فسلجة الأحياء المجهرية Microbial Physiology

يهتم موضوع الفسلجة الميكروبية بدراسة التفاعلات الأيضية التي تقوم بها الأحياء المجهرية لغرض النمو والتكاثر، وقد صممت هذه التفاعلات لكي تمكن بعض هذه الأحياء مثل البكتريا من أن تحافظ على ديمومة حياتها ضمن مدى واسع من الظروف البيئية، وأن تستجيب للظروف الملائمة وذلك بالنمو ومن ثم التكاثر، وهذه التفاعلات تحتاج الى طاقة والتي تحصل عليها الأحياء المجهرية اما مما هو مخزون في المركبات الكيمياوية المختلفة أو من أشعة الشمس.

ان معظم الأحياء المجهرية تستخدم المركبات اللاعضوية مصدرا وحيدا للطاقة، كذلك فان النباتات وبعض أنواع البكتريا تعتمد على الطاقة الضوئية لأغراض النمو والتكاثر، وتجدر الاشارة الى أن جميع الأحياء وبدون استثناء وبغض النظر عن مصدر طاقتها تستطيع أن تخزن الطاقة بشكل يمكنها من أن تجري تفاعلاتها الأيضية.

ان العديد من التفاعلات التي تجري داخل الخلايا الميكروبية التي من شأنها أن تؤدي الى تخليق المكونات الخلوية المختلفة هي في الواقع نفسها التي تجري في جميع الكائنات الحية، فالمواد البنائية الاساسية التي تتمثل بالكاربوهيدرات والأحماض الأمينية والأحماض الدهنية والقواعد النتروجينية هي نفسها في جميع الخلايا وبالتالي فان التفاعلات التي تجري لتصنيع هذه المواد يجب أن تتشابه، فعلى سبيل المثال اذا عرفنا الية تكوين حامض التايروسين في بكتريا القولون *E. coli* نستطيع أن نتوقع بأن نفس الالية تجري في جسم الانسان، وهذا ما يجري في الواقع.

الطاقة Energy

الطاقة هي القدرة على اداء شغل. وتستطيع الأنظمة الحيوية أن تستغل الطاقة الكيمياوية أو الضوئية أو الاثنين معا لأداء الشغل في تصنيع المواد الخلوية بحيث تنتج خلايا جديدة. ويمثل ضوء الشمس مصدر الطاقة الرئيس للكائنات الحية. وتتحول هذه الطاقة الضوئية الى طاقة كيمياوية من خلال عملية البناء الضوئي Photosynthesis ، والأحياء التي تستغل الطاقة الضوئية تتضمن النباتات الخضراء والبكتريا الخضراء المزرقة Cyanobacteria والبكتريا الخضراء والارجوانية وتدعى هذه الاحياء بالأحياء ضوئية التغذية Phototrophic . ان الطاقة الكيمياوية المتولدة أثناء عملية البناء الضوئي تخزن في بعض المركبات العضوية لتشكل مصدرا متجددا للطاقة الكيمياوية للكائنات الحية التي لا تستطيع القيام بعملية البناء الضوئي، وهذه الأخيرة اما أن تكون كيمياوية لاعضوية التغذية Chemolithotrophic التي تستغل الطاقة الكيمياوية في الجزيئات اللاعضوية، أو تكون كيمياوية عضوية التغذية Chemoorganotrophic التي تستغل الطاقة الكيمياوية في الجزيئات العضوية لكي تنمو وتتكاثر.

ان التفاعلات الكيميائية التي تحتاج الى طاقة تتمثل بمعظم التفاعلات البنائية التي تجري داخل الكائنات الحية مثل عمليات بناء البروتين. ويمكن الحصول على الطاقة الضرورية للتفاعلات البنائية اما مباشرة من خلال هدم بعض المركبات الأيضية أو بصورة غير مباشرة من بعض المركبات الكيمياوية الخازنة للطاقة.

بالإضافة الى ما تقدم يمكن للطاقة أن تتوافر من خلال انتقال الالكترونات من بعض المركبات الى مركبات أخرى. فالمواد التي تفقد الالكترونات هي مواد مختزلة Reductant والمواد التي تستلم الالكترونات هي مواد مؤكسدة Oxidant ويدعى هذا النوع من التفاعلات بتفاعلات التأكسدية الاختزالية Redox Reactions . وتتحرر الطاقة عندما تنتقل الالكترونات من مادة وهي في حالة الاختزال الى مادة اخرى متأكسدة.

تستطيع الخلايا ان تحول الطاقة المتحررة اثناء التفاعلات الكيمياوية الى مركبات أخرى تعمل مخازن للطاقة، وتحتوي هذه المخازن على جزيئات ناقلة لهذه الطاقة، وهي موجودة في جميع الخلايا، وتتمثل

بمركب الادينوسين ثلاثي الفوسفات Adenosine Tri-Phosphate ATP وتحتوي جزيئة ATP على القاعدة النتروجينية الادنين Adenine وسكر الرايبوز Ribose وثلاث جزيئات من الفوسفات.

هناك جزيئة صغيرة أخرى في الخلية تنقل الطاقة، وهي ثاني نيوكليوتيد الأدنين والنيكوتيناميد Nicotinamide Adenine Dinucleotide (NAD) وهي من المواد الأيضية التي تستطيع نقل الطاقة على شكل الكترونات، وتشترك هذه الجزيئة في العديد من تفاعلات الأكسدة والاختزال. والطاقة الموجودة في جزيئتي ATP و NAD تصبح متوافرة لجميع التفاعلات البنائية التي تتوسطها الأنزيمات، حيث ان الأنزيمات تلعب دورا مهما في الخلية، وان كميتها ونوعها الموجود في الخلية يحددان القابلية الأيضية لهذه الخلية.

الأنزيمات Enzymes

هي جزيئات بروتينية وظيفية تعمل كعوامل مساعدة، أي انها تسرع من معدل التفاعل دون أن تتأثر هي من جراء عملها هذا.

من المعروف ان معظم التفاعلات الكيمياوية تجري ببطيء تحت درجة حرارة الغرفة، والانزيمات تعمل تحت درجة حرارة الكائنات الحية وهي على العموم واطئة نسبيا، فالأنزيمات تسرع من معدلات التفاعلات الكيمياوية وذلك بامتلاكها مواقع مساعدة تتفاعل بصورة نوعية مع المواد المتفاعلة. وتتحد مادة التفاعل Substrate (S) مع الانزيم Enzyme (E) لإنتاج معقد من مادة التفاعل والأنزيم ES ، وبسبب خصوصية تركيب الأنزيمات فان فعلها ينصب على الأواصر الكيمياوية ضمن جزيئة مادة التفاعل مما يؤدي الى تكوين مركب جديد يمثل الناتج Product (P) ، وكما مبين في المعادلة أدناه:

Substrate (S) +Enzyme (E) Enzyme Substrate(ES) E+ Product (P)

ان هذا التفاعل هو تفاعل عام لأنزيم يعمل على مادة تفاعل واحدة، وتسمى الانزيمات عادة اعتمادا على مادة التفاعل، فمثلا Proteinase هو الأنزيم الذي يعمل على البروتينات و Carbohydrase للأنزيمات التي تعمل على الكربوهيدرات و Lipase هي الانزيمات التي تعمل على الدهون Lipids وهكذا، وقد نعتمد في التسمية على نوع التفاعل الذي يجري كما في انزيم Oxidase الذي يدخل في تفاعلات

الأكسدة وأنزيم Reductase الذي يدخل في تفاعلات الاختزال وهكذا، ويضاف المقطع ase دلالة على ان الاسم يعني انزيما".

يحتوي العديد من الأنزيمات على جزء بروتيني متحد مع جزيئة عضوية ذات وزن جزيئي واطيء يطلق عليه Coenzyme وفي هذه الحالة يسمى الجزء البروتيني Apoenzyme ، وعندما يتحد هذان الاثنان يتشكل الانزيم الكامل الذي يدعى بـ Haloenzyme ، وكما موضح في المعادلة أدناه:

Apoenzyme + Coenzyme Haloenzyme

وغالبا ما تلعب الفيتامينات دور الانزيم المساعد Coenzyme أو تشكل الجزء الاساس منه، وفي بعض الاحيان لا يعمل الانزيم الا بوجود بعض المعادن مثل الحديد كما في حالة انزيم الكاتاليز، ومن المعادن التي تدخل في تركيب الانزيمات هي المغنيسيوم والمنغنيز والحديد والزنك حيث تقوم هذه الايونات بتنشيط الانزيمات.

تمتلك الخلايا 1000 انزيم على الأقل، وقد قدر عدد الانزيمات في بكتريا القولون *E.coli* بعدة الاف نوع، الا انه وبالرغم من هذا العدد الهائل فقد تم تقسيم هذه الانزيمات الى ثمان مجاميع أساسية هي:

1- انزيمات الاكسدة والاختزال Oxidoreductase التي تساعد في تفاعلات الأكسدة والاختزال.
2- الانزيمات الناقلة Transferase التي تنقل مجموعة كيمياوية من جزيئة الى اخرى.
3- انزيمات التحلل المائي Hydrolase وهي تكسر الأواصر التساهمية بإضافتها جزيئة ماء.
4- انزيمات Decarboxylase وهي تزيح مجموعة CO_2 من جزيئة الحوامض الكاربوكسيلية العضوية.
5- انزيمات Isomerase وهي التي تساعد على احداث التغييرات التركيبية ضمن الجزيئة الواحدة.
6- انزيمات الربط Ligases وهي الانزيمات التي تساعد على ربط جزيئتين معا في عمليات البناء مع حدوث تحلل مائي لجزيئة ATP .
7- انزيمات التجفيف Dehydration وهي التي تساعد على ازاحة جزيئة ماء H_2O من مادة التفاعل.
8- الانزيمات المزيلة لمجموعة الأمين Deaminase وهي التي تساعد على ازاحة مجموعة الأمين NH_2 من مادة التفاعل.

التنفس الهوائي Aerobic Respiration

يحصل الانسان والعديد من الاحياء المجهرية على الطاقة وهو في ظروف هوائية اي بوجود الاوكسجين، ومن خلال التنفس الهوائي تتحول الطاقة الكيمياوية من مركب الى اخر باستخدام الاوكسجين عاملا مؤكسدا نهائيا. فالكلوكوز مثلا يتأكسد عن طريق التنفس الهوائي الى ثنائي اوكسيد الكاربون وماء، وان العامل المؤكسد O_2 قد اختزل الى H_2O في حين ان ذرات الكاربون لجزيئة الكلوكوز قد تأكسدت الى CO_2 ، وان كمية الطاقة الكلية التي تحررت من الاكسدة التامة للكلوكوز الى ست جزيئات من CO_2 وست جزيئات من الماء هي 686 كيلو سعرة/جزيئة ، ويخزن جزء من هذه الطاقة في داخل الخلية، ويتحرر جزء اخر على شكل حرارة. وعلى أي حال فان أيض الكلوكوز يجري ضمن سلسلة من الخطوات الأيضية التي تشمل دورة التحلل السكري Glycolysis ودورة كريب أو دورة الحوامض الكاربوكسيلية الثلاثية Tricarboxylic acid Cycle (TCA) وسلسلة نقل الالكترونات Electron Transport Chain .

اولا": دورة التحلل السكري Glycolysis

يجمع التنفس الهوائي بين تحرير الطاقة من الكلوكوز وخزنها في ATP . وان عملية تحلل أو هضم الكلوكوز هي أول السلاسل التفاعلية في عمليات أيض الكلوكوز حيث ينتج منها جزيئتان من حامض البايروفيك وجزيئتان من NAD المختزل وجزيئتان من ATP ، وفي الواقع فان جميع هذه الأحداث تجري في ان واحد داخل السايتوبلازم الخلوي حيث ان كل خلية ستمتلك العديد من جزيئات الكلوكوز والعديد من جزيئات كل من المواد الأيضية، وتتفاعل كل مادة مع انزيماتها الخاصة. كما في المعادلة العامة أدناه:

$$C_6H_{12}O_6+2H_3PO_4+2ADP+2NAD_{ox} \qquad 2Pyruvic\ acid+2ATP+2NAD_{red}+2H_2O+2H_2$$

ان حامض البايروفيك يحتوي على كمية من الطاقة والتي يمكن تحريرها باستمرار عمليات الأيض، لذلك فان الأحياء الهوائية تمضي في تمثيل هذا الحامض من خلال سلسلة تفاعلات أيضية أخرى ضمن التنفس الهوائي وهي دورة الحامض ثلاثي الكاربوكسيل.

ثانيا": دورة الحامض ثلاثي الكاربوكسيل Tricarboxylic Acid Cycle

وتسمى احيانا دورة كريب Kreb's cycle أو دورة حامض الستريك Citric Acid Cycle . اذ ان جميع الخلايا القادرة على التنفس الهوائي تحتوي على الأنزيمات الضرورية لإجراء دورة حامض ثلاثي الكاربوكسيل TCA ، وان نقطة الاتصال بين عمليتي التحلل السكري ودورة TCA هي عملية ازاحة مجموعة الكاربوكسيل من حامض البايروفيك. وتتم هذه الخطوة بوجود Coenzyme A وينتج منها Acetyl–CoA وثنائي أوكسيد الكاربون و NAD .

يتحرر ثنائي اوكسيد الكاربون عادة الى الوسط البيئي المحيط بالكائن الحي على شكل غاز، اما Acetyl–CoA فيتحد مع حامض Oxaloacetic acid ليكون حامض ثلاثي الكاربوكسيل المتمثل بحامض الستريك، ان اعادة تكوين حامض Oxaloacetic acid من حامض الستريك في هذه الدورة وبتدخل سلسلة من التفاعلات الانزيمية تنتج جزيئتين من ثنائي اوكسيد الكاربون وجزيئة واحدة من الفلافين المختزل وثلاث جزيئات من NAD وجزيئة واحدة من ATP لكل جزيئة من Acetyl–CoA تدخل في هذه الدورة. وبهذا فان أيض جزيئتين من حامض البايروفيك من تحلل الكلوكوز تدخل التفاعل الاجمالي الاتي:

$$2\text{Pyruvic acid}+8NAD_{ox}+2\text{flavin}_{ox}+2ADP+2H_3PO_4 \quad 6CO_2+2\text{flavin}_{red}+8NAD_{red}+2ATP$$

ثالثا": سلسلة نقل الالكترونات Electron Transport Chain

تحتوي الخلايا على كميات محدودة من NAD ، واذا ما اختزلت جميع هذه الكمية فلن يبقى NAD وبذلك تختل عملية الأيض، ان عملية أكسدة NAD المتكون من عمليتي التحلل السكري ودورة حامض الستريك تسمى بسلسلة نقل الالكترونات.

يتأكسد NAD والفلافينات بواسطة سلسلة نقل الالكترونات المرتبطة بالأغشية الخلوية، ففي الخلايا حقيقية النواة تقع هذه السلسلة في الأغشية الداخلية للمايتوكوندريا، أما في البكتريا الهوائية فان موقع هذه السلسلة ينحصر في الغشاء السايتوبلازمي.

تتكون سلسلة نقل الالكترونات من عدد من الجزيئات الكبيرة مثل مجموعة السايتوكروم والفلافوبروتينات وبروتينات الكبريت والحديد وبعض الجزيئات الصغيرة مثل الكينونات، ويشترك كل واحد من هذه المركبات في تفاعل معين من تفاعلات الاكسدة والاختزال. ولقد حددت قابلية هذه المواد على أخذ الالكترونات من مركبات اخرى، فالمركب الذي يعطي الكترونات اكثر الى مركبات أخرى سيكون هو المركب الأقوى اختزالا، والمركب الأقوى اختزالا هو الذي يحتوي على الكمية الأعلى من الطاقة.

ان الطاقة المتحررة من هذه العملية التأكسدية قد تستغل بتحويلها الى طاقة مخزونة على شكل ATP او تفقد على شكل حرارة.

رابعا": الفسفرة التأكسدية Oxidative Phosphorylation

وهي عملية تتكون من خلالها جزيئات ATP مع اعادة تكوين NAD عن طريق سلسلة نقل الالكترونات وباستخدام الاوكسجين كمستقبل نهائي للالكترونات، ففي حالة وجود الاوكسجين وعند تدخل مجموعة السايتوكروم في عملية الأكسدة تحدث ثلاث عمليات فسفرة على الأقل.

ينتج من هذه العمليات الثلاث ماء وبيروكسيد الهيدروجين H_2O_2 وبعض السوبر اوكسيد O_2 ، وهذا السوبر اوكسيد هو جذر يتكون عندما يختزل الاوكسجين بواسطة الكترون واحد فقط. ان هذه المركبات تنتج ايضا من عملية التحلل السكري ودورة كريب وبكميات قليلة، وتتحول الكميات القليلة من O_2 الى بيروكسيد الهيدروجين بتدخل انزيم superoxide dismutase الذي يتحلل بدوره بواسطة أنزيم catalase الى الماء والاوكسجين، وعلى العموم فان معظم البكتريا الهوائية تحتوي على انزيم الكاتاليز الذي من خلاله تتخلص الخلية من بيروكسيد الهيدروجين عالي السمية.

الطاقة الناتجة من التنفس الهوائي

ان الطاقة الناتجة من عمليات التنفس الهوائي الثلاث (التحلل السكري ودورة كريب وسلسلة نقل الالكترونات) تبلغ 38 جزيئة من ATP تتكون من الأكسدة التامة لجزيئة واحدة من الكلوكوز، اضافة الى 6 جزيئات من CO_2 و 6 جزيئات ماء H_2O .

انتاج الطاقة لا هوائيا"

تستطيع بعض الكائنات الحية ان تنتج ATP من الكاربوهيدرات بغياب الاوكسجين، فالأحياء التي تعيش في الظلام وفي الظروف اللاهوائية تستطيع ان تنتج ATP من الكاربوهيدرات اما عن طريق التنفس اللاهوائي Anaerobic Respiration او عن طريق التخمر Fermentation ، والبيئات التي توفر هذه الظروف منتشرة بكثرة في الطبيعة مثل الابار العميقة وقاع البحيرات اضافة الى أمعاء الانسان.

اولا": التنفس اللاهوائي Anaerobic Respiration

يرتبط التنفس الخلوي عادة بالغشاء البلازمي، ويختلف هذا النوع من التنفس عن التنفس الهوائي في كون المستلم النهائي للالكترونات هو مركبات لا عضوية وليس الاوكسجين كما في حالة التنفس الهوائي. ومن هذه المستلمات هي النترات NO_3 و الكبريتات SO_4 ، فبكتريا القولون *E. coli* تستطيع أن تنمو لا هوائيا عندما يتأكسد الكلوكوز، وباستخدام النترات مستلما نهائيا للالكترونات ونتيجة لعملية الأكسدة هذه ينتج لدينا مشتقات النترات مثل النتريتات NO_2 وغاز النتروجين N_2 ، وتعتبر قابلية الكائن الحي على انتاج النتريتات تحت ظروف لا هوائية صفة تشخيصية في عملية تصنيف البكتريا.

ومن البكتريا اللاهوائية التي تختزل الكبريتات هي بكتريا *Desuifovibrio sulforicans* فهي تتنفس عن طريق اختزال الكبريتات SO_4 الى ايونات الكبريتيدات S^{-2} على شكل H_2S او الى الكبريت الذري S ، وتجدر الاشارة هنا الى ان عملية اختزال الكبريتات الى كبريتيد الهيدروجين هي السبب في اسوداد الطين في بعض الأحيان فضلا عن لون البحر الأسود المائل للسواد حيث ان كبريتيد الهيدروجين يتفاعل مع أيون الحديدوز Fe^{+2} ليكون ملح كبريتيد الحديدوز FeS ذا اللون الأسود.

ثانيا": التخمر Fermentation

هي عملية انتاج الطاقة لا هوائيا"، وتقوم فيه النواتج الأيضية الوسطية بدور المستلم النهائي للالكترونات، وعلى هذا الأساس تكون نواتج التخمر لا أكثر تأكسدا" ولا أكثر اختزالا" من المادة الأساس.

ان بكتريا التخمر لا تمتلك أيا من سلسلة التنفس أو سلسلة نقل الالكترونات، وبذلك فهي تستغل الالكترونات المحملة على NAD لاختزال حامض البايروفيك الى حامض اللاكتك.

ان كمية الطاقة المتحررة لا تكفي لإنتاج ATP وبهذا فان الالكترونات تتحول الى حامض البايروفيك محررة بذلك NAD مؤكسد وهذا يسمح باستمرارية عملية تحلل الكلوكوز، وان هذه العملية هي وحدها التي توفر الطاقة لهذه البكتريا.