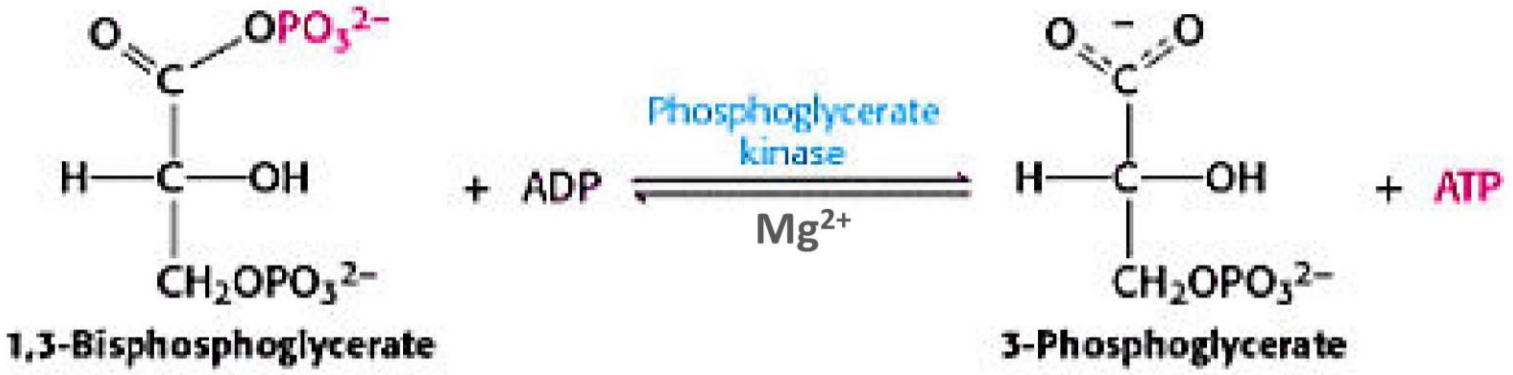
الكيمياء الحياتية / م4

المحاضرة -3-

تفاعلات التحلل السكري Glycolysis

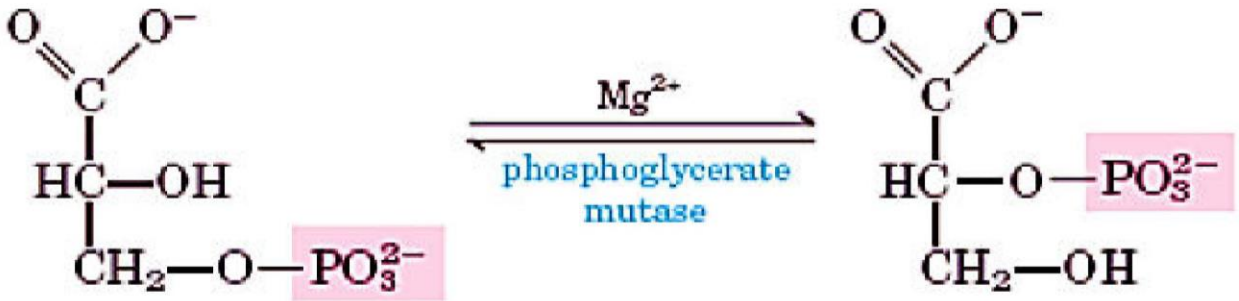
التفاعل السابع: تحول جزيئتان من ١,٣- ثنائي فوسفو كليسرات إلى جزيئتين من ٣- فوسفو كليسرات



- هذا التفاعل يُحفز بواسطة إنزيم Phosphoglycerate kinase.
- التفاعل عكسي منتج للطاقة (ATP).
- يحتاج الانزيم الى ايونات المغنسيوم.

تفاعلات التحلل السكري Glycolysis

التفاعل الثامن: تحول جزيئتان من ٣- فوسفو كليسيرات إلى جزيئتين من ٢- فوسفو كليسيرات



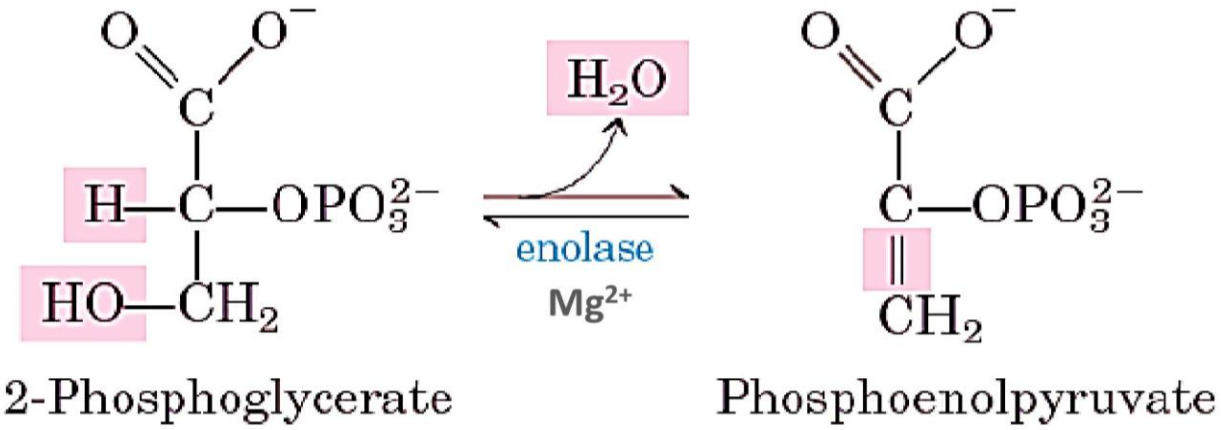
3-Phosphoglycerate

2-Phosphoglycerate

- يتضمن التفاعل نقل مجموعة الفوسفات من الموقع ٣الى الموقع ٢ بواسطة إنزيم Phospho glycerate mutase.
- التفاعل عكسي ويحتاج الانزيم فيه الى ايونات المغنسيوم .

تفاعلات التحلل السكرى Glycolysis

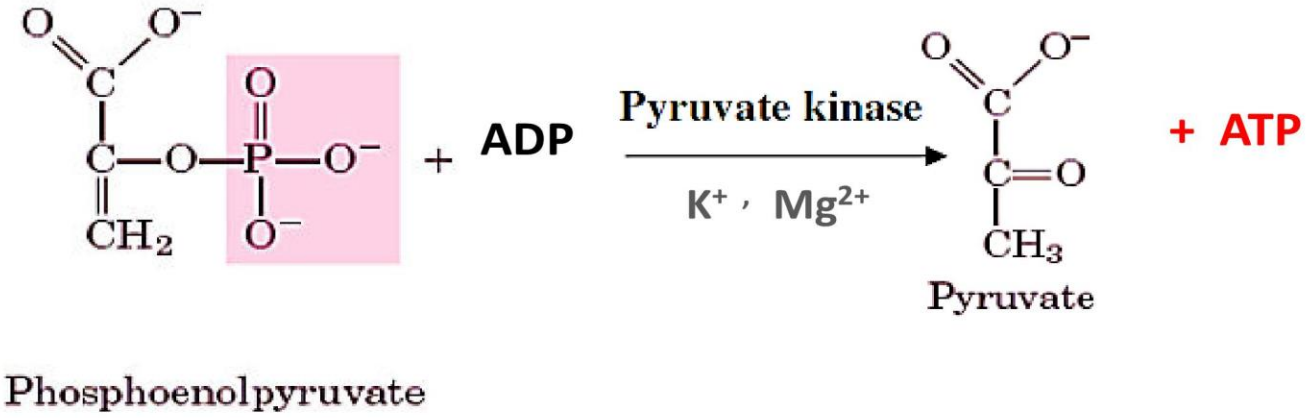
التفاعل التاسع: تكوين جزيئتي فوسفو إينول بيروفات من جزيئتي ٢- فوسفو كليسرات



- المركب الناتج هو مركب فوسفاتي يملك طاقة عالية .
- يحفز هذا التفاعل (سحب جزيئة ماء) إنزيم Enolase.
- التفاعل عكسي ويحتاج الانزيم الى ايونات المغنسيوم او المنغنيز(مرافق انزيمي).

تفاعلات التحلل السكري Glycolysis

التفاعل العاشر: تكوين جزيئتي البيروفات من جزيئتي فوسفو إينول بيروفات



Phosphoenolpyruvate

- يحفز إنزيم Pyruvate kinase تحول مجموعة الفوسفات من الفوسفواينول بايروفات الى الـ ADP وتكوين الـ ATP.
- التفاعل غير عكسي ويحتاج الانزيم الى ايونات البوتاسيوم اضافة الى ايونات المغنيسيوم او المنغنيز.

١٩

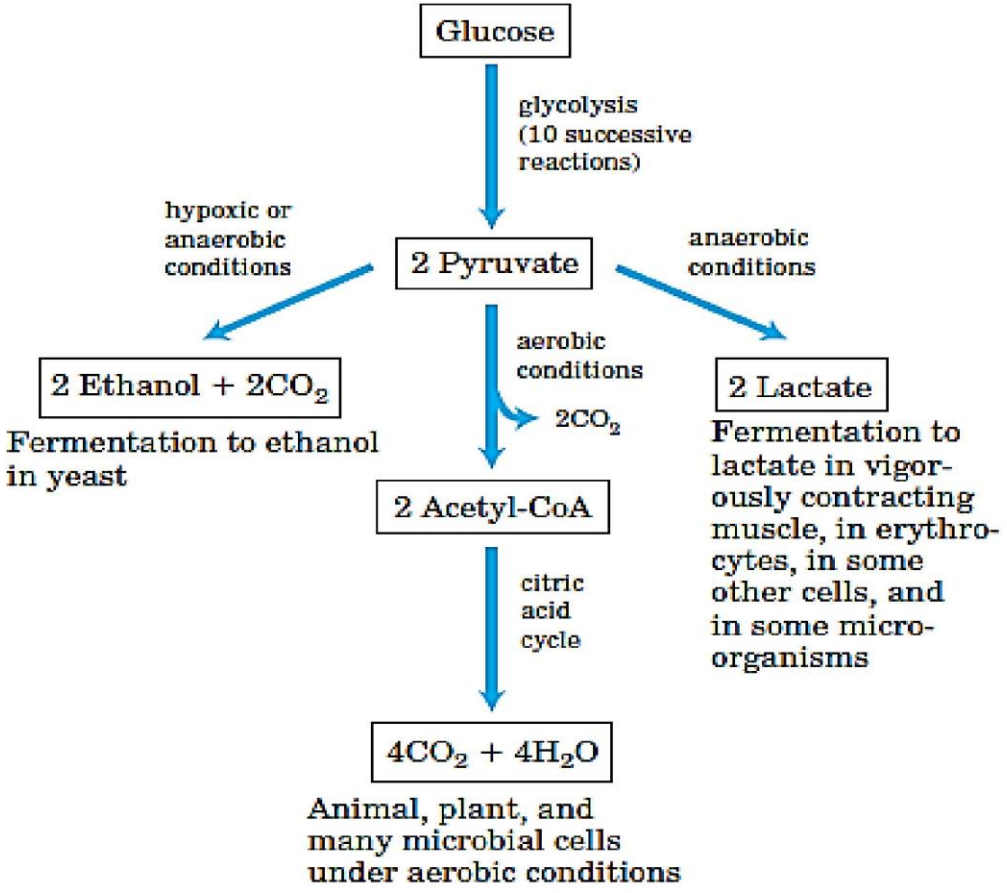
تنظيم مسار الـ Glycolysis

- **تم التطرق الى ثلاث تفاعلات غير عكسية ضمن تفاعلات مسار التحلل السكري العشرة وهذه التفاعلات تحفزها انزيمات تُعد نقاط سيطرة تُنظم هذا المسار حسب احتياج الخلية للطاقة وهذه التفاعلات هي (١، ٣، ١٠):**
  - التفاعل الاول الذي يحفزه انزيم Hexokinase.
  - التفاعل الثالث الذي يحفزه انزيم Phosphofructokinase.
  - التفاعل العاشر الذي يحفزه انزيم Pyruvate kinase.

- ويُعد إنزيم Phosphofructokinase مفتاح المسار حيث يلعب دوراً اساسياً مهما في تنظيم مسار التحلل السكري.

مصير البايروفات الناتجة من تحلل الكلوكوز

Fate of pyruvate produced from glycolysis



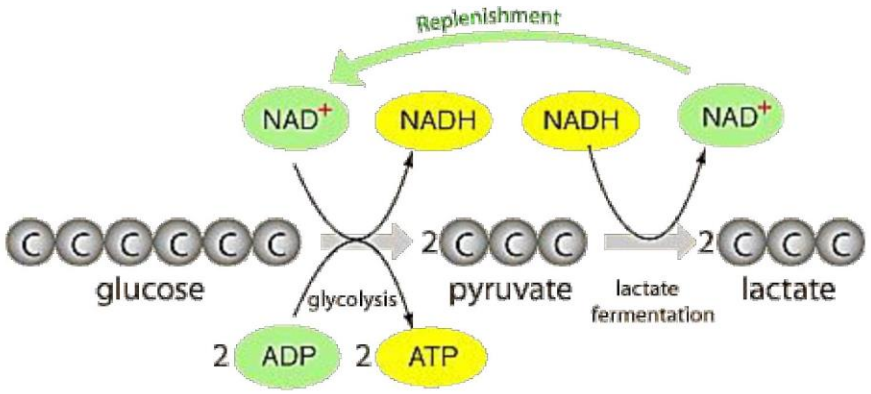
٢١

مصير البايروفات الناتجة من تحلل الكلوكوز

ان البايروفات الناتجة من مسار الـ Glycolysis لها اتجاهات وتحولات مختلفة حسب طبيعة الكائن الحي وطبيعة الفسيولوجية التي يمر بها وهذه التحولات هي:

١- تحول البايروفات الى لاكتات: تحدث هذه العملية في الانسان والكائنات الراقية وعدد كبير من الكائنات المجهرية (بغياب الاوكسجين) حيث يتم إعادة أكسدة NADH إلى NAD^+ عند تحول البايروفات إلى لاكتات بواسطة إنزيم Lactate dehydrogenase.

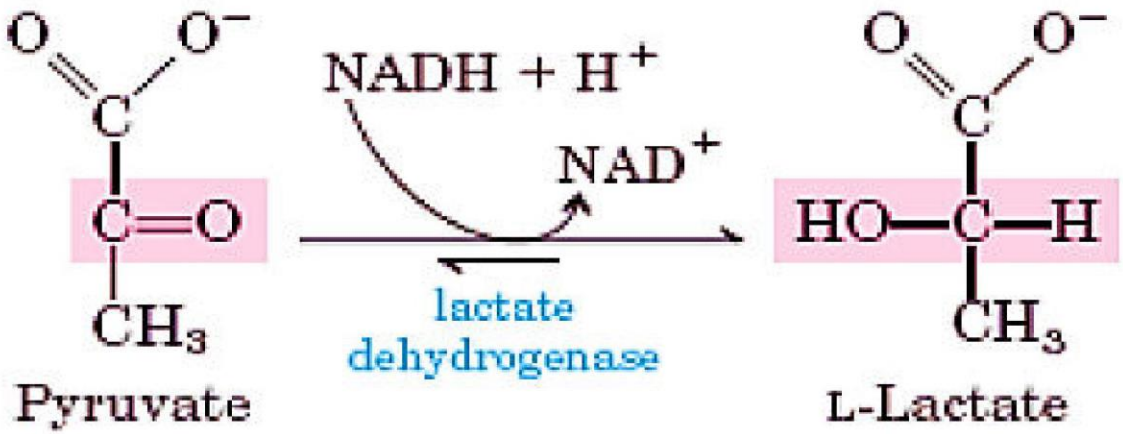
(ان تفاعلات مسار Glycolysis حتى تحدث وتستمر تحتاج إلى الصورة المؤكسدة من NADH وهي NAD^+ ، لذلك كان من الضروري إعادة أكسدة NADH الناتج عن أكسدة Glyceraldehyde-3-phosphate (التفاعل السادس)).



Lactate fermentation

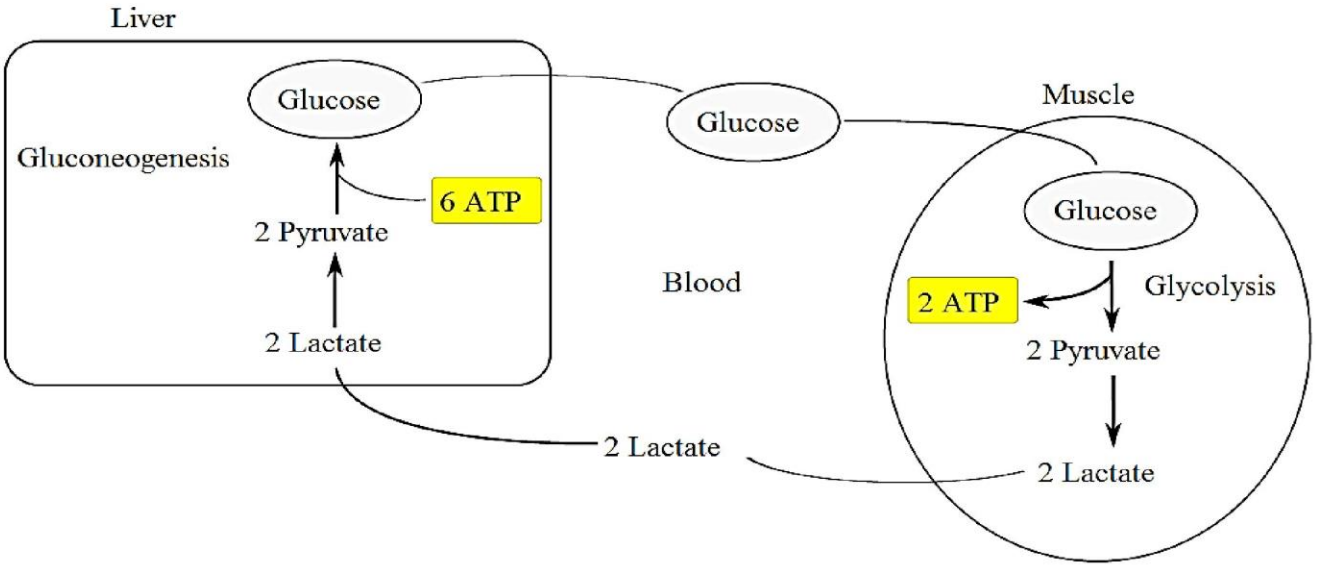
٢٣

مصير البايروفات الناتجة من تحلل الكلوكوز



$$\text{Glucose} + 2\text{ADP} + 2\text{Pi} \longrightarrow 2\text{Lactate} + 2\text{ATP}$$

- في حالة التمارين العضلية الشديدة فان كمية الأوكسجين في العضلات تكون قليلة ولا تصل الى المايتوكوندريا لأكسدة NADH، فكيف يمكن لتفاعلات Glycolysis أن تستمر حتى تؤدي العضلات وظيفتها؟



Cori cycle

مصير البايروفات الناتجة من تحلل الكلوكوز

٢- تحول البايروفات الى ايثانول: لا تحدث هذه العملية في الانسان بل في الخميرة وبعض الكائنات المجهرية بغياب الاوكسجين Anaerobic conditions، وتتم بخطوتين:

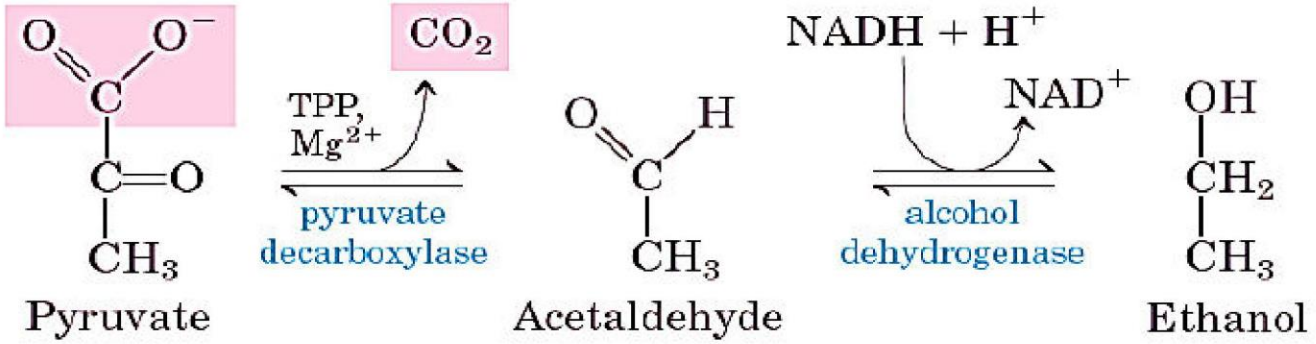
- تحول البيروفات إلى اسيتالديهايد بازالة ثاني أكسيد الكربون بواسطة إنزيم Pyruvate decarboxylase وبوجود المرافق الإنزيمي ثيامين بايروفوسفات Thiamine pyrophosphate (TPP) وأيونات المغنيسيوم.

- اختزال الاسيتالديهايد إلى ايثانول بواسطة انزيم Alcohol dehyrogenase بوجود ايونات الخارصين مع أكسدة NADH إلى NAD^+.

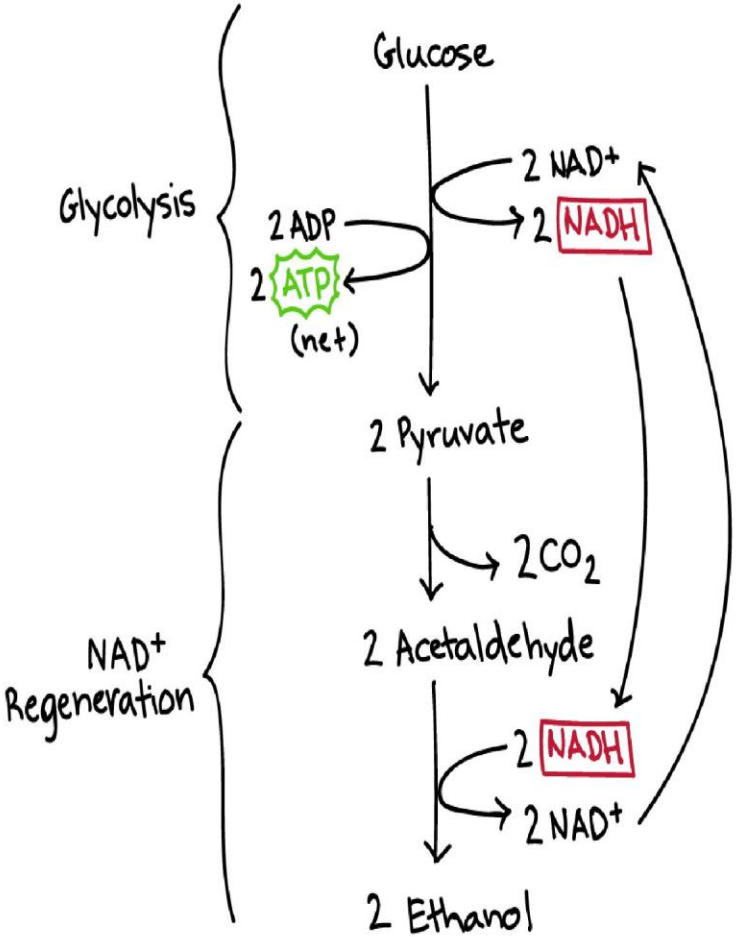
- ان مسار التخمر الكحولي للكلوكوز يشبه مسار Homolactic fermentation ماعدا الخطوة الأخيرة التي تحفز بأنزيم Lactate dehydrogenase حيث يتم التعويض عنها بخطوتين أنزيميتين.

مصير البايروفات الناتجة من تحلل الكلوكوز

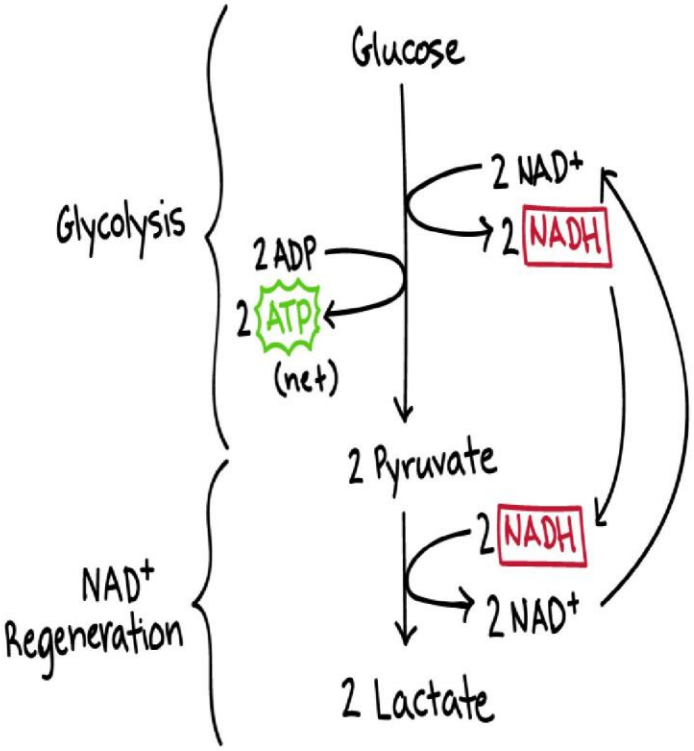
التخمر الكحولي Alcoholic Fermentation



Glucose + 2ADP + 2Pi ⟶ 2Ethanol + 2ATP + $2CO_2$



Alcoholic fermentation



Lactic acid fermentation
(Homolactic fermentation)

الملخص

1. **سؤال:** علل: يُعدّ التفاعل السابع في مسار التحلل السكري ($Glycolysis$) تفاعلاً منتجًا للطاقة (ATP) على الرغم من أنه تفاعل عكسي ؟ **جواب:** لأن هذا التفاعل، المحفز بواسطة إنزيم **Phosphoglycerate kinase** , ينقل مجموعة فوسفات عالية الطاقة من جزيئتي **Bisphosphoglycerate-1,3** إلى جزيئتي ADP ، مما ينتج جزيئتي ATP وجزيئتي **Phosphoglycerate-3**.

---

2. **سؤال:** علل: يحتاج كل من إنزيم **Phosphoglycerate kinase** (في التفاعل السابع) وإنزيم **Phosphoglycerate mutase** (في التفاعل الثامن) إلى أيونات المغنيسيوم (Mg^{2+})؟

جواب: يحتاج كلا الإنزيمين إلى أيونات **المغنيسيوم** (Mg^{2+}) كعامل مساعد (مرافق إنزيمي) ضروري لحدوث التفاعل. بالنسبة لإنزيم **Phosphoglycerate mutase**، فإن التفاعل عكسي ويحتاج أيونات المغنيسيوم.

---

3. **سؤال:** علل: يجب أن يتم نقل مجموعة الفوسفات في التفاعل الثامن من 3-فوسفوغليسرات إلى 2-فوسفوغليسرات بواسطة إنزيم **Phosphoglycerate mutase** ؟ **جواب:** يتضمن هذا التفاعل نقل مجموعة الفوسفات من الموضع 3 إلى الموضع 2 ، مما يحوّل جزيئتي **3-فوسفوغليسرات** إلى جزيئتين من **2-فوسفوغليسرات**. وهو تفاعل عكسي ويحتاج الإنزيم فيه إلى أيونات المغنيسيوم

---

4. **سؤال:** علل: يُعتبر ناتج التفاعل التاسع، وهو **Phosphoenolpyruvate** (فوسفو إينول بيروفات)، مركبًا فوسفاتيًا ذا طاقة عالية جدًا ؟ **جواب:** لأنه ناتج عن إزالة جزيئة ماء (H_2O) من جزيئتي **2-فوسفوغليسرات** بتحفيز من إنزيم **Enolase**. وهذا المركب يمتلك طاقة فوسفاتية عالية.

5. **سؤال:** علل: يُعدّ إنزيم **Phosphofructokinase** مفتاحًا (مفتاح المسار) في تنظيم عملية التحلل السكري ($Glycolysis$)؟

جواب: لأنه واحد من ثلاثة إنزيمات تحفز تفاعلات **غير عكسية** ضمن تفاعلات مسار التحلل السكري العشرة، وهذه التفاعلات هي نقاط السيطرة الرئيسية (1، 3، و 10) التي تُنظِّم المسار حسب احتياج الخلية للطاقة.

6. **سؤال:** علل: يُعتبر التفاعل العاشر (تكوين البيروفات) تفاعلاً غير عكسي ومنظمًا رئيسيًا في مسار التحلل السكري ؟ **جواب:** لأنه يحفز بواسطة إنزيم **Pyruvate kinase** ، والذي يحول مجموعة الفوسفات من فوسفو إينول بيروفات إلى ADP لتكوين جزيئتي ATP و **بيروفات**. هذا التفاعل غير عكسي ويحتاج الإنزيم فيه إلى أيونات البوتاسيوم (K^+) وإضافة إلى أيونات المغنيسيوم أو المنغنيز.

7. **سؤال:** علل: تحويل البيروفات إلى لاكتات ($Lactate$) هو مسار تحويل رئيسي للبيروفات في الأنسجة التي تعمل تحت نقص الأوكسجين ($Anaerobic\ conditions$) ؟ **جواب:** لأن هذه العملية تتم في غياب الأوكسجين لغرض إعادة أكسدة جزيئة $NADH$ إلى $NAD+$ ، وهو أمر ضروري لاستمرار التحلل السكري وتحديداً لإعادة أكسدة $NADH$ الناتج من أكسدة **Glyceraldehyde-3-phosphate** (التفاعل السادس).

---

8. **سؤال:** علل: تستطيع العضلات الاستمرار في أداء وظيفتها لفترة قصيرة أثناء التمارين الشديدة رغم قلة الأوكسجين وعدم وصول $NADH$ إلى المايتوكوندريا للأكسدة ؟ **جواب:** لأنها تعتمد على تحويل البيروفات إلى لاكتات عن طريق **تخمر اللاكتات** (Lactate fermentation) ، وهذا التفاعل يؤمن تجديد $NAD+$ اللازم لاستمرار التحلل السكري وإنتاج كمية صافية من $2\ ATP$.

---

9. **سؤال:** علل: لا يحدث تحويل البيروفات إلى إيثانول ($Ethanol$) في جسم الإنسان؟

جواب: لأن هذه العملية لا تحدث في الإنسان بل تحدث في الخميرة وبعض الكائنات المجهرية بغياب الأوكسجين ، وتتم بخطوتين تتطلب إنزيمي **Pyruvate decarboxylase** و **Alcohol dehydrogenase** ، وهذان الإنزيمان غير موجودين في جسم الإنسان.

10. **سؤال:** علل: يشار إلى الدورة التي يتم فيها نقل اللاكتات من العضلات إلى الكبد ثم تحويلها إلى جلوكوز وإعادتها إلى العضلات باسم **دورة كوري** ($Cori\ cycle$)؟

جواب: لأنها تمثل آلية لنقل اللاكتات الناتجة عن التحلل السكري اللاهوائي في العضلات إلى الكبد ليتم تحويلها هناك إلى جلوكوز عبر عملية استحداث الجلوكوز (Gluconeogenesis) باستهلاك $6\ ATP$، ثم يعود الجلوكوز عبر الدم إلى العضلات لاستخدامه كمصدر للطاقة.

تعاريف

1. **التحلل السكري (Glycolysis):** هو سلسلة من عشرة تفاعلات متتالية يتم فيها تحويل جزيء الغلوكوز إلى جزيئتي بيروفات.
2. **التفاعلات المنظمة (Regulatory Steps):** هي ثلاث تفاعلات غير عكسية ضمن مسار التحلل السكري العشرة، تحفزها إنزيمات (Hexokinase، Phosphofructokinase، Pyruvate kinase) وتُعد نقاط سيطرة تُنظِّم المسار حسب احتياج الخلية للطاقة.
3. **تخمر اللاكتات (Lactate Fermentation) / التحول إلى لاكتات:** هو عملية تحويل البيروفات إلى لاكتات بواسطة إنزيم **Lactate dehydrogenase** في غياب الأوكسجين. تحدث في الإنسان والكائنات الراقية وعدد كبير من الكائنات المجهرية لتجديد $NAD+$ اللازم لاستمرار التحلل السكري.
4. **التخمر الكحولي (Alcoholic Fermentation) / التحول إلى إيثانول:** هو عملية تحويل البيروفات إلى أسيتالديهيد ثم اختزال الأسيتالديهيد إلى إيثانول ($Ethanol$) وثاني أكسيد الكربون (CO_2)، وتتم هذه العملية في الخميرة وبعض الكائنات المجهرية بغياب الأوكسجين.
5. **دورة كوري (Cori Cycle):** هي المسار الذي يتم فيه نقل اللاكتات المتكونة في العضلات خلال التمارين الشديدة إلى الكبد، حيث تُحوَّل اللاكتات إلى جلوكوز عن طريق عملية استحداث الجلوكوز ($Gluconeogenesis$)، ثم يعود هذا الجلوكوز إلى العضلات لاستخدامه كمصدر للطاقة.