الطاقة الحيوية و الاستقلاب ودورة حمض الليمون

١. الطاقة الحيوية (الترموديناميك الكيمائي الحيوي):

هو دراسة تغيرات الطاقة المرافقة للتفاعلات الحيوية.

يمكن لبعض الجمل اللاحيوية أن تستعمل الطاقة الحرارية للقيام بعملها، أما الجمل الحيوية فهي بشكل أساسي متعادلة الحرارة لذلك فهي تستخدم الطاقة الكيميائية لإجراء التفاعلات الحيوية.

٢. الأهمية الحيوية الطبية Biomedical Importance :

لا بد من توافر وقود ليزود العضوية بالطاقة اللازمة لاستمرارها بالقيام بوظائفها الطبيعية. تعد طريقة حصول العضوية على الطاقة انطلاقا من الطعام ضرورية لفهم عمليات التغذية و الاستقلاب حيث تخضع المواد الغذائية التي يتناولها الإنسان إلى مجموعة عمليات و تحولات ندعوها بالاستقلاب نحصل منها على الطاقة و تخزينها و تأمين الركائز لاصطناع مركبات الجسم. يحدث الموت بسبب الجوع عندما تستنفذ مخازن الطاقة، كما أن هنالك أنماط من سوء التغذية تترافق مع خلل توازن الطاقة.

يتم تنظيم معدل الطاقة المتحررة و الذي يقاس بمعدل الاستقلاب من خلال تأثير الهرمونات الدرقية ومنه فإن اضطراب وظائف هذه الهرمونات يسبب العديد من الأمراض، ويؤدي التخزين الزائد للطاقة الفائضة إلى البدانة.

٣. اقتران التفاعلات الحيوية Coupling of biological Processes

يقصد باقتران التفاعلات الحيوية أن التفاعلات الآخذة للطاقة تجري بالاقتران مع التفاعلات المعطية للطاقة، حيث أن التفاعلات الحيوية مثل تفاعلات الاصطناع و التقلص العضلي و نقل السيالة العصبية، و تفاعلات النقل الفعال تحصل على الطاقة اللازمة لحدوثها خلال الارتباط الكيميائي أو اقتران بتفاعلات الأكسدة و الإرجاع.

وبالتالي نميز نوعين من تفاعلات الاستقلاب:

١- التقويض (الهدم) Catabolism: وهي عبارة عن تفاعلات مطلقة للطاقة ناتجة عن عمليات أكسدة المواد الغذائية

٢- البناء Anabolism: وهي تفاعلات اصطناع مركبات الجسم المختلفة اعتبارا من نواتج الهدم و هي تفاعلات ماصه للطاقة.

٤. مراحل تشكل الطاقة: وتشمل على ثلاث مراحل

a) الهضم و الامتصاص: تتحول المركبات إلى وحداتها الأساسية . لا يتم الحصول في هذه المرحلة على أي طاقة. يبدأ من الفم بتناول الطعام و ينتهي بامتصاص المركبات البسيطة في الأمعاء و انتقالها إلى خلية الهدف

- البروتينات ⟵ حموض أمينية
- الشحوم ⟵ غليسرول و حموض دسمة
- سكريات المتعددة ⟵ سكريات أحادية

b) تتحول الوحدات الرئيسية إلى مركبات الطاقة الرئيسية:

- تحلل السكر ⟵ البيروفات + طاقة (مكافئات مرجعة)

و تتحول بعد ذلك البيروفات إلى أستيل التميم أ و طاقة (مكافئات مرجعة)

- نقل و نزع أمين الحموض الأمينية ⟵تتحول هياكلها إلى مركبات الطاقة الرئيسية
- أكسدة الحموض الدسمة ⟵ أستيل التميم أ + طاقة (مكافئات مرجعة)

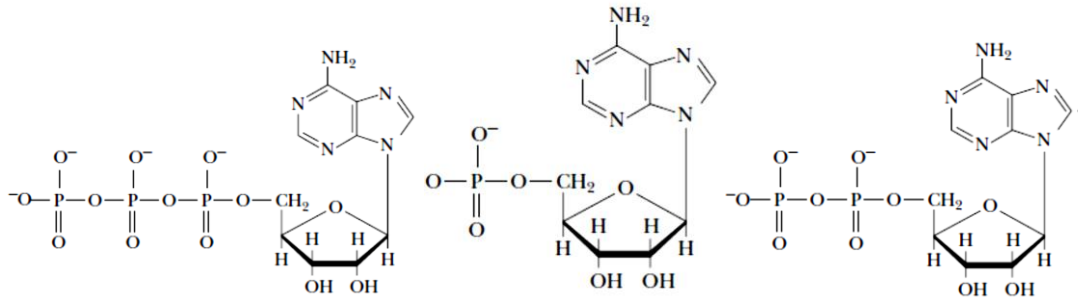
c) أكسدة أستيل التميم أ Acetyl Co A: ينتج عن أكسدة أستيل التميم أ بوجود مجموعة من الإنزيمات ،التي تشكل مع بعضها دوره حمض الليمون Tricarboxylic acid cycle، مكافئات مرجعة ($FADH_2$, GTP ,NADH). تعاد أكسدة التمائم السابقة بالسلسلة التنفسية حيث يتم نقل المكافئات المرجعة إلى الأوكسجين الجزيئي ليتشكل بالنهاية الماء،و يقترن بعملية نقل الالكترونات إنتاج الطاقة و ذلك باصطناع الATP (الذي يعد الحامل الأساسي في البدن) في المتقدرات (الفسفره التأكسدية).

ملاحظة : االفائض من الطاقه يساهم في الحفاظ على درجة حرارة الجسم

٥.دور المركبات الفوسفات عالية الطاقة:

من أجل الحفاظ على العمليات الحيوية، يجب أن تملك كافة العضويات الحيوية في وسطها المحيط مصدر للطاقة . يعمل ATP خلال تفاعلاته في الخلية كمعقد مع شوارد Mg^{+2} حيث يلعب ال ATP دوراً أساساً في التقاط و نقل الطاقة الحرة من التفاعلات الناشرة للطاقة إلى تفاعلات الآخذة للطاقة.

اقترح العالم ليبمان استعمال الرمز P ⓟ للإشارة إلى وجود مركبات الفوسفات عالية الطاقة . ينتج لدى انتقال المجموعة المرتبطة بهذا الربط إلى مستقبله المناسب انتقال أكبر كمية من الطاقة الحرة. يمتلك ال ATP مجموعتي فوسفات عالية الطاقة، و يمتلك ال ADP مجموعة فوسفات عالية الطاقة واحدة بينما لا يمتلك ال AMP أية مجموعة فوسفاتية عالية الطاقة لأن الرابط بين مجموعة الفوسفات و السكر هو رابط استري فوسفوري عادي.



ATP ADP AMP

يسمح مركب ATP باقتران التفاعلات غير المفضلة ترموديناميكياً بأخرى مفضلة وكمثال على مثل هذه التفاعلات نذكر التفاعل الأول في طريق تحلل الغلوكوز هو فسفرة الغلوكوز إلى غلوكوز-6-فوسفات و هو تفاعل آخذ للطاقة و لا يمكن أن يحدث تحت شروط الفيزيولوجية الطبيعية.

$$\text{Glucose} + \text{Pi} \longrightarrow \text{Glucose-6-Phosphate} + \text{water} \ (\Delta G = +13{,}8\ \text{Kj/mol})$$

وحتى يتم هذا التفاعل يجب أن يقترن مع تفاعل آخر معطي للطاقة أكبر من الطاقة اللازمة لفسفرة الغلوكوز ومثل هذا التفاعل هو حلمهة مجموعة الفوسفات الطرفية من ال ATP

$$\text{ATP} \longrightarrow \text{ADP} + \text{Pi} \ (\Delta G = -30{,}5\ \text{kj/mol})$$

عندما يقترن التفاعلان السابقان بوساطة إنزيم هيكسوكيناز يمكن لفسفرة الغلوكوز أن تجري بتفاعل معطي للطاقة بشدة

$$\text{Glucose} + \text{ATP} \longrightarrow \text{Glucose-6-Phosphate} + \text{ADP} \ (\Delta G = -16{,}7\ \text{Kj/mol})$$

نلاحظ أن الطاقة الحرة المعيارية الناتجة عن حلمهه ال ATP تقدر ب 30,5 Kj/mol لكل من مجموعة من مجموعتي الفوسفات النهائيتين.إن القيمة الوسطية للطاقة الحرة لحلمهة الATP تتصف بدلاله حيوية هامة مقرنة مع مركبات الفوسفات العضوية الأخرى. يبين الجدول التالي قيم الطاقة الحرة المعيارية لحلمهة العديد من المركبات الفوسفات الحيوية الهامة.

Compound	$\Delta G^{\circ\prime}$ (kJ · mol^{-1})
Phosphoenolpyruvate	−61.9
1,3-Bisphosphoglycerate	−49.4
ATP → AMP + PP_i	−45.6
Phosphocreatine	−43.1
ATP → ADP + P_i	−30.5
Glucose-1-phosphate	−20.9
PP_i → 2 P_i	−19.2
Glucose-6-phosphate	−13.8
Glycerol-3-phosphate	−9.2

نظراً لموقع الATP في وسط قائمة الطاقة الحرة المعيارية يمكن أن تقسم القائمة إلى مجموعتين:

المجموعة الأولى: المركبات عالية الطاقة بما فيها ال ATP عادة تكون بلا ماءات Anhydridres (مثل 3,1- ثنائي فوسفوغليسيرات) أو بشكل اينولفوسفات (فوسفوا ينول بيروفات) أو بشكل غوانيدين (كرياتين فوسفات، آرجنين فوسفات).

المجموعة الثانية: المركبات ذات الطاقة الفوسفاتية المنخفضة والممثلة باسترات الفوسفات الموجودة كمركبات وسطية في تحلل الغلوكوز وهي تملك قيمة للطاقة الحرة أصغر من تلك الخاصة بال ATP. و ينتمي إلى تلك الفئة غلوكوز- 6- فوسفات، غلوكوز- 1- فوسفات ، الغليسرول- 6- فوسفات ، بيروفوسفات، ADP ، AMP .

يمكن للنيكلوزيدات ثلاثية الفوسفات المماثلة لل ATP و المحتوية على أساس آخر غير الأدنين أن تصطنع انطلاقاً من نيكليوزيداتها ثنائية الفوسفات و ذلك بوجود إنزيم نيوكليوزيد ثنائي الفوسفات كيناز و تلعب كل من هذه المركبات ثلاثية الفوسفات دوراً هاماً في عمليات الفسفرة داخل الخلية.

$$ATP + UDP \longrightarrow ADP + UTP \text{ (Uridine Triphosphate)}$$

$$ATP + GDP \longrightarrow ADP + GTP \text{ (Guanosine Triphosphate)}$$

$$ATP + CDP \longrightarrow ADP + CTP \text{ (Cytidine Triphosphate)}$$

هنالك مجموعة اخرى من المعقدات تلعب دوراً في تخزين الفوسفات عالية الطاقة و هي تتضمن الكرياتين فوسفات التي تتشكل في العضلات الهيكلية و القلب و النطاف و الدماغ و كذلك الآرجنين فوسفات المتشكلة في عضلات اللافقاريات. تحت الظروف الفيزيولوجية الطبيعية و في وقت الراحة يسمح الكرياتين فوسفات لتراكيز ال ATP أن تبقى ثابتة في العضلات غير أن هذا ال ATP يستهلك بسرعة كمصدر للطاقة خلال عملية التقلص العضلي. ومن جهة أخرى عندما يصبح تركيز ال ATP عالياً (تكون النسبة ATP/ ADP عالية) فإن الكرياتين فوسفات يتشكل و يلعب دور مخزن لمجموعة الفوسفات عالية الطاقة. لقد تم وصف و دراسة ما يدعى بناقل الكرياتين فوسفات في العضلة و تبين أنه عبارة عن آلية تقوم بنقل الفوسفات عالي الطاقة من المتقدرات إلى الغمد الليف االعضلي، كما تقوم بدور دارئة للفوسفات عالي الطاقة في عضلة القلب و هي دارئة ذات أهمية بالغه في تأمين الحماية الفورية من تأثيرات احتشاء العضلة القلبية.

$$ATP + \text{creatine} \rightleftharpoons \text{phosphocreatine} + ADP$$

٦. الأكسدة الحيوية Biologic Oxidation:

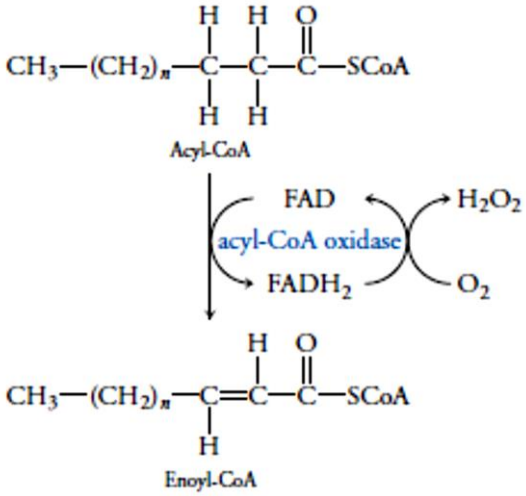
تتضمن تفاعلات و عمليات الهدم على عدد من تفاعلات الأكسدة و الإرجاع التي تنتقل فيها الإلكترونات من مركب إلى آخر.

تعرف الأكسدة : بأنها عملية نزع الالكترونات(نزع الهيدرجين، تثبيت الأوكسجين)، كما يعرف الارجاع بأنه عملية اكتساب الالكترونات (تثبيت الهيدرجين ، نزع الأوكسجين) و كذلك يكون تفاعلي الأكسدة و الارجاع متلازمين.

في الأكسدة الهوائية لا تتم أكسدة مركبات الوقود مباشرة بالأوكسجين الجزيئي لأنه يحرر مقدار كبير من الطاقة مما يؤدي إلى تلف الخلية الحية، لذلك تلجأ الخلايا إلى عملية المناقلة الإلكترونية لتجزئه الطاقة المحمولة بوساطة المكافئات المرجعة إلى عدة مراحل. حيث تبدأ بنقل هذه المكافئات المرجعة إلى ثلاث تمائم متخصصة و هي NAD^+, $NADP^+$, FAD.

تصنف الإنزيمات التي تشترك بعمليات الاكسدة و الارجاع :

أ- **إنزيمات الأوكسيداز Oxidase:** وهي تحفز عملية نزع الهيدروجين من الركيزة بواسطة الأوكسجين و ينتج الماء أو فوق أوكسيد الهيدروجين (الماء الأوكسجيني)



أهمها:

- الفلافوبروتينات تحوي الانزيمات الفلافوبروتينات على زمرة ضميمية FMN, FAD مرتبطة معها ارتباط لاتكافؤي
- السيتوكروم أوكسيداز: هو بروتين هيمي موجود في العديد من الأنسجة يحتوي على زمرة الهيم كزمرة ضميمية و زمرة الهيم مشابهة تماما لزمرة الهيم الموجودة في الهيموغلوبين و الميوغلوبين ، ويطلق عليه أيضاً اسم السيتوكروم aa_3 وهو المركب الأخير في السلسلة التنفسية.
- كزانتين أوكسيداز: أحد أنزيمات التي تشارك في استقلاب الأسس البورينية التي تستقلب إلى حمض البول.
- الغلوكوز أوكسيداز: يستخلص من بعض الفطور و يستخدم في معايرة الغلوكوز.

ب- إنزيمات الديهيدروجيناز dehydrogenase: هي الانزيمات تقوم بنقل الهيدروجين في تفاعلات الأكسدة و الارجاع من ركيزة لأخرى، و لا تستطيع استعمال الأوكسجين كمستقبل للهيدروجين، كما في:

- انزيمات التحلل السكري اللاهوائي
- الانزيمات المشاركة في السلسلة التنفسية فهي تشارك كحوامل للالكترونات من الفلافوبروتينات إلى السيتوكروم أوكسيداز، وهي بروتينات هيمية حديدية تتذبذب فيها ذرة الحديد ما بين رقمي الأكسدة Fe^{+2} و Fe^{+3} خلال عملية الأكسدة و الارجاع. يرافق عمل تلك الانزيمات تمائم إنزيمية NAD+, NADP+ ، FAD, FMN فكل السيتوكرومات هي إنزيمات نازعة للهيدروجين ما عدا السيتوكروم الأوكسيداز، و كذلك السيتوكروم P450 الذي يتواجد في الشبكة السيتوبلاسمية الداخلية

ج- أنزيمات الهيدروبيروكسيداز ينتمي إلى تلك الفئة انزيمات البيروكسيداز و إنزيمات الكاتالاز

وهي إنزيمات تقوم بحماية الجسم من البيروكسيدات الضارة حيث يؤدي تراكم البيروكسيدات في الخلية إلى توليد الجذور الحرة التي تسبب في تخريب الأنسجة و ربما تؤدي للسرطان. كمثال على تلك الأنزيمات الغلوتاتون بيروكسيداز الذي يحتوي على عنصر السيلينيوم كزمرة ضميمية فهو يقوم بتحطيم الماء الأوكسجيني المتشكل داخل الكرية الحمراء.

$$H_2O_2 + AH_2 \longrightarrow 2\,H_2O + A$$

أما الكاتالاز فهو بروتين هيميي يحوي على أربع زمر هيمية، يتواجد في الكريات الحمراء و نقي العظام و الأغشية المخاطية و الكلى و الكبد.

كما وجدت الأجسام الصغرية (البيروكسيزومات وهي غنية بأنزيمات الأوكسيداز و الكاتالاز) في العديد من الأنسجة و منها الكبد.

د- إنزيمات الأوكسيجيناز Oxygenase: تدخل تلك الانزيمات في اصطناع و تدرك العديد من المستقلبات أكثر مما تشارك و تخزين الطاقة في الخلية و هي تحفز إدخال الاوكسجين إلى الركيزة ويتم ذلك بمرحلتين:

- ربط الأوكسجين بمركز الفعال للانزيم
- نقل الرابطة الاوكسجينية إلى الركيزة

و تقسم هذه الإنزيمات إلى قسمين:

١- إنزيمات الأوكسيجيناز الأحادية : وهي تدخل ذرة أوكسجين واحدة فقط للركيزة و الأخرى ترجع للماء و من أهمها P450 المتقدري حيث تحفز ضم زمرة الهيدروكسيل إلى المركبات الستيروئيدية كما تحفز ضم هذه الزمرة إلى العديد من العقاقير و المواد للتخلص منها (مثل المورفين)

٢- إنزيمات الأوكسيجيناز الثنائية (أوكسجين ترانسفيراز) تدخل ذرتي الأوكسجين للركيزة ومن تلك الإنزيمات هوموجينتيسات دي أ وكسيجيناز.

٧. الفسفرة التأكسدية Oxidative Phosphorylation:

و هي العملية التي يتم فيها إنتاج الطاقة على شكل ATP و تتجلى بنقل الالكترونات من المكافئات المرجعة NADH و $FADH_2$الناتجة عن استقلاب المركبات الكيميائية الحيوية (السكريات ، الدسم ، بروتينات) إلى الأوكسجين عبر سلسلة من حوامل الإلكترون. إن المكافئات المرجعة إما أن توجد في مطرق المتقدرات أو السيتوزول وهي تعتبر وقود السلسلة التنفسية .

تتم السلسلة التنفسية في الغشاء الداخلي للمتقدرات حيث لإنتاج الطاقة يجب أن تترافق عملية الأكسدة بعملية الفسفرة

٨. سلسلة نقل الإلكترونElectron Transport chain (ETC) :

هي مجموعة الإنزيمات و النواقل الإلكترونية الموجودة داخل المقتدرات و المرتبة بحسب فرق الكمون الأكسدة و الإرجاع – اختصاراً ردوكس Redox– المسؤولة عن نقل المكافئات المرجعة من الركائز إلى الأوكسجين الجزيئي.

أهم الإنزيمات و النواقل في السلسلة التنفسية:

١) إنزيمات نازعات الهيدروجين تمائمها النيكوتين أميد (NAD^+)

يؤكسد ال NAD^+ الركائز وفق المعادلة:

$$NAD^+ + AH_2 \rightleftharpoons NADH + H^+ + A$$

تعاد أكسدة H^+ و NADH بالبروتينات الفلافينية وبذلك يقوم ال NAD^+ بنقل المكافئات المرجعة من الركائز إلى التمائم الفلافينية

$$NADH + H^+ + FAD \longrightarrow FADH_2 + NAD^+$$

٢) إنزيمات نازعات الهيدروجين تمائمها FAD أو FMN (الفلافو بروتينات) هي بروتينات تعمل كجسور ارتباط بين إنزيمات و تمائمها من جهة و بين السيتوكروم من جهة أخرى.

ينقل جزيء الفلافين المكافئات المرجعة من مصدرين هما

- إما من الركائز مباشرة وفق المعادلة:

$$FAD + AH_4 \longleftrightarrow FADH_2 + AH_2$$

- أو من تمائم ال H^+ و NADH

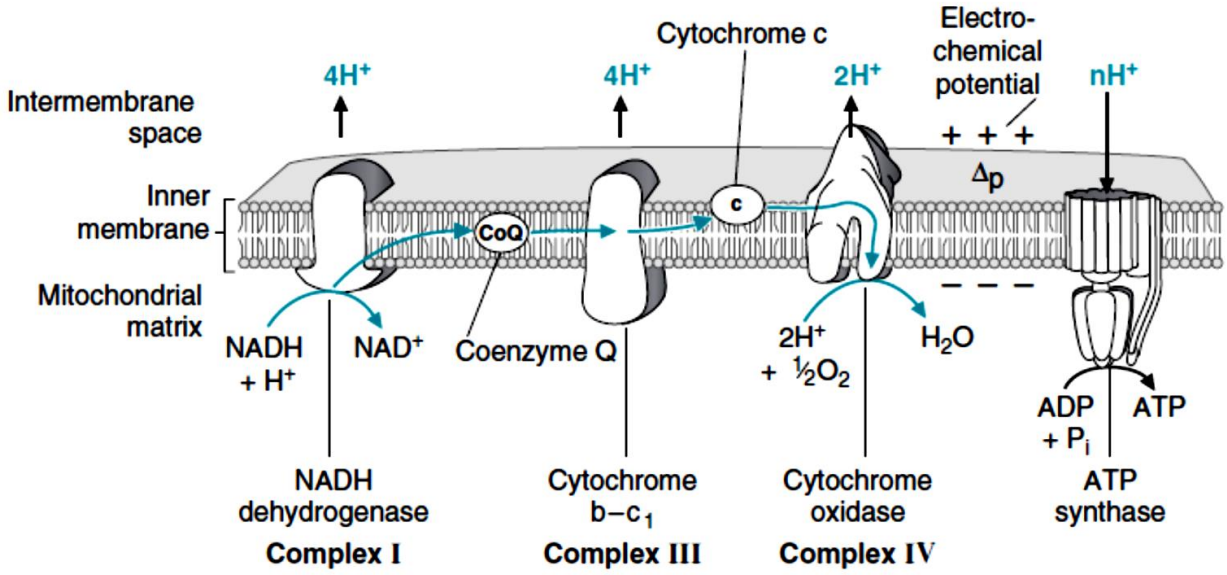
وتعاد أكسدتها في السلسلة التنفسية بوساطة التميم اليوبيكينون.

٣) اليوبيكينون (الكوانزيم Q) Co Q:

مادة دسمة موجودة في المتقدرات وهو مشتق فينوكينون يحوي سلسلة جانبية ايزوبرن(يشبه تركيبها الفيتامين K) يقوم اليوبيكينون بنقل المكافئات المرجعة من التمائم الفلافينية إلى الصبائغ.

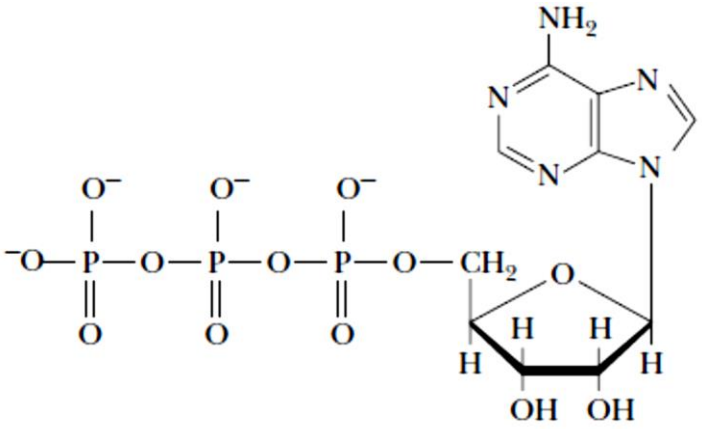
٤) سلسلة الصبائغ ((السيتوكرومات)) $a\diagup a_3$, C, C_1, b

تتركب الصبائغ C, C_1, b من بروتين وهيم الحاوي على الحديد القابل للتذبذب بين Fe^{+3} و Fe^{+2} أثناء عمليات الأكسدة و الإرجاع و بالتالي نقل المكافئات المرجعة من اليوبيكينون إلى أوكسيداز الصبائغ $a_3\backslash a$ حيث يتركب ال $a_3\backslash a$ من بروتين و هيم الحاوي على النحاس وبالتالي يملك إلفه عالية تجاه الأوكسجين لذلك تعاد أكسدته بالأوكسجين الجزيئي الذي هو المتقبل الأخير للمكافئات المرجعة



مفهوم السلاسل التنفسية و الفسفرة التأكسدية:

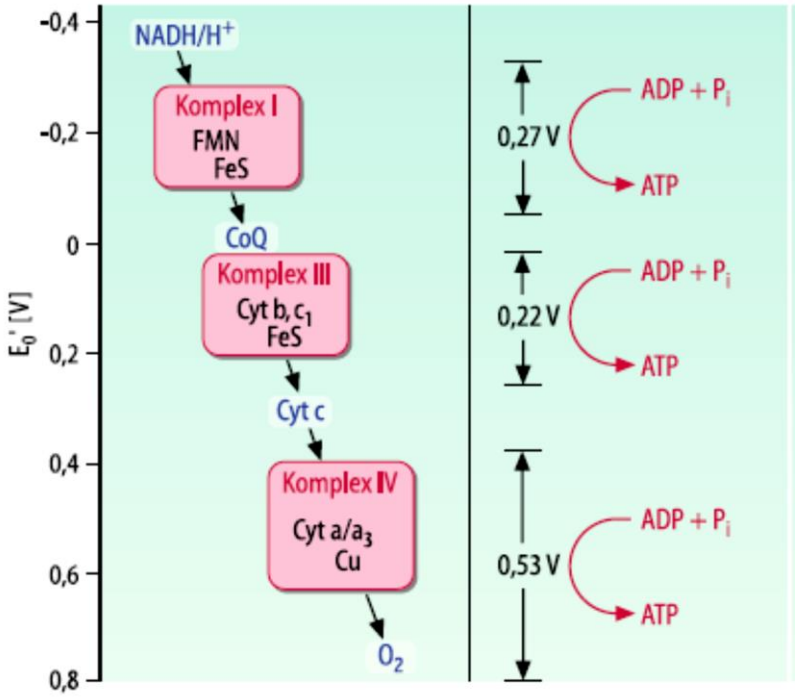
معظم الطاقة المتحررة أثناء عمليات الإستقلاب توجد على شكل مكافئات مرجعة. تقوم السلاسل التنفسية بنقل هذه الإلكترونات حتى تصل إلى تفاعلها الأخير مع الأوكسجين لتشكيل الماء و تقتنص الطاقة بشكل مركبات فوسفات عالية الطاقة على شكل ATP .



صنفت مقومات السلسلة التنفسية إلى معقدات ومركبات تسمى حوامل المتحركة للسلسلة التنفسية

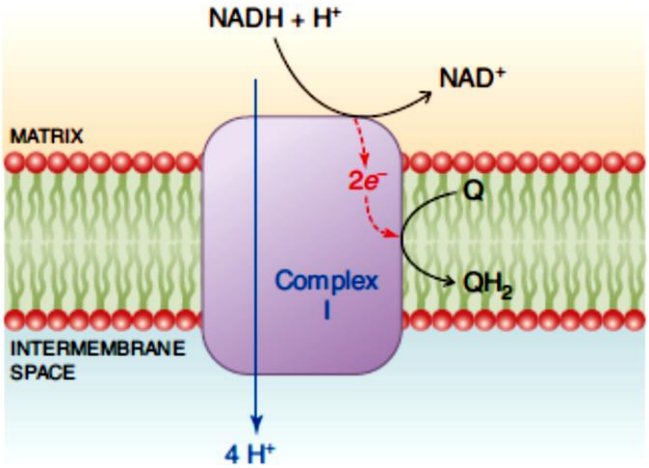
- المعقد I : نازع الهيدروجين ال NADH (NADH dehydrogenase)
- المعقد II : نازع الهيدروجين االسوكسينات (Succinate dehydrogenase)
- الحامل : الأوبيكينون Co Q
- المعقد III: المعقد السيتوكروم bc1
- الحامل : السيتوكروم C
- المعقد IV: السيتوكروم C أوكسيداز

تقع مقومات السلسلة التنفسية في المقتدرات مرتبة بحسب تزايد كمون الأكسدة و الإرجاع بحيث تتناسب المكافئات المرجعه على شكل متدرج

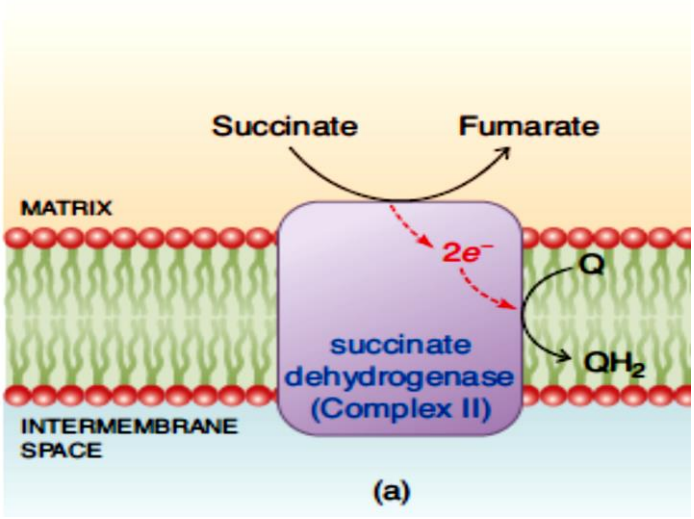


❖ المعقد I (NADH– ديهيدروجيناز): إن البروتون الحر و أيون الهيدريد المحمولين ب $NADH, H^+$ ينتقلان إلى إنزيم NADH– ده هيدروجيناز وهو يوجد ضمن الغشاء المتقدري الداخلي يحوي على جزيء قوي الارتباط من الفلافين أحادي النكليوتيد الذي يستقبل ذرتي هيدروجين ($2H, 2e^-$) ليصبح 2FNMH وبالتالي مرور الالكترون يترافق مع تحرر H^+ إلى السيتوزول. كما يحوي المعقد NADH–ده هيدروجيناز على مراكز الحديدية الكبريتية Fe–S هذه المراكز الحديدية ضرورية لنقل ذرات الهيدرجين إلى العنصر التالي في السلسلة و هو معقد اليوبيكينون ومرور الالكترون في مراكز الحديد كبريت أيضاً يترافق مع تحرير H^+ إلى السيتوزول.

كل الكترون يدخل عبر المعقد الأول يمر عبر الموضعين السابقين أي كل الكترون يترافق بتحرر $2H^+$ و بالتالي يصبح عدد البروتونات الكلية المحررة إلى السيتوزول من المعقد الأول هو $4H^+$.



❖ المعقد II (سوكسينات ديهيدروجيناز): يحوي على أربع سلاسل ببتيدية و كذلك على المرافقين FAD و مراكز الحديد– كبريت . يتصف هذا المعقد بأنه على تماس مع السطح الداخلي للمتقدرات، ينقل الالكترونات من حمض السوكسونيك(من حلقة كريبس) ويسلمها FAD لتصبح FADH2 ثم تنتقل إلى الكوإنزيم Q، إن المعقد II لا يلعب دور مضخة بروتينية و بالتالي لا يترافق مرور الالكترون فيه بتحرير البروتون إلى السيتوزول.

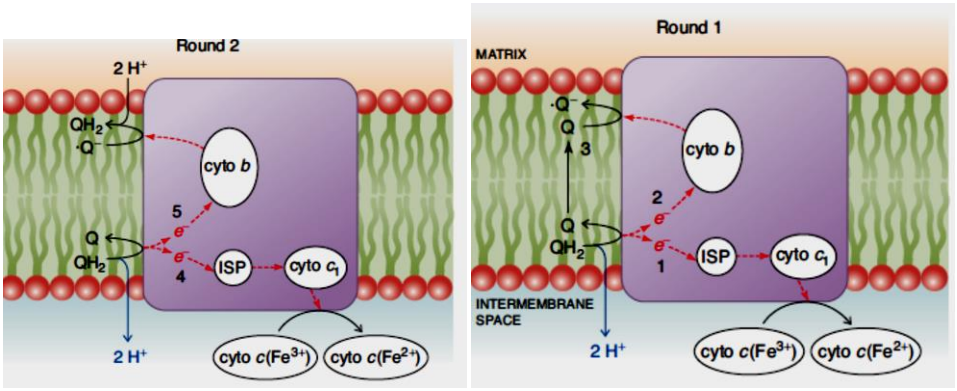


❖ المعقد III سيتوكروم b C1: يختلف عن غيره بأنه ثنائي القسيم مكون من ١١ سلسلة ببتيدية ، و من هيم b و هيم C1 و مراكز الحديد –كبريت. يقوم هذا المعقد بنقل الالكترونين من كوإنزيم Q إلى السيتوكروم C ويتم ذلك على مرحلتين :

الأولى: من الهيم b إلى Fe–S و يترافق بتحرير $2H^+$ إلى السيتوزول.

الثانية: من Fe–S إلى الهيم C1 و يترافق أيضاً بتحرير $2H^+$ إلى السيتوزول.

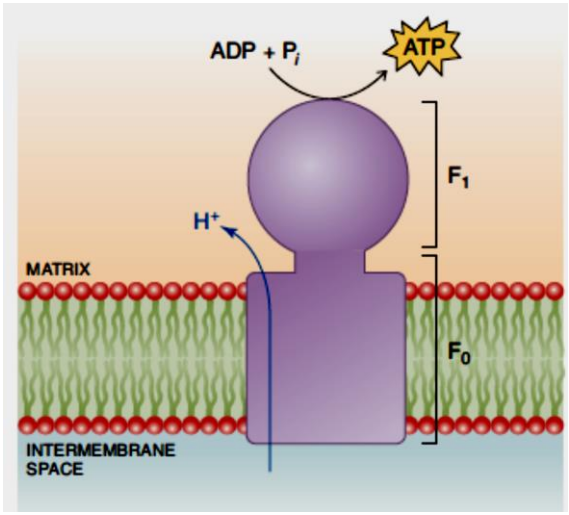
وبالتالي يكون مجموع البروتونات المتحررة إلى السيتوزول من المعقد الثالث هو $4H^+$



❖ السيتوكروم C هو بروتين هيمي صغير الحجم و لكنه مفعوله كبير بسبب قدرته على الحركة لتمتعه بدرجة عالية من الحلولية وظيفته نقل الالكترونين من المعقد الثالث إلى المعقد الرابع

❖ المعقد IV سيتوكروم C أوكسيداز: يتكون من هيم a و هيم a3 و نحاس . ينقل الالكترونين من سيتوكروم C إلى الأوكسجين و هو المعقد الوحيد القادر على تثبيت الالكترونين على الاوكسجين فيربطان بروتونين و يتشكل الماء و يبقى لدينا في النهاية بروتونين يضخان إلى السيتوزول .

❖ المعقد V(ATPase)



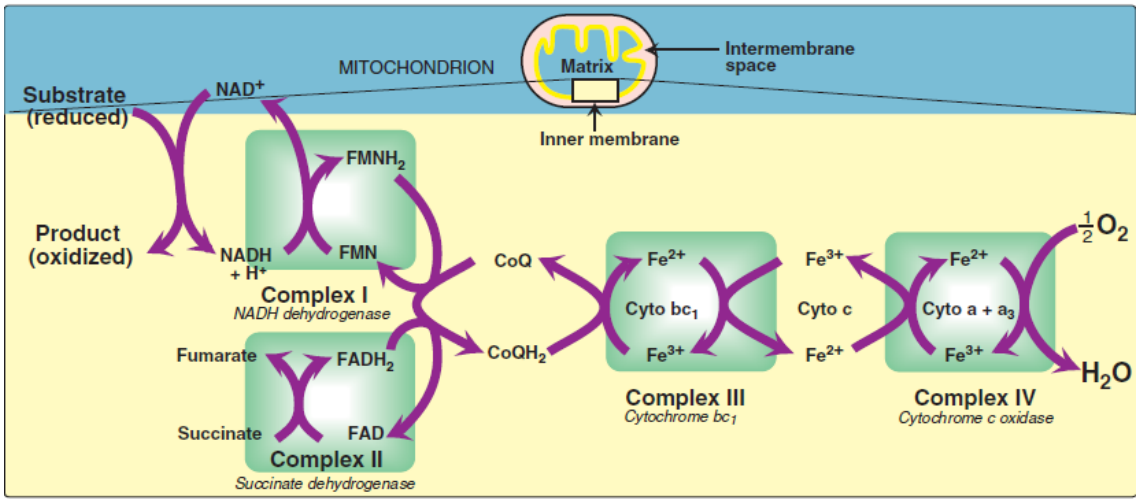
دعي كذلك بسبب قدرته على حلمهة ATP في حال فصله من الغشاء الخلوي . بينما اسمه الحقيقي هو ATP– Synthase . يتألف من وحدتين F0 توجد في الغشاء المتقدري الداخلي و F1 توجد في المطرق.

تحوي قناة لمرور البروتونات فهي تعد من البروتينات المتممة العابرة للغشاء ، تعبرها البروتونات التي تحررت إلى السيتوزول في المراحل السابقة لتعود إلى المطرق من جديد و تساهم في تشكيل ATP.

تقترح نظرية ميتشل أن البروتونات بعد انتقالها إلى القسم السيتوزولي من الغشاء المتقدري الداخلي فإنها تعود لتدخل مطرق المتقدرات عن طريق قناة في المعقد ATPase مؤدية إلى اصطناع ATP بدء من ADP و Pi .

كل بروتونين يسهمان في تشكيل جزيئة واحدة من ATP و بالتالي 4H+ تسهم في تشكيل جزيئة ATP و استهلاك ذرة أوكسجين إذا:

- يتشكل من أكسدة جزيئة NADH ثلاث جزيئات ATP و تستهلك ذرتي أوكسجين وتكون نسبة P/O هو 3/2
- يتشكل من أكسدة جزيئة FADH2 جزيئتين ATP و تستهلك ذرة أوكسجين وتكون نسبة P/O هو 2/1



و قد حددت مناطق اختزان الطاقة في السلسلة التنفسية في المراكز التالية:

- المركز الأول: أكسدة ال NADH بوساطة FAD
- المركز الثاني: أكسدة الستيوكروم b
- قبل أوكسيداز الصبائغ a_3\a مباشرة

١٠. مثبطات السلسلة التنفسية و الفسفرة التأكسدية:

- مثبطات تامة توقف السلسلة التنفسية في ثلاث مناطق تتوافق مع مراكز اختزان الطاقة.

يثبط المركز الأول بتأثير كل من الأميتال Amytal و الروتنونRotenon يرتبط ب Co Q

يثبط المركز الثاني تحت تأثير مركب الأنيمايسين أ Antimycin A يرتبط ب Cyto b C1

أما المركز الثالث فيثبط بأول أوكسيد الكربون أو السيانيد أو غاز كبريت الهيدروجين عند أوكسيداز الصبائغ a_3\a

- مثبطات الفسفرة التأكسدية: حيث يتم تثبيط نواقل ADP و ATP إلى داخل و خارج المتقدرات.مثل أوليغومايسين oligomycin يرتبط ب F0

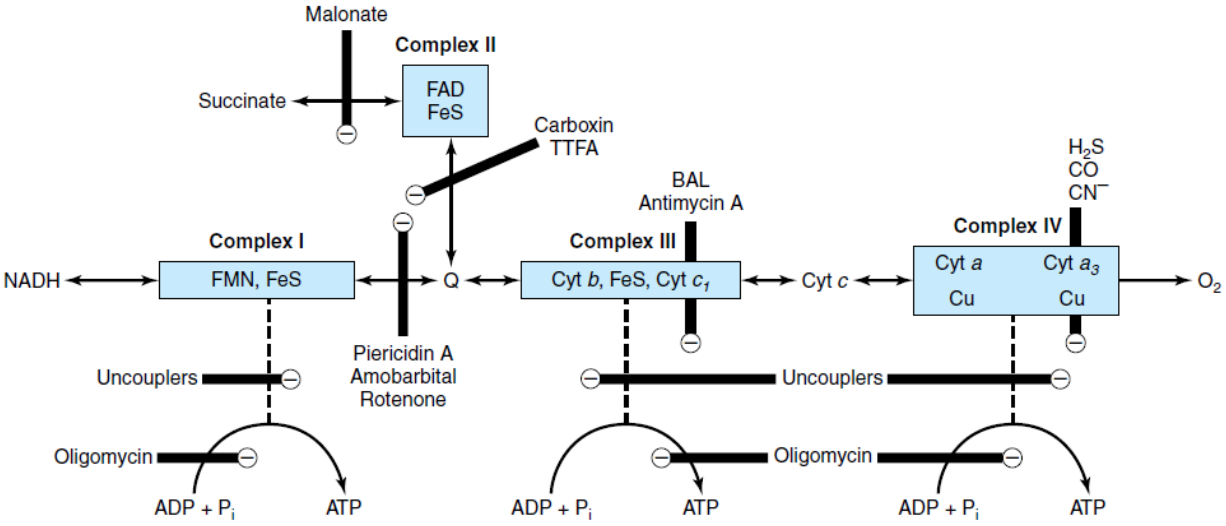
إن أي خلل في مكونات السلسلة التنفسية يؤدي إلى خلل كلي أو جزئي في انتاج الطاقة . و هذا الخلل إما يتعلق بانتاج ATP أو يتعلق بخلل بالأكسدة و الفسفرة

ان المثبطات تؤدي إلى تثبيط سلسلة نقل الإلكترون و تنقص انتاج ATP و تنقص من استهلاك الأوكسجين، و تزيد من نسبه NADH / FADH2

- مفككات الاقتران في هذه الحالة تستمر عملية الأكسدة دون الفسفرة التأكسدية .حيث

١- تنقص مدروج البروتونات ٢- تنقص انتاج ATP ٣- تزيد من استهلاك الأوكسجين ٤- تزيد من اكسدة NADH (دون الحصول على الطاقة و هذا يؤدي إلى ارتفاع حراره)

أمثله عنها ٢،٤- ثنائي نترو فينيل ، اسبرين (فاكي ارتباط ناشر للحراره)



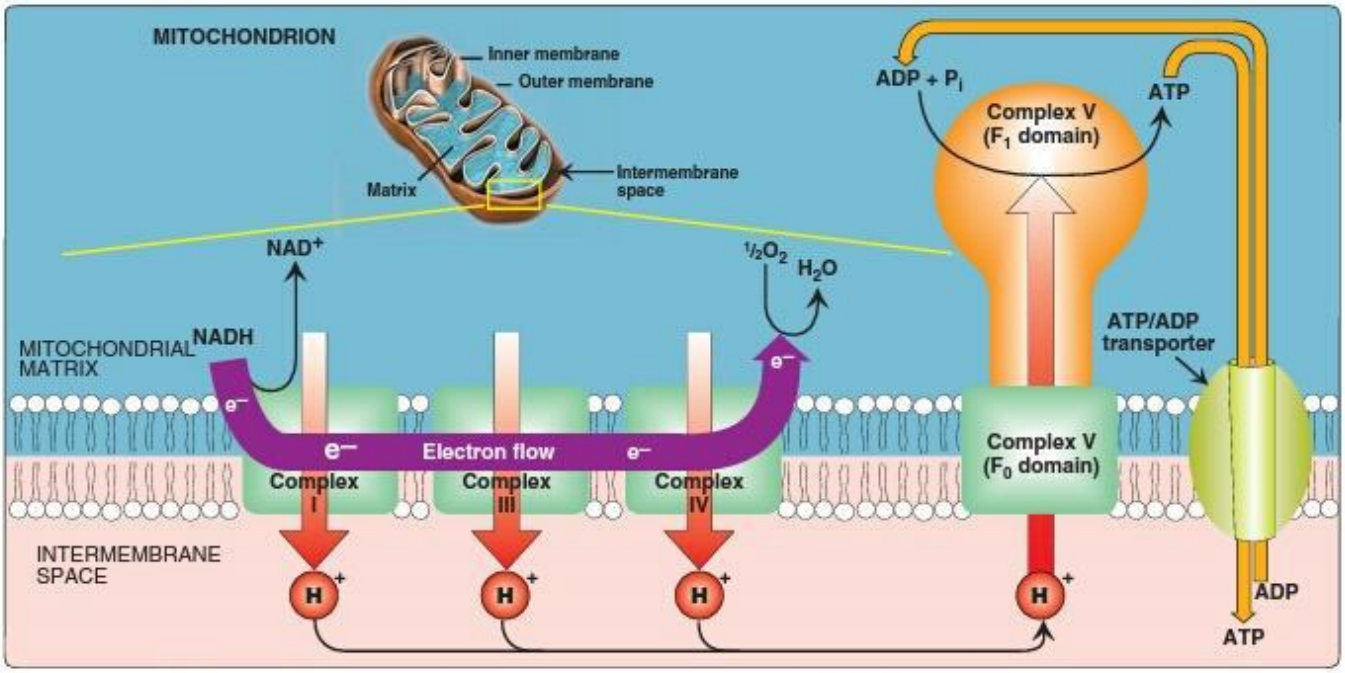


Figure 6.13
Electron transport chain shown coupled to the transport of protons. [Note: Protons are not pumped at Complex II.]