الفصل الرابع

عمليات المعالجة الحيوية للمياه الملوثة

Biological Treatments of Contaminated Water

4. 1. مقدمة Introduuction:

لما كانت الكائنات الحية الدقيقة أو الميكروبات هي حجر الزاوية في عمليات المعالجة البيولوجية للمخلفات الملوثة للمياه، ولما كان هذا الكتاب يقدم للقارئ المتخصص، إلى جانب القارئ غير المتخصص، والمهتم بموضوع ملوثات المياه وطرق تنقيتها، فكان من الضروري التعرض - بشكل مبسط - لماهية علم الميكروبيولوجي.

والمعالجة البيولوجية للمخلفات المائية عبارة عن تفاعلات كيماوية تقوم بها الميكروبات، ويتم من خلالها هدم بعض المواد، وبناء مواد أخرى؛ بغرض الحصول على الطاقة؛ ولذلك كان من الضروري أيضًا أن يشمل هذا الفصل فكرة عن تفاعلات التمثيل الميكروبي ومساراته المختلفة التي تسلكها الميكروبات للحصول على الطاقة، وأن يشمل أيضًا العوامل المؤثرة على النشاط الحيوي للميكروبات، وغيرها من العمليات ذات الصلة بالتفاعلات التي تقوم بها الميكروبات، ثم نلقي الضوء أيضًا على أهم المجموعات الميكروبية السائدة في المياه الملوثة، والمجموعات التي تلعب الدور الرئيس في معالجة هذه المخلفات؛ حيث من الضروري للباحثين والعاملين في هذا المجال أن يكونوا على دراية بخصائص هذه الميكروبات، وأماكن تواجدها الطبيعية، والعوامل المؤثرة على نموها ونشاطها التمثيلي.

2.4. بعض أساسيات علم الميكروبيولوجي Some basics of microbiology:

4. 2. 1. التمثيل الميكروبي Microbial metabolism:

منذ زمن ليس بعيدًا كان الناس لا يعرفون ما الذي يجعل عصير الفاكهة يتحول إلى خمور، وما الذي يسبب حموضة اللبن، وقد كان باستير في سنة 1857 هو أول من

أثبت أن هذه التغيرات تعود إلى الميكروبات، وبعد ذلك استطاع أن يتعرف على الميكروبات الموجودة في عينات من العصير المتخمر واللبن الحامض، كما كان باستير أيضًا هو أول من درس العمليات الكيماوية التي تقوم بها الميكروبات، وقد تعلمنا من باستير أن هناك بعض التفاعلات الكيماوية، ينتج عنها طاقة وتفاعلات أخرى، تحتاج إلى طاقة، وإذا كان التفاعل يحتاج إلى طاقة، فإنه يسمى تفاعل بِناء أو تخليق Anabolic reaction، أما إذا كان التفاعل ينتج عنه طاقة، فإنه يسمى تفاعل هدم Catabolic reaction، وبصفة عامة، فإن كانت التفاعلات تتم داخل الخلية تسمى تمثيلًا، وتتكون من هذين النوعين من التفاعل، أي أن:

التمثيل = تفاعلات بناء تحتاج إلى طاقة، وتفاعلات هدم تطلق أو تنتج طاقة. ولفهم كل من تفاعلات الهدم والبناء، فإننا سنشير إلى بعض المصطلحات التي ترتبط بهذا الموضوع.

أي أن التمثيل هو مجموع التفاعلات الكيماوية التي تحدث داخل الخلية الحية، والتفاعلات تتم في خطوات حيث تبدأ بمادة معينة وتنتهي بمنتج معين. والحقيقة أن هناك عدد كبير من خطوات التفاعل تتم بين مادة البداية والناتج النهائي وهذه الخطوات تسمى مسارات التمثيل، وفي أي مسار تمثيلي فإن التفاعل يقود إلى تفاعل تالي الذي يقود إلى التفاعل تالي وهكذا في شكل سلسلة يمكن تمثيلها كما يلي:

$$\xrightarrow{A} \xrightarrow{E1} B \xrightarrow{E2} C \xrightarrow{E3} D \xrightarrow{E4} E \xrightarrow{E5} F \xrightarrow{E6} G \xrightarrow{E7} H \xrightarrow{En} I$$

فالحروف الكبيرة تمثل مواد تفاعل ونواتج تفاعل، أي أن الحرف A يمثل مادة تفاعل الخطوة الأولى، والحرف B يمثل ناتج تفاعل هذه الخطوة، ثم تصبح المادة B هي مادة تفاعل الخطوة الثانية، والمادة C هي ناتج تفاعل هذه الخطوة، وهكذا، أما حرف E_1 فيمثل الإنزيم الذي يساعد على إتمام الخطوة الأولى، وكما هو واضح، فإن كل خطوة من مسار التمثيل تتم بواسطة إنزيم مختلف عن إنزيمات باقي الخطوات. وفي التفاعلات الإنزيمية، فإن مواد التفاعل تسمى المواد الأولية (Substrates) للإنزيمات، أي أن المادة A هي مادة أولية للإنزيم E_1، والمادة B هي ناتج تفاعل هذه

الخطوة، ثم تصبح مادة أولية للإنزيم E_2، والمادة C هي ناتج تفاعل هذه الخطوة وهكذا يستمر التفاعل حتى يتكون الناتج النهائي.

4. 2. 2. الإنزيمات Enzymes :

الإنزيمات - بصفة عامة - عبارة عن مركبات بروتينية ذات وزن جزيئي كبير أكثر من 10000، ولها أشكال ثلاثية الأبعاد، وتعتبر عوامل مساعدة Catalysts، بمعنى أنها تسرع من معدل التفاعلات الكيميائية دون أن يحدث لها تغيير، وكلمة Enzyme مشتقة من اليونانية؛ حيث إن الحرفين En معناهما الحرف "في" باللغة العربية، و "In" باللغة الإنجليزية، والحروف Zyme معناها الخميرة باللغة العربية، و Yeast باللغة الإنجليزية، أي أن الكلمة كلها معناها "في الخميرة"، أو In yeast، وأول مرة استعمل فيها لفظ إنزيم كان في عام 1878، وكان يستخدم للتمييز بين ما كان يعرف في ذلك الوقت باسم التخمرات المنظمة Organized ferments، والتي تعني استخدام الكائن الحي كله Whole microorganism في التخمير، وبين التخمرات غير المنظمة Unorganized ferments، والتي تعني استخدام مستخلصات Extracts أو إفرازات Secretions الكائن الحي في التخمير، أي أن لفظ الإنزيم - آنذاك - كان يستخدم للتأكيد على أن هذا العامل المساعد في التفاعلات الكيميائية عبارة عن مستخلص أو إفراز خارج الخلايا، وليس الخلايا كلها. ولتوضيح الدور المهم الذي تساهم به الميكروبات كمصدر مهم للإنزيمات، فيكفي أن نعلم أن خلية واحدة من البكتيريا E.coli - على سبيل المثال - تصنع داخلها حوالي 3000 نوع مختلف من البروتينات، معظمها عبارة عن إنزيمات.

وكل التفاعلات التي تحدث داخل الخلية تحتاج إلى إنزيمات، والإنزيمات في النظام البيولوجي تسرع من التفاعلات الكيماوية، وتقلل الوقت اللازم للتفاعل بدرجة كبيرة جدًّا، كما تقلل - بدرجة كبيرة - من كمية طاقة التنشيط، وهي الطاقة اللازمة لبدء التفاعل الكيماوي. والإنزيمات في الكائنات الحية متخصصة، وكل إنزيم يمكن أن يشترك في تفاعل واحد فقط، وكثير من الإنزيمات تتكون من جزأين؛ الجزء الأول: يتكون من بروتين، ويسمى Apoenzyme، والجزء الثاني: يتكون من مادة

غير بروتينية، ويسمى Co-enzyme، وهو عبارة عن فيتامينات، أو قد يسمى Co-factor، وفي هذه الحالة يكون أيونًا غير عضوي، مثل الحديد، النحاس، المغنسيوم، المنجنيز، الزنك، الكالسيوم، والكوبالت، والـ Apoenzyme مع الـ Co- enzyme، ويسمى Holoenzyme، أي أن:

Apoenzyme + Co- factor or Co- enzyme = Holoenzyme

ويمكن تلخيص ميكانيكية نشاط أي إنزيم في الخطوات الآتية:

1. يوجد على سطح الإنزيم موقع متخصص، يسمى موقعًا نشطًا (Active site).
2. يتفاعل الإنزيم مع المادة الأولية عند ذلك الموقع النشط، ويتكون معقد من المادة الأولية والإنزيم.
3. أثناء اتحاد الإنزيم والمادة الأولية يحدث التفاعل الكيماوي.
4. ينفصل معقد المادة الأولية والإنزيم إلى ناتج معين والإنزيم.
5. لا يتغير الإنزيم، ويمكن أن يبدأ التفاعل مرة أخرى مع جزء آخر من المادة الأولية.

وتوجد في داخل الخلايا مركبات يطلق عليها مرافقات الإنزيمات، وأكثرها شيوعًا مرافق الإنزيم NAD (Dinucleotide – Nicotine amide – adenine)، والصورة المختزلة منه هي NADH، ومرافق الإنزيم (Dinucleotide – Flavin – adenine) FAD، والصورة المختزلة منه هي $FADH_2$. مركب الـ NAD هو مرافق إنزيم يتم تخليقه بواسطة الخلية من فيتامين B، وهو عادة يحمل شحنة موجبة، ويمكن أن يستقبل ذرة هيدروجين و2 إلكترون، ويصبح في صورة مختزلة (NADH). هذه الصورة المختزلة تتولد أثناء أكسدة المواد الغذائية، أي أن الإنزيم عندما يقوم بنزع ذرة هيدروجين أثناء تحليله لمادة معينة، فلابد وأن يأخذها منه مركب معين؛ حتى يستطيع الإنزيم أن يستمر في عمله، هذا المركب المعين الذي يأخذ الهيدروجين هو مرافق الإنزيم، الذي بدوره ينقل الهيدروجين إلى مادة أخرى، وبذلك يعود إلى الحالة المؤكسدة مرة أخرى (في دورة تعرف بسلسلة التنفس)؛ ليستمر أيضًا في عمله، أما مركب FAD، فهو أيضًا مرافق إنزيم، ويتكون من نوع آخر من فيتامين B المرتبط مع جزيء AMP، ويعمل مرافق الإنزيم FAD كمستقبل للهيدروجين في تفاعلات نزع

الهيدروجين، حيث يختزل - في هذه الحالة - إلى $FADH_2$، وهذه بدورها تتأكسد مرة أخرى عن طريق سلسلة التنفس؛ لكي تستمر في العمل.

4. 2. 3. مصادر الكربون والطاقة Energy and carbon sources:

كل الأنظمة الحيوية - بما فيها الميكروبات - لها متطلبات لمجموعة من العناصر الغذائية، وبالنسبة لمصادر الكربون والطاقة، يمكن تقسيم كل الكائنات إلى مجموعات كما يلي:

- **مجموعة الكائنات الحية الدقيقة Photoautotrophs**: وهي التي يمكنها أن تستعمل أشعة الشمس كمصدر للطاقة، وثاني أكسيد الكربون كمصدر للكربون، وتشمل هذه المجموعة بكتيريا التمثيل الضوئي (بكتيريا الكبريت الخضراء، وبكتيريا الكبريت الأرجوانية، والبكتيريا الخضراء المزرقة)، والطحالب والنباتات الخضراء.
- **مجموعة الكائنات الحية الدقيقة Photoheterotrophs**: وهذه المجموعة تستعمل الضوء كمصدر للطاقة، ولكنها لا تستطيع استعمال ثاني أكسيد الكربون كمصدر للكربون؛ بل تستعمل مركبات عضوية مثل الكحولات والأحماض الدهنية والأحماض العضوية والمواد الكربوهيدراتية كمصدر للكربون، ومن بين هذه المجموعة البكتيريا الخضراء والأرجوانية غير الكبريتية.
- **مجموعة الكائنات الحية الدقيقة Chemotrophs**: وهذه المجموعة غير قادرة على استخدام أشعة الشمس كمصدر للطاقة، ولكن مصدر الطاقة بالنسبة لها هو تفاعلات أكسدة واختزال مواد عضوية أو غير عضوية؛ ولذلك فإن هذه المجموعة تنقسم - بدورها - إلى مجموعتين، وهما:
- **مجموعة الكائنات الحية الدقيقة Chemoautotrophs**: وهي المجموعة التي تستخدم ثاني أكسيد الكربون كمصدر للكربون، وتستخدم مواد غير عضوية كمصدر للطاقة، مثل الكبريت بالنسبة للجنس Thiobacillus، وكبريتيد الهيدروجين بالنسبة

للجنس Beggiatoa، والأمونيا بالنسبة للجنس Nitrosomonas، والنتريت بالنسبة للجنس Nitrobacter، والحديد بالنسبة للبكتيريا Thiobacillus ferroxidans.

- **مجموعة الكائنات الحية الدقيقة Chemoheterotrophs**: وفي هذه المجموعة فإن المادة العضوية هي مصدر الكربون ومصدر الطاقة، ويتبع هذه المجموعة معظم البكتيريا، وكل الفطريات والبروتوزوا والحيوانات.

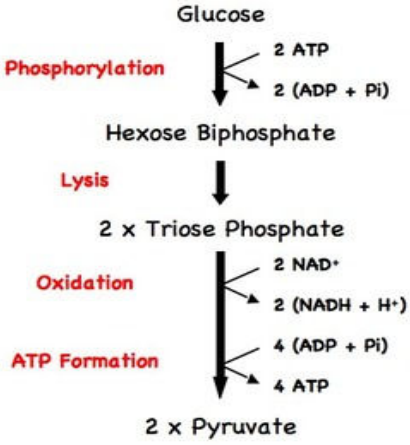
4. 2. 4. هدم المواد الكربوهيدراتية Decomposition of carbohydrate materials:

تحصل خلايا الميكروبات على معظم طاقتها من أكسدة المواد الكربوهيدراتية، وعملية هدم المواد الكربوهيدراتية هي تكسيرها لإنتاج الطاقة، عن طريق تفاعلات الأكسدة والاختزال؛ ولذلك فهي عملية مهمة جدًّا في تمثيل الخلية، ولكي تهدم المواد العضوية بالكامل، فلابد من تكسيرها أولًا إلى سكريات بسيطة، وذلك بواسطة الإنزيمات التي تفرزها الخلايا إلى البيئة، أي أن المواد الكربوهيدراتية، سواء أكانت سليلوز أو نشا، أو أي مادة أخرى عديدة التسكر، تتحول إلى جلوكوز من خلال الهدم الإنزيمي، ثم يدخل الجلوكوز إلى داخل الخلية؛ حيث يسمح حجمه بذلك.

وتبدأ التفاعلات داخل الخلية بالجلوكوز دائمًا، حتى لو كان هناك سكر ثنائي مثل اللاكتوز، يمكنه الدخول إلى الخلية، فلابد من تحوله إلى جلوكوز و جلاكتوز قبل أن تبدأ التفاعلات، ولإنتاج الطاقة من الجلوكوز، فإن الميكروبات تستخدم عمليتين، وهما التنفس والتخمر. والخطوة الأولى في كل من عمليتي التنفس والتخمر، هي أكسدة الجلوكوز إلى حامض بيروفيك، وتتم أكسدة الجلوكوز إلى حامض بيروفيك، من خلال عدد كبير من التفاعلات الكيماوية، تتجمع كلها في عملية الـ Glycolysis (الشكل رقم 1-4) أي أن عملية الـ Glycolysis هي أكسدة الجلوكوز إلى حامض بيروفيك.

التنفس الهوائي: هو نوع من التمثيل، يشتمل على تفاعلات أكسدة واختزال، ويكون المستقبل النهائي للإلكترون هو جزيء الأكسجين؛ ولذلك فإن هذه العملية تعتمد على وجود الهواء. تبدأ عملية التنفس الهوائي بعملية الـ Glycolysis، التي ينتج

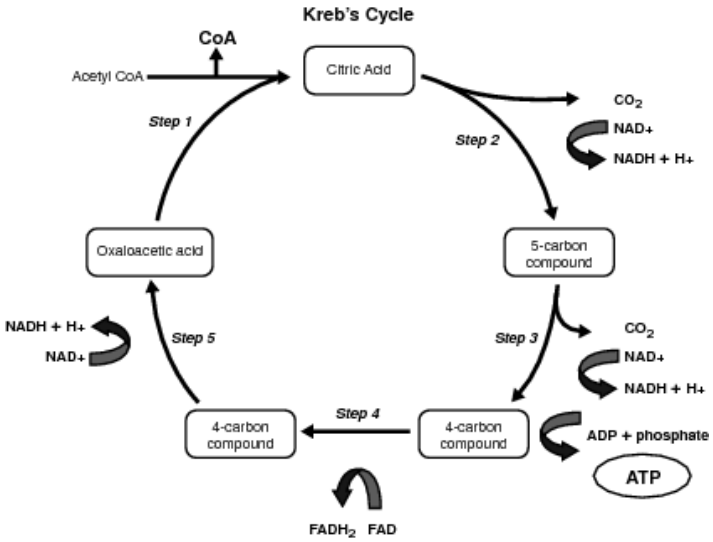
عنها حامض بيروفيك كما ذكرنا، ثم يدخل حامض البيروفيك الناتج من هذه العملية إلى نظام يسمى دورة كربس (الشكل رقم 2-4).



شكل (1-4): عملية الـ Glycolysis

في دورة كربس تحدث عمليات أكسدة متتالية لحامض البيروفيك، ونتيجة هذه الأكسدة تنزع من حامض البيروفيك كل ذرات الهيدروجين، ويقابل ذلك أن مرافقات الإنزيمات الموجودة في الخلية تختزل، باستقبالها للهيدروجين المنزوع من أكسدة حامض البيروفيك، وعلى ذلك فلو تأملت الشكل رقم (2-4) تجد أن النتيجة النهائية لدورة كربس هي مرافقات إنزيم في صورة مختزلة، أي عدد من الـ NADH والـ $FADH_2$. ثم تدخل مرافقات الإنزيم المختزلة بعد ذلك في نظام آخر يعرف بسلسلة التنفس، في هذا النظام تتم أكسدة مرافقات الإنزيم مرة أخرى، أي ينزع منها الهيدروجين مرة أخرى؛ ليتحد مع الأكسجين المتوافر (لأنه تنفس هوائي)، ويتكون ماء، أما الكربون الناتج من تفكك حامض البيروفيك، فإنه أيضًا يتحد مع الأكسجين، ويتكون ثاني أكسيد الكربون، أي أن النتيجة النهائية للتنفس، هو تكون الماء وثاني أكسيد الكربون، أي هدم كامل للجلوكوز، وعلى ذلك يمكن تلخيص عملية التنفس كما يلي:

جلوكوز ← حامض بيروفيك ← مرافقات إنزيم مختزلة و CO_2 ← ماء و CO_2



شكل (2–4): دورة كربس

التخمر: الخطوة الأولى في عمليات التخمر هي أيضًا عملية الـ Glycolysis، إلا أنه بمجرد انتهاء هذه العملية، فإن حامض البيروفيك المتكون لا يدخل في دورة كربس، كما هو الحال في عملية التنفس، وإنما يتحول إلى نواتج مختلفة حسب الميكروب الذي يقوم بالتفاعل وحسب ظروف التفاعل، حيث قد يتحول إلى كحول إذا كان الميكروب السائد هو الخميرة والظروف لا هوائية، أو يتحول إلى حامض لاكتيك إذا كانت بكتيريا اللاكتوباسيلس هي السائدة مع وجود قليل من الهواء. أي أن عملية التخمر هي أكسدة غير كاملة للمادة العضوية، أو هي تكسير للمادة العضوية (الجلوكوز) إلى مادة عضوية أصغر (الكحول أو الحامض). ويمكن تلخيص عملية التخمر كما يلي:

جلوكوز← حامض بيروفيك ← كحول أو حامض أو أي منتج عضوي + ثاني أكسيد الكربون

4. 2. 5. نمو البكتيريا Growth of bacteria:

غالبًا ما تعتمد العمليات الميكروبيولوجية على إنتاج الحد الأقصى من الخلايا الميكروبية في أقل وقت ممكن، وتقاس كفاءة هذه العمليات عن طريق خواص النمو للميكروب المرغوب به؛ ولذلك فمن المهم دراسة منحنى النمو قبل التعرض لاستخدام الميكروبات بشكل مباشر أو غير مباشر لخدمة الإنسان. ونمو الميكروبات وزيادة كتلتها الحيوية شيء أساسي في جميع الأنظمة البيولوجية، غير أن قياس هذا النمو يشكل بعض الصعوبات العملية، ويقدر نمو الميكروبات بطرق عديدة، منها ما يلي:

1. تقدير قيم النيتروجين الخلوي، وهي من أحسن الطرق وأدقها في تقدير نمو الميكروبات، ولكنها طريقة غير ملائمة لجميع الظروف.
2. قياس الزيادة في الوزن الجاف للخلايا، وفي معظم الحالات يكون هذا القياس كافيًا للتعبير عن نمو الميكروبات، ولكن هذه الطريقة قد تعطي نتائج مبالغ فيها عندما يدخل فيها المواد المخزنة داخل خلايا الميكروبات.
3. قياس نمو الميكروبات أيضًا بقياس العكارة أو الكثافة الضوئية Optical density، الناتجة من نمو الميكروب في بيئة سائلة؛ حيث إنها دالة لحجم الخلايا وأعدادها، ويمكن ربطها بمنحنى قياسي للوزن الجاف.
4. إجراء طرد مركزي للمزارع النامية، ثم قياس كمية الخلايا المتجمعة.
5. كذلك تستخدم طرق غير مباشرة لتقدير نمو الميكروبات، تعتمد على قياس النشاط الخلوي، مثل تقدير ثاني أكسيد الكربون الناتج عن نشاط الميكروب ونموه.

وعندما توضع القيم اللوغاريتمية المعبرة عن نمو ميكروب وحيد الخلية في مزرعة مغمورة على المحور الصادي مع الزمن على المحور السيني في رسم بياني، ينتج من ذلك منحنى له شكل مميز، يسمى منحنى النمو Growth curve. وتفاصيل تكوين هذا المنحنى وشكله تعتمد على نوع الميكروب، وعلى الظروف المحيطة به، ولكن في جميع الحالات يتكون منحنى النمو من أربعة أطوار رئيسة، كما يتضح من الشكل رقم (3-4) وهي:

أ- طور التكيف مع البيئة Lag phase.

ب- طور النمو الأسي Log phase.

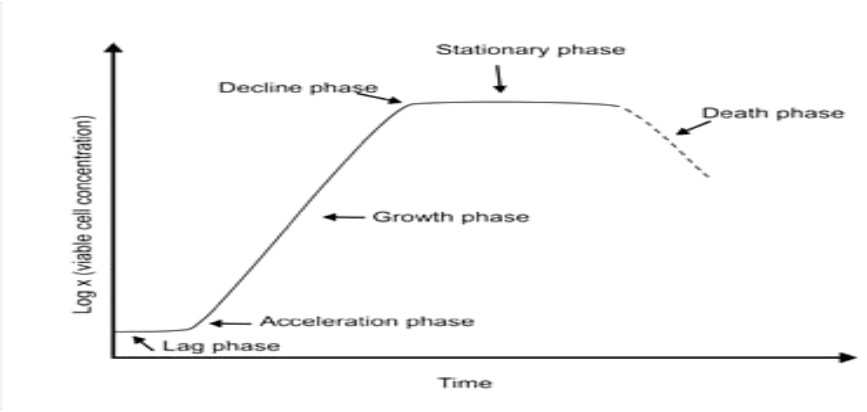
ج- طور الثبات Stationary phase.

د- طور الموت Death phase.

وفي بعض أنواع البكتيريا يظهر - بوضوح - ما يمكن أن يطلق عليه طور النمو السريع، وهي الفترة ما قبل طور النمو الأسي، كما يظهر بوضوح في هذه الأنواع البكتيرية ما يعرف بطور النمو البطيء، وهي الفترة ما بعد طور الثبات. ويتوقف وجود طور النمو السريع وطور النمو البطيء على نوع الميكروب؛ ولذلك سوف نتناول بالشرح بقية الأطوار التي توجد دائمًا في منحنى النمو، مع الإشارة إلى أي من هذين الطورين عند اللزوم.

أ- طور التكيف مع البيئة Lag phase:

بالنسبة لأي ميكروب، فإن الفترة المنقضية بين تلقيح بيئة طازجة وبين اكتشاف أول نمو واضح ومرئي تسمى الطور اللاجي، وهي فترة التكيف مع الظروف البيئية الجديدة التي انتقل إليها الميكروب ليبدأ في النمو، وتعتمد مدة الطور اللاجي على طبيعة الميكروب، وعلى حجم اللقاح وحالته الفسيولوجية، وعلى كمية البيئة التي نقلت مع اللقاح، وعلى التركيزات المتغيرة للمواد الأساسية في البيئة الجديدة، وعلى درجة الحرارة، وأحيانًا على نوع وكثافة الضوء، ويمكن تقصير فترة الطور اللاجي بزيادة حجم اللقاح، وزيادة الحرارة حتى الحد الأمثل، وعن طريق نقل اللقاح إلى بيئة أكثر غنى بالعناصر الغذائية، مقارنة بالبيئة التي تم فيها تنمية اللقاح، كذلك يمكن اختصار زمن هذا الطور - بشكل كبير، قد يصل إلى حد إلغائه - عن طريق التلقيح بمزرعة أخذت وهي في الطور اللوغاريتمي.



شكل (3-4): منحنى النمو

ب- طور النمو الأسي Log phase:

يبدأ الطور اللوغاريتمي أو طور النمو الأسي لميكروب معين عندما يكون معدل نموه ثابتًا عند حده الأقصى؛ نتيجة عوامل بيئية معينة، تسبب توازنًا في تفاعلات تكاثر الخلايا، ومعدل النمو الثابت بالنسبة للميكروب وحيد الخلية يعني أن الخلايا الفردية تنقسم كل فترة منتظمة من الزمن، ويعني أن الزيادة في المواد الخلوية لكل وحدة زمن تقدر بمعدل النمو والكمية الموجودة في أي وقت. والنمو التصاعدي للخلايا يخضع لمعادلات حسابية كثيرة، لا تهم معرفتها في موضوع هذا الكتاب، ولكن لابد لكل دارس أن يعلم أن هذه الحسابات تؤدي في النهاية إلى أن يكون لكل ميكروب وحيد الخلية معادلة رياضية مهمة، يمكن عن طريقها حساب زمن الجيل Generation time، وهو الوقت اللازم لكل انقسام خاص بهذا الميكروب، ومعرفة زمن الجيل الخاص بكل ميكروب في غاية الأهمية بالنسبة للتطبيقات الميكروبيولجية في مختلف مناحي الحياة، وقد وجد أن متوسط زمن أو وقت الجيل يختلف من 15 دقيقة لبعض البكتيريا إلى عدة أيام لبعض الفطريات الخيطية.

ويقدر النمو الكلي لأي ميكروب تجريبيًّا، أما فترة التكيف الأولي التي تسمى بالطور اللاجي، فيمكن أن تقدر من المنحنى، عن طريق استنتاج الزمن من المحور الصادي المقابل لبداية النمو اللوغاريتمي في المنحنى، أو تقدر حسابيًّا عن طريق الفرق

بين الزمن اللازم لتراكم كمية معينة من النمو الخلوي تجريبيًّا، وبين الزمن اللازم للوصول إلى الكمية نفسها، مع افتراض أن النمو أسي أو لوغاريتمي من البداية.

ج- طور الثبات Stationary phase:

إن نفاد العناصر الغذائية في البيئة، أو تراكم مخلفات الخلية، يحد من الزيادة في أعداد الخلايا، وهذه الظروف البيئية غير المناسبة تؤدي إلى نقص مستمر في معدل النمو، حتى الوصول إلى طور الثبات؛ حيث تبقى كمية المواد الخلوية في البيئة ثابتة، وفي الميكروبات وحيدة الخلية قد يتم التغير إلى طور الثبات سريعًا، ولكن الميكروبات الخيطية لا تتغير سريعًا إلى طور الثبات في النمو، ولكن تأخذ وقتًا أطول تنمو فيه نموًّا بطيئًا قبل أن يتغير نموها إلى طور الثبات؛ حيث يؤدي نقص الأغذية، أو تكون مضادات حيوية في البيئة، أو تراكم نواتج التمثيل الغذائي، إلى نقص تدريجي في نمو خيوط فرعية جديدة، مع استمرار النمو القمي للهيفا، وفترة النمو البطيء هذه التي توجد بين الطور اللوغاريتمي وطور الثبات، تسمى أحيانًا طور النمو البطيء.

د- طور الموت Death phase:

يبدأ هذا الطور من أطوار النمو (طور الموت) أو ما يمكن تسميته بنهاية أطوار النمو عند نفاذ مواد التغذية نهائيًا في وسط النمو، وعندها يبدأ موت الخلايا البكتيرية حتى يصل عدد خلاياها في كل ملليلتر إلى الصفر.

3.4. بعض التعبيرات والمصطلحات المستخدمة في العمليات البيولوجية

Some expressions and terms used in the biological processes:

هناك بعض التعبيرات والمصطلحات المستخدمة في مجال المعالجة البيولوجية، ويكون من المفيد الإشارة إليها؛ للمساعدة على الفهم الجيد لهذه العمليات، بما يفيد العاملين في وحدات عمليات المعالجة البيولوجية:

- **العمليات الهوائية Aerobic processes**: يقصد بها عمليات المعالجة التي تتم في وجود الأكسجين، هذه العمليات تقوم بها بعض البكتيريا التي يمكن أن تعيش فقط في وجود الأكسجين الذائب، وتعرف بالبكتيريا الهوائية إجبارًا.
- **العمليات غير الهوائية Anaerobic processes**: يقصد بها عمليات المعالجة التي تتم في غياب الأكسجين، وتقوم بها البكتيريا التي تعيش فقط في غياب الأكسجين، والتي تعرف بالبكتيريا غير الهوائية إجبارًا.
- **عكس التأزت اللا هوائي Anoxic denitrification**: يقصد بها العملية التي يتم فيها تحول النترات حيويًّا إلى غاز النيتروجين في غياب الأكسجين بواسطة بكتيريا متخصصة.
- **العمليات الاختيارية Facultative processes**: يقصد بها العمليات الحيوية التي تتم في وجود أو عدم وجود الأكسجين؛ فقد لا يكون هناك فرق بين وجود أو عدم وجود الهواء لكي تؤدي البكتيريا دورها بكفاءة، وتعرف البكتيريا في هذه الحالات بالبكتيريا الاختيارية.
- **الكائنات المحبة لقليل من الهواء Microaerophils**: وهي مجموعة من البكتيريا تعيش في حالة نشطة في وجود كمية قليلة من الهواء.
- **إزالة المواد الكربونية Carbonaceous BOD removal**: يقصد بها استخدام الميكروبات المواد الكربونية العضوية في المياه الملوثة غذاءً، فتتحول هذه المواد العضوية إلى أنسجة خلوية ومختلف الغازات، أي أن الميكروبات تقوم بتمثيل المواد الكربونية تمثيلًا كاملًا، وبذلك تتكاثر بغزارة، وينتج عن ذلك خلايا ميكروبية، وفي هذا التحول من المفترض أيضًا أن يتحول النيتروجين الموجود في المياه الملوثة إلى أمونيا.
- **التأزت Nitrification**: وهي عملية حيوية، تتحول فيها الأمونيا إلى نترات (أزوت) على خطوتين متتاليتين؛ حيث تتحول الأمونيا أولًا إلى نتريت بواسطة بكتيريا متخصصة، ثم تتحول النتريت إلى نترات بواسطة بكتيريا أخرى متخصصة.

- **عكس التأزت Denitrification**: وهي العملية الحيوية التي تتحول فيها النترات إلى نيتروجين وغازات أخرى تتصاعد إلى الغلاف الجوي، وذلك بواسطة البكتيريا.
- **حالة الاستقرار Stabilization**: وهي العملية الحيوية التي فيها تصل المادة العضوية في الحمأة الناتجة من المعالجة الأولية للمخلفات المائية إلى حالة من الاستقرار، أي تتحول إلى أنسجة خلوية وغازات، وإذا تمت عملية الاستقرار هذه في ظروف هوائية يسمى هضمًا هوائيًّا، وإذا تمت في ظروف لا هوائية يسمى هضمًا لا هوائي.
- **المادة الأولية Substrate**: وهو مصطلح يشير إلى المادة العضوية أو العناصر الغذائية التي تتعرض للتحول أثناء المعالجة الحيوية، وعادة ما يرتبط مصطلح مادة أولية بالتفاعلات الإنزيمية؛ حيث يكون لكل إنزيم مادة أولية تحفزه ليعمل عليها ويحللها.
- **عمليات النمو المعلق Suspended- growth processes**: وهي عمليات المعالجة الحيوية، تنمو فيها الميكروبات المسئولة عن تحويل المادة العضوية أو المكونات الأخرى في المياه الملوثة إلى أنسجة خلوية، وتتصاعد غازات، وتصل حالة نمو البكتيريا بحيث تكون معلقًا في السائل (المخلف المائي).
- **عمليات النمو العالق Attached- growth processes**: وهي عمليات المعالجة الحيوية، حيث تنمو فيها الميكروبات المسئولة عن تحويل المادة العضوية أو المكونات الأخرى في المياه الملوثة إلى أنسجة خلوية وغازات، بحيث تكون عالقة على بيئة خاملة، مثل الصخور أو الخبث أو سيراميك أو بلاستيك من نوع خاص، ويعرف هذا النوع من النمو بعمليات الفيلم المثبت. **Fixed- film processes.**
- **المتطلبات الكيماوية من الأكسجين Chemical Oxygen Demand (COD)**: وهي كمية الأكسجين اللازمة لكي تتأكسد كمية معينة من المادة

العضوية أكسدة كيماوية تامة، أي تتحول إلى ثاني أكسيد كربون وماء في زمن محدد، ودرجة حرارة محددة.

- **المتطلبات الحيوية من الأكسجين Biological Oxygen Demand (BOD)**: وهي كمية الأكسجين التي تستهلكها الميكروبات في مدة خمسة أيام على درجة حرارة 20 درجة مئوية؛ لكي تؤكسد المادة العضوية الموجودة في كمية معلومة من المياه الملوثة.

وفي عمليات إزالة المواد العضوية الكربونية، فإن عمليات تجميع الغرويات الصلبة، وهضم المواد العضوية تتم حيويًّا، عن طريق مجموعة متنوعة جدًّا من الميكروبات، غالبيتها العظمى من البكتيريا، هذه الميكروبات تحول المواد الغروية العضوية إلى أنسجة خلوية، أي تتكاثر مستخدمة المواد العضوية مصدرًا للكربون والطاقة. ونظرًا لأن الأنسجة الخلوية أو الكتل الميكروبية لها ثقل نوعي أكبر من الماء، فإنها تترسب، وبالتالي يمكن إزالتها بسهولة، ويجب الإشارة إلى أنه إذا لم يتم إزالة الأنسجة الخلوية الناتجة من استهلاك المادة العضوية، فلا تكون المعالجة كاملة؛ لأن الأنسجة الخلوية في حد ذاتها عبارة عن مادة عضوية، وبالتالي سوف تتداخل في تقدير الـ BOD الذي يتم بصفة دورية للمياه بعد معالجتها.

4.4. عمليات المعالجة البيولوجية الرئيسة Main of the biological treatment processes:

هناك أربع عمليات رئيسة، وهي العمليات الهوائية، والعمليات اللا هوائية، وعملية عكس التأزت اللا هوائية، ثم خليط من العمليات الثلاث، وكل من العمليات السابقة يتم تقسيمها إلى عمليات أصغر، بالاعتماد على طريقة تنمية الميكروبات. وبشكل عام فإن التطبيقات الرئيسة للعمليات البيولوجية هي:

1. إزالة المواد العضوية الكربونية، وتقاس عادة في صورة BOD، أو كربون كلي عضوي TOC، أو في صورة متطلبات الأكسجين الكيماوية COD.
2. إزالة الأمونيا بعملية التأزت.

3. إزالة النترات بعملية عكس التأزت.
4. الهضم.

4. 5. عمليات المعالجة بنظام النمو المعلق الهوائي Aerobic suspended-growth treatment processes:

تشمل هذه الأنظمة اختلاط الكتلة الحيوية - أي العدد الهائل من الميكروبات - جيدًا مع الرواسب الطينية؛ لتستخدم في المعالجة، كما أن هذا النظام يمكن عمله في مساحة أقل من الأنظمة الأخرى. وعمليات النمو المعلق الرئيسة هي:

1. عملية الحمأة المنشطة The activated sludge process.
2. عملية التأزت بمعلق النمو The suspended- growth nitrification process.
3. البحيرات الهوائية Aerated lagoons.
4. الهضم الهوائي The aerobic digestion process.

وفيما يلي نلقي الضوء على هذه العمليات.

4. 5. 1. عملية الحمأة المنشطة The activated sludge process:

هي عملية يتم فيها معالجة رواسب مياه المجاري، وكذا معالجة المياه الملوثة الصناعية. في هذا النظام يتم ضخ الهواء أو الأكسجين النقي إلى رواسب مياه المجاري، أو إلى المياه الملوثة الصناعية، والتي تحتوي على عدد كبير من الميكروبات، من خلال معالجات المرحلة الأولية. ومع استمرار ضخ الهواء تتكاثر الميكروبات الموجودة في الرواسب، وفي المياه الملوثة الصناعية بشدة كبيرة جدًّا؛ ولذلك تتكون كتلة حيوية متلبدة، تكون قادرة على أكسدة المواد العضوية أكسدة تامة، وبالتالي قادرة على تخفيض محتوى الرواسب من المواد العضوية، ثم يتم إدخال كميات من مياه المجاري الخام، أو المياه الملوثة الصناعية الخام على هذا الوحل النشط. وكلما تمت معالجة كمية من مياه المجاري أو المياه الملوثة الصناعية، فإن الكمية الزائدة يتم دفعها إلى حوض الترسيب؛ أما المياه الرائقة الناتجة عن هذه العملية، فإنها تصرف إلى مكان آخر؛ لتلقي مزيد من المعالجة قبل صرفها النهائي، وعند إدخال رواسب خام يستخدم جزء من

الرواسب المعالجة، والمحتوية على عدد ضخم من الميكروبات كلقاح للمادة الخام الجديدة.

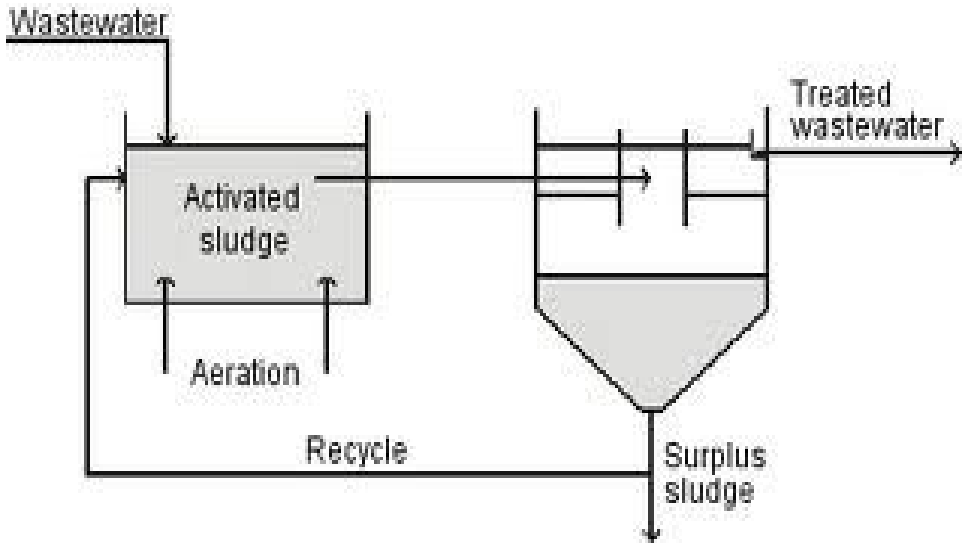
إن مصطلح الوحل المنشط أو الحمأة المنشطة Activated sludge يطلق أيضًا على المواد النشطة بيولوجيًّا، والتي تنتجها محطات التنقية، والتي لها تأثير كبير في عمليات التنقية. هذه المواد عبارة عن راسب أو وحل آمن، لونه بني، ويحتوي على كتل متلبدة من الميكروبات، معظمها بكتيريا، ولكن توجد أيضًا البروتوزوا، وفي بعض المحطات التي لا تعمل بكفاءة عالية تنمو بعض البكتيريا الخيطية، التي تشمل Sphaerotilus natans، وهذه البكتيريا تتكاثر بشكل هائل، وتجعل الوحل غير قابل للترسيب، وتتسبب في أن يعلق الوحل بأسلاك أحواض الترسيب؛ ما يجعلها تلوث المنتج النهائي، وتجعل المعالجة غير جيدة. وهذه البكتيريا - في كثير من الأحيان - يطلق عليها غير المتخصصين فطر المجاري Sewage fungus.

وفي محطات معالجة المجاري أو معالجة المياه الملوثة الصناعية، تستخدم المعالجة بطريقة الوحل المنشط أو الحمأة المنشطة لغرض أو أكثر من الأغراض الآتية:

- أكسدة المواد الكربونية أو المواد الحيوية Biological materials، والتي تشمل أنسجة حيوية، مواد حيوية ميتة أو حية، مواد كيماوية قد توجد بشكل طبيعي في الأحياء الموجودة، ومواد عضوية ... إلخ.
- أكسدة المواد النيتروجية، والتي غالبًا ما تكون أمونيا، والنيتروجين الموجود في المواد الحيوية.
- إزالة الفوسفات.
- الحصول على غازات مثل ثاني أكسيد الكربون، والأمونيا، والنيتروجين ... إلخ.
- إنتاج كتل حيوية متلبدة، خالية من فطر المجاري؛ لاستخدامها كلقاح.
- إنتاج سائل نهائي منخفض المحتوى من المواد العضوية الذائبة أو العالقة.

وبصفة عامة، فإن محطات المعالجة بنظام الوحل المنشط أو الحمأة المنشطة، تتكون ببساطة من حوض للتهوية؛ حيث يتم ضخ الهواء أو الأكسجين، وحوض للترسيب

Settling tank، وعادة ما يطلق عليه أيضًا حوض الترسيب الثانوي Secondary settling tank (الشكل رقم 4-4)؛ حيث يسمح للكتل الحيوية المتلبدة بأن تترسب، وهكذا يتم فصل الوحل البيولوجي المنشط Activated biological sludge عن الماء الرائق المعالج.



شكل (4-4): دياجرام يوضح عملية الحمأة المنشطة

أما معالجة المواد النيتروجينية والفوسفات، فإنها تتضمن خطوات أخرى؛ حيث تترك مياه المجاري المختلطة بالوحل النشط في حالة تسمى Anoxic، والتي تعني عدم وجود بقايا من الأكسجين الذائب، وسوف نتعرض لاحقًا لمعالجة هذه المواد.

- **أنواع محطات الوحل النشط Types of activated sludge plants** :

توجد أنواع مختلفة من المحطات التي تعالج مياه المجاري بطريقة الوحل النشط، منها ما يسمى محطات الـ Package plants، والتي تستخدم في المجتمعات الصغيرة، وعادة ما تكون ملحقة بالمصانع أو بمنطقة محددة؛ ولذلك فقد تلغى خطوة الترسيب المستخدم في المعالجة الأولية؛ لأن في مثل هذه الحالات لا يكون هناك مواد خشنة مثلما يوجد في المحطات التي تعمل على نطاق واسع، كما يوجد نوع آخر يسمى خندق الأكسدة Oxidation ditch (الشكل رقم 5-4).

شكل (5-4): محطة حمأة منشطة من النوع المسمى خندق الأكسدة

وتتوفر مثل هذه المحطات في المناطق التي تتوافر فيها مساحات كبيرة من الأرض؛ لأنه في هذا النوع من المحطات تعالج مياه المجاري في خندق كبير بيضاوي أو مستدير الشكل، والذي يحتوي على مضخة هواء أو أكثر، تمتد بشكل أفقي فوق سطح المياه. هذه المضخة تعمل كأنها مقلب، حيث تحرك مياه المجاري المختلطة بالوحل النشط حول الخندق وفي الوقت نفسه تمد بالهواء، وهذه الأنواع من المحطات غالبًا ما تأخذ أسماء تجارية مثل: pasveer , Orbal , Carrousel حسب الجهة المصممة أو المصنعة لها، وتتميز هذه المحطات بأنه من السهل صيانتها، كما أنها تستوعب تدفقات مياه المجاري الشديدة، خصوصًا في أوقات الصباح والمساء. ومحطات خنادق الأكسدة مصممة جميعها بحيث يكون لها وقت احتفاظ بالمواد الذائبة Hydraulic retention time (HRT)، يساوي من 24 إلى 48 ساعة، أي أن كل محطة تعالج ما يعادل سعتها من كمية المياه التي تدخلها في خلال 24-48 ساعة، وهذا الوقت يتم حسابه عن طريق معرفة كمية الهواء التي يتم ضخها؛ حيث إن الـ (HRT) يساوي حجم حوض التهوية، مقسومًا على معدل دخول المياه إلى المحطة.

كما يوجد نوع آخر من محطات الوحل النشط، يسمى العمود العميق Deep shaft (الشكل رقم 6-4). هذا النوع ينتشر في البلاد التي لا توجد بها مساحات أرض بوفرة؛ حيث تكون المحطة على شكل عمود عميق تحت الأرض، ويتم حقن الهواء أو الأكسجين تحت ضغط، مثل هذه الأعمدة قد تكون مدفونة على عمق يزيد عن 100 متر، ومليئة بمياه المجاري المختلطة بالوحل النشط، وكلما دخلت مياه المجاري إلى المحطة يتم ضخ كمية أكسجين تحت قوى الضغط، الذي يعطي تهوية أشد من الأنواع الأخرى من المحطات .. فعلى سبيل المثال، فإن المضخات السطحية تعطي كفاءة تهوية تعادل من 0.5 إلى 1.5 كجم أكسجين / ساعة، والتهوية عن طريق الانتشار تعطي كفاءة مقدارها 1.5 إلى 2.5 كجم أكسجين / ساعة، في حين أن التهوية في محطات العمود المدفون تصل كفاءة التهوية فيها من 5 إلى 8 كجم أكسجين / ساعة. كما أن قوى ضخ الهواء في حد ذاتها تعتبر قوى ميكانيكية، تساعد على مزج الوحل النشط بمياه المجاري، وفي النهاية يتكون ماء رائق معالج يطفو على السطح، ووحل راسب، يمكن فصلهما بسهولة. وهذا النوع من المحطات له كفاءة عالية، إلا أن تكاليف إنشاء هذه المحطات عالية، وتنتشر هذه المحطات في اليابان؛ بسبب النقص في الأرض.

شكل (6-4): محطة من النوع المسمى العمود العميق (Deep shaft)

والخطوة النهائية في المعالجة بطريقة الحمأة النشطة هي ترسيب الكتل المتلبدة من الأحياء، أو نواتج الترويق والترسيب الثانوي Secondary sedimentation؛ لينتج عن ذلك ماء يحتوي على مستوى منخفض جدًّا من المواد العضوية والمواد العضوية العالقة.

- **ميكروبيولوجيا عملية الحمأة المنشطة Process of microbial activated sludge:**

لكي يتم تصميم وإدارة نظام الحمأة المنشطة بكفاءة، من الضروري فهم أهمية الميكروبات في هذا النظام. إن الدور الحيوي للبكتيريا في الطبيعة أنها تهدم المواد العضوية الناتجة عن نشاط الأحياء الأخرى، وفي عملية الحمأة المنشطة فإن البكتيريا هي أهم الكائنات الحية؛ لأنها هي المسئولة عن هدم المواد العضوية في المجاري الداخلة إلى المحطة، وفي داخل الأحواض، فإن جزءًا من المادة العضوية يستهلك بواسطة البكتيريا الهوائية والاختيارية للحصول على الطاقة؛ لكي تستطيع هدم باقي المادة العضوية وتحويلها إلى خلايا ميكروبية جديدة. وهناك جزء صغير من المادة العضوية في المياه الملوثة يتم تحويله إلى مركبات ذات محتوى أقل من الطاقة مثل CO_2 , SO_4 , NO_3، أما الباقي فيتم تحويله إلى مواد خلوية، كذلك فإن هناك مواد وسطية كثيرة، تنتجها البكتيريا قبل الناتج النهائي (المواد الخلوية). بصفة عامة، فإن البكتيريا في عملية الحمأة المنشطة سالبة لتفاعل جرام، أي عند صبغها بصبغة جرام تظهر تحت الميكروسكوب بلون أحمر، وتشمل عددًا من الأجناس مثل: Pseudomonas وZoogloea وAchromobacter و Flavobacterium و Nocardia وBdellovibrio و Mycobacterium وجنسي بكتيريا التأزت Nitrosomonas و Nitrobacter، بالإضافة إلى ذلك هناك بعض الكائنات الخيطية مثل: Sphaerotilus و Beggiatoa و Thiothrix و Lecicothrix وGeotrichum.

وعلى الرغم من أن البكتيريا هي الميكروبات الأساسية في هدم المواد العضوية في مياه المجاري الداخلة إلى محطة المعالجة، فإن النشاط التمثيلي للميكروبات الأخرى مهم أيضًا جدًّا. فعلى سبيل المثال، فإن البروتوزوا تأكل أنواع البكتيريا التي لا تترسب

(بكتيريا من خصائصها ألا ترسب في القاع) وهذا يزيد من كفاءة عملية المعالجة، وعلى الرغم من أنه من المهم أن تقوم البكتيريا بتحليل المخلفات العضوية بأسرع ما يمكن، فمن المهم أيضًا أن تكون البكتيريا كتلًا حيوية متلبدة، يسهل ترسيبها وفصلها عن المياه. وقد لوحظ أنه كلما طالت مدة بقاء الخلايا في أحواض المعالجة، كلما كانت الطبقة المتلبدة جيدة، وبالتالي كانت عملية الترسيب جيدة. السبب في ذلك أنه كلما طال عمر الخلايا فإن الشحنة السطحية تقل، ويزداد إفراز عديدات التسكر حول الخلايا، ووجود عديدات التسكر بكميات كبيرة، يساعد - بدرجة كبيرة - في تكوين الكتلة المتلبدة، وبالتالي يساعد في زيادة كفاءة الترسيب، وبالنسبة للمخلفات المائية المنزلية، وجد أن بقاء الميكروبات لمدة 3 إلى 4 أيام كافية للوصول إلى كفاءة عالية في الترسيب.

وعلى الرغم من تكون كتل متلبدة من الميكروبات وترسبها بسهولة، إلا أنه - في بعض الحالات - تبقى المياه محتوية على مستوى عالٍ من المواد الصلبة الخلوية؛ وذلك نظرًا لسوء تصميم وحدة الترسيب الثانوي، أو سوء إدارة وحدات التهوية، أو وجود الميكروبات الخيطية مثل Sphaerotilus والفطريات.

4. 5. 2. عملية التأزت بمعلق النمو The suspended- growth nitrification process:

هي عملية الأكسدة الحيوية للأمونيا بواسطة الأكسجين إلى نتريت، يتبع ذلك أكسدة النتريت إلى نترات. إن أكسدة الأمونيا إلى نتريت، والمتبوعة بأكسدة النتريت إلى نترات، تقوم بها مجموعتين مختلفتين من البكتيريا، تسمى بكتيريا التأزت Nitrifying bacteria. الخطوة الأولى من عملية التأزت - وهي أكسدة الأمونيا إلى نتريت، كما في المعادلة رقم (1-4) - تقوم بها بكتيريا الجنس Nitrosomonas؛ حيث تحصل على الطاقة من عملية التصنيع الكيماوي، من خلال أكسدة الأمونيا إلى نتريت، ويتم ذلك تحت ظروف جيدة للتهوية.

$$NH_4^+ + 1.5\ O_2 \rightarrow N\ O_2^- + H_2O + 2\ H^+ \qquad (4\text{-}1)$$

وعلى الرغم من أن أكثر أجناس البكتيريا شيوعًا في القيام بهذه الخطوة هو الجنس Nitrosomonas كما ذكرنا، إلا أن الأجناس Nitrosopira , Nitrosococcus Nitrosovibrio و Nitrosolobus قادرة أيضًا على أكسدة الأمونيا إلى نتريت. هذه البكتيريا المؤكسدة للأمونيا تختلف عن بعضها وراثيًّا، ولكن لها علاقة ببعضها، وتعيش في أماكن متشابهة.

أما الخطوة الثانية فتقوم بها بكتيريا الجنس Nitrobacter، وتحصل على الطاقة من خلال أكسدة النتريت إلى نترات، كما في المعادلة رقم (2-4).

$$NO_2^- + 0.5\ O_2 \rightarrow NO_3^- \qquad (4\text{-}2)$$

وهناك أجناس كثيرة من البكتيريا تؤكسد النتريت إلى نترات، مثل أجناس:

Nitrococcus, Nitrospina, Nitrospira و Nitrocystis، ولكن أكثرها شيوعًا هو الجنس Nitrobacter، وهذه الأجناس قريبة من بعضها من الناحية الوراثية، وتعيش في بيئات متشابهة، ويمكن التعبير عن التأزت الكامل أثناء معالجة المياه الملوثة بالمعادلة رقم (3-4) كما يلي:

$$NH_4^+ + 2O_2 \longrightarrow NO_3^- + H_2O + 2H^+ \qquad (4\text{-}3)$$

وبكتيريا التأزت - سواء التي تقوم بالخطوة الأولى أو التي تقوم بالخطوة الثانية - هي بكتيريا ذاتية التغذية كيماويًّا، أي Chemoautotrophs؛ حيث تستخدم ثاني أكسيد الكربون مصدرًا للكربون، وتستخدم الأمونيا أو النتريت مصدرًا للطاقة، وتلعب بكتيريا التأزت دورًا مهمًّا في إزالة الأمونيا من المياه الملوثة للمنازل، وتكلفة هذه العملية تتمثل فقط في التهوية، أي إدخال الأكسجين إلى المفاعل.

ومن الناحية العملية، فإن عملية التأزت يمكن أن تتم في الحوض نفسه الذي تتم فيه عملية الحمأة المنشطة الخاصة بإزالة المواد الكربونية من المياه الملوثة، وفي هذه الحالة تسمى "عملية التأزت ذات المرحلة الواحدة"، أو قد تتم عملية التأزت في مفاعل

أو حوض منفصل بعد عملية الحمأة المنشطة مباشرة، وأكسدة الأمونيا إلى نترات قد تتم بالإمداد بالهواء أو الأكسجين النقي.

4. 5. 3. البحيرات الهوائية أو المهواة Aerated lagoons:

البحيرات الهوائية (الشكل رقم 7-4) شائعة في المجتمعات الصغيرة، في هذه النظم تستخدم أجهزة التهوية لخلط محتويات البركة من المياه الملوثة بالأكسجين، ويشار أحيانًا إلى هذا الخلط أو المزج بأنه مزج جزئي أو كلي، اعتمادًا على مدى التهوية. البحيرات الهوائية جزئية المزيج غالبًا ما تكون بحيرات لا هوائية، تم تكييفها ورفع مستواها لاستقبال المزيد من مياه الصرف الصحي. وباستثناء التصميمات التي تستخدم الرياح في تحريك أجهزة التهوية، فإن معظم أجهزة التهوية تتطلب طاقة لكي تعمل، إلا أن تكاليف الطاقة تكون دائمًا أقل بكثير من تلك التي لغيرها من نظم المعالجة الميكانيكية. ولا شك أن التهوية تجعل المعالجة أكثر كفاءة، والذي يعوض تكاليف الطاقة في كثير من الحالات، وبصفة عامة، فإن البحيرات الخلوية المهواة تتطلب كميات أقل من مساحة الأرض وأوقات لإتمام المعالجة.

شكل (7-4): بحيرة هوائية أو مهواة

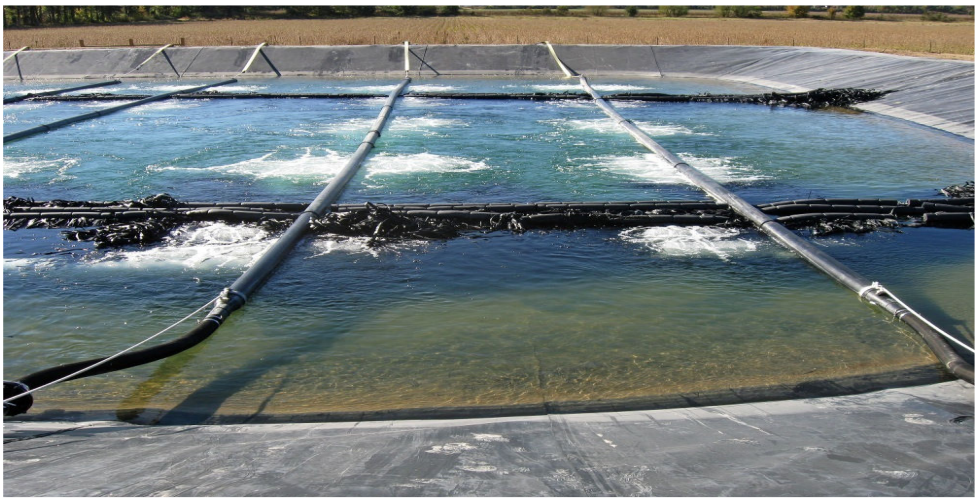
والبحيرة الهوائية هي وحدة معالجة يستخدم فيها نظام النمو المعلق (أي معلق من الميكروبات). ونظام البحيرة المهواة يتكون من بحيرة كبيرة أو أحواض ترابية مزودة بأجهزة تهوية ميكانيكية مجهزة للحفاظ على البيئة هوائية، ومنع ترسب الكتلة الحيوية المعلقة. والبحيرة مزودة بمدخل للمخلفات المائية في أحد الأطراف؛ لتمكين تدفق مياه الصرف الصحي من خلاله، ومنفذ في الطرف الآخر، ويتم احتجاز المياه الملوثة لوقت محدد قبل أن تصرف عن طريق المنفذ، وفي بداية عمليات المعالجة فإن محتوى البحيرة الهوائية من الكائنات الحية الدقيقة أقل بكثير من نظام الحمأة المنشطة؛ لأنه لا يوجد إعادة تدوير الحمأة، ولذلك لابد من استمرار المعالجة لفترة أطول كثيرًا؛ من أجل تحقيق نفس كفاءة المعالجة باستخدام الحمأة المنشطة.

وبقاء المياه الملوثة في البحيرة لفترة طويلة يعتبر ميزة عندما يراد هدم المواد الكيميائية العضوية المعقدة. والكائنات الحية الدقيقة في البحيرات الهوائية هي أكثر مقاومة للاضطرابات الناجمة عن عملية تغذية البحيرة بمخلفات مائية خام من تلك الموجودة في عملية الحمأة المنشطة؛ بسبب كبر حجم البحيرة، وبقاء المياه الملوثة فيها لأوقات أطول، والفرق الرئيس بين عمليات الحمأة المنشطة والبحيرات الهوائية، هو أنه في الأخيرة لا توجد أحواض ترسيب، ولا إعادة تدوير الحمأة، وقد تزود البحيرات الهوائية ببركة نضوج لمزيد من المعالجة لمياه الصرف.

والبحيرات الهوائية ضحلة نسبيًّا، بعمق يتراوح من 2-5 أمتار، ومزودة بأجهزة التهوية الميكانيكية على منصات طافية أو ثابتة، وتستخدم أجهزة التهوية الميكانيكية لتوفير الأكسجين للمعالجة البيولوجية لمياه الصرف، وكذلك الإبقاء على المواد الصلبة البيولوجية في حالة معلق. وتتم التهوية من أعلى إلى أسفل، ويكون الهواء مندفعًا بقوة كافية للحفاظ على المواد الصلبة في حالة معلق، مع خلط كامل بالهواء، ولا يحدث ترسيب في مثل هذه البحيرات. وفي ظروف التوازن، فإن كمية المواد الصلبة الجديدة (الميكروبية) المنتجة في النظام تساوي كمية المواد الصلبة التي تخرج من النظام، وهكذا فإن تركيز المواد الصلبة في مياه الصرف مرتفع نسبيًّا، وقد يحتاج إلى مزيد من المعالجة بعد مثل هذه البحيرات. وقد وجد أن خلط الماء مفيد من وجهات نظر عدة؛

حيث إنه بدون أن يحدث خلط جيد تظل الطبقات السطحية مهواة لفترات طويلة نسبيًّا من الزمن. وهذه الظروف توفر بيئة ممتازة للطحالب لتستقر وتنمو، والخلط أيضًا يخلص النظام من ثاني أكسيد الكربون، وكما سبق ذكره أيضًا فإن أجهزة التهوية قد تكون عائمة (شكل 8-4)، أو قد تكون ثابتة (شكل 9-4).

شكل (8-4): أجهزة تهوية عائمة



شكل (9-4): أجهزة تهوية ثابتة

ونظرًا لأن عمليات البحيرات الهوائية هي - بالأساس - مثل عمليات الحمأة المنشطة، فإن الميكروبات السائدة في البحيرات الهوائية هي نفسها ميكروبات الحمأة المنشطة. غير أن هناك بعض الاختلافات؛ حيث إن كبر حجم مساحة السطح في البحيرات الهوائية يجعل تأثير حرارة الجو على التركيب الميكروبي أكثر من تأثيرها في حالة أحواض الحمأة المنشطة.

4. 5. 4. الهضم الهوائي The aerobic digestion process:

الهضم الهوائي هو عملية أكسدة وتحلل للأجزاء العضوية المتبقية في الحمأة، بواسطة الكائنات الدقيقة في وجود الأكسجين. ففي ظل الظروف الهوائية تستهلك البكتيريا المواد العضوية بسرعة، وتحولها إلى غاز ثاني أكسيد الكربون والماء. الهضم الهوائي ينتج عنه استقرار المنتج، أي الوصول إلى حالة ثابتة لا تحتاج إلى أي مزيد من عمليات المعالجة، كذلك فإن الهضم الهوائي يقلل من الكتلة والحجم، ويقلل من الكائنات المسببة للأمراض، وبالمقارنة مع الهضم اللا هوائي فإن الهضم الهوائي يحتاج إلى محطات أصغر، ولكن تكاليف استخدام التشغيل تكون أكبر بكثير؛ بسبب الطاقة المستخدمة، والمضخات، والمحركات اللازمة لإضافة الأكسجين لهذه العملية، ولكن منذ ظهور تكنولوجيا مرشحات الألياف الحجرية Stone fiber filter technology التي تستخدم تقنية تيارات الهواء الطبيعية، لم تعد هذه الطريقة مكلفة بالدرجة العالية. وعمليات الهضم الهوائي قد تستخدم للمعالجة في الحالات الآتية:

1. مخلفات عمليات الحمأة المنشطة.
2. مخلفات عمليات مرشحات التقطير.
3. خليط من مخلفات عمليات الحمأة المنشطة وعمليات مرشحات التقطير.

وتعمل محطات الهضم الهوائي من خلال ناشرات الهواء Air diffusers أو أجهزة التهوية، التي عادة ما تكون على شكل أقراص (شكل رقم 10-4)، أو أنبوب (شكل رقم 11-4) تستخدم لنقل الهواء الجوي إلى المياه التي تحتاج لمزيد من المعالجة. وناشرات الهواء تستخدم الأغشية المطاطية التي ينتج عنها فقاعات صغيرة الحجم، أو قد تكون مصنوعة من السيراميك وينتج عنها فقاعات كبيرة الحجم.

شكل (10–4): ناشرات هواء على شكل أقراص

شكل (11–4): ناشرات هواء على شكل أنابيب

4. 6. عمليات المعالجة بنظام النمو الهوائي العالق Aerobic attached-growth treatment processes:

4. 6. 1. مرشح التقطر Trickling filter:

مرشح التقطر يستخدم في المعالجة الثانوية، والتي تلي المعالجة الأولية، ومن المعروف أن المعالجة الأولية يتم فيها إزالة المواد الصلبة المترسبة والمواد الطافية، ولذلك فإن المياه الملوثة تصل إلى مرشح التقطر، وهي تحتوي على مواد صلبة غروية أو مواد ذائبة، ولذلك فإن الغرض من استخدام مرشح التقطر هو إزالة هذه المواد الصلبة الذائبة والغروية، من خلال عملية التحلل البيولوجي الهوائية.

في مرشح التقطر (شكل 4-12) يتم تكوين بيئة؛ لتنمو عليها الميكروبات، وهذه البيئة تشبه السرير؛ لكي تأخذ الشكل المناسب لنمو الكائنات، ولذلك تسمى بالسرير المثبت fixed bed، ويتكون هذا السرير من صخور، زلط، خبث المعادن، مواد من البولي إيثيلين، البيت موس أو مواد بلاستيكية. تمرر مياه المجاري على هذه المواد من أعلى إلى أسفل ببطء شديد، فتنمو الكائنات الحية المختلفة، حتى تتكون طبقة لزجة من الميكروبات تغطي السرير بالكامل من جميع الجوانب، ويتم نشر المياه الملوثة على طبقات الكائنات الحية الدقيقة، ويسمح لهذه المياه أن تنساب أو تتقطر إلى أسفل، من خلال الكائنات الحية الدقيقة التي تغطي مكونات المرشح.

يتم توفير ظروف هوائية جيدة لهذه الميكروبات؛ إما عن طريق ضخ كميات من الهواء إلى سرير الميكروبات، وإما أن تكون التهوية طبيعية عندما يكون المرشح أو السرير به فتحات للتهوية. أما ميكانيكية هدم المواد العضوية فتتلخص في ادمصاص المواد العضوية الموجودة في مياه المجاري (أو أي مخلفات مائية أخرى) على الطبقة الميكروبية اللزجة، ومع انتشار الهواء خلال الطبقة الميكروبية اللزجة، يتوفر الأكسجين اللازم لعملية الأكسدة الكيموحيوية للمواد العضوية؛ لينتج عن ذلك غاز ثاني أكسيد الكربون وماء ونواتج أكسدة أخرى.

شكل (12–4): مرشح التقطر Trickling filter

وكلما زاد سمك الطبقة الميكروبية اللزجة كلما كان من الصعب على الهواء أن يخرقها، وبالتالي فإنه من المحتمل أن تتكون طبقة داخلية غير هوائية.

ومرشحات التقطر الحديثة تتكون من بيئات شديدة النفاذية، والتي تلتصق أو تتعلق بها الميكروبات، والتي من خلالها يتم مرور المياه الملوثة، وعادة تتكون مواد المرشح من صخور (زلط)، تختلف في حجمها من 25 إلى 100 مم في القطر، وعمق هذه الصخور يتراوح من 0.9 إلى 2.5 متر، بمتوسط 1.8 متر. أما مرشحات التقطر التي تتكون من مواد بلاستيكية فهي اختراع أكثر حداثة؛ حيث يتم بناؤه على شكل مربع، أو أي شكل آخر، بعمق يتراوح من 9 إلى 12 متر، وفي كل الحالات يتم بناء هذه المرشحات بنظام صرف تحتها؛ حتى يمكن تجميع المياه التي تم معالجتها، وكذلك أي مواد صلبة حيوية. هذا الصرف التحتي مهم جدًّا، ليس فقط كنظام تجميع للمياه المعالجة، ولكن أيضًا كنظام يتم من خلاله تدوير الهواء اللازم لعملية الأكسدة. والمياه المعالجة يتم تجميعها في أحواض ترسيب؛ وذلك بغرض فصل المواد الصلبة، وفي الغالب يتم إعادة جزء من المياه التي تم معالجتها إلى مرشح التقطر؛ وذلك لتخفيف المياه الملوثة الخام.

4. 6. 2. الوصلات الحيوية الدوارة Rotating biological contactor (RBC):

هي أيضًا عملية معالجة حيوية، تستخدم للمخلفات المائية بعد مرحلة المعالجة الأولية. في هذه العملية يسمح للمخلفات المائية أن تتلامس مع بيئة حيوية؛ لإزالة الملوثات من المياه الملوثة قبل صرفها إلى الأنهار أو البحيرات أو المحيطات، ويتكون هذا النظام من مجموعة من الأسطوانات القريبة من بعضها البعض، والمثبتة في عمود دوار مثبت في المياه، بحيث يكون حوالي 40٪ من سطح الأسطوانات مغمورًا تحت الماء، والباقي فوق سطح المياه (شكل 13-4).

شكل (13-4): الموصلات الحيوية الدوارة

يدور العمود بالأسطوانات ببطء، فيكون هناك فرصة لغمر هذه الأسطوانات في المياه، وفي الوقت نفسه، تكون هناك تهوية جيدة باستمرار، وتنمو الميكروبات على سطح هذه الأسطوانات، حتى تتكون طبقة من الأحياء الدقيقة محيطة بالأسطوانات، وهذه الأسطوانات مكونة - في الغالب - من مواد بلاستيكية، بحيث تدمص عليها المواد العضوية، وبذلك تتكون بيئة جيدة لنمو الميكروبات. ومع تزايد ادمصاص المواد العضوية العالقة في مياه المجاري يزداد نمو الميكروبات، حتى تتكون رقائق حيوية، أي طبقات حيوية يطلق عليها Biofilms، تلتصق بالأسطوانات، وتقوم بتمثيل المواد العضوية تمثيلًا كاملًا في ظل توفر التهوية الناتجة من دوران الأسطوانات؛ مما يسهل على الميكروبات القيام بأكسدة الملوثات العضوية أكسدة تامة، حيث تتحول إلى ثاني أكسيد كربون وماء ونواتج أكسدة أخرى غير ملوثة للبيئة.

4. 7. الهضم اللا هوائي Anaerobic digestion:

الهضم اللا هوائي هي العملية التي عن طريقها تقوم الميكروبات بهدم المواد القابلة بيولوجيًّا للهدم تحت الظروف غير الهوائية، وتستعمل هذه العملية على نطاق واسع في

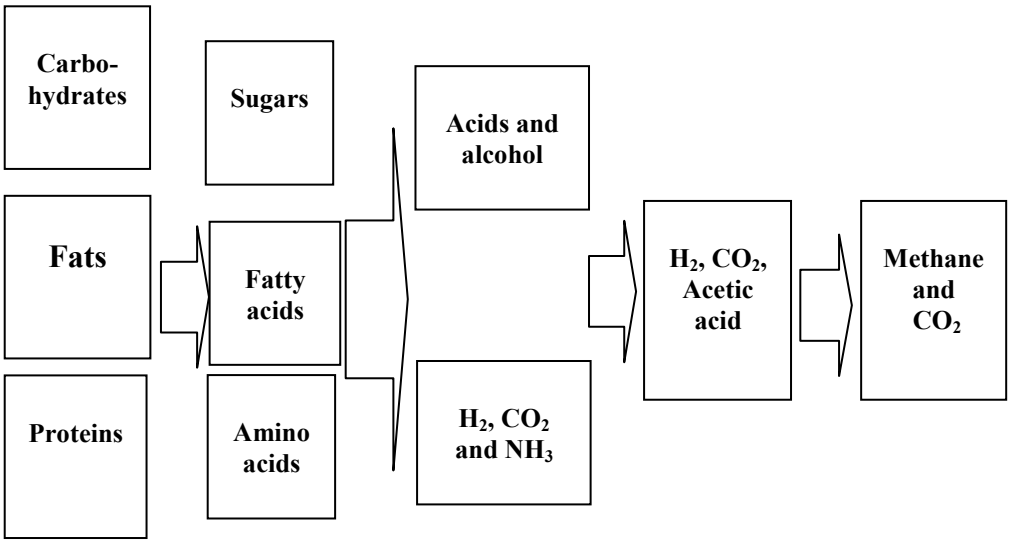
معالجة الوحل الراسب أثناء معالجة مياه المجاري، وكذلك المخلفات العضوية؛ لأن هذه العملية تقلل من حجم وكتلة المواد الداخلة في التفاعل، كما تقضي على الميكروبات المسببة للأمراض.

وعملية الهضم اللا هوائي تعتبر الآن مصدرًا متجددًا للطاقة؛ حيث ينتج عنها الميثان المختلط بنسبة من غاز ثاني أكسيد الكربون، والذي يطلق عليه الغاز الحيوي Biogas، والذي يستعمل بديلًا للطاقة البترولية أو الطاقة الكهربائية، علاوة على ذلك، فإن عملية الهضم اللا هوائي تمنع تصاعد الغازات الضارة إلى الغلاف الجوي، كما أن المواد الصلبة المتخلفة عن عملية الهضم تستخدم سمادًا عضويًّا جيدًا.

تبدأ عملية الهضم اللا هوائي بقيام البكتيريا بتحليل المواد الداخلة إلى المفاعل؛ بغرض تكسير المواد غير الذائبة، مثل المواد الكربوهيدراتية، وجعلها ميسرة لبكتيريا أخرى. تقوم بكتيريا مرحلة الحموضة Acidogenic bacteria بعد ذلك بتحويل السكريات والأحماض الأمينية الناتجة من المرحلة الأولى إلى ثاني أكسيد الكربون، والهيدروجين، والأمونيا، والأحماض العضوية. تقوم بعد ذلك بكتيريا مرحلة حامض الخليك Acidogenic bacteria بتحويل هذه النواتج إلى حامض خليك، مع مزيد من الأمونيا والهيدروجين وثاني أكسيد الكربون. ثم بعد ذلك تقوم بكتيريا مرحلة الميثان Methanogenic bacteria بتحويل هذه المكونات إلى غاز الميثان وثاني أكسيد الكربون، ولكي تكون عملية إنتاج الغاز الحيوي مفهومة جيدًا من الناحية الميكروبيولوجية، فمن الأفضل أن نعطي فكرة تفصيلية عن مراحل إنتاجه، وعن بكتيريا الميثان كما يلي:

4. 7. 1. مراحل تكوين وإنتاج الغاز الحيوي Stages of biogas production:

أثناء عملية الهدم اللا هوائي تتحول المادة العضوية إلى غازي الميثان وثاني أكسيد الكربون (الغاز الحيوي) في خطوات متميزة عن بعضها البعض، عن طريق مجموعات مختلفة من الميكروبات، كما يتضح من شكل (14-4).



شكل (14-4): مراحل تكوين وإنتاج خليط من الميثان وثاني أكسيد الكربون (الغاز الحيوي)

كما يتضح من الشكل السابق يمكن تحديد خطوات إنتاج الغاز الحيوي في أربع مراحل متميزة كما يلي:

1. مرحلة التحلل Hydrolysis:

لكي تستطيع البكتيريا في المفاعلات غير الهوائية أن تمثل المواد العضوية الموجودة، فلابد أن تقوم بتكسير هذه المواد إلى مكوناتها الأصغر في الوزن الجزيئي؛ حيث إن جدار الخلية الميكروبية لا يسمح بمرور الجزيئات كبيرة الوزن الجزيئي، ولذلك فلابد للمواد الكربوهيدراتية - على سبيل المثال - أن تتحلل إلى سكريات، والدهون إلى أحماض دهنية والبروتينات إلى أحماض أمينية ... إلخ وهذا ما يسمى بالتحلل، ولذلك فإن التحلل هو أول خطوة مهمة في إنتاج الغاز الحيوي، ويقوم بتنفيذ المرحلة الأولى البكتيريا غير ذاتية التغذية مثل: Bacillus cereus, B. megaterium, Clostridium, Bacteriods. Ruminococcus، حيث يحدث تخمر للمركبات

العضوية المعقدة، مثل عديد السكريات والبروتينات واللبيدات، وتكون نواتج التخمر لهذه المواد أحماضًا دهنية طويلة السلسلة والخلات والفور مات وحامض البروبيونيك والهيدروجين والأمونيا، وكحولات مختلفة، وأحماض أمينية، ومركبات أروماتية. بالنسبة لحامض الخليك والهيدروجين الناتجين من المرحلة الأولى، فيمكن لبكتيريا الميثان تحويلهما مباشرة إلى غاز الميثان، أي أن هاتين المادتين تدخلان مباشرة إلى المرحلة أو الخطوة الرابعة الموضحة أسفله.

2. مرحلة إنتاج الأحماض Acid genesis:

في هذه الخطوة، فإن المنتجات الأخرى (غير حامض الخليك والهيدروجين) - مثل الأحماض الدهنية الطيارة ذات السلاسل الطويلة بدرجة أطول من حامض الخليك - يجب أن تتحول إلى أحماض قصيرة السلسلة، مثل الأستات والفورمات، وتقوم بتنفيذ هذه المرحلة مجموعة من البكتيريا تسمى عادة Syntrophic bacteria؛ حيث تقوم بهدم الأحماض الدهنية طويلة السلسلة وحامض البروبيونيك والكحولات المختلفة، وبعض الأحماض الأمينية والمركبات الأورماتية إلى المواد الأولية لإنتاج غاز الميثان، وهي الهيدروجين والخلات والفورمات، ونظرًا لأن هناك كثيرًا من الميكروبات يمكنها أن تهدم هذه المواد، دون أن تكون نواتج الهدم هي المواد الأولية لإنتاج غاز الميثان - فإن البكتيريا التي تقوم بتفاعلات المرحلة الثانية تسمى Syntrophic metabolizes.

3. مرحلة إنتاج حامض الخليك Acetogenesis:

في هذه المرحلة تتحول معظم نواتج المرحلة الثانية إلى حامض خليك، بالإضافة إلى ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين، وهي أهم المواد التي تتحول إلى ميثان في المرحلة الرابعة.

4. مرحلة إنتاج غاز الميثان Methanogenesis:

هذه المرحلة هي الأخيرة، حيث تقوم بها مجموعات كبيرة ومتنوعة من بكتيريا الميثان، حيث توجد مجموعة تستخدم الهيدروجين والفورمات الناتجين من المرحلة الثانية لاختزال ثاني أكسيد الكربون إلى ميثان، وتسمى هذه المجموعة

hydrogenotrophic methanogens، وتوجد مجموعة أخرى تمثل الخلات إلى ميثان وثاني أكسيد الكربون، وتسمى هذه المجموعة acetotrophic methanogens، وهذه المرحلة حساسة جدًّا لانخفاض درجة الـ pH، حيث تحدث عند درجة pH تتراوح من 6.5 إلى 8، والمعادلة النهائية التي تعبر عن إنتاج الغاز الحيوي هي:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3\ CO_2 + 3CH_4 \qquad (4\text{-}4)$$

هذا العرض السريع لعملية الهدم اللا هوائي للمادة العضوية التي توجد في المياه الملوثة، يوضح أن مجموعات البكتيريا هي التي تقوم بأنظمة تمثيلية متعددة ومختلفة، وتتداخل فيما بينها لكي يتم الهدم. وهذا على عكس الأنظمة الأخرى المتبعة في معالجة المياه الملوثة، سواء أكانت تحت ظروف هوائية أو ظروف عكس تأزت؛ حيث يمكن لميكروب واحد أن يهدم المادة العضوية تمامًا إذا توفر مستقبل الإلكترونيات (الأكسجين أو النترات) بكمية كافية.

ولكل ما تقدم نقول إن أصعب ما في عملية المعالجة اللا هوائية هو المحافظة على التوازن المناسب بين مختلف المجاميع البكتيرية، بحيث يكون معدل إنتاج المواد الوسطية التي تعتبر مفتاحًا لإنتاج الميثان مساويًا لمعدل استهلاكها، بحيث لا تتراكم في الوسط، وهذا يتطلب خبرة ودراية تامة بمسارات التفاعل وتصميم المفاعلات.

2.7.4. بكتيريا الميثان (بكتيريا المرحلة الرابعة) Methane bacteria:

بكتيريا الميثان هي مجموعة مختلفة من الميكروبات جميعها تكتسب الطاقة اللازمة لنموها من التفاعلات التي تؤدي إلى إنتاج الميثان، وهي بكتيريا متحركة وغير متجرثمة وسالبة لتفاعل جرام. وبكتيريا الميثان كمجموعة فسيولوجية مقدرتها التأكسدية محدودة، لا تستطيع أن تمثل السكريات البسيطة أو المعقدة كمصدر للكربون، ويقتصر نشاطها الحيوي على الأحماض الدهنية والكحولات الأليفاتية وغازات الهيدروجين وأول أكسيد الكربون والخلات والفورمات، وقليل من المركبات العضوية. وبعض الأنواع من بكتيريا الميثان تبدي تخصصًا شديدًا بالنسبة للمواد الأولية المستخدمة، وهذا التخصص جعل بكتيريا الميثان

تعتمد على ميكروبات أخرى لكي تجهز لها مواردها الأولية. وبعض بكتيريا الميثان - مثل: Methanobacterium omelinskii, M. formicicum, M. thermoautotrophicm – لها القدرة على النمو ذاتي التغذية، أي تستخدم ثاني أكسيد الكربون كمصدر وحيد للكربون، وبدون بكتيريا الميثان لا يحدث هدم كامل للمادة العضوية تحت الظروف غير الهوائية؛ حيث ستتوقف عملية الهدم عند نواتج مرحلة التخمير غير الغازية.

وهنا لابد للقارئ أن يعلم أن أهم المواد الأولية بالنسبة لبكتيريا الميثان هي الهيدروجين؛ حيث إن مقدرة بكتيريا الميثان على استخدامه كمادة أولية، تلعب دورًا أساسيًّا في تنظيم تفاعلات مرحلة التخمر والتحكم في نوع نواتجها، كما تلعب دورًا أساسيًّا أيضًا في تهيئة الظروف البيئية المناسبة لهدم الأحماض الدهنية والمركبات الأروماتية. وعلى أية حال، فإن بكتيريا الميثان لها مقدرة عالية على استخدام الهيدروجين، حتى أن المخمرات غير الهوائية التي تدار بطريقة صحيحة ينخفض فيها تركيز الهيدروجين بدرجة كبيرة جدًّا بالنسبة للفورمات كمادة أولية، فهو ناتج شائع لمرحلة التخمر، وتستطيع كثير من بكتيريا الميثان أن تستخدمه كمادة أولية، ولكن وجد أن هذه الميكروبات تختلف فيما بينها اختلافًا كبيرًا في مقدرتها على تمثيل الفورمات؛ حيث إن أقدر هذه البكتيريا على تمثيل الفورمات هي Methanobacterium formicicum.

أما بالنسبة للخلات فهي منتج رئيس في مرحلة التخمر، وكميًّا تعتبر الخلات أهم مادة أولية في إنتاج الميثان؛ فقد وجد أن 60-90٪ من الميثان المنتج في المخمرات غير الهوائية يتكون من مجموعة الميثايل التي توجد على الخلات، وتحت ظروف الحرارة المرتفعة أو عند زيادة تركيز الأمونيوم، فيبدو أن طريق تمثيل الخلات يبدأ بأكسدة مجموعة الميثايل. وتنتمي بكتيريا الميثان التي تستخدم الخلات إلى الأجناس Methanosarcina, Methanosaeta، ولكن ثبت أن الجنس Methanosarcina له معدل نمو أسرع، ومقدرة أعلى على استخدام الخلات، بالمقارنة بالجنس Methanosaeta، كما ثبت أن بكتيريا Methanosarcina تستطيع أيضًا أن تستخدم الميثانول والميثايل أمين كمواد أولية لإنتاج الميثان. إن سير تفاعل هذه

العمليـة في الاتجـاه الـصحيح يتطلـب الحفـاظ على الظـروف الـلا هوائيـة؛ ولذلـك تـستخدم مفـاعلات محكمـة الإغـلاق، بحيـث يـصعب تـسرب الهـواء إليهـا، كـذلك فـإن الحفـاظ على درجـة حـرارة الهـضم، ودرجـة الـ pH ومعـدل دخـول المـواد الخـام إلى المفاعـل، يعتـبر مـن العوامل المهمة جـدًّا لهـدم المـواد، حـتى أن أي خلـل في أي عامـل منهـا قـد يـؤدي إلى فـشل العملية بأكملها.

4. 7. 3. تنظيم تفاعلات إنتاج الميثان Regulation of methane production reactions:

لابـد أن يكـون هنـاك تـوازن شـديد بـين مراحـل إنتـاج الميثـان؛ حـتى تـتم العمليـة بنجـاح، وكمـا ذكرنـا فـإن الخطـوة الأولى في عمليـة الإنتـاج هي تحلـل وتخمـر المـواد العـضوية معقـدة التركيـب، وفي كثـير مـن المخلفـات - خـصوصًا تلـك الـتي تحتـوي على مـواد سـليولوزية - فـإن خطـوة التحلـل في حـد ذاتهـا قـد تكـون مُعِيقـة لبعـض الوقـت لعمليـة الإنتـاج؛ ولذلـك يجـب الإلمـام بـالظروف البيئيـة الـتي تـسرع مـن تحلـل المـواد العـضوية المعقـدة. وعمومًـا فـإن عديـدات الـسكر مثـل الـسليولوز والهيميـسليولوز والبكتـين والنـشا، تتحلـل إلى مـواد ذات وزن جـزيئي أقـل، مثـل الـسكريات الـتي تتخمـر معطيـة حـامض بيروفيـك، ومـن حـامض البيروفيـك تنـتج مـواد مختلفـة مثـل الأحمـاض العضوية والكحولات الـتي تـصبح مـواد أوليـة لإنتـاج الميثـان. كمـا أن البروتينـات تتحلـل أيـضًا إلى بيتيـدات وأحمـاض أمينيـة، الـتي تتخمـر إلى مـواد أوليـة لإنتـاج الميثـان، مثـل isobutyrate ، isovalerate، أمـا الدهـون فتتحلـل إلى أحمـاض دهنيـة طويلـة السلـسلة، وهي مـواد أوليـة لإنتـاج الميثـان مبـاشرة، وليـست مـادة أوليـة لبكتيريـا التخمـر، كمـا تتحلـل الدهـون أيـضًا إلى جليـسرول، وبعـض الـسكريات الـتي يجـب أن تتخمـر أولًا لتعطي مـواد أوليـة لإنتـاج الميثـان. ومـن أهـم العوامـل الـتي تلعـب دورًا أساسـيًّا في تنظـيم كميـة ونـوع المـواد الـتي تنـتج في مرحلـة التخمـر، هـو تـركيز الهيـدروجين؛ فـفي المخمـرات التي يتم تـشغيلها بطريقـة جيـدة وصـحيحة - حيـث يكـون تـركيز الهيـدروجين منخفـضًا - فـإن بكتيريـا التخمـر في مـسار تفاعلهـا تعيـد أكـسدة مرافقاتهـا الإنزيميـة $NADH_2$ عـن طريـق نـزع الهيـدروجين، وهـذا يـسمح لهـذه البكتيريـا أن تمثـل حـامض البيروفيـك

غالبًا إلى خلات وثاني أكسيد كربون وهيدروجين، وهي أهم المواد الأولية لإنتاج الميثان. أما إذا كانت المخمرات لا يتم تشغيلها بطريقة صحيحة، فيرتفع فيها تركيز الهيدروجين، وتجبر بكتيريا التخمر على إعادة أكسدة مرافقاتها الإنزيمية $NADH_2$، عن طريق إنتاج أحماض البروبيونيك والبيوتيريك واللاكتيك، وليس عن طريق إنتاج الخلات، وهي المادة الأولية المفضلة لدى بكتيريا الميثان. ومن العوامل التي تسبب ارتفاع تركيز الهيدروجين في الوسط، وتعرقل نجاح عملية إنتاج الميثان، هو الارتفاع الفجائي في تركيز المادة العضوية، أي زيادة معدل إضافة المياه الملوثة إلى المخمرات غير الهوائية؛ ولذلك يجب أن يكون معدل الإضافة محسوبًا بدقة شديدة، بحيث لا يزيد تركيز الهيدروجين في المخمر.

وعندما يحدث تثبيط لبكتيريا الميثان يزداد أيضًا ارتفاع تركيز الهيدروجين في الوسط؛ ولذلك يجب تجنب جميع العوامل التي تثبط نمو بكتيريا الميثان، مثل وجود المعادن الثقيلة بتركيزات أكثر من اللازم، وتجدر الإشارة إلى أن الأحماض التي تنتج نتيجة زيادة تركيز الهيدروجين في الوسط تؤدي إلى انخفاض رقم الـ pH؛ مما يؤدي إلى زيادة نمو البكتيريا المحبة للحموضة؛ ولذلك تسود بكتيريا حامض البيوتيريك، ويزداد هذا الحامض زيادة كبيرة، وهذا أيضًا يعرقل نجاح عملية إنتاج الميثان.

وكما سبق توضيحه، فإن بكتيريا الميثان السائدة تختلف باختلاف المواد الأولية؛ ولذلك فقد تتوفر الخلات ولا توجد بكتيريا الميثان المتخصصة لاستخدام هذه المادة؛ مما يؤدي إلى تراكمها في المخمر، وإذا تراكمت الخلات تتأثر عملية إنتاج الميثان؛ ولذلك لابد من التأكد من وجود بكتيريا الميثان المستعملة للخلات بالذات؛ لأنها هي المادة الأولية الرئيسة لإنتاج الميثان. ومن العوامل البيئية المهمة أيضًا - التي يجب الإلمام بها، والتي تؤثر على معدل النمو وعلى النشاط الحيوي لبكتيريا الميثان - هي درجة الحرارة، وقد وجد أن هناك مدى واسعًا جدًّا من درجة الحرارة بالنسبة لبكتيريا الميثان؛ حيث إنها قد تنشط في أراضي القطب الشمالي عند درجة 6 مئوية، كما تنشط أيضًا عند درجة حرارة أعلى من 100 درجة مئوية.

وبالنسبة لبكتيريا الميثان التي تستخدم الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون كمواد أولية لإنتاج الميثان، فلا تتأثر إطلاقًا بارتفاع درجة الحرارة؛ حيث وجد أن درجة الحرارة المثلى للبكتيريا Methanopyrus kandleri هي 100 درجة مئوية؛ بل إن هذه البكتيريا تستطيع أن تنمو عند 110 درجة مئوية، كما توجد عدة أنواع من البكتيريا المستخدمة لليهدروجين ذات درجة حرارة مثلى تتراوح من 83-85 درجة مئوية. وبالنسبة لبكتيريا الميثان التي تنتمي لمجموعة Acetotrophic، فلا يوجد منها أي نوع يمكن أن ينشط عند درجة حرارة أعلى من 70 درجة مئوية، أما بكتيريا الميثان المحبة للحرارة المرتفعة، فمنها بكتيريا الجنس Methanosaeta، التي تنمو على درجة حرارة مثلى 60-65 درجة مئوية، ومنها البكتيريا Methanosaeta sp، ودرجة حراراتها المثلى 50-58 درجة مئوية، وقد وصف نوع واحد من بكتيريا الميثان محب للحرارة المنخفضة، أي حوالي 15 درجة مئوية، وهو النوع Methanogenium frigidum. وبالإضافة لما سبق، توجد أنواع كثيرة من بكتيريا الميثان المحبة للحرارة المتوسطة، ويتراوح مداها من 30-35 درجة مئوية، وهكذا يوجد نظامان لإنتاج الميثان من حيث درجة الحرارة، وهما نظام استخدام الكائنات المحبة للحرارة المرتفعة، ونظام استخدام الكائنات المحبة للحرارة المتوسطة. أما بالنسبة لتأثير درجة الـ pH على تنظيم سير التفاعل، فإن الغالبية العظمى من بكتيريا الميثان تفضل درجة pH قريبة من التعادل، على الرغم من أن بعضها تفضل درجة pH منخفضة، تصل إلى 4.

4. 7. 4. التطبيقات Applications:

تستخدم عملية الهضم اللا هوائي بشكل شائع في معالجة رواسب معالجة مياه المجاري، وهي عملية بسيطة إذا ما تمت بعناية؛ حيث تؤدي إلى تخفيض هائل في كمية المادة العضوية، وتقريبًا كل المواد العضوية يمكن هدمها عن طريق الهضم أو التحلل اللا هوائي. وتشمل هذه المواد القابلة للهدم الحيوي مخلفات مثل الورق والحشائش، ومخلفات المواد الغذائية، ومخلفات المجاري، ومخلفات الحيوان، ويستثنى من ذلك فقط المواد الخشبية؛ حيث إن اللجنين لا يتحلل تحت الظروف غير الهوائية.

في البلاد النامية، فإن مخلفات المنازل البسيطة ومخلفات المزارع يمكن أن يتم هضمها لا هوائيًّا، وينتج عن ذلك غاز الميثان، الذي يمكن أن يستخدم مصدرًا جيدًا للطاقة، فيستخدم - مثلًا - في الطهي وفي الإضاءة. ومنذ سنة 1975 توسعت الصين والهند في بناء وحدات صغيرة لإنتاج الغاز الحيوي، واستخدامه كمصدر للطاقة في المناطق الريفية للطهي والإضاءة، وتزايد الضغوط الخاصة بقوانين البيئة أدى إلى تزايد عمليات الهدم اللا هوائي لرواسب معالجة مياه المجاري، وبصفة عامة، فإن اتباع تكنولوجيا الهضم اللا هوائي يمكن أن يحافظ على البيئة، من خلال عدد من النقاط كما يلي:

- استبدال مصادر الطاقة الملوثة للبيئة بالغاز الحيوي.
- منع تصاعد غاز الميثان إلى الغلاف الجوي.
- استبدال الأسمدة المصنعة كيماويًّا بالأسمدة العضوية الناتجة من اتباع هذه العملية.
- تقليل استخدام الطاقة الكهربائية عالية التكاليف.

إن الميثان والقوى الناتجة من الهضم اللا هوائي يمكن أن تستخدم بديلًا للوقود الناتج عن احتراق الزيوت، وبذلك يتم المحافظة على طبقة الأوزون من الدمار، هذا يعود إلى الحقيقة التي مؤداها أن الكربون في المواد التي تم هدمها حيويًّا لإنتاج غاز الميثان هو جزء من دورة الكربون الطبيعية. والكربون المنطلق إلى الغلاف الجوي نتيجة استهلاك الغاز الحيوي أو غاز الميثان، تتم إزالته بواسطة النباتات لكي تنمو، وذلك عن طريق عملية التمثيل الضوئي، فإذا استمر الحال على هذا النحو، فإننا نحصل على نظام بيئي متعادل الكربون. هذا بعكس حرق الكربون الموجود في الزيوت التي كانت مدفونة في الأرض ربما لملايين السنين، والذي يؤدي استهلاكه إلى زيادة غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. ومخلفات الهضم اللا هوائي السائلة تستخدم سمادًا للتربة، وهو غني بالعناصر الغذائية، وبالتالي يمكن أن تستخدم بديلًا للأسمدة المصنعة كيماويًّا، كما أن المخلفات الصلبة تستخدم محسنات للتربة الزراعية؛ ولذلك فإن هناك بلاد تسوق فيها مخلفات إنتاج الغاز الحيوي بالأهمية نفسها التي يسوق فيها الغاز الحيوي.

4. 7. 5. تغذية المفاعل Feed stock:

إن أكثر العوامل أهمية في نظم الهدم اللا هوائي، هي تغذية المفاعل بالمواد الأولية، ومفاعلات الهدم اللا هوائي يمكنها أن تتقبل أي مواد عضوية قابلة للهدم، إلا أنه إذا كان الغرض من عملية الهدم اللا هوائي هو إنتاج الغاز الحيوي، فإن مستوى المواد القابلة للتعفن سيكون هو مفتاح نجاح العملية، فكلما زاد مستوى المواد القابلة للتعفن في المواد الداخلة للمفاعل، كلما زاد إنتاج الغاز الحيوي، وعلى ذلك فإن تركيب المواد الأولية يعتبر عاملًا رئيسًا في عملية إنتاج الغاز الحيوي، وهناك عدد من التقنيات أصبحت ميسرة لتقدير تركيب وخصائص المواد الأولية الداخلة إلى المفاعل، ويمكن للميكروبات غير الهوائية أن تهدم المواد العضوية بدرجات مختلفة من النجاح. بالنسبة للمواد الجاهزة مثل المواد الكربوهيدراتية قصيرة السلسلة، فإنها تهدم بسهولة، وفي مدة زمنية قصيرة، أما المواد طويلة السلسلة أو عديدات التسكر - مثل السليولوز والهيميلسليوز - فإنها تأخذ وقتًا أطول حتى يتم هدمها، كذلك - وكما سبق التنويه - فإن الميكروبات غير الهوائية لا يمكنها أن تهدم بعض جزئيات الخشب ذات السلسلة الطويلة مثل اللجنين، وقد تم تصميم المفاعلات غير الهوائية أساسًا من أجل استخدام رواسب مياه المجاري ومخلفات الحيوانات.

الاعتبار الثاني الذي يجب مراعاته هو محتوى المواد الداخلة إلى المفاعل من الرطوبة، فكلما زاد محتوى المواد الأولية من الرطوبة كلما كانت مناسبة أكثر لإنتاج الغاز الحيوي، وفي الوقت نفسه كلما كانت أقل تكلفة؛ حيث لن تكون هناك حاجة لاستخدام مقلبات ميكانيكية، كما أن المواد الرطبة ستكون مناسبة للمضخات المستخدمة في المفاعل، كذلك فإن محتوى المواد الأولية من الرطوبة سوف يحدد الطريقة التي سيتم بها الهدم غير الهوائي؛ فعندما تكون المواد الأولية صلبة فقد يكون هدمًا لا هوائيًّا، عن طريق تحويلها إلى كومبست أكثر فائدة من استخدامها لإنتاج الغاز الحيوي.

هناك اعتبار ثالث أيضًا يجب مراعاته في تغذية المفاعل، ألا وهو نسبة الكربون إلى النيتروجين في المواد العضوية الداخلة، هذه النسبة هي مفتاح التوازن الميكروبي داخل

المفاعل؛ حتى لا تسود مجموعة ميكروبية على حساب مجموعة أخرى، وقد وجد أن النسبة النموذجية بين الكربون والنيتروجين لإنتاج الغاز الحيوي يجب أن تكون حوالي 20- 30.

الاعتبار الرابع في تغذية المفاعل الذي يجب مراعاته هو مدى تلوث المواد الأولية بمواد غريبة، فمثلًا إذا كانت المواد الأولية تحتوي على ملوثات فيزيائية - مثل البلاستيك والزجاج أو المعادن - فإنها تحتاج إلى معالجة أولية قبل استخدامها لإنتاج الغاز الحيوي، وإذا لم يتم إزالة هذه المواد، فإنها تسبب مشاكل ميكانيكية داخل المفاعل، وبالتالي لن يؤدي وظيفته بكفاءة عالية؛ ولهذا فإن تصميم محطات معالجة المجاري لم يعد قاصرًا على الناحية الحيوية فقط، ولكن تراعى فيه أيضًا الناحية الميكانيكية، أي المعالجة الميكانيكية؛ ولذلك لم يعد يطلق على المحطة محطة المعالجة البيولوجية، ولكن يطلق عليها محطة المعالجة البيولوجية الميكانيكية Mechanical Biological Treatment Plant (شكل 15-4)، وبالطبع فإن المواد الأولية المستخدمة في تغذية المفاعل كلما احتاجت معالجة أولية، كلما زاد ذلك من تكاليف العملية وقلل من كفاءتها.

شكل (15-4): مفاعلات حديثة تستخدم للمعالجة البيولوجية اللا هوائية لرواسب مياه المجاري

4. 7. 6. المنتجات Products:

توجد ثلاثة منتجات رئيسة لعملية الهدم اللا هوائي، وهي الغاز الحيوي، وبقايا الهدم، والماء. والغاز الحيوي يتكون - بصفة رئيسة - من الميثان وثاني أكسيد الكربون مع كميات صغيرة من الهيدروجين وآثار من كبريتيد الهيدروجين (جدول 1-4) ومعظم الغاز الحيوي ينتج في منتصف عملية الهدم بعد أن تكون أعداد البكتيريا قد زادت إلى الحد الذي يسمح لها بإنتاج كميات كبيرة من الغاز. ويقل إنتاج الغاز الحيوي عندما يقل تركيز المواد الأولية المناسبة لإنتاجه. ويتخزن الغاز الحيوي أعلى المفاعل في بالون غير قابل للاشتعال، أو يستخلص ويخزن في خزانات خاصة (شكل 16-4) لحين استعماله.

جدول (1-4): تركيب الغاز الحيوي

المكون	(٪)
الميثان، CH_4	70-50
ثاني أكسيد الكربون، CO_2	50-25
النيتروجين، N_2	10-0
الهيدروجين، H_2	1-0
كبريتيد الهيدروجين، H_2S	3-0
الأكسجين، O_2	2-0

شكل (16-4): خزان خاص لتخزين الغاز الحيوي لحين استخدامه

والميثان في الغاز الحيوي يمكن أن يستخدم مباشرة كوقود حراري، كما يمكن أن يستخدم لتوليد الكهرباء عن طريق مولدات تعمل بغاز الميثان، وفي كثير من المزارع التي تصمم فيها وحدات لهدم مخلفات الحيوانات والدواجن لا هوائيًّا لإنتاج غاز الميثان، تستخدم المولدات التي تعمل بالميثان لإنتاج كهرباء لإنارة وتشغيل المزرعة، كما أن الزائد عن حاجة المزرعة من الكهرباء يتم بيعه، وهكذا فإن الهدم اللا هوائي للمخلفات يعتبر مصدرًا متجددًا من مصادر الطاقة الكهربائية.

وقد يتطلب الغاز الحيوي عملية تركيز قبل استخدامه كوقود؛ وذلك بسبب احتوائه على غاز كبريتيد الهيدروجين، الذي يتكون نتيجة وجود الكبريتيات في المواد الداخلة للتفاعل، وهو غاز سام؛ ولذلك فإن قوانين البيئة في البلاد المتقدمة تمنع استخدام الغاز الحيوي المحتوي على مستويات من كبرتيد الهيدروجين أعلى من المستوى المقبول والمسموح به بيئيًّا، وتلزم الجهات المعنية بتنظيفه من هذا الغاز أو تكريره. وكبديل لعملية التكرير يضاف كلوريد الحديد إلى المفاعل؛ بغرض منع تكون كبريتيد الهيدروجين.

والمنتج الرئيس الثاني للهدم اللا هوائي هو المخلفات الصلبة، وهي عبارة عن المواد التي تتركها الميكروبات بدون تحليل كامل، كما يدخل فيها أيضًا كميات هائلة من البكتيريا الميتة، والتي تحللت إلى عناصر معدنية. وهذه المخلفات قد تكون أليافًا صلبة أو سوائل غنية بالعناصر الغذائية، أو وحلًا راسبًا يجمع بين الألياف والسائل. ويمكن الحصول على هذه المخلفات معًا، كما يمكن الحصول عليها منفصلة، وذلك بواسطة تقنيات مختلفة.

والمخلفات الصلبة التي تتخلف عن مرحلة تكوين الأحماض عبارة عن مواد عضوية ثابتة التركيب، تحتوي على كميات كبيرة من اللجنين والسليولوز، كما تحتوي أيضًا على أنواع مختلفة من العناصر المعدنية الناتجة من البكتيريا الميتة، وقد تحتوي أيضًا على كميات صغيرة من البلاستيك، وهذه المواد قد تستخدم كسماد عضوي صناعي (كومبست)، وقد تستخدم في تصنيع بعض مواد البناء.

أما السوائل التي تتخلف عن مرحلة إنتاج غاز الميثان فهي سوائل غنية بالعناصر الغذائية، ويمكن أن تستخدم كسماد جيد، وهذا يعتمد على جودة هذه السوائل، حيث يجب التأكد من أن مستويات المواد السامة بها تقع في المدى المقبول والمسموح به بيئيًّا. وعلى أية حال، فإن تركيز المواد السامة في هذا المخلف، يعتمد على أصل المواد الأولية الداخلة إلى المفاعل، ففي الغالب فإن الغاز الحيوي المنتج من مخلفات المزرعة يكون نظيفًا، أما الغاز الحيوي المنتج من المخلفات الصناعية فيحتوي على تركيز عالٍ من المواد السامة، ويجب معالجته.

وقد تحتوي المخلفات على نسب عالية من اللجنين الذي لم يمكن للبكتيريا أن تهدمه، كما قد تحتوي على نسب من الأمونيا، وهي ضارة لنمو النباتات إذا ما أضيفت مباشرة إلى التربة، وفي هذه الحالة يجب إنضاج المخلفات قبل استخدامها في التربة الزراعية. ويتم الإنضاج عن طريق استخدامها كمواد خام للكومبست، ففي أثناء إنتاج الكومبست من هذه المواد، فإن هناك ميكروبات كثيرة - أهمها الفطريات - تقوم بتحليل اللجنين، أما الأمونيا فإنها تتحول إلى نترات، وبذلك فإن الإنضاج يجعل هذه المواد سمادًا جيدًا لنمو النباتات.

أما المنتج الأخير للهدم اللا هوائي فهو الماء، هذا الماء يأتي من الرطوبة الموجودة في رواسب مياه المجاري الأصلية التي تم معالجتها - كما يأتي - أيضا من التفاعلات الميكروبية داخل المفاعل، وهذا الماء الخارج من عملية الهدم اللا هوائي يحتوي على مستويات منخفضة من الـ BOD والـ COD، وهي مقاييس لتركيز المادة العضوية كما سبق توضيحها، وقد يحتاج هذا الماء إلى معالجة بسيطة قبل صرفه إلى البيئة، وهذه المعالجة عبارة عن إمرار تيار من الهواء في هذا الماء، حتى تتم أكسدة ما تبقى من مادة عضوية فيه.

4. 8. عمليات حيوية أخرى شائعة الاستخدام Other biological processes commonly used:

4. 8. 1. عكس التأزت Denitrification:

هي عملية اختزال النترات والنتريت، وهي الصور المؤكسدة للنيتروجين، والصالحة للاستخدام بواسطة عدة مجموعات بكتيرية إلى غاز النيتروجين، الذي ينصرف إلى الغلاف الجوي، ويمكن اعتبار هذه العملية عكس عملية تثبيت النيتروجين، التي يتحول فيها غاز النيتروجين إلى صور حيوية قابلة للاستخدام، وقد استخدمت هذه العملية لوقت طويل في معالجة مياه المجاري المنزلية. أما بالنسبة لتطبيق هذا النظام على المياه الملوثة للمصانع، فإن الأمر يبدو معقدًا؛ وذلك لأن المياه الملوثة للمصانع تختلف خصائصها يومًا عن يوم، فالمياه الملوثة لمصانع المضادات الحيوية تحتوي على بقايا من المضادات الحيوية، وعلى تركيز عالٍ من الأمونيا، هذه الخصائص لا تناسب بكتيريا عكس التأزت، وقد تؤدي إلى موتها.

وعملية عكس التأزت تقوم بها بكتيريا غير ذاتية التغذية Heterotrophic bacteria، وهي بكتيريا سالبة لجرام مثل Pseudomonas , Alcaligenes , Peacocks , Thiobaillus.، وبكتيريا موجبة لجرام مثل جنس Bacillus، وقليل من البكتيريا المتحملة للتركيزات العالية من الأملاح مثل Haloferax denitrificans. وهي كلها بكتيريا لها القدرة على تحليل البروتين، وعلى أي حال فإن التأزت وعكس التأزت هما أجزاء مهمة من دورة النيتروجين، وبكتيريا عكس

التـأزت شـائعة في الطبيعـة، ويمكـن عزلهـا وزراعتهـا بـسهولة. وقـد كان - ومـا يـزال - هنـاك اهتمـام كبـير بإزالـة النـترات مـن الميـاه الملوثـة باسـتخدام عمليـة عكـس التـأزت، على الـرغم مـن أنهـا عمليـة بطيئـة نـسبيًا بالنـسبة لمعالجـة الميـاه الملوثـة الـصناعية، الـتي تحتوي على تركيز عالٍ من النترات.

وتتم عمليـة عكـس التـأزت تحـت ظـروف خاصـة في البيئـة، وبـصفة عامـة، تـتم هـذه العمليـة عنـدما يـستهلك الأكـسجين، وتتحـول البكتيريـا إلى اسـتخدام النـترات كمـصدر للأكـسجين الذي تـستخدمه في هـدم المـادة العـضوية، ولأن الغـلاف الجـوي المحـيط بنـا غـني بالأكـسجين، فـإن عمليـة عكـس التـأزت تحـدث فقـط في بعـض أنـواع التربـة الغدقـة، وفي المـاء الأرضي، وفي المـزارع المائيـة، وعمليـة عكـس التـأزت تـتم في الخطـوات المتتالية الآتية:

نترات ← نتريت ← أكسيد النتريك ← أكسيد النيتروز ← غاز النيتروجين

أو يعبر عنها بالتفاعلات الآتية:

$$2NO_3^- + 10e^- + 12H^+ \rightarrow N_2 + 6H_2O \qquad (4\text{-}5)$$

وتـستخدم المـادة العـضوية - كمـا سـبق ذكـره - مـصدرًا للكربـون والطاقـة لهـذه البكتيريـا، وقـد تكـون المـادة العـضوية سـائلة، وهـو الـشائع إضـافتها، مثـل الميثـانول والإيثانول وحـامض الخليـك، وقـد وجـد البـاحثون أن الاحتياجـات النظريـة مـن الميثـانول لكي تتم عمليـة عكـس التـأزت بنجـاح هي 2.47 مجـم مـن CH_3OH لـكل مجـم مـن NO_3^- N، كما يتضح من المعادلة رقم (4-6).

$$NO_3^- + 1.08\ CH_3OH + 0.24\ H_2CO_3 \rightarrow 0.056\ C_5H_7O_2N + 0.47N_2 + 1.68\ H_2O + HCO_3^- \qquad (4\text{-}6)$$

4. 8. 2. التأزت وعكس التأزت المتزامنين Simultaneous nitrification and denitrification (SND):

لقد كان مـن المعـروف أن عمليـتي التـأزت وعكـس التـأزت تتمـان بـشكل منفـصل، أي كل منهمـا يـتم في مفاعـل منفـصل عـن الآخـر، إلى أن تـم تطـوير طريقـة تـتم فيهـا عمليتـا

التأزت وعكس التأزت في مفاعل واحد تحت ظروف قياسية، ويطلق على هذه العملية التأزت وعكس التأزت المتزامن. تبدأ العملية بتأزت جزئي للأمونيا إلى نتريت، ثم بشكل مباشر تتحول النتريت إلى غاز النيتروجين، ونجاح هذه العملية يؤدي إلى اختزال حجم المفاعل، ويؤدي إلى تقليل التكاليف اللازمة لفصل النظام الهوائي عن النظام غير الهوائي. ومعظم المفاعلات التي تتم فيها عمليتا التأزت وعكس التأزت في الوقت نفسه هي من المفاعلات التي يطلق عليها مفاعلات الفيلم الحيوي Bio- film reactors؛ حيث يتم إدخال شبكة من المواسير البلاستيك، أو أي مادة خاملة داخل المفاعل، وتتغذى الكائنات الحية على المواد العضوية، وتنمو نموًّا غزيرًا، ومع هذا النمو ترسو الكائنات الحية على شبكة البلاستيك، وتكون فيلمًا (شكل 17-4) يختلف سمكه حسب نوع المخلفات التي يتم معالجتها. ويسمح المفاعل بحدوث تأزت هوائي ثم عكس تأزت لا هوائي، وقد وجد العلماء أن تطبيق هذا النظام يؤدي إلى إزالة جيدة للنيتروجين، وإلى خفض كمية المادة العضوية، حيث تستهلك في عملية التأزت. كما وجد أن هذه العملية مهمة أيضًا في الحفاظ على رقم pH متعادل في المفاعل، بدون إضافة حامض أو قلوي، وهذا مهم؛ لأن رقم الـ pH الأمثل بالنسبة لعملية التأزت هو من 7.5 إلى 8.5، وخلال عملية التأزت تستهلك القلويات، ولكن خلال عملية عكس التأزت تنتج القلويات.

شكل (17-4): فيلم من الكائنات الدقيقه داخل المفاعل

4. 8. 3. عملية أكسدة الأمونيا لا هوائيًّا Anaerobic ammonium oxidation (Anammox) process:

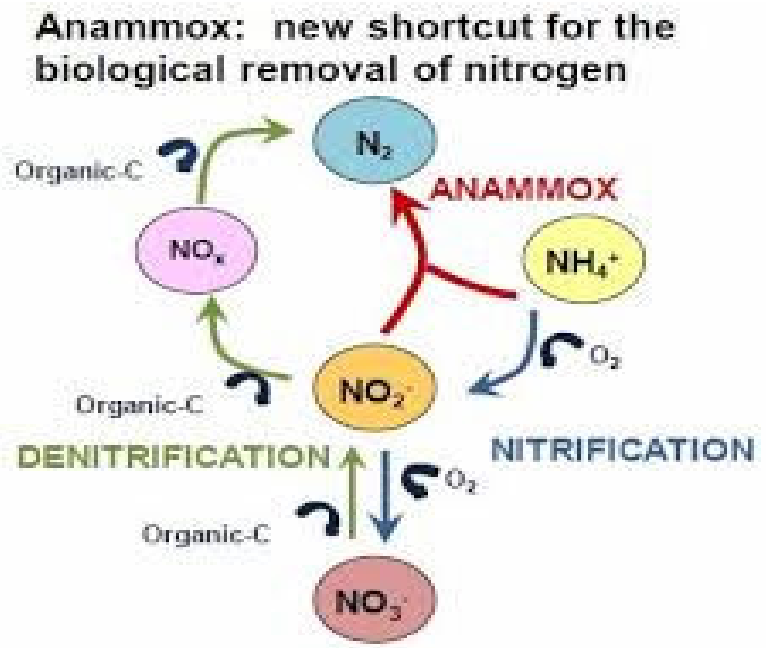
يطلق على هذه العملية (Anammox)، ومنذ اكتشاف هذه العملية حديثًا وهي تلقى اهتمامًا كبيرًا؛ حيث إنها عملية بيولوجية ذات كفاءة عالية في إزالة النيتروجين. في هذه العملية تتأكسد الأمونيا إلى غاز النيتروجين، وتستخدم النتريت كمستقبل للإلكترون، كما يستخدم غاز ثاني أكسيد الكربون للنمو، وبالمقارنة بعمليات التأزت – عكس التأزت، فإن هذه العملية الذاتية التغذية لا تحتاج - إطلاقًا - إلى إضافة مصدر للكربون (الميثانول مثلًا)، وتحتاج إلى كمية أقل من الأكسجين (50٪ أقل)، وبالتالي فهي عملية أقل تكلفة، ويمكن التعبير عنها بالمعادلة رقم (7-4).

$$NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + 2H_2O \qquad (4\text{-}7)$$

وعملية الأناموكس تحتاج إلى أمونيا ونتريت بنسبة تقريبًا 1: 1، وبالنسبة لبعض المخلفات فإن هذه النسبة يمكن الوصول إليها بسهولة، مثل سوائل هضم الوحل، وعندما تتحول نصف كمية الأمونيا الموجودة تقل القلويات، ويحدث انخفاض شديد في رقم الـ pH، وهذا يمنع حدوث مزيد من التأزت، ويمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة رقم (8-4).

$$NH_4^+ + HCO_3^- + 0.75\ O_2 \rightarrow 0.5\ NH_4^+ + 0.5\ NO_2^- + CO_2 + 1.5\ H_2O \qquad (4\text{-}8)$$

ومسار التمثيل الممكن في هذه العملية يمكن بيانه في الشكل رقم (18-4)، وفي هذا المسار فإن مستقبل الإلكترون - وهو النتريت - يختزل إلى hydroxylamine، الذي يتفاعل مع معطي الإلكترون (الأمونيا)، ويؤدي ذلك إلى تكوين غاز النيتروجين.



شكل (18-4): المسار التمثيلي لعملية الأناموكس

4. 8. 4. إزالة الفوسفور Phosphorous removal:

يمكن إزالة الفوسفور حيويًّا عن طريق عملية تسمى الإزالة الحيوية المنشطة للفوسفور Enhanced biological phosphorus removal. في هذه العملية لابد من وجود حوض لا هوائي سابق لحوض التهوية، وفي هذا الحوض اللا هوائي تنمو مجموعة خاصة من البكتيريا غير ذاتية التغذية، تسمى Polyphosphate-accumulating organisms، هذه البكتيريا تنمو بشكل اختياري، وتسود على باقي المجموعات البكتيرية في داخل بيئة الوحل النشط. وقد وجد أن هذه البكتيريا تنتمي للقسم Betaproteobacteria، وقد أمكن عزل بعض أنواعها، وسميت: "Candidatus Accumulibacter Phosphates"، ولها القدرة على استعمال صور عديدة ومختلفة من صور الكربون تحت الظروف غير الهوائية. هذه البكتيريا تقوم بتخزين كميات هائلة من الفوسفور داخل خلاياها. وبصفة عامة، فإن خلايا

البكتيريا عمومًا تحتوي على 1-2٪ فسفور ضمن المكونات الخلوية، مثل الفوسفوليبيدات التي توجد في الأغشية، ومثل الـ DNA، ولكن هذه البكتيريا يمكنها أن تخزن الفوسفور ليصل إلى 7٪، وأحيانًا - في بعض الأنواع - يصل إلى 20٪ من وزن الكتل الحيوية. ففي هذه الحالة فإن البكتيريا لا تستهلك الفوسفور الموجود فقط من أجل بناء مكوناتها الخلوية، ولكن أيضًا تقوم بتخزين كميات هائلة منه داخل الخلايا. وفي النهاية يمكن فصل هذه الكتل الحيوية من الماء المعالج، وهذه الكتل الحيوية لها قيمة سمادية عالية. ويمكن أيضًا إزالة الفوسفور عن طريق الترسيب الكيماوي عادة، باستخدام أملاح الحديد أو أملاح الألمونيوم، إلا أن هذه الطريقة تعتبر مكلفة، كما أنه يصعب تداول الوحل الكيماوي الناتج، إلا أن إزالة الفوسفور عن طريق الترسيب الكيماوي تعتبر أسهل من الترسيب البيولوجي، وتحتاج إلى مساحة أحواض أصغر.

* * *