**سلسلة نقل الإلكترونات**

Electron transport system

**حامل الطاقة Adenosine Triphosphate (ATP)**

يعتبر جزيءATP هو حامل الطاقة Energy currency في الخلية . ففي كل الخلايا الحية تختزن الطاقة مؤقتاً في مركب كيميائي يطلق عليه أدينوسين ثلاثي الفوسفات ويرمز إليه بالإنجليزية بالأحرف الكبيرة من بدايات اسمه وهي ATP .

وجزيء ATP عبارة عن نيو كليوتيد Nuclotide يتكون من ثلاثة أجزاء رئيسية وهي :

الأدينين Adenine وهو قاعدة نيتروجينية من مجموعة البيورين .

الريوز Ribose وهو سكر خماسي .

1. ثلاثة مجموعات فوسفاتية غير عضوية وهي عبارة عن ثلاث ذرات فوسفور محاطة بذرات الأكسجين .

ويجد الإشارة أن مجموعات الفوسفات ترتبط كيميائياً بنهاية الجزيء في شكل متعاقب مثل ثلاث عربات تجرهم قاطرة فيمكن أن ينفصلوا واحدة بعد الأخـرى عنها ويمكن أن يتصلوا بها واحدة بعد الأخرى أيضاً .

والروابط التي تربط مجموعات الفوسفات في جزيء ATP يمكن كسرها عن طريق التحليل المائي , وهذا راجع لأن الثلاثة مجموعات فوسفات تنفر من بعضها البعض لأنها شحنة سالبة عند تركيز معين لأيون الهيدروجين وهو pH الخلية ويعزي إلى هذه الروابط هي روابط غنية بالطاقة أو روابط عالية الطاقة

وعندما تنفصل مجموعة فوسفات طرفية من جزيء ATP فإنه يتحول إلى أدنيوسين ثنائي الفوسفات (ADP) Adenosine diphosphate ولو أن مجموعة الفوسفات هذه لم تنتقل إلى جزيء آخر فهي تفرز كفوسفات غير عضوي (pi) ويكون التفاعل في هذه الحالة منتجاً للطاقة كما في المعادلة التالية : ADP+Pi+7.6kcal/mole ATP+H2O

والطاقة الحرة المفرزة في التفاعل السابق يمكن أن تفقد كحرارة . أما في التفاعلات متزاوجة الطاقة فإن جزء من هذه الطاقة ينتقل ليدفع تفاعلاً مختزناً للطاقة مثل تفاعل تكوين السكروز من الجلوكوز والفركتوز كما في المعادلة التالية :

Glucose + Fructose + AT ADP +Pi + Sucrose + 1,2 kcal/mole

مع ملاحظة أن المعادلة السابقة تتم على خطوتين الأولى يمنح فيها حامل الطاقة ATP مجموعة فوسفات لترتبط بالجلوكوز ويسمى هذا التفاعل بتفاعل الفسفرة Phosphorylation reaction وهو تفاعل تنتقل فيه مجموعة الفوسفات إلى مركب آخر كما هو موضح بالمعادلة التالية :

Glucose + ATP Glucose–P+ ADP

والثانية يتم فيها اتحاد الجلوكوز مع الفركتوز وتحرير مجموعة الفوسفات في صورة فوسفور غير عضوي .

Glucose–P + P+ Fructose Sucrose + Pi

وعملية الفسفرة Phosphorylation وهي انتقال مجموعة الفوسفات من حامل الطاقة ATP إلى بعض المركبات الأخرى يمكن أن تتزاوج مع عملية أخرى مختزنة للطاقة داخل الخلية وذلك بمساعدة بعض الإنزيمات المتخصصة , بالإضافة إلى ذلك فالطاقة يتم الاحتياج إليها لإضافة مجموعة فوسفات إلى الأدينوسين أحادي الفوسفات AMP لتحويله إلى أدينوسين ثنائي الفوسفات ADP أو لتحويل الأدينوسين ثنائي الفوسفات إلى أدينوسين ثلاثي الفوسفات ATP .

**نقل الطاقة في الخلية يتم بواسطة تفاعلات الأكسدة والاختزال :**

إن الخلية يمكنها نقل الطاقة عن طريق نقل مجموعة فوسفات من حامل الطاقةATP , ويمكن أيضاً نقل الطاقة عن طريق نقل الإلكترونات , وكما نعلم أن الأكسدة Oxidatino هي عملية كيميائية تفقد فيها المادة الألكترونات , بينما الاختزال Reduction هي عملية متزاوجة معها تكتسب فيها المادة الإلكترونات . ولأن الإلكترونات تفرز أثناء تفاعلات الأكسدة لذلك لا يمكن أن تنفرد عمليات الأكسدة ببقائها في الخلية بمفردها , ولكن كل تفاعلات الأكسدة في الخلية يصاحبها تفاعلات اختزال والتي فيها يتم اكتساب الإلكترون عن طريق ذرة أو أيون أو جزيء .

ولأن تفاعلات الأكسدة والاختزال متزامنة مع بعضها لذلك يطلق عليها دائماً Redox reactions والمادة التي تصبح مؤكسدة تفقد (تعطي) طاقة بإفرازها للإلكترون , أما المادة التي أصبحت مختزلة فإنها تكتسب الطاقة باكتسابها للإلكترونات . وهناك عديد من تفاعلات الأكسدة والاختزال تأخذ مكانها في الخلية بانتقال الإلكترونات من مركب إلى مركب آخر وهذه الإلكترونات المنتقلة والتي تكون مساوية للطاقة المنتقلة لازمة وضرورية كجزء من عملية التنفس الخلوي وعملية البناء الضوئي وعديد من التفاعلات الكيميائية الأخرى .

**ناقلات الإلكترون** Electron carriers :

ليس من السهل طبعاً إزالة الإلكترون , أو عدد من الإلكترونات من الروابط التساهمية في المركبات ولكن السهل طبعاً هو إزالة كل الذرة ولهذا السبب فتفاعلات الأكسدة والاختزال البيولوجية عادة تتضمن نقل ذرة الهيدروجين أكثر من نقل الإلكترون نفسه . (لاحظ أن ذرة الهيدروجين تحتوي على الإلكترون وبروتون ولذلك فتفاعلات الأكسدة والاختزال تتضمن فقط ذرات الهيدروجين لكنها لا تتضمن أيونات الهيدروجين لأن أيونات الهيدروجين لا تحتوي على الإلكترونات وذلك فهي لا تدخل في تفاعلات الأكسدة والاختزال) .

عند نزع الإلكترون (سواء منفرداً أو كجزء من ذرة الهيدروجين) من مركب عضوي فإنه يأخذ معه بعضاً من الطاقة المخزنة في المركب العضوي الذي نزع منه هذا الإلكترون والطاقة المأخوذة معه ينتقلان إلى جزيء مستقبل للإلكترون Electron acceptor molecule وهذا الإلكترون يفقد طاقته الحرة كلما انتقل من مستقبل Acceptor إلى مستقبل آخر .

ومن مستقبلات ذرة الهيدروجين الشائعة ما يلي :

1. **ثنائي نيو كليوتايد أمين الأدينين والنيكونين** Nicotinamide adenine dinucleotid (NAD)

يرمز له بالرمز NAD+ وهو من الفيتامينات التي تعمل كمساعدات إنزيمية Coenzymes وهو أحد أفراد مجموعة فيتامين B-complex وعندما يختزل هذا الجزيء فهو يختزن بصفة مؤقتة كمية كبيرة من الطاقة الحرة كما في المعادلة التالية :

YH2 + NAD+ Y + NADH + H+

مختزل مؤكسد

لاحظ NAD+ يصبح مختزلاً بعد إتحاده بذرة الهيدروجين . و NAD+ هو عبارة عن أيون له شحنة موجبة مقدارها +1وعندما يتحد بإثنين إلكترون وواحد بروتون تتعادل شحنته ويتكون المركب المختزل وهو NADH + H ( أن الطريقة الصحيحة لكتابة الصورة المختزلة من NAD+ هي NADH +H إلا أن كثيراً من المراجع دأبت للتبسيط والتسهيل على كتابة الصورة المختزلة بالرموز NADH2 فقط ) .

1. **فوسفات ثنائي نيو كليوتايد أمي الأدينين والنيكوتين**

Nicotinamide dinucleotid Phosphate (NADP)

وهو يتشابه كيميائياً مع مستقبل NAD+ ويزداد عنه في التركيب الكيميائي Nicotinamide , بالفوسفات ويعمل أيضاً كمعاون إنزيمي Coenzyme والفوسفات هنا لا يشترك مباشرة في عملية نقل الطاقة . والصورة المختزلة من NADP يرمز لها بالرمز H NADP ولكن إلكترونات NADPH تستخدم بطريقة مباشرة بدرجة كبيرة لتوفر الطاقة لتفاعلات معينة وضرورية في عملية البناء الضوئي (Photosynthesis) .

1. ثنائي نيو كليوتايد الأدينين والفلافين FAD) Flavin adenine dinucleotide)

هي أحد أفراد فيتامين B-complex ويعمل كمعادن إنزيمي Coenzyme وهو عبارة عن نيوكليوتيد يكتسب ذرات الهيدروجين وإلكتروناتها والصورة المختزلة له ويرمز لها بالرمز FADH2

1. السيتو كرومات Cytochromes

هي عبارة عن بروتينات تحتوي على الحديد ومكون الحديد فيها يكتسب الإلكترونات من ذرات الهيدروجين وبعد ذلك ينقل هذه الإلكترونات إلى بعض المركبات الأخرى مثل NADP+ و NAD+ .

**سلسة نقل الإلكترونات :** Electron transport system

إن هدم جزيء واحد من سكر الجلوكوز في ثلاثة مراحل هي عملية التحلل السكري وأكسدة حمض البيروفيك ودوره حمض الستريك فإن حصيلته من الجزيئات عالية الطاقة الناتجة يمكن تلخيصها في الجدول التالي :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **حصيلة الجزيئات ذات الطاقة العالية** | **الفسفرة على مستوى مادة التفاعل** | **الأكسدة** |
| التحلل السكري | ATP2 | 2 NADH |
| أكسدة حمض البيروفيك |  | 2 NADH |
| دورة حمض الستريك | ATP2 | 2- FADH2 6NADH |
| المجموع | ATP4 | 2 FADH2 10 NADH |

لقد نتج عن عملية التحلل السكري ودورة حمض الستريك تكوين 4 جزيئات عالية الطاقة من جزيئات الــ ATP أما تفاعلات الأكسدة المنتجة للإلكترونات كانت الحصيلة في 3 مراحل هي 10 جزيئات عالية الطاقة من حاملات الإلكترونات أو جزيئات الــ NADH وجزيئين من حاملات الإلكترونات أو جزيئات الـــ FADH2 التي تكونت في دورة حامض الستريك .

عرفنا أن جزاءً من الطاقة التي تحرت خلال التفاعلات الكيميائية التي مر فيها جزيء السكر استغلت في تكوين جزيئات عالية الطاقة على شكل جزيئات ATP من جزيئات ADP ومجموعات الفوسفات اللاعضوية(pi).

لكن معظم الطاقة المتحررة تبقى في الإلكترونات المتروعة من الروابط الموجودة بين ذرات الكربون أو ذرات الكربون والهيدروجين وهذه الإلكترونات عالية الطاقة تحمل من قبل جزيئات حاملة للإلكترونات عالية الطاقة جزيئات NADH وجزيئات FADH2 .

تتم الاستفادة من طاقة الإلكترونات العالية المحمولة من قبل جزيئات NADH وجزيئات FADH2 عن طريق تمرير ونقل هذه الطاقة في تفاعلات متتابعة وبمساعدة العديد من حاملات الإلكترونات بحيث تقل الطاقة بالتدريج وتعرف هذه العملية بسلسلة نقل الإلكترونات Electron transport chain .

الطاقة المتحررة خلال عملية نقل تلك الإلكترونات عالية الطاقة تستغل في عملية تكوين جزيئات عالية الطاقة من جزيئات ATP .

جزيئات NADH وجزيئات FADH2 تمرر إلكتروناتها إلى سلسلة من حاملات الإلكترونات من جزيء NADH الذي يمرر زوجاً من الإلكترونات إلى حامل الإلكترونات المعروف باسم الفلافين أحادي النيو كليوتيد Flavin (FMA) mononucleotide الذي بدوره يمررها إلى حامل آخر يعرف باسم المرافق الإنزيم Q .

Coenzyme Q (Co Q) ثم تستمر عملية نقل الإلكترونات المتدرجة عبر عدد من مركبات تعرف بالسيتو كرومات Cytochromes تبدأ عملية النقل الإلكتروني السيتو كرومي من السيتو كروم ب (Cyt.b) Cytochrome b إلى السيتو كروم ج Cytochrome c (Cyt.c) ثم من السيتو كروم أ Cytochome a (Cyt.a) إلى السيتو كروم 3أ Cytochome A3 (Cyt.a3) ومنه الأكسجين كمستقبل نهائي للإلكترونيات .

إن عملية النقل الإلكتروني تبدأ من جزيء FADH2 من المرافق الإنزيمي Q , وليس من مركب الفلافين وحيد النيوكليوتيد (FMA) . وأن كل جزيء من جزيئات NADH الحامل للإلكترونات ينتج عنها في نهاية سلسلة النقل الإلكتروني ثلاث جزيئات من جزيئات ATP 3 . بينما الجزيء الواحد من جزيئات FADH2 الحامل للإلكترونات ينتج عنه جزيئين فقط من جزيئات ATP2 عالية الطاقة .

إن الجزيء الواحد من جزيئات NADH الموجودة في السيتوبلازم ينتج عنها جزيئين فقط من جزيئات ATP العالية الطاقة لأن جزء من الطاقة يصرف نظير انتقاله من السيتوبلازم إلى الجسم السبحي .

إذاً يمكن حساب عدد الجزيئات التي تكونت نتيجة لأكسدة جزيئات NADH وجزيئات FADH2 خلال عملية النقل الإلكتروني المتسلسل التي سبق ذكرها من المعادلة التالية :

10NADH + 10H+ +2FADH2 +32ATP+32Pi+6O2

10NAD+ + 2FAD++ +32ATP + 42H2O

وللحصول على العدد الكلي للجزيئات ATP عالية الطاقة التي يتم الحصول عليها من أكسدة جزيء واحد من سكر الجلوكوز يمكن تلخيصها في المعادلة النهائية التالية :

C6H12O6+6O2+36ADP+36Pi 6CO2+36ATP+42H2O

أما كيفية حساب تلك الجزيئات عالية الطاقة من ATP التي تم الحصول عليها من أكسدة جزيء واحد من سكر الجلوكوز يمكن تلخيصها في الجدول التالي :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **حصيلة الجزيئات ذات الطاقة العالية** | **الفسفرة على مستوى مادة التفاعل** | **الأكسدة** |
| التحلل السكري | ATP2 | 2 NADH  \*4 ATP |
| أكسدة حمض البيروفيك |  | 2 NADH  6 ATP |
| دورة حمض الستريك | ATP2 | 2- FADH2 6NADH  4ATP 18ATP |

**بناء الكربوهيدرات** Synthesis of carbohydrates

أن الخطوة الأولى في مثل هذه العملية البنائية : هي اختزال حمض فوسفات الجليسريك في وجود NADPH و ATP إلى جليسر الدهيد –3– فوسفات , وبتحول هذا الأخير إلى الشبيه الكيتوني (3-فوسفات ثنائي هيدروكسي الأسيتون) ويتكاثف الشبيهين معاً وفي وجود إنزيم الدوليز , يتكون الفركتوز 1, 6 ثنائي الفوسفات . ثم يتحول الفركتوز 1, 6 ثنائي الفوسفات إلى فركتوز –6– فوسفات عن طريق تحلله مائياً بفعل إنزيم هكسو ثنائي فوسفاتيز . ومن فركتوز –6– فوسفات , يمكن أن يتكون الجلوكوز , أو السكروز , أو النشا ويلاحظ أن الجلوكوز الحر , يتكون بفعل إنزيم فوسفاتيز آخر , يحفز التحلل المائي للجلوكوز –6– فوسفات .

أيض الدهون

الدهون تتكون أساساً من الكربون والهيدروجين والقليل من الأكسجين بالمقارنة بالكربوهيدرات ، وهي لا تذوب في الماء ولكنها تذوب في المذيبات العضوية والمكونات الأساسية هي :

1- الجليسرول Glycerol وهو كحول ثلاثي مجموعة الهيدروكسيل OH .

2- الأحماض الدهنية Fatty acids : ويتكون كل منها من سلسلة من ذرات الكربون تبدأ بالعدد ثمانية ثم تزيد زوجياً .

ومن هذه الدهون ما هو صلب ومنها ما هو صلب ومنها ما هو سائل عن درجة حرارة الغرفة ، والفرق يكمن في الروابط في الأحماض الدهنية ، فإذا ما كان بعضها غير مشبع كون دهوناً سائلة ( زيوت Oils) وإذا ما كانت كلها مشبعة تكون دهوناً متصلبة ( شحوم Fats) والتحولات الأيضية تندرج تحت البناء Anabolism ، والهدم Catabolism .

التحولات الأيضية للدهون :

تحتوي الخلايا البكتيرية على دهون ( عبارة عن أحماض دهنية ، وجليسرول ) كما تحتوي أيضاً على شموع وهي عبارة عن الإسترات الكحولية الوحيدة لهذه الأحماض mono alcohllic ، كما أنها تحتوي أيضاً على دهون أكثر تعقيداً وهي الدهون الفوسفاتية phospholipids .

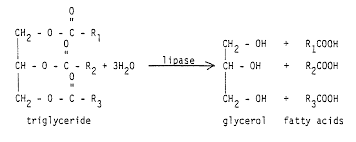
تحتوي خلايا البكتيريا على نسبة معينة من الدهون تتراوح بين 0.5 – 5% من وزنها الجاف ، والبكتيريا Mycobacterium تحتوي خلاياها على نسبه مرتفعة من الدهون ، أما خلايا الفطريات والخمائر فيبدو أنها تحتوي على نسبة أكبر من الدهون تتراوح بين 10 – 25% وعموماً فإن نسبة الدهون تختلف في الخلايا باختلاف الظروف البيئية .

هدم الدهون fats Catabolism :

يبدأ تكسير الدهون بعملية تحليل Hydrolysis لها بواسطة إنزيم glycerol ester hydrolase المعروف بإنزيم الليبيز Lipase موجود في سيتوبلازم الخلية ويكون غير شائع الوجود في البكتيريا ، ولكنه منتشر انتشاراً واسعاً بين الفطريات .

يعمل إنزيم الليبيز على تفكيك الروابط الجليسريدية فتتحرر الأحماض الدهنية والجليسرول .

وتعجل أيونات الكالسيوم أتمام التحلل المائي في الدهون المتعادلة ( الجليسريدات ) .

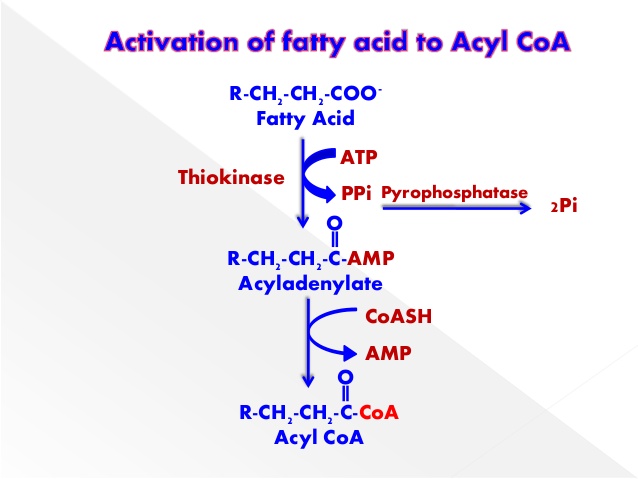


أكسدة الأحماض الدهنية Oxidation of fatty acids

يتم هدم الأحماض الدهنية عن طريق أكسدتها ، وتختزل مسبقاً الأحماض الدهنية غير المشبعة لكي تعطي الأحماض المشبعة ، وتجري أكسدة الأحماض الدهنية المشبعة تدريجياً ويتم إسراع كافة تفاعلات الأكسدة المتعددة المراحل بواسطة إنزيمات متخصصة .

تتطلب عملية التأكسد تنشيط جزيء الحمض عن طريق إنشاء رابطة استركبريتية Thidesterعالية الطاقة ، بين كربوكسيل الحمض والمجموعة الهيدروكبريتية للمرافق الإنزيمي أ Coa – SH ، وذلك في وجود ATPوإنزيم أسيل المرافق الإنزيمي أ سينثيتيز acyl – Coa synthetase المعروف من قبل باسم thiokinase هذه التفاعلات عكسية حيث أنه يمكن أن يستعمل لإنتاج ATP. يتبع ذلك دخول المشتق الإسيلي ( acyl ) للمرافق الإنزيمي أ في سلسلة تفاعلات ، يطلق عليها ( مسار تأكسد بيتا ) وتسفر عن هدم هذا المركب كلياً إلى وحدات متماثلة ثنائية الكربون 2c-units في صورة أسيتيل المرافق الإنزيمي أ

acetyl - COA .



- الأكسدة في الوضع بيتا للأحماض الدهنية B-oxidation

تتأكسد الأحماض الدهنية خلال مجموعة من التفاعلات تسمى أكسدة بيتا – B oxidation حيث أنه يتم أكسدة ذرة الكربون رقم B في كل مرة تتم هذه الأكسدة ، وذرة الكربون رقم B هي ذرة الكربون رقم 3 في السلسلة ومع دور الإنزيمات المعنية تتحول السلسلة بتوالي التفاعلات إلى عدد من مركب أسيتيل المرافق الإنزيمي أ acetyle-CoA ويتم عملية الأكسدة .

1. يتضمن التفاعل الأول في هذا المسار ، نزع ذرتي هيدروجين من كربون الموضع ألفاً وكربون الوضع بيتا بالسلسلة الهيدروكربونية ، حيث تتكون بينهما رابطة مزدوجة ، بفعل الإنزيم آسيل مرافق إنزيم أ د يهيدروجنيز acyl – Coa dehydrogenase الذي تعمل مجموعته الإضافية Fad مستقبلاً للهيدروجين .

2. يتم إضافة جزيء ماء ، بفعل إنزيم إينويل مرافق إنزيمي أ هيدراتيز عبر الرابطة المزدوجة ويتكون مشتق أسيلي ( بيتاهيدروكسي ) للمرافق الإنزيمي .

3. يتأكسد هذا المركب الناتج متحولاً إلى الصورة الكيتونية المقابلة وذلك بترع ذرتي هيدروجين من الموضع بيتا ، وذلك في وجود إنزيم هيدروكسي أسيل مرافق إنزيم أ د يهدروجنيز NAD+ والمرافق B-hydroxy acyl-CoA dehydrogenase

4. يتم انشطار المركب الكيتوني الناتج بيتا – كيتو آسيل المرافق الإنزيمي أ بين موضعي ألفا وبيتا ، ونقل الشق الأسيلي ( R-C=O ) إلى جزيء آخر من المرافق الإنزيمي أ ، حيث يتكون مشتق أسيلي جديد لهذا المرافق ، تنقص سلسلته الكربونية ذرتي كربون عن جزيء الحمض الدهني الذي بُدئ بأكسدته . أما الجزء الآخر من الجزيء المنشطر ، فيكون في صورة أسيتيل المرافق الإنزيمي أ ويحفز هذا التفاعل إنزيم بيتا – كيتو آسيل مرافق إنزيم أ ثيوليز B-keto acyl-COA thiolase

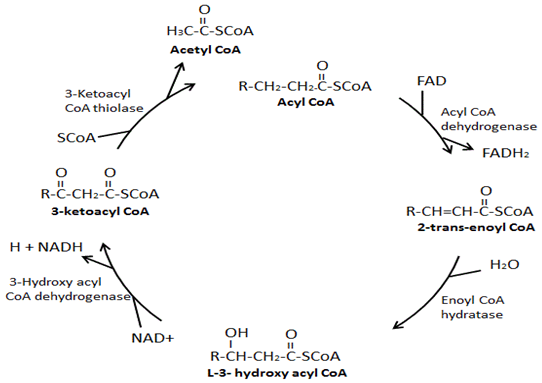
يمر هذا الناتج ، الذي فقد ذرتي كربون ، في سلسلة مماثلة للتفاعلات السابقة الذكر وبتكرار ذلك بالنسبة للنواتج المتتالية يمكن هدم السلسلة الهيدروكربونية بأكملها إلى وحدات ثنائية الكربون ، في صورة أسيتيل المرافق الإنزيمي أ ، يبلغ عددها نصف عدد ذرات الكربون بجزيء الحمض الدهني .

على الرغم من تكرار هذه السلسلة من التفاعلات المتماثلة فإنها لا تشكل دورة مغلقة ، إنما تشكل مساراً حلزونياً ، تنتهي كل دورة من لفاته ، بانشطار وحدة أسيتيل ، وتكوين ناتج تقل سلسلته الكربونية ذرتين عن الناتج الذي قبله ، وتزيد ذرتين على الذي بعده إلى أن ينتج عن إنشطار السلسلة في النهاية وحدة اسيتيل .

بعدها يتم أكسدة هذه النواتج من خلال دورة كربس والسلسلة التنفسية لإنتاج الطاقة اللامة للخلية .

وهناك طرق أخرى للاستفادة من هذه العملية وتحويل أسيتيل المرافق الإنزيمي Acetyl CoA إلى سكريات من خلال دورة الجليو كسيلات Glyoxylate.

وقد أوضحت الدراسات أن أغلب البكتيريا لا تستطيع تحليل الأحماض الدهنية بسهولة ولكن عندما يستحث تكوين الإنزيمات المتخصصة تصبح هذه البكتيريا نشطة في أكسدة الأحماض الدهنية ، فالبكتيريا E . coli مثلاً يمكنها النمو على الأحماض الدهنية ذات السلاسل الطويلة ، ولكنها تقضي طور ركود طويل .



مسار بيتا التأكسدي

- تفاعلات تحول الجليسرول إلى سكر :

الجليسرول يمكن أكسدته عن طريق المسار الجلايكولي ودورة كربس بعد فسفرته وتحوله في وجود ATp وإنزيم جليسرول كاينيز glycerol Kinase إلى ألفا فوسفات جليسرول a-glycerol phosphate . وهذه تختزل في وجود NAD وإنزيم جليسروفوسفات ديهيدروجنيز إلى فوسفات ثنائي هيدروكسي أسيتون .

ومن جهة أخرى ، قد يتحول الجليسرول عن طريق المركب الوسطي نفسه الفاجليسرول فوسفات إلى كربوهيدرات .

