فسلجة النبات

التنفس Respiration

إعداد: د. أنس منير توفيق

كلية الزراعة/جامعة تكريت

تجري عملية التركيب الضوئي في النباتات الخضراء وتؤدي الى تكوين المواد العضوية والكاربوهيدرات والبروتينات والشحوم وغيرها من المواد على حساب الطاقة الضوئية والماء، اي انها تقوم بتحويل الطاقة الضوئية الى طاقة كيميائية وهذه الطاقة الكيميائية تستغل بعملية عكسية تدعى التنفس. حيث تستمد الكائنات الحية الطاقة المخزونة فى المركبات العضوية وذلك اثناء اكسدتها وتفتيتها، اذ تتأكسد المواد العضوية المذكورة وخاصة السكريات لتنطلق الطاقة الكامنة فيها والتي تدخل في مختلف العمليات الحيوية. وهذه الطاقة تنطلق بشكل طاقة نشطة تستغل فى العمليات الحيوية المختلفة وكذلك فى تنشيط بعض المركبات الكيماوية لتكوين مركبات جديدة تساهم فى زيادة كمية البروتوبلازم وبالتالى نمو الكائن الحي.

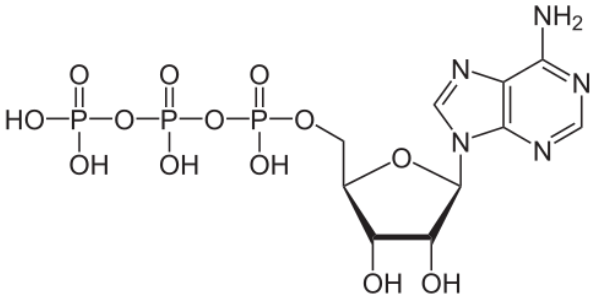
ويمكن تعريف عملية التنفس بأنها عملية تفتيت وأكسدة المركبات العضوية وانطلاق الطاقة المخزنة بها على شكل طاقة حرة. ومن الناحية الكيميائية فهي عملية أكسدة واختزال تحدث فى جميع الخلايا الحية فتسبب انطلاق الطاقة الكامنة فى المواد المتفاعلة على حالة طاقة نشطة وبالتالي فهي عكس عملية البناء المعروفة بالتمثيل الضوني وتعطي نواتج عكسية.

ان التنفس يجري في جميع الخلايا الحية ليلاً ونهاراً ولكن بمعدلات مختلفة في الانسجة المختلفة لغرض انتاج الطاقة التي يحتاجها النبات، وان الجزء الاعظم من هذه الطاقة تحتفظ به الخلايا الحية بشكل مركبات غنية بالطاقة (ATP او غيره) وتستغل في تكوين الهيكل الكاربوني الذي تستند عليه اجسام النباتات وكذلك تدخل في الفعاليات الحيوية اللازمة لتكوين الاحماض الامينية والبروتينات والحوامض النووية والدهون والصبغات وغيرها من المواد، كما تستعمل الطاقة في امتصاص الماء والعناصر المغذية ونقل الماء والمواد الغذائية داخل الجسم و كذلك تستعمل في عملية الازهار وتكوين الثمار والبذور والدرنات وغيرها من انسجة النبات، كما ان هذه الطاقة قد يتبعثر جزء صغير منها على شكل حرارة.

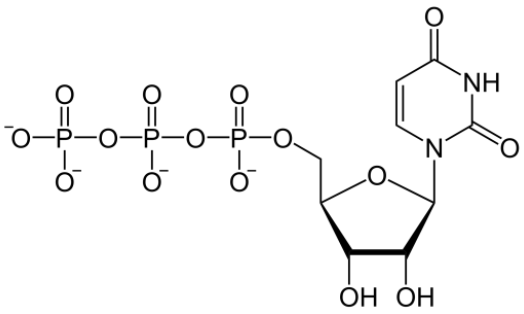
ان النبات قد كيف نفسه وفق ميكانيكية معينة لخزن قسم من الطاقة بشكل مركبات تدعى بـ Energy rich compounds ومن انواعها التالي:

١- مركبات الـ Pyrophosphate compounds وتضم:

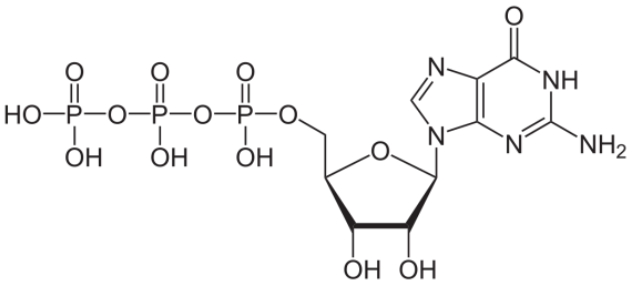
Adenosine Triphosphate ATP



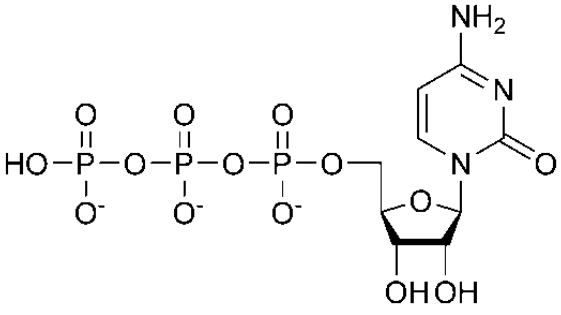
Uridine Triphosphate UTP



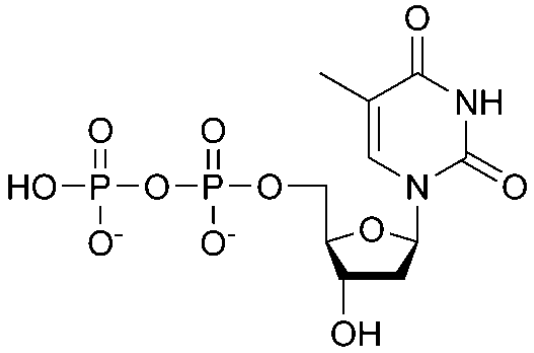
Guanosine Triphosphate GTP



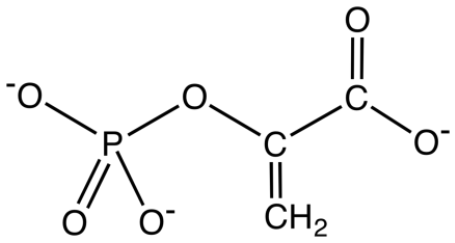
Cytidine Triphosphate CTP



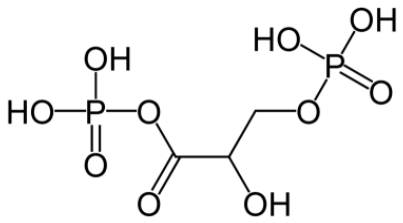
Thymidine Triphosphate TTp



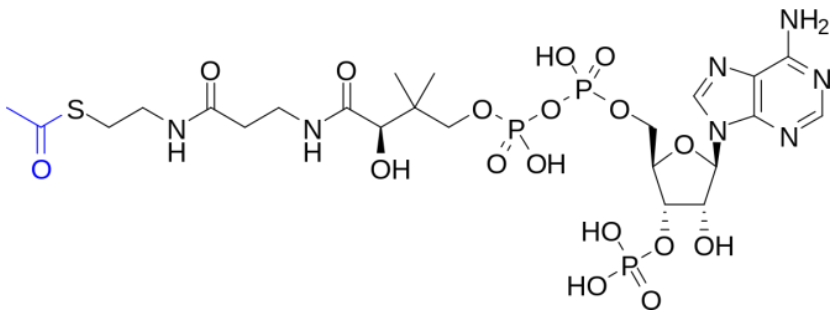
٢- مركبات الـ Enolic Phosphate مثل المركب Phosphoenolpyruvic acid



٣- مركبات الـ Acyle phosphates مثل المركب 1,3-diphosphoglyceric



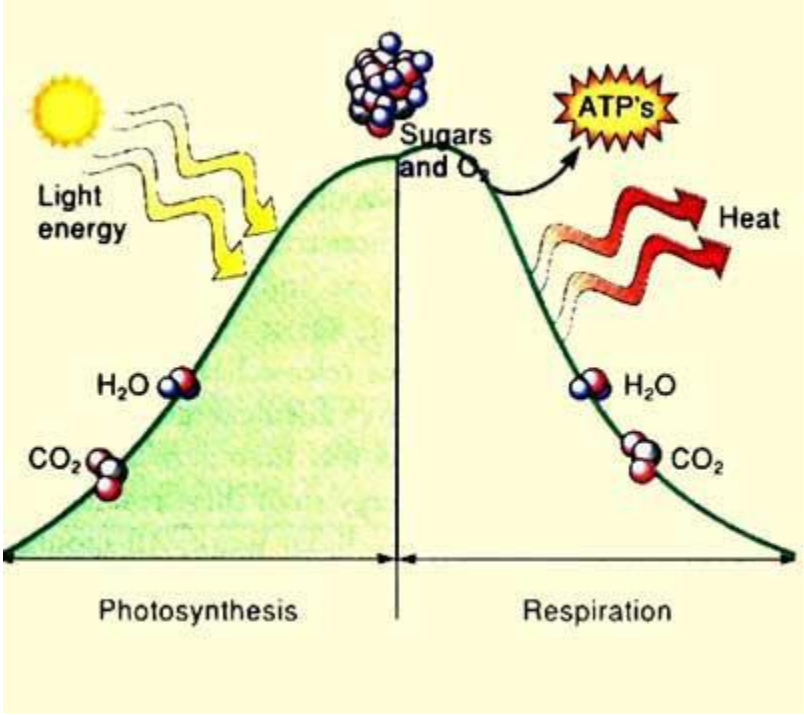
٤- مركبات الـ Thiol esters مثل المركب Acetyl CoA



كيمياء التنفس الحيوية Biochemistry of Respiration

يشترك الاوكسجين الماخوذ من قبل النبات في اكسدة السكريات وغيرها من المواد الى CO_2 وماء مع تحرير الطاقة اللازمة لنمو وتطور النبات وكما في المعادلة الاتية:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O \qquad \Delta G = 686 \text{ Kcal / mole}$$



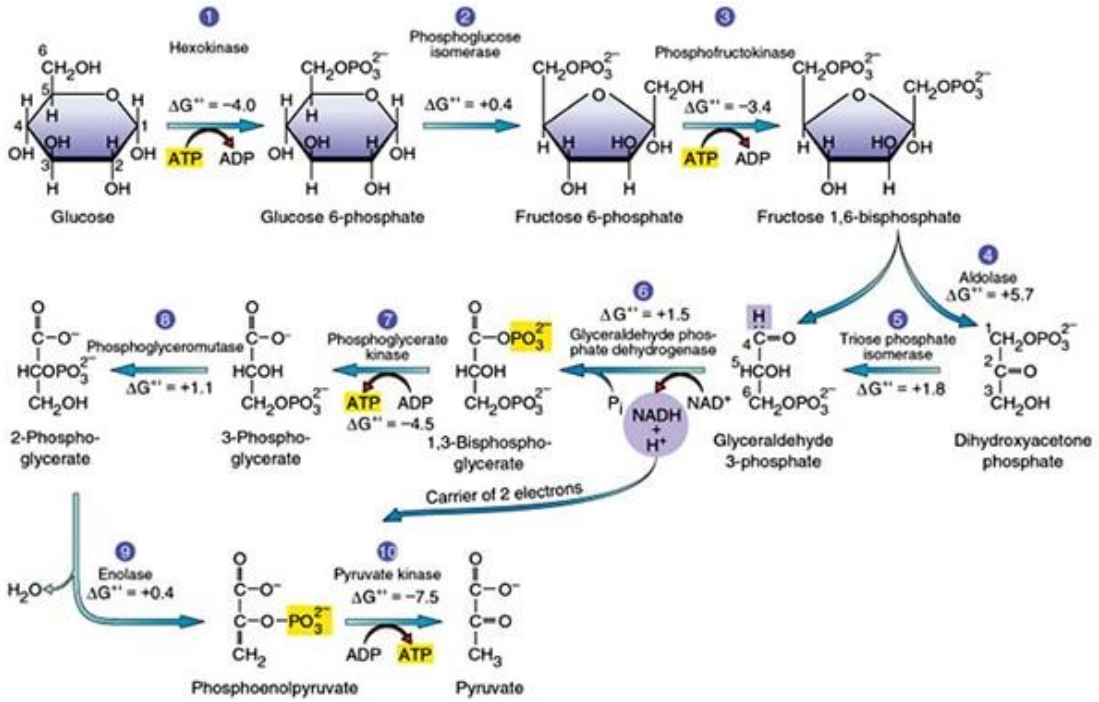
ولا تتم الاكسدة في خطوة واحدة بل خلال سلسلة طويلة من التفاعلات المنظمة التي يعتمد كل تفاعل على التفاعل السابق له، كما ان الاوكسجين لا يشترك في كل التفاعلات التأكسدية. وقد قسمت هذه التفاعلات الى ثلاثة مراحل هي:

١- القسم الاول غير هوائي Anaerobic carbohydrate metabolism

تجري تفاعلات هذه المرحلة في معظم الانسجة الحية وتتكون من عدة خطوات لهدم النشأ والسكريات لتكوين مركبات ذات ثلاث ذرات كاربون والتي تسمى Pyruvic acid. ولاتحتاج هذه المرحلة للاوكسجين (او بكميات قليلة جداً) وتحدث في السايتوبلازم.

ويعبر عن هذا النوع من التحلل بتعبيرين هما: **التحلل السكري Glycolysis** الذي يشير الى الهدم اللاهوائي للكاربوهيدرات في الخلايا الحية ويتكون من عدة تفاعلات تنتهي بتكوين Lactic acid او Pyruvic acid وكما في المعادلة التالية:

$C_6H_{12}O_6$ +2NAD^+ + 2ADP + 2P —> 2pyruvic acid, (CH_3(C=O)COOH + 2ATP^+ 2NADH + 2H^+

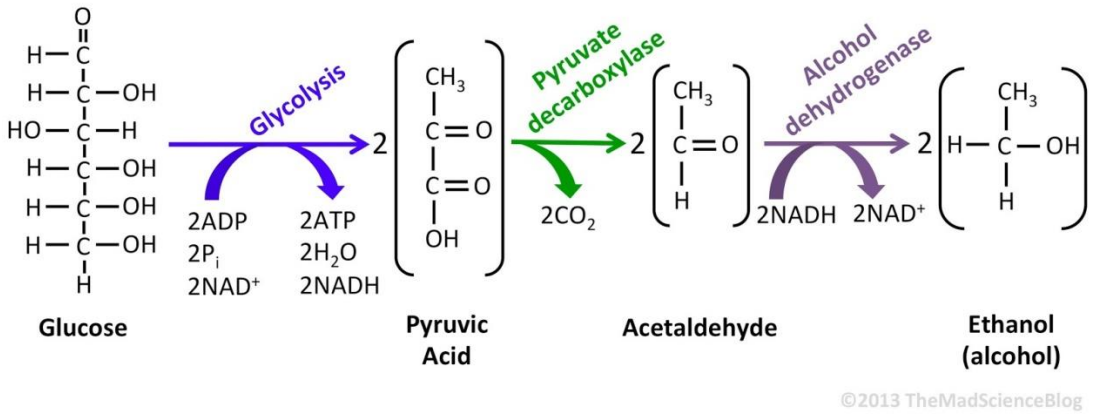


وبذلك تنتهي Glycolysis وينتج عنها اربع جزيئات منATP في حين يستهلك خلالها جزيئان فتكون المحصلة جزيئان فقط من ATP. بعد ذلك يدخل الـ Pyruvic acid في التخمر الكحولي أو تخمر اللاكتيك ليتم التنفس اللاهوائي أو يدخل الـ Pyruvic acid في دورة كربس Krebs cycle (دورة السترات) ليتم التنفس الهوائي.

أما **التعبير الثاني** فهو التخمر الكحولي Alcoholic fermentation الذي يشير الى الهدم اللاهوائي للكاربوهيدرات وتحدث في الخميرة yeast وتنتهي بتكوين الكحول الاثيلي Ethanol و CO_2. وتجدر الاشارة الى ان كلا التفاعلين متشابهين باستثناء الخطوة الاخيرة، فبدلا من تكوين lactic acid يتكون ethanol، وكما في المعادلة التالية:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

ولا ينتج عن ذلك طاقة اي لا تتكون مركبات ATP وبذلك بعملية التنفس اللاهوائي بداية من تفتيت السكر حتى تكون lactic acid و ethanol لا ينتج عنها سوى جزيئان من ATP وهي الناتج اثناء عملية Glycolysis التي اشرنا لها اعلاه.



وعلى الرغم من ان انواعاً عديدة من الخمائر تستطيع تخمير انواع مختلفة من السكريات، إلا ان اكثرية الخمائر لاتستطيع تخمير النشأ لافتقارها لانزيمات الـ amylases التي تحلل النشأ الى سكر المالتوز maltose والكلوكوز.

ولهذا تستعمل بذور الشعير النابتة (الباذرات malt) بدلاً من البذور الجافة الحاوية على النشأ في صناعة البيرة، حيث ان معظم النشأ يتحول الى سكريات بسيطة اثناء عملية الانبات.

وتسمى تفاعلات التحلل السكري والتخمر الكحولي والتي قد تتم بغياب الاوكسجين بالتنفس اللاهوائي anaerobic respiration والذي قد تلجأ له بعض الخلايا في حال عدم استطاعة الاوكسجين دخول الخلية النباتية في حال قلة توفره كما في حالة انبات البذور ذات الغلاف الصلب مثل الذرة والبزاليا، او في حالة الترب الغدقة حيث تكون الجذور غير قادرة على التنفس الهوائي.

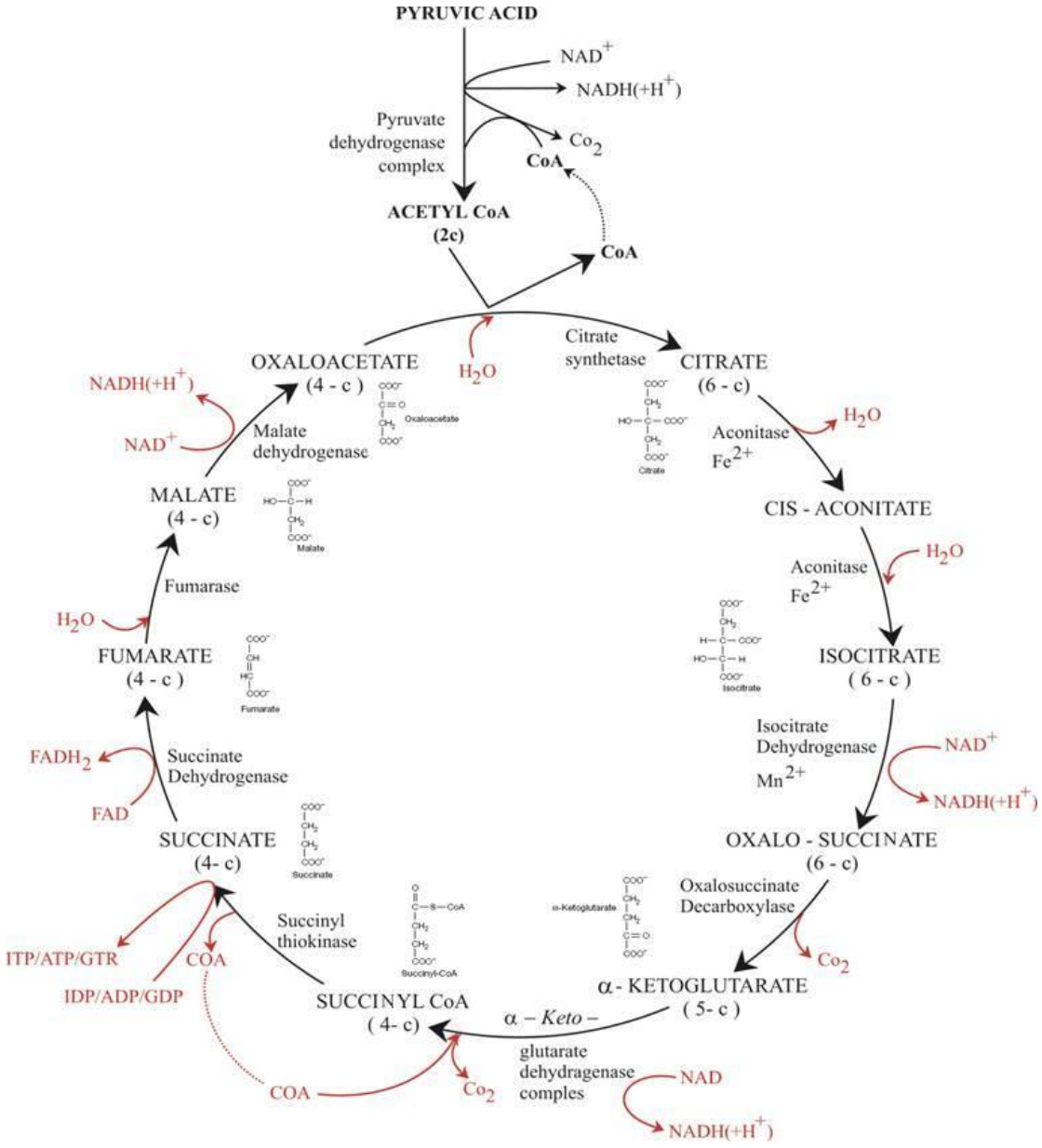
٢- القسم الثاني الهوائي Aerobic carbohydrate metabolism

يتم ذلك عن طريق سلسلة من التفاعلات تبدأ أولا بتكوين acetyl coenzyme A وهي عملية معقدة. وتحتاج هذه العملية الى خمس مساعدات ضرورية thiamine pyrophosphate TPP، المغنسيوم، NAD، Coenzyme A و Lipoic acid. ومن التفاعل نجد تكوين Acetyl CoA و CO_2 أول مجموعة تخرج من الـ Pyruvic acid وفي اثناء هذا التحول السابق الاشارة اليه يتم نقل الكترونان للـ NAD لتكوين NADH واثناء نقل هذان الالكترونان ينتج عن ذلك ثلاث جزيئات من ATP ويمكن تلخيص التفاعل كالآتي :

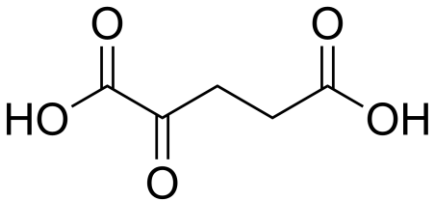
Pyruvate + CoA + NAD Acetyl CoA + CO_2 + NADH +3ATP

دورة كربس Krebs cycle

يعتبر Acetyl CoA حلقة الوصل بين عملية Glycolysis ودورة كربس Krebs cycle (أو دورة حامض الستريك citric acid cycle أو دورة الاحماض ثلاثية الكربون Tricarboxyclic cycle (TCA)). ان أول تفاعل في تلك الدورة التي تحدث على سطح الغشاء الداخلي للمايتوكوندريا هو اتحاد Acetyl COA مع Oxaloacetic acid لتكوين حامض الستريك. حيث تتم سلسلة من التفاعلات يتم خلالها اربع خطوات أكسدة ودخول جزيئات الماء وتحرير CO_2 وثمان ذرات هايدروجين، وبذلك يتم تفتيت كل ذرات الكاربون التي كونت الـ Pyruvic acid وكما بالمخطط التالي.



وخلال هذه الدورة يتم تكوين حامض الالفا كيتوجليتريك α-Ketoglutaric acid ويعتبر هذا الحامض هو مفتاح عمليات التمثيل داخل النبات، فهو يلعب دوراً هاماً في تمثيل كلا من الكاربوهيدرات والدهون وكذلك الأحماض الامينية.



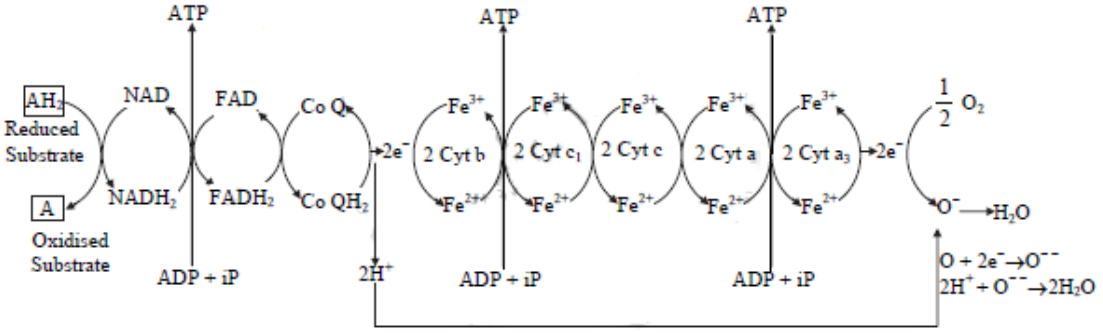
(alpha)α-Ketoglutaric acid

القسم الثالث/ سلسلة نقل الالكترونات Electron Transport Chain (ETC)

وهو تفاعل هوائي، عبارة عن سلسلة من تفاعلات تأكسدية – اختزالية أثناء انتقال الهيدروجين المنزوع من الحوامض العضوية في المرحلة الثانية من التنفس واتحاده بالأوكسجين مكوناً الماء، وتتحرر فيه كمية كبيرة من الطاقة. ويكون مرافقاً للقسم الثاني وتسمى هذه التفاعلات بسلسلة نقل الالكترونات (Electron Transport Chain). وفي هذه المرحلة فان الطاقة المتحررة تخزن في مركبات الطاقة مثل ATP بعملية الـ Oxidative Phosphorylation ليستفاد منها الكائن الحي في عملياته الحياتية المختلفة.

مما تقدم نجد في دورة الأحماض الثلاثية أنه تم اختزال كلا من المرافقين الانزيمي FAD، NAD وحملوا بأيونات الهيدروجين. لذلك وجب اعادة اكسدتهم وتسمى تلك الاكسدة بالاكسدة النهائية أو الطرفية Terminal oxidation. ان ذرات الهيدروجين في NADH+H الناتجة من عملية الـ Glycolysis ودورة كربس Krebs cycle تستطيع الاتحاد مباشرة مع الاوكسجين لتكون الماء الذي هو الناتج الثاني من نواتج التنفس وتقوم عدة انزيمات باتمام هذة العملية بعد ان تمر بسلسلة من التفاعلات تسمى بسلسلة نقل الالكترونات Electron Transport Chain (ETC). ان هذا التحول يبتدئ بالمواد ذات الطاقة الاختزالية الواطئة منتقلاً الى المواد ذات الطاقة الاختزالية العالية. ومن المعلوم ان الاوكسجين يمتلك قدرة عالية على اكتساب الالكترونات، وان الانزيمات العاملة في هذه السلسلة مخصصة لكل تفاعل معين ولهذا فان التفاعلات تجري بانتظام عالي في اجزاء دقيقة جدا مرتبطة بالغشاء الداخلي للمايتوكوندريا تعرف بالـ Subunits.

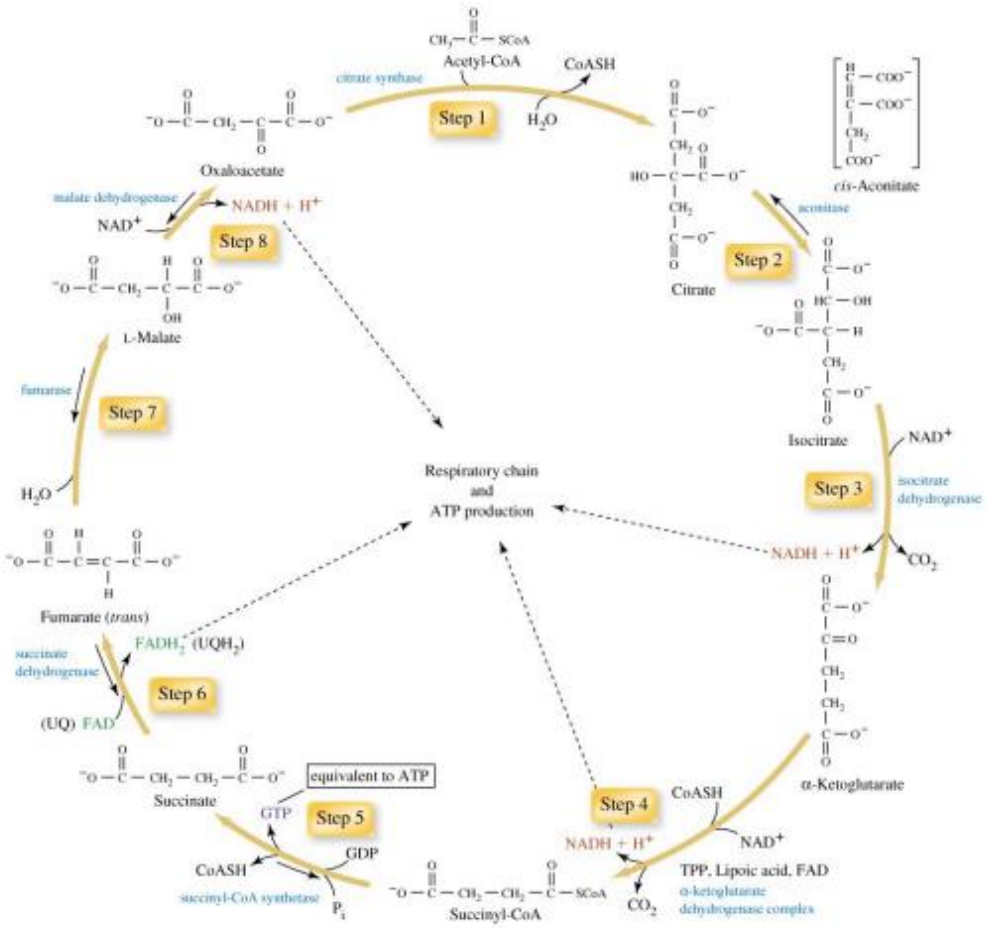
ان الشكل ادناه يوضح سلسلة تفاعلات نقل الالكترونات من المواد المتفاعلة المختزلة الى الاوكسجين الحر، حيث تفقد الـ NADH+H ايونات الهيدروجين والالكترونات التي اكتسبتها من المواد المتفاعلة لتحولها الى FAD وبذلك تصبح NAD مؤكسدة وتستطيع اكتساب الكترونين جديدين من المواد الحيوية المختلفة بمساعدة انزيمات Dehydrogenases. وعندما تتكون FADH+H و NADH+H فأن ايوني الهيدروجين وزوج الالكترونات قد يكتسبها المركب المسمى بـ Coenzyme Q او CoQ.



Diagrammatic Representation of Electron Transport Chain

يحول CoQ المختزل الالكترونات الى احد انواع السايتوكرومات Cytochromes الحاوية على الحديد وهي Cytochromes Oxidase, Cyt C, Cyt B على التوالي. ويقوم السايتوكروم الاخير بتسليم زوج من الالكترونات الى الاوكسجين لتكوين الماء. علماً ان عملية نقل زوج من الالكترونات تتطلب مليون سايتوكروم من كل نوع من الانواع الثلاث المذكورة اعلاه!

وعلى صلة بالموضوع، فان كل من الحديد والنحاس لهما اهمية كبيرة في نمو النبات حيث ان الـ Cytochromes Oxidase يحتوي عليهما الا ان النحاس هو الذي يعاني عملية الاكسدة والاختزال (Cuprous نحاسوز و Cupric نحاسيك) عندما يتفاعل مع الاوكسجين.



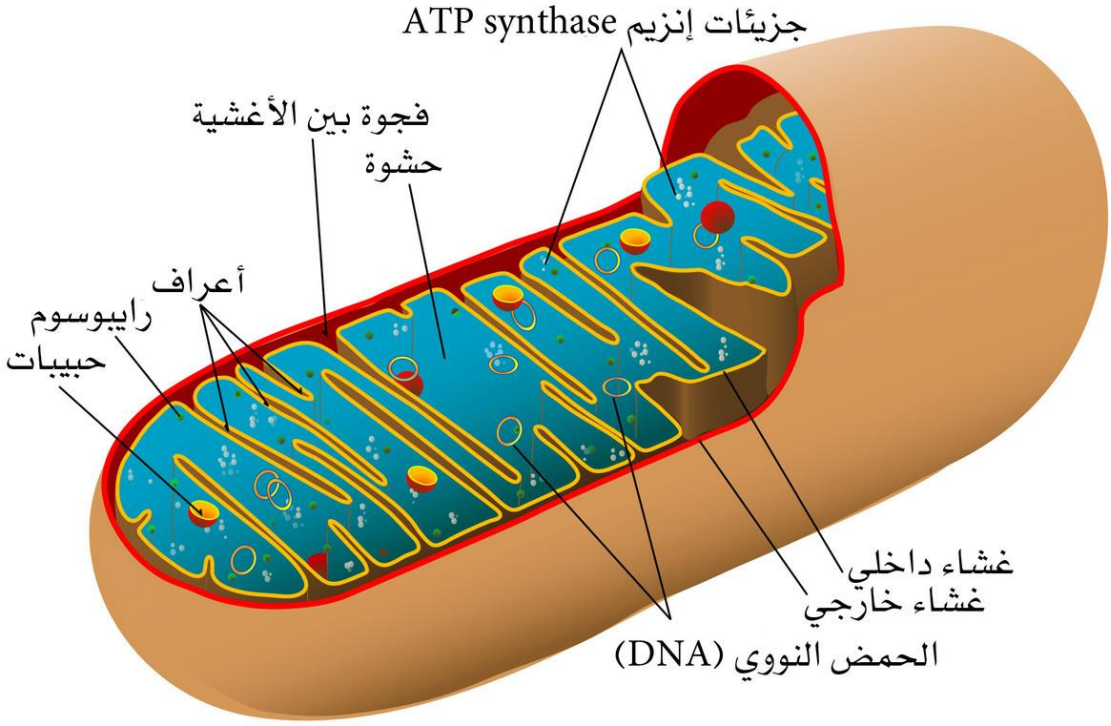
وهكذا فان كمية الطاقة المتحررة او الناتجة من تحطيم جزيئة كلوكوز واحدة هو: **38 ATP حيث أن 8 ATP ناتجة من عملية الـ Glycolysis و 30 ATP ناتجة من 2 Pyruvic acid من خلال دورة كربس Krebs cycle.**

وان كل 1 NAD يساوي 3 ATP وكل 1 FAD يساوي 2 ATP

مكان حدوث التنفس

يحدث التنفس فى عضيات صغيرة تعرف بالمايتوكوندريا Mitochondria والتي هى بمثابة بيت الطاقة. حيث تحتوى على انزيمات التنفس، وهى أجسام محاطة بوحدتين غشائيتين يضمان بداخلهما الحشوة وأنزيمات دورة كربس ومركبات عديدة من نواتج التفاعلات الأنزيمية والسيتوكرومات. ويلاحظ كثافة المايتوكوندريا في الخلايا النشطة مثل الخلايا المرستيمية حيث تسود بها المايتوكوندريا.

ونظرا لاحتواء المايتوكوندريا على DNA فان لها القدرة على الانقسام دون الأعتماد على النواة.



ويذكر ان عملية التركيب الضوئي والتنفس تحدثان في الانسجة الخضراء في ان واحد ولهذا لا يمكن قياس التركيب الضوئي بدقة نظرا لان ثاني اكسيد الكربون CO_2 المنتج بالتنفس الذي يستعمل مباشرة في التركيب الضوئي اوفي تفاعلات حيوية اخرى مثبتة لثاني اوكسيد الكاربون. كما ان الاوكسجين المنتج بالتركيب الضوئي قد يستعمل مباشرة في عملية التنفس او في تفاعلات تاكسدية حيوية اخرى.

العوامل المؤثرة على التنفس Factors affecting on Respiration

١ الأوكسجين المتوفر ٢- درجة الحرارة ٣- الضوء ٤- العناصر الغذائية والمواد السامة ٥- تأثير CO_2 ٦- نقص المواد الغذائية ٧- عمر النبات ونوعه ٨- الامراض والجروح والتأثيرات الميكانيكية ٩- المحتوى المائي للخلية.

ان استمرارية التنفس اللاهوائي غير مفيدة لحياة النبات للاسباب التالية:

١ – ان الطاقة الناتجة غير كافية لاتمام جميع التفاعلات الحيوية بالخلية.

٢- لايمكن استمرارية جميع التفاعلات البنائية داخل النبات بغياب الاوكسجين.

٣- ينتج عن التخمر الكحولي كحوي يعمل على نزع الماء من الاغشية البلازمية مما يؤدي الى تصلبها وتلفها، اما CO_2 فانه يذوب في الماء مكوناً حامض الكاربونيك الذي له تأثير سام على بروتوبلازم الخلية.

تتم عملية بناء الطاقة او اكسدة المركبات العضوية المعقدة (الكربوهيدرات ،الدهون ،البروتينات) في الخلايا الحية والتي تعرف بالاكسده البايلوجية. فعملية اكسدة جزيء الكلوكوز اكسدة تامة الى ماء و CO_2 يصاحبها بناء طاقة كبيرة (اذا نتجت هذه الطاقة مرة واحدة تسبب احتراق الخلية، لذلك تنطلق على دفعات صغيرة حتى يمكن استغلالها اولا باول في الخلية) تحدث خلال مسلك الانحلال الكليكوزي ودورة كربس ودورة نقل الالكترون (دورة السيتوكروم).