

التخمير المشترك لمخلفات الفول مع روث الأبقار – النموذج الحركي لإنتاج الغاز الحيوي

داود ملوك^{1*}

1 كلية الزراعة، جامعة حماه، حماه، سلمية، سورية.

*للمراسلة: داود ملوك dawod_81@hotmail.com هاتف: 0338811109 موبايل: 0992765291

تاريخ القبول: 2026 / 01/4

تاريخ الاستلام: 2025 / 12 / 4

الملخص

تعد معالجة المخلفات الزراعية الثانوية باستخدام تقنية الغاز الحيوي خياراً جيداً للحفاظ على بيئة نظيفة ومصدراً متجدداً لإنتاج الطاقة. تم في هذا البحث دراسة تأثير التخمير اللاهوائي المشترك لمخلفات الفول (BW) مع روث الأبقار (CM) في إنتاج الغاز الحيوي، وذلك للحصول على بيانات لحركية تطل المادة العضوية وزيادة إنتاج الغاز الحيوي. أجريت التجربة باستخدام وحدات تخمير لاهوائية سعة كل منها لتر واحد، عند درجة الحرارة الثابتة 37 °C ولمدة ثلاثين يوماً. تتراوح حجم الغاز الحيوي الناتج بين 147-262 LN/Kg VS، وذلك للتخمير المشترك لمخلفات الفول مع روث الأبقار عند نسب خلط BW إلى CM 25:75، 50:50، 75:25 على التوالي. كانت النسبة المثالية للتخمير المشترك لمخلفات الفول مع روث الأبقار 50:50 من حيث إنتاج الغاز الحيوي والذي بلغ 191 LN/Kg VS. قيس درجة الحموضة pH لوسط التخمير اللاهوائي يومياً، باستعمال جهاز مختبر صُمم خصيصاً لهذا الغرض، وكانت قيم درجة الحموضة ملائمة لعملية التخمير اللاهوائي وتراوح بين 5.4 – 7.99. توافقت بيانات التجارب المخبرية مع النموذج الحركي لإنتاج الغاز الحيوي الذي تم وضعه، وكانت قيم ثوابت معدل التفاعل تتراوح بين (0.07 – 0.09).
الكلمات المفتاحية: الغاز الحيوي، التخمير المشترك، النموذج الحركي، مخلفات الفول.

المقدمة:

تؤكد الدراسات بأن مصادر الطاقة التقليدية ستضرب في الأجل القريب، لذا بدأ العالم – وخاصة في الدول المتقدمة – بإجراء البحوث والدراسات للعثور على مصادر أخرى للطاقة، غير المصادر المستخدمة حالياً، ونتيجة لتلك البحوث فقد توصلت العديد من الدول إلى الاعتماد التدريجي على مصادر جديدة للطاقة سميت بمصادر الطاقة المتجددة، والتي تؤمن الطاقة دون الخشية من نضوب مصادرها وتساهم في حماية البيئة في آن واحد. وتدرج هذه المصادر فيما يلي: الطاقة الشمسية، طاقة المياه، طاقة الرياح، طاقة جوف الأرض، طاقة الكتلة الحيوية (الصرن، 2012).

تعتبر الطاقات التقليدية (النفط و الغاز والفحم) هي المصدر الرئيسي للطاقة الأولية في الجمهورية العربية السورية، حيث أن الطاقة المنتجة منها تشكل 94.9% من الطلب الكلي على الطاقة الأولية، مقابل 5.1% من الطاقات المتجددة تتوزع على النحو التالي، 2.8% من الطاقة الهيدرومائية، 2.6% من الكتلة الحيوية وخاصة تقنية التخمير اللاهوائي (الغاز الحيوي). وفي حال استمرار معدل نمو الطلب على الطاقة الأولية والمقدر بحوالي 6% سنوياً دون اتخاذ أي إجراء برفع كفاءة استخدام الطاقة وتنمية

استخدام الطاقات المتجددة، فمن المتوقع أن يصل الطلب الكلي على الطاقة بحلول عام 2030 إلى حوالي 65 مليون طن مكافئ نفطي (المركز الوطني لبحوث الطاقة، 2012).

تعدّ عملية التخمير اللاهوائي أو (الهضم اللاهوائي) هي واحدة من التقنيات المستخدمة لإنتاج الطاقة وكذلك لتقليل المحتوى العضوي للنفايات. والغاز الحيوي هو خليط من الغاز القابل للاشتعال (غاز الميثان) وغاز ثاني أكسيد الكربون وغازات أخرى (CO, N₂, H₂, NH₃, O₂, H₂S)، ويتم إنتاج الغاز الحيوي عبر سلسلة من العمليات البيوكيميائية خلال عملية الهضم اللاهوائي للمواد العضوية عن طريق مجموعات متخصصة من البكتيريا اللاهوائية (Haryanto et al, 2018).

تمر عملية التخمير اللاهوائي للمواد العضوية بأربع مراحل، أولاً حلمهة hydrolysis المواد العضوية المعقدة مثل البروتينات والدهون والكربوهيدرات - وذلك بفعل بكتيريا التحلل والتخمير - إلى مركبات أبسط (سكريات بسيطة و حموض دسمة و غليسرول وحموض امينية)، ثم تتفكك هذه المركبات لتشكل أحماض عضوية بالإضافة إلى غاز ثاني أكسيد الكربون (CO₂) وغاز ثاني كبريت الهيدروجين (H₂S) والأمونيا، وذلك خلال مرحلة (إنتاج الأحماض) acidogenesis /المرحلة الثانية/ (Weiland, 2010)، (Xie 2012)، (Haryanto et al, 2018). في المرحلة الثالثة (مرحلة تشكل حمض الخل acetogenesis) تقوم مجموعات متخصصة من البكتيريا اللاهوائية باستهلاك الحموض العضوية والأحماض الدهنية المتطايرة (VFA) لتشكل حمض الخل وغاز ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين. وفي النهاية تقوم بكتيريا الميثان بتحويل المنتجات السابقة إلى غاز الميثان، وذلك خلال مرحلة تشكل الميثان methanogenesis، آخر مراحل عملية التخمير اللاهوائي حيث إن 70 % من كمية الغاز تتشكل عن طريق تفكك حمض الخل إلى غاز الميثان وغاز ثاني أكسيد الكربون، وبإرجاع ثاني أكسيد الكربون بالهيدروجين يتم تشكيل الكمية المتبقية (Weiland, 2010)، (Haryanto et al, 2018).

تستند اختبارات التحلل البيولوجي (الحيوي) إما على قياس مدى تشكل واحد أو أكثر من المنتجات المشاركة في التفاعلات البيولوجية للمواد العضوية الخاضعة للاختبار، أو عن طريق قياس مدى تحلل واستهلاك المادة العضوية (الركيزة) في عملية التخمير اللاهوائي.

تعتمد الطرق التي تستند إلى تشكل المنتجات إلى مراقبة إما المنتج النهائي (الغاز الحيوي)، أو المنتجات الوسيطة مثل الحموض الدهنية المتطايرة VFA (Angelidaki and Sanders, 2004). عند تقييم التحلل البيولوجي عن طريق مراقبة إنتاج الغاز الحيوي في الظروف اللاهوائية، فإنه من الشائع استخدام تجربتين مختلفتين في تغذية الهاضم هما نظام الدفعة الواحدة (batch System)، أو التغذية المستمرة (continuous feeding) (Angelidaki and Sanders, 2004)، ويتم قياس إنتاج الغاز الحيوي كزيادة في الحجم تحت ضغط ثابت (طرق حجمية) /volumetric methods/ (Rozzi and Remigi, 2001).

يستخدم النموذج الحركي من الدرجة الأولى أو النموذج الحركي الأولي (First order kinetic) بشكل شائع لوصف وتقييم معدل التحلل البيولوجي للمواد العضوية أثناء الهضم اللاهوائي، ويعطى بالمعادلة: $\frac{dX_{degr}}{dt} = -Kh * X_{degr}$ ، حيث X_{degr} تركيز مدخلات الهضم القابلة للتحلل البيولوجي (kg/m³)، t هو الزمن (days)، و Kh ثابت التحلل المائي من الدرجة الأولى (the first order hydrolysis constant) (days⁻¹). على الرغم من أن النماذج الحركية من الدرجة الأولى (First order kinetics) هي علاقات تجريبية، إلا أنها تعطي مؤشر هام عن درجة التحلل البيولوجي الذي يرتبط بمساحة السطح المتاح للتفاعلات البيوكيميائية وتركيز مدخلات الهاضم في فترات زمنية محددة، وبالتالي إمكانية التنبؤ بإنتاج الغاز الحيوي في أي زمن

من عملية التخمر اللاهوائي (Sanders et al, 2000)، (Angelidaki and Sanders, 2004)، (Al Afif and Pfeifer,) (2022).

يتبع الفول العائلة البقولية *Leguminaceae* الاسم العلمي *Vicia Faba*، وهو نبات حولي عشبي ويعدّ من المحاصيل البقولية الرئيسية الهامة. يحتوي نبات الفول على جذر وتدي عميق قد يصل إلى عمق 100 سم، وساق قائمة مضلعه يتراوح طولها بين 60-160 سم، أما الورقة فهي ريشية مركبة من 3 أو 5 أو 7 وريقات بيضاوية الشكل. تتألف ثمرة الفول من كربة واحدة، وهي قرنية قشرتها جلدية مبطنة بزغب أبيض، ويتراوح طولها بين 8-48 cm وعرضها بين 1-3.5 cm تحتوي على 1-8 حبات حسب الصنف. يكون شكل القرن مستقيم يميل إلى الانحناء قليلاً، ولونه أخضر يميل إلى الاسمرار عند تمام النضج (Dubrovskis et al, 2019). تصل المساحة المستثمرة سنوياً من الفول الأخضر في الجمهورية العربية السورية إلى 7948 هكتار تعطي إنتاجاً يقدر بنحو 52 ألف طن (المجموعة الإحصائية، 2022). أما بالنسبة للثروة الحيوانية فإن سورية غنية بها؛ حيث قدر عدد الأبقار بحوالي 1.108 مليون رأس، وتقدر كمية المخلفات الناتجة عنها بحوالي 7.6 مليون طن سنوياً، ويكون حجم الغاز الحيوي المتوقع 159.95 مليون متر مكعب/سنة، وكمية السماد العضوي الناتج عن التخمر اللاهوائي 7.128 مليون طن/سنة (يونس وزملاؤه، 2012).

حازت الدراسات الخاصة بإنتاج الغاز الحيوي عن طريق التخمر اللاهوائي المشترك اهتماماً واسعاً، وذلك نظراً لكون عملية التخمر اللاهوائي منفردة غير مجدية بسبب كمياتها الصغيرة نسبياً وارتفاع احتمال التثبيط نتيجة تراكم الحموض الدهنية طويلة السلسلة LCFA، لذلك فإن التخمر المشترك يعتبر الخيار الأفضل (Luostarinen et al, 2009)، (Salama et al. 2019). تشير الأبحاث في هذا المجال إلى أن التخمر اللاهوائي المشترك لمخلفات تحوي مكونات عضوية صعبة التحلل (روث الأبقار) مع مخلفات غنية بالمواد العضوية سهلة التفتك (مخلفات الفول) له أثر إيجابي في زيادة إنتاج الغاز الحيوي، وذلك يتوافق مع ما توصل إليه Nenes وزملائه (2009). في دراسة أجراها (Wie et al, 2014) على التخمر المشترك لقش الشعير مع روث الأبقار، حيث كان الإنتاج الأعظمي للغاز الحيوي LN/Kg VS 192 وذلك عند نسبة خلط 50% قش+50% روث، وقد أفضت النتائج إلى أن الزيادة في إنتاج الغاز الحيوي عند نسبة الخلط السابقة قد بلغت 100% وذلك بالمقارنة مع تخمر الروث لوحده. وفي دراسة أجريت في مخابر قسم الهندسة الزراعية التابعة لجامعة فيينا للمصادر الطبيعية والعلوم التطبيقية - فيينا - النمسا، تم التحري عن الإنتاج الأعظمي للميتان من ثقل الزيتون (OP) ومخلفات الماشية (CW) وخلاتهما، وذلك في مجموعة مخمرات لاهوائية سعة كل منها 1 لتر وعند درجة حرارة 37.5 م° ولمدة 60 يوماً، حيث أظهرت النتائج أن النسبة المثالية للتخمر المشترك لثقل الزيتون ومخلفات المواشي كانت 25:75 على التوالي وكان معدل إنتاج الميتان LN Kg/VS 127، ويمكن أن يفسر ذلك بكمية ثقل الزيتون الكبيرة في الخليط ومحتواها العالي من الدهن الخام والسيليلوز والسكر بالمقارنة مع مخلفات الماشية (العفيف وأمون، 2008).

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير التخمر المشترك لمخلفات الفول (BW) مع روث الأبقار (CM) في إنتاج الغاز الحيوي، وذلك للحصول على بيانات لحركية تحلل المادة العضوية وزيادة إنتاج الغاز الحيوي.

مواد وطرق البحث:

العينات ووسط التخمر:

تم جمع مخلفات الفول (القشرة الخارجية لقرن الفول) من مزرعة تبعد 2 كم باتجاه الشمال من مدينة السلمية. تم تقنين العينة لتصبح بأبعاد (0.3 - 1) سم، وتم جمع عينات من مخلفات الأبقار من مزرعة في مدينة السلمية، قدم لها نظام غذائي متوازن من سيلاج الأعشاب والتبن وحفظت بدرجة حرارة 4 °C (Palmowski and Muller, 2000).

وسط التخمر: هو الراسب الناتج عن عملية الهضم اللاهوائي في وحدة التخمر، ويُستعمل لتنشيط وتسريع عملية التخمر (العفيف و أمون، 2008). في هذا البحث جرى استعمال وسط التخمر الناتج من عملية تخمر لاهوائي لروث الأبقار، وُجّع من وحدات التخمر في مختبرات كلية الزراعة - جامعة حماه، في نهاية زمن التخمر اللاهوائي حيث يكون النشاط الجرثومي في أدنى حدوده، وتم حفظه في ظروف لاهوائية وذلك بحسب (VDI4630, 2006).

مخطط التجربة:

لتحديد أثر التخمر المشترك لمخلفات الفول مع مخلفات الأبقار في إنتاج الغاز الحيوي تم تصميم التجربة وفق النسب التالية المبينة في الجدول (1)

الجدول (1): خلطات العينات وكمياتها التجريبية

الخلطات	BW (%)	CM (%)	BW (غرام مادة العضوية)	CM (غرام مادة العضوية)	وسط التخمر (غرام)
BW	100	0	8	0	800
خلطة 1	75	25	6	2	800
خلطة 2	50	50	4	4	800
خلطة 3	25	75	2	6	800
CM	0	100	0	8	800

BW = مخلفات الفول، CW = روث الأبقار، خلطة 1 = 75% مخلفات الفول + 25% روث الأبقار،

خلطة 2 = 50% مخلفات الفول + 50% روث الأبقار، خلطة 3 = 25% مخلفات الفول + 75% روث الأبقار.

تم إجراء التحاليل الكيميائية لعينات مخلفات الفول وروث الأبقار ووسط التخمر والتي شملت تحري المادة الجافة والمادة العضوية في المادة الجافة والبروتين الخام والألياف الخام والدهن الخام والنشاء والسكر والرماد، وبين الجدول (2) القيم المقاسة لهذه المؤشرات.

الجدول (2): نتائج التحاليل التي أجريت على عينات مخلفات الفول (القشرة الخارجية لقرن الفول) وروث الأبقار ووسط التخمر قبل بدء

التجربة

نوع التحليل	مخلفات الفول	روث الأبقار	وسط التخمر
المادة الجافة %	52.2	44.6	3
المادة العضوية في المادة الجافة %	93.4	72.3	66
البروتين الخام % DM	26.1	9.9	م.غ
الليف الخام (السليولوز، الهيمسليولوز، اللغنين) % DM	17.3	54.3	م.غ
دهن خام % DM	1.9	4.5	م.غ
نشاء % DM	46.4	2.3	م.غ
سكر % DM	3.2	1.3	م.غ
رماد %	5.1	27.7	م.غ

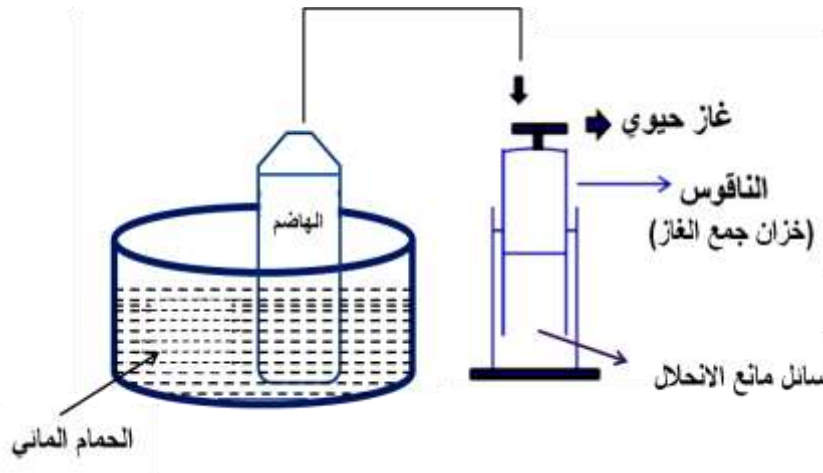
م.غ: غير مقاس (أدنى من حد الكشف والقياس)، DM: مادة جافة

اختبارات الهضم اللاهوائي:

أجريت تجارب التحري عن الإنتاج الأعظمي للغاز الحيوي من مخلفات الفول وروث الأبقار، في مخابر كلية الزراعة - جامعة حماه، وذلك في وحدة تخمير لاهوائية.

تتألف وحدة التخمر من أربعة مخمرات سعة 1 لتر، تم تزويد كل مخمر بفتحة تغذية علوية يتم من خلالها إضافة مواد التجربة ويمكن إغلاقها بشكل محكم لمنع حدوث تسريب للغاز الناتج والحفاظ على الظروف اللاهوائية وذلك باستخدام موانع تسريب خاصة (جوانات). توضع المخمرات ضمن حمام مائي مزود بترموستات للتحكم بدرجة الحرارة المطلوبة بدرجة حرارة 37 °C ولمدة 30 يوماً، حيث تم إنهاء الاختبارات عندما أصبح إنتاج الغاز الحيوي اليومي يساوي أو أقل من 1% من إنتاج الغاز الحيوي التراكمي (Habashi et al, 2016).

تم إضافة العينات دفعة واحدة، وجمع الغاز الحيوي المنطلق في خزانات جمع الغاز المملوءة بسائل مانع للانحلال بدلاً من الماء والذي يتكون من حمض كبريت مركز وكبريتات الصوديوم وبرتقالي الميثيل، وذلك بهدف منع انحلال غاز ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغاز الحيوي من أجل حساب نسبته بدقة في حال تم تحليل مكونات الغاز الحيوي المنطلق. وتم تحديد حجم الغاز الحيوي الناتج من حساب ارتفاع الناقوس عند تدفق الغاز الحيوي إلى الخزان كما هو مبين في الشكل (1). تم إجراء ثلاث مكررات لمعاملات التجارب، وقيس حجم الغاز الحيوي الناتج من وسط التخمر بشكل مستقل، وطُرحت كميته من كمية الغاز الحيوي الناتج من تخمر العينة مع وسط التخمر، وذلك للوقوف على الكمية الفعلية للغاز الحيوي الناتج من العينة (Bayr et al, 2012). جرى تحريك العينات داخل الهاضم يدوياً عن طريق رج الهواضم يومياً (Lattef et al, 2014). تم قياس حجم الغاز الحيوي الناتج يومياً، وقيس في الشرطيين النظاميين من الحرارة 273 K ، والضغط 1013 ميلي بار. قيس حجم الغاز الحيوي في لتر نظامي لكل كيلو غرام من المادة العضوية في ظروف لاهوائية (LN/Kg VS) (AL Afif and Pfeifer, 2021) (VDI4630, 2006).

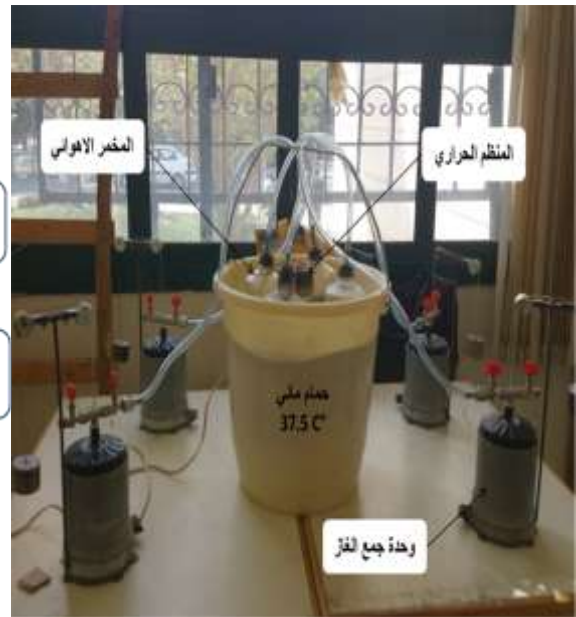


الشكل (1): وحدة التخمر اللاهوائية المخبرية المستخدمة في التجربة

يبين الشكل (2) والشكل (3) صورة فوتوغرافية لوحدة التخمر اللاهوائية المستخدمة في التجربة بكافة مكوناتها، وصورة فوتوغرافية لإحدى وحدات جمع الغاز المستخدمة في التجربة بكافة مكوناتها على التوالي.



الشكل (2) وحدة التخمر اللاهوائية

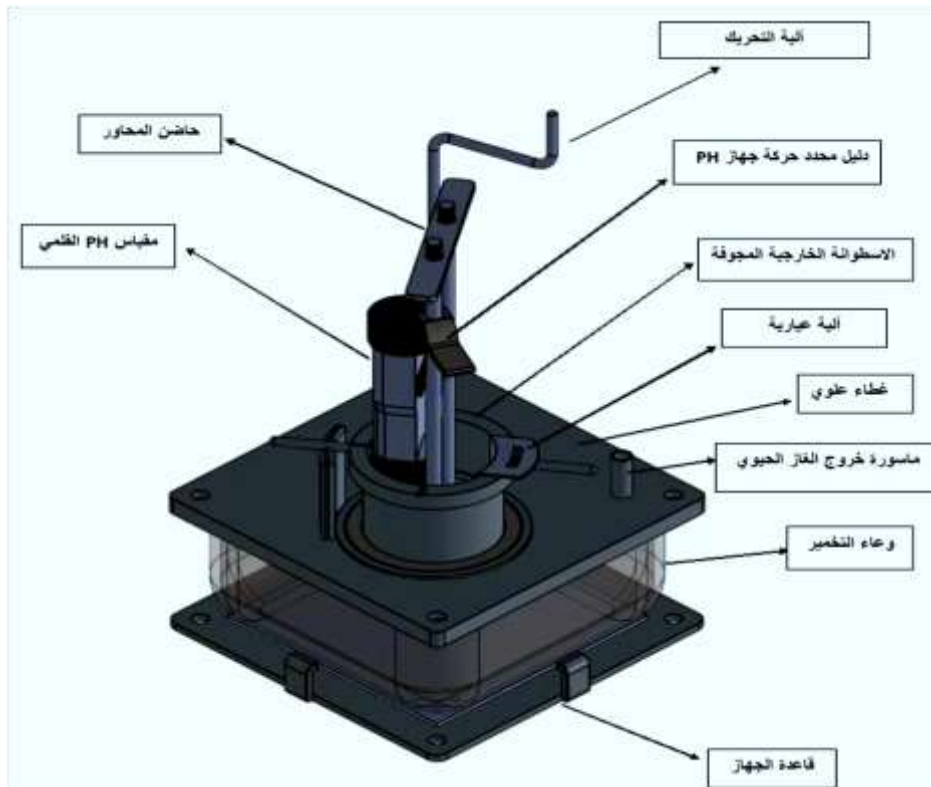


الشكل (3): وحدة جمع الغاز

قياس درجة الحموضة PH:

من أجل قياس درجة الحموضة PH بشكل يومي، تم تصنيع جهاز مخبري معد لهذا الغرض (مخمر لاهوائي مخبري معد لقياس درجة الحموضة PH)، مجهز بألية ميكانيكية يدوية تسمح بدخول جهاز قياس PH القلمي وخروجه، بهدف قياس درجة الحموضة لوسط التخمر وبشكل يومي دون السماح بتبادل الغازات مع الوسط الخارجي كما هو مبين في الشكل (4).

صُمم الجهاز من قبل الباحث، وحصل على براءة اختراع رقم /6115/ بتاريخ 2020/6/7.



الشكل (4): المخمر اللاهوائي المخبري المعد لقياس درجة الحموضة PH المستخدم في التجربة

التحليل الإحصائي:

تم تصميم التجربة وفق التصميم العشوائي الكامل، حيث تم إجراء تحليل التباين أحادي الاتجاه *one way ANOVA*، ثم قورنت المتوسطات بإجراء اختبار أقل فرق معنوي LSD عند مستوى ثقة 95%. ولتقييم دقة الشكل الرياضي للدالة والتحقق من درجة تمثيل النموذج الخطي للبيانات تم حساب قيمة معامل التحديد R^2 .

النتائج والمناقشة:

تأثير التخمر المشترك على إنتاج الغاز الحيوي:

يبين الجدول (3) حجم الغاز الحيوي الناتج عن التخمر اللاهوائي المفرد والمشارك لمخلفات الفول وروث الأبقار، والانحراف المعياري لثلاثة مكررات، وقد تراوح حجم الغاز الحيوي الناتج عن التخمر المشترك لمدة 30 يوماً عند درجة الحرارة 37 °C لكل خليط على حده خطة 1، خطة 2، خطة 3 (181, 191, 184) LN/Kg VS على التوالي.

دلت الدراسة الإحصائية على وجود فرق معنوية في كمية الغاز الحيوي الناتج من التخمر اللاهوائي لروث الأبقار مقارنة مع الخلطات (خطة 1، خطة 2، خطة 3) عند مستوى معنوية 5%، حيث كانت كمية الغاز الحيوي الناتجة عن التخمر اللاهوائي للخلطات أعلى بنسبة (18.7, 23, 20.1)% على التوالي، ولم تكن هناك فروق معنوية في إنتاج الغاز الحيوي بين الخلطات (خطة 1، خطة 2، خطة 3) عند المستوى 5%. توصل كلاً من Astals وزملائه (2012)، و Hills and Roberts (1981) بأنه عند التخمر اللاهوائي المشترك للمخلفات النباتية مع مخلفات الأبقار، فإن الأخيرة تقوم بتأمين مجال واسع من العناصر الغذائية الأساسية اللازمة لنمو البكتيريا، علاوة على أن القلوية العالية في هذه المخلفات تقاوم تغيرات ال PH وتبقيها ضمن الحدود المقبولة، خاصةً عند التراكم المؤقت للحموض الدهنية المتطايرة (VFA) الناتجة عن التفكك السريع للمادة العضوية في المخلفات النباتية والذي يؤدي إلى انخفاض ال PH وتثبيط عملية التخمر اللاهوائي.

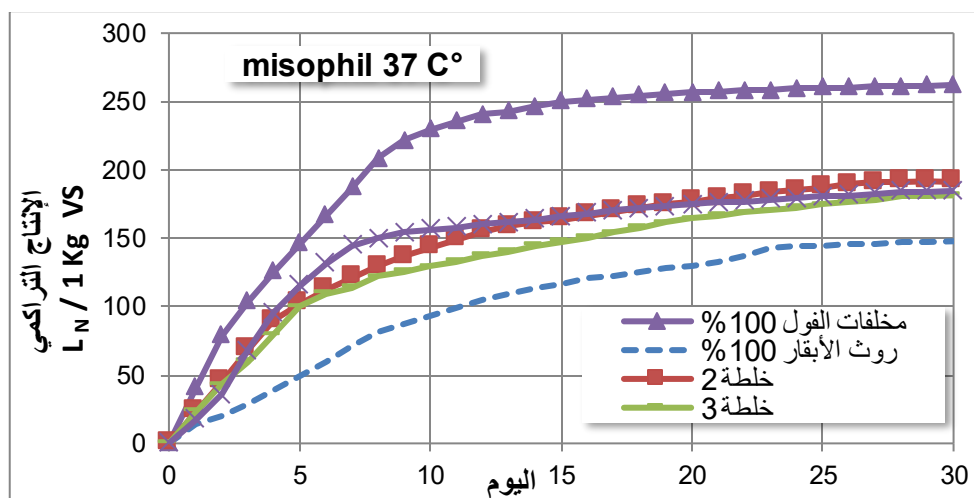
الجدول (3): الغاز الحيوي والميثان من التخمر اللاهوائي لمخلفات الفول وروث الأبقار وخلطتهما، والانحراف المعياري لثلاثة مكررات.

معاملات التجربة	N	ناتج الغاز الحيوي LN/Kg VS		ناتج الميثان LN/Kg VS	
		المتوسط	S.D	المتوسط	S.D
100% مخلفات الفول	3	262	20	144	12
خطة 1	3	184*	14	107*	8
خطة 2	3	191*	28	109*	16
خلط 3	3	181*	7	101*	4
100% روث الأبقار	3	147	11	82	6

خطة 1: 75% مخلفات الفول+25% روث الأبقار، خطة 2: 50% مخلفات الفول+50% روث الأبقار، خطة 3: 25% مخلفات الفول+75% روث الأبقار، S.D: الانحراف المعياري، N: عدد المكررات، *: وجود فرق معنوي.

لقد دلت الدراسة الإحصائية على وجود انخفاض معنوي في إنتاج الغاز الحيوي للخلطات (خطة 1، خطة 2، خطة 3) بنسبة (29.7, 27, 30.9)% على التوالي وذلك مقارنة مع الغاز الحيوي الناتج من تخمر مخلفات الفول لوحدها. وهذا يتوافق مع ما ورد في الأبحاث المشابهة التي ركزت على التخمر المشترك بين المخلفات النباتية وروث الأبقار؛ حيث انخفض إنتاج الغاز الحيوي من التخمر اللاهوائي المشترك لتقل الزيتون مع روث الأبقار بنسبة تتراوح بين (7.5 – 16.7)% وذلك مقارنة مع التخمر اللاهوائي لتقل الزيتون لوحده (العفيف وأمون، 2008). وقد يعود السبب في ذلك إلى ارتفاع السكر والنشاء في مخلفات الفول مقارنة مع روث الأبقار الجدول (2). لقد أشار (Angelidaki and Sanders, 2004) إلى أن المخلفات العضوية الغنية بالمواد الكربوهيدراتية ذات القابلية العالية للتطل ممكن أن تزيد من إنتاج الغاز الحيوي حتى 40%.

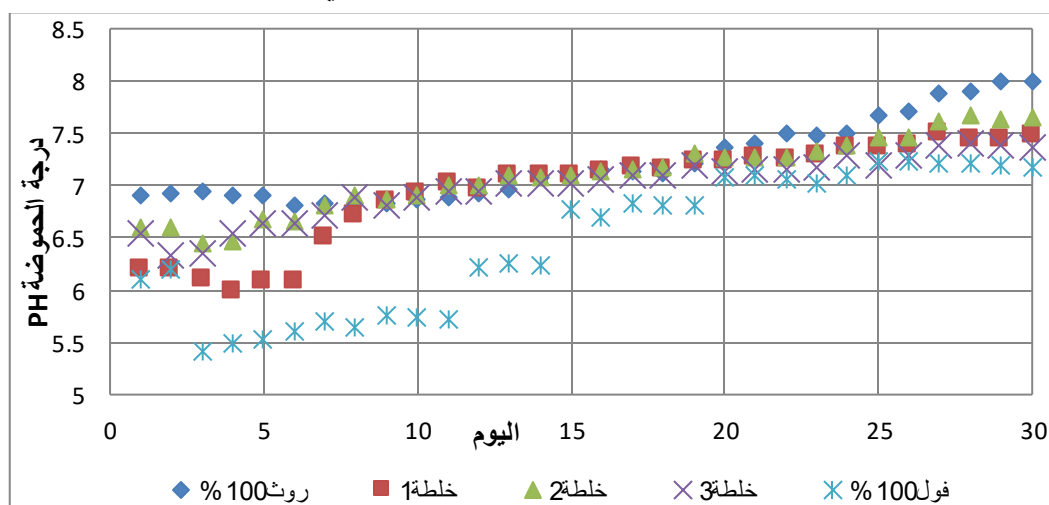
يبين الشكل (5) المنحنيات التراكمية لإنتاج الغاز الحيوي من مخلفات الفول وروث الأبقار وخطاتهما، حيث يظهر فيه تفوق المعاملة 100% مخلفات الفول بشكل ملحوظ على باقي المعاملات.



الشكل (5): المنحنيات التراكمية لإنتاج الغاز الحيوي من مخلفات الفول وروث الأبقار وخطاتهما

درجة الحموضة PH أثناء عملية التخمير اللاهوائي:

يبين الشكل (6) قيم درجة الحموضة PH المقاسة يومياً لعملية التخمير اللاهوائي المفرد والمشارك لمخلفات الفول وروث الأبقار، حيث تراوحت القيم المقاسة ل PH بين (5.4 - 7.23)، (6.8 - 7.9)، (5.9 - 7.49)، (6.45 - 7.66)، (6.32 - 7.39) لكل من مخلفات الفول وروث الأبقار والخلائط: خلطة 1، خلطة 2، خلطة 3 على التوالي.



الشكل (6): قيم درجة الحموضة PH خلال عملية التخمير اللاهوائي لمخلفات المفرد والمشارك لمخلفات الفول وروث الأبقار

يلاحظ من النتائج التي تم الحصول عليها أن قيم ال PH في جميع المعاملات قد تراوحت بين (5.4 - 7.99)، وهذا يتوافق مع ما توصل إليه Wang وزملاءه 2013 في تجربة للتخمير اللاهوائي المشترك للحماة ومخلفات الطعام، حيث تراوحت قيم درجة الحموضة بين (6.3 - 8.2). وفي تجربة قام بها Cuetos وزملاءه (2008) للتخمير اللاهوائي للمخلفات البلدية الصلبة، تراوحت قيم درجة الحموضة بين (6.4 - 8). إن قيم درجة الحموضة المقاسة يومياً، والتي تم الحصول عليها في هذه التجربة كانت ملائمة لعملية التخمير اللاهوائي. لاحظ Haryanto وزملاؤه (2018) أن عمليات التخلل اللاهوائي تلبى متطلبات النشاط ونمو الكائنات الحية الدقيقة اللاهوائية عند مجال لقيم درجة الحموضة PH يتراوح بين (5.5 - 8.5).

لقد أشار Xu وزملاؤه (2018) إلى أن الكريوهيدرات والبروتينات سريعة التحطم والتحول البيولوجي، حيث تعتبر معدلات الطمئة لهذه المواد العضوية عالية. تجدر الإشارة هنا إلى أن معدلات الطمئة العالية أو سير مرحلة الطمئة - أولى مراحل عملية التخمر اللاهوائي - بشكل سريع وبدون عرقلة ينتج عنه تشكل الحموض العضوية بتركيز عالية وهي الركائز الرئيسية للمراحل اللاحقة، وهذا يفسر قيمة الحد الأدنى ل PH (5.4) أثناء التخمر اللاهوائي لمخلفات الفول بشكل مفرد وأيضاً انخفاض قيم PH لمخلفات الفول بالمقارنة مع بقية معاملات التجربة، حيث احتوت مخلفات الفول على مواد عضوية سهلة التحطم والتحلل البيولوجي (النشاء DM % 46.4، بروتين DM % 26.1) (الجدول 2)، والتي تتفكك بسرعة خلال عملية التخمر اللاهوائي وتُسرع من تشكل الحموض العضوية وبالتالي انخفاض رقم PH. وعلى العكس من ذلك فقد كانت قيم ال PH أثناء عملية التخمر اللاهوائي لروث الأبقار مفردة الأعلى بين جميع المعاملات بسبب احتوائها على نسبة عالية من المكونات العضوية صعبة التفكك (السليولوز، الهيمسليولوز، اللغنين DM % 54.3) (الجدول 2)، وهذا يتوافق مع ما ذكره Chayovan وزملاؤه (1988) والذي حصل على قيم PH تراوحت بين (7-8) أثناء التخمر اللاهوائي لروث الأبقار، وضمن نفس السياق أيضاً حصل Masse وزملائه (2005) على قيم PH تراوحت بين (7.86-8.03) أثناء عملية التخمر اللاهوائي لروث الخنازير.

النموذج الحركي لإنتاج الغاز الحيوي:

معدل التفاعل أو معدل سرعة التفاعل الكيميائي هو معدل التغير في (تركيز) المواد المتفاعلة أو الناتجة في وحدة الزمن، أو معدل تغير نواتج التفاعل في وحدة الزمن. وبأخذ قانون حفظ المادة في الاعتبار فإن زيادة كمية الغازات الناتجة عن الهضم اللاهوائي يترافق مع نقص تركيز المواد العضوية المتحللة. إن اشتقاق معادلة رياضية تبين تغير تركيز المادة المتفاعلة وربطها بإنتاج الغاز الحيوي بدلالة الزمن أو بمعنى أدق - التنبؤ بإنتاجية الغاز الحيوي كتابع لزمان الهضم اللاهوائي للعينة المختبرة (إيجاد نموذج رياضي) - له جدوى ونفع من الناحية العلمية، إضافة إلى ذلك تعطينا انعكاساً وتفسيراً للتحلل البيولوجي داخل المخمر ويمكن استخدامها للإجابة على العديد من التساؤلات.

يتوافق إنتاج الغاز الحيوي خلال زمن التخمر اللاهوائي للمادة العضوية مع الإزالة البيولوجية لمركباتها. معدل الإزالة للركيزة $r(c)$ كتابع للتركيز (c) - في أي زمن من التخمر اللاهوائي - يُعبر عنه بالطلب الحركي الأول أو l الحركية الكيميائية من الرتبة الأولى، وذلك وفقاً للمعادلة التالية: (Grau *et al*, 1975)، (Angelidaki and Sanders, 2004)، (Linke, 2006)، (Li *et al*, 2011)، (Al Afif and Pfeifer, 2022).

$$-\frac{dc}{dt} = r(C) = k \cdot C(t) \quad (1)$$

إن تغير تركيز العينة dc بالنسبة للزمن t يعتمد على التركيز الحقيقي للعينة كتابع للزمن t وثابت معدل التفاعل k . وبعد تكامل المعادلة (1) نحصل على المعادلة (2):

$$-\int_{C_0}^C \frac{dc}{c} = k \int_0^t dt \quad \ln \frac{C(t)}{C_0} = -k \cdot t \quad (2) \quad -\frac{dc}{c} = k \cdot dt$$

حيث: $C(t)$: تركيز العينة المتحللة بيولوجياً خلال أي زمن t من عملية التخمر اللاهوائي، C_0 : تركيز العينة المتحللة بيولوجياً في بداية عملية التخمر اللاهوائي، t : زمن التخمر اللاهوائي باليوم (d)، k : ثابت معدل التفاعل (d^{-1}) .

1 حركية التفاعل أو الحركية الكيميائية هو العلم الذي يهتم ويختص بدراسة معدل التغير في سرعة التفاعلات الكيميائية والعوامل المؤثرة فيها مثل الضغط ودرجة الحرارة والتركيز وطبيعة العوامل المتفاعلة والعوامل المحفزة أو المثبطة، كما أنها تقوم بوضع نماذج رياضية توصف خواص التفاعلات الكيميائية.

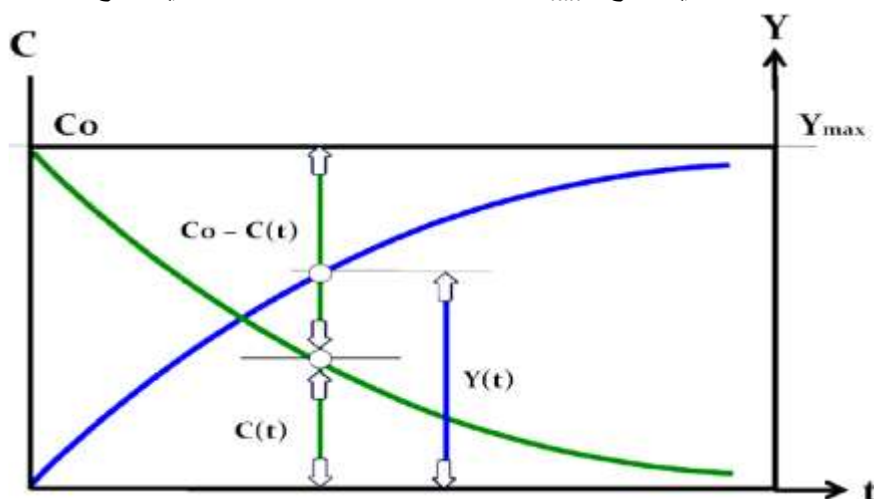
يبين الشكل (7) العلاقة بين تحلل المادة العضوية وإنتاج الغاز الحيوي التراكمي كتابع لزمن التخمر اللاهوائي (العلاقة بين تركيز العينة C وناتج الغاز الحيوي Y خلال زمن التخمر اللاهوائي t)، وهنا - ومن الشكل (7) - فإنه مع تقدم زمن التخمر اللاهوائي يتناقص تركيز العينة الابتدائية C_0 ويزداد بالتزامن إنتاج الغاز الحيوي، ليصل إلى القيمة العظمى Y_{max} .

إن التحلل البيولوجي للمادة العضوية الخاضعة لعملية التخمر اللاهوائي يتناسب مع إنتاج الغاز الحيوي وفقاً للمعادلة التالية:

$$(3) \quad \frac{C_0 - C(t)}{C_0} = \frac{Y(t)}{Y_{max}}$$

$$(4) \quad \frac{C(t)}{C_0} = \frac{Y_{max} - Y(t)}{Y_{max}}$$

حيث: $y(t)$: القيمة اللحظية للغاز الحيوي الناتج، Y_{max} : القيمة الكلية التراكمية للغاز الحيوي الناتج.



الشكل (7): العلاقة بين تحلل المادة العضوية وإنتاج الغاز الحيوي التراكمي بدلالة زمن التخمر اللاهوائي

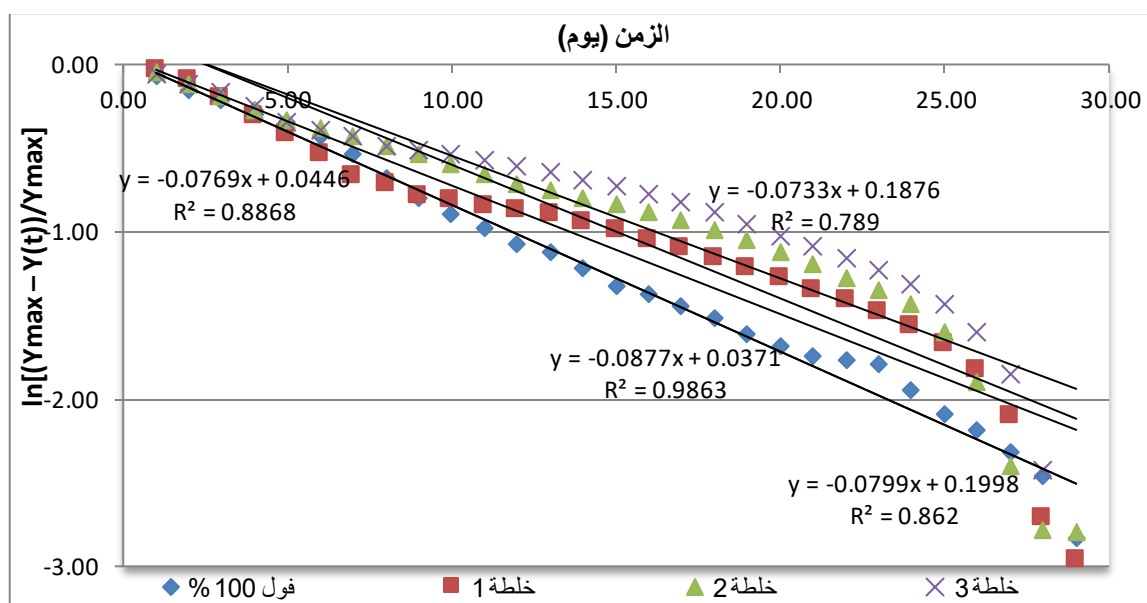
بتعويض المعادلة (4) في المعادلة (2) يمكننا الحصول على المعادلة (5) والتي من خلالها يمكننا حساب ثابت معدل التفاعل K ، وبغزل $Y(t)$ يمكننا الحصول على المعادلة (6) والتي من خلالها يتم حساب إنتاج الغاز الحيوي كتابع للزمن t ، وبالتالي المقارنة بين القيم الحسابية والقيم التجريبية كما هو مبين في الجدول (4).

$$(5) \quad \ln \frac{Y_{max} - Y(t)}{Y_{max}} = -k \cdot t$$

$$(6) \quad Y(t) = Y_{max} (1 - e^{-k \cdot t})$$

لتعيين ثابت معدل التفاعل k والتحقق من النموذج الحركي الاولي (the first order kinetic)، يتم رسم مخطط بياني للوغاريتم النسبة $[(Y_{max} - Y(t)) / Y_{max}]$ بالنسبة للزمن t .

يوضح الشكل (8) العلاقة بين لوغاريتم النسبة $[(Y_{max} - Y(t)) / Y_{max}]$ كتابع للزمن t ، وتم الحصول على ثابت معدل التفاعل كقيمة تكافئ ميل الخطوط البيانية.



الشكل (8): العلاقة بين لوغاريتم النسبة $[(Y_{max} - Y(t)) / Y_{max}]$ كتابع للزمن t

لقد كانت قيم ثوابت معدل التفاعل للعينات المختبرة (مخلفات الفول والخلطات: خطة 1، خطة 2، خطة 3) $(K_1=0.09)$ ، $(K_2=0.08)$ ، $(K_3=0.08)$ ، $(K_4=0.07)$ على التوالي.

إن قيم ثوابت معدل التفاعل كانت تتراوح بين $(0.07 - 0.09)$ وهي تعكس معدل التفاعل وتحلل المادة العضوية الذي يرافق الإنتاج التراكمي للغاز الحيوي. إن التخمر اللاهوائي لمخلفات الفول بشكل مفرد أعطت أعلى معدل تفاعل، حيث كانت قيمة ثابت معدل التفاعل الأكبر بين جميع المعاملات وقد بلغت 0.09 ، وهنا يمكن استنتاج أن الهضم اللاهوائي لهذه المخلفات كان سهلاً وسريعاً بالمقارنة مع المعاملات التي تمت إضافة الروث إليها. إن المنحنين التراكميين للغاز الحيوي الناتج من الهضم اللاهوائي للخطة 1 (75% مخلفات الفول + 25% روث الأبقار) والخطة 2 (50% مخلفات الفول + 50% روث الأبقار) كانا متقاربين إلى حد التطابق كما هو مبين في (الشكل 5)، لذلك كانت قيمتي ثابت معدل التفاعل لهذه الخلطات متساوية والتي كانت (0.08) ، وقد يعود السبب إلى ثبات درجة الحرارة والاستقرار الذي تمنحه درجة الحرارة المعتدلة لعملية التخمر اللاهوائي، وهذا يتوافق مع ما توصل إليه (Kim et al, 2006) في تجربة للتخمر اللاهوائي لمخلفات الطعام حيث حصل على معدلات تفاعل متقاربة عند درجات الحرارة المعتدلة 35°C و 40°C ، حيث كانت قيم ثابت معدل التفاعل 0.35 و 0.38 على التوالي، وقد لاحظ الباحثون ازدياد معدل تحلل المادة العضوية بشكل ملحوظ بزيادة درجة حرارة التخمر، حيث بلغ ثابت معدل التفاعل القيمة 0.61 عند التخمر عند درجة حرارة 50°C .

من أجل الحصول على القيم الحسابية لإنتاج الغاز الحيوي نعوض قيم ثابت معدل التفاعل التي تم الحصول عليها $(K_1=0.09)$ ، $(K_2=0.08)$ ، $(K_3=0.08)$ ، $(K_4=0.07)$ في المعادلة 6. بين الجدول (4) المقارنة بين القيم الحسابية والقيم التجريبية (المقاسة) لإنتاج الغاز الحيوي من التخمر اللاهوائي لمخلفات الفول والخلطات: خطة 1، خطة 2، خطة 3.

يُلاحظ من الجدول (4) عدم وجود اختلافات ظاهرية كبيرة بين القيم الحسابية والتجريبية (المقاسة) للغاز الحيوي الناتج من التخمر اللاهوائي لمخلفات الفول بشكل مفرد وذلك بالمقارنة مع بقية المعاملات (خطة 1، خطة 2، خطة 3)، وخاصة في أول أيام عملية التخمر اللاهوائي وفي نهايتها، وكان أكبر فرق بين القيم الحسابية والتجريبية خلال كامل زمن التخمر في اليوم التاسع حيث بلغ 22.3 LN/Kg VS .

الجدول (4): المقارنة بين القيم الحسابية والقيم التجريبية (المقاسة)

حطلة 3		حطلة 2		حطلة 1		مخلفات الفول 100%		اليوم
القيم المقاسة LN/Kg VS	القيم الحسابية LN/Kg VS	القيم المقاسة LN/Kg VS	القيم الحسابية LN/Kg VS	القيم المقاسة LN/Kg VS	القيم الحسابية LN/Kg VS	القيم المقاسة LN/Kg VS	القيم الحسابية LN/Kg VS	
23.66	18.85	23.17	11.12	17.66	25.63	40.95	38.61	1
43.42	35.74	45.31	21.60	35.87	47.69	79.17	71.50	2
59.80	50.87	68.56	31.46	68.12	66.68	103.70	99.54	3
79.50	64.43	90.09	40.75	95.67	83.02	125.63	123.42	4
99.83	76.57	102.45	49.50	115.42	97.08	145.88	143.78	5
109.26	87.45	112.84	57.74	131.65	109.19	166.53	161.13	6
114.34	97.19	121.32	65.50	144.62	119.61	187.28	175.91	7
122.35	105.92	129.65	72.81	149.62	128.58	208.52	188.50	8
125.43	113.74	136.35	79.70	154.32	136.30	221.54	199.24	9
129.14	120.75	142.91	86.18	156.27	142.94	229.30	208.38	10
132.85	127.03	149.36	92.28	158.11	148.66	235.14	216.18	11
137.28	132.65	154.80	98.03	159.77	153.59	240.17	222.82	12
140.32	137.69	158.35	103.44	161.36	157.82	242.39	228.48	13
144.60	142.20	161.25	108.54	163.65	161.47	246.64	233.30	14
147.64	146.24	163.97	113.35	165.86	164.61	249.94	237.41	15
150.74	149.86	166.72	117.87	167.88	167.31	251.24	240.92	16
154.26	153.10	169.38	122.13	169.96	169.63	252.79	243.90	17
157.77	156.01	172.19	126.14	171.62	171.63	254.36	246.44	18
161.20	158.61	174.95	129.91	173.36	173.36	255.85	248.61	19
164.27	160.94	177.19	133.47	174.73	174.84	256.83	250.46	20
166.67	163.03	179.36	136.82	176.10	176.12	257.46	252.03	21
168.73	164.91	181.48	139.98	177.16	177.21	257.73	253.37	22
170.51	166.58	183.11	142.95	178.27	178.16	257.95	254.51	23
172.55	168.08	184.59	145.75	179.34	178.97	259.19	255.49	24
174.60	169.43	186.89	148.38	180.42	179.67	260.05	256.32	25
176.67	170.63	189.18	150.86	181.56	180.28	260.48	257.02	26
178.65	171.71	190.86	153.20	182.85	180.79	260.91	257.63	27
180.53	172.68	191.29	155.40	183.94	181.24	261.26	258.14	28
181.10	173.55	191.30	157.48	184.00	181.63	261.77	258.58	29
181.36	173.92	191.44	157.84	184.67	181.84	262.77	258.60	30

إن هذا التقارب بين القيم الحسابية والمقاسة يعتبر دليل دقة النموذج الرياضي المقترح للتعبير عن سير التفاعل ضمن المخمر، مع الأخذ بعين الاعتبار ثبات وملائمة درجة حرارة التخمر، واحتواء مخلفات الفول على مواد عضوية ذات قابلية عالية للتغل البيولوجي، حيث نلاحظ ارتفاع السكر والنشاء في مخلفات الفول مقارنة مع روث الأبقار الجدول (2)، لقد أشار Hartmann

(2002) إلى أن المخلفات العضوية ذات المحتوى العالي من الكربوهيدرات والتي لها قدرة عالية على التحلل البيولوجي تعطي معدلات عالية من إنتاج الغاز الحيوي.

الاستنتاجات:

تعدّ مخلفات الفول مادة جيدة لإنتاج الغاز الحيوي، ويتبين من خلال نتائج هذا البحث الحصول على نتائج إيجابية للتخمر اللاهوائي المشترك لمخلفات الفول مع روث الأبقار، وقد حققت نسبة خلط 50:50 أعلى قيمة في إنتاج الغاز الحيوي. تم قياس درجة الحموضة PH يومياً لعملية التخمر اللاهوائي، بواسطة جهاز صُمم وصنع خصيصاً لهذا الغرض، وكانت قيم ال PH المُقاسة ملائمة لعملية التخمر اللاهوائي وقد تراوحت بين (5.4-7.99). لائمت بيانات التجارب المخبرية النموذج الحركي لإنتاج الغاز الحيوي الذي تم وضعه، وكانت قيم ثوابت معدل التفاعل تتراوح بين (0.07 - 0.09) وهي تعكس معدل التفاعل وتطل المادة العضوية الذي يرافق الإنتاج التراكمي للغاز الحيوي. كان هناك تقارب بين القيم الحسابية والمُقاسة، والذي يعتبر دليل على دقة النموذج الرياضي المقترح للتعبير عن سير التفاعل ضمن المخمر.

المراجع :

الصرن، رعد (2012). استعداد المستهلك السوري لتبني تقانات الطاقة المتجددة الخضراء، مجلة جامعة دمشق للعلوم الاقتصادية والقانونية - المجلد 28 - العدد الأول - ص (365 - 395).

العفيف، رأفت وأمون، توماس. 2008. إنتاج الغاز الحيوي من ثقل الزيتون ومخلفات المواشي - دراسة تأثير التخمر المشترك وإضافة الأنزيمات في إنتاجية الميثان - مجلة جامعة دمشق للعلوم الزراعية المجلد (24) - العدد 2 - (103 - 121).

المجموعة الإحصائية الزراعية السورية، وزارة الزراعة، 2022.

تقييم واقع و آفاق استثمار الكتلة الحيوية في الجمهورية العربية السورية، 2012- دراسة الطلب على الطاقة في سورية و إستراتيجية التزود الأفضل حتى عام 2030، المركز الوطني لبحوث الطاقة، رئاسة مجلس الوزراء، 52 صفحة.

علي، يونس، الشياح، عبد الرحمن، العفيف، رأفت، علي، نادر، جحا، زياد، 2012. تقييم واقع و آفاق استثمار الكتلة الحيوية في الجمهورية العربية السورية، دراسة الطلب على الطاقة في سورية واستراتيجية التزود الأفضل حتى عام 2030، المركز الوطني لبحوث الطاقة، رئاسة مجلس الوزراء، 52 صفحة.

AL Afif, R and Pfeifer, C., 2021. Enhancement of methane yield from cotton stalks by mechanical pre-treatment. *Science Direct. Carbon Resources Conversion*, 4: 164-168.

Al Afif, R and Pfeifer, C., 2022. Biochemical methane potential of three-phase olive mill solid waste: Influence of temperature and supplemental enzymes. *Science Direct. Carbon Resources Conversion*, 5: 248-254.

Angelidaki, I and Sanders, W., 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3: 117-129.

Astals, S., Ardevol, N. V., Alvares, M. J., 2012. Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions. *Biogas and digestate. Bioresource and Technology*. 110(2012) 63-70.

Bayr, S., Rantanen, M., Kaparaju, P., Rintala, J., 2012 - Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of rendering plant and slaughterhouse wastes. *Science Direct. Bioresource Technology*, 104: 28-36.

Chayovan, S., Gerrish, B.J., Eastman, A.J., 1988. Biogas Production from Dairy Manure: The Effects of Temperature Perturbation. *Biological Wastes*. 25: 1-16.

- Cuetos, J.M., a, Gomeza, X., Otero, M., Moran, A., 2008. Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Biochemical Engineering Journal*, 40: 99–106.
- Dubrovskis, V., Plume, I., Straume., 2019. 27th European Biomass Conference and Exhibition, 27-30 May 2019, Lisbon, Portugal.
- Grau, P., Dohanyos, M., Chudoba, J., 1975. Kinetic of multicomponent substrate removal by activated sludge. *Water Res*, 9: 637-642.
- Habashi, N., Mehrdadi, N., Mennerich, A., Alighardashi, A., Torabian, A., 2016- Hydrodynamic cavitation as a novel approach for pretreatment of oily wastewater for anaerobic co-digestion with waste activated sludge. *Science Direct, Ultrasonics Sonochemistry*, 31: 362–370.
- Hartmann, H., 2002. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste with recirculation of process water. PhD. Thesis, Technical University of Denmark.
- Haryanto A., Hasanudin U., Afrian C., Zulkarnaen I, 2018. Biogas production from anaerobic codigestion of cowdung and elephant grass (*Pennisetum Purpureum*) using batch digester. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science*, 141 (2018) 012011.
- Hills, L. D., and Roberts, W, D., 1981. Anaerobic digestion of dairy manure and field crop residues. *Agric waste* 1981, 3: 89- 179.
- Kim, K.J., Oh, R.B., Chun, N.Y., Kim, W.S., 2006. Effects of Temperature and Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Food Waste. *journal of bioscience and bioengineering*, 120(4): 328-332.
- Lattef and others, 2014- Batch anaerobic co-digestion of cow manure and waste milk in tow stage process for hydrogen and methane productions. *Bioprocess Biosyst Engineering*, 37(3): 355-363.
- Li, C., Champagne, P., Anderson, C.B., 2011. Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions. *Science Direct. Bioresource Technology*, 102: 9471-9480.
- Linke, B., 2006. Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of solid wastes from potato processing. *Science Direct, Biomass and Bioenergy*, 30: 892–896.
- Luostarinen, S., Luste, S., Sillanpaa, M., 2009. Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant. *Science Direct, Bioresource Technology*, 100: 79-85.
- Masse, I.D., Masse, L., Croteau, F., 2005. The effect of temperature fluctuations on psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure. *Bioresource Technology*. 89, 57–62.
- Nenes, L., oliveira, R., Alves, M. M., 2009. Co-digestion of cow manure, food waste and intermittent input of fat. *Bioresource Technology*, 100(6): 1957- 1962.
- Palmowski, L.M., and Müller, J.A., 2000. Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion. *Water science and technology*, 41(3):155-62.
- Rozzi, A and Remigi. E., 2001. Anaerobic biodegradability. In: 9th World Congress, Anaerobic digestion 2001. Belgium, Workshop 3 Harmonisation of anaerobic activity and biodegradation assays. 9-2-2001. Conference Proceeding.
- Salama, S.E., Saha, S., Kurade, K.M., Dev, S., 2019. Recent trends in anaerobic co-digestion: Fat, oil, and grease (FOG) for enhanced biomethanation. *Science Direct, Progress in Energy and Combustion Science*, 70: 22–42.
- Sanders, W.T.M., Geerink, M., Zeeman, G., Lettinga, G., 2000. Anaerobic hydrolysis kinetics of particulate substrates. *Wat. Sci. Technol*, 41(3): 17–24.

- VDI4630, 2006- Fermentation of organic materials . Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data , fermentation tests. VDI Richtlinien 4630. Düsseldorf, 200.
- Wang, L., NAziz, N.T., Reyes, L.F., 2013. Determining the limits of anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge with grease interceptor waste. *Science Direct. Water research*, 47: 3835-3844.
- Weiland, P., 2010- biogas production: current state and perspectives. *Appl microbial biotechnol*, 85: 849-860.
- Wie, S., Zhang, H., Cai, X., Xu, J., Fang, J., Liu, H. 2014. Psychrophilic anaerobic of highland barley straw with two animal manures at high altitude for enhancing biogas production. *Energy Conversion and Management*, 88: 40-48.
- Xie, Sihuang., 2012. Evaluation of biogas production from Anaerobic digestion of pig manure and grass silage. doctoral dissertation. National University of Ireland, Civil Engineering, Ireland.
- Xu, F., Li, Y., Ge, X., Yang, L., Li, Y., 2018. Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities. *Science Direct, Bioresource Technology*, 247: 1047–1058.

Co-Fermentation of Faba beans residues with cow manure - kinetic model for biogas production

Daoud Malouk^{1*}

¹ College of Agriculture, Ministry of Higher Education, University of Hama, Hama, Salmeah, Syria.



(*Corresponding author: Daoud Malouk, Email: dawod_81@hotmail.com, Mobile: 0992765291)

Received: 4/12 / 2025

Accepted: 4/01 / 2026

Abstract

Anaerobic digestion of wasted amount of agriculture products is considered an important process to get a clean environment and to get renewable source of energy. In this study the the effect of co-digestion of broad beans wastes (BW) with cow manure (CM) on Biogas production was investigated in order to get kinetic data for degradation and increase the biogas yield. Eudiometer batch digesters of one litre capacity were used and the temperature was set at 37 C°. Hydraulic retention time was 30 days. Biogas yield produced from the co-digestion of BW with CM (ratios of BW to CM were 75:25, 50:50, 25:75 respectively) was ranged between (147-262) LN/Kg VS. The co-digestion ratio between BW and CM which gave the maximum biogas and methane yield (191 LN/Kg VS), was observed to be 50:50. The pH of the anaerobic digestion process was measured daily by a specially designed laboratory device. The measured pH values were suitable for the anaerobic digestion process and ranged between (8.8 - 5.4) A first order kinetic was adequate to fit the experimental data obtained with the reaction rate constants values ranged between (0.07 – 0.09).

Keywords: Biogas, Co- digestion, kinetic model, broad beans wastes.