

دراسة تجريبية لتأثير إضافة جسيمات الغرافيت النانوية على إنتاج الغاز الحيوي من الهضم المشترك اللاهوائي للمخلفات العضوية

د.م. نادر علي *

أ.د.م. موسى المحمد **

م. إياس شاش ***

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٢/٢٦ . قبل للنشر في ٢٠٢٥/٥/١٥)

□ ملخص □

يُعدّ الغاز الحيوي مصدراً واعداً للطاقة المتجددة، حيث يتأثر إنتاجه بالعديد من العوامل، من بينها إضافة المواد النانوية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير إضافة الغرافيت على إنتاج الغاز الحيوي من خلال عملية الهضم المشترك لروث الأبقار وقشور البطاطا بنسبة خلط (٢٠:٨٠). تم تنفيذ التجارب باستخدام مفاعلات حيوية كرومية مصنعة محلياً، مع إضافة الغرافيت بتركيز مختلفة (100, 200, 300, 500, 750) mg/L. أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في إنتاج الغاز الحيوي عند إضافة الغرافيت بتركيز (100, 200, 300) mg/L، حيث ارتفع الإنتاج بنسبة (27.42%, 52.37%, 13.95%)، على التوالي، مقارنةً بالعملية التقليدية دون محفزات نانوية. كما ارتفع محتوى غاز الميثان بنسبة (73.23%, 19.24%) عند التركيز (100, 200) mg/L، في حين انخفض عند التركيز (300, 500) mg/L بمقدار (23.96%, 6.77%)، على التوالي. بالمقابل، أدى استخدام تركيز مرتفع من الغرافيت (500) mg/L إلى انخفاض إنتاج الغاز الحيوي بنسب (3.33%). ومن ناحية أخرى، أدى استخدام تركيز (750) mg/L إلى عدم استقرار العملية وحدوث انفجار في المفاعل منذ اليوم الأول. تشير هذه النتائج إلى أن إضافة الغرافيت بتركيز مناسبة تعزز إنتاج الغاز الحيوي، وترفع نسبة الميثان فيه، إلا أن التركيز المرتفع يؤثر سلباً على استقرار العملية.

الكلمات المفتاحية: طاقة الكتلة الحيوية - الهضم المشترك اللاهوائي - الغاز الحيوي - الغرافيت.

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

** أستاذ في كلية الهندسة التقنية، قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة، جامعة طرطوس، طرطوس_سوريا.

*** طالب دكتوراه في كلية الهندسة التقنية، قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة، جامعة طرطوس، طرطوس_سوريا.

An experimental study of the effect of adding graphite nanoparticles on biogas production from anaerobic co-digestion of organic waste.

Dr.Eng. Nader Ali*

Pro.Dr.Eng. Mousa Al mohammad**

Eng. Iyas Shash***

(Received 26/2/2025 . Accepted 15/5/2025)

□ ABSTRACT □

Biogas is considered a promising source of renewable energy, with its production influenced by various factors, including the addition of nanomaterials. This study aims to evaluate the effect of graphite addition on biogas production through the co-digestion process of cow manure and potato peels at a mixing ratio of 80:20. The experiments were conducted using locally manufactured chromium bioreactors, with graphite added at different concentrations (100, 200, 300, 500, and 750 mg/L).

The results showed a significant improvement in biogas production with the addition of graphite at concentrations of 100, 200, and 300 mg/L, with production increasing by 13.95%, 52.37%, and 27.42%, respectively, compared to the conventional process without nanocatalysts. Additionally, methane content increased by 19.24% and 73.23% at concentrations of 100 and 200 mg/L, respectively, while it decreased by 6.77% and 23.96% at concentrations of 300 and 500 mg/L. Conversely, using a high graphite concentration of 500 mg/L led to a 3.33% reduction in biogas production. Moreover, the use of 750 mg/L resulted in process instability and reactor failure due to an explosion on the first day. These results indicate that adding graphite at appropriate concentrations enhances biogas production and increases methane content, but high concentrations negatively affect the stability of the process.

Keywords: Biomass energy – Anaerobic co-digestion – Biogas – Graphite.

*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 Renewable Energy Technologies Engineering, Tartous University, Tartous - Syria.

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

١- المقدمة:

تعتبر طاقة الكتلة الحيوية من أهم مصادر الطاقة المتجددة التي تلعب دوراً حيوياً في تقليل التلوث البيئي وتقليص الاعتماد على الوقود الأحفوري. وتعد عملية الهضم اللاهوائي (AD) من أبرز تقنيات تحويل الكتلة الحيوية إلى طاقة مفيدة، وتعد عملية ميكروبية معقدة تتم في بيئة خالية من الأكسجين، وتساعد في تحويل المخلفات العضوية، مثل روث الحيوانات والمخلفات الزراعية والصناعية إلى غاز حيوي يتكون أساساً من الميثان وثنائي أكسيد الكربون [١]. تُعتبر هذه العملية تقنية بيئية مستدامة، تسهم في تقليل النفايات العضوية وتوفير مصدر طاقة متجدد يمكن استخدامه في توليد الكهرباء أو كوقود بديل [2, 3]. ومع ذلك، تواجه عملية الهضم اللاهوائي بعض التحديات، مثل تقليل كفاءة إنتاج الغاز الحيوي بسبب تراكم الأحماض الدهنية المتطايرة (VFAs) وتغيرات درجة الحموضة، مما يستدعي البحث عن حلول مبتكرة لتحسين الأداء [٤].

نظراً للفوائد العديدة لإنتاج الغاز الحيوي من النفايات العضوية، فقد ركزت الأبحاث الحديثة على تطوير تقنيات مبتكرة لتحسين هذه العملية، من بين الابتكارات التي تم إدخالها مؤخراً في هذا المجال إضافة الميكروبات المتخصصة لتحسين الهضم اللاهوائي، وتقنية الهضم المشترك لأنواع متعددة من النفايات [5, 6]، وكذلك استخدام المواد النانوية لتعزيز إنتاج الغاز الحيوي. تتميز المواد النانوية بخصائص فريدة، مثل حجمها الصغير جداً، وتنوع أشكالها، وارتفاع نشاطها التفاعلي، واستقرارها الكيميائي، مما يجعلها خياراً واعداً لتحسين عمليات التحلل الحيوي وتحفيز نشاط الإنزيمات المشاركة في إنتاج الميثان [7].

من بين الجسيمات النانوية التي تم استخدامها في عملية الهضم اللاهوائي هي جسيمات الغرافيت، حيث يتمتع الغرافيت ببعض الخصائص الفريدة، مثل التوصيل الكهربائي العالي والمساحة السطحية الكبيرة، الذي يساعد في تعزيز نقل الإلكترونات بين البكتيريا المنتجة للميثان، مما يزيد من إنتاج الميثان ويحسن من كفاءة عملية التحلل اللاهوائي [8].

٢- الدراسات المرجعية:

قام Akbar Sanaei-Moghadam وآخرون (٢٠١٤) [9] بتقييم إنتاج الطاقة من خليط من مخلفات البطاطا وروث البقر، حيث تم تصميم وبناء مفاعل مخبري لإنتاج الغاز الحيوي على مرحلة واحدة وفقاً لنظام مفاعل الخزان ذي التحريك المستمر لتقييم أداء وكفاءة إنتاج الغاز الحيوي من الهضم المشترك لقشور البطاطا وروث البقر. كان النموذج قادراً على التحكم تلقائياً في الظروف البيئية للعملية، بما في ذلك درجة الحرارة والزمن ومعدل التقليب. تم إجراء تجربة هضم لاهوائية اعتماداً على الهضم المشترك لقشور البطاطا وروث الأبقار في ثلاثة نسب من الخلط (Potato Pulp: Cow Manure) PP: CM بما في ذلك ٢٠:٨٠، ٥٠:٥٠، ٨٠:٢٠، و١٠٠:٠ وذلك عند شروط درجة الحرارة المتوسطة ودون إضافة لقاحات أولية. خلال زمن بقاء (HRT) قدره ٥٠ يوماً نتج غاز الميثان عند نسب الخلط المختلفة، وبيّنت النتائج التجريبية أن زيادة نسبة روث الأبقار في الخليط مع قشر البطاطا يحسن من كفاءة إنتاج الغاز الحيوي؛ كما أنّ إضافة قشور البطاطا إلى روث الأبقار يؤدي إلى تآزر إيجابي في عمل البكتيريا المنتجة للميثان، كما بيّنت النتائج أن نسبة الخلط الأمثل هي ٢٠:٨٠ حيث حققت أعلى إنتاج للغاز الحيوي والميثان.

وقدم الباحث Hamdi وآخرون (2020) [10] دراسة لتأثير إضافة الغرافيت على عملية الهضم اللاهوائي لمخلفات الطعام وروث الأبقار ومزيجهما، بهدف تحسين إنتاج الغاز الحيوي وفهم التغيرات في الوسط الميكروبي

داخل المفاعلات اللاهوائية. حيث قام الباحثون بإجراء تجارب دفعية عند درجات حرارة متوسطة، حيث تم إضافة الغرافيت بتركيز مختلفة $0.2 - 5$ g/L إلى مفاعلات تحتوي على مخلفات الطعام، روث الأبقار، وخليط منهما. وتم قياس إنتاج الغاز الحيوي. أظهرت النتائج أن إضافة الغرافيت عند تركيز 0.75 g/L عزز إنتاج الغاز الحيوي بنسبة تصل إلى 41.4% عند استخدام الهضم المشترك لمخلفات الطعام وروث الأبقار، مع تحقيق أعلى إنتاجية من غاز الميثان مقارنة بباقي التجارب.

كما أجرى الباحث Sevgi وآخرون (2020) [11] دراسة لتأثير الغرافيت على إنتاج الغاز الحيوي والميثان في عملية الهضم اللاهوائي المشترك لنفايات الطعام (FW) وروث الأبقار (CM). تم تقييم العلاقة بين توزيع البنية الميكروبية والظروف التشغيلية باستخدام تحليل التكرار (RDA). أظهرت النتائج أن إضافة الغرافيت عززت عملية إنتاج الميثان من خلال زيادة التفاعل بين بكتيريا Clostridium والكائنات المنتجة للميثان مثل Methanosarcina و Methanosaeta. كما بين التحليل أن المواد الموصلة، مثل الغرافيت، تساهم في تحسين أداء الهضم اللاهوائي من خلال تعزيز النقل المباشر للإلكترونات بين البكتيريا المنتجة للميثان، مما يؤدي إلى زيادة إنتاجية الغاز الحيوي. تشير هذه النتائج إلى إمكانية تحسين كفاءة عمليات الهضم اللاهوائي من خلال إضافة مواد موصلة، مما يساهم في تطوير استراتيجيات أكثر فاعلية لإنتاج الطاقة الحيوية من النفايات العضوية. واستعرض Abdelwahab وآخرون (2020) [12] دراسة مرجعية لإنتاج الغاز الحيوي باستخدام الجسيمات النانوية، وصنف الباحثون الجسيمات النانوية NPs المستخدمة في عملية الهضم اللاهوائي إلى ثلاث فئات: جسيمات أكسيد المعادن النانوية، جسيمات المعادن صفرية التكافؤ، والجسيمات الكربونية النانوية. أظهرت نتائج الدراسة أن إضافة جسيمات الكربون النانوية لها تأثير إيجابي على تركيز الأمونيا، واستهلاك VFAs، وCOD عند مقارنتها بالطريقة التقليدية (بدون جسيمات نانوية)، كما أن إضافة الجسيمات النانوية عند تراكيز منخفضة يعتبر مجد اقتصادياً نظراً للتأثيرات الإيجابية في عملية الهضم اللاهوائي وإنتاج الغاز الحيوي.

❖ أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في استخدام الغرافيت لتحسين إنتاج الغاز الحيوي في المفاعلات اللاهوائية، حيث يُعد الغرافيت من المحفزات النانوية القادرة على تعزيز نشاط البكتيريا المنتجة للميثان. من المتوقع أن تساهم هذه الإضافة في تسريع عملية التحلل الحيوي، وتقليل زمن بقاء المخلفات داخل المفاعل، مما ينعكس إيجاباً على كمية وجودة الغاز الحيوي الناتج، وكفاءة المفاعلات اللاهوائية في معالجة المخلفات العضوية.

ويهدف البحث إلى تقييم تأثير إضافة جسيمات الغرافيت بتركيز مختلفة على إنتاج الغاز الحيوي في المفاعلات اللاهوائية باستخدام خليط من روث الأبقار وقشور البطاطا كنموذج للمخلفات العضوية، من خلال دراسة تأثيره على معدل الإنتاج، وجودة الغاز. كما يسعى إلى تحديد التركيز الأفضل للغرافيت الذي يحقق أعلى كفاءة لإنتاج الغاز.

٣- طرائق البحث ومواده:

٣-١ المادة العضوية المستخدمة: هي عبارة عن خليط من روث الأبقار وقشور البطاطا بنسبة خلط (20:80) [9]، تم الحصول على قشور البطاطا من مخلفات أحد المطاعم المجاورة، في حين تم الحصول على روث الأبقار من مخلفات بقرة في إحدى المنازل الريفية.

٢-٣ الجسيمات النانوية (جسيمات الغرافيت):

تتميز جسيمات الغرافيت بعدة مزايا تجعلها فعالة في تحسين إنتاج الغاز الحيوي في المفاعلات اللاهوائية. فهي تمتلك موصلية كهربائية عالية، مما يسهم في تعزيز نقل الإلكترونات بين البكتيريا وتحفيز نشاطها، خاصة البكتيريا المنتجة للميثان. كما أن الغرافيت مستقر كيميائياً وحرارياً، مما يجعله مناسباً للاستخدام في البيئات اللاهوائية دون أن يتحلل أو يتفاعل مع المركبات الأخرى. إضافة إلى ذلك، يتميز الغرافيت بسطحه الكبير ومساميته العالية، مما يوفر مساحة مثالية لامتناس وتثبيت البكتيريا، وبالتالي تحسين كفاءة عملية الهضم اللاهوائي [8]. علاوة على ذلك، يُعد الغرافيت مادة متوفرة نسبياً وذات تكلفة منخفضة مقارنةً ببعض المحفزات النانوية الأخرى، مما يجعله خياراً اقتصادياً وفعالاً في تحسين عمليات إنتاج الطاقة الحيوية. يوضح الشكل (١) مواصفات جسيمات الغرافيت المستخدمة في هذا البحث.



الشكل (١): مواصفات جسيمات الغرافيت المستخدمة.

٣-٣ المفاعل الحيوي:

تم استخدام ثلاثة مفاعلات حيوية مخبرية مصنعة محلياً من مادة الكروم بحجم 5L لإجراء التجارب، مجهز كل منها بخلاط يدوي عبارة عن قضيب مع أربع صفائح (شفرات) من الكروم، ومزود بجهاز إلكتروني لقياس درجة الحرارة ومتحكم حرارة 12 V وجهاز إلكتروني لقياس الـ PH، ومبادل حراري نحاسي داخلي، ويوضح الشكل (٢) المفاعل الحيوي المستخدم.



الشكل (٢) المفاعل الحيوي المخبري المصنع محلياً.

٣-٤ أجهزة القياس المستخدمة:

- (١) جهاز كاشف الغازات المحمول (BTQ- DR850): عبارة عن جهاز محمول يتم من خلاله قياس نسبة كل من الغازات التالية ضمن الغاز الحيوي وهي: غاز الميثان (CH_4)، وغاز أول أكسيد الكربون (CO)، وغاز كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، وغاز الأوكسجين (O_2)، كما في الشكل (٣).



الشكل (٣): كاشف الغازات المحمول (BTQ- DR850).

- (٢) جهاز قياس ال PH: جهاز الكتروني لقياس درجة ال PH في الوسط العضوي داخل المفاعل الحيوي بدقة قياس 0.1، كما في الشكل (٤).



الشكل (٤): جهاز قياس ال PH.

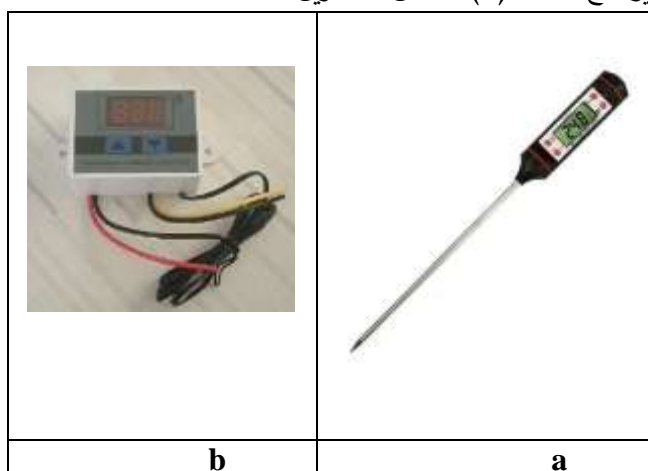
٣) جهاز إلكتروني كتلي دقيق بدقة 0.001g لوزن المواد النانوية المراد إضافتها، ويوضح الشكل (٥) الميزان الكتلي المستخدم.



الشكل (٥): جهاز الكتلي دقيق

٤) جهاز إلكتروني لقياس درجة الحرارة ومتحكم بدرجة الحرارة (12V):

يتم من خلال جهاز قياس درجة الحرارة الرقمي قياس درجة الحرارة ضمن المفاعل الحيوي وبدقة قياس 0.1°C ، في حين يستخدم متحكم الحرارة لضبط درجة الحرارة والتحكم بعمل المضخة التي تضخ الماء الساخن ضمن أنابيب المبادل الحراري للمفاعل، ويوضح الشكل (٦) كل من الجهازين.



الشكل (٦): (a): جهاز الكتلي لقياس درجة الحرارة، (b): متحكم حرارة 12V.

٤- إجراء التجارب والاختبارات:

تم في البداية تجهيز المادة العضوية، والتي تتكون من مزيج من روث الأبقار الطازج وقشور البطاطا. تم تجفيف عينات من هذين المكونين لتحديد نسبة المادة الصلبة، حيث تبين أنها تبلغ ٢٠%. وبناءً على هذه النتيجة، تم تحضير خليط وزنه الإجمالي 4 kg، وذلك بمزج 1.6 kg من روث الأبقار مع 0.4 kg من قشور البطاطا بشكل متجانس، ثم أضيف 2 kg من الماء لضبط نسبة المادة الصلبة داخل المفاعل إلى ١٠%. وبهذا، يتكون محلول التغذية بتركيبية تشمل ٢٠% قشور بطاطا و ٨٠% روث أبقار، وفقاً لما أوصت به الدراسات السابقة [9]. بعد ذلك، تمت إضافة جسيمات الغرافيت إلى الخليط مع التحريك الجيد لضمان التجانس قبل نقله إلى المفاعل، كما هو موضح في الشكل (٧).



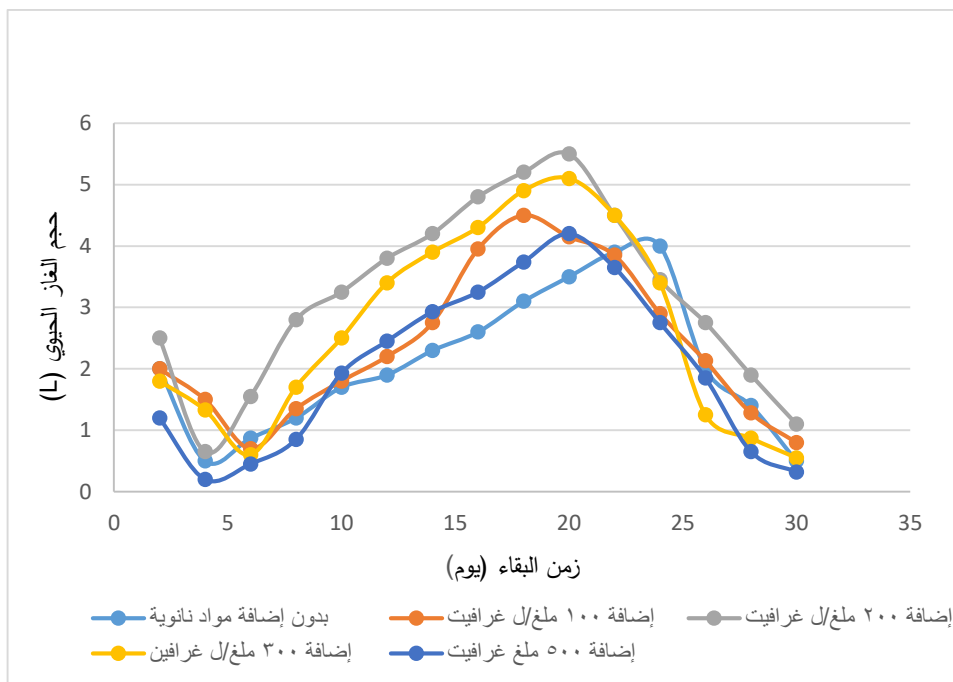
الشكل (٧): المادة العضوية بعد إضافة المواد النانوية وخلطها جيداً.

تم إجراء التجارب بإضافة نسب مختلفة من جسيمات الغرافيت النانوية وفق التراكيز التالية: (100. 200. 300. 500, 750) mg/L. تم إجراء التجارب بظروف درجات الحرارة المتوسطة عند درجة حرارة $(38 \pm 2)^\circ\text{C}$ ، ولمدة ٣٠ يوماً، حيث تم خلط المواد يدوياً وتقليبها ضمن المفاعل كل ١٢ ساعة بمعدل ١٢٠ دورة في الدقيقة ولمدة ثلاث دقائق.

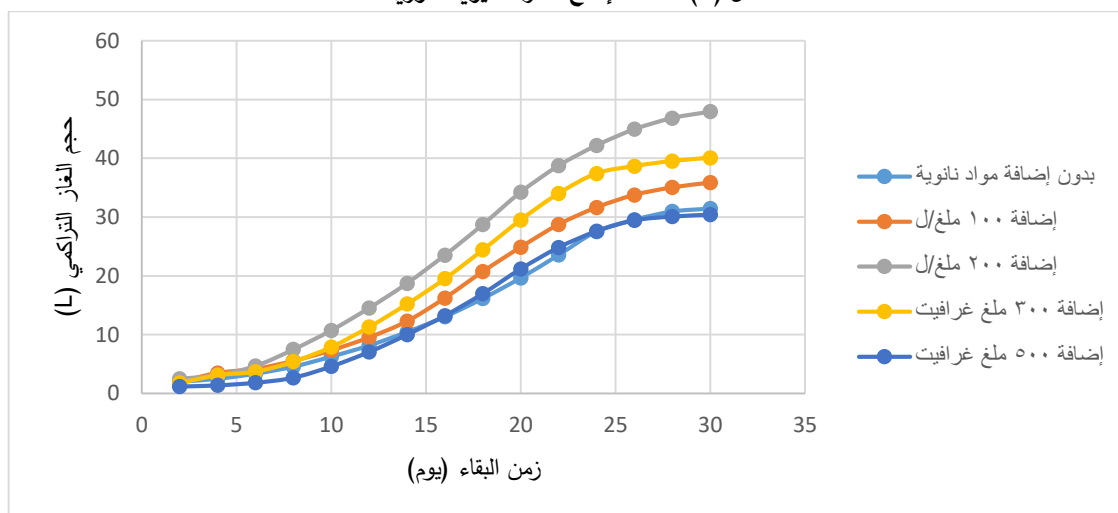
٥- النتائج والمناقشة:

٥-١ تأثير إضافة الغرافيت على إنتاج الغاز الحيوي

تم قياس حجم الغاز الحيوي الناتج كل يومين باستخدام طريقة إزاحة السائل، وتم تسجيل النتائج التالية بشكل دوري وتراكمي وفق المخططات الموضحة في الشكلين (٨) و(٩).



الشكل (٨): مخطط إنتاج الغاز الحيوي الدوري.



الشكل (٩): مخطط إنتاج الغاز الحيوي التراكمي.

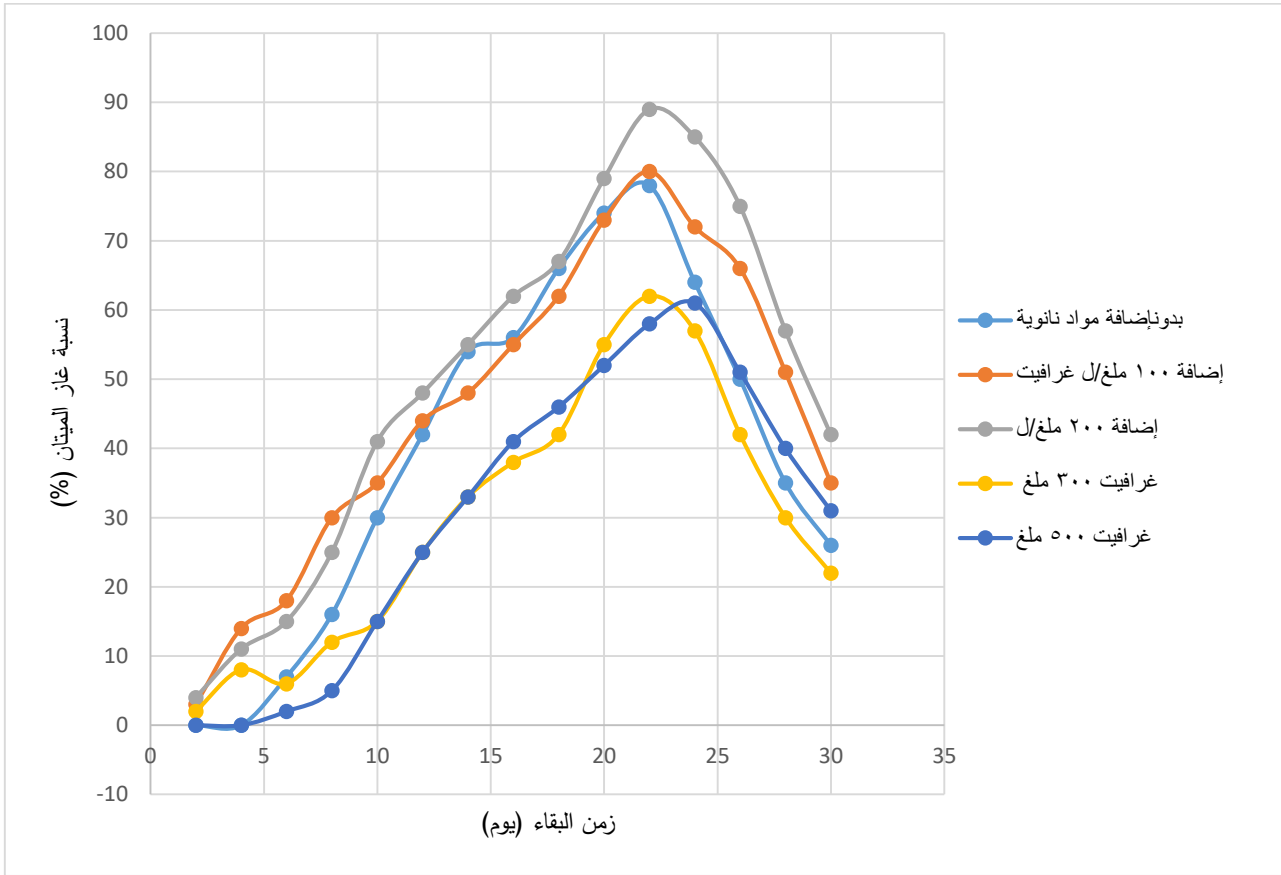
نلاحظ من الشكل (٨) أنه عند إضافة جسيمات الغرافيت تم الوصول إلى ذروة الإنتاج في اليوم الـ ١٨ عند تراكيز 100 mg/L حيث بلغ الإنتاج $L (٤,٥)$ وفي اليوم ٢٠ عند تراكيز $(٢٠٠, ٣٠٠, ٥٠٠) \text{ mg/L}$ حيث بلغ الإنتاج على التوالي $L (٥,٥, ٥,١, ٤,٢)$ وفي اليوم الـ ٢٤ بدون إضافة جسيمات الغرافيت بلغ إنتاج الغاز $L (٤)$ ؛ كما يتضح من الشكل (٩) أن إضافة الغرافيت بتراكيز مختلفة أثر بشكل ملحوظ على إنتاجية الغاز الحيوي، فعند التراكيز المنخفضة والمتوسطة $(100, 200, 300) \text{ mg/L}$ لوحظت زيادات ملحوظة في إنتاج الغاز الحيوي بنسبة $(13.95\%, 52.37\%, 27.42\%)$. على التوالي مقارنة بعملية الهضم التقليدية، يُعزى هذا التحسن إلى دور الغرافيت كموصل كهربائي يُعزز نقل الإلكترونات بين الميكروبات، مما يزيد من نشاط البكتيريا المنتجة للميثان؛ حيث إن المواد الكربونية مثل الغرافيت تعمل كجسور إلكترونية بين الميكروبات، مما يؤدي إلى تحسين كفاءة نقل الإلكترونات وتسريع عملية التحلل اللاهوائي، كما أظهرت النتائج انخفاضاً في إنتاج

الغاز الحيوي عند التركيز العالي mg/L (٥٠٠) بنسبة 3.33% مقارنة بالهضم التقليدي. يعود هذا الانخفاض إلى تكتل جسيمات الغرافيت عند التراكيز المرتفعة، مما يعيق التفاعل الفعال بين الميكروبات والمواد العضوية، حيث إن التراكيز العالية من المواد الكربونية يمكن أن تُسبب تراكمات تُعيق الاتصال المباشر بين المواد المضافة والميكروبات، مما يُقلل من كفاءة العملية.

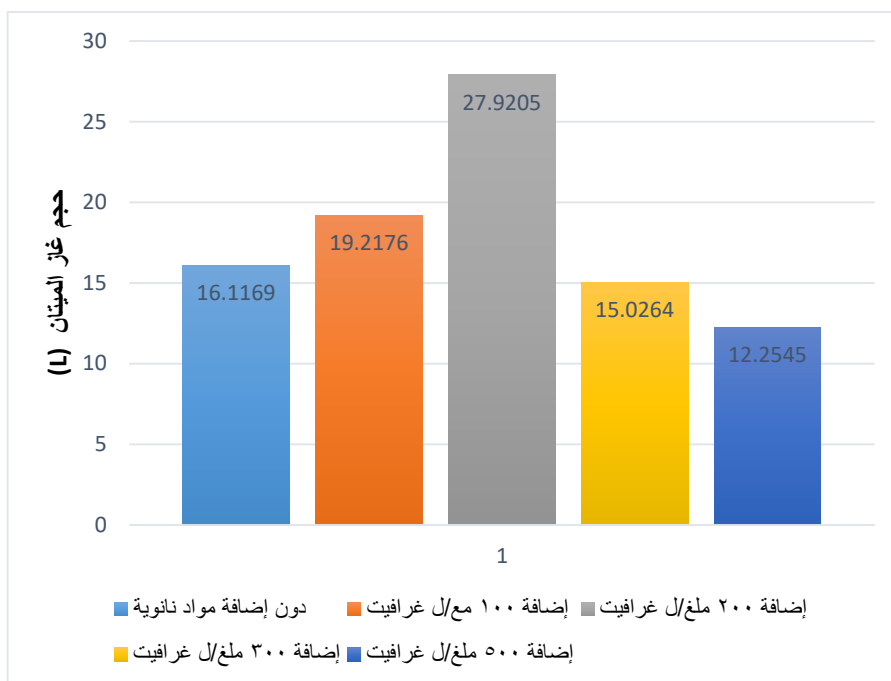
أما عند التركيز الأعلى mg/L (٧٥٠)، فقد لوحظ حدوث انفجار في اليوم الأول من التجربة. يُعزى هذا إلى الإنتاج السريع وغير المتحكم فيه للغاز الحيوي، مما أدى إلى زيادة الضغط داخل النظام، حيث أن التراكيز المرتفعة جداً من المواد الموصلة قد تُحفز إنتاجاً مفاجئاً للغاز الحيوي بسبب تسارع التفاعلات الكيميائية الحيوية، مما قد يُسبب مشكلات تشغيلية خطيرة إذا لم يتم التحكم في النظام.

٥-٢ تأثير إضافة الغرافيت على حجم ومحتوى غاز الميثان في الغاز الحيوي

تم قياس نسبة غاز الميثان في الغاز الحيوي باستخدام كاشف الغازات المحمول الموضح بالشكل (٣)، تم تسجيل النتائج كل يومين، ويوضح الشكل (١٠) مخطط الإنتاج الدوري لغاز الميثان أثناء عمليات الهضم المختلفة، ويوضح الشكل (١١) مخطط حجم غاز الميثان الكلي لمختلف التجارب خلال مدة التجربة (وهو ناتج عن مجموع جداءات نسبة غاز الميثان بحجم الغاز الحيوي اليومي).



الشكل (١٠): مخطط إنتاج غاز الميثان أثناء عمليات الهضم المختلفة.



الشكل (١١): الحجم الكلي لغاز الميثان خلال عمليات الهضم المختلفة.

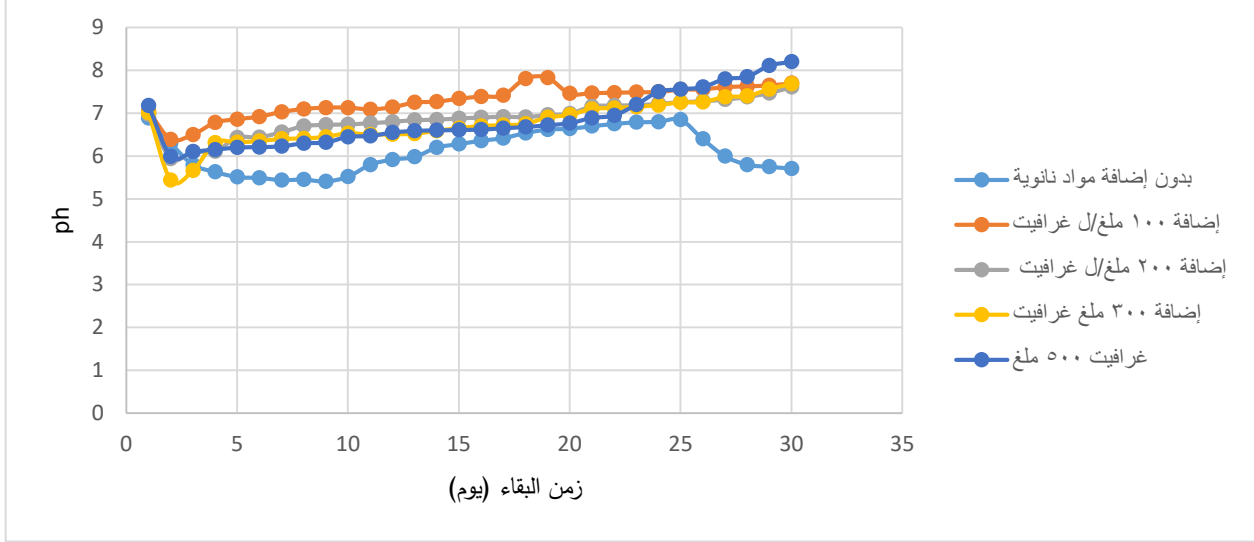
نلاحظ من الشكل (١٠) ارتفاع نسبة غاز الميثان عند إضافة الغرافيت، حيث بلغت ذروة إنتاج غاز الميثان في اليوم ٢٢ من بدء التجربة عند إضافة الغرافيت بتركيز (100, 200, 300) mg/L على التوالي (62%, 89%, 80%)، في حين أن ذروة إنتاج غاز الميثان عند تركيز (500) mg/L من الغرافيت كانت في اليوم ٢٤ وبلغت نسبته في الغاز الحيوي (61%)، وبلغت ذروة إنتاج الميثان في العملية التقليدية (بدون إضافة الغرافيت) (78%) في اليوم ٢٢ من بدء التجربة؛ كما يوضح المخطط في الشكل (١١) زيادة في حجم غاز الميثان المنتج عند إضافة الغرافيت بتركيز (100, 200) mg/L بمقدار (19.24%, 73.23%) مقارنة بالعملية التقليدية، في حين انخفض حجم غاز الميثان المنتج عند إضافة الغرافيت بتركيز (300, 500) mg/L بمقدار (6.77%, 23.96%) مقارنة بالعملية التقليدية.

تشير النتائج إلى التأثير الواضح لإضافة الغرافيت بتركيز مختلفة على إنتاج غاز الميثان، حيث أظهرت التراكيز المنخفضة (100, 200) mg/L تحسناً كبيراً في إنتاجية الغاز. يعود ذلك إلى قدرة الغرافيت على تعزيز النشاط الميكروبي، إذ يعمل كموصل كهربائي يساعد على تسهيل نقل الإلكترونات بين الكائنات الدقيقة المنتجة للميثان والبكتيريا المساهمة في تحلل المواد العضوية.

عند التراكيز العالية من الغرافيت (300, 500) mg/L، لوحظ انخفاض إنتاجية الميثان. يمكن تفسير ذلك بتأثير الغرافيت الزائد على البيئة الميكروبية، حيث يؤدي إلى اضطراب توازن الأكسدة والاختزال في النظام اللاهوائي؛ حيث أن التراكيز المرتفعة من المواد الكربونية قد تخلق بيئة غير مواتية للكائنات الدقيقة، مما يؤدي إلى تفاعلات جانبية، مثل تراكم الإلكترونات غير المستخدمة أو التنافس بين الميكروبات، مما يعيق إنتاج الميثان. إضافة إلى ذلك، يُسّر تأخير ذروة إنتاج الميثان عند تركيز 500 mg/L إلى تأثير التركيز العالي على استقرار المجتمع الميكروبي، مما يتطلب وقتاً أطول للتكيف مع الظروف الجديدة. هذه النتائج تؤكد أهمية التحكم الدقيق في تراكيز الغرافيت لتحقيق التوازن بين تعزيز النشاط الميكروبي ومنع الآثار السلبية لتراكيز الإضافات المرتفعة.

٣-٥ تأثير إضافة الغرافيت على درجة الحموضة الـ PH

تم قياس درجة الـ PH باستخدام جهاز قياس درجة الحموضة الموضح في الشكل (٤) بشكل يومي خلال مدة التجربة وتم تسجيل النتائج كما هو موضح في الشكل (١٤).



الشكل (١٤): قيم الـ PH خلال مدة التجارب.

يُظهر مخطط الـ pH أن إضافة الغرافيت بتركيزات مختلفة أثرت بشكل كبير على عمليات التحلل اللاهوائي وإنتاج الغاز الحيوي، ففي المراحل الأولى من التجربة، كان هناك انخفاض ملحوظ في قيم الـ pH، مما يعكس تكوّن الأحماض العضوية نتيجة تحلل المواد العضوية. عند التركيزات المنخفضة والمتوسطة للغرافيت (100, 200, 300) mg/L، لوحظ استقرار أسرع في قيم pH نحو المجال المثالي (٦,٨-٧,٥) اللازم لنشاط البكتيريا المنتجة للميثان، يعود هذا التحسن إلى قدرة الغرافيت على تعزيز التفاعلات الميكروبية عبر تحسين نقل الإلكترونات بين المجتمعات الميكروبية. في المقابل، عند التركيزات العالية (500) mg/L، ظهر اضطراب في استقرار قيم الـ pH نتيجة التأثير السلبي لتركيز الغرافيت المرتفع. أظهرت النتائج أن إضافة الغرافيت بتركيز (100, 200) mg/L أدت إلى تسريع الانتقال من المرحلة الحمضية إلى مرحلة إنتاج الميثان، مما ساهم في زيادة إنتاج الميثان مقارنة بالنظام التقليدي. في حين أن التركيز المرتفع (500) mg/L أدى إلى تأخير الذروة في إنتاج الميثان بسبب التأثير السلبي على البيئة الميكروبية.

٦- الاستنتاجات والتوصيات

٦-١ الاستنتاجات

- ١- أدى إضافة الغرافيت بتركيز 200 mg/L إلى زيادة إنتاج الغاز الحيوي بمقدار 52.37% مقارنة بالعملية التقليدية (بدون إضافة جسيمات الغرافيت).
- ٢- انخفض إنتاج الغاز الحيوي بمقدار 3.33% مقارنة بالعملية التقليدية عند إضافة تركيز مرتفع من الغرافيت (500 mg/L).

٣- زيادة حجم غاز الميثان بمقدار 73.23% عند إضافة الغرافيت بتركيز 200 mg/L مقارنة بالعملية التقليدية، في حين انخفض حجم الميثان بمقدار 23.96% عند إضافة الغرافيت بتركيز 500 mg/L مقارنة بالعملية التقليدية.

٦-٢ التوصيات

- ☞ إجراء التجارب عند درجات حرارة مختلفة ودراسة تأثير درجة الحرارة على عمل المحفزات النانوية في عملية الهضم اللاهوائي.
- ☞ دراسة تأثير الغرافيت على عملية الهضم المشترك لمواد عضوية مختلفة.
- ☞ اختيار مواد نانوية أخرى لمعرفة تأثيرها على مخرجات عملية الهضم اللاهوائي.

المراجع:

- [1] Al SEADI, T; et al. 2008, *BIOGAS HANDBOOK*. University of Southern Denmark Esbjerg.
- [2] Barati, M.R., Aghbashlo, M., Ghanavati, H., Tabatabaei, M., Sharifi, M., Javadirad, G., Dadak, A., Soufiyan, M.M., 2017. *Comprehensive exergy analysis of a gas engine equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste*. Energy Convers. Manag. 151, 753–763.
- [٣] REN, Y; et al. 2018, *A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: Research updates and tendencies*. ELSEVIER, Bioresource Technology, Volume 247, Pages 1069-1076.
- [٤] KARKI, R., et al. 2021, *Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives Applied Microbiology and Biotechnology*, ELSEVIER, Bioresource Technology 330 /125001.
- [5] Kazemi Shariat Panahi, H., Dehghani, M., Aghbashlo, M., Karimi, K., Tabatabaei, M., 2019. Shifting fuel feedstock from oil wells to sea: Iran outlook and potential for biofuel production from brown macroalgae (ochrophyta; phaeophyceae). *Renew. sustain. Energy Rev.* 112, 626–642.
- [6] Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Valijanlian, E., Kazemi Shariat Panahi, H., Nizami, A.S., Ghanavati, H., Sulaiman, A., Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., 2019, *A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, part I: upstream strategies*. *Renew. Energy* 146, 1204–1220.
- [7] Rahimzadeh, H., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Panahi, H.K.S., Rashidi, A., Goli, S.A.H., Mostafaei, M., Ardjmand, M., Nizami, A.S. 2018, *Potential of acid-activated bentonite and SO₃H-functionalized MWCNTs for biodiesel production from residual olive oil under biorefinery scheme*. *Front. Energy Res.* 6, 137–147.

[8] DEHHAGHIA, M; et al. 2019, *A state-of-the-art review on the application of nanomaterials for enhancing biogas production. Journal of Environmental Management* 251.

[9] AKBAR, S; et al. 2014, *Enhancement of Biogas Production by Co-digestion of Potato Pulp with Cow Manure in a CSTR System. Springer Science+Business Media New York.*

[10] uratçobanoğlu, H., Gökçek, Ö. B., Mert, R. A., Zan, R., & Demirel, S. (2020). Simultaneous synergistic effects of graphite addition and co-digestion of food waste and cow manure: Biogas production and microbial community. *Bioresource Technology*, 309, 123365.

[11] DEMİREL, S; et al. 2020, *linkage of operational parameters and microbiome in anaerobic co-digestion with graphite. Sigma J Eng & Nat Sci* 38 (3), 1191-120.

[12] ABDELWAHAB; et al. 2020, *Application of nanoparticles for biogas production: Currentstatus and perspectives. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.*