التي تحدث اثناء عملية اكسدة جزئ سكر الجلوكوز في مراحل رئيسية وهي :

Glycolysis

اولا : التحلل السكري

Pyruvic acid Oxidation

ثانيا : اكسدة حمض البيروفيك

Citric acid cycle

ثالثا : دورة حمض الستريك

electron transport system رابعا: نظام نقل الالكترونات

## اولا : التحلل السكري ( الجليكوليزز ) Glycolysis

هو تحول الجلوكوز الي حمض البيروفيك باي مسار كيموحيوي ومن المسارات الجليكوليزية الرئيسية المعروفة

1- مسار امدن – مايرهوف (EM) يعتبر المسار الرئيسي في معظم الكائنات الحية . وينتج كمية بسيطة من ATP ولكنة هام . لانة ينتج معظم حمض البيروفيك الذي يدخل في دورة حمض الستريك و يستطيع الامدام بكميات كبيرة من ATP . يمكن ان يعمل تحت ظروف الهوائية او اللاهوائية .

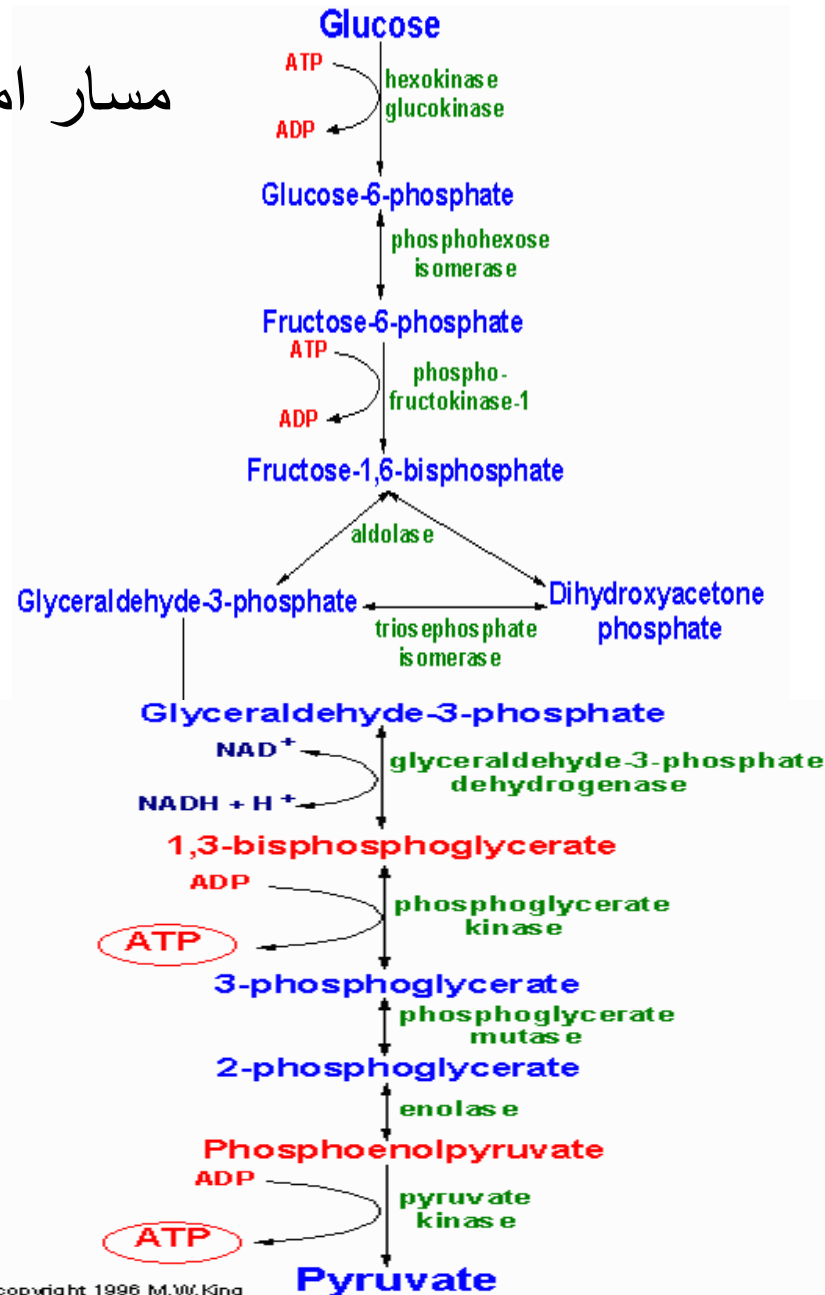
2- مسار فوسفات البنتوز ويحدث في معظم الكائنات الحية و يمكن ان يعمل تحت ظروف الهوائية او اللاهوائية . ويعتبر هذا المسار منبع التخليق الحيوي للسكريات الخماسية ( البنتوزات ) المطلوبة لتخليق الاحماض النووية

3- مسار انتير-دودوروف يعتبر هذا المسار نادرا في الطبيعة و لوحظ فقط في بعض البكتيريا السالبة لصبغة جرام وفي فطريات قليلة



# Carbohydrate Metabolism • السلسلة الأيضية لهدم سكر الجلوكوز تسمى Glycolysis

مسار امدن - ماير هوف (EM)



## ثانيا : اكسدة حمض البيروفيك Pyruvic acid Oxidation

تتم اكسدة حمض البيروفيك او هدمة عن طريق عدة مسارات تختلف علي حسب نوع الخلية التي تقوم بهذا العمل و الظروف المحيطة بها و. هناك مساران رئيسيان لهدم حمض البيروفيك .

1- مسار لاهوائي (التخمير)

2- مسار هوائي

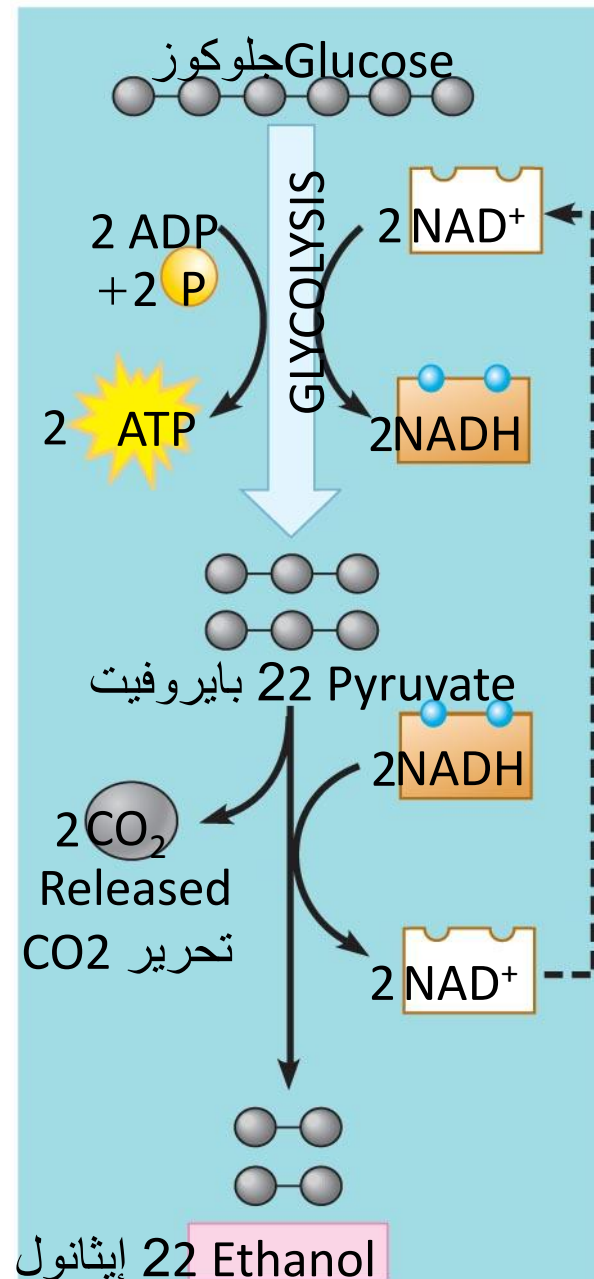
1- مسار لاهوائي (التخمير)

تتم عملية التخمير في غياب الاكسجين و تبعا لنواتجالتخمير امكن تمييز ست مجموعات تخمرية

- تخمر حمض اللاكتيك

يتكون حمض اللاكتيك يتفاعل اختزالي بواسطة انزيم اللاكتيك اسديز

## Alcohol fermentation تخمير الكحول



## تخمير كحولي

يتكون كحول ايثيلي و ذلك بعد نزع  $\text{CO}_2$  من حمض البيروفيك بواسطة انزيم بيروفيك اسيدديكربوكسيليز

## تخمير لاکتيکی مختلط :

ينتج حمض لاکتيك مختلطاً مع حمض الخليك و كحول الايثايل و ثاني اكسيد الكربون

## تخمير بروبيوني :

ينتج كمية بسيطة من حمض اللاكتيك بالإضافة الي حمض البروبيونيك و حمض الخليك و حمض السكسينك و ثاني اكسيد الكربون

## التخمير في بكتيريا مجموعة القولون

وهو تخمير مميز تكون نتيجة حمض لاکتيك وحمض الفورميك و كحول الايثايل

## تخمير بيوتيري

ينتج حمض خليك و حمض بيوتيريك و كمية كبيرة من غازي الهيدروجين و ثاني اكسيد الكربون

2- المسار الهوائي في وجود الاوكسيجين يتم اكسدة حمض البيروفيك في سلسلة طويلة ليتحول في النهاية الي ثاني اكسيد الكربون و ماء

## Citric acid cycle

## ثالثا : دورة حمض الستريك

تؤدي الى تكوين جزيئات وسطية ناقلة للطاقة تشتق منها كمية اضافية من الطاقة تقدر بثلاثين جزيئا من ATP + الكمية الناتجة من تحلل الجلوكوز = 36 جزئ

عملية هدم الاحماض الدهنية الى Acetyl Co-A (وقود دورة كربس) تتم في ال Matrix عن طريق  $\beta$ -Oxidation

## دورة كريس Krebs cycle

يوجد ثلاث عمليات رئيسية يجب أن تؤخذ في الاعتبار بالنسبة لدورة كريس:

أ- تحول جزيئات المواد الغذائية الرئيسية إلى مركب ثنائي الكربون يدعى حمض الخليك الذي يوجد دائما متحدا مع المرافق الإنزيمي Co-enzyme A ويطلق عليهما معا Acetyl Co-enzyme A والبعض الآخر يدخل إلى الدورة مباشرة.

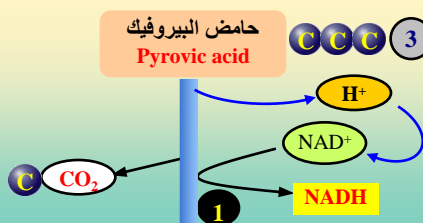
ب- يدخل مركب ال Acetyl Co-enzyme A دورة كريس وأثناء الدورة يتم انفصال ثاني أكسيد الكربون والماء و ذرات الهيدروجين بواسطة نازعات الهيدروجين Dehydrogenases ليتحول ال  $NAD^+$  و  $FAD^+$  إلى  $NADH+H^+$  و  $FADH_2$  على التوالي وهذه تعتبر حاملات الطاقة في دورة كريس.

ج- تنزع ذرات الهيدروجين في أزواج ويصاحب نزاعها انتقال الإلكترونات المحملة على  $NADH$  و  $FADH_2$  عبر سلسلة خطية من مركبات ناقلة للإلكترونات تدعى السلسلة التنفسية لنقل الإلكترونات وبنقلها تفقد طاقتها على مراحل وتستخدم الطاقة المنطلقة في تكوين مركب الطاقة ATP عن طريق الجمع بين ال ADP ومجموعة الفوسفات غير العضوية. وعملية تكوين ال ATP تسمى الأكسدة الفسفورية Oxidative phosphorylation وفي المرحلة الأخيرة تنقل الإلكترونات إلى الأكسجين حيث يختزل ويتكون الماء كناتج نهائي.

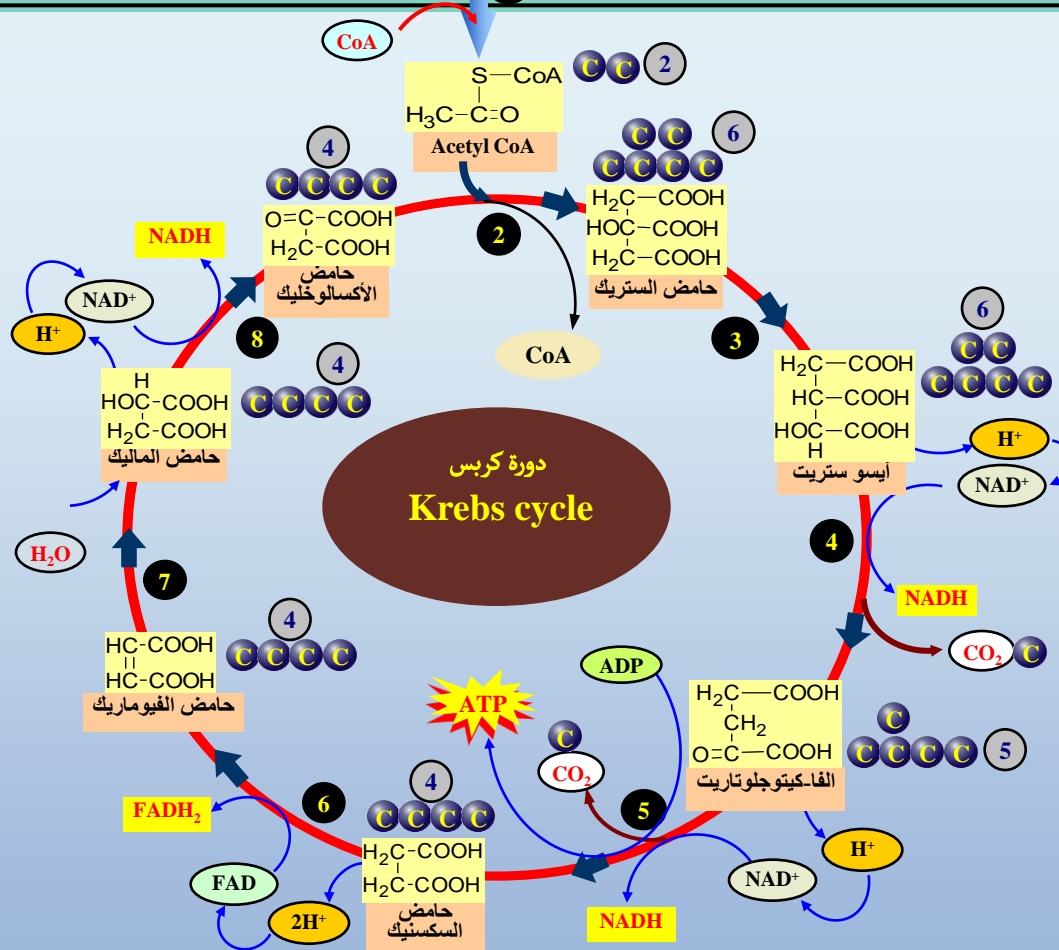
يستخدم مركب Acetyl Co-enzyme A كعربة نقل لإدخال ذرتين من الكربون إلى دورة كريس وأثناء الدورة يتم انطلاق جزئين من ثاني أكسيد الكربون ويتكون ثلاث جزيئات  $NADH_2$  وجزئ واحد من GTP وآخر من  $FADH_2$ . ويلاحظ أيضا أن هذه المرافقات الإنزيمية تعمل كعربات لنقل الإلكترونات من دورة كريس إلى السلسلة التنفسية وفي هذه السلسلة يتم الربط بين انتقال الإلكترونات وتكوين مركب الطاقة بواسطة عملية الأكسدة الفسفورية حيث يتم تزامن أو تزواج بين انتقال الإلكترونات وتكوين ATP.

## السيتوبلازم

حامض البيروفيك  
Pyrovic acid



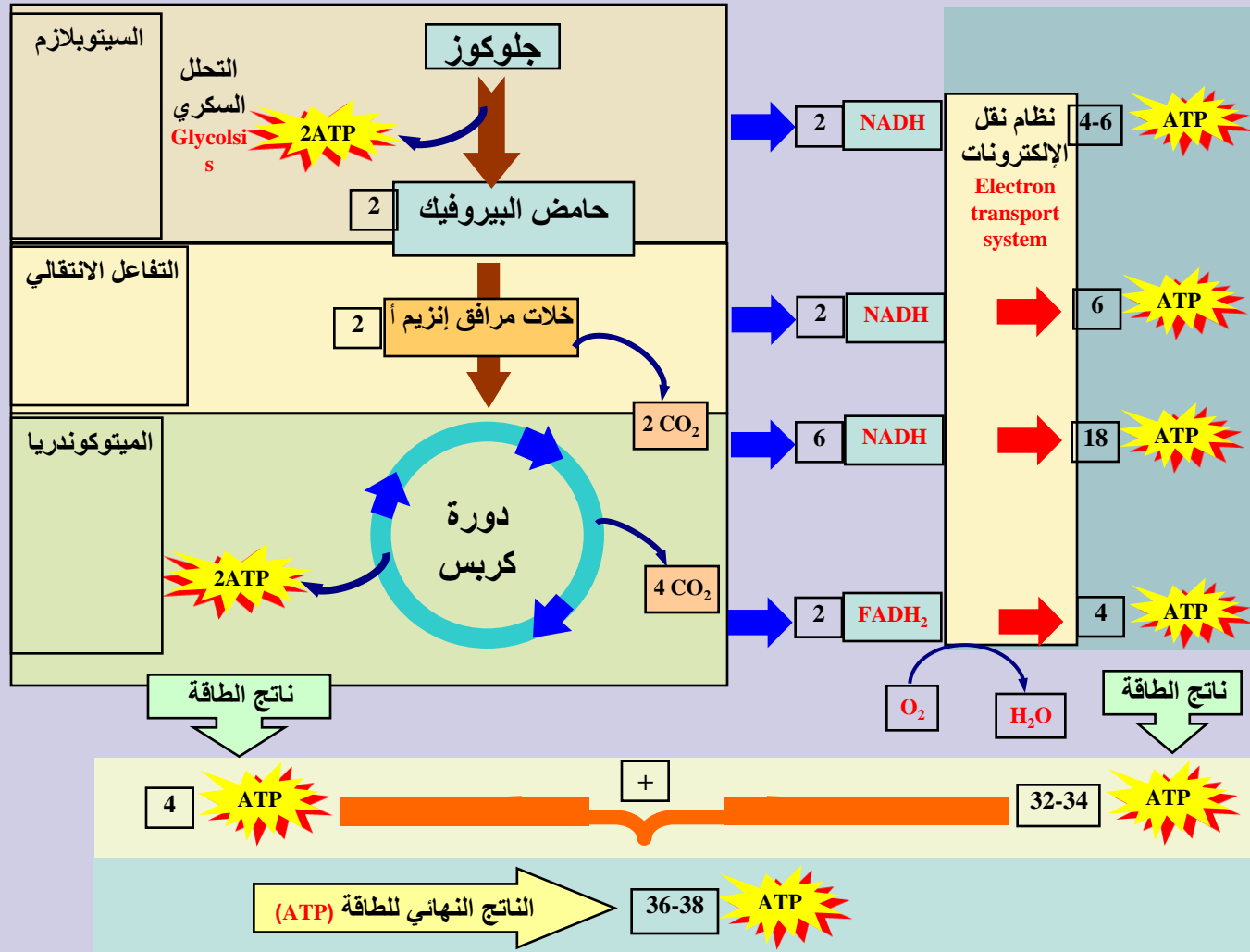
## الميتوكوندريا

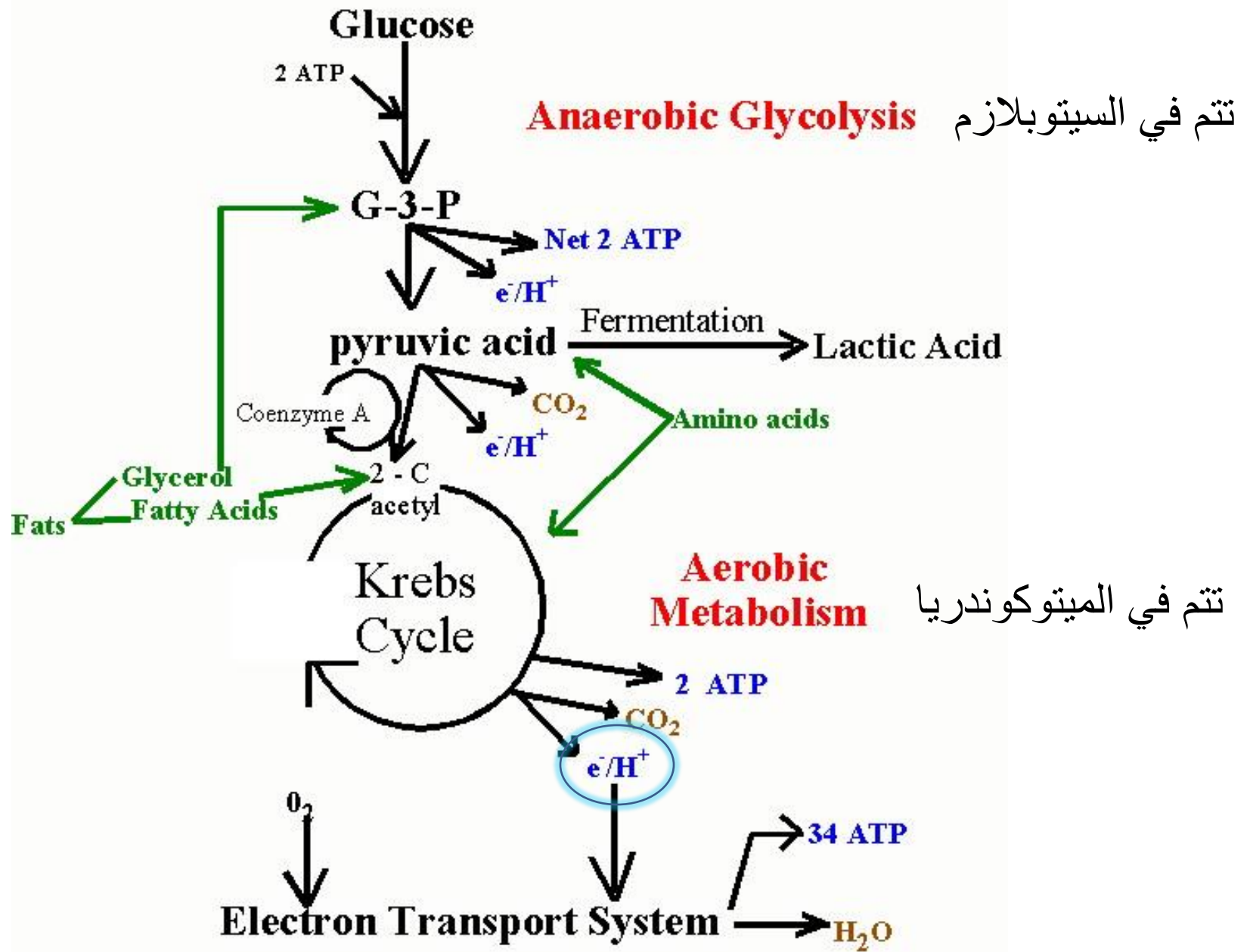


تؤدي الى تكوين جزيئات  
وسطية ناقلة للطاقة تشتق منها  
كمية اضافية من الطاقة تقدر  
بثلاثين جزيئا من ATP  
+ الكمية الناتجة من تحلل  
الجلوكوز = 36 جزيئ

عملية هدم الاحماض الدهنية  
الى Acetyl Co-A (وقود دورة  
كريس) تتم في ال Matrix عن  
طريق β-Oxidation



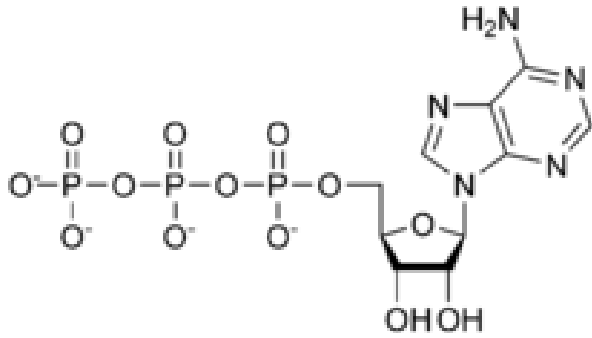




## السلسلة التنفسية Electron transport chain

- هي عملية نزع ذرات الهيدروجين (في أزواج) من NADH or FADH<sub>2</sub> (نواتج دورة كربس) التي يصاحبها انتقال للإلكترونات المحملة عليها عبر سلسلة خطية من مركبات ناقلة للإلكترونات (مركبات السيتوكرومات التي هي عبارة عن جزيئات تحتوي على ذرات الحديد وإثناء مرور الإلكترونات تتحول من الحديدوز إلى الحديد  $Fe^{++} \rightarrow Fe^{+++}, e^-$ ) وبانتقال الإلكترونات تفقد طاقتها على مراحل وتستخدم الطاقة المنطلقة في تكوين مركب الطاقة ATP عن طريق الجمع بين ADP ومجموعة الفوسفات الغير عضوية Pi
- في المرحلة الأخيرة يتم نقل الإلكترونات إلى الأكسجين ويتكون الماء
- تسمى عملية تكوين ATP بالأكسدة الفسفورية Oxidative phosphorylation
- Acetyl-Coenzyme A عربة نقل لإدخال ذرتين من الكربون إلى دورة كربس
- المرفقات الانزيمية NADH or FADH<sub>2</sub> تعمل كعربة نقل للإلكترونات من دورة كربس إلى السلسلة التنفسية
- في هذه السلسلة يتم الربط بين انتقال الإلكترونات وتكوين مركبات الطاقة بواسطة Oxidative phosphorylation

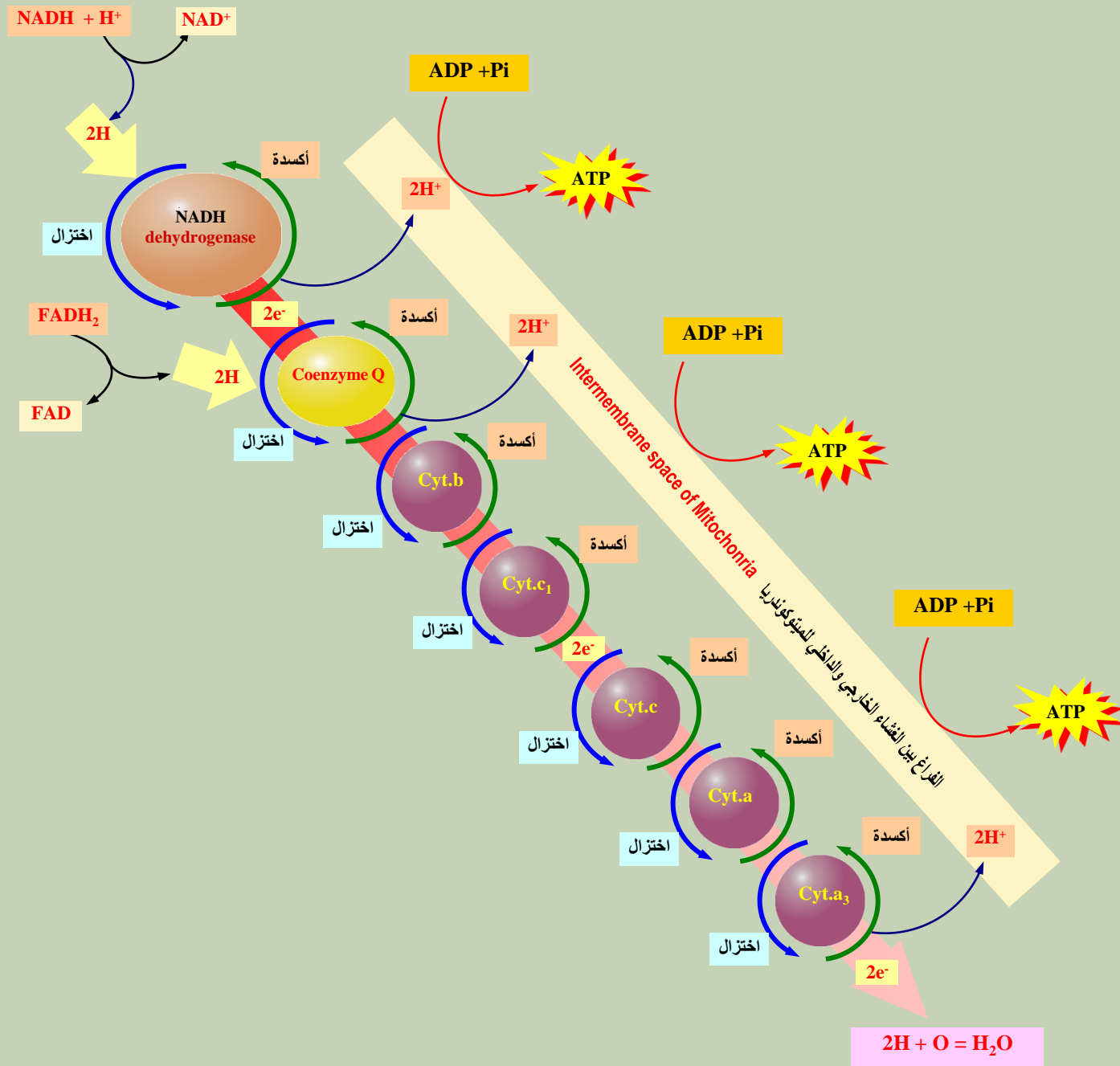
## الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP)

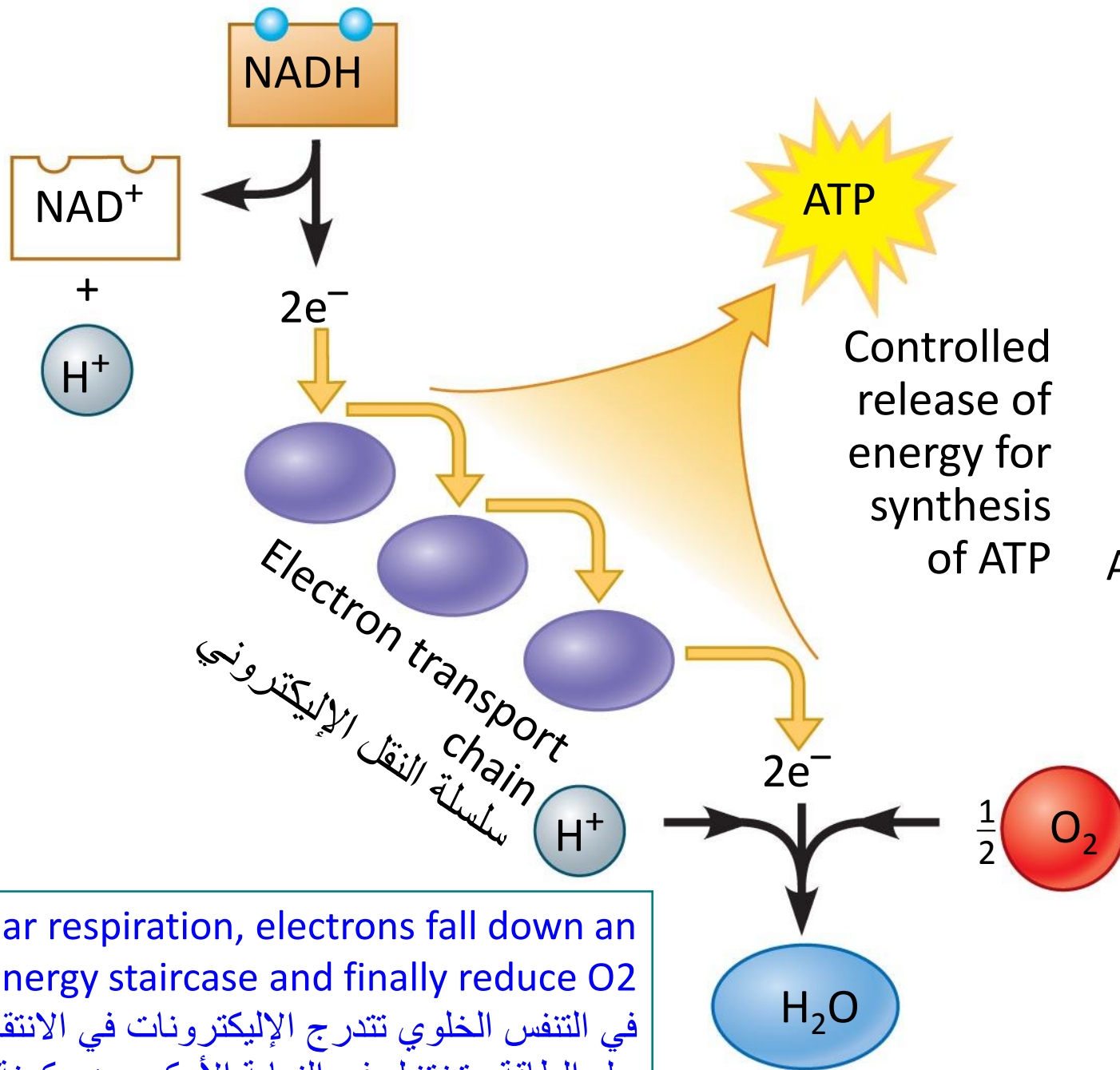


هو "عملة" الطاقة في الخلية

يتألف ATP من القاعدة النيتروجينية أدينين، وسكر الريبوز، وثلاث مجموعات فوسفات،

وتحتوي الروابط بين مجموعات الفوسفات على طاقة كيميائية مختزنة بكميات كبيرة ويمكن لهذه الطاقة أن تنطلق عند تحطم إحدى روابط الفوسفات، فعند تحطم الرابطة بين مجموعتي الفوسفات الثانية والثالثة، تتحرر طاقة مقدارها 7.3 كيلو سعر / مول،





In cellular respiration, electrons fall down an energy staircase and finally reduce O<sub>2</sub>

في التنفس الخلوي تتدرج الإلكترونات في الانتقال باتجاه أسفل سلم الطاقة وتختزل في النهاية الأوكسجين مكونة الماء

## معقدات السلسلة التنفسية complexes Respiratory chain

يوجد أربع مجموعات من الإنزيمات المعقدة والداخلية في تركيب الغشاء الداخلي للميتوكوندريا وتعمل هذه المجموعات على هيئة سلسلة متتابعة لنقل الإلكترونات من مادة الوقود إلى الأكسجين وهي كما يلي:

### أ- المعقد الأول Complex (1)

NADH-Co-enzyme-Q- oxidoreductase

### ب- المعقد الثاني Complex (2)

Succinate-Coenzyme-Q-oxidoreductase

### ج- المعقد الثالث Complex (3)

Reduced Coenzyme-Q-Cytochrome -oxidoreductase.

### د- المعقد الرابع Complex (4)

Cytochrome oxidase

## Oxidative phosphorylation الأكسدة الفسفورية

الأكسدة الفسفورية هي عملية حيوية للحصول على أكبر قدر من الطاقة الايضية وجعلها متاحة في صورة مركب الطاقة الذي يستخدم لانجاز عمليات فسيولوجية في الخلية الحية. ATP في الحالات الطبيعية تتزامن الأكسدة مع الفسفرة وهذا يعني أن الحاجة لإنتاج كمية من الطاقة يتطلب زيادة الأكسدة لمواد الوقود المتاحة وهذه ترتبط بزيادة معدل استهلاك الأكسجين



## أيض الدهون Lipid metabolism

### Fatty acid oxidation أكسدة الأحماض الدهنية

الخطوة الأولى لأكسدة الأحماض الدهنية تتمثل في تحلل ثلاثي الجليسرأيد إلى أحماض دهنية و جليسرول.

الذي يدخل سلسلة Glycerol – 3 – phosphate لينتج مركب ATP الجليسرول يتم تفاعله إنزيميا في وجود تحلل الجلوكوز ويستخدم لإنتاج الطاقة. الأحماض الدهنية تنقل إلى الأنسجة النشطة لأكسدتها واشتقاق الطاقة وجميع الخلايا تستهلك الأحماض الدهنية لإنتاج الطاقة

## Amino acid oxidationأكسدة الأحماض الأمينية

لا تستخدم البروتينات في إنتاج الطاقة إلا في حالات نادرة مثل الصيام لمدة طويلة أو الجوع الشديد بسبب نقص الغذاء

وفي بعض الحالات المرضية مثل الإصابة بالسكري فإن البروتينات تتحول إلى سكر جلوكوز يستخدم في إنتاج الطاقة

والكثير منه يخرج في البول ويرجع ذلك لنقص هرمون الأنسولين الذي له دور في تنظيم الأيض الخلوي.

وفي الخلايا الحية يتم تأيض الأحماض الأمينية عن طريق نزع مجموعة الأمونيا ( $\text{-NH}_3$  Amino group) وتحول مجموعة الأمونيا إلى يوريا يتم التخلص منها، بينما Deamination بواسطة تفاعلات نزع الأمونيا يمكن أن تستخدم كمصدر للطاقة أو بناء الدهون أو Keto acid المجموعة الكربونية الناتجة والتي تكون في صورة الكربوهيدرات.

# Summary

- تسمى عملية تكوين ATP عن طريق الجمع بين الـ ADP ومجموعة الفوسفات الغير عضوية بالاكسدة الفوسفورية **Oxidative Phosphorylation**
- **الاكسدة** : هي فقد الالكترون من المركب وانتقالها الى مركب اخر
- **الاكسدة الحيوية** : تيم فيها نقل الالكترونات عبر ذرات الهيدروجين
- **مركبات  $NAD^+$ ,  $FAD^+$  المؤكسدة** يتم اختزالها في دورة كربس الى  $NADH$ ,  $FADH_2$  وبنقلها الى السلسلة التنفسية تعاد اكسدتها (اي تفقد الالكترونات المكتسبة من دورة كربس على هيئة بروتون وتعود لها ثانيا لاكتساب الالكترونات)



1. أكسدة:  $\text{NADH} \rightarrow 3 \text{ ATP}$
2. أكسدة :  $\text{FADH}_2 \rightarrow 2 \text{ ATP}$
3.  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 36 \text{ ADP} + 36 \text{ HPO}_4^{-2} + 36 \text{ H}^+ \rightarrow 6\text{CO}_2 + 36\text{ATP} + 42 \text{ H}_2\text{O}$
4. الدهون تعتبر مستودع للطاقة

## استخدامات الطاقة الحيوية:

- 1- تصنيع مواد جديدة (بروتينات, دهون, كربوهيدرات وغيرها) يمكن استخدامها في عمليات التجديد والإنقسام والنمو وغيرها من العمليات المستهلكة للطاقة.
- 2- انجاز عمليات ميكانيكية مثل الحركة الدورانية للسيتوبلازم أو غيرها.
- 3- القيام بعملية النقل النشط ضد التدرج في التركيز.
- 4- المحافظة على جهد الأغشية لما له في التوصيل والنقل أو انتاج اختلاف في الشحنات الكهربائية بين جهتي الغشاء.
- 5- الافراز الخلوي بجميع أنواعه.
- 6- انتاج طاقة مشعة كما في بعض الكائنات الحية.

## Respiratory chain السلسلة التنفسية

تعتمد السلسلة التنفسية على مجموعة من إنزيمات الأكسدة والاختزال التي تحفز تفاعلات خاصة تدعى تفاعلات الأكسدة والاختزال وتعمل في أزواج حيث يكون أحد المركبات معطي للإلكترونات والآخر مستقبل لها. وعلى هذا الأساس فإن الأكسدة يقصد بها فقد الإلكترونات من المركب وانتقالها إلى مركب آخر يتم اختزاله. المؤكسدة  $FAD^+$  و  $NAD^+$  وبصفة عامة فالأكسدة الحيوية يتم فيها نقل الإلكترونات عبر ذرات الهيدروجين. مركبات oxidized form وبنقلها إلى السلسلة التنفسية لتعاد أكسدتها  $FADH_2$   $NADH$  يتم اختزالها في دورة كربس ( أي أنها تفقد إلكتروناتها المكتسبة من دورة كربس على هيئة بروتون وتعود مرة أخرى لتحمل بالإلكترونات  $H^+$