الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية التكنولوجيا

مذكرة تخرج لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

ميدان: العلوم والتكنولوجيا

شعبة: هندسة الطرائق

تخصص: هندسة كيميائية

من إعداد الطلبة:

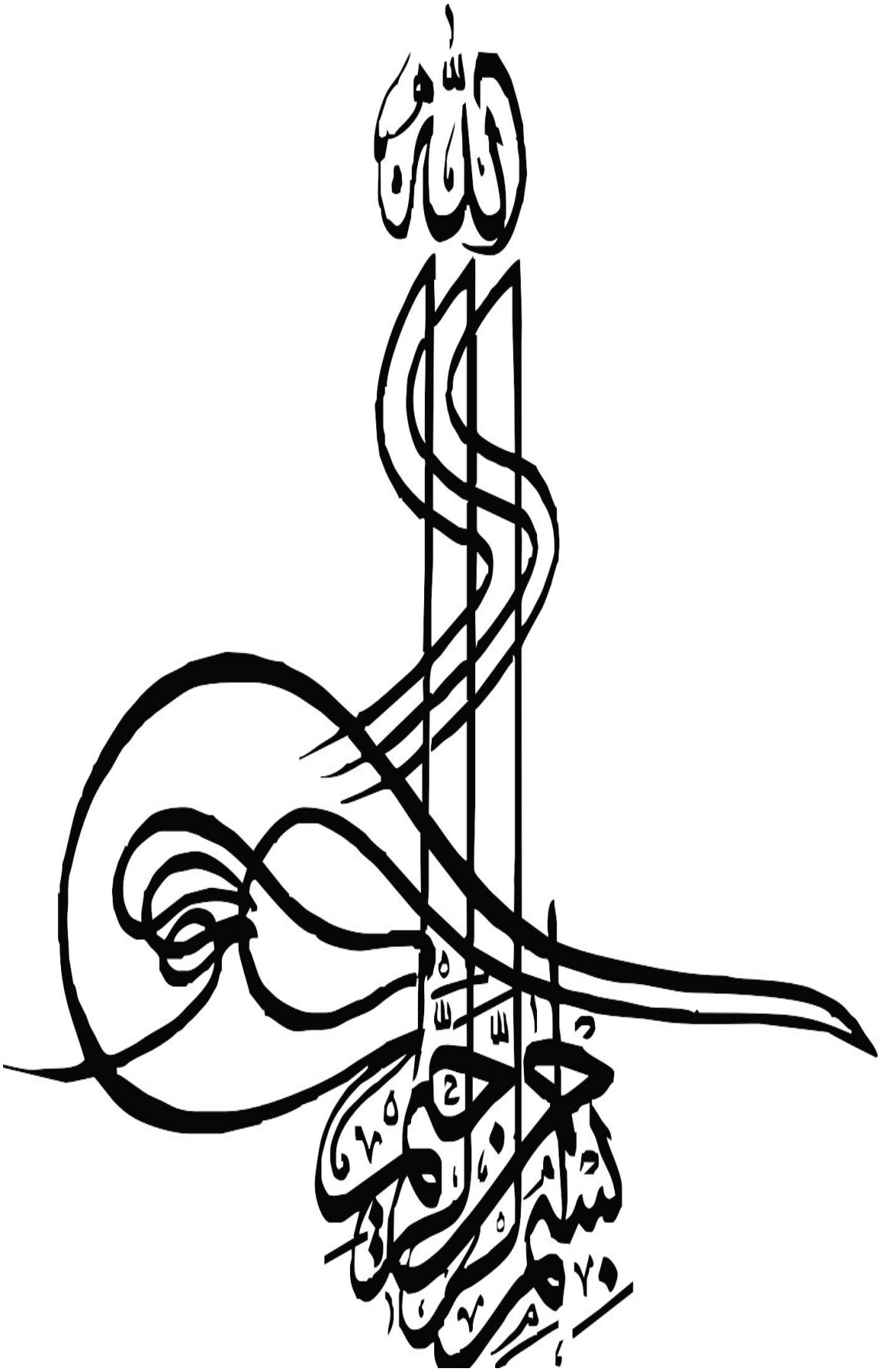
- سعيد عفاف
- قدوري مارية
- عبد القوي شهرزاد

إنتاج البيوميثان من الكتلة الحيوية

نوقشت يوم: 13/06/2022

الإسم واللقب	الجامعة	الصفة
احمودة كوثر	الوادي	رئيسا
رواحنة نور الدين	الوادي	مناقشا
محمد الطيب وصيف خالد	الوادي	مؤطرا

الموسم الجامعي: 2021-2022


الله
بسم الله الرحمن الرحيم

إهداء

الحمد للّه رب العالمين والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء والمرسلين

إلى من ربتني وأنارت دربي وأعانتني بالصلوات والدعاء إلى أغلى الناس

"أمي الحبيبة"

إلى من كان منبع العزة والقوة وعلمني أن العلم تاج الكرامة وحلة الأخلاق

"أبي الكريم"

إلى من قاسموني حلو الحياة ومرها

"اخواتي وأخي وعمي وعمتي"

إلى أساتذتي الكرام

إلى كل الزملاء والأصحاب

إلى كل طالب علم

أهدي إليكم هذا العمل

سعيد عفاف

rawpixel

الإهداء

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء والمرسلين

إلى من ربتني وأنارت دربي وأعانتني بالصلوات والدعاء إلى أغلى الناس

"أمي الحبيبة"

إلى من كان منبع العزة والقوة وعلمني أن العلم تاج الكرامة وحلة الأخلاق

"أبي الكريم"

إلى من قاسموني حلو الحياة ومرها

"إخوتي وأخواتي"

وإلى قرة عيني

"زوجي الحبيب"

إلى أساتذتي الكرام

إلى كل الزملاء والأصحاب

إلى كل طالب علم

أهدي إليكم هذا العمل

قدوري مارية

لاهداء

الحمد للّه رب العالمين والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء والمرسلين

الى روحي الغالية وأنارت دربي

"أمي الحبيبة"

إلى من كان منبع العزة والقوة وعلمني أن العلم تاج الكرامة وحلة الأخلاق

"أبي الكريم"

إلى من قاسموني حلو الحياة ومرها

"إخوتي وأخواتي"

وإلى قرة عيني

"زوجي الحبيب"

إلى أساتذتي الكرام

إلى كل الزملاء والأصحاب

إلى كل طالب علم

أهدي إليكم هذا العمل

عبد القوي شهرزاد

شكر وعرفان

يارب لك الحمد كما ينبغي لجلال وجهك وعظيم سلطانك في البداية نشكر ونحمد اللّه عزّ وجل الذي وفقنا لإتمام هذا العمل المتواضع.

ونتقدم بجزيل الشكر والامتنان الكبير إلى الدكتور

"محمد الطيب وصيف خالد"

على قبوله الإشراف على هذه المذكرة، وكل ما قدمه لنا طيلة فترة إعدادها من توجيهات ونصائح قيمة

كما نتقدم بالشكر للأساتذة أعضاء لجنة المناقشة لقبولهم مناقشة هذه المذكرة

كما لا يفوتنا أن نشكر كل الأساتذة الذين تكونا على أيديهم

وأخيرا نتقدم بالشكر لكافة الزملاء الذين مدوا لنا يد العون والمساعدة ولو بالسؤال عن مصير هذه المذكرة.

«واللّه ولي التوفيق»

rawpixel

فهرس المحتويات

فهرس المحتويات

المحتويات	الصفحة
اهداء	-
شكر وعرفان	-
فهرس المحتويات	II
قائمة الاشكال والجداول	
المقدمة العامة	2
الفصل الأول: الوقود الحيوي	
المقدمة	4
I.1 . مفهوم الوقود الحيوي	4
I.2. أنواع الوقود الحيوي	5
I .1.2. من حيث المصدر	5
I.2.2. من حيث النوع	5
I.3. انتاج الوقود الحيوي	8
I .1.3.تعريف الكتلة الحيوية	9
I.2.3. أنواع الكتلة الحيوية	9
I.3.3. موارد الكتلة الحيوية	10
I.4.3. خصائص الكتلة الحيوية	11
I.4. أجيال الوقود الحيوي	12
I.1.4. الجيل الأول	12
I.2.4. الجيل الثاني	12
I.3.4. الجيل الثالث	12
I.5. طرق انتاج الوقود الحيوي (العمليات)	13

I.1.5. الطريقة أولي كيميائية (voie oléochimique)	13
I. 2.5.العملية الجافة أو الحرارية الكيميائية(La voie sèche ou thermochimique)	14
I.3.5. العملية الرطبة أو البيولوجية(La voie humide ou biologique)	14
I.6. مزايا وعيوب الوقود الحيوي	14
I.6.1. المزايا	15
I.6.2. العيوب	15
I.7. الاتجاهات العالمية لإنتاج الوقود الحيوي	16
I.7.1. دوافع الاتجاه العالمي نحو انتاج الوقود الحيوي	16
I.7.2. الدول المنتجة للوقود الحيوي:	17
I.7.3. دخول الدول الإفريقية لصناعة الوقود الحيوي:	19
I.7.4. موقع الجزائر من خارطة الوقود الحيوي:	20
قائمة المراجع	21
الفصل الثاني : الغاز الحيوي (البيوميثان)	
المقدمة	25
II .1. تعريف الغاز الحيوي	25
II .1.1. مكونات الغاز الحيوي	25
II .1.2. مصادر الغاز الحيوي	27
II .2. المكونات الأساسية للكتلة الحيوية	30
II .2.1. المكونات الجزيئية Lignocellulosic	31
II .3. إنتاج الغاز الحيوي	32
II .3.1. الهضم الهوائي	33
II .3.2. الهضم اللاهوائي	33
II .3.3. المراحل البيوكيميائية للمعالجة بالميثان	33
II .3.4. الكيمياء الفيزيائية للهضم اللاهوائي	35

II .4. الهاضم اللاهوائي	37
II .1.4. نوع الركائز	40
II .5. آلية العمل ضمن الهاضم اللاهوائي	41
II .6. تقنيات تنقية الغاز الحيوي	41
II .1.6.جودة الغاز الحيوي	43
II .7. استخدامات الغاز الحيوي	44
II .8. مكانة الغاز الحيوي في العالم	44
II .1.8. في افريقيا	46
II .9. مميزات وعيوب الغاز الحيوي	46
II .1.9 ميزة الغاز الحيوي	46
II .2.9. عيوب الغاز الحيوي	46
قائمة المراجع	47
الفصل الثالث: انتاج الغاز الحيوي من الكتلة الحيوية	
المقدمة:	50
III.1. الدراسة الأولى: تحويل النفايات العضوية من سكن جامعي لإنتاج البيوغاز	51
III.1.1. المواد والأساليب المستعملة	52
III.1.1.1. المواد المستعملة	52
III.1.1.2. أساليب العمل	52
III.1.1.3. الجهاز التجريبي	52
III.1.2. توصيف الركيزة	53
III.1.3. النتائج والمناقشة	54
III.1.3.1. الأس الهيدروجيني	54
III.1.3.2. الغاز الحيوي المنتج	55

III.3.3.1. تطور الطلب على الأكسجين DCO	56
III.3.3.1. توصيف الركيزة بعد الهضم	56
III.1.4. الإستنتاج	57
III.2. الدراسة الثانية: دراسة تأثير الأس الهيدروجيني على إنتاج الغاز الحيوي من النفايات المنزلية	58
المقدمة	58
III.1.2. المواد المستعملة وخطوات العمل	59
III.1.1.2. المواد المستعملة	59
III.2.1.2. خطوات العمل	59
III.2.2. النتائج والمناقشة	60
III.3.2. الإستنتاج	62
III.3. التجربة الثالثة: إنتاج الغاز الحيوي من مخلفات البطاطس	63
المقدمة	63
III.1.3. المواد و الأساليب	63
III.2.3. خطوات العمل	64
III.1.2.3. تقدير المادة الجافة (MS)	64
III.2.2.3. تحديد المادة العضوية (MO)	65
III.3.3. النتائج والمناقشة	66
III.1.3.3. خصائص الركيزة	66
III.4.3. معلمات الهضم	67
III..1.4.3. الرقم الهيدروجيني	67
III.2.4.3. إنتاج الغاز الحيوي	67
III.3.4.3. معامل التلوث: التغير في الطلب الكيميائي على الأكسجين (DCO)	68
III.5.3. الإستنتاج	70

قائمة المراجع	71
الخاتمة	73
الملخص	

قائمة الجداول والأشكال

قائمة الجداول

الجدول	الصفحة
الفصل الأول:	
الجدول I.1: ترتيب منتجي الوقود الحيوي والمواد الخام الرئيسية.	8
الجدولI .2: تطور انتاج الوقود الحيوي عالميا (2006-2016)	18
الجدول I.3: إنتاج الوقود الحيوي ببعض الدول الإفريقية جنوب الصحراء	19
الفصل الثاني	
الجدول II .1: تقنيات تنقية الميثان	41
الجدول II .2: جدول يوضح تأثير تكوين المدخلات على جودة الغاز الحيوي.	41
الفصل الثالث:	
الجدولIII.1: توصيف الركيزة قبل الهضم اللاهوائي	51
الجدول III.2: توصيف الركيزة بعد الهضم	53
الجدولIII.3 : نتائج المادة الجافة قبل الهضم	61
الجدولIII.4: نتائج المادة العضوية قبل الهضم وبعده	61

قائمة الأشكال

الشكل	صفحة
الفصل الأول	
الشكل I.1 : تطور الإنتاج العالمي للديزيل الحيوي من الكتلة الحيوي المختلفة (2007-2019)	**6**
الشكل I.2: الإنتاج العالمي للإيثانول الحيوي من الكتلة الحيوية (2007-2019)	**6**
الشكلI.3: حصة المواد الأولية المستخدمة في إنتاج الوقود الحيوي في الإنتاج العالمي(2007-2019)	**7**
الشكل I.4: مصادر الكتلة الحيوية	**11**
الشكل I.5: مراحل إنتاج الجيل الأول من الوقود الحيوي	**12**
الشكل I.6: استخلاص الوقود الحيوي من الطحالب	**13**
الشكلI .7: الدول الرائدة على أساس إنتاج الوقود الحيوي في جميع أنحاء العالم في عام 2020 (باليتاجول)	**18**
الفصل الثاني:	
الشكل II .1: هيكل السلسلة الجزئية لسيليلوز	**31**
الشكل II .2: هيكل السلسلة الجزئية للهيميسليلوز	**31**
الشكل II .3:الوحدة الهيكلية الأساسية للجنين	**31**
الشكل II .4: الخطوات الرئيسية لعملية الهضم اللاهوائي (ب: البكتيريا ؛ أ: العتائق)	**33**
الشكل II .5: مصنع الغاز الحيوي	**37**
الشكل II .6:أجهزة الهضم اللاهوائية المختلطة بلا حدود ، (a): عن طريق إعادة تدوير الغاز الحيوي ، (b): عن طريق إعادة تدوير الركيزة ، (c): عن طريق الشفرات	**38**
الشكل II .7: تلامس الهاضمات اللاهوائية مع الاحتفاظ بالكتلة الحيوية عن طريق: (a) الدورق، (b): عن طريق الغشاء	**38**
الشكل II .8:الهاضم اللاهوائي UASB	**40**
الشكل II .9: مختلف استخدامات الغاز الحيوي	**42**
الشكل II .10:الإنتاج العالمي للغاز الحيوي في عام 2012 واتجاهه حتى عام 2022	**44**

الفصل الثالث:	
الشكلIII.1: تطور الأس الهيدروجيني كدالة للوقت	**54**
الشكلIII.2: تطور حجم الغاز الحيوي كدالة للوقت	**55**
الشكل III.3: تطور DCO كدالة زمنية	**56**
الشكلIII.4: منظر للعينة بعد القطع	**59**
الشكلIII.5: الهاضم المستعمل	**60**
الشكلIII.6: تطور الأس الهيدروجيني كدالة للزمن	**60**
الشكلIII.7: تطور الأس الهيدروجيني كدالة للزمن	**60**
الشكلIII.8: تطور حجم الغاز الحيوي كدالة للزمن	**61**
الشكلIII.9: تطور حجم الغاز الحيوي كدالة للزمن	**61**
الشكلIII.10: تباين DBO5 كدالة للوقت	**62**
الشكلIII.11: اختلاف DCO كدالة للوقت	**62**
الشكل III.12:عرض فوتوغرافي للهاضم	**64**
الشكلIII.13: تغير الأس الهيدروجيني كدالة للوقت	**67**
الشكلIII.14: تغير حجم الغاز الحيوي كدالة للوقت	**68**
الشكلIII.15: تباين DCO كدالة للوقت	**69**

المقدمة العامة

المقدمة العامة:

أدى الاستخدام المستمر للوقود الأحفوري وتأثيرات غازات الاحتباس الحراري الإضرار بالبيئة، ومع زيادة الطلب المستمر على الطاقة المتزايد في العالم واحتمال التناقص السريع لاحتياطات النفط والغاز واليورانيوم دفع للبحث عن أنواع بديلة للوقود من مصادر حيوية متجددة، يعتبر الوقود الحيوي أحد أهم الحلول لمشاكل الطاقة لكونه طاقة نظيفة وغير مكلفة، كما يلعب دورا هاما في تحقيق التنمية المستدامة لارتباطه الوثيق بمختلف المجالات الاقتصادية والاجتماعية والبيئية، يكون إنتاج الوقود الحيوي عن طريق استغلال الكتل الحيوية التي تشمل جميع المخلفات الحيوانية والزراعية والآدمية.

الكتلة الحيوية مصدر للطاقة المتجددة القابلة للتطبيق والذي يتم استخدامها في أشكال مختلفة لتزويد بالطاقة، أحد خيارات إنتاج الطاقة من الكتلة الحيوية هو الغاز الحيوي المشتق من عملية الهضم اللاهوائي (الذي يتم في ظل غياب الأكسجين) للكتل الحيوية ومصادر عضوية أخرى، حيث يمكن استخدام الغاز الحيوي كوقود مستدام للحرارة والطاقة والنقل، يؤدي التدهور الطبيعي للكتل الحيوية إلى إنتاج الغاز الحيوي بواسطة الكائنات الحية في ظل الظروف اللاهوائية. أصبحت تقنية الهضم اللاهوائي أحد أكثر مسارات إنتاج الطاقة المتجددة جاذبية.

تتكون هذه المذكرة من ثلاثة فصول حيث تطرقنا في الفصل الأول إلى تعريف الوقود الحيوي وطرق إنتاجه من خلال الكتلة الحيوية، وفي الفصل الثاني تحدثنا عن المنتج المهم من الكتلة الحيوية المتمثل في الغاز الحيوي والحصول عليه من خلال تقنية الهضم اللاهوائي ثم الفصل الثالث والأخير عرض بعض التجارب تم إجراؤها مسبقا لإنتاج الغاز الحيوي.

الفصل الأول:

الوقود الحيوي

المقدمة:

الطاقة الحيوية طاقة متجددة تنتج من الكائنات الحية كبقايا النباتات أو الفضلات التي تنتجها الكائنات الحية مثل السماد الحيواني ومخلفات زراعية...، وهذه الأشياء ومخلفاتها تسمى الكتلة الحيوية تتكون من الأشياء الحية تماما مثل الوقود الأحفوري المتكون في الأرض من النباتات والبقايا الحيوانية وتكون قابلة للتجدد خلال دورة الزمن قياسا بالوقود الأحفوري الذي يتطلب تكونه ملايين السنين[1].

يعد الوقود الحيوي منتوج من منتوجات الكتلة الحيوية، كما يعرف أنه من أقدم أنواع الوقود بسبب استخدام الإنسان: حرق الحطب، الأخشاب والنباتات في التدفئة والطبخ منذ زمن سحيق يمتد لآلاف السنين[2].

كما يتميز هذا المصدر بعدم إضراره بالبيئة أو المناخ، فمحروقات الوقود الحيوي تتميز مقارنة بالوقود الأحفوري بإطلاق محتوى أقل من CO_2 المسبب الرئيسي للاحتباس الحراري[3].

وفي هذا الفصل سيتم التعرف على مفهوم الوقود الحيوي وأنواعه وطرق إنتاجه بالاعتماد على الكتلة الحيوية كمصدر للطاقة.

I.1. مفهوم الوقود الحيوي

الوقود مادة تمدنا بطاقة نافعة، ويستخدم الوقود لتدفئة المباني وتبريدها، طبخ الطعام، تسيير المحركات وتوليد الكهرباء، ويتشكل بعض أنواع الوقود طبيعياً، وينتج بعضها الآخر صناعياً، ويمكن عمل الوقود الصناعي من الوقود الأحفوري ومن أنواع معينة من الصخور والرمل وكذلك من الكتلة الحيوية، وهي اسم يطلق على المواد العضوية القابلة للتحول[4]

يعرف الوقود الحيوي بأنه: الطاقة المستمدة من الكائنات الحية سواء النباتية أو الحيوانية منها، وهو أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة، على خلاف غيرها من الموارد الطبيعية مثل النفط والفحم الحجري وكافة أنواع الوقود الأحفوري والوقود النووي[2]

يعتبر الوقود الحيوي هو الوقود المنتج بشكل مباشر أو غير مباشر من الكتلة الحيوية والتي تعني المادة ذات الأصل البيولوجي (باستثناء المواد المطمورة في التشكيلات الجيولوجية والتي تحولت إلى متحجرات أحفورية)[5]، كما يمكن القول أن الوقود الحيوي هو تحويل الكتلة الحيوية إلى طاقة، إذ يمكن بواسطتها إنتاج الكهرباء والحرارة والطاقة، بالاعتماد على أنواع الوقود المشتقة منها (السائلة والغازية والصلبة)، كما بإمكانها أن تكون بديلا لأنواع من الوقود[6].

I.2. أنواع الوقود الحيوي

يمكن تصنيف الوقود الحيوي حسب المصدر والنوع[7]:

I.2.1. من حيث المصدر:

مشتق من الدهون والشحوم الحيوانية.

- الدهون الحيوانية: تشمل الدهون المستخدمة لإنتاج الديزل الحيوي على الشحم ومن بين الشحوم المختارة لإنتاجه، دهون الدجاج ودهون السمك (في اليابان) بسبب ما تقدمه من ميزة اقتصادية لأنها غالبا ما تكون بأسعار معقولة[8].
- مشتق من منتجات الغابات (الجذور، الجذوع وأرواق الأشجار) أو مخلفات المدن والصناعة الزراعية والغذائية[7].

I.2.2. من حيث النوع

بشكل عام يتكون الوقود الحيوي من ثلاث أنواع:

- **الوقود الحيوي الصلب**: وينظر إليه على أنه الوقود الحيوي التقليدي، يتم الحصول عليه من الأشجار في شكل أخشاب أو النفايات الزراعية لاستعمالها في أغراض مثل: الطهي والتسخين والإضاءة، وينتشر هذا النوع منذ القدم، خاصة في الأماكن الريفية والنائية المنتشرة بالدول الفقيرة والنامية بأمريكا اللاتينية وإفريقيا وأوروبا.
- **الوقود الحيوي الغازي**: وهو أحد أنواع الوقود الحيوي الذي يكون في صورة غازية، ويتم انتاجه من تحلل المواد العضوية في المخلفات الحيوانية والنباتية، والتي ينتج عنها غاز "الميثان" بالقدر الذي يمكن تجميعه والاستفادة منه كطاقة بديلة لطاقة التقليدية واستخدامه في مجالات مختلفة كتوليد الكهرباء، أو كبديل للغاز الطبيعي في أغراض الطهي والتسخين (غاز المدينة).
- **الوقود الحيوي السائل**: وهو من أنواع الوقود الحيوي الذي أثار جدلا عالميا وبه تم الدخول في عصر الإنتاج الكثيف للوقود الحيوي[9]، وهو مصدر الطاقة الوحيد من مصادر الطاقة المتجددة البديل للوقود الأحفوري في كل المجالات حيث يمكن نقله وتخزينه واستخدامه بطرق متعددة[5].

وينقسم إلى:

- **الديزل الحيوي** (**البيوديزل**): هو وقود بديل مصنوع من مصادر بيولوجية مثل النباتات والدهون الحيوانية، من خلال الانتقال الاستيري الذي يتم فيه تحويل الدهون الثلاثية الى استرات المثيل والإيثيل[10] وينتج من: بذور اللفت، فول الصويا، زيت النخيل، الجاتروفا والكارنيا، بذور زيت الخروع وبذور القطن...[9]

ولقد بلغ الإنتاج العالمي للديزل الحيوي سنة 2019 أزيد من 40 (بيلون لتر)، يوضح الشكل التالي تطور الإنتاج العالمي من مختلف الكتل الحيوية المستعملة ما بين سنة (2007-2019).

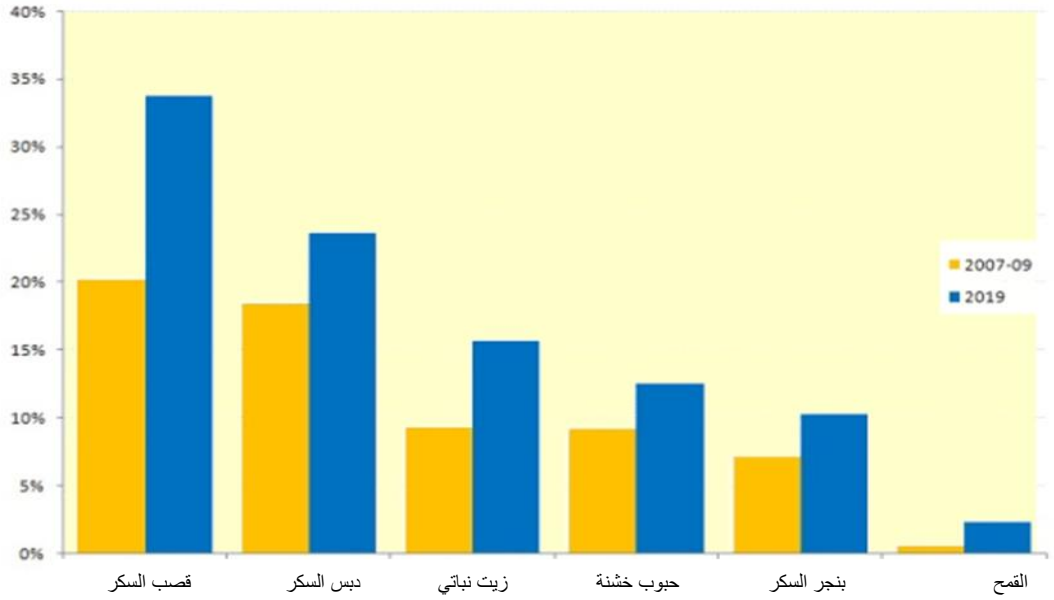
الشكل 1.I : تطور الإنتاج العالمي للديزيل الحيوي من الكتلة الحيوي المختلفة (2007-2019)

- **الإيثانول الحيوي** (**البيوإيثانول**): هو سائل كحولي شفاف لا لون له طعمه حلو نوعا ما، سريع الاشتعال، يتم انتاجه في الغالب من مخلفات حيوانية والنباتات التي تحتوي كمية كبيرة من السكر والنشويات، يستخدم كمصدر للطاقة بديلا عن البنزين[7]، وينتج من: قصب السكر، بنجر السكر، التمر، الذرة السكرية والرفيعة، الكاسافا، المخلفات النباتية...[9]

حيث قدرت قيمة الإنتاج العالمي للايثانول الحيوي سنة 2019 مايقارب 160(بليون لتر) وهذا الشكل يعطي تطور الإنتاج العالمي لمختلف الكتل الحيوية مابين سنة (2007-2019).

الشكل I.2: الإنتاج العالمي للإيثانول الحيوي من الكتلة الحيوية (2007–2019)

وبذلك يعتمد انتاج الوقود الحيوي السائل كأحد أنواع الطاقة المتجددة (énergie renouvelable) على تحويل الكتلة الحيوية (Biomass)، سواء كانت ممثلة في صورة حبوب ومحاصيل أو في صورة زيوت إلى إيثانول كحولي أو ديزل عضوي[9].



الشكل I.3: حصة المواد الأولية المستخدمة في إنتاج الوقود الحيوي في الإنتاج العالمي(2007–2019)

I.3. انتاج الوقود الحيوي

الوقود الحيوي هو وقود نظيف يعتمد إنتاجه في الأساس على تحويل الكتلة الحيوية إلى طاقة يمكن استخدامها في الإنارة وتسيير المركبات والمولدات وعديد الاستعمالات.

يتم الحصول على الوقود الحيوي من تحلل المزروعات والفضلات وبقايا الحيوانات التي يمكن إعادة استخدامها[5].

الجدول I.1: ترتيب منتجي الوقود الحيوي والمواد الخام الرئيسية.

	الرتبة (الفترة المرجعية)		المواد الخام الرئيسية	
	الإيثانول	الديزل	الإيثانول	الديزل
الولايات المتحدة الأمريكية	1 (48.2%)	2 (18.1%)	الذرة	زيت فول الصويا وزيوت الطبخ المستعملة
الإتحاد الأوروبي	5 (4.8%)	1 (32.3%)	بنجر السكر والقمح والذرة	زيت بذور اللفت وزيت النخيل وزيوت الطبخ المستعملة
البرازيل	2 (26.7%)	4 (12.2%)	قصب السكر والذرة	زيت الصويا
الصين	3 (8.3%)	9 (2.3%)	الذرة والكسافا	زيوت الطبخ المستعملة
الهند	5 (2.3%)	15 (0.5%)	دبس السكر	زيوت الطبخ المستعملة
كندا	6 (1.6%)	13 (0.7%)	الذرة والقمح	زيت بذور اللفت، نفايات زيوت الطبخ وزيت فول الصويا
إندونيسيا	20 (0.1%)	3 (15%)	دبس السكر	زيت النخيل
الأرجنتين	8 (1.0%)	5 (5%)	دبس وقصب سكر وذرة	زيت الصويا
تايلاندا	7 (1.4%)	7 (3.8%)	دبس، كسافا،	زيت النخيل

			قصب السكر	
كولومبيا	13 (0.44%)	11 (1.3%)	قصب السكر	زيت النخيل
باراغواي	14 (0.42%)	19 (0.03%)	الذرة وقصب السكر	الجاتروفا

يمثل الجدول السابق مكانة الدول المنتجة للوقود الحيوي على التوالي والمواد الخام الرئيسية المستعملة في الإنتاج، احتلت الولايات المتحدة الأمريكية، الاتحاد الأوروبي والبرازيل المراتب الأولى عالميا من حيث نسب الإنتاج والمواد الخام المستعملة في الإيثانول والديزل الحيوي.

I .1.3.تعريف الكتلة الحيوية:

تعد الكتلة الحيوية ثالث أكبر مورد للطاقة الأولية في العالم بعد الفحم والنفط، لديها القدرة على أن تكون بديلا جزئيا عن الوقود الأحفوري، وتشير إلى جميع المواد العضوية التي يمكن تحويلها إلى طاقة، نعني بالمواد العضوية المواد ذات الأصل النباتي (بقايا الطعام، والخشب، والأوراق) والمواد الأصل الحيواني (جثث الحيوانات، والكائنات الحية في التربة)[11].

وتعرف بأنها " الجزء القابل للتحلل البيولوجي من المنتجات والنفايات والمخلفات من الزراعة. بما في ذلك المواد النباتية والحيوانية من البر والبحر والغابات والصناعات ذات الصلة، وكذلك الجزء القابل للتحلل البيولوجي للنفايات الصناعية والمنزلية"[12].

I.2.3. أنواع الكتلة الحيوية:

تشمل الكتلة الحيوية عدة أنواع حيث نذكر منها:

- النباتات الخشبية
- النباتات العشبية (الأعشاب)
- النباتات المائية والطحالب
- الأسمدة (المخلفات الحيوانية)

من أجل استغلال الكتلة الحيوية والحصول من خلالها على أنواع وقود أكثر إثارة للاهتمام يجب تحويلها إلى عدة حالات (صلبة، سائلة، غازية)، يمكن إجراء هذا التحويل حراريا أو كيميائيا أو ميكانيكيا، يعتمد هذا الاختيار على نوع وكمية الكتلة الحيوية المتاحة ونوع الطاقة النهائية. [6].

I.3.3. موارد الكتلة الحيوية

موارد الكتلة الحيوية متنوعة بشكل عام، يتم تمييز الفئات التالية:

- الأخشاب، وخاصة في شكل جذوع الأشجار أو الرقائق.
- منتجات الأخشاب الثانوية التي تغطي جميع النفايات الناتجة عن الغابات والصناعات المتعلقة بمعالجة الأعشاب.
- مخلفات الصناعات الغذائية والزراعية.
- المنتجات والمشتقات من الزراعة (القش، مخلفات المحاصيل...الخ)، والمزارع لأغراض الطاقة (الصفصاف، الخفقان....الخ).
- النفايات العضوية مثل النفايات المنزلية والنفايات في أصل الزراعة مثل النفايات السائلة الزراعية.
- نفايات الأخشاب التي لا تحتوي على مركبات عضوية مهلنجة أو معادن ثقيلة[13، 14].

هذا الشكل يوضح بعض من مصادر الكتلة الحيوية

الشكل I.4: مصادر الكتلة الحيوية

I.4.3. خصائص الكتلة الحيوية

الخصائص اللازمة لمصدر الكتلة الحيوية هي التي تحدد كلا من اختيار عملية التحويل وأي صعوبات معالجة لاحقة قد تنشأ، وبالمثل فإن اختيار مصدر الكتلة الحيوية يتأثر بالشكل المطلوب للطاقة والتفاعل بين هذين الجانبين هو الذي يتيح إدخال المرونة في استخدم الكتلة الحيوية كمصدر للطاقة.

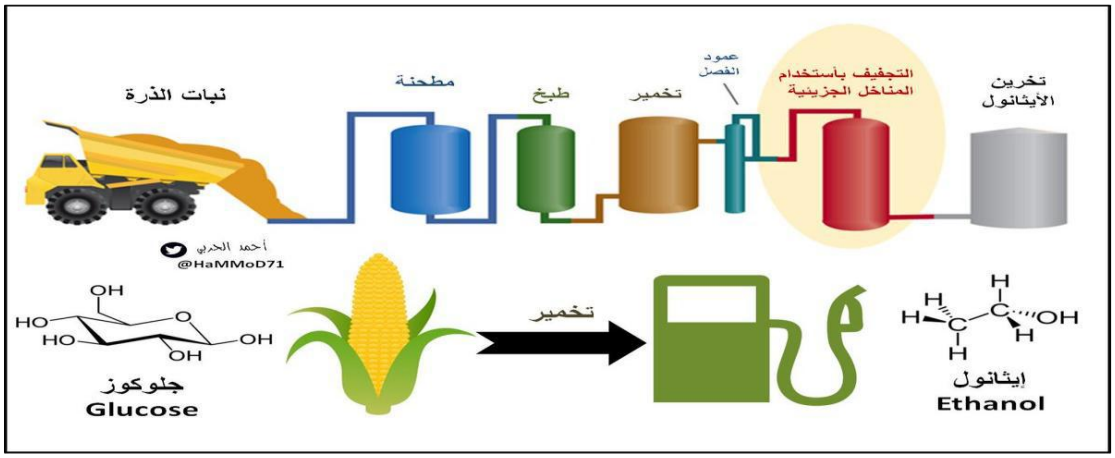
ومن أهم هذه الخصائص نذكر:

- نسب الكربون الثابت والمواد المتطايرة
- محتوى المعدن القلوي
- السليلوز / اللجنين (الكتلة الحيوية الجافة)
- محتوى الرطوبة (جوهري وخارجي)
- القيمة الحرارية
- محتوى الرماد البقايا[6]

I.4. أجيال الوقود الحيوي

هناك أربعة أجيال من الوقود الحيوي:

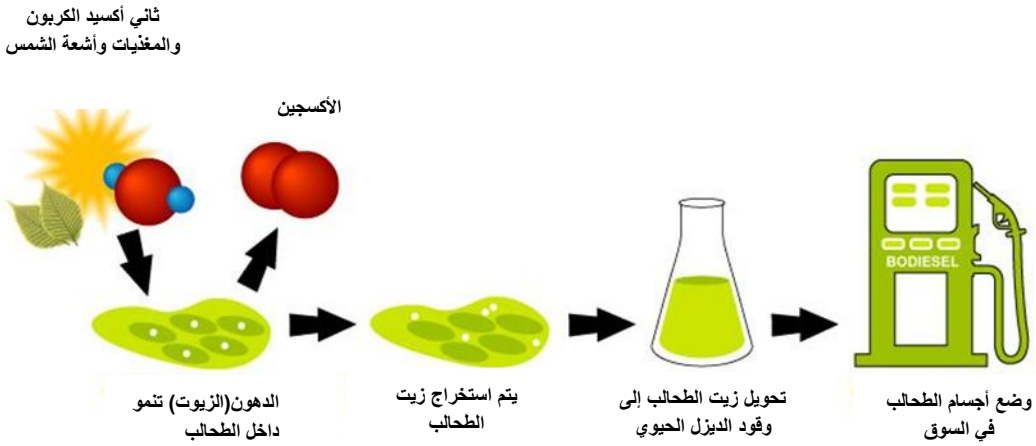
I.4.1. الجيل الأول: يعتمد في إنتاج الوقود الحيوي على بذور وحبوب النباتات كالقمح، الذرة، قصب السكر، اللفت، فول الصويا، الشعير وعباد الشمس بالإضافة إلى التمور[15]، وكذا بن القهوة يمكن استخدامه كمادة خام في إنتاج الإيثانول الحيوي، وقد تلقت تلك الطريقة عدة انتقادات عالمية لأنها تسبب في تحويل الكثير من الأراضي الزراعية، مما يؤثر ذلك سلبا على النشاط الزراعي وفقراء العالم بسبب ارتفاع بليغ في الأسعار العالمية للحبوب والزيوت. الشكل التالي يبين مراحل انتاج الوقود الحيوي من الجيل الأول:



الشكل I.5: مراحل إنتاج الجيل الأول من الوقود الحيوي

I.4.2. الجيل الثاني: والذي يعتمد أساسا على المخلفات والبقايا النباتية كسيقان القمح ونشارة الخشب والذرة [16]، أشجار التين وغيرها حيث يتم الحصول على الوقود الحيوي السليلوزي والميثانول والإيثانول الحيوي، فبرغم من نجاح الطريقة وأهمية استخدامها في انتاج الوقود الحيوي إلا أنها أيضا تمس بالغذاء المواشي من العلف وتحرم التربة الزراعية من المخلفات التي يتم تحويلها إلى سماد عضوي يخصبها[17].

I.4.3. الجيل الثالث: يتميز هذا الجيل باستخدام الطحالب لإنتاج الوقود الحيوي، حيث أشارت العديد من الدراسات الحديثة إلى أن الطحالب الخضراء مصدر للوقود [18-20]، يندرج تحت مصادر الطاقة المتجددة، وخاصة بعد التزايد المستمر في سعر الوقود الأحفوري، لها أثر محدود على البيئة، ولا تؤثر على الاحتياج العالمي من الغذاء لذلك يمكن التوصل إلى الحقيقة بأن أفضل المحاصيل التي يمكن استخدامها كوقود حيوي هي الطحالب كونها لا تصلح للاستعمال البشري بالإضافة لأنها تنمو في البحر أو مزارع تستخدم فيها مياه عادية أو مياه البحر، تنمو خلال 12 ساعة و51%منها زيت، الطحالب كائنات دقيقة وحيدة الخلية ولها القدرة على التمثيل الضوئي، وتتميز بمعدل نمو سريع، تعتبر من أقدم أنواع الحياة على وجه الأرض، حيث يعتقد أن الوقود الأحفوري تكون من الطحالب في العصر القديم[18].



الشكل I.6: استخلاص الوقود الحيوي من الطحالب

يتمتع الجيل الثاني والثالث من الوقود الحيوي بميزة، من بين أمور أخرى عدم "احتلال" الأراضي الزراعية في منافسة مع انتاج الغذاء للبشر، نضجهم الصناعي، وخاصة الجيل الثالث، لا يزال يتعين تحديده.

يمكن أن يتخذ الوقود الحيوي أشكالا مختلفة:

- استرات الزيوت النباتية المنتجة، على سبيل المثال، من بذور اللفت (وقود الديزل الحيوي).
- الايثانول، المنتج من القمح والشمندر، والذي يمكن السوبر الخالي من رصاص في شكل ETBE) éthyl tertio butyl éther) يعزز ETBE في دمج الايثانول في البنزين.

I.4.4. الجيل الرابع: يعتبر هذا الجيل أحدث اتجاه عالمي لإنتاج الوقود الحيوي، ويعتمد على إجراء تغيير في جينوم أحد الكائنات الدقيقة وهو بكتيريا يطلق عليها micoplasma laboratorium حيث أنها تصبح قادرة على انتاج الوقود الحيوي من غاز ثاني أكسيد الكربون[21].

I.5. طرق انتاج الوقود الحيوي (العمليات)

I.5.1. الطريقة أوليوكيميائية (**voie oléochimique**):

الوقود الحيوي عبارة عن وقود سائل أو غازي يتم إنشاؤه من تفاعل:

- بين الزيت (بذور اللفت، عباد الشمس) والكحول في حالة وقود الديزل الحيوي.
- من خليط السكر والبنزين المخمر في حالة الإيثانول الحيوي.

I. 2.5.العملية الجافة أو الحرارية الكيميائية(La voie sèche ou thermochimique):

تتكون العملية الجافة بشكل أساسي من عملية كيميائية حرارية، والتي تشمل تقنيات الاحتراق والتغويز والانحلال الحراري:

- **الاحتراق La Combustion:**

ينتج عن الاحتراق حرارة عن طريق أكسدة الوقود الكاملة، بشكل عام في وجود العمليات الصناعية أو في شبكات التدفئة المركزية. يمكن أيضا إرسال البحار إلى توربين أو محرك بخاري لإنتاج الطاقة الميكانيكية أو قبل كل شيء الكهرباء، يطلق على الإنتاج المشترك للحرارة والكهرباء التوليد المشترك للطاقة.

- **التغويز La gazéification:**

يتم تغويز الكتلة الحيوية الصلبة في مفاعل معين، المغويز، يتكون من تفاعل الكربون من الكتلة الحيوية والغازات المتفاعلة (بخار الماء وثاني أكسيد الكربون) والنتيجة هي التحول الكامل للمادة الصلبة، بصرف النظر عن الرماد، إلى غاز قابل للاشتعال يتكون من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون. يتم حرق هذا الغاز، بعد تنقيته وترشيحه، في محرك احتراق لإنتاج طاقة ميكانيكية أو كهرباء. التوليد المشترك للطاقة ممكن أيضا باستخدام تقنية التغويز.

- **الانحلال الحراري La Pyrolyse:**

التحلل الحراري للخشب هو العملية التي تسمح بتحويل الخشب إلى غاز قابل للاشتعال. المنتجات القابلة للتكثيف (الماء والقطران) والفحم. يتوافق مع التحلل الحراري الخشب في ظل فراغ أو في وجود غاز خامل. تستخدم عمليات الانحلال الحراري التقليدية درجات حرارة تتراوح بين 300-600 درجة مئوية وتنتج الفحم. تستخدم عمليات الانحلال الحراري الحديثة درجات حرارة أعلى وتستعيد الطاقة من المنتجات المتطايرة.

I.3.5. العملية الرطبة أو البيولوجية(La voie humide ou biologique):

القطاع الرئيسي لهذا الطريق هو الهضم اللاهوائي، هذه عملية تعتمد على تحلل المواد العضوية بواسطة الكائنات الحية الدقيقة، يحدث في هضم ساخن بدون أكسجين (تفاعل في بيئة لاهوائية). هذه العملية تجعل من الممكن إنتاج:

- الغاز الحيوي: الذي هو نتيجة الهضم اللاهوائي للمواد العضوية.
- الهضم: وهو المنتج المتبقي للمعالجة بالميثان، والذي يتكون من مادة عضوية غير قابلة لتحلل[22].

I.6. مزايا وعيوب الوقود الحيوي:

يترتب عن الوقود الحيوي العديد من المزايا والعيوب نذكر من كل منهما مايلي:

I.6.1. المزايا

- **متجدد:** يستغرق إنتاج الوقود الأحفوري آلاف السنين بينما المواد الخام للوقود الحيوي قابلة للتجديد بدرجة أكبر بسرعة.
- **الامن:** بتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة الأجنبية يمكن أن تحمي سلامة موارد طاقتها وتحرر نفسها من التأثيرات الخارج.
- **قابلية التحلل البيولوجي:** الوقود الحيوي قابل للتحلل البيولوجي بسهولة وكثير أقل خطورة في التعامل مع الوقود التقليدي.
- **انبعاثات منخفضة الكربون:** عندما يتم حرق الوقود الحيوي، فإنها تنتج أقل بكثير من الكربون والسموم أقل بكثير. إنه بديل أكثر أمانًا للحفاظ على جودة الغلاف الجوي.

I.6.2. العيوب

- **إنتاج الطاقة:** الوقود الحيوي له إنتاجية أقل من الطاقة من الوقود التقليدي وبالتالي تتطلب كمية أكبر منها تنتج نفس المستوى من الطاقة.
- **تكلفة عالية:** تكرير الوقود الحيوي لإنتاج طاقة أكثر كفاءة وبناء المصانع اللازمة لزيادة الكميات سوف يتطلب الوقود الحيوي استثمارًا أوليًا كبيرًا.
- **أسعار الغذاء:** يمكن استخدام بعض المحاصيل الغذائية الغذاء والوقود الحيوي (مثال الذرة). مع زيادة الطلب، من المرجح أن ترتفع الأسعار أيضًا.
- **التوفر:** الوقود الحيوي غير متاح بعد بسهولة للمزارعين. المستهلكين ومعظم المركبات غير مجهزة للعمل معها الوقود الحيوي[21].

I.7. الاتجاهات العالمية لإنتاج الوقود الحيوي:

I.1.7. دوافع الاتجاه العالمي نحو انتاج الوقود الحيوي

تعتبر الطاقة الأحفورية التقليدية الشكل المهيمن منذ عقود على مصادر الطاقة في العالم والتي تستخرج من النفط كمصدر رئيسي لها، إضافة للفحم والغاز، ونتيجة لأسباب عديدة أهمها ارتفاع أسعار النفط والتأثيرات السلبية للانبعاثات السامة من الوقود الأحفوري على البيئة والمناخ فقد توجه الاهتمام بالطاقة نحو بديل آخر له العديد من المزايا والآفاق ممثلا في الطاقة الحيوية.

ويوجد العديد من الأسباب الأخرى نذكرها في النقاط الآتية:

- **أمن الطاقة:** يأتي الوقود الحيوي ضمن مصادر الطاقة البديلة، التي توفر إمكانية تأمين مصادر الطاقة في مواجهة التقلبات المستمرة في أسعار النفط والترتيب لاحتمالية مرحلة ما بعد النفط حيث يمثل البترول المصدر الرئيسي للطاقة الأحفورية التقليدية بنسبة تقارب 35% من مجموع الطاقة الأولية ككل يلي الفحم بنسبة 25% ثم الغاز الطبيعي ونظرا لسباق المتواصل للحصول على الطاقة في إطار عملية النمو الاقتصادي خصوصا مع بداية السبعينات من القرن العشرين، فقد شهدت أسعار الطاقة ارتفاعات حادة نتجت عنها أزمة سنة 1973م التي أدت بواضعي السياسات وصناع القرار إلى التفكير في ضرورة إيجاد مصادر أخرى للطاقة بديلة عن النفط حيث كانت تلك بداية للتوجه نحو وضع مستقبلي مغاير يتراجع فيه الاعتماد عن الطاقة الاحفورية التقليدية، لكن معاودة انخفاض أسعار النفط من جديد أدى إلى الاهتمام بإيجاد بدائل للطاقة الأحفورية حتى بداية الألفية الجديدة، في حين وصلت أسعار النفط إلى مستويات قياسية قاربت 150 دولار للبرميل. حيث أن أسعار النفط تضاعفت سنة 2008 بـ 5 مرات مقارنة بقيمتها المسجلة سنة 2002 وذلك راجع إلى عدة أسباب منها:
  - زيادة الطلب على النفط كمصدر للطاقة مع تزايد معدلات النمو في العالم والحروب
  - الاضطرابات الجيوسياسية في البلدان المصدرة للنفط كالعراق ونيجيريا [22].
- **التغيرات المناخية:** لم يقتصر الأمر في ضرورة إيجاد بديل للطاقة عن النفط فقط بسبب ارتفاع أسعاره، حيث أدت الانبعاثات المتزايدة والناتجة عن الوقود الأحفوري (البنزين، الديزل) إلى التسبب في بروز ما يعرف بظاهرة "الاحتباس الحراري أو تغير المناخ" والتي أبرزت وضعا مناخيا جديدا أثر سلبيا على البيئة بشكل عام والزراعة بشكل خاص. نتيجة لذلك زادت الضرورة الملحة لإيجاد بديل للطاقة الأحفورية التقليدية بشكل يخدم عملية التنمية المستدامة التي

تضمن عدم إلحاق الضرر بالبيئة، إذ ظهر مفهوم الطاقة الحيوية كمدعم رئيسي للتنمية المستدامة ليبقى من جديد على الساحة العالمية بشكل يظهر على أنه مستقبل الطاقة البديلة.

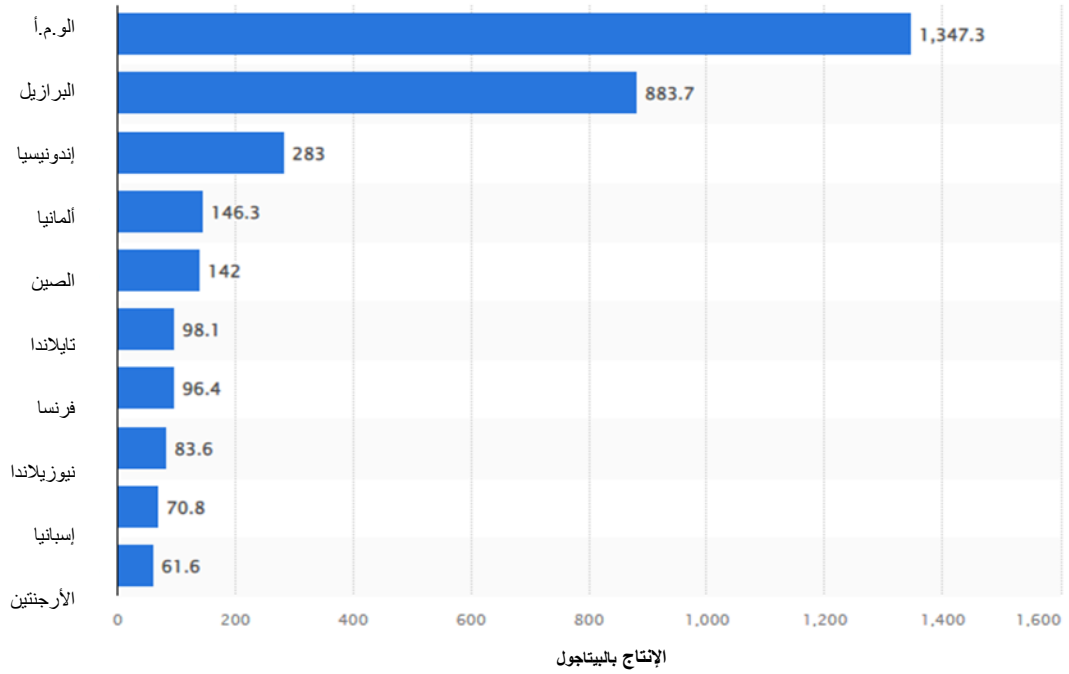
- **تنويع مصادر الطاقة**: والحد من تعرضها لتقلبات أسعار النفط العالمية، ويمثل التنويع عامل جذب للبلدان المستوردة للنفط، ولا سيما البلدان التي تتحمل تكلفة نقل عالية للمنتجات البترولية مثل البلدان الغير ساحلية. وتستخدم الدول الوقود الحيوي لتقليص اعتمادها على المصدر الأساسي للوقود ألا وهو النفط، كمثال الو م أ.
- **الحد من الملوثات الخطيرة**: التي تصدر من عوادم السيارات، حيث تمثل السيارات مصدرا رئيسيا لسوء نوعية الهواء في المدن، ربما يكون الوقود الحيوي أفضل بيئيا من الوقود البترولي، ويحقق الإيثانول أعظم منفعة من حيث نوعية الهواء عند استخدامه في السيارات القديمة التي غالبا لا تنتشر في شوارع البلدان النامية، ويساعد الإيثانول على الحد من انبعاث أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات وخاصة في المناخ البارد. ويمكن استبداله بإضافات الرصاص الضارة لزيادة قدرة البنزين على الاحتراق كما أن جميع أنواع الوقود الحيوي خالية من الكبريت. يساعد الديزل الحيوي على الحد من انبعاث أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات، لكنه يزيد من انبعاث أكسيد النيتروجين زيادة طفيفة[23].
- توجد دوافع أخرى، نذكر منها:

- تنمية صادرات الطاقة الموجه لإنتاج الوقود الحيوي في البلدان التي تملك الإمكانات لاستخدام الأراضي والتشغيل.
- تنمية أسواق جديدة لصادراتها وتحسين أوضاع ميزانها التجاري.
- استصلاح الأراضي وتجديد وتحسين حماية التربة الزراعية وإصلاح وتجديد الأراضي المتدهورة والمهجورة.
- معالجة المخلفات الزراعية للحد من التلوث وذلك بتحويلها إلى أداة فعالة في إنتاج الوقود الحيوي[24].

I.2.7. الدول المنتجة للوقود الحيوي:

احتلت الولايات المتحدة الأمريكية المرتبة الأولى في إنتاج الوقود الحيوي سنة 2020م بنسبة تقدر (1347.3بيتاجول) حيث تليها البرازيل في المرتبة الثانية بنسبة (883.7 بيتاجول)، بينما تحتل إندونيسيا المرتبة الثالثة بإنتاج قدر (283 بيتاجول).ومن جهة الاتحاد الأوروبي احتلت ألمانيا المرتبة الأولى بنسبة بلغت (146.3 بيتاجول) عن باقي دول الاتحاد الأوروبي.

الشكل التالي يبين إحصائيات لباقي الدول في إنتاج الوقود لسنة 2020م:



الشكل I .7: الدول الرائدة على أساس إنتاج الوقود الحيوي في جميع أنحاء العالم في عام 2020 (بالبيتاجول)

كما يمثل الجدول الآتي تطور إنتاج الوقود الحيوي خلال الفترة الزمنية (2006-2016)

الجدول I .2: تطور انتاج الوقود الحيوي عالميا (2006-2016)

الإنتاج السنة	الإيثانول الحيوي	الديزل الحيوي	الإجمالي
2006	716	125	841
2007	925	179	1104
2008	1215	262	1477
2009	1290	314	1604
2010	1479	357	1836
2011	1455	426	1881
2012	1490	467	1957
2013	1582	529	2111
2014	1663	571	2234
2015	1737	529	2263
2016	1721	586	2307

I.3.7. دخول الدول الإفريقية لصناعة الوقود الحيوي:

وضعت العديد من الدول الإفريقية جنوب الصحراء خططا ومبادرات وطنية لدعم صناعة الوقود الحيوي لديها وخاصة دول حوض النيل، يبين الجدول التالي إنتاج الوقود الحيوي في بعض الدول الإفريقية جنوب الصحراء[25]:

الشكل I.3: إنتاج الوقود الحيوي ببعض الدول الإفريقية جنوب الصحراء

الدولة	الكتلة الحيوية	البيوديزل (مليون لتر)	البيوإيثانول (مليون لتر)
بنين	الكاسافا	-	
بوركينا فاسو	قصب السكر	-	20
ساحل العاج	تفل السكر	-	20
غانا	جاتروفا	50	20
غينيا	كاجو	-	-
مالي	تفل السكر	-	10
مالاوي	تفل السكر	-	20
كينيا	تفل السكر	-	146
إثيوبيا	تفل السكر	-	413
النيجر	الجاتروفا	10	80
نيجيريا	قصب السكر	-	-
السودان	تفل السكر	-	70
سوازيلاند	تفل السكر	-	408
السنغال	تفل السكر	-	480
تنزانيا	تفل السكر	-	245
توجو	الجاتروفا	10	-
أوغندا	تفل السكر	-	119

I.4.7. موقع الجزائر من خارطة الوقود الحيوي:

يمكن تحديد موقع الجزائر في هذا التوجه العالمي من خلال بعدين أساسيين، يتعلق الأول بالتأثيرات والانعكاسات التي تمس الاقتصاد الجزائري خاصة في ظل الاعتماد الكبير جدا على الوقود الأحفوري كمصدر رئيسي للموارد. أما البعد الثاني فيرتبط بالفرص والقيود المرتبطة بدخول الجزائر هذه المنظومة في ظل توفرها على كل المقومات من مساحات شاسعة زراعية ومساحات غير مستغلة من جهة، ومن جهة أخرى توفرها على موارد مائية وغابية، خاصة ثروة النخيل[26].

قائمة المراجع:

1– سمير سعدون مصطفى، بلاد عبدالله ناصر، محمود خضر سليمان: الطاقة البديلة واستخداماتها -https://www.alfred library.com/2019/06/Alternative-Energy-Sources.html

2– محمد راضي، عقيل عبد محمد: الوقود الحيوي السائل بديل النفط مفهومه وآثاره مع إشارة إلى دولة الإمارات العربية. كلية الإدارة و الاقتصاد: جامعة البصرة.

https://gulfpolicies.org/2019-05-18-07-26-26/94-2019-06-27-09-51-26/1408-2019-07-01-10-34-48

3– أسامة بدير، سامي محمود: تداعيات الأزمة المالية العالمية على الغذاء في مصر الواقع ، التحديات، الآفاق والمستقبل، مارس 2009. https://hawassdroit.yoo7.com/t1634-topic

4– موقع إنترنت المعرفة: وقود.https://www.marefa.org/%D9%88%D9%82%D9%88%D8%AF

5– فيصل عبدالله الزنكوي: تقرير الوقود الحيوي المتجدد.

https://www.mof.gov.kw/MOFDesicions/MOFPublish/PDF/Biofuels.pdf

6– McKendry, P.2002 , Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource technology, **83**(1): p. 37-46.

7– عزمي محمد عبد الجليل الغايش: تأثير التوسع في صناعة الوقود الحيوي على الأمن الغذائي. مجلة البحوث الفقهية والقانونية، 2019. 34(الجزء الثاني): p. 1-88.

8– Ahmia, A., et al. 2014, Raw material for biodiesel production. Valorization of used edible oil. Journal of Renewable Energies,. **17**(2): p. 335–343-335–343.

9– نهلة أحمد أبو العز: أثر صناعة الوقود الحيوي على أسعار المواد الغذائية فى دول حوض النيل. مؤتمرات معهد البحوث والدراسات الافريقية، 2014.

10– سليمان، دراسة مخبرية لبحث "تصميم و تنفيذ محطة إرشادية لإنتاج الوقود الحيوي من الفضلات المنزلية من دخون وزيوت مستعملة" موضوع العقد رقم 14 07/11/2011.

11– الأبيض محمد، عصام بشور، شلق علي، حبشي روزين: منتدى الأبحاث والسياسة حول تغير المناخ والبيئة في العالم العربي، إعادة تدوير الكتلة الحيوية الزراعية لإنتاج الغاز الحيوي: دراسة الجدوى الاقتصادية في المناطق الريفية في لبنان، 2011. http://hdl.handle.net/10938/21164

12– Manzanares, P. 2020, The role of biorefinering research in the development of a modern bioeconomy. Acta Innovations, (37): p. 47-56.

13– Lin, Y. and S. Tanaka, 2006, Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. Applied microbiology and biotechnology, **69**(6): p. 627-64.2

14– Mourjane, I. and J. Fosse, 2021, La biomasse agricole: quelles ressources pour quel potentiel énergétique? France Stratégie.

15– Chandel, A.K., et al. 2012, Sugarcane bagasse and leaves: foreseeable biomass of biofuel and bio-products. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, **87**(1): p. 11-20.

16– Cadoret, J.-P. and O. Bernard, 2008, La production de biocarburant lipidique avec des microalgues: promesses et défis. Journal de la Société de Biologie, **202**(3): p. 201-211.

17– Carriquiry, M.A., X .Du, and G.R. 2011, Timilsina, Second generation biofuels: Economics and policies. Energy policy, **39**(7): p. 4222-4234.

18– Chisti, Y., Fuels from microalgae. 2010, Taylor & Francis. p. 233-235.

19– Alam, F., S. Mobin, and H. Chowdhury, 2015,Third generation biofuel from algae. Procedia Engineering, **105**: p. 763-768.

20– Alam, F., et al. 2012, Biofuel from algae-Is it a viable alternative? Procedia Engineering, **49**: p. 221-227.

21– Dutta, K., A. Daverey, and J.-G. Lin, 2014, Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation. Renewable energy, **69**: p. 114-122.

22– MOUNIA, M.B. 2015, CONTRIBUTION A L'ELABORATION D'UN DISPOSITIF PRODUISANT DU BIOGAZ-METHANE, in DEPARTEMENT

ALIMENTATION EN EAU POTABLE, MEMOIRE DE MASTER., ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah

23– برنامج الأمم المتحدة الإنمائي، الدليل الارشادي للبرلمانين من أجل الطاقة المتجددة https://www.agora-parl.org/sites/default/files/agora-documents/renewable_energy_user_guide_ar_jan2015.pdf

24– Hess, J. 2007, Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation ،.Université Nice Sophia Antipolis.

25– الأخضر بن عمر، عبد الكريم أمحمد بوغزالة،2017: إنتاج الوقود الحيوي، الفرص والمخاطر مع الإشارة إلى حالة الجزائر. Journal of Quantitative Economics Studies,. **3**(1).

الفصل الثاني:

الغاز الحيوي (البيوميثان)

المقدمة:

يقود الاستخدام غير العقلاني الحالي للوقود الأحفوري وتأثير غازات الاحتباس الحراري على البيئة البحث في إنتاج الطاقة المتجددة من الموارد العضوية والنفايات. الطلب العالمي على الطاقة مرتفع، ويتم إنتاج معظم هذه الطاقة من الموارد الأحفورية. تشير الدراسات الحديثة إلى أن الهضم اللاهوائي Anaerobic Digestion (AD) هو تقنية بديلة فعالة تجمع بين إنتاج الوقود الحيوي والإدارة المستدامة للنفايات[1].

في هذا الفصل سنستهدف موضوع تقنية انتاج الغاز الحيوي ومصدره الرئيسي (الكتلة الحيوية إلى جانب النفايات العضوية) وكذلك استغلال العديد من الدول لطاقة الغاز الحيوي.

II .1. تعريف الغاز الحيوي

الغاز الحيوي هو غاز قابل للاشتعال[2]، هو خليط يتكون أساسا من الميثان CH_4 وثاني أكسيد الكربونCO_2 بالإضافة إلى بعض المكونات الأخرى، الناتج من تحلل المواد العضوية(أصل حيواني أو نباتي)، بواسطة الكائنات الحية الدقيقة(البكتيريا البدائية الميثانوجية) في ظل ما يسمى بالظروف "اللاهوائية"، أي في غياب الأكسجين. حيث تنتج هذه البكتيريا الميثان المحفوظ في التضاريس الرسوبية الذي يستخرج على شكل غاز طبيعي، هذه الظاهرة يمكن ملاحظتها على نطاق واسع في الطبيعة.

كان العالم الإيطالي أليساندرو فولتا (1745-1823م) أول من وصف وتوصل إلى تحليل تركيبة "غاز المستنقعات". في عام 1776م حيث تمكن من عزل مكونه الرئيسي وهو الميثان[3].

II .1.1. مكونات الغاز الحيوي:

يتكون الغاز الحيوي بشكل أساسي من غاز الميثان بنسبة (50-75٪) وغاز ثاني أكسيد الكربون بنسبة (45-25٪)، إضافة إلى وجود بعض العناصر بنسب ضئيلة (أقل من 2٪) تتمثل في: كبريتيد الهيدروجين (H_2S) ،الهيدروجين (H_2) ،الماء (H_2O) ،الأكسجين (O_2) ،الأمونيا (NH_3) والنيتروجين (N_2)، وهو مشبع عمومًا ببخار الماء. يمكن استخدام النفايات السائلة للماشية كمدخلات لإنتاج الغاز الحيوي من خلال عملية المعالجة بالميثان حيث إنها بواعث رئيسية للميثان (الملاط) وأكسيد النيتروز (السماد الصلب)، وهما غازان من غازات الدفيئة (Gaz à effet de serre). ومع

ذلك لا يزال من الممكن إنتاج الغاز الحيوي باستخدام مواد عضوية أخرى غنية بالدهون أو السكريات مثل محاصيل الطاقة (علف الذرة)، والنفايات المنزلية والدهون (بقايا من مصانع تجهيز الأغذية أو المسالخ)[4].

- **الميثان CH_4**: يعطي نسبة الميثان لغازات الكتلة الحيوية قيمة حرارية، ويعد أحد المكونات الرئيسية المشاركة في إطلاق الطاقة أثناء الاحتراق. درجة حرارة اشتعال غاز الميثان عند الضغط الجوي في وجود لهب أو شرارة هي 550 درجة مئوية. لذلك فإن اشتعالها الذاتي ليس تلقائيًا، وهو غاز عديم الرائحة واللون[5].
- **ثاني أكسيد الكربون CO_2**: غاز عديم الرائحة واللون أثقل من الهواء، ليس قابل للاشتعال حيث يقلل من محتوى الأكسجين الذي يمكن أن يسبب الاختناق.

وجود ثاني أكسيد الكربون متأصل في الغاز الحيوي، لا يشارك في عملية الاحتراق ولكنه يزيد من نسبة الميثان[6].

- **الأكسجين O_2**: يعمل الأكسجين كعامل مثبط في عملية الهضم اللاهوائي بسبب مشاركة مجموعة من الكائنات الحية الدقيقة اللاهوائية من الأستوجينات والميثانوجينات، حيث يسبب دخول الأكسجين إلى الهاضمات اللاهوائية إلى انخفاض إنتاج الميثان والفشل الكلي للمفاعلات مما يؤدي في بعض الأحيان إلى إضافة مواد كاسحة للأكسجين (مثل كبريتيد الصوديوم) وعلى العكس من ذلك حيث لوحظ تحسن التحلل المائي للمواد الجسيمية في AD في وجود الأكسجين.[5].
- **الهيدروجين H_2**: يساهم الهيدروجين في تقليل مؤشر الميثان بشكل كبير. الهيدروجين هو وقود تكون سرعة انتشار اللهب فيه عالية للغاية: 260 سم / ثانية (في ظل الظروف القياسية) ، يجب اتخاذ احتياطات خاصة للاستخدام لاستعادته. على سبيل المقارنة، تبلغ نسبة الغاز الطبيعي (المشابه بالميثان) 37 سم / ثانية.
- **أول أكسيد الكربون CO**: يؤدي المحتوى العالي من أول أكسيد الكربون (غاز عديم الرائحة واللون) إلى تسمم غازات التحويل إلى غاز. حتى في التركيزات المنخفضة، يمكن أن يحل محل الأكسجين في عملية التنفس ويسبب الاختناق[5].
- **كبريتيد الهيدروجين (H_2S)**: هو غاز ذو رائحة مميزة (يمكن اكتشافه من 0.7 جزء في المليون، من 150 جزء في المليون يمنع حاسة الشم)، أثقل من الهواء، قابل للاشتعال وسام للغاية. يسبب الغثيان والصداع والقيء. عند التركيزات العالية (> 700 جزء في المليون) فإنه يؤثر على الجهاز العصبي المركزي ويسبب الوفاة.

- **مركبات النيتروجين(NH_3)**: يؤدي وجود النيتروجين في الغاز الحيوي إلى تسريع وتضخيم الاحتراق مما يؤدي إلى إجهاد حراري يمكن أن يؤدي إلى ذوبان المكابس وتسخين الحاقنات، أحد تأثيرات NH_3 هو أن يتأكسد تمامًا إلى أكاسيد النيتروجين أثناء الاحتراق، مما قد يكون له تأثير كبير على الانبعاثات الملوثة [6].

II .2.1. مصادر الغاز الحيوي:

للغاز الحيوي عدة مصادر منها:

- الحمأة الناتجة عن محطات معالجة مياه الصرف الصحي (Sludge from wastewater treatment plants). يأتي الغاز الحيوي من المواد العضوية الموجودة في مياه الصرف الصحي. وهو غاز غني بالميثان وكبريتيد الهيدروجين ولكنه غني بالمركبات العضوية المتطايرة والمعادن الثقيلة الناتجة عن تجميع المياه الملوثة بغسل الطرق بالمطر.
- الغاز الحيوي الصناعي أو الزراعي (من الصناعات الغذائية الزراعية، وروث الماشية).
- الغاز الحيوي من وحدات معالجة الميثان المحددة المرتبطة بالتسميد. عادة، لا يوجد غاز حيوي في حالة التسميد، لأن الأخير يتطلب، على عكس المعالجة بالميثان، معالجة بإضافة الهواء. ولكن توجد اليوم عمليات مختلطة تجعل من الممكن إنتاج كل من الأسمدة العضوية والغاز الحيوي.
- الغاز الحيوي من مراكز التخزين (Biogas from storage centers). تنتج مدافن النفايات غازًا حيويًا بشكل تلقائي لأن النفايات القابلة للتخمير تترسب هناك، ولكن هذا الغاز عشوائي جدًا في تكوينه بسبب عدم انتظام مدخلات النفايات من حيث الكمية والنوعية. يمكن إنتاج الغاز الحيوي بمعدلات مختلفة، على مدى عدة (عشرات) السنين[6].

يترتب عن الوجود النفايات وعدم استغلالها إلى وجود مشاكل وآثار السلبية على البيئة، وهذا مايؤدي إلى وجوب معالجتها عن طريق إعادة استخدامها أو إعادة تدويرها، أو عن طريق عملية الدفن المنتجة للغاز الحيوي إذ تعتبر النفايات من أهم مصادر إنتاجه.

تعرف النفايات على أنها " أي مخلفات من عملية إنتاج أو تحويل أو استخدام" (المادة 3 من قانون 12 ديسمبر 2001)، وكذلك حسب منظمة الصحة العالمية النفايات أو مايعرف بالمخلفات هي كل مادة يقوم صاحبها أو مالكها بالتخلص منها. (المادة 3 من قانون 12 ديسمبر 2001)[7، 8].

يتم استخدام العديد من تصنيفات النفايات حاليًا:

- ✓ اعتمادًا على طبيعة النفايات والمخاطر التي تشكلها على الناس والبيئة: النفايات الخطرة والنفايات غير الخطرة؛
- ✓ اعتمادًا على أصل النفايات: النفايات البلدية وما شابهها، نفايات الأنشطة الاقتصادية، بما في ذلك النفايات الواقعة تحت المسؤولية الموسعة للمنتِج.

حيث يتم تصنيفها على أنها:

- **نفايات خطرة**: هي التي تحتوي على كميات متفاوتة من العناصر السامة الضارة بالكائنات الحية والبيئة. هذه النوعية لا تفترض أن أصلها يمكن أن يكون محليًا أو صناعيًا أو زراعيًا.
- **نفايات غير خطرة**: يتم تعريف النفايات غير الخطرة افتراضيًا فيما يتعلق بالنفايات السابقة بأنها تلك التي لا تقدم أيًا من الخصائص التي تجعل النفايات خطرة.
- **النفايات الحيوية**: تتعبر ضمن النفايات غير الخطرة، حيث " تعرف بأنها نفايات قابلة للتحلل البيولوجي مثل نفايات طعام، تنشأ بشكل خاص من المنازل، المطاعم، متعاهدو الطعام، أو متاجر البيع بالتجزئة".
- **النفايات الخاملة**: هي نفايات لا تخضع لأي تعديل فيزيائي أو كيميائي أو بيولوجي كبير، وكذلك لا تحلل بيولوجيا ولا تحترق ولا تنتج أي تفاعل (فزيائي أو كيميائي)، أيضا لا تتلف المواد التي تلحق الضرر بالبيئة أو صحة الإنسان.
- **النفايات البلدية**: النفايات المنزلية وما يماثلها: وفقًا لقانون البيئة، فإن "النفايات المنزلية" هي "نفايات خطرة أو غير خطرة يكون منتجها الأولي منزليًا". على الرغم من أن هذا التعريف يميز فقط النفايات المنزلية بشكل منفصل، إلا أنه يجب الاعتراف بأنه عمليًا لا يتم معالجتها بمفردها، والتي تشمل النفايات التي تنتجها المنازل وبعض النفايات من الأنشطة الاقتصادية.
- **النفايات البلدية الأخرى**:

- النفايات من المساحات الخضراء (حوالي 1 مليون طن / سنة).
- نفايات تنظيف الطرق العامة.
- النفايات المتعلقة بالسيارات (الإطارات والزيوت والجثث)؛
- نفايات الصرف الصحي الجماعية (الحمأة من محطات معالجة مياه الصرف الصحي، 9 مليون طن في عام 2012)[9].

كما يمكن القول أن للنفايات نطاق واسع وهذا قد يسبب في تأثيرها على البيئة والصحة العامة:

- **على البيئة** :

– **التلوث البيولوجي**: وتتميز مظاهره بانتشار العوامل الممرضة التي يفضلها وجود مخلفات عضوية متحللة. لطالما كانت ملوثات هذا الفضاء موجودة ، لكنها أصبحت مقلقة بشكل خاص خلال العقود الماضية بسبب الفجوة المتزايدة الاتساع التي تتسع من ناحية بين تطورها في علاقة مباشرة مع زيادة السكان وتركزهم في المدن و تطور أسلوب حياتهم، ومن ناحية أخرى، التطور بوتيرة أبطأ بكثير للوسائل المطبقة لتحييدهم.

– **التلوث الفيزيائي والكيميائي**: لطالما كانت ملوثات هذا الفضاء موجودة ، لكنها أصبحت مقلقة بشكل خاص خلال العقود الماضية بسبب الفجوة المتزايدة الاتساع التي تتسع من ناحية بين تطورها في علاقة مباشرة مع زيادة السكان وتركزهم في المدن و تطور أسلوب حياتهم ، ومن ناحية أخرى ، التطور بوتيرة أبطأ بكثير للوسائل المطبقة لتحييدهم.

– **على الصحة العامة**:

– النفايات القابلة للتحلل هي السبب الرئيسي للأمراض التي يسببها التلوث البيولوجي، ولا سيما بسبب النفايات المنزلية: الحيوانات الضالة التي تجد طعامها هناك ثم تحمل جميع أنواع الطفيليات أو مسببات الأمراض الأخرى التي تعتبر عوامل نقل الأمراض المعدية و / أو المميتة.

ويمكن تثمين هذه النفايات من خلال معالجتها، فوفقا لقانون 01-19 أن استعادة النفايات هي جميع عمليات إعادة استخدام النفايات أو إعادة تدويرها أو تحويلها إلى سماد أو مادة أخرى[8].

وهو عملية تهدف إلى انقاص الكمية المتجمعة من النفايات، حيث يعبر عن مجموع الإجراءات المتبعة من الأجل الاستفادة من النفايات تحت شروط ومعايير بيئية معينة[10].

تكمن أهمية تثمين أو إعادة تدوير النفايات إلى العديد من الجوانب منها الجانب البيئي، الاقتصادي، الاجتماعي والجانب الصحي، ونذكر في ما يأتي تأثير تثمين النفايات على كل من هذه الجوانب:

- **الأهمية البيئية** : تقليل نسبة التلوث بأنواعه عن طريق تخفيض تراكم النفايات التي تساهم بشكل كبير في تلوث البيئة بسبب إصدار الغازات الملوثة والعناصر السامة إلى الهواء و المياه و التربة، وكذلك تؤدي إلى تخفيض أثر النشاط الإنساني على كوكب الأرض.
- **الأهمية الاقتصادية**: تلعب عملية تثمين النفايات دورا مهما في تخفيض النفقات الاقتصادية حيث يجعل لها قيمة مالية معتبرة وذلك باتباع طرق محددة.
- **الأهمية الاجتماعية**: تقليل نسبة البطالة عن طريق توفير فرص عمل لجمع وفرز النفايات الصلبة، حيث تنمي الحس بالمسؤولية لأفراد المجتمع اتجاه البيئة وماتقدمه من خيرات.
- **الأهمية الصحية**: توفر بيئة سليمة ونظيفة خالية من الروائح الكريهة والحشرات الضارة، الحد من الأمراض الناتجة عن تراكم النفايات.

يمكن استخدام مجموعة كبيرة من أنواع النفايات كركائز لإنتاج الغاز الحيوي باستخدام تقنية (AD). يتم جمع كميات كبيرة من نفايات اللجنوسليلوز من الأنشطة الزراعية والبلدية وغيرها.

II .2. المكونات الأساسية للكتلة الحيوية

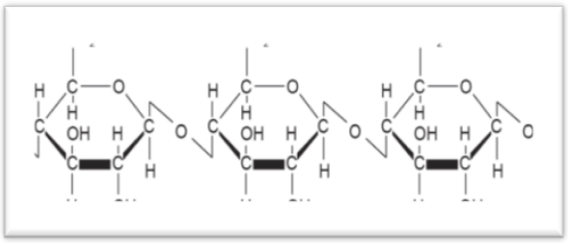
تحتوي الكتلة الحيوية على الكربوهيدرات والبروتينات والدهون والسليلوز والهيميسليلوز، التي يمكن استخدامها كمواد وسيطة لإنتاج الغاز الحيوي. عادة ما يتم إضافة ركائز مشتركة لزيادة المحتوى العضوي ومنه تحقيق إنتاجية أعلى للغاز. تشمل هذه الركائز النفايات العضوية من الصناعات ذات صلة بالزراعة، ونفايات الطعام، ويعتمد تكوين وإنتاج الغاز الحيوي على

نوع المادة الأولية والركيزة المشتركة[1]،توفر الدهون أعلى ناتج للغاز الحيوي، ولكنها تتطلب وقتا طويلا للاحتفاظ بها نظرا لقلة توافرها الحيوي، تظهر الكربوهيدرات والبروتينات معدلات تحويل أسرع بكثير ولكن بإنتاجية أقل من لغاز الحيوي[11].

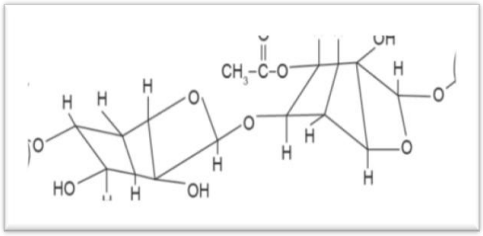
II .1.2. المكونات الجزيئية Lignocellulosic:

وتشمل نفايات السليلوز مثل محاصيل الطاقة والمخلفات الزراعية وحمأة الصرف الصحي، والتي لديها إمكانات كبيرة لإنتاج الوقود الحيوي. يتكون اللجنوسليلوز من ثلاثة مكونات عضوية رئيسية: السليلوز، والهيميسليلوز، واللجنين.

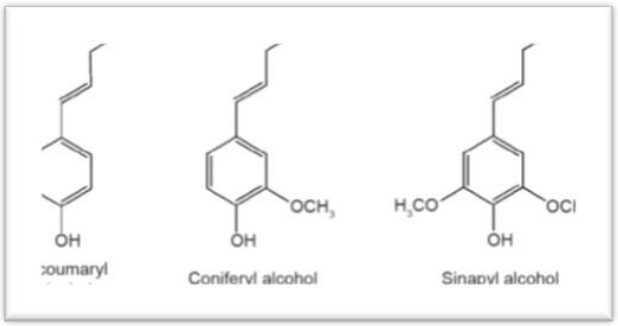
- **السليلوز**: السليلوز هو مكون هيكلي أساسي يرتبط بالقوة الميكانيكية لجدران الخلايا النباتية، وهو عبارة عن بوليمر خطي مرتبط بعدة روابط β-1،4-glycosidic. يحتوي هيكلها على أجزاء ذات هيكل بلوري وأجزاء ذات ترتيب غير متبلور، السليلوز هو المركب العضوي الأكثر وفرة على وجه الأرض ويشكل أكثر من 25٪ من الكتلة الحيوية النباتية.
- **الهيميسليلوز**: هو هيكل معقد وقابل للتغيير يتكون من بوليمرات مختلفة مثل البنتوز (زيلوز، أرابينوز)، hexoses (مانو، جلوكو، وجلاكتوز)، وأحماض سكر / يورونيك (غلوكورونيك، جالاكتورونيك، وحمض ميثيل جالاكتورونيك). ويختلف تركيبه بإختلاف أصل المادة الوسيطة ويتطلب مجموعة من الإنزيمات المتنوعة ليتم تحللها إلى مونومرات حرة، يشكل الهيميسليلوز رابطًا بين جزيئات اللجنين والسليلوز، مما يزيد من انضغاط شبكة السليلوز-هيميسيلولوز-اللجنين بأكملها. ترتبط قابلية ذوبان مركباته المختلفة ارتباطا مباشرا بدرجة الحرارة، ومنه الذوبان يكون مرتبط بمعايير مختلفة مثل درجة الحرارة (الحساسية الحرارية الكيميائية)، ودرجة الحموضة (أي البيئة الحمضية أو القلوية)، ومحتوى الرطوبة.
- **اللجنين**: هو عبارة عن بوليمر غير متجانس موجود بشكل طبيعي لجدار الخلية. هيكلها معقد لأنه يتكون من ثلاث وحدات أساسها فينيل بروبان (كحول ب-كوماريل، كحول كونيفريل، وكحول سينابيل) والتي يتم تجميعها معًا بواسطة روابط، اللجنين مكون هام من مكونات الخشب يشكل (30٪ - 60٪)، تحتوي المخلفات الزراعية والأعشاب على(5٪ -30٪)من اللجنين، في حين أن بقايا المحاصيل تتكون أساسًا من الهيميسليلوز. وتؤثر خصائص اللجنين مثل التركيبة والهيكل إيجابيا على عملية التحلل المائي وبالتالي زيادة كفاءة إنتاج الغاز الحيوي. ومع ذلك فإن محتوى اللجنين العالي في الكتلة الحيوية يؤدي إلى انخفاض كفاءة التحلل[1].



الشكل II .1: هيكل السلسلة الجزئية لسيليلوز



الشكل II .2: هيكل السلسلة الجزئية للهيميسليلوز



الشكل II .3:الوحدة الهيكلية الأساسية للجنين

II .3. إنتاج الغاز الحيوي

يتم تحلل المواد العضوية (الكتلة الحيوية) في خطوتين أساسيتين. المرحلة الأولى هوائية والثانية لاهوائية. يحدث التحلل الهوائي بمجرد دفن النفايات، في وجود الأكسجين، يليه التحلل اللاهوائي في غياب الأكسجين، لفترة أطول من الوقت[6].

- **الهضم**: إنه ناتج بقايا الهضم اللاهوائي، ويتكون من مواد عضوية غير قابلة للتحلل (اللجنين)، ومواد معدنية (نيتروجين، وفوسفور)، وبكتيريا زائدة. يختلف تكوين الهضم وفقًا للمدخلات ولكن أيضًا وفقًا لظروف تشغيل الجهاز الهضمي.

يحتوي الهضم على الخصائص التالية:

- قلة الرائحة بسبب هضم المواد العضوية المسؤولة عن الإزعاج الشمي.
- تقليل الجراثيم المسببة للأمراض بفضل النظافة.
- تعديل القيمة المحتجزة حيث لا يتم مهاجمة الجزء الخشبي الذي يساهم في تكوين الدبال.
- تحسن قيمة التسميد، حيث يوجد النيتروجين في صورة نشادر، يسهل على النباتات امتصاصه. ومع ذلك، فإن حالتها الأكثر تقلبًا لها عواقب على طرق التخزين والانتشار.
- ظهور سائل أكثر من الطين غير المعالج، فهو يخترق التربة بسرعة أكبر[12].

II .1.3. الهضم الهوائي:

تستمر هذه المرحلة لبعضة أسابيع أو أشهر، تتضمن استهلاك الأوكسجين الموجود في النفايات عند الدفن، تتحلل المادة العضوية البوليمرية بواسطة الكائنات الحية الدقيقة إلى أوليغومرات ومونومرات التي تحلل بعد ذلك مع إنتاج ثاني أكسيد الكربون و H_2Oوطاقة، تستخدم هذه الطاقة في زيادة الأسية في العدد[6].

II .2.3. الهضم اللاهوائي:

هو عملية بيولوجية لتحلل المواد العضوية بواسطة الكائنات الحية الدقيقة، وهو عملية تحدث في غياب الأوكسجين، ويتم إجراء "الهضم" أو "التخمير" اللاهوائي في عبوات مغلقة أو أجهزة هضم يتم فيها تحسين تفاعلات التخمير والتحكم فيها[13].

II .3.3. المراحل البيوكيميائية للمعالجة بالميثان:

- **التحلل المائي**: وهي عملية تحطيم الجزيئات العضوية المعقدة مثل الكربوهيدرات والدهون والبروتينات باستخدام الإنزيمات إلى جزيئات بسيطة: سكريات، أحماض أمينية وأحماض دهنية. يكون التحلل المائي للسليلوز والدهون بطيئًا في بعض الأحيان ويمكن أن يحد من معدل التحلل الإجمالي بواسطة عملية الميثان.
- **تكوين الحمض**: تسمى أيضا بمرحلة التخمر، وهي تحول المونومرات الناتجة من التحلل المائي إلى أحماض عضوية قصيرة السلسلة (2 إلى 6 ذرات كربون)، الأحماض الرئيسية المنتجة هي حمض الأسيتيك وحمض البروبيونيك وحمض الزبد، تؤدي هذه المرحلة إلى تحمض البيئة، ويكون توليد الحمض سريع بشكل عام بسبب معدل النمو المرتفع للبكتيريا المعنية. ويتم انتاج أيضا من هذه المرحلة ثاني أكسيد الكربون، الهيدروجين، النيتروجين والأمونيا.
- **التوليف (تكوين الأسيتات)**: يتم في هذه المرحلة تحويل المركبات المختلفة الناتجة عن المرحلة السابقة إلى سلائف مباشرة للميثان: الأسيتات من ناحية وثاني أكسيد الكربون وكذلك الهيدروجين من ناحية أخرى. تسمح هذه المرحلة بالنمو السريع لبكتيريا معينة ولا تحد من معدل التحلل[4].
- **توليد الميثان**: يتم ضمان تكوين الميثان من خلال مسارين:

✓ من الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون باستخدام البكتيريا المغذية للهيدروجين بعد التفاعل:

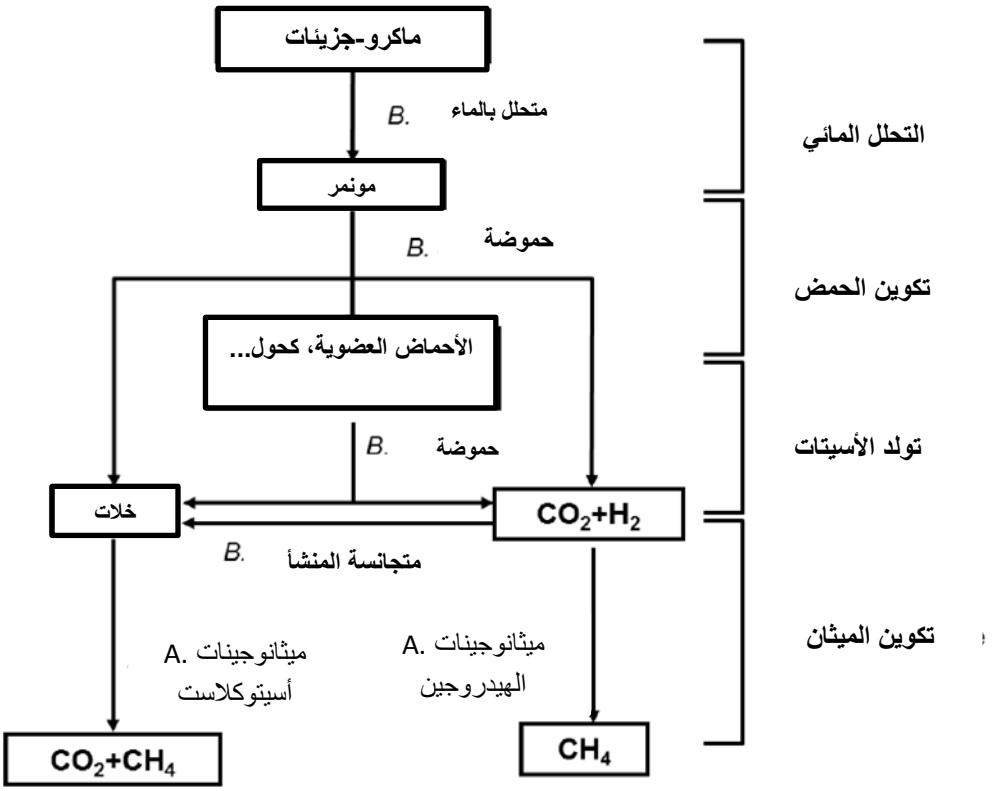
$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad (-567\ Kj.mol^{-1})$$

✓ ومن أسيتات البكتريا الخفية بعد التفاعل:

$$CH_3COOH + H_2O \longrightarrow CH_4 + H_2CO_3 \qquad (-130\ Kj.mol^{-1})$$

يعتبر أن 70% من إنتاج الميثان يأتي من الأسيتات. يتم إجراء أول مرحلتين من التخمر بواسطة البكتيريا اللاهوائية والهوائية. من ناحية أخرى، فإن عملية تكوين الميثان هي لاهوائية تمامًا.

لذلك يختلف تكوين الغاز الحيوي بمرور الوقت. في مرحلة تكوين الميثان المستقرة، يكون محتوى الميثان حوالي 50 إلى 75% ومحتوى ثاني أكسيد الكربون من 25 إلى 45%، أي نسبة ميثان / ثاني أكسيد الكربون من 1.2 إلى 1.5%، سمة من سمات هذه المرحلة. في السابق، يمكن أن ترتفع هذه النسبة إلى 2% في نهاية التخمير، تقل[14].



الشكل II .4: الخطوات الرئيسية لعملية الهضم اللاهوائي (A: البكتيريا ؛ B: العتائق)

II .4.3. الكيمياء الفيزيائية للهضم اللاهوائي:

يتأثر تكوين الميثان بالعديد من العوامل البيئية منها:

- **البكتيريا**: تصنف البكتيريا إلى أربع أنواع حسب نوع المادة الخام المستخدم:

- **بكتيريا التحلل والتخمر**: تحول المركبات العضوية (كالكربوهيدرات والبروتينات والدهون) إلى سكريات ونشويات وأحماض أمينية وأحماض دهنية عليا ومركبات متعادلة ومركبات أبسط كحامض الخليك ومركبات أحادية الكربون زائد الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون.
- **بكتيريا منتجة للهيدروجين والخلات**: تحول منتجات المجموعة السابقة من البكتيريا كالأحماض الدهنية الأعلى من الخليات كالبروبيوتيك والبيوتريك والمركبات المتعادلة كالإيتانول والبروبانول إلى هيدروجين وخلات.
- **بكتيريا منتجة خلات**: هذا النوع يعمل على نطاق واسع من المركبات العضوية أحادية أو متعددة ذرات الكربون ويحولها إلى حامض خليك.
- **بكتيريا منتجة الميثان**: تستخدم الهيدروجين، ثاني أكسيد الكربون، الخلات، الميثانول، أول أكسيد الكربون لإنتاج غاز الميثان[14].

- **الحرارة**: إن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة كفاءة المعالجة بالميثان لأن ظاهرة الميثان ليست مؤكسدة للغاية وبالتالي فهي ليست طاردة للحرارة. من ناحية أخرى، فإن هذه الزيادة في الكفاءة ليست خطية، ولكنها تعرض مناطق درجة حرارة مثالية. يعد الحفاظ على درجة الحرارة داخل أحد هذه النطاقات أمرًا ضروريًا لكفاءة العملية[8].

ووفقا لمدى درجة الحرارة يكون نمو الكائنات الحية، وينقسم إلى ثلاث فئات:

- ✓ يهمن تأثير الكائنات الحية الدقيقة بين 4-20 درجة مئوية، مع نمو أمثل حوالي 15 درجة مئوية.
- ✓ تهيمن الفصيلة المتوسطة والميسوفيلات بين 20-45 درجة مئوية مع درجة قصوى تبلغ حوالي 37 درجة مئوية.
- ✓ تهيمن الحرارة بين 55-70 درجة مئوية، مع درجة حرارة مثالية تبلغ حوالي 60 درجة مئوية[15].

- **الرطوبة:**

يعتبر الأكسجين O_2 سامًا للبكتيريا اللاهوائية الصارمة مثل البكتيريا المولدة للأسيتات والميثانوجين. لذلك من الضروري تجنب أي دخول للهواء من خلال العمل على سبيل المثال في ظروف الفيضانات، في حين أن الرطوبة لها تأثير كبير على عمل البكتيريا، وبالتالي فإن الميثان عملية مناسبة بشكل خاص للنفايات عالية الرطوبة، وتظهر الدراسات أن مستويات الرطوبة التي تزيد عن 60٪ تزيد من إنتاج الغاز، والتي تصل بحد أقصى إلى حوالي 80٪[8].

- **درجة الحموضة pH والقلوية:**

يعتبر أحد أهم معلمات المعالجة بالميثان، حيث يشير الرقم الهيدروجيني المستقر إلى وجود نظام متوازن وميثان فعال. من ناحية أخرى، فإن الاختلافات في درجة الحموضة، في كثير من الأحيان انخفاضها، هي علامات على وجود مشاكل. البكتيريا المولدة للميثان حساسة للغاية للتغيرات في الأس الهيدروجيني: يمكن أن تهدد التغييرات الصغيرة إنتاج الغاز. القيم المثالية للكائنات الدقيقة المولدة للميثان تختلف بين 7.0 و 7.2. يعد خفض الأس الهيدروجيني إلى أقل من 5.0 مميتًا لهذه الكائنات وحتى القيم القريبة من 6.0 غالبًا ما تتسبب في إغلاق العملية[8].

- **العناصر الغذائية:**

تتكون المادة الحية بشكل أساسي من ذرات الكربون والهيدروجين والأكسجين والنيتروجين والفوسفور والكبريت. يجب أن تكون هذه المكونات الأولية موجودة في الركيزة وفقًا لنسب صيغة الكتلة الحيوية التجريبية[15]، فإن النسبة بين الكربون والنيتروجين الموجود في المادة العضوية مهمة للتشغيل السليم للمفاعلات. تشير الدراسات إلى أن النسبة المرغوبة بين 20 و 30، مع كون 25 هي النسبة المثالية. يمكن أن تؤدي زيادة إمداد النيتروجين إلى زيادة إنتاج الأمونيا، والتي يمكن أن تضر الكائنات الحية الدقيقة وتعطل الميثان.

- **نوع النفايات:**

تعد طبيعة النفايات وقابليتها للتحلل البيولوجي أساسًا المعلمات الأساسية في تقدير إمكانات إنتاج الميثان. وبالتالي، كلما زاد الجزء القابل للتحلل الحيوي، زاد إنتاج الغاز.

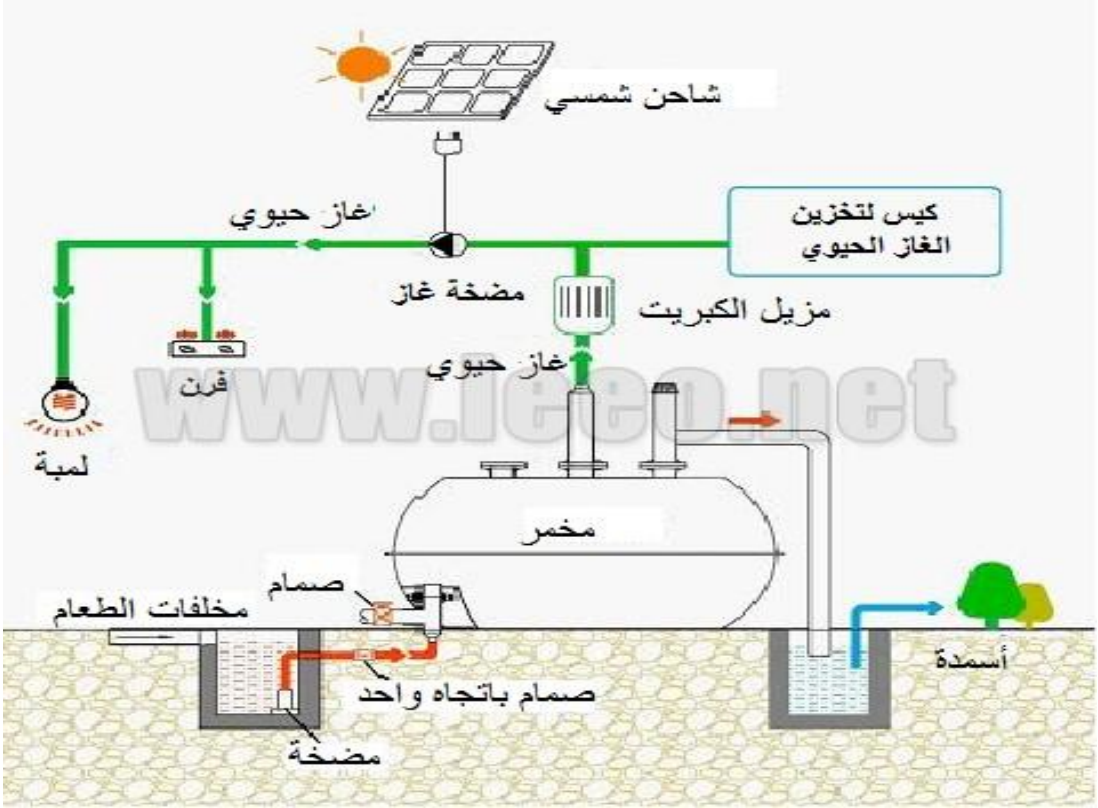
تم تحديد ثلاث فئات رئيسية من النفايات تتميز بمعدل تدهورها:

- ✓ **سريع التحلل البيولوجي:** هذه في الغالب جميع المواد القابلة للتعفن، والنفايات الخضراء، والفواكه والخضروات، والمواد الحيوانية.
- ✓ **قابل للتحلل بشكل معتدل:** وتشمل كل ما هو طين أو شحم.
- ✓ **المواد القابلة للتحلل ببطء:** إنها مصنوعة من الورق والكرتون والخشب[8].

II .4. الهاضم اللاهوائي:

يتم انتاج الغاز الحيوي في جميع الأماكن التي يتم فيها تخزين وتراكم المخلفات القابلة للتخمير، الهاضم اللاهوائي (يسمى أيضا المفاعل الحراري أو المخمر)، هو في الأساس عبارة عن خزان مغلق ومحكم ويفضل أن يكون معزولا حراريا من الخارج ومحروما كليا أو جزئيا من التهوية المستمرة. حيث تتناوب الأنواع البكتيرية المختلفة على تحلل المركبات العضوية للنفايات أو النفايات السائلة.

قبل الاستثمار في عملية الهضم اللاهوائي، من الضروري إجراء دراسة فنية واقتصادية. يجب أخذ العديد من المعلمات في الاعتبار عند تحجيم جهاز الهضم: طبيعة النفايات السائلة المراد معالجتها (صلبة، قابلة للذوبان، إلخ)، تركيزها (الحمل العضوي)، محصول التنقية المتوقع، طريقة الاسترداد، الغاز الحيوي، ...[2، 13، 15].



الشكل II .5: مصنع الغاز الحيوي

- **أنظمة الهضم المختلفة:**

يتكون جهاز الهضم عمومًا من خزان مغلق ومحكم الإغلاق ويفضل أن يكون معزولًا حرارياً من الخارج. يختلف اختيار الهاضم حسب نوع النفايات المراد معالجتها والاستخدام المقصود.

يمكن تصنيف الهاضمات حسب:

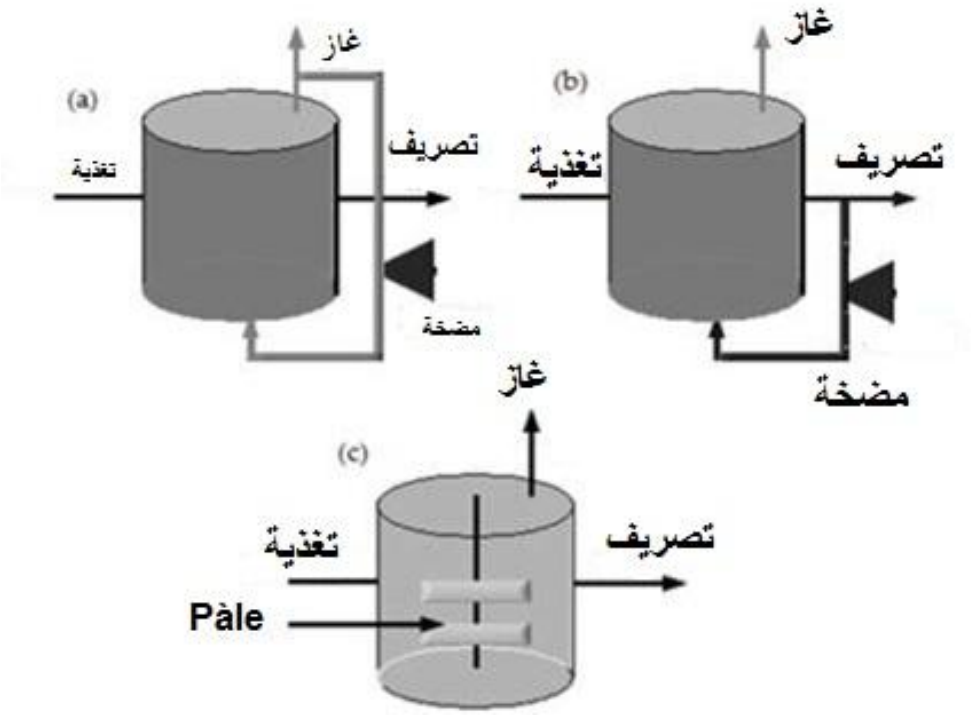
- **أسلوب التغذية:** دفعي، مستمر أو شبه مستمر.
- **نوع الركيزة:** صلبة أو شبه صلبة أو سائلة.
- **الطريقة المختارة:** لضمان الحفاظ على كتلة حيوية كبيرة وأطول فترة بقاء ممكنة للكائنات الدقيقة، ولتحسين التلامس بين الكتلة الحيوية والركيزة المراد معالجتها،
- **عدد المراحل:** مرحلة واحدة أو مرحلتين اعتمادًا على ما إذا كان تكوين الميثان والتولد الحمضي يحدثان في نفس المفاعل أو في خزانين منفصلين؛ فصل خطوات العملية البيولوجية.

- **هضم نوع الدفعة:**

جهاز الهضم المتقطع أو الدفعي: بناء بسيط، يتكون وضع التشغيل من ملء جهاز الهضم بالمواد العضوية للهضم، ووقت الاحتفاظ هو دالة لدرجة الحرارة وعوامل أخرى، وعند التفريغ يمكن إعادة بدء العملية مرة أخرى.

- **النوع الهاضم المستمر:**

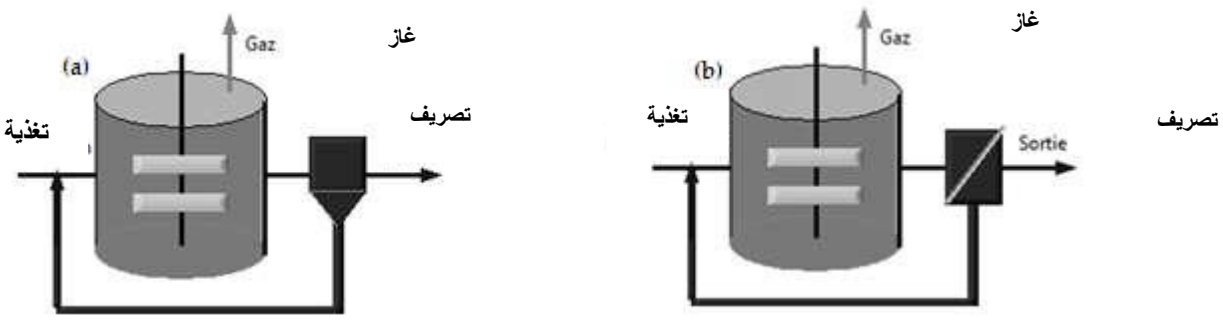
يتم هضم الركيزة التي يمكن إدخالها باستمرار ونقلها إما ميكانيكيا أو تحت ضغط مدخلات جديدة للمخرجات مثل الهضم. يوجد ثلاث أنواع من أجهزة الهضم المستمرة: نظام الخزان العمودي ونظام الخزان الأفقي و نظام "الخزانات المتعددة"، نميز بالنسبة للهضم نع التغذية المستمرة العائلات التالية:



الشكل II .6:أجهزة الهضم اللاهوائية المختلطة بلا حدود ، (a): عن طريق إعادة تدوير الغاز الحيوي ، (b): عن طريق إعادة تدوير الركيزة ، (c): عن طريق الشفرات

- **هضم الثقافة الحرة:** يتم تعليق الكتلة الحيوية في الهاضم، نميز نوعان منه: مفاعلات مختلطة بلا حدود، مفاعلات الاتصال.
- **هاضمات الثقافة الثابتة:** نميز: أنظمة الأسرة الثابتة، وأنظمة الأسرة المميعة.

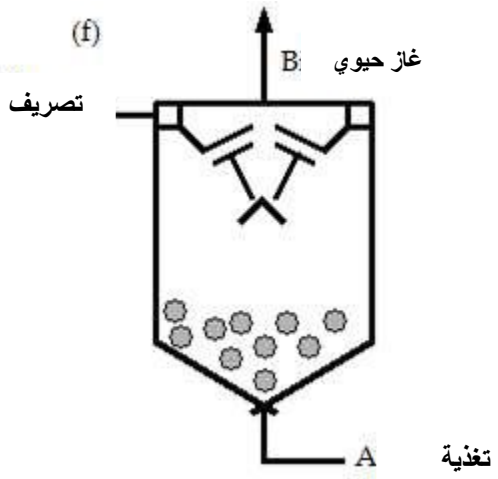
- **مفاعلات الاتصال**



الشكل II .7: تلامس الهضمات اللاهوائية مع الاحتفاظ بالكتلة الحيوية عن طريق: (a) الدورق ، (b): عن طريق الغشاء.

- **أنظمة UASB (مصرف الحمأة اللاهوائية للتدفق الصاعد):**

تتم باستخدام قدرة التلبد الذاتي للكتلة الحيوية في المفاعل و ترسيب الحبيبات، و تتم موازنة التدفقات البكتيرية في المفاعل عن طريق الترسيب مع التدفق التصاعدي للنفايات السائلة المراد معالجتها.



الشكل II .8:الهاضم اللاهوائي UASB

- **الهاضم من النوع شبه المستمر:**

يعمل الهاضم شبه المستمر مع مجموعة من خصائص السابقتين من أجل الاستفادة من مزايا الطرفين[16].

II .1.4. نوع الركائز:

يعتمد هذا التصنيف للهضم على محتوى المادة الجافة من المادة العضوية مما يؤثر على تناسقها.

- صلب بمحتوى مادة جافة> 15٪.

- شبه صلبة أو عجينة يتراوح محتوى المادة الجافة فيها بين 5 و 15٪.
- سائل يحتوي على نسبة جافة أقل من 5٪.

يفضل استخدام العمليات المستمرة أو شبه المستمرة لمعالجة النفايات، حيث يتم الاحتفاظ بمحتوى الهاضم متجانسًا عن طريق الخلط الميكانيكي المنتظم للسائل[12].

II .5. آلية العمل ضمن الهاضم اللاهوائي

توضع المخلفات العضوية في الهاضم ولا يسمح للأكسجين بالدخول الى حيث توجد المخلفات فتقوم البكتيريا بتحليل المخلفات في جو خال من الاكسجين، ينتج عن هذه العملية خليط قابل للاحتراق مكون من غازات الميثان وثاني أوكسيد الكربون (الغاز الحيوي). وينتج أيضا سماد طبيعي معالج على شكل سائل.

يجمع الغاز الناتج في خزانات حيث يبلغ حجم الغاز الناتج ما يعادل 1.5-2.5 من حجم الهاضم نفسه فلو افترضنا ان حجم الهاضم يبلغ الف ليتر فان حجم الغاز الناتج يبلغ حوالي 1500 الى 2500 ليتر من الغاز وتختلف نسبة الميثان في الغاز الناتج اعتمادا على نوع المخلفات المستعملة غير ان النسبة بشكل عام تتراوح ما بين 60-70 % وتحتوي المخلفات التي تبقى بعد انتاج الغاز على النتروجين وهو الذي تحتاجه النباتات، لذلك فان مخلفات عملية الهضم اللاهوائي تستعمل اسمدة للنباتات في المزارع وبهذا الشكل يمكن الاستفادة من المخلفات باعتبارها مصدر طاقة ومصدر اسمدة في ذات الوقت، تعتبر الابقار من افضل الحيوانات في مجال انتاج الغاز من المخلفات[14].

II .6. تقنيات تنقية الغاز الحيوي

تهدف التنقية إلى زيادة نسب الميثان لتحسين خصائص الطاقة لخليط الغاز، في حين أن الزيادة في محتوى الميثان في الغاز الحيوي تعتمد على طريقة الاسترداد المختارة، يحتوي الخليط في أفضل الأحوال على 50 إلى 70% من الميثان وهو قليل جدا لاستخدامه كوقود وحقن في الشبكة التي تتطلب مالا يقل عن 97% من الميثان، يتطلب إنتاج الغاز الحيوي بخصائص قريبة من خصائص الغاز الطبيعي.

ثاني أكسيد الكربون هو الملوث الرئيسي، ولكن الغازات الأخرى يمكن أن تقدم نسبا كبيرة (N_2 أو O_2، H_2، المسؤولة عن الرائحة الكريهة لتحويل الميثان إلى سماد أو النفايات المنزلية)، لذلك يخضع الغاز الحيوي لسلسلة من خطوات التنقية:

- يحتوي الغاز الحيوي المنتج على بخار ماء يجب التخلص منه باستخدام جهاز تنقية وهو عبارة عن مصيدة مياه مثبتة عند أدنى نقطة في الأنبوب،
- يجب بعد ذلك تنقية الغاز الحيوي عن طريق التخلص من H_2S عن طريق تمرير الغاز الحيوي عبر مرشح مصنوع من أكسيد الحديد،
- يتم التخلص من ثاني أكسيد الكربون عن طريق فقاعات الغاز الحيوي في محلول الجير حيث يتم تثبيت ثاني أكسيد الكربون.
- بعد التنقية، يتم قياس كمية الغاز الحيوي باستخدام مقياس ضغط قبل تخزينه في جرس قياس الغاز.
- يتم تحليل الغاز الناتج عن طريق كروماتوجرافيا الغاز (FID) وهي الطريقة الأسرع والأكثر اكتمالاً والأكثر دقة لتحليل النظام الغازي[17].

يمثل الجدول التالي بعض التقنيات لتنقية الغاز الحيوي من مختلف المركبات:

الجدول II .1: تقنيات تنقية الميثان

المركبات المراد التخلص منها	التقنية
الماء	التكثيف أو المبردة، الامتصاص على الجليكول، المناخل الجزيئية
الكبريت	الغسيل بالماء تحت الضغط، الامتزاز على الكربون النشط، إضافة كلوريد الحديد في الموقع، التقنيات البيولوجية، التهوية الدقيقة
الهالوجينات العضوية	امتصاص الكربون النشط
ثاني أكسيد الكربون	الغسل بالماء تحت الضغط، المناخل الجزيئية، فصل الغشاء، الامتزاز على الجليكول، الطحالب الدقيقة

II .1.6.جودة الغاز الحيوي

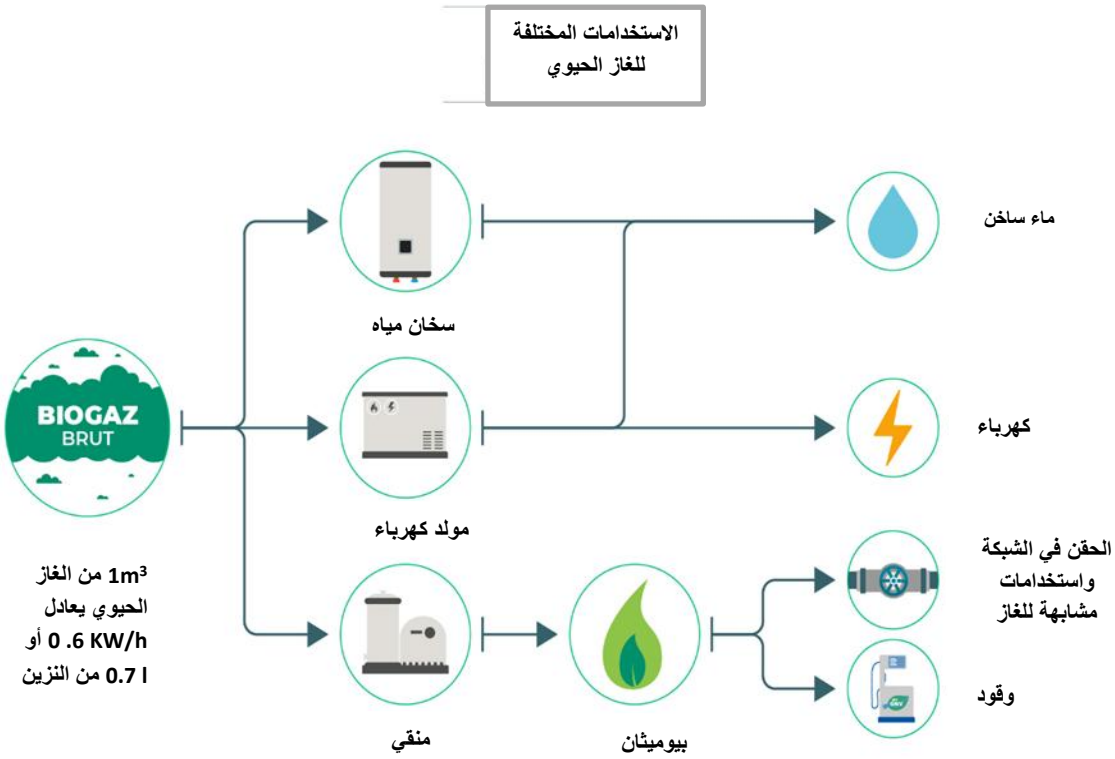
ترتبط جودة الغاز الحيوي ارتباطًا مباشرًا بالمدخلات المستخدمة وظروف الإنتاج. يمكن العثور على العديد من المكونات الأخرى بكميات ضئيلة في الغاز الحيوي مع المركبات الموجودة بشكل رئيسي في الغاز الحيوي وفقًا لمدخلات معينة مستخدمة[16].

الجدول II .2: جدول يوضح تأثير تكوين المدخلات على جودة الغاز الحيوي.

المركبات	متوسط المحتوى في %	تعتمد جودة الغاز الحيوي على المركبات المراد تنظيفها		
		مرتفع	متوسط	منخفض
CH_4	30-60			
CO_2	40-70			
N_2	<10			
O_2	<2			
H_2	أثار			
CO	أثار			
مركبات الكبريت (H_2S، mercaptans)	أثار			
الهيدروكربونات	أثار			
مركبات الهالوجين العضوية	أثار			
مركبات السيليكون العضوية	أثار			
H_2O	متشبع			
جزيئات	أثار			

II .7. استخدامات الغاز الحيوي

الغاز الحيوي قابل للتحويل إلى جميع أشكال الطاقة القابلة للاستخدام (الحرارة والكهرباء والوقود). أيضا، يمكن استخدامها في حالتها الخام، دون تنقيتها مسبقا. من هذا، على المستوى المالي بشكل خاص، تصبح الغاز الحيوي مفيدا وتنافسيا مقارنة ببقية الطاقات. يتم تخزينها عند الضغط المنخفض وعلى مسافة توزيع قصيرة، وبالتالي توفر الغاز الحيوي المعدات التقليدية التي لا تتطلب ضغطا مرتفعا. دفعت المزايا التي يقدمها قطاع الكتلة الحيوية في مركز تطوير الطاقات المتجددة إلى الاهتمام به[16].



الشكل II .9: مختلف استخدامات الغاز الحيوي

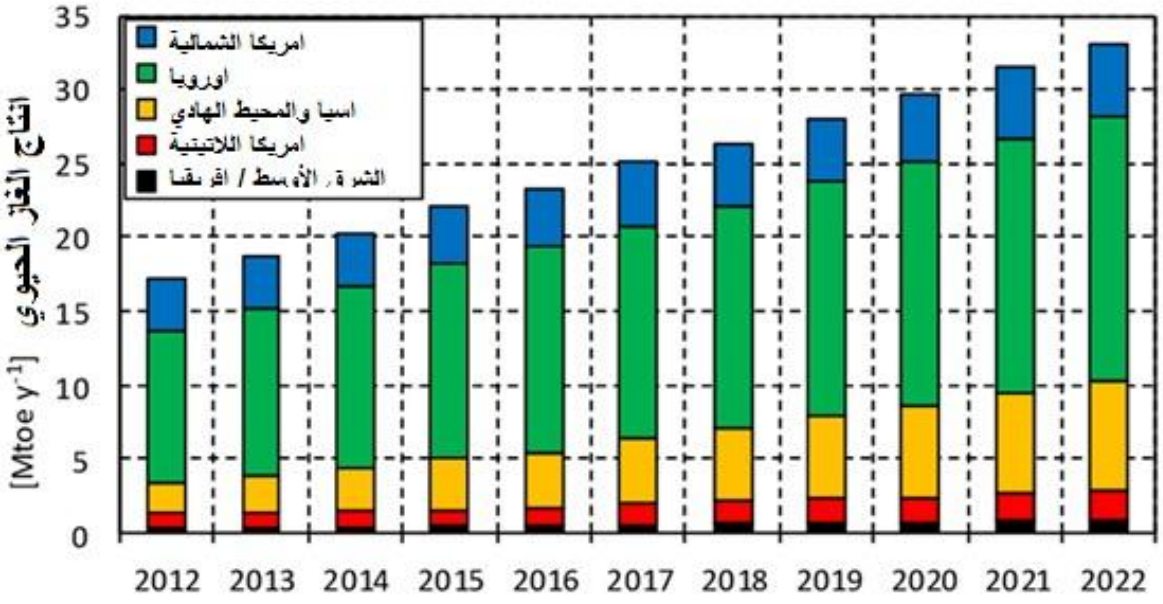
II .8. مكانة الغاز الحيوي في العالم

يكتسب الاهتمام العالمي بمصادر الطاقة المتجددة، حيث ينمو إنتاج الغاز الحيوي بشكل دائم ومستمر، تقوم العديد من الدول بإنشاء مصانع لإنتاج الغاز الحيوي والحصول عليه.

يُعد الاتحاد الأوروبي رائدًا عالميًا في مجال الغاز الحيوي، بإنتاج قدره 10،085.8 كيلو طن في العام (في عام 2011) من حيث الطاقة الأولية، وهو ما يمثل حوالي 60 % من الإنتاج العالمي. ألمانيا هي الدولة العضو في الاتحاد الأوروبي التي

حققت أكبر تقدم في هذا المجال بإنتاج يصل إلى 5،067.6 كيلو طن في العام، منها حصة تبلغ 4،414.2 كيلو طن في العام تنتج عن عمليات الهضم اللاهوائي. المملكة المتحدة هي ثاني أكبر منتج لها 1.764.8 كيلو طن في العام، ويتم تحديدها بنسبة 84% بواسطة الغاز الحيوي لطمر النفايات والباقي عن طريق الغاز الحيوي المنتج في محطات معالجة مياه الصرف الصحي (هضم الحمأة). إيطاليا (1،095.7 كيلو طن في سنة) وفرنسا (349.6 كيلو طن في سنة) في قائمة أكبر المنتجين. يقدر الإنتاج في عام 2020 بنحو 28.0 مليون طن في السنة وفقًا للخطط الوطنية للطاقة المتجددة للاتحاد الأوروبي. يتم توجيه استخدامات الغاز الحيوي بشكل أساسي لإنتاج الكهرباء والحرارة. ومع ذلك، هناك العديد من حالات تحويل الغاز الحيوي إلى ميثان حيوي يتم حقنه في شبكات الغاز الطبيعي أو استخدامه كوقود حيوي في المركبات.

يوضح الشكل الدور الرائد للاتحاد الأوروبي في إنتاج الغاز الحيوي العالمي في عام 2012 واتجاهه حتى عام 2022 في عام 2012، بلغ هذا الإنتاج 17200 كيلو طن في السنة: حوالي 60% أعطته أوروبا (حوالي 10500 كيلو طن في السنة)، بينما مساهمة أمريكا الشمالية محدودة بحوالي 22.0٪. أما المساهمات الصغيرة فتقدمها منطقة آسيا والمحيط الهادئ (حوالي 11%) وأمريكا اللاتينية (6%) والشرق الأوسط وأفريقيا (حوالي 1.0%)



الشكل II .10:الإنتاج العالمي للغاز الحيوي في عام 2012 واتجاهه حتى عام 2022[18].

II .1.8. في افريقيا:

تتوفر كميات كبيرة من النفايات في إفريقيا، لكن إنتاج الغاز الحيوي لا يزال أقل تطوراً مما هو عليه في المناطق الأخرى. يجري تركيب أجهزة هضم الغاز الحيوي في عدة دول (بوروندي، بوتسوانا، بوركينا فاسو، كوت ديفوار، إثيوبيا، غانا، غينيا، ليسوتو، كينيا، ناميبيا، نيجيريا، رواندا، السنغال، جنوب إفريقيا، أوغندا وزيمبابوي)[19]. تحتوي القارة الأفريقية أيضًا على مصادر طبيعية غير عادية للغاية للغاز الحيوي، مثل تلك التي تحدث في أعماق بحيرة كيفو في رواندا وجمهورية الكونغو الديمقراطية. تنتج هذه البحيرة غازًا حيويًا من الإجراءات المشتركة للكائنات الحية الدقيقة اللاهوائية في الأعماق التي تتغذى من المواد العضوية المتحللة، جنبًا إلى جنب مع العمليات المرتبطة بالنشاط الحراري الأرضي. بالإضافة إلى ذلك، توجد أشكال أخرى من الغاز الحيوي الطبيعي في مواقع المناجم في جنوب إفريقيا[20].

II .9. مميزات وعيوب الغاز الحيوي

II .1.9 ميزة الغاز الحيوي

ويشمل عدة مزايا نذكر منها:

- يجعل إنتاج الغاز الحيوي من الممكن استعادة النفايات العضوية وبالتالي تجنب تلوث بيئتنا. الغاز الحيوي هو غاز طبيعي متجدد تنتجه البكتيريا مما يؤدي إلى تخمير المواد العضوية الحيوانية أو النباتية.
- أن الميثان له طاقة تسخين أعلى بـ 23 مرة من طاقة ثاني أكسيد الكربون، لذلك يُنصح باستخدام الغاز الحيوي. تلوث أقل بكثير من النفط.
- يأتي الغاز الحيوي بشكل أساسي من نفايات المطبخ والحدائق، لذلك إذا قمنا بجمعه لصنع غاز حيوي، فسيكون لدينا تقليل في كمية النفايات، وبالتالي سيكون لدينا تقليل في التلوث.

II .2.9. عيوب الغاز الحيوي

كما له عيوب نذكر منها:

- تكلفة الاستثمار هي العقبة الأولى أمام إنتاج الغاز الحيوي.
- هذه الطاقة واعدة للغاية ولكن من الضروري توعية الجمهور بهذه الأخبار لأن تقنية الهضم اللاهوائي لتشكيل الغاز الحيوي لا يزال يتم تجاهلها كثيرًا من قبل الجمهور[21، 22].

قائمة المراجع:

.1 S.Achinas et al, 2017, Euverink, A technological overview of biogas production from biowaste. Engineering, **3**(3): p. 299-307.

.2 C.RICAUD, 2007, Biogaz: Ce qu'il faut savoir. Systèmes solaires (Revue), (179): p. 34-37.

.3 A.Bugat et al.2008، Biogas. Report by the Academy of Technologies.

.4 La biométhanisation à la ferme, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.

.5 C. Couturier, 2009, Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse. Etude RECORD.

.6 M.Meres, 2009, Analyse de la composition du biogaz en vue de l'optimisation de sa production et de son exploitation dans des centres de stockage des déchets ménagers, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jagiellone….

.7 J.Popp et al. 2014, The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. Renewable and sustainable energy reviews,**32**: p. 559-578.

.8 M.Besma, 2018, Étude technoéconomique de la conversion électrique du biogaz en Algérie. Cas du CET de Batna. Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2, Département de génie mécanique.

.9 A. Damien, 2004, Guide du traitement des déchets: Dunod Paris.

10. محمد البرج،عبد الحليم بن بادة: آليات تثمين النفايات المنزلية وماشابهها في التشريع الجزائري مجلة العلوم القانونية الاجتماعية، جامعة غرداية (الجزائر)، المجلد السادس، العدد الأول، السنة مارس 2020.

.11 P .Weiland, 2010, Biogas production: current state and perspectives. Applied microbiology and biotechnology, **85**(4): p. 849-860.

.12 A.T.Harimbola et al , Instrumentation d'un digesteur expérimental en vue de maintenir sa température interne entre 35 C et 37 C.

.13 Tahri Ahmed et al. 2017, PRODUCTION DE BIOGAZ A PARTIR DU DECHET DE LA POMME DE TERRE. ResearchGate.

.14 منال عريشة،نسرين الصوا: مدخلات ومخرجات الهاضم الحيوي والعوامل المؤثرة على عملية التخمر اللاهوائي. .http://kawngroup.com/bio-digester

.15 J.Hess , 2007, Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation. Université Nice Sophia Antipolis.

.16 C.F.C. HOUNGUE et al. 2017, Amélioration par chauffage solaire des performances d'un digesteur anaérobie dans les conditions de température de Cotonou, EPAC/UAC.

.17 I.S. Tou et al, 2001, Production de Biométhane à partir des Déjections Animales. Rev. Energ. Ren: Production et Valorisation-Biomasse, p. 103-108.

.18 Raboni, M. and G. Urbini, Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives. Revista ambiente & agua, 201 :(2)9 .4p. 191-202.

.19 Austin, G. and G. Morris, Biogas Production in Africa. 2012. p. 103-115.

.20 The Potential for Biogas in Africa.

https://www.clarke-energy.com/2015/the-potential-for-biogas-in-africa]:/

.21 M.Mostert, 2012, Faisabilité économique et environnementale d'un bus au biogaz à Liège., Université de Liège, Liège, Belgique.

.22 TOGBE YEMADAN et al, 2009,Optimisation de la production et de l'utilisation du Biogaz au centre Songhaï.

الفصل الثالث:

انتاج الغاز الحيوي

المقدمة:

أصبحت تقنية الهضم اللاهوائي من التقنيات الضرورية لتقليل حجم النفايات وإنتاج الغاز الحيوي، الذي يعتبر مصدر طاقة متجدد يتم استخدامه في مجالات عدة، كما أنها عملية فعالة وسهلة الاستغلال واقتصادية لمعالجة النفايات العضوية.

في هذا الفصل سيتم عرض بعض الدراسات لإنتاج الغاز الحيوي بركائز مختلفة (المكونة من النفايات العضوية) حيث يتم تعيين الخصائص الآتية لكل عينة:

- ✓ **المادة الجافة (Matière Sèche)**: هي ما تحصل عليه عند إزالة الماء من أحد المنتجات. لتحديد المادة الجافة، تُسكب عينة من أي كتلة ،في كبسولة ذات كتلة معروفة أو (M) يتم تنظيفها وتجفيفها مسبقًا ، ثم يتم وضع الكل في فرن عند 105 درجة مئوية لمدة 12 ساعة حتى يتم الحصول على وزن ثابت. يتم وزن الكبسولة بعد التبريد في مجفف. النسبة المئوية للمادة الجافة هي النسبة بين وزن المادة الجافة وكتلة المادة غير الجافة (الرطبة).
- ✓ **محتوى المادة العضوية (Matière Organique)**: لتحديد محتوى المادة العضوية (MO) ، يتم إدخال أي كتلة من العينة بعد التجفيف في كبسولة تم تنظيفها وتجفيفها سابقًا لها كتلة (M) ، يتم وضع الكل في دثر فرن للتكلس عند 550 درجة مئوية لمدة 5 ساعات. بعد تبريد الكبسولة التي تحتوي على المادة المعدنية يتم وزنها مرة أخرى. يتم الحصول على كتلة المادة العضوية بالاختلاف بين كتلة المادة الجافة وكتلة المادة العضوية [1].
- ✓ **الطلب الكيميائي للأكسجين(Demande chimique en oxygène)**: يمثل الطلب الكيميائي على الأكسجين كمية الأكسجين التي تستهلكها المواد المؤكسدة الموجودة كيميائياً في الماء. إنه يمثل معظم المركبات العضوية ولكن أيضًا الأملاح المعدنية القابلة للأكسدة (الكبريتيدات والكلوريدات وما إلى ذلك). هذه إحدى الطرق الأكثر استخدامًا لتقييم الحمل الكلي للملوثات العضوية في المياه.
- ✓ **الطلب البيولوجي على الأكسجين (Demande biochimique en oxygène)**: هو كمية الأكسجين المذاب التي تستهلكها الكائنات الحية الدقيقة في الظلام عند 20 درجة مئوية لمدة 5 أيام. وذلك يسمح بتقييم المواد العضوية القابلة للتحلل[2].

- ✓ **الأحماض الدهنية الطيارة (Les acides gras volatils)** الأحماض الدهنية الرئيسية هي حمض الأسيتيك أو الأسيتات (C2) ، وحمض البروبيونيك أو البروبيونات (C3) وحمض الزبد أو الزبدات (C4)[3].

وفي كل دراسة يتم تحديد كمية الغاز الحيوي المنتج بواسطة الطريقة السائلة، حيث يتم إجراء قياس حجم الغاز الحيوي المنتج بواسطة طريقة إزاحة السائل الغاز الحيوي المنتج بإدخال دورق Erlenmeyer وبفرق الضغط يتحرك الماء ويصب في الدورق المتدرج. يتوافق حجم المياه المزاحة مع حجم الغاز الحيوي المنتج[4].

III.1. الدراسة الأولى: تحويل النفايات العضوية من سكن جامعي لإنتاج البيوغاز[5]

أنجزت هذه الدراسة من قبل الدكتور م. جعفري وفريقه المتكون من الباحثين: س. كلوم، م. خلافي، أ.طاهري، ف. سالمي، ك.قايدي، ل. بن سماعيل، و. باراكو، أ.قادري، أ. عمروش. والتابعين لوحد أبحاث الطاقة المتجددة في البيئة الصحراوية، URERMS، مركز تنمية الطاقات المتجددة، CDER، أدرار، الجزائر، جامعة مستغانم وجامعة بشار. حيث تم نشر هذه الدراسة في مجلة علوم مواد البيئة J. Mater. Environ. Sci.

تمكن تقنية الهضم اللاهوائي أن تكون النفايات مصدرا للثروة وتساعد في تقليل حجم النفايات ومنه إنتاج غاز حيوي وهو مصدر طاقة متجدد يمكن استخدامه في إنتاج الكهرباء والحرارة، ينتج عن عملية الهضم اللاهوائي غاز حيوي بقايا الهضم التي لم تتحلل يتم استعمالها كعامل تسميد ممتاز للأرضي الزراعية.

تتميز هذه التقنية بثلاث مراحل أساسية: مرحلة التحلل المائي، مرحلة تكوين الأسيتات ومرحلة تكوين الميثان. ويتم تنفذيها بواسطة كائنات حية دقيقة مختلفة خلال كل مرحلة يتم تقسيمها إلى أربع مجموعات غذائية البكتيريا المتحللة بالماء والتي تتحلل الدهون ، البروتينات والكربوهيدرات (السليلوز بشكل أساسي) وتحويلها إلى جزيئات بسيطة. – بكتيريا التخمير الحمضية المنتجة للهيدروجين والأسيتات – بكتيريا أسيتوجينية تسمى متجانسة المنشأ.

في هذا العمل تم استخدام ركائز سهلة التحلل البيولوجي وهي نفايات عضوية غنية بالسكر وأطعمة مطبوخة غنية بالنشا، مأخوذة من سكن جامعي.

حيث كان معدل حجم الغاز المنتج كبير من بداية الهضم حتى نهايته، وكذا معدل تحلل المواد العضوية في فترة قصيرة من أحد عشر يوما، مع متابعة تطور الأس الهيدروجيني وتطور الطلب على الأوكسجين (DCO) وحجم الغاز الحيوي المنتج.

يتكون العمل هذ من دراسة تحسين ظروف الهضم اللاهوائي وتسريع معالجة النفايات العضوية بالميثان. يهدف هذا إلى استغلال هذه النتائج على نطاق تجريبي وخاصة لإطلاق أجهزة هضم جديدة (بدء تشغيل أجهزة الهضم).

III.1.1. المواد والأساليب المستعملة:

III.1.1.1. المواد المستعملة:

من أجل هذه الدراسة تم استعمال هذه المواد: قشور الخضروات الحلوة (البنجر والجزر)، الأطعمة المطبوخة التي تحتوي على النشا (الأرز والبطاطس). وتم أخذ هذه العينات من سكن جامعي

III.1.1.2. أساليب العمل:

تم اتباع الأساليب التالية في العمل:

- قياس الأس الهيدروجيني باستخدام مقياس من النوع METR TOLLEDD وضبطه باستخدام محلول NaOH.
- استخدام المادة الطافية التي تم الحصول عليها، بعد الطرد المركزي للعينات لقياسDCO.
- تحديد حجم الغاز المنتج بواسطة طريقة السائل المزاح، وقياس المادة العضوية(MO) بالطريقة القياسية.

III.1.1.3. الجهاز التجريبي:

كان الجهاز التجريبي المستعملة كالآتي:

- زجاجة ذات لتر واحد
- تتكون من فتحتين، الأولى لأخذ عينات سائلة باستخدام حقنة، والثانية لاستعادة وقياس حجم الغاز الحيوي المنتج.

III.1.2. توصيف الركيزة:

تم وصف الركيزة المستعملة كالآتي:

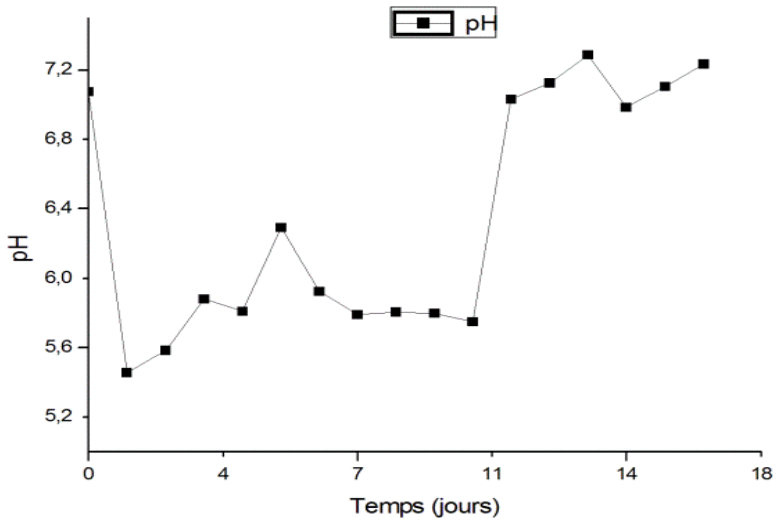
الجدول1.III: توصيف الركيزة قبل الهضم اللاهوائي

الإعدادات	القيم
المادة الجافة (MS%)	24
المادة العضوية (MO%)	95
الرقم الهيدروجيني PH	6.9

3.1.III. النتائج والمناقشة:

بعد إتمام عملية الهضم كانت أظهرت نتائج مختلفة بالنسبة لكل من الأس الهيدروجيني والغاز المنتج:

1.3.1.III. الأس الهيدروجيني:



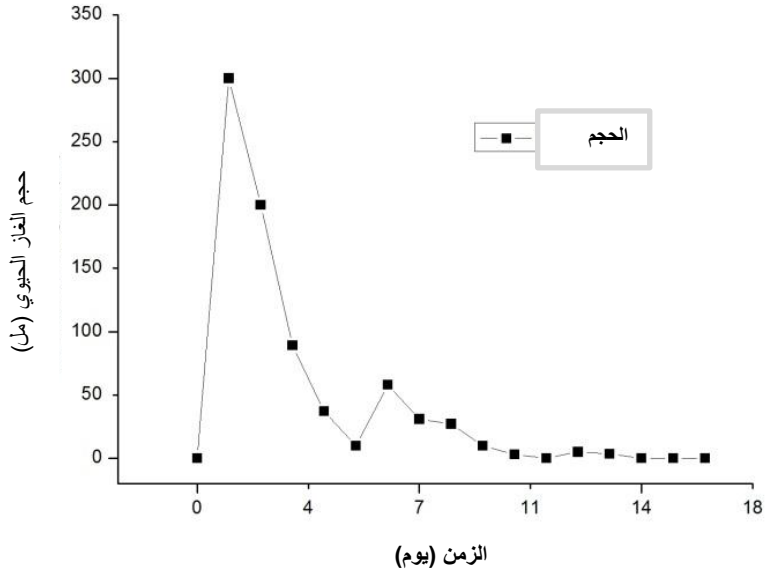
الشكل1.III: تطور الأس الهيدروجيني كدالة للوقت.

تم ملاحظة من خلال الشكل أنه حدث تغير للأس الهيدروجيني أثناء المعالجة بالميثان:

- خلال اليومين الأولين تم حدوث انخفاض سريع في الرقم الهيدروجيني من 7.07 إلى 5.45 وهذا راجع إلى نقص تحلل الركيزة وعدم تكوين الأحماض الدهنية.

- من اليوم الثالث حتى الخامس، تزايد في الرقم الهيدروجيني قليلا (تعديل ذاتي). تم تفسير هذه الزيادة من خلال انتاج الايثانول، لكنها ليست القيمة المثلى للهضم اللاهوائي.
- من اليوم الخامس تم ضبط الأس الهيدروجيني بمحلول هيدروكسيد الصوديوم لتقريب القيمة من 7 (القيمة المثلى للهضم اللاهوائي)، بعد التعديل انخفض الرقم الهيدروجيني إلى 6 حتى اليوم الحادي عشر، وذلك لاستمرار انتاج الحمض.
- بعد اليوم الحادي عشر، تم إجراء تعديل ثان، ظل هذه المرة الأس الهيدروجيني ثابت بالقرب من 7 في نهاية التجربة، وذلك من خلال استهلاك متطاير الأحماض الدهنية (AGV) واستنفاد المواد العضوية.

III.2.3.1. الغاز الحيوي المنتج:

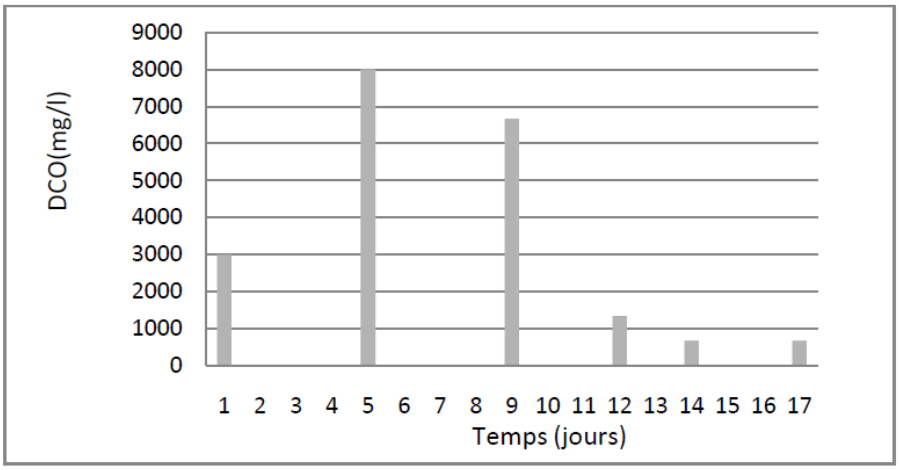


الشكلIII.2: تطور حجم الغاز الحيوي كدالة للوقت.

من خلال الشكل تم ملاحظة إن غالبية حجم الغاز المنتج قد تم في الأيام الخمسة الأولى 300ml كحد أقصى مسجل في اليوم الأول. ويفسر هذا الإنتاج الكبير والسريع على أن الركيزة المستخدمة قابلة للتحلل البيولوجي بسهولة، حيث تم تسجيل انخفاضا مستمرا في حجم الغاز من اليوم السابع حتى اليوم السابع عشر أصبح صفرا، ويرجع ذلك إلى استنفاد المادة العضوية وبالتالي استنفاد AGV في الوسط وعدم توازن وسط الاستزراع (عدم وجود العناصر الغذائية).

III.3.1.3. تطور الطلب على الأكسجين DCO:

من خلال الشكل يكون DCO خلال الأيام الأولى منخفضا، وذلك إلى بداية تدهور الركيزة (مرحلة التحلل المائي والتوليد الحمضي). في اليوم الخامس يصل DCO إلى 8000 mg/l كحد أقصى وهذا راجع إلى تدهور غالبية الركيزة الذي يتضح من خلال حجم الغاز المنتج في هذه الفترة، يبدأ DCO في الانخفاض حتى يصل إلى 400 mg/l في نهاية الهضم، ومعدل انحلال الحمل العضوية 76.33%.



الشكل III.3. تطور DCO كدالة زمنية

III.3.1.4. توصيف الركيزة بعد الهضم:

- الكتلة المحولة (15% من MO).
- الحجم الإجمالي للغاز المنتج اثناء المعالجة بالميثان 850 ml.
- ينتهي بإنتاج 56.66 ml/g من MO

الجدول III.2: توصيف الركيزة بعد الهضم

الاعدادات	القيم
المادة الجافة (MS%)	2.15
المادة العضوية (MO%)	45
الرقم الهيدروجيني PH	7.2

4.1.III. الاستنتاج

سمحت هذه الدراسة باستنتاج أن النفايات العضوية الغنية بالسكر والأغذية المطبوخة الغنية بالنشا تشكل ركيزة مواتية لإطلاق هاضمات جديدة من أنواع مختلفة لقابلية التحلل بسهولة وتسمح بالإنتاج السريع للغاز الحيوي. واتضح هذا من النتائج التي تم الحصول عليها:

- كان إنتاج الميثان جيد منذ اليوم الأول للهضم اللاهوائي بقيمة 300 مل / يوم.

- تم إنتاج كمية كبيرة من الغاز الحيوي خلال الأيام الخمسة الأولى (640 مل) من حجم إجمالي 850مل.

- إنتاج الغاز الحيوي 56.66 مل /غرام من المواد العضوية.

- نسبة تحلل المادة العضوية 76.33٪.

III.2. الدراسة الثانية: دراسة تأثير الأس الهيدروجيني على إنتاج الغاز الحيوي من النفايات المنزلية[6]

أنجزت هذه الدراسة من قبل الدكتور س.كلوم وفريقه المتكون من الباحثين م.خلافي، م.جعفري، أ. طاهري و أ.توزي و التابعين لوحدة أبحاث الطاقة المتجددة في البيئة الصحراوية، URERMS، مركز تنمية الطاقات المتجددة، CDER، أدرار، الجزائر،حيث نشرت هذه الدراسة من مجلة الطاقة المتجددة Revue des Energies Renouvelables.

الميثان أو الهضم اللاهوائي هو عملية طبيعية لتحويل المادة العضوية إلى طاقة بواسطة البكتيريا الميثانية المنشأ في غياب الأكسجين. يتم إجراؤه في عبوات محصورة تسمى "أجهزة الهضم" ، حيث يتم تحسين تفاعلات التخمير والتحكم فيها.

تتمثل هذه الدراسة في دراسة الهضم اللاهوائي للنفايات المنزلية (نفايات المطبخ) وبشكل أكثر تحديدًا تأثير الأس الهيدروجيني على إنتاج الغاز الحيوي. خلال هذه الدراسة، تم أيضًا اتباع تطور معلمات التلوث، مثل DCO و BOD_5، بالإضافة إلى حجم الغاز الحيوي المنتج كدالة زمنية مع درجة حموضة معدلة وأيضًا مع درجة حموضة غير معدلة. أتاحت النتائج التي تم الحصول عليها إثبات إمكانية إنتاج كمية كبيرة من الغاز الحيوي القابل للاشتعال لفترة قصيرة للهضم عند درجة الحموضة المعدلة (بيئة مواتية للنشاط البكتيري) مقارنة بالجهاز عند درجة الحموضة غير المعدلة.

تمت دراسة الهضم اللاهوائي للنفايات المنزلية (نفايات المطبخ) في هضمين، الأول مع تعديل درجة الحموضة حول الحياد (الرقم الهيدروجيني 7)، وهي البيئة الملائمة لتطور البكتيريا الميثانية، المسؤولة لتشكيل الغاز الحيوي والآخر، دون تعديل الأس الهيدروجيني لإثبات تأثير الأس الهيدروجيني على إنتاج الغاز الحيوي. وللقيام بذلك، تم بانتظام بمراقبة الأس الهيدروجيني، وحجم الغاز الحيوي المنتج، وتطور DCO و BOD_5 كدالة لوقت الهضم.

الغرض من هذه التجربة هو إثبات تأثير تعديل الأس الهيدروجيني على الهضم اللاهوائي للنفايات المنزلية. أثناء مرحلة التكوّن الحمضي – التحلل المائي، ينخفض الأس الهيدروجيني إلى القيم الدنيا (5 – 3)، مما يؤثر على مرحلة تكوين الميثان ويمنعها. تتكون التجربة من تصحيح الأس الهيدروجيني باستخدام كربونات الصوديوم(Na_2CO_3) ، حتى قيم تتراوح بين 6.5 و 7 (بيئة مواتية لنشاط البكتيريا المولدة للميثان) وهذا لتعزيز تكوين الغاز الحيوي.

III.2.1. المواد المستعملة وخطوات العمل:

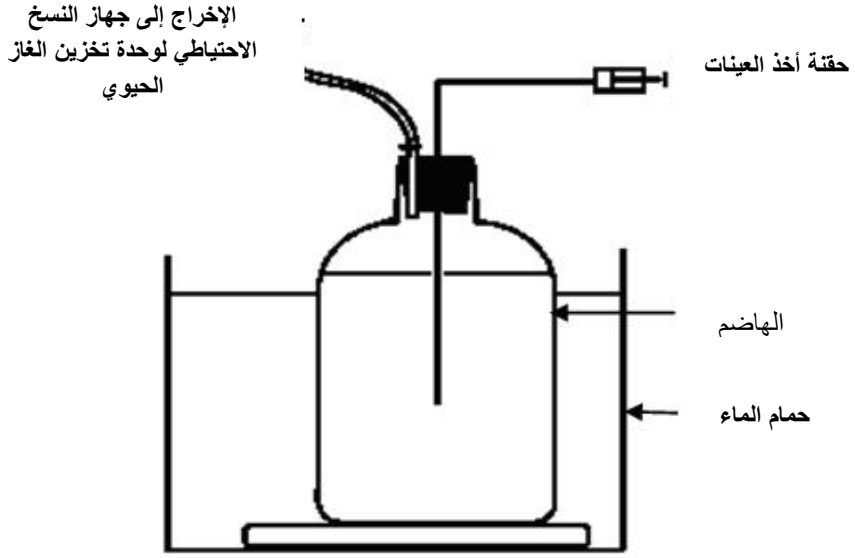
III.2.1.1. المواد المستعملة:

المواد المستخدمة هي النفايات منزلية (فضلات المطبخ: مثل البصل، البطاطس، الجزر، الشمندر، الخس، قشور الأرضي شوكي).

III.2.1.2. خطوات العمل:

تم تقطيعها لتجانس العينات، وإدخالها في جهاز هضم بسعة لتر واحد بمعدل تخفيف 16g من المادة الجافة لكل لتر، يكون محكم الإغلاق لضمان عدم وجود الهواء.

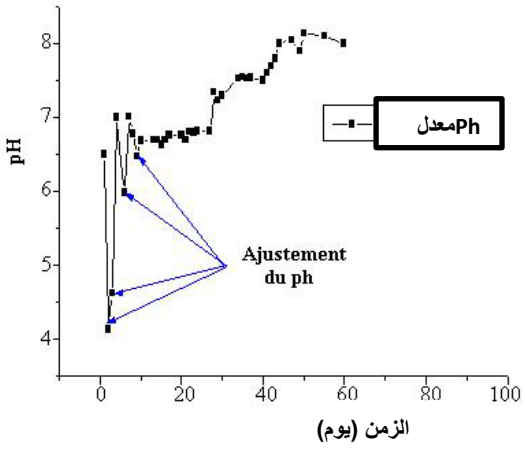
الشكلIII.4: منظر للعينة بعد القطع



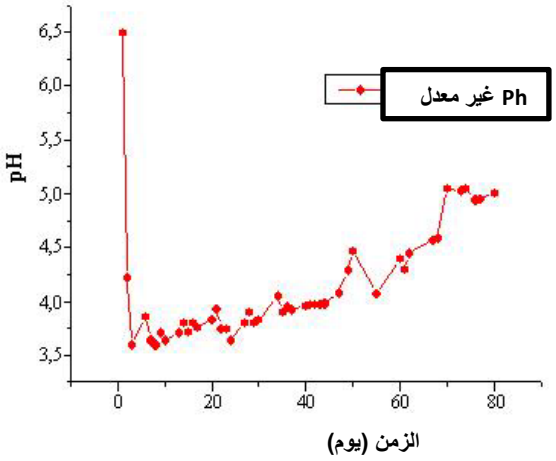
الشكل III.5: الهاضم المستعمل

- ثم غمره في حمام مائي عند 35 درجة مئوية ± 2 درجة مئوية [5-7]. يتم قياس حجم الغاز الحيوي المتكون باستخدام طريقة السائل المزاح، ثم يتم تطبيعه تحت ظروف درجة الحرارة والضغط.
- تم قياس الأس الهيدروجيني باستخدام مقياس الأس الهيدروجيني من نوع HANNA 9142. تم تحليل الطلب الكيميائي على الأكسجين (DCO) والطلب البيولوجي على الأكسجين (BOD_5).

III.2.2. النتائج والمناقشة:



الشكل III.6: تطور الأس الهيدروجيني كدالة للزمن



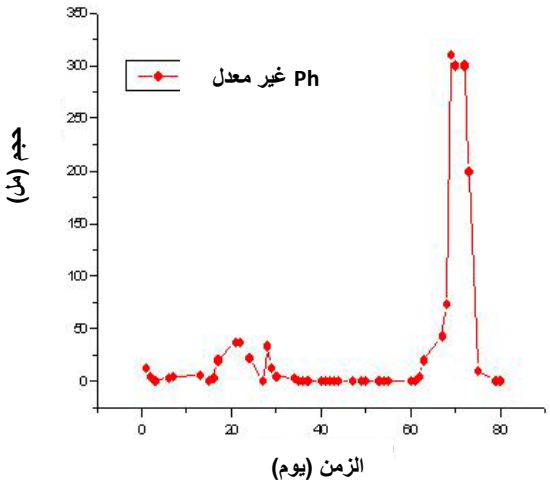
الشكل III.7: تطور الأس الهيدروجيني كدالة للزمن

من خلال الشكل، وجد أنه حدث انخافض في الرقم الهيدروجيني من 6.5 إلى قيمة دنيا قريبة من 4 في الحالتين (عند ضبط الرقم الهيدروجيني و عند عدم ضبطه) . يفسر هذا بتدهور المواد العضوية وتكوين الأحماض العضوية والأحماض الدهنية المتطايرة.

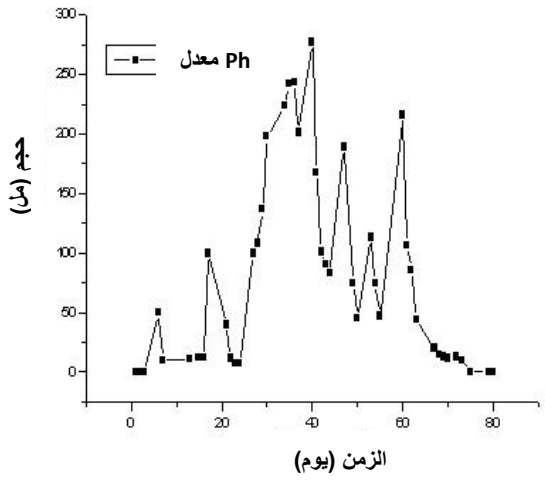
تعود الزيادة في الرقم الهيدروجيني في الشكل إلى تعديل الأس الهيدروجيني بواسطة كربونات الصوديوم في الأيام العشرة الأولى. بعد هذا الوقت، تم ملاحظة تعديلًا ذاتيًا للرقم الهيدروجيني ناتجًا عن استنفاد الأحماض المتكونة في الجزء الأول بواسطة بكتيريا الأسيتوجين.

وفي الحالة الثانية، ظل الانخفاض في الرقم الهيدروجيني مستقرًا تقريبًا عند حوالي 3.8 خلال خمسة وأربعين (45) يومًا. تم تسجيل زيادة طفيفة من اليوم الستين (60).

وفقًا للشكل، وجد أن مرحلة تكوين الميثان يتم تشغيلها من اليوم الخامس والعشرين في حالة الرقم الهيدروجيني المعدل، ومن ناحية أخرى في حالة الأس الهيدروجيني غير المعدل فإن بدء هذه المرحلة يكون ممكنًا فقط من اليوم الستين. سمح ذلك بملاحظة أنه في وسط التفاعل عند درجة حموضة قريبة من 7، يفضل تطوير البكتيريا المولدة للميثان وبالتالي بداية مرحلة تكوين الميثان. خلال هذه الفترة التي تبلغ 80 يومًا، تم إنتاج 3.5 Nl من الغاز الحيوي لحالة الأس الهيدروجيني المعدل و 1.5 Nl فقط في حالة الأس الهيدروجيني غير المعدل.

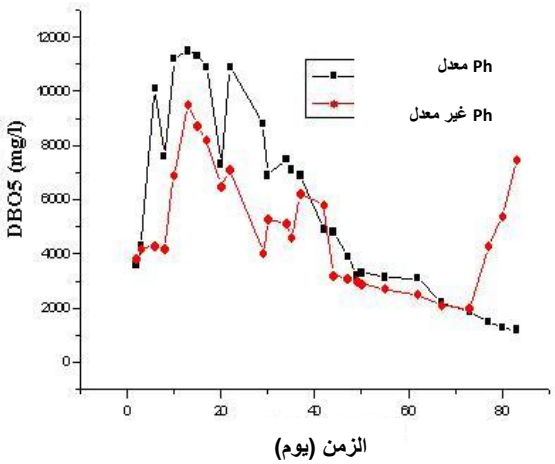


الشكل III.8: تطور حجم الغاز الحيوي كدالة للزمن

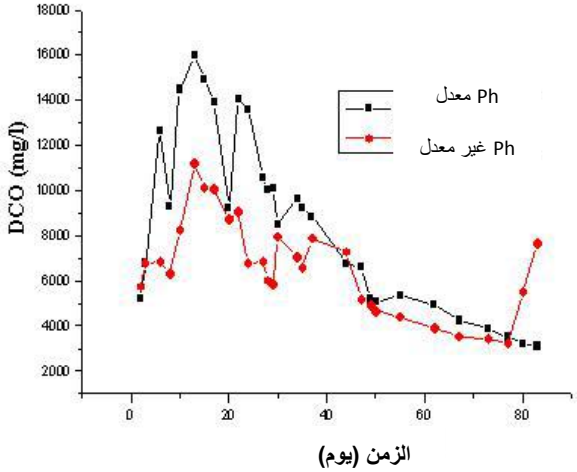


الشكل III.9: تطور حجم الغاز الحيوي كدالة للزمن

من خلال الشكلان 5 و 6 تم توضيح أن هناك انخفاضًا في الحمل العضوي، ويتضح ذلك جيدًا من خلال انخفاض الطلب على الأكسجين الكيميائي (DCO) والطلب الكيميائي الحيوي على الأكسجين (DBO_5)، ولكن مع زيادة العائد في حالة الأس الهيدروجيني المعدل مقارنةً بالرقم الهيدروجيني غير المعدل، يكون هذا الناتج 70٪ للأس الهيدروجيني المعدل و 43٪ للأس الهيدروجيني غير المعدل على التوالي.



الشكل III.10: تباين DBO_5 كدالة للوقت



الشكل III.11: اختلاف DCO كدالة للوقت

III.3. الاستنتاج

أظهرت هذه الدراسة تأثير الأس الهيدروجيني على إنتاج الغاز الحيوي من النفايات المنزلية، أن تعديل الأس الهيدروجيني إلى حوالي 7 يفضي إلى تطوير البكتيريا الميثانية المنشأ المسؤولة عن تكوين غاز الميثان. وجدنا أيضًا أن كمية الغاز الحيوي المنتجة في حالة الأس الهيدروجيني المعدل هي ضعف الكمية المنتجة في حالة الأس الهيدروجيني غير المعدل.

فيما يتعلق بمعايير إزالة التلوث، لوحظ انخفاض ملحوظ في الحمل العضوي في الحالتين ، ولكن مع ناتج أفضل بنسبة 70٪ في حالة الأس الهيدروجيني المعدل.

III.3. الدراسة الثالثة: إنتاج الغاز الحيوي من مخلفات البطاطس[7]

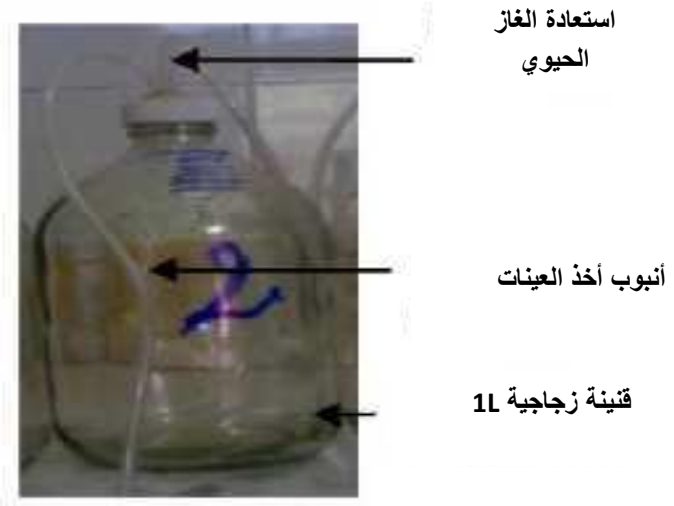
أنجزت هذه الدراسة من قبل الدكتور طاهري أحمد وفريقه المتكون من الباحثين جعفري محمد، خلافي مصطفى، قايدي كمال، كلوم سليمان وباباعمار الزهرة. والتابعين لوحدة أبحاث الطاقة المتجددة في البيئة الصحراوية، URERMS، مركز تنمية الطاقات المتجددة، CDER، أدرار، الجزائر. وجامعة أدرار، وجامعة غرادية.

بفضل الهضم اللاهوائي (الميثان)، تصبح النفايات مصدرًا للثروة. تصبح هذه التقنية ضرورية في عملية تقليل حجم النفايات وإنتاج الغاز الحيوي، وهو مصدر طاقة متجددة يمكن استخدامه في إنتاج الكهرباء والحرارة. كما أنها طريقة فعالة وسهلة الاستغلال واقتصادية لمعالجة نفايات المواد العضوية.

يتكون هذا العمل من دراسة معالجة مخلفات البطاطس بطريقة الهضم اللاهوائي على نطاق معمل لإنتاج الغاز الحيوي. استخدام هاضمات لاهوائية بحجم 01 لتر تعمل عند 37 ± 2 درجة مئوية. أجريت ثلاثة أنواع من التجارب لإبراز تأثير تركيز الركيزة (مخلفات البطاطس) على عملية المعالجة الحيوية. أظهرت النتائج أن تأثير تركيز الركيزة على الهضم اللاهوائي لمخلفات البطاطس مهم جدًا لإنتاج الغاز الحيوي وتقليل الحمل العضوي للطبقة السفلية.

III.3.1. المواد والأساليب:

المواد	الأساليب
. الركيزة المستخدمة: قشور الخضروات(البطاطس)	. الهاضم1: تركيز 1% من MS . الهاضم2: تركيز 11% من MS . الهاضم 3: تركيز5% من MS



الشكل III.12:عرض فوتوغرافي للهاضم

- **شروط الوسط:**

تم الحفاظ على المفاعلات في حالة متوسطة (37 درجة مئوية) في حمام مائي ساخن ينظمه منظم الحرارة، والحفاظ على الرقم الهيدروجيني للوسط عند 7.

III.2.3. خطوات العمل:

III.2.3.1. تقدير المادة الجافة (MS):

حددت المادة الجافة عن طريق:

- سكب عينة من الكتلة الكتلة، إما (M_1) أو (M) في كبسولة ذات كتلة معروفة حيث تم تنظيفها وتجفيفها مسبقا.
- تم وضع العينة في فرن عند 105 درجة مئوية لمدة 12 ساعة حتى الحصول على فرن ثابت.
- وزنت الكبسولة بعد التبريد في مجفف.

وبالتالي الحصول على النسبة المئوية للمادة الجافة وفقا للعلاقة التالية:

$$\%\,MS = \frac{M_1 - [(M + M_1) - (M + M_2)]}{M_1} \times 100$$

حيث أن:

M: كتلة الكبسولة

M1: كتلة العينة قبل التجفيف

M2: كتلة العينة بعد التجفيف

III.3.2.2. تحديد المادة العضوية (MO):

- إدخال كتلة من العينة بعد التجفيف في كبسولة تم تنظيفها و تجفيفها سابقا.
- وضع العينة في دتر فرن للتكلس عند 550 درجة مئوية لمدة 5 ساعات.
- تبرد الكبسولة التي تحتوي على المادة المعدنية ثم وزنها مرة أخرى.
- يكون الحصول عليها بالاختلاط بين الكتلة الجافة و الكتلة.

وبالتالي حساب النسبة المئوية للمادة العضوية بالعلاقة التالية:

$$\%\,MS = \frac{M_1 - [(M + M_1) - (M + M_2)]}{M_1} \times 100$$

تمثل:

M: كتلة الكبسولة

M1: كتلة العينة بعد التجفيف

M2: كتلة العينة بعد التكليس.

III.3.3. النتائج والمناقشة:

III.3.3.1. خصائص الركيزة

الجدولIII.3 : نتائج المادة الجافة قبل الهضم

العينة	نسبة MS (٪)
1	15.46
2	16.71
3	34.75

الجدولIII.4: نتائج المادة العضوية قبل الهضم وبعده

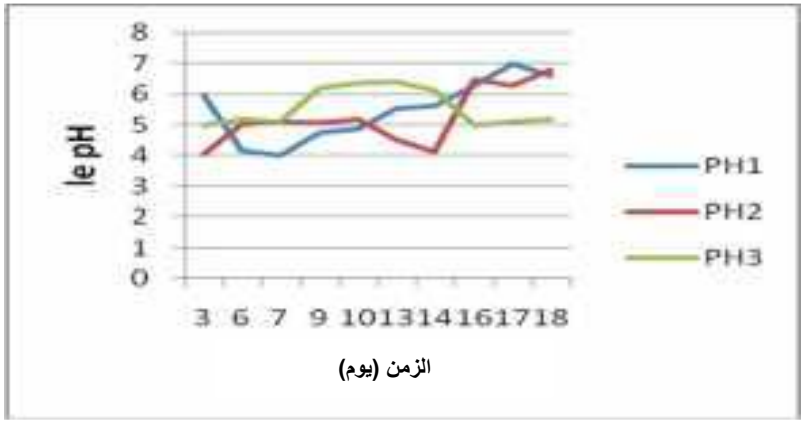
العينة	نسبة MO قبل الهضم (%)	نسبة MO بعد الهضم (%)
1	94.48	58.95
2	94.98	22
3	94.63	51.3

- **بعد فترة الهضم:**

- كانت الركيزة المستخدمة ملاءمة للهضم لوجود أكثر من 70% من المواد العضوية.
- تدهور المواد المادة العضوية بنسبة 30.95%.
- المفاعل الثاني ذو ركيزة أقل من المواد العضوية يزيد عن 72% مما جعل تدهور المواد جيد، وإنتاج سريع للغاز الحيوي.

III.4.3. معلمات الهضم:

III.1.4.3. الرقم الهيدروجيني:



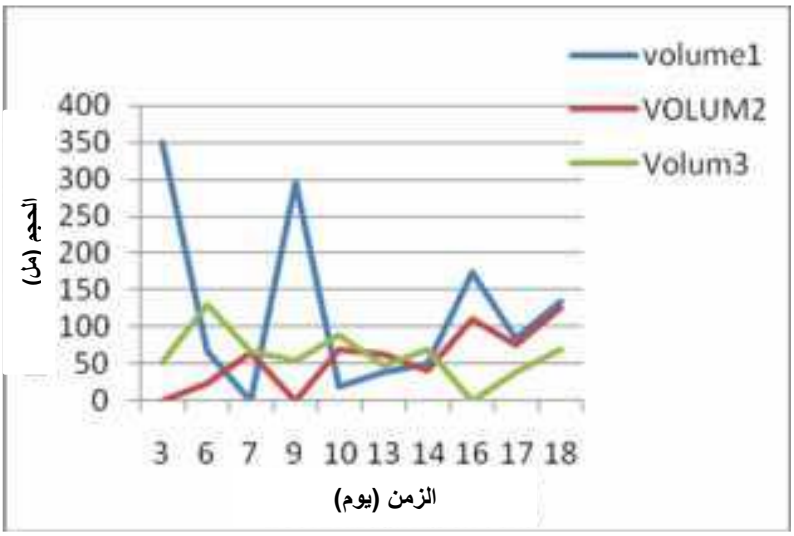
الشكلIII.13: تغير الأس الهيدروجيني كدالة للوقت.

- **المفاعل الأول:** الرقم الهيدروجيني وصل للقيمة 4 كأدنى حد وهذا راجع إلى بداية مرحلة التحلل المائي والتكوين الحمضي، ثم بغلوه إلى القيمة القصوى البالغة 7.
- **المفاعل الثاني والثالث:** قيمة الحموضة من 4 إلى 5، مع تزايدها تدريجيا لتعود للحالة الطبيعة.

ترجع هذه الزيادة في الرقم الهيدروجيني للمفاعلات الثلاثة للقيام بتعديل الوسط باستخدام هيدروكسيد الصوديوم، لتصنيف قيم الأس الهيدروجيني بالقرب من الحياد، وهي القيمة المناسبة لتطور البكتيريا ونشاطها.

III.2.4.3. إنتاج الغاز الحيوي:

يتيح التحكم اليومي في الإنتاج الغازي للمفاعلات الثلاثة الحصول على المنحنيات التالية:

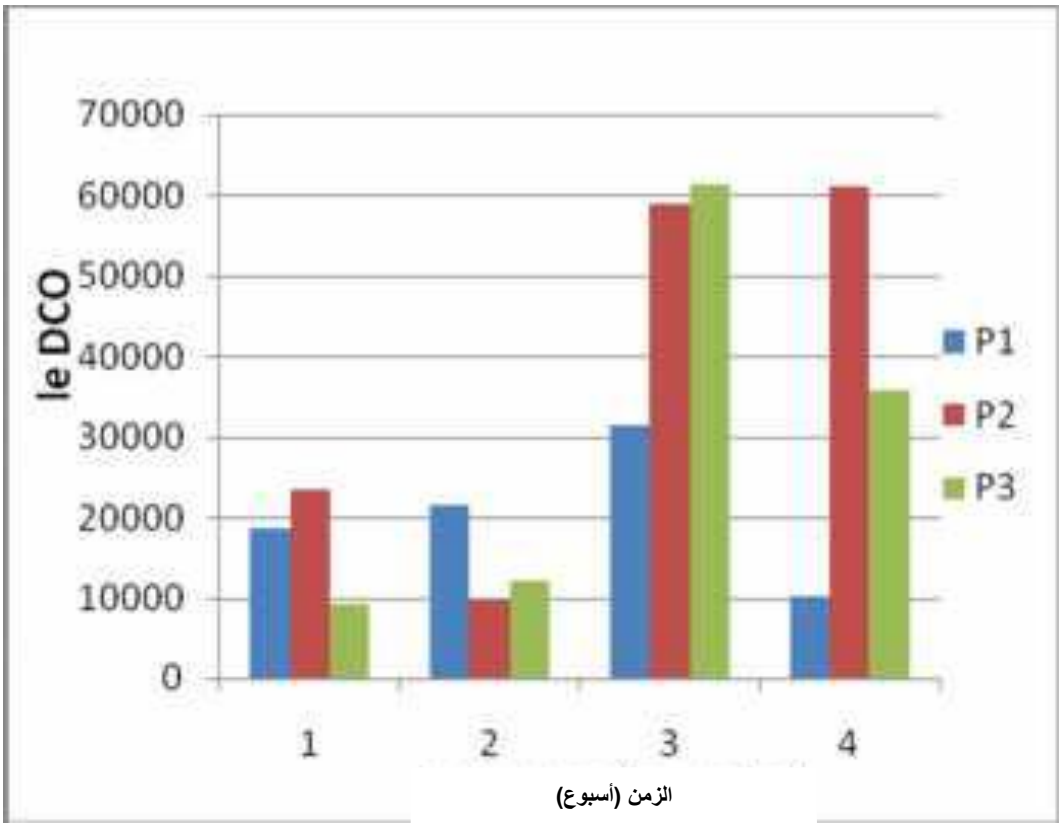


شكلIII.14: تغير حجم الغاز الحيوي كدالة للوقت.

- لوحظ إنتاج قوي جدًا للغاز الحيوي في بداية الهضم اللاهوائي. ثم انخفاض في الحجم حتى اليوم السابع للمفاعل الأول.
- في اليوم الخامس، كان بداية إنتاج كبير للغاز الحيوي بنسب متغيرة نحو القيم القصوى، لتحول الأحماض الدهنية المتطايرة إلى ميثان وثاني أكسيد الكربون. ومنه إدراك المرحلة المسؤولة عن إنتاج الغاز الحيوي.
- لكن بالنسبة للمفاعلين الآخرين، وجد أن تغير حجمهما متشابه وأن إنتاج الغاز الحيوي بيهما أقل من الأول.
- في نهاية عملية الهضم اللاهوائي، تم ملاحظة انخفاض في إنتاج نفس الغاز الحيوي. فسرت هذه الظاهرة باستنفاد الأحماض الدهنية المتطايرة في الوسط وبالتالي استنفاد الركيزة بشكل عام.

III.3.4.3. معامل التلوث: التغير في الطلب الكيميائي على الأكسجين (DCO):

منحنيات تباين الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO) معروضة في الشكل التالي:



الشكلIII.15: تباين DCOكدالة للوقت.

- يجعل الطلب على الأكسجين الكيميائي من الممكن التعبير عن تلوث الركيزة ،
- تباين DCO كدالة زمنية للمفاعلات الثلاثة: كانت قيم دنيا في الأسبوعين الأولين. وفي الأسبوع الثالث زدات إلى الحد الأقصى للقيمة، تعبر هذه الزيادة عن التحلل المائي للوسط وفي النهاية تنتهي بانخفاض في DCO مما يعني تحلل (ميثان) المادة العضوية وإنتاج الغاز الحيوي.

III.5.3. الاستناج

أتاحت هذه الدراسة استنتاج أن تركيز المخلفات العضوية (قشور الخضار) من البطاطس يؤثر على التحلل البيولوجي وإنتاج الغاز الحيوي.

هذا واضح من النتائج التي تم الحصول عليها:

- بالنسبة للتركيز الثاني (11٪ من MS) ، بدأ إنتاج الميثان بشكل جيد منذ الأيام الأولى من الهضم اللاهوائي بقيمة 350 مل/ يوم ، أما بالنسبة للتركيزين الآخرين فقط فيبدأ من اليوم الثامن عشر.

- كما أن كمية الغاز الحيوي المنتج مهمة جداً حيث تصل إلى 1.2 لتر ومعدل تحلل المادة العضوية 35.53

قائمة المراجع:

.1 Tahri Ahmed et al., PRODUCTION DE BIOGAZ A PARTIR DU DECHET DE LA POMME DE TERRE. ResearchGate, 2017.

.2 Makhoukh, M., et al., Contribution a l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'Oued Moulouya (Maroc oriental). LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, 2011(9.(

.3 A.M, Elamin, Evaluation of slaughterhouse effluents and proposal of a recovery solution for Morocco. Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal, 2020. **4**(1): p. 300-306.

.4 S.Sakaki, Étude de la production des acides gras volatils à partir de la fermentation acidogène des boues d'épuration des effluents issus d'une usine de pâtes et papiers. 2014, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.

.5 M.Djaafri, Méthanisation des déchets organiques issus de la résidence universitaire de l'université Africaine de la ville d'Adrar Sud-Ouest de l'Algérie. Djaafri et al., 2014(5 (S2.((

.6 S. Kalloum et al, 2007. Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers. Revue des Energies Renouvelables, **10 N°4**: p. 539 – 543.

.7 Tahri Ahmed et al. 2017, PRODUCTION DE BIOGAZ A PARTIR DU DECHET DE LA POMME DE TERRE. ResearchGate.

الخاتمة

الخاتمة:

الغاز الحيوي هو مصدر من مصادر الطاقات المتجددة المتولد من تفكيك المواد العضوية بواسطة البكتيريا اللاهوائية، ينتج الغاز الحيوي عن طريق تحلل الكتلة الحيوية في خطوتين أساسيتين الأولى هوائية والثانية لاهوائية. ولأن الطلب على الطاقة في تزايد خاصة الطاقة النظيفة، كان الهدف من هذه الدراسة انتاج وقود حيوي نقي وصديق للبيئة المتمثل في الغاز الحيوي، حيث يعتبر الغاز الحيوي من الطاقات المتجددة أنظف من خلال التقليل من انبعاث الغازات السامة في الجو.

في هذه التجارب تم انتاج الغاز الحيوي من المخلفات المنزلية المتمثلة في قشور الخضروات والاطعمة المحتوية على النشاء عبر طريقة الهضم اللاهوائي، حيث من خلالها تم دراسة العوامل التي تؤثر على عملية الهضم اللاهوائي كالمراحل البيوكيميائية للمعالجة بالميثان (التحلل المائي، تكوين الحمض)، وكذلك حالة الوسط للمواد العضوية المتمثل في درجة الحرارة والرقم الهيدروجيني pH، إضافة إلى أن الركيزة الملاءمة لعملية الهضم اللاهوائي وسهولة التحلل البيولوجي تسمح بإنتاج سريع للغاز الحيوي.

كما أن للميثان الحيوي دورًا كبيرًا في المستقبل كحامل للطاقة لأنه مرن في الاستخدام وقابل للتخزين، واعتمادًا على التحسينات التكنولوجية وخفض التكاليف المستقبلية وخطط الدعم، سيزداد حجم إنتاج الميثان، وتحسين إنتاجية الغاز الحيوي وأداء مصانع الغاز الحيوي، كما يمكن توقع أيضا بعض التحسينات في عملية الهضم اللاهوائي وخفض التكاليف من خلال تحسين ظروف العمليات البيولوجية وتؤدي تحسينات العمليات إلى تقليل الحاجة إلى تنظيف الغاز وإزالة الملوثات. مما ينتج عنه تقليل التكاليف والحصول على غاز نظيف وآمن للاستعمال.

الملخص

الأضرار الناتجة عن استخدام الوقود الأحفوري أدت إلى البحث عن مصادر بديلة نظيفة غير قابلة للنضوب على المدى البعيد، ويعد الوقود الحيوي البديل الأمثل للوقود الأحفوري. ولإنتاج الوقود الحيوي يستخدم العديد من أنواع الكتلة الحيوية.

وفي هذه الدراسة تطرقنا إلى الوقود الحيوي المنتج عن طريق الهضم اللاهوائي للكتلة الحيوية.

حيث قمنا بعرض بعض التجارب لدراسة تقنية الهضم اللاهوائي للنفايات المنزلية بغرض تحسين ظروف إنتاج الغاز الحيوي. وذلك من ناحية تأثير الأس الهيدروجيني pHومتابعة تطور الطلب الكيميائي على الأكسجين DCO والطلب البيولوجي على الأكسجين DBO_5 مما وجدنا أن هذه العوامل لها تأثير على إنتاج الغاز الحيوي.

الكلمات المفتاحية: الوقود الحيوي، الكتلة الحيوية، الغاز الحيوي، الهضم اللاهوائي، النفايات العضوية.

Abstract:

The damage caused by fossil fuels has led to the search for clean, inexhaustible alternative sources in the long term, and biofuels are the best alternative to fossil fuels. To produce biofuels, many types of biomass are used.

In this study, we dealt with biofuels produced by anaerobic digestion of biomass. Where we presented some experiments to study the technique of anaerobic digestion of household waste in order to improve the conditions of biogas production. In terms of the effect of pH, follow-up of the development of chemical oxygen demand (DCO) and biological demand for oxygen (DBO_5), we found that these factors have an impact on biogas production.

Key words: biofuels, biomass, biogas, anaerobic digestion, organic waste