الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا للأساتذة الشيخ محمد
البشير الإبراهيمي
القبة القديمة-الجزائر
قسم العلوم الطبيعية

Ecole Normale Supérieure (ENS)
Cheikh Mohamed El Bachir El
IbrahimiVieux Kouba - Alger
Département des Sciences Naturelles

مطبوعة الأعمال الموجهة في الكيمياء الحيوية الأيضية

لطلبة العلوم الطبيعية السنة الثانية

إعداد وتصميم

د. شافيـــــــــــــــــــــة تيقـــــــــــرين

العنوان الإلكتروني chafia.tigrine@g.ens-kouba.dz

2025/2026

الفهرس

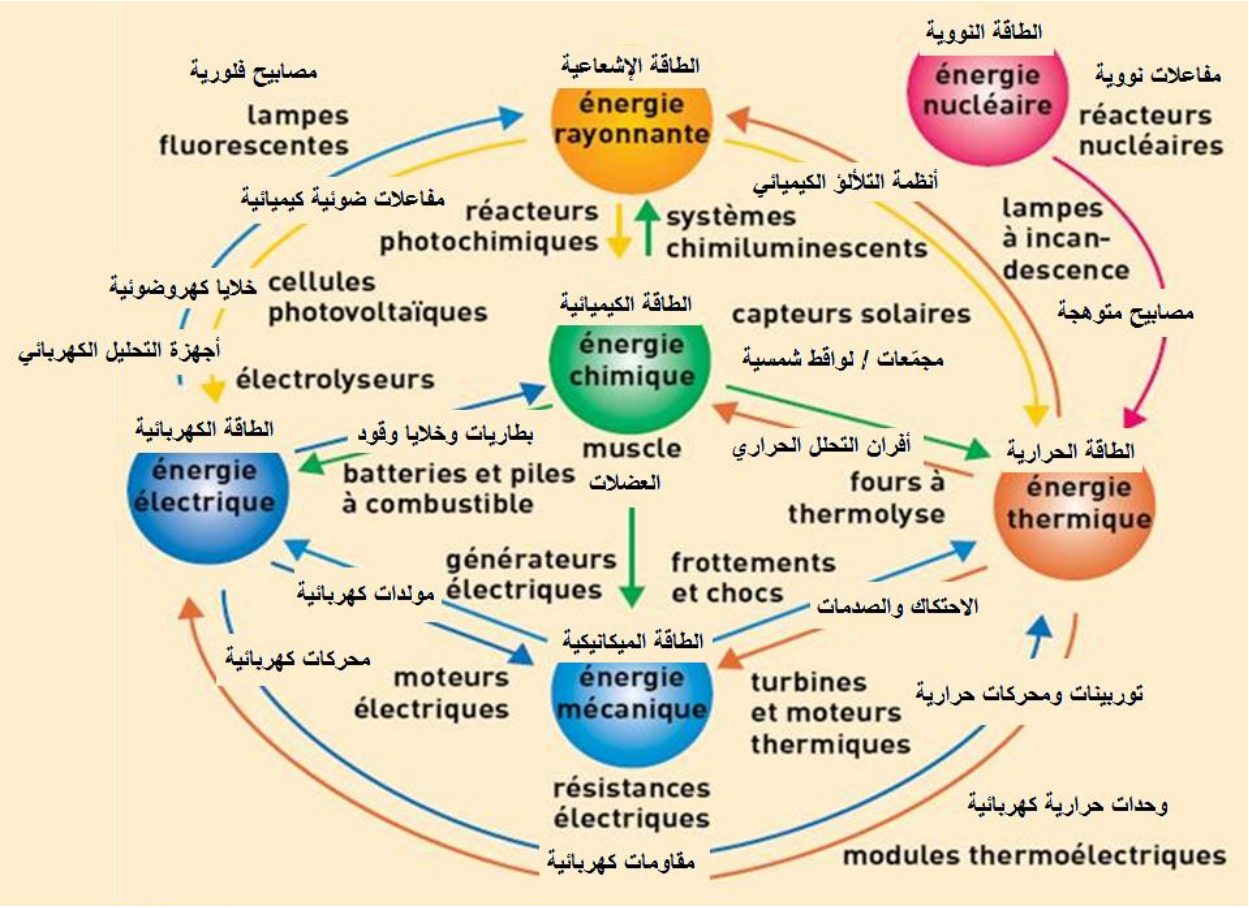
1. سلسلة الطاقة الحرة 3
1.1. تذكير بالمفاهيم الأساسية للطاقة الحيوية 3
1.1.1. مفهوم الطاقة الحيوية Bioénergétique 4
2.1.1. مفهوم الطاقة الحرة 5
3.1.1. التغير في الطاقة الحرة القياسي $\Delta G°$ 6
4.1.1. وحدات قياس الطاقة الحرة 7
5.1.1. العلاقة بين ثابت الإتزان K_{eq} و ΔG 8
6.1.1. مفهوم الازدواج في التفاعلات الحيوية 8
7.1.1. أهم المركبات الغنية بالطاقة 9
2.1. سلسلة التمارين حول الطاقة الحرة 10
3.1. حلول تمارين سلسلة الطاقة الحرة 21
2. سلسلة علاقة كمون الأكسدة والإرجاع (E) بالطاقة الحرة (ΔG) 37
1.2. تذكير بالمفاهيم الأساسية لكمون الأكسدة والإرجاع (E) 37
2.2. سلسلة التمارين حول الطاقة الحرة وعلاقتها بكمون الأكسدة والإرجاع 41
3.2. حلول التمارين حول الطاقة الحرة وعلاقتها بكمون الأكسدة والإرجاع 50
3. تمارين متنوعة حول المتابوليزم 62
1.3. نبذة عن الميتابوليزم 62
2.3. أهمية الميتابوليزم 62
3.3. أمثلة على مسارات أيضية رئيسية 62
4.3. العوامل المؤثرة في الميتابوليزم 63

1.4.3. تذكير بميتابوليزم السكريات 63
2.4.3. تذكير بميتابوليزم الدهون..... 66
3.4.3. تذكير بميتابوليزم البروتينات 68
4.4.3. أسئلة متنوعة حول ميتابوليزم السكريات 72
5.4.3. أجوبة الأسئلة 73
6.4.3. تـمارين مقترحة حول الميتابوليزم 75
قائمة المراجع..... 87

1. سلسلة الطاقة الحرة

1.1. تذكير بالمفاهيم الأساسية للطاقة الحيوية

إليكم الصورة التالية. ماذا تلاحظون؟ ماذا تستنتجون؟



"Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme"

(Antoine-Laurent de Lavoisier)

تشرح الصورة تحولات الطاقة بين أشكالها المختلفة، مثل تحويل الطاقة الضوئية إلى كيميائية في المفاعلات الكيميائية الضوئية، و تحويل الطاقة النووية إلى حرارية في المفاعلات النووية. كما تتضمن تحويل الطاقة الشمسية إلى كهربائية عبر الخلايا الكهروضوئية، والطاقة الكيميائية إلى كهربائية في البطاريات، أو إلى ميكانيكية في العضلات. بالإضافة إلى ذلك، تظهر تحولات

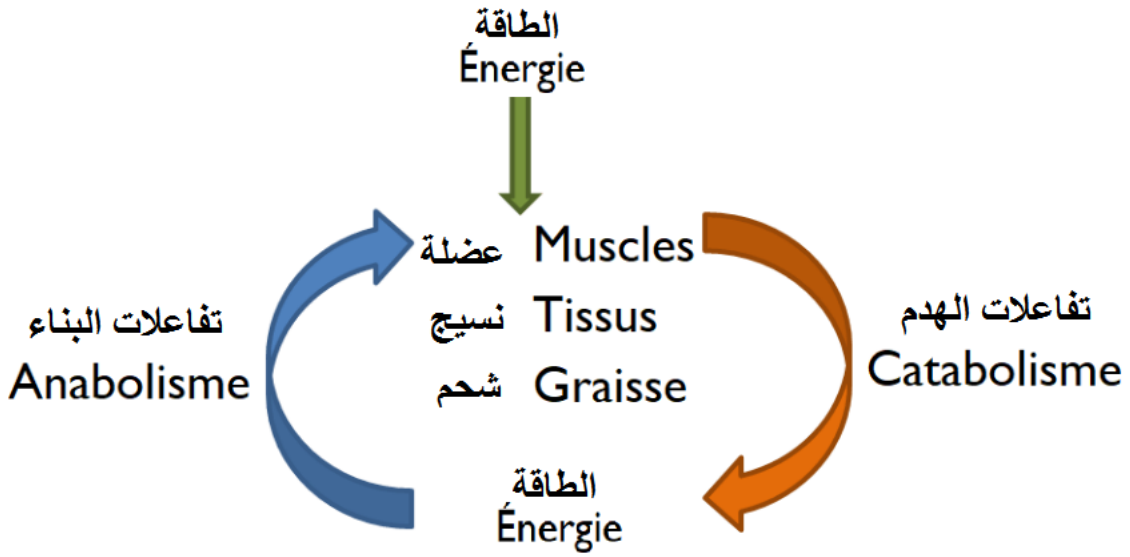
الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية عبر المولدات، والكهربائية إلى حرارية في المقاومات الكهربائية. باختصار، توضح الصورة كيفية تحويل الطاقة من شكل إلى آخر باستخدام تقنيات وأجهزة مختلفة. وخلال هذه التحولات، فإن الطاقة لاتفنى بل تتحول من شكل لآخر وهذا ماقاله العالم Lavoisier **" لا شيء يضيع، ولا شيء يُخلق من عدم، كلّ شيء يتحوّل".**

في هذه السلسلة سنتناول نوع من أنواع الطاقة ألا وهو الطاقة الحيوية.

1.1.1. مفهوم الطاقة الحيوية Bioénergétique

علم الطاقة الحيوية هو فرع من فروع الكيمياء الحيوية يدرس ويشرح آليات تحويل الطاقة في الأنسجة الحية. والطاقة الحيوية هي كمية الطاقة التي يتم تحويلها أثناء التفاعلات الحيوية أي التفاعلات التي تحدث داخل خلايا الكائنات الحية. و تمثل هذه التفاعلات ما يسمى بالأيض أو الميتابوليزم.

يهتم الميتابوليزم بدراسة التحولات أو التفاعلات الحيوية التي تتم في العضوية والذي تضم تفاعلات الهدم وتفاعلات البناء (الشكل 01).



الشكل 01: العلاقة بين الطاقة الحيوية وتفاعلات الهدم والبناء على مستوى العضوية.

2.1.1. مفهوم الطاقة الحرة

الطاقة الحرة أو طاقة جبس الحرة Gibbs free energy نسبة للعالم William Gibbs، الذي وصفها لأول مرة. ويرمز لها بالرمز G.

حيث إذا كان لدينا التفاعل التالي:

$$A \longrightarrow B$$

فإنه من الصعب قياس الكمية الكلية للطاقة الحرة لهذا التفاعل وإنما نقيس التغير في الطاقة الحرة ΔG حيث يمثل الـ Δ G الفرق بين طاقة النواتج وطاقة المتفاعلات.

$$\Delta G = G_B - G_A$$

إذا كانت ΔG
- سالبة ($G_B < G_A$) فإن التفاعل يسير تلقائيا ويسمى تفاعل ناشر.
- موجبة ($G_B > G_A$) فإن التفاعل لا يسير تلقائيا ويسمى تفاعل ماص.

التفاعل الناشر هو تفاعل يعطي طاقة تمتص من طرف التفاعلات الماصة وجزء من هذه الطاقة يخرج على شكل حرارة. التفاعل الماص هو تفاعل يحتاج إلى إمداده بمصدر للطاقة لكي يتم.

3.1.1. التغير في الطاقة الحرة القياسي ΔG°

يعتمد التغيير في الطاقة الحرة القياسي ΔG° على نوع وتركيز المواد المتفاعلة والمواد الناتجة بالإضافة إلى الشروط التجريبية T°، pH...

مثال لدينا التفاعل التالي:

$$A + B \rightarrow C + D$$

نطبق القانون التالي لحساب طاقة هذا التفاعل:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[C][D]}{[A][B]}$$

حيث :

ΔG : التغير في الطاقة الحرة غير القياسي .

ΔG° : التغير في الطاقة الحرة القياسي.

R : ثابت الغازات (8.315 J/K.mol) (1.98 cal /K. mol)

T : درجة الحرارة المطلقة بـ KELVIN° (0°C +273) kelvin.

Ln : اللوغاريتم النيبيري (لتحويله للوغاريتم العشري نضرب في 2.3).

عندما يصل التفاعل لحالة الإتزان فإن:

$$\Delta G = 0$$

$$\Delta G° = - RT \ln Keq$$

حيث Keq يسمى ثابت الاتزان وهو يساوي:

$$Keq = \frac{[C][D]}{[A][B]}$$

إذا اعتبرنا أن درجة الحرارة القياسية هي 25°C نحولها للكالفن:

$$25 + 273 = 298 \text{ Kelvin}$$

وإذا عوضنا بثابت الغازات تصبح ($R = 1.98 \times 10^{-3}$ Kcal /K. mol) تصبح المعادلة كالتالي:

$$\Delta G° = -RT\ln Keq$$

$$\Delta G° = -1.98 \text{ X } 10^{-3} \text{ X } (273+25) \text{ X } 2.3 \text{ X } Keq$$

$$\Delta G° = - 1.36 \log Keq$$

$$Keq = 10^{- \Delta G°/1.36}$$

4.1.1. وحدات قياس الطاقة الحرة

حسب قيمة ثابت الغازات يكون التغير في الطاقة الحرة بوحدة كيلوكالوري/مول Kcal/mole أو الكيلوجول/مول KJ/mole.

يمكن التحويل وذلك باستعمال العلاقة التالية:

1 calorie = 4.18 Joules

5.1.1. العلاقة بين ثابت الإتزان K_{eq} و ΔG

من خلال الجدول (01) الموالي نلاحظ أنه كلما كان التغير في الطاقة الحرة القياسي صغيرا (قيمة سالبة) كلما كان ثابت الإتزان قيمة كبيرة وهو ما يدل على أن التفاعل تام بصورة تلقائية والعكس صحيح.

الجدول 01: يمثل العلاقة العكسية بين ثابت الإتزان K_{eq} و ΔG

حالة التفاعل	ΔG^{o} (kJ/mol)	K_{eq}
تفاعل تلقائي (ناشر)	− 23	10^{4}
تفاعل تلقائي (ناشر)	− 11	10^{2}
في حالة إتزان	0	$10^{0} = 1$
غير تلقائي (ماص)	+ 11	10^{-2}
غير تلقائي (ماص)	+ 23	10^{-4}

6.1.1. مفهوم الازدواج في التفاعلات الحيوية

إن تصنيع المركبات الكبيرة كالبروتينات والمركبات الغنية بالطاقة والنقل الفعال للأيونات لتكوين التدرج في التركيز وغيرها كلها تفاعلات تسير ضد الاتجاه التلقائي ($\Delta G>0$).

لا تكون هذه التفاعلات ممكنة إلا عن طريق الازدواج مع تفاعلات تلقائية ناشرة للطاقة. ويمكن معرفة الاتجاه التلقائي لزوج من التفاعلات عن طريق كتابة محصلة المعادلتين وجمع الطاقة في كلا التفاعلين.

مثال1:

1. Glu + Pi ⟶ G6P + H20 ΔG_1^0 = +13,8 KJ/mole
2. ATP + H20 ⟶ ADP + Pi ΔG_2^0 = -30.5 KJ/mole

Glu + ATP ⟶ G6P + ADP +Pi ΔG_3^0 = - 16 ,7 KJ /mole

مثال2:

Succinyl-CoA + H2O ⟶ Succinate + CoA $\Delta G_1^{o'}$= -37.4 KJ/mole

GDP + Pi ⟶ GTP + H2O $\Delta G_2^{o'}$= +34 KJ/mole

Succinyl-CoA + GDP + Pi ⟶ Succinate + CoA + GTP $\Delta G_3^{o'}$= -3.4 KJ/mole

- محصلة الطاقة هنا سالبة مما يدل أن محصلة التفاعلين تعطي تفاعلا ناشرا للطاقة.

7.1.1. أهم المركبات الغنية بالطاقة

تشترك جميع الكائنات الحية في إنتاجها لصور محددة من الطاقة الكيميائية التي تستعمل لسير العديد من العمليات التي تحتاج إلى الطاقة .أهم هذه الصور هي المركبات الفسفاتية الغنية بالطاقة والمرافقات الإنزيمية المرجعة.

تحرر المركبات الغنية بالطاقة عند إماهتها طاقة عالية تفوق تلك التي تنتج من أغلب المركبات العادية .وتتميز المركبات الغنية بالطاقة بأنها لا تخزن لفترات طويلة، فهي طاقة تخزن بصورة مؤقتة ولفترة قصيرة وهي مع ذلك مركبات مستقرة. يمثل الجدول (2) الموالي أهم المركبات الغنية بالطاقة مرتبة ترتيبا تنازليا من الأعلى طاقة إلى الأخفض طاقة حيث يتوسطها جزيئة الـ ATP. تستطيع جزيئة الـ ATP من خلال موقعها أن تتكون انطلاقا من الجزيئات الأعلى طاقة منها كما تستطيع إعطاء الفسفات والطاقة لتكوين المركبات ذات الطاقة

المنخفضة في الميتابوليزم وهي أغلب المركبات. فالثنائية ATP/ADP تعمل كنظام مستقبل ومعطي وسطي وبخاصة مع العديد من الإنزيمات التي تنشط تفاعلات الازدواج.

الجدول 02: قيم ΔG بالكيلوكالوري/مول و بالكيلوجول /مول لبعض المركبات الهامة في الميتابوليزم.

	$\Delta G'^\circ$	
	(kJ/mol)	(kcal/mol)
Phosphoenolpyruvate	−61.9	−14.8
1,3-Bisphosphoglycerate (→ 3-phosphoglycerate + P_i)	−49.3	−11.8
Phosphocreatine	−43.0	−10.3
ADP (→ AMP + P_i)	−32.8	−7.8
ATP (→ ADP + P_i)	−30.5	−7.3
ATP (→ AMP + PP_i)	−45.6	−10.9
AMP (→ adenosine + P_i)	−14.2	−3.4
PP_i (→ $2P_i$)	−19.2	−4.0
Glucose 3-phosphate	−20.9	−5.0
Fructose 6-phosphate	−15.9	−3.8
Glucose 6-phosphate	−13.8	−3.3
Glycerol 3-phosphate	−9.2	−2.2
Acetyl-CoA	−31.4	−7.5

2.1. سلسلة التمارين حول الطاقة الحرة

التمرين 01

يعطي تحليل المركب A النواتج: B و C حيث يتميز هذا التفاعل بتغير الطاقة الحرة القياسية بقيمة -1 كيلو جول/ مول

✓ صنف هذا التفاعل اكتب المعادلة؟ احسب ثابت الاتزان (Keq) للتفاعل؟

التمرين 02

احسب الطاقة الحرة لتحلل ATP للعضلة (حالة الراحة):

$$ATP \longrightarrow ADP + Pi$$

حيث أن تركيز ATP و Pi يساوي 5 mM و ADP يساوي 0.5 mM . عند درجة الحرارة 25 °م و حموضة متعادلة (pH= 7) $\Delta G°= -30.5$ KJ/mole.

التمرين 03

إذا كانت $\Delta°G$ = -7.5 Kcal/mole عند درجة الحرارة 25 °م و حموضة متعادلة (pH=7) للتفاعل التالي:

$$PEP + ADP \rightleftharpoons Pyruvate + ATP$$

ما هو تركيز المواد المتفاعلة عند الاتزان إذا كان التركيز الأولي لمركب PEP و ADP هو 5 ميلي مول/ل و كان تركيز ATP و Pyruvate

معدوم؟

التمرين 04

تتم التفاعلات التالية في شروط قياسية:

(1) $PEP + HO_2 \longrightarrow Pyruvate + Pi$ $\quad Keq = 7.13\ 10^{10}$

(2) $ATP + HO_2 \longrightarrow ADP + Pi$ $\quad Keq = 4.43\ 10^{5}$

(3) $PEP + ADP \longrightarrow Pyruvate + ATP$

- احسب محصلة الطاقة الحرة القياسية للتفاعل الثالث؟

التمرين 05

ليكن لدينا التفاعل التالي:

$$Fumarate + HO_2 \longrightarrow Malate$$

✓ احسب $\Delta G°$ اذا كان ثابت الاتزان للتفاعل (Keq)= 4.03 عند درجة حرارة 25 °م و pH=7.

✓ ماذا تستنتج من هذا التفاعل؟ (نفرض أن تركيز H_2O يبقى ثابت و يساوي 1 مول).

- إذا افترضنا أن التفاعل يسير في الاتجاه المعاكس و ΔG°= +0.7 Kcal/mole في الشروط القياسية و تم ازدواج بين هذا التفاعل و التفاعل التالي:

$$\text{Fumarate} + NH_4^+ \longrightarrow \text{Aspartate}$$

الذي يبلغ ثابت اتزانه (Keq) 417 عند درجة حرارة 37 °م.

- ✓ احسب ΔG° للتفاعل الكلي (المحصلة)؟
- ✓ ما هو تركيز Malate عند الاتزان إذا كان تركيز كل من : NH^+_4 و Malate في بداية التفاعل يساوي 1مول و 0.1 مول على التوالي؟
- ✓ ما هي النسبة المئوية (%) للـ Malate المتحولة إلى مركب Asp في هذه الشروط؟

التمرين 06

عند التحليل المائي للسكروز تنتج طاقة قياسية ΔG° تقدر بـ 27.6- كيلوجول /مول حسب التفاعل التالي:

$$\text{Saccharose} + HO_2 \rightleftharpoons \text{Fructose} + \text{Glucose}$$

- ✓ ما ذا تعني هذه النتيجة (كمية الطاقة)؟
- ✓ هل بالإمكان حدوث تفاعل عكسي (بناء السكروز)؟.
- ✓ ما هو الشرط الضروري لتكوين السكروز؟

✓ ماذا يغير وجود الإنزيم في الوسط لهذا التفاعل؟

التمرين 07

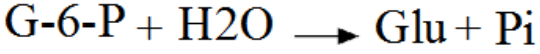
ΔG^0 للتفاعل التالي من اليسار الى اليمين هي -0.4 كيلوكالوري/ مول.

✓ احسب Keq.

✓ في أي اتجاه يسير التفاعل ذاتيا إذا كانت تراكيز F-6-P و G-6-P هي:

10^{-3} و $10^{-3}.2$ مول/ل على التوالي.

يتحلل G-6-P حسب التفاعل التالي حيث ΔG^0 = -3.30 كيلوكالوري/ مول



✓ كيف يكون تفاعل تكوين G-6-P ممكنا في الحالات الطبيعية؟

✓ اكتب معادلة التفاعل و احسب ΔG^0 . (ΔG^0 لتحلل جزيئة ATP هي -7.3 كيلوكالوري/ مول).

التمرين 08

التغير في الطاقة الحرة القياسيΔG^0 لتفاعل التحلل المائي لسكر اللكتوز هو -4 كيلوكالوري / مول.

- ✓ اكتب معادلة التفاعل و احسب ثابت الاتزان Keq ؟
- ✓ ماهيΔG^0 و Keq لبناء اللكتوز من غلوكوز و جلكتوز؟

يتم في الخلايا الحية في الحالات الطبيعية تصنيع اللكتوز من UDP-galactose و الجلوكوز بواسطة انزيم Lactose synthase.

- ✓ احسب ΔG^0 و Keq للتفاعل التالي
- ✓ UDP-Galactose + Glucose → Lactose + UDP
- ✓ اكتب معادلة تحلل UDP الجلكتوز إذا علمت $\Delta G^{0'}$ هو-7.3 كيلوكالوري / مول
- ✓ ماذا يمكن أن تستنتج ؟ ماذا يمكن القول عن دور مركب UDP-Gal؟ إلى أي قسم من المركبات يمكن تصنيفه

التمرين 09

لدينا التفاعلات التالية:

PEP + ADP ⟶ Pyruvate + ATP (1) Gluc-6P + ADP ⟶ Gluc + ATP (2)

قيمة $\Delta G°$ لإماهة المركبات التالية هي:

ATP= - 30,5, PEP= - 61,9, Gluc-6P - 13,8 kJ/mole

أحسب $\Delta G°$ لكل تفاعل وحدد في أي اتجاه تسير التفاعلات؟

أذكر الإنزيمات في (1) و (2)، ماهي خاصية PEP؟

التمرين 10

ليكن التفاعلين:

التفاعل الأول:

Phosphoenolpyruvate + ADP → Pyruvate + ATP

تبلغ $\Delta G°'$ لهذا التفاعل -31.4 kJ/mol

كما تبلغ تراكيز المتفاعلات و النواتج مايلي:

[PEP] = 0.01 mM; [ADP] = 1.0 mM; [Pyruvate] = 0.5 mM; [ATP] = 2.0 mM

التفاعل الثاني:

Malate + NAD^+ → Oxaloacetate + NADH + H^+

تبلغ $\Delta G°'$ لهذا التفاعل +29.7 kJ/mol

كما تبلغ تراكيز المتفاعلات و النواتج مايلي:

[Malate] = 2.0 mM; [NAD^+] = 1.0 mM; [Oxaloacetate] = 0.01 mM;

[NADH] = 0.1 mM

عند درجة الحرارة =37°C و ثابت الغازات R = 8.314 J/mol·K

الأسئلة:

1. احسب ΔG الفعلي للتفاعل 1 داخل الخلية، وهل التفاعل تلقائي؟
2. احسب ΔG الفعلي للتفاعل 2 داخل الميتوكوندري، وهل يمكن أن يحدث تلقائيًا؟
3. احسب ثابت التوازن (Keq) لكل من التفاعلين.
4. أي التفاعلين يعمل بعيدًا عن التوازن؟
5. إذا تم ربط التفاعلين، هل يصبح التفاعل الإجمالي تلقائيًا؟ احسب ΔG الكلي.

التمرين 11

أسئلة متعددة الاختيارات حول الطاقة الحرة لجيبس (ΔG)

1. الطاقة الحرة لجيبس (ΔG) تستخدم لتحديد:

A. كتلة التفاعل
B. سرعة التفاعل
C. تلقائية التفاعل
D. نوع الروابط الكيميائية

2. إذا كانت $\Delta G < 0$ فإن التفاعل يكون:

A. غير تلقائي
B. في حالة توازن
C. تلقائي
D. يحتاج محفز

3. عندما تكون $\Delta G = 0$ فإن التفاعل:

A. لا يحدث
B. في حالة توازن
C. تلقائي تمامًا
D. ماص للحرارة

4 . التفاعل الذي ΔG فيه $0 <$ يُوصف بأنه:

A. تلقائي
B. محفز
C. غير تلقائي
D. سريع جدًا

5. من خصائص التفاعل التلقائي أنه:

A. لا يحتاج طاقة
B. يمكن أن يحدث بدون طاقة إضافية
C. يتطلب تدخل إنزيم دائمًا
D. لا ينتج حرارة

6. التفاعلات التي لها ΔG موجبة يمكن أن تحدث في الخلايا إذا:

A. تم تبريد النظام
B. اقترنت بتفاعل له ΔG سالبة
C. تم تسريعها بإنزيم
D. حدثت تحت ضغط عالٍ

7. تعتمد ΔG على:

A. الظروف القياسية فقط
B. درجة الحرارة والتركيز فقط
C. الظروف الفعلية للنظام
D. الزمن فقط

8. في النظام البيولوجي، التفاعل الذي له $\Delta G > 0$ عادة ما يحدث إذا تم:

A. تبريده
B. ربطه بتحللATP
C. تغيير الأس الهيدروجيني فقط
D. زيادة الضغط فقط

9. يُعتبر ATP جزيئًا عالي الطاقة لأن:

A. له كتلة كبيرة
B. تحلله يعطي ΔG سالبة كبيرة
C. يحتوي على روابط بيروكسيد
D. يتحلل ببطء شديد

10. أي مما يلي يمكن أن يؤثر في ΔG لتفاعل ما في الخلية؟

A. درجة الحرارة
B. تركيز المواد المتفاعلة والنواتج
C. اقترانه بتفاعل آخر
D. جميع ما سبق

11. إذا زاد تركيز النواتج في تفاعل معين، فإن:ΔG

A. تبقى ثابتة
B. تزداد
C. تنقص
D. تصبح صفر

12. إن ΔG لوحدها لا تخبرنا بـ:

A. ما إذا كان التفاعل تلقائيًا
B. مقدار الطاقة المتاحة
C. سرعة التفاعل
D. اتجاه التفاعل

13. لماذا تكون ΔG مفيدة في دراسة المسارات الأيضية؟

A. لأنها تحدد كمية الإنزيم اللازم
B. لأنها تحدد سرعة التفاعل
C. لأنها تحدد اتجاه كل خطوة في المسار
D. لأنها تُظهر كتلة الجزيئات المتفاعلة

14. إذا كان ΔG للتفاعل A موجبة، والتفاعل B سالبة، وتم دمجهما :ما النتيجة الممكنة؟

A. ΔG دائمًا موجبة
B. ΔG دائمًا سالبة
C. تعتمد على مجموع ΔG للتفاعلين
D. يعتمد على سرعة التفاعل B

15. التفاعل الذي له ΔG > 0 ولكنه لا يحدث فعليًا، سببه على الأغلب:

A. تركيز النواتج عالي
B. نقص إنزيم محفز
C. درجة حرارة عالية
D. التفاعل متزن

16. أي الجمل التالية تعبر عن الحالة الحقيقية عندما ΔG° موجب، و ΔG الفعلي في الخلية سالب؟

A. التفاعل لا يمكن أن يحدث
B. التفاعل تلقائي داخل الخلية
C. ΔG لا يتغير
D. هناك خطأ في الحساب

17. إذا كان التفاعل A له ΔG = -3 kJ/mol ، والتفاعل B لهΔG = -20 kJ/mol ، أي التفاعل أكثر" تلقائية"؟

A .A
B .B
C. كلاهما متساوي
D. لا يمكن تحديده

18. عندما يتم ربط تفاعل غير تلقائي مع تحللATP ، الهدف هو:

A. إبطاء التفاعل
B. زيادةΔG
C. تحويل التفاعل إلى تلقائي
D. رفع تركيز النواتج

19. تفاعل في حالة توازن، ثم أُضيف نواتج بكثرة .ما تأثير ذلك على ΔG ؟

A. ΔG يبقى صفر
B. ΔG يصبح موجبا
C. ΔG يصبح سالبا
D. ΔG يعتمد على الإنزيم

20. في التفاعلات العكسية، متى يتغير اتجاه التفاعل؟

A. عندما$\Delta G = 0$
B. عندما ΔG تتغير علامتها
C. عندما$\Delta G = \Delta G^{\circ}$
D. عندما ΔG يصبح ثابتًا

3.1. حلول تمارين سلسلة الطاقة الحرة

حل التمرين 01:

$A \rightarrow B + C$ $\Delta G° = -1$ Kj/mole

– تصنيف التفاعل : تفاعل تلقائي ناشر للحرارة لأن $\Delta°G < 0$.

– حساب ثابت الإتزان :

في الشروط القياسية :

$T° = 25° C \rightarrow T$ (**Kelvin**) $= 273 + 25 = 298$ K

$R = 8,32$ j/k/mole $= 1,98$ Cal/K/mole

$\Delta G° = -2,3\ RT\log_{10} keq$

$Keq = 10^{-\Delta G°/1,36}$

أولا تحول الطاقة من جول/مول إلى الكالوري/مول .

$1\ Cal \rightarrow 4,18$ j

$X = \Delta G° = -0,24$ K Cal/mole ..... $X \rightarrow -10^{+3}$ joule

$\rightarrow Keq = 10^{-(-0,24)/1,36}$

$Keq = 1,49$

أولا تحول الطاقة من جول/مول إلى الكالوري/مول .

$1\ Cal \rightarrow 4,18$ j

$X \rightarrow -10^{+3}$ joule

$X = \Delta G° = -0,24$ K Cal/mole

$Keq = 10^{-(-0,24)/1,36} \Rightarrow Keq = 1,49$

حل التمرين 02:

حساب التغير في الطاقة الحرة لتفاعل تحلل ATP : $ATP \longrightarrow ADP+Pi$

مع العلم ان :

$\Delta G\,°= -30.5KJ/mole$, $T=25C°$, $PH=7$

$[ADP]=0.5$ mM, $[Pi]=[ATP]= 5$ mM

-حساب الطاقة الحرة :

$$\Delta G = \Delta G\,° + RT \ln [ADP].[Pi]/[ATP]$$

$$\Delta G = -30.5 + 8.32.10^{-3} 298 \text{ Ln } 0.5.10^{-3}$$

$$\Delta G = -49.34 \text{ KJ/mole}$$

$$= -11.805 \text{ Kcal/mole}$$

حل التمرين 03:

إذا كانت $\Delta°G$ = -7.5 Kcal/mole عند درجة الحرارة 25 °م و حموضة متعادلة (pH=7) للتفاعل التالي:

$$\mathbf{PEP + ADP \rightleftharpoons Pyruvate + ATP}$$

ما هو تركيز المواد المتفاعلة عند الاتزان إذا كان التركيز الأولي لمركب PEP و ADP هو 5 ميلي مول/ل و كان تركيز ATP و Pyruvate معدوم؟

$$PEP + ADP \rightleftharpoons pyruvate + ATP \qquad \Delta G^\circ = -7{,}5 \text{ K cal/mole}$$
$$(T^\circ = 25^\circ C\ ,\ pH = 7)$$

- حساب تركيز المواد المتفاعلة عند الاتزان إذا كان :

$$PEP + ADP \rightleftharpoons pyruvate + ATP$$

t = 0	5mM	5mM	0	0
t = x	5-x	5-x	x	x

إذن حساب التركيز x عند الاتزان :

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT\ Ln Keq$$

حالة الاتزان ← $\Delta G = 0$.

$$\rightarrow \Delta G^\circ = -RT\ Lnkeq = -1{,}36\ LogKeq$$

$$Keq = \frac{x^2}{(5-x)^2} = 10^{-\Delta G^\circ/1{,}36} = 3{,}27\ 10^5$$

$$\rightarrow \frac{x^2}{(5-x)^2} = 3{,}27\ 10^5$$

$$\rightarrow Z = 4{,}99 \text{ mM}$$

حل التمرين 04:

1/ $PEP + H_2O \rightarrow pyruvate + Pi$ $\qquad keq_1\ 7{,}13\ 10^{10}$

2/ $ATP + H_2O \rightarrow ADP + Pi$ $\qquad keq_2\ 4{,}43\ 10^5$

3/ $PEP + ADP \rightarrow pyruvate + ATP$

حساب محصلة الطاقة الحرة القياسية للتفاعل 3 :

نلاحظ أن التفاعل 3 هو محصلة للتفاعلين 1 و 2 (معكوس) .

$$PEP + H_2O \rightarrow Pyruvate + Pi \quad \Delta G_1^\circ$$
$$ADP + Pi \rightarrow ATP + H_2O \quad \Delta G_2^\circ$$
$$PEP + ADP \rightarrow Pyruvate + ATP \quad \Delta G_3^\circ$$

$$\Delta G_1^\circ = -1{,}36 \log keq_1 = -1{,}36 \log 7{,}13\ 10^{10}$$
$$= -14{,}76 \text{ K cal/mole}$$

$$\Delta G_2^\circ = -1{,}36 \log \frac{1}{Keq_2} = +7{,}67 \text{ K cal/mole}$$

$$\Delta G_3^\circ = -7{,}06 \text{ k cal/mole}$$

حل التمرين 05:

الجزء الأول: ليكن لدينا التفاعل التالي:

$$\text{Funarate} + HO_2 \longrightarrow \text{Malate}$$

- ✓ احسب $\Delta G°$ اذا كان ثابت الاتزان للتفاعل (Keq)= 4.03 عند درجة حرارة 25 °م و pH=7.
- ✓ ماذا تستنتج من هذا التفاعل؟ (نفرض أن تركيز H_2O يبقى ثابت و يساوي 1 مول).

- حساب $\Delta G°$:

$$\Delta G° = -1{,}36 \text{ Log Keq}$$

$$\Delta G° = -0{,}82 \text{ Kcal/mole}$$

- تصنيف التفاعل:

$\Delta°G < 0$ ⟸ تفاعل ناشر للحرارة (Réaction exergonique)

حل الجزء الثاني

ـ نفترض أن هذا التفاعل يسير في الاتجاه المعاكس و في الشروط القياسية وتم ازدواجه مع التفاعل التالي:

$$\text{Malate} \longrightarrow \text{Fumarate} + H_2O \qquad \Delta G^{\circ}_1 = +\,0.7 \text{ Kcal/mole}$$

$$\text{Fumarate} + NH_4^+ \longrightarrow \text{Aspartate} \qquad Keq = 417\ (37\ C^{\circ})$$

$$\text{Malate} + NH_4^+ \longrightarrow \text{Aspartate} + H_2O \qquad \Delta G^{\circ}_3\ ?$$

- حساب ΔG°_3 أي المحصلة للتفاعل الكلي :

بما أن درجة الحرارة تغيرت إلى 37 C° إذن لا نستخدم القانون السابق بل نعيد الحساب :

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln Keq$$

$$\Delta G^{\circ} = -1{,}98\ 10^{-3}\ 310 \ln Keq$$

$$\boxed{\Delta G^{\circ} = -1{,}41 \log Keq}$$

$$\Delta G^{\circ}_2 = -1{,}41 \log 417 = -3{,}69 \text{ Kcal/mole}$$

$$\Delta G^{\circ}_1 = +0{,}7 \text{ Kcal / mole.}$$

$$\Delta G°_3 = \Delta G°_1 + \Delta G°_2$$

$$= 0,7 + (-3,69)$$

$$\Delta G°_3 = -3 \text{ Kcal / mole}$$

- تصنيف التفاعل:

$\Delta°G_3 < 0$ ⟸ تفاعل ناشر للحرارة (Réaction exergonique)

- حساب تركيز Malate عند الاتزان إذا كان تركيز كل من : NH^+_4 و Malate في بداية التفاعل يساوي 1مول و 0.1 مول على التوالي :

- حساب تركيز المالات عند الاتزان:

	Malate + NH_4^+		Aspartate+H_2O	
t=0	0.1 M	1M	0 M	1M
t=n	(0.1−x)	(1−x)	x M	1M

$$\Delta G = \Delta G° + RT \text{ Ln } Keq$$

عند الاتزان: $\Delta G = 0$

$$\Delta G° = -1,41 \text{ Log } Keq$$

$$\text{Log } Keq = \Delta G° / 1,41 = +3 / 1,41$$

$$\text{Log } Keq = 2,127$$

$$\Longrightarrow Keq = 134,17$$

$$Keq = \frac{x}{[0,1-x][1-x]} = 134,17$$

$$0 = 134,17\ x^2 - 148,58\ x + 13,417$$

$$X_1 = -b-\sqrt{\Delta} / 2a \quad \sqrt{\Delta} = 122 = b^2 - 4ac$$

$$= 148,58-122 / 268,34 = 0,099$$

$$X_2 = -b+\sqrt{\Delta}/2a = 148,58+122/268,34$$

$$= 1,009$$

- X_2 مرفوض لأنه < 0.1 (التركيز المولي للمالات = 0.1 M).

- X_1 مقبول

إذن التركيز المولي للمالات بعد نهاية التفاعل تساوي : **0.001 M**

$$0.1 - 0.099 = 0.001\ M$$

$$\begin{array}{l} 0,1\ M \longrightarrow 100\% \\ 0,099\ M \longrightarrow X' \end{array} \Rightarrow X' = 99\ \%$$

وبالتالي 99% من المالات تحولت إلى Asp و 1 % فقط بقي على شكل Malate

حل التمرين 06:

1- تفاعل تلقائي ناشر للحرارة لأن $\Delta G^\circ < 0$

2- إمكانية حدوث تفاعل عكسي ⟸ نعم يمكن حدوث تفاعل عكسي و لكن بشرط:

أ - حدوث تفاعل إزدواج مع تفاعل ناشر لتوفير الطاقة

ب - وجود إنزيم

3- وجود انزيم في وسط التفاعل يسرع التفاعل ويخفض الطاقة المستهلكة

انزيمات الهدم (حسب الرابطة المكسرة):

Saccharase = Invertase (الاسم الشائع)

α-Glucosidase

β –Fructosidase

انزيمات البناء: Saccharose Synthase

$$F-6-P \longrightarrow G-6-P \qquad \Delta G^\circ = -0,4 \text{ Kcal/mole}$$

- حساب ثابت الإتزان Keq:

$$\Delta G=0 \Longrightarrow \Delta G^\circ=-1,36 \log Keq$$

$$\Longrightarrow Keq= 10^{-\Delta G/1.36} = 10^{2.94} = 1.96$$

حل التمرين 07:

$$F-6-P \longrightarrow G-6-P \qquad \Delta G^\circ = -0,4 \text{ Kcal/mole}$$

- حساب ثابت الإتزان Keq:

$$\Delta G=0 \Longrightarrow \Delta G^\circ=-1,36 \log Keq$$

$$\Longrightarrow Keq= 10^{-\Delta G/1.36} = 10^{2.94} = 1.96$$

ـ تحديد سير التفاعل علما أن:

$$[F-6-P]=2\ 10^{-3}M,\ [G-6-P]=1\ 10^{-3}M$$

$$\Delta G = \Delta G° + 1,36\ \text{Log}\ [G-6-P]/[F-6-P]$$

$$= -0,4 + 1,36 \text{Log}\ (1\ 10^{-3}/2\ 10^{-3})$$

$$\Delta G = -\ 0,8\ \text{Kcal/mole}$$

$\Delta G < 0 \Longrightarrow$ التفاعل تلقائي من اليسار إلى اليمين في اتجاه تكوين G−6−P

$$F-6-P \longrightarrow G-6-P$$

$$G-6-P + H_2O \longrightarrow \text{Glucose} + Pi$$

$$\Delta G° = -3,3\ \text{Kcal/mole}$$

يكون تفاعل تكوين G−6−P ممكنا في الحالات الطبيعية عند تحليل جزيئة ATP إلى ADP .

$$\text{Glucose} + Pi \longrightarrow G-6-P \qquad \Delta G_1° = 3,3$$

$$ATP \longrightarrow ADP + Pi \qquad \Delta G_2° = -7,3$$

$$\text{Glucose} + ATP \longrightarrow G-6-P + ADP \qquad \Delta G_3° = -4\text{Kcal/mole}$$

حل التمرين 08:

الجواب 01

- كتابة معادلة التفاعل

$$Lactose + H_2O \longrightarrow Glucose + Galactose$$

$$\Delta G° = -4\ Kcal/mole$$

- حساب ثابت الاتزان:

$$\Delta G° = -1{,}36\ Log\ Keq \Longrightarrow Keq = 10^{-\Delta G°/1{,}36} = 10^{+4/1{,}36}$$

$$Keq = 873{,}33$$

الجواب 2

حساب ΔG و Keq لبناء اللاكتوز:

$$Glucose + Galactose \longrightarrow Lactose$$

$$\Delta G°' = +4\ Kcal/mole \Longrightarrow Keq' = 10^{4/-1{,}36}$$

$$Keq' = 1{,}14\ 10^{-3}$$

الجواب 03

حساب $\Delta G°$ و Keq:

$$UDP\text{-}Gal \longrightarrow UDP + Gal \qquad \Delta G_1° = -7{,}3 Kcal/mole$$

$$Gal + Gluc \longrightarrow Lactose \qquad \Delta G_2° = +4 Kcal/mole$$

$$UDP\text{-}Gal + Gluc \longrightarrow UDP + Lactose \qquad \Delta G_3° = -3{,}3 Kcal/mol$$

$$Keq = 10^{-(-3,3)/1,36}$$

$$Keq = 266,97$$

الاستنتاج:

- ازدواج بين تفاعل ناشر (1) وتفاعل ماص (2) سمح بحدوث التفاعل الماص (بناء Lactose).

- دور المركب UDP-galactose :

يحتوي هذا المركب على رابطة غنية بالطاقة عند تحللها تعطي طاقة كبيرة كافية لتكوين الرابطة الجليكوزيدية بين Glucose و Galactose.

- ينتمي هذا المركب إلى المركبات الغنية بالطاقة.

حل التمرين 09:

- حساب ΔG_1° للتفاعل الأول:

$$PEP \longrightarrow Pyruvate + Pi \qquad -61,9KJ/mole$$

$$ADP + Pi \longrightarrow ATP \qquad +30,5KJ/mole$$

$$PEP + ADP \longrightarrow Pyruvate + ATP \qquad \Delta G_1^\circ = -31,4KJ/mole$$

التفاعل(1) $\Longleftarrow$ $\Delta G_1° < 0$ $\Longleftarrow$ تفاعل ناشر $\Longleftarrow$ يسير تلقائيا من اليسار إلى اليمين

- حساب ΔG_1° للتفاعل الثاني:

$$Glucose-6P \longrightarrow Glucose + Pi \qquad -13,8KJ/mole$$

$$ADP + Pi \longrightarrow ATP \qquad +30,5KJ/mole$$

$$Glucose-6P + ADP \longrightarrow Glucose + ATP \qquad \Delta G_2° = +16,7KJ/mole$$

التفاعل(2) $\Longleftarrow$ $\Delta G_2° > 0$ $\Longleftarrow$ تفاعل ماص $\Longleftarrow$ يسير من اليسار إلى اليمين

$\Longleftarrow$ التفاعل يكون تلقائيا من اليمين إلى اليسار أي في اتجاه تكوين Gluc-6P.

- الانزيمات هي: 1- pyruvate Kinase

2- Glucokinase / Hexokinase

$$G6P + ADP \xrightarrow{\text{Glucose6 Phosphatase}} Glucose + ATP$$

حل التمرين 10:

- **السؤال 1: ΔG الفعلي للتفاعل 1**

المعادلة:

$$PEP+ADP \rightarrow Pyruvate+ATP$$

المعطيات:

- $\Delta G^{\circ\prime} = -31.4$ kJ/mol
- [PEP] = 0.01 mM
- [ADP] = 1.0 mM
- [Pyruvate] = 0.5 mM
- [ATP] = 2.0 mM
- T = 310 K
- R = 8.314 J/mol·K

الحساب:

$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln(Keq)$
$Q = [Pyruvate][ATP] / [PEP][ADP] = (0.5)(2.0)/(0.01)(1.0) = 100$

$\Delta G = -31400 + 8.314 \times 10^{-3} \times \ln(100)$
$\Delta G \approx -31400 + 2577.34 \times 4.605$
$\Delta G \approx -31400 + 11860$
$\Delta G \approx -19540$ J/mol = -19.54 kJ/mol

النتيجة: التفاعل **تلقائي** لأن$\Delta G < 0$

- **السؤال 2: ΔG الفعلي للتفاعل 2**

المعادلة:

$$Malate + NAD^+ \rightarrow Oxaloacetate + NADH$$

المعطيات:

- $\Delta G^{\circ\prime} = +29.7$ kJ/mol
- [Malate] = 2.0 mM
- $[NAD^+]$ = 1.0 mM
- [Oxaloacetate] = 0.01 mM
- [NADH] = 0.1 mM

الحساب:

$Keq = [OxAc][NADH] / [Malate][NAD^+] = (0.01)(0.1)/(2.0)(1.0) = 0.0005$

$\Delta G = 29700 + 8.314 \times 310 \times \ln(0.0005)$

$\Delta G \approx 29700 + 2577.34 \times (-7.600)$

$\Delta G \approx 29700 - 19587.8$

$\Delta G \approx 10112$ J/mol = 10.11 kJ/mol

النتيجة :التفاعل **غير تلقائي** لأن$\Delta G > 0$

السؤال 3: حساب Keq لكل تفاعل:

التفاعل 1 :

$Keq = 10^{(-\Delta G^\circ / RT)} = 10^{(31400 / 2577.34)} = 10^{(12.2)} \approx 2.03 \times 10^5$

التفاعل 2 :

$Keq = 10^{(-29700 / 2577.34)} = 10^{(-11.5)} \approx 9.99 \times 10^{-6}$

السؤال 4: من يعمل بعيدًا عن التوازن؟

- **التفاعل 1** ΔG : سالب جدًا، Keq كبير ← يعمل بعيدًا عن التوازن
- **التفاعل 2** ΔG : موجب، Keq صغير جدًا ← غير تلقائي في الظروف العادية

السؤال 5: هل يصبح التفاعل المشترك تلقائيًا؟

ΔG الإجمالي $= \Delta G_1 + \Delta G_2 = -19.54 + 10.11 = -9.43$ kJ/mol

النتيجة :نعم، التفاعل المشترك يصبح **تلقائيًا** لأن ΔG الإجمالية سالبة.

حل التمرين 11:

1. الجواب الصحيح : C	**5.** الجواب الصحيح: B	**9.** الجواب الصحيح: B	**13.** الجواب الصحيح: C	**17.** الجواب الصحيح: B
2. الجواب الصحيح: C	**6.** الجواب الصحيح: B	**10.** الجواب الصحيح: D	**14.** الجواب الصحيح: C	**18.** الجواب الصحيح: C
3. الجواب الصحيح : B	**7.** الجواب الصحيح: C	**11.** الجواب الصحيح :B	**15.** الجواب الصحيح: B	**19.** الجواب الصحيح: B
4. الجواب الصحيح: C	**8.** الجواب الصحيح: B	**12.** الجواب الصحيح: C	**16.** الجواب الصحيح: B	**20.** الجواب الصحيح: B

2. سلسلة علاقة كمون الأكسدة والإرجاع (E) بالطاقة الحرة (ΔG)

1.2. تذكير بالمفاهيم الأساسية لكمون الأكسدة والإرجاع (E)

مفهوم كمون الأكسدة والإرجاع

من بين التفاعلات التي تحدث على مستوى الخلايا الحية تفاعلات الأكسدة والإرجاع.

ماهي الأكسدة و ما هو الإرجاع؟

الأكسدة هي فقد للإليكترونات و الإرجاع هو اكتساب للإليكترونات.

من بين تفاعلات الأكسدة و الإرجاع التفاعلات التي تحدث على مستوى السلسلة التنفسية من أجل إنتاج جزيئة الطاقة ATP .

- ❖ خلال تفاعلات الأكسدة أو الإرجاع قد يحدث فقد أو اكتساب للطاقة.
- ❖ للتعبير عن مقدار طاقة الإلكترونات في تفاعلات الأكسدة والإرجاع يستعمل مصطلح آخر يختلف عن مصطلح الطاقة الحرة يعرف بكمون الأكسدة والإرجاع Potentiel Redox. وهو مصطلح كهروكيميائي ويرمز له بالرمز E .
- ❖ **كيف يعمل الجهاز؟**

يمكن حساب التغير في كمون الأكسدة والإرجاع ΔE بواسطة جهاز الفولت متر (الشكل 02). تتدفق الإلكترونات من القطب الاختباري إلى القطب المرجعي، أو بالعكس.

حيث يمثل قطب الهيدروجين قطب نصف الخلية المرجعي النهائي عند pH = 0. ويُحدّد جهد القوة الدافعة الكهربائية (emf) لهذا القطب بقيمة 0.00 فولت.

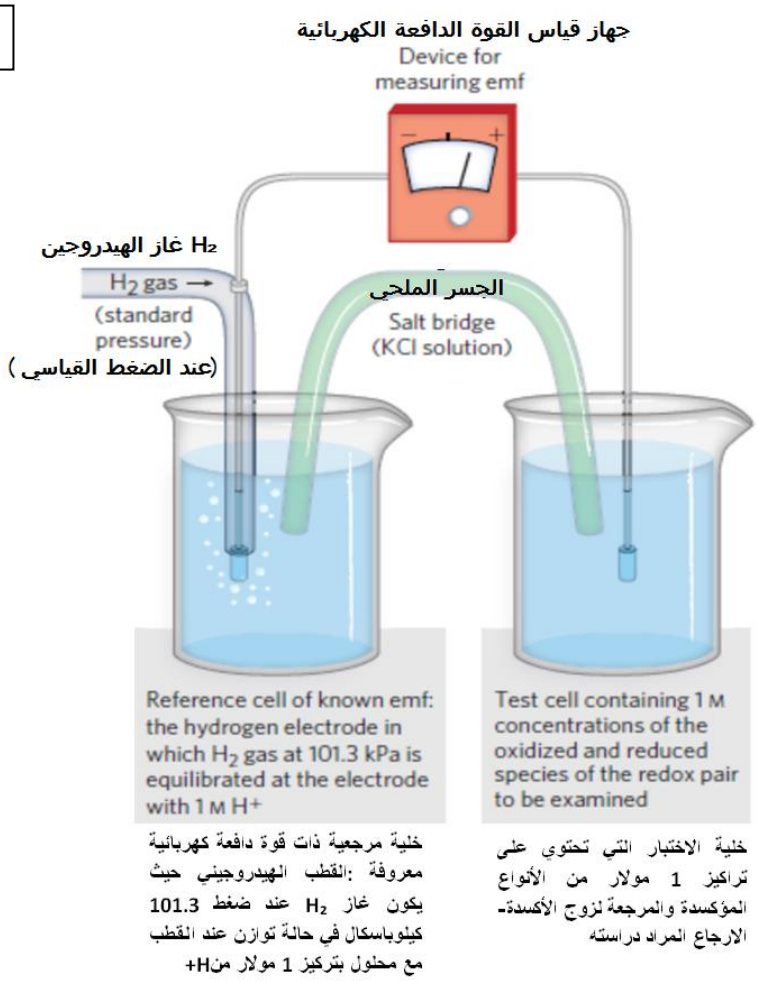
عند pH = 7 وحرارة 25°C في الخلية الاختبارية فإن E′° لقطب الهيدروجين يساوي - 0.414 فولت.

إن اتجاه تدفق الإلكترونات يعتمد على "ضغط" الإلكترونات النسبي أو الجهد بين الخليتين.

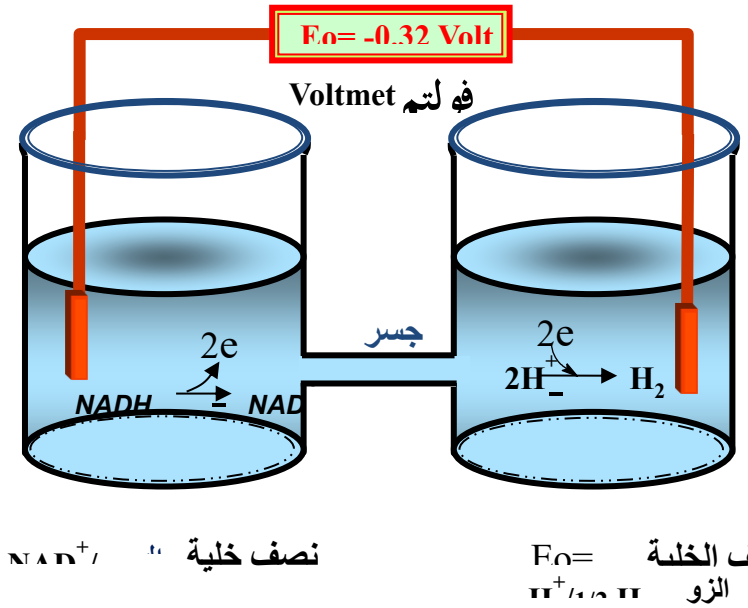
يُستخدم جسر ملحي يحتوي على محلول KCl مشبع لتوفير مسار لحركة الأيونات المعاكسة بين الخلية الاختبارية والخلية المرجعية.

من خلال قياس القوة الدافعة الكهربائية المرصودة ومعرفة قيمة emf للخلية المرجعية، يمكن للمجرّب تحديد emf للخلية الاختبارية التي تحتوي على زوج الأكسدة/الإرجاع. علما أن الخلية التي تكتسب الإلكترونات تكون ذات كمون الأكسدة والإرجاع الأكثر إيجابية.

1



2



الشكل 02: قياس كمون الأكسدة والإرجاع القياسي (E°) لزوج أكسدة/إرجاع.

1- الجهاز في شكله الحقيقي. 2- مخطط مبسط للجهاز.

في تفاعلات الأكسدة والإرجاع تكتب المركبات القابلة للأكسدة والإرجاع في شكل أزواج (ثنائيات) تعرف بـزوج أكسدة/إرجاع Couple redox .

مثال:

Fe^{3+}/Fe^{2+}

$NAD^+/NADH$

Forme oxydée / Forme réduite

الصورة المرجّعة / الصورة المؤكسدة

يعبر عن قابلية فقد الإليكترونات لكل زوج بكمون الأكسدة والإرجاع E والذي يقاس بوحدات الفولت volt .

لكل زوج كمون قياسي ثابت في الشروط القياسية E°

❖ كيف تنتقل الإلكترونات بين الزوجين؟ من هو الزوج المعطي و من هو الزوج المستقبل؟

$D \xrightarrow[\text{أكسدة}]{} D^+ + e^-$

$A + e^- \xrightarrow[\text{إرجاع}]{} A^-$

نفترض لدينا التفاعلين التاليين:

❖ تبلغ قيمة E° للزوج D^+/D -0.3 فولت.

❖ بينما تبلغ قيمة E° للزوج A/A^- -0.1 فولت.

❖ تنتقل الإلكترونات تلقائيا من الكمون المنخفض إلى المرتفع.

❖ يكون الزوج D^+/D هو المعطي و يكون الزوج A/A^- هو المستقبل و بالتالي يمكن كتابة معادلة انتقال الإليكترونات بين الزوجين (تفاعل أكسدة / إرجاع) كالتالي:

$$D + A \rightleftharpoons D^+ + A^-$$

❖ **كيف يتم حساب الطاقة عند انتقال الإلكترونات بينهما؟**

إذا افترضنا انتقال إلكترون من جزيء مرجِع (معطي D (Donneur إلى جزيء مؤكسَد (مستقبل A (Accepteur فإن ΔG^o لهذا التفاعل تتناسب مع الفرق في كمون الأكسدة والإرجاع القياسي ΔE^o بين المستقبل والمعطي و تحسب حسب العلاقة التالي:

$$\Delta G° = -nf\,(E_A^o - E_D^o)$$

حيث n عدد الإلكترونات و f هو ثابت فاراداي ويساوي 23.062 كيلوكالوري /فولت/ مول أو 96.5 كيلوجول/فولت/ مول.

2.2. سلسلة التمارين حول الطاقة الحرة و علاقتها بكمون الأكسدة والإرجاع

التمرين 01

يتم التفاعل التالي خلال السلسلة

التنفسية + $FADH_2$

$$Cytb\ Fe^{+3} \rightarrow FAD + Cyt\ Fe^{+2} + H^+$$

✓ هل المعادلة متزنة ؟

✓ ما هو عدد البروتونات H الداخلة في التفاعل؟

✓ حدد عدد الالكترونات المنقولة؟

التمرين 02

يقدر كمون الأكسدة والإرجاع القياسي للتفاعل التالي:

$$Fe^{+3} + é \rightarrow Fe^{+2}$$

بـ 0.771 فولت , عند درجة الحرارة 25 م و حموضة معتدلة pH=7 . ما هو التغيير في قيمة الطاقة الحرة للتفاعل في هذه الشروط ؟ صنف هذا التفاعل (ذاتي أو غير ذاتي) مع التعليل؟

التمرين 03

لدينا التفاعل التالي:

$$CH_3\text{-}CHO + NADH{+}H^+ \rightarrow CH_3\text{-}CH_2\ OH + NAD^+$$

يبلغ E_0 للزوج (اسيتالدهيد ايثانول) و ($NAD^+/NADH$) قيمة - 0.197 و - 0.3 فولت على التوالي في الشروط القياسية (عند درجة الحرارة 25 °م و حموضة معتدلة: pH=7)

✓ في أي اتجاه يسير التفاعل في هذه الحالة؟

✓ ما هو عدد الالكترونات (é) المنقولة ؟

✓ احسب ثابت الاتزان للتفاعل في الاتجاه التلقائي ؟

التمرين 04

عند انتقال الالكترونات (é) إلى الأوكسجين (O_2) في الشروط القياسية حسب المعادلة التالية :

$$NADH+H^+ + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow NAD^+ + H2O$$

تنتج طاقة, حيث تستغل هذه الطاقة في تكوين مركب غني بالطاقة.

✓ ما هو هذا المركب؟

✓ اكتب المعادلة الكيميائية لتكوينه ؟

✓ ما هو عدد الالكترونات (é) و البروتونات (H^+) المنقولة ؟

✓ ما هو الإنزيم المسؤول عن هذا التفاعل و موقعه الحيوي ؟

✓ احسب كمية الطاقة الناتجة بالكالوري ثم بالجول؟

✓ إذا علمت أن كل مول من هذا المركب يتطلب 7.3 كيلو كالوري. ما هو عدد المولات الناتجة منه؟

التمرين 05

لدينا نوع من البكتيريا تستعمل في تنفسها الفوسفات كمستقبل و المركب NADH كمركب معطي للالكترونات. اذا علمت ان كمون الأكسدة والإرجاع القياسي (E_0) للزوج $NAD^+/NADH$

هو - 0.32 فولت و يبلغ للزوج PO_4^{-3}/HPO_4^{-2} +0.48 فولت , و أن التغير في ΔE_0 يقدر بـ 1 فولت عندما تكون $\Delta G^0 =$ 46 كيلو كالوري لكل زوج من الالكترونات.

- ✓ ما هو عدد ATP المتكونة من ADP و Pi لكل زوج من الالكترونات ؟ اذا علمت أن طاقة تكوين مركب ATP تبلغ 7.3 كيلو كالوري لكل مول . و أن مردود عملية الازدواج هو60 %.

- ✓ إذا اعتمدت البكتيريا في تنفسها على الأكسجين (O_2) كمستقبل للالكترونات (é) هل في هذه الحالة سيتكون عدد اكبر أو اقل من ATP? إذا افترضنا وجود نفس المردود (60 %). ما هو عدد ATP المتكونة في هذه الحالة مع العلم بان زوج الاختزال القياسي للزوج (E_0) O_2/O_2 ½ يبلغ +0.82 فولت.

التمرين 06

ليكن لدينا التفاعل التالي:

$$\textbf{Pyruvate} + \textbf{NADH+H}^+ \rightarrow \textbf{Lactate} + \textbf{NAD}^+$$

إذا تم التفاعل من اليسار إلى اليمين تكون $\Delta G =$ -6 كيلو كالوري /المول في الشروط القياسية.

- ✓ احسب E_0 للزوج (Pyr/Lac) مع العلم بان كمون الأكسدة والإرجاع القياسي (E_0) هو -0.32 فولت؟

التمرين 07

ليكن لدينا التفاعل التالي:

$$NADH+H^+ +3ADP \quad +3\ Pi \quad + \ ½\ O_2 \quad \rightarrow NAD^+ + \ 3\ ATP \ + \ H2O$$

إذا علمت ان كمون الأكسدة والإرجاع القياسي (E_0) للزوج $NAD^+/NADH$ هو -0.32 فولت و للزوج (E_0) ½ O_2/O_2 يبلغ +0.82 فولت.

✓ احسب محصلة الطاقة الكلية لأكسدة مول من $NADH+H^+$ بالأكسجين خلال السلسلة التنفسية, مع العلم أن تكوين مركب ATP انطلاقا من ADP و Pi يتطلب 7.3 كيلو كالوري لكل مول.

✓ فسر حساب المردودية؟

التمرين 08

لدينا الأزواج A/A^- , B/B^- . اكتب معادلة التفاعل في الاتجاه الذاتي و احسب ΔG^0 اذا كان E_0 هو -0.19 فولت للزوج A/A^- و 0.1 فولت للزوج B/B^-

✓ اكتب معادلة تفاعل كل من الزوجين مع الزوج $H^+/1H2$ و احسب ΔG^0 في كل حالة مع العلم ان E_0 للزوج $H^+/1H2$=0.

التمرين 09

تفاعل الجلوكوز مع الأوكسجين في التنفس الخلوي يعطي المعادلة الكلية المبسطة التالية:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$$

- $E(1/2O_2/H2O) = +0.815$ V

- E(Glucose/ CO2) = -0.430 V

1. احسب $\Delta E^{\circ\prime}$ للتفاعل الكلي
2. احسب $\Delta G^{\circ\prime}$ لهذا التفاعل (مع العلم أن عدد الإليكترونات المنقولة هو n=24
3. فسر لماذا يعتبر هذا التفاعل مصدر الطاقة الرئيسي في الخلية.

التمرين 10

أسئلة متعدد الاختيارات (MCQ) حول الطاقة الحرة (ΔG) وعلاقتها بكمون الأكسدة والإرجاع القياسي (E°)

1. ما هي العلاقة الصحيحة بين الطاقة الحرة وفرق كمون الأكسدة والإرجاع ؟

A. $\Delta G = nF\Delta E$
B. $\Delta G = -nF\Delta E$
C. $\Delta G = n/\Delta E$
D. $\Delta G = \Delta E/n$

2. ما قيمة ثابت فاراداي(F) ؟

A. 6.022×10^{23}
B. 1.602×10^{-19}
C. 96,485 C/mol
D. 8.314 J/mol·K

3. عند $\Delta G^{\circ\prime}$ سالبة، فإن التفاعل يكون:
A. غير تلقائي
B. في حالة اتزان
C. تلقائي
D. يحتاج طاقة خارجية

4. وحدة ΔG هي:

A. Volt
B. Joule
C. Coulomb
D. Ohm

5. عندما يكون فرق كمون الأكسدة والإرجاع ($\Delta E^{\circ\prime}$) موجبًا، فإن التفاعل:
A. غير مفضل
B. مفضل حراريًا
C. عند الاتزان
D. يتطلب طاقة

6. ما هو عدد الإلكترونات المنقولة في تفاعل NADH إلى NAD^+ ؟

A. 1
B. 2
C. 3
D. 4

7. إذا كان $E^{\circ\prime}$ للمركب A أكبر من المركب B، فإن:
A . A أكثر قدرة على الأكسدة
B . A أكثر قدرة على الاختزال
C . B أكثر قدرة على الاختزال
D . التفاعل غير ممكن

8 . في تفاعل يحتوي على $\Delta E^{\circ\prime} = +0.4$ V و$n = 2$ ، فإن $\Delta G^{\circ\prime}$ يساوي تقريبًا:

A. -77.2 kJ/mol
B. +77.2 kJ/mol
C. -38.6 kJ/mol
D. +38.6 kJ/mol

9. أي من التالي يمثل قطبًا مرجعيًا في قياسات°E ؟
A. قطب كلور الفضة
B. قطب الكربون
C. قطب الهيدروجين القياسي
D. قطب الذهب

10. إذا كان ΔG°′ موجبًا و E°′ سالبًا، فإن التفاعل:
A. لا يحدث تلقائيًا
B. ينتجATP
C . يحدث بقوة
D . يتوازن بسرعة

11. عند أي pH يتم قياس E°′ في الظروف البيوكيميائية القياسية؟

A. 0
B. 7
C. 14
D. 1

12. أي من هذه الجزيئات له جهد اختزال منخفض جدًا ويعمل كعامل مختزل قوي؟

A. O_2
B. H_2O
C. NADH
D. FAD

13. الطاقة الحرة القياسية ΔG°′ للتفاعل $NADH + ½O_2 \rightarrow NAD^+ + H_2O$ هي تقريبًا:

A. -50 kJ/mol
B. -220 kJ/mol
C. -100 kJ/mol
D. +100 kJ/mol

14. ما عدد الإلكترونات المنقولة في أكسدة جزيء واحد من الجلوكوز الكامل؟

A. 6
B. 12
C. 24
D. 36

15. إذا كان $\Delta E^{\circ\prime}$ لتفاعل +1.1V ، و$n = 3$، فما قيمة $\Delta G^{\circ\prime}$ بالكيلوجول؟

A. -318.4
B. -290
C. -322.0
D. -275.5

16. في سلسلة نقل الإلكترونات، لماذا يُطلق تفاعل نقل الإلكترون من NADH إلى O_2 طاقة كبيرة؟

A. لأن الفرق في $E^{\circ\prime}$ بينهما كبير
B. لأن O_2 عامل مختزل قوي
C. لأن NADH عامل مؤكسد
D. لأنه لا يوجد إنزيمات مشاركة

17. الفرق في الطاقة الحرة بين +0.2 V و +0.8 V لعدد 2 إلكترون هو:

A. 38.6 kJ/mol
B. 116 kJ/mol
C. 38.6 J/mol
D. 0.6 V

18. عند أي شرط يكون$\Delta G = 0$ ؟
A. عندما يكون$\Delta E^{\circ\prime} = 0$

B. عندما يكون التفاعل تلقائي
C. عندما يكون التفاعل عند الاتزان
D. عندما يكون$n = 0$

19. في التجارب، يستخدم الجسر الملحي (salt bridge) لــ:
A. تقوية فرق الجهد
B. نقل الإلكترونات
C. معادلة حركة الأيونات
D. منع التأكسد

20 .عند إضافة NADH إلى تفاعل معين، يزداد معدل التفاعل لأن:

A. NADH يغير pH
B. NADH يزيد $E°'$
C. NADH يتبرع بإلكترونات ويحفز الاختزال
D. NADH يقلل من عدد الإلكترونات

.

3.2. حلول التمارين حول الطاقة الحرة وعلاقتها بكمون الأكسدة والإرجاع

حل التمرين 01

لدينا التفاعل التالي

$$FADH_2 + Cytb\ Fe^{+3} \longrightarrow FAD + CytbFe^{+2} + H^+$$

1. المعادلة غير متزنة وبالتالي لموازنة هذه المعادلة نفصلها الى جملة معادلتين كما يلي

$$FADH_2 \longrightarrow FAD + 2H^+ + 2é \qquad n_1=2$$
$$Cytb\ Fe^{+3} + é \longrightarrow Cytb\ Fe^{+2} \qquad n_2=1$$

بما ان عدد الالكترونات غير متساوي نقول ان المعادلة غير متزنة و بالتالي يجب جعل عدد الالكترونات متساوي في كلتا المعادلتين وذلك بضرب المعادلة الثانية في 2 و بالتالي تصبح المعدلة متزنة كما هو موضح في التفاعل التالي:

$$FADH_2 + 2cytb\ Fe^{3+} \longrightarrow FAD + 2cytbFe^{+2} + 2H^+$$

2. عدد البروتونات الداخلة في التفاعل هو 2
3. عدد الالكترونات المنقولة في التفاعل هو 2

حل التمرين 02

لدينا التفاعل التالي: $Fe^{+3} + é \longrightarrow Fe^{+2}$

1. حساب التغير في الطاقة الحرة القياسية $\Delta G^\circ = -nF\Delta E^\circ$

مع العلم ان: $\Delta E = E^\circ_{(Fe^{+3}/Fe^{+2})} - E^\circ_{(H^+/1/2\,H_2)}$

$= 0.771 - 0 = 0.771\ V$

عدد الالكترونات $(n) = 1$ و بالتالي:

$\Delta G^\circ = -23.06 \times 0.771 = -17.78$ kcal/mole

بما ان $\Delta G^\circ < 0$ و منه يمكن القول ان التفاعل تلقائي ناشر للحرارة

حل التمرين 03

لدينا التفاعل التالي

$$CH_3\text{-}CHO + NADH^+H^+ \rightarrow CH_3\text{-}CH_2\,OH + NAD^+$$

1. لتحديد اتجاه سير التفاعل لدينا

$\Delta E^\circ = E^\circ_{(CH3\text{-}CHO/CH3\text{-}CH2\text{-}OH)} - E^\circ_{(NAD+/NADH)}$

$\Delta E^\circ = -0.197 - (-0.32) = 0.123\,v$

$\Delta E^\circ = 0.123\,v$

بما ان $\Delta E^\circ > 0$ فان $\Delta G^\circ < 0$ لانه توجد علاقة عكسية في الاشارة بينهما و بالتالي فان التفاعل تلقائي من اليسار الى اليمين.

2. عدد الالكترونات المنقولة هو 2 لانه اذا تم تفكيك المعادلة الى جملة معادلتين تكون كالتالي

$$NADHH^+ + H^+ \longrightarrow NAD^+ + 2é + 2H^+ \qquad n_1 = 2$$

$$CH3\text{-}CHO + 2H^+ + 2é \longrightarrow CH3\text{-}CH2\text{-}OH \qquad n_2 = 2$$

3. حساب ثابت الاتزان في الاتجاه التلقائي

$\Delta G^\circ = -nF\Delta E^\circ = -2 \times 23.06 \times 0.123 = -5.67$ kcal/mole

$\Delta G^\circ = -1.36$ Keq

$Keq = 10^{-\Delta G^\circ}/1.36 = 10^{+5.67/1.36} = 10^{+4.17}$

$Keq = 14791.08$

حل التمرين 04

لدينا التفاعل التالي:

$$NADH+H^+ + ½\ O2 \rightarrow NAD^+ + H2O$$

1. المركب الغني بالطاقة هو **ATP**.
2. كتابة المعادلة الكيميائية لتكوينه:

$$ADP + Pi \longrightarrow ATP$$

3. لمعرفة عدد الالكترونات و البروتونات المنقولة نقوم بتفكيك المعادلة على شكل جملة معادلتين او مرحلتين

$$NADHH^+ + H^+ \longrightarrow NAD^+ + 2H^+ + 2é$$

$$1/2O_2 + 2H^+ + 2é \longrightarrow H_2O$$

وبالتالي فان:

- عدد الالكترونات المنقولة هو 2
- عدد البروتونات المنقولة هو 2

4. الانزيم المسؤول عن هذا التفاعل هو **ATP synthase**.
5. و يتواجد في الغشاء الداخلي للميتوكوندري.

7- حساب عدد مولات الـ ATP الناتجة:

1 mole ⟶ 7.3 kcal/mole
X ⟶ 52.57 kcal/mole
⟹ X= 7

و بالتالي ينتج 7 جزئيات ATP.

6. حساب كمية الطاقة الناتجة بالكلوري ثم بالجول

لدينا

$$\Delta G° = -nF\Delta E°$$

حيث ان عدد الالكترونات (n) هو 2

$$\Delta E° = E°_{(1/2O2/H2O)} - E°_{(NAD+/NADH)} = 0.82 - (-0.32) = 1.14\ v$$

$$\Delta E° = 1.14v$$

بعدها نقوم بحساب التغير في الطاقة الحرة القياسية

$$\Delta G° = -2x23.06x1.14 = 52.57\ kcal/mole$$

$$\Delta G° = -219.77\ kjoule/mole$$

حساب المردودية:

نحن نعلم أن 1 مول من $NADH, H^+$ يعطي 2.5 جزيءة من ATP

7 ATP ⟶ 100%
2.5 ⟶ X%

X= 35.71 %

أي 35.71 % فقط تتحول إلى ATP و الباقي تخرج على شكل حرارة

حل التمرين 05

A . حساب عدد ATP لكل زوج من الالكترونات المنقولة

مع العلم انه لدينا

$E^\circ_{(NAD+/NADH+)} = -0.32$ v

$E^\circ_{(PO4-3/HPO4-2)} = 0.48$v

من معطيات التمرين لدينا $\Delta E^\circ = 1$v عندما تكون $\Delta G^\circ = 46$ kcal/mole و بالتالي يجب حساب قيمة $\Delta E^{\circ\prime}$ للبكتيريا التي تستعمل في تنفسها الفوسفات كمستقبل و المركب NADH كمركب معطي للالكترونات و بالتالي لدينا

$\Delta E^\circ = 1V$ ⟶ 46 Kcal/mole
$\Delta E^{\circ\prime}(0.48+ 0.32)$ ⟶ $\Delta G^{\circ\prime}$

$\Delta G^{\circ\prime} = 36.896$ kcal/mole

طريقة أخرى لحساب الطاقة الناتجة:

$\Delta G^\circ = -nF\Delta E^\circ$

حيث ان عدد الالكترونات (n) هو 2

$\Delta E^{\circ\prime} = E^\circ_{(PO_4^{-3}/HPO_4^{-2})} - E^\circ_{(NAD+/NADH)} = 0.48 - (-0.32) = 0.8$ v

$\Delta E^\circ = 0.8$ v

بعدها نقوم بحساب التغير في الطاقة الحرة القياسية

$$\Delta G^\circ = -2x23.06x\ 0.8 = -36.89 \text{ kcal/mole}$$

و بعد ذلك نقوم بحساب $\Delta G^{\circ\prime\prime}$ عند المردود 60 %

36.896 Kcal/mole ⟶ 100%

$\Delta G^{\circ\prime\prime}$ ⟶ 60%

$\Delta G^{\circ\prime\prime} = 22.14$ kcal/mole

و بالتالي لحساب عدد جزئيات ATP لدينا العلاقة الثلاثية التالية

1mole ⟶ 7.3 kcal/mole

X ⟶ 22.14 kcal

X= 3

ينتج 3 جزيئات من ATP

B. حساب عدد ATP المتكونة إذا اعتمدت البكتيريا في تنفسها على الأكسجين (O_2) كمستقبل للالكترونات (é)

نقوم باتباع نفس الطريقة السابقة حيث ان :

$$\Delta G^\circ = -nF\Delta E^\circ = -2 \times 23.06\ 10^{-3} \times (0.82+0.32)$$

$$\Delta G^\circ = -52.577 \text{kcal/mole}$$

بعدها نقوم حساب ΔG° عند المردود 60 % حيث لدينا :

52.577 kcal/mole ⟶ 100%

$\Delta G'^\circ$ ⟶ 60%

$\Delta G^\circ = 32.54$ kcal/mole

حساب عدد جزئيات ATP

1mole ⟶ 7.3 kcal/mole

X ⟶ 32.54 kcal/mole

X= 4

ينتج 4 جزيئات من ATP

حل التمرين 06

لدينا التفاعل التالي : $\mathbf{Pyruvate + NADH+H^+ \longrightarrow Lactate + NAD^+}$

التفاعل تلقائي يسير من اليسار الى اليمين لان $\Delta G°<0$ ($\Delta G° = -6Kcal/mole$)

- حساب E_0 للزوج (Pyr/Lac)

لمعرفة عدد الالكترونات يمكن تفكيك المعادلة كمايلي :

$$\mathbf{CH3\text{-}CO\text{-}COO^- + 2H^+ + 2é \longrightarrow CH3\text{-}CHOH\text{-}COOH}$$

$$\mathbf{NADHH^+ \longrightarrow 2H^+ + 2é + NAD}$$

و بالتالي تكون المعادلة متزنة و عدد الالكترونات المنقولة هو 2

نقوم بحساب $\Delta E°$ من القانون التالي :

$$\Delta G° = -nF\Delta E°$$

$$\Delta E° = -\Delta G°/nF = 6/2 \times 23.06 = 0.13v$$

$$\Delta E° = E°_{pyr/lact} - E°_{NAD/NADH}$$

$$E°_{pyr/lact} = 0.13 + (-0.32) = -0.19$$

$$E°_{pyr/lact} = -0.19v$$

حل التمرين 07

يشبه التمرين رقم 05

حل التمرين 08

1. معادلة التفاعل:

❖ تنتقل الإلكترونات تلقائيا من الكمون المنخفض إلى المرتفع .

$$A^- + B \longrightarrow A + B^-$$

2. حساب الطاقة الحرة القياسية :

$$\Delta G^0 = - nF \Delta E^0$$

$$E^0_{(A/A^-)} = - 0.19 \text{ V}$$

$$E^0_{(B/B^-)} = 0.1 \text{ V}$$

$$\Delta E^0 = E^0_{(B/B^-)} - E^0_{(A/A^-)}$$

$$\Delta E^0 = 0.1 - (- 0.19)$$

$$\Delta E^0 = + 0.29 \text{ V}$$

$$\Delta G^0 = - nF \Delta E^0$$

$$= - 1 \text{ X } 23.06\ 10^{-3} \text{ X } 0.29$$

$$\Delta G^0 = - 6.68 \text{ Kcal/mole}$$

بما ان $\Delta E°>0$ فان $\Delta G°<0$ لانه توجد علاقة عكسية في الاشارة بينهما و بالتالي فان التفاعل تلقائي من اليسار الي اليمين.

3. كتابة معادلة تفاعل الزوج A/A^- مع الزوج $H^+/1/2\,H_2$ وحساب الطاقة الحرة القياسية :

❖ تنتقل الإلكترونات تلقائيا من الكمون المنخفض إلى المرتفع .

$$A^- + H^+ \longrightarrow A + 1/2\,H_2$$

$$\Delta G^0 = -nF\,\Delta E^0$$

$$\Delta E^0 = E^0_{(H^+/1/2\,H_2)} - E^0_{(A/A^-)} = 0 - (-0.19) = +0.19\ V$$

$$\Delta G^0 = -nF\,\Delta E^0$$

$$= -1 \times 23.06\ 10^{-3} \times 0.19$$

$$\Delta G^0 = -4.38\ Kcal/mole$$

بما ان $\Delta E°>0$ فان $\Delta G°<0$ لانه توجد علاقة عكسية في الاشارة بينهما و بالتالي فان التفاعل تلقائي من اليسار الي اليمين.

4. كتابة معادلة تفاعل الزوج A/A^- مع الزوج $H^+/1/2\,H_2$ وحساب الطاقة الحرة القياسية :

❖ تنتقل الإلكترونات تلقائيا من الكمون المنخفض إلى المرتفع .

$$B + 1/2\,H_2 \longrightarrow B^- + H^+$$

$$\Delta G^0 = -nF\,\Delta E^0$$

$$\Delta E^0 = E^0_{(B/B^-)} - E^0_{(H^+/1/2\,H_2)} = 0.1 - 0 = 0.1\ V$$

$$\Delta G^0 = -nF\,\Delta E^0$$

$$= -1 \times 23.06\ 10^{-3} \times 0.1$$

$$\Delta G^0 = -2.306\ Kcal/mole$$

بما ان $\Delta E°>0$ فان $\Delta G°<0$ لانه توجد علاقة عكسية في الاشارة بينهما و بالتالي فان التفاعل تلقائي من اليسار الي اليمين.

حل التمرين 09

يمثل هذا التفاعل **أكسدة الجلوكوز**، ويحدث داخل **الميتوكوندري** ضمن السلسلة التنفسية الخلوية، وهو المصدر الأساسي للطاقة في الخلية.

$$\mathbf{C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O}$$

- $E(1/2O_2/H2O) = +0.815$ V المستقبل
- $E(Glucose/\ CO2) = -0.430$ V المعطي

* حساب فرق كمون الأكسدة والإرجاع ($\Delta E°$) :

$\Delta E = 0.815 - (-0.430) = 1.245$ V

* حساب الطاقة الحرة القياسية $\Delta G°$:

$\Delta G° = -nF\ \Delta E = -24 \times 96{,}485 \times 10^{-3} \times 1.245$

$\Delta G° = -2{,}882.6$ kJ/mol

- $\mathbf{\Delta G° < 0}$ ← التفاعل شديد الميول للحدوث تلقائيًا.
- هذا يفسر لماذا يتم تخزين طاقة هائلة في الجلوكوز ولماذا يعتبر التنفس الخلوي مصدر الطاقة الأهم في الكائنات الحية.
- تُستخدم هذه الطاقة في تخليق ATP عبر سلسلة نقل الإلكترونات وتفاعل الأكسدة الفوسفورية.

حل التمرين 10

1. الجواب الصحيح : B	**5.** الجواب الصحيح: B	**9.** الجواب الصحيح: C	**13.** الجواب الصحيح: B	**17.** الجواب الصحيح: A
2. الجواب الصحيح: C	**6.** الجواب الصحيح: B	**10.** الجواب الصحيح: A	**14.** الجواب الصحيح: C	**18.** الجواب الصحيح: C
3. الجواب الصحيح : C	**7.** الجواب الصحيح: B	**11.** الجواب الصحيح :B	**15.** الجواب الصحيح: A	**19.** الجواب الصحيح: C
4. الجواب الصحيح: B	**8.** الجواب الصحيح: A	**12.** الجواب الصحيح: C	**16.** الجواب الصحيح: A	**20.** الجواب الصحيح: C

3. تمارين متنوعة حول المتابوليزم

1.3. نبذة عن الميتابوليزم

الميتابوليزم (الاستقلاب أو الأيض، Metabolism) هو مجموعة التفاعلات البيوكيميائية التي تحدث داخل خلايا الكائنات الحية للحفاظ على الحياة، وتشمل:

- تفاعلات هدم المواد (Catabolism): تفكيك الجزيئات مثل السكريات، الدهون، البروتينات لإنتاج الطاقة (مثال: تحلل الجلوكوز).

- تفاعلات بناء المواد (Anabolism): ويتم خلالها تكوين جزيئات بسيطة مثل الجلوكوز والأحماض الآمينية أو تكوين جزيئات معقدة من جزيئات بسيطة مثل بناء البروتينات من الأحماض الأمينية وتستلزم تفاعلات البناء استخدام الطاقة.

2.3. أهمية الميتابوليزم

- توفير الطاقة (عبر إنتاج ATP).

- تخليق الجزيئات اللازمة للنمو وإصلاح الخلايا.

- التخلص من الفضلات (مثل اليوريا، ثاني أكسيد الكربون).

3.3. أمثلة على مسارات أيضية رئيسية

- استقلاب السكريات: تحلل الجلوكوز، دورة كريبس، التنفس الهوائي.

- استقلاب الدهون: أكسدة الأحماض الدهنية، تكوين الأجسام الكيتونية.

- استقلاب البروتينات: هدم الأحماض الأمينية، دورة اليوريا.

4.3. العوامل المؤثرة في الميتابوليزم

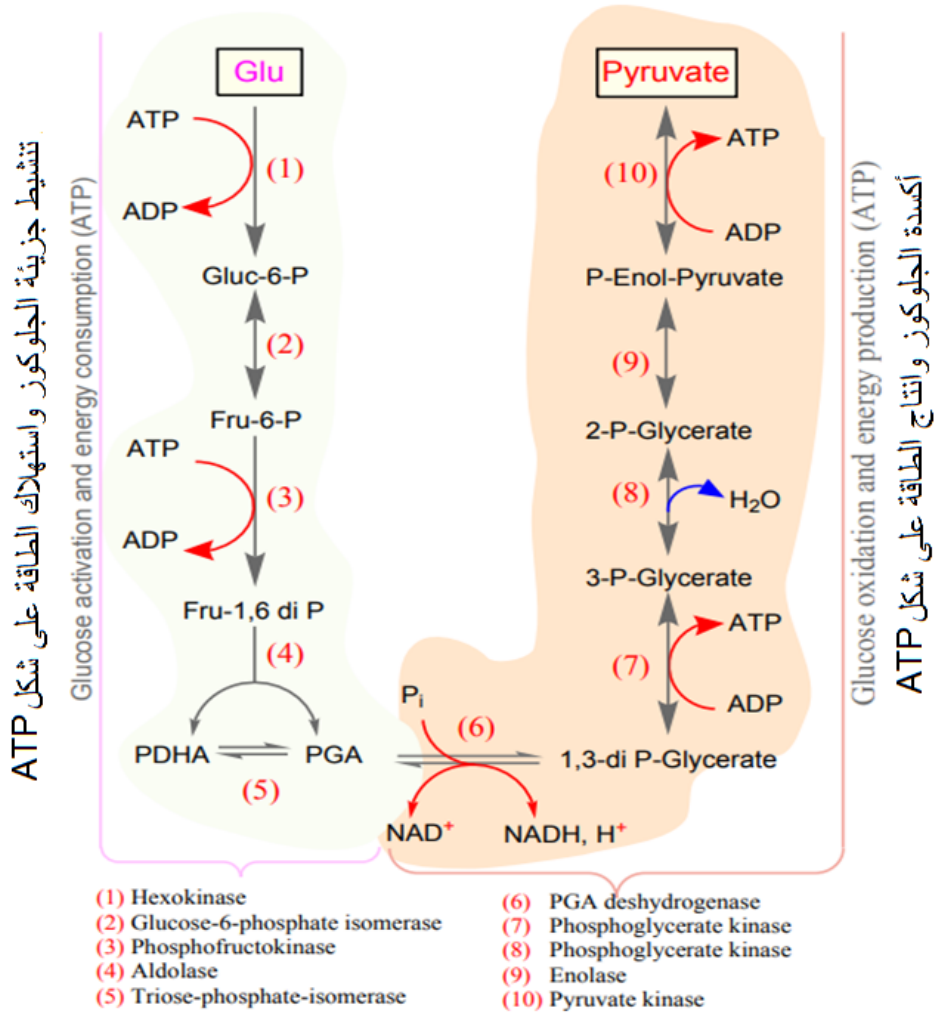
- الأنزيمات: تُسرِّع التفاعلات (مثل هيكسوكيناز في تحلل الجلوكوز).

- الهرمونات: مثل الإنسولين (يخفض سكر الدم) والجلوكاجون (يرفعه).

- العوامل الوراثية والبيئية: كالتغذية، درجة الحرارة، النشاط البدني.

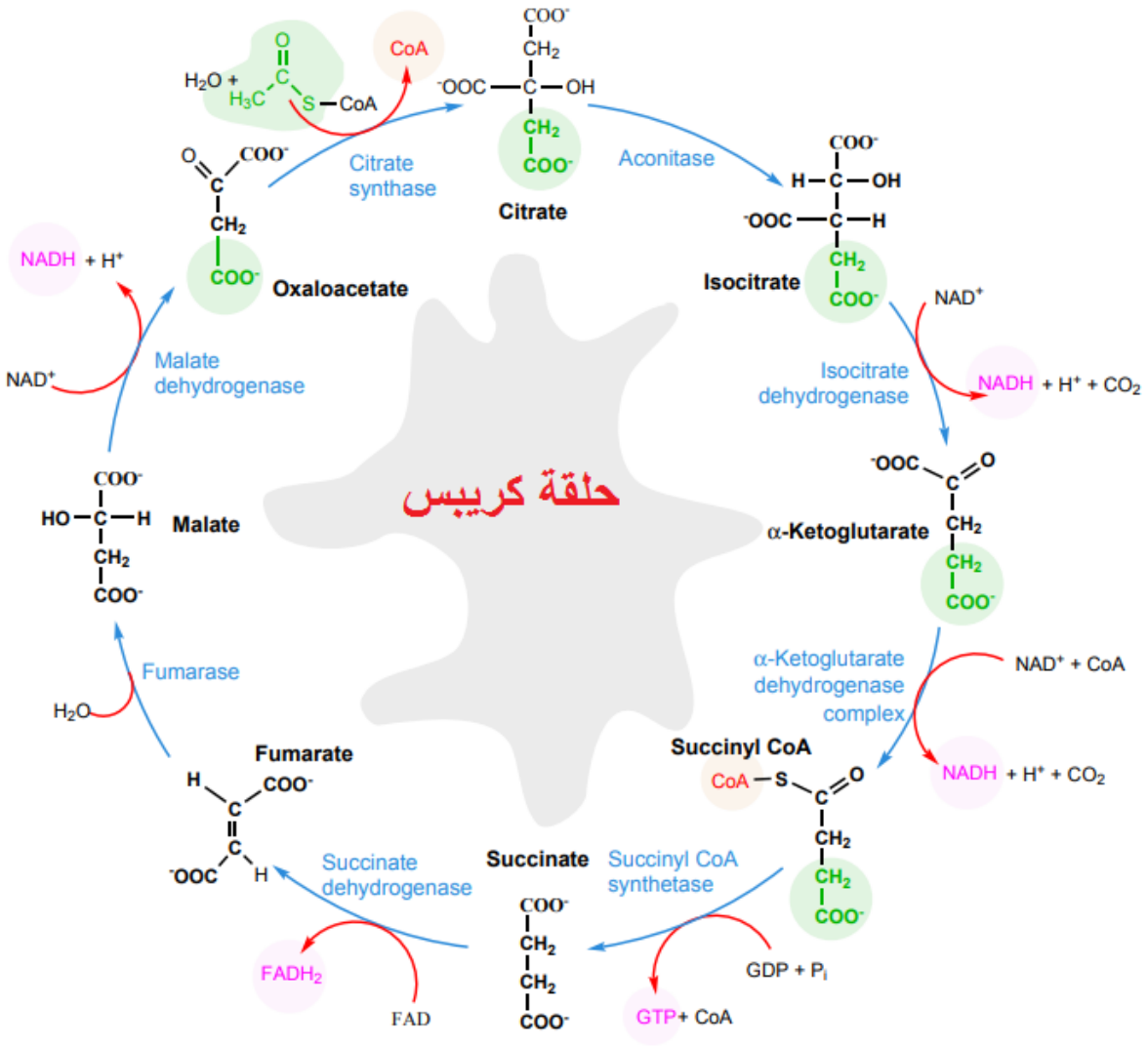
1.4.3. تذكير بميتابوليزم السكريات

أ- التحلل السكري

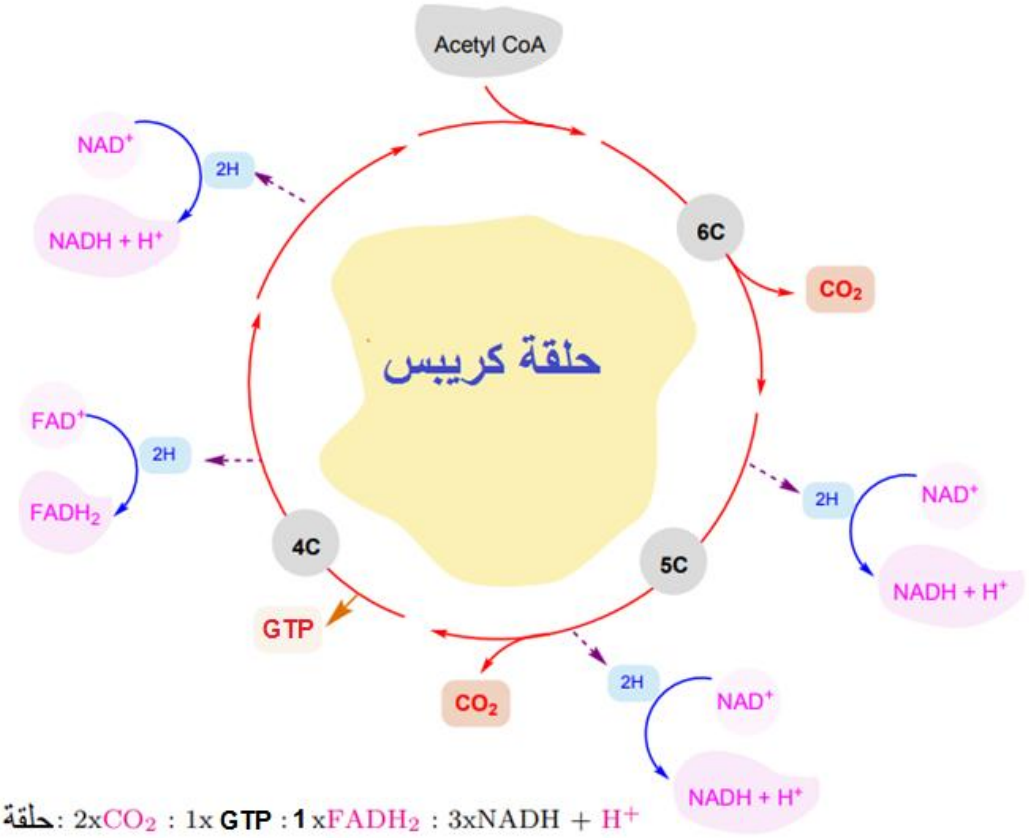


مراحل التحلل السكري والأنزيمات المتدخلة فيه

ب- حلقة كريبس


حلقة كريبس
Citrate synthase
Citrate
Aconitase
Isocitrate
Isocitrate dehydrogenase
α-Ketoglutarate
α-Ketoglutarate dehydrogenase complex
Succinyl CoA
Succinyl CoA synthetase
Succinate
Succinate dehydrogenase
Fumarate
Fumarase
Malate
Malate dehydrogenase
Oxaloacetate
CoA
NADH + H+
NAD+
NADH + H+ + CO2
NAD+ + CoA
GDP + Pi
GTP + CoA
FADH2
FAD
H2O

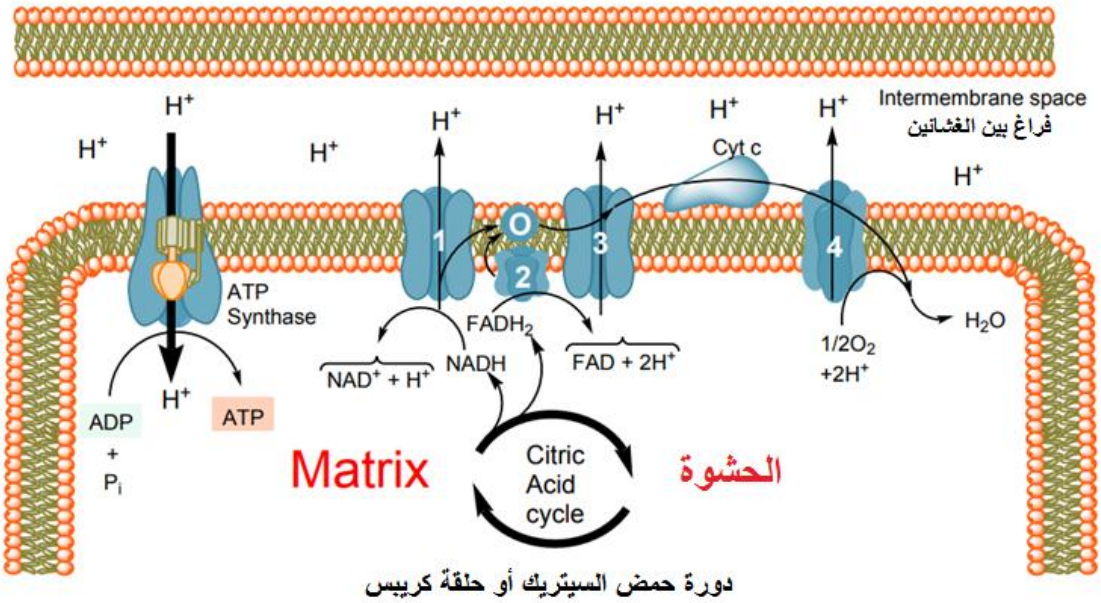
ج- كمية الطاقة الناتجة من حلقة كربس



حلقة واحدة: $2xCO_2 : 1x$ GTP $: 1\,xFADH_2 : 3xNADH + H^+$

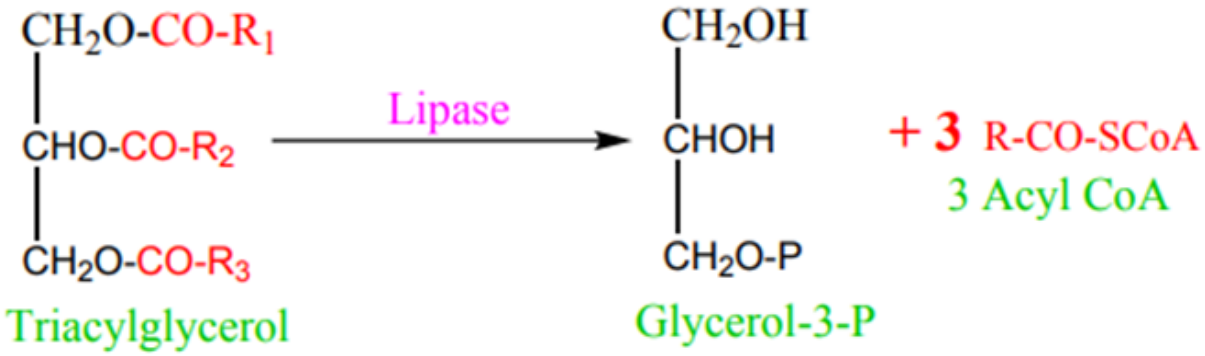
حلقتين : $4xCO_2 : 2xATP : 2xFADH_2 : 6xNADH + H^+$

د. الفسفرة التأكسدية



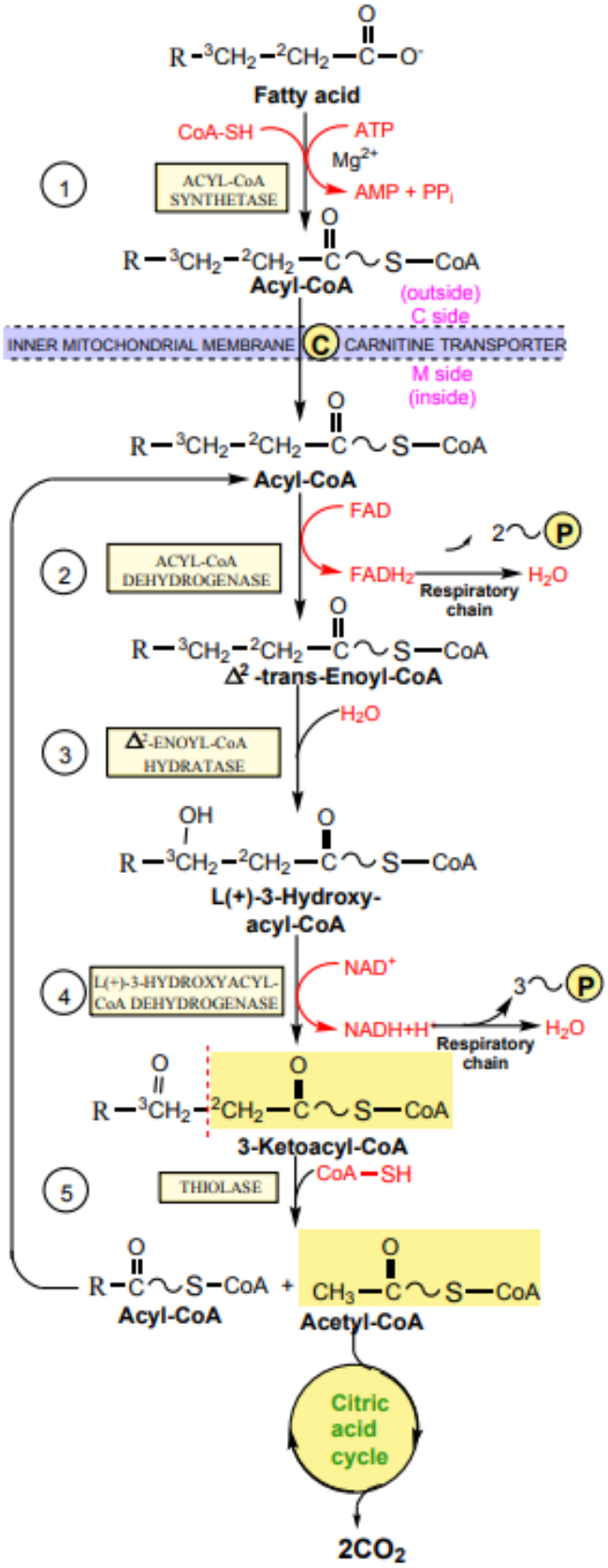
دورة حمض السيتريك أو حلقة كريبس

2.4.3. تذكير بميتابوليزم الدهون



إماهة ثلاثي الجليسريد

β-oxidation


Fatty acid
CoA-SH
ATP
Mg2+
AMP + PPi
1
ACYL-CoA SYNTHETASE
Acyl-CoA
(outside)
C side
INNER MITOCHONDRIAL MEMBRANE
C
CARNITINE TRANSPORTER
M side
(inside)
Acyl-CoA
FAD
2
P
2
ACYL-CoA DEHYDROGENASE
FADH2
H2O
Respiratory chain
Δ2 -trans-Enoyl-CoA
H2O
3
Δ2-ENOYL-CoA HYDRATASE
L(+)-3-Hydroxy-acyl-CoA
NAD+
4
L(+)-3-HYDROXYACYL-CoA DEHYDROGENASE
NADH+H+
3
P
H2O
Respiratory chain
3-Ketoacyl-CoA
5
THIOLASE
CoA–SH
Acyl-CoA
Acetyl-CoA
Citric acid cycle
2CO2

3.4.3. تذكير بميتابوليزم البروتينات

1. مراحل الهضم والامتصاص

- تُهضَم البروتينات الغذائية في المعدة والأمعاء الدقيقة إلى أحماض أمينية بواسطة البيبسين، التربسين، الكيموتربسين، كربوكسي والأمينوبيبتيداز.

- تُمتَص الأحماض الأمينية الناتجة عبر جدار الأمعاء ثم تمر للدم ثم إلى الكبد عن طريق الوريد البابي.

2. مصير الأحماض الأمينية

لا يتم تخزين الأحماض الأمينية من طرف العضوية مثل الكربوهيدرات أو الدهنيات، بل تُستخدم مباشرة في تخليق بروتينات جديدة. كما تدخل في تخليق مركبات آزوتية أخرى (هورمونات، نواقل عصبية، قواعد آزوتية للـDNA/RNA). إذا زاد مدخولها عن حاجة التخليق توجه للهدم (catabolisme).

3. هدم الأحماض الأمينية

a- نزع المجموعة الأمينية (Déamination/Transamination)

- Transamination: تنقل إنزيمات Aminotransférases مجموعة الأمين من حمض أميني إلى α-Ketoglutarate لتكوين الـ Glutamate والذي يعتبر كمخزن مؤقت للـNH_2 وينتج ايضا α-Ketoacide correspondant الهيكل الكربوني للحمض الأميني.

مثال :

$$\text{Alanine} + \alpha\text{-Ketoglutarate} \xrightarrow{ALAT} \text{Pyruvate} + \text{Glutamate}$$

- Oxidative deamination: نزع مجموعة NH_3 من الغلوتامات بواسطة glutamate déshydrogénase.

b. مصير الهيكل الكربوني (squelette carboné) يتحول إلى وسائط تدخل في مسارات الطاقة:

Pyruvate, Acetyl-CoA, Oxaloacetate, Fumarate, Succinyl-CoA, α-Ketoglutarate.

حسب ناتج التحول، نصنف الأحماض الأمينية إلى:

1 - أحماض آمينية Glucogènes: تعطي وسائط لتخليق الغلوكوز (Pyruvate, Oxaloacetate, Fumarate…).

2 - أحماض آمينية Cétogènes : تعطي Acetyl-CoA أو Acetoacetate (Leucine, Lysine)

1 - أحماض آمينية Glucogènes + Cétogènes مثل: Isoleucine, Phenylalanine, Tryptophane, Tyrosine.

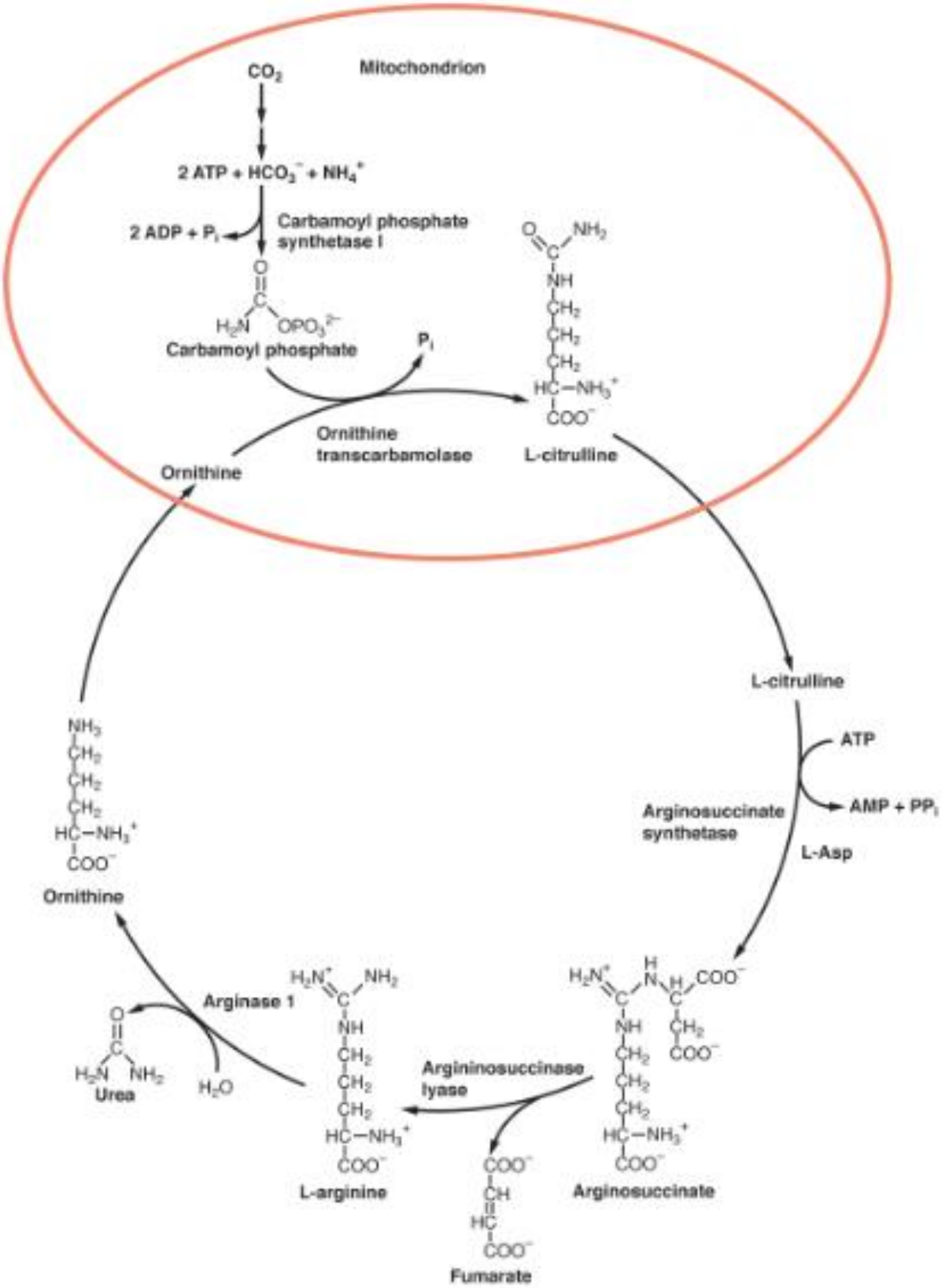
C- مصير مجموعة الأمونيا (NH_3)

الأمونيا الحرة سامة لذلك تُحوَّل إلى:

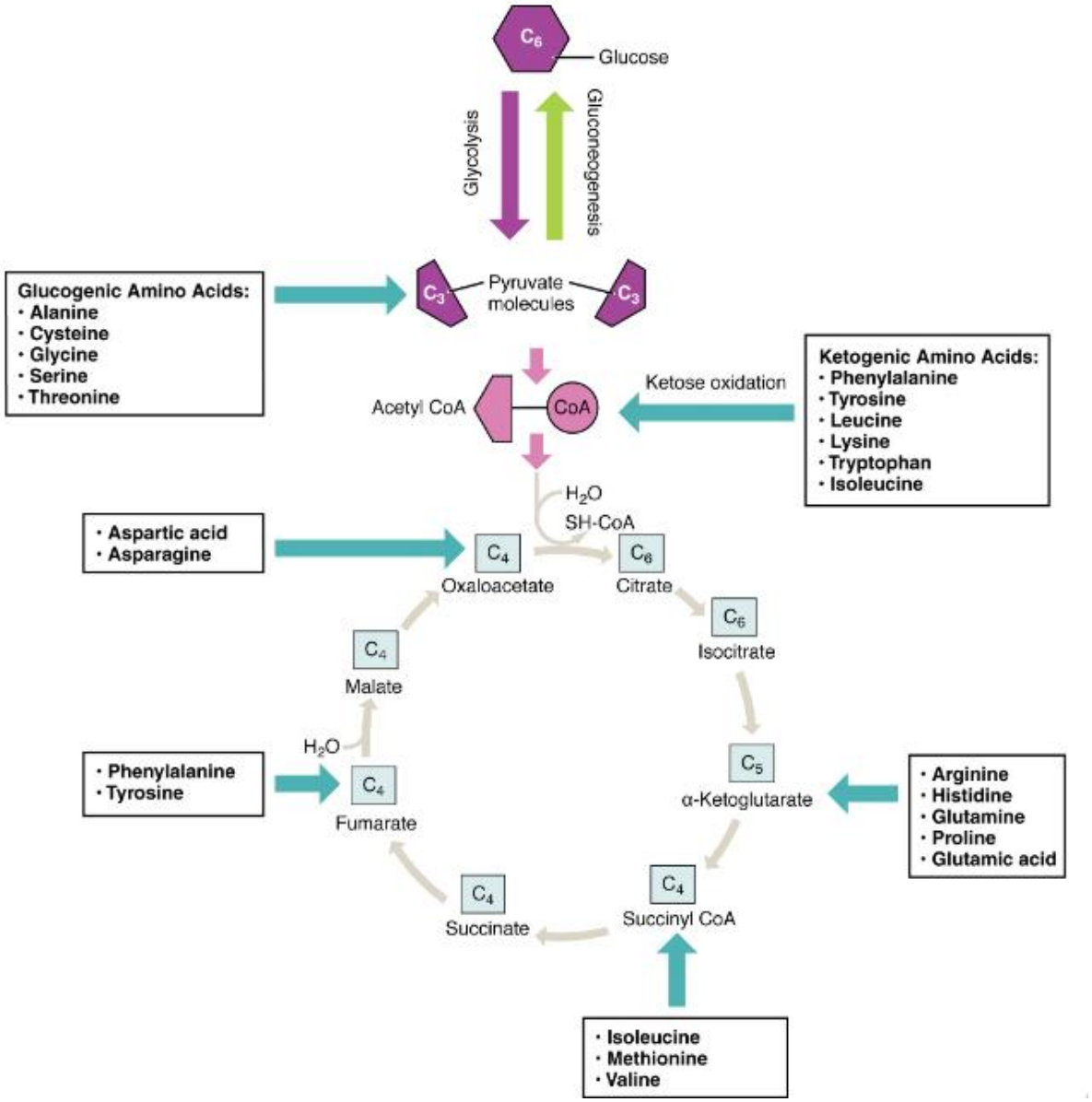
1- Glutamine (Glutamate + NH_3) بواسطة أنزيم Glutamine synthétase .

2- ألانين (Cycle glucose-alanine) في العضلة.

3. على مستوى الكبد تدخل الأمونيا الحرة دورة اليوريا (Cycle de l'urée) للتخلص منها في شكل Urea تُطرح في البول.



الشكل : دورة اليوريا يُزال النيتروجين بعملية الترانساميناز، مما يُنتج الأمونيا ووسائط دورة كريبس. تتم معالجة الأمونيا في دورة اليوريا لتكوين اليوريا التي تُطرح عبر الكليتين.



الشكل: يمكن الحصول على الطاقة من الأحماض الأمينية حيث تدخل كطلائع في التحلل السكري أو دورة كريبس. الأحماض الأمينية (المكتوبة بالخط العريض) يمكن أن تدخل الدورة عبر عدة مسارات.

4.4.3. أسئلة متنوعة حول ميتابوليزم السكريات

1. ما هو الهدف الرئيسي من عملية التحلل السكري؟

2. في أي جزء من الخلية تحدث عملية التحلل السكري؟

3. ما هو الجزيء الذي تبدأ به عملية التحلل السكري؟

4. كم عدد جزيئات الـ ATPيتم إنتاجها في التحلل السكري (بشكل إجمالي)؟

5. ما هو الناتج النهائي لعملية التحلل السكري؟

6. كم عدد جزيئات الـ ATPالصافية (net) الناتجة من تحلل جزيء واحد من الجلوكوز؟

7. ما هو الإنزيم المسؤول عن تحويل الجلوكوز إلى جلوكوز-6-فوسفات؟

8. ما هو دور الإنزيم "aldolase" في التحلل السكري؟

9. ما هو الإنزيم الذي ينظم السرعة الكلية للتحلل السكري ويعتبر نقطة تحكم رئيسية؟

10. ما هو عدد جزيئات NADH التي يتم إنتاجها في التحلل السكري من جزيء واحد من الجلوكوز؟

11. إذا تم منع إنزيم"pyruvate kinase" ، فكيف يؤثر ذلك على ناتج التحلل السكري؟

12. اشرح كيف يمكن أن تؤثر الظروف الهوائية واللاهوائية على مصير البيروفات الناتج من التحلل السكري.

13. قارن بين الطاقة الناتجة من التحلل السكري فقط، والطاقة الناتجة عند دخول البيروفات إلى دورة كريبس وسلسلة نقل الإلكترونات.

14. لماذا يعتبر التفاعل الذي يحفزه إنزيم **phosphofructokinase-1**غير قابل للانعكاس، وما أهميته التنظيمية؟

15. كيف تؤثر مستويات ATP العالية داخل الخلية على نشاط التحلل السكري؟

5.4.3. أجوبة الأسئلة

1. استخلاص الطاقة من الجلوكوز على شكل ATP.
2. في السيتوبلازم.(cytoplasm)
3. الجلوكوز.(Glucose)
4. 4جزيئات ATP تُنتَج إجمالاً (ولكن صافي الإنتاج هو 2.(
5. 2جزيء بيروفات (Pyruvate). 2 ATP صافية.
6. في الكبد (Hexokinase أو.Glucokinase)
7. يقسم الفركتوز-6،1-بيسفوسفات إلى جليسرالدهيد-3-فوسفات ودايهايدروكسي أسيتون فوسفات.
8. .Phosphofructokinase-1 (PFK-1)
9. .2 NADH سيتوقف إنتاج البيروفات و ATPالنهائي لأن التفاعل الأخير في السلسلة PEP)إلى (Pyruvate لا يتم.

11.في الظروف الهوائية: يتحول البيروفات إلى أسيتيل CoA-ثم يدخل دورة كريبس.

في الظروف اللاهوائية: يتحول إلى لاكتات لإعادة أكسدة NADH إلى.NAD^+

12. التحلل السكري وحده يعطي 2 ATP صافية؛

لكن دخول البيروفات إلى دورة كريبس وسلسلة نقل الإلكترونات يرفع الإنتاج إلى حوالي 30-32 ATP لكل جلوكوز.

13. لأن التفاعل يحتاج طاقة كبيرة ولا يمكن عكسه بسهولة، وهو نقطة تنظيم رئيسية في التحكم بسرعة التحلل السكري.

14. تثبط نشاط) PFK-1 مثبط ألوستيري)، وبالتالي تبطئ التحلل السكري.

6.4.3. تـمارين مقترحة حول الميتابوليزم

أ. استقلاب الكربوهيدرات

التمرين 1:

يمكن للـ Acetyl Coenzyme A الناتج عن تحلل الغلوكوز عبر التحلل السكري ونزع الكربوكسيل التأكسدي أن يدخل في مسار دورة كريبس.

1. حدد موقع حدوث هذه الأخيرة (دورة كريبس).
2. أنشئ جدول يلخص دورة كريبس بإعطاء الصيغ نصف المطورة للمواد الوسطية، والإنزيمات المساعدة المشاركة، وأسماء الإنزيمات في كل خطوة.
3. ضع الحصيلة الجزيئية لتحلل جزيء واحد من Acetyl Coenzyme A في دورة كريبس.
4. تنتج دورة كريبس إنزيمات مساعدة مُختزَلة:
   a. أعطِ اسم وموقع البنية الخلوية التي يتم عبرها، في الظروف الهوائية، إعادة أكسدة هذه الإنزيمات المساعدة.
   b. استخرج أهمية هذه الآلية بالنسبة للخلية.

التمرين 2:

احسب الحصيلة في الـ ATP للتحلل الكامل لجزيء من السكروز إلى CO_2 وH_2O.

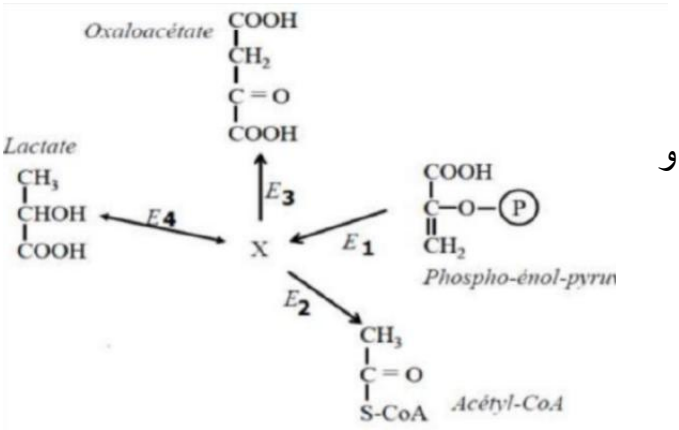
التمرين 3:

اشرح المسار الاستقلابي الذي يسمح بتحويل جزيء من اللاكتات ودمجه في الغلايكوجين.

- أذكر التفاعلات السيتوسولية والتفاعلات الميتوكوندرية.
- قيّم عدد جزيئات الـ ATP اللازمة لهذا الدمج.

التمرين 4:

يعطى المخطط الاستقلابي التالي:



- حدد اسم وصيغة المركب X .
- أعطِ أسماء الإنزيمات E1 و E2 و E3 و E4.

التمرين 5:

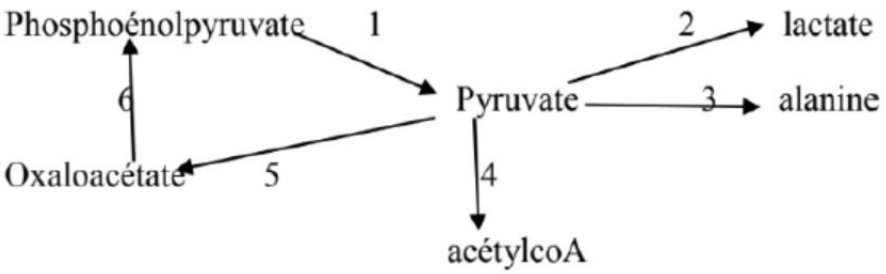
أعطِ الحصيلة الطاقوية والحصيلة الكيميائية للتحلل الكامل للمالتوز في الحالتين التاليتين:

- في الظروف الهوائية.
- في الظروف اللاهوائية.

اشرح المنهجية بكتابة التفاعلات والإنزيمات المشاركة.

التمرين 6:

يعطى المخطط التالي:



- سمِّ الإنزيمات الستة التي تحفز كل تفاعل.
- أعد كتابة التفاعلات كاملة (مع البنى الكيميائية) مع تحديد اتجاه التفاعل.
- في أي ظروف تحدث التفاعلات رقم 2 و4؟
- حدد المسار الاستقلابي الذي ينتمي إليه كل تفاعل.
- وضح موقع حدوث كل تفاعل.
- اشرح آلية تنظيم الإنزيم رقم 1.

التمرين 7:

أجب بـ "صحيح" أو "خطأ" مع تصحيح العبارات الخاطئة:

- الغلوكوز يتحلل في كريات الدم الحمراء عبر التحلل السكري ودورة كريبس .

➤ خطأ: كريات الدم الحمراء لا تحتوي على ميتوكوندريا، لذلك يحدث فقط التحلل السكري.

- التحلل السكري يحدث فقط في الظروف اللاهوائية .

➤ خطأ: يحدث في الظروف الهوائية واللاهوائية.

- الحصيلة الطاقوية للتحلل السكري في الظروف اللاهوائية هي 8 ATP .

➤ خطأ: هي 2.ATP

- الإنزيم الأساسي لتنظيم التحلل السكري هو فوسفوفركتوكيناز-1 (PFK)، يُنشَّط بالفركتوز-2،6-ثنائي الفوسفات ويُثبط بواسطة الـ ATP والسترات.
- نزع الكربوكسيل التأكسدي للبيروفات إلى أسيتيل- مرافق الأنزيم أ يحدث في السيتوبلازم.

➤ خطأ: يحدث في الميتوكوندريا.

- دورة كريبس تسمح بتكوين 24 ATP لكل جزيء غلوكوز.

➤ خطأ: تعطي 32 ATP (تُنتَج عند احتساب السلسلة التنفسية).

- نقطة التنظيم الرئيسية في دورة كريبس هي إنزيم بيروفات ديهيدروجيناز .

➢ صحيح. للتوضيح هل إنزيم بيروفات ديهيدروجيناز (PDH) جزء من دورة كريبس ؟
لا، مركّب بيروفات ديهيدروجيناز لا ينتمي مباشرة إلى دورة كريبس.
وظيفته هي ربط التحلل السكري (glycolyse) بدورة كريبس:
يحوّل البيروفات ($CH_3–CO–COOH$) إلى Acétyl–CoA ($CH_3–CO–S–CoA$) مع إنتاج NADH وCO_2.

- سكسينات ديهيدروجيناز يحفز تفاعلاً غير عكوس .

➤ خطأ: التفاعل عكوس وليس موقعاً رئيسياً للتنظيم.

- إنتاج $NADPH,H^+$ يحدث خلال أول تفاعلين من الطور غير التأكسدي لمسار فوسفات البنتوز .

➤ خطأ: يحدث في الطور التأكسدي.

- استحداث الغلوكوز نشط جداً في الدماغ.

➤ خطأ: يحدث في الكبد والكلى، وليس في الدماغ.

- تحويل البيروفات إلى فوسفوينول بيروفات يتطلب بيروفات كربوكسيلاز وبيروفات ديهيدروجيناز.

➤ خطأ: الإنزيمان هما بيروفات كربوكسيلاز و PEP كربوكسي كيناز.

- دورة اللاكتات-غلوكوز تسمى دورة فيليغ .

➤ خطأ: تسمى دورة كوري.

- تحلل الغلايكوجين العضلي يثبط بواسطة الغلوكوز .

➤ خطأ: التحلل الكبدي للغلايكوجين هو الذي يثبط بالغلوكوز.

- الإنسولين يحفز التحلل السكري وتحلل الغلايكوجين.

➤ خطأ: يحفز التحلل الغلايكولي وتكوين الغلايكوجين.

- إنزيم غلايكوجين سينثاز يحتاج بادئة على شكل غلايكوجينين أو قليل سكاريد.
- في الكبد، الفركتوز يدخل التحلل السكري عند فركتوز-6-فوسفات.

➤ خطأ: يدخل عند ثنائي هيدروكسي أسيتون فوسفات أو غليسيرالدهيد-3-فوسفات عبر فركتوز-1-فوسفات.

التمرين8:

في حالة الراحة، يكون تركيز اللاكتات في الدم حوالي 1 ملي مول/لتر، بينما يصل إلى 20 ملي مول/لتر أثناء مجهود عضلي شديد.

1. اكتب التفاعل المؤدي إلى إنتاج اللاكتات العضلي (مع الصيغ المطورة).
2. اشرح الفائدة الاستقلابية لهذا التفاعل.
3. حدد المصائر الممكنة للاكتات المتكون.

التمرين 9:

اشرح المسار الاستقلابي الذي يسمح بتحويل جزيء من اللاكتات ودمجه في الغلايكوجين.

- أذكر التفاعلات السيتوسولية والتفاعلات الميتوكوندرية.
- قيّم عدد جزيئات الـ ATP اللازمة لهذا الدمج.

التمرين 10:

1. ارسم مخطط التفاعلات البيوكيميائية التي توضح خطوات التحويل بين الغالاكتوز والغلوكوز، مع إبراز جزيئات الـATP.

2. عند من يكون استقلاب الغالاكتوز مهماً جداً؟ ولماذا؟

3. ضع الحصيلة الطاقوية لتحلل الغالاكتوز (التحلل السكري + دورة كريبس). ماذا تلاحظ مقارنة بالغلوكوز؟

التمرين 11:

في حالة الراحة، يكون تركيز اللاكتات في الدم حوالي 1 ملي مول/لتر، بينما يصل إلى 20 ملي مول/لتر أثناء مجهود عضلي شديد.

1. اكتب التفاعل المؤدي إلى إنتاج اللاكتات العضلي (مع الصيغ المفصلة).

2. اشرح الفائدة الاستقلابية لهذا التفاعل.

3. حدد المصائر الممكنة للاكتات المتكون.

التمرين 12:

1. في أي الأنسجة يُخزن الغلايكوجين؟ وهل لهذا التخزين نفس الفائدة في كل هذه الأنسجة؟
2. ما هو الموقع الخلوي لمسارات استقلاب الغلايكوجين (تكوين الغلايكوجين وتحلله)؟ سمِّ الإنزيمين المنظمين لهذين المسارين.
3. اكتب المعادلة النهائية لتكوين الغلايكوجين انطلاقاً من غلوكوز-1-فوسفات.
4. اكتب المعادلة النهائية لتحلل الغلايكوجين الكبدي.

التمرين 13:

كم عدد مولات الـ ATP الناتجة عن أكسدة 90 غرام من الغلوكوز إلى أسيتيل-كوA؟

بـ- استقلاب الدهون

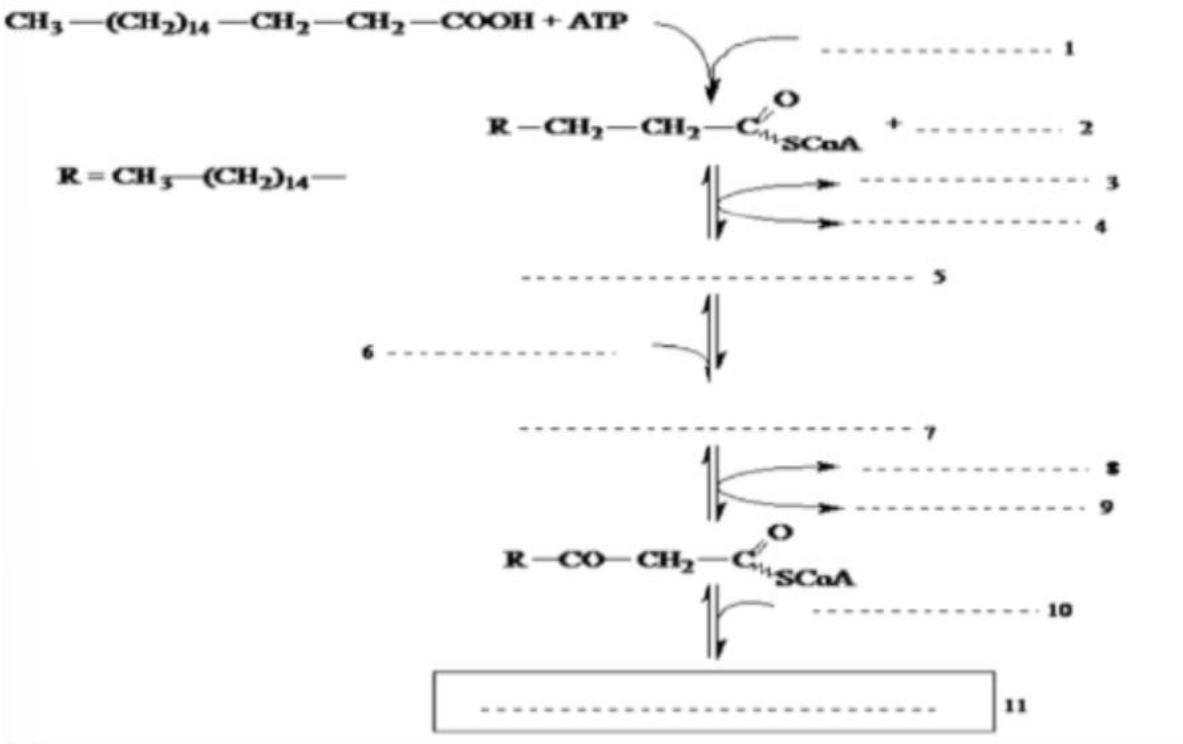
التمرين 1:

تتم عملية تخليق الأحماض الدهنية انطلاقاً من الأسيتيل مرافق الأنزيم أ

1. حدد الموقع الخلوي والأنسجة التي تتم فيها هذه العملية.
2. في أي حالة تكون هذه العملية نشطة؟
3. اكتب التفاعل الكلي لتخليق مول واحد من حمض الميريستيك انطلاقاً من الأسيتيل مرافق الأنزيم أ .
4. اذكر التفاعل المحدد لمعدل هذه العملية، واشرح آلية تنظيمها بمخطط.

التمرين 2:

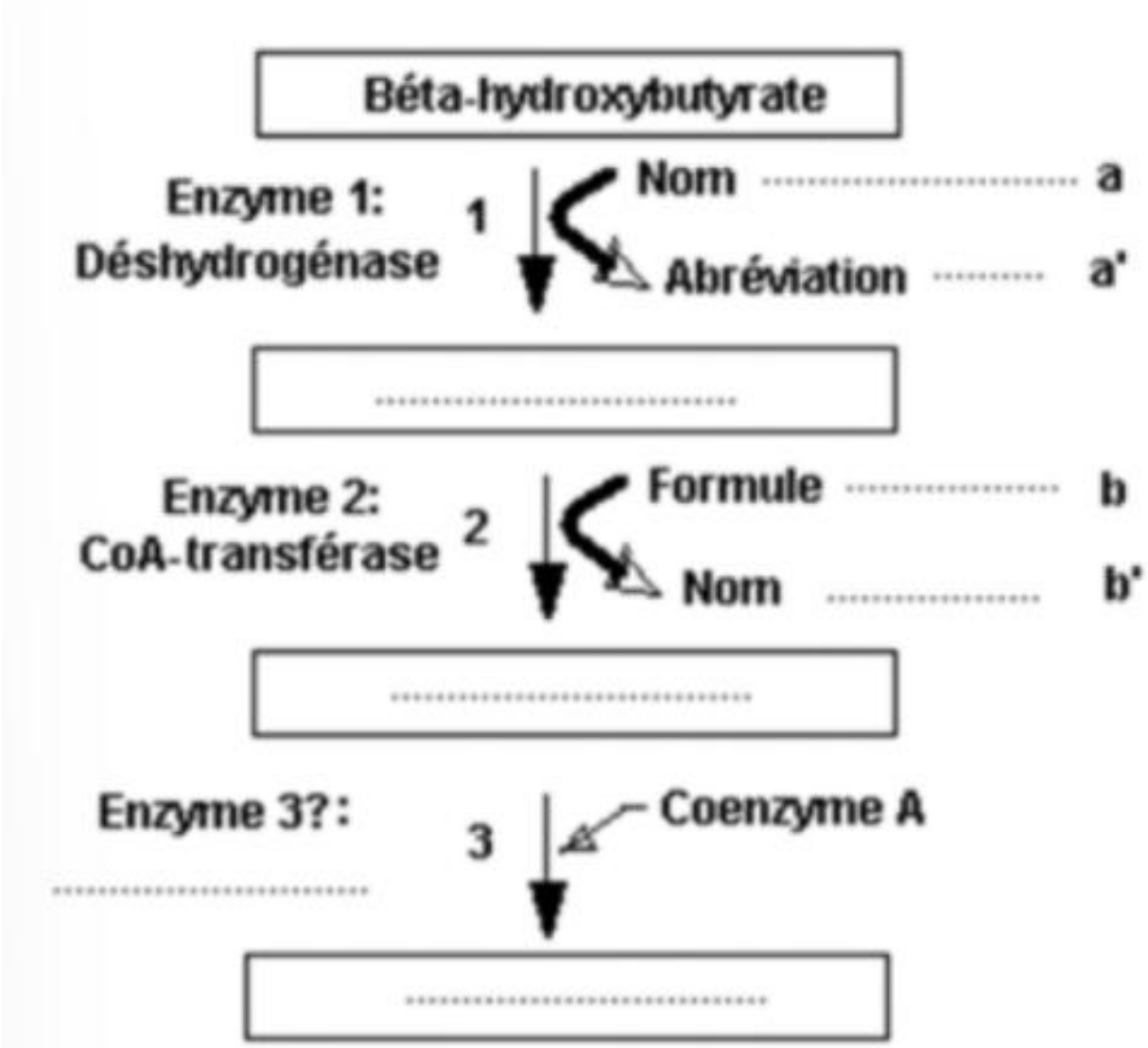
المخطط التالي يمثل الدورة الأولى من تحلل مول واحد من حمض الستياريك (stearic acid):



1. أكمل المخطط وأعطِ أسماء المركبات.
2. بما أن الأكسدة -β تحدث في الميتوكوندريا، اشرح كيف ينتقل الحمض الدهني من السيتوسول إلى الميتوكوندريا.
3. كم عدد الدورات اللازمة للتحلل الكامل لهذا الحمض الدهني؟
4. أعطِ الحصيلة الكيميائية والطاقوية لتحلل مول واحد من حمض الستيريك في الظروف الهوائية.

التمرين 3:

يدخل الأسيتيل -COA في مسار يؤدي إلى تكوين 3-هيدروكسي بيوتيرات. يتحول هذا الأخير حسب المخطط التالي:



1. أكمل المخطط.
2. في أي حالات فيزيولوجية أو مرضية تزداد عملية تكوين 3-هيدروكسي بيوتيرات؟ اشرح الآلية البيوكيميائية.
3. تراكم نواتج هذا المسار يؤدي إلى اضطراب استقلابي، حدده.

التمرين 4:

1. حمض دهني A خضع أثناء تخليقه لعمل إنزيم إطالة ثم إنزيم نزع التشبع عند الكربون 9 في الشبكة الإندوبلازمية:
   a. أعطِ الاسم الكيميائي والاسم الشائع للحمض الدهني A

b. اذكر مراحل تخليقه.

c. أعطِ الحصيلة النهائية للمركبات المستهلكة أثناء تخليق الحمض الدهني A

الهدرجة الكاملة للحمض الدهني A تعطي الحمض الدهني:B

- أعطِ الاسم الكيميائي والاسم الشائع والحصيلة الطاقية للتحلل الكامل للحمض الدهني.B

التمرين 5:

اذكر واشرح المسارين الرئيسيين لتخليق الغليسيروفوسفوليبيدات.

التمرين 6:

نفس أسئلة التمرين 2 مع إضافة سؤال عن حمض دهني غير مشبع له رابطة مزدوجة في (الموقع 9)

التمرين 7:

1. اذكر تفاعلات الكيتوجينيز مع تحديد موقع حدوثها.
2. في أي حالات فيزيولوجية أو مرضية تزداد عملية الكيتوجينيز؟ اشرح الآلية.
3. حدد مصير نواتج الكيتوجينيز.

التمرين 8:

تحلل حمض الستياريك

- اكتب المعادلة الكلية للتحلل.
- اذكر تفاعلات دورة واحدة من-β الأكسدة وعدد جزيئات الـ ATP الناتجة منها.
- احسب عدد جزيئات الـ ATP الناتجة من الأكسدة الكاملة للحمض.
- استنتج عدد جزيئات الـ ATP لكل ذرة كربون مؤكسدة، وقارن مع الغلوكوز.

التمرين 9:

تخليق البالمتيك

- اذكر المراحل اللازمة لتخليقه.
- ما هي الحصيلة الكيميائية؟

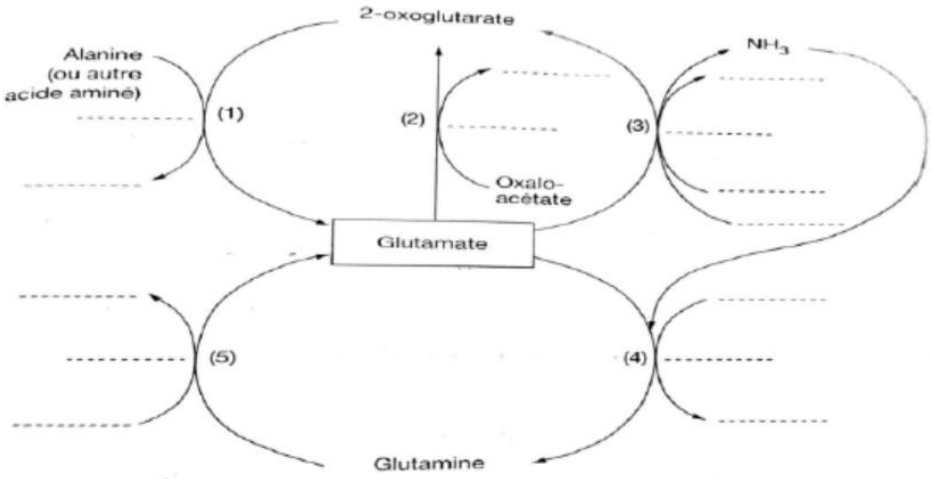
جـ. استقلاب الأحماض الأمينية

التمرين 1:

1. أعطِ الصيغة المفصلة للـL ألانين.
2. اكتب معادلة التحلل الكامل له إلى CO_2 و H_2O و NH_3.
3. صف طريقة نقل الأمونيا في الدم.
4. اكتب تفاعلات دورة اليوريا وحدد موقع كل إنزيم (ميتوكندريا أو سيتوسول).
5. اكتب المعادلة الكلية لتخليق اليوريا من CO_2 و NH_3.

التمرين 2:

الغلوتامات مركب "محوري" في تحلل الأحماض الأمينية:

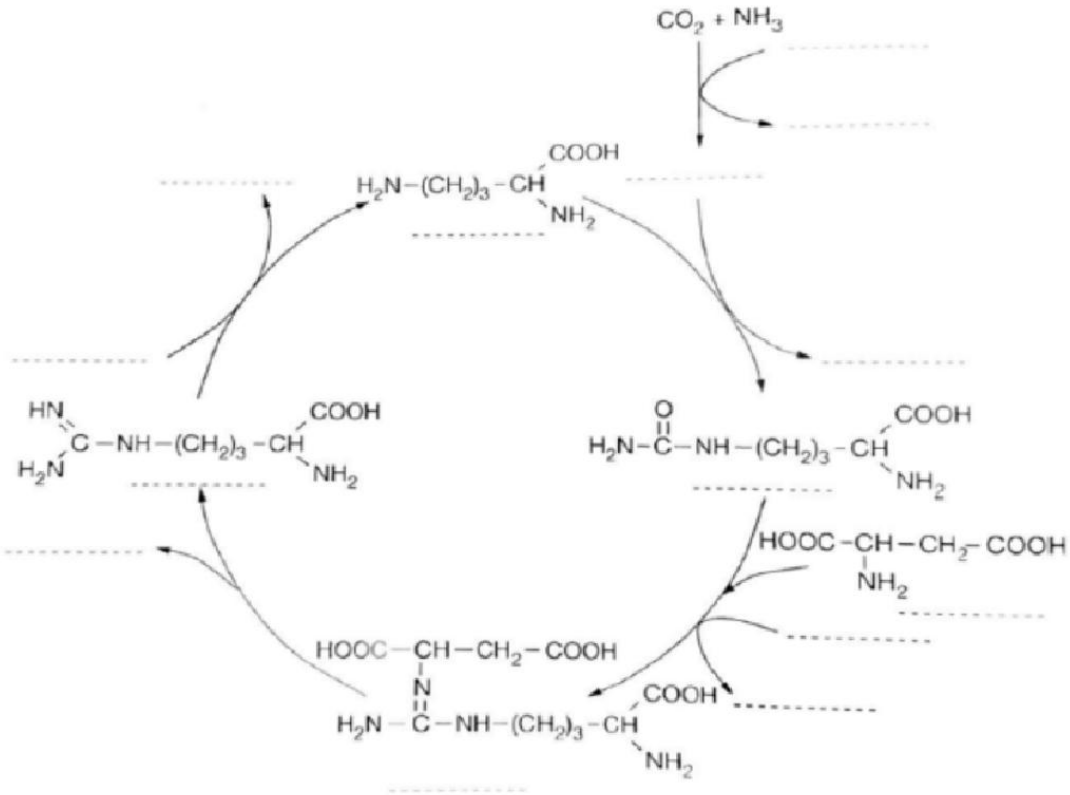


1. أكمل المخطط.

2. حدد الموقع النسيجي والدور الأيضي لكل تفاعل.

التمرين 3:

اليوريا، وهي الشكل الرئيسي لنواتج تحلل الأحماض الأمينية، تتكون عبر سلسلة من التفاعلات كما في المخطط:



1. علّق على المخطط مع تسمية المركبات.
2. حدد مصدر ذرات الكربون والنيتروجين في اليوريا.
3. اذكر العضو الذي تحدث فيه هذه التفاعلات.

قائمة المراجع

- كاملي عبد الكريم (2011). البيوكيمياء الأيضية. دار الوعي للنشر و التوزيع. الجزائر العاصمة، الجزائر.
- آمال بن بوط (2021-2022) أمالي مطبوعة "محاضرات التنظيم الأيضي" . موجهة لطلبة سنة ثالثة ليسانس في الـكيمياء الحيو ية .
- Lehninger Principles of Biochemistry Sixth Edition; David L. Nelson. Product information. Publisher, W.H. Freeman & Company. Publication date, January 1, 2013.
- Hebert E. (1986). Biochimie: Cours, exercices et annales corrigées. Edition Robert Atlani, Boulogne, France.
- Jacques-Henry Weil (2005). Biochimie générale: Cours et exercices corrigés. Edition Dunod, Paris, France.
- Serge Desagher & Monique Lançon (1992). 150 exercices de biochimie. Edition Marketing, Paris, France.
- Jean Delaunay (1975). Biochimie: Travaux dirigés. Hermann collection. Paris, France.
- Sabourault D & Bourdeaux AM (1985). Biochimie (Tome 2): glucides, lipides, métabolisme intermédiaire. Bréal Editeur, Montreuil, France.
- OpenStax – Anatomy & Physiology 2e
- https://biochimej.univ-angers.fr/Page2/TexteTD/1SV2H2/1Bioenergetique1 /1Correction .htm