الجزء 1

استهلاك المادة العضوية وتدفق الطاقة

استرداد منظم للمعارف

تمرين 1

يعتبر التنفس والتخمر وسيلتين لتحويل الطاقة الكامنة في المواد العضوية المستهلكة من طرف الخلايا، إلى طاقة كامنة في جزيئة ATP.

- **استعرض بإيجاز مراحل التنفس والتخمر مبرزا المعادلة العامة مقارنا الحصيلة والمردودية الطاقية لكل منهما.**

استثمار المعارف وتوظيف القدرات

تمرين 1

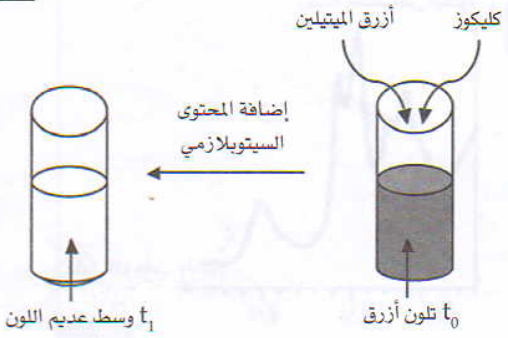
لدراسة كيفية استخلاص الطاقة من المادة العضوية نقترح التجارب والمعطيات التالية :

■ **التجربة 1:**

تم استخلاص المحتوى السيتوبلازمي (بدون عضيات) لخلايا الخميرة بواسطة تقنية النبذ؛ ثم وُضع في أنبوب اختبار به كليكوز وكشاف الأكسدة والإختزال : أزرق الميتيلين الذي يكون أزرقا في حالة الأكسدة ويتحول إلى عديم اللون في حالة الاختزال.

في نهاية التجربة اختفى الكليكوز كليا مع ظهور حمض البيروفيك (الوثيقة 1).

الوثيقة 1

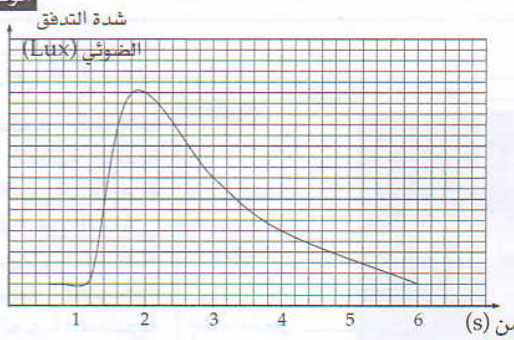


■ **التجربة 2 :**

تُصدر حشرات الحباحب «luciole» إضاءة أثناء فترة الإستعراض الزواجي، وتعرف الظاهرة بالإضاءة الإحيائية وتنتج عن تفاعل مركب Luciférine - Luciférase مع جزيئة ATP.

تم تهييء وسط تجريبي يحتوي على المحتوى السيتوبلازمي للخميرة وعلى مركب Luciférine - Luciférase وتم تتبع تطور شدة التدفق الضوئي بواسطة مضياء. تترجم الوثيقة 2 النتائج المحصل عليها.

الوثيقة 2



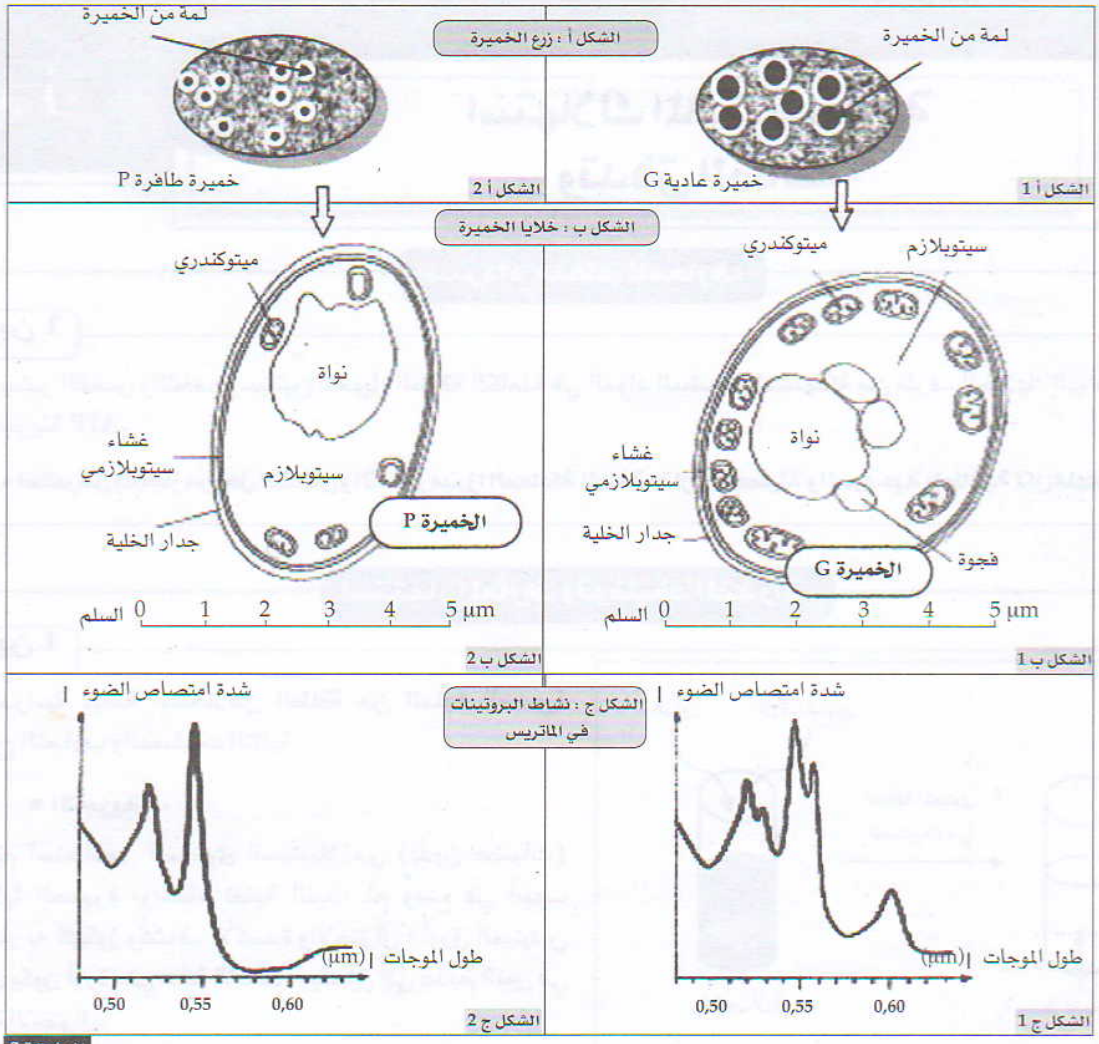
حلل النتائج المحصل عليها انطلاقا من نتائج التجربتين 1 و2 بيّن المرحلة الاستقلالية التي تم الكشف عنها والتفاعلات التي تتم خلالها.

توجد سلالتان من الخميرة: سلالة G متوحشة وسلالة P طافرة، تتميز هذه الأخيرة بخلل على مستوى الميتوكندري.

■ **التجربة 3:** تم زرع كل سلالة من الخميرة (G و P) في وسط زرع به كليكوز. يحتوي الوسطان على نفس كمية الكليكوز ويوجدان في نفس ظروف الزرع. أعطت نتيجة الزرع الشكلين أ1 وأ2 من الوثيقة 3. في نهاية هذه التجربة لوحظ اختفاء الكليكوز في أ 1 وظهور الإيثانول في أ 2 .

كما أعطت ملاحظة عينة من كل سلالة بالمجهر الإلكتروني الشكلين ب 1 وب 2.

كما بين تتبع شدة امتصاص الضوء λ بـ µm من طرف أنزيمات ماتريس الميتوكندري لكل سلالة النتائج الواردة في الشكلين ج 1 و ج 2 من الوثيقة 3.

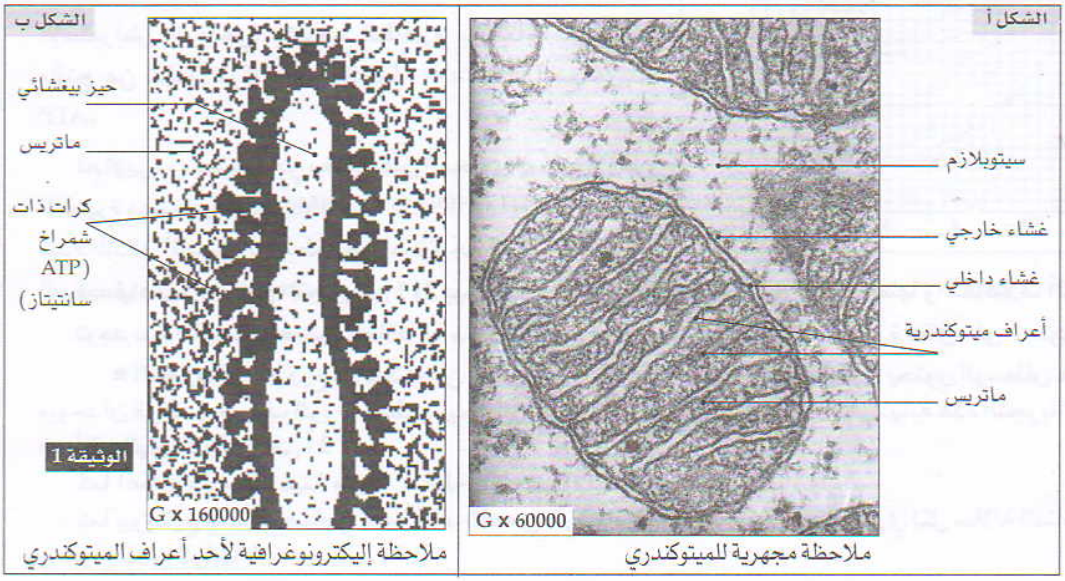


الوثيقة 3

2 - بعد تحليل النتائج الواردة في الوثيقة 3 استنتج المسلك الاستقلابي المعتمد لكل سلالة من الخميرة وعلاقته بحجم اللمات.

تمرين 2

تستمد الخلايا الغير الذاتية التغذية الطاقة اللازمة لنشاطها من استغلال وتحويل الطاقة الكيميائية المتواجدة في المادة العضوية التي تحصل عليها من الوسط الذي تعيش فيه، تتوفر هذه الخلايا على ميتوكندريات تتدخل في تفاعلات أكسدة - اختزال تمكن من استخلاص جزء هام من الطاقة من المادة العضوية وذلك بوجود O_2.



الوثيقة 1

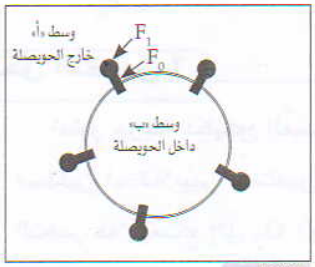
• باستعمال الموجات الفوق صوتية تمت تجزئة الميتوكندري فتشكلت حويصلات للأغشية الداخلية بها كرات ذات شمراخ موجهة نحو الخارج، توضع هذه الحويصلات في أوساط مختلفة pH بوجود ADP وPi وتم إنجاز التجارب التالية (الوثيقة 2):

التجربة	الوسط - أ -	الوسط - ب -	النتيجة الملاحظة
1	pH = 7	pH = 7	عدم تشكل ATP
2	pH = 7	pH = 4	تشكل ATP
3	Oligomycine pH = 7	pH = 4	عدم تشكل ATP
4	عينات ADP وPi pH = 7	pH = 4	عدم تشكل ATP
5	FCCP + pH = 7	pH = 4	عدم تشكل ATP

الشكل أ

Oligomycine : مادة تكبح نشاط المركب ATP سانتيتاز

FCCP : مادة تجعل الغشاء نفوذاً للبروتينات H^+ من الحيز البيغشائي إلى الماتريس



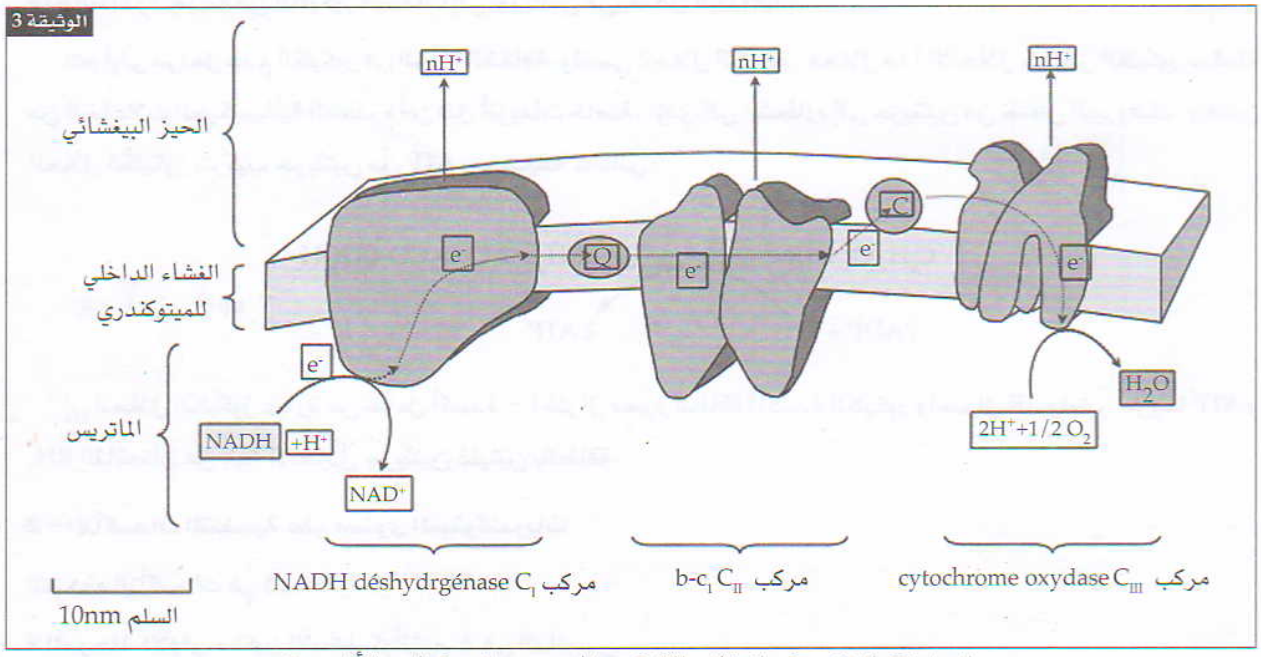
الشكل ب

حويصلة غشائية بها كرات ذات شمراخ

الوثيقة 2

• يحتوي الغشاء الداخلي للميتوكندري على مركبات أنزيمية مختلفة C_I و C_{II} و C_{III}، كما يحتوي على جزيئات متحركة (Ubiquinone Q و Cytochrome C) تنقل الإلكترونات بين المركبات الأنزيمية.

الوثيقة 3



السلسلة التنفسية، انتقال الإليكترونات بين المركبات الأنزيمية

سؤال : انطلاقا من الاستغلال المنطقي والممنهج للوثائق 1، و2، و3 وبالاعتماد على معلوماتك بين كيف تنتج الخلايا ATP انطلاقا من نواتج أكسدة المادة العضوية داخل الميتوكندري.

استرداد منظم للمعارف

حل التمرين 1

تعتبر جزيئة الكليكوز المُستقلَب الطاقي الرئيسي لجميع الخلايا التي تعمل على هدمه لاستخراج الطاقة الكامنة به حسب مسلكين استقلابيين مختلفين : التنفس والتخمر. يحدث التنفس في وسط يسود فيه الأكسجين (وسط حي هوائي). أما التخمر فلا يحتاج إلى O_2 (وسط حي لاهوائي). هناك أنواع عديدة من التخمرات أهمها : التخمر الكحولي الذي ينتج الإيثانول و CO_2 والتخمر اللبني الذي يعطي الحمض اللبني.

1 – انحلال الكليكوز على مستوى الجبلة الشفافة : مرحلة مشتركة بين التنفس والتخمر

هو عبارة عن مجموعة من التفاعلات الكيميائية تتم على مستوى الجبلة الشفافة، وتتطلب أنزيمات نوعية. تتحول خلال هذه الظاهرة جزيئة من الكليكوز فوسفات إلى جزيئتين من حمض البيروفيك.

تتم أولى مراحل هدم الكليكوز في الجبلة الشفافة، وتسمى انحلال الكليكوز. فخلال هذا الانحلال يتعرض الكليكوز لسلسلة من التفاعلات الحيكيميائية المحفزة من قبل أنزيمات خاصة، تؤدي إلى انشطاره إلى جزيئتين من حمض البيروفيك. ويقترن انحلال الكليكوز بتركيب جزيئتين من ATP. وحصيلته كالتالي :

$$C_6H_{12}O_6 + 2R \longrightarrow 2RH_2 + 2\,CH_3\text{-}CO\text{-}COOH$$

$$2ADP + 2Pi \longrightarrow 2\,ATP$$

إن انحلال الكليكوز عبارة عن تفاعل أكسدة – اختزال محرر للطاقة (أكسدة الكليكوز واختزال R). وتعتبر جزيئتا ATP و RH_2 الناتجتان عن هذا الانحلال جزيئتين غنيتين بالطاقة.

2 – التأكسدات التنفسية على مستوى الميتوكندريات

تتم هذه التأكسدات في ثلاث مراحل :

- **المرحلة الأولى :** تكون الأستيل كوأنزيم A في الماتريس.

يؤدي تأثير أنزيمات مُزيلة للهيدروجين وأنزيمات مُزيلة لثاني أوكسيد الكربون إلى انتزاع ذرة الهيدروجين وانتزاع جزيئة ثاني أوكسيد الكربون من حمض البيروفيك $(CH_3 - CO - COOH)$، ويرتبط الشق أستيل $(CH_3 - CO)$ المتبقي عن هذا التفكك بجزيئة صغيرة تدعى كوأنزيم A $(Co - A)$، فيتكون أستيل كوأنزيم A.

- **المرحلة الثانية :** دورة KREBS في الماتريس.

يثبَّت الشق أستيل على حمض أوكسالو أستيك (C_4) فينتج عنه تكون حمض الستريك (C_6). أما الكوانزيم A فيتحرر قصد تثبيت شق أستيل جديد.

بمجرد تشكل حمض الستريك تنطلق دورة KREBS.

▪ **المرحلة الثالثة :** اختزال الأكسجين والتفسفر المؤكسد.

يتم على مستوى الغشاء الداخلي للميتوكوندري، إعادة أكسدة متقبلات الإلكترونات والبروتونات ($NADH_2$ و $FADH_2$) التي اختزلت خلال انحلال الكليكوز وتفكك حمض البيروفيك خلال دورة KREBS. تسترجع هذه المتقبلات حالتها المؤكسدة بتسليمها البروتونات والإلكترونات إلى سلسلة من جزيئات مرصعة في الغشاء الداخلي للميتوكندري تسمى السلسلة التنفسية. تساهم السلسلة التنفسية في تفاعلات أكسدة واختزال وهي مسؤولة عن تدفق الإلكترونات والبروتونات انطلاقا من المعطي الأولي : الزوج $NADH_2$ / NAD^+ إلى المتقبل النهائي: الزوج H_2O / O_2، وتدعى عملية التدفق هذه الأكسدة التنفسية.

يمكن تمثيل المعادلة العامة للتنفس بالنسبة للكليكوز كنموذج على الشكل التالي :

$$C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O + \text{حرارة}$$

38ATP / (36ATP) أو — 38ADP+38Pi / (36ADP+36Pi) أو

3 – التخمر الكحولي

في غياب الأكسجين يقوم حمض البيروفيك بدور المتقبل للهيدروجين، ينتج عن هذا التفاعل تكون الإيثانول وإعادة أكسدة $NADH_2$.

$$2NAD^+ + 2(CH_3 - CH_2OH) + 2CO_2 \qquad 2(CH_3 - CO\,COOH) + 2NADH_2$$

2 إيثانول ⟵ 2 حمض البيروفيك

يحدث هذا التفاعل على مستوى الجبلة الشفافة

4 – مقارنة الحصيلة الطاقية للتنفس والتخمر

التنفس	التخمر
– التنفس والتخمر طريقتان لهدم المستقلبات وتحويل جزء من الطاقة الكامنة في هذه الأخيرة إلى ATP ويحرر الجزء الآخر في الوسط على شكل حرارة. – التنفس والتخمر يبتدئان دائما بمرحلة مشتركة تتم داخل الجبلة الشفافة وهي انحلال الكليكوز.	
– انطلاقا من مول من الكليكوز تنتج الخلية 36 إلى 38 ATP : كمية الطاقة كبيرة.	– 2 ATP خلال التخمر الكحولي :كمية قليلة من الطاقة.
– الطاقة الإجمالية التي يمكن استخراجها من مول من الكليكوز خلال التنفس. $C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \rightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O + \boxed{1098kJ}$	الطاقة المستخرجة من مول من الكليكوز خلال التخمر الكحولي. $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2(CH_3 - CH_2OH) + 2CO_2\ \boxed{61kJ}$
– هدم كامل لجزيئة الكليكوز وتحرير كل الطاقة الكامنة فيها.	– هدم جزئي لجزيئة الكليكوز ناتج عن التخمر الكحولي، حيث أن الكحول الاثيلي مازال يحتوي على طاقة.
– علما بأن مول من ATP تحرر 30,5 kJ، إذن استهلاك مول من الكليكوز ينتج 1098 kJ إلى 1160 kJ.	–استهلاك مول من الكليكوز يُنتج 61 kJ.
– المردودية الطاقية : 38,4% إلى 40,5%. $\frac{1159\times100}{2\,840} = 40,5\%$ ، $\frac{1098\times100}{2\,840} = 38,4\%$	– المردودية الطاقية : $\frac{61\times100}{2\,840} = 2,1\%$

ملحوظة : تُعطي الأكسدة الكيميائية لمول من الكليكوز 2840 kJ.

حل التمرين 1

1 - **في التجربة 1:** بعد إضافة الكليكوز للمحتوى السيتوبلازمي لخلايا الخميرة، يختفي هذا المستقلب ويظهر حمض البيروفيك، كما يتغير لون أزرق الميتيلين من أزرق إلى عديم اللون (اختزال أزرق الميتيلين).

⬅ يتعرض الكليكوز للأكسدة داخل المحتوى السيتوبلازمي.

في التجربة 2 : يرتفع انبعاث الإضاءة من طرف المستخلص اللاخلوي للخميرة ويصل قيمة قصوى بعد 2s ثم ينخفض انبعاث إضاءة بشكل تدريجي. تعكس هذه التغيرات استهلاك ATP.

تتمثل المرحلة الاستقلابية في انحلال الكليكوز وتحويله إلى حمض البيروفيك وفق التفاعل التالي :

$C_6H_{12}O_6$ (كليكوز) $\xrightarrow{2NAD \rightarrow 2NADH_2}$ $\xrightarrow{2ADP+2Pi \rightarrow 2ATP}$ $2(CH_3COCOOH)$ (2 حمض بيروفيك)

تحدث هذه التفاعلات داخل الجبلة الشفافة.

2 - حجم اللمات كبير لدى سلالة الخميرة العادية G مقارنة مع سلالة الخميرة الطافرة P.

خلايا الخميرة من السلالة G لها حجم كبير (5µm) وتتوفر على ميتوكندريات نامية وبأعداد كبيرة مقارنة مع خلايا السلالة P (3µm).

تبين تغيرات شدة امتصاص الضوء لدى بروتينات ماتريس ميتوكندريات السلالة G عدة قمم وهو ما يعني تدخل عدة أنزيمات (خمسة) في نشاط الميتوكندري لدى السلالة G، بينما تُبيِّن تغيرات شدة امتصاص الضوء لدى بروتينات ماتريس ميتوكندريات السلالة الطافرة P قمتان وهو ما يعني تدخل عدد قليل من الأنزيمات في نشاط الميتوكندري لدى هذه السلالة.

كل سلالة تتخذ مسلكا محددا لاستخلاص الطاقة :

السلالة G : بوجود عدد كبير من الأنزيمات، تستطيع هدم حمض البيروفيك كليا ضمن تفاعلات حلقة krebs والأكسدة التنفسية والتفسفر المؤكسد. هناك ربح كبير للطاقة يُستعمَل للنمو والتكاثر وهو ما يعكس خلايا خميرة نامية وبأعداد كبيرة (لمات كبيرة).

السلالة P : بوجود عدد قليل من الأنزيمات، لا تستطيع هذه الخلايا هدم حمض البيروفيك كليا وتلجأ للتخمر الكحولي ويتحول حمض البيروفيك إلى حتالة عضوية : الإيثانول. يتميز التخمر الكحولي بإنتاج ضئيل للطاقة يعكسه ضمور الميتوكندريات وصغر حجم الخلايا وظهور لمات صغيرة.

حل التمرين 2

▪ **الوثيقة 1 :**

تحتوي الميتوكندري على غشائين: غشاء خارجي وغشاء داخلي متعرج داخل الماتريس مشكلا أعرافا. تبين الملاحظة الإلكترونوغرافية أن الأعراف تحتوي على بنيات كروية موجهة نحو الماتريس ومرصعة في الغشاء بواسطة شمراخ. تسمى الكرات ذات الشمراخ المركب F_1 - F_0 أو ATP سانتيتاز.

▪ **الوثيقة 2 :**

- في التجربة 1 حيث يتساوى pH في الوسطين (pH = 7)، الوسط «أ» (الوسط الخارجي للحويصلة) والوسط «ب» (الوسط الداخلي للحويصلة)، لا يتم تركيب ATP.
- في التجربة 2 حيث pH الوسط الخارجي مرتفع (pH = 7)، و pH الوسط الداخلي منخفض (pH = 4) يتم تركيب ATP.

- في التجربة 3 حيث توجد مادة oligomycine في الوسط الخارجي والتي تكبح النشاط الأنزيمي للمركب F_1 - F_0 ورغم أن pH هذا الوسط أكبر من pH الوسط الداخلي، فإنه لا يتم تركيب ATP ⬅ يتطلب تركيب ATP نشاط المركب F_1 - F_0.
- في التجربة 4، حيث لا يوجد ADP وPig ورغم أن pH الوسط الخارجي أكبر من pH الوسط الداخلي، فإنه لا يتم تركيب ATP ⬅ يتطلب تركيب ATP وجود ADP و Pi.
- في التجربة 5، حيث توجد مادة FCCP في الوسط الخارجي تسمح بتدفق البروتونات H^+ من الوسط الداخلي (pH منخفض) إلى الوسط الخارجي (pH مرتفع)، لا يتم تركيب ATP ⬅ يتطلب تركيب ATP فارق تركيز H^+ بين الوسطين.

يمثل الوسط «أ» أي خارج الحويصلة الماتريس داخل الميتوكندري، أما الوسط «ب» داخل الحويصلة فهو المرادف للحيز البيغشائي.

▪ الوثيقة 3 :

تتكون السلسلة التنفسية من ثلاثة مركبات أنزيمية كبيرة (C_{III} ،C_{II} ،C_I)مرصعة في الغشاء الداخلي للميتوكندري، كل مركب بمثابة مضخة للبروتونات H^+ يغذيها تدفق الإلكترونات e^-.

يحرر ($NADH,H^+$) إلكترونات وبروتونات. تنتقل الإلكترونات بين المركبات الثلاث بواسطة جزيئة Q (Ubiquinone Q) وجزيئة C (Cytochrome C) التي تمثل ناقلات متحركة داخل الغشاء الداخلي للميتوكندري.

يصاحب تنقل الإلكترونات عبر السلسلة التنفسية تحرير للطاقة تستعمله المركبات C_I و C_{II} و C_{III} لضخ البروتونات من الماتريس في اتجاه الحيز البيغشائي. ينتهي تنقل الإلكترونات بالوصول إلى المتقبل النهائي O_2 الذي يتحول إلى ماء.

يترتب عن ضخ البروتونات إلى الحيز البيغشاني نشوء ممال H^+ من جهتي الغشاء الداخلي للميتوكندري.

$2H+ + 2e- + ½\ O_2 \longrightarrow H_2O$ ⬅

⬅ ظهور فرق جهد بين الحيز البيغشائي والماتريس

يستغل المركب ATP سانتيتاز الطاقة الناتجة عن وجود فرق جهد H^+ في تركيب ATP انطلاقا من ADP وPig وعودة أيونات H^+ إلى الماتريس عبر هذا المركب : إنها ظاهرة التفسفر المؤكسد.