الفصل الثالث

الأسس العلمية في إنتاج الأسمدة العضوية

obeikan.com

obeikan.com

الفصل الثالث

الأسس العلمية في إنتاج الأسمدة العضوية

Scientific Foundation for the Production of Organic Fertilizers

مقدمة *Introduction:*

إن عمليات تصنيع الأسمدة العضوية Organic fertilizer أو الكمبوست Compost من المواد العضوية للقمامة المنزلية، أو من بقايا المخلفات الزراعية والحيوانية، أو مخلفات التصنيع الزراعي، أو من مخلفات الأسواق، تعتبر عملية بيولوحية في المقام الأول، بمعنى أن الفاعل الأساسي فيها والمنتج الحقيقي لها هي الكائنات الحية الدقيقة، وأن الدور الإنساني في عملية التصنيع هذه يقتصر على توفير أنسب الظروف البيئية لنمو وتكاثر هذه الكائنات الحية الدقيقة المُسخرة للقيام بهذا الدور على أكمل وجه, فيما يعرف بعمليات التحول (شكل 3- 1).

شكل (3-1): تحول المخلفات العضوية إلى أسمدة عضوية في صورة كمبوست بواسطة عوامل التحويل والعمليات الميكانيكية الأساسية

وصناعة الأسمدة العضوية يمكن أن تتم من خلال عدد من الأنظمة التي تختلف في احتياجاتها وتجهيزاتها، كما تختلف أيضًا في طبيعة وخواص إنتاجها من الأسمدة العضوية.

لكن أفضل الأنظمة العملية في تصنيع الأسمدة العضوية أو الكمبوست هي طريقة الكمر الهوائي، والتي تتم بسهولة وكفاءة عالية إذا أمكن الإجابة عن هذين السؤالين المهمين في هذا المجال:

السؤال الأول: ما هي الأسس العلمية التي تبنى عليها عمليات التحول إلى أسمدة عضوية، وما هي الكائنات الحية الدقيقة التي تعمل على هذا التحول، وماذا تحتاج هذه الكائنات من مواد تساعدها على النشاط والعمل، وعوامل النمو التي يجب توافرها في بيئتها للقيام بهذا الدور المنشود؟

السؤال الثاني: كيف يمكن توفير وتحقيق هذه الاحتياجات لهذه الكائنات، حتى يمكنها القيام بأعباء عملها المكلفة بالقيام به؟

إن الإجابة عن السؤال الأول تعني معرفة عوامل النمو التي يجب توافرها للكائنات الحية الدقيقة في المواد التي تعمل عليها هذه الكائنات، والأسس العلمية المرتبطة بها ويجب فهمها، والعمل على تحقيقها، وتجنب إهمالها، لأهميتها في الحصول على المنتج النهائي في الوقت المناسب، وبالجودة المطلوبة في الأسمدة العضوية، وهو ما سيكون عليه محتوى هذا الفصل.

بينما ستكون الإجابة عن السؤال الثاني حول كيفية توفير وتحقيق هذه الاحتياجات لهذه الكائنات الحية الدقيقة، حتى يمكنها القيام بأعباء عملها المكلفة بالقيام به، سيكون من خلال "التطبيقات العملية في صناعة الأسمدة العضوية" والذي سنتعرض له تفصيلاً في الفصل الرابع – إن شاء الله.

عوامل النمو المتحكمة في زمن الإنتاج وجودة المنتج من الأسمدة العضوية المكمورة هوائيًا:

تتمثل هذه العوامل فيما يلي:

1. أنواع الكائنات الحية الدقيقة التي تقوم بتصنيع الأسمدة العضوية وتحسين خصائصه Types of composting microorganisms.
2. حجم جزيئات المواد الخام للمخلفات المستخدمة في إنتاج الأسمدة العضوية Particle size of raw materials for organic fertilizer production.
3. نسبة الكربون إلى النيتروجين في المواد الخام المستخدمة في إنتاج الأسمدة العضوية C/N Ratio in raw materials for organic fertilizer production.
4. توفير الرطوبة المناسبة لنشاط البكتريا الهوائية Suitable moisture requirement for microorganism activity.
5. توفير نسبة الأكسجين المناسبة لنشاط البكتريا الهوائية Suitable oxygen requirement for microorganism activity.
6. الاتزان العنصري في المكمورات والمصفوفات، والذي يساعد على نمو وتكاثر الكائنات الحية الدقيقة Nutrient balance requirement for microorganism activity.
7. رقم الحموضة في المكمورات والمصفوفات Suitable pH in compost windrows and piles.

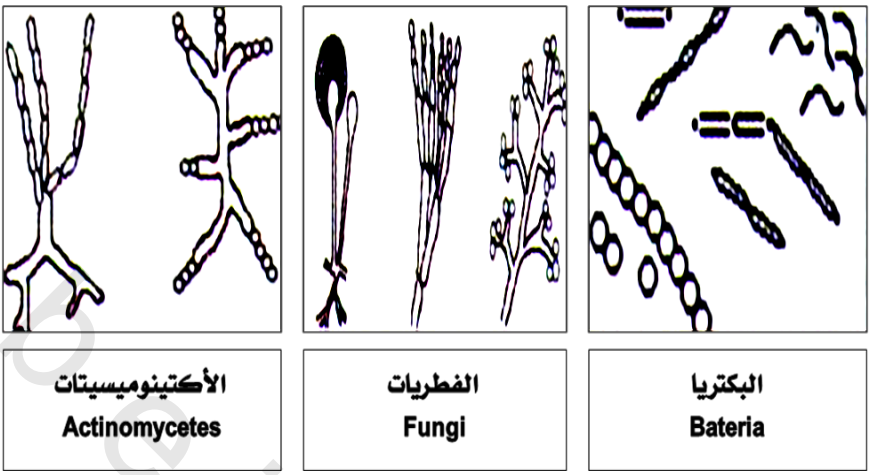
8. الاتزان الحراري في المكمورات والمصفوفات Heating balance in compost windrows and piles .

وبإلقاء الضوء على هذه العوامل المحددة لنشاط وعمل الكائنات الحية الدقيقة، وفهم أهميتها، ودور كلٍّ منها في تصنيع الأسمدة العضوية أو الكمبوست، يمكن للقائمين على عملية التصنيع تجنب الوقوع في الأخطاء أثناء عمليات التشغيل.

[1] أنواع الكائنات الحية الدقيقة التي تقوم بتصنيع الأسمدة العضوية وتحسين خصائصه *Types of composting microorganisms*:

أهم الكائنات الحية الدقيقة التي تعمل على تحلل المخلفات العضوية (مخلفات القمامة المنزلية ومخلفات البقايا الزراعية والحيوانية، وغيرها) وتحويلها إلى أسمدة عضوية – هي البكتريا Bacteria , والتي تمثل حوالي 80-90٪ من بلايين الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في كل جرام من المخلفات. وبالإضافة إلى البكتريا توجد كائنات حية أخرى تساهم في تكسير وتحلل المواد العضوية في المخلفات الزراعية للحصول على الأسمدة العضوية , مثل الفطريات Fungi والأكتينوميسينات Actinomycetes (شكل 3-2).

والكائنات الحية الدقيقة منها ما هو هوائي Aerobic؛ لحاجتها إلى الهواء وما به من أكسجين؛ لاستمرار حياتها ونشاطها، ومنها ما هو لا هوائي Anaerobic؛ والتي بمقدورها العيش والنشاط دون الحاجة إلى الهواء ولا إلى الأكسجين الموجود به، كما أن منها أنواع يمكنها العيش هوائيًّا ولا هوائيًّا تعرف بـــ Facultative aerobic، ومع تمتع هذا النوع من الكائنات بالقدرة على الحياة في الظروف الهوائية وغير الهوائية، إلاَّ أنها تكون أكثر نشاطًا في الظروف الهوائية.

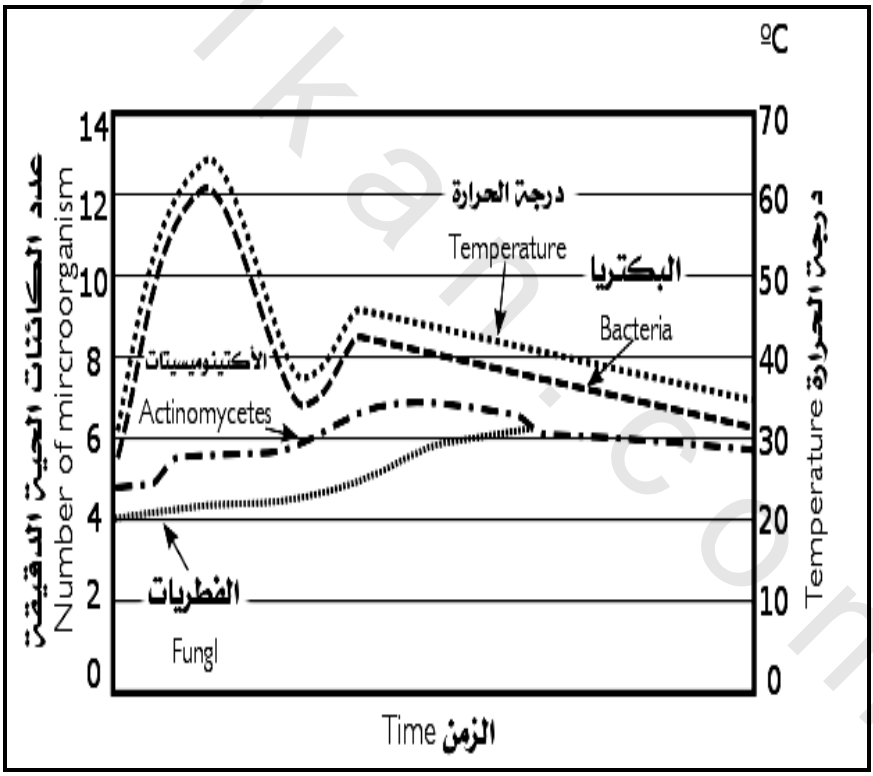


شكل (3-2): يوضح أشكال بعض مجموعات الكائنات الحية الدقيقة الأساسية في التحلل وإنتاج الكمبوست

كما أن من الكائنات الحية الدقيقة ما هو ذاتي التغذية Autotrophic bacteria ، وهي الكائنات التي تعتمد في تغذيتها، وحصولها على الطاقة اللازمة لحياتها وممارسة نشاطها من أكسدة بعض المواد المعدنية مثل أكسدة أيون الأمونيوم(Ammonium ion (NH_4) إلى أيونات النيتريت Nitrite ions (NO_2) ، وأكسدة أيونات النيتريت إلى أيونات النترات Nitrate ions (NO_3)، وهو ما يختلف عن الكائنات الحية الدقيقة عضوية التغذية Heterotrophic bacteria، وهي الكائنات التي تعتمد في تغذيتها وحصولها على الطاقة اللازمة لنشاطها من أكسدة المواد العضوية؛ أي أنها تعمل على تحلل المواد العضوية، طالما رغبت في الحياة؛ ومن ثم يمكن اعتبار هذه الأنواع من الكائنات الحية الدقيقة هي الأهم في تصنيع الأسمدة العضوية.

ويمكن التعريف بأهم مجموعات العمل الأساسية من الكائنات الحية الدقيقة، والتي تتركز في مجموعات من البكتريا والفطريات والأكتينوميسيتات، ولكلٍّ منها دورٌ بارز في كل مرحلة من مراحل إنتاج وتصنيع الأسمدة

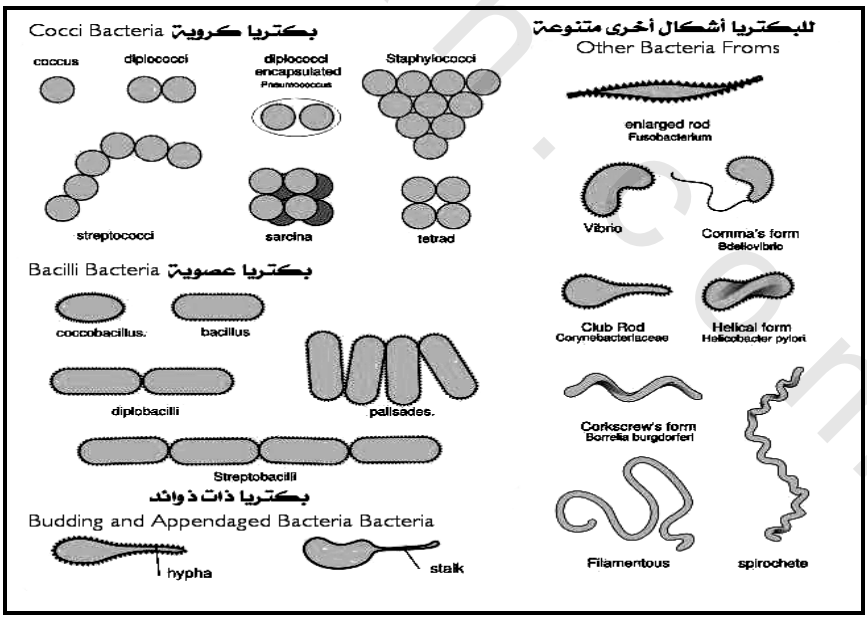
العضوية في صورة كمبوست. وسوف يكون مفيدًا معرفته في أي مرحلة من مراحل الإنتاج يكون سيادة وتواجد هذه المجموعات، وأي دور تلعبه كلٌ منها عند تواجدها، وما هو مدى درجة الحرارة الذي يرتبط به تواجدها ونشاطها وتكاثرها في وسط التحلل. وفي كل الأحوال يجب أن يكون معلومًا أن كل هذه المجموعات تظل موجودة في وسط التحلل، مهما كان التباين في درجة الحرارة، ولا يختفي أي منها من وسط الكمر والعمليات نهائيًا، والذي يختلف هو درجة النشاط لكلٍ منها؛ ارتباطًا بظروف النمو المناسبة لها (شكل 3- 3).



شكل (3-3): يوضح اختلاف عدد الكائنات الحية الدقيقة أثناء مراحل الكمر تبعًا لدرجة الحرارة التي تفضلها، وفيها تتواجد البكتريا بأعداد كبيرة في مرحلة النشاط على عكس الفطريات والأكتينوميسيتات

أولًا: البكتريا *Bacteria*:

والبكتيريا هي أكبر مجموعات الكائنات الحية الدقيقة, ويصل عددها إلى بليون خلية في الجرام الواحد من وسط النمو، وطول خلاياها يترواح ما بين 0.5 إلى 5.0 ميكرومتر (الميكرومتر 1 في 10^{-6} من المتر = الميكرون)، وتشتمل على مجموعات متباينة من الأنواع، وتتواجد في أشكال وتجمعات متعددة (شكل 3-4)، منها الشكل الكروي Cocci، والشكل العصوي Bacilli ، والشكل المتبرعم أو ذات الزوائد Budding and appendage bacteria، بالإضافة إلى أشكال أخرى متنوعة. والكائنات الحية الدقيقة من البكتريا ذات قدرات فسيولوجية عالية، تنعكس على النشاط والتكاثر وتحليل المواد العضوية، وخاصة المواد سهلة التحلل، وتتحمل درجات عالية من الحرارة تصل إلى 75°م، ومنها من الأنواع مثل *Bacillus sp.* التي يمكنها أن تحيا على درجات حرارة تصل إلى 95°م.



شكل (3- 4): رسم تخطيطي لأنواع من البكتريا وتجمعاتها المختلفة

وبصفة عامة تتميز البكتريا بما يلي:

- أسرع الكائنات الحية في التكاثر والانتشار.
- لها دور بارز ومؤثر أثناء المراحل النشطة Active processing stage لتصنيع الكمبوست.
- لها القدرة على التأقلم في ظروف ارتفاع رقم الـــ pH، وارتفاع المحتوى الرطوبي، في حين أن قدرتها ضعيفة على التأقلم مع انخفاض رقم الـــ pH، وانخفاض نسبة الرطوبة في مواد وبيئة التحلل.
- منها البكتريا الهوائية Aerobic واللاهوائية Anaerobic.

ثانيًا: الفطريات *Fungi*:

والفطريات كائنات حية دقيقة لها تركيب خيطي طويل Long filaments form، تسمى هيفات Hyphae، لدرجة أنه يمكن رؤيتها بالعين المجردة. وتتواجد الفطريات في تجمعات يصل عددها إلى حوالي 0.01 -1.0 مليون لكل 1 جرام من وسط النمو، وتعمل على إحداث الثبات للمادة العضوية، وتحسين التهوية بالكمبوست. كما تتميز الفطريات بما يلي:

- تتغذى وتعمل على تحلل المواد الأكثر مقاومة للتحلل، مثل اللجنين.
- تعمل في مدى واسع من رقم الـــ pH.
- لها دور مهم في مرحلة التشافي للكمبوست Curing stage.
- تفضل العمل والعيش في ظروف من الرطوبة المنخفضة.
- بعضها يفرز مضادات حيوية تمنع أو توقف نمو العديد من الميكروبات المرضية.

ويمكن عمل مقارنة بين البكتريا والفطريات لعدد من العومل المرتبطة بنموها ونشاطها (جدول 3- 1).

جدول (3-1): مقارنة بين البكتريا والفطريات لعدد من عومل النمو والنشاط

العامل Factor	البكتريا Bacteria	الفطريات Fungi
نسبة الكربون للنيتروجين C/N Ratio	تفضل وفرة من النيتروجين	تفضل وفرة من الكربون
الرطوبة Moisture	نموها أفضل عند الرطوبة المرتفعة	نموها أفضل عند الرطوبة المنخفضة
الأكسجين Oxygen (O_2)	تظل على قيد الحياة في مستوى منخفض من الأكسجين	تحتاج إلى مستوى أكثر من 6٪ من الأكسجين
الحرارة Temperature	تنمو بشكل جيد حتى 75 °م	تنمو بشكل جيد حتى 60 °م
رقم الحموضة pH	بطيئة النمو عند pH أقل من 5	لا يتأثر النمو عند pH أقل من 5
الزمن Time	سريعة التكاثر	بطيئة التكاثر

ثالثًا: الأكتينوميسينات *Actinomycetes*:

والأكتينوميسيتات تعيش وتنتشر في الأساس في التربة، وهي تشبه الفطريات من حيث الشكل في خيوط، وتشبه البكتريا من حيث صغر الحجم وتركيب الخلايا؛ حيث تحتوي على نواة بدائية، ولا يحيط بها غلاف نووي، كما يوجد تشابه في تركيب الجدار الخلوي مع البكتيريا، ولا تحتوي على الميتوكوندريا؛ ومن ثم تم تسميتها بالبكتريا الخيطية، أو الأكتينوبكتريا Actinobacteria، وتسمى في بعض الأحيان بالبكتريا

الشبيهة بالفطر، ومع ذلك يظل الاسم الشائع لها حتى الآن هو الأكتينوميسيتس. وتتواجد الأكتينوميسيتات بمعدل 0.1 – 10 مليون وحدة في كل جرام من وسط النمو أو التحلل.

وتتميز الاكتينوميسينات بما يلي:

- تفضل العمل والعيش في ظروف من الرطوبة المنخفضة مثل الفطريات، وعلى عكس البكتريا.
- لها دور مهم أثناء المراحل النهائية Final stage لتصنيع الكمبوست, وهى مرحلة التشافي Curing stage؛ حيث تعمل على تكوين المجموعات العضوية في الكمبوست في صورة ثابتة.
- تتغذى وتعمل على تحلل المواد صعبة التحلل مثل اللجنين, وهي في ذلك تتشابه مع ما تقوم به الفطريات.
- يزداد نشاطها في الظروف المتعادلة إلى القاعدية الخفيفة في وسط النمو.
- تقوم بإفراز مادة الجيوسمين Geosmin التي تعطي للكمبوست رائحة التربة.
- يفرز مضادات حيوية تمنع أو توقف نمو العديد من الميكروبات المرضية.

والكائنات الحية الدقيقة – بصفة عامة – تتكاثر بسرعة رهيبة، لدرجة أنها في غضون عدة ساعات تصل للذروة، وتكون مستعمرات كبيرة في كومات ومصفوفات الكمبوست إذا ما توفرت لها ظروف النمو والتكاثر المثلى.

والكائنات الحية الدقيقة الهوائية موجودة في الجو المحيط بنا، وفي المخلفات المطلوب تصنيع الكمبوست منها، إلى الدرجة التي يرى معها كثير من العلماء أن تصنيع الكمبوست أو الأسمدة العضوية لا يحتاج إلى استخدام بكتريا إضافية لإتمام عمليات التحلل، بينما يرى البعض الآخر ضرورة زيادة هذه الأعداد، وإضافة أنواع متخصصة أخرى لزيادة معدل وكفاءة عمليات التحلل، وسرعة إنضاج الكمبوست، ويؤكدون ذلك بما دلت عليه كثيرٌ من التجارب من أن استخدام بعض البكتريا المتخصصة في تحلل السليلوز ، والهيميسليولوز ، والبكتيريا تزيد من سرعة التحلل, وتؤثر في نواتج التحلل، وخاصة فيما ينتج عنها من أحماض عضوية، مثل حامض الهيوميك والفلفيك.

وفي اليابان يتم إضافة خليط من الكائنات الحية الدقيقة المعروف باسم EM، اختصارًا لكلمة Effective Microorganisms أو الكائنات الحية الفعالة، وهذا الخليط تم إعداده وتجهيزه بواسطة Tiruo Higa منذ عام 1980 بجامعة Ryukyu، وتسمى عملية التخمر والتحلل بواسطة EM باسم "بوكاشي Bokashi" . وخليط الـ EM يحتوي على مجموعة متوافقة من الكائنات الحية الدقيقة النافعة، التي تقوم بإفراز بعض الأحماض والإنزيمات التي تعمل على تحليل المواد العضوية المعقدة، كما تقوم بتثبيت أزوت الهواء الجوي؛ مما يزيد من محتوى الكمبوست من النيتروجين، كما تقوم بإفراز مضادات حيوية تثبط نمو بعض الميكروبات الممرضة. والمجموعات المكونة للـ Effective Microorganisms، بالإضافة إلى الفطريات والأكتينوميسيتات هي:

- **البكتريا الممثلة للضوء *Photosynthetic Bacteria***: وتشمل هذه البكتيريا مجموعة متباينة من الأنواع ذات قدرات فسيولوجية عالية على استخدام

الضوء كمصدر للطاقة, واستخدام ثاني أكسيد الكربون الجوي أو المواد العضوية في المخلفات لبناء خلاياها تحت الظروف اللاهوائية، كما أنها تستطيع النمو أيضًا تحت الظروف الهوائية، وفي غياب الضوء، وفي هذه الحالة تستخدم المواد العضوية – مثل الأحماض العضوية والكحولات والكربوهيدرات – كمصدر للطاقة والكربون معًا. فضلاً عن ذلك, فإن العديد من تلك البكتريا الممثلة للضوء لها القدرة أيضًا على تثبيت أزوت الهواء الجوي.

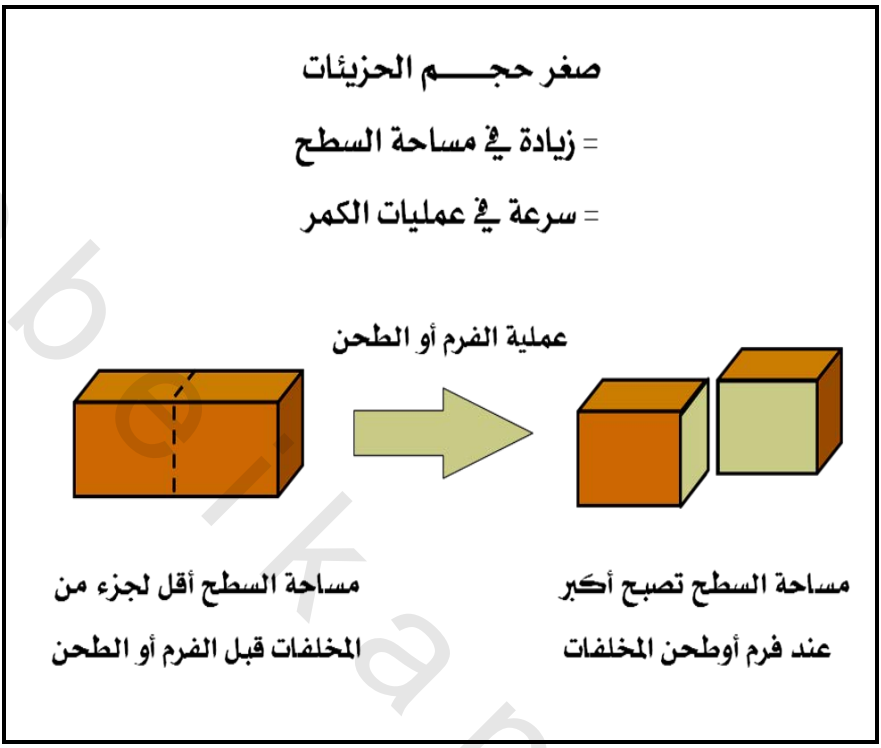
- **بكتريا حامض اللاكتيك *Lactic acid bacteria***: وهذه البكتريا لها القدرة على تحويل السكريات إلى حامض لاكتيك، ويؤدي تكوين حامض اللاكتيك إلى خفض درجة pH في الوسط المحيط؛ الأمر الذي يساعد على إذابة العناصر الغذائية، بالإضافة إلى ذلك فإن حامض اللاكتيك نفسه يسرع من تحلل المواد العضوية المعقدة، وأيضًا له تأثير مثبط قوي يقاوم نمو بعض الفطريات الممرضة، مثل فطر الفيوزاريم، ويؤدي ذلك بالتبعية إلى اختفاء النيماتودا.
- **الخمائر *Yeast***: وهذه الخمائر تحتاج لنموها مواد عضوية مختلفة، ونتيجة هذا النمو تنتج بعض الأحماض الأمينية والفيتامينات وبعض الهرمونات والإنزيمات التي تفيد نمو الكائنات الحية الدقيقة الأخرى في الكمبوست.

ومع الجزم بأهمية وفاعلية هذه المجموعات من الكائنات الحية الدقيقة، إلَّا أنه عند استعمال EM في عدة تجارب بمصانع إنتاج الكمبوست من المخلفات البلدية الصلبة، أو المخلفات النباتية والحيوانية، لم يعط أي تأثير ملحوظ على سرعة تحلل المخلفات، أو تقصير فترة الإنتاج. وهذه الملاحظة تسير في نفس الاتجاه الذي وصل إليه Formowitz وآخرون سنة 2007م، من أن إضافة أو

استخدام الـ EM لم يظهر أي دلائل على زيادة معدنة المكونات العضوية، أو زيادة مستعمرات هذه الكائنات في الكمبوست. ومن ثم يمكن القول إنه إذا لم تكن لمحتويات الـ EM فعالية على سرعة تحلل المخلفات ومعدنتها، كما أنها لم تسجل تواجدًا بأعداد كبيرة يشير إلى سرعة تكاثرها - فإن ذلك يعني أن ظروف النمو في مكمورات تصنيع الكمبوست لا تحقق الظروف المثلى للنمو والتكاثر والنشاط لهذه الكائنات؛ ومن ثم لا ينصح باستخدامها كمنشط بكتيري في صناعة الأسمدة العضوية على الأقل تحت ظروف وطريقة الكمر الهوائي المستخدمة في مصر. ومع ذلك تجدر الإشارة إلى أن إضافة مخلوط الـ EM على الكمبوست الناضج قبل إضافته للتربة أعطى نتائج إيجابية بمزارع شركة المملكة بتوشكا.

[2] حجم جزيئات المواد الخام للمخلفات المستخدمة في إنتاج الأسمدة العضوية *Particle size of raw materials for organic fertilizer production*

حجم جزيئات المواد الخام النباتية له أهمية قصوى في صناعة الكمبوست أو السماد العضوي؛ حيث إن سرعة التفاعلات بصفة عامة، ونشاط الكائنات الحية الدقيقة بصفة خاصة، يزداد كلما صغرت أحجام الجزيئات، فكلما قل حجم الجزيئات كلما زادت مساحة السطح في وحدة الحجم أو الوزن، فمكعب طول ضلعه 1 سنتيمتر يكون مساحة أسطحه تساوي 6 سنتيمتر مربع، في حين أن كسره فقط إلى نصفين في كل اتجاه يعطي 8 مكعبات، طول ضلع كل منها نصف سنتيمتر، ومجموع مساحة أسطحها 12 سنتيمتر مربع (شكل 3- 5). وزيادة مساحة السطح لجزيئات المواد الخام تزيد من أعداد الكائنات الحية المحيطة بها أو المتراكمة عليها، فيزداد معدل التكسير والهضم لهذه المخلفات.



شكل (3-5): تأثير عملية الفرم للمخلفات على زيادة مساحة السطح وما يتبعها من زيادة سرعة التفاعل، والحصول على المنتج من الكمبوست في أسرع وقت ممكن

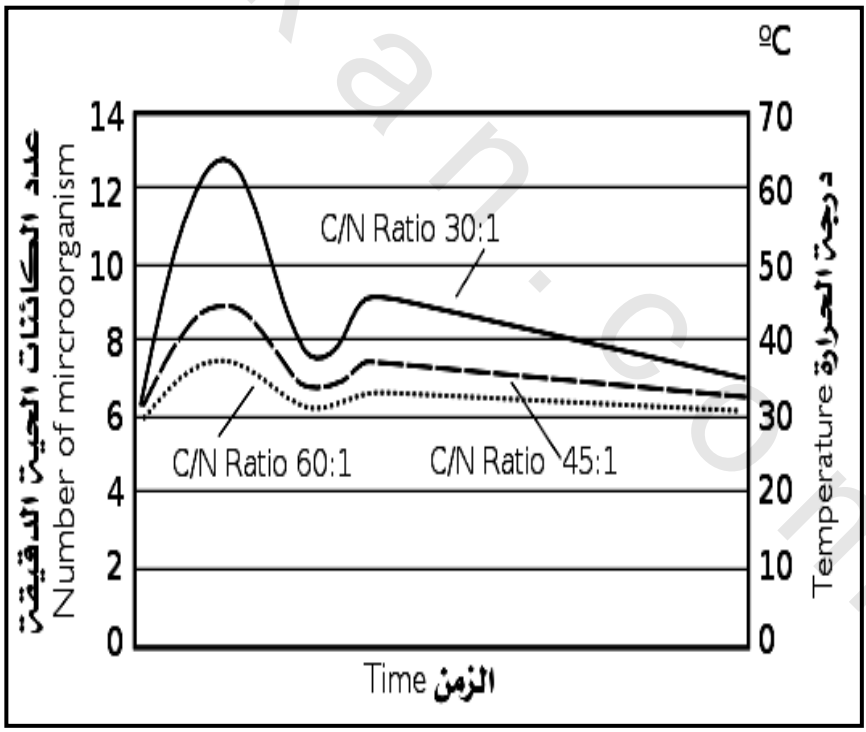
كما أن حجم الحزيئات أوالأجزاء المكونة للمواد الخام اللازمة لصناعة الكمبوست تؤثر في التهوية التي تعتمد عليها البكتريا الهوائية التي ستعمل على هذه المخلفات وتحويلها إلى سماد. فصغر حجم الجزيئات عن 0.25 سم يقلل من مستوى التهوية، بالإضافة إلى أنه يقلل الفراغات البينية الناشئة بين جزيئاتها، والتي ما تلبث أن تمتلئ هذه الفراغات البينية الصغيرة بالماء؛ مما يحول وسط التفاعل إلى وسط لا هوائي، كما أن كبرها عن 5 سم يزيد من معدل التهوية؛ مما يقلل من نشاط وتفاعل الكائنات الحية معها، وهو ما يُزيد من الوقت اللازم للتحلل وإنتاج الكمبوست.

لذا فإنه يجب أن يكون حجم الجزيئات متنوعًا فيما بين 0.25-5.0 سم بما يسمح بوجود فراغات بينية يمكنها أن تمسك الرطوبة المثلى لنشاط الكائنات الحية الدقيقة، والتي لا تزيد عن 65٪، كما تسمح بحركة دخول الهواء وما به من أكسجين وخروج ثاني أكسيد الكربون، كما تعمل على حفظ درجة الحرارة في كومة الكمبوست؛ مما يساعد على التسوية والإنضاج بشكل أسرع. وتعتبر جزيئات المادة العضوية لمخلفات قمامة المدن أو المخلفات المنزلية, وكذلك المخلفات الحيوانية في مدى يمثل هذه الأحجام، وبالتالي تكون جاهزة لعمل ونشاط الكائنات الحية الدقيقة في الحالة الفردية لكل منهما، أو عند خلطهما لإنتاج الكمبوست الخليط من المخلفات المنزلية والحيوانية. في حين أن بقايا المخلفات النباتية – من حطب وقش وعروش وتقليم أشجار – كلها تحتاج إلى عملية فرم أو طحن؛ لتوفير شرط صغر حجم جزيئاتها إلى الحدود المشار إليها؛ حتى يسهل للكائنات الحية الدقيقة التعامل معها, وبما يحقق التجانس بينها. ويتم فرم وطحن المخلفات باستخدام ماكينات خاصة مختلفة الأنواع والقدرة الإنتاجية على حسب نوع المخلفات وسمك أجزائها وفروعها وأغصانها، والكمية المتاحة لصناعة الأسمدة العضوية.

[3] نسبة الكربون إلى النيتروجين في المواد الخام المستخدمة في إنتاج الأسمدة العضوية C/N *Ratio in raw materials for organic fertilizer production*

تستخدم الكائنات الحية الدقيقة الكربون في بناء أجسامها، والحصول منها أيضًا على الطاقة اللازمة لنشاطها. فالكربون يكون 50٪ من كتلة الخلايا البكتيرية، والنيتروجين مكون أساسي للبروتينات، والأحماض النووية، والأحماض الأمينية، والإنزيمات وكلها مهمة وضرورية في نمو الخلية البكتيرية ونشاطها في وجود عنصري الفوسفور والبوتاسيوم. وحتى تعمل الكائنات

الحية الدقيقة على المخلفات والبقايا النباتية, فإنه يلزمها مستوى متوازن من الكربون والنيتروجين على وجه الخصوص. فالكمية المثلى من هذين العنصرين في البيئات أو المخلفات التي ستعمل عليها البكتريا يجب أن تكون ما بين 25- 35: 1، وهناك رأي آخر يرى أنها تكون بين 20- 40: 1, وكلاهما يعطي متوسط 30: 1، أي 30 جزء من الكربون: 1 جزء من النيتروجين، وهذا المدى من نسبة الكربون إلى النيتروجين يعطي نتائج جيدة, من حيث سرعة تكاثر الكائنات وزيادة أعدادها، وبالتالي قصر فترة وزمن الإنتاج، وما يترتب عليه من جودة الكمبوست الناتج من هذه المخلفات، مقارنة بارتفاع نسبة الكربون إلى النيتروجين إلى 45 أو 60: 1 (شكل 3- 6).



شكل (3-6): تأثير نسبة الكربون إلى النيتروجين على نشاط الكائنات الحية الدقيقة وسرعة عمليات التحلل

لكن لماذا هذه النسبة 30: 1 هي المتوسط الأنسب فيما بين الكربون والنيتروجين عند صناعة الأسمدة العضوية؟

ترجع مثالية هذا الرقم 30:1 لكونه المعدل الذي يتوافق مع معدل بناء أجسام البكتريا والكائنات الحية الدقيقة؛ مما يزيد من معدل التكاثر ومعه زيادة معدل التحلل للمخلفات. أي أن هذه الكائنات تحتاج مقابل كل جزء واحد من النيتروجين 30 جزءًا من الكربون، وانخفاض النسبة كثيرًا عن هذا المعدل يعني زيادة كمية عنصر النيتروجين عن احتياجات البكتريا, والتي من شأنها – في هذه الحالة – أن تفقد على صورة غاز الأمونيا أو أكسيد النيتروز, وتسبب ظهور روائح غير مقبولة. وفي حالة ارتفاع نسبة الكربون إلى النيتروجين, فهذا يعني أن كمية النيتروجين غير كافية للنمو الأمثل للبكتريا؛ فيقل النشاط وتقل الأعداد المتوالدة وتقل معه التفاعلات, ويظل الكمبوست باردًا؛ مما يطيل من أمد التحلل وزمن إنتاج الكمبوست، إلى أن تموت بعض هذه البكتريا, ويستخدم النيتروجين المخزن في أجسامها بواسطة كائنات حية أخرى, وبناء خلايا جديدة تستهلك جزءًا من الكربون الزائد، وتستمر هذه العملية حتى حدوث الاتزان، وعندها يتم الإسراع في التفاعل.

وطبيعة تحلل الكربون من المخلفات والبقايا النباتية تختلف باختلاف المركب المكون له أو الموجود هو فيه، ففي حين نجد أن الكربون الموجود بمخلفات الثمار على صورة سكريات بسيطة يستهلك بواسطة البكتريا بسرعة أكبر من استهلاك الكربون الموجود في مادة السليلوز الموجود في قش الأرز مثلاً. وفي نفس الوقت نجد أن الكربون الموجود في سليلوز القش سهل التحلل بواسطة البكتريا بدرجة أكبر من الكربون الموجود في لجنين الأخشاب, والذي يعتبر

مرتبطًا مع المركب بقوة؛ بل ويصبح مقاومًا للتحلل. والمخلفات الزراعية بعضها غني في محتواه من النيتروجين، والآخر غني بالكربون (جدول 3- 2)؛ مما يوجب خلط هذه المخلفات الزراعية بالنسب التي تحقق معدل الكربون إلى النيتروجين المناسب لنمو ونشاط الكائنات الحية الدقيقة.

جدول (3-2): نسبة الكربون إلى النيتروجين في بعض البقايا والمخلفات الصلبة

مواد عالية في محتواها من الكربون	نسبة الكربون: النيتروجين (C/N Ratio)	مواد عالية في محتواها من النيتروجين	نسبة الكربون: النيتروجين (C/N Ratio)
أوراق الأشجار	1: 80-30	بقايا الخضروات	1: 20-15
السيقان	1: 100- 40	تقليم الحشائش	1: 25-15
ورق الموز	1: 90-80	البرسيم	1: 20-13
قش الأرز	1: 60-55	مطحون البن	1: 20-15
حطب الذرة	1: 58-50	الروث الحيواني	1: 25- 5
حطب القطن	1: 150-120	زرق الدجاج البياض	12-3
قش الشعير	1: 45-32	مخلفات الطيور المنزلية	1: 15-10
تفل الزيتون	1: 50-40	مخلفات دجاج بالفرشة	1: 18-13
قوالح الذرة	120 -60	البكتريا	1:5
قلف الأشجار	1: 130-100	الأكتينوميسيتات	1:6
نشارة الأخشاب	1: 500-100	الفطريات	1:10
ورق الجرائد	1:560-450	الدبال أو الهيومس	1: 14-10

وتستخدم المخلفات الغنية في محتواها من النيتروجين، والتي يكون فيها نسبة الكربون إلى النيتروجين بها أقل من 25: 1 للخلط مع المخلفات الغنية في الكربون، والتي ترتفع فيها نسبة الكربون إلى النيتروجين إلى أكبر من 1:50 لتحقيق التوازن المطلوب، والوصول إلى أقل من 35 :1 بين الكربون إلى النيتروجين. ومن الجدول السابق نجد أن النباتات الخضراء من بقايا المحاصيل والخضر والأغذية، وتقليم الحشائش أو الروث الحيواني وزرق الدواجن، أو مطحون البن - بالإضافة إلى مخلفات المجازر والأسماك - تفيد بشكل جيد في عملية الخلط. وخلط هذه المخلفات - التي تكون في معظم الأحيان رطبة، ومتداخلة وغير هشة - يحقق بالإضافة إلى الاتزان في نسبة الكربون إلى النيتروجين، التوازان في الرطوبة، وفي تقليل المسافات البينية التي تساعد على مسك الرطوبة فيما بينها بشكل أفضل.

وفي حالة عدم توفر مخلفات زراعية غنية بالنيتروجين أو ذات C/N Ratio منخفضة, فإن ضبط نسبة الكربون إلى النيتروجين يمكن أن يتم بإضافة نسبة محسوبة من النيتروجين من أي مصدر من مصادر الأسمدة النيتروجينية.

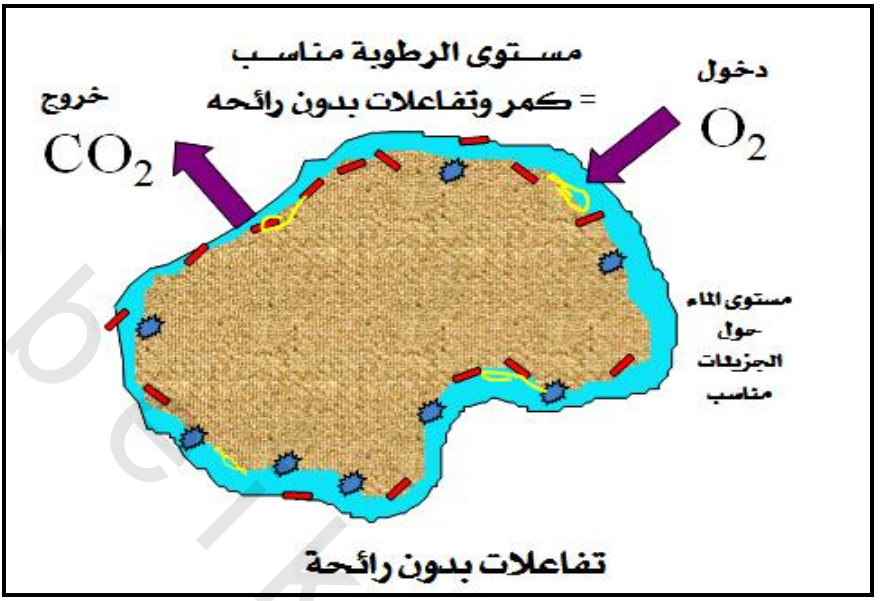
كما يمكن أن يستخدم الكمبوست القديم Old compost في حدود 5 -10٪؛ ليساعد على هذا الاتزان وكبادئ لبداية النشاط للكائنات الحية الدقيقة. وتستمر نسبة الكربون إلى النيتروجين في الانخفاض أثناء عمليات التحلل؛ نتيجة نشاط الكائنات الحية الدقيقة حتى تصل في المنتج النهائي من الكمبوست الناضج لأقل من 20 :1، وقد تصل بعد انتهاء مرحلة النضج والتشافي والاستقرار إلى درجة الثبات تقريبًا، مسجلةً أقل من 1:15.

[4] توفير الرطوبة المناسبة لنشاط البكتريا الهوائية *Suitable moisture requirement for microorganism activity*:

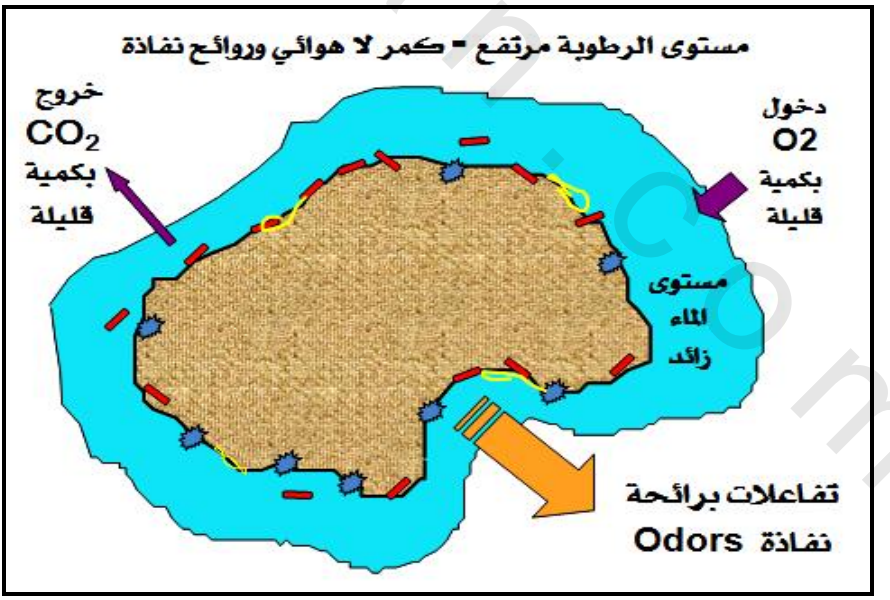
الكائنات الحية الدقيقة، مثلها مثل كل الكائنات الحية، تحتاج إلى الماء في وسط نموها لتعيش وتحيا وتعمل فيما سُخرت من أجله من أعمال، مصداقًا لقوله تعالى: "وجعلنا من الماء كل شيء حي"؛ لذا فإن الماء أو الرطوبة ضرورية لنشاط الكائنات الحية الدقيقة التي تحتوي أجسامها على حوالي 80٪ من الماء.

ولقد وجد أن الرطوبة المناسبة لنمو هذه الكائنات الحية تتراوح من 40 – 65٪ ، وبالتالي فإن انخفاض نسبة الرطوبة عن 40٪ يوقف نشاط ونمو الكائنات الحية الدقيقة، وزيادتها عن 65٪ يجعل من الظروف المحيطة بهذه الكائنات ظروفًا لا هوائية ينتج عنها تفاعلات اختزال مصحوبة بروائح نفاذة من الميثان والأمونيا، وكبريتيد الهيدروجين وغيرها. ويفضل أن تكون نسبة الرطوبة بوسط نمو الكائنات الحية الدقيقة في المدى المتوسط للمدى السابق, بحيث تصبح حوالي 50-55٪ كمتوسط مثالي لنسبة الرطوبة الواجب توافرها في وسط النمو.

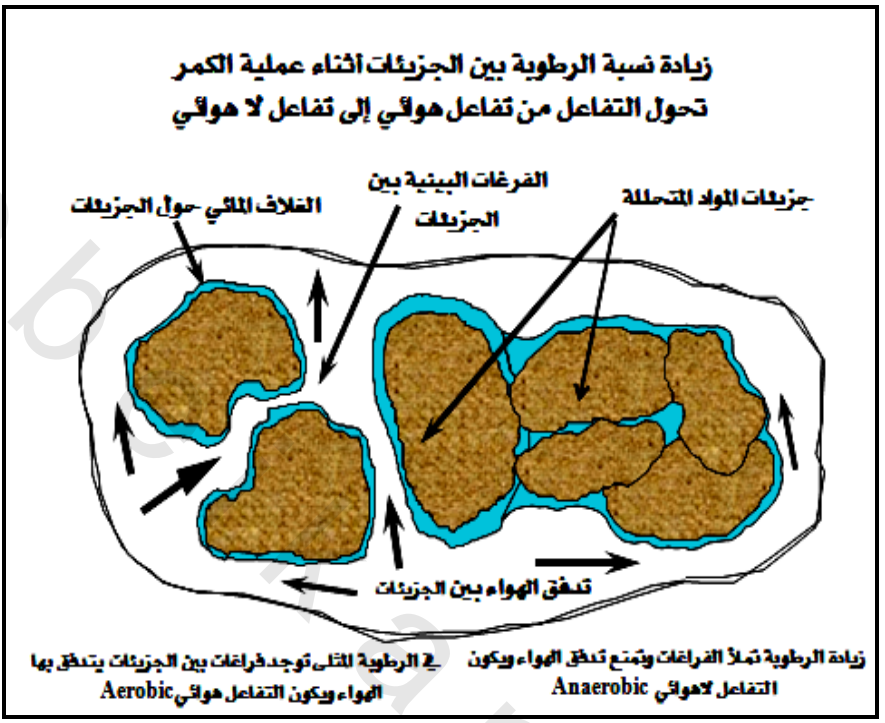
والأشكال التالية توضح كيف يكون مستوى الماء مناسبًا (شكل 2- 7)، أو زائدًا (شكل 2- 8) حول جزيئات المادة العضوية، ومدى تأثير ذلك على انسياب وتحرك الهواء فيما بين الجزيئات في هاتين الحالتين (شكل 3- 9).



شكل (3-7): يوضح سمك طبقة الماء حول جزيئات المادة العضوية في حالة الرطوبة المناسبة، والحصول على تفاعلات هوائية داخل مكمورات المخلفات بدون رائحة



شكل (3-8): يوضح سمك طبقة الماء حول جزيئات المادة العضوية في حالة الرطوبة المرتفعة، وما يتبعها من تفاعلات لا هوائية داخل مكمورات المخلفات ذات رائحة نفاذة



شكل (3- 9): يوضح مدى تأثير سمك طبقة الماء حول جزيئات المادة العضوية في تحرك وانسياب الهواء فيما بين الجزيئات، وتأثيره على نوع التفاعل؛ هوائي (إلى اليسار)، ولا هوائي (إلى اليمين)

وعند بداية العمليات في إنتاج الكمبوست يجب أن يتم الوصول إلى الرطوبة المناسبة بالتدريج؛ حيث تكون هناك صعوبة في هذه المرحلة في امتصاص وتشرب الجزيئات للماء بسهولة، وحتى لا تؤدي زيادة كمية المياه المضافة - مع عدم تشربها - إلى انسيابها على الأرض. لذا يتم البدء في الترطيب للوصول إلى رطوبة أولية قد تصل إلى مستوى 30٪، ثم الوصول إلى 40٪ في الإضافة التالية، وهكذا مع كل مرة من مرات الإضافة حتى نقترب من مستوى الرطوبة المناسب لذروة نشاط الكائنات، وهو ما فوق 50٪ إلى أقل من 60٪.

ولقد وجد بعض الباحثين أن المواد النباتية ذات الألياف العالية يمكن أن يتم عمل كمبوست منها في وجود رطوبة تزيد عن 85-90٪؛ حيث إن الألياف لها سعة تشبع مرتفعة، تصل إلى أكثر من 300٪، وبالتالي فإن 85 – 90٪ يعني وجود مسافات بينية أكثر من 50٪ تسمح بوجود قدر كافٍ من الأكسجين داخل هذه المخلفات لنشاط الكائنات الحية الدقيقة، وأثناء العمليات ومع تحلل هذه الألياف، وفي وجود ارتفاع درجات الحرارة في مرحلة Thermophilic، فإن ذلك يؤدي إلى انخفاض نسبة الرطوبة تدريجيًّا لتتناسب مع سعة التشبع للألياف المتحللة، حتى الوصول إلى الحدود التي تحافظ على نشاط الكائنات الحية.

[5] توفير نسبة الأكسجين المناسبة لنشاط البكتريا الهوائية *Suitable oxygen requirement for microorganism activity*

إن توفير الأكسجين بالمعدل المناسب لنشاط البكتريا الهوائية أمر في غاية الأهمية؛ حيث تحتاجه البكتريا الهوائية في أكسدة مكونات المادة العضوية، التي غالبًا ما تتكون من العديد من المركبات العضوية، منها بصفة أساسية المواد الكربوهيدراتية [السكريات الأحادية Monosaccharides (جلوكوز Glucose، جلاكتوز Galactose، فركتوز Fructose، مانوز Mannose، أرابينوز Arabinose، زايلوز Zylose، ريبوز Ribose) ، السكريات الثنائية Disaccharides (سكروز Sucrose، اللاكتوز Lactose، مالتوز Maltose)، السكريات العديدة Polysaccharides (السلسلوز Cellulose والهيميسليلوز Hemicellulose والنشا Starch)]، واللجنين Lignin ، والبروتينات Protein ، بالإضافة إلى بعض الزيوت والشموع والمواد الملونة.

وتختلف نسب تواجد هذه المكونات في المادة العضوية باختلاف نوع المخلفات المتواجدة بها، لكنها في المتوسط تتواجد بالنسب التقريبية التي يوضحها جدول (3- 3).

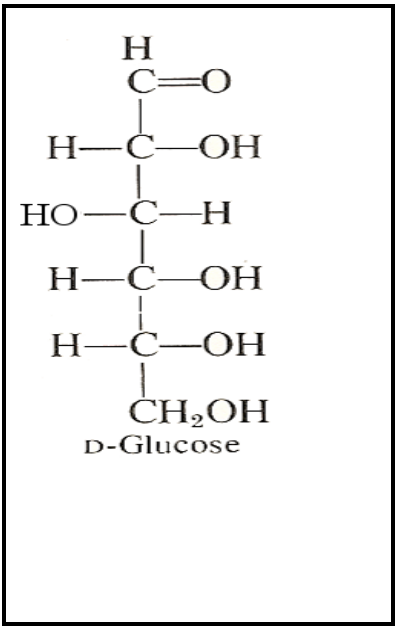
جدول (3-3): نسب مكونات المادة العضوية

المادة	النسبة المئوية (٪)	المادة	النسبة المئوية (٪)
الكربوهيدرات الأحادية والثنائية	5 - 1	**بروتينات بسيطة ومعقدة**	15 - 1
سيليلوز	50 - 20	**لجنين**	30 –10
هيمسيليلوز	28 -10	**زيوت وشموع ومواد ملونة**	8 - 1

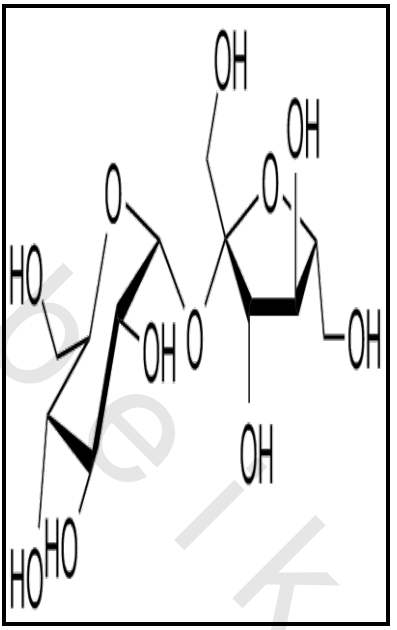
وهذه المكونات للمادة العضوية وما تحتويه من مركبات تنقسم في قابليتها للتحلل إلى ثلاث مجموعات:

المجموعة الأولى: المركبات سريعة الأكسدة والتحلل, مثل: السكريات الأحادية الأحادية Monosaccharide (جلوكوز ، فركتوز ... إلخ)، ثم السكريات الثنائية Disaccharide: سكروز (جزيء من الجلوكوز وآخر من الفركتوز)، اللاكتوز (جزيء من الجلوكوز وآخر من الجلاكتوز ... إلخ)، والنشا Starches, وهو جزيئات سكريات عديدة من الجلوكوز.

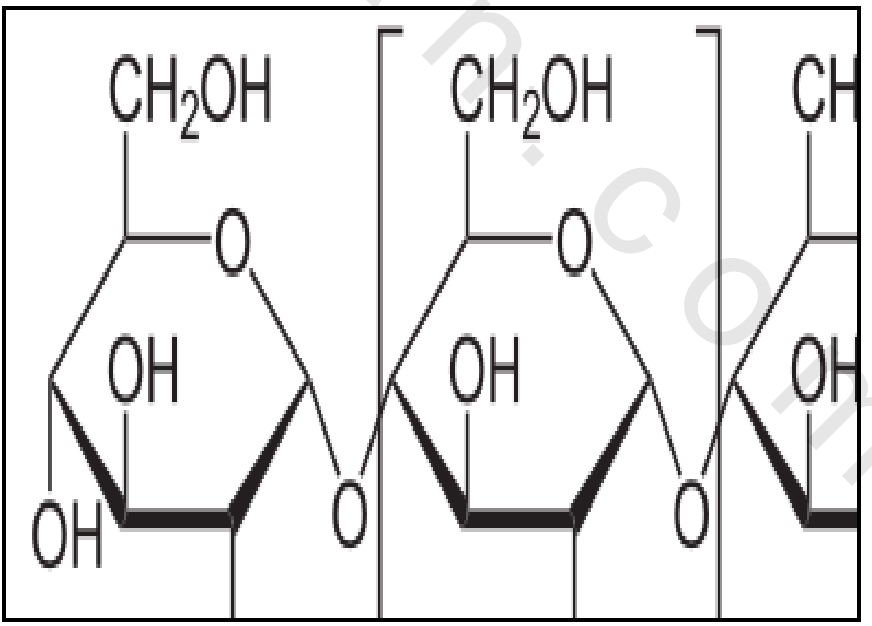
ومن ضمن أفراد هذه المجموعة أيضًا البكتين Pectin والليبيدات Lipids والجليسريدات Glycerol والأحماض الأمينية Amino acids واليوريا Urea.



جلوكوز **Glucose**



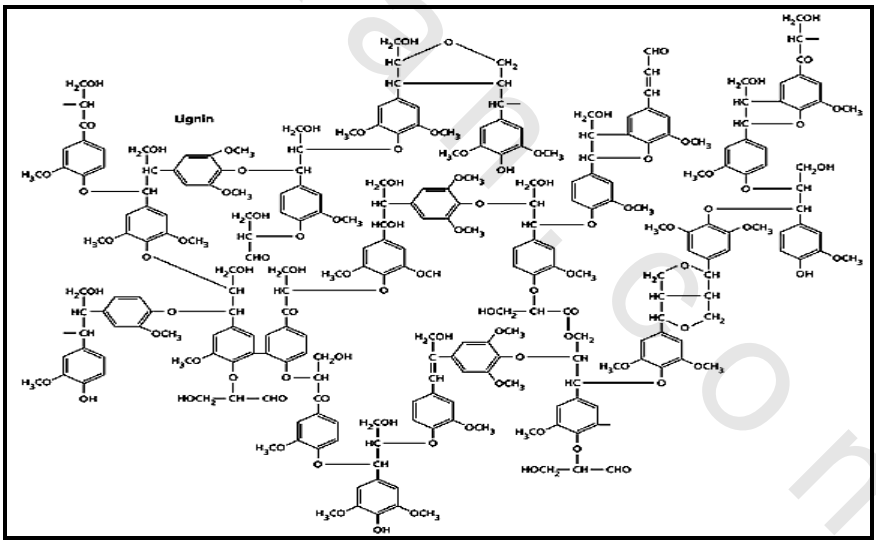
سكروز **Sucrose**



النشـا Starch

والمجموعة الثانية: تشمل المركبات التي تتحلل ببطء وتأخذ وقتًا في الأكسدة والتحلل, وهي البروتينات Proteins والهيميسليلوز Hemicellulose والسليلوز Cellulose والشيتين Chitin.

المجموعة الثالثة: تشمل المركبات صعبة التحلل, وتظل معظم مكوناتها في المنتج النهائي مثل اللجنين Lignin والسليلوز الملجنن Lignocellulose. وتأتي صعوبة التحلل لهذه المكونات لهذه المجموعة إلى تعقد تركيبها، فجزيء اللجنين مثلاً يحتوي على مجموعات كيميائية متعددة، مرتبطة ببعضها بروابط كيميائية متنوعة، وهذا التنوع والتعدد في المكونات، واختلاف مستوى الارتباط فيما بينها يؤدي إلى صعوبة تحلل هذه المركبات التي تمثل المجموعة الثالثة.



التركيب البنائي لجزيء اللجنين Lignin molecule structure

وفي حالة وجود الأكسجين الكافي لنشاط الكائنات الحية الهوائية تتجه تفاعلات الأكسدة في اتجاه تكوين الأحماض العضوية، ثاني أكسيد الكربون

CO_2، الماء H_2O ، والطاقة Energy كما في المعادلة التالية التي تعرف بمعادلة التنفس الهوائي Aerobic respiration:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + Energy$$
(677 kcal/mol)

كما ينتج عن عمليات التحلل أيونات الأمونيوم NH_4^+ في عملية تعرف باسم عملية المعدنة Mineralization أو النشدرة Ammonification، وأيونات الأمونيوم الناتجة يحدث لها أكسدة، وتتحول إلى أيونات النترات NO_3^- من خلال عملية تعرف باسم عملية النترتة أو Nitrification. كما تنتج أيضًا من عمليات الأكسدة أنيونات الفوسفات $H_2PO_4^-$ والكبريتات SO_4^{--} والعديد من العناصر الغذائية التي كانت ضمن مكونات المادة العضوية في صورة أكاسيد وكاتيونات وأنيونات مدمصة على الدبال. كما ينتج أيضًا خلال عمليات التحلل العديد من الأحماض العضوية. وتستمر عمليات التحول والتحلل الهوائي في وجود الأكسجين, حتى الوصول إلى مرحلة الثبات وتكوين الدبال أو Humus في سماد عضوي أو كمبوست ذي صفات طبيعية وكيميائية جيدة، كما يتميز الكمبوست الهوائي الناتج برائحة التربة الزراعية المقبولة, والتي ترجع إلى مادة الجيوسمين Geosmin التي تفرزها الأكتينومسيتات.

في حين أن عدم توفر الأكسجين الكافي لنشاط البكتريا الهوائية يؤدي إلى نشاط البكتريا غير الهوائية, ويكون من نتيجته الحصول على منتج من السماد أقل جودة، مع اتجاه التفاعلات لإنتاج كميات محسوسة من غاز الميثان CH_4 أو غاز المستنقعات Swamp gas،

بالإضافة إلى بعض الأحماض العضوية R-COOH قصيرة السلسلة Short-chain، خاصة الأحماض الدهنية Fatty acids، والأمونيا NH_3، وبعض الأمينات $R\text{-}NH_2$، والميركبتنات R-SH، وبعض الغازات السامة, مثل: كبريتيد الهيدروجين H_2S، وكبريتيد داي مثيل، والإيثيلين $H_2C=CH_2$, والميثان, كما توضحها المعادلات التالية المعروفة بمعادلات التنفس اللاهوائي Anaerobic respiration:

$$C_6H_{12}O_6 + 3SO_4^{=} + 6H^{+} \Longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 3H_2S + \textbf{Energy } \textit{(107 kcal/mol)}$$

ومعادلات التخمر اللاهوائي وإنتاج الإيثانول Anaerobic fermentation to ethanol

$$C_6H_{12}O_6 \Longrightarrow 2C_2H_6O + 2CO_2 + \textbf{Energy } \textit{(51 kcal/mol)}$$

وهذه المكونات تتراكم في وسط التحلل والتخمر؛ مما يظهر معه روائح كريهة غير مرغوب بها.

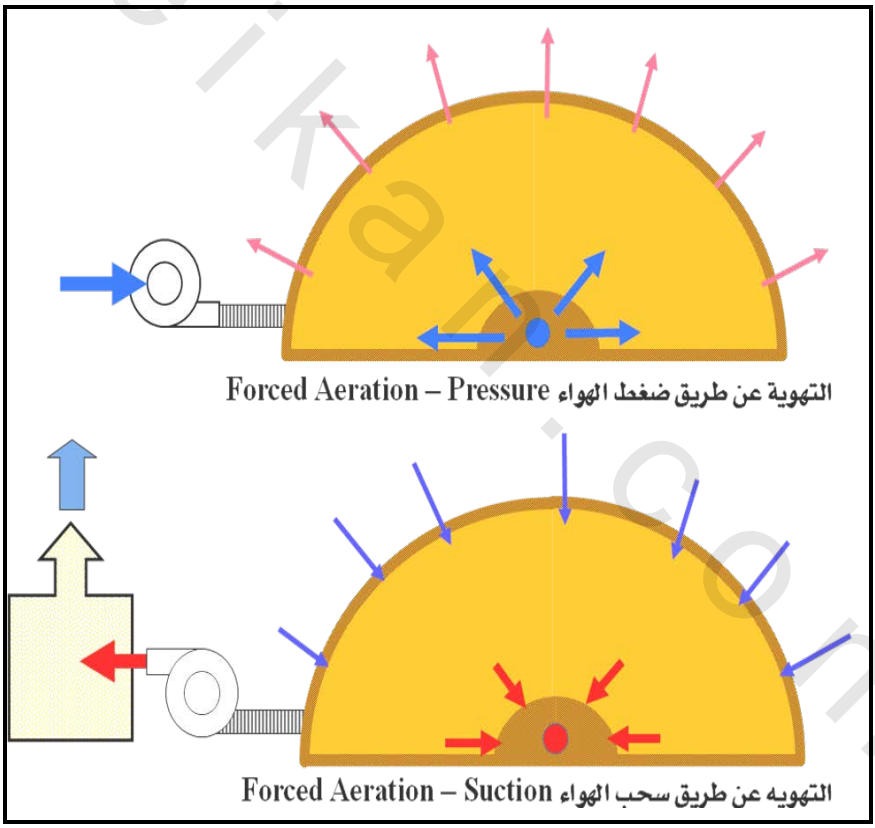
ولما كان الأكسجين ضروري لنمو ونشاط البكتريا الهوائية، فإن هذا النشاط يتبعه نقص في كميته باستمرار؛ مما يخلق ظروفًا لا هوائية، قد تتوقف معه تمامًا عملية تحويل الأمونيوم إلى نترات، وتعرض النيتروجين للفقد في صورة أمونيا، وظهور روائح كريهة نتيجة تصاعد الأمونيا مع غاز الميثان وكبريتيد الهيدروجين. كما تستتبع زيادة النشاط مزيدًا من الارتفاع في درجة حرارة المصفوفات؛ الأمر الذي يجب معه إدخال قدر من الأكسجين؛ تعويضًا لما تم استهلاكه منه بواسطة

البكتريا، وخفضًا لدرجة الحرارة، وهذا الأمر يتم إنجازه بضخ مزيد من الهواء الجوي الذي يحتوي الهواء الجوي على 78٪ نيتروجين، 21٪ أكسجين، 0.9٪ أرجون، 0.04٪ ثاني أكسيد الكربون، فيما يعرف بالتهوية.

والتهوية تؤدي إلى إضافة الأكسجين، وخفض وطرد الحرارة وبخار الماء، وأي غازات محبوسة في مكمورة أو مصفوفة الكمبوست، ويجب أن يكون معلومًا أن معدل التهوية المطلوب لتقليل المحتوى الرطوبي وإزالة أو طرد الحرارة بالمصفوفات يكون أكبر من معدل الحاجة إلى الإمداد بالأكسجين بحوالي 10 مرات، لذلك فإن درجة حرارة المصفوفات هي التي تحدد كم التهوية اللازم، وعدد مرات التقليب المطلوبة لهذه المصفوفات. وبعد إجراء كل عملية تقليب ترتفع درجة الحرارة مرة أخرى, حتى الوصول إلى درجة الثبات في نهاية مرحلة الكمر أو مرحلة Thermophilic, ثم بعدها تتجه للانخفاض؛ للدخول في مرحلة النضج Maturation.

وطالما أن التهوية التي نقوم بها للتخلص من الحرارة والرطوبة الزائدة أكبر من الحاجة إلى الإمداد بالأكسجين, فالسؤال هنا: كم من الأكسجين يلزم للمحافظة على أن تظل بيئة النمو هوائية؟ من حسن الحظ أن البكتريا الهوائية تظل على قيد الحياة والنشاط حتى مستوى 5٪ أكسجين، لكن المستوى المثالي للأكسجين الذي يحقق مزيدًا من النشاط للبكتريا الهوائية، يجب أن يزيد عن 5٪ ليصل إلى 10٪ في مرحلة الكمر النشط Active composting، وفي مرحلة الإنضاج أو التشافي Maturity or Curing تكون أكبر من 2٪ حتى 5٪.

وتتم عملية التهوية بالتقليب بماكينات التقليب, أو اللوادر, أو بمقطورة توزيع السماد العضوي المعروفة باسم بدارة السماد, أو حتى يدويًّا في الكومات الصغيرة؛ لإدخال جزء من الهواء الجوي وما به من أكسجين، أو يتم عبر ضخ الهواء إلى داخل المصفوفات، أو سحب الهواء الداخلي الساخن قليل الأكسجين من المصفوفات، من خلال مواسير خاصة مثبتة أسفل المصفوفات في الأنظمة المغلقة (شكل 3-10).



شكل (3-10) : أنظمة الكمر الهوائي بالتهوية بضغط الهواء الجوي، من خلال مواسير مثقبة أسفل منتصف المصفوفة، ومنها ينتشر الهواء إلى داخلها (لأعلى)، أو سحب الهواء من داخل المصفوفة؛ ليحل محله الهواء الجوي من جميع أنحاء المصفوفة (لأسفل)

ولقد وجد بعض الباحثين أن كم التهوية اللازم لإحداث التهوية للإمداد بالأكسجين والتخلص من الحرارة الزائدة (عند 70°م) والرطوبة الزائدة (عند 60٪) هو 0.6-0.8 متر مكعب من الهواء / في اليوم / لكل كيلو جرام من المواد المتحللة على أساس الوزن الجاف. وأضاف آخرون أن ضخ الهواء بمعدل حوالي 4 متر مكعب / لكل طن / في اليوم كافٍ للإمداد بالأكسجين اللازم للكائنات، والتخلص من ثاني أكسيد الكربون المتولد من التفاعلات؛ لذا يجب أن يتم التقليب كل 3- 6 أيام، وملاحظة أن زيادة المدة الزمنية بين فترات التقليب تحول وسط التفاعل داخل المصفوفات تدريجيًّا إلى وسط وتفاعلات لا هوائية، بينما يظل الغلاف الخارجي للمصفوفات ولعمق 20-30 سم هوائيًّا؛ مما يؤدي إلى الحصول على منتج غير جيد من الأسمدة العضوية.

[6] الاتزان العنصري في المكمورات والمصفوفات والذي يساعد على نمو الكائنات الحية الدقيقة *Nutrient balance requirement for microorganism activity*

يعتبر الفوسفور والبوتاسيوم والكالسيوم والحديد والبورون والنحاس، بالإضافة إلى عنصري الكربون والنيتروجين - من أهم العناصر الضرورية في عمليات التمثيل الغذائي، والتي ينعكس أثرها على نمو ونشاط الكائنات الحية الدقيقة. وهذه العناصر الضرورية في حياة الكائنات الحية الدقيقة، هي أيضًا العناصر الأساسية والضرورية في حياة

النبات، وبالتالي فإن استخدام المخلفات النباتية في تصنيع الكمبوست يوفر جزءًا مهمًّا من احتياجات الكائنات الحية الدقيقة من هذه العناصر، وإن ظل تركيزها أيضًا من العوامل المؤثرة على نشاط هذه الكائنات. وبالرغم من ذلك فإن هذه العناصر لا يتم إضافتها أثناء تصنيع الأسمدة العضوية أو الكمبوست، وعدم الإضافة هذه لا تعيق نشاط الكائنات الحية الدقيقة إذا ما توفرت مستوياتها عند أو بالقرب من المستوى المناسب لنشاطها في المخلفات العضوية للقمامة المنزلية، للبقايا والمخلفات الزراعية (نباتية - حيوانية)، لمخلفات التصنيع الزراعي ومخلفات الأسواق العمومية، وهي المخلفات التي تنمو عليها هذه الكائنات، وتعمل على تحويلها إلى كمبوست.

[7] رقم الحموضة في المكمورات والمصفوفات *Suitable pH in compost windrows and piles*

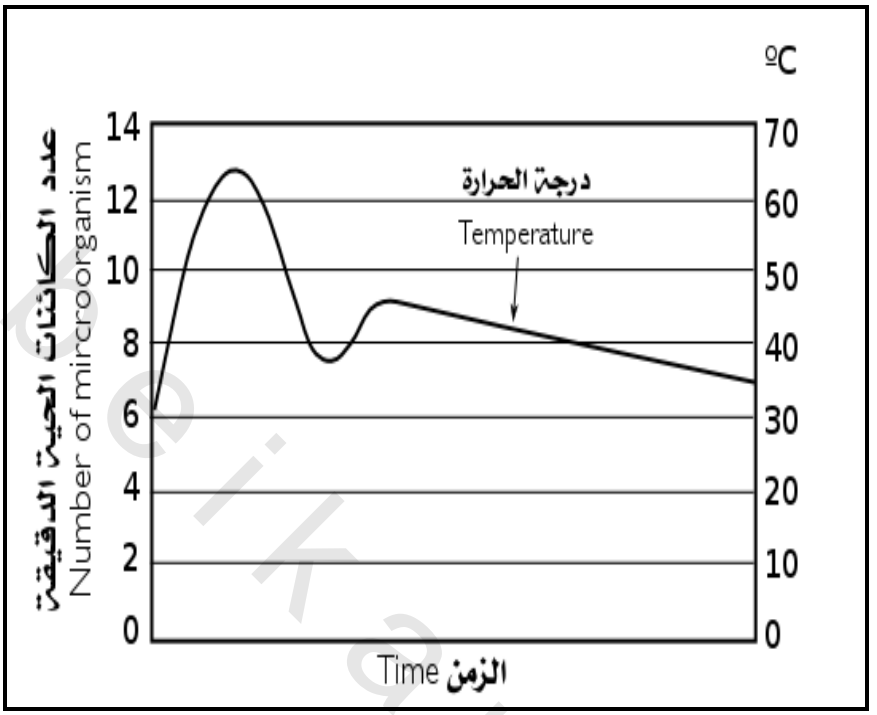
الكائنات الحية الدقيقة التي تعمل في إنتاج الكمبوست هوائيًّا يناسبها رقم التفاعل أو رقم الـ pH في مدى واسع، يبدأ من الحد الأدنى 5.5- 6.5 إلى حده الأعلى من 8.5-9.0؛ لكنه يكون أقل كفاءة عند pH 5.5 ،9.0، مقارنة به عندما يكون قريبًا من التعادل. ومعظم البكتريا يناسبها رقم pH من 6-7.5 ، والفطريات يناسبها رقم pH من 5.5-8. وتعمل البكتريا على تحلل السكريات في المراحل الأولى لعمليات التخمر بسرعة وكفاءة عالية عند pH من 6- 9 ، في حين يكون تحلل البروتينات عاليًا في مجال من الـ pH من 7-8.

وبصفة عامة، فإن رقم الـ pH المثالي الذي تعمل عنده البكتريا وأي كائنات حية دقيقة تحلل المخلفات النباتية أو غيرها من المخلفات هو من 6-8. وفي المراحل الأولى من إنتاج الكمبوست تنطلق بعض الأحماض العضوية - التي غالبًا ما تتراكم - مما يؤدي إلى خفض رقم الـ pH, والذي يشجع بعض الفطريات للنمو والقيام بتكسير اللجنين والسليلوز في الظروف الهوائية، بالإضافة إلى المركبات النيتروجينية من بروتينات وأحماض أمينية, والتي بتحللها تنطلق الأمونيا؛ مما يؤدي إلى رفع رقم الـ pH. ورقم الـpH يتجه إلى الارتفاع بعد يوم إلى أربعة أيام من بداية الكمر, ثم يواصل ارتفاعه، متلازمًا مع ارتفاع درجة حرارة التفاعل في المصفوفات في مرحلة Thermophilic، إلى أن يصل إلى القلوية، pH من 8-9 يبدأ عندها انخفاض معدل التحلل.

أما إذا انخفض رقم الـ pH عن 4.5 فإن هذا الوسط يؤدي إلى وقف نشاط البكتريا, وبالتالي لا يتم التحلل بالشكل الطبيعي؛ بل إن هذا الانخفاض في رقم الـ pH يعني أن الظروف في المصفوفات أصبحت ظروفًا لا هوائية، وأن هذا الانخفاض يرجع إلى تراكم الأحماض العضوية.

[8] الاتزان الحراري في المكمورات والمصفوفات *Heating balance in compost windrows and piles*

يرتبط المنحنى الحراري لإنتاج الأسمدة العضوية أو الكمبوست بأعداد الكائنات الحية الدقيقة التي تعمل في هذا المجال (شكل 3-11).



شكل (3-11): شكل منحنى الحرارة وارتباطه بأعداد الكائنات الحية الدقيقة أثناء عمليات إنتاج الكمبوست

فالكائنات الحية الدقيقة تنقسم - حسب قدرتها على النمو في درجات الحرارة - إلى أربعة أنواع:

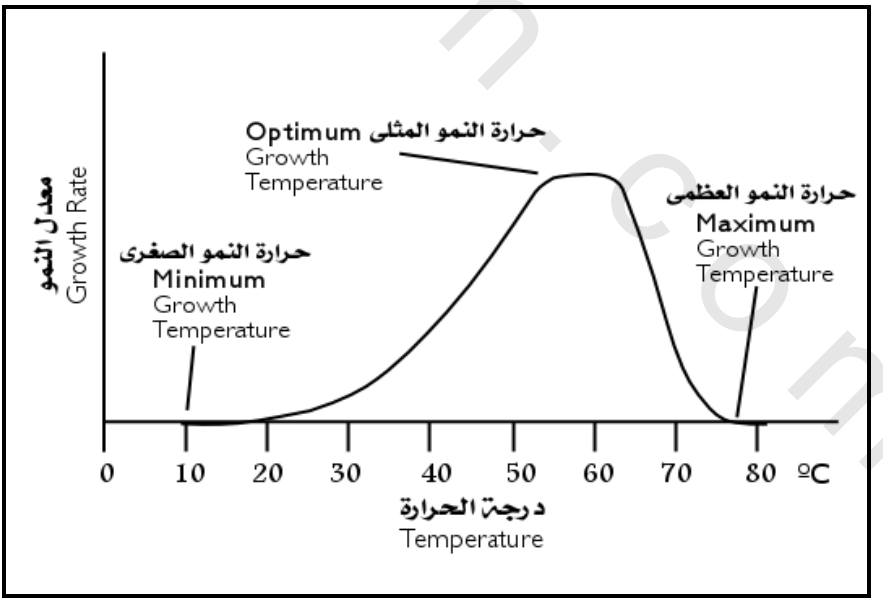
النوع الأول: الكائنات الحية المحبة للحرارة المنخفضة, وتسمى Psychrophilic Microorganism، وهي تفضل الحرارة الأقل من 25ْم.

النوع الثاني: الكائنات الحية الدقيقة المحبة للحرارة المتوسطة (أو غير المحبة للحرارة العالية), وتسمى Mesophilic Microorganism، والتي تنشط في مدى من الحرارة عند أقل من 25ْم إلى أقل من 45ْ م.

النوع الثالث: الكائنات الحية الدقيقة المحبة للحرارة، وتسمى Microorganism Termophilic، والتي تنشط في مدى من الحرارة عند أقل من 45˚م إلى حوالي 80˚م.

النوع الرابع: الكائنات الحية الدقيقة المحبة للحرارة العالية, وتسمى Hyper Thermophilic Microorganism, والتي تنشط في مدى من الحرارة أعلى من 80 م.

ويعتبر النوع الثاني المحب للحرارة المتوسطة Mesophilic, والثالث المحب للحرارة العالية Thermophilic من هذه الكائنات الحية، هما الأهم في صناعة الأسمدة العضوية. وفي كل الأحوال، فإن معدل النمو للكائنات الحية الدقيقة مرتبط بدرجة الحرارة (شكل 3-12).



شكل (3-12): معدل نمو الكائنات الحية الدقيقة وارتباطه بدرجات الحرارة

فهناك درجة صغرى وأخرى عظمى، يكون معدل النمو عندهما أقل ما يمكن، وبينهما درجة الحرارة المثلى, والتي عندها يكون أقصى نشاط وأقصى معدل لنمو هذه الكائنات. ويلاحظ من هذا المنحنى أن نمو الكائنات الحية الدقيقة يقع في مدى من 10 -78°م، وأقصى معدل نمو عند مدى من 50 – 55°م؛ مما يشير إلى أنه في مرحلة النشاط يكون أعلى معدل للنمو، ولكن سرعان ما ينخفض بداية من درجة حرارة 65°م، وهو ما ينبغي معه البدء في تبريد المصفوفة بالتقليب أو بالترطيب أو بهما معًا، فإذا ما وصلت درجة الحرارة إلى مدى أعلى من 70 - 78°م, فإنه يتوجب التقليب عندها فورًا؛ حيث إن ارتفاع درجة الحرارة لأعلى من 70°م سوف يقضي على بعض الكائنات الحية المفيدة.

إن نشاط الكائنات الحية الدقيقة ونموها وتكاثرها، وقيامها بعملية تكسير المواد العضوية – ككائنات ذاتية التغذية – ينشأ عنها غاز ثاني أكسيد الكربون وماء وحرارة, كما سبق الإشارة إليه في معادلة التنفس الهوائي، والتي توضح مقدار الحرارة الناتجة عن كل مول من المواد الكربوهيدراتية المتحللة، وقدرها 677 كيلوكالوري. ويمكن إدراك أهمية الكمر الهوائي من خلال مقارنة الحرارة الناتجة من التنفس الهوائي بمثيلاتها الناتجة من التنفس اللاهوائي، والبالغة 107 كيلوكالوري فقط لكل مول. وهذا القدر من الحرارة المتولدة من التحلل تساهم في سرعة إنضاج الكمبوست، وتعقيمه، والعمل على قتل كل الكائنات الممرضة وبذور الحشائش، في وقت أقصر وجودة أفضل.

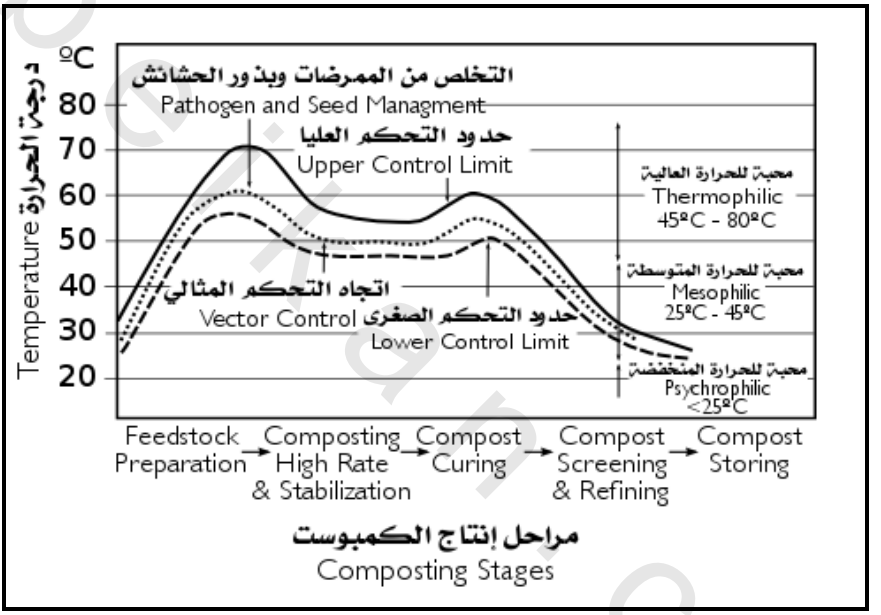
وهذه الحرارة تبدأ ضعيفة في بداية المرحلة الأولى من التحلل؛ حيث تقوم الكائنات المحبة للحرارة المتوسطة Mesophilic Microorganism – والتي تنشط في مدى من الحرارة أقل من 45°م – بمهاجمة المركبات الذائبة سريعة التحلل, فترتفع نتيجة لذلك درجة الحرارة حتى تصل إلى الحد الأقصى لنشاطها, وهو 45 درجة مئوية، فتصبح قدرة الكائنات Mesophilic على الاستمرار ضعيفة، وعندها تنشط الكائنات الدقيقة المحبة للحرارة Thermophihic Microorganism, وتعمل هذه الكائنات منتجة حرارة أعلى من بكتريا Mesophilic, وتظل تعمل بنشاط في مدى من الحرارة من أقل من 45 حتى 78°م. والجدول التالي يوضح حدود الحرارة الصغرى والعظمى, وما بينهما من حرارةٍ مثلى لأهم نوعين من الكائنات المحللة للمخلفات (جدول 3–4).

جدول (3–4): مدى درجات الحرارة الصغرى والمثلى والعظمى للكائنات الحية الدقيقة المحبة للحرارة المتوسطة Mesophilic والمحبة للحرارة العالية Thermophilic

الكائنات الحية الدقيقة	درجة الحرارة الصغرى°م	درجة الحرارة المثلى°م	درجة الحرارة العظمى°م
المحبة للحرارة المتوسطة	10-25	10-35	35-45
المحبة للحرارة العالية	25-45	50-55	75-80

ومن القواعد المعروفة أن درجة حرارة 55°م تعتبر الدرجة الحرجة للكائنات الممرضة, والتي عندها يتم تدمير كل الكائنات الحية الدقيقة المسببة لأمراض الإنسان، والكائنات الممرضة للنبات، بينما درجة الحرارة الحرجة التي يتم عندها تدمير كل بذور الحشائش هي 62°م (شكل 3–13)، وبالتالي

تصبح درجة الحرارة التي يكون عندها أقصى نشاط للكائنات الحية الدقيقة (55-62°م) هي نفس درجة الحرارة اللازمة لإنتاج الكمبوست؛ مما يعني أنه إذا تم إنتاج الكمبوست تحت ظروف التشغيل المثلى، فسوف يكون القضاء على الكائنات الممرضة وبذور الحشائش أمرًا حتميًّا.



شكل (3-13): يوضح أهمية درجات الحرارة ودورها في التحكم في جودة الكمبوست

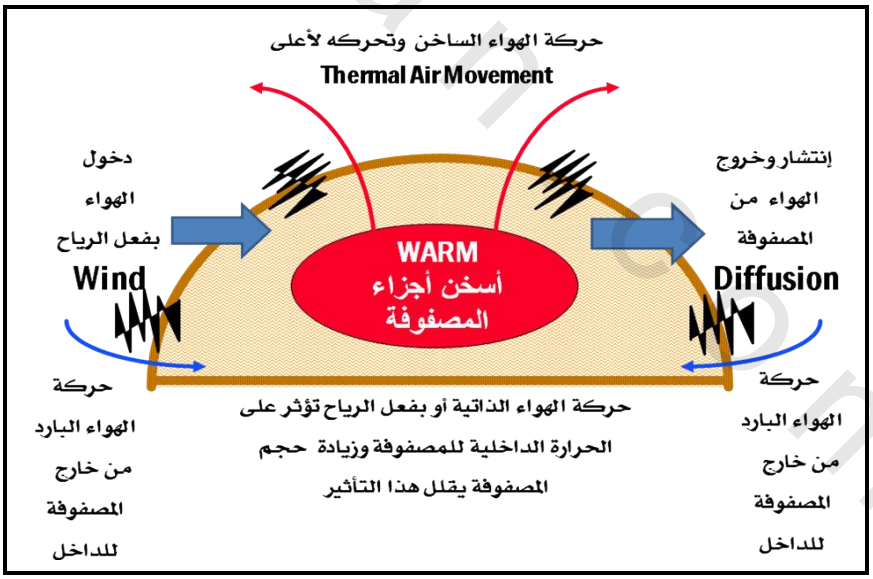
وباستمرار نشاط الكائنات المحبة للحرارة تتراكم الحرارة، وترتفع حرارة المصفوفات إلى أعلى من 65°م, وقد تصل إلى درجة 78°م؛ مما يؤثر على نشاط العمليات بالمصفوفات. وهناك من الباحثين من يرى أن أنسب درجة حرارة لإنتاج الكمبوست تكون من 35-55°م؛ حيث إن هذا المدى تجتمع فيه كل الكائنات الحية الدقيقة المحبة وغير المحبة

للحراة، والتي تعمل معًا لإنضاج الكمبوست؛ لكن الإنضاج يحتاج إلى فترة أطول. وهناك من يرى أن درجة الحرارة الأنسب تكون من 50-60°م بمتوسط 55°م، وهو المدى الأفضل لإنتاج الكمبوست، وهناك من يحبذ أن تظل فترة الإنضاج واقعة في هذه المرحلة من 50-70°م بمتوسط 60°م .

وبالرغم من أن الكائنات الحية الدقيقة المحبة للحرارة تستطيع النمو حتى 78°م، إلا أنه لا يجب الوصول إلى هذه الدرجة على الإطلاق؛ لأنه بارتفاع درجات الحرارة عن 70°م، فإن معدل فقد النيتروجين يزداد في صورة أمونيا، وخاصة عندما تكون قيمة C/N Ratio منخفضة. وفي كل الأحوال - وعند درجات الحرارة المرتفعة - لا بد من التقليب؛ لإدخال مزيد من الهواء الجوي الذي يؤدي إلى خفض درجة الحرارة إلى حدود حوالي 60°م، والمحافظة عليها؛ حتى نضمن حسن أداء هذه الكائنات لوظائفها، والحصول على سماد عضوي جيد في وقت مناسب. ويجب الأخذ في الاعتبار أن ارتفاع درجة الحرارة يزيد من معدل بخر الماء؛ مما يقلل من المحتوى الرطوبي إلى أقل من 40٪، وعندها يزداد التأثير الضار لارتفاع درجة الحرارة، خاصة مع ابتعاد فترات التقليب إلى أكثر من أسبوع؛ مما يؤدي إلى حدوث الاحتراق الذاتي Spontaneous combustion، كما أشار إليه Rynk سنة 1992.

ويؤثر في درجة حرارة المصفوفات حجم المصفوفة، والعوامل الجوية، من حرارة ورياح المحيط بالمصفوفات. فبعض الدراسات تشير إلى أنه عند بناء مكمورة أو مصفوفة بارتفاع 1.5 متر وصلت درجة

حرارتها الداخلية إلى 70°م، بالرغم من أن درجة حرارة الجو المحيط بالمصفوفات تتراوح بين 15-20°م، وعند خفض هذا الارتفاع إلى 0.6 متر، انخفضت درجة الحرارة خلال 3 ساعات فقط إلى 65°م ، وعند إعادة بناء هذه المصفوفة إلى ارتفاع 1.5 متر مرة أخرى وصلت درجة حرارتها الداخلية بعد 24 ساعة إلى 70°م. كما أن الرياح القوية تؤدي إلى خفض درجة حرارة المصفوفات بالمنطقة القريبة من السطح، وفي الجانب المعرض للرياح أكثر منها في الجانب المقابل؛ مما يحتم أن يكون حجم المصفوفات مناسبًا؛ حتى تحتفظ بقدر مناسب من الحرارة الداخلية مع أكبر قدر من المخلفات؛ مما يساعد على إنضاج كميات أكبر في وقت أقل مع جودة في إنضاج الكمبوست الناتج (شكل 3-14).

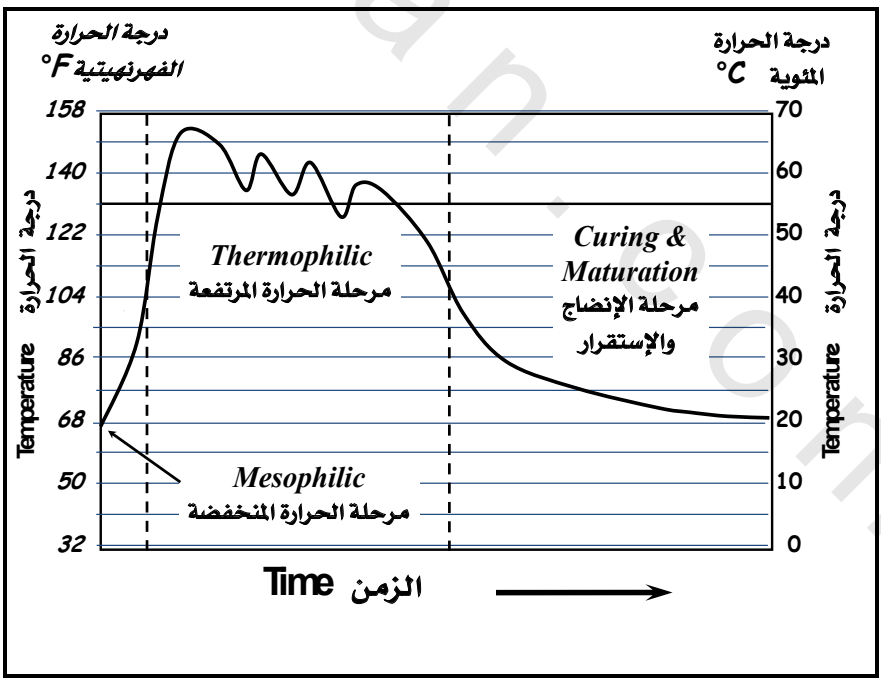


شكل (3-14): يوضح شكل حركة الرياح وتأثيرها على دخول الهواء البارد من الخارج وخروج الهواء الساخن من المصفوفات، ويكون التأثير كبيرًا عندما يكون حجم المصفوفة منخفضًا

ويوضح الشكل السابق (شكل 3-14) حركة الرياح وتأثيرها على دخول الهواء الخارجي وانتشاره داخل المصفوفة، وتأثيره على خروج الهواء الساخن من المصفوفة؛ مما يؤدي إلى تبريدها، وهذا التأثير يكون ملحوظًا عندما يكون ارتفاع المصفوفات منخفضًا.

تستمر هذه المرحلة حتى الوصول إلى الانخفاض الطبيعي في درجة الحرارة، بما يعني أنه لا توجد مواد قابلة للتحلل، وأننا وصلنا إلى المنتج النهائي للمركبات العضوية وهو الدبال، وتقل معه أعداد الكائنات الحية الدقيقة.

ومن هنا يمكن تحديد مراحل إنتاج الكمبوست أو السماد العضوي في حالته المثلى تبعًا لنوع البكتريا السائدة ودرجة الحرارة الناتجة أثناءها من خلال شكل (3-15).



شكل (3-15): يوضح مدى درجات الحرارة أثناء مراحل إنتاج الكمبوست

المرحلة الأولى: مرحلة بداية التحلل أو الحرارة المعتدلة Low processing stage، وتستمر من عدة أيام إلى أسبوعين، مع سيادة الكائنات الحية الدقيقة من نوع Mesophilic.

المرحلة الثانية: مرحلة التخمر Fermentation أو مرحلة التحلل النشط Active processing stage الحرارة المرتفعة, وتستمر من 4-8 أسابيع، وتسود فيها الكائنات الحية الدقيقة من نوع Thermophilic, وهي في معظمها من البكتريا التي تنشط في مدى من الحرارة المرتفع حتى حوالي 80°م.

المرحلة الثالثة: مرحلة الإنضاج Maturation، أو مرحلة التشافي Curing، وهي مرحلة الحرارة المنخفضة, والتي قد تستمر من 3-4 أسابيع، وقد تأخذ عدة شهور, ويسود فيها نشاط الفطريات والأكتينوميسيتس.

وبمراعاة كل ما سبق من احتياطات لتحقيق النمو الأمثل للكائنات الحية الدقيقة التي ستقوم بتصنيع السماد العضوي من جزئيات ذات حجم مناسب من المواد الخام للمخلفات المستخدمة في التصنيع, والتي تم ضبط نسبة الكربون إلى النيتروجين بها، والمحافظة على النسبة المناسبة من الأكسجين ورقم الحموضة والاتزان العنصري والرطوبة المناسبة لنشاط البكتريا الهوائية المكلفة بتصنيعها، ومتابعة الاتزان الحراري الناتج من نشاطها - فإنه يمكن التحكم في زمن الإنتاج، وجودة المنتج الناتج من الأسمدة العضوية.