كلية العلوم

القسم :الكيمياء

السنة : الثالثة

المادة : كيمياء حيوية

المحاضرة : السابعة /نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

الإنزيمات

ماهو الإنزيم : الإنزيم هو بروتين نوعي يعمل كوسيط لانجاز تفاعل الكيميائي بسرعة كبيرة.
يتكون من أحماض أمينية مرتبطة بروابط ببتيدية ، له بنية فراغية ، يتخرب بالحرارة ، نشاطة يتأثر بالحرارة وبـ pH
يمكن الكشف عنه بواسطة الكواشف الخاصة بالبروتينات
نسبة قليلة جدا من الإنزيمات ذات طبيعة غير بروتينية ولها نشاط محدد (نوع محدد من التفاعلات) ، معظمها يعمل على تحليل ARN (يفكك روابط الفوسفاتية ثنائية الإستر).

4.24 الإنزيمات

تحفّز الإنزيمات معظم التفاعلات الكيميائيّة الحيويّة التي تجري ضمن الكائنات الحيّة. تشترك الإنزيمات مع الحفّازات اللاعضويّة في الصفتين التّاليتين:

- تسرّع التفاعل دون أن تُستنفد/تُستهلك
- توفّر سبيلاً بديلاً للتفاعل بطاقة تنشيط أخفض.

يتسم التحفيز الإنزيمي ببعض المزايا النوعيّة:

- الإنزيمات جميعها جزيئات بروتينيّة ضخمة
- الإنزيمات أكثر كفاءة من الحفّازات اللاعضويّة: حيث تزداد معها سرعة التّفاعل غالباً بمعدل يتراوح بين 10^6 إلى 10^{12}
- الإنزيمات عالية النوعيّة: إذ أنّها تحفّز عادةً تفاعلاً محدداً واحداً فقط
- وكمحصلةٍ لهذه النوعيّة، لا تنتج الإنزيمات منتجاتٍ ثانويّة side products
- تعمل الإنزيمات في شروطٍ لطيفةٍ جداً: مثلاً بدرجة حرارة 35 درجة مئويّة، وpH= 7، والضغط الجوي
- كمية الإنزيم الموجودة في خلية ما قابلّة للتنظيم بناءً على الحاجة

تُدعى المادة النوعيّة (المستقلب) التي تتوافق مع سطح الإنزيم وتنقلب إلى منتج(ات) بـ **الركازة**. مثلاً، يحفّز إنزيم اليوريـاز التّفاعل:

$$\underset{\text{urea}}{(NH_2)_2CO} + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2$$

اليوريا هي الرّكازة في هذا التّفاعل لأنّها تتوافق مع سطح الإنزيم. يتفاعل الماء مع اليوريا، لكن فقط عندما تكون مرتبطةً بسطح الإنزيم.

فعّالية الإنزيم: عدد المولات من الرّكازة التي تنقلب إلى المُنتج في الدقيقة

رقم المردود: عدد جزئيات الرّكازة المتفاعلة بكلّ جزيئة إنزيم في الدّقيقة

نوعية (خصوصية) الإنزيم

ينجم عن الطيّ المعقّد لسلسلة متعدد ببتيد الإنزيم «جيبٌ pocket» على سطح الإنزيم يدعى **الموقع الفعّال**. الموقع الفعّال هو المكان حيث ترتبط الرّكازة بالإنزيم ويحصل فيه التّحفيز. يحتل الموقع الفعّال مساحة صغيرة فقط من الجزيئة. يمتلك الموقع الفعّال العديد من السلاسل الجانبيّة النوعيّة لحموض أمينيّة والتي تشكّل روابط ضعيفة مع الرّكازة ممّا يحافظ على الرّكازة في مكانها ويسمح لباقي الجزيئات بأن تتمكن من التّفاعل معها في التّوضّع الصّحيح.

يمكن استعمال النّموذج البسيط، والذي يدعى **نموذج القفل والمفتاح**، لإيضاح خصوصيّة الإنزيمات. إذ لكي تخضع للتفاعل، لا بدّ أن تتوافق الرّكازة (المفتاح) مع شكل الموقع الفعّال للإنزيم (القفل). ونقول بأنّ للرّكازة شكلاً متمّماً للموقع الفعّال (الشّكل 17.24).

ينبغي للركازة أن تمتلك الشّكل والأبعاد الصحيحة لتتوافق مع الموقع الفعّال للإنزيم. كما يجب أيضاً أن تمتلك المجموعات الوظيفيّة الضروريّة لتشكيل روابط ضعيفة مع السّلاسل الجانبيّة للحموض الأمينيّة المبطّنة للموقع الفعّال. ويعزى ذلك إلى توزع الشحنة الإلكترونيّة بين الرّكازة والموقع الفعّال. مثلاً، عندما تتلاءم الرّكازة مع الموقع الفعّال مرتبطةً به:

- إذا كان جزء لاقطبي من جزيئة الرّكازة مجاوراً لجزء لاقطبي من الإنزيم، فثمّة قوى فان درفالس موجودة
- إذا جاور جزءٌ مشحون إيجابيّاً بعض الشيء من جزيئة الرّكازة مع جزءٍ سلبيٍّ بعض الشيء من الإنزيم، فثمّة قوى ثنائيّة القطب موجودة
- تسلسل التّفاعل:
- تنتشر الرّكازة إلى الموقع الفعّال
- ترتبط الرّكازة بالموقع الفعّال مشكلةً معقد ركازة-إنزيم
- تحفّز التّفاعلَ السلاسلُ الجانبيّةُ للحموض الأمينيّة (والجزيئات الصغيرة الأخرى أو الأيونات) في الموقع الفعّال: في هذه العمليّة يمكن لثمالات حموض أمينيّة محدّدة أن تقوم بدور مانحٍ/آخذٍ للبروتون أو النكليوفيلات/أليفات النّوى
- تنتشر المنتجات مبتعدةً عن الموقع الفعّال

5.24 العوامل المؤثرة في فعّالية الإنزيم

يعتمد التّحفيز الإنزيمي على قوى التّجاذب الضّعيفة والتي تنجم البنية الثّالثيّة للإنزيم عنها. تعدّل تغيّرات طفيفة في الأسّ الهدروجيني (pH) ودرجة الحرارة البنية الثّالثيّة بحيث تتبدل معها الهندسة الفراغيّة الدقيقة للموقع الفعّال. وينجم عن ذلك خسارةٌ فعّالية الإنزيم. كما تتعطّل الإنزيمات أيضاً بمواد كيميائيّة تسبّب تغيراً معتبراً في بنيتها الثالثيّة. كما تقوم الحموض القويّة والقلويات القويّة والمنظفات بتأثيرٍ مشابه.

تأثير درجة الحرارة

يوضّح الشّكل 26.24 تغيّر الفعّالية الإنزيميّة بدلالة درجة الحرارة.

في درجة حرارة بين 0 درجة مئويّة إلى 40 درجة مئويّةً تزداد سرعة الفعّالية الإنزيميّة بطريقة مشابهةٍ للتفاعلات الكيميائيّة الأخرى.

مع ازدياد درجة الحرارة:

- تتحرك الجزيئات بسرعة أكبر مسببةً تعاظماً في تواتر التّصادمات
- تتصادم نسبة أكبر من الجزيئات بطاقةٍ تساوي أو تزيد على طاقة التّنشيط.

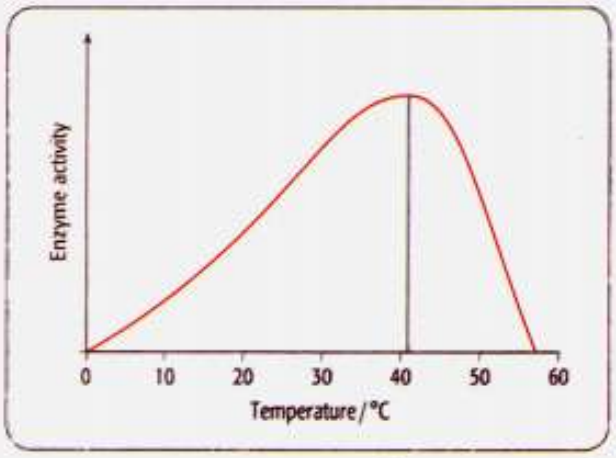
تتناقص الفعّالية الإنزيميّة بصورة جليّةٍ في درجة حرارة فوق الـ 40 درجة مئويّة. ومع تزايد درجة الحرارة بصورة أكبر:

- تعطّل الحركة الحراريّة المتزايدة لسلسة متعدّد الببتيد القوى بين الجزيئيّة التي تحافظ على البنية الثّالثيّة للإنزيم
- يبدأ الإنزيم بفقد بنيته الثالثيّة
- يتغيّر شكل الموقع الفعّال بحيث لا يعود قادراً على الارتباط بالرّكازة
- يفقد الإنزيم فعّاليته التّحفيزيّة

في درجة حرارة تفوق ما يقارب الـ 65 درجة مئويّة. يفقد الإنزيم بنيته الثّالثيّة كليّاً ويبدأ حتى يفقد بنيته الثّانويّة. عندما يفقد بروتين بنيته الثلاثيّة الأبعاد الدقيقة. نقول عندها إنّه قد تمسّخ

للحقيقة

يمكن لبعض الجراثيم العيش في ينابيع حارّة بدرجة حرارة عالية للغاية. ينمو أحد الجراثيم الذي اكتشف في الينابيع الحارّة لمنتزه يلوستون في الولايات المتحدة الأمريكيّة بصورة مفضّلة في درجة حرارة 105 درجة مئويّة! يمكن للإنزيمات التي تملك بصورة استثنائيّة درجة حرارة مثلى مرتفعة يمكن أن تكون مفيدةً. مثلاً. يمكن استعمال الإنزيم الذي يدعى Taq بوليميراز في درجة حرارة 80 درجة مئويّة لإكثار كميّة الدنا DNA المتوفّرة في تحديد البصمة الجينيّة لـ دنا DNA والمساعدة في الكشف عن الجرائم.

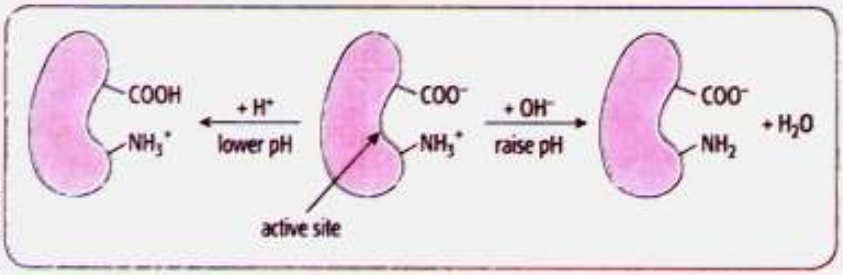


الشكل 26.24 تغيّر الفعّالية الإنزيميّة بدلالة درجة الحرارة.

تأثير الأس الهيدروجيني pH

تمسّخ الحدود القصوى للأسّ الهدروجينيّ pH الإنزيمات وذلك بتعطيل بنيتها الثّالثيّة. يمنح الـ pH المنخفض بروتونات إلى كاربوكسيل ^{-}COO السلاسل الجانبيّة في حين ينزع الـ pH المرتفع بروتونات الـ $-NH_3^+$ في السلاسل الجانبيّة. و سيخرّب هذا بدوره الروابط الأيونيّة التي تساعد في الحفاظ على البنية الثالثيّة.

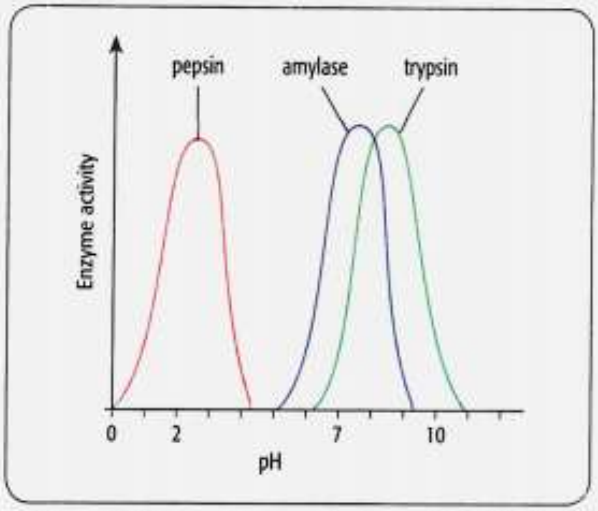
تؤثّر التغيرات الطفيفة في الـ pH بشدّة في تأيّن السلاسل الجانبيّة لبعض الحموض الأمينيّة في الموقع الفعّال (وفي بعض الأحيان الرّكازة ذاتها). تستند فعّالية بعض الانزيمات إلى أن ثمالات حموض أمينيّة معيّنة في الموقع الفعّال مشحونةٌ أو غير مشحونة. في هذه الحالات. فإنّ بإمكان انزياح حتى وبو لمجرّد وحدة فقط في الـ pH أن يغيّر فعّاليّة الإنزيم بصورة ملحوظة. يوضّح الشّكل 27.24 هذا التّأثير.



الشكل 27.24 كيف تؤثّر تغيّرات الـ pH في تأيّن ثمالات الحموض الأمينيّة في الموقع الفعّال.

أغلب الإنزيمات فعّالة في مجال pH ضيّق إلى حدٍّ ما. وعلى الرّغم من أنّ درجة الـ pH المثلى لمعظم الإنزيمات التي تقوم بعملها ضمن الخلايا تقارب pH= 7، فإنّ للعديد من الإنزيمات التي تقوم بوظائفها خارج الخليّة، مثل الإنزيمات الهاضمة في المعدة والأمعاء، درجات باهاء pH مثلى تعكس pH الوسط الذي تعمل ضمنه (الشّكل 28.24). مثلاً:

- يحلمه الببسين البروتينات إلى ببتيدات في الظروف الشديدة الحموضة للمعدة
- يحلمه الأميلاز النشاء في ظروف شديدة القلويّة نوعاً ما التي ينتجها اللعاب في الفم.
- يحلمه تريبسين الببتيدات في الظروف القلويّة الخفيفة للأمعاء الدّقيقة



الشّكل 28.24 المنحنيات التي تبيّن درجات الـ pH المثلى للعديد من الإنزيمات

تميمات العوامل: المجموعات الضميمة و تميمات الإنزيم

تتطلّب العديد من الإنزيمات مجموعات لا بروتينيّة تُدعى **تميمات العوامل** لتقوم بوظيفتها كمحفّزات. وبدون المحفّزات (تميمات العوامل)، لا تستطيع هذه الإنزيمات أن تقوم بوظيفتها الحفزيّة. هناك نمطان من تميمات العوامل هي المجموعات الضّميمة وتميمات الإنزيم.

المجموعات الضميمة هي أيونات أو جزيئات مرتبطة بصورة دائمة بإنزيمات معيّنة. مثلاً، إنزيم كاربونيك أنهيدراز، والذي يحفّز التّفاعل:

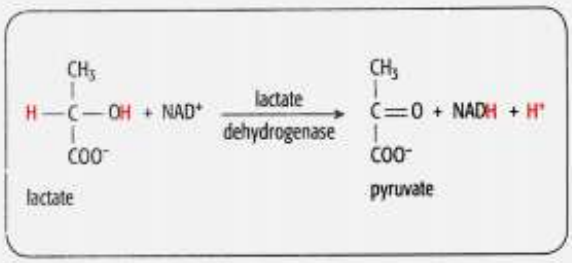
$$CO_2 + H_2O \rightarrow HCO_3^- + H^+$$

ترتبط بسطحه أيون زنك Zn^{2+} بصورةٍ دائمة.

ترتبط الجزيئات الضخمة نوعاً ما مثل الهيم بالبروتينات. هناك مثالان لبروتينين يحتويان على الهيم وهما:

1. الهيموغلوبين الذي ينقل الأكسجين إلى أنحاء الجسم.
2. السيتوكروم أكسيداز الذي يدخل في تفاعلات الأكسدة والإرجاع التّنفسيّة.

تميمات الإنزيم جزيئاتٌ معقّدة، تصطنع غالباً من فيتامينات التي لا تكون مرتبطةً بصورةٍ دائمةٍ بالإنزيم، وهي تعمل بصورة مشتركةٍ مع الإنزيمات لإنجاز التفاعل المطلوب. ترتبط بصورةٍ مؤقتة بالموقع الفعّال للإنزيم وتقوم بوظيفة تميمة ركازة co-substrate. تنخرط تميمات الإنزيم NAD^+ و $NADP^+$ و FAD



الشّكل 29.24 يقوم NAD^+ (نيكوتيناميد أدينين دينكليوتيد nicotinamide adenine dinucleotide) بوظيفة عامل مؤكسد عند انقلاب لاكتات إلى بيروفات pyruvate. تتراكم اللاكتات في العضلات عندما تمارين التّمارين الرّياضيّة بوجود كميّة محدودة من الأكسجين. تقوم بقلب اللاكتات إلى بيروفات عندما يكون لدينا وارد وافرٌ من الأكسجين مرّةً أخرى.

في تفاعلات نقل الإلكترونات وأيونات الهيروجين في حين ينخرط تميم الإنزيم coenzyme-A A في نقل مجموعات CH_3CO^-. يقدّم انقلاب اللاكتات lactate (المنتجة أثناء التّنفس اللاهوائي في العضلات) إلى البيروفات مثالاً عن دور الـ NAD^+ كتميم إنزيم يدخل في تفاعلات الأكسدة والإرجاع (الشّكل 29.24).

تتحوّر تميمات الإنزيم بصورةٍ طفيفة أثناء التّفاعلات. إذ تنقلب إلى شكلها الأصلي بتفاعلات أخرى تجري في الخليّة. مثلاً ينقلب الـ $NADH^+$ ليعود إلى NAD^+ بتفاعلات أكسدة تحدث في مواضع أخرى في الخليّة.

عمليات الاستقلاب

تعريف عمليات الاستقلاب: هي مجموع الكلى لكافة التفاعلات الأنزيميه التي تحدث في الخليه ، وتكون الوظائف النوعيه للعمليات الحيويه:

1. استخلاص الطاقه الكيميائيه من الأغذيه العضويه أو اشعة الشمس
2. تحويل المواد الغذائيه من محيط الى مواد بنائيه أوليه للجزيئات الكبيره المكونه للخلايا
3. تجميع المواد البنائيه للبروتينات الاحماض الامينيه الدهون السكريات المتعدده والمكونه الاخرى المتميزه في الخليه
4. تكوين أو تحطيم هذه الجزيئات الحيويه الضروريه كوظيفه معينه في الخلايا

تتكون العمليات الأيضيه من شبكتين:

- شبكة تعمل لإنتاج الطاقه الكيميائيه ATP من تحلل جزيئات الوقود او من اشعة الشمس
- شبكة تسخير الطاقه الكيمايئه ATP لغرض صنع مكونات خلويه جديده

Digestion of Carbohydrates هضم السكريات

ان معظم الكربوهيدرات الغذائية هي من اصل حيواني (glycogen) اما المصدر النباتي هو النشاء (Starch).

يبدأ الهضم في الفم والانزيم المسؤول هو الاميلاز الفا(α- amylase) الموجود في اللعاب.

في المعدة لا يوجد هضم بسبب حموضة المعدة العالية التي تثبط فعل انزيم الاميلاز

يتم الهضم في الامعاء بوساطة انزيمات(α- amylase) البنكرياسية لمتابعة هضم النشاء

تفرز الامعاء انزيمات لهضم سكريات قليلة التعدد والسكريات الثنائية مثال: المالتاز، السكراز، اللاكتاز.

تمتص السكريات البسيطة في الامعاء الدقيقة. لا يتطلب الامتصاص من قبل الخلايا المعوية وجود الانسولين. يتم الامتصاص بآليات مختلفة.

ويتم امتصاص السكريات الأحاديه خلال الغشاء الطلائى المبطن للأمعاء الدقيقه وبعد الأمتصاص يتم نقلها في الدم الى الكبد

يعمل الكبد على تحويل السكريات الأحاديه مثل الفركتوز و الجالاكتوز الى الغلوكوز لتستفيد منه باقي الخلايا

مصير الغلوكوز في الدم

1. يتم نقله بواسطة الدم الى الأنسجة المختلفه في الجسم.
2. يتم اسغلاله في الأنسجة المختلفه بالطرق التاليه:

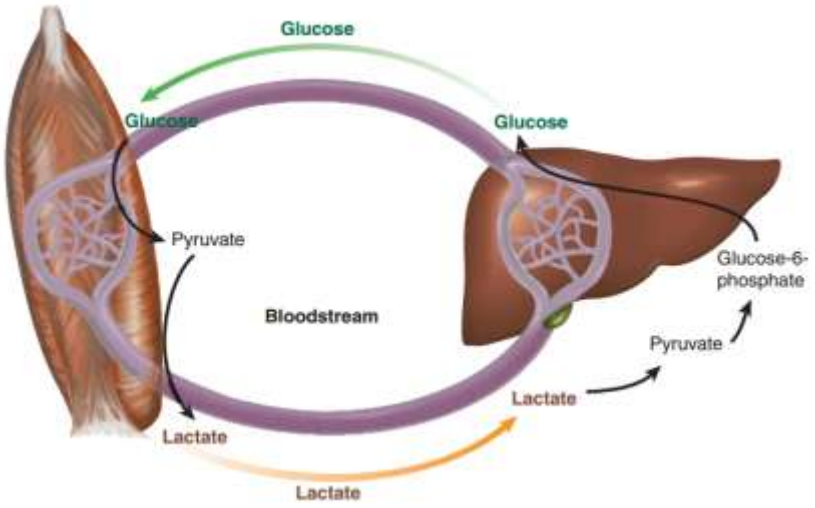
اكسدة الغلوكوز لانتاج الماء وثاني اكسيد الكربون والطاقه عن طريق الجلايكوليسس ودورة كربس.

تحويل الغلوكوز الى مكونات اخرى ذات اهميه بيولوجيه مثل:

- الريبوز والديوكسي رابيوز لتصنيع الاحماض النووية
- حمض الجلوكيورنيك في الكبد وهو هام للتفاعلات التى يتم فيها تحويل المواد السامه الى مواد غير سامه
- سكريات امينيه لصنع السكريات المخاطيه

3. التخزين: يتم تخزين الغلوكوز في الكبد والعضلات على هيئة جلايكوجين بواسطة عملية تسمى الجليكوجينسيس

ويتم تخزينه في الكبد والنسيج الشحمي على هيئة دهون متعادله عن طريق عملية تسمى ليبوجنيسس



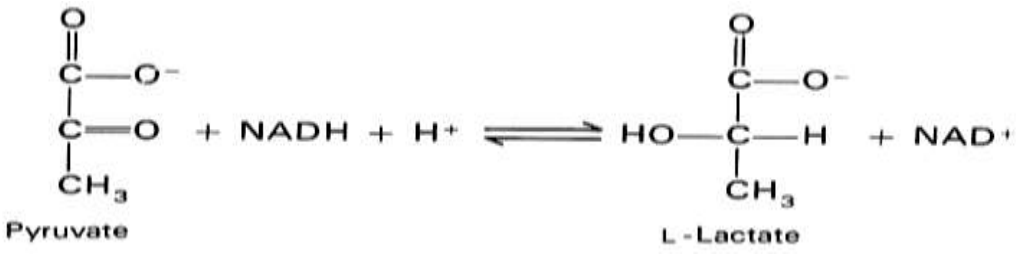
تحلل سكر الجلايكوليسس glycolysis

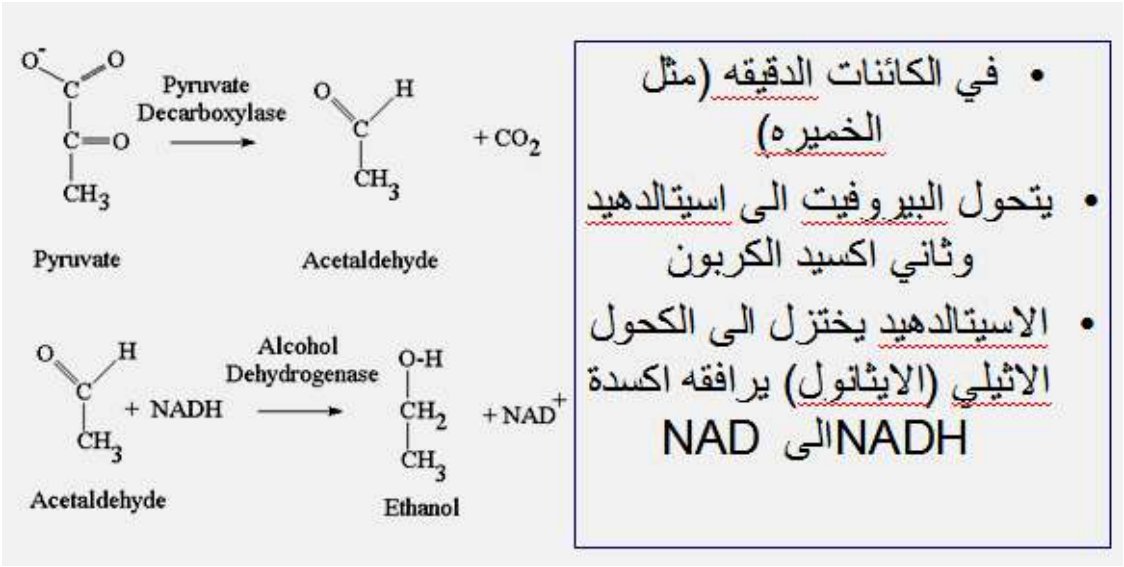
- هي العمليه التى يقوم بها الكائن الحي بتحطيم سكر الجلوكوز وتحويل الى بيروفيت ومن ثم الى:

1. حمض اللاكتيت بغياب الهواء في الكائنات الراقيه اما في الخمائر والفطريات يتم تحويلها الى كحول الإيثانول وتسمى بالتخمر.
2. اسيتل – CoA في وجود الهواء وتسمى الجلايكوليسس

تحلل السكر بغياب الهواء

- في الكائنات الراقيه : يتم اختزال البيروفيت الى اللاكتيت ويرافقه اكسدة الـ NADHالى NAD ، و يتم بمساعدة انزيم اللاكتيت ديهيدروجينز





التمثيل الغذائي (الأيض) للدهون :- Metabolism of fats

الدهون من بين المواد الغذائية المختلفة التي تزود الجسم بأقصى طاقة (9.5 Kcal/gm) لكل كمية من المادة الدهنية المتأكسدة . وهذه القيمة تعادل تقريباً ضعف مثيلتها لنفس الوزن من البروتينات والكاربوهيدرات والجسم لايؤكسد الدهون فقط ولكنه ايضا يخلقها وبصفة خاصة من الكاربوهيدرات

و لقد ثبت ان الدهون والبروتينات والكربوهيدرات الموجودة في الجسم تكون في حالة ديناميكية من الهدم والبناء .

ولو فرضنا انه قد سمح لجزيئة دهن بالاحتراق مع الاوكسجين فإن كمية كبيرة من الطاقة تنطلق مرة واحدة على شكل حرارة وهذه الصورة من الطاقة لايمكن ان تستعمل في التمثيل الغذائي . وهناك سبب هام لماذا يجب ان تتم الاكسدة في الخلية تحت ظروف متناهية في الدقة وذلك على النقيض من الاحتراق . حيث ان الخلايا الحية لايمكنها ان تستعمل الحرارة لتقوم بوظائفها لأن الطاقة الحرارية تؤدي شغلاً فقط عند انسيابها من المناطق الدافئة الى المناطق الأكثر برودة

ولكن من الوجهة العلمية لايوجد اختلاف في درجات حرارة الخلية الحية . وتسترجع الخلية الطاقة المنبعثة من اكسدة المواد الغذائية ليس كحرارة ولكن كطاقة كيميائية تستطيع ان تقوم بعمل في نظام ثابت الحرارة . وللحصول على طاقة في صورة مفيدة فإن الخلية تؤكسد وقودها على مراحل والانزيمات هي المحرك لعملية الاحتراق المنتظم بمساعدة جزيئات أصغر من مواد عضوية تسمى (المرافق الانزيمي) Co Enzyme.

وفي هذا القسم فإن التفاعلات الكيميائية العضوية التي بواسطتها تنهدم وتخلق المواد الدهنية توصف باختصار كما يأتي :

((تدخل الدهون الى الجسم من خلال الفم وتمر الى المعدة ولكنها تتأثر قليلاً بمحيطها الحامضي . وتمتص الدهون أولاً في الأمعاء الدقيقة حيث تستحلب بواسطة أملاح حوامض الصفراء (المرارية) Bile acids & Salts وتتحلل الى الحوامض الدهنية والكليسيرين بواسطة انزيمات مختلفة قابلة للذوبان في الماء (Lipase) ومن الامعاء تدخل الليبيدات المتحللة الى مجرى الدم وتنتقل الى الأعضاء الأخرى وخاصة الكبد لتكملة عملية التمثيل الغذائي . وقد يحدث إعادة اتحاد أو ان الكليسيرين الذي يشابه في تركيبه الكربوهيدرات يمكن ان يدخل دورة التمثيل الغذائي للكربوهيدرات . كما ان الاحماض الدهنية قد تتحلل كلياً الى ثاني اوكسيد الكربون وماء لتزويد الطاقة)))..

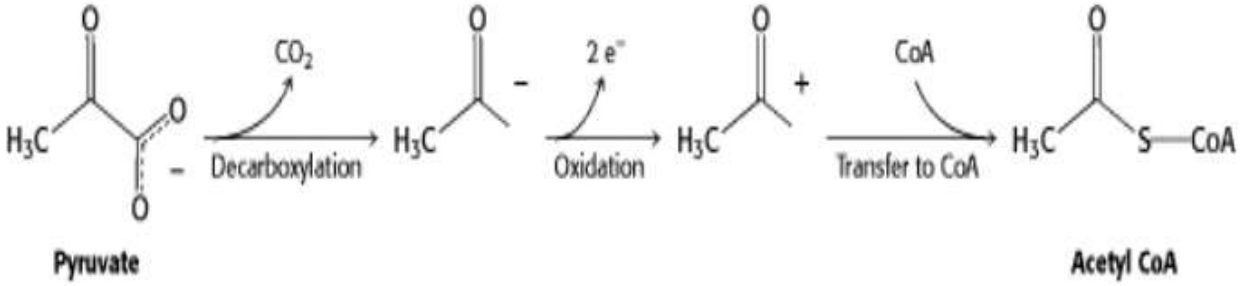
والخاصية التركيبية الأساسية في المرافق الأنزيمي CoA والهامة في التمثيل الغذائي للمواد الدهنية هي المركبتان (مجموعة SH) ولهذا يرمز له بالرمز CoA-SH .

دورة كريبس *Krebs Cycle*

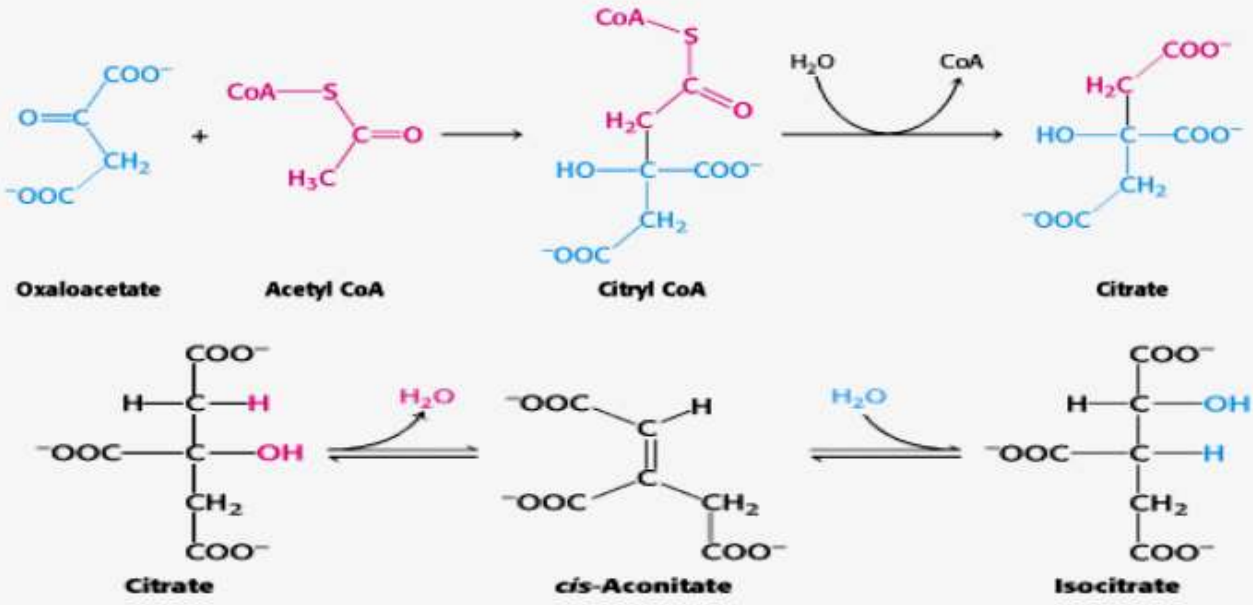
وتعرف ايضا" بدورة حامض الستريك (الليمون) Citric Acid Cycle أو دورة الحامض ثلاثي الكاربوكسيل Tri Carboxylic Acid Cycle (TCA) نسبة الى اول مركب يتكون في الدورة وهو حامض الستريك Citric Acid (ثلاثي الكاربوكسيل) وسميت بالدورة لانه يعاد فيها تكوين (بناء) حامض الاوكزالواسيتك Oxaloacetic acid (OAA) وهو المركب الذي تبدأ به الدورة . وتكمن اهمية هذه الدورة في كونها مصدر للطاقة مصدر لتكوين العديد من المركبات الحياتية المهمة مثل الحوامض الامينية و البروتينات والحوامض النووية .

ويمكن ان تدخل في دورة كريبس مركبات ناتجة في الأصل من تكسير الدهون او البروتينات وعليه يمكن ان تستغل هذه المواد في عملية التنفس او تكوين الطاقة .

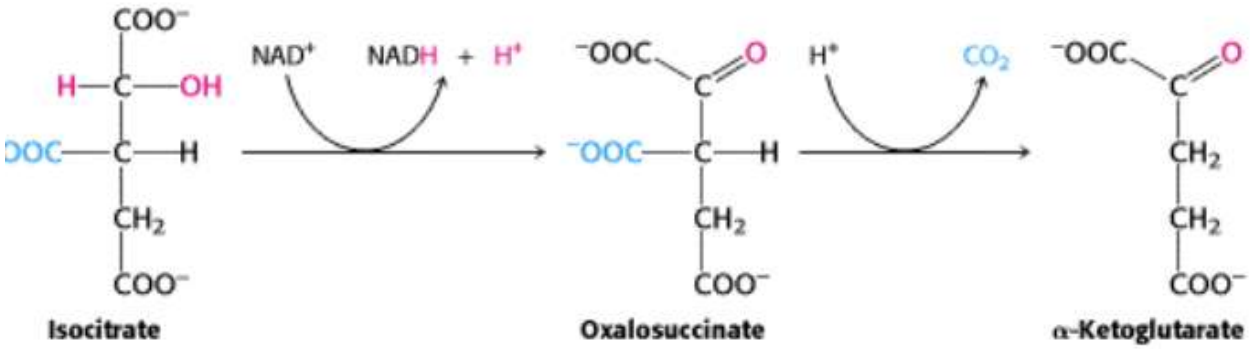
تتم هذه الدورة بوجود الاوكسجين حيث يتحول حامض البايروفيك الى المرافق الأنزيمي Acetyl CoA



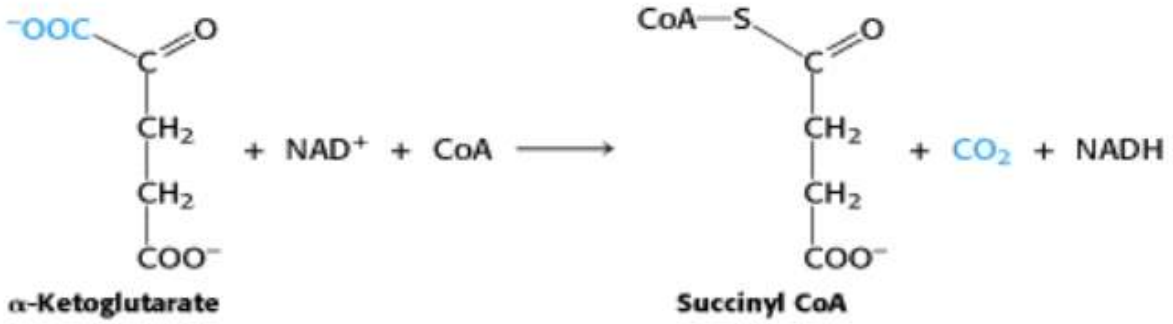
وتبدأ الدورة بتفاعل المرافق الأنزيمي **Acetyl CoA** مع (OAA) **Oxaloacetic acid** لتكوين حامض الستريك Citric Acid (C6) الذي يفقد جزيئة ماء H_2O لتكوين مركب قلق جداً وهو Cis Aconitate الذي سرعان ما يكتسب جزيئة ماء ليتحول الى حامض الـ Isocitric acid

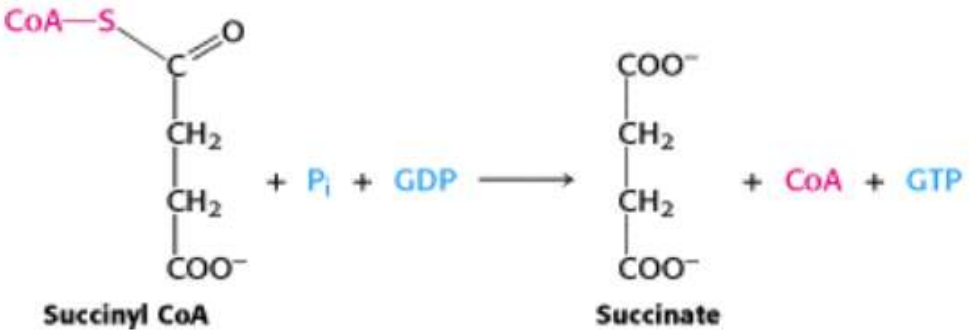


يتأكسد حامض الـ Isocitric acid بوجود انزيم Isocitrate dehydrogenase فيتحول الى حامض α –Ketoglutaric Acid (C5) حيث يتم فقدان جزيئة CO_2 وازاحة زوج من الالكترونات وزوج من أيونات الهيدروجين واختزال المرافق الانزيمي NAD^+ وتحوله الى NADH + H .



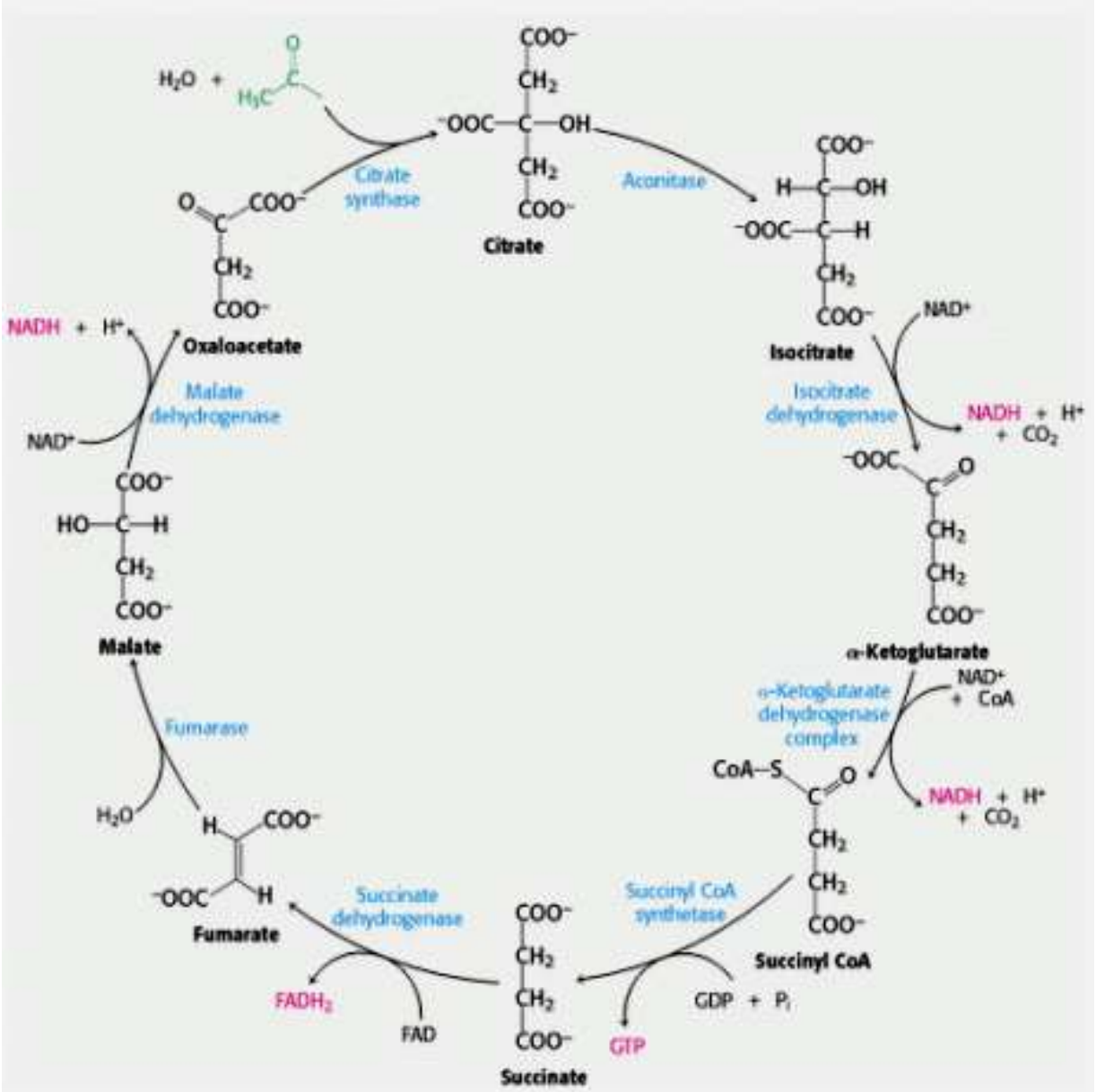
بعدها يتأكسد α –Ketoglutaric Acid بوجود انزيم α –Ketoglutarate dehydrogenase يفقد جزيئة CO_2 ليتحول الى Succinyl CoA الذي يتحول الى حامض Succinic acid (C4)





بعدها يتأكسد Succinic acid بوجود انزيم Succinate dehydrogenase الى حامض الفيوماريك الغيرمشبع Fumaric acid (C4) ولا يتدخل الانزيم NAD في هذه الخطوة بل بوجود المرافق الانزيمي FAD (الذي يتحول الى $FADH_2$) وبعد اضافة جزيئة ماء يتحول Fumaric acid الى Malic acid بوجود انزيم الـ Fumarase .

بعدها يتاكسد Malic acid بوجود انزيم Malate dehydrogenase الى Oxaloacetic acid واختزال المرافق الانزيمي NAD^+ وتحوله الى NADH + H وهكذا تعاد الدورة من جديد ليتم تجهيز الجسم بالطاقة


Citrate synthase
Aconitase
Isocitrate dehydrogenase
α-Ketoglutarate dehydrogenase complex
Succinyl CoA synthetase
Succinate dehydrogenase
Fumarase
Malate dehydrogenase
Citrate
Isocitrate
α-Ketoglutarate
Succinyl CoA
Succinate
Fumarate
Malate
Oxaloacetate
Krebs Cycle