

تطوير جهاز مخبري لإنتاج الغاز الحيوي من المخلفات العضوية

م. بلال بكور، د. مصطفى طالب، د. أحمد فراس علوش

جامعة ادلب، كلية الهندسة الميكانيكية

ملخص:

دُرس في هذا البحث تطوير جهاز مخبري لإنتاج الغاز الحيوي وقد أظهرت النتائج أن الجهاز يتمتع بدقة قياس مستقرة بغض النظر عن قيمة الانحراف في القياس عند الضغط الجوي، وذلك بفضل حساسات قياس الضغط المستخدمة وكفاءتها ودقتها، كما أثبت الجهاز أداءً جيداً بقدرته على تنفيذ القياسات بدقة مقبولة وسرعة، ما يؤدي إلى زيادة ثقة الجهاز وثقة النتائج التي يقدمها، وأشارت النتائج أيضاً إلى تحقيق الجهاز الفوائد الاقتصادية المتوقعة من استخدامه، لأنه يمتاز بسعر وتكلفة وصيانة معقولة.

يمكن القول إن استخدام الجهاز المخبري في إنتاج الغاز الحيوي يُحسِّن عملية الإنتاج ويزيد كفاءتها، ويعد هذا البحث مرجعاً مهماً للمهتمين بمجال إنتاج الغاز الحيوي. عن طريق تنفيذ التوصيات المقدمة واستخدام الجهاز، يمكن تعزيز الكفاءة والموثوقية في إنتاج الغاز الحيوي وتعزيز استدامته مصدراً للطاقة المتجددة.

الكلمات المفتاحية: الغاز الحيوي، الطفو، التخمر اللاهوائي، الهاضم اللاهوائي،

طاقة متجددة.

Developing a laboratory device for producing biogas from organic waste

Belal bakour, Dr. Mostafa Taleb , Dr. Ahmad Firas Alloush
Idlib University Faculty of Mechanic Engineering

Abstract:

In this research, a laboratory device for the production of biogas was studied. The results showed that the device has a stable measurement accuracy regardless of the deviation value in the measurement at atmospheric pressure, thanks to the pressure sensors used, and their efficiency and accuracy. The device has also proven to perform well with its ability to carry out measurements with acceptable accuracy and speed, which leads to an increase in the reliability of the device and the confidence of the results it provides. The results also indicated that the device is correspondent to with the economic benefits expected from its use, as it is available at a reasonable price, cost, and maintenance.

It can be concluded that the use of the laboratory equipment in the production of biogas contributes to improving the production process and increasing its efficiency. This research is an important reference for those interested in the field of biogas production. By implementing the recommendations made and using the device, the efficiency and reliability of biogas production can be enhanced and its sustainability as a renewable energy source Can be achieved.

Keywords: biogas, flotation, anaerobic fermentation, anaerobic digester, Renewable energy.

مقدمة:

يتكون الغاز الحيوي بشكل رئيس من غاز الميثان فتصل نسبته إلى 60%، ويمكن استخراجه من المواد العضوية المتحللة بواسطة العمليات البيولوجية، مثل المخلفات الزراعية، ومخلفات الحيوانات. ويُعدّ الغاز الحيوي مصدراً مهماً للطاقة المتجددة والمستدامة [Fan et al., 2018] لأسباب عدّة نذكر منها:

أولاً: يوفر الغاز الحيوي تنوعاً طاقوياً، إذ يقلل من الاعتماد على المصادر الأحفورية المحدودة ويزيد من التنوع في سلسلة الإمدادات الطاقوية.

ثانياً: إن الغاز الحيوي قابل للتجدد؛ إذ يمكن إنتاجه بشكل مستمر من المواد العضوية المتجددة والنفايات الزراعية والمخلفات الغذائية. وهذا يعني أنه يمكن زراعة المزيد من المواد العضوية لإنتاج الغاز الحيوي وتجديدها بشكل مستمر.

ثالثاً: يمكن استخدام مخلفات عملية إنتاج الغاز الحيوي سماداً عضوياً للزراعة، ما يحسن تربة الأراضي ويزيد من إنتاجية المحاصيل.

رابعاً: يُحسن استخدام الغاز الحيوي إدارة المخلفات عن طريق تقليل تراكم المخلفات العضوية وتخليص البيئة منها، وكذلك تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة لدى استخدامه بديلاً للوقود الأحفوري كالنفط والفحم.

يُعدّ التخمر اللاهوائي أهم الطرق المُتبعة لتحويل المخلفات العضوية إلى غاز حيوي. تتحلل المواد العضوية في هذه العملية عن طريق البكتيريا في ظروف خالية من الأكسجين، ما يؤدي إلى إنتاج الغاز الحيوي.

إن عملية إنتاج الغاز الحيوي عن طريق عملية التخمر اللاهوائي للمخلفات العضوية تكون في مراحل، وتتميز كل مرحلة بشروط محددة وبارامترات تشغيل مختلفة بما يتوافق مع المرحلة المعنية ومن هذه البارامترات (درجة الحموضة، درجة الحرارة، الضغط، سرعة التقليب ومعدله،...) [Bhatt and Tao, 2020, Singh et al., 2018].

وتُعدّ عملية قياس حجم الغاز الناتج عن عملية التخمر اللاهوائي من العمليات الأساسية والضرورية اللازمة لمعرفة تأثير البارامترات التي تؤثر بشكل مباشر في عملية إنتاج الغاز الحيوي ولما كان حجم الغاز المُنتج والمطلوب قياسه صغيراً جداً وعند ضغوط

منخفضة جداً بالإضافة إلى الدقة العالية المطلوبة للقياس كان لابد من تصميم جهاز قياس الحجم الناتج بما يتفق مع حجم الهاضم وكمية التدفق المتوقعة للغاز المُنتَج. إنَّ تطوير جهاز مخبري لإنتاج الغاز الحيوي من المخلفات العضوية ضرورة ملحة وذلك لأسباب عدّة منها:

1. تحسين التحكم والرصد: يمكن للجهاز المخبري أن يوفر تحكماً دقيقاً في عملية إنتاج الغاز الحيوي ورصد المؤشرات المهمة كدرجة الحموضة، ونسبة الغازات المنتجة، والنشاط البيولوجي وغير ذلك، ما يسمح بمراقبة وتحسين العملية بشكل مستمر وتحقيق أعلى أداء.
 2. التجارب والبحوث: يوفر الجهاز المخبري بيئة ملائمة وآمنة لإجراء التجارب والبحوث المتعلقة بإنتاج الغاز الحيوي، ويمكن استخدامه لاختبار تأثير مختلف العوامل على عملية إنتاج الغاز الحيوي وتحسين الفهم العلمي للعملية.
 3. التدريب والتعليم: يمكن استخدام الجهاز المخبري في التدريب والتعليم للطلاب والباحثين والمهنيين في مجال إنتاج الغاز الحيوي.
 4. التطوير المستقبلي: قد يمهد تطوير جهاز مخبري الطريق لتطوير أنظمة أكبر وأكثر تعقيداً لإنتاج الغاز الحيوي من المخلفات العضوية. بعد عملية إنتاج الغاز الحيوي يُنقى من غاز ثاني أكسيد الكربون، ويُقاس حجمه مع الزمن منسوباً إلى كمية المادة العضوية في الهاضم، وتُخزن قيم الحجم المنتج في قاعدة بيانات تسمح بعملية التحليل اللاحقة، وذلك بعد تصحيح الحجم المقاس إلى الشروط القياسية من الضغط ودرجة الحرارة.
- إنَّ تصنيع جهاز يلبي المتطلبات سابقة الذكر يُعدّ ذا أهمية كبيرة في إجراء الدراسات والأبحاث اللازمة لعملية إنتاج الغاز الحيوي واحداً من مصادر الطاقة البديلة والمتجددة.

1. الأجهزة المستخدمة وطريقة العمل:

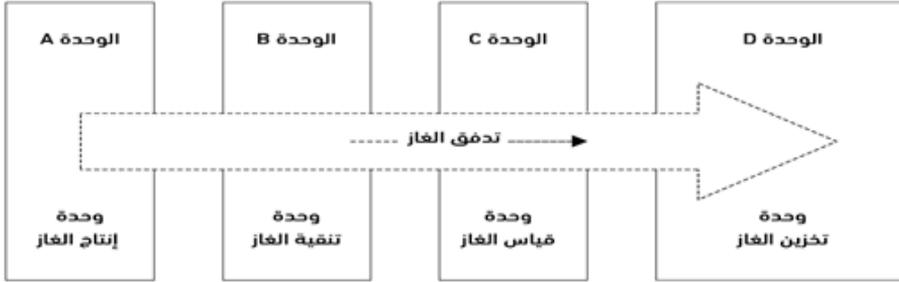
يتكون الجهاز من أربع وحدات أساسية الشكل (1):

الوحدة A: تمثل الهاضم اللاهوائي (وحدة إنتاج الغاز).

الوحدة B: وحدة تنقية الغاز المُنتَج.

الوحدة C: وحدة قياس حجم الغاز المُنتَج المُنقَى.

الوحدة D: وحدة تخزين الغاز المُنتَج المُنقَى.



الشكل (1): يبين مراحل إنتاج الغاز الحيوي ومعالجته وفق آلية عمل الجهاز.

وحدة إنتاج الغاز (الهاضم اللاهوائي):

تتنوع تصاميم الهاضم وتختلف حسب نوع المادة المهضومة ونظام التغذية (مستمر، متقطع ..) [Sarker et al., 2019] وغير ذلك من العوامل التي تُحدّد نوع الهاضم المستخدم وتصميمه.

سنعتمد في هذا البحث على نموذج الهاضم من نوع (continuous stirred-tank

reactor) (CSTR) (المفاعل ذو التحريك المستمر) والذي يتميز بما يأتي:

1. مرحلة واحدة.

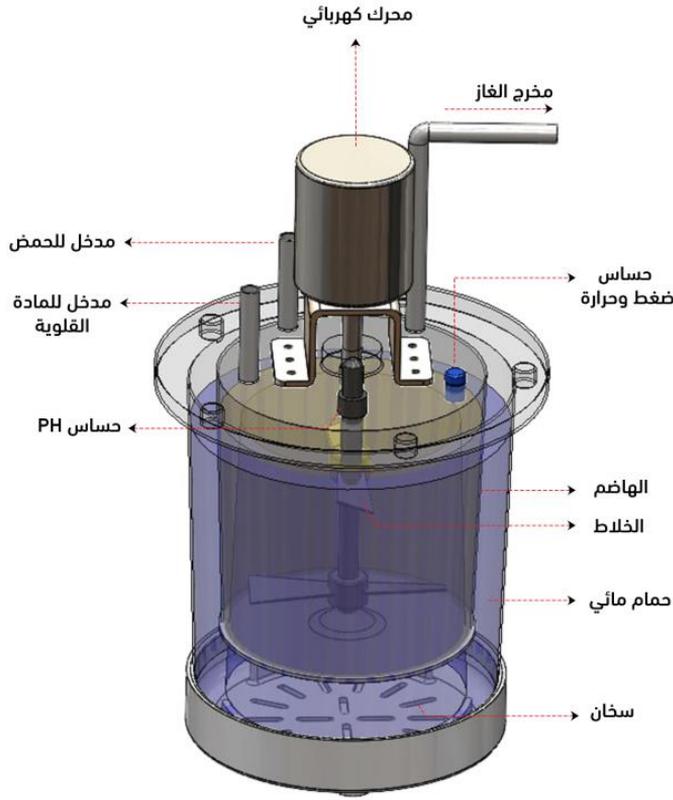
2. تغذية لمرة واحدة.

3. التحريك يتم عن طريق خلّاط ميكانيكي بمحرك كهربائي.

جُهِز الهاضم بعدد من الحساسات والأجهزة التي تسمح بمتابعة جميع البارامترات

التي تؤثر في إنتاج الغاز الحيوي وضبطها. يوضح الشكل (2) الهاضم المستخدم مع

مكوّناته الأساسية:



الشكل (2): المكونات الأساسية للهاضم اللاهوائي

فيتكون الهاضم من الأجزاء الأساسية الآتية:

1. جسم الهاضم (المفاعل): وهو أسطوانة قطرها 13.5cm وارتفاعها 14.5cm مصنوعة من مادة الأكريليك يمكنها أن تعالج ثلاث لترات من المادة المطلوب هضمها.
2. حمام مائي ساخن: للمحافظة على درجة حرارة المادة في الهاضم في الحدود المسموح بها وهذا الحمام أسطوانة قطرها 15.5cm وطولها 17cm تُعبأ بالماء كوسيط للتسخين، يُسخن عن طريق وشيعة كهربائية تُضبط الحرارة أوتوماتيكياً بربطها بحساس درجة الحرارة ضمن الحمام.

3. خلّاط ميكانيكي: يُحرّك المادة ضمن الهاضم بنظام تحريك وقلب مُحدّد مسبقاً (عدد الدورات بالدقيقة، وقت التوقّف والتحريك، اتّجاه التحريك...) وذلك عن طريق محرّك كهربائي يُنحّك به ويُبرمج.
4. حسّاس PH لقياس قلوية الوسط ضمن الهاضم بشكل مستمر وضبطه عن طريق إضافة حمض أو أساس.
5. مدخل للمادة الحمضية لتعديل PH الوسط.
6. مدخل للمادة الأساس لتعديل PH الوسط.
7. حساس لقراءة الضغط ودرجة الحرارة ضمن الهاضم في الفراغ العلوي (ضغط وحرارة الغاز في الفراغ العلوي للهاضم).
8. مخرج للغاز: لسحب الغاز الناتج عن عملية التخمر اللاهوائي يوضع صمّام على هذا المخرج لضبط الضغط ضمن الهاضم.

1.1 وحدة تنقية الغاز المُنتج:

يوصل مخرج الغاز المُنتج من الهاضم بحجرة الشكل (3) تحوي محلول (Na OH) تركيز (3M) لامتصاص وإزالة غازات CO_2 و H_2S ولهذا المحلول كفاءة امتصاص (98%) ومن ثمّ يوصل مخرج هذه الحجرة بجهاز قياس حجم الغاز، وهكذا يُحسب حجم الغاز المتبقي ممثلاً بـغاز الميثان (CH_4).

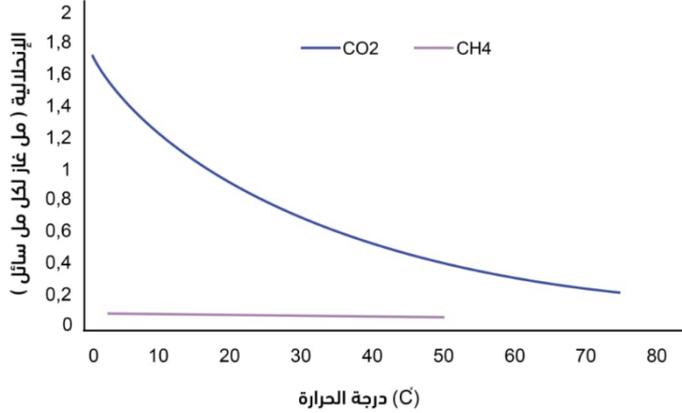


الشكل (3): وحدة تنقية الغاز التي تتكون من حجرة التنقية ومدخل ومخرج للغاز

يُعد غاز الميثان غازاً عضوياً هيدروكربونياً قليل الانحلالية بالماء وتُعد انحلاليته بالماء صفر بينما CO_2 غاز شديد القطبية وشديد الانحلالية في الماء:

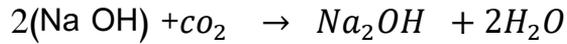


يوضح المخطط في الشكل (4) انحلالية كلٍّ من غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وغاز الميثان (CH_4) في الماء عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل (4): انحلالية كلٍّ من CH_4 و CO_2 عند درجات الحرارة المختلفة.

$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+ \leftrightarrow CO_3^{2-} + 2H^+$
 إن إزالة شوارد الهيدروجين (H^+) يؤدي إلى زيادة انحلالية (CO_2)، أي يتحول اتجاه التفاعل لليمين ولتحقيق ذلك تُضاف مادة قاعدية، كاستخدام محلول من هيدروكسيد الصوديوم بحيث يكون (PH>8):



للحصول على محلول هيدروكسيد الصوديوم (3M) نضيف (240 gr) من مادة هيدروكسيد الصوديوم الجافة إلى (2000 mL) من الماء المقطر. وللتأكد أن قيمة PH للمحلول أكبر من (8) نستخدم كاشفاً يعطي المحلول لوناً أزرق بما أن الـ (PH>8) وعندما يقل PH عن قيمة 8 يصبح المحلول لالون له.

1.2. وحدة قياس حجم الغاز (الوحدة C):

إن قياس حجم صغير جداً من الغاز عند ضغوط منخفضة (قريبة من الضغط الجوي) بدقة عالية ليست مهمة سهلة لأن أجهزة قياس تدفق الغاز الصناعية لا تُمكننا من قياس التدفقات المنخفضة للغاز بالدقة المطلوبة. تتعدد [Weinrich et al., 2018] طرق قياس حجم الغاز إلا أنه يوجد طريقتان [Stromberg et al., 2014; VDI 4630:2014-04 E, 2014]

تقليديتان لقياس حجم الغاز المنتج خلال وحدة الزمن:

(a) القياس تحت ضغط ثابت.

(b) القياس تحت حجم ثابت.

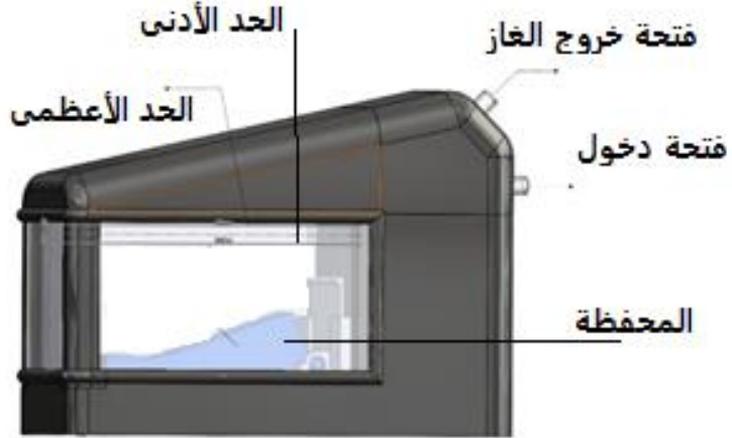
وتوجد آلية أخرى تعتمد طريقة الكروماتوغرافيا الغازية، وهي مشابهة للطريقة البارامترية ولكن بدلاً من قياس الزيادة في الضغط تقيس الأجهزة تغيرات تركيب الغاز. ولهذه الطريقة دقة قياس لا بأس بها لكن استجابة الأجهزة منخفضة ولا تستطيع تحسس تغيرات أقل من (75 Ncm^3) [Walker et al., 2009; Wedler, 2022]، إضافة إلى أن تقنية الكروماتوغرافيا الغازية تتطلب أجهزة باهظة الثمن، وتحتاج فنيين بخبرة عالية ومعايرة مستمرة للأجهزة فهي غير مناسبة.

وقد وُجِدَت آلية بسيطة وفعالة وقليلة التكلفة لتصميم جهاز يقيس حجم الغاز المُنتَج وفق الطريقة الحجمية تعتمد على مبدأ إزاحة السائل والطفو. هذا الجهاز يعمل وفق نظام أوتوماتيكي يعتمد على قياسات الغاز الحجمية ويُعدّ جزءاً مهماً من نظام عمل محاكاة مخبري لقياس تأثير عدة عوامل على مُعدّل إنتاج الغاز وكفاءته.

1.2.1. مبدأ عمل جهاز قياس حجم الغاز المُنتَج:

يعتمد الجهاز على مبدأ إزاحة السائل والطفو [Ahmed et al., 2001] ويستطيع مراقبة تدفقات غازية بسيطة. إذ تعمل المحفظة المغمورة ضمن السائل على تجميع الغاز الداخل للجهاز، والمنبعث من الأنبوب أسفلها إلى أن يصل حجم الغاز المجمع ضمن المحفظة إلى قيمة تجعل قوة الطفو المؤثرة في المحفظة أكبر من وزنها، ما يؤدي إلى طفو المحفظة من أحد طرفيها بينما يبقى الطرف الآخر المثبت ضمن السائل [Rosato, 2018].

إن تحرك المحفظة وطفوها وفق الآلية السابقة يجعل الغاز يتحرر من المحفظة إلى الفراغ العلوي من الجهاز ومنه إلى مخرج الغاز. وبعد تحرر الغاز من المحفظة تصبح قوة الطفو المؤثرة في المحفظة أقل من وزنها وتغوص المحفظة مجدداً ضمن السائل لتبدأ مرحلة جديدة من تجميع الغاز أسفلها. وعند كل عملية طفو للمحفظة يعمل جهاز عدّ على توليد نبضة رقمية تمثل حجماً محدداً من الغاز (حجم الغاز المجمع أسفل المحفظة)، وعليه حساب عدد مرات تحرر المحفظة يعني حساب تدفق حجم الغاز. تعتمد دقة الحساب على حجم المحفظة وأي جرعات الغاز المتحررة والمحددة الحجم ml (20). وتُسجّل البيانات في نظام بيانات متكامل يقوم بعرض البيانات للتدفق وتحليلها. يعمل الجهاز، الشكل (5) على تصحيح حجم الغاز المتحرر من المحفظة إلى الشروط القياسية من الضغط ودرجة الحرارة

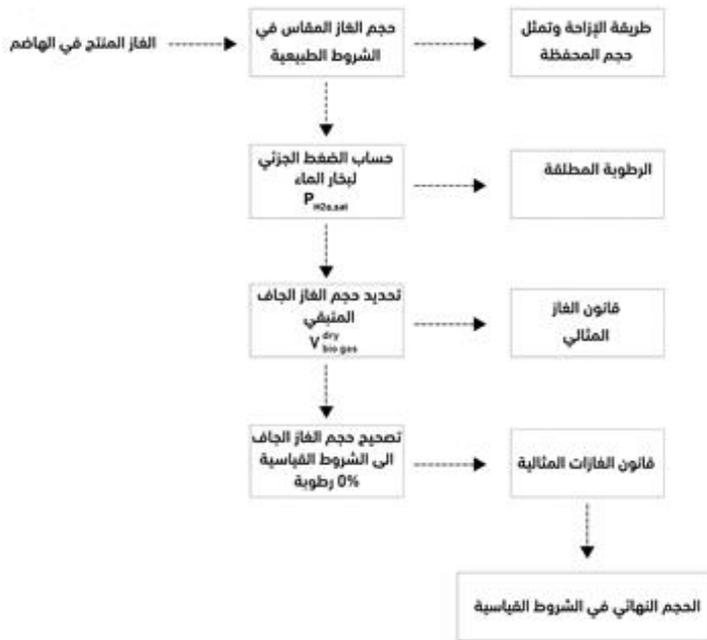


الشكل (5): جهاز قياس حجم الغاز

1.2.2. تصحيح حجم الغاز المقاس إلى الشروط القياسية:

رُود الجهاز بحساسات إلكترونية للضغط والحرارة وعدّاد إلكتروني لحركة المحفظة، ورُبِطت هذه الحساسات ببرنامج يُصحح آلياً الحجم المقيس في ظروف العمل إلى الشروط القياسية من الضغط ودرجة الحرارة وبشكل آني عند كل تحرر لحجم من الغاز، وهكذا نحصل على حجم الغاز المُنتج بالشروط القياسية.

يُقاس الضغط والحرارة عند كل عملية طفو للمحفظة وتحرر للغاز ضمنها ويُعاد تصحيح الحجم إلى الشروط القياسية من الضغط والحرارة و 0% رطوبة، $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، $P=1\text{ atm}$. ويوجد شروط مرجعية قياسية مختلفة وبشكل عام يُعتمد (IUPAC) (The standards of the International Union of Pure and Applied Chemistry) [McNaught and Wilkinson, 2019] والتي تعتمد: $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ودرجة الحرارة $p=101,325\text{ Kpa}$ الضغط القياسي 0% والتي توافق رطوبة $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ودرجة الحرارة $p=101,325\text{ Kpa}$ الضغط القياسي 0%. ويوضح الشكل (6) آلية حساب حجم الغاز في الشروط القياسية.



الشكل (6): مخطط يوضح آلية حساب حجم الغاز في الشروط القياسية. [Neubert et al., 2021].

1.3 وحدة تخزين الغاز:

بعد خروج الغاز من وحدة قياس الحجم يُخزّن في وحدة التخزين وهي خزان أسطواني. وفيما يأتي آلية عملها وأهم مكوناتها:

1. المضخة المكبسية:

تقوم بسحب الغاز من وحدة قياس الغاز وتعمل وفق الآتي:

في طور السحب: تسحب المضخة الغاز المتحرر من المحفظة إلى الفراغ العلوي لوحدة قياس الحجم بحيث تحافظ على ضغط ثابت للغاز في الفراغ العلوي للهاضم قريب من الضغط الجوي، ويتحقق ذلك عن طريق الربط الأوتوماتيكي لمكبس المضخة مع حساس الضغط الذي يقيس الضغط في الفراغ العلوي لوحدة قياس الحجم، وفي هذه الأثناء يكون الصمام بين المضخة ووحدة قياس الحجم مفتوحاً دائماً (ON)

وفي طور الطرد: يُغلق الصمام بين المضخة ووحدة قياس الحجم، ويُفتح الصمام بين المضخة والخزان، ويعمل المكبس على ضغط الغاز وطرده من أسطوانة المضخة باتجاه الخزان. وتكرر الدورة (سحب وطرده)، وهكذا تستمر العملية.

2. الخزان: يُخزن الغاز الحيوي ضمنه إلى ضغط معين ومن هذا الخزان يُسحب الغاز إلى مشعل الاختبار ويُزود الخزان بصمام أمان ميكانيكي يفتح للهواء الجوي بمجرد بلوغ الضغط قيمة عالية منعا لأي حادث.

3. مصيدة اللهب: لمنع عودة اللهب من الشعلة باتجاه الخزان.

1.4 نظام تشغيل الجهاز الإلكتروني:

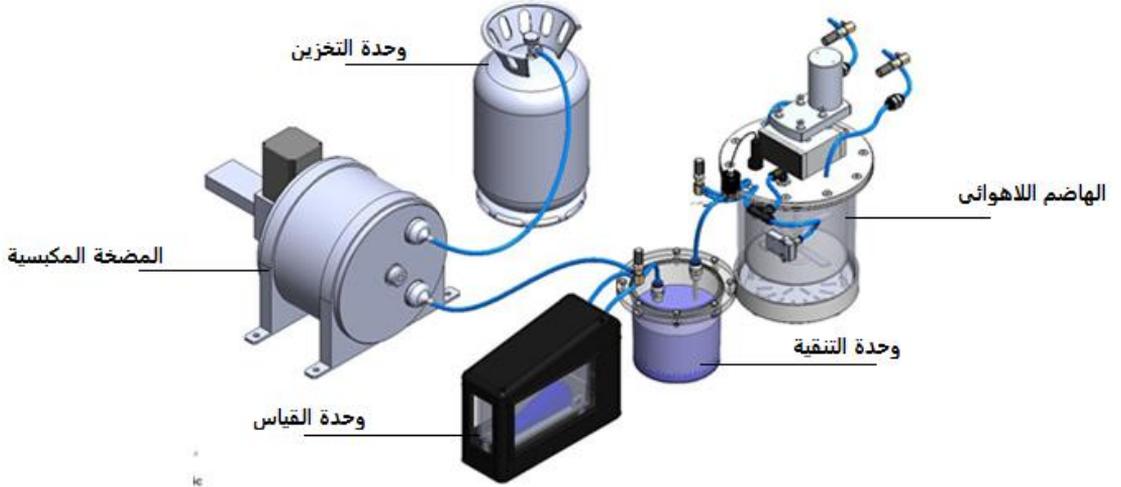
صُممت البرمجيات اللازمة لعمل الجهاز، وهي تتكون من:

1. قاعدة بيانات من أجل تخزين البيانات الخاصة لكل تجربة على حدة، محددة بزمن بدء كل تجربة ونهايتها، ومحفوظة بشكل يسمح بالاستعلام عن البيانات الخاصة بالتجربة في أي لحظة لغرض إجراء عمليات التحليل.

2. واجهة تحكم مصممة بلغة الجافا نبدأ عن طريقها بتجربة جديدة ووضع بارامترات التشغيل الخاصة بالتجربة.

3. واجهة أندرويد تمكننا من متابعة التجربة من خلال الإنترنت (الشابكة).

يوضح الشكل (7) مكونات الجهاز المخبري لإنتاج الغاز الحيوي.



الشكل (7): مكونات الجهاز المخبري لإنتاج الغاز الحيوي

2. النتائج والمناقشة:

بعد تصنيع مكونات الجهاز وتجميعها وفقاً للتصميم المذكور، كان البدء بتطبيق الجهاز واختباره. ويُعدّ القياس الدقيق لحجم الغاز المنتج، الذي يرجع إلى وحدة كتلة المادة العضوية الموجودة في الهاضم، هو المعيار الأساسي والدقيق لتقدير كفاءة إنتاج الغاز الحيوي من المادة العضوية.

أُجري الاختبار ثم معايرة الجهاز عن طريق حقن حجم مقيس من الهواء (عند شروط الغرفة من الضغط ودرجة الحرارة) وذلك ضمن الهاضم بافتراضه حجماً مُنتجاً من الغاز ضمن الهاضم ثم قياس الحجم الناتج من خلال وحدة القياس وإجراء المقارنة بين الحجم المحقون (المُنتج افتراضاً) والحجم المقيس وذلك عند ضغوط مختلفة.

ف عند الضغط الجوي ($p_0 = 101000 \text{ pa}$) كانت النتائج لعشرة اختبارات وفق

الجدول (1) الآتي:

الجدول (1): نتائج اختبار الجهاز عند الضغط الجوي

10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	الاختبار (n)
18.8	19.2	18.9	18.9	18.8	18.8	18.9	18.9	19.1	19.2	حجم الهواء المحقون (x)

لحساب دقة القياس للجهاز وفق النتائج السابقة:

1. متوسط نتائج القياس:

$$\begin{aligned} \text{mean} &= \frac{19.2 + 19.1 + 18.9 + 18.9 + 18.8 + 18.8 + 18.9 + 18.9 + 19.2 + 18.8}{10} \\ &= 18.95 \end{aligned}$$

2. حساب الانحراف المعياري:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \text{mean})^2}{n - 1}}$$

إذ:

n: عدد مرات القياس (عدد الاختبارات).

mean: القيمة المتوسطة للقياس.

x: قيمة القياس في الاختبار n

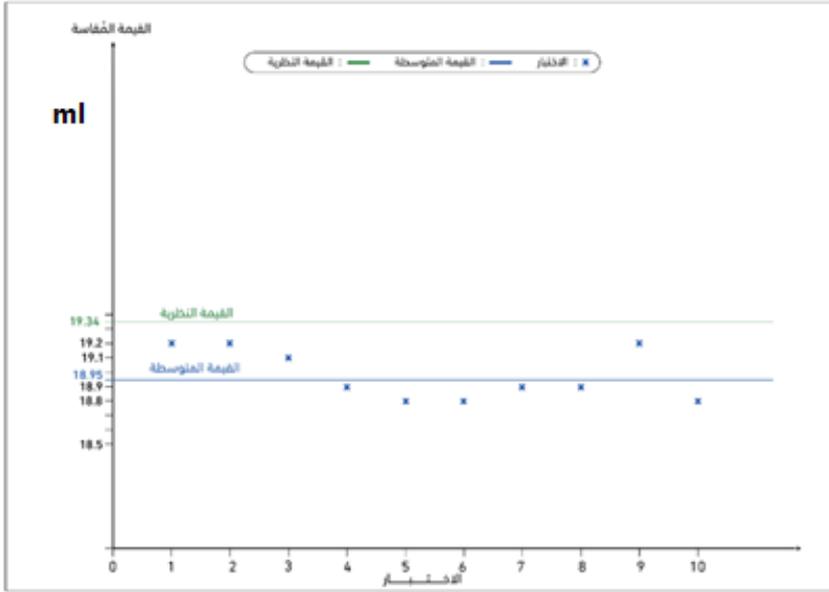
σ : الانحراف المعياري.

وبعد التعويض في المعادلة السابقة نجد قيمة الانحراف المعياري: $\sigma = 0.16$ وعليه فإن

دقة القياس للجهاز: (18.95 ± 0.16) (المتوسط 18.95 والانحراف المعياري 0.16)

يوضح الشكل (8) انحراف قيم القياسات التجريبية العملية عن القيم النظرية والمتوسطة

وذلك عند الضغط الجوي (ضغط غرفة الاختبار)



الشكل (8): انحراف قيم القياسات عن القيمة النظرية والقيمة المتوسطة عند الضغط الجوي.

- إن اختلاف القيمة النظرية عن القيمة المتوسطة لقياس يعود للأسباب الآتية:
- انخفاض حجم الغاز ضمن المحفظة في جهاز القياس بسبب ضغط عمود السائل (الماء) الموجود ضمن الخلية ($h = 10 \text{ cm}$) ما يؤثر في حساب القيمة النظرية.
 - خطأ في القيمة النظرية بسبب خطأ في قياس البارامترات التي تدخل في حساب حجم المحفظة ضمن جهاز القياس.
 - خطأ في القيمة العملية (التجريبية): إذ إنّها تمثل قيمة متوسطة لقيم تجريبية لمجموعة قياسات وقيمة الانحراف لهذه القياسات:
- $$\varepsilon = x_{max} - x_{min} = 19.2 - 18.8 = 0.3 \text{ ml}$$
- ويعود سبب هذا الانحراف لعوامل، منها:
- خطأ تصنيعي في أثناء صناعة المحفظة ضمن جهاز القياس.
 - حساسية المحفظة لعملية الطفو.
 - خطأ في قياس حجم الغاز.

من ناحية أخرى، يعدّ الضغط ضمن الهاضم من العوامل الأهم والأكثر تعقيداً من حيث القياس والضبط، يُؤثر في كفاءة إنتاج الغاز من الهاضم. بينما تكون بقية البارامترات سهلة الضبط والقياس. لذلك كانت الأهمية في عملية اختبار الجهاز بشكل أساسي واقعة على قياس حجم الغاز المنتج عند الضغوط المختلفة، وخاصةً عند الضغوط القريبة من الضغط الجوي والضغوط التخلخلية.

يهدف هذا الاهتمام في عملية الاختبار إلى فهم أداء الجهاز في حالات التشغيل الصعبة، كالضغوط التخلخلية. وعندما يعمل الهاضم تحت ضغط تخلخلي، تزداد التحديات والصعوبات في تحقيق كفاءة إنتاج الغاز، لذلك يتعين تصميم الجهاز بحيث يكون قادراً على التعامل مع هذه الظروف التشغيلية الصعبة وتحقيق أداء أمثل.

يتيح اختبار الجهاز في حالات التشغيل الصعبة كالضغوط التخلخلية تقييم قدرته على الحفاظ على إنتاجية الغاز المستدامة واستقرارها في ظروف التشغيل المتغيرة.

تم حساب الحجم النظري للغاز المنتج المكافئ لحجم المحفظة (الحجم المحقون

من الغاز ضمن الهاضم عند ضغط الغرفة بأنه حجم منتج نريد قياسه) والمقابل لكل ضغط من ضغوط الاختبار اعتماداً على قانون Boyle:

$$p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2$$

p_1 : ضغط الاختبار

v_1 : الحجم النظري عند الضغط الجوي (19.34 ml)

p_2 : الضغط الجوي في غرفة الاختبار ($p_0 = 101000 \text{ pa}$)

v_2 : الحجم النظري عند ضغط الاختبار

فمثلاً عند ضغط الاختبار: ($p_1 = 97000 \text{ pa}$) كان الحجم النظري للمحفظة:

$$v_2 = \frac{97000 * 19.34}{101000} = 18.57 \text{ ml}$$

وهكذا حُسب الحجم النظري والمتوسط والانحراف المعياري عند كل ضغط من

ضغوط القياس وجاءت النتائج كما هو مبين بالجدول (2).

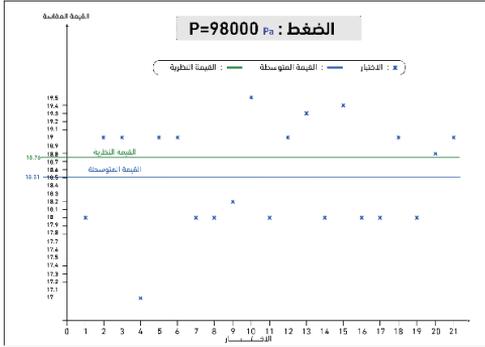
كل نقطة قياس يسجلها نظام القياس تُمثل عملية تفريغ للمحفظة أي حجماً قياسياً يقابلها الحجم المحقون من الهواء والتي من المفترض أن تكون متطابقة في الحالة المثالية لعمل الجهاز.

الجدول (2): نتائج اختبار الجهاز عند ضغوط مختلفة وقيم الانحراف المعياري عند كل اختبار

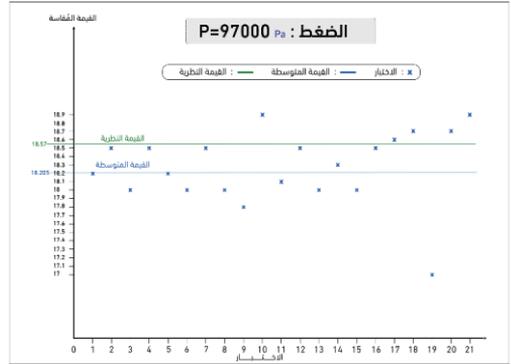
حجم الغاز الناتج (الحجم المحقون) عند ضغوط مختلفة pa					العينة
120000	100000	99000	98000	97000	
23	19	17.8	18	18.2	1
23.2	19	18	19	18.5	2
23.3	19.2	17.6	19	18	3
23.1	18.9	19	17	18.5	4
23.3	18	18	19	18.2	5
23	19	19	19	18	6
22.5	18.8	19	18	18.5	7
22.6	19	19	18	18	8
22	18.6	18	18.2	17.8	9
22.9	19	19.3	19.5	18.9	10
23.9	19	19	18	18.1	11
23	18.2	17.7	19	18.5	12
23.3	19	19	19.3	18	13
23.4	19	17.9	18	18.3	14
21.9	18.7	18.3	19.4	18	15
23.8	18	18	18	18.5	16
22.9	19.3	18	18	18.6	17
22.6	18	18	19	18.7	18
22.8	18	19.2	18	17	19
23.2	19	18	18.8	17.8	20
22.985	18.735	18.39	18.51	18.205	المتوسط
0.536	0.513	0.575	0.663	0.447	الانحراف المعياري
23	19.14	18.95	18.76	18.57	القيمة النظرية
2	1.3	1.6	1.8	1.9	الانحراف

د. طالب، د. علوش، بكور

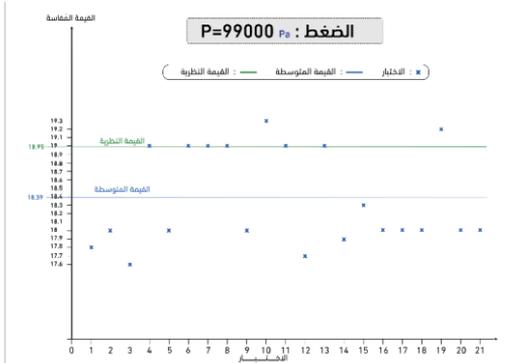
توضح الأشكال (9, 10, 11, 12, 13) مخططات الاختبارات عند الضغوط المختلفة ويظهر عليها انحراف قيم القياسات عن القيم النظرية والقيم المتوسطة عند كل ضغط من ضغوط الاختبار:



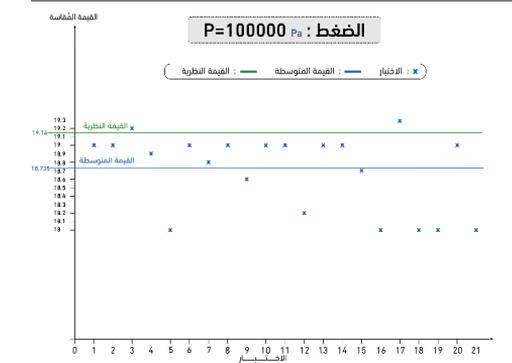
الشكل (10): الاختبار عند الضغط 98000



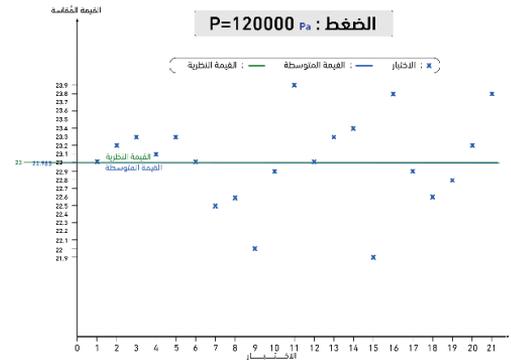
الشكل (9): الاختبار عند الضغط 97000 pa



الشكل (12): الاختبار عند الضغط 100000pa



الشكل (11): الاختبار عند الضغط 99000 pa



الشكل (13): الاختبار عند الضغط 120000pa

عند دراسة النتائج المتعلقة بضغط الاختبار، نلاحظ أن الانحراف المعياري يكون متساوياً وذلك عند ضغوط الاختبار المختلفة، وييدي الجهاز تقريباً دقة القياس نفسها بغض النظر عن قيمة الانحراف في القياس عند الضغط الجوي. ويعود ذلك أساساً إلى حساسات قياس الضغط المستخدمة وكفاءتها ودقتها، فعند القيام بالاختبار عند الضغط الجوي لا يكون من الضروري تفعيل حساس قياس الضغط، كما يُنظر أيضاً إلى مدى عازلية الجهاز للضغط. ويُعدّ أداء الجهاز وقدرته على تنفيذ القياسات بدقة مقبولة وسرعة مهمين، والثقة في النتائج وعدم الحاجة إلى إعادة القياسات المتكررة أو التدقيقات يزيد من موثوقية الجهاز. بالإضافة إلى ذلك، توفر الجهاز بسعر وتكلفة وصيانة منخفضة وملحقات معقولة ومتوافقة مع الفوائد الاقتصادية المتوقعة من استخدامه. كل ذلك يُتيح الاستفادة من الجهاز أداةً مخبرية في دراسة وتطوير إنتاج الغاز الحيوي.

3. التوصيات:

- بناءً على نتائج الدراسة، يمكن تقديم بعض التوصيات المتعلقة بتطوير الجهاز المستخدم في إنتاج الغاز الحيوي المخبري. وهنا بعض الاقتراحات:
1. تحسين دقة القياس: ينبغي تطوير الجهاز لزيادة دقة قياس المكونات والغازات المنبعثة في عملية إنتاج الغاز الحيوي. ويمكن ذلك عن طريق استكشاف تقنيات قياس متقدمة واستخدام أجهزة استشعار أكثر حساسية للحصول على قراءات أكثر دقة وموثوقية.
 2. تحسين التحليل والتقييم: ينبغي تطوير أدوات تحليل وتقييم متقدمة لمعالجة البيانات المستخلصة من الجهاز. ويمكن تطوير برامج حاسوبية متطورة لتحليل البيانات واستخلاص معلومات مهمة تُحسّن جودة إنتاج الغاز الحيوي وتُحدّد المعوقات والتحسينات الممكنة.
 3. تطوير واجهة مستخدم: ينبغي أن تكون واجهة الجهاز سهلة الاستخدام ومبسطة للمشغلين والباحثين. يجب أن توفر واجهة مستخدم بديهية وتوجيهات واضحة لتسهيل عملية المراقبة والتحليل واتخاذ القرارات.

4. تعزيز المرونة والتوافقية: يجب أن يكون الجهاز قابلاً للتعديل والتوافق مع مختلف الظروف والمتغيرات في عمليات إنتاج الغاز الحيوي، ويتكيف مع متطلبات مختلفة للبيئات والمصادر الحيوية المستخدمة.

5. الخلاصة:

توصلت هذه الدراسة إلى أن استخدام الجهاز في مجال إنتاج الغاز الحيوي مخبرياً يُحسِّن عملية الإنتاج ويزيد كفاءتها، عن طريق قياس المكونات والغازات المنبعثة وتحليل البيانات، ويمكن للباحثين والمشغلين مراقبة العملية بدقة وتحديد المعوقات وتحسين جودة إنتاج الغاز الحيوي.

وفي النهاية، يعد هذا البحث مرجعاً مهماً للمهتمين بمجال إنتاج الغاز الحيوي. إن الاستناد إلى النتائج والتوصيات المقدمة في هذه الدراسة سيساعد الباحثين والمختصين على تعزيز فهمهم لعملية إنتاج الغاز الحيوي وتطوير الأدوات والتقنيات المستخدمة في هذا المجال، عن طريق الاستفادة من هذه المعرفة، يمكن تحقيق تقدم ملحوظ في إنتاج الغاز الحيوي واستخدامه مصدراً مستداماً ومتجدداً للطاقة.

كما يُعزِّز البحث فهمنا لعملية إنتاج الغاز الحيوي ويُحسِّن جودة الأدوات المستخدمة في هذا المجال، عن طريق استخدام الجهاز وتنفيذ التوصيات المقدمة، سَتُعزِّز الكفاءة والموثوقية في إنتاج الغاز الحيوي واستدامته مصدراً للطاقة المتجددة.

6. المراجع:

1. Ahmed, E., Ibrahim, S., Abbas, I. 2001. Al-Mawiya' [Arabic]. 260 pp. Sudanese House of Books, Khartoum, Sudan.
2. Fan YV, Klemeš JJ, Lee CT, Perry S. 2018. Anaerobic digestion of municipal solid waste: Energy and carbon emission footprint. J Environ Manage., 223: 888-897. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.005>
3. McNaught, A.D., Wilkinson, A. 2019. IUPAC Compendium of Chemical Terminology. The Gold Book. Blackwell Sci. Publ. Oxford, U.K. Online version (2019-) created by S. J. Chalk. <https://doi.org/10.1351/goldbook>.
4. Neubert, K., Kretzschmar, J., dos Santos, T.R. 2021. Making sense of gas measurements: quantification of multicomponent gas mixtures in biological and chemical laboratory experiments. ChemTexts, 7: 27. <https://doi.org/10.1007/s40828-021-00151-0>

5. Rosato, M.A. **2018**. Managing Biogas Plants: A Practical Guide. **296** pp. CRC Press, Boca Raton, Florida, U.S.A.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315225838/managing-biogas-plants-mario-alejandro-rosato>
6. Sarker, S., Lamb, J., Hjelme, D.M., Lain, K. **2019**. A review of the role of critical parameters in the design and operation of biogas production plants. Apple Sci., **9**: **1915**.
<https://doi.org/10.3390/app9091915>
7. Singh, S.K.; Kadi, S.; Prashanth, B.; Nayak, S.K. **2018**. Factors Affecting Anaerobic Digestion of Organic Waste. Int. J. Eng. Res. Mech. Civ. Eng., **3**.
https://www.technoarete.org/common_abstract/pdf/IJERMCE/v5/i2/Ext_05498.pdf
8. Stromberg, S., Nistor, M., Liu, J. **2014**. Towards eliminating systematic errors caused by the experimental condition in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. Waste Manag., **34(11)**: **1939-1948**. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.018>
9. VDI **4630:2014-04** E. **2014** Fermentation of organic materials characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Beuth Verlag.
<https://www.beuth.de/en/draft-technical-rule/vdi-4630/194213756>
10. Walker, M., Zhang, Y., Heaven, S., Banks, C. **2009**. Potential errors in the quantitative evaluation of biogas production in anaerobic digestion processes. Bioresour. Technol., **100(24)**: **6399-6346**. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.018>
11. Wedler, G. **2022**. Good to know – Thermal Mass Flow Sensor: Bypass versus CTA. Retrieved on September **20, 2022** from:
<https://www.bronkhorst.com/int/service-support-1/technologies/thermal-mass-flow-sensor-for-gases-bypass-principle/>
12. Weinrich, S., Schäfer, F., Bochmann, G., Liebetrau, J. **2018**. Value of batch tests for biogas potential analysis; method comparison and challenges of substrate and efficiency evaluation of biogas plants. Murphy, J.D. (Ed.) IEA Bioenergy Task. **37**: **10**.
https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/Batch_tests_web_END.pdf
13. Bhatt A.H., Tao, L. **2020**. Economic Perspectives of Biogas Production via Anaerobic Digestion. Bioengineering (Basel), **7(3)**: **74**. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7030074>