الأكسدة البيولوجية وإنتاج الطاقة
Biological Oxidation and energy production
التنفس Respiration

يحصل الكائن الحي علي الطاقة اللازمة للنمو وإتمام كافة العمليات الحيوية وذلك عن طريق أكسدة المواد الغذائية وتحرير الطاقة الكامنة في تلك المواد الغذائية وحبسها في مركبات ATP . وهو من المركبات الغنية بالطاقة وكذلك تخزن تلك الطاقة في المرافق الإنزيمي $NADPH_2$. وتتم عملية الأكسدة في وجود O_2 وتنطلق الطاقة كما ذكرنا بالإضافة إلي CO_2 والماء . ولا تتحرر الطاقة المخزنة في المادة الغذائية دفعة واحدة بل تتحرر في خطوات متسلسلة من التفاعلات التي تتحكم بها الإنزيمات . والمواد الغذائية التي تستخدم في تحرير الطاقة هى المواد الكربوهيدراتية والدهون والبروتينات ، وعملية تحرير الطاقة خلال عملية التنفس تحدث في الظلام أو الضوء علي حد سواء . في حالة استخدام الكربوهيدرات (النشا) في التنفس كمادة بادئة لإنتاج جزيئات $NADPH_2$,ATP فإنه يلزم تحليل النشا إلي جزيئات أصغر بفعل الإنزيمات المتخصصة حيث يتم تحويلها إلي سكريات أحادية.

نشا ←(A- amylase) دكسترين ←(β- amylase) مالتوز ←(maltase) جلوكوز

وفي حالة استخدام الدهون فيلزم تحللها إلي أحماض دهنيه وجلسرين أنزيميا. وتتأكسد الأحماض الدهنية ويتكون منها acetyl-CoA والذى يدخل مباشرة فى دورة كربس.

Lipids Lipids fatty acids + glycrole

في حالة البروتينات فإنها تتحلل إلي أحماض أمينيه بفعل الإنزيمات المحللة. ثم تتأكسد الأحماض الأمينية بنزع مجموعة Amine(NH_2 -) وينتج الحمض الكيتوني والذي يتحول في النهاية إلي المركب acetyl Co A – والذي يدخل مباشرة في دورة كربس.

معامل التنفس Respiratory quotient (RQ)

يعرف معامل التنفس علي أنه النسبة بين حجم Co_2 المنطلق من عملية التنفس إلي حجم الأكسوجين O_2 المستهلك في العملية . ويلاحظ اختلاف معامل التنفس (RQ)

$$RQ = \frac{\text{Volume of } CO_2 \text{ evolved}}{\text{Volume of } O_2 \text{ Consumed}}$$

بإختلاف المادة الأساسية المستهلكة أثناء عملية التنفس كما هو واضح من الأمثلة التالية:

في حالة استخدام المواد الكربوهيدراتية كمادة للتنفس . يلاحظ أن معامل التنفس يساوي الوحدة أي أن كمية CO_2 المنطلقة تساوي كمية O_2 المستهلكة في عملية التنفس وذلك عند حدوث الأكسدة الكاملة .

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 675.\ K\ cal$$

$$RQ = \frac{6\ CO_2}{6O_2} \quad (1)$$

يلاحظ أن النسبة بين الكربون والأكسوجين في جزيء الجلوكوز ١ : ١

- في حالة استخدام الدهون كمادة للتنفس فإن معامل التنفس يكون أقل من الوحدة حيث أن جزيء الدهن يحتوي علي نسبة عالية من الكربون ونسبة ضئيلة من O_2 وعلي ذلك فإنه يحتاج إلي كمية كبيرة من O_2 لإتمام عملية الأكسدة

$$C_{51}H_{98}O_6 + 72.5O_2 \text{ -------- } 51CO_2 + 49C_2O + 759\ Ok\ .cal$$

كما هو الحال في حمض ثلاثي البالمتين

$$RQ = \frac{51CO_2}{72.5O_2} = 0.7$$

- ولذلك فإنها تحتاج إلي قدر ضئيل من O_2 الخارجي لإتمام عملية الأكسدة ويزداد معامل التنفس عن الوحدة كما في حمض الماليك

$$COOH.CH_2CHOH.COOH + 3O_2 \longrightarrow 4CO_2 + 3H_2O + 320\ k.cal$$

$$RQ = \frac{4CO_2}{3O_2} = 1.33$$

ويمكن استخدام جهاز جانونج لتقدير معامل التنفس للحالات السابقة.

العوامل التي تؤثر في سرعة عملية التنفس

* درجة الحرارة

كل التفاعلات البيولوجية الكيماوية التي تتم بواسطة الإنزيمات ومنها التنفس فإن معدل التنفس يزداد بزيادة درجة الحرارة في المدى الحراري. حيث تنشط عملية التنفس وتزداد بارتفاع درجة الحرارة (١٠ °م) بين درجتي الصفر - ٣٥ °م وهذه الزيادة تتراوح قيمتها بين ٢ – ٢.٥ مرة . أي أن المعامل الحراري (Q10) Temperature Coefficient وهو الزيادة في سرعة التنفس نتيجة لزيادة درجة الحرارة عشر درجات مئوية. ويشترط أن يحدث هذا بعيدا عن التأثير السيئ علي البروتوبلازم والإنزيمات.

* تركيز الأكسوجين الخارجي

عموماً لا يتأثر معدل التنفس كثيرا بتغيير نسبة الأكسوجين في الجو من ٢٠ إلي ٥ % أما إذا نقص تركيز الأكسوجين عن ٥ % فإن معدل التنفس يرتفع لحدوث التنفس الهوائي وإلا هوائي معا لإمداد النبات بالطاقة.

* تركيز CO_2 في الجو الخارجي

تنخفض سرعة التنفس إذا زاد تركيز CO_2 في الجو المحيط للنسيج النباتي ، وقد استغلت هذه الظاهرة اقتصاديا في حفظ ثمار الفاكهة وكذلك الخضروات. فقد تبين أن حفظ ثمار التفاح في جو يحتوي علي ٥% CO_2 ، ٣% O_2 ، ٩٢% N_2 وعند درجات حرارة ٤ - ٥ °م . يؤدي ذلك إلي انخفاض سرعة التنفس وغيره من التحولات .وأمكن حفظ هذه الثمار لمدة ٨ شهور بحالة جيدة.

* المادة المستهلكة في التنفس

زيادة تركيز السكريات الأحادية الذائبة يؤدي إلي زيادة في سرعة التنفس وقد لوحظ أنه عند حفظ الأنسجة النشوية كالبطاطس في الثلاجة يؤدي ذلك ارتفاع نسبة السكريات الذائبة بها وبالتالي يؤدي ذلك إلي زيادة معدل النمو بمجرد خروجها من الثلاجة إلي جو الغرفة.

* نسبة الماء في النسيج

يؤدي النقص في المحتوي المائى لبعض الأنسجة النباتية إلي زيادة معدل التنفس . وعندما تقترب الأنسجة من حالة الذبول يتحلل ما بها من نشا إلي سكريات ذائبة مما يؤدي إلي ارتفاع في سرعة التنفس.

- **في حالة الأنسجة العادية مثل أنسجة الأوراق والثمار والدرنات والسيقان والتي تحتوي علي نسبة عالية من الماء. فإن سرعة التنفس بها تكاد لا تتأثر بالتغيرات العادية في محتواها المائي وذلك لأن قدرا كبيرا من الماء الذي تحويه يوجد في صورة حرة.**
- **في حالة البذور فإنها تحتوي قدر ضئيل جدا من الماء ولذلك فإن معدل التنفس في البذور يكاد لا يذكر وذلك يفسر طول عمر البذور الجافة. ولوحظ في حبوب القمح أن معدل تنفسها يزيد بزيادة الرطوبة فيها عن ١٧ % وقد يكون السبب أن المحتوي المائي أقل من هذه النسبة يكون علي صورة ماء مرتبط وعند زيادة الماء الحر تزداد سرعة التنفس.**

* الأملاح

يزداد معدل التنفس إذا تعرض النسيج النباتي لأيونات الأملاح والزيادة في هذه الحالة تسمي بالتنفس الملحي.

ميكانيكية التنفس Mechanism of Rispiration

تقسم عملية التنفس إلي مرحلتين هما:

- **الانحلال الجليكولي Glycolysis ويتضمن التفاعلات التي تتناول تحلل جزيء الجلوكوز حتي يتكون حمض البيروقيك. وتتم هذه العملية في غياب أو وجود الأكسوجين وتفاعلات هذه الدورة لا تحتاج الأكسوجين.**
- **دورة كربس Krebs Cycle وتعرف بدورة حمض الستريك ويتم فيها أكسدة حمض البيروقيك الناتج من التفاعل السابق من خلال دورة الانحلال الجليكولي. وتتم أكسدته هوائيا إلي ثاني أكسيد الكربون والماء ، وتتم هذه العملية تحت الظروف الهوائية فقط.**

دورة الانحلال الجليكولي Glycolysis

هذه الدورة تتم في وجود أو عدم وجود O_2 لأن تفاعلات هذه الدورة لا تحتاج إلي O_2 وتتضمن هذه الدورة التغيرات التي تطرأ علي جزيء الجلوكوز من البداية حتي يتكون حمض البيروفيك. كما يطلق علي هذه الدورة أيضا Embden – Meyerhof – Parans Pathway وسميت كذلك لأن هؤلاء العلماء قد حققوا العديد من الإنزيمات والمركبات الوسيطة لهذه الدورة.

وتتم تفاعلات هذه الدورة من السيتوبلازم ويعتبر مسلك (EMP) المسلك الرئيسي والأساسي الذي يتحول فيه الجلوكوز أو المركبات الوسيطة إلي بيروفات. ويتضمن هذا المسلك التحولات الداخلية للسكريات ونقل مجاميع الفوسفات والتحول النهائي لمركب واحد سداسي الكربون إلي مركبين ثلاثيا الكربون وهو كذلك مسلك لا هوائي يتكون فيه بعض جزيئات $NADPH_2$, ATP .

ويكون التفاعل في صورته الإجمالية كالتالي

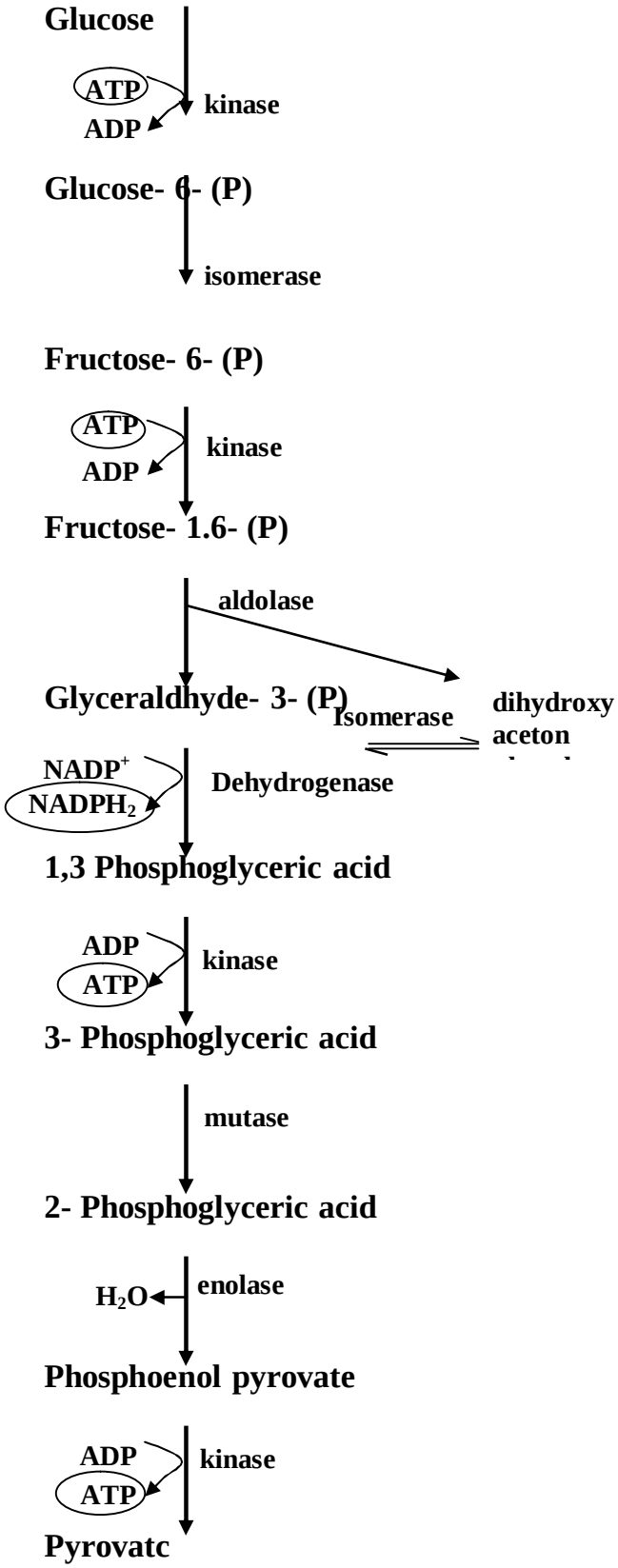
$$\text{Glucose} + 2\ ADP + 2\ Pi + 2\ NADP \longrightarrow 2\ \text{Pyrovate} + 2\ ATP + 2\ NADPH2$$

يلاحظ من دورة الانحلال الجليكولي أن أكسدة جزيء الجلوكوز من خلال التفاعلات السابقة تعتبر غير تامة ولذلك فإن الطاقة الناتجة ضئيلة نسبياً. وتحسب الطاقة في صورة جزيئات $NADPH_2$, ATP

ويمكن حساب الطاقة في دورة الانحلال الجليكوني كالتالي

- **يحتاج جزيء الجلوكوز إلي ٢ جزيء ATP حتى يتحول إلي فركتوز ثنائي الفوسفات.**
- **ينطلق ٢ جزيء ATP الأول عند تحويل 1,3 PGA $\xrightarrow{\text{إلى}}$ 3,PGA والثاني عند تحويل PEP إلي بيروفات وكل منهم يمثل نصف جزيء جلوكوز . وبالتالي فإن الطاقة الناتجة تصبح ٤ جزيئات ATP لكل جزيء جلوكوز.**
- **في مرحلة تحول ٣ - فسفو جلسرالدهيد إلي PGA – 1.3 نتج عنه جزيء واحد $NADPH_2$ أي أن جزيء الجلوكوز ينطلق عنه ٢ جزيء $NADPH_2$.**
- **إجمالي الطاقة الناتجة من خلال دورة الانحلال الجليكولي ٨ جزيئات ATP .**
- **والمخطط التالي يوضح الخطوات المتعاقبة التي تفسر مسلك الانحلال الجليكوني EMP**

دور الانحلال الجليكولى Glycolysis



دورة كــربس (دورة حمض الستريك ، دورة الأحماض ثلاثية الكربوكسيل)
Krebs Cycle (citric acid cycle , Tricarboxylic acid cycle)

لقد عرفنا مما سبق أن عملية تكسر الكربوهيدرات تحت الظروف اللاهوائية تنتهي بإنتاج حمض البيروفيك من خلال مسلك (EMP). فإذا توفر O_2 بدرجة كافية تحدث لحمض البيروفيك عملية أكسدة ونزع مجموعة الكربوكسيل ليعطي acetyl coenzyme A وهذا التفاعل معقد ويحتاج إلي توفر خمس عوامل أساسية حتى يتم وهي:

(١) (TPP) Thiamim pyrophosphate
(٢) أيونات الماغنسيوم.
(٣) NADP
(٤) (CO – A) Coenzyme – A
(٥) حمض الليبويك Lipoic acid

ويعتبر acetyl CO - A هو الوصلة الرابطة بين الانحلال الجليكولي ودورة كربس. وعن طريق دورة كربس ونظام نقل الإليكترون تتم أكسدة البيروفات أكسدة تامة إلي H_2O ، CO_2 أي أن الأكسدة التامة لجزيء الجلوكوز تحدث من خلال مسلك الانحلال الجليكولي ودورة كربس ونظام نقل الإليكترون.

وتفاعلات دورة كربس ونظام نقل الإليكترون يحتاج إلي توفر O_2 وتحدث هذه التفاعلات في الميتوكوندريا ونحصل من خلالها علي ٣٨ جزيء ATP لذلك فإن دورة كربس تكون فعالة جدا في تحرير الطاقة بالمقارنة بالانحلال الجليكولي أو التخمر.

إذن المركب acetyl CO – A والناتج من أكسدة البيروفيك يتم نزع CO_2 وانطلاق طاقة مختزلة $NADPH_2$. يتم استقبال هذا المركب acetyl CO – A بواسطة Oxalacetic acide (OAA) والذي يحتوي علي ٤ ذرات كربون فينتج مركب يحتوي علي ٦ ذرات كربون وبهذا المركب ٣ مجاميع كربوكسيل وهو حمض الستريك. وبالنظر إلي تفاعلات الدورة بالتفصيل يمكن فهم هدم البيروفات في وجود O_2 . وتتم هذه التفاعلات الخاصة بدورة كربس والفسفرة التأكسدية في الميتوكوندريا . وتحتاج تفاعلات هذه الدورة إلي O_2 . من الدورة يتضح انطلاق ٤ جزيئات $NADPH_2$ وجزيء واحد من $FADH_2$ وجزيء واحد من

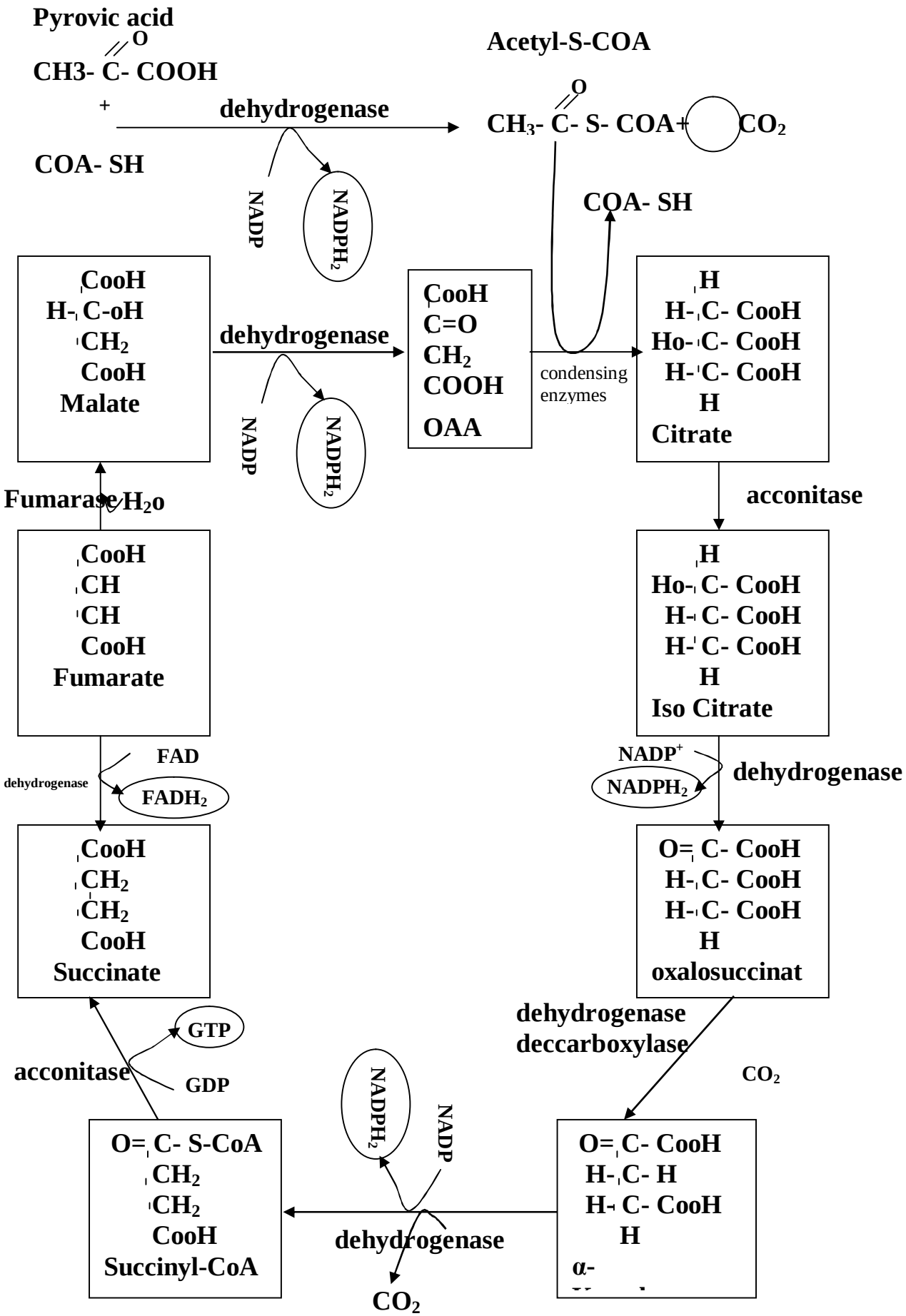
ATP وهذه الطاقة تعادل ١٥ جزيء ATP عند هدم جزيء حمض البيروفيك وهو نصف جزيء جلوكوز . إذن الجلوكوز ينتج عنه ٣٠ جزيء ATP من خلال دورة كربس. وحيث أن الانحلال الجليكولي ينتج عنه طاقة ٨ جزيء ATP فيكون إجمالي الطاقة الناتجة عن هدم جزيء الجلوكوز من خلال مساري الانحلال الجليكوني وكربس حوالي ٣٨ جزيء ATP وهذه الطاقة المختزنة في صورة ATP تستخدمها الخلية في العمليات البيولوجية المختلفة علي مراحل وهذه العمليات هي علي سبيل المثال:

*** إنقسام الخلايا * الامتصاص * حركة البروتوبلازم**

*** انتقال العصارة داخل جسم النبات * الإنتحاءات**

*** عمليات البناء المختلفة في الخلية من بروتوبلازم وبروتين ودهون ..... الخ.**

والمخطط التالي يوضح الخطوات الرئيسية في مسلك (دورة) كربس ومناطق انطلاق جزيئات الطاقة وكذلك انطلاق CO_2


Pyrovic acid
CH3- C- COOH
O
+
COA- SH
dehydrogenase
NADP
NADPH2
Acetyl-S-COA
CH3- C- S- COA
O
+ CO2
COA- SH
CooH
H- C-oH
CH2
CooH
Malate
dehydrogenase
NADP
NADPH2
CooH
C=O
CH2
COOH
OAA
condensing enzymes
H
H- C- CooH
Ho- C- CooH
H- C- CooH
H
Citrate
acconitase
Fumarase/H2o
CooH
CH
CH
CooH
Fumarate
H
Ho- C- CooH
H- C- CooH
H- C- CooH
H
Iso Citrate
FAD
dehydrogenase
FADH2
NADP+
NADPH2
dehydrogenase
CooH
CH2
CH2
CooH
Succinate
O= C- CooH
H- C- CooH
H- C- CooH
H
oxalosuccinat
GTP
acconitase
GDP
dehydrogenase
deccarboxylase
CO2
NADPH2
NADP
O= C- S-CoA
CH2
CH2
CooH
Succinyl-CoA
O= C- CooH
H- C- H
H- C- CooH
H
α-
dehydrogenase
CO2

الدور الذي تلعبه دورة كربس في عمليات البناء في الخلية

- **تساهم دورة كربس في إنتاج الطاقة اللازمة لعمليات البناء المختلفة**
- **المساهمة في بناء الأحماض الأمينية فمثلا يتكون حمض الجلوتاميك من الفاكيتوجلوتاريك ، والاسباراتيك من الأوكسالوخليك.**
- **يدخل acetyl CO-A في التحولات الغذائية للدهون.**
- **حمض الفيوماريك يدخل في التحولات الغذائية للنتروجين.**
- **Succinyl - COA يدخل في التحولات الغذائية للدهون كما يدخل في بناء مركبات البورفيرين والتي يتكون منها الكلوروفيلات – الستيوكروم – بعض الإنزيمات الأخرى.**

ويمكن أن نوضح دور المركبات الوسيطة في تفاعلات التنفس وعلاقتها بالمكونات الخلوية كما في المخطط التالي:

المركبات الوسيطة من تفاعلات التنفس		المكونات الخلوية التى يدخل فيها المركبات الوسيطة
Hexose (P)	⟵	بناء الجدار الخلوى ومكوناته مثل السليلوز الهميسليلوز - الزيلات - الجالاكتات مركبات البكتين - الثيوكلثيرات - الأحماض النووية.
Trios (P)	⟵	الجليسرول : يدخل فى بناء الدهون والليبدات تكوين الأحماض الأمينية: السيرين - السستين - البروتين.
PEP	⟵	الفينولات، ، التيروسين، التربتوفان - الاندول - الانثوسيانين
Pyrovate	⟵	الإيثانول - حمض اللاكتيك - الحمض الأمينى الانين
Acetyl.Co.A	⟵	الكاروتنيويدات - بناء الهرمونات وخاصة السلاسل الجانبية لكل من السيتوكينين - GA - ABA - بناء الكيوتيكل - بناء الدهون - بناء البروتين.
Oxalacetic acid	⟵	تكوين الحمض الأمينى اسبارتيك والذى بدوره يدخل فى تكوين كل من pyrimidines, alkaloids الأحماض النووية والبروتين.
α- Ketoglutaric	⟵	تكوين الحمض الأمينى جلوتاميك
Succinyl-CoA	⟵	الكلوروفيللات ــ السيتوكرومات ــ الفيتوكروم ــ الفيكوسيانين

نــظام نــقل الإلــكترون والــفسفرة
Electron transport system and Phosphorylation

يوجد ارتباط وثيق بين النواتج المختزلة لدورة كربس مع نظام نقل الإلكترون ومن هذا الارتباط يعاد أكسدة المرافقات الإنزيمية المختزلة مثل $FADH_2$, $NADPH_2$ وتستغل الطاقة المتحررة عن هذه الأكسدة في تخليق جزيئات ATP من خلال نظام نقل الإليكترون مع استعمال O_2 كمستقبل نهائي وتسمي هذه العملية بالفسفرة التأكسدية Oxidtive phosphorylation ومن الجدير بالذكر أن هذه العملية تحدث في الميتوكوندريا وخاصة علي النموات المقبضية المتواجدة علي الكرستيا . ويمكن عرض الفسفرة التأكسدية بالطريقة المبسطة التالية :

$$NADPH \xrightarrow[ATP]{} FADH_2 \xrightarrow[ATP]{} Quinon \xrightarrow[ATP]{} cyt\ b\ ,\ c \xrightarrow{} cyt\ .f \xrightarrow{1/2\ O_2} H_2O$$

التنفس اللاهوائي Anaerobic Respiration

البيروفات الناتج من دورة الانحلال الجليكوني وفي ظروف لا هوائية أي في غياب O_2 ينتج عنه مركبات مثل كحول الإيثايل وتعرف هذه العملية بالتخمر الكحولي وقد وينتج عنه حمض اللاكتيك وتسمي في هذه الحالة بالتخمر اللاكتيكي، وقد يتكون بعض المركبات الوسيطية الأخرى مثل الاسيتالدهيد وحمض الخليك.

* التخمر الكحولي Alcohol Fermentation

تحدث هذه العملية في النباتات الراقية تحت ظروف خاصة حيث يتجزأ الجلوكوز من خلال الانحلال الجليكوني إلي البيروفات والذي بدوره يتحول إلي كحول تحت ظروف لا هوائية.

$$Pyrovate \longrightarrow acetaldehyde + CO_2$$

$$Acetaldehyde + NADPH_2 \longrightarrow Ethanol + NADP$$

يلاحظ استهلاك جزيء $NADPH_2$ في هذا التفاعل لكل جزيء بروفات وهي تعادل ٣ جزيئات ATP أي أنه يستهلك ٣ جزيئات ATP لكل جزيء جلوكوز. وعندما يتم احتراق الجلوكوز من خلال دورة الانحلال الجليكولي والتخمر الكحولي أي في ظروف لا هوائية فيكون مجموع الطاقة الناتجة هي: ٨ جزيئات ATP من الانحلال الجليكولي واستهلاك ٦ جزيئات ATP في التخمر الكحولي فتكون المحصلة ٢ جزيء ATP

* التخمر اللاكتيكي Lactic Fermentation

هذا النوع من التخمر بواسطة بعض أنواع البكتيريا والطحالب وفي أنسجة العضلات في الحيوان.

$$\text{Pyrovate} + NADPH_2 \xrightarrow{\text{dehydrogenase}} CH_3\text{-}CHOH\text{-}COOH + NADP$$

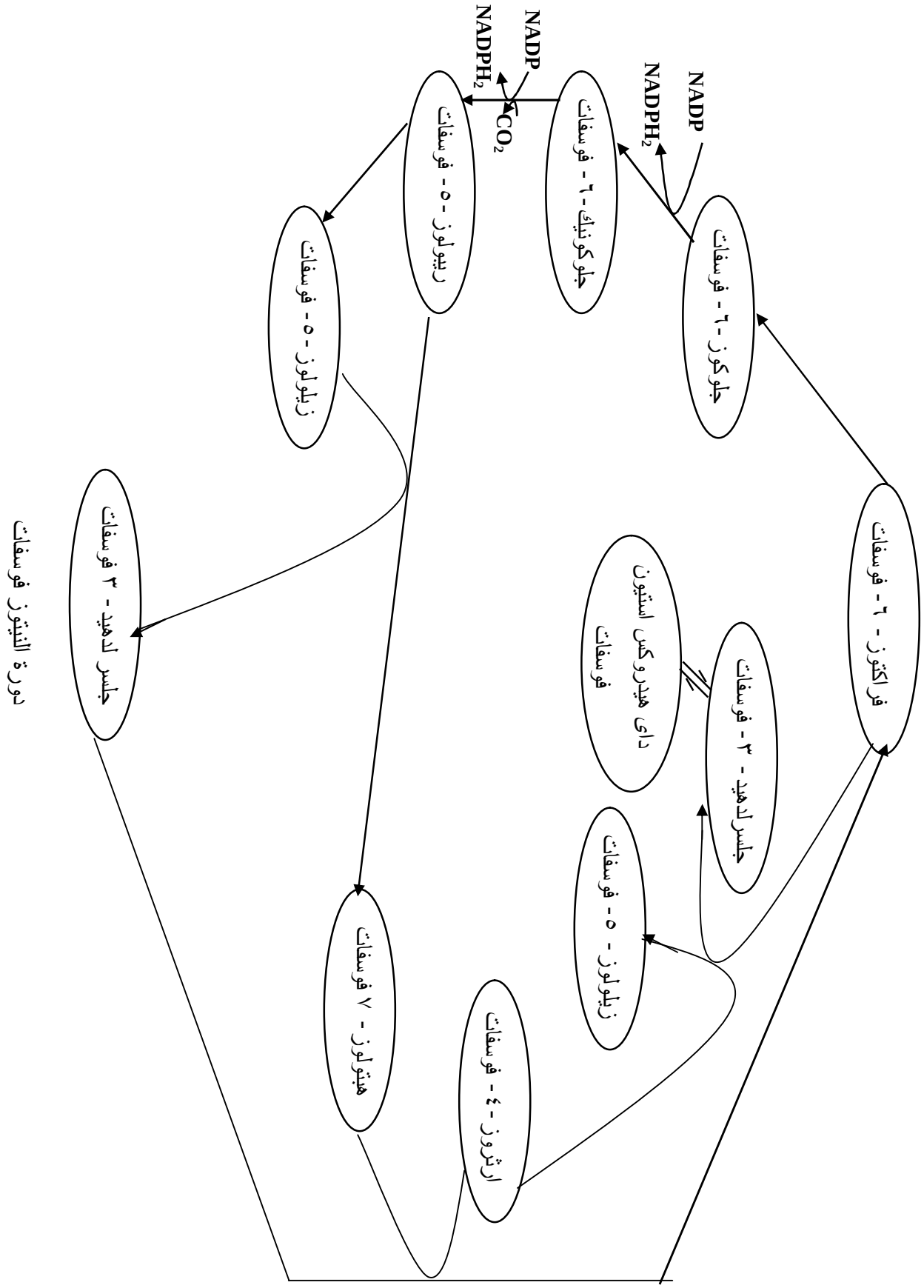
يلاحظ عدم انطلاق CO_2 في هذا النوع من التخمر.

* دورة البنتوزفوسفات Pentose phosphate pathyway

تتم هذه الدورة في النباتات الراقية والدنيئة وكذلك في النباتات اللاهوائية ولا يدخل O_2 في هذه الدورة ولكنها تتم في وجوده. وتتم عملية أكسدة الجلوكوز عن طريق نزع الهيدروجين وكذلك من المركبات الوسيطة وانتقال هذا الهيدروجين إلي المرافق الإنزيمي NADP . وفي النهاية ينطلق CO_2 وطاقة مختزلة في صورة $NADPH_2$ وتتم تفاعلات هذه الدورة في سيتوبلازم الخلية حيث تتواجد الإنزيمات الخاصة بها والمعادلة الإجمالية لهذه الدورة هي:

$$6\text{Glucose 6P} + 12\ NADP \longrightarrow 6\ CO_2 + 12\ NADPH_2$$

ولمعرفة الخطوات العديدة لهذه الدورة وكذلك المركبات الوسيطة يمكن الرجوع إلي الرسم التفصيلي التالي:


دورة البنتوز فوسفات
جلوكوز -٦- فوسفات
جلوكونيك -٦- فوسفات
ريبولوز -٥- فوسفات
زيلولوز -٥- فوسفات
جلسر لدهيد - ٣ فوسفات
فراكتوز - ٦ - فوسفات
داى هيدروكس استيون فوسفات
جلسر لدهيد - ٣ - فوسفات
زيلولوز - ٥ - فوسفات
ارثروز -٤- فوسفات
هبتولوز - ٧ فوسفات
NADP
NADPH2
NADP
NADPH2
CO2

هــدم الــدهون Degradation of Fats

عند استخدام الدهون كمادة للحصول علي الطاقة من خلال عملية التنفس يلاحظ بوضوح وخاصــة البــذور الزيتية وأثناء الإنبات حدوث تحلل إنزيمي أولا للدهون وفي وجود الماء إلي أحمض دهنيه وجلسرول

$$\text{Lipids} \xrightarrow{\text{lipase}} \text{Fatty acids + glycerol}$$

الجليسرول

قد يتحول إلي داي هيدروكسي اسيتون فوسفات أو بيروفات أو يدخل في دورة الانحلال الجليكولي.

*** الأحماض الدهنية: يتم هدم الأحماض الدهنية من خلال B- oxidation إلي acetyl co-A والتي تــدخل بدورها في دورة كربس للحصول علي الطاقة وتحدث هذه الخطوات في الميتوكوندريا.**

*** قد يتم هدم الأحماض الدهنية وخاصة في الفلقات أثناء الإنبات أو في الأوراق الصغيرة للنباتات من خلال α - oxidation حيث يتم نزع مجموعة الكربوكسيل في كل مرة وانطلاق CO_2 وهذا النوع مــن الأكســدة أقل محصول الطاقة عن B - oxidation**

الأكسدة فى الوضع الفا للأحماض الدهنية α- oxidation

هذا النوع من الأكسدة أقل أهمية من حيث إنتاج الطاقة ويعتمد هذا التفاعــل أساســاً علــى نشــاط إنــزيم البيروكسيدير Peroxidase فى وجود H_2O_2 حيث يتم التخلص من ذرة الكربون الطرفية مع كل تفاعل.

$$\text{R-CH}_2\text{- CH}_2\text{ CooH} \xrightarrow[\text{Peroxidas}]{\text{H}_2\text{ O}_2} \text{R-CH}_2\text{. CHO+ Co}_2\text{+ 3H}_2\text{o}$$

$$\text{R-CH}_2\text{ C(=O)-H} \xrightarrow[\text{NADP}]{\text{H}_2\text{ O}_2} \text{R. CH}_2\text{- CooH+ NADPH}_2$$

aldehyde

يلاحظ انطلاق جزئ طاقة مختزلة $NADPH_2$ لكل جزئ Co_2 منطلق فى هذا التفاعل. ويكثر حدوث هــذا التفاعل فى أوراق النباتات الحديثة. عند هدم جزئ من حمض البالمتيك ١٦ ذرة كربون ينتج ١٥ جــزئ

NADPH2 ويكون إجمالى الطاقة الناتجــة = $NADPH_2$ 15 × 3 = ATP45 وعلـــى اعتبــار أن

الطاقة المخزنة فى جزئ ATP= ٧ كيلــو كالورى وأن الطاقــة الكلية المخزنة فــى حمــض البالمتيــك = ٢٣٠٠ كيلو كالورى فتصبح كفــاءة هدم حمض البالمتيك من خلال المسار α- oxidation

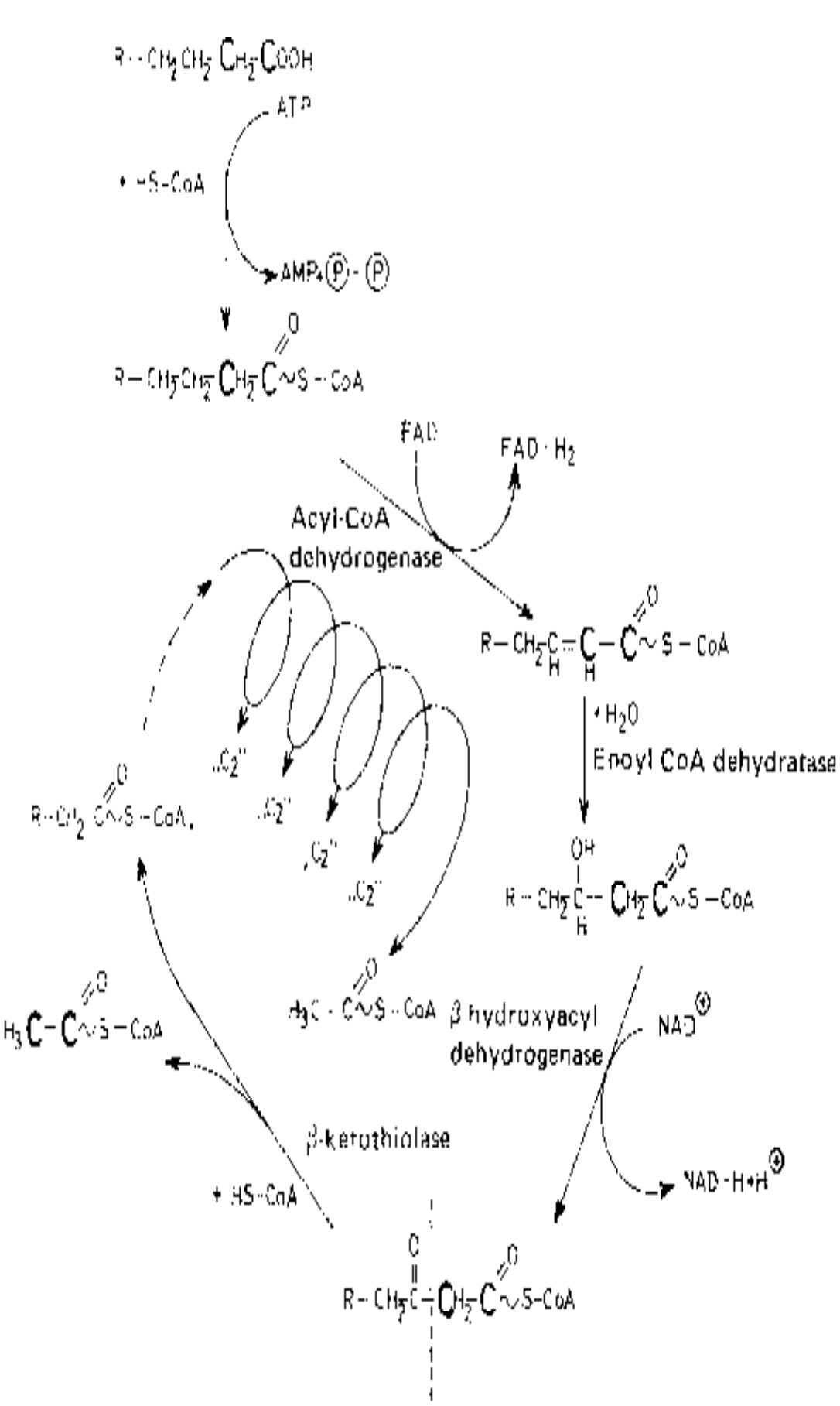
$$\% ١٤ = \frac{\text{٤٥ جزئ ATP} \times \text{٧ كيلو كالورى لكل جزئ ATP}}{\text{الطاقة الكلية المخزنة فى حمض البالمتيك = ٢٣٠٠ كيلو}}$$

الأكسدة فى الوضع بيتا للأحماض الدهنية وانطلاق الطاقة

β- oxidation of fatlyoxids and enesgy production

يتم هدم جزئيات الأحماض الدهنية فى الميتوكوندريا. ويبدأ المسار بتنشيط الحمض الدهنى لتكوين معقد من الحمض الدهنى والمرافق لانزيمى COA فى وجود جزئ الطاقة ATP وإنزيم الكينيز. ويتبــع ذلــك عــدة عمليات وخطوات تنتهى بانشطار ذرتين كربون فى صورة المركــب acetyl- CoA والــذى ينشــطر عــن الحمض الدهنى ثم تتكرر هذه الدورة عدة مرات حيث يتم تحويل الحمض الدهنى كله إلى جزئيات من ذرتين كربون في صورة acetyl. CoA.

أما عن خطوات الأكسدة فى الوضع بيتا فيمكن تلخيصها فى الآتى:



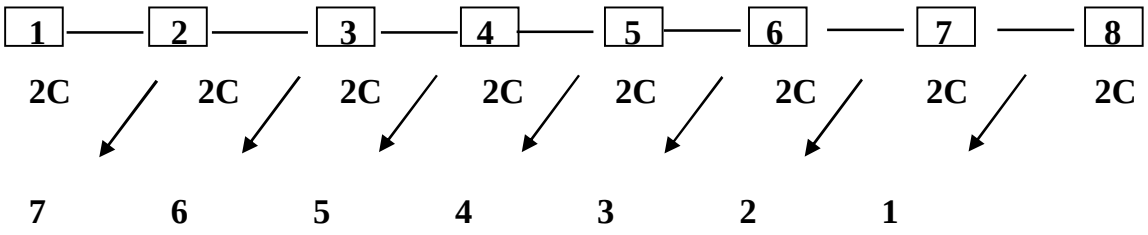
Reaction sequence in β-oxidation of a fatty acid

يتضح من الخطوات استهلاك جزيء ATP لتنشيط التفاعل الكلى وينتج طاقة عبارة عن جزئى واحد $FADH_2$ وجزئ واحد $NADPH_2$ لكل جزئى acetyl CoA منتج. وبذلك ينتج عدد ٥ خمسة جزئيات ATP لكل جزئى منتج من acetyl CoA.

وعند اتخاذ حمض البالمتيك كمثال لهدم الأحماض الدهنية من خلال المسار β-oxidation يتضح الآتى:

"Degradation Palmitic acid"

من المعروف أن حمض البالمتيك يحتوى على ١٦ ذرة كربون. فيتم تكسير حمض البالمتيك وهدمه من خلال β-oxidation وذلك على مراحل وفى كل مرحلة ينتج جزئ acetyl CoA يحتوى على 2C ذرة كربون وفى النهاية ينتج ٨ جزيئات acetyl- CoA.



* عدد مرات الانشطار

من المعروف أنه عند انطلاق أو انشطار جزئ acetyl. CoA تنطلق طاقة مكونة من $FADH_2$ + $NADPH_2$ = ٥ جزئيات ATP. وأنه لكى يتم هدم جزئ واحد من البالمتيك فإن ذلك يتم على مراحل فى كل مرحلة ينتج جزئى acetyl-CoA ويصحب ذلك انطلاق طاقة.

٧ مراحل هدم أو انشطار × ٥ جزئيات طاقة ناتجة لكل جزئ acetyl CoA = ٣٥ جزئ ATP.

ومن المعروف أيضاً أنه سبق استهلاك جزئ واحد ATP لتنشيط التفاعل فى بدايته. إذن محصلة الطاقة الناتجة لهدم حمض البالمتيك إلى ٨ جزئيات acetyl CoA = ٣٥ جزئ ATP - ATP مستهلك = ٣٤ جزئ ATP.

ومن دورة كربس يتضح أن هدم جزئ واحد من acetyl CoA بصورة كاملة إلى Co_2، H_2o فإنه ينتج طاقة مقدارها ١٢ جزئ ATP. وعند هدم ٨ جزئيات acetyl CoA والمنشطرة من حمض البالمتيك وعند هدمها من خلال دورة كربس فإنه ينتج طاقة مقدارها= ٨ جزئيات acetyl CoA × ١٢ جزئ ATP لكل جزئ acetyl CoA= ٩٦ جزئ ATP.

إذن إجمالى الطاقة الناتجة من هدم ١ مول من حمض البالمتيك من خلال دورة كربس = ٣٤ ATP (فى مرحلة إنتاج وانشطار acetyl CoA) + ٩٦ ATP (من خلال دورة كربس) = ١٣٠ جزئى ATP.

ومن المعروف أن الطاقة الكلية المخزنة فى البالمتيك عند انطلاقها تحت الظروف القياسية يكون مقدارها ٢٣٠٠ كيلو كالورى.

إذاً كفاءة هدم واحد مول من حمض البالميتك من خلال β- oxidation وكذلك دورة كربس

$$= \frac{\text{١٣٠ جزئ ATP} \times \text{٧ كيلو كالورى}}{\text{٢٣٠٠ كيلو كالورى}} \times ١٠٠ = ٤٠\%$$

ومكان حدوث β- oxidation: بعض العلماء أكد أن خطوات الأكسدة فى الوضع بيتا يتم فى جسيمات glyoxysomes فى حالة إنبات بذور الخروج. كما أكد البعض الآخر حدوثها فى Mitochondria فى حالة إنبات بذور الفول السودانى.

التنفس الضوئى Photorespiratrion

التنفس العادى يحدث فى الميتوكوندريا سواء فى الضوء أو الظلام وفى جميع أنواع الخلايا الحية. أما التنفس الضوئى فلا يحدث إلا فى الضوء أثناء عملية البناء الضوئى وفى حالة زيادة تركيز O_2 ولا ينتج عنه انطلاق طاقة ولكن يحدث استهلاك O_2 وانطلاق Co_2. والتنفس الضوئى يختلف عن التنفس الظلامى فى عدة أمور منها:

(١) لا يحدث للتنفس الضوئى تثبيط بواسطة مثبطات التنفس الظلامى والذى يتم فى الميتوكوندريا.

(٢) لا يصاحب التنفس الضوئى انطلاق جزئيات طاقة.

(٣) للتنفس الضوئى علاقة بتنظيم وتوازن الطاقة المختزلة الناتجة من عملية البناء الضوئى حيث يتم استهلاك بعضها وأكسدتها بواسطة O_2 الناتج من التنفس الضوئى.

(٤) يحدث التنفس الضوئى فى جسيمات peroxysomes (بالتعاوون مع الميتوكوندريا والبلاستيدات) وهى منتشرة فى السيتوبلازم أما التنفس الظلامى يحدث فى الميتوكوندريا فقط.

(٥) التركيز العالى من Co_2 يثبط التنفس الضوئى.

(٦) يحدث التنفس الضوئى بدرجة عالية فى النباتات ثلاثية الكربون بينما قد ينعدم فى النباتات رباعية الكربون وذلك لتوفر Co_2 بتركيز مرتفع فى الكلوربلاست.

(٧) يقلل التنفس الضوئى كفاءة عملية البناء الضوئى بنسبة ٥٠ - ٨٠% فى C_3.

1- high Co2		**1- Low Co2**
2- Low O2		**2- High O2**
3- Low temperature		**3- High temperature**
PGA ←	**RUBP**	→ **Phosphoglycolate**
4- Low irradiance		**4- High irradiance**

السكر الخماسى والمستقبل

Co2 فى البناء الضوئى

فى نباتات C3

Photosynthesis ⟷ **Photorespiration**

يتبادر إلى الذهن سؤال مهم لماذا التركيزات المرتفعة من O_2 مثبطة للبناء الضوئى فى النباتات C_3.

(١) أن O_2 ينافس CO_2 على الاتحاد بالهيدروجين (فى مركبات الطاقة) المختزلة. فبدلا من أن يتم اختزال جزئيات CO_2 إلى كربوهيدرات يحدث أن يختزل O_2 إلى ماء.

(٢) أن O_2 ينافس Co_2 على الاتحاد بالمستقبل RUBP فبدلاً من استقبال السكر RUBP للغاز Co_2 وتكوين PGA من خلال عملية البناء الضوئى نجد أن O_2 يؤكسد RUBP إلى phosphoglycolic وبذلك يقل معدل تثبيت Co_2.