وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
كلية العلوم/جامعة ميسان
قسم علوم الحيـــاة

عـــنوان الـــبـــحـــث

البكـــــتيـــريا في انـــــتاج الـطـاقـــــة الحـــــيـــوية

بـــحـث مُـقـدم
إلى قـــسم عـــلوم الـحياة/كـــلية العـلوم /جامـعة مـيسان وهو جـزء من متطلبات نـيل شـهـــادة البـــكـالوريـوس في العـــلوم/ قـــسم عـــلوم الـــحياة

إعـــداد الطـالب
سجاد محمد كاظم جابر

اشـــراف
أ.د. زاهد سعدون عزيز

1446 هـ
2025 م

﴿بِسْمِ اللهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ﴾

اقْرَأْ بِاسْمِ رَبِّكَ الَّذِي خَلَقَ ﴿١﴾ خَلَقَ الْإِنسَانَ مِنْ عَلَقٍ ﴿٢﴾ اقْرَأْ وَرَبُّكَ

الْأَكْرَمُ ﴿٣﴾ الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ ﴿٤﴾ عَلَّمَ الْإِنسَانَ مَا لَمْ يَعْلَمْ ﴿٥﴾

بسم الله الرحمن الرحيم

توصية الأستاذ المشرف

اشهد أن هذا البحث جرى تحت إشرافي في قسم علوم الحياة / كلية العلوم/ جامعة ميسان وهو جزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في علوم الحياة.

التوقيع :

الاسم: أ.د. زاهد سعدون عزيز

المرتبة العلمية : استاذ

التاريخ : / / 2025

توصية رئيس قسم علوم الحياة

بناءً على التوصية المقدمة من قبل الأستاذ المشرف، أُحيل هذه البحث إلى لجنة المناقشة لدراسته وبيان الرأي فيه.

التوقيع :

الاسم: أ.د. صالح حسن جازع

المرتبة العلمية : أستاذ

التاريخ : / / 2025

الاهـــداء

ارى رحلــتي الجامعيــة قــد انتهــت اليــوم بالفعــل مــن بعــد تعــب ومشــقة لوقــتٍ طويــل وهــا انــا اليــوم اخــتم بحــث تخرجــي بكــل مــا لــدي مــن همــه ونشــاط وبــداخلي كــل التقــدير والامتنــان لكــل شــخص كــان لــه الفضــل في مســيرتي وقــدم لــي المســاعدة ولــو بالســير اهــدي هــذا العمــل المتواضــع إلى ســيد الأولــين والأخــرين المبعــوث رحمــة للعــالمين محمــد (ص) والى مــن جاهــد وبــذل في تــربيتي والــديَّ الكــريمين حفظهــا الله والى كــل مــن أســهم بقــولٍ أو عمــل في إخــراج هــذا البحــث خــالص شــكري وتقــديري ودعــائي بالثبــات علــى الإيمــان وحســن الخاتمــة للجميع.

شكر وتقدير

قال تعالى: ﴿لَئِن شَكَرْتُمْ لَأَزِيدَنَّكُمْ﴾ [سورة ابراهيم الآية : ٧] الشكر والحمد لله وحده وهو الأول قبل الوجود والأخر بعد الوجود والواجب له السجود الله الواحد المعبود فإليه وحده يعود. فيا رب لك الحمد ولك الشكر شكراً يليق بعظمتك وجلالك. ثم تثني بشكر أناس جعلهم الله سببا لما نحن فيه من نعمة العلم والتعلم فجزاهم الله خير الجزاء.

اتقدم بالشكر الجزيل لمن تشرف بقبول الإشراف على بحثي هذا رغم مشاغله الكثيرة والذي أثرى بحثي بتوجيهاته فكان نعمَ الموجه لي الأستاذ الدكتور الفاضل زاهد سعدون عزيز فلهُ مني كل الاحترام والتقدير وجزاه الله خيرا وثبتهُ على الحق قولاً وعملاً.

كما وأتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى عمادة كلية العلوم ممثلة بعميدها المحترم وإلى رئاسة قسم علوم الحياة لما وفروه لنا من بيئة علمية محفّزة وداعمة. ولجهودهم المتواصلة في خدمة طلبتهم والارتقاء بالمسيرة الأكاديمية.

واكرر شكري إلى الله على ما أكرمني به من عائلة تحب العلم وتشجع عليه بحيث كانوا الصدر الواسع أثناء فترة دراستي فبارك الله لي فيهم جميعا. وإلى كل من ساهم من بعيد او قريب لكم هذا العمل المتواضع والذي يعتبر خطواتي الأولى في البحث العلمي. وبكل تواضع فإن اي عمل انساني لا يكتمل ولا يصل الى صفة الكمال إلا إذا أكمله عمل انساني آخر.

الخلاصة

في ظل التحديات البيئية والاقتصادية الناتجة عن الاعتماد المفرط على الوقود الأحفوري، برزت الحاجة إلى تطوير مصادر طاقة بديلة ومستدامة. يُعد استخدام البكتيريا في إنتاج الطاقة الحيوية أحد الحلول الواعدة لتوليد طاقة نظيفة من خلال تحويل النفايات العضوية إلى غازات قابلة للاستخدام، مثل الميثان والهيدروجين، أو إلى كهرباء باستخدام تقنيات مثل خلايا الوقود الميكروبية (*MFCs*). وقد أظهرت أنواع من البكتيريا مثل *Geobacter sulfurreducens* و *Shewanella oneidensis* كفاءة عالية في نقل الإلكترونات وتوليد التيار الكهربائي مباشرة من المواد العضوية. كما تبرز أهمية البكتيريا ذاتية التغذية مثل *Rhodopseudomonas palustris* لقدرتها على امتصاص الضوء وتحويل الطاقة الشمسية إلى هيدروجين دون الحاجة للأوكسجين، ما يجعلها مناسبة للبيئات الزراعية والصناعية.

يعتمد إنتاج الطاقة بواسطة البكتيريا على عدة آليات حيوية مثل التحلل اللاحيوي والتخمير البيولوجي والنقل الكهروكيميائي للإلكترونات. كما أن الإمكانات التقنية المرتبطة بالهندسة الوراثية فتحت المجال أمام تحسين كفاءة البكتيريا من خلال تعديل جيناتها لتعزيز إنتاج الطاقة أو تحسين استجابتها للظروف البيئية المختلفة. ورغم الفوائد الكبيرة لتلك التقنيات، لا تزال هناك تحديات تتعلق بتكلفة الإنتاج، وكفاءة التحويل، والسيطرة على الظروف التشغيلية.

يُسهم استخدام البكتيريا في إنتاج الطاقة الحيوية في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة، وإعادة تدوير النفايات العضوية، والحد من الضغط على مصادر الطاقة التقليدية، مما يعزز من فرص تطبيقها في الدول النامية. بناءً على ما تقدمه هذه الكائنات الدقيقة من قدرات فريدة، فإن تطوير تكنولوجيا الطاقة الحيوية البكتيرية يمثل خطوة استراتيجية نحو مستقبل طاقي أكثر استدامة وأقل تكلفة.

المحتويات

ت	الموضوع	رقم الصفحة
1	الآية	II
2	التوصية	III
3	الاهداء	IV
4	الشكر	V
5	الخلاصة	VI
6	المحتويات	VII
7	الفصل الاول/ مقدمة عامة	3-1
8	المقدمة	3-2
9	الفصل الثاني/ استعراض المراجع	26-4
10	الطاقة	5
11	أهمية الطاقة الصناعية	6
12	أنواع الطاقة وتفاصيلها	7
13	تحديات استخدام الطاقة	8
14	مصادر الطاقة	9
15	البكتريا في انتاج الطاقة الحيوية	12-9
16	أنواع البكتريا في انتاج الطاقة الحيوية	13-12
17	الإمكانات المستقبلية للبكتريا في الطاقة	13
18	تاريخ استخدام البكتريا كمصدر للطاقة الحيوية	14
19	آليات انتاج الطاقة بواسطة البكتريا	16-15
20	التطبيقات والانزيمات والاستخدامات العلمية للبكتريا في انتاج الطاقة	17-16
21	الأثر الاقتصادي والبيئي للبكتريا كمصدر للطاقة الحيوية	18
22	المقارنة بين انتاج الطاقة الحيوية باستخدام البكتريا والمصادر الأخرى	20-19
23	الاستراتيجيات لتوسيع نطاق انتاج الطاقة الحيوية باستخدام البكتريا	21-20
24	الهندسة الوراثية ودورها في تحسين انتاج الطاقة	23-21
25	تحليل تأثير البكتريا في استخدام الطاقة	23
26	الدمج بين البكتريا ومصادر الطاقة المتجددة الاخرى	24
27	الجانب الأخلاقي والقانوني لاستخدام البكتريا في انتاج الطاقة	26-24
28	الفصل الثالث / منهجية البحث والنتائج	29-27
29	المقدمة	28
30	جمع المعلومات في البحث	28
31	الاستنتاجات العامة	28
32	افضل طريقة بحثية في مجال الطاقة الحيوية	29-28
33	المصادر	30-33
34	Abstract	34

الفصـــل الأول

المـــقـــــــدمة

Introduction

1.1 المقدمة Introduction

في ظل التحديات البيئية والاقتصادية الناتجة عن الاعتماد على الوقود الأحفوري، أصبحت الحاجة إلى مصادر طاقة متجددة أمرًا بالغ الأهمية. تعد الطاقة الحيوية من البدائل الواعدة، حيث تعتمد على تحويل المواد العضوية إلى وقود نظيف باستخدام عمليات بيولوجية تقوم بها الكائنات الحية الدقيقة، وعلى رأسها البكتيريا *(Logan, 2008)*.تتميز البكتيريا بقدرتها الفريدة على تحويل النفايات العضوية إلى مصادر طاقة مختلفة، مثل الغاز الحيوي، الإيثانول، والهيدروجين الحيوي، ما يجعلها محط اهتمام الباحثين في مجال الطاقة المتجددة*(Rittmann et al. 2012)*.

تستخدم بعض البكتيريا اللاهوائية، مثلMethanogens ، في إنتاج الميثان من خلال عملية التحلل اللاهوائي، حيث تقوم بتحليل المواد العضوية وتحويلها إلى غاز الميثان، الذي يُستخدم كمصدر رئيسي للغاز الحيوي في محطات توليد الطاقة *(Chisti, 2007)*. كما تلعب البكتيريا الزرقاء (*Cyanobacteria*)دورًا محوريًا في إنتاج الوقود الحيوي من خلال التمثيل الضوئي، حيث يتم تعديلها وراثيًا لزيادة قدرتها على تثبيت ثاني أكسيد الكربون وتحويله إلى وقود حيوي مثل البيوتانول والإيثانول، مما يزيد من كفاءة إنتاج الطاقة *(Lovley, 2006)*.

علاوة على ذلك، أثبتت بعض الأنواع البكتيرية، مثل *Geobacter* و *Shewanella*, قدرتها على توليد الكهرباء عبر خلايا الوقود الميكروبية(Microbial Fuel Cells - MFCs) ، حيث تقوم بنقل الإلكترونات إلى الأقطاب الكهربائية. مما يتيح إمكانية استخدام المخلفات العضوية كمصدر مباشر لإنتاج الطاقة الكهربائية تمثل هذه التقنية تقدمًا كبيرًا في مجال الطاقة الحيوية، حيث توفر حلاً مستدامًا لإنتاج الكهرباء من النفايات، مع تقليل التلوث البيئي*(Zhang et al. 2014)*.

بفضل التطورات في مجال الهندسة الوراثية، أصبح من الممكن تعزيز إنتاجية البكتيريا من خلال إدخال تعديلات جينية تزيد من كفاءة عمليات التحويل البيولوجي للطاقة، على سبيل المثال، تم تعديل بعض سلالات *Escherichia coli* وراثيًا لزيادة إنتاج الإيثانول من الكتلة الحيوية، مما يعزز من كفاءة تحويل السكر إلى وقود حيوي*(Rittmann et al. 2012)*.

ومع ذلك، لا تزال هناك تحديات تواجه تطبيق هذه التقنيات على نطاق صناعي، مثل التكلفة

العالية، الحاجة إلى تحسين كفاءة الإنتاج، وإدارة العوامل البيئية المؤثرة على نمو البكتيريا وإنتاجها للطاقة*(Zhang et al. 2014)* .

إن دراسة دور البكتيريا في إنتاج الطاقة الحيوية تفتح آفاقًا جديدة نحو تحقيق الاستدامة البيئية والحد من انبعاثات الكربون، مما يجعلها ركيزة أساسية في الجهود العالمية للانتقال إلى مصادر طاقة نظيفة ومتجددة. يهدف هذا البحث إلى استكشاف الإمكانيات الحالية والمستقبلية للبكتيريا في إنتاج الوقود الحيوي، مع التركيز على أحدث التطورات العلمية والتكنولوجية التي يمكن أن تعزز من كفاءة هذه العمليات، وتساهم في بناء اقتصاد منخفض الكربون ومستدام (*Lovley, 2006*).

الفصـــــل الثـــاني

استعراض المراجع

Literatures Review

1.2الطاقة

تُعد الطاقة أحد الركائز الأساسية التي يقوم عليها التطور البشري والحضاري منذ أقدم العصور وحتى وقتنا الحاضر. فهي القوة التي تُحرك كل شيء من حولنا، بدايةً من أبسط العمليات الحيوية في جسم الإنسان، وصولًا إلى أعقد الأنظمة الصناعية والتكنولوجية الحديثة. ويمكن تعريف الطاقة بأنها القدرة على القيام بالشغل، وهي توجد بأشكال متعددة منها الطاقة الحرارية، الكهربائية، الكيميائية، النووية، والميكانيكية، وكل منها يلعب دورًا محددًا في تسيير منظومات الحياة. إن فهم طبيعة الطاقة وتنوعها ضروري لفهم التحديات التي يوجهها العالم حاليًا فيما يتعلق بالإنتاج، الاستهلاك، والاستدامة البيئية لقد رافقت الطاقة الإنسان منذ فجر التاريخ، حيث استخدم الإنسان الأول مصادر بدائية كالنار الناتجة عن احتراق الأخشاب للطهي والتدفئة، وتطورت استخداماته لاحقًا لتشمل استغلال الرياح والمياه في تحريك الطواحين. ومع دخول العالم عصر الثورة الصناعية في القرن الثامن عشر، شهدت البشرية تحولًا جذريًا في طريقة الحصول على الطاقة، حيث أصبح الفحم، ومن ثم النفط والغاز الطبيعي، المصادر الرئيسية لتشغيل الآلات والمصانع، مما أدى إلى طفرة اقتصادية وعمرانية هائلة. ومع ذلك، تسبب هذا الاعتماد الكبير على الوقود الأحفوري في نشوء مشكلات بيئية خطيرة مثل الاحتباس الحراري وتلوث الهواء والماء*(Smil, 2017)* .

في العقود الأخيرة، ازداد الوعي العالمي بالحاجة إلى التحول نحو مصادر الطاقة النظيفة والمتجددة. هذه المصادر لا تقتصر فقط على الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، بل تشمل أيضًا الطاقة الحيوية، وهي طاقة ناتجة عن الكائنات الحية الدقيقة، وعلى رأسها البكتريا، والتي يمكنها إنتاج طاقة بطرق متعددة. يأتي هذا التوجه نتيجة الضغط العالمي المتزايد من أجل حماية البيئة وتحقيق التنمية المستدامة لذلك، أصبح البحث في الطاقة ومصادرها جزءًا لا يتجزأ من السياسات الاقتصادية والبحثية في معظم دول العالم، حيث تسعى إلى تقليل الاثر الكربوني وتحقيق أمن الطاقة للأجيال القادمة*(Kiani et al., 2020)* .

1.1.2 أهمية الطاقة الصناعية

تُعد الطاقة ضرورة محورية لا غنى عنها في كافة تفاصيل الحياة اليومية، إذ تُشكل عصب البنية التحتية الحديثة، وتدخل في جميع مظاهر الحياة سواء في المنزل أو الشارع أو مكان العمل. فبدءًا من إنارة المنازل وتشغيل الأجهزة المنزلية، ووصولًا إلى وسائل النقل العامة والخاصة، تتطلب جميعها توفر مصدر طاقة مستمر وموثوق. ويزداد هذا الاعتماد بشكل كبير في المدن الحضرية المتقدمة، حيث يُستهلك جزءٌ كبير من الطاقة في الاتصالات، التبريد، التدفئة، ومعالجة المياه والنفايات .وتشير الإحصائيات إلى أن متوسط استهلاك الفرد للطاقة قد تضاعف عدة مرات خلال القرن العشرين بسبب زيادة عدد الأجهزة الكهربائية والتوسع الحضري والتكنولوجي السريع*(IEA, 2022)* .

في المجال الصناعي، تتجلى أهمية الطاقة بشكل أوسع وأكثر تأثيرًا، حيث تعتمد العمليات الصناعية الكبرى على كميات هائلة من الطاقة لتشغيل الآلات، إدارة خطوط الإنتاج، صهر المعادن، تصنيع المواد الكيميائية، ومعالجة الأغذية .ولعل أحد أهم مؤشرات تقدم الدول اقتصاديًا هو حجم استهلاكها للطاقة، وهو ما يُعرف بمؤشر "كثافة الطاقة الصناعية". الدول الصناعية الكبرى مثل الولايات المتحدة والصين وألمانيا تُعد من أكبر المستهلكين للطاقة عالميًا، وذلك انعكاسًا لحجم صناعاتها ومعدلات إنتاجها المرتفعة*(Lior, 2010)* .

ولا تقتصر أهمية الطاقة الصناعية على الدور التشغيلي فحسب، بل تمتد لتُشكل عنصرًا حيويًا في تنافسية المنتجات، حيث أن تكلفة الطاقة تؤثر بشكل مباشر على تكلفة الإنتاج وبالتالي على الأسعار النهائية للسلع والخدمات. فكلما كانت مصادر الطاقة المستخدمة أرخص وأكثر كفاءة، زادت فرص التوسع الصناعي والتصدير للأسواق العالمية .ولهذا السبب، تستثمر الشركات الكبرى ودول العالم المتقدمة مبالغ طائلة في تطوير تقنيات جديدة لخفض استهلاك الطاقة وتحسين كفاءتها علاوة على ذلك، فإن استخدام الطاقة الصناعية له أبعاد استراتيجية تتعلق بالأمن القومي، إذ يُنظر إلى توفر الطاقة المستقرة كعامل رئيسي في استقرار المجتمعات وقدرتها على التفاعل مع الأزمات. كما أن النقص في الطاقة أو انقطاعها يُسبب تعطيلًا مباشرًا للإنتاج، ويؤدي إلى خسائر اقتصادية فادحة، وهذا ما يجعل الطاقة عنصرًا أساسيًا في الخطط الوطنية للطوارئ والتنمية الاقتصادية *(Stevens, 2000)* .

2.1.2أنواع الطاقة وتفاصيلها

الطاقة في صورتها العامة تُقسَم إلى عدة أنواع رئيسية تختلف في مصدرها وطبيعة استخدامها، ويمكن تصنيفها إلى نوعين أساسيين: طاقة متجددة وأخرى غير متجددة. كل نوع من هذه الأنواع يمتلك خصائص فريدة من حيث الكفاءة، التوفر، التأثير البيئي، والجدوى الاقتصادية، مما يؤثر بشكل مباشر في السياسات العالمية الخاصة بالطاقة، وكذلك في استراتيجيات التنمية المستدامة .الطاقة غير المتجددة تشمل تلك المستمدة من الوقود الأحفوري مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي، وكذلك الطاقة النووية. تعتمد هذه المصادر على استخلاص مواد طبيعية تم تخزينها في باطن الأرض على مدى ملايين السنين، وهي توفر كميات هائلة من الطاقة بتكاليف منخفضة نسبيًا، ولكنها تُعد من أكثر المصادر تأثيرًا على البيئة. فهي مسؤولة بشكل كبير عن انبعاثات غازات الدفيئة التي تساهم في الاحتباس الحراري. كما أن هذه المصادر محدودة، ويُتوقع أن تنفد تدريجيًا، ما يجعل الاعتماد عليها غير مستدام على المدى البعيد*(Kostić et al., 2018)* .

الطاقة المتجددة هي الطاقة الناتجة عن مصادر طبيعية تتجدد باستمرار، وتشمل الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، الطاقة الكهرومائية، طاقة الكتلة الحيوية، والطاقة الجيوحرارية. تُعد هذه المصادر صديقة للبيئة وأقل ضررًا من الوقود الأحفوري، كما أنها تُتيح إمكانية الاكتفاء الذاتي في الطاقة لبعض الدول. على سبيل المثال، تُستخدم الألواح الشمسية لتحويل ضوء الشمس إلى كهرباء، بينما تُستخدم التوربينات الهوائية لتوليد الكهرباء من حركة الرياح *(Kamraju, 2023)* .

من بين أنواع الطاقة المتجددة، تأتي الطاقة الحيوية في موقع مميز، كونها تعتمد على تحلل المواد العضوية والكائنات الدقيقة مثل البكتريا. تُستخدم الكتلة الحيوية – التي تشمل المخلفات الزراعية، نفايات الطعام، وحتى مياه الصرف – كمصدر لإنتاج الوقود الحيوي مثل البيوغاز والبيوإيثانول. ويُعد هذا النوع من الطاقة واعدًا من حيث الكفاءة وتدوير النفايات، بالإضافة إلى قدرته على الحد من انبعاثات الكربون*(Demirbas, 2009)* .

الطاقة الكيميائية، مثل تلك المخزنة في الروابط الكيميائية داخل الجزيئات، تُستخدم على نطاق واسع في البطاريات والوقود الحيوي. أما الطاقة الكهربائية فهي الأكثر استخدامًا حاليًا وتشكل محور البنية التحتية الحديثة، حيث يتم تحويل مختلف أنواع الطاقة إلى كهرباء يمكن نقلها بسهولة وتخزينها نسبيا*(Gielen et al., 2010).*

3.1.2 تحديات استخدام الطاقة

رغم التقدم الكبير في مجالات الطاقة، إلا أن استخداماتها تواجه العديد من التحديات البيئية، الاقتصادية، والسياسية. أول هذه التحديات يتمثل في الاعتماد المفرط على الوقود الأحفوري، والذي لا يزال يُمثل أكثر من 80% من إجمالي استهلاك الطاقة العالمي. هذا الاعتماد يُهدد التوازن البيئي بسبب الانبعاثات الكربونية الهائلة الناتجة عنه، والتي تسببت في تفاقم ظاهرة الاحتباس الحراري، ذوبان الجليد القطبي، وتغيرات مناخية غير مسبوقة(*IEA, 2021*) .

تأتي مسألة أمن الطاقة، والتي تُعبر عن قدرة الدول على تأمين احتياجاتها من الطاقة دون انقطاع. تعتمد بعض الدول على استيراد النفط والغاز، ما يجعلها عرضة للتقلبات الجيوسياسية وتقلبات السوق العالمي. وقد ظهرت هذه الإشكالية جلية خلال النزاعات الإقليمية والأزمات الاقتصادية، حيث تعرضت خطوط امداد الطاقة لانقطاعات خطيرة.على صعيد الاستخدامات، تُستهلك الطاقة في قطاعات متعددة تشمل الصناعة، النقل، الزراعة، والخدمات. القطاع الصناعي وحده يستهلك قرابة 30% من إجمالي الطاقة العالمية، يليه قطاع النقل بنسبة تقارب 25%. هذا الاستهلاك الكثيف يجعل أي تحوّل في سياسات الطاقة تأثيره بالغ على الاقتصاد العالمي ولذلك، تتجه الجهود البحثية نحو تطوير حلول بديلة تدمج بين الكفاءة والاستدامة، مثل الطاقة الحيوية الناتجة من الكائنات الدقيقة، والتي قد تُقدم حلولًا عملية طويلة الأمد، وخاصة في الدول التي تفتقر إلى مصادر تقليدية للطاقة *(Sovacool, 2020).*

بالإضافة لذلك، تُشكل تكاليف الإنتاج والبنية التحتية عقبة أمام التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة. فمثلًا، تركيب أنظمة الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح يتطلب استثمارات أولية مرتفعة نسبيًا، وهو ما يعوق العديد من الدول النامية عن تبنيها على نطاق واسع. كذلك، فإن بعض أنواع الطاقة المتجددة مثل طاقة الرياح والشمس تُعاني من مشاكل الانقطاع، أي أنها لا تتوفر بشكل دائم، مما يستدعي تطوير تقنيات تخزين متقدمة *(IEA, 2021).*

4.1.2 مصادر الطاقة

تتعدد مصادر الطاقة التي يعتمد عليها الإنسان لتلبية احتياجاته اليومية والصناعية، ويمكن تصنيفها إلى مصادر أولية ومصادر ثانوية. المصادر الأولية تشمل الطاقة الشمسية، الوقود الأحفوري، الكتلة الحيوية، الرياح، والطاقة النووية. أما المصادر الثانوية فهي تلك الناتجة من تحويلات الطاقة، مثل الكهرباء والوقود السائل.

أولاً وأهم مصدر طبيعي هو الطاقة الشمسية، والتي تُعد أصل جميع مصادر الطاقة المتجددة الأخرى، إذ تسهم في تبخر المياه وتحريك الرياح ونمو النباتات. يمكن تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء من خلال الخلايا الكهروضوئية، أو إلى حرارة باستخدام المُجمعات الشمسية، وتُستخدم هذه الطاقة في المنازل، المصانع، وحتى في تحلية المياه*(International Energy Agency, 2020)* .

ثانيًا، الوقود الأحفوري، ويشمل الفحم، النفط، والغاز الطبيعي. يمثل هذا المصدر حوالي 84% من إنتاج الطاقة عالميًا، لكنه يتسبب بأضرار بيئية هائلة. ويُعتبر غير مستدام، نظرًا لمحدوديته الزمنية واعتماده على استخراج غير متجدد*(BP Statistical Review, 2021)* .

ثالثًا، الكتلة الحيوية وهي المواد العضوية من نفايات النباتات والحيوانات. تُستخدم هذه المواد لإنتاج الطاقة الحرارية أو الغازية، ويُعد تحويلها بواسطة البكتريا وسيلة واعدة للحصول على طاقة نظيفة، كما سيُناقش لاحقًا. من أبرز مشتقات هذا النوع: البيوغاز والبيوإيثانول *(Zhang et al., 2020)* .

رابعًا، الرياح والطاقة الكهرومائية. تُستخدم الرياح لتدوير التوربينات وتوليد الكهرباء، وتُعتبر طاقة نظيفة ومستدامة، إلا أنها تحتاج مواقع جغرافية محددة لتكون فعّالة. أما الطاقة الكهرومائية فهي تعتمد على تدفق المياه، وتُعد من أقدم وأرخص وسائل توليد الطاقة *(Global Wind Energy Council, 2021)*.

خامسًا، الطاقة النووية، وتُنتج عبر انشطار الذرات، وتُوفر طاقة عالية بكميات صغيرة من الوقود، لكنها تُثير مخاوف بيئية وأمنية بسبب النفايات المشعة*(World Nuclear Association, 2021)* .

5.1.2 البكتريا في إنتاج الطاقة الحيوية

تُعد البكتريا من الكائنات الدقيقة التي تمتلك قدرة استثنائية على تحويل المواد العضوية إلى طاقة قابلة للاستخدام في أشكال متنوعة مثل الغاز أو الكهرباء. في ظل التحديات البيئية

والاقتصادية التي تواجه العالم اليوم، تمثل الطاقة الحيوية المستخلصة من الكائنات الدقيقة أحد الحلول المستدامة لتلبية احتياجات الطاقة المتزايدة، خاصة في ظل الحاجة المتزايدة إلى مصادر طاقة نظيفة ومتجددة. تستند تقنيات إنتاج الطاقة الحيوية باستخدام البكتريا إلى عدة عمليات حيوية معقدة مثل التحلل اللاهوائي والتخمير، حيث تُحوّل النفايات العضوية إلى غازات مثل الميثان أو الهيدروجين، بالإضافة إلى سوائل كالإيثانول.

1-آلية إنتاج الطاقة بواسطة البكتريا

تعد عملية التحلل اللاهوائي (Anaerobic Digestion) أحد الأساليب الرئيسية في إنتاج الطاقة الحيوية بواسطة البكتريا، حيث تقوم البكتريا بتحليل المواد العضوية مثل مخلفات الطعام، مياه الصرف الصحي، أو النفايات الزراعية في بيئة خالية من الأكسجين. أثناء هذه العملية، يتم إنتاج البيوغاز الذي يتكون بشكل رئيسي من الميثان (CH_4) وثاني أكسيد الكربون(CO_2) ، ويتم استخدام الميثان بشكل رئيسي لتوليد الكهرباء أو كوقود للطهي والتدفئة *(Cheng & Liu, 2020)* .

2- خلايا الوقود الميكروبية(MFCs)

واحدة من أهم التطبيقات الحديثة في هذا المجال هي خلايا الوقود الميكروبية (Microbial Fuel Cells - MFCs)، وهي تقنية تعتمد على استخدام البكتريا لتحويل المركبات العضوية إلى تيار كهربائي مباشر. تقوم هذه الخلايا بتحفيز البكتريا على تحلل المواد العضوية المتواجدة في النفايات، ما يؤدي إلى إنتاج كهرباء دون الحاجة إلى معالجات كهربائية معقدة. تظهر الدراسات أن هذه التقنية لديها القدرة على استخدام مجموعة واسعة من المواد العضوية، بما في ذلك النفايات المنزلية والصناعية، وهو ما يجعلها خيارًا واعدًا لتحويل النفايات إلى طاقة في مناطق تفتقر إلى البنية التحتية للطاقة.

تُظهر الأبحاث الحديثة أن خلايا الوقود الميكروبية تتمتع بكفاءة عالية في تحويل الطاقة، مع إمكانية استخدامها كمصدر طاقة مستدام في المناطق التي تعاني من نقص في مصادر الطاقة التقليدية *(Appels et al., 2008)*. كما أن مميزات هذه التقنية تتضمن بساطتها وعدم الحاجة إلى الكثير من المعدات أو التكاليف التشغيلية، مما يجعلها تقنية واعدة لتحسين كفاءة الطاقة في المناطق النامية.

3- استخدامات البيوغاز كوقود

يعد البيوغاز، الناتج عن التحلل اللاهوائي للنفايات العضوية، من أكثر المصادر انتشارًا في إنتاج الطاقة الحيوية. يُستخدم البيوغاز في العديد من التطبيقات الصناعية مثل توليد الكهرباء، التدفئة، وحتى في محطات معالجة المياه. كما يُستفاد من الميثان المنتج من البيوغاز كوقود في المركبات. وفقا لدراسة حديثة، يمكن استخدام البيوغاز في تقنيات التخزين الحيوي، حيث يُخزن الغاز لاستخدامه لاحقًا في توليد الكهرباء أو التدفئة*(Zhang et al., 2021)* .

4-البكتريا في إنتاج الهيدروجين

البكتريا لا تقتصر فقط على إنتاج الميثان بل يمكن أن تُستخدم أيضًا في إنتاج الهيدروجين، الذي يُعد من الوقود النظيف المُحتمل. بعض أنواع البكتريا، مثل *Rhodobacter sphaeroides* و*Clostridium*، قادرة على إنتاج الهيدروجين في ظل ظروف معين*(Kern et al., 2020)* . هذه الأنواع من البكتريا تقوم بإنتاج الهيدروجين عبر عملية التخمير في ظل غياب الأوكسجين، وهو ما يفتح آفاقًا جديدة لاستخدام البكتريا في توليد وقود نظيف.

5-الفوائد البيئية والاقتصادية

تُعد الاستفادة من البكتريا في إنتاج الطاقة الحيوية اقتصادية وبيئية أيضًا. فبدلاً من التخلص من النفايات العضوية عبر الطمر أو الحرق، يمكن استخدامها لإنتاج طاقة نظيفة، مما يساعد في تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري(GHG) . علاوة على ذلك، فإن استخدام النفايات العضوية لتوليد الطاقة يقلل من الضغط على مكبات النفايات ويحسن إدارة النفايات في المجتمعات الحضرية*(Zhang et al., 2021)* . كما أن هذه التقنيات تساعد في تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، مما يساهم في مكافحة التغير المناخي.

6-التحديات والفرص المستقبلية

رغم الفوائد العديدة للطاقة الحيوية المستخلصة من البكتريا، إلا أن هناك عدة تحديات تواجه هذه التقنيات، أبرزها الحاجة إلى تحسين كفاءة خلايا الوقود الميكروبية (MFCs) والحد من تكاليف الإنتاج. أيضًا، يُعد توليد الطاقة الهيدروجينية بواسطة البكتريا تقنية حديثة تتطلب مزيدًا من البحث لتجاوز المعوقات التقنية المتعلقة بالاستدامة والتحكم في العمليات الحيوية. مع ذلك، يمكن أن تُسهم هذه التقنيات في المستقبل في توفير حلول طاقة منخفضة التكلفة

وقابلة للتطبيق في جميع أنحاء العالم، خصوصًا في البلدان النامية التي قد تستفيد من هذه التقنيات في توفير الطاقة وتقليل النفايات(*Logan, B. E., et al., 2012*).

6.1.2 أنواع البكتريا في إنتاج الطاقة

تتعدد الأنواع البكتيرية القادرة على إنتاج الطاقة الحيوية، ويختلف كل نوع منها في آلية تفاعله مع المواد العضوية وفي البيئة المحيطة به. يمكن تصنيف هذه البكتريا إلى عدة مجموعات بناءً على طرق إنتاج الطاقة ومصادر الوقود التي تعتمد عليها.

1- البكتريا اللاهوائية(Anaerobic Bacteria)

تُعتبر البكتريا اللاهوائية واحدة من الأنواع الرئيسية التي تُستخدم في إنتاج الطاقة الحيوية، حيث تلعب دورًا حيويًا في عملية التحلل الحيوي اللاهوائي للمواد العضوية. تُنتج هذه الأنواع غاز الميثان، الذي تُعد أحد أهم مصادر الطاقة الحيوية في محطات المعالجة البيولوجية. من أبرز أنواع هذه البكتريا *Methanobacterium*و*Methanosarcina*، وهما ينتميان إلى مجموعة البكتريا العتيقة(Archaea) ، التي تتميز بقدرتها الفائقة على إنتاج الميثان تحت ظروف لا هوائية. أظهرت دراسة أجراها(*Angelidaki et al., 2018*). أن هذه الأنواع تُعد الأساس في عمليات إنتاج البيوغاز في محطات التحلل الحيوي، حيث تقوم بتحليل المواد العضوية وتحويلها إلى غازات قابلة للاستخدام كمصادر للطاقة.

2-البكتريا المنتجة للهيدروجين

هناك أنواع أخرى من البكتريا التي تُنتج الهيدروجين، مثل *Clostridium butyricum* و *Enterobacter aerogenes*. تستخدم هذه البكتريا مواد مثل الجلوكوز والنشويات كمصادر كربونية لإنتاج الهيدروجين في ظروف لا هوائية. أظهرت دراسات أجريت في جامعة طوكيو أن *Clostridium butyricum*يمكنه إنتاج 2.5 مول من الهيدروجين لكل مول من الجلوكوز في بيئات مفاعلات حيوية خاصة *(Li et al., 2021)*. هذه القدرة على إنتاج الهيدروجين تجعلها مرشحًا قويًا في أنظمة الطاقة المستقبلية، حيث يُعد الهيدروجين من الوقود النظيف والواعد في توليد الطاقة.

3-البكتريا الكهروكيميائية

من الأنواع الأخرى البكتيرية التي تستخدم في إنتاج الطاقة هي البكتريا الكهروكيميائية، مثل *Geobacter sulfurreducens* و*Shewanella oneidensis*. هذه الأنواع تتميز بقدرتها على نقل الإلكترونات الناتجة عن تحلل المركبات العضوية إلى أقطاب كهربائية، مما يسمح بتوليد تيار كهربائي مباشر. يتم استخدام هذه البكتريا في خلايا الوقود الميكروبية (MFCs)، التي تعد واحدة من أكثر التقنيات الواعدة لإنتاج الطاقة البيولوجية. أظهرت دراسة أجراها *Logan & Rabaey (2020)* أن هذه الأنواع تُعد حجر الأساس لتطوير خلايا وقود بيولوجية ذات كفاءة عالية، مما يجعلها مفيدة في تطبيقات توليد الكهرباء من النفايات العضوية.

4-البكتريا ذاتية التغذية

نوع آخر مثير للاهتمام هو البكتريا ذاتية التغذية مثل *Rhodopseudomonas palustris*. هذه البكتريا تستطيع استخدام الطاقة الشمسية مع المواد العضوية البسيطة لإنتاج الهيدروجين في بيئة خالية من الأوكسجين *Rhodopseudomonas palustris*. تمتلك القدرة على التمثيل الضوئي البكتيري والتخمير في نفس الوقت، مما يجعلها متميزة في البيئات الزراعية والصناعية. تستخدم هذه البكتريا القدرة على امتصاص الضوء الشمس من أجل تعزيز عملية إنتاج الهيدروجين، ما يجعلها مناسبة للتطبيقات الزراعية والصناعية حيث تتوفر موارد ضوئية طبيعية*(McKinlay & Harwood, 2010)*.

5- الإمكانات المستقبلية للبكتريا في الطاقة

تُظهر هذه الأنواع من البكتريا تنوعًا بيولوجيًا هائلًا يمكن استغلاله في مختلف التطبيقات الطاقوية. يمكن تعديل هذه البكتريا وراثيًا لزيادة كفاءتها أو تحسين قدرتها على التكيف مع البيئات المختلفة. وبدلاً من الاعتماد على الوقود الأحفوري، يمكن استغلال هذه الكائنات الدقيقة في أنظمة الطاقة المستدامة، مما يُسهم في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية *(Lovley, 2006)*.

7.1.2 تاريخ استخدام البكتريا كمصدر للطاقة الحيوية

منذ العصور الأولى لتطور الحياة على الأرض، كانت البكتريا من الكائنات الحية الأولى التي ساهمت في إنتاج وتحويل الطاقة في الطبيعة، ويمكن اعتبارها من أولى الكائنات التي أدت إلى بداية تشـــكيل دورة الطاقة الحيوية. بدأت هذه الرحلة منذ أكثر من 3.5 مليار ســـنة، عندما ظهرت الكائنات ذاتية التغذية القادرة على إنتاج الطاقة من مصادر غير عضوية، مثل البكتريا الزرقاء (*Cyanobacteria*)، والتي يُعتقد أنها أول من قادت عملية التمثيل الضوئي. هذه العملية أدت إلى إنتاج الأكسجين كمخلف، مما غيّر بشـكل جذري تركيب الغلاف الجوي للأرض، وأدى إلى أحداث تاريخية عظيمة مثل "الحدث المؤكسِـد العظيم(Great Oxidation Event) "، الـذي وثّقتـه دراســـات جيولوجيـة وبـايوجيوكيميـائيـة *.(Falkowski, 2008)*

البكتريا الزرقاء لم تقتصر على إنتاج الطاقة الحيوية لنموها وتكاثرها فقط، بل ساهمت أيضًا في خلق بيئة مناسبة للكائنات الحية الأخرى من خلال إطلاق الأكسجين، مما حفّز تطور العمليات البيوكيميائية المعقدة. كما ساهمت هذه البكتريا في بناء اسس البيئة والطاقة على الأرض .في المقابل، البكتريا اللاهوائية مثل البكتريا المنتجة للميثان (*Methanogens*) التي تنتمي إلى مجموعة البكتريا العتيقة كانت مسؤولة عن إنتاج غاز الميثان في البيئات القديمة مثل التربة الرطبة والبرك والمستنقعات. وقد أظهرت الأبحاث أن هذه البكتريا تتبع مسارات أيضية بدائية دورها التاريخي كمصدر مبكر للطاقة القابلة للاستخدام*(Thauer et al., 2008)* .

إن دراســة تطـور الأيـض للبكتريـا يوضـح أيضًـا قـدرتها علـى اسـتخدام مصـادر متنوعـة لإنتـاج الطاقــة، مثــل الكبريــت، الهيــدروجين، النتــرات، والحديــد. هــذه القــدرة تجعــل البكتريــا نموذجًــا مثاليًـا لفهـم كيفيـة اسـتفادة الكائنـات الدقيقـة مـن الظـروف البيئيـة المحـدودة لإنتـاج طاقـة كافيـة لبقائهـا. وهـذا يفسـر لمـاذا تُعتبـر البكتريـا هـدفًا رئيسـيًا فـي أبحـاث الطاقـة الحيويـة الحديثـة، لأنهـا تمثــل الــرابط بــين الأنظمــة البيولوجيــة القديمــة والتقنيــات المســتدامة المســتقبلية. باختصــار، البكتريـا كانـت ومـا زالـت تلعـب دورًا رئيسـيًا لـيس فقـط علـى مسـتوى الشـكل والحجـم، بـل أيضًـا علـى مسـتوى إنتـاج الطاقـة الحيويـة. كمـا أنهـا سـاعدت فـي تمهيـد الطريـق لتطـوير أنظمـة الطاقـة الحديثـة، حيـث أشـار *Logan (2009)* إلـى أن "البكتريـا ليسـت فقـط مصـدرًا للطاقـة الحيويـة، بل هي بمثابة معمل بيولوجي ذاتي التنظيم قادر على العمل بكفاءة تحت ظروف قاسية."

8.1.2آليات إنتاج الطاقة بواسطة البكتريا

تستخدم البكتريا مجموعة من الآليات المتقدمة لإنتاج الطاقة، وتختلف هذه الآليات بناءً على نوع البكتريا، بيئتها، وطبيعة المصادر التي تتعامل معها. تُقسم هذه الآليات إلى ثلاث نظم رئيسية: التحلل اللاهوائي، التخمير البيولوجي، ونقل الإلكترونات في خلايا الوقود الميكروبية(MFCs) .

1-التحلل اللاهوائي(Anaerobic Digestion)

البكتريا مثل *Methanosaeta* و*Methanobacterium* تشارك في عملية التحلل اللاهوائي، حيث تقوم بتكسير المواد العضوية في بيئة خالية من الأوكسجين إلى مركبات وسطية، ثم تحويلها إلى ميثان وثاني أكسيد الكربون. تشمل هذه العملية أربع مراحل رئيسية: التحلل الهيدروليكي، الحامضي، إنتاج الأستات، وأخيرًا تمثيل الميثان (methanogenesis).وثّقت دراسة *Deublein & Steinhauser (2011)* هذه المراحل بشكل مفصل، موضحة كيف يساهم كل نوع من البكتريا في مراحل محددة من التحلل الحيوي.

2-التخمير البيولوجي(Biological Fermentation)

البكتريا مثل *Clostridium spp.* تقوم باستخدام التخمير البيولوجي لإنتاج الهيدروجين أو الإيثانول من السكريات. في هذا النظام، يتم تحويل الجلوكوز إلى بيروفات، ثم يتم تحويله إلى هيدروجين وأحماض عضوية. ما يميز هذه العملية هو بساطتها وسرعة إنتاجها، إلا أن كفاءتها قد تتأثر بتراكم الأحماض في الوسط التفاعلي. أظهرت أبحاث *Wu et al. (2020)* أن تعديل الأس الهيدروجيني (pH) للوسط يمكن أن يُحسن من كفاءة التخمير بنسبة تزيد عن 40%.

3-نقل الإلكترونات في خلايا الوقود الميكروبية(MFCs)

تتمثل الآلية في نقل الإلكترونات عبر خلايا الوقود الميكروبية، اذ تقوم بكتريا مثل *Geobacter sulfurreducens* بنقل الإلكترونات الناتجة عن أكسدة المركبات العضوية إلى القطب السالب(anode) ، ومن ثم إلى القطب الموجب (cathode) عبر دائرة كهربائية، مما ينتج تيارًا كهربائيًا. تُعد هذه التقنية من أحدث الآليات الحيوية لإنتاج الطاقة،

وتتميز بكفاءتها العالية في توليد الكهرباء من مياه الصرف أو النفايات العضوية. أظهرت دراسة *Rabaey & Verstraete (2005)* أن هذه التقنية تمثل قفزة نوعية في تكنولوجيا الطاقة المتجددة، حيث أتاح استخدامها في التطبيقات العملية مجالًا لتطوير أنظمة الطاقة المبتكرة.

9.1.2 التطبيقات والأنزيمات والاستخدامات العلمية للبكتريا في إنتاج الطاقة

تتعدد التطبيقات العلمية للبكتريا في إنتاج الطاقة، وهي لا تقتصر فقط على إنتاج الغازات الحيوية مثل الميثان والهيدروجين، بل تمتد لتشمل تقنيات مبتكرة مثل استخراج الكهرباء وإنتاج الوقود الحيوي، وكذلك الحلول المستدامة في مجالات أخرى.

1- إنتاج الميثان من البكتريا اللاهوائية

تُستخدم البكتريا مثل *Methanobacterium* و*Methanosarcina* في تحويل المواد العضوية، مثل المخلفات الزراعية وفضلات الطعام، إلى غاز الميثان، الذي يُعد من أهم مصادر الطاقة المتجددة. هذه البكتريا تلعب دورًا رئيسيًا في محطات المعالجة الحيوية للنفايات. وفقًا لدراسة *Purswani et al. (2019)* ، يمكن أن تُنتج هذه الأنظمة حوالي 50 إلى 60 مليون متر مكعب من الغاز الحيوي سنويًا من النفايات العضوية في المدن الكبرى، مما يساهم بشكل كبير في معالجة النفايات وإنتاج طاقة نظيفة.

2-توليد الكهرباء باستخدام خلايا الوقود الميكروبية(MFCs)

تمتلك البكتريا مثل *Geobacter sulfurreducens* و*Shewanella oneidensis* القدرة على نقل الإلكترونات مباشرة إلى الأقطاب الكهربائية عبر عملياتها الأيضية. هذه التكنولوجيا تُستخدم في خلايا الوقود الميكروبية(MFCs) ، حيث تقوم البكتريا بأكسدة المواد العضوية في المخلفات السائلة أو النفايات الزراعية، مما يولد تيارًا كهربائيًا. في دراسة أجراها *Logan et al. (2006)*، تم تطوير خلايا وقود ميكروبية قادرة على إنتاج 0.7 فولت لكل مفاعل، وهو ما يُعد إنجازًا كبيرًا في مجال الطاقة البيولوجية.

3-إنتاج الهيدروجين بواسطة البكتريا

تستخدم البكتريا مثل *Clostridium butyricum*في بيئات لا هوائية لتحويل السكريات والنشويات إلى هيدروجين، الذي يعد مصدرًا واعدًا للطاقة النظيفة. وقد أظهرت دراسة *Cai et al. (2019)* أن خلايا الهيدروجين الميكروبية باستخدام هذه البكتريا يمكن أن تنتج هيدروجين بكفاءة تصل إلى 15 مول/ليتر يوميًا من الجلوكوز، مما يجعلها تقنية واعدة في صناعات الطاقة النظيفة.

4-الأنزيمات المنتجة من البكتريا

تُنتج البكتريا أنزيمات هامة تُستخدم في عمليات تحويل الطاقة. على سبيل المثال، تُنتج *Bacillus subtilis*أنزيمات الأميلاز التي تساعد في تخمير السكريات لإنتاج الوقود الحيوي. كما أن هناك أنزيمات تُساعد في تقليل درجة الحرارة اللازمة لتفاعلات التحلل الحيوي، مما يعزز من كفاءة إنتاج الطاقة. أظهرت دراسة *Sundararajan et al. (2018)* أن تحسين هذه الأنزيمات باستخدام الهندسة الوراثية يمكن أن يُضاعف من كفاءة خلايا الوقود الميكروبية، مما يساهم في تسريع وتيرة التفاعلات وزيادة إنتاج الطاقة.

5-إنتاج البيوإيثانول باستخدام البكتريا

تلعب البكتريا مثل *Zymomonas mobilis*دورًا رئيسيًا في تصنيع البيوإيثانول من المخلفات النباتية. هذه البكتريا تحول السكر إلى إيثانول بفاعلية عالية، تُعد من البكتريا الأكثر استخدامًا في صناعات الوقود الحيوي على مستوى العالم. وفقًا لدراسة*Zhang et al. (2020)* ، تم تحسين استجابة *Zymomonas mobilis*لتعمل بشكل أكثر كفاءة عند استخدام الكربوهيدرات المعقدة في محطات إنتاج الوقود الحيوي.

6- لتطبيقات الصناعية الأخرى

تُستخدم البكتريا في العديد من التطبيقات الصناعية المتعلقة بإنتاج الطاقة النظيفة. على سبيل المثال، في معالجة النفايات، تلعب البكتريا دورًا حيويًا في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة مثل الميثان، فضلاً عن مساهمتها في تقليل التكاليف المرتبطة بإنتاج الطاقة من الوقود الأحفوري. يمكن للبكتريا أيضًا أن تكون جزءًا من الحلول المستدامة لإنتاج طاقة متجددة من المخلفات العضوية، مما يقلل من الحاجة إلى الوقود الأحفوري ويقلل من التأثيرات البيئية . *(Pant et al., 2010).*

10.1.2الأثر الاقتصادي والبيئي للبكتريا كمصدر للطاقة الحيوية

1- الأثر الاقتصادي

يُعد استخدام البكتريا كمصدر للطاقة الحيوية من الخيارات الواعدة لتحسين الاستدامة البيئية وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية. من الناحية الاقتصادية، يمكن أن تسهم هذه التكنولوجيا بشكل كبير في تقليل التكاليف المرتبطة بإنتاج الطاقة من الوقود الأحفوري. إذ أن المواد الخام المطلوبة لإنتاج الطاقة الحيوية من البكتريا عادة ما تكون أقل تكلفة مقارنة بالوقود الأحفوري. بالإضافة إلى ذلك، تُسهم هذه العمليات في استغلال النفايات العضوية المتراكمة في المدن والمناطق الصناعية، مما يساهم في التخلص منها بطريقة مفيدة ويقلل من آثارها السلبية على البيئة *(Rabaey & Verstraete, 2005)*.

بينت الدراسات الاقتصادية مثل دراسة *(Chakraborty et al. 2020)* أن الاستثمار في تقنيات الطاقة الحيوية المعتمدة على البكتريا يمكن أن يوفر اقتصادًا مستدامًا، حيث يُتوقع أن يتجاوز العائد من هذه التقنيات عدة مليارات من الدولارات سنويًا على مستوى العالم.

2- الأثر البيئي

تساهم البكتريا في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان. فعلى سبيل المثال، استخدام البكتريا لإنتاج الغاز الحيوي من المخلفات العضوية يساعد في تقليل انبعاثات الميثان التي تتسرب عادة إلى الغلاف الجوي من المدافن أو النفايات الزراعية. كما أن عمليات إنتاج الطاقة بواسطة البكتريا لا تُنتج مواد ضارة أو ملوثات بيئية، مما يجعلها خيارًا مثاليًا لمشروعات الطاقة المستدامة*(Cheng & Logan, 2007)*.

اكدت دراسة *(Figueiredo et al. 2019)* أن استخدام البكتريا في أنظمة إنتاج الطاقة الحيوية يمكن أن يُسهم بشكل كبير في الحد من تأثيرات التغير المناخي من خلال تقليل الانبعاثات الضارة وتحويل النفايات إلى طاقة نظيفة. من خلال هذه التطبيقات المتنوعة، تساهم البكتريا بشكل كبير في توفير حلول طاقة متجددة ومستدامة، مما يعزز من التنمية الاقتصادية المستدامة ويُسهم في الحفاظ على البيئة.

11.1.2المقارنة بين إنتاج الطاقة الحيوية باستخدام البكتريا والمصادر الاخرى

يُعد إنتاج الطاقة الحيوية باستخدام البكتريا أحد الحلول الواعدة مقارنةً بمصادر الطاقة التقليدية والبديلة الأخرى. عند إجراء مقارنة بين هذه الطريقة وتكنولوجيا الطاقة الحيوية الأخرى مثل إنتاج الإيثانول من النباتات أو استخدام الوقود الحيوي المستخرج من الزيوت النباتية، نجد أن هناك العديد من الفروق من حيث الكفاءة، الاستدامة، التكلفة، والآثار البيئية (*Yuan et al., 2011*).

أولًا، في إنتاج الطاقة باستخدام البكتريا، تُعد الكفاءة البيولوجية لهذه الكائنات الدقيقة عالية جدًا. بكتريا مثل *Geobacter sulfurreducens* و *Methanobacterium*يمكنها تحويل النفايات العضوية مباشرة إلى طاقة قابلة للاستخدام مثل الميثان أو الهيدروجين أو الكهرباء بشكل أكثر فعالية من أنظمة التحلل الحيوي التقليدية التي تعتمد على العوامل الكيميائية والحرارية. وقد بينت دراسة (*Dai et al. 2020*)أن خلايا الوقود الميكروبية التي تستخدم بكتريا Geobacter يمكن أن تحقق كفاءة إنتاج طاقة تصل إلى 50٪ من طاقتها القصوى، وهو معدل أعلى بكثير مقارنةً بالطاقة الناتجة عن الوقود الحيوي التقليدي.

ثانيًا، من حيث الاستدامة، يتمتع إنتاج الطاقة الحيوية باستخدام البكتريا بميزة واضحة على الطاقة التقليدية المستخلصة من الوقود الأحفوري. اذن البكتريا قادرة على التعامل مع النفايات العضوية من صناعات مختلفة مثل الزراعة، الصناعات الغذائية، أو حتى النفايات البلدية، وتحويلها إلى طاقة دون التأثير الكبير على البيئة. على عكس ذلك، يعتمد إنتاج الوقود الأحفوري على استخراج واستخدام مصادر غير متجددة مثل الفحم والنفط، مما يؤدي إلى تلوث البيئة والانبعاثات الضارة. وفقًا لدراسة (*Kumar et al. (2019*، أظهرت النتائج أن استخدام البكتريا في إنتاج الطاقة يقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون مقارنةً باستخدام الوقود الأحفوري بنسبة تصل إلى 60.%

من ناحية التكلفة، يتطلب إنتاج الطاقة باستخدام البكتريا استثمارات أقل من الطرق التقليدية، خاصة في حال استخدام البكتريا في معالجة النفايات العضوية المتاحة بكثرة. على سبيل المثال، يمكن استخدام النفايات الزراعية أو مخلفات الطعام في عمليات التخمير أو التحلل الحيوي لإنتاج الغاز الحيوي، مما يقلل من التكلفة الإجمالية للإنتاج. وقد أظهرت دراسة (*Zhao et al. (2020*أن تكلفة إنتاج الغاز

الحيوي باستخدام البكتريا قد تكون أقل بنسبة 25-30% مقارنة بتقنيات الطاقة المتجددة الأخرى مثل الألواح الشمسية أو الرياح.

أما من حيث الآثار البيئية، يُظهر استخدام البكتريا لإنتاج الطاقة فوائد بيئية عظيمة. فهي تعمل على تقليل النفايات، وتحول المواد العضوية التي لا قيمة لها إلى مصادر طاقة، مما يقلل من التلوث الناجم عن تراكم النفايات في البيئة. بالمقابل، يُنتج الوقود الحيوي من المواد النباتية مثل الذرة وفول الصويا يمكن أن يُسهم في زيادة الضغط على البيئة الزراعية، ويؤدي إلى الاستخدام المكثف للأراضي والمياه. بشكل عام، يُعد إنتاج الطاقة باستخدام البكتريا خيارًا أكثر استدامة من العديد من البدائل الأخرى المتاحة حاليًا، مما يفتح المجال لتطوير المزيد من التقنيات المتقدمة في المستقبل(*Service, 2009*) .

12. 1.2 الاستراتيجيات لتوسيع نطاق إنتاج الطاقة الحيوية باستخدام البكتريا

في سبيل توسيع نطاق استخدام البكتريا في إنتاج الطاقة الحيوية، هناك مجموعة من الاستراتيجيات العلمية والتكنولوجية التي يمكن تبنيها لزيادة الكفاءة وتحقيق إنتاج طاقة مستدام. أولى هذه الاستراتيجيات هي تحسين السلالات البكتيرية عبر الهندسة الوراثية، وهي تقنية تتمثل في تعديل الجينوم البكتيري لتعزيز قدرتها على التحلل الحيوي أو التخمير بشكل أكثر كفاءة. على سبيل المثال، من خلال تعديل الجينوم للأنواع مثل ***Clostridium butyricum*** و***Geobacter sulfurreducens***، يمكن زيادة إنتاج الهيدروجين أو الغاز الحيوي. تشير دراسة ***Zhang et al. (2021)*** إلى أن الهندسة الوراثية لهذه السلالات أظهرت تحسنًا كبيرًا في إنتاج الطاقة بنسبة تصل إلى 40.%

من خلال تحسين الظروف البيئية في مفاعلات الطاقة الحيوية، يمكن تحسين الأداء العام للبكتريا. تُعد هذه الاستراتيجية واحدة من الطرق الأكثر فعالية لتحسين إنتاج الطاقة، حيث أن العوامل مثل درجة الحرارة، الأس الهيدروجيني، وتركيز المواد العضوية تؤثر بشكل كبير على كفاءة البكتريا في إنتاج الطاقة. وأثبتت دراسة ***Park et al. (2018)*** أن تحسين هذه العوامل في مفاعلات الهيدروجين الميكروبية يمكن أن يزيد الإنتاج بمقدار 50% مقارنةً بالحالات التقليدية.

بالإضافة إلى ذلك، فان التوسع في ان استخدام النفايات العضوية كمصدر للطاقة يُعد من الاستراتيجيات المستقبلية الهامة. حيث يمكن استخدام النفايات الزراعية، المخلفات الغذائية، وحتى مياه الصرف الصحي لتغذية مفاعلات البكتريا، مما يسهم في تقليل التكاليف وزيادة

الفعالية. وأكدت دراسة *Jiang et al. (2020)* أن استخدام هذه النفايات يُقلل من تكاليف الإنتاج بشكل كبير ويعزز من الاستدامة البيئية.

استراتيجية أخرى هي تحسين التكامل بين البكتريا وطرق الطاقة المتجددة الأخرى مثل الطاقة الشمسية والرياح. يمكن دمج خلايا الوقود الميكروبية مع أنظمة الطاقة الشمسية لإنتاج كهرباء أكثر استقرارًا وكفاءة، وهو ما يتطلب تقنيات متطورة لزيادة التفاعل بين المكونات البيولوجية والتكنولوجية. أظهرت دراسة *Zhao et al. (2022)* أن دمج الطاقة الشمسية مع خلايا الوقود الميكروبية زاد من الإنتاج بنسبة 30% مقارنةً بالاستخدام الأحادي للطاقة الشمسية.

13.1.2 الهندسة الوراثية ودورها في تحسين إنتاج الطاقة

تلعب الهندسة الوراثية دورًا محوريًا في تحسين إنتاج الطاقة الحيوية باستخدام البكتريا، حيث تتيح تعديل جينوم الكائنات الدقيقة لزيادة كفاءتها في تحويل المواد العضوية إلى طاقة. تُعد هذه التكنولوجيا من الأدوات الأساسية التي تمكن الباحثين من تطوير سلالات بكتيرية أكثر قدرة وفاعلية في إنتاج الغاز الحيوي، الميثان، الهيدروجين، أو حتى الكهرباء.

إحدى التطبيقات الرئيسية للهندسة الوراثية في هذا المجال هي تحسين قدرة البكتريا على تحلل المواد العضوية. البكتريا الطبيعية مثل *Clostridium butyricum* و*Geobacter sulfurreducens* تعمل على تحويل الكربوهيدرات والأحماض العضوية إلى طاقة، ولكن عبر الهندسة الوراثية، يمكن تعزيز هذه القدرة بشكل كبير. على سبيل المثال، تم تعديل سلالات *Geobacter sulfurreducens* لزيادة قدرتها على نقل الإلكترونات إلى الأقطاب الكهربائية في خلايا الوقود الميكروبية، مما يعزز من قدرة هذه البكتريا على إنتاج الكهرباء بكفاءة أعلى. كما أظهرت دراسة Liu et al. (2020) أن التعديل الوراثي لهذه البكتريا أدى إلى زيادة قدرة إنتاج الكهرباء بنسبة 35% مقارنة بالأنواع الطبيعية.

وضح *Wang et al. (2019)* أن سلالات Geobacter المعدلة وراثيًا أظهرت تحسنًا كبيرًا في قدرة تخزين الكهرباء، مما جعلها أكثر فاعلية في المفاعلات التي تُستخدم لتوليد الكهرباء من المواد العضوية.

علاوة على ذلك، يُمكن للهندسة الوراثية زيادة مقاومة البكتريا للظروف البيئية القاسية مثل درجات الحرارة العالية أو المستويات المنخفضة للأوكسجين. هذا يُمكّن البكتريا من العمل في بيئات متنوعة تشمل النفايات الصناعية أو المخلفات الزراعية التي تحتوي على مركبات سامة قد تؤثر على سلالات البكتريا التقليدية. أظهرت دراسة *Chen et al. (2019)* أن البكتريا المعدلة وراثيًا يمكنها تحمّل ظروف حموضة مرتفعة في عملية إنتاج الميثان، مما يعزز من استدامة عمليات إنتاج الطاقة.

بيّنَ *Zhang et al. (2020)* أن التعديل الوراثي للبكتريا مثل *Methanosaeta* أظهر مقاومة كبيرة للمواد السامة الموجودة في النفايات الصناعية، مما جعل هذه البكتريا أكثر قدرة على تحسين إنتاج الميثان في بيئات غير مستقرة.

تساعد الهندسة الوراثية في تحسين فعالية الإنتاج البيولوجي للهيدروجين من خلال البكتريا. تم تعديل أنواع من البكتريا مثل *Rhodobacter sphaeroides* لزيادة قدرتها على إنتاج الهيدروجين في بيئات لا هوائية، ما يجعلها مناسبة للاستخدام في مفاعلات لإنتاج الهيدروجين بأعلى كفاءة. وأكدت دراسة *Wang et al. (2021)* أن هذه التعديلات يمكن أن تزيد من معدل إنتاج الهيدروجين حتى خمس مرات مقارنةً بالبكتريا الطبيعية.

في إطار البحث في طرق جديدة لإنتاج الطاقة البيولوجية، يُساهم تعديل الجينات المتعلقة بإنتاج الإنزيمات في تسريع وتحسين عملية التحلل الحيوي. يمكن للبكتريا المعدلة أن تنتج إنزيمات متخصصة لتحطيم السكريات المعقدة أو الألياف النباتية، مما يؤدي إلى إنتاج مزيد من الوقود الحيوي بكفاءة أعلى. على سبيل المثال، سلالة *Bacillus subtilis* المعدلة وراثيًا يمكن أن تنتج إنزيمات تؤدي إلى تحلل السكريات والنشويات في المواد العضوية بشكل أسرع، ما يزيد من سرعة إنتاج الإيثانول. أشادت دراسات مثل *Jia et al. (2020)* إلى أن هذه السلالات المعدلة تستطيع إنتاج كميات أكبر من الإيثانول مقارنة بالأنواع غير المعدلة.

إحدى التحديات التي تواجه استخدام الهندسة الوراثية في هذا المجال هي التوازن بين زيادة الإنتاجية والحفاظ على استقرار السلالات المعدلة. حيث أن التعديلات الجينية قد تؤدي في بعض الأحيان إلى تغيير في خصائص البكتريا الأخرى مثل قدرتها على التكاثر أو تحمل الظروف البيئية، مما قد يؤثر على استدامة العمليات الصناعية. ومع ذلك، فإن تطور تقنيات

التعديل الجيني الدقيق مثل CRISPR-Cas9 قد عزز من القدرة على إجراء تعديلات دقيقة وأكثر استقرارًا .من خلال تعزيز تفاعل البكتريا مع المواد العضوية باستخدام الهندسة الوراثية، يمكن تحقيق تحسينات كبيرة في إنتاج الطاقة الحيوية من خلال هذه الكائنات الدقيقة. ولكن هناك حاجة إلى مزيد من الأبحاث في هذا المجال لضمان أن التعديلات الوراثية لا تؤدي إلى تأثيرات غير مرغوب فيها على البيئة أو الاقتصاد.

14.1.2 تحليل تأثير البكتريا في استخدام الطاقة

البكتريا في إنتاج الطاقة الحيوية لا تقتصر فقط على تقديم حلول بديلة للطاقة، بل تؤثر أيضًا على طريقة استخدام الطاقة في مختلف المجالات. يمتد تأثير هذه الكائنات الدقيقة ليشمل التأثيرات على البيئة، حيث تقدم حلولًا تقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري وتساهم في تقليل انبعاثات الكربون الضارة.

تُعد البكتريا المستخدمة في خلايا الوقود الميكروبية (MFCs) مثالًا حيًا على كيف يمكن للبكتريا أن تُحدث تأثيرًا في كيفية استخدام الطاقة. هذه التقنية تستخدم البكتريا لتحويل الطاقة الكيميائية المخزنة في المواد العضوية إلى طاقة كهربائية. اوضحت دراسة ***Zhao et al. (2022)***أوضحت أن خلايا الوقود الميكروبية يمكنها توفير كهرباء مستقرة تُستخدم في تطبيقات صغيرة مثل إضاءة المناطق النائية أو تشغيل أجهزة صغيرة. كما أظهرت البكتريا المنتجة للميثان مثل **Methanosarcina** أن بإمكانها استخدام المواد العضوية المتجددة لتوليد غازات يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية وكهربائية، ما يوفر مصدر طاقة مستدام دون التأثير على البيئة.في المجال الزراعي، يُعد دور البكتريا في إنتاج الطاقة الحيوية من النفايات الزراعية إحدى النقاط التي يمكن أن تحدث تحولًا كبيرًا في طريقة استهلاك الطاقة في هذا المجال. يمكن استخدام بقايا المحاصيل مثل قش الأرز، أو السماد العضوي كمصادر طاقة حيوية، وتحويلها بواسطة البكتريا إلى غازات حيوية مثل الميثان. هذا يمكن أن يقلل من المواد المفقودة في المحاصيل الزراعية ويحولها إلى مصدر مستدام للطاقة .من الناحية البيئية، تُظهر الدراسات أن استخدام البكتريا في إنتاج الطاقة يساهم بشكل ملحوظ في تقليل التلوث البيئي. عندما يتم استخدام المواد العضوية المتجددة في عمليات التخمير أو التحلل الحيوي، تساهم البكتريا في تقليل الغازات المسببة للاحتباس الحراري مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان، والتي تعد من الغازات الرئيسية المسببة لتغير المناخ. اوضحت دراسة ***Xu et al. (2021)***أن استخدام الطاقة الحيوية المنتجة عبر البكتريا يمكن أن يقلل انبعاثات الكربون بنحو 50% مقارنة بالوقود الأحفوري.

15.1. 2 الدمج بين البكتريا ومصادر الطاقة المتجددة الأخرى

مع تزايد الاهتمام بمصادر الطاقة المتجددة، فإن التكامل بين البكتريا والطاقة الشمسية أو الرياح يُعد خطوة مهمة في تحسين كفاءة إنتاج الطاقة المستدامة. يُمكن دمج خلايا الوقود الميكروبية (MFCs) مع أنظمة الطاقة الشمسية أو الرياح لتوليد كهرباء بشكل مستمر وفعال.

أظهرت دراسة *Liu et al. (2019)* أن دمج الخلايا الميكروبية مع الطاقة الشمسية يزيد من فعالية إنتاج الكهرباء ويقلل من الاعتماد على الشبكات الكهربائية التقليدية. بالإضافة إلى ذلك، يمكن تخزين الطاقة الناتجة عن مفاعلات البكتريا لاستخدامها في أوقات غياب الشمس أو الرياح، مما يسهم في تحقيق استقرار في إمدادات الطاقة .من خلال دمج البكتريا مع مصادر الطاقة المتجددة الأخرى، يمكن تحقيق توازن بيئي وتقليل تكاليف الإنتاج في نفس الوقت. هذا المج يُعتبر خطوة مهمة نحو طاقة مستدامة واقتصاد بيئي قادر على تلبية احتياجات الطاقة في المستقبل.

16.1.2الجانب الأخلاقي والقانوني لاستخدام البكتريا في إنتاج الطاقة

تعد القضايا الأخلاقية والقانونية المتعلقة باستخدام البكتريا في إنتاج الطاقة الحيوية من القضايا المهمة التي يجب التعامل معها بحذر. هذه القضايا تتعلق بالعديد من الجوانب مثل الامن البيولوجي، حقوق الملكية الفكرية، التأثيرات البيئية، والتنظيمات الحكومية.

من الناحية الأخلاقية، يثير استخدام الهندسة الوراثية للبكتريا بعض المخاوف بشأن التعديل الجيني. تعد التعديلات الجينية على الكائنات الحية في مجال الطاقة الحيوية خطوة جريئة تهدف إلى تحسين إنتاج الطاقة. ومع ذلك، يتساءل البعض عن تأثير هذه التعديلات على البيئة والصحة العامة إذا ما تسربت هذه الكائنات المعدلة إلى الطبيعة. على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي التسرب غير المتعمد للبكتريا المعدلة وراثيًا في البيئات الطبيعية إلى تغيير النظام البيئي بشكل غير مرغوب فيه. كما أن هناك مخاوف من استخدام البكتريا في بيئات مختبرية أو في مفاعلات مفتوحة قد تؤدي إلى تلوث غير متوقع أو تأثيرات سلبية على التنوع البيولوجي. لذا، تُعد قوانين الامن البيولوجي من الضروريات التي يجب أن تصاحب هذه التقنية.

أما من الناحية القانونية، تتنوع التشـريعات المتعلقة باسـتخدام البكتريا المعدلة وراثيًا في إنتاج الطاقة حسـب البلدان. في بعض الدول، هناك تشـريعات صـارمة تتعلق بكيفية التعامل مع الكائنات المعدلة وراثيًا، بما في ذلك متطلبات الحصـول على تصـاريح خاصـة لاسـتخدامها في إنتاج الطاقة. على سـبيل المثال، في الاتحاد الأوروبي، تُعد اللائحة الأوروبية بشـأن المنتجات المعدلة وراثيًا (Regulation (EC) No 1829/2003)من أكثر التشريعات صرامة في العالم. وهذه اللائحة تشمل قواعد صـارمة تتعلق بسلامة البيئة والصحة العامة وتفرض شروطًا دقيقة لإجراء الأبحاث والتجارب .من جانب آخر، في الولايات المتحدة، قد تكون قوانين اسـتخدام البكتريا في إنتاج الطاقة الحيوية أكثر مرونة مقارنة بـالاتحـاد الأوروبي. ومع ذلـك، فـإن هيئـة الأغـذيـة والأدويـة الأمريكيـة (Food and Drug Administration)ووكالة حماية البيئة (Environmental Protection Agency) تراقب عن كثب استخدام الكائنات الحية المعدلة وراثيًا وتضع إرشادات للتأكد من سلامة التقنيات الجديدة في هذا المجال. ومن الضـروري أيضًـا مراعاة حقوق الملكية الفكرية المرتبطة بتكنولوجيا البكتريا المعدلة وراثيًا. إذ يمكن أن تكون براءات الاختراع المتعلقة بالتراكيب الجينية أو عمليات الإنتاج هي موضـوعًا مثيرًا للجدل، خاصـة إذا تم اسـتخدامها بطريقة تعيق الوصـول المفتوح للمعرفة العلمية أو تؤثر على القدرة التنافسية في الأسواق العالمية.

التأثيرات البيئية:

البكتريا المعدلة وراثيًا المسـتخدمة في إنتاج الطاقة قد تواجه قضـايا قانونية تتعلق بإطلاقها في البيئة. على الرغم من أن هذه البكتريا تُعد آمنة في بيئات مغلقة تحت مراقبة صـارمة، إلا أن التسـرب غير المقصـود قد يتسـبب في تغيير البيئة المحلية أو التأثير على التنوع البيولوجي. وقد تناولت دراسـة *(Citi ,2019)*قضايا تتعلق بإطلاق هذه الكائنات في البيئة، مؤكدة على ضرورة وضع أنظمة قانونية تسمح بمراقبة دقيقة لضمان عدم تسربها إلى الأماكن غير المرخصة.

الحلول التنظيمية:

لحل هذه القضـايا الأخلاقية والقانونية، يمكن تكثيف العمل على وضـع أنظمة تنظيمية محكمة تضـمن استخدام البكتريا في إنتاج الطاقة بشكل آمن. يمكن أن تشمل هذه الأنظمة فرض قيود على مكان وزمان استخدام الكائنات المعدلة وراثيًا، بالإضافة إلى وضع متطلبات على الشهادات البيئية التي تضمن سلامة هذه الكائنات قبل اسـتخدامها في العمليات الصـناعية. وكذلك، من المهم تطوير آليات قانونية تضـمن

مشــاركة المعرفة والتقنيات المتعلقة بالبكتريا في مجال الطاقة بشـكل عادل، بحيث لا يتم حصـر الفوائد الاقتصادية في أيدٍ قليلة.

الفصل الثالث

منهجية البحث والنتائج

Research Methodology and Results

3.1 مقدمة الفصل

يتناول هذا الفصل أهم الاستنتاجات التي تم استخلاصها من البحث حول دور البكتيريا في إنتاج الطاقة الحيوية، مع التركيز على كفاءة الطرق المختلفة المستخدمة في البحث والتحليل. كما سيتم استعراض كيفية جمع المعلومات واعتماد المصادر العلمية، بالإضافة إلى مقارنة الأساليب البحثية المختلفة لمعرفة أيها كان الأكثر فعالية.

3.2 جمع المعلومات في البحث

نظرًا للطبيعة النظرية للبحث، تم جمع المعلومات من مصادر أكاديمية متنوعة، والتي تشمل :

- الأوراق البحثية المنشورة: تم الاعتماد على دراسات موثوقة نُشرت في المجلات العلمية المحكمة التي تناولت موضوع إنتاج الطاقة الحيوية بالبكتيريا .
- المراجعات النظرية: تحليل الكتب والمقالات العلمية التي تتناول أحدث التطورات في مجال الهندسة الوراثية والطاقة البيولوجية .
- المقارنات البحثية: دراسة المقارنات بين التقنيات المختلفة المستخدمة في إنتاج الطاقة الحيوية، مثل التحلل اللاهوائي وخلايا الوقود الميكروبية .

3.3 الاستنتاجات العامة

- يُعد استخدام البكتيريا في إنتاج الطاقة الحيوية من الحلول الواعدة لمستقبل الطاقة المستدامة، حيث توفر هذه الكائنات الدقيقة آليات فعالة لتحويل النفايات العضوية إلى وقود نظيف .
- كشفت الدراسات التي تم مراجعتها أن التحلل اللاهوائي يُعد من أكثر الطرق شيوعًا في إنتاج البيو غاز، لكنه يواجه تحديات تتعلق بالكفاءة والظروف البيئية .
- خلايا الوقود الميكروبية (MFCs) تُظهر إمكانيات واعدة في تحويل المواد العضوية إلى كهرباء، لكنها لا تزال بحاجة إلى تحسينات لزيادة كفاءتها على نطاق واسع .
- الهندسة الوراثية تمثل أداة قوية لتعزيز قدرات البكتيريا، حيث يمكن تعديل السلالات لزيادة إنتاجيتها وتكيفها مع الظروف المختلفة، مما يفتح آفاقًا جديدة للتطبيقات المستقبلية في هذا المجال .

3. 4أفضل طريقة بحثية في مجال الطاقة الحيوية

◆الجمع بين التحليل المقارن والمراجعة المنهجية كان أكثر الطرق فعالية في فهم إمكانات البكتيريا، حيث سمح بتقييم مزايا وعيوب كل تقنية بشكل واضح .

◆تحليل الدراسات الحديثة قدم رؤية متكاملة حول التطورات الجديدة، وساعد في استنتاج الاتجاهات المستقبلية في البحث العلمي .

◆الاعتماد على مصادر متنوعة ساهم في تحقيق توازن بين النظريات العلمية والتطبيقات العملية، مما أعطى البحث عمقًا أكبر .

المصادر

1. **Angelidaki, I. (2018).**
   Anaerobic bacteria in biogas production systems. *Biotechnology Advances*.
2. **Appels, L. (2008).**
   Microbial fuel cells: Promising technology for sustainable energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 1006–1030.
3. **BP Statistical Review. (2021).**
   Statistical Review of World Energy 2021. BP p.l.c. Retrieved from https://www.bp.com
4. **Cheng, S., & Liu, H. (2020).**
   Microbial electrolysis cells: A new type of biological hydrogen production system. *Environmental Science & Technology*, **43**(6), 2068–2073.
5. **Chisti, Y. (2007).**
   Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, **25**, 294–306.
6. **Demirbas, A. (2009).**
   Biofuels: Securing the planet's future energy needs. Springer. ISBN: 9781848820111.
7. **Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011).**
   Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction (2nd ed.). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
8. **Falkowski, P. (2008).**
   The power of plankton. *Nature*, **483**, S17–S20.
9. **Gielen, D. (2010).**
   The role of electricity in the energy transition. *International Renewable Energy Agency (IRENA)*.

10. **Global Wind Energy Council. (2021).**
Global Wind Report 2021. Retrieved from https://gwec.net
11. **International Energy Agency (IEA). (2020).**
World Energy Outlook 2020. Paris: IEA.
12. **International Energy Agency (IEA). (2021).**
World Energy Outlook 2021. Paris: IEA.
13. **International Energy Agency (IEA). (2022).**
World Energy Outlook 2022. Paris: IEA.
14. **Kamraju, V. (2023).**
Harnessing wind energy for clean electricity production. *Energy Procedia*, **157**, 1245–1252.
15. **Kern, M. (2020).**
Hydrogen production by photosynthetic bacteria. *Bioresource Technology*, **101**, 2044–2050.
16. **Kiani, B. (2020).**
Strategies for transitioning to renewable energy systems. *Energy Reports*, **6**, 434–445.
17. **Kostić, M. M. (2018).**
Sustainable energy – The future of humanity. *Thermal Science*, **22**, 391–408.
18. **Li, Y. (2021).**
Biohydrogen production from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, **102**, 8437–8444.
19. **Lior, N. (2010).**
Energy resources and use: The present situation and possible paths to the future. *Energy*, **35**(6), 2631–2638.
20. **Logan, B. E. (2008).**
Microbial Fuel Cells. John Wiley & Sons. ISBN: 9780470032171.

21. **Logan, B. E., & Rabaey, K. (2020).**
Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. *Science*, **337**(6095), 686–690.

22. **Lovley, D. R. (2006).**
Bug juice: Harvesting electricity with microorganisms. *Nature Reviews Microbiology*, **4**, 497–508.

23. **McKinlay, J. B., & Harwood, C. S. (2010).**
Photobiological production of hydrogen gas as a biofuel. *Current Opinion in Biotechnology*, **21**, 244–251.

24. **Rittmann, B. E. (2012).**
Energy from waste: The role of microbial communities. *Nature Reviews Microbiology*, **10**, 271–281.

25. **Smil, V. (2017).**
Energy and Civilization: A History. MIT Press. ISBN: 9780262035774.

26. **Sovacool, B. K. (2020).**
The political economy of energy transitions. *Energy Policy*, **57**, 1–6.

27. **Stevens, P. (2000).**
The role of energy in national security strategies. *Journal of Energy Security*, **4**, 9–13.

28. **Thauer, R. K. (2008).**
Methanogenic archaea: Ecologically relevant differences in energy conservation. *Nature Reviews Microbiology*, **6**, 579–591.

29. **World Nuclear Association. (2021).**
World Nuclear Performance Report 2021. Retrieved from https://www.world-nuclear.org

30. **Wu, X. (2020).**
Improving hydrogen production by microbial fermentation: a review. *Bioresource Technology*, **101**(5), 1350–1360.

31. **Zhang, Y. (2014).**
Bioelectrochemical systems for energy recovery from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **30**, 286–296.
32. **Zhang, Y. (2020).**
Biogas production from agricultural residues. *Biomass and Bioenergy*, **138**, 105606.
33. **Zhang, Y. (2021).**
Enhancement of bioenergy production via genetic engineering of bacteria. *Biotechnology Advances*, **47**, 107695.

Abstract

In light of the environmental and economic challenges resulting from excessive reliance on fossil fuels, the need has emerged to develop alternative and sustainable energy sources. The use of bacteria in bioenergy production represents one of the promising solutions for generating clean energy by converting organic waste into usable gases such as methane and hydrogen, or into electricity through technologies such as microbial fuel cells (MFCs).

Certain bacterial species, such as ***Geobacter sulfurreducens*** and ***Shewanella oneidensis***, have demonstrated high efficiency in electron transfer and the direct generation of electrical current from organic substrates. Additionally, autotrophic bacteria like ***Rhodopseudomonas palustris*** are of particular interest due to their ability to absorb light and convert solar energy into hydrogen without the need for oxygen, making them suitable for agricultural and industrial environments.

Bacterial energy production relies on various biological mechanisms, including anaerobic degradation, biological fermentation, and electrochemical electron transfer. Advances in genetic engineering have further enabled the enhancement of bacterial performance through gene modification aimed at improving energy yield and environmental adaptability. Despite the significant advantages of these technologies, challenges remain concerning production costs, energy conversion efficiency, and operational control.

Utilizing bacteria for bioenergy production contributes to reducing greenhouse gas emissions, recycling organic waste, and alleviating pressure on conventional energy sources—benefits that are especially relevant to developing countries. Given the unique capabilities of these microorganisms, the development of bacterial bioenergy technology constitutes a strategic step toward a more sustainable and cost-effective energy future.

Ministry of Higher Education and Scientific Research

University Of Misan / College Of Science
Department Of Biology

search submitted to Department of biology/College of Science / University of Misan, which is part of the requirements for obtaining a Bachelor's degree in Science / Department of biology

Bacteria in Bioenergy Production

submitted by

Sajjad Mohammed Kazem

Supervised by

Professor Dr. Zahid Saadoun Aziz

2025