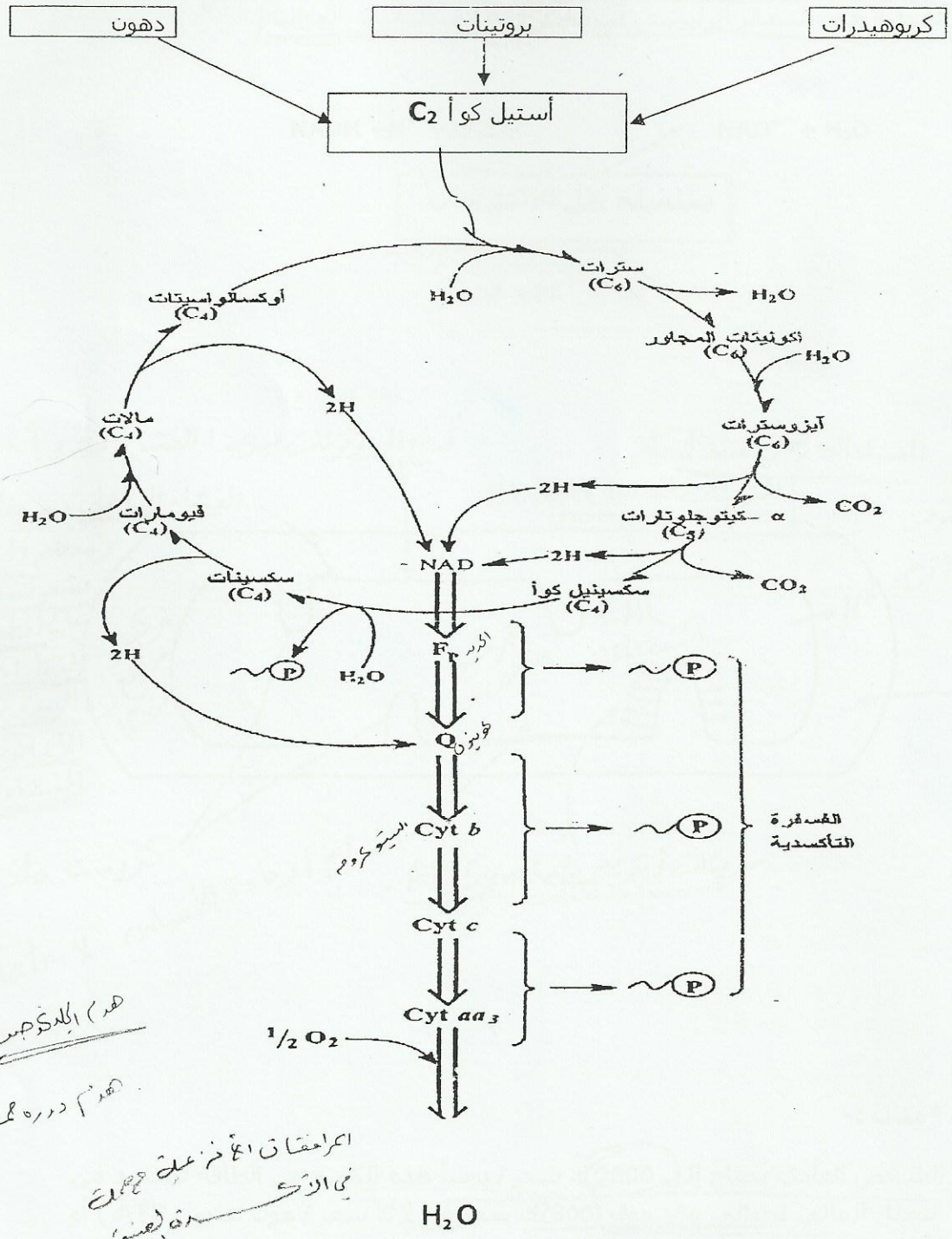
المحاضرة الخامسة .

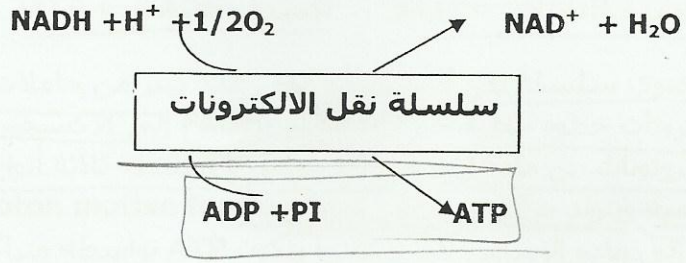
الأكسدة الحيوية.

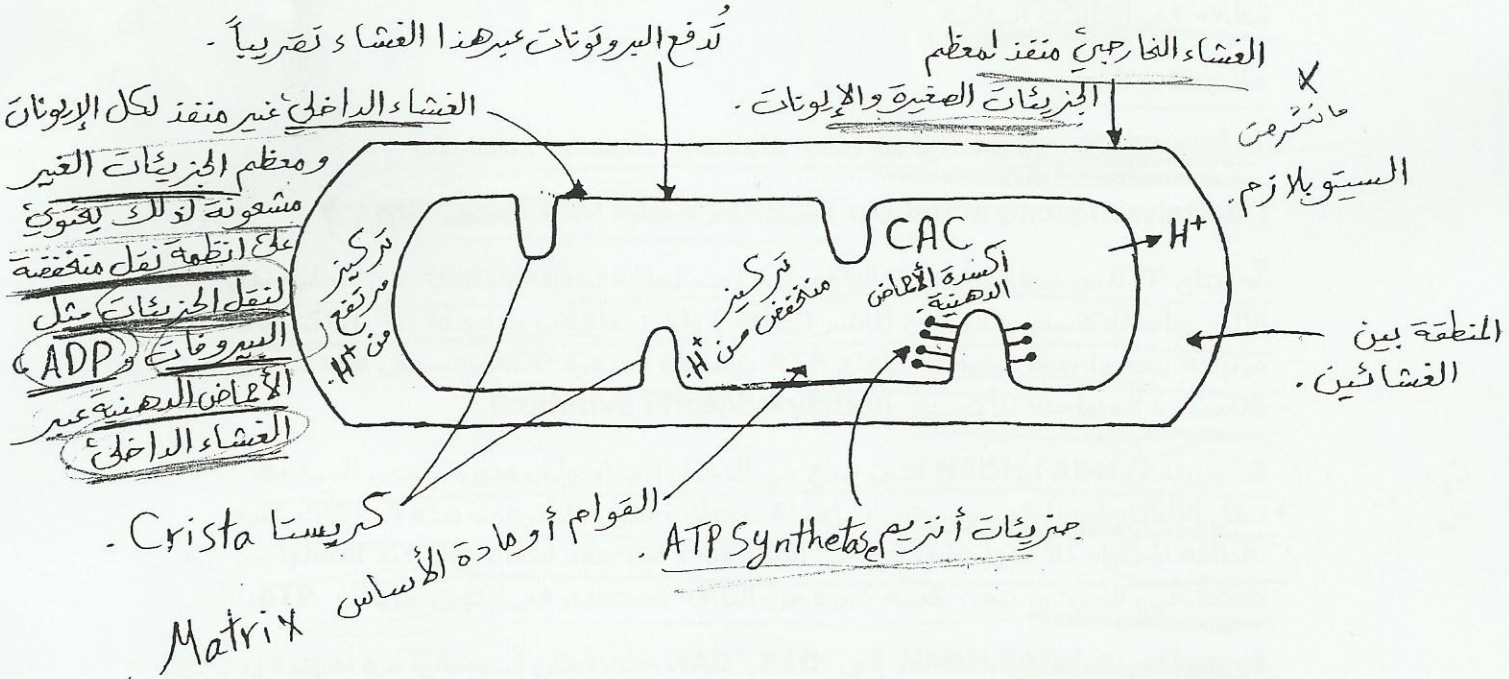


مخطط لسلسلة نقل الألكترونات والفسفرة التأكسدية

تعريف الفسفره المصاحبه للاكسده :

هي العمليه التي يتكون فيها **ATP** من **ADP** والفوسفات نتيجة لانتقال الالكترونات من **$FADH_2$،NADH** إلى الاكسجين الجزيئ بواسطة سلسلة من ناقلات الالكترونات وهذه العمليه هي المصدر الرئيسي لجزيئات **ATP** في الكائنات الهوائيه.





***مثال :-**

الشخص العادي يحتاج إلى 2800ك سعر / يومياً هذه الكميه من الطاقه تستمد من التحلل المائي لحوالي 384 مول (2800ك سعر ÷ 2.3ك سعر / مول لتكوين **ATP**) أو 190ك ATP مع ذلك فإن كمية **ATP** الموجوده حقيقيه في جسم الأنسان تبلغ 50جم لذلك فإن هذه الكميه يجب أن تتفكك إلى **ADP+PI** ويعاد تكوينها الاف المرات في اليوم الواحد .

أهم خصائص الفسفره المصاحبه للاكسده :-

1- دورة حمض الستريك ومسار اكسدة الأحماض الدهنيه واللذان ينتجان معظم جزيئات $NADH,FADH_2$ يوجدان في مادة الاساس **Matrix** للميتوكندريا قريباً من الغشاء الداخلي الذي يحتوي على سلسلة نقل الالكترونات **electron transport chain** وإنزيمات الفسفره .

2- اكسدة **NADH** ← **3ATP** ، اكسدة $FADH_2$ ← **2ATP**

3- تحتوي سلسلة نقل الألكترونات على عدد كبير من حاملات الالكترونات وانتقال الالكترونات خطوه خطوه من **NADH** و $FADH_2$ إلى الاكسجين الجزيئي يؤدي إلى دفع بروتونات من ماده الاساس للميتوكندريا بواسطة ثلاثة أنواع من التراكيبات الإنزيميه ويتولد بذلك قوه دافعه بروتونيه **proton motive force** وبعودة البروتونات ثانيه إلى ماده الاساس للميتوكندريا يتكون **ATP** بواسطة متراكب إنزيمي خاص .

4- تعتبر عملية الفسفره المصاحبه للاكسده على درجه كبيره من الأهميه في توليد الطاقه في الكائنات الهوائيه .

ملاحظات الدوره :-

1- أنتاج **ATP** في الميتوكندريا هو نتيجة مايسمى بالفسفرة التأكسدية (**oxidative phosphorylation**) حيث يتم فسفرة **ADP** ليعطي **ATP** .

2- أنتاج **ATP** بواسطة الفسفرة التأكسدية (مستهلكة للطاقة)منفصلة عن عملية نقل الالكترونات للاكسجين الجزيئ (ناشر للطاقة) ولكن تفاعلات سلسلة نقل الالكترونات مرتبطة ببعضها بقوة ومصاحبة لإنتاج **ATP** بواسطة فسفرة **ADP** وتسمى هذه العمليه بالفسفره المصاحبه للأكسده **Oxidative Phosphorylation**.

3- جزيئات $NADH,FADH_2$ التي تنتج من التحلل الجلايكولي ودورة حمض الستريك تنقل الالكترونات للاكسجين في سلسلة تفاعلات نقل الالكترونات هذه الجزيئات غنيه بالطاقه لاحتواء كلاً منها على زوج من الالكترونات ذي جهد انتقال عال عند انتقالها للاكسجين الجزيئي تتحرر كميه كبيره من الطاقه تستخدم في تكوين جزيئات **ATP** .

4- يتم أكسدة $NADH,FADH_2$ إلى NAD^+,FAD حيث يمكن استعمالها مرة أخرى في العمليات الأيضية المختلفة.

5- الاكسجين الذي يعتبر المستقبل الأكبر للالكترونات يختزل إلى ماء **(H_2O)** وهذا يكمل العملية التي يتم فيها الأكسدة التامة للجلوكوز إلى $CO_2 + H_2O$.

6- يقوم $NADH,FADH_2$ بتمرير الكترون إلى المرافق الانزيمي **Q** (كو **Q**) الذي يقوم بتمريره إلى سلسلة من البروتينات تسمى السيتوكروم وأخيراً إلى الأكسجين.

***سلسلة نقل الالكترونات تحتوي على:-**

1- حاملات الالكترونات (حوالي 15) تشمل الفلافينات **FMN** ،معقد الحديد والكبريت **Fes Complex** ،الكونيون **Q**،مركبات الهيم، السيتوكرومات .

2- إنزيمات السلسله التنفسيه وهي المتراكبات الانزيميه (حاملات الالكترونات ماعدا الكونيون توجد في صورة مرتبطه مع البروتينات والتي تجمع في ثلاث متراكبات إنزيميه1و2و3.

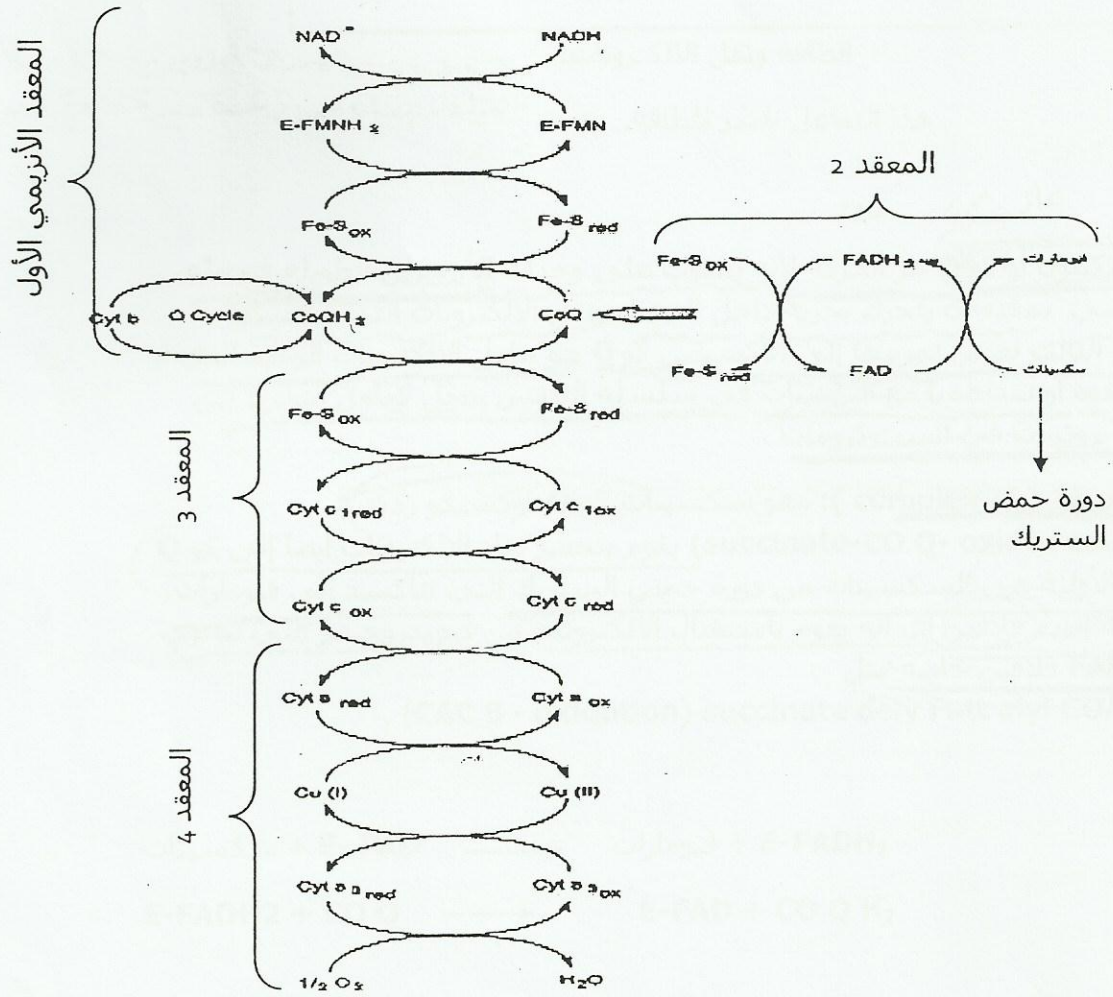
إنزيمات السلسله التنفسيه :-

1- . معقد **I** (**Complex I**) : هو **NADH - CO Q** اوكسيدو ردكتيز **(NADH-COQ oxidoreductase)** يحفز الخطوة الاولى من نقل الالكترونات وبالتحديد نقل الالكترونات من **NADH** إلى النيوبيكينون(**Vbiquinone**) أو المرافق **Q**.

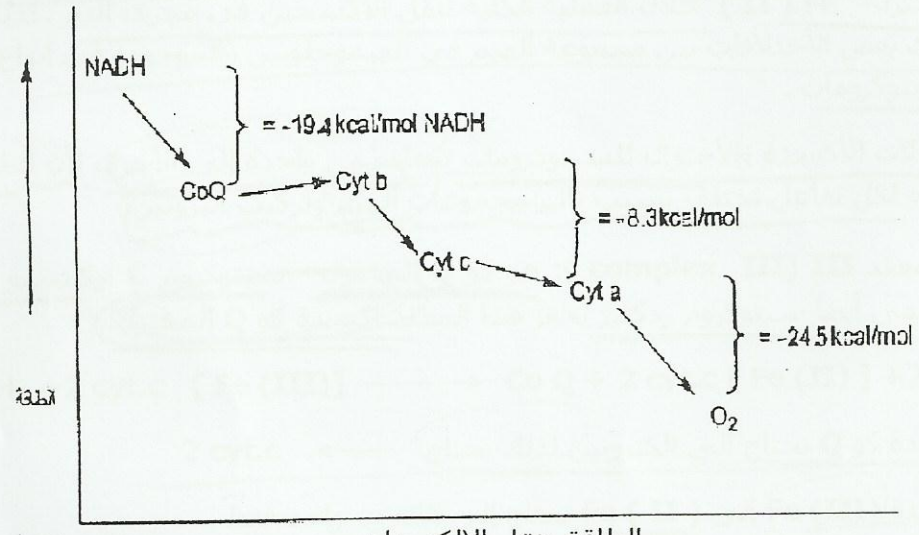
يحتوي المتراكب على **FMN** ، **Fes** (بروتين الحديد غير هيمي).

يتواجد هذا المرافق في الغشاء الداخلي للميتوكندريا ويضم مجموعةمن البروتينات تحتوي على الحديد كبريت وكذلك الفلافو بروتينات التي تؤكسد **NADH**.

الرسم التالي : يوضح نقل الالكترونات و الفسفرة التأكسدية .



١. معقد I NADH كو Q اكسيدوردكتيز
البريكينون كو Q
٢- السكسينات كو Q اكسيدوردكتيز



الطاقة ونقل الالكترونات.

هذا التفاعل ناشر للطاقة.

١- * اليوبيكينون أو كو Q حر الحركة لأنه يحتوي على وحدات الأيزوبرين الطويله فتجعله غير قطبي يمكنه أن يتحرك بحرية داخل الغشاء ونقل الالكترونات التي يكتسبها للمعقد الثالث لغرض تمريرها إلى الأكسجين كو Q هو حامل الالكترونات الوحيد الذي لا يرتبط بقوه او تساهميا مع البروتينات في سلسلة التنفس يعمل كعامل متحرك بين الفلافو بروتينات في السيتوكرومات .

2- معقد II (complex II): وهو سكسينات كو Q اوكسيدو ردكتيز (succinate-CO Q- oxido reductas) يقوم بتحفيز نقل الالكترونات أيضاً إلى كو Q المادة الأولية هي السكسينات من دورة حمض الستريك التي تتأكسد إلى فيومارات بواسطة إنزيم فلافين اي انه يقوم باستقبال الالكترونات من ديهيدروجينيز التي تحتوي على FAD فلافين خاصه مثل
. (CAC β - oxidation) succinate dely Fatt alyl COA dely

سكسينات + E- FAD ⟶ فيومارات + $E\text{-}FADH_2$

E-FADH2 + CO Q ⟶ E-FAD + CO Q H_2

- تحرر الالكترونات من كو **Q** الذي تعاد أكسدته إلى السلسلة البروتينية الأولى والتي تسمى السيتوكرومات وكل بروتين منها يحتوي على مجموعة هيم وفي كل مجموعة هيم يختزل الحديد إلى **Fe (II)** ثم يعاد أكسدته إلى **Fe (III)**.

هذا الوضع يختلف عن الحديد في مجموعة هيم الهيموجلوبين حيث تبقى الحالة المختزلة **Fe (II)** خلال العملية الكلية لنقل الاكسجين في مجرى الدم .كذلك هناك بعض الأختلافات بين مجموعة الهيم في الهيموجلوبين والموجودة في أنواع السيتوكرومات .

تفاعلات الأكسدة والأختزال للسيتوكرومات تختلف من واحدة إلى الأخرى لأن الطاقة الحره لكل تفاعل تختلف بسبب تاثير مجموعات الهيم وتركيب البروتين.

3- معقد **III** **(complex III)**: هو كو **Q** المختزل سيتوكروم **C** اوكسيدو ردكتيز ويسمى أيضاً سيتوكروم ردكتيز يحفز هذا المعقد أكسدة كو **Q** المختزل.

$$Co\,QH_2 + 2\ cyt.c\ [Fe\ (III)] \longrightarrow Co\,Q + 2\ cyt.c\ [Fe\ (II)] + 2H^+$$

أكسدة كو **Q** تحتاج ألى الكترونين لذلك يحتاج ⟵ **2 cyt.c**

أكسدة **Fe (III)** إلى **Fe (II)** تحتاج إلى الكترون واحد فقط .

- المكونات الرئيسية لهذا المعقد تضم نوعين من **cyt b** ، **cyt .c_1** وعده بروتينات حديد _ كبريت **(Iron-sulfur proteins)** .

- هذا المعقد أحد مكونات الغشاء الداخلي للميتوكندريا.

- يتم تمرير الكترون واحد من كو **Q** المختزل إلى معقدات الحديد _كبريت ثم إلى سيتوكروم c_1 تاركاً كو **Q** في شكل شبه كينون.

$$CO\,Q\,H_2 \longrightarrow Fe\text{-}s \longrightarrow cyt.c_1$$

وشبه الكينون مع الشكل المؤكسد والمختزل لكو **Q** تساهم في العملية الدورية التي يتم فيها اختزال وأكسدة اثنين من **cyt.b** .

- يقوم الجزء الثاني من كو **Q** بتمرير الكترون الثاني إلى **cyt .c_1** ومنه إلى **cyt.c** الناقل يفقد كل جزئ من جزيئ كو **Q** الكترون واحد في دورة **Q** والنتيجة الاجمالية تبدو كما لو كان جزئ واحد من كو **Q** قد فقد الكترونين .

- ضخ البروتينات الذي يصاحبه إنتاج **ATP** يحدث في تفاعلات هذا المعقد.

4- المعقد **IV** **(complex IV)**: سيتوكروم **C** أوكسيديز **(cyto chrome oxidase)** يحفز الخطوة الأخيرة لنقل الالكترون وهي نقل الألكترونات من **cyt.c** إلى الاكسجين .

$$2\ cyt.c\ [Fe\ (II)] + 2H^+ + 1\backslash 2\ O_2 \longrightarrow 2\ cyt.c\ [Fe\ (III)] + H_2O$$

ضخ البروتينات تحدث أيضاً نتيجة هذا التفاعل.

$2cyt_c\,[Fe(II)] + \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ \longrightarrow H_2O + 2cyt_c\,[Fe(III)]$

- تلعب أيونات النحاس دور مستقبلات الكترونات وسطيه بين نوعي سيتوكروم (a, a_3) في السلسلة .

cyt.c ⟶ cyt a ⟶ cu^{2+} ⟶ cyt a_3 ⟶ O_2

التفاعل الكلي:

2 cyt aa_3 [(reduced, Fe (II)] +1\2O_2+ $2H^+$ ⟶ 2cyt aa_3 [(oxidized, Fe (III)] + O_2

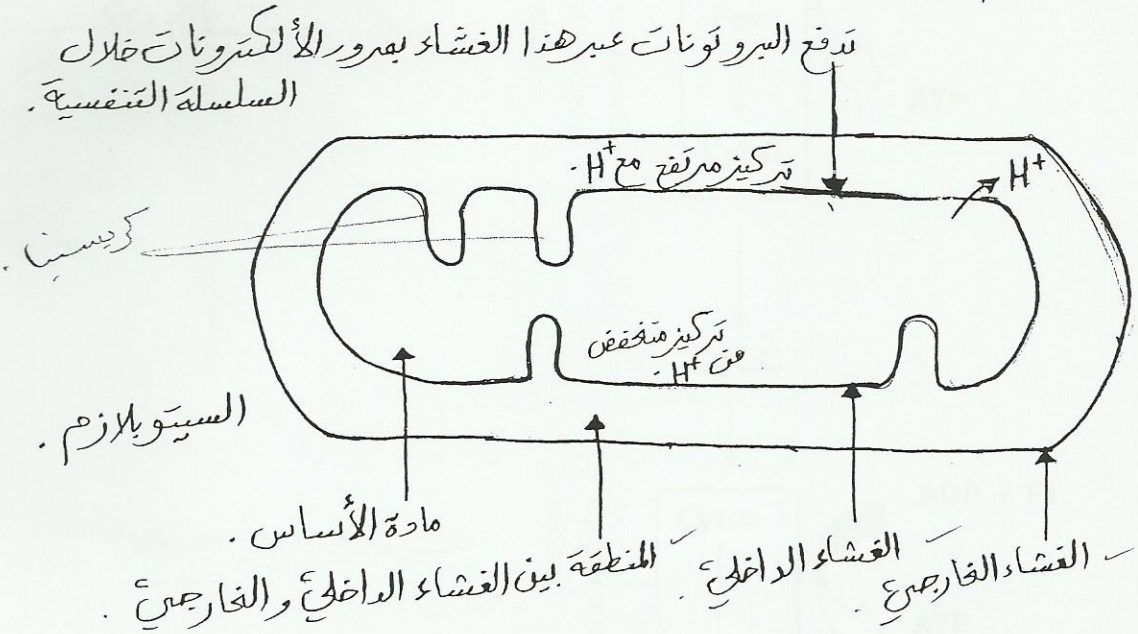
يعتقد ان سريان الالكترونات من **NADH** إلى **O_2** خلال السلسله التنفسيه يدفع ايونات الهيدروجين من جانب مادة الاساس عبر الاغشاء الداخلي للميتوكندريا إلى الجانب الاخر عند ثلاثه مواضع بينما الـ**$FADH_2$** في موضعين فقط . ويستخدم متدرج ايونات الهيدروجين الذي ينشا عند كل موضع في تكوين جزئ **ATP** بواسطه المتراكب الانزيمي **ATP synthetase** (ATPase) .

سينثاز ATP

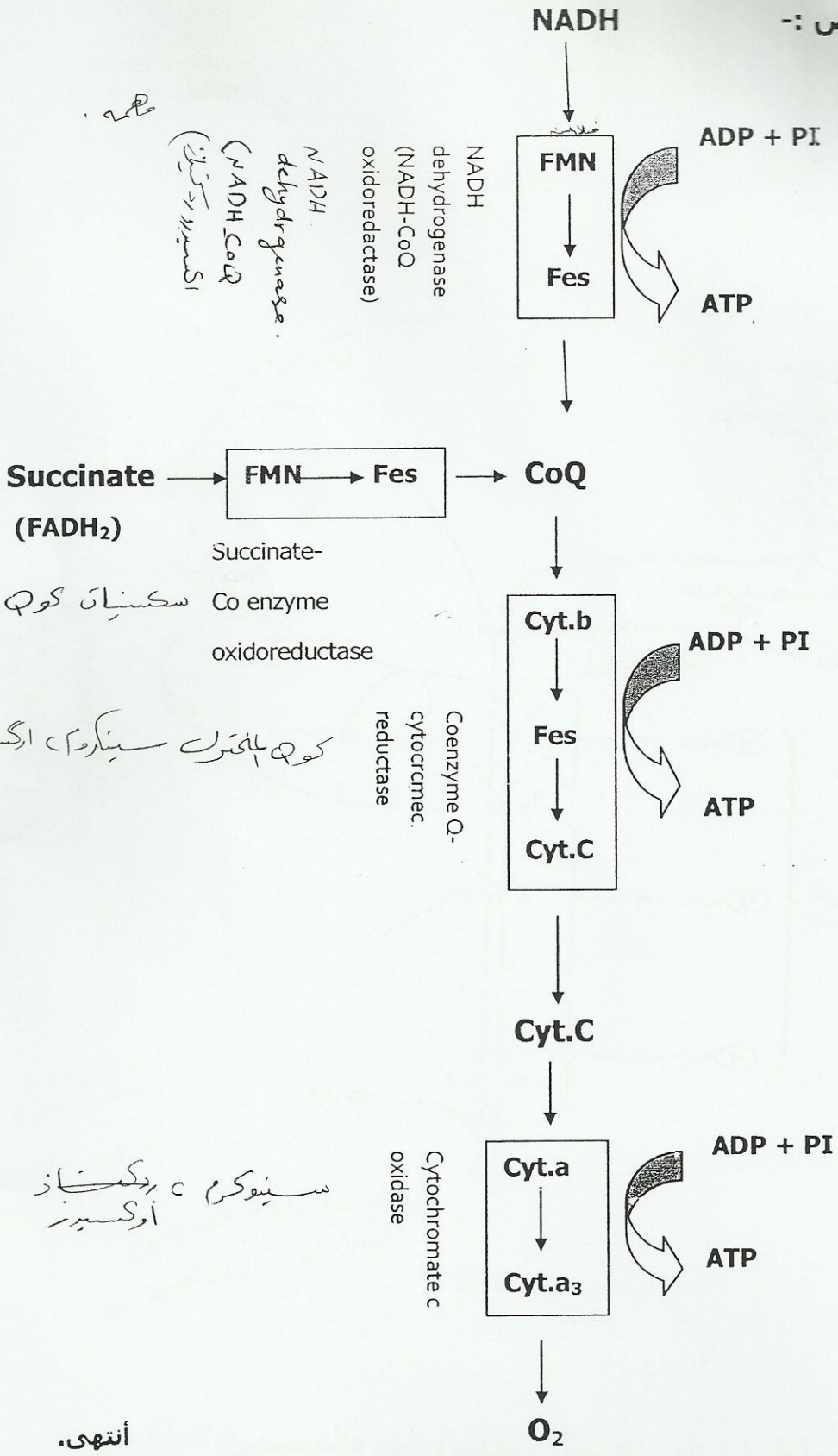
$FADH_2$ موضعين فقط

NADH 3 مواضع

~~FADpH~~



ملخص :-


NADH
FMN
Fes
ADP + PI
ATP
NADH dehydrogenase (NADH-CoQ oxidoreductase)
Succinate
(FADH2)
FMN
Fes
CoQ
Succinate-Co enzyme oxidoreductase
Cyt.b
Fes
Cyt.C
ADP + PI
ATP
Coenzyme Q-cytocrcmec. reductase
Cyt.C
Cyt.a
Cyt.a3
ADP + PI
ATP
Cytochromate c oxidase
O2

أنتهى.