مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد (3) – 2025: 230-239

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 41 number (3) -2025: 230-239

تأثير استخدام التهوية المكروية(Microaeration) على الهواضم اللاهوائية*

هيلين نذير مسلماني*[1] محمود حديد[2] غسان درة حداد[3]

*1. طالبة دكتوراه في قسم الهندسة البيئية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق.
Helenmuslemani@Damascusuniversity.edu.sy
2. استاذ مساعد، دكتور، مهندس في قسم الهندسة البيئية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق.
Mahmmoodhadid@Damascusuniversity.edu.sy
3. استاذ مساعد، دكتور، مهندس في قسم الهندسة البيئية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق.
GhassanHadad@Damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

يتناول المقال تقنية حديثة(Microaeration) يتم تطبيقها على الهواضم اللاهوائية للنفايات العضوية بهدف تجاوز المشكلات التي تعاني منها هذه الهواضم كمنع تراكم الأحماض الدهنية الطيارة VAFs، وتعزيز عمليات الإماهة وبالتالي تحسين جودة الغاز الحيوي عن طريق زيادة نسبة غاز الميتان فيه وتعزيز الاكسدة البيولوجية لغاز كبريتيد الهيدروجين H_2S المنبعث منه. في هذا البحث استخدمت مياه الصرف الصحي لمدينة عدرا بالقرب من العاصمة دمشق في دراسة استمرت لمدة ثلاثين يوم بهدف المقارنة ما بين هاضمين احدهما بشروط لاهوائية صارمة T1 والأخر بتطبيق تقنية التهوية المكروية (Microaeration) (T2) عبر ضخ كمية من الاكسجين النقي بمعدل مع (0.07LO2\Lfeed\day)مع تثبيت درجة الحرارة عند 35° درجة مئوية حيث بدأت عملية ضخ الهواء في اليوم العاشر واستمرت لليوم الثلاثين (نهاية التجربة)، وتم التوصل الى نسبة إزالة كبريتيد الهيدروجين 97.7% في الهاضم الخاضع لشروط تهوية مكروية، بالإضافة الى زيادة في نسبة غاز الميتان ضمن كتلة الغاز الحيوي المنبعث حيث وصلت نسبته الى 77.8% .

الكلمات المفتاحية: هاضم لاهوائي، تهوية دقيقة، الغاز الحيوي، اكسدة بيولوجية لغاز كبريتيد الهيدروجين

تاريخ الايداع: 2023/2/27
تاريخ القبول: 2023/5/15

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

ISSN (online): 2789-6854
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

Effects of microaeration on anaerobic digestion process*

Helen Nazer Muslemani[*1] Mahmmood Hadid[2] Ghassan Hadad[3]

[*1.] PHD Student at Environmental Engineering department-Civil Engineering Faculty-Damascus University. Helenmuslemani@Damascusuniversity.edu.sy

[2.] Associate Professor, Dr. Eng, Environmental Engineering department- Civil Engineering Faculty- Damascus. Mahmmoodhadid@Damascusuniversity.edu.sy

[3.] Associate Professor, Dr. Eng, Environmental Engineering department- Civil Engineering Faculty- Damascus. Ghassanhadad@Damascusuniversity.edu.sy

Received: 27/2/2023

Accepted: 15/5/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abstract:

Microaeration is a new technology applying on anaerobic digestion (AD) to improve hydrolysis, reduce volatile fatty acids (VFA), enhance methane production and remove H_2S from the biogas. This pepper compared between traditional AD (T1) and microaerated AD (T2). Dosing O2 started in (T2) with ($0.07L_{O2}\backslash L_{feed}\backslash day$) at the 10^{th} day to the 30^{th} day (end of the study) , temperature was set at 35°. AS a result Microaeration have several positive impact on AD(T2) represented by removing H2S which reached 97.7% after 30 days of treatment ,and increasing CH4 which reached 77.8%(V\v),in addition COD and SO4 was stability decreased on T2

Keywords: Microaeration, anaerobic digestion (AD), Biogas, removal of H_2S

المقدمة:

يعتبر الهضم اللاهوائي للنفايات العضوية أحد أهم الطرق البيولوجية لجعل هذه النفايات ذات قيمة إذ يعتبر الغاز الحيوي المنطلق من التحلل اللاهوائي لهذه النفايات مصدراً من مصادر الطاقة النظيفة والتي تساهم بالتقليل من ظاهرة الاحتباس الحراري والتقليل من استخدام الوقود الاحفوري والتقليل من استخدام خشب الغابات وخصوصا في البلدان النامية كما أن المتبقي في الهواضم اللاهوائية من الركيزة بعد اكتمال عملية الهضم يعد سماداً عضوي مهم في العمليات الزراعية.

1. تعريف الهضم اللاهوائي:

يعرف الهضم اللاهوائي للنفايات العضوية بأنه تحلل المواد العضوية معقدة التركيب كالبروتينات و السكريات المتعددة والدهون بيولوجيا إلى مواد ابسط وذلك بفعل الكائنات المجهرية وبغياب تام للأكسجين وينتج عن هذه العمليات مجموعة من الغازات نطلق عليها اسم الغاز الحيوي يعتبر الميتان المكون الأساسي للغاز الحيوي المنطلق والذي يمكن تحويلة إلى طاقة حرارية نظيفة وكهرباء الامر الذي يساهم في بالتقليل من ظاهرة الاحتباس الحراري والتقليل من استخدام الوقود الاحفوري والتقليل من استخدام خشب الغابات وخصوصا في البلدان النامية كما أن المتبقي في الهواضم اللاهوائية من الركيزة بعد اكتمال عملية الهضم يعد سمادا عضوي مهم في العمليات الزراعية Hollifield, . E.A. (1985).

2. مراحل الهضم اللاهوائي:

تمر عملية الهضم اللاهوائي بسلسلة من المراحل إذا تعتبر نواتج المرحلة الحالية هي الركيزة الأساسية للمرحلة التالية:

2.1. مرحلة الإماهة Hydrolysis:

تعتبر هذه المرحلة أطول مرحلة نسبيا تقوم البكتريا المسؤولة عن هذه المرحلة بتفكيك المواد الصعبة إلى مواد ابسط حيث يتم تفكيك البروتينات إلى احماض امينية (البربوتنيك – البيوتريك– الايثانول – البربونول) والسكريات المتعددة كالسيللوز إلى سكريات ثنائية واحادية والدهون إلى احماض عضوية طيارة (حامض الخليك)

2.2. مرحلة تشكل الأحماض Acedogenic bacteria:

وتنطوي هذه المرحلة على طورين:

في الطور الأول تعمل البكتريا المسؤولة في البداية وبالاعتماد على نواتج المرحلة السابقة لتشكيل الأحماض العضوية الطيارة متل حمض الخل.

$$C6H12O6 \leftrightarrow 2CH3\ CH2OH + 2CO2$$

$$C6H12O6 + 2H2 \leftrightarrow 2CH3\ CH2COOH + 2H2O$$

$$C6H12O6 \rightarrow 3CH3\ COOH$$

ليبدأ بعدها الطور الثاني حيث يتم تحويل المركبات التي نتجت عن التفاعلات السابقة إلى حمض الاسيتات وهيدروجين وكربون وفق التفاعلات التالية:

$$CH3CH2COOH + 2H2O \rightarrow CH3\ CCOOH + CO2 + 3H2$$

$$C6H12O6 + 2H2 \rightarrow 2CH3\ CH2CooH + 2H2O$$

$$CH3COO- + 4H2O \rightarrow 2HCO^{-3} + H^{+} + 2H2$$

يغشى في هذه المرحلة زيادة انتاج الأحماض لان ذلك يؤدي إلى تراكم هذه الأحماض والامر الذي سيؤدي إلى انخفاض قيمة ph الوسط وبالتالي عدم الاستقرار وخلل في عمل الهاضم.

2.3. مرحلة تشكل الميتان Methanogenes:

تعتبر هذه العملية هي الأخيرة في عمليات الهاضم اللاهوائي إذ تقوم البكتريا في هذه المرحلة باستخدام الأحماض التي نتجت عن المرحلة السابقة إلى الميتان اغلب الميتان المنتج يكون من حمض الاستيات حوالي 70%

تقوم hydrogenotrophic methanogens باستخدام ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين لإنتاج الميتان وفق المعادلات:

$$CH3COOH \rightarrow CH4 + CO2$$

$$CO2 + 4H2 \leftrightarrow CH4 + 2H2O$$

كما يمكن للميتان ان يتشكل من حمض الايثانول وفق المعادله:

$$2CH3CH2OH + CO2 \rightarrow CH4 + 2CH3COOH$$

(Richard, E. N., Hilonga, A., Machunda, R. L., & Njau, K. N. (2019))

تقوم بهذه العلميات مجتمعات من الاحياء الدقيقة والميكروبات وبحيث تكون منتجات المرحلة الحالية هي الركيزة الاساسية للمرحلة التالية وللحفاظ على استقرار عمل الهاضم يجب الحفاظ على هذه المجتمعات الميكروبية والحفاظ على نشاطها

في الماضي كانت تتم عمليات التحلل الهواء ضمن الهواضم اللاهوائية بغياب تام للأكسجين او الهواء وذلك خوفا على تدهور البكتريا المنتجة للميتان اذا ما تعرضت للهواء

إلا أن الابحاث والدراسات الحديثة توصلت الى تقنية بسيطة يمكن تطبيقها على الهواضم اللاهوائية من اجل تحسين جودة الغاز الحيوي المنبعث واكسدة H2S المنبعث معه اطلق على هذه العملية اسم (Microaeration)

3. تعريف عملية (Microaeration):

تعرف عملية Microaeration او التهوية الدقيقة او التهوية المكروية بأنها عملية حقن كمية من الاكسجين النقي أو الهواء في مفاعل أو هاضم اللاهوائي إذ يمكن ان يضخ الهواء على دفعة واحدة او على عدة دفعات باليوم ويمكن ان تكون نقطة ضخ الاكسجين برأس الهاضم او في خط اعادة تدوير الحمأة او في منطقة السائل

يستخدم مصطلح aeration / oxygenation في حال كانت جرعة الاكسجين عالية تصل إلى

(102-218 L_{O2}/L_{feed}) (Bekmezic etal.2011) أما عندما تكون كمية الاكسجين (6.4-2.6 L_{O2}/L_{feed}) تكون العملية اسمها اما عند استخدام كمية كسجين تصل ل limited

تكون العملية Microareation ($0.03\text{-}1.27L_{O2}/L_{feed}$)

وفي حال صلت كمية الاكسجين المستخدمة إلى (-0.74 0.94 L_{O2}/L_{feed}) نطلق مصطلح moderate (Dı´az et al. 2010, 2011a, 2011 b; Fdz-Polanco et al. 2009; Jenicek et al. 2014; Krayzelova et al. 2014a; Rodriguez et al. 2012).

إن الغاية من ادخال هذه التقنية إلى الهواضم اللاهوائية:

منع تراكم الأحماض الدهنية الطيارة VAFs

تحقيق استقرار بعمل الهاضم

أكسدة غاز كبريتيد الهيدروجين

تعزيز عمليات الإماهة وبالتالي تحسين انتاج الميتان

4. تأثير التهوية المكروية (Microaeration) على الكائنات البكتيرية في الهاضم اللاهوائي:

تعتمد عملية Microaeration على خلق بيئة فريدة في الهواضم اللاهوائية وذلك بالاستفادة من دمج الظروف الهوائية واللاهوائية.

خلال عملية Microaeration تستهلك الميكروبات الاختيارية (التي تستطيع أن تعيش في ظل وجود الاكسجين أو عدمه) جزيئات الاكسجين وتنتج جذور الاكسجين النشطة مثل (O_2^-, H_2O_2 ,$\cdot OH$) هذه الجذور والأيونات النشطة

عالية الأكسدة تستطيع أن تخرب غشاء الخلايا وبنيتها و DNA

تنتج البكتريا الهوائية والاختيارية في المقابل انزيمات مضادة للأكسدة تبطل مفعول هذه الجذور المؤكسدة مما يسمح لها بالازدهار في الظروف الهوائية (Ezraty et al., 2017)

كما يحدث تشارك وتعايش ما بين الكائنات الاختيارية facultative والاحياء اللاهوائية anaerobicmicroorganisms في الهاضم اللاهوائي حيث تتجمع اللاهوائيات المطلقة في الطبقة الداخلية بينما تتجمع الكائنات الاختيارية على الطبقة الخارجية

تعمل الكائنات الاختيارية مع الانزيمات النشطة المضادة للأكسدة والمنتجة من قبل الهوائيات على التقاط جزيئات الاكسجين النشطة مما يؤدي إلى تناقص تراكيز جزيئات الاكسجين عبر الكتلة الحيوية وبالتالي تأمين الحماية للكائنات اللاهوائية التي تكون موجودة في النواة الداخلية للكتلة الحيوية

أي أن الكائنات الاختيارية طبقة خارجية تكون بمثابة الدرع ضد الاكسجين مما يؤمن الحماية للكائنات اللاهوائية الصارمة وتسمح لها بأن تعمل بشكل فعال ضمن الظروف المعالجة الميكرو بيولوجية.

(I. Ramos, R. Pérez, M. Fdz-Polanco, 2013)

في الهواضم اللاهوائية يتم تحلل المركبات العضوية عبر سلسلة من التفاعلات الكيمائية وبحيث تكون نتائج المرحلة الراهنة هي ركائز للمرحلة التالية ونتيجة لذلك تتفاعل الكائنات الحية الدقيقة مع بعضها البعض بطريقة تسمح دائما للمادة المتفاعلة بالانتقال من مرحلة التميه إلى مرحلة تشكل الأحماض ثم لمرحلة انتاج الميتان هذه الحلقة ما بين البكتريا والمجمعات الاحيائية تسمح لها العمل بشكل فعال حتى مع التواجد المحدود لمجتمعات ATP

(Xu et al., 2014)

وللحفاظ على فعالية عملية Microaeration يجب الحفاظ على التوازن والعلاقة المستمرة ما بين مختلف المجموعات الميكروبية (الاختيارية، واللاهوائية، وبكتريا التحلل المائي، والمنتجة للميتان، والمؤكسدة لغاز كبريت الهدروجين) بالإضافة إلى الحفاظ على التوازن ما بين عمليات الأكسدة والارجاع، والحفاظ على توازن الاكسجين المحقون والمستهلك

(Madigan et al., 2015).

5. الدراسة العملية:

جرت الدراسة على عينات حمأة صرف صحي حجم العينة (40) ليتر (20 ليتر حمأة أولية + 20 ليتر حمأة ثانوية) من محطة الصرف الصحي في مدينة عدرا بالقرب من العاصمة دمشق، بعد وضع العينة في نموذج تجريبي لهاضم لاهوائي من نوع (UASB)تم تسخين العينة إلى درجة حرارة 35° درجة مئوية وتمت المحافظة على هذه الدرجة ثابتة طول فترة التجربة، استمرت كل تجربة من التجارب لمدة 30 يوم.

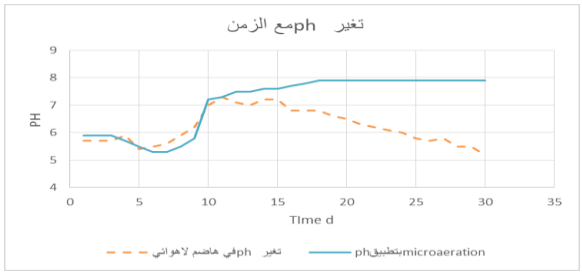
في الهاضم (T1) جرت التجربة بظروف لاهوائية تامة وتم تعديل القلوية في هذا الهاضم في اليوم العاشر بإضافة مادة هيدروكسيد الصوديوم وذلك من اجل تنشيط البكتريا المنتجة للميتان.

أما في الهاضم (T2) فقد تم تطبيق التهوية المكروية او الدقيقة (Microaeration) باستخدام الاكسجين النقي وعبر وصل انبوبة اكسجين مزودة بساعة تحكم وضبط للتحكم بمقدار الاكسجين المراد ادخاله إلى الهاضم عبر أنبوب موصول به وطبقت التهوية بمعدل بمقدار $0.07L_{O2}\backslash L_{feed}\backslash day$ أي حوالي \1.4\ ولمدة اربع ساعات يوميا بدأت عملية التهوية المكروية في اليوم العاشر وبعد أن بدأ غاز الميتان بالانبعاث وذلك من اجل ضمان نمو مجتمعات البكتريا المنتجة للميتان إذ أنها بكتريا لاهوائية صارمة ولا تمنو بوجود الهواء اطلاقاً

قبل البدء بالتجارب تم اجراء عدداً من الاختبارات الاولية لجميع العينات حيث تم قياس COD فتراوحت قيمته ما بين

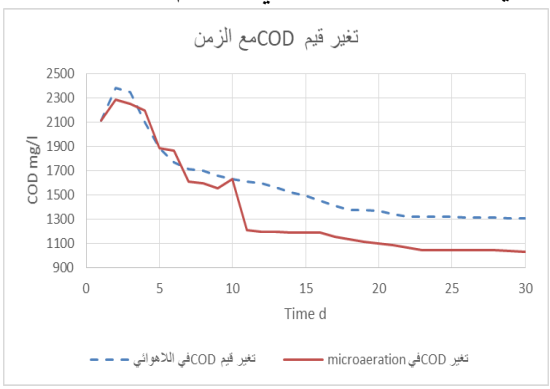
(2110-2420 mg/L) كما تم قياس نسبة SO_4^{-2} فكانت ما بين (32-36mg/L) ، كما تراوحت قيمة PH الأولية ضمن المجال (5.7-5.9)

من التجربة نلاحظ ان قيمة PH في الهاضم اللاهوائي الخاضع لتهوية مكروية Microaeration كانت اكثر استقرارا من بعد تطبيق التهوية وبقيت مستقرة حتى نهاية فترة التجربة مما امن استقرار عمليات الهاضم. من الأمور التي ساعدت على المحافظة على قيمة PH هو انخفاض كمية الأحماض الطيارة الناتجة عن تفكك المواد العضوية بوجود الاكسجين بالإضافة إلى ان بكتيريا SOB تساهم في رفع PH الوسط عبر اكسدتها ل H_2S ل S^0



الشكل رقم(1) يوضح تغير قيم PH مع الزمن في الهاضمين T1و T2

بالمقارنة ما بين سلوك الهاضمين T1و T2 نلاحظ انخفاض اكبر بقيمةCOD في الهاضم T2 الخاضع لشروط تهوية مكروية مقارنه مع الهاضم اللاهوائي الصارم T1وذلك لأن عملية التهوية المكروية عززت من عمليات الإماهة وذلك عن طريق دمج الشروط الهوائية واللاهوائية فأصبحت المواد العضوية تتأكسد بشكل كامل في الهاضم T2



الشكل رقم(2) يوضح تغير قيم COD مع الزمن في T1و T2

اما بالنسبة لقيمة SO4 نلاحظ ان نسبة انخفاضها في الهاضم T2 الخاضع لشروط تهوية مكروية كانت أعلى وذلك لأن جزء SO_4 كانت يتم ارجاعها بفعل بكتريا SOB التي نشطت بوجود الاكسجين إلى S^0 كما في المعادلة:

$$2SO_4^{-2} + 4H^+ \rightarrow 2S^0 + O_2 + 2H_2O$$

وجزء اخر تقوم بكتريا SRB بتفكيكه واطلاق H_2S منه كما في المعادلة:

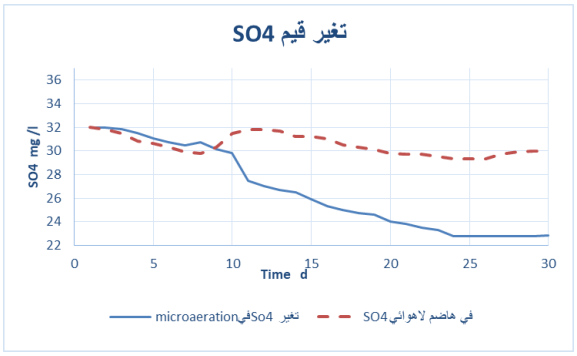
$$HS^- \rightleftarrows H^+ + S^{-2}$$

لتقوم أيضا بكتريا SOB بأكسدة H_2S ل S^0 كما في المعادلات:

$$H2S + 0.5\,O_2 \rightarrow S^0 + H_2O$$

$$S^0 + H_2O + 3/2\,O_2 \rightarrow SO_4^{-2} + 2H^+$$

$$H_2S + 2O_2 \rightarrow SO_4^{-2} + 2H^+$$



الشكل رقم(3) يوضح تغير قيم SO4 مع الزمن في T1و T2

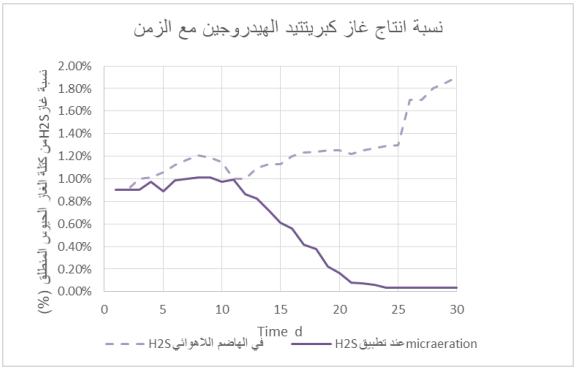
عن إزالة H_2S فنلاحظ أن نسبته انخفضت من كتلة الغاز الحيوي المنبعث بمجرد تطبيق التهوية المكروية أي من اليوم الحادي عشر ضمن الهاضم T2وذلك لان بكتريا SOB نشطت بوجود الاكسجين وبدأت بعملها بالتقاط جزيئات H_2S المنبعث من عمل بكتريا SRB كما في المعادلة:

$$SO_4^{-2} + H_2O \rightarrow H_2S + 3O$$

وارجعته إلى S^0 كما في المعادلة:

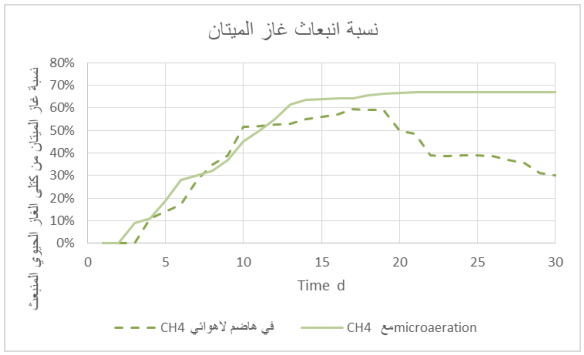
$$H2S + 0.5\,O_2 \rightarrow S^0 + H_2O$$

وقد تم التوصل الى نسبة إزالة بلغت 97.7% من نسبته في الأيام الأولى للتجربة وذلك في اليوم الرابع والعشرين للتجربة وبقيت ثابتة لم يطرأ عليها تغير حتى اليوم الثلاثين



الشكل رقم(4) يوضح تغير قيم H2S مع الزمن في T1وT2

نسبة غاز الميتان في الهاضم T2 الخاضع لشروط تهوية مكروية كانت أعلى وأكثر استقرارا حست وصلت نسبتها الى 77.8% من اليوم الثامن عشر وبقيت هذه النسب ثابتة لليوم الثلاثين في حين كانت اعلى نسبة لغاز الميتان المنبعث من الهاضم اللاهوائي الصارم T1 59.5% في السوم السابع عشر واستمرت لثلاثة أيام ثم بدأت بالانخفاض تدريجيا



الشكل رقم(5) يوضح نسبةCH4المنبعث مع الزمن في T1وT2

7. النتائج والتوصيات:

-إن تطبيق (Microaeration) او التهوية المكروية او التهوية الدقيقة هي طريقة بسيطة غير مكلفة ولا تتطلب اجراء أي تعديلات على تصميم الهاضم اللاهوائي وهي طريقة عالية الكفاءة ومستقرة لإزالة غاز كبريتيد الهيدروجين من الغاز الحيوي وبالتالي تخليص البيئية من آثاره الضارة بالإضافة إلى زيادة القيمة الحرارية للغاز الحيوي، كما أنه يخفض نسبة SO_4 في الحمأة السائلة المتبقية في الهاضم.

- ان تطبيق التهوية الدقيقة لا يؤثر فقط على تنظيف الغاز الحيوي من كبريتيد الهيدروجين وإنما يعزز علميات الإماهة ويؤمن استقرار عمل الهاضم ككل ويعطينا وسيلة للتحكم بكافة عملياته.

- في هذه الدراسة تم تثبيت درجة الحرارة عند 35درجة مئوية بالإضافة الى تثبيت كمية الاكسجين المضخوخة طول مدة التجربة إلا أنه يوصى بمزيد من الأبحاث تأخذ بعين الاعتبار تغير درجة الحرارة واستخدام شدات تهوية مختلفة ضمن الهاضم خلال فترة التجربة ودراسة مدى تأثير هذين العاملين على انتاج الميتان وإزالة H2S ضمن شروط التهوية المكروية (Microaeration)

- يجب الانتباه إلى أن تطبيق هذه التقنية هي عملية غاية في الدقة والحساسية إذ أن العمليات متداخلة بشكل كبير إلا أن مفتاح التحكم بها هو قيمة PH لذا يجب الانتباه إلى تغيراته بشكل كبير.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل(501100020595)

8-References:

[1]-Bekmezci OK, Ucar D, Kaksonen AH, Sahinkaya E (2011) Sulfidogenic biotreatment of synthetic acid mine drainage and sulfide oxidation in anaerobic baffled reactor. J Hazard Mater 189(3):670–676.

[2]-Dı´az I, Lopes AC, Pe´rez SI, Fdz-Polanco M (2010) Performance evaluation of oxygen, air and nitrate for the microaerobic removal of hydrogen sulphide in biogas from sludge digestion. Bioresour Technol 101(20):7724–7730.

[3]- Dı´az I, Donoso-Bravo A, Fdz-Polanco M (2011a) Effect of microaerobic conditions on the degradation kinetics of cellulose. Bioresour Technol 102(21):10139–10142.

[4]- Dı´az I, Lopes AC, Perez SI, Fdz-Polanco M (2011b) Determination of the optimal rate for the microaerobic treatment of several H2S concentrations in biogas from sludge digesters. Water Sci Technol 64(1):233–238.

[5]- Ezraty, B., Gennaris, A., Barras, F., Collet, J.-F., 2017. Oxidative stress, protein damage and repair in bacteria. Nat. Rev. Microbiol.

[6]- Fdz-Polanco M, Diaz I, Perez SI, Lopes AC, Fdz-Polanco F (2009) Hydrogen sulphide removal in the anaerobic digestion of sludge by micro-aerobic processes: pilot plant experience. Water Sci Technol 60(12):3045–3050.

[7]-Hollifield, E.A. (1985) Production and Utilization of Biogas, in Developing Countries, Prepared by GTZ, 1985, Eshbon.

[8]-I. Ramos, R. Pérez, M. Fdz-Polanco; Microaerobic desulphurisation unit: A new biological system for the removal of H2S from biogas;-a review 2013.

[9]-, M.T., Martinko, J.M., Bender, K.S., Buckley, D.H., Stahl, D.A., 2015. Brock Biology of Microorganisms, 14th ed. Pearson, Boston.).

[10]-Richard, E. N., Hilonga, A., Machunda, R. L., & Njau, K. N. (2019). A review on strategies to optimize metabolic stages of anaerobic digestion of municipal solid wastes towards enhanced resources recovery. Sustainable Environment Research, 29(1), 1-13.

[11]-Rodriguez E, Lopes A, Fdz-Polanco M, Stams AJ, GarciaEncina PA (2012) Molecular analysis of the biomass of a fluidized bed reactor treating synthetic vinasse at anaerobic and micro-aerobic conditions. Appl Microbiol Biotechnol 93(5):2181–2191.

[12]-Xu, S., Selvam, A., Wong, J.W.C., 2014. Optimization of micro-aeration intensity in acidogenic reactor of a two-phase anaerobic digester treating food waste. Waste Manag. 34, 363–369.