

## تقييم تأثير تقنية الهضم المشترك اللاهوائي ثلاثي المراحل على إنتاج الغاز الحيوي

د.م. نادر علي\*

أ.د.م. ميساء شاش\*\*

م. إياس شاش\*\*\*

(تاريخ الإيداع 2021/ 11/ 22 . قُبل للنشر في 2022/ 1/ 4 )

### □ ملخص □

نظراً إلى الحاجة الماسة للغاز المنزلي والصعوبات الكبيرة في تأمينه وارتفاع أسعاره، إضافة إلى ضرورة التخلص الآمن من النفايات العضوية، وإمكانية الاستفادة منها في إنتاج الغاز الحيوي، واستخدامه في تأمين الطاقة الحرارية والكهربائية، والحصول على السماد العضوي السائل؛ تم في هذه الدراسة تقييم تأثير تقنية الهضم المشترك اللاهوائي ثلاثي المراحل على إنتاج الغاز الحيوي. حيث تم تحضير عينة بحجم 10L تحوي 20% مخلفات منزلية (قشور البطاطا) وروث الأبقار بنسبة 80% من محلول التغذية. وقد تم التوصل إلى النتائج التالية: بلغ إنتاج الغاز الحيوي الإجمالي في المرحلة الأولى 22 L بجودة منخفضة، وفي المرحلة الثانية 100 L عند درجة حرارة 30°C وبجودة عالية، وفي المرحلة الثالثة عند درجة حرارة 40°C بلغ إنتاج الغاز الحيوي 30 L بجودة متوسطة، حيث استنزفت كامل الطاقة في المادة العضوية.

**الكلمات المفتاحية:** طاقة الكتلة الحيوية - الوقود الحيوي - الغاز الحيوي - الهضم اللاهوائي المشترك - المفاعل الحيوي متعدد المراحل.

\* مدرس في كلية الهندسة التقنية، قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة، جامعة طرطوس، طرطوس\_سوريا.

\*\* أستاذ في كلية الهندسة التقنية، قسم هندسة المعدات والأليات، جامعة طرطوس، طرطوس\_سوريا.

\*\*\* طالب ماجستير في كلية الهندسة التقنية، قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة، جامعة طرطوس، طرطوس\_سوريا.

## Evaluation of the effect of a three-stage anaerobic co-digestion technique on biogas production

**Dr.Eng. Nader Ali\***  
**Pro.Dr.Eng. Mayssa Shash\*\***  
**Eng. Iyas Shash\*\*\***

(Received 22 / 11/ 2021 . Accepted 4 / 1/ 2022)

### □ ABSTRACT □

In view of the urgent need for domestic gas and the great difficulties in securing it and its high prices, in addition to the need to safely dispose of organic waste, and the possibility of benefiting from it in the production of biogas, and its use in securing thermal and electrical energy, and obtaining liquid organic fertilizer; In this study, the effect of three-stage anaerobic co-digestion technique on biogas production was evaluated. A 10L sample was prepared containing 20% household waste (potato peels) and cow dung with 80% of the feed solution. The following results were reached: the total biogas production in the first stage amounted to 22 L with low quality, in the second stage 100 L at a temperature of 30<sup>o</sup>C with high quality, and in the third stage at a temperature of 40<sup>o</sup>C, the production of biogas reached 30 L with medium quality, as all the energy in the organic matter was exhausted.

**Key words:** biomass energy - biofuels - biogas - combined anaerobic digestion - multi-stage bioreactor.

---

\*Lecturer at the Faculty of Technical Engineering, Department of Renewable Energy Technologies Engineering, Tartous University, Tartous - Syria.

\*\*Professor at the Faculty of Technical Engineering, Department of Equipment and Machinery Engineering, Tartous University, Tartous - Syria.

\*\*\*Master Student, Faculty of Technical Engineering, Department of Renewable Energy Technologies Engineering, Tartous University, Tartous - Syria.

## 1- المقدمة:

تُعتبر الطاقة مكوناً أساسياً من مكونات الكون، وتعدّ أحد أشكال الوجود. وتُشتقّ الطاقة عادةً من مصادر طبيعية وأخرى غير طبيعية، لذلك تقسم إلى نوعين رئيسيين، وهما: الطاقة المتجدّدة، وهي التي تعتمد على المصادر الطبيعية، وأخرى غير متجدّدة، وتعتمد على مصادر غير طبيعية، لكنّها تشكّلت مع الزّمن وتحت تأثير مجموعة من العوامل. وجميع أنواع هذه الطاقة تستلزم وجود آليات، وأدوات، وتقنيّات خاصّة لاستخلاصها، وتسخيرها لصالح الإنسان [1] [2].

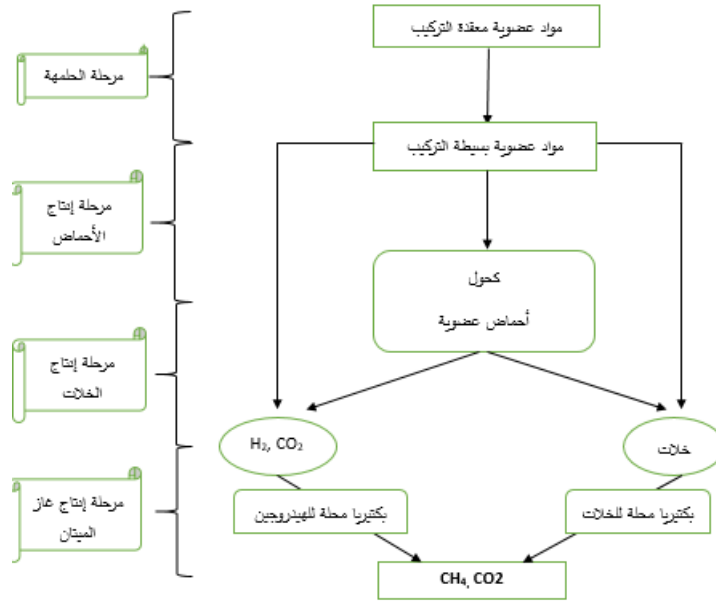
تتنوع الطاقات المتجددة من حيث تنوع مصادرها، كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة المد والجزر والطاقة الجيولوجية وطاقة الكتلة الحيوية [1]. وطاقة الكتلة الحيوية هي الطاقة المستمدة من الكائنات الحية، سواء النباتية أو الحيوانية منها، وهي أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة التي تلعب دوراً كبيراً في الحفاظ على البيئة وتأمين طاقة نظيفة ومستدامة [2]، ويعتبر الوقود الحيوي الناتج عن استخدام طاقة الكتلة الحيوية ذا فاعلية كبيرة وأقلّ أثراً على البيئة، مقارنة مع استخدام الوقود الأحفوري الذي يسبب انبعاث غازات ضارة وملوثة للبيئة، وأحد أهم أنواع الوقود الحيوي يأتي الغاز الحيوي والذي سيتم التركيز عليه في هذه الدراسة.

تعتمد تقانة الغاز الحيوي على تفكك المخلفات والمواد العضوية، وتحللها، وذلك في ظروف لاهوائية بواسطة الكائنات الحية الدقيقة وبشروط ملائمة للعمليات الحيوية التي تقوم بها هذه الكائنات الدقيقة ضمن الهاضم [2] [3]، مما يؤدي إلى انبعاث غاز قابل للاشتعال يعرف بالغاز الحيوي والذي يتكون من خليط غازي يشكل غاز الميثان الجزء الأكبر من تركيبه [3]، وينتج عن عملية التخمر مادة غنية، تستخدم كسماد عضوي نظيف عالي الجودة، وخالية من البذور والكائنات الضارة وليس لها رائحة جاذبة للحشرات.

## 2- تقنية الهضم اللاهوائي (Anaerobic Digestion)

عملية الهضم اللاهوائي (AD) هي عملية كيميائية حيوية، يتم خلالها تحلل المواد العضوية، في غياب الأكسجين، بواسطة أنواع مختلفة من الكائنات الحية الدقيقة اللاهوائية [4]. وينتج عن عملية الهضم اللاهوائي AD الغاز الحيوي والسماد. فإذا كانت المادة العضوية المستخدمة عبارة عن خليط متجانس من نوعين أو أكثر من المواد الأولية (مثل روث الحيوانات والنفايات العضوية من الصناعات الغذائية)، فإن العملية تسمى "الهضم المشترك"، وهي شائعة في معظم تطبيقات الغاز الحيوي في الوقت الراهن [4].

يوضح الرسم البياني في الشكل (1) الخطوات الأربع الرئيسية لعملية الهضم اللاهوائي: الحمهة، وإنتاج الأحماض، وإنتاج الخلات، وإنتاج الميثان.



الشكل (1): الخطوات الرئيسية لعملية الهضم اللاهوائي [5].

## 1-2 العوامل الرئيسية المؤثرة على إنتاج الغاز في المفاعل الحيوي (الهاضم):

### 1- درجات الحرارة:

إن معدل إنتاج غاز الميثان يعتمد على معدلات درجات الحرارة، إذ إن درجة الحرارة تؤثر على الأنشطة الحيوية داخل المفاعل الحيوي. تؤثر درجة الحرارة بشكل كبير على عملية التخمير وإنتاج الغاز الحيوي [5] [6]. يمكن أن تتم عملية الهضم اللاهوائي AD عند درجات حرارة مختلفة، مقسمة إلى ثلاثة مجالات من درجة الحرارة الملائمة لعمل البكتيريا المنتجة للميثان كما هو موضح في الجدول (1)، وهناك علاقة مباشرة بين درجة حرارة العملية وزمن البقاء HRT.

الجدول (1): أنواع البكتيريا ومجال درجات الحرارة وزمن البقاء [6].

مجال زمن البقاء	مجال درجة الحرارة	نوع البكتيريا
70 - 80 يوماً	أقل من 20°C	المحبة لدرجات الحرارة المنخفضة
30 - 40 يوماً	30 - 42 °C	المحبة لدرجات الحرارة المتوسطة
15 - 20 يوماً	43 - 55 °C	المحبة لدرجات الحرارة العالية

### 2- درجة الحموضة (pH):

إن البكتيريا المنتجة لغاز الميثان حساسة جداً لتغيرات درجة الحموضة. لذا يجب الحفاظ على درجة الحموضة ما بين 6.8-7.2 لأن هذه القيمة لدرجة الحموضة هي الأمثل لنشاط بكتيريا الميثان [5] [7]. تلعب درجة الحموضة دوراً رئيسياً في التحلل الحيوي اللاهوائي، من خلال تأثيرها على نشاط أنزيمات الحلمة [8].

### 3- الأحماض الدهنية المتطايرة (volatile fatty acids):

إنّ الأحماض الدهنية المتطايرة (VFA) هي جزء أساسي من تكوين الغاز الحيوي كحمض الخل، ولكن عند التراكيز العالية جداً يمكن أن يمنع عملية الهضم، ومن ثمّ إيقاف إنتاج الغاز الحيوي [9].

#### 4- نسبة الكربون إلى النتروجين C/N ratio:

تعتبر المغذيات غير المتوازنة في المواد العضوية عاملاً محدداً في الهضم اللاهوائي [10]. تلعب نسبة الكربون إلى النتروجين دوراً مهماً في الهضم اللاهوائي، وإنّ النسبة المثالية هي بحدود 1:20-35 [8]. إنّ المواد العضوية متباينة في محتواها من نسبة الكربون إلى النتروجين. ولذلك فإنّ خلط المواد العضوية المختلفة مهم جداً للوصول إلى نسبة مناسبة [10]. إذا كانت نسبة الكربون إلى النتروجين أعلى من الحد الأمثل، فإنّ معدل التحلل سيكون بطيئاً، وعندما تكون النسبة منخفضة يمكن إنّ يتراكم الأمونيا الذي سوف يثبط من نشاط البكتيريا.

#### 5- الخلط (التقليب داخل المفاعل):

يزيد الخلط من ملامسة البكتيريا للمواد العضوية ومن ثمّ تسرع عملية الهضم، كما أنّه يقلل من ترسب المواد الصلبة على الجزء السفلي من الهاضم ويمنع تكون الرغوة والرواسب على سطح محلول التخمر [11].

#### 6- زمن البقاء الهيدروليكي (Hydraulic Retention Time):

وهو متوسط عدد أيام بقاء المحلول داخل المفاعل، والذي تحكمه عوامل كثيرة منها ظروف التشغيل مثل درجة الحرارة وطبيعة المادة العضوية المستخدمة وسهولة تخمرها ونوع المفاعل المستخدم، إن انخفاضه عن الحد الأدنى يسمح بخروج البكتيريا وتناقصها في الهاضم مما يسبب توقف أو انخفاض في إنتاج الغاز، أما الحد الأقصى لزمن البقاء فتحدده عوامل اقتصادية حيث إن زيادة زمن البقاء يؤدي إلى زيادة حجم المفاعل وبالتالي زيادة التكاليف، وعادة يكون زمن البقاء حوالي 40 يوماً بالنسبة لتخمر روث الماشية في الظروف العادية بدون تسخين [12].

## 2-2 الدراسات المرجعية:

قام باحثون [13]، بإجراء دراسة تم فيها استعراض التقدم البحثي والتحديات التي تتطوي عليها تقنية الهضم المشترك اللاهوائي (AcOD)، ومساهمة التقنيات المختلفة في هندسة إنتاج الغاز الحيوي. وأشار الباحثون إلى أن خطوات التفكك والحلمهة هي العوامل المحددة لعملية الهضم المشترك. وبينت النتائج أن إضافة بادئات مختلفة (مواد متخمرة) أدى إلى تحسن استقرار وعمل نظام الهضم المشترك اللاهوائي، كما أن الهضم المشترك يعزز إنتاج الغاز من 25% إلى 400% بالمقارنة مع الهضم الأحادي لنفس المواد العضوية.

كما قام باحثون آخرون [14]، بإجراء دراسة لتقييم عملية الهضم المشترك لمخلفات الطعام والحماة النشطة في نظام لا هوائي من مرحلتين ومقارنتها بعملية المرحلة الواحدة التقليدية، حيث يتكون النظام المكون من مرحلتين من مفاعلين متصلين في سلسلة قادرة على أداء مراحل التخمر وإنتاج الميثان بشكل منفصل. وأجريت التجارب في الوضع شبه المستمر تحت ظروف درجة حرارة متوسطة (37°C)، وخلصت التجارب إلى مجموعة من النتائج أهمها: ازدياد إجمالي إنتاج الغاز الحيوي بنسبة 35%، وزادت نسبة إزالة المواد الصلبة المتطايرة بنسبة 9%، كما ازداد محتوى الميثان من 61.2% إلى 70.1%.

وقام باحثون [15]، بدراسة تأثير درجة الحرارة على كفاءة إنتاج الغاز الحيوي وبنية مجموعة الميكروبات في مفاعل الهضم اللاهوائي ثنائي المراحل من أجل الهضم المشترك لروث البقر وقش الذرة عند درجات حرارة مختلفة. وأوضحت النتائج أنه في نطاق درجات الحرارة من 25-35°C ازدادت كفاءة إنتاج الأحماض الدهنية المتطايرة في مرحلة التخمض، كما ازدادت كفاءة إنتاج الغاز الحيوي في مرحلة إنتاج الميثان، وكان هناك تنوع للبكتيريا في مرحلتي إنتاج الأحماض والميثان؛ وعند درجة الحرارة المنخفضة (20°C) انخفض محتوى الطلب الأكسجيني الكيميائي المشوب (SCOD) والأحماض الدهنية المتطايرة (VFA) في المرحلة الحمضية، كما انخفض إنتاج الغاز الحيوي في مرحلة إنتاج الميثان، وانخفض تنوع المجموعات الميكروبية في المرحلة الحمضية ومرحلة إنتاج الميثان.

### 3- أهمية البحث وأهدافه:

نظراً لأن الهضم المشترك اللاهوائي يقوم بتسريع عملية تحلل المواد صعبة التحلل، وزيادة جودة وكمية الغاز الحيوي والسماد العضوي الناتجين، مقارنة بالهضم أحادي الركيزة، بالإضافة إلى كون المفاعلات وحيدة المرحلة تستغرق زمن بقاء للمخلفات كبيراً نسبياً وعدم استقرار في عملية الهضم اللاهوائي، وأن المفاعلات ثنائية المراحل أظهرت زيادة في إنتاج الغاز الحيوي وزيادة محتوى الميثان في الغاز الحيوي، مقارنة بالمفاعلات وحيدة المرحلة. لذلك كان هدف هذا البحث تقييم المفاعلات الحيوية ثلاثية المراحل من حيث:

- زيادة كمية الغاز الحيوي الناتج.
- استقرار نظام عمل هذه المفاعلات.
- تحسين جودة الغاز الحيوي الناتج.

### 4- طرائق البحث ومواده

#### 4-1 مواد البحث:



الشكل (2): المزيج الحيوي المستخدم 10L  
(20% قشور بطاطا + 80% روث أبقار + ماء).

(1) المادة العضوية المستخدمة: وهي عبارة عن مزيج من روث الأبقار الطازج وقشور البطاطا (كمخلفات منزلية)؛ تم تجفيف عينات من قشور البطاطا وروث الأبقار لمعرفة نسبة المادة الصلبة في العينة وتبين أنها 20%، وبناءً على ذلك تم خلط 4 kg من روث الأبقار مع 1 kg من قشور البطاطا بشكل جيد وأضيف الماء بحيث أصبحت نسبة المادة الصلبة في المفاعل 10%، بالتالي يتشكل محلول تغذية بحجم 10 L (20% قشور بطاطا + 80% روث أبقار) كما أوصت به الدراسات السابقة [16]، كما في الشكل (2).

 <p>الشكل (3): أسطوانات من مادة ال PVC.</p>	<p>(2) أسطوانات من مادة ال PVC: قطر الواحدة منها 20 cm وطولها 50 cm، كما في الشكل (3)، حيث تم اختيار هذه المادة للمزايا التالية:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• مقاومة للأملاح والأحماض والقلويات وغير قابلة للصدأ.</li> <li>• لا تتفاعل مع المواد العضوية الموجودة ضمنها.</li> <li>• تتحمل درجات حرارة عالية حتى 70 °C.</li> <li>• سهولة تركيبها وصيانتها وتحملها للصددمات.</li> </ul>								
 <p>الشكل (4): خلاط يدوي من الكروم.</p>	<p>(3) خلاط يدوي: عبارة عن قضيب كروم قطره 2mm مثبت عليه صفائح من الكروم أبعاد الصفيحة الواحدة (6 × 6) cm، كما هو موضح في الشكل (4)، تم اختيار مادة الكروم للخصائص التالية:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• يعتبر معدن الكروم من المعادن المقاومة للصدأ والتآكل والحرارة.</li> <li>• يتمتع بصلابة عالية وقدرة على تحمل الصدمات.</li> </ul>								
 <p>الشكل (5): وشائع التسخين المستخدمة.</p>	<p>(4) وشائع تسخين: طولها 50 cm واستطاعتها 500 W موجودة ضمن قضيب نحاسي لعزلها عن الوسط الداخلي، وهي موضحة في الشكل (5).</p>								
 <p>الشكل (6): حساس درجة حرارة نوع TPM-10.</p>	<p>(5) حساس لقياس درجة الحرارة في محلول التغذية نوع TPM-10 Digital Thermometer كما يظهر الشكل (5). ويوضح الجدول (2) مواصفات الحساس:</p> <p>الجدول (2): مواصفات الحساس المستخدم.</p> <table border="1" data-bbox="933 1545 1340 1736"> <tr> <td>-50°C → +80°C</td> <td>مجال القياس</td> </tr> <tr> <td>±1 °C</td> <td>الدقة</td> </tr> <tr> <td>نوع NTC</td> <td>المستشعر</td> </tr> <tr> <td>1.5 V ، LR44</td> <td>مصدر الطاقة</td> </tr> </table>	-50°C → +80°C	مجال القياس	±1 °C	الدقة	نوع NTC	المستشعر	1.5 V ، LR44	مصدر الطاقة
-50°C → +80°C	مجال القياس								
±1 °C	الدقة								
نوع NTC	المستشعر								
1.5 V ، LR44	مصدر الطاقة								

 <p>الشكل (7): دفتر ال PH المستخدم.</p>	<p>6) مستشعر ال PH، كما يظهر في الشكل (7).</p>
<p>7) سكر جارور (بلاستيكي)، كما في الشكل (9).</p>  <p>الشكل (9): سكر بلاستيكي.</p>	<p>6) سكر نحاسي، كما في الشكل (8).</p>  <p>الشكل (8): سكر نحاسي.</p>
 <p>الشكل (10): خزانات الغاز الحيوي المستخدمة.</p>	<p>8) خزانات الغاز الحيوي (عبارة عن دولا ب سباحة)، كما في الشكل (10).</p>

#### 4-2 طرائق البحث:

#### 4-2-1 تصميم المفاعل الحيوي ثلاثي المراحل:

تم في هذا البحث تصميم مفاعل حيوي ثلاثي المراحل، حيث اعتمد التوضع الشاقولي للأسطوانات فوق بعضها البعض بحيث تتصل الأسطوانات ببعضها من خلال السكر البلاستيكي الذي يتيح انتقال المخلفات العضوية عبرها بسهولة. يوضع في كل أسطوانة كل من الخلاط اليدوي ووشية التسخين وحساس قياس درجة الحرارة، وتتصل كل اسطوانة من خلال السكر النحاسي وأنبوب من البولي إيثيلين بخزان للغاز الحيوي، وتوضع هذه الاسطوانات ضمن خزنة خشبية لعزلها عن الوسط الخارجي وحمايتها، كما هو موضح في الشكل (11).





الشكل (11): المفاعل الحيوي ثلاثي المراحل.

#### 2-2-4 تشغيل المفاعل الحيوي:

يتم في المرحلة الأولى وضع الدفعة الأولى من محلول التغذية بحجم 10 ل في الأسطوانة الأولى، وتترك فيها إلى حين استقرار قيمة الـ PH، وتضبط درجة الحرارة عند  $30^{\circ}\text{C}$ ؛ ثم ينقل محلول التغذية إلى المرحلة الثانية عند بلوغ قيمة الـ PH عند الرقم 7 ودرجة حرارة  $30^{\circ}\text{C}$ ، ويعاد تغذية المرحلة الأولى من جديد؛ ثم تبدأ المرحلة الثالثة عند استقرار قيمة الـ PH عند الرقم 8 ودرجة حرارة  $40^{\circ}\text{C}$ ، وتستمر إلى نهاية عملية التخمر، وتوقف إنتاج الغاز الحيوي. وعند انتقال الدفعة الأولى إلى المرحلة الثالثة تنقل الدفعة الثانية إلى المرحلة الثانية، وتملأ الأسطوانة الأولى بدفعة ثالثة، وبهذه الطريقة يتم تشغيل المفاعل الحيوي ثلاثي المراحل، ويتم خلط محلول التغذية في المراحل الثلاث بمعدل 50 دورة كل ست ساعات.

#### 3-2-4 الاختبارات:

##### 1) قياس الـ PH:

تم مراقبة قيمة الـ PH كل خمسة أيام، وتم قياسها باستخدام مستشعرات الـ PH، حيث تتلون ورقة المستشعر عند وضع نقطة من محلول التغذية عليها وبناءً على اللون يتم تحديد قيمة الـ PH، حيث يوضح الشكل (12) الألوان الناتجة وقيم الـ PH الموافقة.



الشكل (12): الألوان المعتمدة لتحديد قيمة الـ PH.

##### 2) اختبار إنتاج الغاز الحيوي:

تم مراقبة إنتاج الغاز الحيوي للدفعة الأولى في المراحل الثلاث وتسجيل حجم الغاز المنتج بشكل دوري وتراكمي باعتماد وحدات حجمية بسعة 2 L.

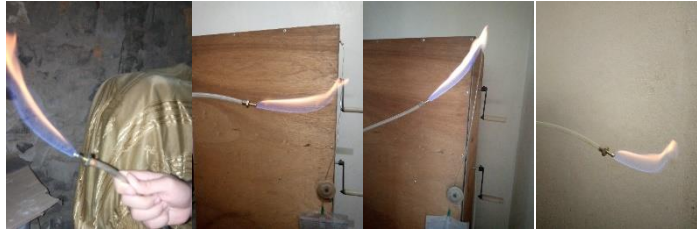
##### 3) اختبار جودة الغاز الحيوي:

تم تحليل عينات من الغاز الحيوي الناتج في المخبر المركزي بمصفأة بانياس باستخدام جهاز الكروماتوكراف للتأكد من خلو الغاز الحيوي من أي غاز عضوي غير الميثان (علمياً أن جهاز الكروماتوكراف يحدد نسبة غاز الميثان في الغاز الحيوي بالنسبة للغازات التي يحللها الجهاز وهي الميثان والإيثان والبروبان والبيوتان والبنتان)، ويظهر الشكل (13) جهاز الكروماتوكراف المستخدم.



الشكل (13): جهاز الكروماتوكراف المستخدم في المخبر المركزي بمصفأة بانياس.

كما تم أخذ عينات من شعلة الغاز في أوقات مختلفة، كما يظهر في الشكل (14)، من أجل التأكد من ارتفاع نسبة غاز الميثان بالاعتماد على لون الشعلة.

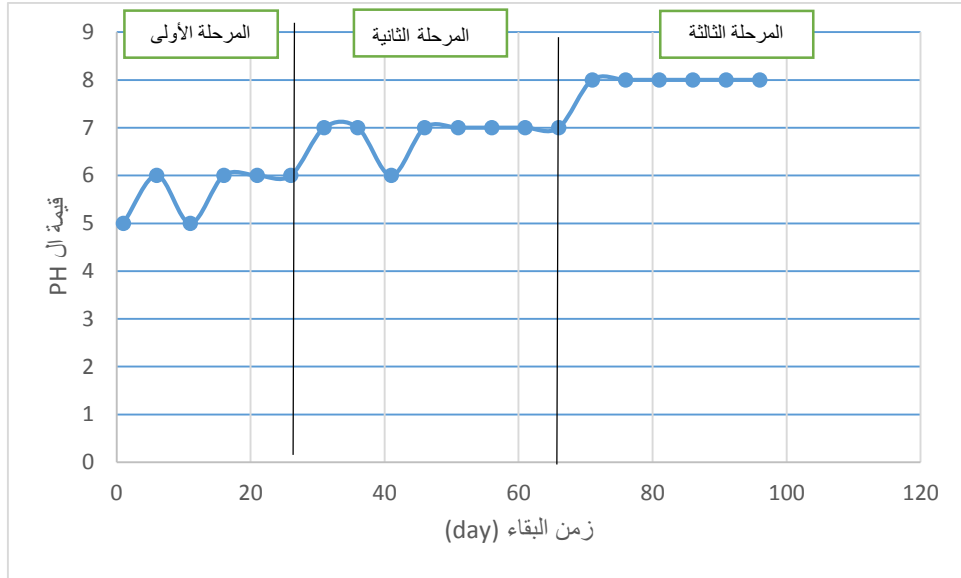


الشكل (14): اشتعال عينات من الغاز الحيوي.

## 5- النتائج والمناقشة:

### 5-1 نتائج قياس ال PH:

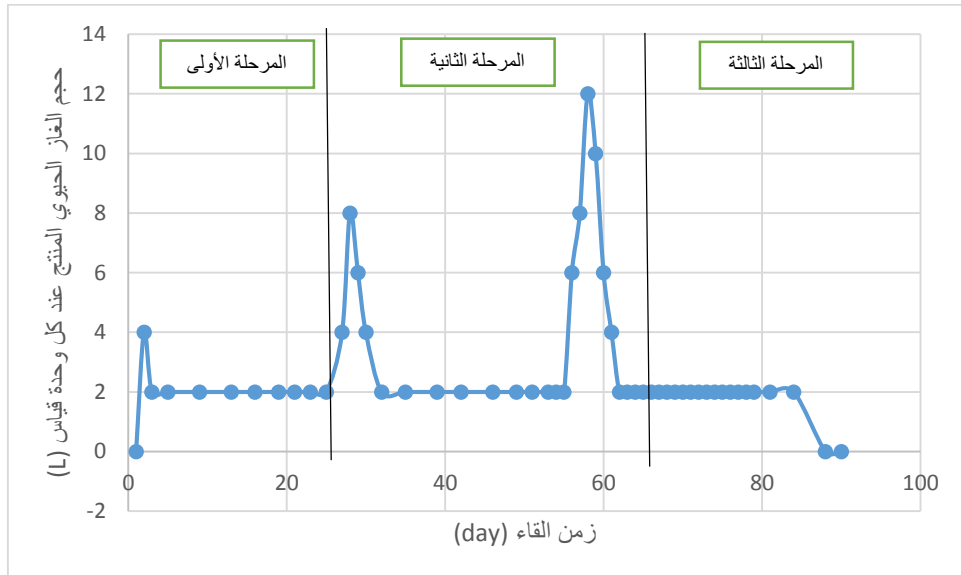
يبين المنحني في الشكل (15) العلاقة بين تغير قيم ال PH مع زمن البقاء، حيث نلاحظ أنه في المرحلة الأولى، والتي استمرت حوالي 26 يوماً، تراوحت قيمة ال PH بين 5 و 6 حيث كانت العملية الكيميائية السائدة هي عملية الحمهة، ثم بدأ يتزايد مع بداية المرحلة الثانية ليستقر فيها على الرقم 7 حتى اليوم 66، ليعود ويزداد في بداية المرحلة الثالثة حتى الرقم 8 ويستقر عنده حتى نهاية التجربة.



الشكل (15): العلاقة بين تغير قيم ال PH مع زمن البقاء.

### 2-5 نتائج قياس حجم الغاز الحيوي:

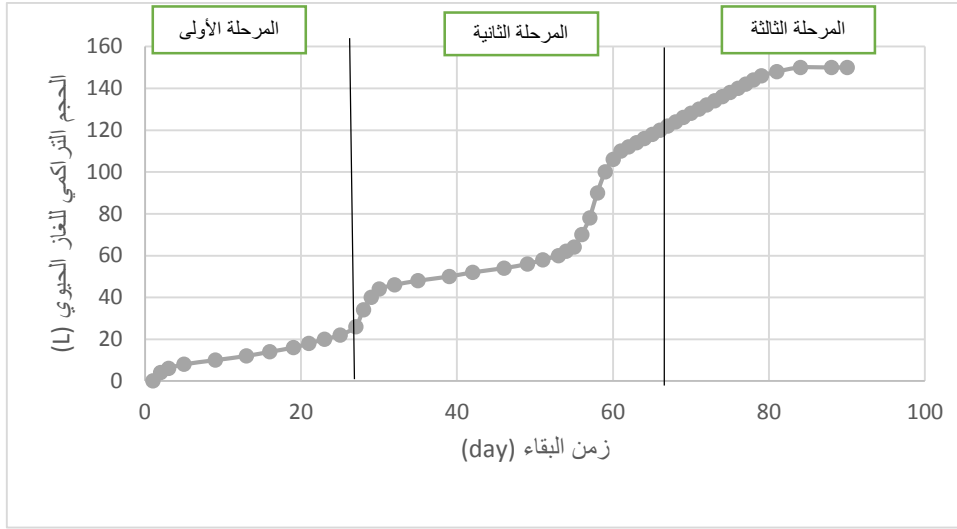
يبين المنحني في الشكل (16) العلاقة بين تغير حجم الغاز الحيوي الدوري مع زمن البقاء، حيث بلغ إنتاج الغاز الحيوي في نهاية المرحلة الأولى 22 L، ويمكننا تفسير ذلك بأن قيمة ال PH قد تراوحت بين 5 - 6، وفي المرحلة الثانية لوحظ وجود ذروتان لإنتاج الغاز الحيوي، الذروة الأولى في اليوم 28، حيث بلغ إنتاج الغاز 8 L، والذروة الثانية في اليوم 58، حيث بلغ إنتاج الغاز 12 L، حيث كانت قيمة ال PH=7، وبلغ إنتاج الغاز الإجمالي في المرحلة الثانية 100 L، وفي المرحلة الثالثة كان حجم الغاز المنتج فيها 30 L وذلك عند قيمة PH=8.



الشكل (16): تغير حجم الغاز الدوري مع زمن البقاء.

### 3-5 نتائج تحليل جودة الغاز الحيوي:

يبين المنحني في الشكل (17) العلاقة بين الحجم التراكمي للغاز الحيوي وزمن البقاء،



الشكل (17): العلاقة بين الحجم التراكمي للغاز الحيوي وزمن البقاء.

يلاحظ من المنحني في الشكل (17) أنه في المرحلة الأولى بدأ إنتاج الغاز الحيوي بشكل بطيء حتى نهاية المرحلة، بحيث لم يتجاوز الحجم التراكمي للغاز 22L، كما أنه عند تحليل الغاز كانت نسبة غاز الميثان 0%، ولم يكن قابلاً للاشتعال خلال أول أسبوعين، ثم بدأ بالاحتراق بلهب أحمر حتى نهاية المرحلة الأولى دالاً على وجود غاز الميثان بنسبة منخفضة وارتفاع نسب الغازات الأخرى. ومع بداية المرحلة الثانية، عند قيمة ال PH=7 ودرجة الحرارة 30°C، بدأ يتزايد إنتاج الغاز بشكل أبطأ حتى اليوم 51، ثم تزايد إنتاج الغاز بشكل كبير حتى نهاية التجربة، وذلك عند استقرار قيمة ال PH عند الرقم 7. وأظهرت نتائج تحليل الغاز وجود غاز الميثان وانخفاض نسب الغازات الأخرى، حيث كان احتراق الغاز الحيوي بلهب أزرق دالاً على ارتفاع نسبة غاز الميثان في الغاز الحيوي. وفي المرحلة الثالثة، عند درجة الحرارة 40°C وقيمة PH=8، لوحظ استقرار إنتاج الغاز الحيوي بمعدل 2 L يومياً حتى اليوم 79، ثم بدأ بالانخفاض تدريجياً حتى النفاذ، مع استقرار بمواصفات الغاز الناتج، إلا أنه في الأيام العشر الأخيرة لعملية التخمير كان اشتعال الغاز ذا لون أزرق يصاحبه عدة ألوان، مما يدل على انخفاض نسبة غاز الميثان في الغاز الحيوي.

## 6- الاستنتاجات والتوصيات

### 1-6 الاستنتاجات:

من خلال تقييم أداء المفاعل الحيوي ثلاثي المراحل تم التوصل إلى الاستنتاجات التالية:

- 1- إمكانية التحكم في بارامترات المفاعل الحيوي ثلاثي المراحل بشكل منفصل.
- 2- ازداد إنتاج الغاز الحيوي في المرحلة الثانية (درجة حرارة 30°C، وقيمة PH=7) بنسبة 81.96%.
- 3- ارتفاع نسبة غاز الميثان في الغاز الحيوي المنتج في المرحلة الثانية.
- 4- انخفاض نسبة غاز الميثان في العشرة أيام الأخيرة في المرحلة الثالثة.

## 2-6 التوصيات:

- ✓ إجراء الاختبارات عند درجات حرارة مختلفة، لمعرفة أثر تغير درجات الحرارة في المفاعلات ثلاثية المراحل مقارنة مع المفاعلات أحادية وثنائية المراحل.
- ✓ استخدام مواد عضوية متنوعة ذات خصائص مختلفة لدراسة تأثيرها على إنتاج وجودة مخرجات المفاعل الحيوي.
- ✓ أتمتة المفاعلات الحيوية، بحيث يقوم المفاعل تلقائياً بضبط درجة الحرارة وخلط المواد العضوية ضمن المفاعل.

## المراجع:

1. معرفي، مصطفى عباس. "مبادئ الطاقة .مطبوعات جامعة دولة الكويت"،(1999).
2. غانم، محمد؛ إبراهيم، دعد. "استخدام تقنية التخمير لإنتاج الغاز الحيوي من روث الأبقار". مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية، (2014).
3. Igoni, A Hilkih et al;” Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste” Applied Energy 85, 430–438. (2008)
4. Al Seadi, Teodorita et al;”biogas handbook”, University of Southern Denmark Esbjerg,(2008).
5. Al Seadi, T; ”Good practice in quality management of AD residues from biogas production”, Report made for the International Energy Agency, Task 24- Energy from Biological Conversion of Organic Waste. Published by IEA Bioenergy and AEA Technology Environment, Oxfordshire, United Kingdom, (2001).
6. Gerardi, M,H;” The microbiology of anaerobic digesters”. John Wiley & Sons, ( 2003).
7. Khanal, S.K;”Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications”, John Wiley & Sons. (2011)
8. Mathew AK, Bhui I, Banerjee SN, Goswami R, Shome A, Chakraborty AK, Balachandran S, Chaudhury S;” Biogas production from locally available aquatic weeds of Santiniketan through anaerobic digestion”, Clean Technol Environ Policy.doi:10.1007/s10098-014-08776, (2014).
9. Shelford, T. C. Gooch, A. Choudhury, and S. Lansing;”A Technical Reference Guide for Dairy-Derived Biogas Production, Treatment and Utilization”, University of Maryland, department of environmental science and technology. 104 p, (2019).
10. Goswami R, Chattopadhyay. P, Shome. A, Banerjee. S.N, Chakraborty A.K, Mathew. A.K, Chaudhury. S; ”An overview of physico-chemical mechanisms of biogas production by microbial communities: A step towards sustainable waste management”, 3 Biotech 6, 1–12. [CrossRef] [PubMed], (2016).
11. Ngan, N. V. C, et al; “Anaerobic Digestion of Rice Straw for Biogas Production”, Chapter 5, Sustainable Rice Straw Management, (2020).
12. Rittmann, B. E., & McCarty, P. L.; “Environmental biotechnology: Principles and applications (International ed.)”. Singapore: McGraw Hill, (2001).

13. Kiros Hagos et al; "Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives", State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China, (2017).
14. Baldi. F., et al; "Comparison of single-stage and two-stage anaerobic co-digestion of food waste and activated sludge for hydrogen and methane production", Volume 143, Page 1755-1765, December (2019).
15. Wang. Shiwei et al; "Influence of Temperature on Biogas Production Efficiency and Microbial Community in a Two-Phase Anaerobic Digestion System", State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, January (2019).
16. Akbar Sanaei-Moghadam et al; "Enhancement of Biogas Production by Co-digestion of Potato Pulp with Cow Manure in a CSTR System", Springer Science+Business Media New York (2014).