

A Study of the Efficiency of the Two-Phase Anaerobic Degradation System 2PAD in The Different Temperature Ranges

Dr. Mahmoud Hadid*
Ziad Aladeeb**

(Received 29 / 7 / 2019. Accepted 5 / 12 / 2019)

□ ABSTRACT □

The Average thermal range (Mesophilic) [25 – 40]°C is the optimal range for the process of anaerobic treatment and specifically the temperature [34 -37]°C where the microorganisms that lead the anaerobic treatment process are at their highest activity which gives high efficiency to the treatment process and biogas production process, also the Two-Phase Anaerobic Degradation System 2PAD is used to increase the efficiency of anaerobic treatment process compared to the Conventional Single-Phase Anaerobic Digestion System AD. This research presents a study of the efficiency of the Two-Phase Anaerobic Degradation System 2PAD in the different ranges of temperature through the treatment of three samples of wastewater from slaughterhouses, where the efficiency of COD removal was 81.65% and the efficiency of BOD removal was 88.00% and the efficiency of TSS removal was 39.68% while biogas production reached 0.24 liter from each liter of the sample at 40° C and during a 10-day hydraulic retention time HRT for the first sample A (COD_{in}= 3760 mg/l, BOD_{in}=2500 mg/l, TSS_{in}=368 mg/l), and the efficiency of COD removal was 64.74% and the efficiency of BOD removal was 71.43% and the efficiency of TSS removal was 56.09% while biogas production reached 0.16 liter from each liter of the sample at 20° C and during a 24-day hydraulic retention time HRT for the second samples B (COD_{in}=1730 mg/l, BOD_{in}=1400 mg/l, TSS_{in}=312 mg/l). and the efficiency of COD removal was 83.38% and the efficiency of BOD removal was 89.29% and the efficiency of TSS removal was 42.11% while biogas production reached 0.28 liter from each liter of the sample at 34° C and during a 17-day hydraulic retention time HRT for the third sample C (COD_{in}=3850 mg/l, BOD_{in}=2800 mg/l, TSS_{in}=475 mg/l).

Keywords: Anaerobic Treatment, Anaerobic Reactor, High Strength Wastewater, Biological Degradation, Biogas, Conventional Single-Phase Anaerobic Digestion System AD, Two-Phase Anaerobic Degradation System 2PAD.

* Associate Professor - Department of Environmental Engineering - Faculty of Civil Engineering - Damascus University – Damascus – Syria.

** Postgraduate Student (PhD) - Department of Environmental Engineering - Faculty of Civil Engineering - Damascus University – Damascus – Syria.

دراسة كفاءة نظام المعالجة اللاهوائية ثنائي الطور 2PAD في مجالات درجة الحرارة المختلفة

د. محمود حديد*

زياد الأديب**

تاريخ الإيداع 29 / 7 / 2019. قُبِلَ للنشر في 5 / 12 / 2019

□ ملخص □

يعتبر المجال الحراري المتوسط (Mesophilic) $25-40^{\circ}\text{C}$ المجال الأمثل لسير عملية المعالجة البيولوجية اللاهوائية وتحديدًا درجة الحرارة $34-37^{\circ}\text{C}$ حيث تكون الأحياء الدقيقة التي تقود عملية المعالجة اللاهوائية في أعلى نشاط لها الأمر الذي يعطي كفاءة عالية لعملية المعالجة وعملية إنتاج الغاز الحيوي، أيضاً يستخدم نظام المعالجة اللاهوائية ثنائي الطور (Two-Phase Anaerobic Degradation System) 2PAD لرفع كفاءة عملية المعالجة اللاهوائية بالمقارنة مع نظام المعالجة اللاهوائية التقليدي (Conventional Single-Phase Anaerobic Digestion System) AD. يعرض هذا البحث دراسة كفاءة نظام المعالجة اللاهوائية ثنائي الطور 2PAD في المجالات المختلفة من درجة الحرارة وذلك من خلال معالجة ثلاث عينات من مياه الصرف الناتجة عن المسالخ، حيث كانت كفاءة إزالة COD 81.65% وكفاءة إزالة BOD 88.00% وكفاءة إزالة TSS 39.68% بينما بلغ إنتاج الغاز الحيوي 0.24 Liter من كل 1 Liter من العينة في درجة الحرارة 40°C وخلال زمن بقاء هيدروليكي 10 day HRT بالنسبة للعينة الأولى A ($\text{COD}_{\text{in}}=3760 \text{ mg/l}$, $\text{BOD}_{\text{in}}=2500 \text{ mg/l}$, $\text{TSS}_{\text{in}}=368 \text{ mg/l}$)، و كانت كفاءة إزالة COD 64.74% وكفاءة إزالة BOD 71.43% وكفاءة إزالة TSS 56.09% بينما بلغ إنتاج الغاز الحيوي 0.16 Liter من كل 1 Liter من العينة في درجة الحرارة 20°C وخلال زمن بقاء هيدروليكي 24 day HRT بالنسبة للعينة الثانية B ($\text{COD}_{\text{in}}=1730 \text{ mg/l}$, $\text{BOD}_{\text{in}}=1400 \text{ mg/l}$, $\text{TSS}_{\text{in}}=312 \text{ mg/l}$)، وكانت كفاءة إزالة COD 83.38% وكفاءة إزالة BOD 89.29% وكفاءة إزالة TSS 42.11% بينما بلغ إنتاج الغاز الحيوي 0.28 Liter من كل 1 Liter من العينة في درجة الحرارة 34°C وخلال زمن بقاء هيدروليكي 17 day HRT بالنسبة للعينة الثالثة C ($\text{COD}_{\text{in}}=3850 \text{ mg/l}$, $\text{BOD}_{\text{in}}=2800 \text{ mg/l}$, $\text{TSS}_{\text{in}}=475 \text{ mg/l}$).

الكلمات المفتاحية: المعالجة اللاهوائية، المفاعل اللاهوائي، مياه الصرف عالية التركيز، التحلل البيولوجي، الغاز الحيوي، نظام المعالجة اللاهوائية التقليدي AD، نظام المعالجة اللاهوائية ثنائي الطور 2PAD.

*أستاذ مساعد - قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

**طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

مقدمة:

تنشأ مياه الصرف الناتجة عن المسالخ من المخلفات السائلة التي تنتج عن عمليات غسل وذبح الحيوانات بالإضافة إلى عمليات تنظيف الأدوات والأرضيات، ويمكن تلخيص هذه العمليات كما يلي: 1- غسل الحيوانات، 2- الذبح، 3- السلخ، 4- تنظيف أجسام الحيوانات، 5- تنظيف الأدوات والأرضيات. تحتوي مياه الصرف هذه على مخلفات من الدماء، جزيئات من الجلد، جزيئات من اللحم والعظم، بالإضافة إلى روث الحيوانات [1]. تتكون هذه المخلفات بشكل أساسي من مزيج معقد من البروتينات (Proteins)، والكاربوهيدرات (Carbohydrates)، بالإضافة إلى الدسم (Fats)، حيث تعتبر هذه المكونات من المواد العضوية المعقدة صعبة التفكك بطرق المعالجة التقليدية وهذا ما يجعلها من أخطر الملوثات على البيئة [2].

إن عملية المعالجة اللاهوائية (الهضم اللاهوائي - التخمر) (Anaerobic Digestion – Degradation) هي عملية بيوكيميائية يتم فيها تفكيك المادة العضوية بغياب الأوكسيجين بواسطة عدة أنواع من الأحياء الدقيقة (البكتيريا) (Microorganisms) وتحويلها إلى مزيج من الغازات الذي يدعى الغاز الحيوي (Biogas) [3]، والذي يتكون بدوره بشكل أساسي من غاز الميثان (CH₄ (Methane)، وغاز ثنائي أوكسيد الكربون (CO₂ (Carbon Dioxide)، ويعد الغاز الحيوي مصدر نظيف ومتجدد للطاقة ويمكن أن يكون مصدر للطاقة المستدامة ووسيلة بديلة عن الطاقة التقليدية (الوقود الأحفوري والفحم الحجري) التي تستنفذ حالياً بمعدل كبير فضلاً عن تسببها بالكثير من المشكلات البيئية مثل تلوث الهواء والاحتباس الحراري، في حين تكون الحمأة الناتجة (Sludge) غنية بشوارد الأمونيوم (Ammonium) NH₄⁺ وغيرها من المواد المغذية والتي يمكن أن تستخدم كمسمد عضوي طبيعي للتربة دون أية عملية معالجة [4].

يمكن تلخيص مراحل عملية المعالجة اللاهوائية من خلال تقسيمها بحسب متطلبات شروط الوسط البيئية إلى طورين أساسيين هما: الطور الحمضي (Acid Genesis) وطور إنتاج غاز الميثان (Methane Genesis). في نظام المعالجة اللاهوائية التقليدي AD تحدث عملية المعالجة اللاهوائية بطوريتها في مفاعل واحد ضمن توازن حساس جداً، بينما يحدث الطور الحمضي وطور إنتاج غاز الميثان بشكل متتابع في مفاعلين منفصلين ضمن متطلبات شروط وسط بيئية مثالية وهذا ما يسمى نظام المعالجة اللاهوائية ثنائي الطور 2PAD وقد استخدم هذا النظام لأول مرة في العام 1971 من قبل العالمين Pohland و Ghosh [5] حيث تبدو آفاق استخدام هذا النظام واعدة جداً جعلته محط اهتمام الباحثين فخلال السنوات الماضية خضع نظام المعالجة 2PAD للكثير من الدراسات: وقد تم التأكد من قدرته على معالجة مياه صرف عالية التركيز [5] ومن إمكانية استخدامه في درجات الحرارة الطبيعية [6] ومن زيادة معدل مرحلة الحمأة [4] وإنتاج أفضل للغاز الحيوي [7] وقدرته على تحمل صدمات زيادة معدل الحمل العضوي [8] فضلاً عن زيادة استقرار عملية المعالجة من خلال قدرته على تحمل تغيرات درجة pH وقلوية الوسط وتركيز الحموض العضوية المتطايرة [9]. من هنا تم الإنطلاق بهذا البحث من أجل دراسة تأثير درجة الحرارة على كفاءة نظام المعالجة 2PAD.

أهمية البحث وأهدافه:

يعد استخدام النظام 2PAD في معالجة مياه الصرف من المشاريع البيئية الرائدة بامتياز على المستوى العالمي، لذلك فإن دراسة تأثير درجة الحرارة باعتبارها أحد البارامترات الأساسية في النظام لا يفتح المجال فقط أمام استخدام هذا النظام في معالجة مياه الصرف بل يعد خطوة مهمة تفتح المجال لدراسات متقدمة في مجال المعالجة اللاهوائية. يهدف

هذا البحث إلى تطبيق نظام المعالجة اللاهوائية ثنائي الطور 2PAD في معالجة مياه الصرف الناتجة عن المسالخ وذلك من أجل دراسة كفاءة النظام في درجات الحرارة المختلفة بالمقارنة مع كفاءته في درجة الحرارة المثالية لعملية المعالجة اللاهوائية $[30-40]^{\circ}\text{C}$.

طرائق البحث ومواده:

تم تصميم نموذج تجريبي لنظام المعالجة اللاهوائية ثنائي الطور 2PAD وتم تحضير عينات من مياه الصرف الناتجة عن المسالخ من أجل معالجتها في النموذج التجريبي وذلك في درجة حرارة مختلفة لكل عينة، ثم مقارنة نتائج المعالجة والتي هي بشكل أساسي: كفاءة إزالة COD وكفاءة إزالة BOD وكفاءة إزالة TSS وإنتاج الغاز الحيوي.

1- مراحل عملية المعالجة اللاهوائية:

تقسم عادة عملية المعالجة اللاهوائية وإنتاج الغاز الحيوي إلى 4 مراحل رئيسية متتالية هي على الترتيب [4]، [10]، [11] كما في الشكل (1).

1-1- مرحلة الحلمة (Hydrolysis):

في مرحلة الحلمة يتم تحويل المركبات العضوية المعقدة ذات السلاسل الطويلة صعبة التفكك غير المنحلة في الماء إلى مركبات عضوية منحلة في الماء بواسطة نوع من الأحياء الدقيقة اللاهوائية، والتي بمجرد توفر شروط لاهوائية تفرز أنزيمات (Enzymes) تقوم بإذابة المركبات العضوية المتواجدة على تماس مع جدار الخلية بحيث تصبح قادرة على اختراق الغشاء الخلوي للخلية البكتيرية والدخول إليها حيث يتم تفكيكها، وبذلك تتحول البروتينات إلى حموض أمينية وتتحوّل الكربوهيدرات إلى سكريات بسيطة وتتحوّل الدسم إلى حموض دسمة لكي يصبح بالإمكان استخدامها كمصدر للغذاء والطاقة من قبل الخلية البكتيرية، وتسمى الأحياء الدقيقة التي تشارك في هذه المرحلة ببكتيريا الحلمة (Hydrolytic Bacteria).

بروتينات معقدة --> حموض أمينية

كربوهيدرات معقدة --> سكريات بسيطة

دسم معقدة --> حموض دسمة

1-2- مرحلة تشكيل الحموض الدسمة الطيارة (Acid Genesis):

في هذه المرحلة فإن المواد الناتجة عن مرحلة الحلمة والتي هي الحموض الأمينية والسكريات البسيطة والحموض الدسمة والتي أصبحت داخل الخلايا البكتيرية المشاركة في مرحلة الحلمة بعد إذابتها، يتم تفكيكها عن طريق أكسدتها لاهوائياً (تخمّر) (Fermentation) داخل الخلايا بواسطة أنزيمات خاصة، وبالتالي تتخمر الحموض الأمينية والسكريات البسيطة والحموض الدسمة ذات السلاسل الطويلة إلى حموض دسمة طيارة (Volatile Fatty Acids) VFAs، وهي بشكل أساسي: حمض الفورميك (فورمات) HCOOH (Formate) وحمض الخل (الخلات) CH_3COOH (Acetate) وحمض البروبيونيك $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{COOH}$ (Propionic Acid) وحمض الزبدة $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ (Butyric Acid) وهي حموض عضوية قصيرة السلسلة، بالإضافة إلى غاز الهيدروجين

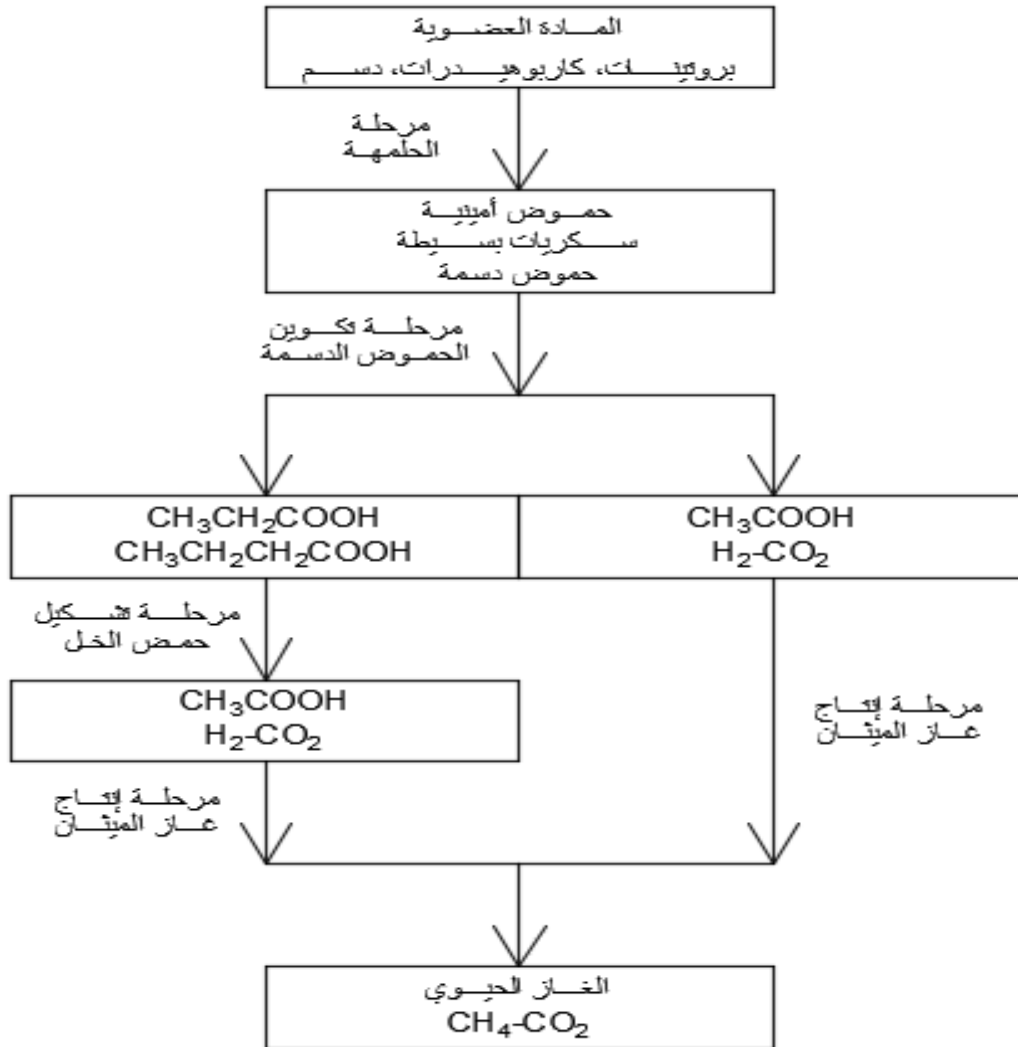
هذه المرحلة بيكتيريا التخمر الحمضية (Fermentation Acid Genic Bacteria)، وتسمى الأحياء الدقيقة التي تشارك في

3-1- مرحلة تشكيل الخلات (Acetate Genesis):

تكون الخلات وحمض الفورميك وغاز الهيدروجين وغاز ثنائي أكسيد الكربون جاهزة مباشرة للاستهلاك من قبل الأحياء الدقيقة المنتجة لغاز الميثان في المرحلة 4، بينما لا يكون حمض البريبونيك وحمض الزبدة جاهزة مباشرة للاستهلاك من قبل الأحياء الدقيقة المنتجة لغاز الميثان في المرحلة 4 لذلك يتم تفكيكها إلى الخلات وغاز الهيدروجين وغاز ثنائي أكسيد الكربون بواسطة الأحياء الدقيقة المشكلة للخلات (Acetate Genic Bacteria).

4-1- مرحلة إنتاج غاز الميثان (Methane Genesis):

في هذه المرحلة يتم إنتاج غاز الميثان وغاز ثنائي أكسيد الكربون من الخلات وغاز الهيدروجين وغاز ثنائي أكسيد الكربون بواسطة الأحياء الدقيقة المنتجة لغاز الميثان (Methane Genic Bacteria).



الشكل (1) مراحل عملية المعالجة اللاهوائية.

2- الباراميترات المؤثرة على عملية المعالجة اللاهوائية:

1-2- درجة الحرارة (Temperature): T:

تعتبر درجة الحرارة من أكثر الباراميترات أهمية فهي تؤثر مباشرة على جميع أنواع الأحياء الدقيقة التي تقود عملية المعالجة اللاهوائية، يمكن أن تعمل عملية المعالجة اللاهوائية في ثلاث مجالات من درجة الحرارة هي: 1- المجال الحراري الطبيعي (Psychophilic) $10-25^{\circ}\text{C}$ ، 2- المجال الحراري المتوسط (Mesophilic) $25-40^{\circ}\text{C}$ [12]، 3- المجال الحراري العالي (Thermophilic) $40-60^{\circ}\text{C}$. تعتبر درجة الحرارة المثلى لإنتاج غاز الميثان $34-37^{\circ}\text{C}$ ، في حين يستخدم المجال الحراري العالي عند معالجة مواد عضوية عالية التركيز، بينما تقل كفاءة المعالجة اللاهوائية في المجال الحراري الطبيعي [11].

2-2- الرقم الهيدروجيني pH:

تتأثر الأحياء الدقيقة التي تقود عملية المعالجة اللاهوائية بشكل مباشر بدرجة pH، حيث تنشط بكتيريا التخمر الحمضية عند درجة $\text{pH}=5$ ، في حين لا تنشط البكتيريا المنتجة لغاز الميثان عند درجة $\text{pH}<6.2$ ، ويكون نشاطها مثالياً عند $\text{pH}=6.8-7.2$ [11]، [13].

2-3- زمن البقاء الهيدروليكي (Hydraulic Retention Time): HRT:

هو الزمن الذي تحتاجه المواد العضوية حتى تتفكك إلى غاز الميثان، حيث يبلغ معدل نمو بكتيريا الحلمة 2 day و يبلغ معدل نمو بكتيريا التخمر الحمضية 4 day بينما يبلغ معدل نمو الأحياء الدقيقة المنتجة للميثان 4 day لذلك يجب ألا يقل زمن البقاء الهيدروليكي عن $10-12$ day ويرتبط بشكل مباشر مع درجة الحرارة [11].

2-4- المزج (Mixing):

يساعد المزج في تحسين كفاءة عملية المعالجة اللاهوائية من خلال توزيع الأحياء الدقيقة والمواد الغذائية والمواد العضوية بشكل منتظم كما يساعد في تنظيم درجة الحرارة، ويجب أن يكون المزج بحدود مقبولة حيث أن المزج الزائد ينهك الأحياء الدقيقة كما أن المزج غير الكافي يؤدي إلى تشكل الرغوة [11].

2-5- الحموض الدسمة الطيارة (Volatile Fatty Acids): VFAs:

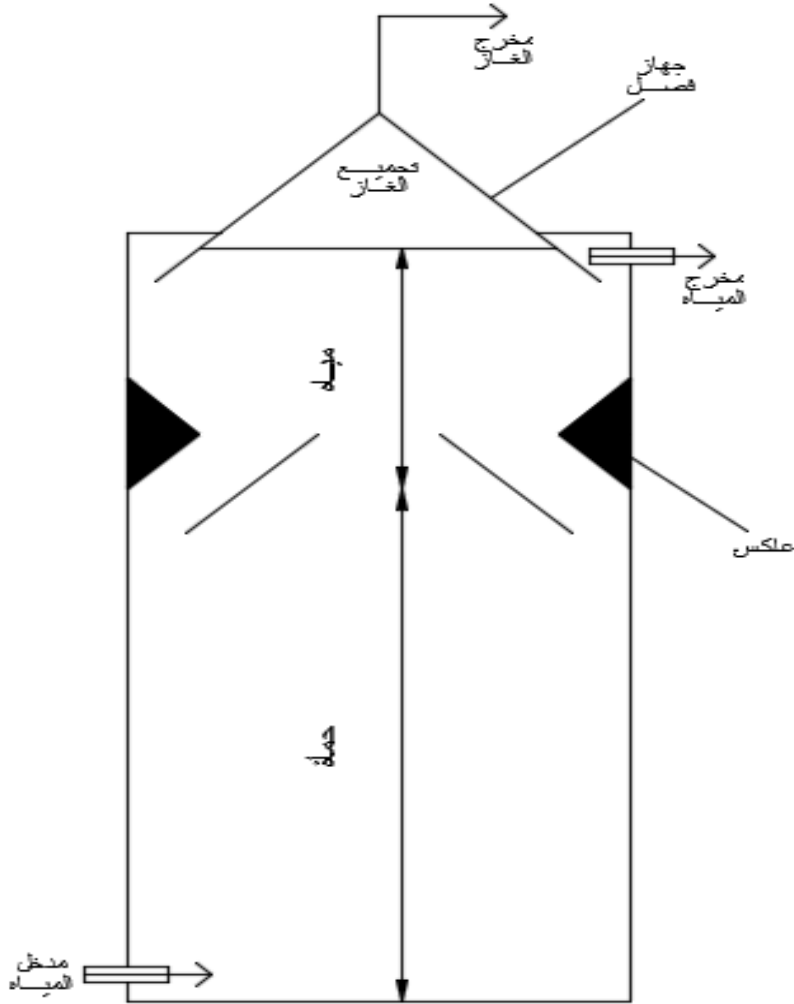
إن الحموض الدسمة الطيارة الناتجة عن عمليات الحلمة والتخمر وتشكل الخلات تسبب خفض درجة pH لكنها تعود للارتفاع مع بدء استهلاك هذه الحموض من قبل الأحياء الدقيقة المنتجة لغاز الميثان، لكن تراكم هذه الحموض يؤدي إلى استمرار انخفاض درجة pH فإذا انخفضت عن القيم المسموحة أدت إلى موت الأحياء الدقيقة المنتجة لغاز الميثان، لذلك يتم تعديل درجة pH عن طريق إضافة مواد قلوية [11].

2-6- ضغط غاز الهيدروجين الجزئي (Partial Pressure Of Hydrogen Gas):

تعيش الأحياء الدقيقة المنتجة للخلات فقط ضمن شروط منخفضة من ضغط غاز الهيدروجين الجزئي وهي بنفس الوقت تنتج غاز H_2 ، وهنا يأتي دور الأحياء الدقيقة المنتجة لغاز الميثان التي تقوم باستهلاك غاز H_2 المتشكل باستمرار وتحافظ على شروط منخفضة من ضغط غاز الهيدروجين الجزئي، لكن إذا لم يكن معدل استهلاك الهيدروجين كافياً وتجاوز ضغط غاز الهيدروجين الجزئي 10^{-4} atm (أتموسفير) فإن الأحياء الدقيقة المنتجة للخلات يتوقف نشاطها، لذلك يجب تخفيض ضغط غاز الهيدروجين الجزئي عن طريق عملية تفريغ للغاز (Degasing) [14].

3- نظام المعالجة اللاهوائية التقليدي (AD (Conventional Single-Phase Anaerobic Digestion System): يتألف نظام المعالجة اللاهوائية التقليدي من مفاعل (Reactor) استاتيكي واحد تحدث فيه جميع مراحل المعالجة اللاهوائية ويمتاز هذا النوع بالبساطة وانخفاض تكاليف الإنشاء والتشغيل، ويمكن أن يتألف من عدة مفاعلات مع أجزاء متحركة وحساسات ومقاييس لضبط عملية المعالجة اللاهوائية ويمتاز هذا النوع بالكفاءة لكن مع ارتفاع تكاليف الإنشاء والتشغيل مقارنة مع المفاعل الواحد، كما يوجد أنظمة للجريان المستمر وأنظمة للجريان المتقطع. يعد المفاعل من نوع (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) UASB من أشهر أنواع المفاعلات المستخدمة في أنظمة المعالجة اللاهوائية ويتألف من [15]، [16] كما في الشكل (2):

- خزان مغلق مستطيل أو أسطواني (وهو الأكثر شيوعاً) أو مختلط (مستطيل من الأسفل وأسطواني من الأعلى).
- مدخل المياه (Influent) يتوضع أسفل المفاعل، بينما يتوضع مخرج المياه (Effluent) في الجزء الأعلى من المفاعل.
- لمنع الحمأة من الطفو وإجبارها على النزول إلى قاع المفاعل يتم تركيب عاكس (Deflector) على كامل محيط الحوض.
- يتم جمع الغاز المتشكل من أعلى المفاعل عن طريق جهاز فصل (Phase Separator) فوق سطح المياه.



الشكل (2) مفاعل UASB.

4- نظام المعالجة اللاهوائية ثنائي الطور (2PAD (Two-Phase Anaerobic Degradation System):

تعمل الأحياء الدقيقة التي تقود الطور الحمضي في عملية المعالجة اللاهوائية والتي هي بكتيريا الحلمهة وبكتيريا التخمر الحمضية بالإضافة إلى الأحياء الدقيقة المشكلة للخلات في مجال مشترك من شروط الوسط البيئية من حيث متطلبات التغذية وبارامترات التشغيل، في حين تعمل الأحياء الدقيقة المنتجة للميثان والتي تقود طور إنتاج غاز الميثان في عملية المعالجة اللاهوائية ضمن شروط وسط بيئية مختلفة تماماً عن شروط وسط أحياء الطور الحمضي لذلك يعمل نظام المعالجة اللاهوائية التقليدي ضمن توازن حساس جداً بالإضافة إلى صعوبة تأمين الشروط المثالية لعمل الأحياء الدقيقة لكل طور دون التأثير على عمل الأحياء الدقيقة للطور الآخر الأمر الذي ينعكس سلباً على كفاءة واستقرار عملية المعالجة اللاهوائية في نظام المعالجة اللاهوائية التقليدي [17]. في نظام المعالجة اللاهوائية ثنائي الطور تتم عملية الفصل الفيزيائي بين طوري عملية المعالجة اللاهوائية بحيث يجري كل طور في مفاعل خاص به بشكل منفصل عن الطور الآخر الذي يجري في مفاعل آخر خاص به أيضاً، الأمر الذي يساعد في تأمين الشروط المثالية لعمل الأحياء الدقيقة لكل طور دون التأثير على عمل الأحياء الدقيقة في الطور الآخر وهذا ما ينعكس إيجاباً على كفاءة واستقرار عملية المعالجة اللاهوائية وتتم آلية الفصل كما يلي [5]، [17]:

1. يتم في المفاعل R1 الشكل (3) مفاعل الطور الحمضي كبح نشاط الأحياء الدقيقة المنتجة للميثان نتيجة انخفاض درجة الرقم الهيدروجيني pH إلى القيمة 6 مع زيادة تشكل الحموض دون تعديلها بإضافة مواد قلوية، لكن وفي الوقت نفسه يتم سحب غاز الهيدروجين المتشكل لمنع تشكل ضغط هيدروجين جزئي مرتفع من شأنه أن يوقف نشاط الأحياء الدقيقة المشكلة للخلات، وبذلك يتم الحصول على مفاعل يتم فيه تحول المواد العضوية إلى حموض دسمة طيارة فقط بشكل كامل وفعال جداً وبدون مشاكل تتعلق بتغير درجة الرقم الهيدروجيني pH مع الانتباه إلى عمليات المزج وتثبيت درجة الحرارة.

2. بعد الإنتهاء من عملية تحول المواد العضوية إلى حموض دسمة طيارة في المفاعل R1 يتم تعديل درجة pH إما بعملية إضافة مواد قلوية أو بعملية إعادة تدوير للمياه المعالجة ليتم في المفاعل R2 (مفاعل طور إنتاج غاز الميثان الذي يحتوي مسبقاً على حمأة غنية بالأحياء الدقيقة المنتجة للميثان) عملية تفكيك الحموض الدسمة الطيارة إلى غاز الميثان بشكل فعال جداً دون مشاكل تتعلق بانخفاض درجة pH مع الانتباه إلى عمليات المزج وتثبيت درجة الحرارة.

5- تصميم نموذج تجريبي لنظام المعالجة اللاهوائية ثنائي الطور 2PAD:

تم اختيار الخزان الأسطواني المعدني سعة 200 لتر ذو الغطاء القابل للفتح والإغلاق بإحكام كأساس للمفاعلات R1، R2 لنظام المعالج اللاهوائية ثنائي الطور 2PAD [18]، [19] والذي يأتي بأبعاد:

$$\text{قطر (خارجي - داخلي)} = 572-584 \text{ mm}$$

$$\text{ارتفاع (خارجي - داخلي)} = 851-876 \text{ mm}$$

كما يظهر في الصورة (1) أثناء تصميم النموذج في الورشة:



الصورة (1) الخزان الأسطواني المعدني سعة 200 لتر.

حيث تم إجراء التعديلات التالية على كل من الخزائين ليعمل النموذج التجريبي على عينات بحجم يتراوح [20-170] Liter كما في الصورة (2) والشكل (3) والشكل (4):

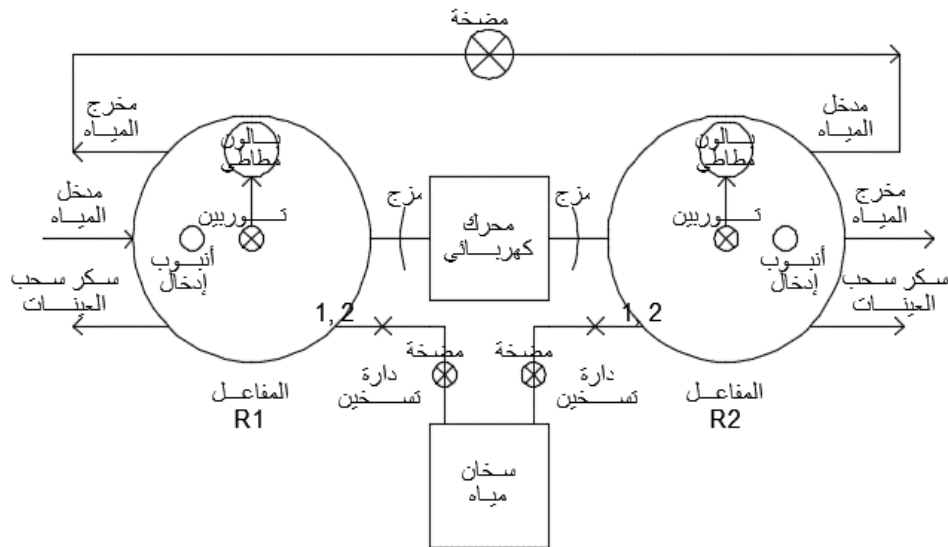
- 1- الطلي من الداخل بمادة الإيبوكسي (Epoxy) للعزل من تأثير الحموض.
- 2- التغليف من الخارج بطبقة من الصوف الزجاجي (Glass Wool) للعزل الحراري.
- 3- تركيب عاكس معدني سماكة 4 mm مطلي بمادة الإيبوكسي ملفوف على كامل محيط المفاعل الداخلي بزاوية 135° عند ثلث ارتفاع المفاعل من الأعلى.
- 4- تركيب جهاز فصل عن طريق تثبيت قمع مقلوب معدني سماكة 4 mm مطلي بمادة الإيبوكسي بقطر يساوي قطر المفاعل الداخلي على الوجه الداخلي لغطاء المفاعل بحيث يبرز عنق القمع خارج الغطاء الذي بدوره يوصل بخرطوم PVC لنقل الغاز إلى بالون مطاطي خارجي لتجميع الغاز وقياسه عن طريق وزن البالون وتم الإستعانة بتوربين للمساعدة في عملية نقل وتفريغ الغاز.
- 5- تمرير أنبوب معدني سماكة 4 mm بقطر 2 in (إنش) مطلي بمادة الإيبوكسي عبر غطاء المفاعل وعبر جهاز الفصل ومزود بغطاء قابل للفتح والإغلاق بإحكام لتأمين إضافة مواد إلى محتويات المفاعل عند الضرورة.
- 6- تم استخدام محرك ميكانيكي كهربائي معدل بواسطة علبة سرعة بنسبة تخفيض سرعة دوران 100/1 لتصبح عدد دوراته 18 rpm (دورة في الدقيقة) ويتوضع على قاعدة معدنية في منتصف المسافة بين المفاعلين ويخرج منه محور من الكروم يدخل المفاعلين في منتصف ارتفاعها الداخلي ليثبت في نهايته مراوح بلاستيكية لتأمين عملية المزج، هذا المحرك موصول مع مؤقت زمني أوتوماتيكي لضبط عملية تشغيله وإيقافه حسب معدل المزج المطلوب.
- 7- تم تزويد كل من المفاعلين بفتحتين 1، 2 في أسفلها لتمرير دارة مياه تسخين مغلقة مؤلفة من شبكة من خرطوم PVC قطر 0.5 in (إنش) الناشرة للحرارة بحيث تدخل كل مفاعل من الفتحة 1 وتخرج من الفتحة 2 وموصولة مع

سخان مياه كهربائي سعة 60 Liter، ومزودة بمضخة مياه موصولة مع حساس حراري رقمي يقوم بقياس درجة حرارة محتويات المفاعل وإعطاء أمر لتشغيل وإطفاء مضخة مياه التسخين حسب درجة الحرارة المطلوبة التي تعطى للحساس، وزودت بسكورة للتحكم كما يظهر في الصورة (2).

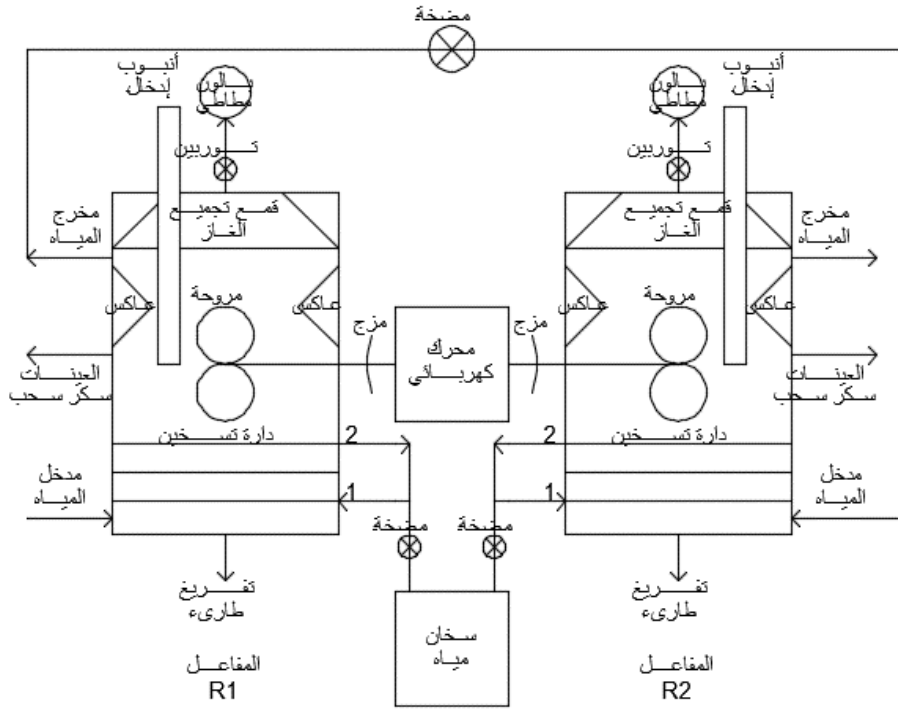
8- تم تزويد كل من المفاعلين بسكر قطر 1 in (إنش) في أسفلها لإدخال المحتويات عن طريق مضخة خارجية وسكر قطر 1 in (إنش) في الأعلى للمخرج، كما زود بسكر قطر 1 in (إنش) آخر في الأسفل للتفريغ الطارئ، وسكر قطر 0.5 in (إنش) في منتصف ارتفاع المفاعل لأخذ العينات.



الصورة (2) المفاعلات مع التعديلات وأجهزة التحكم.



الشكل (3) مخطط عمل النموذج التجريبي.



الشكل (4) مقطع طولي في النموذج التجريبي.

6- تحضير العينات:

تم تحضير ثلاث عينات من مياه الصرف الناتجة عن المسالخ A, B, C كل منها بحجم 25 Liter من المسلخ العام في مدينة النبك - محافظة ريف دمشق، تم تعبئة العينات في خزان مغلق بعد تصفيتها من الشوائب ثم تم نقلها وضخها مباشرة إلى النموذج التجريبي (مخبر الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق).

ملاحظة: جميع العينات المدروسة خالية تماماً من مياه الصرف المحلية الناتجة عن مرافق المسلخ ومن المنظفات.

7- الدراسة التجريبية:

بعد وضع كل عينة في المفاعل R1 في النموذج التجريبي تم أخذ بارامترات التشغيل كما يلي:

- غاز الأوكسجين: تم تشغيل توربين سحب الغاز مباشرة بعد بدء الطور الحمضي لتتم عملية تفريغ غاز الأوكسجين الموجود في المفاعل.

- درجة الحرارة: تم تشغيل النموذج التجريبي مع تثبيت درجة حرارة المفاعلات عند الدرجة 40°C بالنسبة للعينة A، وعند الدرجة 20°C بالنسبة للعينة B، وعند الدرجة 34°C بالنسبة للعينة C.

- معدل المزج: اعتمد معدل المزج 18 rpm (دورة في الدقيقة) (5 دقائق تشغيل و15 دقيقة إطفاء) في النموذج لجميع العينات المدروسة.

- درجة pH وضغط غاز الهيدروجين الجزئي: ترك المفاعل R1 دون تعديل درجة pH مع الأخذ بعين الاعتبار عملية سحب غاز الهيدروجين المتشكل من المفاعل حتى لا يتشكل ضغط هيدروجين جزئي منخفض، وعند انتهاء زمن البقاء الهيدروليكي في المفاعل R1 تم تعديل درجة pH فيه ثم ضخ المحتويات إلى المفاعل R2 الذي يحتوي

مسبقاً على مواد غنية بالأحياء الدقيقة المنتجة للميثان والتي هي عبارة عن الحمأة الناتجة عن عملية معالجة سابقة وذلك بالنسبة لجميع العينات المدروسة.

- زمن البقاء الهيدروليكي: وضعت العينة A في النموذج التجريبي ليتم أخذ زمن البقاء الهيدروليكي في المفاعل R1 حتى ثبات درجة pH عند القيمة 6.1 ليكون $HRT_A1=5$ day ثم ضخت محتويات المفاعل R1 إلى المفاعل R2 ليتم أخذ زمن بقاء هيدروليكي $HRT_A2=5$ day عندما تقل عملية إنتاج الغاز الحيوي ليصبح زمن البقاء الكلي في النموذج $HRT_A=HRT_A1+HRT_A2=5+5=10$ day، وضعت العينة B في النموذج التجريبي ليتم أخذ زمن البقاء الهيدروليكي في المفاعل R1 حتى ثبات درجة pH عند القيمة 6.2 ليكون $HRT_B1=14$ day ثم ضخت محتويات المفاعل R1 إلى المفاعل R2 ليتم أخذ زمن بقاء هيدروليكي $HRT_B2=10$ day عندما تقل عملية إنتاج الغاز الحيوي ليصبح زمن البقاء الكلي $HRT_B=HRT_B1+HRT_B2=14+10=24$ day، وضعت العينة C في النموذج التجريبي ليتم أخذ زمن البقاء الهيدروليكي في المفاعل R1 حتى ثبات درجة pH عند القيمة 5.9 ليكون $HRT_C1=10$ day ثم ضخت محتويات المفاعل R1 إلى المفاعل R2 ليتم أخذ زمن بقاء هيدروليكي $HRT_C2=7$ day عندما تقل عملية إنتاج الغاز الحيوي ليصبح زمن البقاء الكلي $HRT_C=HRT_C1+HRT_C2=10+7=17$ day كما في الجدول (2). كانت مواصفات العينات كما في الجدول (1):

الجدول (1) مواصفات العينات.

	العينة A	العينة B	العينة C
COD mg/l	3760	1730	3850
BOD ₅ ²⁰ mg/l	2500	1400	2800
	0.66*COD	0.8*COD	0.73*COD
TSS mg/l	368	312	475
pH	6.49	6.80	7.82
تاريخها	2017/7/22	2017/3/12	2018/3/19

ويظهر الجدول (2) تغيرات درجة pH خلال زمن البقاء الهيدروليكي في كل من النظامين: ملاحظة 1: لم يتم أخذ قراءات في الأيام 6، 7، 13، 14، 20، 21، 22، 23 بسبب أيام العطلة. ملاحظة 2: تمت عملية تعديل درجة pH بإضافة جرعة من كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) (الكلس) بتركيز 150 g/l [13] بعد أخذ القراءات ذات الخط المزدوج في الجدول (2) والتي تمثل نقطة الانتقال إلى مفاعل طور إنتاج غاز الميثان حيث يشير ثبات درجة pH إلى أن كامل المادة العضوية قد تحولت إلى حموض عضوية وانتهى بذلك الطور الحمضي. ملاحظة 3: تم قياس قيم درجة pH باستخدام جهاز رقمي في المخبر.

الجدول (2) تغيرات درجة pH خلال زمن البقاء الهيدروليكي HRT.

HRT day	A pH	B pH	C pH
0	6.49	6.80	7.82
1	6.20	6.38	7.55
2	6.14	6.35	7.10
3	6.12	6.33	6.70
4	6.09	6.33	6.30
5	<u>6.09</u>	6.33	6.01
8	6.85	6.32	5.99
9	7.13	6.26	5.93
10	7.82	6.20	<u>5.92</u>
11	/	6.15	6.55
12	/	6.16	6.60
15	/	<u>6.20</u>	6.91
16	/	6.60	7.05
17	/	7.00	7.11
18	/	7.10	/
19	/	7.20	/
24	/	7.20	/

النتائج والمناقشة:

في نهاية زمن البقاء الهيدروليكي المفروض لكل عينة تم الحصول على:

1- كفاءة إزالة COD بنسبة 81.65% للعينة A، وبنسبة 64.74% للعينة B، وبنسبة 83.38% للعينة C، كما يظهر في الجدول (3) والشكل (5)، حيث تم تحديد قيم COD باستخدام جهاز الامتصاص الذري مع الكواشف الكيميائية المطلوبة والحاضنة المرافقة في المخبر.

2- كفاءة إزالة BOD_5^{20} بنسبة 88.00% للعينة A، وبنسبة 71.43% للعينة B، وبنسبة 89.29% للعينة C، كما يظهر في الجدول (4) والشكل (6)، حيث تم تحديد قيم BOD باستخدام رؤوس تحديد قيم BOD مع المواد الكيميائية المطلوبة والحاضنة المرافقة.

3- كفاءة إزالة TSS بنسبة 39.68% للعينة A، وبنسبة 56.09% للعينة B، وبنسبة 42.11% للعينة C، كما يظهر في الجدول (5) والشكل (7)، حيث تم تحديد قيم TSS باستخدام جهاز الامتصاص الذري في المخبر.

4- إنتاج 6 Liter من الغاز الحيوي من العينة A، وإنتاج 4 Liter من العينة B، وإنتاج 6.95 Liter من العينة C كما هو موضح في الجدول (6)، حيث تم قياس وزن الغاز الحيوي المنتج في بالون التجميع باستخدام الميزان الدقيق وبعد تحديد الوزن الحجمي للغاز الحيوي بشكل حقيقي في المخبر تم تحويل قيم إنتاج الغاز لواحدة اللتر.

الجدول (3) كفاءة إزالة COD.

HRT day	COD mg/l	كفاءة إزالة COD %
A: 40°C		
0	3760	0.00
5	2480	34.05
10	690	81.65
B: 20°C		
0	1730	0.00
14	1200	30.64
24	610	64.74
C: 34°C		
0	3850	0.00
10	2410	37.41
17	640	83.38

الجدول (4) كفاءة إزالة BOD₅²⁰.

HRT day	BOD ₅ ²⁰ mg/l	كفاءة إزالة BOD ₅ ²⁰ %
A: 40°C		
0	2500	0.00
5	1600	36.00
10	300	88.00
B: 20°C		
0	1400	0.00
14	600	57.15
24	400	71.43
C: 34°C		
0	2800	0.00
10	1400	50.00
17	300	89.29

الجدول (5) كفاءة إزالة TSS.

HRT day	TSS mg/l	كفاءة إزالة TSS %
A: 40°C		
0	368	0.00
5	315	14.41
10	222	39.68
B: 20°C		

0	312	0.00
14	250	19.88
24	137	56.09
C: 34°C		
0	475	0.00
10	350	26.32
17	275	42.11

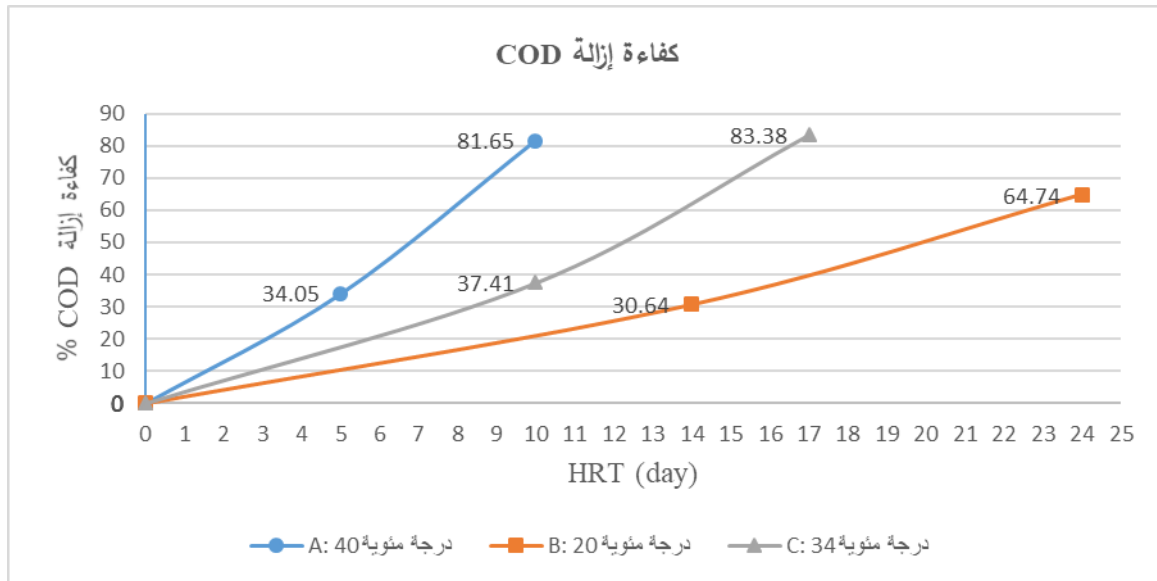
الجدول (6) إنتاج الغاز الحيوي.

HRT day	إنتاج الغاز الحيوي (تراكمي) Liter		
	A: 40°C	B: 20°C	C: 34°C
0	0	0	0
1	0.5	0	0.55
2	1.5	0	1.05
3	2	0.5	1.7
4	2.5	0.5	2.15
5	3	1	2.9
8	4	1	3.3
9	5.5	1	3.6
10	6	1	3.75
11		1.5	4.5
12		1.5	5.7
15		1.5	6.3
16		2	6.75
17		3	6.95
18		3.5	
19		4	
24		4	

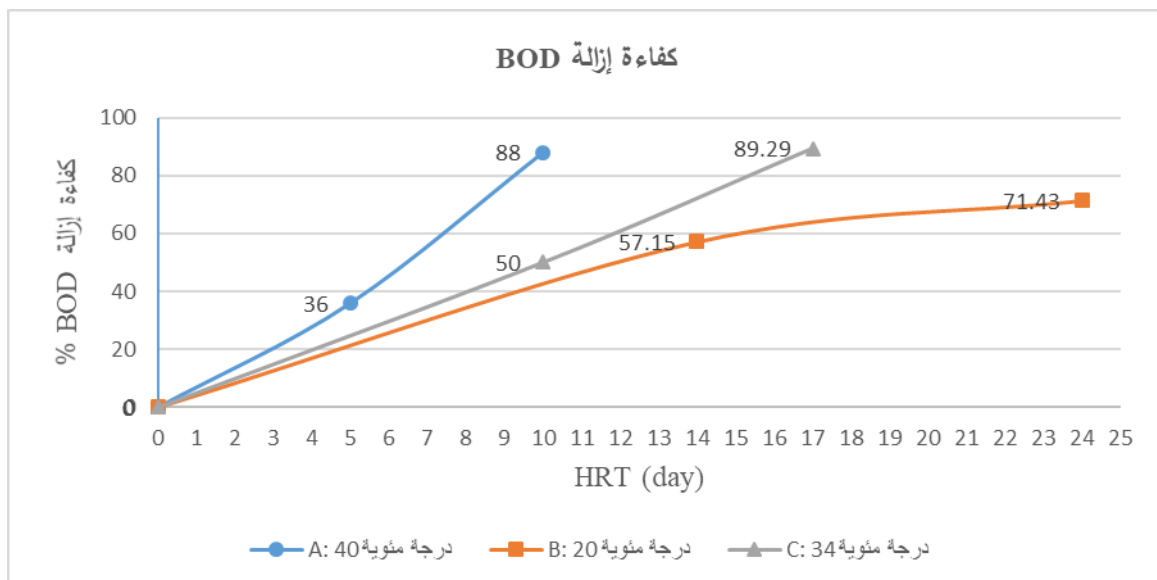
$$\text{Biogas Production} = \frac{6*1}{V_A=25} = 0.24 \text{ L(gas)/L(مواد)} \quad (1)$$

$$\text{Biogas Production} = \frac{4*1}{V_B=25} = 0.16 \text{ L(gas)/L(مواد)} \quad (2)$$

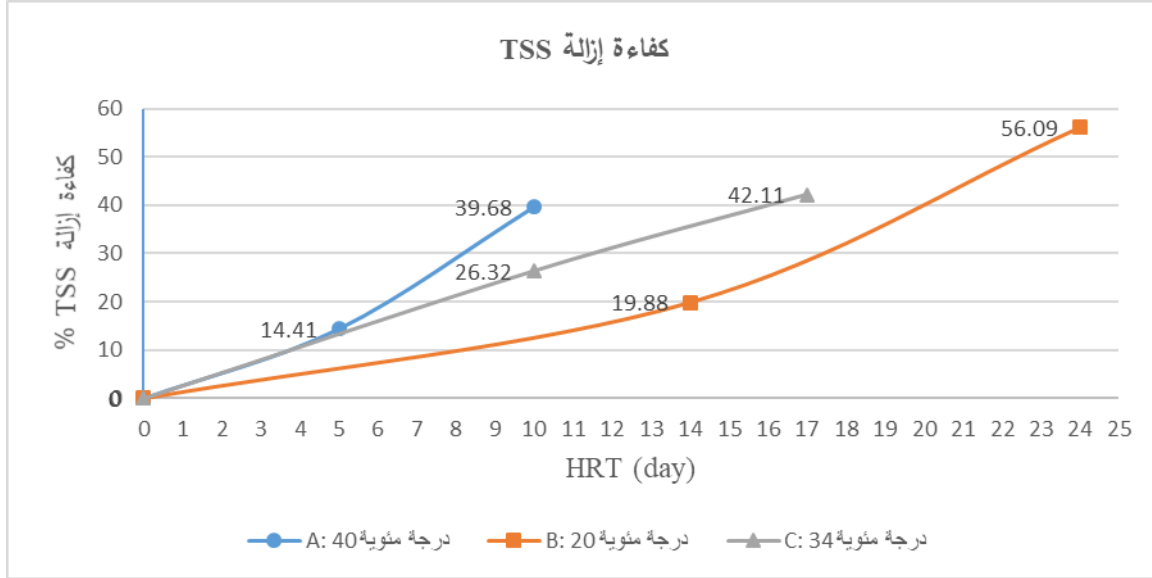
$$\text{Biogas Production} = \frac{6.95*1}{V_C=25} = 0.28 \text{ L(gas)/L(مواد)} \quad (3)$$



الشكل (5) كفاءة إزالة COD.



الشكل (6) كفاءة إزالة BOD₅²⁰.



الشكل (7) كفاءة إزالة TSS.

حيث تم أخذ ثلاث قيم لـ COD، BOD، TSS هي: قيمة أولية وقيمة عند نهاية الطور الحمضي بعد ثبات درجة pH وقيمة نهائية عند نهاية طور إنتاج غاز الميثان بعد توقف عملية إنتاج الغاز الحيوي وذلك لكل عينة مدروسة ليتم رسم المنحنيات.

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- تم الحصول على أكبر كفاءة إزالة COD=83.38% وأكبر كفاءة إزالة BOD=89.29% وأعلى إنتاج من الغاز الحيوي 6.95 Liter عند درجة الحرارة المثالية 34°C وبزمن بقاء هيدروليكي 17 day وذلك للعينة C.
- 2- تم الحصول على كفاءة إزالة COD=81.65% وكفاءة إزالة BOD=88.00% أقل وإنتاج غاز حيوي 6 Liter أقل عند درجة الحرارة 40°C ولكن بزمن بقاء هيدروليكي أقل أيضاً 10 day وذلك للعينة A.
- 3- تم الحصول على أقل كفاءة إزالة COD=64.74% وأقل كفاءة إزالة BOD=73.43% وأقل إنتاج من الغاز الحيوي 4 Liter عند درجة الحرارة 20°C عند أكبر زمن بقاء هيدروليكي 24 day وذلك للعينة B.
- 4- تم الحصول على أكبر كفاءة إزالة TSS=56.09% عند زمن بقاء هيدروليكي 24 day وذلك بالنسبة للعينة B وكفاءة إزالة أقل TSS=42.11% عند زمن بقاء هيدروليكي 17 day وذلك بالنسبة للعينة C وأقل كفاءة إزالة TSS=39.68% عند زمن بقاء هيدروليكي 10 day وذلك بالنسبة للعينة A، أي أن كفاءة إزالة TSS تتناسب طردياً مع زمن البقاء الهيدروليكي.

يمكن أن يعمل نظام المعالجة اللاهوائية ضمن المجال الحراري الطبيعي (Mesophilic) أي بدرجة حرارة الغرفة وبالتالي توفير المزيد من الطاقة المصروفة على رفع درجة الحرارة لكن بكفاءة معالجة أقل، كما يمكن دراسة بقية البارامترات المؤثرة بهدف إمكانية تحسين كفاءة المعالجة في هذه الحالة.

References:

- [1] RAJESHWARI, K. V., BALAKRISHAN, M., KANSAL, A, LATA, A., KISHORE, V. V. N. *State of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment*. RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS PERGAMON, Vol. 4, 2000, 135-156.
- [2] RUIZ, M. C., VEIGA, P. D., & BLAZQUEZ, R. *Treatment of slaughterhouse wastewater in a UASB reactor and an anaerobic filter*. Bioresource Technology La Coruna, Vol. 60, No. 3, 1997, 251-258.
- [3] PARAJULI, P. *Biogas measurement techniques and the associated errors*, University of Jyvaskyla, 2011, 38.
- [4] ADEKUNLE, K. F., OKOLIE, J. A. *A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion*. Advances in Bioscience and Biotechnology Nigeria, Vol. 6, 2015, 205-212.
- [5] KE, S., SHI, Z., FANG, H. H. P. *Applications of two-phase anaerobic degradation in industrial wastewater treatment*. Int. J. Environment and pollution Changsha, Honk Kong, Vol. 23, No. 1, 2005, 65-80.
- [6] BEUX, S., NUNES, E. and BARANA, A. C. *Effect of Temperature on Two-phase Anaerobic Reactors Treating Slaughterhouse Wastewater*. BRAZILIAN ARCHIVES OF BIOLOGY AND TECHNOLOGY BRAZIL, Vol. 50, No. 6, 2007, 1061-1072.
- [7] MEDINA, M. H., MANRIQUEZ, R. J. *Anaerobic Digestion of Sluaghterhouse Solid Waste for Optimization of Biogas Production*. Int. j. Environ. Res, Vol. 8 No. 2, 2014, 483-492.
- [8] INMAN, D. C. *Comparative Studies of Alternative Anaerobic Digestion Technologies*, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2004, 74.
- [9] SIVARAJAN, P., ARUTCHELVAN, V., NAGARAJAN, S. *START-UP REGIME OF TWO-PHASE UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET REACTOR*. Jr. of Industrial Pollution Control, Vol. 26 No. 2, 2010, 225-230.
- [10] APPELS, L., BAEYENS, J., DEGREVE, J., DEWIL, R. *Principles and potential of the anaerobic digestion*. Progress in Energy and Combustion Science ELSEVIER, Vol. 34, 2008, 755-781.
- [11] GERARDI, M. H. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, New Jersey, 2003, 177.
- [12] GUANG, L., JING, L., and HAN, X. *Efficiencies of Mesophilic Two-Phase Anaerobic Digestion*. International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 4, No. 5, 2013, 576-581.
- [13] JUNG, J., LEE, S., SHIN, P., and CHUNG, Y. *Effect of pH on Phase Separated Anaerobic Digestion*. Biotechnol. Bioprocess Eng Korea, Vol. 5, 2000, 456-459.
- [14] FELDER, R. M., ROUSSEAU, R. W. *ELEMENTARY PRINCIPLES OF CHEMICAL PROCESS*, Third Edition, John wiley & Sons, Inc., USA., 2005, 675.
- [15] WIRTSCHAFTSBERATUNG, B. *Anaerobic treatment of municipal wastewater in UASB-reactors*. Technical Information Germany, Vol. W6e, 2001, 1-10.
- [16] MACAPAGAL, D. C., VELASQUEZ, E. G. *Proposed Design of Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) for Mapua Institute of Technology*, Mapue Institute of Technology, Mapue City, 2014, 59.
- [17] DEMIRAL, B., YENIGUN, O. *Two-phase anaerobic digestion Processes: a review*. JOURNAL OF CHEMICAL TECHNOLOGY & BIOTECHNOL, Vol. 77, 2016, 743-755.
- [18] American National Standards Institute ANSI, MH2, February 11th, 2017.

- [19] SINPAISANSOMBOON, N., INTANON, P., RAKWICHIAN, W., KONGSRICHAROERN, N. *Development of Two-Stage Anaerobic Digesters for Biogas Production from Biodegradable Waste of Phitsanulok Municipal*, International Journal of Renewable Energy, Vol. 2, No. 2, 2007, 63-71.