بحوث المؤتمر العلمي الأول
لكلية العلوم

التلوث البيئي وتحديات الاستدامة البيئية

تحت شعار : التصالح مع البيئة

سرت 14 اكتوبر 2025م

تحرير

ا.د. عبدالسلام الصالحين محمد

ا.د. حسين مسعود ابومدينه

د. أشرف مصطفى ابوسنينة

د. فتحية عبدالجواد موسى

منشورات مركز البحوث والاستشارات بجامعة سرت

الطبعة الأولى 2025م

Types of Article Open Access

المؤتمر العلمي الأول لكلية العلوم – جامعة سرت

"التلوث البيئي وتحديات الاستدامة البيئية"

EPESC

14 أكتوبر 2025

الجزء الثاني: خاص بالورقات المقدمة باللغة العربية

الوكالة الليبية للرقم الدولي الموحد للكتاب (ISBN)
ISBN 978-9959-891-67-9

لجان المؤتمر

اللجنة العليا

أ.د. سليمان مفتاح الشاطر	رئيس الجامعة
أ.د. الطيب محمد القبي	وكيل الجامعة
د. أشرف مصطفى أبوسنينة	عميد الكلية

اللجنة العلمية

أ.د. عبد السلام الصالحين محمد	كلية العلوم / جامعة سرت	رئيساً
أ.د. احميد محمد يونس	كلية العلوم / جامعة سرت	عضواً
أ.د. رمضان عبدالمولى الهنداوي	كلية العلوم / جامعة عمر المختار	عضواً
أ.د. تهاني يونس عمر	كلية العلوم / جامعة سرت	عضواً
د. فتحية عبد الجواد موسى	كلية العلوم / جامعة سرت	عضواً

اللجنة التحضيرية

أ. زينب رجب الفيتوري	رئيساً
أ. علي محمد عمرناجي	عضواً
أ. علي عبد الرحيم الغزالي	عضواً
د. سعاد أحمد أبومريم	عضواً
عبد الحليم مفتاح الشاطر	عضواً
خالد جمعة امهلهل	عضواً
سفيان سالم الشعالي	عضواً
علي مصطفى مكادة	عضواً
يوسف الكرامي	عضواً

محرري كتيب المؤتمر:

أ.د. عبد السلام الصالحين محمد
ا.د. حسين مسعود ابومدينة
د. أشرف مصطفى أبوسنينة
د. فتحية عبد الجواد موسى

ايميل التواصل: epesc@su.edu.ly

موقع المؤتمر: https://su.edu.ly/research/index.php/conferences/science/sc1

المحتويات

1. الدور الإيكولوجي لنبات الخروع *Ricinus communis* L في التكيف مع تلوث التربة بالمعادن الثقيلة في البيئات الساحلية شبه القاحلة: دراسة حالة وادي السهل الغربي، شمال شرق ليبيا 220

2. استخدام مخلفات البلاستيك الصناعي في تطوير مستشعر حساس ومرن للكشف عن الزلال (الألبومين) في الدم 229

3. مقارنة كهروكيميائية لإنتاج غاز الهيدروجين من مياه البحر مع مصادر مائية اخرى: دراسة حالة من محطة تحلية مياه البحر بمدينة طبرق - ليبيا 244

4. الأمن البيئي في ظل تطور الذكاء الاصطناعي واستخدامه في منظومة أسلحة الدمار الشامل: دراسة في ضوء القانون الدولي العام 257

5. تقدير نسبة تلوث سمكة البوري ببعض الناصر الثقيلة (Cd, Pb, Cu) في حوض سرت. 269

6. تأثير ملوحة المياه المختلفة على أداء النمو ومعدل البقاء وبعض الخصائص الكيميائية في اسماك البلطي كمورد اقتصادي في ليبيا 275

7. دراسة الغطاء النباتي لحافة الجنوبية الجبل الاخضر- شرق ليبيا 286

8. استخدام بعض المستخلصات النباتية كمبيدات صديقة للبيئة لمكافحة (سوس الدقيق) خنفساء الدقيق المشابهة *Tribolium confusum* (duVal) (*Coleoptera: Tenebrionidae*) 305

9. تأثير نبات عدس الماء *Lemna minor* على بعض الخواص الكيميائية في مياه الصرف الصحي في مدينة البيضاء 324

10. التلوث الصناعي للمياه كتهديد للأمن المائي: مقاربة قانونية لحماية الموارد المائية 339

11. صناديق التعويضات كوسيلة من وسائل التعويض الحديث عن الضرر البيئي 364

12. تأثير المياه السوداء على جودة إنتاج محطات التناضح العكسي في مدينة طبرق 382

13. تأثير اضافة مصدر كربون ومصدر نيتروجين على التركيب الكيميائي للبروتينات والدهون 396

14. انتاج الغاز الحيوي من المخلفات العضوية نهج مستدام لتعزيز الطاقة النظيفة في مدينة طبرق 404

15. رصد المخاطر البيئية وآثارها على المواقع الأثرية في مدينة لبدة الكبرى شمال غرب ليبيا 420

16. أوجه حماية البيئة وأحكام المسئولية عن التلوث البيئي وفقا لأحكام القانون الليبي 440

17. البيئة والأمن في العلاقات الدولية "دراسة تحليلية مقارنة ليبيا – اليابان" 455

18. تقييم أداء محطة معالجة مياه الصرف الصحي بمدينة رأس لانوف وإمكانية إعادة استخدام المياه المعالجة 476

19. دراسة الخواص الفيزيائية لمياه الشرب بحي المجاهد / هون – الجفرة 496

20. تقييم كفاءة أداء محطات معالجة مياه الصرف الصناعي في رأس لانوف 504

The First Scientific Conference of the Faculty of Science – Sirte University Environmental Pollution and Challenges of Environmental Sustainability (EPESC), Oct.14, 2025

انتاج الغاز الحيوي من المخلفات العضوية نهج مستدام لتعزيز الطاقة النظيفة في مدينة طبرق

رزق الله عبد الله يونس مصباح، محمد ناجي طاهر مسعود، أحمد عبد السلام عوض محمد، سعد رحيل علي ارويعي

الموارد الطبيعية، كلية الموارد الطبيعية وعلوم البيئة، جامعة طبرق، ليبيا

Corresponding Author Email: rezkaallah.mosbah@tu.edu.ly

Article History:

Received: 03 April 2025

Revised: 29 May 2025

Published: 15 November 2025

الكلمات المفتاحية:
الاستدامة البيئية، الطاقة المتجددة، المخلفات العضوية، الهضم اللاهوائي، إنتاج الغاز الحيوي.

ملخص البحث: هدفت هذه الدراسة إلى تقييم إنتاج الغاز الحيوي من المخلفات العضوية في مدينة طبرق باستخدام تقنية الهضم اللاهوائي، باعتبارها خيارًا مستدامًا لتوليد طاقة نظيفة والحد من التلوث البيئي الناجم عن تراكم النفايات، أُجريت تجربة ميدانية باستخدام تسعة هاضمات لا هوائية (سعة 200 لتر لكل منها) مقسّمة إلى ثلاث معاملات: مخلفات منزلية(A) ، وروث أبقار(B) ، ومزيج متساوٍ من الاثنين(C) ، بثلاثة مكررات لكل معاملة. تم تعبئة كل هاضم بـ 40 كجم من المادة العضوية وإضافة ماء بنسبة 1:2.5، تمت مراقبة درجة الحرارة (البيئة وداخل الهاضم) ودرجة الحموضة (pH)يوميًا، وتم قياس كمية الغاز الحيوي المنتجة بطريقة إزاحة الماء، مع تحليل تأثير ظروف التشغيل (درجة الحرارة ودرجة الحموضة) على معدلات إنتاج الميثان خلال فترة الهضم، أظهرت النتائج تفوق معاملة الخليط (C) في إنتاج الميثان، حيث بلغ متوسط الإنتاج اليومي 0.79 لتر لكل كيلوجرام خلال فترة مكوث 22 يومًا (إجمالي 697 لتر من 40 كجم، متوسط pH=5.4). بالمقابل، سجلت المخلفات المنزلية (A) أدنى إنتاجية للميثان بمعدل 0.27 لتر/كجم/يوم على مدى 32 يومًا (إجمالي 342 لتر، متوسط pH=3.7)نتيجة ارتفاع الحموضة بسبب تراكم الأحماض الدهنية المتطايرة، بينما حقق روث الأبقار (B) معدل 0.56 لتر/كجم/يوم خلال 88 يومًا (إجمالي 1975 لتر، متوسط pH=6.6). تشير هذه الفروق إلى أن دمج أنواع مختلفة من المخلفات مع توفر ظروف حرارية مستقرة يحسّن ظروف التحلل (توازن المغذيات ودرجة الحموضة)، مما يزيد من كفاءة إنتاج الغاز الحيوي ويُسرّع وتيرته. تؤكد الدراسة أن استخدام الهضم اللاهوائي يمثل خيارًا واعدًا ومستدامًا لإنتاج الطاقة النظيفة في طبرق، إذ يسهم في تحويل

النفايات العضوية إلى مصدر طاقة متجددة ويحدّ من انبعاثات الغازات الضارة ومن كميات النفايات المرسلة إلى المدافن.	

المقدمة

تعتمد جميع دول العالم على مواد الطاقة التي يمكن تحويلها إلى حرارة وكهرباء ووقود. وتعد الموارد غير المتجددة حاليًا المصدر الأكثر استخداما للطاقة، وأدى استخدام الوقود الأحفوري مثل الفحم والمنتجات القائمة على البترول الى تأثيرات سلبية بالغة على البيئة وصحة الانسان (Kumar et al., 2021). حيث أدت زيادة الطلب على الطاقات الغير متجددة إلى زيادة انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وتغير المناخ في العالم (Kabir et al., 2023). وقد يصاحب ذلك في استهلاك الطاقة الغير متجددة الى استنفاد مصادرها، لأنها محدودة وسوف تنفد في نهاية المطاف. مما قد يؤدي إلى اضطرابات اقتصادية واجتماعية كبيرة، لا سيما في البلدان النامية التي تعتمد بشكل كبير على الطاقة الغير متجددة في اقتصاداتها (EIA, 2021).

مواجهة التحدي المتمثل في استنفاذ الطاقة غير المتجددة، تستثمر العديد من البلدان في مصادر الطاقة المتجددة مثل طاقة الكتلة الحيوية والطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة المائية. حيث تتمتع مصادر الطاقة المتجددة هذه بالقدرة على توفير مصدر مستدام للطاقة غير قابل للنفاذ وكذلك لا يساهم في تغير المناخ أو استنفاذ الموارد المحدودة (REN21, 2021).

إذ تشير الدراسات الحديثة إلى اهتمامات واسعة في الطاقة الحيوية، كونها مصدر هام للطاقة في العالم باعتبارها بديلاً محايدًا للغازات الدفيئة للوقود الأحفوري (Patrick , 2022). وتشمل منتجات الكتلة الحيوية التقليدية التي تمثل حاليا نحو 10% من استهلاك الطاقة العالمي الى المخلفات الزراعية ومخلفات الانسان من بقايا الطعام والصرف الصحي وروث الحيوانات ومنتجات الغابات والأخشاب التي تم جمعها كمصر رئيسي للطاقات الحية. حيث أظهرت دراسة (Jang et al., 2018 ; Hossain & Fujimoto , 2011) جدوى استخدام عملية الهضم اللاهوائي لإنتاج الميثان من نفايات الطعام وروث الماشية، وقيمت تلك الدراسات آثار العوامل المختلفة، مثل وقت الاحتفاظ الهيدروليكي، ومعدل التحميل العضوي، ودرجة الحموضة، على إنتاج الميثان. وخلصت الدراسة إلى أن عملية الهضم اللاهوائي لديها القدرة على أن تكون تقنية مستدامة لمعالجة نفايات الطعام، وإنتاج الميثان.

وهذا ما هدفت اليه هذه الدراسة في تسليط الضوء على الكتلة الحية من خلال تأثير أنماط الاستهلاك البشري في زيادة النفايات المنزلية والحيوانية في منطقة الدراسة، الى إنتاج غاز الميثان عن طريق التخمير اللاهوائي للمخلفات العضوية، المنزلية والحيوانية، واستعمال هذا الغاز على نطاق واسع كمصدر اساسي للطاقة المتجددة النظيفة في مجال توليد الكهرباء والتدفئة وغيرها. إضافة إلى ذلك تشجيع عملية التنمية المستدامة، بالإضافة الى التخلص من المخلفات العضوية بطريقة امنة والاستفادة منها اقتصاديا.

14. مشكلة الدراسة:

تواجه مدينة طبرق مشكلة بيئية متفاقمة بسبب تراكم المخلفات العضوية دون استغلال تؤدي هذه النفايات إلى تلوث بيئي وزيادة انبعاثات غازات الدفيئة ولا توجد آلية فعالة حالياً لتحويل هذه المخلفات إلى طاقة مستدامة.

15. أهداف الدراسة:

تركّز هذه الدراسة على استخدام تقنية الهضم اللّاهوائي للمخلّفات العضوية بهدف تعزيز إنتاج الطاقة النظيفة في مدينة طبرق، ومعالجة تحدّيات إدارة النفايات العضوية بشكل مستدام.

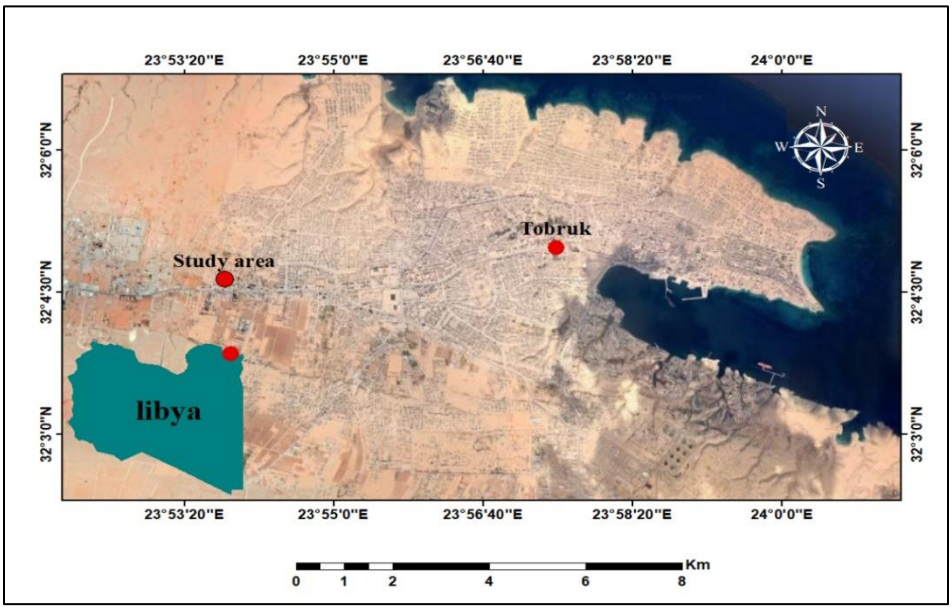
16. أهمية الدراسة:

تُبرز الدراسة إمكانية الاستفادة من المخلفات العضوية لإنتاج طاقة نظيفة باستخدام الهضم اللاهوائي تساهم في الحد من التلوث وتوفير مصدر بديل للطاقة في مدينة طبرق وتوفر بيانات محلية تشجع على التوسع في استخدام هذه التقنية بيئيًا واقتصاديًا.

17. المواد وطرق البحث

منطقة الدراسة:

تمت الدراسة بمدينة طبرق التي تقع جغرافياً في شمال شرق ليبيا، يحدها البحر المتوسط من الشمال، أما فلكيا فأن مدينة طبرق تقع على تقاطع خط طول 27، 58، 24 شرقاً، ودائرة عرض، 4، 5، 32، شمالاً شكل (1). حيث يبلغ عدد سكان مدينة طبرق وفق إحصائية عام 2023 نحو 138363 نسمة. كما يتميز مناخها بمناخ البحر الابيض المتوسط الحار والجاف صيفاً والمعتدل المطر شتاء، والتي يبلغ فيها متوسط درجة الحرارة 31 درجة خلال فصل الصيف.



شكل (1) موقع الدراسة – مدينة طبرق – شرق ليبيا

توفير المخلفات العضوية (المنزلية والحيوانية):

بقايا الأطعمة المستخدمة في التجربة هي نفايات طعام غير متجانسة في طبيعتها لأنها تتكون من نفايات الطعام المنزلي المطبوخ وغير المطبوخ. والتي تم تجميعها من مكب النفايات بالمدينة. كذلك روث الابقار تم تجميعه بالكامل من احدى مزارع الأبقار والمواشي بمنطقة الدراسة. حيث تم فرز المخلفات العضوية عن باقي المخلفات الصلبة الأخرى وكذلك عملية تفتيت وتقطيع المخلفات العضوية من روث الابقار قبل إدخالها بوحدات الهاضم

بأحجام صغيرة حتى تساعد على سهولة عملية التحلل الميكروبي داخل الهاضم وتمت عملية التعبئة على النحو التالي:

المعاملة الاولي (A): بقايا الاطعمة من المخلفات المنزلية، المعاملة الثانية: روث الابقار (B)، المعاملة الثالثة (C): خليط من النفايات المنزلية وروث الابقار بنسبة 1:1 (Haider et al. 2015).

تم وضع المخلفات سابقة الذكر في عدد تسع (9) براميل محكمة من الحديد استخدمت كهواضم لا هوائية، ذو سعة (200 لتر) مقسمة الي (3) معاملات و (3) مكررات لكل نوع من المخلفات على النحو التالي:

تم اضافة 40 kg من مخلفات بقايا الاطعمة في كل وحدة من وحدات المعاملة الاولي والمكررات، ويرمز لها بالرمز (A).

إضافة 40Kg من مخلفات روث الابقار في كل وحدة من وحدات المعاملة الثانية والمكررات، ويرمز لها بالرمز (B).

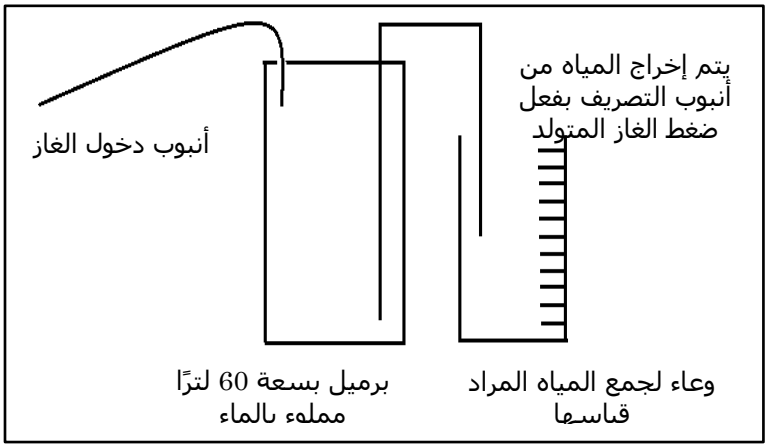
إضافة 40 kg من خليط بقايا الاطعمة وروث الابقار في كل وحدة من وحدات المعاملة الثالثة والمكررات، ورمز لها بالرمز (C).

تم إضافة الماء الي جميع المعاملات حسب ما ورد من (Hassan,2004) بمقدار 1 : 2.5.

تم قياس درجات حرارة الجو بواسطة جهاز Thermometer، وكذلك درجات الحرارة الداخلية للمكمر (الرطبة والجافة) باستخدام جهاز Electronic thermometer، وقياس الرقم الهيدروجيني pH بواسطة جهاز pH meter للمحلول كل يوم عند منتصف النهار طيلة فترة التجربة.

تم قياس كمية الغاز المنتج بوحدة التر عن طريق الازاحة بالماء (شكل 2)، كما ورد في (Ball , 2011) .

تم تحريك المادة العضوية داخل البراميل على فترات متقطعة.

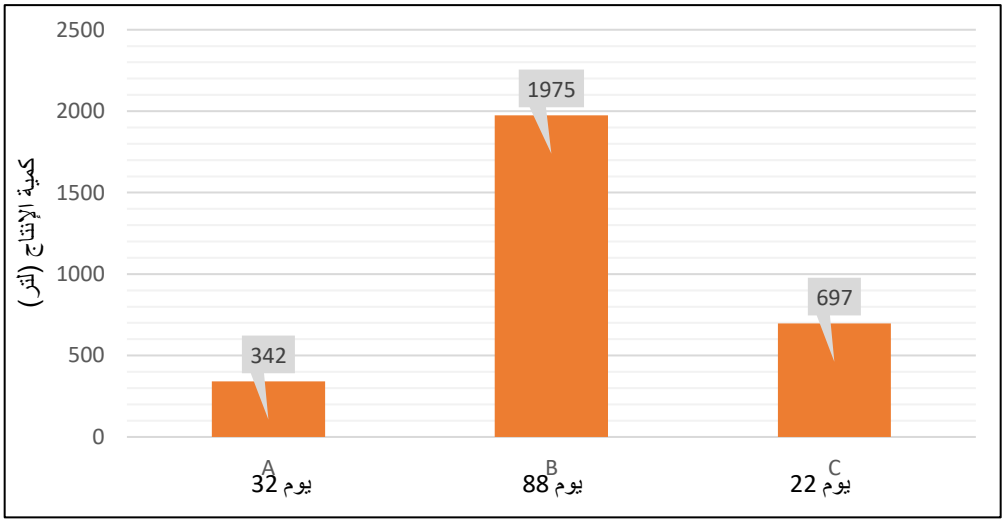


الشكل (2). عملية قياس الغاز المنتج بطريقة إزاحة الماء كما ورد في (Ball , 2011) .

التحليل الإحصائي Statistical analysis: تم اختيار تصميم كامل العشوائية RCD في ثلاث مكررات، تمَّ إجراء عمليات التحليل الإحصائي لكافة الصفات التي شملتها الدراسة بعد جدولتها إحصائياً باستخدام برنامج Gnestat. 7 وتم المقارنة بين المتوسطات باستخدام اختبار أقل فرق معنوي L.S.D عند مستوى معنوية 5% (Gomez & Gomez, 1984).

18. النتائج والمناقشة:

تمت مراقبة زمن مكوث المخلفات المنزلية بقايا الأطعمة المعاملة (A) لمدة 32 يومًا، وتم تفريغ الغاز المُنتَج خلال هذه المدة مرتين وكانت كمية الإنتاج الكلي (342) لتر/ 40 كجم كتلة حية. كما تمت مراقبة زمن مكوث المعاملة (B) روث الأبقار لمدة 88 يومًا، وتم تفريغ الغاز المُنتَج عشر مرات خلال هذه المدة والتي كانت كميتها (1975) لتر/40 كجم كتلة حية. أما بالنسبة للمعاملة (C) وهي خليط من بقايا اطعمة وروث أبقار، فتمت مراقبة زمن مكوثها لمدة 22 يومًا، وتم تفريغ الغاز أربع مرات وكانت الكمية خلال هذه الفترة (697) لتر/ 40 كجم كتلة حية كما هو مبين في الشكل رقم (3)



الشكل (3) كمية إنتاج الغاز الحيوي بالتر خلال فترة كل معاملة في الدراسة (A, B, C).

نشاط الهضم اللاهوائي داخل الكتلة الحية للمعاملات في الدراسة

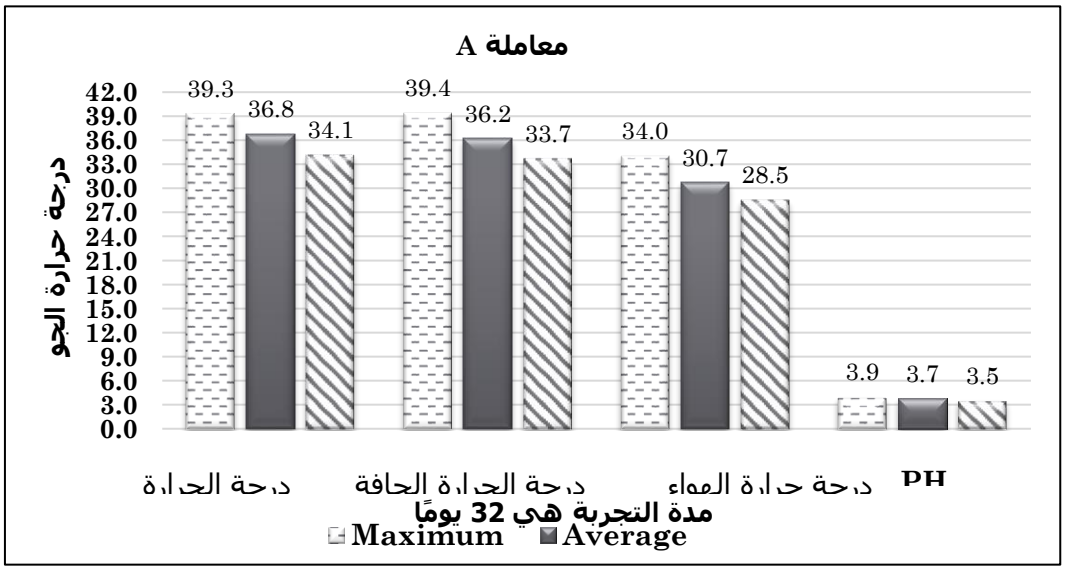
المعاملة (A) المخلفات المنزلية (بقايا الاطعمة):

تظهر البيانات المقدمة في الشكل (4) درجات الحرارة الرطبة والجافة ودرجة حرارة الجو ودرجة الحموضة لعينات الدراسة بقايا الاطعمة المعاملة (A) خلال فترة 32 يومًا من زمن استبقاء الركيزة داخل الهاضم، ويتمثل هدف هذه التجربة في فهم العلاقة المحتملة بين هذه المتغيرات وتأثيراتها على إنتاج الغاز الحيوي. حيث تعتمد نتائج درجات الحرارة الجافة والرطبة ودرجة حرارة الجو على أساس يومي، وهذه البيانات مرتبطة بالتغيرات في البيئة والظروف المناخية السائدة بمنطقة الدراسة خلال فترة التجربة.

حيث أوضحت القياسات تقارب درجات الحرارة الرطبة والتي كانت أقصى قيمه 39.3 وادني قيمة 34.1 والمتوسط (36.8) وأيضاً درجات الحرارة الجافة كانت أقصي قيمة 39.4 وأدني قيمة 33.7 ومتوسطها (36.2) ، وكانت أقصي قيمة لدرجات حرارة الجو 34.0 وأدني قيمه 28.5 ومتوسطها (30.7) ومن خلال هذه النتائج يتضح تقارب درجات الحرارة سواء كانت الرطبة او الجافة او درجات حرارة الجو وهذا يشير الى توازن وتناغم بيئي داخل وحدة الهضم اللاهوائي مما

ساهم في انتاج غاز الميثان ويرجع تقارب درجات الحرارة الى توافر الظروف المثلي لبكتيريا الميثنوجينية (Methanogenic bacteria) وتوازن مكونات العينة العضوية (الكربوهيدرات، والبروتينات، والدهون).

وكانت أقصى درجة الاس الهيدروجيني (pH) 3.9 وأدني قيمة 3.5 والمتوسط (3.7)، وبما ان الهضم اللاهوائي هو عملية بيولوجية حيث تقوم الكائنات الحية الدقيقة بتفكيك المواد العضوية في غياب الأكسجين. خلال هذه العملية، يتم تحويل المركبات العضوية المعقدة إلى جزيئات أبسط، بما في ذلك الأحماض والغازات المختلفة. وقد يكون السبب الرئيسي لانخفاض مستويات الأس الهيدروجيني في جهاز الهضم اللاهوائي مع بقايا الطعام هو تراكم الأحماض الدهنية



المتطايرة (VFAs) وهي عبارة عن مجموعة من الأحماض العضوية والذي يؤدي تراكمها إلى انخفاض الاس الهيدروجيني داخل الهاضم. مما يؤدي الى زيادة الامونيا داخل الهاضم مما يسبب تثبيط في عملية انتاج الغاز الحيوي (Li & Shimizu 2023).

الشكل (4). المعاملة (A) درجات الحرارة الرطبة والجافة ودرجة حرارة الجو والاس الهيدروجيني خلال فترة 32 يوم

المعاملة (B) روث الابقار:

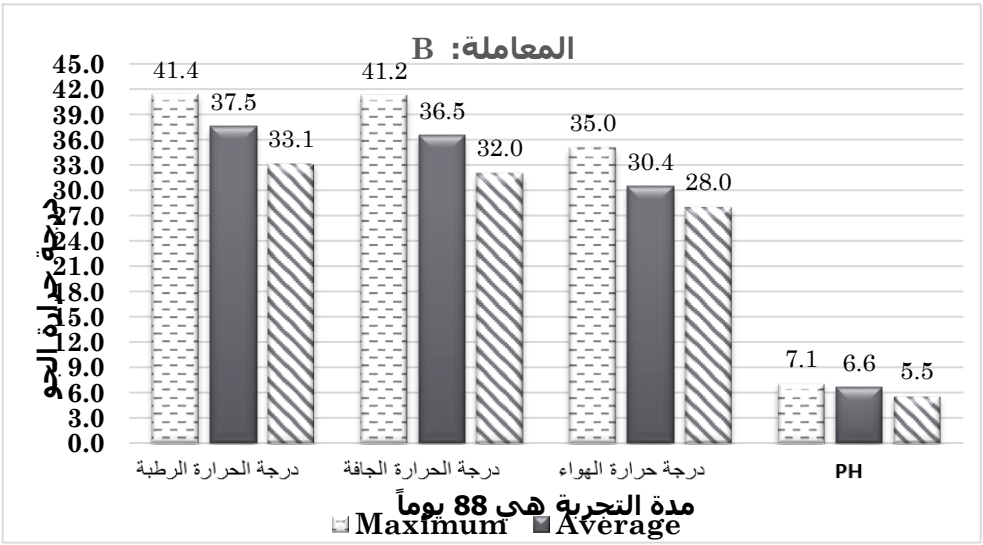
تظهر البيانات المقدمة في الشكل (5) درجات الحرارة الرطبة والجافة ودرجة حرارة الجو ودرجة الاس الهيدروجيني (pH) لعينات الدراسة المعاملة (B) خلال فترة 88 يومًا من زمن استبقاء الركيزة داخل الهاضم. حيث أوضحت القياسات تقارب درجات الحرارة الرطبة والتي كانت أقصى قيمه 41.4 وادني قيمة 33.1 والمتوسط (37.5) وأيضاً درجات الحرارة الجافة كانت أقصي قيمة 41.2 وأدني قيمة 32.0 ومتوسطها (36.5)، وكانت أقصي قيمة لدرجات حرارة الجو 35.0 وأدني قيمه 28.0 ومتوسطها (30.4) على الرغم من أن النتائج تبين تقارب درجات الحرارة الرطبة والجافة ودرجات حرارة الجو، إلا أنه من المهم مقارنتها مع نتائج دراسات سابقة لتفهم السياق الأوسع والتأثير المحتمل لهذه النتائج.

تم اكتشاف أن هذا التقارب يلعب دورًا رئيسيًا في تشكيل بيئة ملائمة لنشاط البكتيريا المسؤولة عن هضم المواد العضوية وإنتاج الغاز الحيوي. بالإضافة إلى ذلك تلعب درجات حرارة الجو دورًا حيويًا هاما، حيث يمكن أن يساهم التقارب فيها في تحقيق توازن في العمليات البيولوجية داخل الهضم، مما يؤدي إلى تحسين إنتاج الغاز الحيوي.

تتفاعل الكتل الحيوية المختلفة بشكل فريد مع التغيرات في درجات الحرارة أثناء عمليات الهضم اللاهوائي، وهذا قد يتسبب في تغيرات في بنية ووظيفة المجتمع الميكروبي. يعتبر فهم هذه التغييرات في المجتمعات الميكروبية ذات أهمية خاصة، حيث يمكن أن تؤثر على معدلات إنتاج الميثان عند تغير درجات الحرارة (Liu et al.,2018).

كذلك أظهرت نتائج الدراسة أن أقصى قيمة للأس الهيدروجيني (pH) كانت 7.1، في حين كانت أدنى قيمة 5.5، وكان متوسط القيم (6.6). تعكس هذه القيم مستويات متوسطة من الحموضة في وحدة الهضم اللاهوائي أثناء إنتاج الغاز الحيوي من بقايا روث الأبقار، وهذه تتفق مع دراسة من قبل (Pasalari et al., 2021) حيث تم تحليل تأثير القيم الهيدروجينية (pH) على إنتاج الغاز الحيوي. ووجدت الدراسة أن الأس الهيدروجيني (pH) يمكن أن يكون له تأثير كبير على تركيب المجتمعات الميكروبية داخل وحدة الهضم اللاهوائي. وبالتالي، يمكن أن تلعب هذه القيم دورًا حاسمًا في تنوع البكتيريا ونشاطها، وبالتالي تحفيز إنتاج الغاز الحيوي. كذلك يتفق ذلك مع دراسة أخرى قام بها (Mao et al ., 2017) إلى أن توازن الأس الهيدروجيني (pH) يمكن أن يؤثر على كفاءة عملية إنتاج الغاز الحيوي. وتشير نتائج الدراسة إلى أن تقلبات كبيرة في الأس الهيدروجيني قد تؤدي إلى تحفيز بعض البكتيريا وتثبيط أخرى، مما يمكن أن يؤثر على تركيب الميكروبات وبالتالي يؤثر على إنتاج الغاز الحيوي.

وعليه يمكن القول أن الأس الهيدروجيني (pH) يلعب دورًا حاسمًا في إنتاج الغاز الحيوي في ظروف الهضم اللاهوائي. وتؤكد الدراسات أن توازن الأس الهيدروجيني قد تكون مفيدة لتحسين كفاءة إنتاج الغاز الحيوي. وبناء على هذه النتائج تعتبر درجة الحرارة الرطبة والجافة ودرجة حرارة الجو عوامل محفزة لإنتاج الغاز الحيوي (Babaee et al., 2013).



الشكل (5). المعاملة (B) درجات الحرارة الرطبة والجافة ودرجة حرارة الجو والاس الهيدروجيني خلال فترة 88 يوم

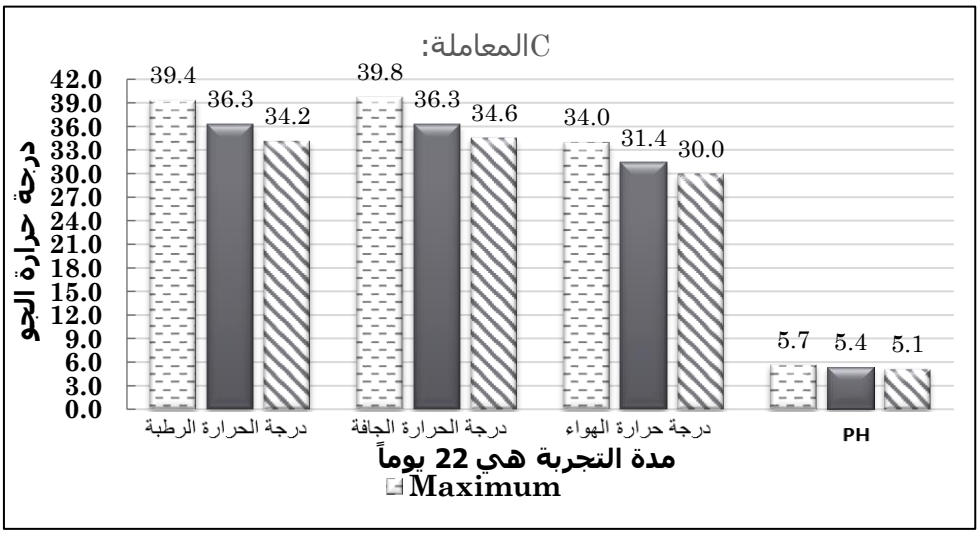
المعاملة (C) خليط روث الابقاروبقايا الاطعمة:

تظهر البيانات المقدمة في الشكل (6) درجات الحرارة الرطبة والجافة ودرجة حرارة الجو ودرجة الحموضة لعينات الدراسة خلال فترة 22 يومًا من زمن استبقاء الركيزة داخل الهاضم.

وأوضحت قياسات درجات الحرارة الرطبة أقصى قيمه 39.4 وادني قيمة 34.2 والمتوسط (36.3) وأيضاً درجات الحرارة الجافة كانت أقصي قيمة 39.8 وأدني قيمة 34.6 ومتوسطها (36.3) ، وكانت أقصي قيمة لدرجات حرارة الجو 34.0 وأدني قيمه 30.0 ومتوسطها (31.4). يتجلى من هذه النتائج تقارب درجات الحرارة الرطبة والجافة وحرارة الجو، مما يشير إلى انسجام الظروف المحيطية داخل وحدة الهضم.

وهذا يتفق مع دراسة قام بها (Nie et al., 2021) إلى أهمية استقرار درجات الحرارة في تحسين عملية الهضم اللاهوائي. حيث أن درجات الحرارة المتوسطة والمستقرة يمكن أن تحفز نمو البكتيريا الميثانوجينة (Methanogenic bacteria) وتعزز من كفاءة إنتاج الغاز الحيوي. كذلك تتفق مع دراسة أخرى قام بها (Shu et al., 2022) أن الظروف المثلى لعملية الهضم اللاهوائي تتضمن درجات حرارة متوسطة وموازنة للرطوبة. وتوصلت هذه الدراسة إلى أن هذه الظروف يمكن أن تؤثر إيجابيًا على نشاط البكتيريا الميثانوجينة (Methanogenic bacteria) وبالتالي تعزز من إنتاج الغاز الحيوي.

ايضا أظهرت نتائج البحث أن أقصى قيمة للأس الهيدروجيني (pH) كانت 5.7، في حين كانت أدنى قيمة 5.1، وكان متوسط القيم (5.4). ومن النتائج المذكورة والدراسات السابقة، يمكن استنتاج أن تقارب درجات الحرارة الرطبة والجافة وحرارة الجو تعكس وجود ظروف مثلى داخل وحدة الهضم اللاهوائي، وهو ما يعزز من تحسين عملية إنتاج الغاز الحيوي.



الشكل (6). المعاملة (C) درجات الحرارة الرطبة والجافة ودرجة حرارة الجو والاس الهيدروجيني خلال فترة 22 يوم

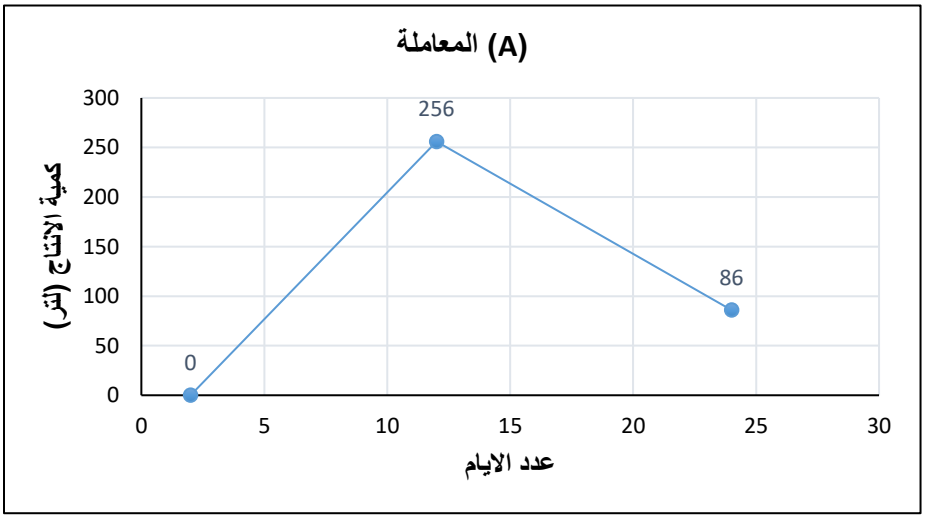
إنتاج الغاز الحيوي (الميثان) في الدراسة

المعاملة (A) - إنتاجية الغاز الحيوي مخلفات منزلية (بقايا الأطعمة):

يبين الشكل رقم (7) والجدول رقم (1) الإنتاج التراكمي للغاز الحيوي خلال فترة الهضم البالغة 32 يوماً والذي بلغ 342 لتر/ 40 كجم (المعاملة A). إذ نجد أن قيم حجم الغاز الحيوي المنتج بعملية الهضم اللاهوائي للمخلفات المنزلية العضوية، ازدادت بشكل تدريجي من الصفر لتبلغ ذروتها في اليوم الثاني عشر حيث بلغ حجم الغاز الحيوي المنتج مقدار 256 لتر، ثم عاود الانخفاض، ليبلغ 86 لتر في اليوم الرابع والعشرين، اي بمعدل 10.687 لتر/40 كجم / اليوم، ما يعادل مقدار 0.27 لتر/ كيلو جرام واحد / اليوم كما موضح في الجدول رقم (1).

في المراحل الأولية من الهضم اللاهوائي داخل المكمر، تتكون كميات كبيرة من الغاز نتيجة لتحلل المواد العضوية السريع. هذا يمكن أن يفسر الزيادة السريعة في إنتاج الغاز حتى اليوم الثاني عشر. ويرجع انخفاض الغاز الحيوي مع الزمن الى تحلل المواد العضوية واستهلاكها خلال المرحلة الاولى من الانتاج. كذلك تراكم المواد المثبطة: خلال عملية الهضم اللاهوائي، قد تتكون مواد مثبطة مثل الأحماض الدهنية ذات السلسلة الطويلة، هذه المواد قد تقلل من نشاط البكتيريا وبالتالي تقليل إنتاج الغاز. بالإضافة الى ذلك قد يحدث تغير في توازن البكتيريا المشاركة في الهضم اللاهوائي، مما يؤدي إلى انخفاض في إنتاج الغاز.

ظروف الهضم مثل درجة الحرارة المختلفة والرقم الهيدروجيني (pH) يمكن أن تؤثر على إنتاج الغاز كما هو مبين في هذه الدراسة الجدول رقم (1). إذا لم تكن هذه الظروف مثلى، فقد يتم خفض إنتاج الغاز (Gaby et al.,2017) .



الشكل (7). كمية انتاج غاز الميثان (لتر) / 40 كجم كتلة حية

المعاملة (B) - إنتاجية الغاز الحيوي - روث الابقار:

يبين الشكل رقم (8) والجدول رقم (1) الإنتاج التراكمي للغاز الحيوي خلال فترة الهضم البالغة 88 يوماً والذي بلغ 1975 لتر/ 40 كجم المعاملة (B)، حيث نجد أن قيم حجم الغاز الحيوي المنتج بعملية الهضم اللاهوائي لعينة روث الابقار كانت متذبذبة وبلغ اعلى معدل لحجم الغاز الحيوي المنتج 268 لتر/ في اليوم الخمسون، ثم عاود الانخفاض، ليبلغ 84

لتر/ في اليوم الثامن والثامنون , بمعدل يومي 22.44 لتر/ 40 كجم / اليوم , اي مقدار 0.56 لتر/ كيلو جرام واحد / اليوم كما موضح في الجدول رقم (1).

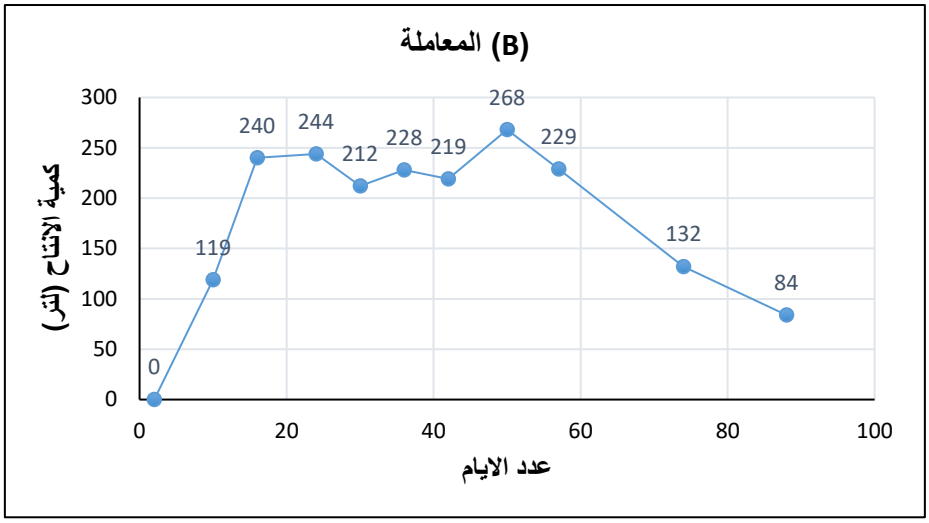
ان التذبذب في إنتاج الغاز الحيوي على مر الأيام. يعود لعوامل مختلفة مثل التغير في خصائص الهاضم اللاهوائي والظروف المحيطة مثل درجات الحرارة الرطوبة والجافة وحرارة الجو، والرقم الهيدروجيني (pH) كما هو مبين في هذه الدراسة الجدول رقم (1). وبالرغم من التذبذب، يمكن ملاحظة وجود اتجاه صاعد في الإنتاجية حتى منتصف الفترة تقريبًا، ومن ثم بدأت الإنتاجية في التراجع.

المعاملة (C) - إنتاجية الغاز الحيوي - الخليط (بقايا الأطعمة وروث الابقار):

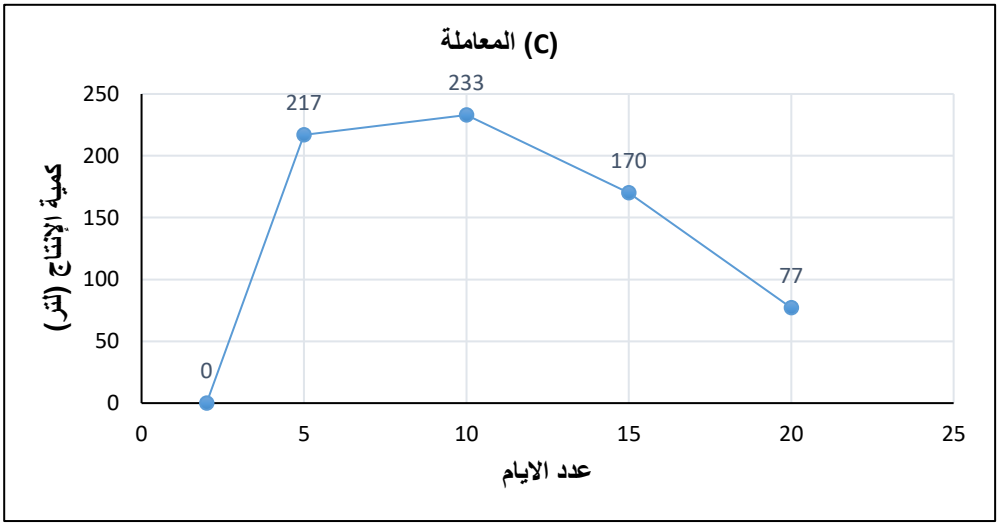
يبين الشكل رقم (9) والجدول رقم (1) الإنتاج التراكمي للغاز الحيوي خلال فترة الهضم البالغة 22 يوم والذي بلغ 697 لتر/ 40 كجم المعاملة (C)، حيث نجد أن قيم حجم الغاز الحيوي المنتج بعملية الهضم اللاهوائي لعينة الخليط ازدادت بشكل تدريجي من الصفر لتبلغ ذروتها في اليوم العاشر حيث بلغ كمية الغاز الحيوي المنتج 233 لتر، ثم عاود الانخفاض، ليبلغ 77 لتر في اليوم الثاني والعشرون، بمعدل 31.68 لتر/ 40 كجم / اليوم، اي مقدار 0.79 لتر/ كيلو جرام واحد / اليوم كما موضح في الجدول (1).

عند استخدام خليط من روث الأبقار وبقايا الأطعمة في الهضم اللاهوائي، فإن الإنتاجية قد تعتمد على توازن الخليط والظروف المحيطة. قد يكون هناك عوامل مثل التغير في التركيب الكيميائي للمواد الداخلة في الكتلة الحية أو التغير في الظروف البيئية التي تؤثر على البكتيريا المسؤولة عن عملية الهضم. كذلك يعتبر استخدام خليط من مصادر مختلفة للمواد العضوية (روث الأبقار وبقايا الأطعمة) قد يزيد من الاستقرار والإنتاجية في الهضم اللاهوائي. (Gaby et al., 2017) لكن يجب أخذ العناية بتوازن التركيب الكيميائي وضمان استقرار الظروف المحيطة لتحقيق أقصى قدر من الإنتاجية (Zhang et al., 2014).

عند النظر في عينة بقايا الأطعمة المعاملة (A) بالمقارنة مع عينة روث الأبقار المعاملة (B)، نلاحظ أن الأس الهيدروجيني (pH) لبقايا الأطعمة كان منخفضًا وبلغ متوسطة 3.7 كما هو مبين في الشكل رقم (4). بينما كان الأس الهيدروجيني (pH) لروث الأبقار قريبًا من المعتدل قيمته 6.6 كما هو مين في الشكل رقم (6). هذه الملاحظات تدل على أن عملية الخلط قد أثرت في تكوين الخليط، حيث ساهم رقم الاس الهيدروجيني (pH) في المعاملة (A) في خفض رقم الاس الهيدروجيني (pH) في معاملة الخلط (C) مما إثر سلبا عن خفض انتاج الغاز تدريجيا بعد 10 ايام وكذلك في زمن التجربة كما هو مبين في الشكل (6) والجدول رقم (1).



الشكل (8). كمية انتاج غاز الميثان (لتر) / 40 كجم كتلة حية



الشكل (9). كمية انتاج غاز الميثان (لتر) / 40 كجم كتلة حية

التحليل الاحصائي في الدراسة:

اشارت نتائج تحليل التباين في جدول (1) الى وجود فروقات ذات دلالة إحصائية بفروق عالية المعنوية بين المخلفات المنزلية العضوية وروث الابقار والخليط في درجة الحرارة الرطبة ودرجة حرارة الجو والاس الهيدروجيني بينما لم تكن هناك فروق معنوية في درجة الحرارة الجافة.

يبين الجدول رقم (1) الى وجود فروقات معنوية في درجة الحرارة الرطبة وكانت اعلى معدلاتها في المعاملة (B) وهي (روث ابقار) حيث وصلت متوسط درجة حرارتها الى 37.5، وكانت المعاملة (A) وهي (المخلفات المنزلية العضوية) 36.8 اما

المعاملة (C) وهي خليط (بقايا الأطعمة وروث الابقار) كانت اقل متوسط في درجة الحرارة الرطبة 36.3، نلاحظ أيضا ان الفروقات المعنوية بين المتوسطات كانت بين روث الابقار والخليط اما المخلفات المنزلية لم تكن هناك فروق ذات دلاله إحصائية.

ويُعزى السبب وراء ارتفاع درجات الحرارة الرطبة أثناء عملية الهضم اللاهوائي لعينة روث الأبقار إلى النشاط البيولوجي للبكتيريا الميثانوجينية (Methanogenicbacteria). حيث تعمل هذه البكتيريا على تفكيك المواد العضوية في الروث تحت ظروف غياب الأكسجين، مما يؤدي إلى إفراز غاز الميثان هذه العملية تتطلب إعدادًا محيطا متخصصًا يشمل ارتفاع درجات الحرارة الرطبة، والذي يؤثر بشكل إيجابي على نشاط البكتيريا وسرعة عملية تكوين وتحرير الغاز الميثان.

كذلك يوضح الجدول رقم (1) عدم وجود فروقات معنوية في درجة الحرارة الجافة وكانت اعلى معدلاتها في المعاملة (B) وهي (روث ابقار) حيث وصلت متوسط درجة حرارتها الى 36.5 وكانت المعاملة (C) وهي خليط (بقايا الأطعمة وروث الابقار) 36.3، اما المعاملة (A) (المخلفات المنزلية العضوية) كانت اقل متوسط في درجة الحرارة الجافة 36.2. ويرجع السبب عدم وجود فروق معنوية في درجات الحرارة الجافة لإنتاج غاز الميثان يرتكز على تكيف البكتيريا الميثانوجينية (Methanogenic bacteria) عند درجة حرارة محددة. تلك البكتيريا تبدو قادرة على التكيف بفعالية مع التغيرات في البيئة المحيطة بها، مما يسمح لها بالنمو والاستقرار في نطاق محدد من درجات الحرارة الجافة. تأتي هذه القدرة على التكيف كآلية تساهم في تقليل تأثير التقلبات في درجات الحرارة الجافة على معدل إنتاج غاز الميثان. وبهذا الشكل، يمكن للتكيف أن يقوم بتقليل الفروق المعنوية في النتائج ويجعل الإنتاج مستقرًا على الرغم من التغيرات في درجات الحرارة الجافة|.

كما يوضح الجدول رقم (1) الى وجود فروقات معنوية في متوسط درجة حرارة الجو وكانت اعلى معدلاتها في المعاملة (C) وهي خليط (بقايا الأطعمة وروث الابقار) حيث وصلت الى 31.4 وكانت المعاملة (A) وهي (المخلفات المنزلية العضوية) 30.7، بينما المعاملة (B) (روث ابقار) حصلت على اقل متوسط في درجة الحرارة الجو 30.4. نلاحظ ان الفروقات المعنوية للمتوسطات كانت في الخليط اما المخلفات المنزلية وروث الابقار لم تكن هناك فروق بينها.

كذلك اكدت نتائج الجدول رقم (1) الى وجود فروقات معنوية في الاس الهيدروجيني (pH) وكانت اعلى معدلاتها في المعاملة (B) وهي (روث ابقار) حيث وصلت متوسط الاس الهيدروجيني (pH) بها الى 6.6 وكانت المعاملة (C) وهي خليط (بقايا الأطعمة وروث الابقار) سجلت 5.4، اما المعاملة (A) وهي (المخلفات المنزلية العضوية) حصلت على اقل متوسط 3.7. نلاحظ ان الفروقات المعنوية كانت بين جميع المعاملات. ويرجع سبب ارتفاع الأس الهيدروجيني (pH) في عينة روث الأبقار إلى نشاط البكتيريا الميثانوجينية (Methanogenic bacteria) أثناء عملية الهضم اللاهوائي، ويمكن أن يؤدي تحلل المواد العضوية إلى إنتاج الهيدروجين أثناء مرحلة الهضم، لكن هذه العملية تؤدي عادة إلى انخفاض الرقم الهيدروجيني بسبب إنتاج الأحماض المتطايرة، وليس زيادتها. حيث ان عملية إنتاج الهيدروجين من خلال التولد الحمضي تميل إلى تحمض البيئة، وليس قلويتها (Arslan et al.,2015).

جدول1: تأثير المعاملات (A,B,C) على درجات الحرارة الرطبة والجافة والجو والـ (pH) خلال فترة التجربة

وحدة القياس	مدة التجربة (اليوم)	درجة الحرارة (الجو)	درجة الحرارة (الرطبة)	درجة الحرارة (الجافة)	الاس الهيدروجيني (pH)	انتاجية غاز الميثان لتر / المعاملة	انتاجية غاز الميثان لتر / اليوم	انتاجية غاز الميثان Kg / لتر
المعاملات A ; B; C	متوسط النتائج عن كل معاملة خلال فترة التجربة							
مخلفات منزلية (A)	32	b30.7	8 ab.36	2 a.36	c3.7	342 c	10.7 c	0.27 c
روث ابقار (B)	88	b 30.4	a37.5	a36.5	a 6.6	1975 a	22.4 b	0.56 b
خليط (C)	22	a31.4	b36.3	a 36.3	b 5.4	697 b	31.6 a	0.79 a
L.S.D - 0.05		**	**	Ns	**	**	**	**

النتائج في الاعمدة مع حروف غير متشابه تدل على فروق معنوية عند احتمالية احصائية / P=0.05

الاستنتاجات:

تعتبر هذه الدراسة خطوة هامة نحو الاستدامة البيئة والاقتصاد البيئي في منطقة الدراسة مدينة طبرق - شرق ليبيا. إن إنتاج غاز الميثان من المخلفات العضوية (الكتلة الحية) يعد خيارًا واعدًا لتوليد الطاقة النظيفة، مع تحسين أداء عمليات الهضم اللاهوائي. حيث يظهر التأثير الإيجابي لتركيب معاملة الخليط (C) وهي (بقايا الأطعمة وروث الابقار) على إنتاجية غاز الميثان، مما يشير إلى أهمية تحسين تركيب المواد داخل وحدة الهضم. بالإضافة إلى ذلك، تسلط هذه الدراسة الضوء على الأثر المباشر للعوامل التشغيلية مثل درجة الحرارة الرطبة والحرارة الجافة وحرارة الجو والرقم الهيدروجيني على انتاج غاز الميثان المستخرج. ويمكن أن تكون هذه النتائج قاعدة لتحسين عمليات إنتاج الطاقة من خلال التحكم الدقيق في هذه العوامل.

تؤكد هذه الدراسة الى الاستفادة القصوى من استراتيجيات تطوير ادارة النفايات العضوية (الكتلة الحية) وسبل وطرق استغلالها كمصدر رئيسي للطاقات المتجددة لغرض توليد الطاقة الخضراء، الطاقة النظيفة، مما يسهم ذلك في تعزيز الاستدامة البيئية والاقتصاد الوطني والمحافظة على البيئة.

19. التوصيات:

- تعميم تقنية الهضم اللاهوائي في الريف الليبي الذين يهتمون بتربية المواشي والابقار وتقديم الدعم المادي والتقني للأسر الراغبة في تنفيذ هذه التقنية.
- إنشاء نماذج مخبرية في الكليات والمعاهد وتجهيزها بأجهزة قياس نسب الغازات لتحديد الظروف المثلي لعمل المخمرات.
- إقامة محطات كبيرة لمعالجة نفايات المنازل العضوية واستخدام الغاز المنتج في توليد الكهرباء أو غاز طهي. هذا يساهم في حل مشكلة مكبات القمامة وتوليد طاقة نظيفة.
- تشجيع التعاون بين القطاعين العام والخاص والمنظمات غير الحكومية لتعزيز تنفيذ مشاريع تقنية الهضم اللاهوائي وتبادل الخبرات والمعرفة.
- تقديم المشروع الي الوزارات والهيئات ذات الاختصاص للتعميم وتمويل مثل تلك المشاريع الاستراتيجية مثل تقنية الهضم اللاهوائي التي تساهم في انتاج طاقة نظيفة وحماية البيئة من التلوث.

المصادر والمراجع:

Arslan, C., Sattar, A., Changying, J., Nasir, A., Mari, I. A., & Bakht, M. Z. (2015). Impact of pH management interval on biohydrogen production from organic fraction of municipal solid wastes by mesophilic thermophilic anaerobic codigestion. *BioMed Research International, 2015*, 1–9. https://doi.org/10.1155/2015/130568

Babaee, A., Shayegan, J., & Roshani, A. (2013). Anaerobic slurry co-digestion of poultry manure and straw: Effect of organic loading and temperature. *Journal of Environmental Health Science and Engineering, 11*(1), 15.

Ball, D. (2011). *Introductory chemistry*. Saylor Foundation.

EIA. (2021). *International Energy Outlook 2021*. U.S. Energy Information Administration.

Gaby, J. C., Zamanzadeh, M., & Horn, S. J. (2017). The effect of temperature and retention time on methane production and microbial community composition in staged anaerobic digesters fed with food waste. *Biotechnology for Biofuels, 10*(1), 1–13.

Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley and Sons.

Haider, M. R., Zeshan, Sohail, Y., Malik, R. N., & Visvanathan, C. (2015). Effect of mixing ratio of food waste and rice husk co-digestion and substrate to inoculum ratio on biogas production. *Bioresource Technology, 190*, 451–457.

Hassan, M. A. M. (2004). *The feasibility of family biogas production from mixed organic wastes in Palestinian rural areas* [Master's thesis, An-Najah National University].

Hossain, M. K., & Fujimoto, M. (2011). Methane production from livestock manure: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*(7), 3295–3304.

Jang, H. M., Ha, J. H., Kim, D. H., & Kim, H. S. (2018). Evaluation of methane production from food waste leachate with high strength in anaerobic digestion process. *Journal of Environmental Management, 206*, 1190–1195.

Kabir, M., Habiba, U. E., Khan, W., & Rahim, S. (2023). Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. *Journal of King Saud University - Science, 35*(4), 102693.

Kumar, S., Jain, S., & Singh, R. K. (2021). Environmental impacts of fossil fuels. In C. M. Hussain (Ed.), *Handbook of environmental materials management* (pp. 1–24). Springer.

Li, X., & Shimizu, N. (2023). Biochar-promoted methane production and mitigation of acidification during thermophilic anaerobic co-digestion of food waste with crude glycerol: Comparison with re-inoculation. *Sustainable Environment Research, 33*(4), 1–13.

Liu, C., Wachemo, A. C., Tong, H., Shi, S., Zhang, L., Yuan, H., & Li, X. (2018). Biogas production and microbial community properties during anaerobic digestion of corn stover at different temperatures. *Bioresource Technology, 261*, 93–103.

Mao, C., Zhang, T., Wang, X., Feng, Y., Ren, G., & Yang, G. (2017). Process performance and methane production optimizing of anaerobic co-digestion of swine manure and corn straw. *Scientific Reports, 7*(1), 1–10.

Moriarty, P. (2022). Can bioenergy once again become a major global energy source. *Encyclopedia, 2*(3), 1357–1369.

Nie, E., He, P., Zhang, H., Hao, L., & Shao, L. (2021). How does temperature regulate anaerobic digestion? *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150*, 111453.

Pasalari, H., Gholami, M., Rezaee, A., Esrafili, A., & Farzadkia, M. (2021). Perspectives on microbial community in anaerobic digestion with emphasis on environmental parameters: A systematic review. *Chemosphere, 270*, 128618.

REN21. (2021). *Renewables 2021 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.

Shu, C., Jaiswal, R., Kuo, M., & Yu, B. (2022). Enhancing methane production in a two-stage anaerobic digestion of spent mushroom substrate and chicken manure via activation of sludge, optimization of temperature, and C/N ratio. *Frontiers in Environmental Science, 9*, 1–14.

Biogas Production from Organic Waste as a Sustainable Approach to Promote Clean Energy in Tobruk City

Rizqullah Abdullah Younis Musbah, Mohamed Naji Taher Masoud, Ahmed Abdulsalam Awad Mohamed, and Saad Raheel Ali Arwaie

Department of Natural Resources, Faculty of Natural Resources and Environmental Sciences, University of Tobruk, Libya

Abstract

This study aimed to evaluate the production of biogas from organic waste in the city of Tobruk using anaerobic digestion technology, as a sustainable option for generating clean energy and reducing environmental pollution caused by waste accumulation. A field experiment was conducted using nine anaerobic digesters (each with a capacity of 200 liters), divided into three treatments: household waste (A), cow dung (B), and an equal mixture of both (C), with three replicates per treatment. Each digester was filled with 40 kg of organic material and water was added at a ratio of 1:2.5. Temperature (ambient and internal) and pH were monitored daily, and biogas production was measured using the

water displacement method. The effects of operational conditions (temperature and pH) on methane production rates during the digestion period were analyzed.

The results showed that the mixture treatment (C) outperformed the others in methane production, with an average daily yield of 0.79 liters per kilogram over a 22-day retention period (total 697 liters from 40 kg, average pH = 5.4). In contrast, household waste (A) recorded the lowest methane yield, at 0.27 liters/kg/day over 32 days (total 342 liters, average pH = 3.7), due to increased acidity resulting from the accumulation of volatile fatty acids. Cow dung (B) achieved a yield of 0.56 liters/kg/day over 88 days (total 1975 liters, average pH = 6.6).

These differences indicate that combining different types of waste under stable thermal conditions improves degradation efficiency (nutrient balance and pH), enhancing biogas production and accelerating the process. The study confirms that anaerobic digestion is a promising and sustainable method for clean energy production in Tobruk, contributing to the conversion of organic waste into a renewable energy source and reducing harmful gas emissions and landfill waste.

Keywords: Anaerobic digestion; Biogas production; Environmental sustainability; Organic waste; Renewable energy.