إنتاج الغاز الحيوي عند تخمير ركائز مشتركة من روث الأبقار وفضلات الطعام باستخدام مفاعل UASB

الدكتور عادل عوض[1] الدكتور حسام صبوح [2]

الدكتور رائد جعفر[3] م. كندة علي[4]

الملخص

إن مفاعل بطانية الحمأة اللاهوائي ذو التدفق العلوي (UASB) هو طريقة معالجة لاهوائية فعالة في معالجة مياه الصرف الصحي والصناعي وروث الحيوانات وبقايا المحاصيل الزراعية ونفايات الطعام . إن إنتاج الغاز الحيوي في سورية ما زال في مرحلته البدائية وأصبح ضرورة ملحة، إلى جانب وجود كمية كبيرة من الكتلة الحيوية الأولية وتقدر بنحو 379 مليون طن سنوياً بناء على معلومات المركز القومي لبحوث الطاقة السنوية)ويمكنها أن تولد حوالي 4.6 مليار متر مكعب من الغاز الحيوي عند معالجتها. تم تصميم مفاعل UASB بمقياس مختبري بقطر 19 سم وارتفاع 115 سم لتحقيق أقصى إنتاج للغاز الحيوي . كانت نسب خلط روث الأبقار مع نفايات الطعام المستخدمة 10%

[1]أستاذ مساعد في قسم الهندسة البيئية–كلية الهندسة المدنية– جامعة تشرين–اللاذقية–سورية.

[2]أستاذ مساعد في قسم الهندسة البيئية–كلية الهندسة المدنية– جامعة تشرين–اللاذقية–سورية.

[3]أستاذمساعد في قسم الهندسة البيئية– كلية الهندسة المدنية– جامعة تشرين–اللاذقية–سورية.

[4]طالبة دكتوراه في قسم الهندسة البيئية– كلية الهندسة المدنية– جامعة تشرين–اللاذقية–سورية.

و18% و40%و60% عند درجة حرارة 35 درجة مئوية لمدة 35 يومًا، تم قياس العديد من البارامترات التي تؤثر على إنتاج الغاز.

كان إنتاج غاز الميثان 8.1 لتر عند 10% من نفايات الطعام و7.4 لتر عند 18٪ من نفايات الطعام، و 7.1 لتر عند 40% من نفايات الطعام، و 6.6 لتر عند 60% من نفايات الطعام. تم تحقيق أعلى إنتاج للغاز الحيوي باستخدام 10% من نفايات الطعام وروث الأبقار ويعود ذلك لقربها من نسبة الكربون إلى النيتروجين المثالية (C/N).

الكلمات المفتاحية: مفاعل UASB – هضم لاهوائي – الغاز الحيوي– النفايات الصلبة العضوية.

Biogas Production by Fermentation of Combined Substrates of Cow Dung and Food Waste using UASB Reactor

Dr.Adel Awad[5] **Dr.Hossam Sabbouh[6]**

Dr.Raed Jafer[7] **Eng.Kinda Ali[8]**

∇ ABSTRACT ∇

for The up flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor is an important and effective anaerobic treatment method for sewage, industrial wastewater, animal manure, agricultural crop residues, and food waste . Biogas production in Syria is still in its early stages and has become an urgent necessity, in addition to the large amount of primary biomass, estimated at about 379 million tons per year, which can generate about 4.6 billion cubic meters of biogas when treated.

[5] Professor in the Department of Environmental Engineering – Faculty of Civil Engineering – Tishreen University – Lattakia – Syria.

[6] Assistant Professor in the Department of Environmental Engineering – Faculty of Civil Engineering – Tishreen University – Lattakia – Syria.

[7] Assistant Professor in the Department of Environmental Engineering – Faculty of Civil Engineering – Tishreen University – Lattakia – Syria.

[8] Engineering – Faculty of Civil Engineering – Tishreen University – Lattakia – Syria.

The UASB reactor was designed in a laboratory scale with a diameter of 19 cm and a height of 115 cm to achieve maximum methane gas production. The mixing ratios of cow manure with the used food waste were 10%, 18%, 40% and 60% at a temperature of 35 °C for 35 days. Several parameters affecting gas production were measured. Methane production was 8.1 L at 10% food waste, 7.4 L at 20% food waste, 7.1 L at 40% food waste, and 6.6 L at 60% food waste. The highest biogas production was achieved using 10% food waste and cow manure due to their proximity to the ideal carbon to nitrogen ratio (C/N).

Key words: UASB reactor – Anaerobic digestion – Biogas – Organic solid waste.

المقدمة:

يعتبر الهاضم اللاهوائي تطبيق واسع الانتشار وتكنولوجيا مختصة في معالجة النفايات العضوية المختلفة وإنتاج الغاز الحيوي والسماد العضوي (Tufaner and Avsar 2016)ففي حين عدم وجود إدارة مناسبة للنفايات الصلبة البلدية (MSW)[9] قد تسبب الأجزاء العضوية العديد من المشكلات البيئية بما فيها تلوث التربة والمياه الجوفية من الرشاحة ومن الانبعاثات غير المقيدة للميتان .

على مر السنين نشأ الوعي حول هذه المشاكل بين الباحثين وقاد البحث إلى إيجاد تكنولوجيا جديدة للطاقة المتجددة بما فيها الغاز الحيوي، لذا أكد (Rosas, 2018) أهمية تحسين الهضم اللاهوائي (AD)[10] أكثر مما مضى أخذا بعين الاعتبار التنمية المستدامة والفهم العميق للعمليات البيولوجية من أجل إنتاج الغاز الحيوي بشكل حقيقي .

تم استخدام نفايات مختلفة تشمل النفايات الصلبة البلدية، وحماة الصرف الصحي، ونفايات المطبخ، وروث الحيوانات لتوليد الغاز الحيوي عن طريق الهضم اللاهوائي من قبل باحثين مختلفين [(Zhang,2013) .(2018 .Sendaaza]. ولكن في الآونة الأخيرة، تحول الاهتمام إلى الهضم المشترك لنفايات المطبخ وروث الحيوانات لتعزيز إنتاج الغاز الحيوي. الهضم المشترك اللاهوائي هو عملية يتم فيها هضم اثنتين أو أكثر من النفايات القابلة للتحلل البيولوجي في وقت واحد في المفاعل من أجل تعزيز كفاءة التحول الحيوي .[Mat,2019]

تدعم عملية الهضم المشترك بشكل كبير إعادة تدوير مجموعة واسعة من النفايات والتأثير التعاوني للأنشطة الميكروبية من خلال تحسين توازن المغذيات مما يؤدي بالتالي إلى استقرار العملية[Sayara,2019].

[9] Municipal Solid Waste
[10] Anaerobic Digestion

كما صرح [Sayara,2019]أنه من أجل كفاءة أداء العملية، من الضروري اختيار ركيزة مشتركة مناسبة بنسبة خلط مناسبة ومعدل تحميل عضوي مناسب (OLR)[11] وخصائص ركيزة مشتركة أثناء الهضم المشترك اللاهوائي.

ونظرا" لأن سوريا تتمتع بمناخ البحر الأبيض المتوسط ومصادر متعددة للطاقة (الشمس ، الرياح ، الزيت ، الماء ، إلخ). هذا بالإضافة إلى إمكانية إنتاج الغاز الحيوي لأنه بلد زراعي يحتوي على عدد كبير من الماشية التي تنتج حوالي 44 مليون طن سنويا من السماد الطبيعي ويمكن أن تنتج حوالي 2.27 مليار متر مكعب من الغاز الحيوي(حسب دراسة إحصائية عام 2009)هذه النسبة تختلف حسب نوع وكمية العلف (الجدول1).

الجدول (1) كمية الغاز الحيوي التي يمكن إنتاجها سنويا في سوريا

Type		Produced manure (million ton/year)	Produced biogas (million m3/year)
Sheep and goats		14.45	14.45
Cows	Oxen	0.1	3.94
	Calves	4.16	166.05
	Dairy cows	13.12	524.91
	Non Dairy cows	3.16	126.48
	Calf female	0.6	23.99
Horses family	Horses	0.12	4.89
	Donkey and mule	0.8	32.16
Poultry	Chicken	0.7	48.84
	produces eggs		
	Mother Chicken	0.32	16.19

[11] Organic load rate

	Chicken	6.04	422.84
	Dinde	0.04	2.64
	Duck and goose	0.01	0.44
	Buffalo	0.14	5.52
	Camel	0.61	24.24
	Total	44.28	2,270.64

تستند الجدوى الاقتصادية لطاقة الكتلة الحيوية في سوريا إلى معلومات المركز القومي لبحوث الطاقة السنوية، والتي تشير إلى أن الكميات الرئيسية للكتلة الحيوية (مثل الروث، والنفايات المنزلية، والنفايات الزراعية، ومياه الصرف الصحي) تبلغ حوالي 379مليون. فيما إذا تم علاجه مع الهضم اللاهوائي يمكن أن تنتج 4.6 مليار متر مكعب من الغاز الحيوي سنويا أي ما يعادل الإنتاج السنوي 25 مليار واط من الكهرباء وما يعادل 2.7 مليار لتر من الديزل بالإضافة إلى إنتاج 341 مليون طن من السماد العضوي عالي الجودة (Jafar and Awad,2021).

وبالتالي، إجمالي الإيرادات من تطبيق تكنولوجيا الغاز الحيوي في سوريا يمكن أن تدر دخلاً يقارب 2 مليار يورو سنويًا، ما يعادل 4.6 مليار متر مكعب من الغاز الحيوي سنويًا.

أهمية البحث وأهدافه:

يعد هذا البحث من الأبحاث التي تعنى في إيجاد حل فعال لمشكلة تفاقم كمية المخلفات العضوية بشقيها (المنزلي والحيواني) في سوريا الناتجة عن القطاع الزراعي في سوريا الذي يحتل مكانة هامة بين القطاعات الاقتصادية والتي تهدر دون الاستفادة منها، كما تكمن أهميته في كونه أحد محاور البحث البيئي المطروحة من قبل وزارة الإدارة المحلية والبيئة .لكون طريقة التخمير اللاهوائي للمخلفات العضوية طريقة فعّالة في تحويل المخلفات العضوية إلى غاز وسماد عضوي يُستفاد منه في زيادة خصوبة التربة من جهة وتمتاز بانخفاض الكتلة الحيوية الناتجة وطلب أقل للمغذيات وتقليل للانبعاثات.

ويهدف هذا البحث:

- تحسين وتطوير عملية إنتاج الغاز الحيوي من خلال تصميم مفاعل UASB مخبري.
- تشغيل المفاعل وتحقيق استقراره مع مراعاة الظروف البيئية المحلية من حيث درجة الحرارة وأنواع الركائز المتاحة، وذلك بأقل التكاليف الممكنة.
- تحديد نسب الخلط المثلى للركائز المختلفة في عملية الهضم اللاهوائي المشترك، وذلك من خلال إجراء سلسلة من التجارب المتكررة. يتم خلال هذه التجارب قياس وتقييم البارامترات المؤثرة على إنتاج الغاز الحيوي، بهدف الوصول إلى أعلى معدل ممكن لإنتاج هذا الغاز.

طرائق البحث ومواده:

الهضم المشترك اللاهوائي لنفايات المطبخ مع روث الحيوانات:

إن زيادة المغذيات النيتروجينية أو الكربونية، وتركيزات المعادن الثقيلة، وتراكم الأحماض الدهنية المتطايرة، فضلاً عن انخفاض محتوى المواد العضوية، يعمل على تثبيط عملية الهضم وبالتالي تقليل إنتاج الغاز الحيوي. ويمكن تحسين كفاءة عملية الهضم المشترك اللاهوائي من خلال إضافة/خلط ركيزة مشتركة متوافقة لإنشاء توازن غذائي وقدرة تخزينية للعملية من أجل الحصول على أقصى إنتاج للغاز الحيوي من خلال الهضم المشترك [Vats,2020]. إن عملية الهضم المشترك اللاهوائي والتي تعد فعالة من حيث التكلفة وتوفر حلاً لنقص أو عدم كفاية المغذيات في الركائز [Sayara,2019]. الهضم المشترك اللاهوائي هو هضم خليط من ركيزتين أو أكثر بخصائص تكمل بعضها البعض من أجل تحسين إنتاج الغاز الحيوي [Mata,2011].

الهضم المشترك اللاهوائي ليس مجرد تقنية معالجة ركيزة لخلط نوعين أو أكثر من النفايات المختلفة بل يعتمد نجاحه على اختيار أفضل نسبة خلط من أجل منع التثبيط وضبط نسبة

الجدول (2) نسبة الكربون الى النتروجين في نفايات الطعام / المطبخ وروث الحيوانات [(Sayara, 2019, Sunny,2018, Singh ,2017)]

الركيزة العضوية	Carbon–nitrogen (C–N) ratio range
نفايات المطبخ	26–30
روث الابقار	16–25
زرق الدواجن	5–15
بقايا الخضروات والفواكه	7–35
نفايات طعام	3–17
نفايات طعام مختلفة	15–32

الكربون والنيتروجين والسماح بالتأثير التآزري للكائنات الحية الدقيقة [Kwietniewska,2014]. أفاد [Minale,2014] أن نفايات المطبخ تحتوي على نسبة عالية من الكربون العضوي ونسبة منخفضة من النيتروجين.

توصيف المواد الخام (حالة الدراسة):

نفايات الطعام:

تم جمع بقايا الطعام أي بقايا الخضروات و الفواكه OFMSW12(الطماطم والبطاطس والباذنجان والجزر و قشور الموز والتفاح و الفليفلة و الخيار ....) من عدة منازل ريفية في منطقة الشراشير جبلة لمدة ثلاثة أشهر في أواخر فصل الصيف وأوائل فصل الخريف

[12] organic fraction of municipal solid waste

لعام 2023 لضمان تجانس وتنوع العينات لاستخدام الجزء العضوي من النفايات الصلبة البلدية كمادة خام لاستعادة الطاقة .تم تقطيع النفايات الى قطع صغيرة باستخدام طريقة التقطيع لإعداد العينة وفقًا لـ BS EN 14899:2005 للوصول الى أحجام بأبعاد 2-5 مم.

تم تغليف العينة في أكياس بلاستيكية محكمة الغلق وحفظها في الثلاجة للاختبار، قبل كل تشغيل اختبار يتم طحن العينات باستخدام خلاط لتحقيق التجانس، وقدرت الكمية المستخدمة الكلية في كل التجارب بما يعادل 15 كغ.

روث الأبقار

تم إحضار روث الأبقار الطازج من مزرعة محلية في منطقة خربة الدنيا – جبلة، تحتوي على 20 بقرة من النوع الهولندي (فريزيان) ويبلغ معدل الإنتاج اليومي من الروث للبقرة البالغة 40 كغ /يوم.

تم جمع الروث الطازج في الصباح وأخذت العينات من عدة مواقع في الحظيرة للحصول على الروث المتجانس، تتراوح نسبة C/N للروث بين 16-25 ضمن أكثر الأدبيات، تم مزج الروث مع ماء الصنبور وإزالة ما يحتويه من شوائب ناجمة عن استخدام القش بساحات التغذية ويعد روث الأبقار غني بالسليلوز يمكن هضمه بسهولة في غياب الأكسجين لذا يعتبر مصدر جيد للأسمدة دون أي تأثير ضار على النباتات (Lamb, 2020) يوضح الجدول (3) خصائص المواد الخام قبل إضافة المياه والخلط.

الجدول (3) خصائص الركيزة الخام قبل الخلط

خصائص الركيزة الخام قبل الخلط		
المعايير	**فضلات الطعام**	**روث الأبقار**
محتوى الرطوبة (%)	94.6	93.2
محتوى الكربون (%)	5.1	6.32
المواد الصلبة الكلية (%)	5.01	5.92
المواد الصلبة المتطايرة (%)	3.1	3.36
مواد لاعضوية	0.21	0.32
آزوت	14	36
PH	5.82	6.12

.

تم قياس عدة بارامترات للركيزة قبل التخمير (بعد الخلط) وهي: تحاليل المكونات الأساسية والكثافة ومحتوى المواد الصلبة المتطايرة VSSومحتوى الرطوبة ومحتوى المواد الصلبة الكلية TSSوالكربون والنتروجين والـ pH والـ COD .الجدول (4) يبين مقارنة لقيم البارامترات المقاسة فعليا (بعد الخلط) مع قيمها في أحد المراجع الأدبية.

البارامترات المقاسة	القيم في دراسة (Kigozi, et al. 2014)	القيم الفعلية
معدل الإنتاج اليومي الوسطي	231.22 kg/day	–
المواد الصلبة الكلية(TS)	%27.14	4.46%
محتوى الرطوبة (MC)	%72.88	94%
المواد العضوية المتطايرة(VS) (% of TS)	%94.9	3.11%
الكثافة	775kg/m³	1050 kg /m^3
نسبة C:N	25:1	4.92:0.123

يُعزى ارتفاع نسبة الكربون إلى النيتروجين (C:N) في الركيزة المدروسة إلى اختلاف تركيب المواد العضوية المستخدمة مقارنةً بما ورد في دراسة (Kigozi et al., 2014) ففي الدراسة المرجعية، تم إجراء الهضم اللاهوائي لمزيج متنوع من نفايات الطعام، شملت الدهون، بقايا الخضار والفواكه، الطعام المطبوخ، الخبز، ومنتجات الألبان، بالإضافة إلى نفايات الحدائق، ما أدى إلى تحقيق توازن نسبي في نسبة C:N .

أما في هذه الدراسة، فقد تم استخدام خليط من روث الأبقار، الغني نسبيًا بالكربون، مع نفايات الطعام المتمثلة فقط ببقايا الخضروات والفواكه، والتي تُعد غنية بالنيتروجين ولكن بنسبة أقل من تلك التي تحتوي على مصادر بروتين مثل اللحوم أو منتجات الألبان. وتجدر الإشارة إلى أن النسبة الأكبر من الركيزة في معظم المكررات كانت من روث

الأبقار، مما ساهم في رفع نسبة الكربون إلى النيتروجين بشكل ملحوظ مقارنةً بالدراسة المرجعية.

مفاعل بطانية الحمأة اللاهوائي ذو التدفق الصاعد (UASB[13]):

تم تصميم المفاعل اللاهوائي من نوع UASB باستخدام مادة الحديد، مع تحديد أبعاده وفقًا للمعايير التصميمية التي ذكرها (Pererva et al., 2020) تتضمن هذه المعايير عوامل مهمة مثل زمن المكوث الهيدروليكي(HRT) و معدل التحميل العضوي(OLR) ، والتي تؤثر جميعها على كفاءة المعالجة.).

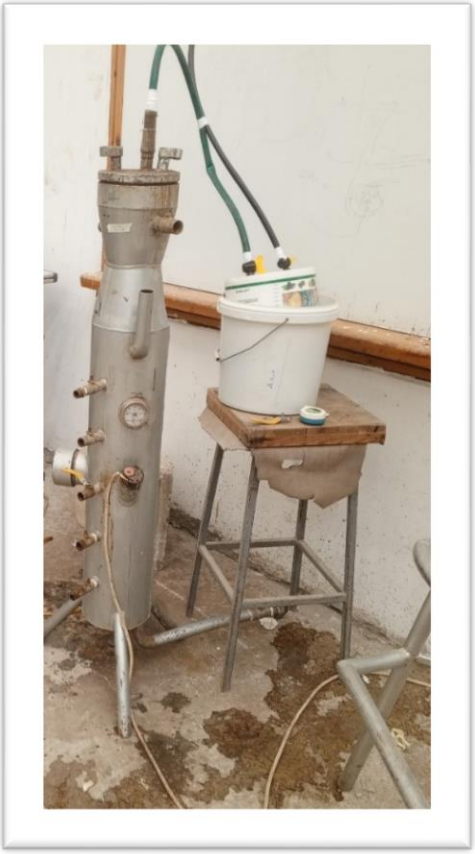
يوضح الجدول (5) أبعاد المفاعل بحيث أبعاده تحقق الأداء الأمثل في معالجة مياه الصرف. كما يبين الشكل (1) النموذج المخبري للهاضم المستخدم.

الجدول (5) أبعاد مفاعل UASB.

نوع المفاعل	مادة الصنع	حجم المفاعل litter	القطر الداخلي cm	الارتفاع الكلي cm	عدد مآخذ آخذ العينات
UASB	حديد	32.58	19 cm	115 cm	8
درجة حرارة التشغيل	**طريقة التغذية**	**مدة التشغيل day**	**التقليب**	**الركيزة**	**قطر المآخذ cm**

[13] Up flow anaerobic sludge blanket

1.5 cm	روث الأبقار مع فضلات الطعام بنسب خلط مختلفة	كل نصف ساعة المضخة تعمل دقيقتين	20–40day	مرة واحدة	31.28±5°c



الشكل (1) مفاعل UASB المخبري

تشغيل المفاعل واستقراره:

بعد استكمال تصميم النموذج والاطلاع على خصائص الركيزة كمادة مختمرة، تم في تاريخ 2023/7/11 وضع أول مكرر ضمن النموذج وكانت العينة الأولى عينة من روث الأبقار مع الماء بنسبة 1:1 بعد تصفيتها من القش وغيرها من الرواسب و كان تركيز المادة الصلبة 10% فقط للوصول الى حالة الاستقرار بالتشغيل وتم تشغيل النموذج لمدة 35 يوما وبدأ إنتاج الغاز الحيوي منذ اليوم السادس ووصلنا الى ذروة الإنتاج في اليوم 21.

بعد تحضير المادة المختمرة ووضعها ضمن النموذج تم اجراء العديد من المكررات باختلاف نسب الخلط للمادة المتخمرة وذلك للمقارنة بمقدار إنتاج الغاز الحيوي وتم اختيار المادة المختمرة المتمثلة بروث الابقار مع فضلات الطعام بنسب خلط مختلفة وهي وفقا لظروف مختلفة من حيث درجة الحرارة ونسبة C/N ،استمرت عملية التخمير لمده 34 يوم وسطيا لكل مكرر وتم ضبط درجة حرارة سخان الحمام المائي للنموذج بحيث تبقى درجة حرارة الأمثل في فصلي الشتاء والصيف.

تم قياس البارامترات المؤثرة على إنتاج الغاز الحيوي لكل مكرر كل يوم وهي (درجة الحرارة، pH، COD، الكثافة ، TSS ،VSS ، نسبة C/N ، الرطوبة) وقدرت البيانات لكل بارامتر في كل مكرر ما يقارب ما بين 30–40 قيمة بينما قدرت الداتا لكل التجارب معا حوالي 250 قيمة لدراسة تأثير تغير نوع الركيزة المستخدمة على إنتاج الغاز الحيوي .

تم قياس غاز الميتان في نموذج UASB بأبسط الطرق من خلال تصميم مقياس يقيس حجم الغاز المتولد من خلال مبدأ الإزاحة بالمياه، ليصار بعدها بجمع الغاز المتشكل ضمن بوالين خاصة بالغازات السامة للتأكد من نسبة غاز الميتان المتشكل ونسبة الغازات الأخرى .

تشغيل النماذج وفق نسب الخلط المختلفة:

في البدء تم اجراء عدد من المكررات لمقارنة نسب الخلط المختلفة من روث الابقار مع فضلات الطعام للوصول الى أفضل معدل لإنتاج غاز الميتان.

المكرر (1) : تجربة خلط روث الابقار 90% مع فضلات الطعام 10%:

تم البدء بهذه التجربة من تاريخ 2024/3/4 واستمر إنتاج الغاز حتى تاريخ 2024/4/3 أي لمدة 31 يوم ودرجة حرارة 21 ° وتم التسخين بفعل حمام مائي ضمن المفاعل UASB، وتم وضع 18.8 كغ من روث الأبقار و2.1 كغ من فضلات الطعام وتم إضافة الماء الى روث الأبقار بمعدل 1:1 و معدل فضلات الطعام للماء 1:1.5.

المكرر (2): تجربة خلط روث الابقار 82% مع فضلات الطعام 18%:

تم البدء بهذه التجربة من تاريخ 2023/8/17 واستمر إنتاج الغاز حتى تاريخ 2023/13/9 أي لمدة30 يوم ودرجة حرارة 31 ° صيفاً ضمن المفاعل UASB، وتم وضع 11.6 كغ من روث الأبقار و2.5 كغ من فضلات الطعام وتم إضافة الماء الى روث الأبقار بمعدل 1:1 و معدل فضلات الطعام للماء 1:1.5 فكان وزن الماء المضاف15.47 كغ .

المكرر (3) : تجربة خلط روث الابقار60 % مع فضلات الطعام40 %:

تم البدء بهذه التجربة من تاريخ 2023/8/27 واستمر إنتاج الغاز حتى تاريخ 2023/9/25 أي لمدة30 يوم ودرجة حرارة 31 ° صيفاً ضمن المفاعل UASB، وتم وضع 6.48كغ من روث الأبقار و 4.32 كغ من فضلات الطعام وتم إضافة الماء الى روث الأبقار بمعدل 1:1 و معدل فضلات الطعام للماء 1:1.5 فكان وزن الماء المضاف 12.96 كغ.

المكرر (4): تجربة خلط روث الابقار40 % مع فضلات الطعام 60%:

تم البدء بهذه التجربة من تاريخ 2023/8/27 واستمر إنتاج الغاز حتى تاريخ 2023/9/25 أي لمدة 30 يوم ودرجة حرارة 31 ° صيفاً ضمن المفاعل القبة الحديدية، وتم وضع 2.8 كغ من روث الأبقار4.32كغ من فضلات الطعام وتم إضافة الماء الى روث الأبقار بمعدل 1:1 و معدل فضلات الطعام للماء 1:1.5 فكان وزن الماء المضاف 9.1 كغ .

النتائج والمناقشة:

النسب ذات الكفاءة الأعلى في إنتاج الغاز الحيوي :

المكرر (1): تجربة خلط روث الابقار 90% مع فضلات الطعام 10%:

بدء إنتاج الغاز الحيوي من الأيام الأولى للتخمير ووصل الى ذروته يوم الثاني عشر بمعدل8.11 ليتر لينخفض تدريجيا حتى توقف باليوم الثلاثين ، تراوحت قيم الـ pH المقاسة بين(6.09–8.7) لترتفع في الأيام الأخيرة أما الـ COD ،فقد تراوحت بين mg/l (14015 –18475)، حيث سُجّل انخفاض تدريجي خلال فترة التشغيل. والجدول التالي يوضح الوصف الإحصائي للمكرر رقم (1).

	count	mean	std	min	max
Numbering for day	34	17.5	9.96	1	34
pH	34	7.33	0.66	6.09	8.7
Moisture percentage	34	92.49	1.49	89.95	96.02
COD mg/L	34	17297.65	872.56	14015	18475
N percentage	34	0.34	0.22	0.13	0.86
C / **N** ratio	34	21.06	10.4	5.43	44.1
inorganic materials percentage	34	2.02	0.66	0.43	3.42
organic matter C percentage	34	5.44	1.35	2.28	9.62
Tss%	34	1.66	2.84	0.2	9.66
Vss%	34	6.71	2.11	1.96	12.59
Temperature Celsius	34	27.53	2.09	20	31
rate of biogas l	34	5.62	1.94	0	8.11

"نظرًا لأن نسبة الكربون إلى النيتروجين في نفايات الطعام (الخضروات والفواكه) تتراوح بين (35 – 7)بينما تتراوح نسبة الكربون إلى النيتروجين في روث الأبقار بين (16 – 25)

(Singh, 2013; Sunny, 2018) فإن عملية الهضم المشترك اللاهوائي فعالة للغاية، حيث تعالج نقص العناصر الغذائية اللازمة لنمو البكتيريا اللاهوائية (Sayra, 2019).

المكرر (2): تجربة خلط روث الابقار 82% مع فضلات الطعام 18%:

بدء إنتاج الغاز الحيوي من الأيام الأولى للتخمير ووصل الى ذروته يوم الثاني عشر بمعدل 7.5 ليتر لينخفض تدريجيا حتى توقف باليوم الثلاثين، تراوحت قيم الـ pH المقاسة بين (6.7–5.54)ترتفع في الأيام الأخيرة أما الـ COD فكانت 19401 mg/l لتنخفض الـ CODخلال التخمير والجدول التالي يوضح الوصف الإحصائي للمكرر (2).

	count	mean	std	min	max
numbering for day	28	16.04	8.87	1	30
pH	28	6.24	0.28	5.54	6.7
Moisture percentage	28	92.11	2.15	88	96.6
COD mg/L	28	15981.93	1849.4	12865	19401
N percentage	28	0.13	0.02	0.1	0.19
C / N ratio	28	31.08	7.7	9.95	42.68
inorganic materials percentage	28	1.26	1.08	0.02	4.46
Organic matter (C) percentage	28	4.11	1.41	1.85	6.48
Temperature Celsius	28	31	0	31	31
Rate of biogas l	28	3.25	2.29	0	7.4

وقد أشار (Xing, 2020)إلى نتائج مهمة عند استخدامه سبع نسب مختلفة من FW/CM (3.4، 2.5، 1.7، 0.8، 0.4، 0.3، 0.2)، حيث تم تثبيت نسبة S/I عند 0.05، وبلغت قيمة الرقم الهيدروجيني الابتدائية 7.83. وأظهرت النتائج أن النسبة = FW/CM (2.5والتي تقابل تقريبًا 18% فضلات طعام و82% روث أبقار) حققت أعلى إنتاج للميثان بقيمة بلغت 646.6 مل/ CH_4 غرام .VS تجدر الإشارة إلى أن هذه النسبة قريبة من النسبة المعتمدة في هذا البحث، إلا أن هناك اختلافات جوهرية بين الدراستين، خصوصًا في خصائص الركيزة المشتركة؛ حيث أن فضلات الطعام المستخدمة في الدراسة الحالية اقتصرت على بقايا خضراوات وفواكه محلية دون إجراء أي تعديل أو معالجة مسبقة، في حين قد تختلف مكونات فضلات الطعام الصينية المستخدمة في دراسة (Xing, 2020) كما لم يتم تعديل قيمة الرقم الهيدروجيني في التجارب الحالية، وتم التشغيل دون إضافة لقاح للمفاعل، على عكس ما ورد في الدراسة المرجعية. علاوة على ذلك، تختلف محتويات المواد الصلبة بين الدراستين، مما قد يفسر التباين في القيم النهائية لإنتاج الميثان. وبناءً عليه، فإن المقارنة مع نتائج Xing تأخذ طابع القرب في نسب الخلط، وليس التطابق الكامل في الظروف التشغيلية أو النتائج.

<u>المكرر (3)</u>: تجربة خلط روث الأبقار 60 % مع فضلات الطعام40 %:

بدء إنتاج الغاز الحيوي من الأيام الأولى للتخمير ووصل الى ذروته يوم الثاني عشر بمعدل 7.1 ليتر لينخفض تدريجيا حتى توقف باليوم الثلاثين، تراوحت قيم الـ pH المقاسة بين (6.37 – 6.67) أما الـ COD فكانت mg/l (15024–17344) والجدول التالي يوضح الوصف الإحصائي للمكرر (3).

	count	mean	std	min	max
numbering for day	30	15.5	8.8	1	30
pH	30	6.67	0.15	6.37	7.04
moisture percentage	30	93.02	0.81	92.68	95.98
COD mg/l	30	16263.51	728.15	15024	17344
N percentage	30	0.36	0.8	0.12	4.12
C / N ratio	30	30.96	14.75	0.71	56.19
Inorganic materials percentage	30	0.41	0.15	0.1	0.69
Organic matter c percentage	30	5.02	1.54	2.03	7.16
Temperature Celsius	30	31	0	31	31
Rate of biogas l	30	2.83	2.18	0	7.1

قدر (Odejobi, 2021) كمية غاز الميثان الناتجة من خلط روث الأبقار ونفايات كافتيريا بنسبة خلط 50:50 بـ 0.460

m^3/kg من المواد المضافة إلى الأغذية. وهنا نسلط الضوء على الاختلافات الكبيرة في تكوين نفايات الطعام(Soha، 2017). وفي بحثنا استخدمنا بشكل خاص نفايات الطعام المكونة من الفواكه والخضروات فقط.

المكرر (4): تجربة خلط روث الابقار 40 % مع فضلات الطعام 60%:

وجدنا هنا كلما زادت نسبة فضلات الطعام الى روث الأبقار انخفض معدل إنتاج الغاز الحيوي لانخفاض نسبة C/N، لانخفاض نسبة C/N [هذا مناقض لما ذكر في الدراسات المرجعية ومنها دراسة [Bharathiraja,2018] حيث سجل أن نفايات المطبخ تحتوي على نسبة عالية من الكربون العضوي ونسبة منخفضة من النيتروجين بعكس روث الأبقار الذي يحتوي على نسبة أعلى من النتروجين وبالتالي زيادة نسبة فضلات الطعام يزيد نسبة C/N وليس يخفض النسبة بالرغم من أن العديد من الدراسات المرجعية، مثل دراسة(Bharathiraja et al., 2018) تشير إلى أن نفايات المطبخ تحتوي على نسبة كربون عضوي مرتفعة مقارنة بمحتواها من النيتروجين، وبالتالي تساهم في رفع نسبة الكربون إلى النيتروجين (C/N) عند خلطها مع روث الأبقار، إلا أن نتائج هذه الدراسة أظهرت انخفاضًا في نسبة C/N بزيادة نسبة فضلات الطعام.

يمكن تفسير هذا التباين من خلال الاختلاف في التركيب النوعي لنفايات الطعام المستخدمة. ففي هذه الدراسة، تكونت نفايات الطعام أساسًا من بقايا خضروات وفواكه، وهي مواد عضوية تحتوي عادةً على نسب مرتفعة من النيتروجين (خاصة في القشرة والبذور والأجزاء الورقية) مقارنة بمحتواها من الكربون، بسبب ارتفاع محتواها المائي والمغذيات النيتروجينية.

بالمقابل، قد يكون روث الأبقار المستخدم في هذه الدراسة غنيًا بالألياف النباتية بسبب نمط تغذية يعتمد على الأعلاف الجافة أو التبن، مما يزيد من محتوى الكربون النسبي فيه.

وكنتيجة لذلك، فإن زيادة نسبة نفايات الطعام التي تحتوي على خضروات وفواكه أدت إلى إضافة مصدر غني نسبيًا بالنيتروجين إلى النظام، مما أدى إلى انخفاض نسبةC/N ، بخلاف ما تذكره بعض الدراسات التي استخدمت نفايات طعام مختلفة تحتوي على نسب أعلى من

الكربون (مثل بقايا الخبز، الأرز، الزيوت، والمعكرونة)." ، ويبلغ معدل التحميل العضوي 0.543 kg COD/m³day $^{-1}$ ونسبة الإزالة للمادة الصلبة الكلية (TS) 28% والجدول التالي يوضح الوصف الإحصائي للمكرر (4).

	count	mean	std	min	max
Numbering for day	30	15.5	8.8	1	30
pH	30	7.34	0.11	7.1	7.65
Moisture percentage	30	92.4	0.96	89.74	95.92
COD mg /l	30	18485.94	1093.82	15913	21367
N percentage	30	0.16	0.07	0.09	0.44
C/N ratio	30	28.03	17.44	0.5	62.86
Inorganic materials percentage	30	1.03	0.66	0.08	2.13
Organic matter percentage	30	3.82	2.27	0.09	7.92
Temperature Celsius	30	31	0	31	31
Rate of biogas l	30	2.74	2.04	0	6.6

أجرى (Petrucciani et al. 2017) دراسة للهضم المشترك بمرحلتين وأشارى إلى أنه عند خلط مخلفات الطعام (52%) وروث الأبقار (26%) والمخلفات الخضراء المقطعة (12%) ولقاح للاهوائي (10%) تراوحت قيم الأس الهيدروجيني بين (7 – 5.7). وتميزت تركيبة الغاز الناتجة بتركيز ثاني أكسيد الكربون ضمن نطاق 60–80% والذي انخفض تدريجياً مع زيادة الميثان من 0% في اليوم الأول إلى 20% في اليوم السابع، بينما ارتفع تركيز الهيدروجين من 0.1% إلى 5.5%. وقد قدرت كمية الميثان المتولدة في المرحلة الثانية ما بين (0.68 – 0.92) متر مكعب قياسي /كجم من المواد العضوية المضافة ويبين الجدول التالي قيم الغاز الحيوي الناتج يوميا للتجارب الأربعة .

day	Rate of Biogas for mixing ratio (10% Food Waste)L	Rate of Biogas for mixing ratio (18% Food Waste)L	Rate of Biogas for mixing ratio (40% Food Waste)L	Rate of Biogas for mixing ratio (60% Food Waste)L
1	0.47 ± 0.23	0.6 ± 0.01	0.2 ± 0	0.21 ± 0
2	1.12 ± 0.19	1.23 ± 0	0.5 ± 0	0.89 ± 0.01
3	2.06 ± 0.70	2.47 ± 0.01	0.78 ± 0	1.25 ± 0.03

4	2.69 ± 0.68	3.08 ± 0	2.2 ± 0	1.9 ± 0
5	3.93 ± 0.69	4.32 ± 0.01	3.5 ± 0.04	3.06 ± 0.1
6	5.17 ± 1.68	6.15 ± 0.03	4.9 ± 0.01	3.31 ± 0.02
7	6.06 ± 0.14	6.15 ± 0.02	6.1 ± 0.01	5.8 ± 0.18
8	7.11 ± 0.63	7.44 ± 0.12	7.03 ± 0.05	6.35 ± 0.08
9	7.18 ± 0.51	6.65 ± 1.17	7.09 ± 0.03	6.39 ± 0.31
10	7.41 ± 0.68	6.02 ± 0.01	5.99 ± 0.03	5.62 ± 0.44
11	7.36 ± 0.85	7 ± 0.07	6.59 ± 0.01	5.53 ± 0.02
12	8.11 ± 1.45	7.5 ± 0.14	7.1 ± 0.06	5 .59± 0.01
13	5.48 ± 0.88	4.98 ± 0.03	4.39 ± 0.02	4.5 ± 0.01

14	4.87 ± 1.15	4.2 ± 0.01	3.97 ± 0.02	4.2 ± 0.01
15	4.35 ± 0.56	4.02 ± 0.06	3.9 ± 0.01	3.99 ± 0.01
16	3.85 ± 0.15	3.9 ± 0.06	3.51 ± 0.01	3.71 ± 0.01
17	3.40 ± 0.17	3.5 ± 0.01	3.4 ± 0.01	3.21 ± 0.01
18	3.17 ± 0.06	3.2 ± 0.01	2.97 ± 0.05	3.07 ± 0.05
19	2.84 ± 0.05	2.81 ± 0.01	2.67 ± 0	2.74 ± 0.12
20	2.49 ± 0.03	2.5 ± 0.01	2.43 ± 0.02	2.38 ± 0.1
21	2.03 ± 0.15	2.06 ± 0.1	1.8 ± 0.01	1.97 ± 0.11
22	1.44 ± 0.12	1.51 ± 0.01	0.98 ± 0.02	1.55 ± 0.21
23	1.16 ± 0.16	1.09 ± 0.15	0.6 ± 0	0.89 ± 0.65

24	0.88 ± 0.11	0.81 ± 0.01	0.4 ± 0	0.67 ± 0.5
25	0.63 ± 0.23	0.5 ± 0	0.23 ± 0	0.45 ± 0.37

تميز الغاز الحيوي بمستويات أعلى من ثاني أكسيد الكربون والغازات الأخرى مقارنةً بالميثان خلال الأيام الأولى من التخمير. ومع استمرار التخمير بعد الأسبوع الأول، انخفضت هذه التركيزات تدريجيًا، على عكس زيادة الميثان. قُدِّر حجم ذروة الغاز الحيوي بـ 8.11، 7.5، 7.1، 5.59 ليتر على التوالي للتجارب الأربعة في اليوم الثاني عشر بينما كان تركيز كبريتيد الهيدروجين صفرًا بسبب ترشيح الغاز قبل جمع العينة. عند إجراء تحليل نوعي لتركيب الغاز الحيوي المُنتَج من بالون غاز بحجم إجمالي قدره 3.5 لتر في اليوم العاشر من التخمير، كان محتوى الميثان 47.19%، ومحتوى ثاني أكسيد الكربون 23.6%، ومحتوى الهيدروجين 23.6%، ومحتوى أول أكسيد الكربون 3.92%، ومحتوى الأكسجين 1.70% لعينة الغاز المقاسة.

تشير نتائج الدراسة إلى أن نسبة الخلط المثلى بين نفايات الطعام وروث البقر (10% نفايات طعام و90% روث بقر) أدت إلى أعلى إنتاجية للغاز الحيوي .عند زيادة نسبة نفايات الطعام، لوحظ انخفاض في معدل إنتاج غاز الميثان، مما يشير إلى تأثير سلبي لزيادة هذه النسبة على كفاءة العملية.

انخفاض قيم الـ COD في المفاعل تدل على فعالية الهضم اللاهوائي في تقليل المواد العضوية القابلة للتحلل .هذا الانخفاض يعكس كفاءة النظام في تحويل المواد العضوية إلى غازات حيوية، مما يعزز من جودة المعالجة .

كما حقق الهضم المشترك قيمة (pH)مناسبة لنمو البكتيريا الميثانية. بحيث زيادة نسبة نفايات الطعام قد تؤدي إلى تراكم الأحماض الدهنية المتطايرة(VFA) ، مما يخفض درجة

الحموضة ويؤثر سلبًا على نشاط البكتيريا .لذلك، فإن الحفاظ على توازن مناسب في نسب الخلط يساهم في استقرار البيئة الميكروبية وتحسين إنتاج الغاز الحيوي .

وتراكم الأحماض الدهنية المتطايرة يمكن أن يعيق عملية الهضم اللاهوائي. ل من خلال ضبط نسب الخلط، يمكن تقليل تراكم هذه الأحماض، مما يحافظ على استقرار النظام ويعزز من كفاءة إنتاج الغاز الحيوي .

عند نسبة خلط 10٪ من نفايات الطعام و90 % من روث البقر تم إنتاج أكبر كمية من الغاز الحيوي. ولوحظ أنه مع زيادة نسبة نفايات الطعام انخفض معدل إنتاج غاز الميثان في كل من التجارب الأربعة السابقة، وكان زمن بقاء المادة المخمرة يصل إلى 30 يومًا.

سعت هذه الدراسة استكشاف تأثير نسب الخلط المختلفة بين مخلفات الطعام وروث الأبقار بهدف تحديد النسبة الأنسب ضمن ظروف التشغيل المعتمدة، فاعتمدنا نوع مفاعل UASBبنظام تغذية أحادي المرحلة ودرجة حرارة تتراوح بين 31 إلى 34 يومًا، بينما اعتمد (Kumari et al., 2018) استخدام ركائز مشتركة متعددة ومتنوعة متمثلة بحمأة الصرف الصحي وروث الأبقار كمخلفات أولية، بالإضافة إلى مخلفات المطبخ ومخلفات الحدائق ومخلفات الزهور ومياه الصرف الصحي للألبان بنسبة خلط 2:1 و كانت درجة حرارة 20 درجة مئوية ونظام التغذية بمرحلة واحدة.

تميزت هذه الدراسة باستخدام مفاعل UASB لمعالجة المخلفات الصلبة المتمثلة في نفايات الطعام وروث الأبقار، دون الاعتماد على حمأة مياه الصرف الصحي كركيزة أساسية، وهو ما يختلف عن معظم الدراسات المرجعية التي ركزت على معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام هذا النوع من المفاعلات .هذا التوجه يعكس إمكانية توسيع نطاق تطبيق مفاعل UASBليشمل معالجة المخلفات العضوية الصلبة، مما يفتح آفاقًا جديدة في مجال إدارة النفايات وتحويلها إلى مصادر طاقة متجددة .

أظهر Otun (2016) أن أعلى إنتاج للغاز الحيوي تم تحقيقه من خلال الهضم المشترك لمخلفات الطعام وروث الأبقار، حيث بلغ 164.8٪، مقارنةً بإنتاج الغاز الحيوي من الهضم

المشترك لمخلفات الأبقار ومخلفات الفاكهة ومخلفات الطعام والذي بلغ 91.0٪. كما بلغ إنتاج الغاز الحيوي من الهضم المشترك لمخلفات الفاكهة وروث الأبقار 83.9٪، ومن روث الأبقار فقط 79.8٪، في حين بلغ إنتاج الغاز الحيوي من مخلفات الفاكهة فقط 76.4٪، ومن مخلفات الطعام فقط 77.4٪، وذلك تحت ظروف اختبار متشابهة.

التوصيات:

وجدنا خلال دراستنا أن انسب نسبة لخلط FW/CM كانت 0.11 أي (10٪ من نفايات الطعام و90 % من روث البقر) فقد حققت أفضل إنتاجية من الغاز الحيوي. وأن تركيبة مخلفات الطعام لها تأثير مباشر على عملية التخمير حيث تختلف النتائج من دولة لأخرى بسبب تنوع تركيبة هذه المخلفات..

نوصي باعتماد مفاعل UASB في معالجة المخلفات العضوية الصلبة، نظرًا لفعاليته في منع ترسيب المواد المخمرة دون الحاجة إلى أنظمة تحريك ميكانيكية، وذلك بفضل التدفق الصاعد الذي يعزز التلامس بين الركيزة والحمأة الحبيبية .تُبرز هذه الميزة أهمية تطوير تقنيات الهضم اللاهوائي التقليدية، خاصة في سوريا، حيث يمكن أن يسهم تطبيق هذا النوع من المفاعلات في تحسين كفاءة المعالجة وتقليل تكاليف التشغيل والصيانة، مما يدعم الاستدامة البيئية والاقتصادية في إدارة النفايات العضوي.

كما لوحظ خلال المراقبة اليومية للمفاعل، فإن كلًا من الرقم الهيدروجيني، ودرجة الحرارة، ونسبة الكربون إلى النيتروجين (C/N) تؤدي دورًا مهمًا في تعزيز إنتاجية غاز الميثان مقارنةً بالغازات الأخرى الناتجة عن عملية التحلل اللاهوائي، مما يساهم في زيادة نقاوة الميثان الناتج وتحسين كفاءة عملية التخمر.. ونظراً لكون سورية دولة تتميز بثروة حيوانية كبيرة وكمية زائدة من مخلفات الطعام فإن هذا يدفعنا إلى استخدام الركائز المشتركة من روث الحيوانات ومخلفات الطعام كوسيلة لإنتاج الغاز الحيوي، وكما تشير نتائج الدراسة إلى أن استخدام مفاعل UASB في تخمير النفايات الصلبة، مثل نفايات الطعام وروث الأبقار، يمثل توجهًا واعدًا يختلف عن الاستخدام التقليدي للمفاعل في معالجة مياه الصرف

الصحي والحمأة الصناعية .بناءً على التجارب التي أُجريت، نوصي بتعزيز وتوسيع نطاق تطبيق تقنية مفاعل UASB لتشمل معالجة النفايات العضوية الصلبة، إلى جانب الحمأة الناتجة عن مياه الصرف الصحي .هذا التوسع يمكن أن يسهم في تحسين كفاءة المعالجة البيئية وتحقيق فوائد اقتصادية من خلال إنتاج الغاز الحيوي، مما يدعم استدامة إدارة النفايات في المناطق التي تفتقر إلى تقنيات معالجة متقدمة .

المراجع :

1. Bharathiraja B, Sudharsana T, Jayamuthunagai T, Praveenkumar R, Chozhavendhan S, Iyyappan J (2018) Biogas production – a review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. Renew Sustain Energy Rev 90:570–582. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093.
2. Cosmas, C. and M. Ezeokonkwo (2018). "Comparative Studies on Biogas Production from Cow Dung and a Blend of Some Commercial Fruit Wastes in Nigeria." 9–12.
3. El-Mashad, H.M., Zhang, R., 2010. Biogas production from co-digestion of dairy manureand food waste. Bioresour. Technol. 101, 4021–4028.
4. Jafar, R., & Awad, A. (2021). State and development of anaerobic technology for biogas production in Syria. Cleaner Engineering and Technology, 5, 100253. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100253
5. Kigozi, Robert, Akinwale Aboyade, and Edison Muzenda

2014 Sizing of an Anaerobic Biodigester for the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. Volume 2.

6. Kumari, K., Suresh, S., Arisutha, S., & Sudhakar, K. (2018). Anaerobic co-digestion of different wastes in a UASB reactor. Waste Management, 77, 545-554. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.007
7. Kwietniewska E, Tys J (2014) Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. Renew Sustain Energy Rev 34:491–500. https://doi.org/10.1016/j.rser. 2014.03.041.
8. Lamb, J. (2020). Feedstocks for AD. In (pp. 123-160). https://doi.org/10.48216/9788269203325CH5.
9. Mat Saad M, Abdul Rahman N, Mohd Yusof M (2019) Hydrogen and methane production from co-digestion of food waste and chicken manure. Pol. J. Environ. Stud 28(4):2805–2814. https:// doi.org/10.15244/pjoes/83670
10. Mata-Alvarez J, Dosta J, Macé S, Astals S (2011) Codigestion of solid wastes: a review of its uses and perspectives including modeling. Crit Rev Biotechnol 31(2):99–111.
11. Minale M, Worku T (2014) Anaerobic co-digestion of sanitary wastewater and kitchen solid waste for biogas and fertilizer production under ambient temperature: waste generated from condominium house. Int J Environ Sci Technol 11:509–516.

12. Odejobi, O., et al. (2021). "Anaerobic co-digestion of kitchen waste and animal manure: a review of operating parameters, inhibiting factors, and pretreatment with their impact on process performance." Biomass Conversion and Biorefinery 13.
13. Pererva, Y., Miller, C. D., & Sims, R. C. (2020). Approaches in Design of Laboratory-Scale UASB Reactors. Processes, 8(6).
14. Petracchini, F., Liotta, F., Paolini, V., Perilli, M., Cerioni, D., Gallucci, F., Carnevale, M., & Bencini, A. (2017). A novel pilot scale multistage semidry anaerobic digestion reactor to treat food waste and cow manure. International Journal of Environmental Science and Technology, 15. https://doi.org/10.1007/s13762-017-1572-z
15. Rosas-Mendoza, E., Méndez-Contreras, J., Martinez Sibaja, A., Vallejo-Cantú, N., & Alvarado-Lassman, A. (2018). Anaerobic digestion of citrus industry effluents using an Anaerobic Hybrid Reactor. Clean Technologies and Environmental Policy, 20. https://doi.org/10.1007/s10098-017-1483-1
16. Sayara T, Sanchez A (2019) A review on anaerobic digestion of lignocellulosic wastes: pretreatments and operational conditions.Appl Sci 9(4655):1–23
17. Sayara T, Sanchez A (2019) A review on anaerobic digestion of lignocellulosic wastes: pretreatments and operational conditions. Appl Sci 9(4655):1–23

18. Sendaaza C (2018) Anaerobic digestion of organic waste: akitchen waste case study. Msc Thesis, The American University,Mechanical Engineering Department, Cairo

19. Singh G, Jain V, Singh A (2017) Effect of temperature and otherfactors on anaerobic digestion process, responsible for biogasproduction. International Journal of Theoretical and AppliedMechanics 12(3):637–657.

20. Singh, L., Wahid, Z. A., Siddiqui, M. F., Ahmad, A., Ab. Rahim, M. H., & Sakinah, M. (2013). Application of immobilized upflow anaerobic sludge blanket reactor using Clostridium LS2 for enhanced biohydrogen production and treatment efficiency of palm oil mill effluent. International Journal of Hydrogen Energy, 38(5), 2221-2229. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.004

21. Sunny S, Joseph K (2018) Review on factors affecting biogasproduction. International Journal For Technological Research InEngineering 5(9):3693–3697.

22. Sunny, S. M. and K. J. I. J. F. T. R. I. E. Joseph (2018). "Review on factors affecting biogas production." 5(9): 3693-3697.

23. T.F. Otun, O.M. Ojo, F.O. Ajibade and J.O. Babatola, “Evaluation of Biogas Production from the Digestion and Codigestion of Animal Waste, Food Waste and Fruit Waste”, International Journal of Energy and Environmental Research, Vol. 4, No. 3, Pp. 8-21, 2016.

24. Tufaner, F., & Avsar, Y. (2016). Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: a review. International Journal of

Environmental Science and Technology, 13. https://doi.org/10.1007/s13762-016-1069-1

25. Vats N, Khan A, Ahmad K (2020) Options for enhanced anaerobic digestion of waste and biomass— a review. Journal of Biosystems Engineering. https://doi.org/10.1007/ s42853-019-00040-y.

26. Xing, B.-S., et al. (2020). "Stable and high-rate anaerobic co-digestion of food waste and cow manure: Optimisation of start-up conditions." Bioresource Technology 307: 123195.

27. Zhang, Cunsheng, et al.2013 The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. Bioresource Technology 129:170-176.

28. Zhang, Cunsheng, et al. 2013 The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. Bioresource Technology 129:170-176.

.