مؤشرات أو ضوابط عملية الهضم اللاهوائي

١- العوامل المؤثرة في عملية التخمر اللاهوائي

تتعلق كفاءة التخمر اللاهوائي ببعض العوامل المتغيرة والتي تعتبر حساسة ومتزامنة ويمكن وصفها أيضا بأنها حرجة، وتأتي أهمية ودقة هذه العوامل بأنها توفر البيئة الملائمة للبكتريا، حيث أن نمو ونشاط البكتريا اللاهوائية يتأثر بشكل كبير بعدة ظروف مثل: استبعاد الأوكسجين ودرجة الحرارة المستقرة وقيمة ال PH والمثبطات ..... الخ.

إن أكثر ما يميز البكتريا اللاهوائية أنها شديدة الحساسية، ومن هنا تنبع أهمية المراقبة الدقيقة لجميع العوامل المحيطة بعملية التخمر اللاهوائي من أجل إنجاح هذه العملية والحصول على أفضل النتائج.

يمكن التمييز بين نوعين من المتغيرات أو العوامل: عوامل البيئة المحيطة المؤثرة على عملية الهضم اللاهوائي (درجة الحرارة – PH ....) وعوامل التشغيل (HRT[٢] – OLR[١] ....)

١-١- عوامل البيئة المحيطة بالهضم الاهوائي AD[٣] PARAMETERS

١-١-١- درجة الحرارة:

تتم عملية التخمر اللاهوائي عند درجات حرارة مختلفة والتي تقسم بشكل عام إلى ثلاثة مجالات:

- Psychrophilic درجات حرارة منخفضة C° تحت ٢٥
- Mesophilic درجات الحرارة المعتدلة (C° ٣٠ – ٤٢)
- Thermophilic درجات الحرارة العالية (C° ٤٣ – ٥٥)

تموت معظم الكائنات الحية الدقيقة في درجة حرارة أكثر من ٦٠ C°، ويكون نمو البكتريا بطيء إذا كانت درجة الحرارة اقل من ٢٥ C° وبالتالي لا يمكن استخدامها في المخمرات.

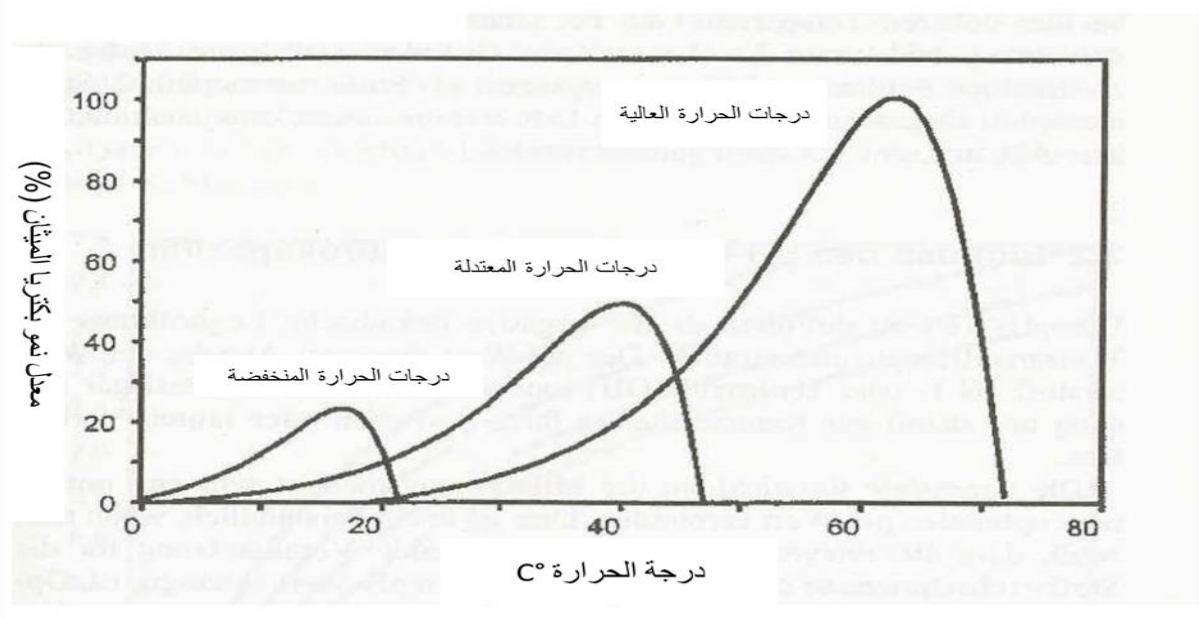
إن ثبات درجة الحرارة هو عامل حاسم ومهم في عملية التخمر اللاهوائي، فقد بينت التجارب أن زيادة أو نقصان درجة مئوية واحدة يؤدي إلى تثبيط مؤقت لعمل البكتريا، والشكل (١) يبين العلاقة بين درجات الحرارة C° و معدل نمو بكتريا الميثان.

---

[1] OLR : معدل التحميل بالمادة العضويةorganic loading rate

[2] HRT: زمن البقاء الهيدروليكي hydraulic retention time :

[3] AD: الهضم اللاهوائي anaerobic digestion



الشكل (١) العلاقة بين درجات الحرارة ومعدل نمو بكتريا الميثان (للاطلاع)

تعمل معظم المخمرات الحديثة ضمن المجال الحراري Thermophilic لما تؤمنه من فوائد مقارنة بالمجال الحراري Mesophilic. يبين الجدول (١) مقارنة بين عملية التخمر اللاهوائي التي تتم ضمن درجات الحرارة المرتفعة والتي تتم ضمن درجات الحرارة المعتدلة من حيث المزايا والمساوئ.

	درجات الحرارة المعتدلة Mesophilic (٤٢ – ٣٠ C°)	**درجات الحرارة المرتفعة Thermophilic (٥٥ – ٤٣ C°)**
المزايا	- استقرار جيد لعملية التخمر اللاهوائي - عدم الحاجة إلى عمليات تحكم معقدة - تركيز بخار الماء ضمن الغاز الحيوي الناتج قليل نسبيا	- نمو سريع للأحياء الدقيقة. - - زيادة معدل تفكك المادة العضوية. - إنتاجية عالية من الغاز الحيوي في وحدة الزمن. - زمن تخمر قصير نسبيا. - القضاء على العوامل الممرضة في الراسب الناتج
المساوئ	- زمن التخمر طويل نسبياً - انتاجية أقل من الغاز الحيوي - معدل تحلل أقل	- استقرار أقل لعملية التخمر اللاهوائي. - الحاجة إلى عمليات تحكم معقدة. - تركيز بخار الماء ضمن الغاز الحيوي عالي.

١-١-٢- درجة الحموضة pH:

تعد درجة الحموضة pH إحدى المؤشرات الهامة في عملية الهضم اللاهوائي، حيث تؤثر قيمتها على نمو البكتريا وخاصة بكتريا الميتان والتي تعتبر حساسة جداً لدرجة الحموضة، وأيضا تؤثر درجة الحموضة على تفكك بعض المركبات الهامة في عملية الهضم اللاهوائي مثل الحموض العضوية. تتغير درجة الحموضة في كل مرحلة من مراحل عملية الهضم، ففي المرحلة الأولى من عملية تكوين الأحماض

يكون pH أقل من ٦، وتزداد درجة الحموضة بمرور الزمن وذلك عندما تتحلل الاحماض المتطايرة ومركبات النتروجين لإنتاج الميثان.
تكمن أهمية قيمة ال pH أثناء عملية التخمر اللاهوائي، بأنها تعطينا دلالات على سير عملية التخمر، فارتفاع القلوية أثناء الانتقال من مرحلة التحميض إلى مرحلة تشكل الميثان هو مؤشر على سير العملية بشكل جيد.
إن التعامل مع البكتريا اللاهوائية من جهة، والتداخل بين العوامل المؤثرة في عملية التخمر من جهة ثانية تجعل عملية التخمر اللاهوائي من العمليات الكيميائية المعقدة فعلى سبيل المثال: إن قيمه ال pH لعملية الهضم اللاهوائي عند درجه الحرارة Termophilic هي أعلى من قيمتها عند درجة الحرارة Mesophilic، حيث إن قابلية انحلال غاز ثاني اوكسيد الكربون بالماء وتشكل حمض الكربونيك تقل عند زيادة درجه الحرارة وبالتالي تنخفض الحموضة ويزداد رقم ال pH. بينما تراكم الحموض الدهنيه القابلة للتطاير VFA يخفض قيمه ال pH.
تعتبر متطلبات درجة الحموضة لعملية الهضم اللاهوائي مرنة، وتنحصر ضمن مجال معين. أظهرت التجارب أن تشكل الميتان يحدث في مجال لقيم ال pH (٥.٥ – ٨.٥)، والمجال المثالي بالنسبة لمرحلة تشكل الميثان هو (٦.٧ – ٧.٥)، أما بالنسبة لمرحلة التحميض فان المجال المثالي لقيم ال pH يتراوح بين (٥.٢ – ٦.٣).

١-١-٣- العناصر المغذية للبكتريا اللاهوائية (Nutrients):

بما أن عملية الهضم اللاهوائي هي عملية بيولوجية تقوم بها كائنات مجهرية مختلفة، فإن العناصر الغذائية اللازمة لنمو تلك الكائنات الدقيقة ضرورية لهذه العملية، حيث أن العناصر الغذائية تؤمن الدعائم الأساسية للنمو الخلوي للبكتريا، وتضمن استمرار قدره هذه الكائنات الدقيقة على اصطناع الأنزيمات التي تقود وتحفز العمليات الكيميائية والحيوية داخل المخمر. من ناحية أخرى، قد يكون ارتفاع تركيز العناصر الغذائية مثبطًا لنمو البكتريا اللاهوائية . يصعب تحديد التراكيز المثالية لهذه المتطلبات الغذائية، والتي تقسم – وفقا للكميات التي تحتاجها البكتريا – إلى مجموعتين، عناصر كبرى (Macronutrients) وعناصر صغرى (Micronutrients). إن الكمية الغير كافية أو الزائدة من العناصر الكبرى والصغرى تؤدي إلى تثبيط التفاعل وعدم استقرار عملية الهضم اللاهوائي ، وقد بينت التجارب أن العديد من العناصر الأساسية تصبح سامه عندما تتواجد بتراكيز عالية.
ويبين الجدول (٢) الحدود الدنيا والعظمى لبعض العناصر المغذية الهامة في عملية الهضم اللاهوائي **(للاطلاع)**

الحدود الدنيا والعظمى للعناصر المغذية الهامة في عملية التخمر اللاهوائي **(للاطلاع)**

العناصر الكبرى Macronutrients (g/L)

	نتروجين	فوسفور	كبريت	بوتاسيوم	مغنيزيوم	صوديوم	كالسيوم	حديد
الحدود الدنيا	٠.١٥	٠.٠٥	٠.٠٥	٠.٠٧٥	٠.٠١	٠.٠٤٥	٠	٠.٠١
	--	--	--	--	--	--	--	--
الحدود العظمى	٠.٤٥	٠.١٥	٠.١	٠.٢٥	٠.٠٤	٠.٢	٠.٠٧٥	٠.٢

العناصر الصغرى Micronutrients (mg/L)

	النيكل	الكوبالت	الموليبديوم	النحاس	الزنك	المنغنيز	السيلينيوم
الحدود الدنيا	٠.٥	٠.٠	٠.١	٠	٠	٠	٠.١
	-	-	-	-	-	-	-
الحدود العظمى	٣٠	٢٠	٠.٣٥	٠.٧٥	٣	٠.١	٠.٣٥

١-١-٤- الأمونيا (Ammonia)

تتحرر الأمونيا نتيجة لتخمر الحموض الأمينية والبروتينات، وتتواجد الأمونيا في وسط التخمر اللاهوائي إما على شكل ايونات امونيوم (NH^{+4})، أو على شكل آمونيا حرة NH_3 والتوازن بينهما يعطى بالمعدلة التالية:

$$NH^{+4} \rightleftharpoons NH3 + H^{+}$$

عند القيم المعتدلة لل pH فإن ٩٩ % من الأمونيا يكون على شكل أمونيوم ذو الأثر السمي القليل مقارنه بالأمونيا الحرة NH_3، ولكن عند القيم العالية لل pH والتي تكون منسجمة مع التخمر اللاهوائي وخاصةً مرحلة تشكل الميثان، فإن التوازن في المعادلة السابقة ينحرف نحو تشكل NH_3 ذو الأثر السمي على البكتريا.

إن قدرة NH_3 على المرور عبر الأغشية الخلوية ودخول الخلية البكتيرية اكبر من قدرة NH^{+4}، وعليه فإن تركيز الأمونيا الحرة يجب أن لا يتجاوز [mg/L] ١٥٠.

١-١-٥- النسبة C/N:

نسبة الكربون/النيتروجين (C/N) هي أحد المؤشرات التي تستخدم لوصف ملائمة الركيزة للهضم اللاهوائي. يُفترض أن النسبة C/N المثالية للهضم اللاهوائي تتراوح بين (٢٠ –٣٠). في حال كانت نسبة C/N عالية، فإن بكتريا الميثان methanogens سوف تستهلك النيتروجين وسيبقى جزء من الكربون في العملية دون تفاعل، مما يؤدي إلى إنتاج غاز حيوي منخفض، ويمكن أيضًا أن تؤدي نسبة C/N العالية إلى تركيز N منخفض جدًا لنمو الميكروبات. من ناحية أخرى، يمكن أن يؤدي انخفاض نسبة C/N إلى تراكم الأمونيا والذي يؤدي إلى تثبيط عملية الهضم.

يمكن أن يكون التوازن الصحيح للركائز الغنية بالكربون في الهضم اللاهوائي ضروريًا للحصول على نسبة C/N مثالية، وهنا يأتي دور التخمر المشترك. فعلى سبيل المثال يوصى باستخدام ركائز غنية بالكربون (الدهون) مع حمأة مياه الصرف الصحي لتحسين أداء عملية الهضم لأن الحمأة وحدها لديها نسبة C/N منخفضة (٥-١٠). أشارت الدراسات إلى أن التخمر المشترك للدهون مع الحمأة أدى إلى تحسين النسبة C/N وزيادة في إنتاج الغاز الحيوي بنسبة تجاوزت ٣٥%.

١-١-٦- السمية والتثبيط (Toxicity and Inhibition):

تعرف السمية أثناء حاله التخمر اللاهوائي بأنها التأثير السلبي – ليس بالضرورة المميت – على العمليات الإستقلابيه للبكتريا، أما التثبيط فيعرف بأنه الاعتلال أو الضعف في عمل أو مهمة هذه البكتريا أو "انخفاض في النمو".

توجد العديد من المواد التي يمكن أن تبطئ أو تخفض معدل الهضم وعند تراكيز عالية يمكن أن تؤدي إلى فشل عمليه الهضم اللاهوائي، مثل المعادن الثقيلة والمنظفات الصناعية والمبيدات والمضادات الحيوية والتي يكون مصدرها من المواد الداخلة إلى الهاضم، أو نواتج ثانوية لعملية الهضم ونتيجة للعمليات الكيميائية داخل المخمر، إن هذه النواتج يمكن أن تكون ضرورية للكائنات الحية الدقيقة عند تراكيز منخفضة، ومثبطة أو سامة بتراكيز أعلى، مثل: الأمونيا ومركبات الكبريت والحموض الدهنية المتطايرة (VFA) والحموض الدهنية طويلة السلسلة (LCFA) والمعادن الثقيلة.

١- ٢- عوامل التشغيل (Operational Parameters)

١-٢- ١- زمن الحضانة الهيدروليكي (hydraulic retention time):

يعرف بأنه معدل الفترة الزمنية لبقاء الركيزة داخل المخمر، ويرتبط هذا الزمن بحجم المخمر وحجم الركيزة الداخلة إلى المخمر وفق المعادلة التالية :

$$VR = HRT \times V$$

حيث:

VR : حجم المخمر $[m^3]$

HRT : زمن الحضانة الهيدروليكي [day] (hydraulic retention time)

V : حجم الركيزة الداخلة إلى المخمر في اليوم $[m^3/day]$

نلاحظ من المعادلة السابقة أن زيادة زمن الحضانة الهيدروليكي يؤدي إلى زيادة حجم المخمر، أي زيادة في تكاليف إنشاء المخمر وعليه فإن زمن البقاء الهيدروليكي يعتبر أحد العوامل التي تؤثر في الجدوى الاقتصادية لإنشاء واستثمار المخمرات، وهنا يأتي دور البحث العلمي في تحديد زمن البقاء المناسب، حيث تجرى التجارب على المواد المراد تخميرها، وذلك ضمن وحدات تخمير مخبريه صغيرة، ويتم تحديد الخط البياني للعلاقة بين إنتاج الغاز الحيوي والزمن، ويؤخذ زمن البقاء الهيدروليكي كنسبه ٨٠% من زمن التجربة الكلي أي بعد وصول إنتاج الغاز الحيوي إلى حدوده الدنيا.
يجب الأخذ بعين الاعتبار ألا يكون زمن البقاء الهيدروليكي قصيراً لكي لا تكون كميه البكتريا المزالة مع الراسب أكبر من كميه البكتريا المعاد تكاثرها.

١-٢-٢- الخلط (Mixing):

يعتبر الخلط المناسب أمرًا ضروريًا لتحقيق الأداء الأمثل لعملية التخمر اللاهوائي. يوفر الخلط اتصالًا وثيقًا بين المواد المهضومة والكتلة الحيوية النشطة، و ينتج تجانسًا وتماثلاً للظروف الكيميائية (مثل الركيزة والمواد الوسيطة والنهائية الناتجة)، والظروف الفيزيائية (مثل درجة الحرارة) في جميع أنحاء الهاضم. من ناحية أخرى يمنع الخلط أيضا تجمع المادة العضوية أسفل المخمر، ويزيل الطبقة المتشكلة على السطح والتي تلعب دور العازل وتمنع الغاز الحيوي من الخروج للأعلى. ولاحظ الباحثون ان الخلط المناسب يؤدي إلى تحسن في إنتاج الغاز الحيوي بنسبة يمكن أن تصل إلى ١٥%.
إن الاحتكاك بين المادة العضوية والبكتريا والذي يؤمنه الخلط، يعطي مجالاً أكبر لتفكك المادة العضوية ويحسن من أداء الهاضم. يحدث الخلط الطبيعي إلى حد ما في خزان الهضم بسبب ارتفاع فقاعات الغاز، ومع ذلك هذا لا يكفي لتحقيق الأداء الأمثل، لذلك هناك حاجة إلى خلط إضافي. يمكن تحقيق الخلط من خلال طرق مختلفة، وذلك باستخدام أنظمة التحريك الميكانيكية (التوربينات ذات الشفرة المسطحة منخفضة السرعة)، وعن طريق إعادة تدوير الراسب الناتج عن عملية التخمر أو الغاز الحيوي باستخدام المضخات.
أكدت العديد من الدراسات على أهمية الخلط الكافي لتحسين توزيع الركائز والأنزيمات والكائنات الحية الدقيقة في جميع أنحاء الهاضم، وتعتبر مده الخلط المثالية هي ١/٤ ساعة كل ٣/٤ ساعة، وذلك عند استخدام خلاط آلي مع مؤقت يتوضعان غالباً أعلى المخمر.

نهاية الجلسة