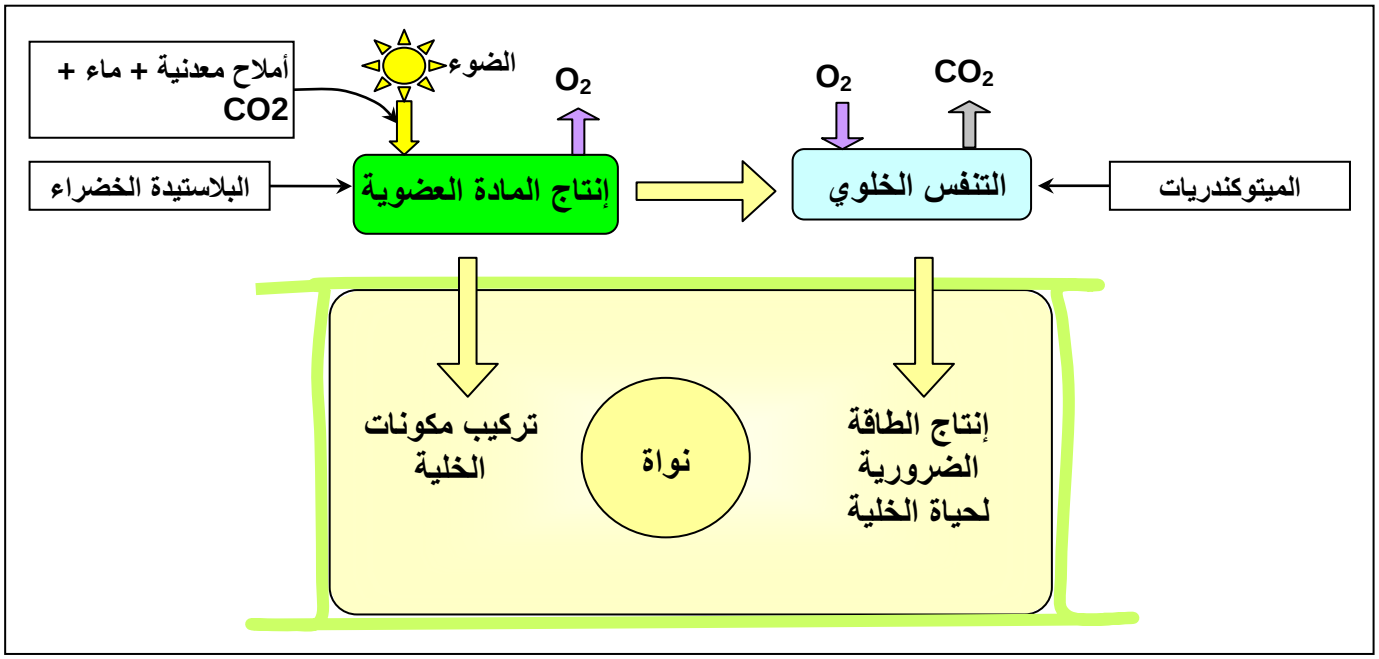
استهلاك المادة العضوية وتدفق الطاقة

مـدخـل عـــام :



تنتج النباتات اليخضورية، المواد العضوية، من سكريات، دهنيات، وبروتيدات، بواسطة ظاهرة التركيب الضوئي.
خلال المرحلة المضاءة من التركيب الضوئي، يتم تحويل الطاقة الضوئية الملتقطة من طرف خلايا النبات، إلى طاقة كيميائية على شكل جزيئات ATP (الأدينوزين ثلاثي الفوسفاط Adénosine Triphosphate) حسب التفاعل التالي :

طـاقـة + ADP + Pi ⟶ ATP

خلال المرحلة المظلمة، تستعمل الطاقة المخزنة في ATP في تفاعلات تركيب المواد العضوية.
تستعمل الخلايا المادة العضوية لتجديد مكوناتها من جهة، وللتزود بالطاقة اللازمة لنشاطها من جهة أخرى.
وبما أن شكل الطاقة المستعملة من طرف الخلايا الحية هو ATP فلابد من استخلاص الطاقة الكامنة في المواد العضوية المستهلكة لتصبح على شكل ATP ، يمكن بعد ذلك استعماله في مختلف الظواهر المستلزمة للطاقة، كالنقل النشيط، الحركة، والتركيبات الخلوية.

1) ما هي الظواهر الخلوية التي تمكن من استخلاص الطاقة على شكل ATP من المواد العضوية المستهلكة ؟
2) كيف تستفيد الخلية من ATP المستخلص ؟
3) كيف توظف المواد العضوية في بناء المادة الحية ؟

الفصل الأول:

تحرير الطاقة الكامنة في المواد العضوية

I – الكشف عن أنماط التفاعلات المسؤولة عن تحرير الطاقة الكامنة في المادة العضوية:

أ – التنفس ظاهرة خلوية لهدم الأغذية:

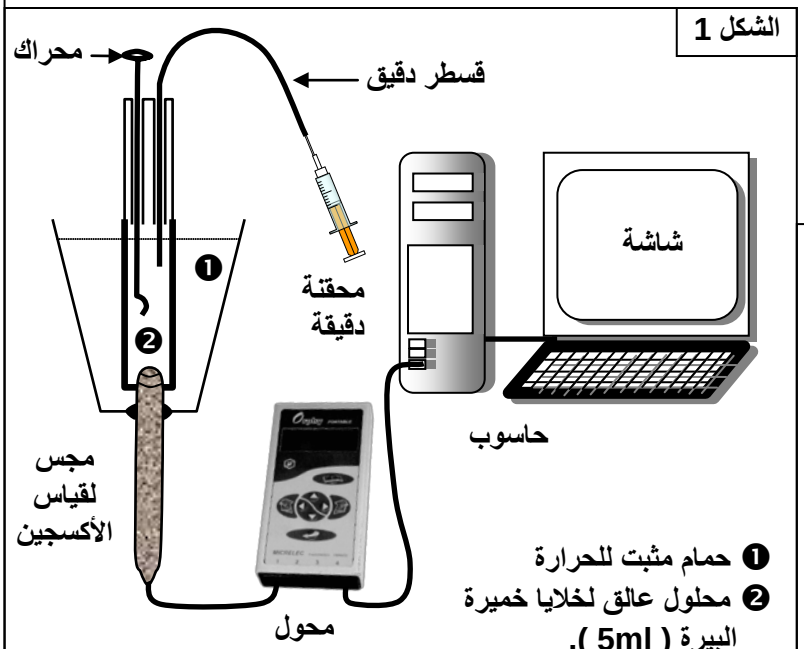
a – تجربة: أنظر الوثيقة1.

الوثيقة 1:

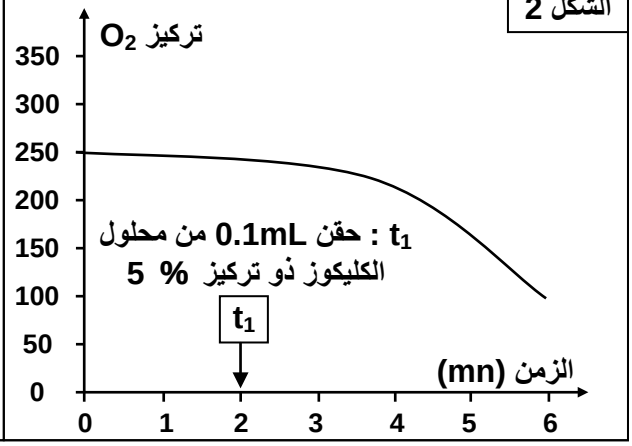
نعرض محلولا عالقا لخلايا الخميرة (10g/l) للتهوية بواسطة مضخة لمدة 30 ساعة، نضع 5ml من هذا المحلول داخل مفاعل حيوى لعدة EXAO (الشكل 1)، نتتبع بفضل العدة تطور تركيز الأوكسجين المذاب داخل المفاعل الحيوي ② : ينقل مجس قياس الأوكسجين، إشارات كهربائية إلى المرافق البيني (محول) الذي يحولها إلى معطيات رقمية يعالجها الحاسوب ويترجمها إلى مبيان (الشكل 2). في الزمن t_1 نحقن داخل المفاعل 0.1 mL من محلول الكليكوز بتركيز 5 %.

صف تطور تركيز الأوكسجين في المفاعل الحيوي، قبل إضافة الكليكوز وبعدها: ماذا تستنتج ؟

الشكل 1



الشكل 2



b – تحليل واستنتاج:

قبل إضافة الكليكوز، تكون نسبة الأوكسجين مستقرة. مباشرة بعد إضافة الكليكوز، تنخفض نسبة الأوكسجين في الوسط. نستنتج من هذه المعطيات أن خلايا الخميرة تستهلك الأوكسجين لهدم الكليكوز. نقول ادن أن خلايا الخميرة تتنفس.

ب – التخمر ظاهرة خلوية أخرى لهدم الأغذية:

a – التخمر اللبني: (Fermentation lactique).

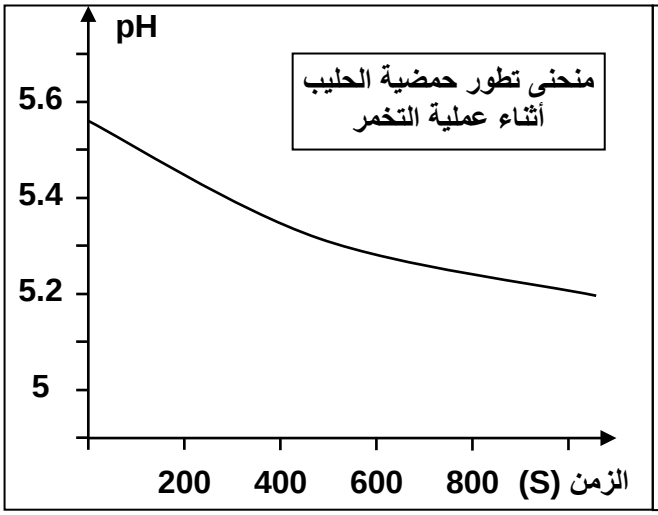
☒ **تجربة :** أنظر الوثيقة 2.

☑ **تحليل واستنتاج :** بعد 15 يوما في درجة حرارة ملائمة (40°C) نلاحظ انخفاض قيمة ph أي ارتفاع قيمة حمضية الحليب.

نستنتج من هذه الملاحظة أنه تم هدم الكليكوز المكون للاكتوز، وتحوله إلى حمض لبني Acide lactique، وذالك في غياب الأوكسجين. نتكلم ادن عن ظاهرة التخمر اللبني

الوثيقة 2 : نأخذ عينة من الحليب الكامل الطري ونفرغها في بوقال ذي حجم 250 ml. نحرص على ملء البوقال إلى أخره لطرد الهواء (للحصول على تفاعل حي لا هوائي) نضع داخل الحليب مقياس ph الذي نربطه بعدة **EXAO** قصد تتبع تطور حمضية الحليب أثناء عملية التخمر (تحول الكليكوز المكون للاكتوز إلى حمض لبني، ويتم ذلك دون طرح CO_2) ، نترك التحضير لمدة 15 يوما في درجة حرارة ملائمة (40°C)، بعد ذلك نتتبع تطور قيمة ph بواسطة عدة EXAO فنحصل على النتائج المبينة أمامه.

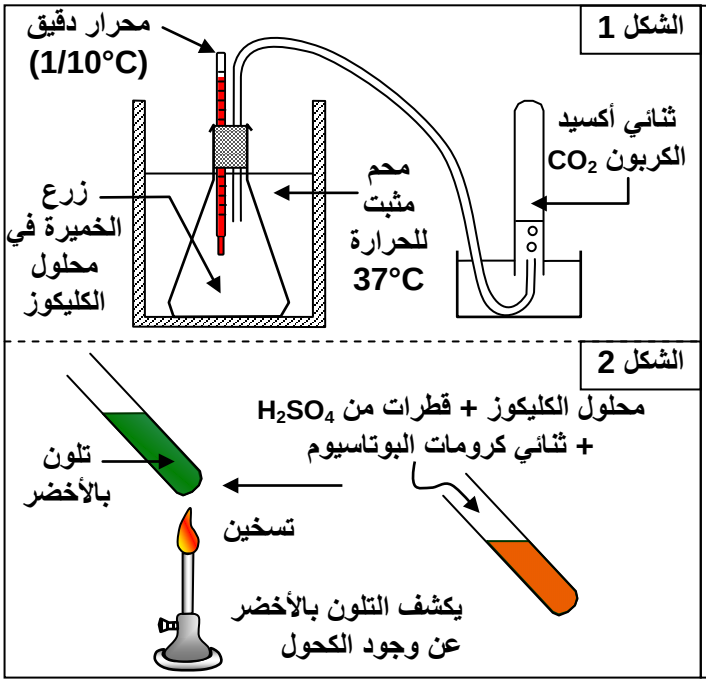
صف تطور المنحنى واستنتج العلاقة بين هذا التطور وهدم الكليكوز.



b – التخمر الكحولي: Fermentation alcoolique

☒ تجربة : أنظر الوثيقة 3.

الوثيقة 3



✱ البروتوكول التجريبي : أنظر الشكل 1.

- نضع محلول الكليكوز في قارورة (5g/l).
- نزرع الخميرة في محلول الكليكوز.
- نضع التحضير في ماء ساخن (37 °C).

✱ النتائج :

- انخفاض كمية الكليكوز في الوسط.
- طرح CO_2 في الأنبوب.
- ارتفاع طفيف لدرجة الحرارة.
- ظهور الكحول في وسط الزرع. (نكشف عن الكحول بواسطة التفاعل المبين في الشكل 2).
  - o انطلاقا من هذه المعطيات التجريبية، قارن بين التخمر اللبني والتخمر الكحولي.
  - o قارن بين مظاهر التنفس ومظاهر التخمر.

☑ تحليل واستنتاج :

التخمر اللبني هو طريقة لهدم الكليكوز، حيث ينتج عن ذلك تكون الحمض اللبني دون طرح CO_2.

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3 - CHOH - COOH$$

التخمر الكحولي هو طريقة لهدم الكليكوز، حيث ينتج عن ذلك كحول هو الايتانول (Ethanol) مع طرح CO_2.

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3 - CH_2OH + 2CO_2$$

c – خلاصة :

تستعمل الخلايا الكليكوز كمستقلب طاقي، ويمكنها هدمه بطريقتين مختلفتين حسب ظروف :

- التنفس : في وسط حيهوائي Aérobie (غني بالأوكسجين)، يتم الهدم الكلي للكليكوز وتحويله إلى CO_2 وماء وهي مواد معدنية دون قيمة طاقية.

- التخمر : في وسط حيلاهوائي Anaérobie (غياب الأوكسجين)، يخضع الكليكوز لهدم غير تام، وتحويله إلى جزيئات عضوية لا تزال تخزن الطاقة الكيميائية.

II – انحلال الكليكوز على مستوى الجبلة الشفافة. Le hyaloplasme

① تعرف البنيات الخلوية المتدخلة في التنفس والتخمر

a – تجارب وملاحظات : أنظر الوثيقة 4.

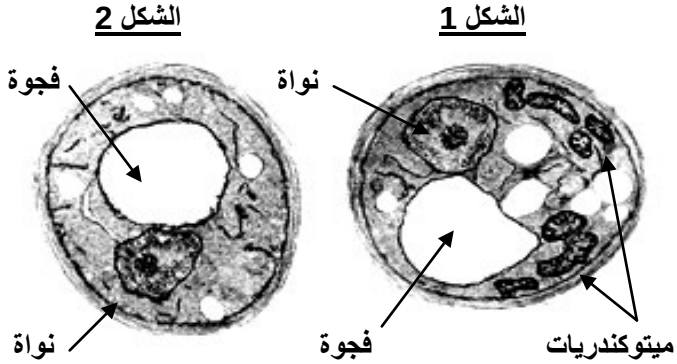
الوثيقة 4: تجربة

خميرة البيرة فطر مجهري وحيد الخلية يمكن أن يعيش في وسط غني بالأكسجين (وسط حيهوائي) ووسط يفتقر للأكسجين (وسط حيلاهوائي)

توضع الخميرة في وسط غني بالأكسجين يحتوي على الكليكوز فيلاحظ بعد مرور يوم أن عدد الخمائر تضاعف كثيرا مع انخفاض كميتي الكليكوز والأكسجين وارتفاع كميتي CO_2 وH_2O في الوسط وتبين الملاحظة المجهرية أن خلايا الخمائر غنية بعضيات خلوية تسمى الميتوكندريات (الشكل 1).

توضع الخميرة في وسط يفتقر للأكسجين يحتوي على الكليكوز فيلاحظ بعد مرور يوم أن عدد الخمائر زاد نسبيا مع انخفاض كمية الكليكوز وارتفاع كمية CO_2، مع تكون كحول الاثانول C_2H_5OH في الوسط، وتبين الملاحظة المجهرية أن خلايا الخمائر تحتوي على ميتوكندريات قليلة وضامرة (الشكل 2).

انطلاقا من هذه المعطيات التجريبية حدد العلاقة بين وجود الميتوكندريات، ووجود ثنائي الأوكسجين في الخلية، مبينا موقعي كل من التنفس والتخمر داخل الخلية.



b – تحليل واستنتاج :

يتبين من هذه المعطيات أنه في الظروف الحيهوائية، أي خلال ظاهرة التنفس، يتطلب هدم الكليكوز وجود عضيات خلوية خاصة هي الميثوكندريات (Mitochondries)، بينما في الظروف الحيلاهوائية، أي خلال ظاهرة التخمر، لا يتطلب هدم الكليكوز وجود الميتوكندريات.

يبتدئ كل من التنفس والتخمر بمرحلة مشتركة تتم داخل الجبلة الشفافة، وهي انحلال الكليكوز (glycolyse). فتستمر تفاعلات التخمر في الجبلة الشفافة، بينما يتطلب التنفس تدخل الميتوكندريات.

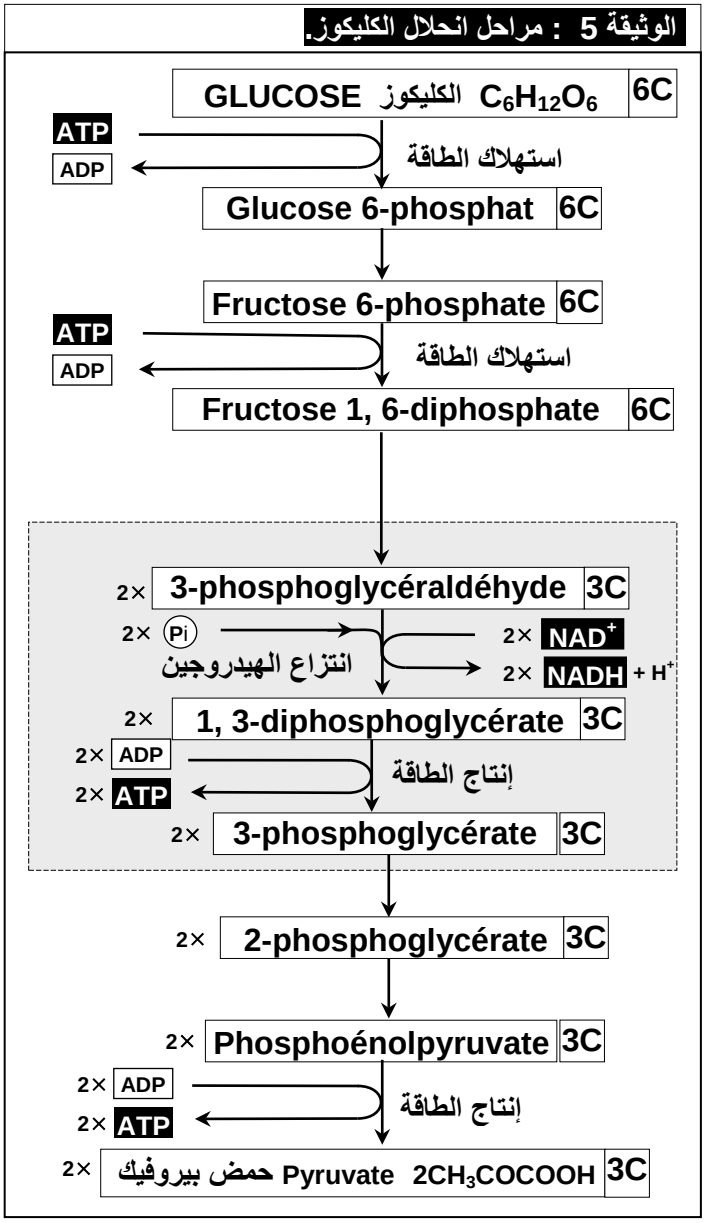
② مراحل انحلال الكليكوز

a – تفاعلات انحلال الكليكوز :

تعطي الوثيقة 5 والوثيقة 6، التفاعلات الكيميائية لانحلال الكليكوز.

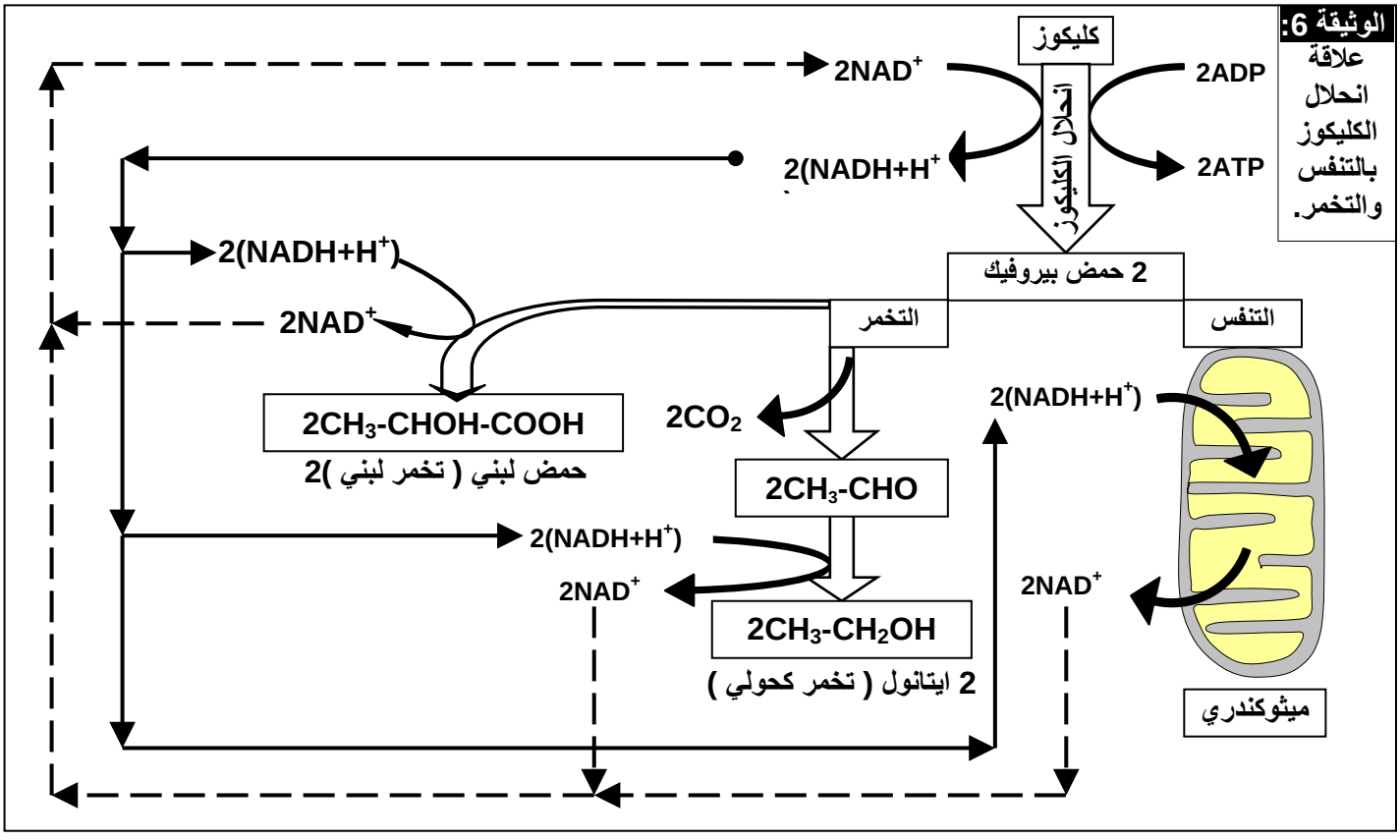
انطلاقا من هذه المعطيات، استخرج الأشكال الطاقية الناتجة عن انحلال الكليكوز.

الوثيقة 5 : مراحل انحلال الكليكوز.



الوثيقة 6:

علاقة انحلال الكليكوز بالتنفس والتخمر.



b – استنتاج :

داخل الجبلة الشفافة ينحل الكليكوز حسب سلسلة من التفاعلات الكيميائية، المحفزة بأنزيمات نوعية. وهي تفاعلات غير مستهلكة للأوكسجين، وتتم على ثلاث مراحل:

- المرحلة الأولى:

يتحول الكليكوز فوسفات إلى فريكتوز ثنائي الفوسفات، بعد تثبيت مجموعة فوسفاتية آتية من ATP.

- المرحلة الثانية:

ينشطر الفريكتوز ثنائي الفوسفات إلى جزيئتين من سكر ثلاثي فوسفات(2غليسيرألديهيد فوسفات).
تخضع كل من هاتين الجزيئتين إلى انتزاع الهيدروجين (أكسدة)، بواسطة مستقبل للهيدروجين (NAD^+ = Nicotinamide adénine dinucléotide).
الشكل المؤكسد NAD^+ يختزل ويحول إلى $NADH + H^+$ مع تفسفر جزيئتي الغليسيرألديهيد فوسفات، اللتان تتحولان إلى حمض غليسيري ثنائي الفوسفات.

$$NAD^+ + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow NADH + H^+$$

- المرحلة الثالثة:

تسلم جزيئتا الحمض الغليسيري ثنائي الفوسفات، مجموعتيهما الفوسفاتية إلى ADP وتتحولان إلى جزيئتين من حمض البيروفيك (Acide pyruvique $CH_3COCOOH$)، بينما يتحول ADP إلى ATP.

ملحوظة :لكي تستمر عملية انحلال الكليكوز، يجب إعادة أكسدة NADH + H+. وتتم هذه الأكسدة، إما خلال التنفس الخلوي، عند وجود الأوكسجين، أو خلال التخمر في غياب الأوكسجين.

③ الحصيلة الطاقية لانحلال الكليكوز:

$$C_6H_{12}O_6 + 2ADP + 2Pi + 2NAD^+ \longrightarrow 2CH_3COCOOH + 2ATP + 2(NADH+H^+)$$

ادن الحصيلة الطاقية لانحلال الكليكوز هي تركيب جزيئتين من ATP بالنسبة لكل جزيئة من الكليكوز.

III – التأكسدات التنفسية ودور الميتوكندريات.

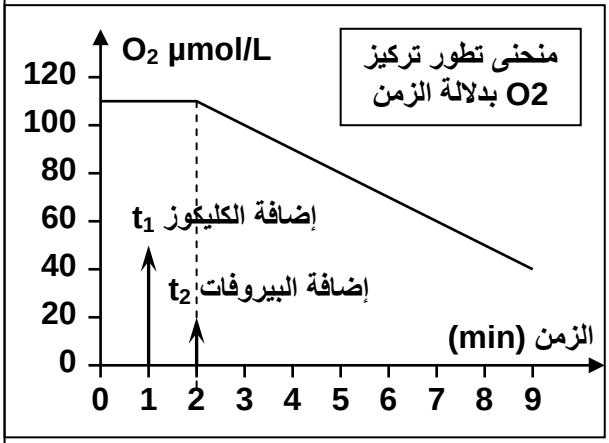
① ماذا يحدث على مستوى الميتوكندري ؟ :

a – تجارب : لمعرفة مصير حمض البيروفيك، أنجزت التجارب المبينة على الوثيقة 7.

الوثيقة 7 : تجربة

نهرس خلايا كبد فأر في محلول عيار له ph=7.4 من أجل عزل الميتوكندريات. نعرض الخليط لنبذ ذي سرعة كبيرة يمكن من الحصول على قعيرة culot من الميتوكندريات.
نخلط جزءا من القعيرة بمحلول عيار ملائم، ونضعه في مفاعل إحيائي لعدة EXAO، ثم نتتبع على شاشة الحاسوب تطور تركيز ثنائي الأوكسجين (المبيان أمامه).
في الزمن t_1 نضيف إلى المفاعل الإحيائي كمية قليلة من الكليكوز، وفي الزمن t_2 نضيف كمية قليلة من حمض البيروفيك.

1) حلل منحنى تطور تركيز O_2 بدلالة الزمن.
2) على ماذا يدل تغير كمية O_2 في الوسط ؟
3) ما هي الظاهرة الفيزيولوجية التي يعبر عنها المنحنى وأين تتم؟
4) ماذا تستنتج بخصوص التفاعلات التي تتم داخل الميتوكندري؟



b – تحليل واستنتاج :

1) قبل t1 يكون استهلاك الأوكسجين من طرف الميتوكندريات ضعيف جدا، وعند إضافة الكليكوز في الزمن t1 لا يتغير استهلاك الأوكسجين. أما عند إضافة حمض البيروفيك فان نسبة استهلاك الأوكسجين ترتفع.

2) يدل تغير كمية الأوكسجين في الوسط على كون الميتوكندريات تستعمله خلال نشاطها.

3) الميتوكندريات تستهلك الأوكسجين يعني أن الأمر يتعلق بظاهرة التنفس الخلوي.

4) نستنتج أن الميتوكندريات لا تستعمل الكليكوز مباشرة، بل تستعمل ناتج انحلال الكليكوز، الذي هو حمض البيروفيك.

إن التفاعلات الكيميائية التي تطرأ على حمض البيروفيك بوجود الأوكسجين، داخل الميتوكندري، تشكل التأكسدات التنفسية وهي تفاعلات حيهوائية.

c – خلاصة :

يتعرض مستقلب الكليكوز إلى تفككين :

ـ الأول خارج الميتوكندري على مستوى الجبلة الشفافة، و لا يحتاج إلى الأوكسجين، و يسمى انحلال الكليكوز. (glycolyse)

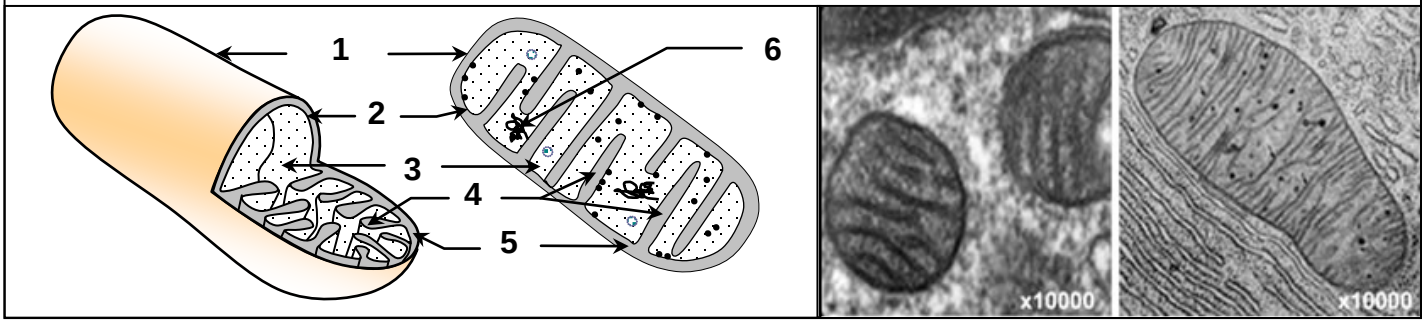
ـ الثاني على مستوى الميتوكندري و يحتاج إلى الأوكسجين و يسمى التأكسدات التنفسية. و يعتبر حمض البيروفيك هو المستقلب الذي يتعرض للتأكسدات التنفسية.

② بنية ومكونات الميتوكندريات :

a – فوق بنية الميتوكندري : أنظر الوثيقة 8.

الوثيقة 8 تظهر الوثيقة صورا الكترونوغرافية للميتوكندريات ورسوما تفسيرية لهذه العضيات.
اعتمادا على هذه المعطيات تعرف بنية الميتوكندري.

شكل 1 | شكل 2 | شكل 3



الشكل 1 = ملاحظة الكترونغرافية لمقطع طولي للميتوكندري.
الشكل 2 = ملاحظة الكترونغرافية لمقطع عرضي للميتوكندري.
الشكل 3 = رسم تخطيطي تفسيري لفوق بنية الميتوكندري.

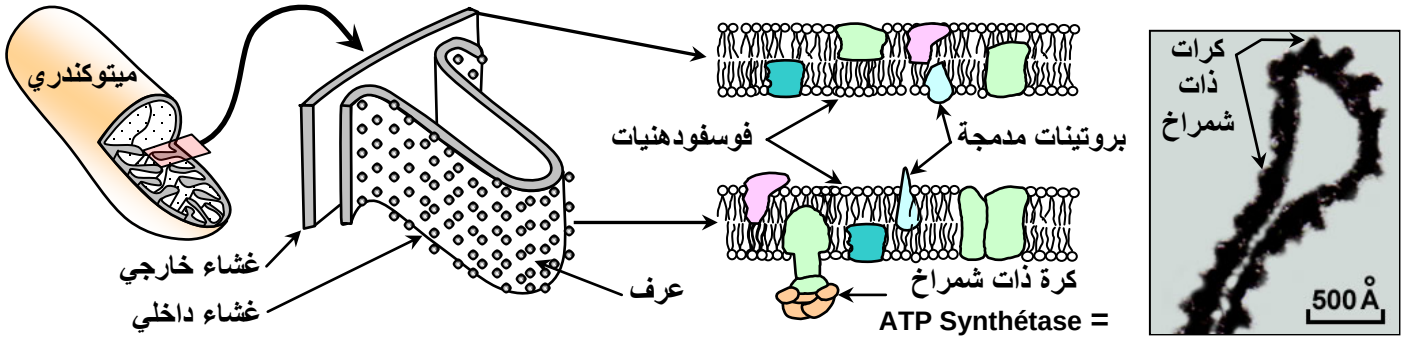
عناصر الشكل 3 من الوثيقة: 1 = غشاء خارجي . 2 = غشاء داخلي . 3 = ماتريس . 4 = أعراف .
5 = حيز بيغشائي . 6 = ADN.

تعتبر الميتوكندري من عضيات الخلية، وتتكون من غشاء مزدوج، يحيط بمادة عديمة اللون تسمى ماتريس (matrice)، تتخللها تفرعات للغشاء الداخلي تسمى أعراف (crêtes).

b – التركيب البيوكيميائي للميتوكندري : أنظر الوثيقة 9، الوثيقة 10.

الوثيقة 9 : تعطي الوثيقة بنية الغشاء الداخلي للميثوكندري ملاحظة بالمجهر الالكتروني، مع رسم تفسيري للبنية الجزيئية للغشاءين الداخلي والخارجي.

ماذا تستخلص من مقارنة البنية الجزيئية للغشاءين الداخلي والخارجي للميتوكندري؟



الوثيقة 10: التركيب الكيميائي للميتوكندري.

قارن التركيب الكيميائي لكل من الغشاء الداخلي والخارجي للميتوكندري والماتريس، واربط بين هذه المعطيات وبنية الميتوكندري.

الغشاء الخارجي	الغشاء الداخلي	الماتريس
▪ بروتينات % 62. ▪ دهنيات % 38 ذات طبيعة شبيهة بتلك الموجودة بالغشاء السيتوبلازمي.	▪ بروتينات % 80. ▪ دهنيات % 20، طبيعتها مختلفة عن الجزيئات الموجودة بالغشاء السيتوبلازمي. ▪ أنزيمات تساهم في تفاعلات أكسدة اختزال. ▪ ATP سنتتاز.	▪ جزيئات صغيرة كربونية. ▪ أنزيمات متنوعة. ▪ ناقلات الالكترونات والبروتونات. ▪ ATP و ADP و P.

يلاحظ اختلاف في التركيب بين الغشاء الخارجي، والداخلي، والماتريس، إذ تكون الماتريس غنية بالأنزيمات المزيلة للهيدروجين والمزيلة للكربون، غنية بناقلات البروتونات والالكترونات وATP، أما الغشاء الداخلي فيتميز بوجود مركبات أنزيمية مسؤولة عن تفسفر ADP إلىATP. وتدخل هذه الأنزيمات في تركيب الكرات ذات شمراخ. (sphère pédonculée).

IV – دور التأكسدات التنفسية في إنتاج ATP:

① تفاعلات دورة Krebs والأكسدة التنفسية :

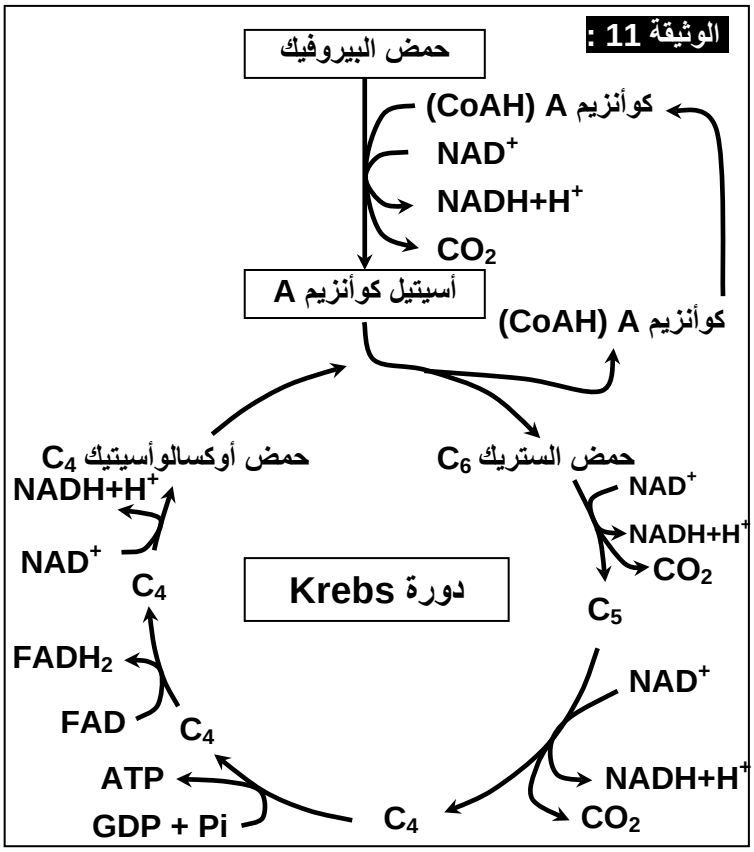
عند انتقاله إلى الميتوكندري، يخضع حمض البيروفيك لمجموعة من التفاعلات، بوجود الأوكسجين، وتسمى التأكسدات التنفسية. تبدأ هذه التفاعلات في الماتريس، حيث يتم هدم حمض البيروفيك عبر مراحل:

a – المرحلة الأولى: تكون الأسيتيل كوأنزيم A. أنظر الوثيقة 11.

تحت تأثير أنزيمات نوعية، مزيلة للهيدروجين ومزيلة للكربون، يتكون الأسيتيل كوأنزيم A في الماتريس، انطلاقا من حمض البيروفيك.

$$CH_3CO-COOH + Co\text{-}AH + NAD^+ \longrightarrow CH_3CO-CoA + NADH_2 + CO_2$$

حمض البيروفيك — كوأنزيم A — أسيتيل كوأنزيم A



b – المرحلة الثانية: دورة Krebs. انظر الوثيقة 11.

هي دورة بيوكيميائية تتكون من سلسلة من تفاعلات إزالة الكربون، وإزالة الهيدروجين.

- ينضم أستيل كوأنزيم A إلى حمض أوكسالوأسيتيك (C4) ، ليعطي حمض السيتريك (C6).
- يحرر الكوأنزيم A، قصد تثبيت شق لأستيل جديد.
- يخضع حمض السيتريك لتفاعلات إزالة الكربون، وإزالة الهيدروجين، بتواجد أنزيمات خاصة، لنحصل في الأخير على حمض الأوكسالوأسيتيك، هذا الأخير يعاود التفاعل مع أستيل كوأنزيم A.
- خلال دورة Krebs يتم تحرير CO_2، واختزال جزيئة NAD وFAD

$$NAD^+ + 2(H^+ + e^-) \text{ ----------> } NADH + H^+$$

$$FAD + 2(H^+ + e^-) \text{ ----------> } FADH_2$$

وتركب جزيئة ATP انطلاقا من أكسدة جزيئة GDP.

التفاعل الإجمالي لهدم حمض البيروفيك في الماتريس:

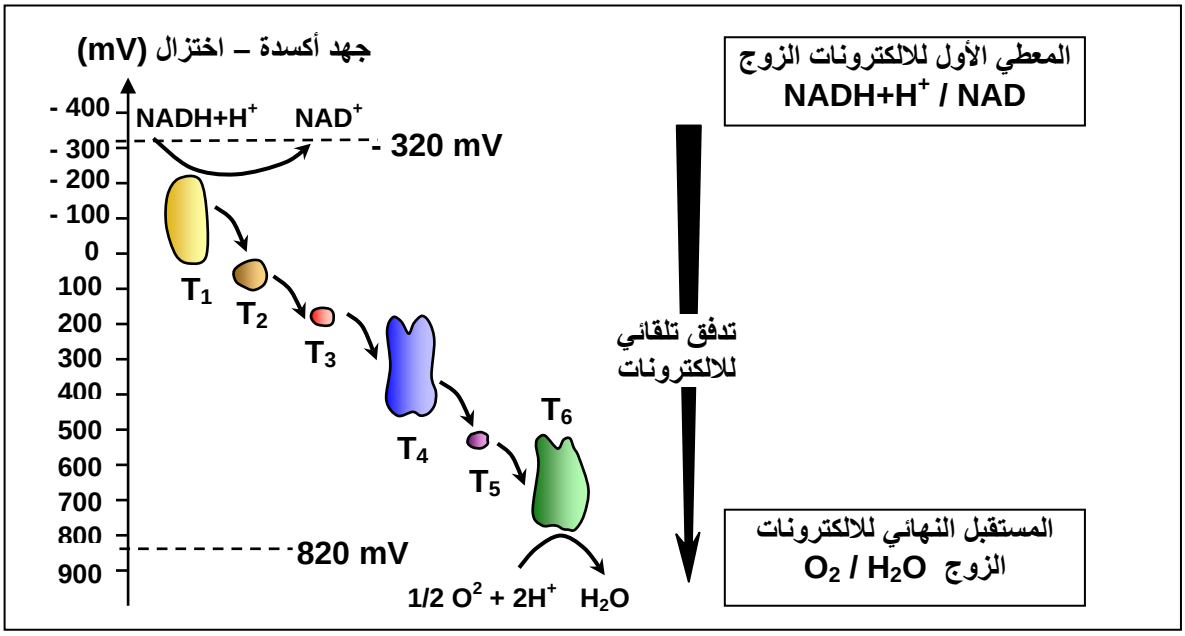
$$CH_3\text{-}CO\text{-}COOH + 4NAD^+ + FAD + GDP + P_i + 3H_2O \text{ ----------> } 4NADH_2 + ATP + 3CO_2 + FADH_2$$

c – المرحلة الثالثة: مصير $NADH+H^+$ و $FADH_2$.

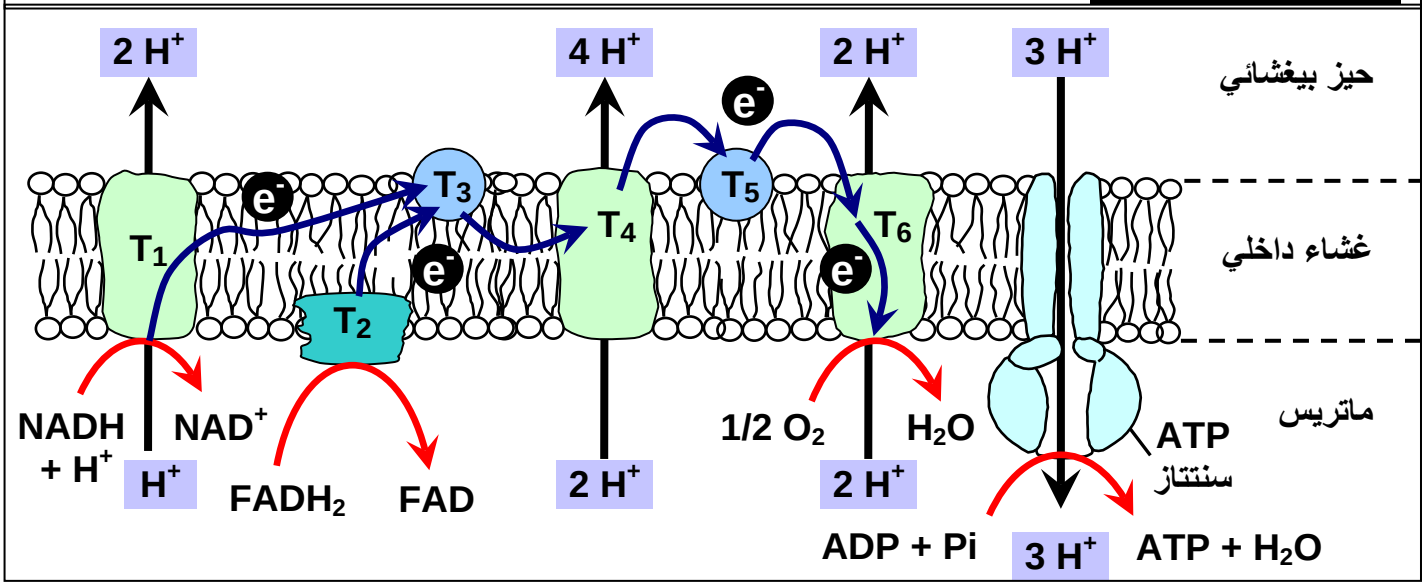
☒ انطلاقا من الوثيقة 12، والوثيقة 13، وضح كيف تحصل الأكسدة التنفسية، وأبرز أهميتها في تكون ممال البروتونات H^+ من جهتي الغشاء الداخلي للميتوكندري.

الوثيقة 12:

يتم نقل الالكترونات من الزوج $NADH+H^+/NAD^+$ إلى الزوج O_2/H_2O بواسطة تفاعلات أكسدة-اختزال، عبر السلسلة التنفسية، وذلك بشكل تلقائي حسب تبدل الجهد أكسدة - اختزال.



الوثيقة 13: الأكسدة التنفسية



☑ خلال تفاعلات أكسدة الكليكوز، يتم اختزال NAD^+ و FAD، لتعطي $NADH+H^+$ و$FADH_2$. ادن هذه جزيئات ناقلة للبروتونات والالكترونات، يجب أن تعود إلى حالتها المؤكسدة.

تتم أكسدة هذه المتقبلات داخل الغشاء الداخلي للميتوكندري. حيث تطرح البروتونات H^+ في الحيز البيغشائي، بينما تسلم الالكترونات إلى نواقل توجد على مستوى الغشاء الداخلي للميتوكندري، وتكون السلسلة التنفسية (la chaîne respiratoire).

إن الالكترونات تتدفق انطلاقا من المعطي الأول $NAD^+/NADH+H^+$ إلى المستقبل النهائي وهو الزوج O_2/H_2O. يسمى هذا التدفق الأكسدة التنفسية.

يتفاعل الأوكسجين المختزل O^{2-} مع $2H^+$ ، ليعطي جزيئة الماء، وتتم هذه العملية داخل ماتريس الميتوكندري.

$$1/2\ O_2 + 2H^+ \text{ ----------> } H_2O$$

خلال مرور الالكترونات من أول معط $NADH + H^+$ إلى أخر متقبل O_2، يتم طرح بروتونات H^+ داخل الحيز البيغشائي، فيرتفع بذلك تركيز H^+ في هذا الحيز، مما يترتب عنه ممال للبروتونات H^+ من جهتي الغشاء الداخلي.

② اختزال الأوكسجين والتفسفر المؤكسد:

a – معطيات تجريبية:

التجربة الأولى: أنظر الوثيقة 14.

الوثيقة 14: العلاقة بين اختزال O_2 وتدفق H^+.

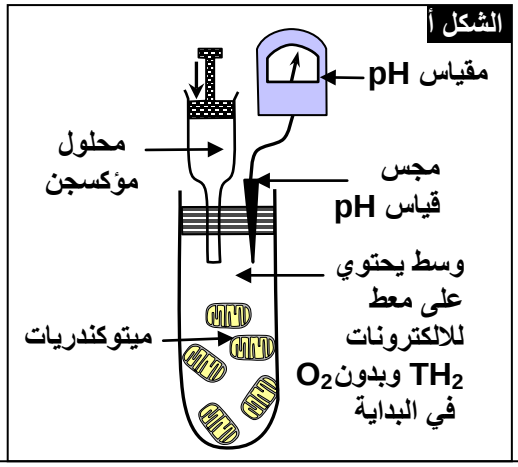
وضعت ميتوكندريات على شكل محلول عالق، في وسط يحتوي على معطي للبروتونات، خال من الأوكسجين (أنظر الشكل أ)، مع تتبع تطور تركيز ايونات H^+ في هذا الوسط قبل وبعد إضافة محلول غني بثنائي الأوكسجين (أنظر الشكل ب).

✱ إضافة O_2 : تأكسد المعطي للالكترونات (TH_2) ينتج عنه خروج البروتونات خارج الميتوكندري.

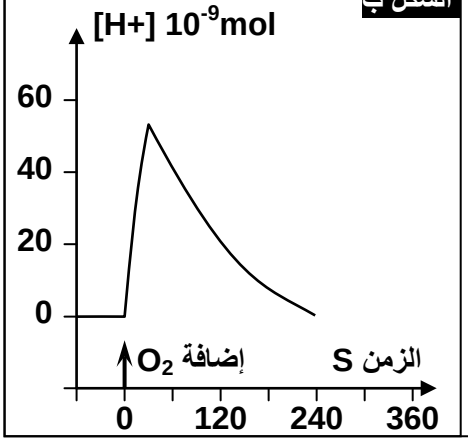
✱ تحدث إضافة ATP انخفاض pH أي ارتفاع تركيز H^+. عندما يستنفد O_2 تعود H^+ إلى داخل الميتوكندري.

ماذا تستنتج من تحليل هذه المعطيات التجريبية؟

الشكل أ



الشكل ب



تحليل معطيات التجربة الأولى:

قبل إضافة O_2، تركيز H^+ في المحلول ضعيف (pH مرتفع). وبعد إضافة O_2 إلى الوسط، تم تسجيل ارتفاع سريع في تركيز H^+ (انخفاض PH)، ثم بدأ يتراجع تدريجيا.

يرجع ارتفاع تركيز H^+ في الوسط، بعد إضافة O_2، إلى انتقال النواقل (TH_2) أي ($FADH_2$, $NADH_2$) من حالتهما المختزلة إلى حالتهما المؤكسدة حسب التفاعل التالي:

$$TH_2 \text{ ----------> } T + 2H^+ + 2e^-$$

يرجع انخفاض تركيز H^+ في الوسط بعد ذلك، إلى استنفاذ O_2 اثر تفاعله مع الالكترونات والبروتونات، حيث يعتبر المتقبل النهائي للبروتونات والالكترونات، حسب التفاعل التالي:

$$1/2\ O_2 + 2H^+ \ 2e^- \text{ ----------> } H_2O$$

التفاعل الإجمالي بعد إضافة O_2 للوسط هو :

$$TH_2 + 1/2\ O_2 \text{ ----------> } T + H_2O$$

التجربة الثانية :

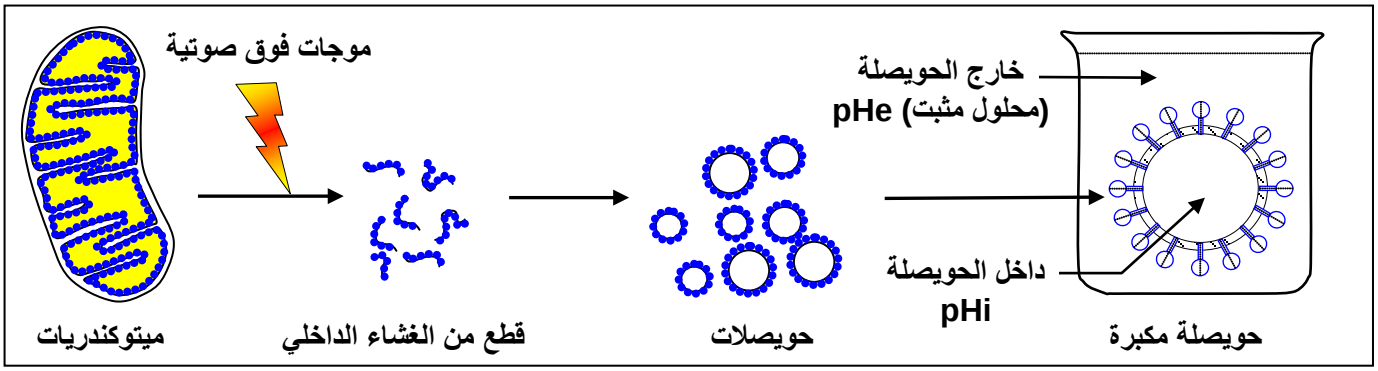
للكشف عن شروط إنتاج ATP على مستوى الكرات ذات شمراخ، نقوم بالتجارب المبينة على الوثيقة 15.

الوثيقة 15: الكشف عن دور الكرات ذات شمراخ (نقل البروتونات والتفسفر المؤكسد لجزيئة ATP).

✱ التجربة a:

بعد عزلها، تخضع الميتوكندريات لفعل الموجات فوق الصوتية مما يؤدي إلى تقطيعها وجعل أعراف الغشاء الداخلي تنقلب وتكون حويصلات مغلقة ، تكون الكرات ذات شمراخ المرتبطة بها موجهة نحو الخارج. توضع هذه الحويصلات بحضور ADP وPi في محاليل مثبتة تختلف من حيث pH.

المعطيات والنتائج التجريبية مبينة على الرسم أسفله:



- إذا كان pH الداخلي (pHi) أصغر من pH الخارجي (pHe)، يلاحظ تفسفر ADP.
- إذا كان pH الداخلي (pHi) يساوي pH الخارجي (pHe)، يلاحظ انعدام تفسفر ADP.

✱ التجربة b:

DNP (2,4dinitrophénol) مادة ذوابة في الدهون، بحضور هذه المادة يصبح الغشاء الداخلي للميتوكندري نفوذا للبروتونات، في هذه الحالة يلاحظ أن اختزال الأكسجين يتم بصفة عادية بينما يتوقف تفسفر ADP.

انطلاقا من هذه المعطيات التجريبية استخرج شروط تركيب ATP داخل الميتوكندري. ثم أبرز العلاقة بين اختزال الأوكسجين والتفسفر المؤكسد.

تحليل معطيات التجربة الثانية:

✓ تبين التجربة a أن فسفرة ADP إلى ATP، يتم على مستوى الكريات ذات شمراخ (ATP Synthétase). وتتطلب هذه الفسفرة وجود فارق في تركيز H^+ بين الحيز البيغشائي والماتريس، حيث يفوق تركيزه في الحيز البيغشائي، تركيزه في الماتريس.

✓ تبين التجربة b أن الغشاء الداخلي للميتوكندري ضروري لإنتاج ATP، فهو المسئول عن خلق الفارق في تركيز H^+، بين الحيز البيغشائي والماتريس، هذا الفارق في التركيز يعتبر ضروريا لفسفرة ADP إلى ATP من طرف الكريات ذات شمراخ.

b – خلاصة:

عند وجود متقبل للالكترونات (O_2)، تتم أكسدة ($NADH_2$, $FADH_2$)(معط للالكترونات)، الشيء الذي يعطي طرح للبروتونات H^+، فترتفع نسبتها داخل الحيز البيغشائي.

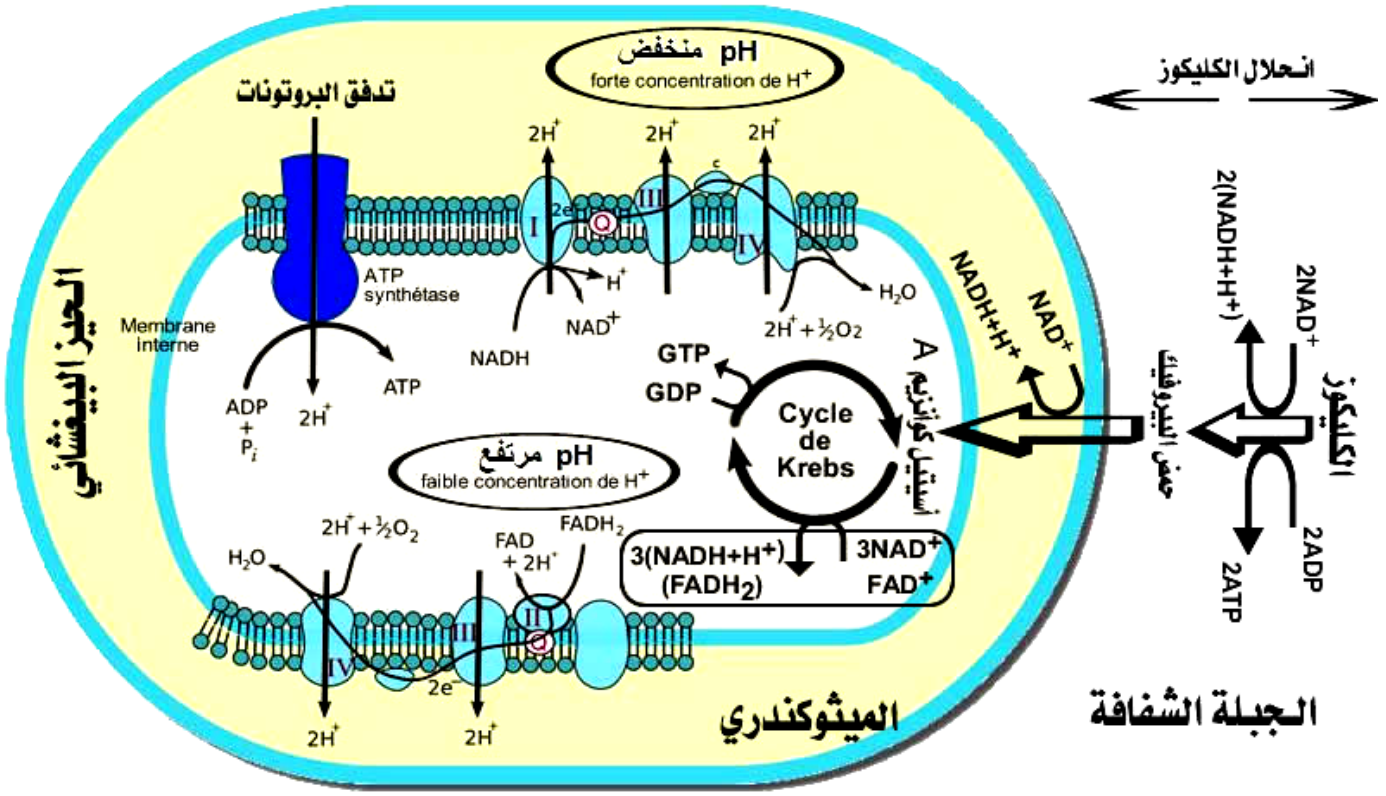
بفعل اختلاف تركيز H^+ من جهتي الغشاء الداخلي للميتوكندري، تتدفق هذه البروتونات إلى الماتريس عبر الكرات ذات شمراخ، والتي تستغل طاقة التدفق لتنتج ATP من خلال تثبيت مجموعة فوسفاتية على جزيئة ADP. تسمى هذه العملية التفسفر المؤكسد Phosphorylation oxydative.

V – مقارنة الحصيلة الطاقية للتنفس والتخمر:

① قياس مردودية التنفس والتخمر :

أ - **المردود الطاقي للتنفس:** أنظر الوثيقة 16.

الوثيقة 16:



اعتمادا على معطيات الوثيقة أعلاه، حدد عدد جزيئات ATP المنتجة انطلاقا من الأكسدة الكاملة لجزيئة واحدة من الكليكوز، في حالة التنفس. علما أن أكسدة جزيئة واحدة من $NADH_2$، تمكن من تركيب ثلاث جزيئات من ATP. وأكسدة جزيئة واحدة من $FADH_2$، تمكن من تركيب جزيئتين من ATP. و أكسدة جزيئة GTP تمكن من تركب جزيئة واحدة من ATP.

إن الأكسدة الكاملة لجزيئة الكليكوز، تعطي :

- خلال انحلال الكليكوز نحصل على $2(NADH+H^+)$ + 2ATP + جزيئتين من حمض البيروفيك.
- خلال دورة Krebs يتكون $3(NADH+H^+)$ + $1(FADH_2)$ + 1ATP. ادن بالنسبة لجزيئتين من حمض البيروفيك، الناتجتين عن انحلال جزيئة واحدة من الكليكوز، يتكون $8(NADH+H^+)$ + $2(FADH_2)$ + 2ATP.
- إن عدد ATP المركبة عند استهلاك جزيئة واحدة من الكليكوز هو:

4 ATP	4 ATP
30 ATP	10 $(NADH+H^+)$
4 ATP	$2(FADH_2)$

المجـمـوع :
38 ATP

نظريا نحصل على ATP38 لكن في الواقع نحصل على ATP36 فقط لأن نواقل NADH الناتجة في الجبلة الشفافة لا تدخل إلى الميتوكندري ولكن تعوض بنواقل 2FADH باستثناء خلايا القلب والكبد حيث تعوض بنواقل NADH .

☒ أحسب المردود الطاقي للتنفس، علما أن الطاقة الإجمالية التي يمكن استخراجها من مول واحد من الكليكوز، تحت درجة حرارة 37 °C، وبوجود الأوكسجين، هي: 2860 KJ، وأن حلمأة مول واحد من ATP، يؤدي إلى تحرير طاقة تساوي 30.5 KJ.

☑ بما أن مول واحد من الكليكوز يركب 38 ATP، فالطاقة التي يحررها مول واحد من الكليكوز هي:
1159 KJ = (30.5 x 38)

ادن المردود الطاقي للتنفس هو:

$$\text{40,5 \%} = 100 \times \frac{1159}{2860}$$

ب- المردود الطاقي للتخمر:

☒ أحسب المردود الطاقي للتخمر، علما أن استهلاك جزيئة واحدة من الكليكوز في حالة التخمر اللبني، يحرر فقط جزيئتين من ATP.

☑ المردود الطاقي للتخمر هو :

$$\text{2.13 \%} = 100 \times \frac{(2 \times 30.5)}{2860}$$

② مقارنة وتفسير :

- أثناء التنفس يتحلل المستقلب (الكليكوز) كليا، فيطرح مجموع الطاقة الكامنة فيه، على شكل طاقة كيميائية (1159 KJ)، وطاقة حرارية (1701 KJ)، مع تكوين حثالة معدنية ($CO_2 + H_2O$) خالية من الطاقة.

- أثناء التخمر، لا يتحلل المستقلب (كليكوز) كليا وبالتالي لا يطرح إلا جزء من الطاقة الكامنة 167) (KJ، جزء منها على شكل طاقة كيميائية (61 KJ)، وجزء على شكل طاقة حرارية 106 KJ) (، مع حثالة عضوية (حمض لبني)، مازالت تحتوي على طاقة كامنة. = (2860 – 167)/2) .1346.5 KJ/ac.lactique)