الطاقات المتجددة

المحاضرة (١٠)

طاقة الكتلة الحيوية (الغاز الحيوي)

نظري

الدكتور داود ملوك

طاقة الكتلة الحيوية

١- مدخل

تعد الطاقة المتجددة مهمة لإنتاج الطاقة في المستقبل وتتميز مصادر هذه الطاقات بقابليتها للتجدد. ينطوي استخدام الطاقة المتجددة على العديد من الفوائد مثل خفض انبعاثات الغازات الدفيئة وتنوع مصادر الطاقة وتقليل الاعتماد على الوقود الاحفوري.

تشمل الطاقة المتجددة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة المائية والطاقة الحرارية الأرضية وطاقة الكتلة الحيوية، ويعتبر استخدام الكتلة الحيوية لإنتاج الطاقة (أي الطاقة الحيوية) واحداً من مصادر الطاقة البديلة والمستدامة الواعدة، حيث يتم إنتاج هذه الطاقة من مجموعة واسعة من المواد العضوية (الاخشاب – المخلفات النباتية والحيوانية – مخلفات بشرية – .... إلخ) إما بشكل مباشر، أو بطرق تحويلية خاصة كتقنية الغاز الحيوي عن طريق التخمر اللاهوائي للمخلفات العضوية.

لعدة سنوات كان البحث عن مصادر بديلة للطاقة هو الدافع الأساسي لاستخدام تكنولوجيا الغاز الحيوي أو تكنولوجيا التخمر اللاهوائي، وفي غضون ذلك بدأت وجهات نظر أخرى – خصوصاً في مضمار حماية البيئة والحد من التلوث – تأخذ أبعادها، نظراً لأن استخدام الغاز الحيوي (باعتباره أحد مصادر الطاقات المتجددة) يقلل من انبعاث الغازات الدفيئة وبالتالي الحد من ظاهره الاحتباس الحراري، الأمر الذي يتماشى مع الأهداف التي جاءت على خلفيه اجتماع الدول الأعضاء في هيئه الأمم المتحدة عام (١٩٩٤) وبروتوكول كويوتو عام (١٩٩٧) للحد من مسببات انبعاثات الغازات المؤدية لارتفاع حرارة الكره الأرضية وترشيد استهلاك الطاقة، وذلك عن طريق منع انبعاث غاز N2O و CH4 الناتجان عن تحلل المخلفات العضوية بواسطة تخمير هذه المخلفات في وحدات إنتاج الغاز الحيوي والاستفادة من غاز الميتان (أحد مكونات الغاز الحيوي) في توليد الطاقة الكهربائية والحرارية.

إن إحدى مزايا الغاز الحيوي هي أنه يمكن إنتاجه من العديد من المواد العضوية التي يمكن أن تُهدر بطريقة أو بأخرى. والغاز الحيوي عبارة عن خليط غاز من الميثان بشكل رئيسي (CH4) وثاني أكسيد الكربون (CO2) الذي يتم إنتاجه بواسطة الكائنات الحية الدقيقة تحت الظروف اللاهوائية، ويحتوي الراسب الناتج عن عملية الهضم على مواد مغذية و يستخدم كسماد عضوي أو محسنات للتربة. ويمكن إنتاج الغاز الحيوي في مستويات مختلفة، ابتداءاً من المخمرات المنزلية، وليس انتهاءاً بالمنشآت الضخمة العملاقة للطاقة المركزية والتي تقوم بإمداد الغاز والكهرباء للشبكة الوطنية.

٢- لمحة تاريخية

ظلت الكتلة الحيوية المصدر الرئيسي للحصول على الحرارة والضوء في مختلف بقاع العالم منذ زمن طويل، وقد حل محلها في نهاية القرن التاسع عشر وقود الفحم والنفط في الدول الصناعية بينما ظل استخدامها واسعا في الدول النامية، وقد أدى نقص الطاقة و تنامي القلق البيئي إلى إعادة استخدام الكتل الحيوية مره أخرى في أنحاء العالم وبالذات في أوربا.

يعود إنتاج الغاز الحيوي إلى العام ١٧٧٦ في إيطاليا عن طريق العالم الكسندر فولتا، حيث عرف في ذلك الوقت بغاز المستنقعات، نظراً لإنتاجه من البحيرات المحتوية على المخلفات

النباتية المنحلة جزئياً، وتعود أولى محاولات إنتاجه في الهند عام ١٨٩٠ وقد وضع برنامج حكومي مستقل لإنشاء قرابة مليون مخمر لإنتاج الغاز الحيوي.
وفي المملكة المتحدة تم توثيق إنتاج وجمع الغاز الحيوي من العمليات البيولوجية لأول مره عام ١٨٩٥، ومنذ ذلك الحين تطورت العملية وطبقت بشكل أوسع لتشمل معالجه المياه العادمة وتجانس أو موازنة الحمأة.

أما في الصين الشعبية فقد بدأت محاولات إنتاجه عام ١٩٢٠ وذلك بمحاولات فرديه، إلى أن بدأ البرنامج القومي عام ١٩٧٠ بإنشاء حوالي خمسه ملايين وحده تخمير منزليه للغاز الحيوي تتراوح أحجامها من ٤ – ٦٠ متر مكعب.
في عام ١٩٤٠ بدأ انتشار استعمال تكنولوجيا الغاز الحيوي من مخلفات الصرف الصحي في الولايات المتحدة الأمريكية، وفي الوقت نفسه نشط الفرنسيون أيضا في إنشاء وحدات للغاز الحيوي بلغ عددها ألف وحده، بالإضافة إلى بعض الوحدات في بلدان شمال إفريقيا.
تاريخيا – وبشكل عام – كان الهضم اللاهوائي مرتبط بشكل رئيسي بمعالجه روث الماشية والحمأة الناتجة عن المعالجة الهوائية للمياه العادمة، في الوقت الحالي يتم التخمر المشترك لروث الماشية (الأبقار – الخنازير – الدواجن) مع المخلفات الزراعية من أجل زيادة إنتاج الغاز الحيوي.
أدت أزمة الطاقة في سبعينيات القرن الماضي، إلى زيادة الاهتمام باستخدام الطاقات المتجددة خاصة تقنيه الغاز الحيوي، من أجل إيجاد بديل عن الوقود الإحفوري كمصدر للطاقة، ولإيجاد حلول بيئية لمعالجه المخلفات التي تسبب تلوث سطح الأرض.

٣- تقنية إنتاج الغاز الحيوي – الهضم اللاهوائي

٣-١- مراحل عملية التخمر اللاهوائي

التخمر اللاهوائي يحول المواد العضوية إلى غاز حيوي من أجل حفظ الطاقة، حيث تقوم فيها الكائنات الحية الدقيقة بتحويل المواد العضوية إلى غاز حيوي في ظل ظروف لا هوائية. يتضمن التخمر اللاهوائي أربع مراحل رئيسية هي: الحلمة (hydrolysis)، التحميض (acidogenesis)، تشكل حمض الخل (acetogenesis) ومرحلة تشكل الميثان (methanogenesis).

٣-١-١- مرحلة الحلمهة (hydrolysis)

الحلمهة أو التحلل المائي (Hydrolysis) هو المرحلة الأولى من التخمر اللاهوائي. خلال التحلل المائي، تتحلل ركائز معقدة مثل المواد العضوية التي تحتوي على البروتينات والكربوهيدرات والدهون إلى جزيئات أبسط قابلة للذوبان. تتحلل السكريات إلى سكريات بسيطة، والبروتينات إلى الأحماض الأمينية، والدهون إلى الجلسرين والأحماض الدهنية طويلة السلسلة Long Chain Fatty Acid (LCFA).
يعتبر التحلل المائي خطوة مهمة في عملية التحلل البيولوجي اللاهوائي (وخاصة بالنسبة للدهون حيث يتم تكوين الحموض الدهنية طويلة السلسلة LCFA). وبتعريف أخر يمكن وصف التحلل المائي بأنه انهيار الركيزة العضوية إلى منتجات أصغر، بحيث يمكن بعد ذلك تناولها وتحطيمها بواسطة البكتيريا اللاهوائية.

٣-١-٢- مرحلة التحميض (Acidogenesis)

التكوُّن الحامضي أو مرحلة التحمض Acidogenesis، والذي يُطلق عليها أيضًا التخمر (fermentation)، ويتم خلال هذه المرحلة تحويل منتجات التحلل المائي أو منتجات مرحلة الحلمهة إلى الأحماض الدهنية المتطايرة (VFAs) والكحولات والهيدروجين (H_2) و CO_2.

٣-١-٣- مرحلة تشكل حمض الخل (acetogenesis)

في مرحلة تشكل حمض الخل acetogenesis تتحول الحوض العضوية والمركبات الأخرى – ويطلق عليها عادة منتجات وسيطة متخمرة fermentative intermediates – إلى حمض الخل (acetic acid) وثاني أوكسيد الكربون والهيدروجين.

٣-١-٤- مرحلة تشكل غاز الميثان (Methanogensis)

تتمثل الخطوة الأخيرة لعملية الهضم اللاهوائي في تكوين الميثان methanogenesis، وتعمل ضمن هذه المرحلة مجموعتان رئيسيتان من أجناس بكتريا الميثان، حيث يتم إنتاج غاز الميثان CH_4، إلى جانب غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2. هناك مساران رئيسيان لمرحلة تكوين الميثان. في المسار الأول تقوم بكتريا (acetoclastic methanogens) والتي تهيمن على ٩٠% من تعداد بكتريا الميثان في هذه المرحلة – والتي تسمى أيضاً في بعض المراجع (acetotrophic methanogens) – باستقلاب حمض الخل (acetic acid) إلى غاز الميثان وغاز ثاني أوكسيد الكربون. وفي المسار الثاني يتم إنتاج غاز الميثان بالإضافة إلى الماء من غاز ثاني أوكسيد الكربون والهيدروجين (بإرجاع ثاني أوكسيد الكربون بالهدروجين) وذلك عن طريق بكتريا (hydrogen-consuming archaea)، والتي تسمى أيضاً البكتريا المُستخدمة أو المُستهلكة للهيدروجين (Hydrogen-utilizing methanogenic bacteria). يتم بشكل عام إنتاج ٧٠% من غاز الميثان خلال العمليات البيولوجية في المسار الأول، و٣٠% في المسار الثاني.

تعتبر مرحلة تشكل الميتان المرحلة الحرجة بالمقارنة مع المراحل السابقة، حيث أن بكتيريا الميثان شديدة الحساسية لظرف التشغيل والبيئة الحاضنة لعمليه الهضم اللاهوائي (درجه الحرارة – PH ....إلخ).

٣-٢- صفات الغاز الحيوي

الغاز الحيوي (biogas) هو غاز قابل للاشتعال يتشكل نتيجة للتفكك البيولوجي للمادة العضوية وذلك بواسطة البكتريا اللاهوائيه، وتتم العملية بالمجمل في ظروف غياب الأوكسجين، وبمعنى أخر إن الغاز الحيوي المتشكل هو أحد نواتج هدم المادة العضوية أثناء عملية تنفس واستقلاب الخلايا البكتيرية. يتم إنتاج الغاز الحيوي باستخدام تقنية التخمر اللاهوائي ضمن هواضم مخصصه،ويتكون بشكل رئيسي من الميثان وغاز ثاني أوكسيد الكربون.

يشتعل الغاز الحيوي دون أن يتصاعد منه دخان مكونا لهب أزرق شديد الحرارة، والطاقة الناتجة من ١ $م^3$ من الغاز الحيوي (نسبة الميتان ٦٥%) تكافئ ٠.٧ لتر بنزين و ٠.٦ $م^3$ غاز طبيعي والطاقة الحرارية الناتجة عن حرق ٠.٨ كغ خشب (١٢% رطوبة). وبالنسبة للاستخدامات المنزلية فإن ١ $م^3$ من الغاز الحيوي تكفي لطهي ثلاث وجبات لعائلة مؤلفة من ٥-٦ أشخاص. وتجدر الإشارة هنا إلى أنه بسبب الصفات الكيمائية والفيزيائية للغاز الحيوي، فإن مواقد غاز البوتان التجارية ليست ملائمة للغاز الحيوي، حيث يلزم ٦ لتر من الهواء لحرق لتر واحد من الغاز الحيوي، لذلك نحتاج إلى مواقد ذات فوهات غاز أكبر.

الغاز الحيوي أخف من الهواء وتبلغ حرارة الاشتعال له ٧٠٠ C° ومن الصعب إسالته، وهو غاز عديم اللون يتطاير بالهواء للأعلى كون وزنه أخف من الهواء. ويعتمد تركيب الغاز الحيوي على تركيب المواد العضوية المتفككة، فإذا كانت المادة العضوية تتكون بشكل رئيسي من الكربوهيدرات تكون نسبة الميثان في الغاز الحيوي أقل مقارنة بالمادة العضوية التي تشكل الدهون النسبة الأكبر من تركيبها. ويتكون الغاز الحيوي بشكل رئيسي من غاز الميثان (٥٥ – ٧٠)% و غاز ثاني أوكسيد الكربون (٣٠ – ٤٥)% ونسبة قليلة (١-٢)% من غازات أخرى مثل / H_2S - H_2 – NH_3 – CO – N_2 – O_2/. ويعتبر غاز الميثان – المكون الرئيسي للغاز الحيوي – هو الغاز الحامل للطاقة.

كيميائيا ينتمي الميثان إلى الألكانات، وهي مركبات عضوية تتكون من الكربون والهيدروجين ذات الصيغة الجزيئية العامة (CnH2n+2) ويعتبر الميتان ابسط مركب ضمن مجموعة الألكانات.

٣-٣- الركيزة - موارد الكتلة الحيوية لإنتاج الغاز الحيوي

تشمل موارد الكتلة الحيوية للغاز الحيوي فئات مختلفة من المواد العضوية. يحكم هذه المواد الخام خصائص معينة تؤثر تأثيرا مباشرا في صلب عملية التخمر اللاهوائي ومنها (الملائمة – الإتاحة – القدرة على التفكك – النقاء)، وتصنف أيضا وفقا لمعايير مختلفة، إحدى هذه التصنيفات يتبع مصدرها الأصلي (زراعي – صناعي – بلدية – مائية) ولكل مادة خام ميزاتها وحدود لاستخدامها وذلك بحسب ذلك الأصل. وتستخدم على نطاق واسع لأغراض وإمدادات الطاقة.

٣-٣-١- فئات الكتلة الحيوية المناسبة كمادة خام لإنتاج الغاز الحيوي

٣-٣-١-١- المخلفات الزراعية Agricultural biogas feedstocks

إن ركائز المواد الأولية المستخدمة لإنتاج الغاز الحيوي مشتقة في المقام الأول من القطاع الزراعي، والذي يمثل المورد الأكبر للمخلفات المستخدمة في هذا المجال.

تتكون هذه المواد الأولية بشكل رئيسي من مخلفات عضوية، أهمها روث الحيوانات والطيور (الأبقار، الخنازير، الدواجن، إلخ). بالإضافة إلى مخلفات المحاصيل والمشتقات الثانوية والنفايات (مثل القش والأعشاب والأوراق والفاكهة والنباتات الكاملة). على مدار العقود الماضية ، تم اختبار فئات جديدة من المواد الأولية مثل محاصيل الطاقة (الذرة، الأعشاب، عباد الشمس، إلخ)، والتي تزرع خصيصًا لإنتاج الغاز الحيوي.

٣-٣-١-١-١- روث الحيوانات والملاط Animal manure and slurries

تعتبر تربية الحيوانات جزءًا مهمًا من القطاع الزراعي في معظم البلدان ، وتشكل الانبعاثات الناتجة عن مخلفات هذه الحيوانات حوالي 18٪ من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري على مستوى العالم. تنبع معظم هذه الانبعاثات من 13 مليار طن من السماد الحيواني الناتج سنوياً في جميع أنحاء العالم.

يمكن استخدام الأسمدة والملاط من مجموعة متنوعة من الحيوانات كمادة لإنتاج الغاز الحيوي (الخنازير، الماشية، الدواجن، وغيرها الكثير)، والتي تتميز بمحتويات مختلفة من المادة الجافة، الروث (١٠ - ٣٠٪ مادة الجافة) أو الملاط سائل (أقل من ١٠٪ مادة الجافة)، ويختلف تكوينها أيضا وفقا لأنواع المنشأ ونوعية الأعلاف الحيوانية. وفي حال تم تخمير روث الأبقار في ظروف درجه الحرارة المعتدله mesophilic، يمكن لإنتاج غاز الميثان أن يصل إلى ١٦٠ LN/Kg VS وذلك بحسب نوعية الغذاء المقدم للأبقار، وتجدر الإشارة إلى انه كلما زادت نسبة البروتين في علف الأبقار زاد إنتاج الميثان.

٣-٣-١-١-٢- مخلفات النبات (المحاصيل) Plant (crop) residues

وتشمل المخلفات النباتية المخلفات الناتجة عن عمليات التصنيع الزراعي ومخلفات الحصاد والنباتات وأجزاء النباتات، والمحاصيل منخفضة الجودة أو الفاسدة، والفواكه والخضروات، والأعلاف التالفة.

تحتاج معظمهم المخلفات النباتية إلى معالجة مسبقة قبل استخدامها في عملية التخمر اللاهوائي، وتتراوح هذه المعالجات المسبقة من بسيطة تتمثل بتفتيت الركيزة، إلى معالجات أكثر تعقيدا تهدف إلى كسر جزيئات السيللوز واللغنوسيللوز من أجل تسهيل عمل الكائنات الحية في هضم المادة العضوية. إن تفتيت الركيزة وتقليل حجمها إلى أقل من ١ سم يسمح للجزيئات بالاختلاط مع أنواع المواد الخام الأخرى ويضمن الحصول على عملية هضم جيدة.

٣-٣-١-١-٣- محاصيل الطاقة Energy crops

تم تطوير زراعة المحاصيل المخصصة خصيصا لإنتاج الطاقة في عام ١٩٩٠ في بلدان مثل ألمانيا والنمسا، على الرغم من أنه تم التحقق من إمكانات الطاقة الكامنة في هذه المحاصيل على شكل غاز ميثان وذلك من خلال الأبحاث والدراسات التي تمت في وقت يعود إلى ١٩٣٠. وتم استخدام العديد من أنواع المحاصيل، سواء النباتات الكاملة أو أجزاء من النباتات، وقد أثبتت أنها مناسبة كمواد خام لإنتاج الغاز الحيوي، ومن هذه الأنواع، الذرة، والأعشاب المختلفة، والحبوب، و البطاطس وعباد الشمس. وتعتبر الذرة هي محصول الطاقة الأكثر استخدامًا في غالبية محطات الغاز الحيوي، وفي التجارب التي أُجريت على الذرة تم الحصول على إنتاج غاز ميثان وصل إلى ٣٦٥ L_N/Kg VS وذلك عند التخمر اللاهوائي للذرة الناضجة ضمن ظروف درجة الحرارة المعتدلة ٣٨ C°. إن زراعة محاصيل الطاقة تتطلب مدخلات عالية من الأسمدة والمبيدات الحشرية والطاقة من أجل الحصاد والنقل، وهذا يقلل إلى حد كبير من الاستدامة البيئية لاستخدامها في الغاز الحيوي وإنتاج الطاقة المتجددة بشكل عام.

٣-٣-١-٢- مخلفات عمليات التصنيع Industrial biogas feedstock

يتم إنتاج كميات كبيرة من المنتجات الثانوية والمخلفات والنفايات من الأنشطة الصناعية التي تعالج المواد الخام الزراعية. تشمل هذه الصناعات الأغذية والمشروبات والأعلاف وتصنيع الأسماك والحليب والنشا والسكر والورق بالإضافة إلى المسالخ. إن المخلفات الناتجة عن هذه الصناعات متنوعة ولديها إمكانات مختلفة لإنتاج الميثان وتختلف في تركيبها ومحتواها من المادة الجافة والمادة العضوية وذلك بحسب أصلها، ولكن معظم هذه المخلفات تتميز بأنها متجانسة وسهلة الهضم غنية بالدهون والبروتينات والسكريات. وعلى سبيل المثال – لا الحصر –: تم تقييم الهضم اللاهوائي لمخلفات صناعة الشوندر السكري مخبريا ضمن ظروف درجة الحرارة المعتدلة ٣٨ C°، وكان إنتاج الغاز الحيوي التراكمي بعد ٦٠ يوم من عملية التخمر ٨٤٥ LN/Kg VS، وكانت نسبة الميتان في الغاز الحيوي ٥٠.٩%.

٣-٣-١-٣- المخلفات البلدية كمادة خام لإنتاج الغاز الحيوي

يُعبر مصطلح المخلفات البلدية عن المخلفات الناتجة عن الاستهلاك البشري بشكل مباشر، ويمكن تصنيفها ضمن فئتين:

٣-٣-١-٣-١- مخلفات عضوية منفصلة عن المصدر

المخلفات العضوية المفصولة عن المصدر تشير إلى الجزء العضوي من النفايات المنزلية مثل نفايات الطعام، نفايات الحدائق وغيرها من النفايات العضوية المماثلة، وتكون مجمعة بشكل منفصل بحيث يتم استخدامها في عملية التخمر اللاهوائي. ولكي تكون المخلفات المنزلية مناسبة لإعادة التدوير عن طريق استخدامها كمادة خام لإنتاج الغاز الحيوي، يجب أن تكون هذه

المخلفات العضوية عالية النقاوة. حيث أن النفايات ذات النقاوة المنخفضة، وذلك بسبب وجود مواد غريبة غير قابلة للهضم، من شانه أن يسبب خللا فنيا وتقنياً في محطات إنتاج الغاز الحيوي. تتمتع النفايات المنزلية العضوية بقدرة تحلل بيولوجي عالية وعائد ميثان جيد، وتتميز بمحتواها المتوازن من العناصر المغذية المواتية لعملية التمثيل الغذائي للكائنات الدقيقة اللاهوائية. وعلى سبيل المثال، وفي إحدى التجارب المخبرية للتخمر اللاهوائي لمخلفات المطبخ بنظام الدفعة الواحدة batch وضمن ظروف درجة الحرارة المعتدلة ٣٧ C°، كان إنتاج الميثان ٦٨٣ LN/Kg VS.

٣-٣-١-٣-٢- حمأة مياه الصرف الصحي Sewage sludge

يعتبر الهضم اللاهوائي المستخدم في معالجة الحمأة الأولية والثانوية الناتجة عن المعالجة الهوائية لمياه الصرف الصحي، تقنية هامة وقياسية في جميع أنحاء العالم.

تستخدم هذه التقنية في آلاف المنشآت كجزء من أنظمة المعالجة الحديثة لمياه الصرف الصحي. تمتلك الحماة الناتجة عن معالجة مياه الصرف الصحي قدرة جيدة على إنتاج الغاز الحيوي، والتي يمكن ان تصل إلى حوالي ٥٥٠ LN/Kg VS.

إن العامل المحدد والمعيق لاستخدام الحمأة كمواد خام لإنتاج الغاز الحيوي هو المحتوى المرتفع للملوثات والمخاطر المتعلقة بتواجدها، وخصوصا عند استخدام الراسب الناتج عن عملية التخمر اللاهوائي كسماد للتربة. غالبًا ما يتم هضم حمأة مياه الصرف الصحي مع الروث أو المخلفات العضوية من الصناعات الغذائية ومخلفات المنازل، مما يحسن إنتاجية الغاز الحيوي واستقرار عملية الهضم.

٣-٣-١-٤- الكتلة الحيوية المائية Aquatic biomass

إلى جانب المواد التي تنتجها مختلف قطاعات المجتمع أنفة الذكر، هناك اهتمام متزايد باستخدام الكتلة الحيوية المائية من مياه البحار والمياه العذبة (الطحالب الكبيرة والصغيرة والأعشاب البحرية). تشير التقديرات إلى أن هناك إمكانات كبيرة لاستخدامها في إنتاج الأغذية والأعلاف وكمواد خام لمختلف الصناعات الأخرى، كما أنها واحدة من أكثر المواد الأولية الواعدة لإنتاج الوقود الحيوي بما في ذلك الغاز الحيوي.

٣-٣-٢- خصائص المادة الخام (الركيزة) المستخدمة لإنتاج الغاز الحيوي

٣-٣-٢-١- الملائمة والتوافر Suitability and availability

يتم اختيار الركائز المستخدمة لإنتاج الغاز الحيوي بناءً على ملائمتها وتوافرها. يتم تحديد الملائمة في هذه الحالة من خلال عدد من الخصائص والمؤشرات مثل محتوى المادة العضوية، الطاقة الكامنة في الركيزة (إمكانية إنتاج الغاز الحيوي والميثان)، وحجم الجسيمات، ومحتوى المادة الجافة، ودرجة الحموضة، ونسبة C:N، والمحتوى من العناصر المغذية الصغرى والكبرى. يقصد بالتوفر أن المواد الأولية يمكن الوصول إليها بسهولة من أجل استخدامها في عملية التخمر اللاهوائي، ويمكن توفيرها بكميات كافية وبشكل متجدد. وبما أن الكائنات الدقيقة اللاهوائية داخل الهاضم تحتاج إلى تزويدها ببعض "المكونات" الأساسية اللازمة لعملية الإستقلاب، فمن الشائع – والمجدي – مزج أكثر من مادة خام (عملية التخمر المشترك) بهدف الحصول على تركيبة ركيزة متوازنة.

٣-٣-٢-٢- الانهضامية (القدرة على التحلل البيولوجي) Digestibility

قابلية الهضم هي المؤشر الرئيسي لتقييم الركيزة وملائمتها لعملية التخمر اللاهوائي، ولها تأثير مباشر على إنتاج الغاز الحيوي والميثان. تشير قابلية الهضم إلى قدرة الركيزة على التحلل والتحطم البيولوجي خلال عملية التخمر اللاهوائي. تعتمد قابلية هضم مادة معينة على محتواها من مركبات سهلة الهضم مثل السكريات البسيطة، فعلى سبيل المثال – لا الحصر – تعتبر مخلفات صناعة السكر (الشوندر السكري) من المواد الجيدة لإنتاج الغاز الحيوي لسهولة تحللها البيولوجي.

يمكن أيضًا أن تحتوي الركيزة على كميات مختلفة ومتنوعة من المركبات ذات القابلية المنخفضة على التحطم والتحلل البيولوجي مثل الليغنوسيللوز. إن من أكثر المواد الخام شيوعاً للاستخدام في عملية التخمر اللاهوائي وأقلها قدرة على التحلل والتحطم البيولوجي هي روث الأبقار. إن وفرة هذه المادة والنتائج البيئية السلبية الناتجة عن تراكمها يجعلانها من أكثر المواد جذباً لعملية التخمر اللاهوائي، على الرغم من الإنتاج المنخفض – نسبياً – من الغاز الحيوي والميثان الذي تنتجه هذه المادة.
إن معدل التحلل البيولوجي اللاهوائي يختلف اختلافا كبيرا باختلاف تكوين المواد العضوية الداخلة إلى المخمر، وتُحدد تركيبة هذه المواد أيضًا مقدار الوقت اللازم لبقاء الركيزة داخل المخمر. وبشكل عام يتم هضم الكربوهيدرات ذات الوزن الجزيئي المنخفض، والأحماض الدهنية المتطايرة والكحولات في غضون ساعات، بينما تحتاج البروتينات والدهون إلى عدة أيام، في حين يحتاج السيللوز إلى عدة أسابيع ليتم تحليلها في الظروف اللاهوائية.

٣-٣-٢-٣- الشوائب وتأثيراتها الغير مرغوبة

إلى جانب المواد الخام، يمكن عن طريق الخطأ تزويد المكونات والمواد غير المرغوب فيها إلى المخمر، وبمجرد دخولها، يمكن أن يسبب وجودها اضطراباً في عملية التخمر اللاهوائي الطبيعية. إن المشاكل التي تسببها هذه المواد هي تقليل الحجم النشط للمخمر (مثلا: الناتج عن ترسيب الرمل في قاع المخمر)، وفشل العملية من خلال تشكل الرغوة، وتشكل الطبقات العائمة، أو حتى الأضرار التي تلحق بالآلات وتجهيزات المخمرات مثل المضخات، وإن أكثر المواد شيوعاً والغير مرغوب بها خلال عملية التخمر اللاهوائي هي الرمل، وغالباً ما يتم دخوله إلى المخمر مع مخلفات الحيوانات (الروث).
إن المواد غير العضوية مثل الزجاج والخردة المعدنية والبلاستيك تعتبر أيضا مكونات غير مرغوب بها في عملية التخمر اللاهوائي. وبمجرد وجودها يصبح من الصعب السيطرة على أثارها السلبية، لهذا السبب يجب أن يتم اختيار جميع أنواع المواد الخام بعناية وأن يتم فرزها مسبقًا بشكل صحيح قبل إدخالها إلى المخمر.

٣-٤- 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.

٣-٤-١- عوامل البيئة المحيطة بالهضم الاهوائي

٣-٤-١-١- 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.

٣-٤-١-٢- 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.
تعتبر متطلبات درجة الحموضة لعملية الهضم اللاهوائي مرنة، وتنحصر ضمن مجال معين. أظهرت التجارب أن تشكل الميتان يحدث في مجال لقيم ال pH يتراوح بين (٥.٥ – ٨.٥).

٣-٤-١-٣- 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، وتقسم هذه العناصر الغذائية – وفقاً 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.

٣-٤-١-٤- 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 NH3 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 اللاهوائية.

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.

٣-٤-١-٥- 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 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.

٣-٤-١-٦- السمية والتثبيط (Toxicity and Inhibition):

تعرف السمية أثناء حاله التخمر اللاهوائي بأنها التأثير السلبي – ليس بالضرورة المميت – على العمليات الاستقلابية 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.

٣-٤-٢- عوامل التشغيل (Operational Parameters)

٣-٤-٢-١- 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. إن 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.

٣-٤-٢-٢- الخلط (Mixing):

يعتبر الخلط المناسب أمراً 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 المحاضرة