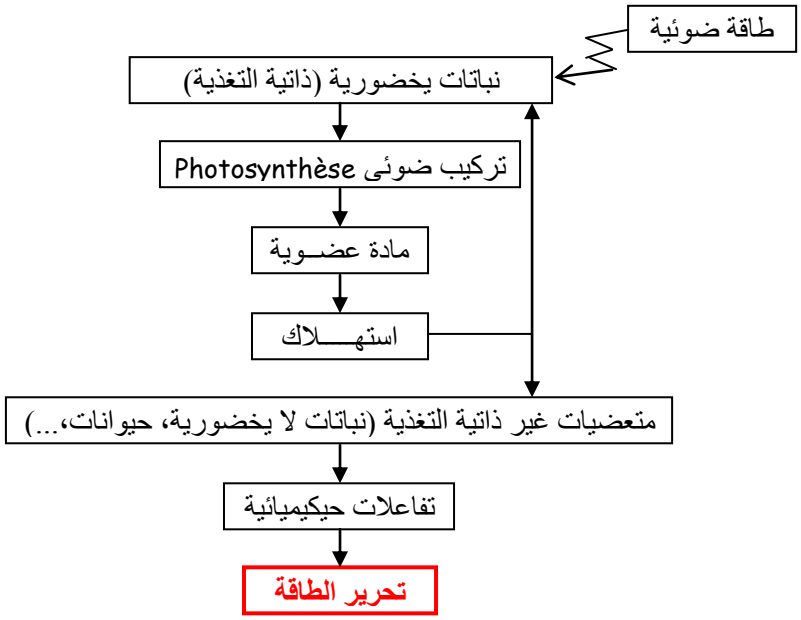
الوحدة الأولى : استهلاك المادة العضوية و تدفق الطاقة

الفصل الأول : التفاعلات المسؤولة عن تحرير الطاقة الكامنة بالمادة العضوية على مستوى الخلية

مدخل :

استعانة بمكتسباتك، أنجز خطاطة توضح من خلالها إنتاج و استهلاك المادة العضوية و تدفق الطاقة داخل حميلة بيئية.

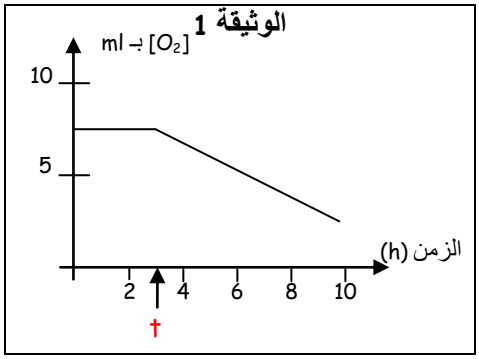


تساؤل : **كيف يتم استهلاك المادة العضوية و ما هي مراحل هدم الجزيئات العضوية و تحرير الطاقة الكامنة بها و تحويلها إلى طاقة قابلة للاستعمال ؟**

I. الكشف عن التنفس الخلوي.

1. معطيات تجريبية 1.

الخمائر عبارة عن فطريات وحيدة الخلية تنتمي إلى النباتات اليخضورية، و تكاثرها يتطلب استهلاكا للطاقة. نقوم بتحضير محلول عالق في الماء من الخميرة بمقدار 10g/l ثم نزوده بالأكسجين لمدة 30 ساعة. بعدها نقوم بوضع 5ml من محلول الخميرة العالق في الماء في حافظة مغلقة مزودة بجهاز إلكتروني يقوم بقياس تغيرات O_2 في الوسط بدلالة الزمن. مع العلم أنه في الزمن † نقوم بحقن 0,1ml من الكليكوز في الحافظة. يبين منحنى الوثيقة 1 النتائج المحصل عليها.



1. صف تطور المنحنى.

2. فسر النتائج المحصل عليها.

3. ما هي الظاهرة التي تم الكشف عنها ؟

الحـــل

1. - قبل حقن الكليكوز يبقى تركيز الأوكسجين ثابتا في الوسط.

- بعد حقن الكليكوز ينخفض تركيز الأوكسجين في الوسط.

2. - ثبات تركيز الأكسجين يُفَسَّر بعدم استهلاكه من طرف خلايا الخميرة لعدم توفرها على جزيئات الكليلوز و ذلك نظرا لبقاء الخلايا مدة طويلة في وسط حي هوائي.

- انخفاض تركيز الأوكسجين بعد حقن الكليكوز يفسر باستهلاكه من طرف خلايا الخميرة من أجل هدم جزيئات الكليكوز و تحرير الطاقة الكامنة بها.

3. إنها ظاهرة التنفس الخلوي La respiration cellulaire.

2. خلاصـــــة.

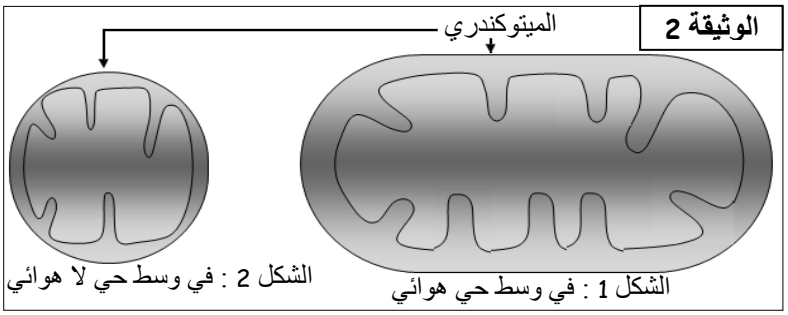
التنفس الخلوي : أكسدة جزيئات عضوية تسمى مستقلبات Métabolites بوجود O_2 و ذلك لتحرير الطاقة الكامنة بها و تحويلها إلى طاقة قابلة للاستعمال من طرف خلايا الكائن الحي.

II. مراحل التنفس الخلوي.

1. على أي مستوى من الخلية يتم التنفس الخلوي ؟

1.1. معطيات تجريبية 2.

يمكن لخميرة البيرة أن تعيش في وسط حي هوائي Aérobique و في وسط حي لا هوائي Anaérobique. في الوسط الأول، تظهر بعض العضيات الخلوية المسماة ميتوكندريات Mitochondries بواسطة المجهر الالكتروني كما هو مبين في الشكل 1 من الوثيقة 2. بينما الشكل 2، فيبين شكل الميتوكندري في وسط حي لا هوائي. **قارن الشكلين و استنتج.**



الحـــل

نلاحظ أن ميتوكندريات خلايا الوسط الحي هوائي أكبر من ميتوكندريات خلايا الوسط الحي لا هوائي. نستنتج أن الميتوكندريات هي العضيات المسؤولة عن التنفس الخلوي.

2.1. معطيات تجريبية 3.

تم وضع مجموعة من طحالب الأوغلين Euglènes (طحلب أحادي الخلية) في الظلام داخل محلول اقتياتي مشبع بالأكسجين و يحتوي على كمية من الكليكوز المشع **(G*).** مكن أخذ عينات من هذه الطحالب في الأوقات t_0 و t_1 و t_2 و t_3 و t_4 من ملاحظة مواد مشعة جديدة هي : حمض البيروفيك (P*) Acide pyruvique، و أحماض حلقة كريبس KREBS (K*)، و CO_2*. يمثل جدول الوثيقة 3 جانبه تموضع هذه المواد داخل الخلية.

الزمن	الوسط الخلوي		الوسط الخارجي
	الميتوكندري	الجبلة الشفافة	
t_0			G***
t_1		G**	G*
t_2	P*	P**	
t_3	P* K*		
t_4	K**		CO_2*

* : نشاط إشعاعي ضعيف
** : نشاط إشعاعي متوسط
*** : نشاط إشعاعي كبير

الوثيقة 3

1. حلل نتائج الجدول مبينا مصير الكليكوز.

2. ماذا تستنتج ؟

الحـــل

1. - في اللحظة t_0 : نلاحظ وجود الكليكوز في الوسط الخارجي.
- في اللحظة t_1 : دخول الكليكوز داخل الجبلة الشفافة Hyaloplasme.
- في اللحظة t_2 : تحول الكليكوز إلى حمض البيروفيك، جزء من هذا الأخير يتسرب إلى الميتوكندري.
- في اللحظة t_3 : تسرب كلي لحمض البيروفيك إلى الميتوكندري و تحوله تدريجيا إلى أحماض حلقة KREBS.
- في اللحظة t_4 : تحول كلي لحمض البيروفيك إلى أحماض حلقة KREBS و CO_2 الذي يطرح في الوسط الخارجي.

2. استنتاج : بعد دخول الكليكوز من الوسط الخارجي إلى الجبلة الشفافة، يتفكك و يتحول إلى حمض البيروفيك. هذا الأخير يتسرب إلى الميتوكندري، و يدخل في حلقة KREBS مما يؤدي إلى ظهور أحماض حلقة KREBS و CO_2.

تعتبر الميتوكندريات إذا العضيات المسؤولة عن التنفس الخلوي. وتتم هذه الظاهرة عبر مرحلتين :
- مرحلة أولى على مستوى الجبلة الشفافة و تسمى انحلال الكليكوز La glycolyse.
- مرحلة ثانية على مستوى الميتوكندري و تتطلب وجود الأوكسجين و تسمى التأكسدات التنفسية Les oxydations respiratoires.

2. انحلال الكليـــكوز La glycolyse.

تتم هذه العملية على مستوى الجبلة الشفافة بدون تدخل الأكسجين. و هي عبارة عن مجموعة من التفاعلات الكيميائية تحفزها أنزيمات، و تتمثل حصيلة هذه التفاعلات في تفكك الكليكوز إلى جزيئتين من حمض البيروفيك مع اختزال NAD^+ إلى $NADH_2$ و تكون طاقة على شكل ATP : (الوثيقة 4)

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + Pi + \text{طاقة } (\approx 7{,}3 \text{ Kcal}) \quad / \quad NAD^+ + 2e^- + 2H^+ \rightarrow NADH,H^+ \ (NADH_2)$$

- ATP (Adénosine Triphosphate) : تتكون جزيئة ATP من قاعدة آزوتية أدنين A (Adénine) و سكر الريبوز و ثلاث مجموعات فوسفاتية. حين تتعرض ATP للحلمأة تتحول إلى ADP و يرافق هذه الحلمأة تحرير طاقة : ATP = AMP ~ P ~ P (~ : رابطة غنية بالطاقة).
- NAD (Nicotinamide Adénine Dinucléotide): جزيئة ناقلة للإلكترونات و البروتونات تلعب دورا مهما في تفاعلات أكسدة - اختزال التنفسية داخل الخلية.

1 كليكوز
ATP
ADP
1 كليكوز 6 فوسفات (G6P)
ATP
ADP
1 فريكتوز ثنائي فوسفات (F1,6P)
تكسير
2 غليسير آلديد فوسفات
2 NAD⁺
2 NADH₂
2 حمض غليسيري ثنائي فوسفات
4 ADP
4 ATP
2 حمض بيروفيك CH_2-CO-COOH

الوثيقة 4

ملحوظة :

- الحصيلة الطاقية لانحلال الكليكوز علما أن $1NADH_2 \approx 3ATP$

$B.E = 6ATP + 4ATP - 2ATP = 8ATP$

- يستلزم انحلال جزيئة كليكوز أخرى تجديد NAD^+ باستمرار، يعني إعادة أكسدة $NADH_2$.

تساؤل : فكيف و أين تتم إعادة أكسدة $NADH_2$ ؟

3. الكشف عن دور الميتوكندري في إنتاج الطاقة.

3.1. معطيات تجريبية 4.

(أنظر المعطيات التجريبية + الأشكال 1 و 2 و 3 من الصفحة 16 من الكتاب المدرسي).

1. صف تطور المنحنى.

2. ماذا تستنتج ؟

الحـــل

1. - في بداية التجربة يكون تركيز O_2 ثابتا.

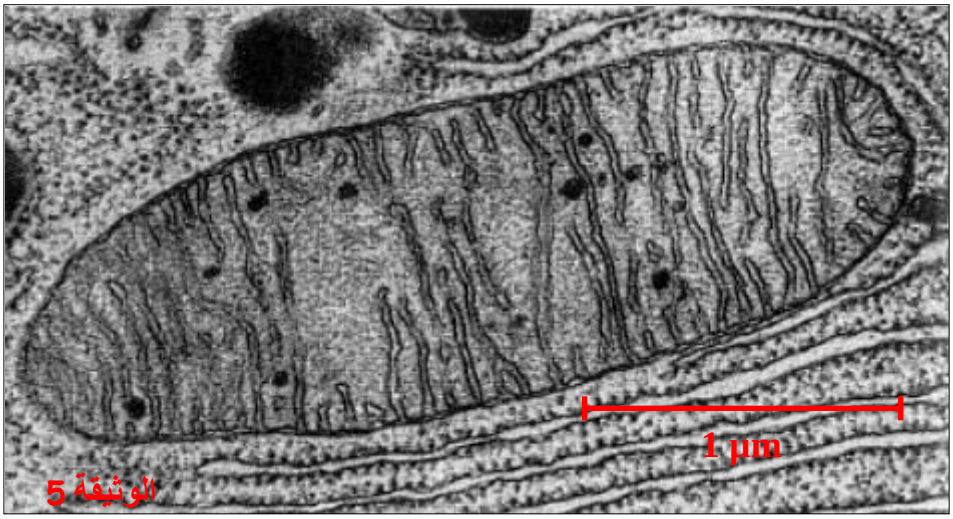
- رغم إضافة الكليكوز إلى المفاعل الإحيائي يستمر $[O_2]$ في الثبات.

- مباشرة بعد إضافة البيروفيك إلى المفاعل الإحيائي نلاحظ انخفاضا مهما في $[O_2]$ مع مرور الزمن.

2. نتائج التجربة تبين أن الميتوكندريات لا تستهلك O_2 بوجود الكليكوز، بينما تستهلكه بوجود حمض البيروفيك. هذا يعني أن الميتوكندريات لا تستعمل الكليكوز مباشرة كمستقلب بل تستعمل حمض البيروفيك من أجل إنتاج الطاقة.

3.2. فوق بنية الميتوكندري (الوثيقة 5).

الميتوكندري عبارة عن عضي خلوي محاط بغشاءين متراكبين يفصلهما فضاء يسمى حيز بيغشائي Espace intermenbranaire. كما يَحُد الغشاء الداخلي فضاء يسمى ماتريس Matrice. يرسل الغشاء الداخلي عدة أعراف Crêtes داخل الماتريس و يدخل في تركيبه دهنيات و بروتينات أهمها مركبات بروتينية تسمى كرات ذات شمراخ Sphères pédonculées. بالإضافة إلى أنزيمات تساهم في تفاعلات الأكسدة - اختزال.



4. مرحلة التأكسدات التنفسية على مستوى الميتوكندري.

4.1. تفاعلات دورة كريبس KREBS (الوثيقة 6).

بعد تسرب حمض البيروفيك الناتج عن انحلال الكليكوز نحو الماتريس، يتحول إلى أستيل كوأنزيم Acétyl CoA A. هذا التحول يكون مصاحبا باختزال NAD^+ إلى $NADH_2$ و طرح CO_2.

على مستوى الماتريس، تعمل سلسلة دورة KREBS على هدم الشق أستيل و تجديد حمض الأوكسالوأستيك Acide Oxaloacétique الضروري من أجل بدء دورة جديدة.

تتميز دورة KREBS بـ :

- تفاعلات إزالة الكربون C و تحرير CO_2.
- تفاعلات إزالة الهيدروجين H الذي تستقبله نواقل الهيدروجين NAD^+ و FAD^+ التي تتحول من حالة التأكسد إلى حالة الاختزال :

$NAD^+ + 2H^+ + 2e^- \rightarrow NADH_2$ / $FAD^+ + 2H^+ + 2e^- \rightarrow FADH_2$.

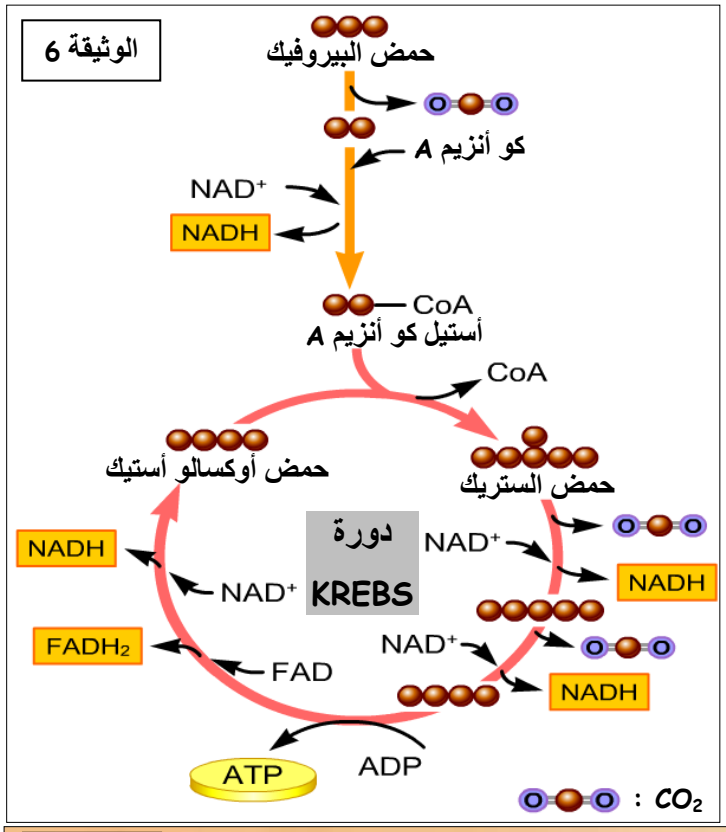
- تفاعل تفسفر ATP انطلاقا من ADP و P_i.

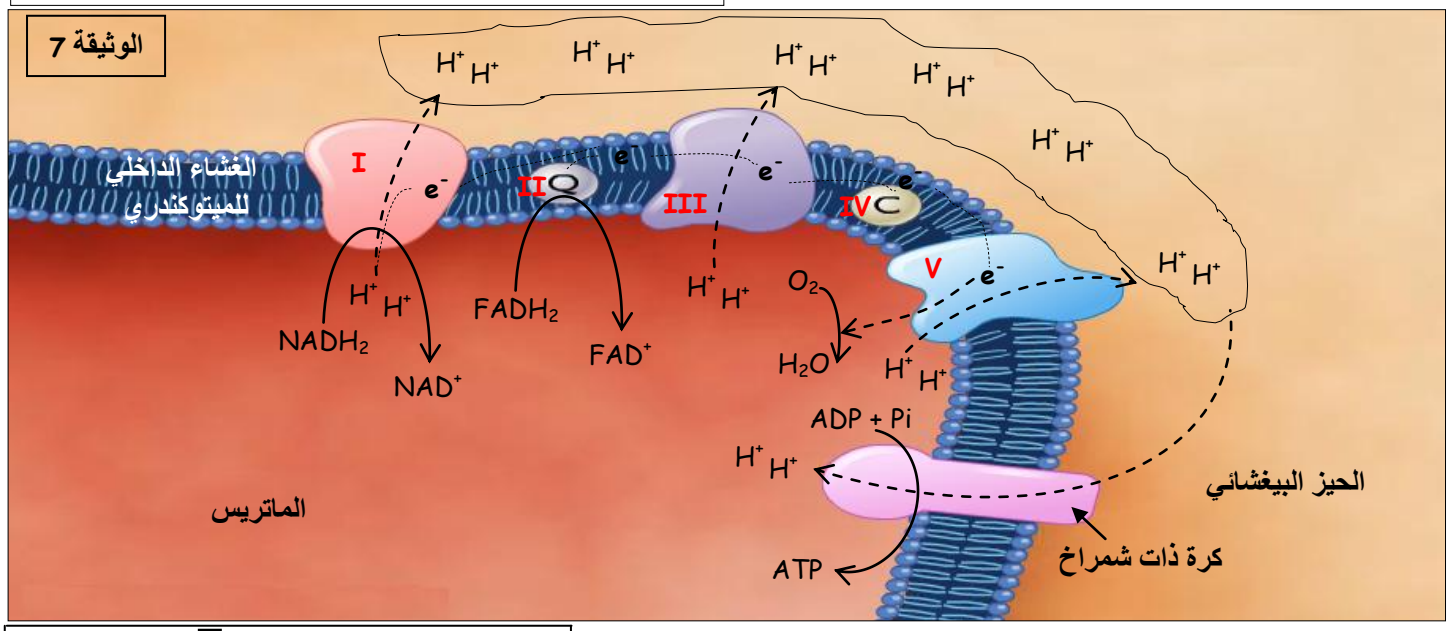
تساؤل : ما هو مصير $NADH_2$ و $FADH_2$ ؟

2.4. مرحلة اختزال الأوكسجين على مستوى السلسلة التنفسية و تركيب ATP عن طريق التفسفر المؤكسد (الوثيقة 7).

يتم على مستوى الغشاء الداخلي للميتوكندري أكسدة $NADH_2$ و $FADH_2$ إلى NAD^+ و FAD^+، إذ تقوم $NADH_2$ و $FADH_2$ بتسليم H^+ و الإلكترونات إلى مركبات بروتينية متموضعة بالغشاء الداخلي للميتوكندري تسمى السلسلة التنفسية Chaîne respiratoire. وبذلك يتم طرح البروتونات في الحيز البيغشائي من جهة، و تسليم الإلكترونات إلى الأوكسجين من جهة أخرى وذلك من أجل تركيب الماء حسب التفاعل التالي : $\frac{1}{2}\ O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$. تجدر الإشارة إلى أن أكسدة $NADH_2$ تعطي 3ATP بينما أكسدة $FADH_2$ تعطي 2ATP.

تساؤل : ما هو مصير البروتونات التي تم طرحها في الحيز البيغشائي ؟





تمرين مدمج :

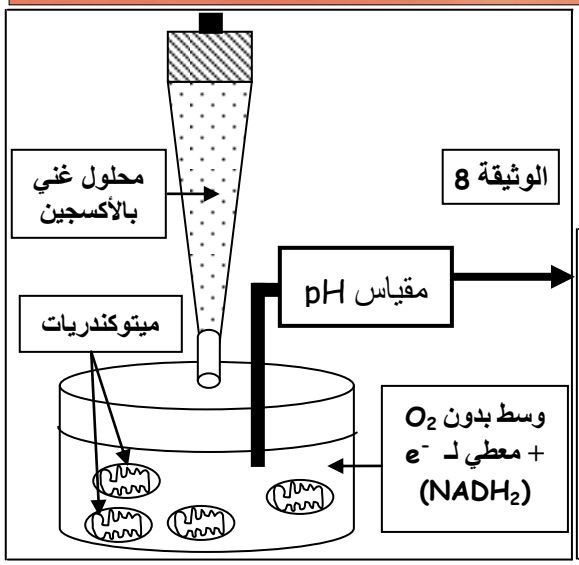
من أجل معرفة آلية تركيب ATP، نجري التجارب التالية :

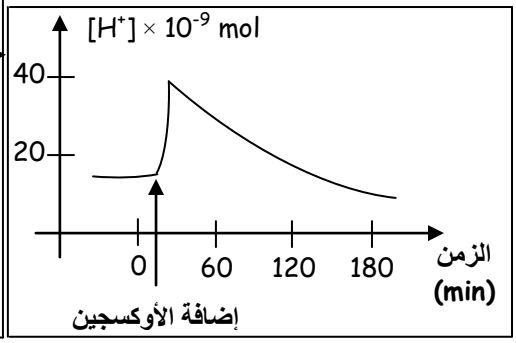
- **التجربة الأولى** : إضافة كمية معينة من الأكسجين إلى الوسط (الوثيقة 8).

1. حلل النتائج المحصل عليها علما أن الغشاء الخارجي للميتوكندري نفوذ لـ H^+.

2. ماذا تستنتج فيما يخص تطور pH؟

- **التجربة الثانية** : بعد عزلها، تخضع الميتوكندريات إلى موجات فوق صوتية، مما يؤدي إلى تقطيعها و جعل أعراف الغشاء الداخلي تنقلب مكونة حُوَيْصلات مغلقة، حيث تكون الكرات ذات

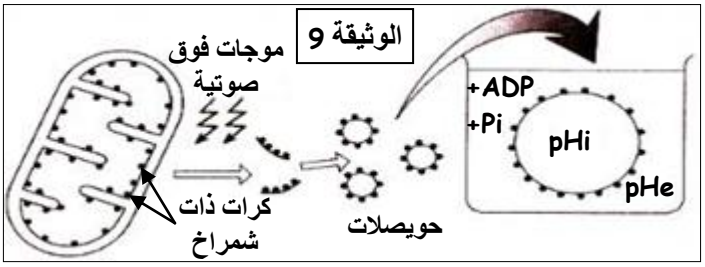




شمراخ المرتبطة بها موجهة نحو الخارج (الوثيقة 9). توضع هذه الحويصلات في محاليل تختلف من حيث pH كما هو مبين في الجدول أسفله.

التجربـــــة	النتيـــــجة
حويصلات + Pi + ADP بحيث pHi < pHe	تكون ATP
حويصلات + Pi + ADP بحيث pHi = pHe	عدم تكون ATP

الوثيقة 9



3. ما هي المعلومة التي يمكن استخلاصها حول تفسفر ADP و تكون ATP ؟

الحـــل

1. عند إضافة الأوكسجين يرتفع تركيز $[H^+]$ في الوسط ثم يشهد انخفاضا مع مرور الزمن.

2. ارتفاع تركيز H^+ في الوسط الخارجي يفسر بتدفق البروتونات من الميتوكندريات، بينما انخفاض تركيز H^+ في الوسط الخارجي يفسر بإعادة تدفق H^+ إلى ماتريس الميتوكندري.

ملحوظة : كلما ارتفع $[H^+]$ إلا و انخفض pH، و العكس صحيح.

3. نستنتج أن ATP لا تتكون إلا إذا كان : $pHi < pHe$ أي : $pH_{الماتريس} < pH_{الحيز البيغشائي}$، و بالتالي : $[H^+]_{الماتريس} > [H^+]_{الحيز البيغشائي}$.

تعلـــيل :

سبق أن رأينا أن أكسدة جزيئات $NADH_2$ و $FADH_2$ على مستوى مركبات السلسلة التنفسية (المركب I و II) تكون مصحوبة بطرح H^+ في الحيز البيغشائي. مما يؤدي إلى ارتفاع $[H^+]$ في الحيز البيغشائي و تكون فارق تركيز بين الحيز البيغشائي و الماتريس يسمى ممال Gradient. هذا الأخير يمثل مدخرا للطاقة بحيث تستعملها الكرات ذات شمراخ من أجل إعادة تدفق H^+ نحو الماتريس و تركيب جزيئات ATP انطلاقا من تفسفر ADP (الوثيقة 7).

الكرات ذات شمراخ عبارة عن بروتينات محفزة لتفاعل تفسفر ADP إلى ATP و تسمى ATP سنتتاز ATP synthétase (ATP_{ase}).

إن تركيب ATP يكون مقترنا باشتغال السلسلة التنفسية أي أكسدة $NADH_2$ و $FADH_2$ ؛ إنه التفسفر المؤكسد Phosphorylation oxydative.

ملحوظة : أثناء إعادة أكسدة $NADH_2$ التي تم تركيبها على مستوى الجبلة الشفافة، يمكن التمييز بين آليتين : آلية تسمح بتركيب 3ATP نتيجة أكسدة $1NADH_2$، و آلية تسمح بتركيب 2ATP نتيجة أكسدة $1NADH_2$.

5. الحصيلة الطاقية Bilan énergétique.

1. انحلال الكليكوز :

$2NADH_2 \rightarrow$ 4ATP أو 6ATP

4ATP $\rightarrow$ 4ATP

6ATP أو 8ATP $\rightarrow$

إذا تم تركيب 8ATP أو 10ATP مع استهلاك 2ATP

2. تشكل أستيل كو A :

$2NADH_2 \rightarrow$ 6ATP

3. حلقة KREBS :

$6NADH_2 \rightarrow$ 18ATP

$2FADH_2 \rightarrow$ 4ATP

$2GTP \rightarrow$ 2ATP

الحصيلة الطاقية الإجمالية لأكسدة جزيئة كليكوز واحدة بوجود O_2 هي← 36ATP أو 38ATP

III. التخمر اللبني Fermentation lactique و التخمر الكحولي Fermentation alcoolique.

يعد التخمر الظاهرة البيولوجية الثانية التي تمكن الخلية من تحرير الطاقة الكامنة بالمادة العضوية، و هي ظاهرة تتم في الجبلة الشفافة فقط و لا تتطلب الأوكسجين. و يعتبر انحلال الكليكوز مرحلة مشتركة بين التنفس الخلوي و التخمر. أما بالنسبة لناقلات الالكترونات $NADH_2$، فإعادة أكسدتها تختلف بين التخمر و التنفس الخلوي :

- خلال التنفس الخلوي، تتم إعادة أكسدة $NADH_2$ على مستوى الغشاء الداخلي للميتوكندري بواسطة السلسلة التنفسية و يصاحب ذلك إنتاج طاقة على شكل ATP.

- خلال التخمر، فإعادة أكسدة $NADH_2$ لا يصاحبها إنتاج طاقة. بالنسبة للتخمر اللبني، فإعادة أكسدة $NADH_2$ تكون مصاحبة بإنتاج الحمض اللبني Acide lactique انطلاقا من حمض البيروفيك حسب التفاعل : $CH_3\text{-}CO\text{-}COOH \xrightarrow[NAD^+]{NADH_2} CH_3\text{-}CHOH\text{-}COOH$

أما في حالة التخمر الكحولي، فيتم تركيب كحول الإيثانول Ethanol انطلاقا من حمض البيروفيك مع أكسدة $NADH_2$ حسب التفاعل جانبه : $CH_3\text{-}CO\text{-}COOH \xrightarrow[NAD^+]{NADH_2} CH_3\text{-}CH_2OH + CO_2$

مقارنة الحصيلة الطاقية للتنفس الخلوي و التخمر :

لنحسب المردود الطاقي للتنفس الخلوي و التخمر علما أن :

$$R = \frac{\text{الطاقة المخزونة في } ATP}{\text{القيمة الطاقية للكليكوز}} \times 100$$

	التنفس الخلوي	التخمر اللبني
المستقلب	الكليكوز	الكليكوز
النواتج	CO_2 و H_2O	الحمض اللبني
الحصيلة الطاقية	38ATP أو 36	2ATP

الطاقة المخزونة في مول واحد من ATP = 30,5 kJ

القيمة الطاقية للكليكوز = 2840 kJ

تطبيق عددي : - **بالنسبة للتنفس الخلوي :** R = (38 × 30,5/2840) × 100 = **40,8%** أو R = (36 × 30,5/2840) × 100 = **38,6%**

- **بالنسبة للتخمر :** R = (2 × 30,5/2840) × 100 = **2,1%**

نلاحظ أن المردود الطاقي للتنفس الخلوي أكبر من المردود الطاقي للتخمر، لأن التنفس الخلوي يؤدي إلى تكوين مواد معدنية خالية من الطاقة (CO_2 و H_2O) بينما التخمر يفضي إلى تكوين مادة عضوية (أحماض لبنية أو كحول) لا زالت تتضمن مخزونا من الطاقة.

IV. خـلاصة.

خطاطة تركيبية حول مختلف التفاعلات المسؤولة عن استهلاك المادة العضوية و استخراج الطاقة الكامنة بها و تحويلها إلى طاقة قابلة للاستعمال ATP :