

ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Γεράσιμος Λυμπεράτος, Καθηγητής ΕΜΠ



Η αερόβια βιοσταθεροποίηση ή λιπασματοποίηση, ή χουμοποίηση ή κομποστοποίηση είναι η βιολογική αποδόμηση και σταθεροποίηση οργανική ύλης υπό συνθήκες που επιτρέπουν την ανάπτυξη θερμοκρασιών στην **θερμοφιλική περιοχή** (50-60 °C), η οποία διασφαλίζεται από βιολογικά παραγόμενη θερμότητα, με τελικό προϊόν αρκούντως σταθεροποιημένο για αποθήκευση και χρήση ως **εδαφοβελτιωτικό** χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Εφαρμογές

- Αποτελεί μορφή σταθεροποίησης των βιοστερεών, η οποία όμως απαιτεί ειδικές συνθήκες υγρασίας και αερισμού, ούτως ώστε να εξασφαλιστούν **θερμοφιλικές θερμοκρασίες**.
- Ακόμη αποτελεί μέθοδο επεξεργασίας του **ζυμώσιμου κλάσματος των απορριμμάτων** (υπολείμματα τροφών, χαρτί) καθώς και **γεωργικών στερεών αποβλήτων**

Η **καταλληλότητα** ενός υλικού (υποστρώματος) για βιοσταθεροποίηση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τρεις παραμέτρους:

(α) την **υγρασία**

(δεν πρέπει να υπερβαίνει το 60%)

(β) το **ζυμώσιμο κλάσμα**

(πρέπει να υπερβαίνει το 50% του στερεού μέρους)

(γ) τον λόγο **C/N**

(δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50/1)

Τύποι αερόβιας βιοσταθεροποίησης

- (α) το σύστημα σειραδίων (windrows),
- (β) το σύστημα του αεριζόμενου στατικού σωρού (static aeration piles) και
- (γ) κλειστοί βιοαντιδραστήρες

Το σύστημα σειραδίων

- συνίσταται στην τοποθέτηση σε παράλληλους **σωρούς** τριγωνικής, τραπεζοειδούς ή ορθογώνιας διατομής, οι οποίοι **αναδεύονται** σε τακτά διαστήματα με μηχανικό τρόπο για επίτευξη επαρκούς αερισμού και ομοιογένειας στον σωρό.
- συχνά προστίθεται **ανακυκλοφορούμενο** προϊόν της βιοσταθεροποίησης ή/ και κάποιοι **προσθετικοί παράγοντες** για αύξηση των αερόκενων και βελτίωση της σύστασης του υποστρώματος όσον αφορά την υγρασία, τα οργανικά και τα άλλα θρεπτικά καθώς και τους μικροοργανισμούς που είναι υπεύθυνοι για την βιοσταθεροποίηση.

Το σύστημα σειραδίων





Σύστημα Αναστρεφόμενων Σειράδων με Αυτοκινούμενο Αναστροφέα

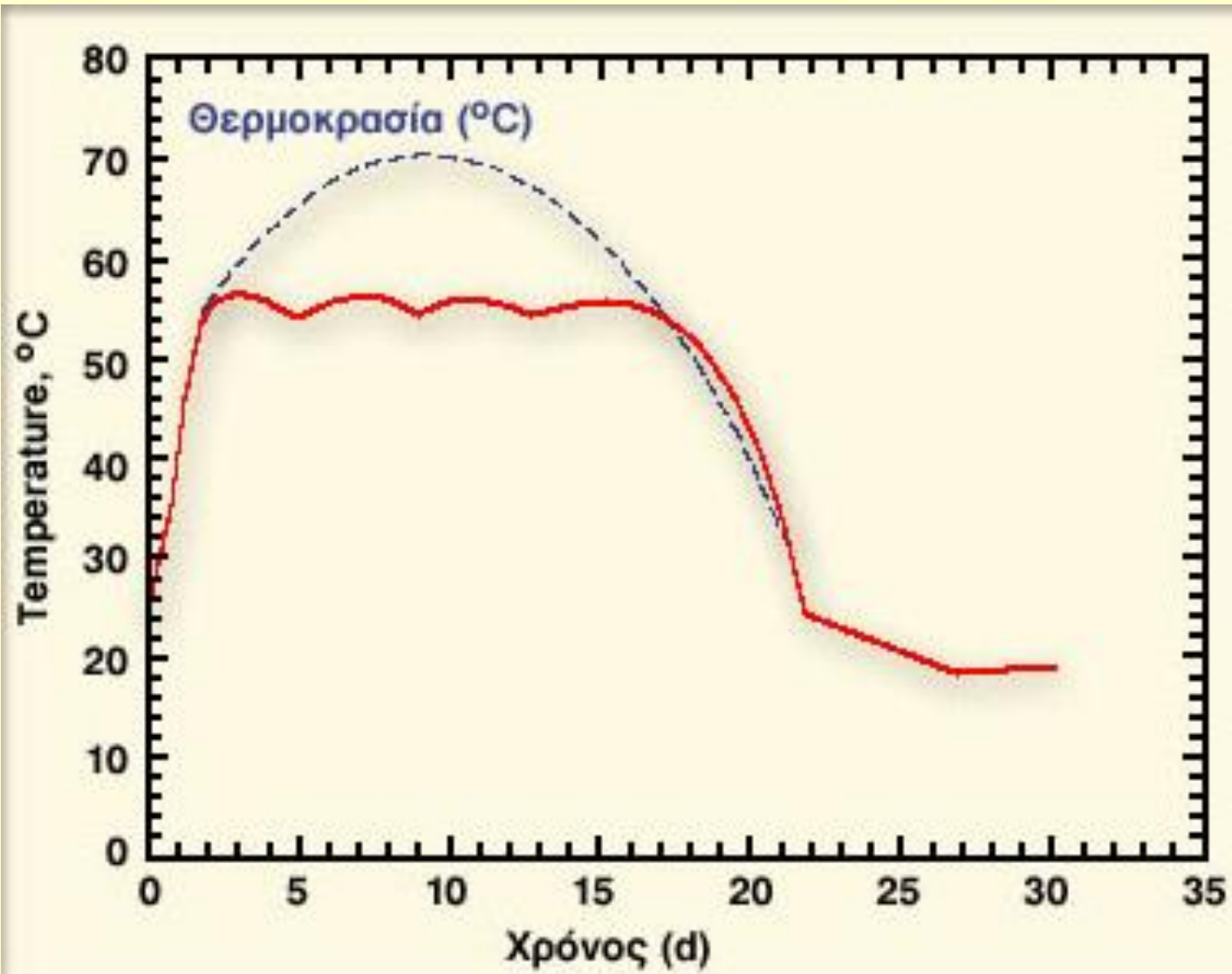
Τελικό προϊόν (compost) από μονάδα βιοσταθεροποίησης



Το σύστημα σειραδίων

- Επίσης μπορεί να προστεθεί και οργανικό ή ανόργανο **διογκωτικό** υλικό (όπως μικρά τεμάχια ξύλου) με σκοπό την παροχή δομικής στήριξης και την αύξηση του πορώδους του προς βιοσταθεροποίηση μείγματος.
- Οι σωροί μπορεί να **αερίζονται** πρόσθετα από φυσητήρες, προκειμένου να εξασφαλιστεί επαρκής παροχή οξυγόνου, ρύθμιση της θερμοκρασίας και να απομακρυνθεί η πρόσθετη υγρασία.
- Τα παραγόμενα υγρά **παροχτεύονται** με κατάλληλες σωληνώσεις.
- Η βιοσταθεροποίηση (μεσοφιλικό, θερμοφιλικό στάδιο και στάδιο ψύξης) διαρκεί περί τις 20 μέρες και ακολουθεί στάδιο **ωρίμανσης** (όπου οξειδώνονται τα διάφορα οργανικά οξέα που παρήχθησαν στο πρώτο στάδιο και βελτιώνεται η τελική σύσταση) 30 περίπου ημερών.

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την βιοσταθεροποίηση.
(η διακεκομμένη γραμμή αφορά την περίπτωση αερισμού με φυσητήρες,
ενώ η συνεχής την περίπτωση αερισμού με ανάδευση)



Οι βασικές **λειτουργικές παράμετροι** που μπορούν να ρυθμιστούν είναι:

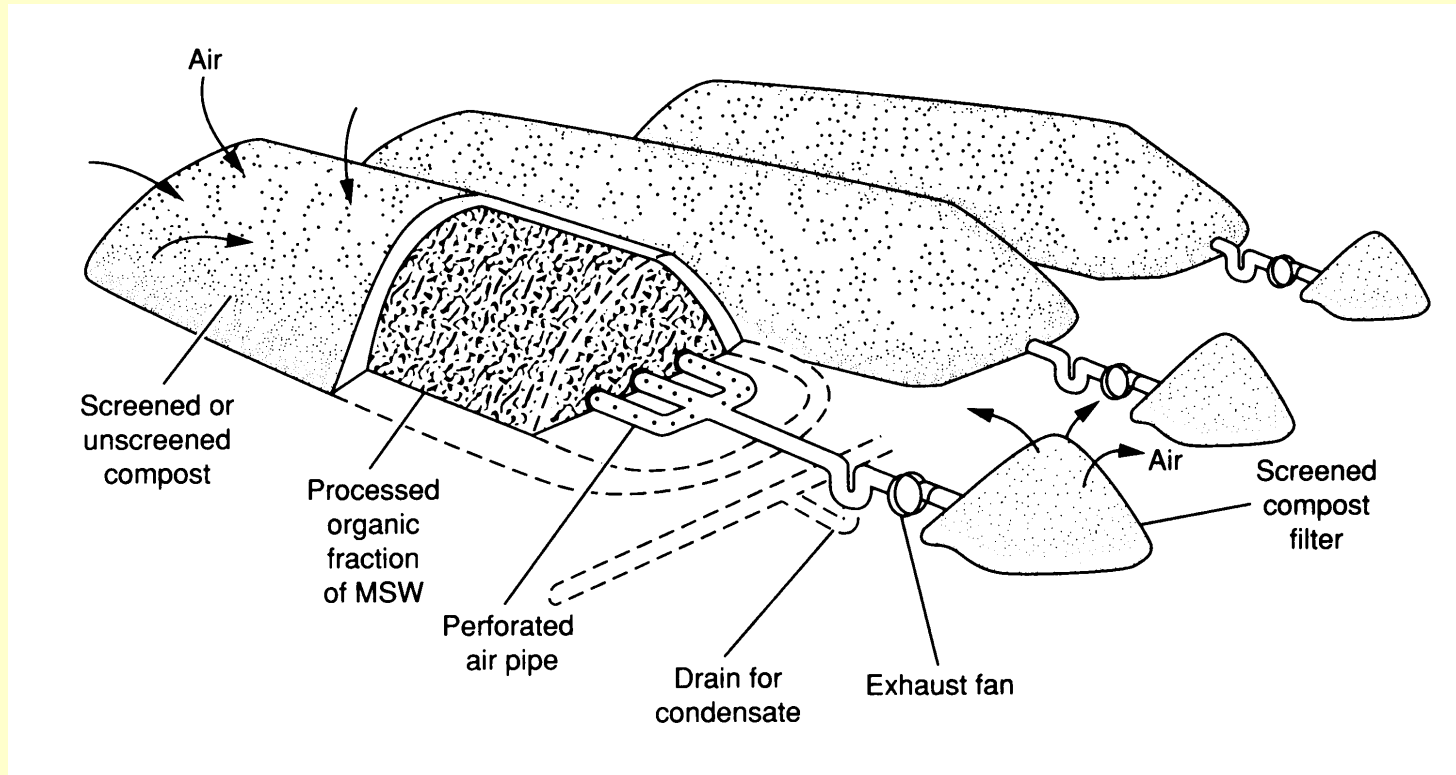
- η σχετική πρόσμιξη πρόσθετων ή προϊόντος ή διογκωτικού υλικού δομής (π.χ. πριονίδι),
- η παροχή αέρα (εφόσον παρέχεται πρόσθετος αερισμός),
- οι χρόνοι παραμονής σε κάθε στάδιο και
- η συχνότητα ανάδευσης.

Ο **αερισμός** κατά την βιοσταθεροποίηση εξυπηρετεί δύο κυρίως σκοπούς:

- την παροχή επαρκούς οξυγόνου για τη βιολογική οξείδωση,
- τη ξήρανση του προς βιοσταθεροποίηση μείγματος.

Η **ενέργεια** η οποία απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας κατά την βιοσταθεροποίηση και για την εξάτμιση της υγρασίας, παράγεται από την απελευθερούμενη ενέργεια κατά την βιοαποδόμηση.

Σύστημα αεριζόμενου στατικού σωρού



Το σύστημα του αεριζόμενου στατικού σωρού διαφέρει από το σύστημα σειραδίων:

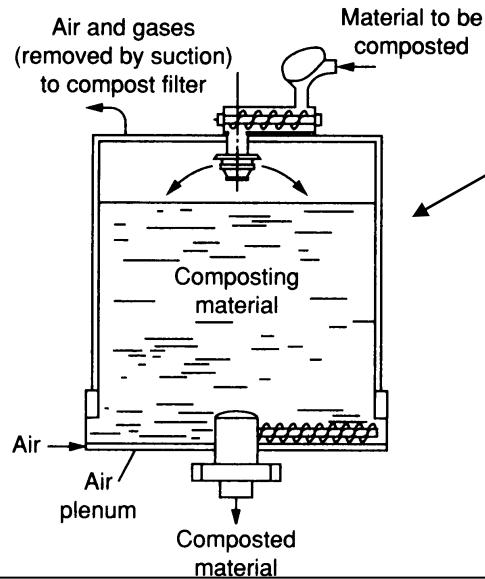
- δεν υπάρχει ανάδευση
- ο αερισμός επιτυγχάνεται με συνεχή παροχή αέρα
- δεν χρησιμοποιείται ανακυκλοφορία προϊόντος (κομπόστ)

Σύστημα αεριζόμενου στατικού σωρού

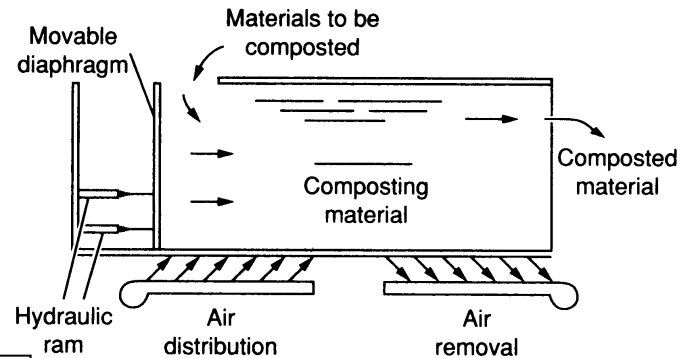


Κλειστοί βιοαντιδραστήρες

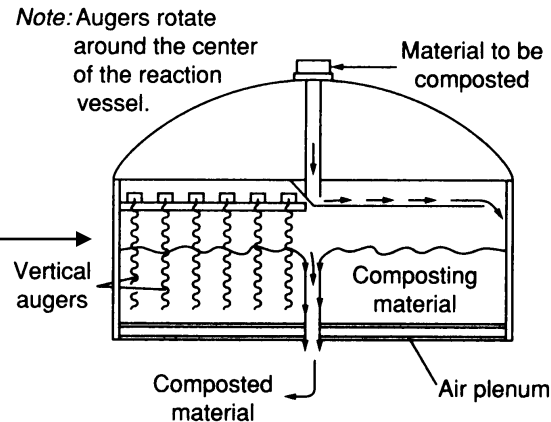
Κινούμενη αναδευόμενη κλίνη



Κινούμενη στερεά κλίνη

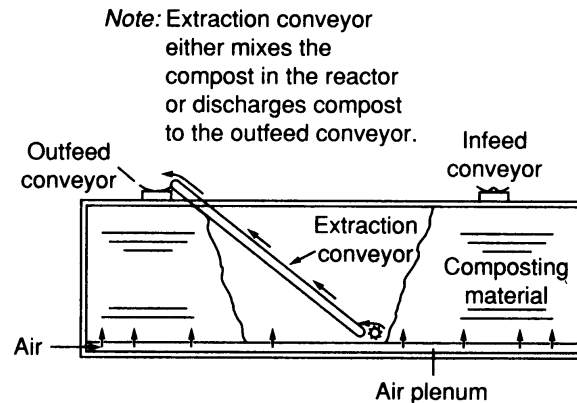


Περιστρεφόμενο τύμπανο



(c)

Αναδευόμενη στερεά κλίνη



(d)

Σύστημα Κομποστοποίησης σε δεξαμενές μέσα σε κλειστό κτίριο



Τράπεζα Κομποστοποίησης (ενιαίο κλειστό κτίριο)
(χρησιμοποιείται για τη φάση της ωρίμανσης με χρόνο παραμονής 3-5 εβδομάδες)



Σύστημα Κομποστοποίησης σε κλειστό Περιστρεφόμενο Κύλινδρο (χρόνος παραμονής 3 ημέρες)



Κριτήρια επιλογής συστήματος κομποστοποίησης

	Σειράδια	Αεριζόμενος Σωρός	Αντιδραστήρας
Κεφάλαιο Εγκατάστασης	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό
Λειτουργικό Κόστος	Χαμηλό	Υψηλό	Χαμηλό
Απαιτήσεις γης	Υψηλές	Υψηλές	Χαμηλές
Ρύθμιση Αερισμού	Περιορισμένη	Πλήρης	Πλήρης
Ελεγχόμενες Παράμετροι	Συχνότητα ανάδευσης, Πρόσθετα ή προϊόν, αερισμός	Παροχή αέρα, παράγων δομής	Παροχή αέρα, ανάδευση, πρόσθετα ή προϊόν
Ευαισθησία στον καιρό	Ευαίσθητο εκτός εάν στεγάζεται σε υπόστεγο	Μη ευαίσθητο	Μη ευαίσθητο
Έλεγχος οσμών	Εξαρτάται από την τροφοδοσία	Εξαρτάται από την τροφοδοσία	Καλός

Παράγοντες που επηρεάζουν την Κομποστοποίηση

- η διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων
- η σχέση άνθρακα/αζώτου (C/N)
- το pH
- το ποσοστό υγρασίας
- η θερμοκρασία
- ο αερισμός
- η παρουσία τοξικών ουσιών

Σχέση Ανθρακα/ Αζώτου (C/N)

- Για την αποτελεσματική εφαρμογή της διεργασίας της κομποστοποίησης ο λόγος C/N πρέπει να είναι περίπου 30:1
- έχουν αναφερθεί και ιδανικές αναλογίες κοντά στο 15:1

pH

- από αυτό εξαρτάται το είδος των μικροοργανισμών που θα αναπτυχθούν
- τα βακτήρια δραστηριοποιούνται σε ουδέτερο ή αλκαλικό περιβάλλον υπό αερόβιες συνθήκες (γέννη Bacillus, Achromobacter, Cellulomonas κ.α) και υπό αναερόβιες (γέννη Clostridium κ.α)
- Αντίθετα, σε $\text{pH} < 5,5$ η διάσπαση των κυτταρινών, ημικυτταρινών κλπ γίνεται κυρίως από μύκητες και ακτινομύκητες (γέννη Aspergillus, Fusarium, Curricularia, Trichoderma κ.α).
- Τα συνήθη υλικά που οδηγούνται στην κομποστοποίηση παρουσιάζουν γενικά χαμηλό pH, ενώ για την βελτιστοποίηση της διεργασίας το pH πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6,0 και 7,5.
- Η ιλύς των αστικών λυμάτων έχει pH που κυμαίνεται μεταξύ 6,9 και 8,1.

Υγρασία

- Όταν η υγρασία είναι σχετικά υψηλή, ο αερισμός δεν είναι αποτελεσματικός με αποτέλεσμα να επιβραδύνονται ή και να αναστέλλονται οι αερόβιες διαδικασίες, δίνοντας τη θέση τους σε αναερόβιες οι οποίες είναι ανεπιθύμητες.
- Βασικό κριτήριο που πρέπει να τηρείται είναι ο **λόγος Λ του νερού προς τα βιοαποδομήσιμα οργανικά να είναι μικρότερος από 10**.
- Χαμηλό ποσοστό υγρασίας οδηγεί επίσης σε επιβράδυνση ή αναστολή των βιολογικών διεργασιών
- τα προς κομποστοποίηση υλικά θα πρέπει να περιέχουν το κατάλληλο ποσοστό υγρασίας
- Το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για τη διεργασία της κομποστοποίησης κυμαίνεται μεταξύ **45-55 %**.

Βελτίωση Υγρασίας

- Το οργανικό κλάσμα (αφαιρουμένων του γυαλιού, των πλαστικών και των μετάλλων) στην Ελλάδα είναι αρκετά υψηλό.
- Η επάρκεια υγρασίας στο προς βιοσταθεροποίηση μείγμα είναι απαραίτητη, προκειμένου να διασφαλιστεί επαρκής ρυθμός βιολογικής οξείδωσης.
- Η υγρασία στα στερεά απορρίμματα μπορεί να αυξηθεί με προσθήκη λάσπης από βιολογικό καθαρισμό (υγρασία 70-75%).
- Στο διαχωριζόμενο οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων στην Ελλάδα, η υγρασία αντίθετα είναι αρκετά υψηλή (της τάξης του 70%) και απαιτείται προς τούτο μείωσή της στο μείγμα τροφοδοσίας με προσθήκη χαρτιού, πριονιδιού ή ανακυκλοφορία προϊόντος.

Θερμοκρασία

- Η σημαντικότερη παράμετρος για τη διεργασία της κομποστοποίησης.
- Η μικροβιακή δραστηριότητα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία πολλές φορές ξεπερνά τους 70 °C, οπότε γίνεται ανεπιθύμητη, μια και **μπορεί να αναστείλει** τη μικροβιακή δραστηριότητα και λαμβάνονται μέτρα για την μείωση της (ύγρανση των υλικών, βελτίωση του αερισμού, ανάδευση του κ.λ.π).
- Μία θερμοκρασία γύρω στους 55-65 °C είναι επιθυμητή για ένα χρονικό διάστημα επειδή οδηγεί σε μερική αποστείρωση του υλικού. Σ'αυτή τη θερμοκρασιακή περιοχή, καταστρέφονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί.
- Κατά την εξέλιξη της διεργασίας, η βέλτιστη θερμοκρασία κομποστοποίησης βρίσκεται στη μεσόφιλη περιοχή, δηλαδή ανάμεσα στους 35-45°C, ενώ αν πέσει κάτω από 20°C, η αποδόμηση επιβραδύνεται.

Αερισμός

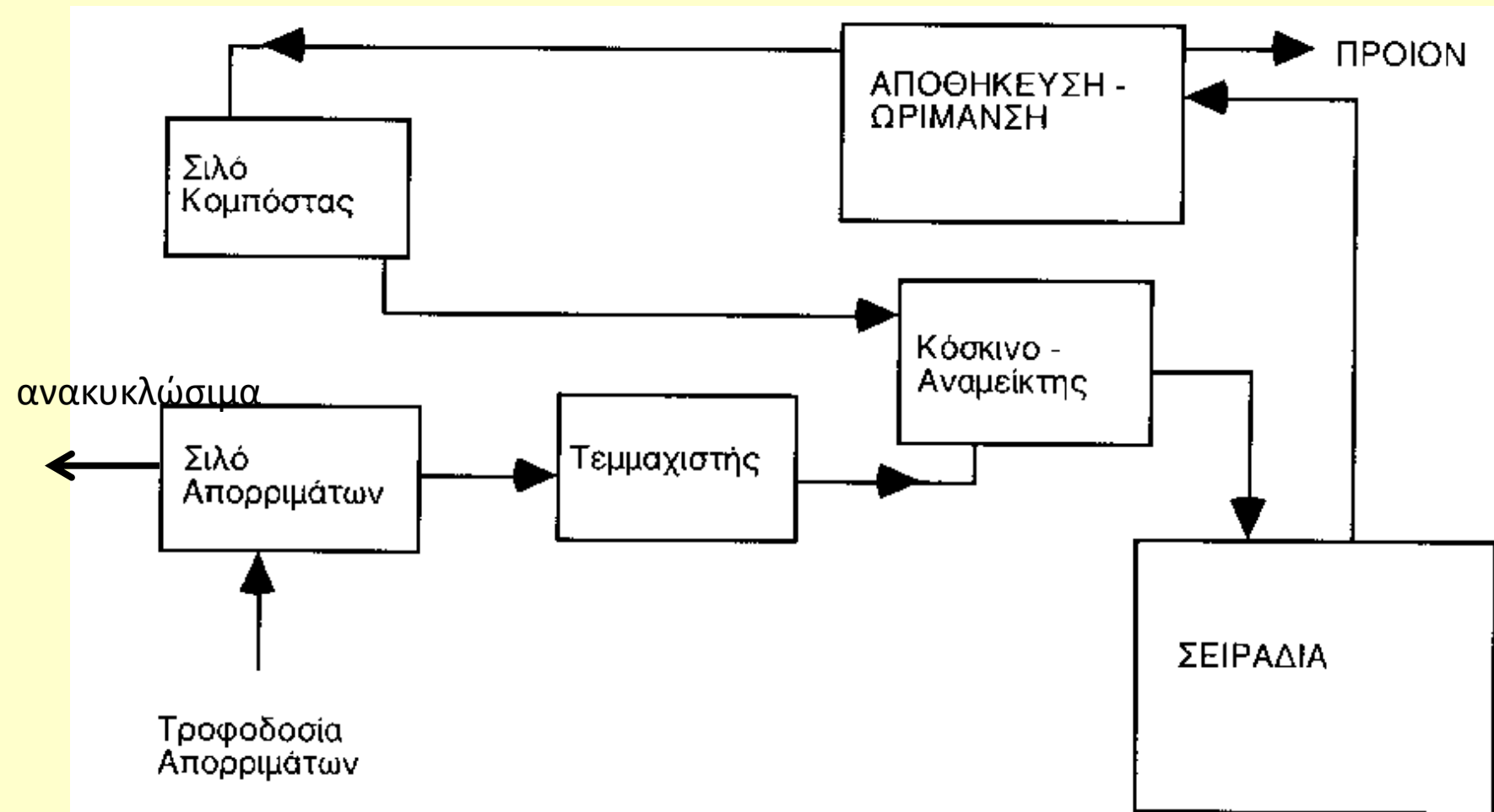
- Πρέπει να εξασφαλίζεται στους οργανισμούς το απαραίτητο οξυγόνο.
- Τα σειράδια δεν πρέπει να ξεπερνούν σε πλάτος τα 1,5-2 μέτρα και ύψος τα 1,3-1,5 μέτρα, ενώ το μήκος τους καθορίζεται από την ποσότητα του προς κομποστοποίηση υλικού.
- Για κλειστά συστήματα η υγρασία, η θερμοκρασία και ο αερισμός ρυθμίζονται κατά περίπτωση.

- Ο **ελεύθερος αέριος χώρος** (free air-space FAS) ορίζεται ως **το κλάσμα του όγκου του μείγματος που καταλαμβάνεται από αέριο**. Είναι σημαντικός δείκτης της επάρκειας αερόβιων συνθηκών για το προς κομποστοποίηση μείγμα
- Η **μεταφορά οξυγόνου** στα συστήματα σειραδίων γίνεται κυρίως λόγω διαφοράς πυκνότητας του αέρα στους πόρους από την εξωτερική και όχι λόγω διάχυσης του οξυγόνου.
- Για μέση διάμετρο σωματιδίων 2,5-5cm και υγρασία 40-60%, **μία ανάδευση κάθε 3 μέρες** επαρκεί για να διασφαλιστεί επαρκής φυσικός αερισμός.
- Για μικρότερα σωματίδια ή/και κλάσμα ελεύθερου αέριου χώρου, ο φυσικός αερισμός που προκύπτει από την ανάδευση και μόνο δεν επαρκεί.

Τρία βασικά στάδια:

- (α) Προεπεξεργασία – με στόχο την προετοιμασία των στερεών απορριμμάτων για την κυρίως επεξεργασία
- (β) Κομποστοποίηση
- (γ) Βελτίωση προϊόντος (ωρίμανση)

Διάγραμμα ροής μονάδας κομποστοποίησης



Άσκηση

Σχεδιάστε μονάδα κομποστοποίησης για απορρίμματα μαζικής παροχής **2000 kg/d** με μέση υγρασία **55%** και ζυμώσιμα (πτητικά στερεά) **78,50%** του ξηρού.

Η εγκατάσταση θα περιλαμβάνει τεμαχισμό και ανάμειξη με τελικό προϊόν για τη ρύθμιση της υγρασίας τροφοδοσίας **στο 50%**.

Το τελικό προϊόν θα έχει υγρασία **30%**.

Να προσδιορισθούν:

- η ποσότητα προϊόντος που απαιτείται να ανακυκλοφορείται
- ο ελεύθερος αέριος χώρος (για την εξασφάλιση επάρκειας αερόβιων συνθηκών)
- οι απαιτήσεις σε αερισμό
- η ενεργειακή αυτοδυναμία της μονάδας, για επιθυμητή θερμοκρασία κομποστοποίησης τους 60°C
- ο λόγος Λ του νερού προς τα αποδομήσιμα οργανικά και να ελεγχθεί αν είναι μικρότερος από 10
- ο συνολικός όγκος των σειραδίων
- ενδεικτική διάταξη χώρου

Δεδομένα:

1. η κομποστοποίηση θα διεξάγεται σε σειράδια, με χρόνο παραμονής **18** ημέρες. Η ωρίμανση θα διαρκεί περί τους 3 μήνες.
2. ειδικά βάρη: ζυμώσιμων στερεών $\gamma_v = 1$, μη ζυμώσιμων $\gamma_{nv} = 2,5$
3. εμπειρικός τύπος ζυμώσιμου κλάσματος απορριμμάτων $C_{16}H_{27}O_8N$
4. αποδόμηση ζυμώσιμων κατά την κομποστοποίηση **50%**
5. πυκνότητα προϊόντος **$0,65 \text{ g/cm}^3$**
6. θερμοχωρητικότητα αέρα και στερεών $c_p = 0,25 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$
7. ειδική θερμότητα εξάτμισης νερού $q_v = 540 \text{ cal/g}$
8. θερμοκρασία περιβάλλοντος **20°C**
9. $\Delta H_{\text{βιολ.οξειδ.}} = 5.500 \text{ cal/g}_{\text{οργαν.}}$
10. Η υγρασία που προσλαμβάνει ο ξηρός αέρας είναι **$0,137 \text{ g H}_2\text{O/g}$ αέρα**

1. Βελτίωση υγρασίας του προς κομποστοποίηση μείγματος

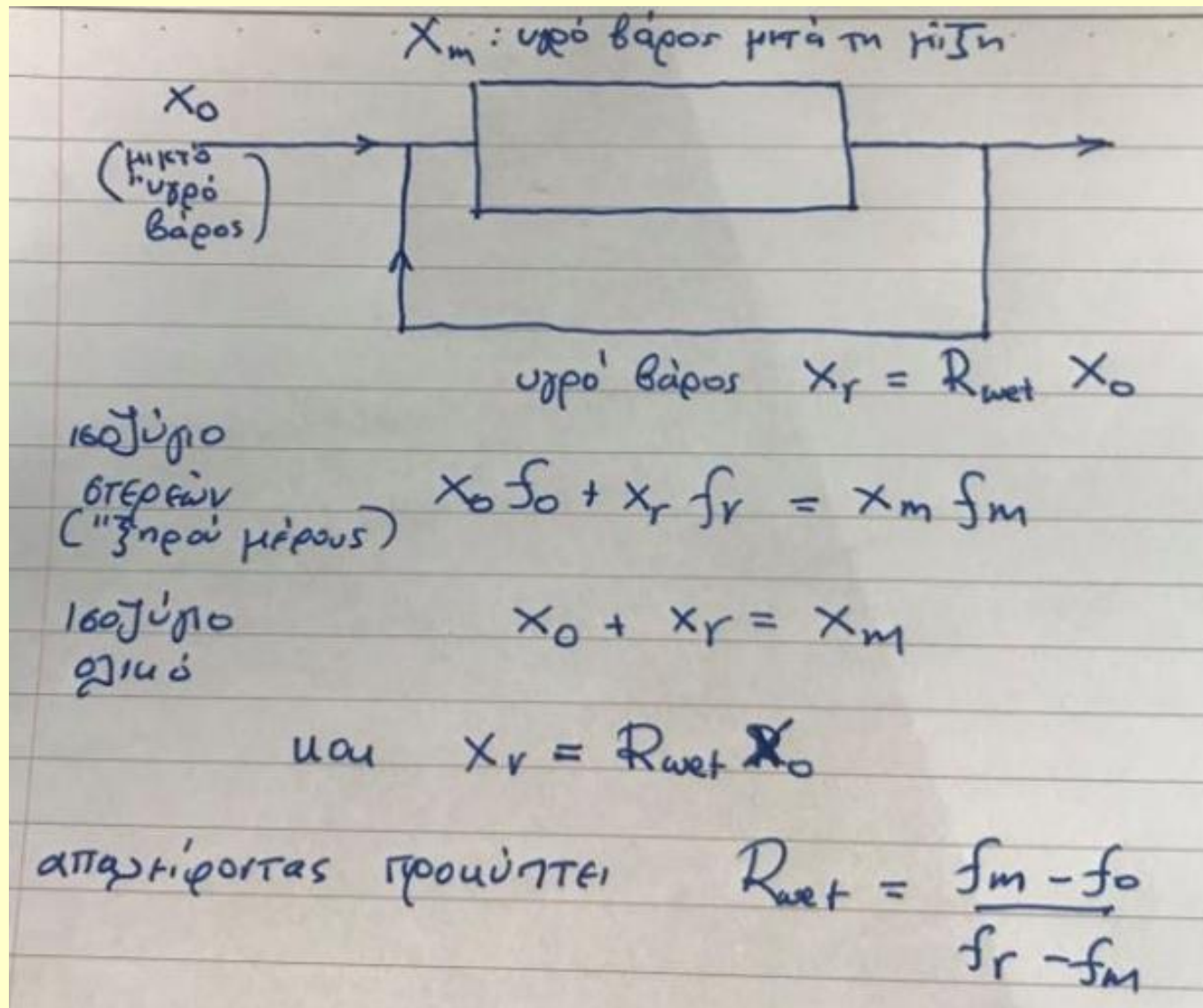
Η υγρασία στο ζυμώσιμο μέρος των στερεών απορριμμάτων (55%) κρίνεται επαρκής ούτως ώστε να μην απαιτείται προσθήκη λάσπης από βιολογικό καθαρισμό.

Αντίθετα κρίνεται επιθυμητή η χρήση ανακυκλοφορούμενου τελικού προϊόντος (κομπόστ) υγρασίας 30% προκειμένου να μειωθεί η υγρασία του μείγματος σε 50%.

Εναλλακτικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πρόσθετα όπως πριονίδια ή κάποιο διογκωτικό υλικό (τεμάχια ξύλου).

Μια και η υγρασία είναι αρκετά κοντά στην τελική επιθυμητή κρίνεται οικονομικότερη η **απλή προσθήκη ανακυκλοφορούμενου προϊόντος.**

Ο λόγος του υγρού βάρους στην ανακυκλοφορία προς το υγρό βάρος στην τροφοδοσία



Ο λόγος του υγρού βάρους στην ανακυκλοφορία προς το υγρό βάρος στην τροφοδοσία R_w είναι:

$$R_{wet} = \frac{f_m - f_0}{f_r - f_m}$$

όπου:

$f_m=0,5$ (επιθυμητό κλάσμα στερεών μείγματος)

$f_0=0,45$ (κλάσμα στερεών τροφοδοσίας)

$f_r=0,7$ (κλάσμα στερεών ανακυκλοφορούμενου προϊόντος)

άρα $R_{wet}=0,25$.

Επομένως απαιτείται επαναφορά (ανακυκλοφορία) τελικού προϊόντος κατά 25% της τροφοδοσίας.

Ο λόγος R_{dry} ξηρού βάρους στην ανακυκλοφορία προς το ξηρό βάρος στην τροφοδοσία

Τώρα

$$R_{dry} = \frac{R_{wet} \times f_r}{x_o f_o} = \frac{f_m - f_o}{f_r - f_m} \cdot \frac{f_r}{f_o} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow R_{dry} = \frac{f_m/f_o - 1}{1 - f_m/f_r}$$

Ο λόγος R_{dry} ξηρού βάρους στην ανακυκλοφορία προς το ξηρό βάρος στην τροφοδοσία δίνεται από την σχέση:

$$R_{\text{dry}} = \frac{\frac{f_m}{f_0} - 1}{1 - \frac{f_m}{f_r}}$$

όπου:

$f_m=0,5$ (επιθυμητό κλάσμα στερεών μείγματος)

$f_0=0,45$ (κλάσμα στερεών τροφοδοσίας)

$f_r=0,7$ (κλάσμα στερεών ανακυκλοφορούμενου προϊόντος)

Εφαρμόζοντας την σχέση προκύπτει $R_{\text{dry}}=0,39$

Το πτητικό κλάσμα του μείγματος δίδεται από την σχέση:

$$f_{vm} = \frac{f_{v0} + f_{vr} R_d}{1 + R_d}$$

Αποδόμηση κατά 50% των πτητικών συνεπάγεται ότι για κάθε 1 g στερεών στην τροφοδοσία παράγονται 0,6075 g στερεών στο προϊόν, το οποίο περιέχει 0,3925 g πτητικών στερεών.

1 g στερεών έχει 0,785 πτητικά, τα μισά (0,3925) μετατρέπονται και άρα το βάρος που μένει είναι $1 - 0,3925 = \mathbf{0,6075}$.

Άρα το κλάσμα των πτητικών στερεών του προϊόντος f_{vr} είναι $\mathbf{0,3925/0,6075 = 0,65}$.

Με $f_{v0}=0,785$, $f_{vr}=0,65$ και $R_d=0,39$, προκύπτει ότι το πτητικό κλάσμα του μείγματος είναι $\mathbf{f_{vm}=0,75}$.

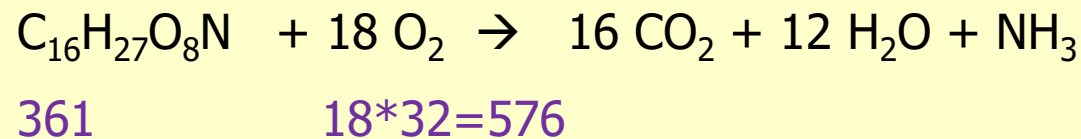
2. Απαιτήσεις αερισμού

Ο αερισμός κατά την κομποστοποίηση εξυπηρετεί δύο κυρίως σκοπούς:

- την παροχή επαρκούς οξυγόνου για την βιολογική οξείδωση
- την ξήρανση του προς λιπασματοποίηση μείγματος.

2.1. Εκτίμηση απαιτήσεων αερισμού για βιολογική οξείδωση

Θεωρώντας ως μέσο εμπειρικό τύπο για την σύσταση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων τον $C_{16}H_{27}O_8N$, έχουμε την ακόλουθη στοιχειομετρία:



Προκύπτει λοιπόν ότι απαιτούνται $576/361=1,60$ g οξυγόνου ανά g αποδομούμενου οργανικού μέρους.

Με βιοαποδόμηση 50% του πτητικού κλάσματος 0,785, προκύπτει ότι απαιτούνται περί τα 0,62 g ($0,5*0,785*1,6$) οξυγόνου (ή 2,7 g αέρα) ανά g στερεού των απορριμμάτων.

Με 2000 kg/d και $f_0=0,45$, η απαίτηση σε αέρα για τη βιολογική οξείδωση υπολογίζεται σε $0,45 \times 2.000 \times 2,7 = 2.430$ κιλά ημερησίως.

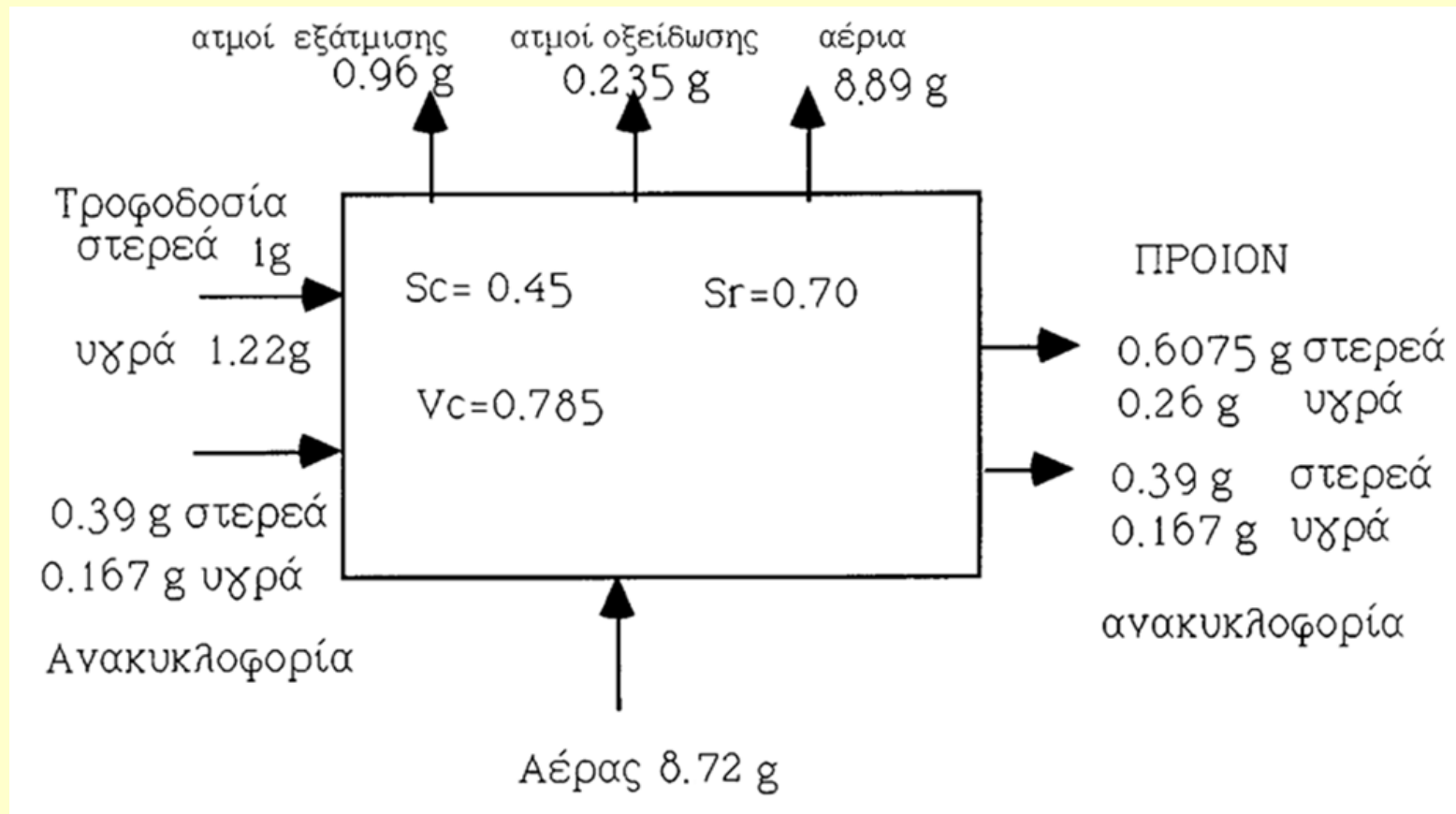
2.2. Εκτίμηση απαιτήσεων αερισμού για απομάκρυνση υγρασίας

- Για 1 g στερεών τροφοδοσίας έχουμε $1 \times 0,55 / 0,45 = 1,22$ g νερού.
- Από την αντίδραση προκύπτει ότι ανά g στερεού απορριμμάτων παράγονται $12 \times 18 / 361 = 0,235$ g νερού.
- Η υγρασία που θα περιέχει το προϊόν θα είναι 30%, άρα τα 0,6075 g των στερεών στο προϊόν θα συνοδεύονται από $0,6075 \times 0,3 / 0,7 = 0,26$ g νερού.
- Άρα ανά g στερεού τροφοδοσίας πρέπει να απομακρυνθούν $1,22 + 0,235 - 0,26 = 1,195$ g νερού.
- Για 2.000 kg/d και $f_0 = 0,45$, έχουμε $\Delta H_2O = 2000 \times 0,45 \times 1,195 = 1076$ kg/d.
- Μια και η υγρασία που προσλαμβάνει ο ξηρός αέρας είναι 0,137 g H₂O/g αέρα, η απαίτηση σε αέρα είναι $1,195 / 0,137 = 8,72$ g ξηρού αέρα/g ξηρού βάρους στην τροφοδοσία ή $900 \times 8,72 = 7.848$ κιλά αέρα ημερησίως, σαφώς περισσότερος (υπερτριπλάσιος) από τον απαιτούμενο για βιολογική οξείδωση.
- Ο λόγος των δύο απαιτήσεων είναι αρκετά μικρός σε σχέση με τον παρατηρούμενο για κομποστοποίηση λάσπης που προέρχεται από βιολογικό καθαρισμό (10-30).
- Αυτό οφείλεται στην αρκετά μεγάλη συγκέντρωση στερεών (45%) στην τροφοδοσία.

3. Ισοζύγιο μάζας

- Λόγω της αποδόμησης των στερεών (50% του πτητικού μέρους) περί τα 0,6075 g στερεού υπολείπονται στο προϊόν.
- Από την στοιχειομετρική εξίσωση εξάγουμε το συμπέρασμα ότι με πτητικότητα 0,785 και ποσοστό βιοαποδομήσιμων 50%, παράγονται 0,235 g H_2O και 0,78 g λοιπών αερίων (CO_2 και NH_3) ενώ καταναλώνονται 0,62 g οξυγόνου.
- Παρέχοντας 8,72 g ξηρού αέρα στην αέρια φάση (σε 60°C) διαφεύγουν
 - $8,72 - 0,62 + 0,78 = 8,89$ g αερίων
 - 0,235 g υδρατμών που προέρχονται από βιολογική οξείδωση, και
 - 0,96 g υγρασίας λόγω εξάτμισης (προκειμένου να παραχθεί προϊόν με υγρασία 30%).

Ισοζύγιο μάζας



4. Προσδιορισμός του ελεύθερου αέριου χώρου

- Στο τελικό προϊόν η πυκνότητα θα είναι $\rho_r=0,65 \text{ ton/m}^3$
- Άρα 1 ton προϊόντος καταλαμβάνει $1/0,650=1,538\text{m}^3$
- 1 ton προϊόντος περιέχει
 - ✓ 0,3 ton νερό
 - ✓ $0,7 \times 0,65 = 0,455\text{ton}$ βιοαποδομήσιμα και
 - ✓ $0,7 \times 0,35 = 0,245\text{ton}$ μη βιοαποδομήσιμα
- Άρα εξαιρουμένου του αέρα, θα καταλαμβάνει όγκο:
 $0,3/1 + 0,455/1 + 0,245/2,5 = 0,853 \text{ m}^3$
- Άρα ο αέρας θα καταλαμβάνει $1,538 - 0,853 = 0,685\text{m}^3$ ή ποσοστό $(0,685/1,538) \times 100 = 44\%$ ελεύθερο αέριο χώρο

Αρχικά

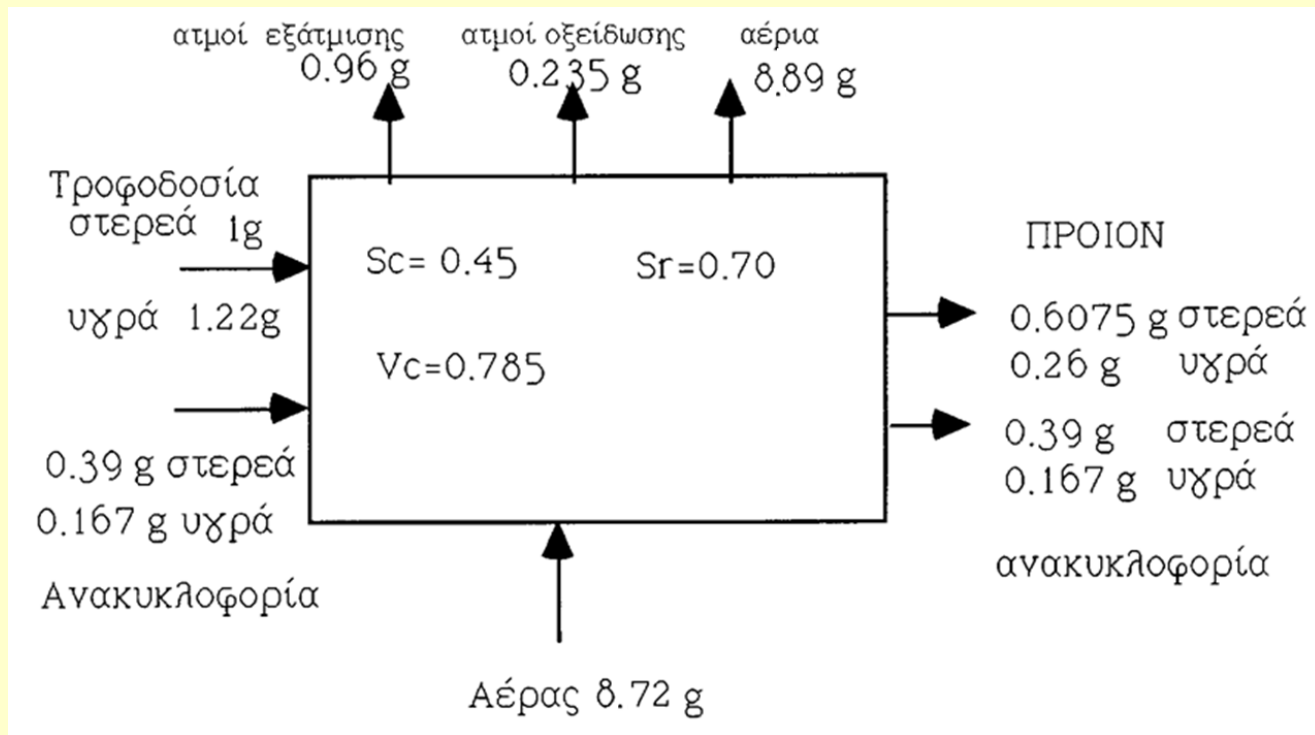
- 1 ton απορρίμματος έχει:
 - ✓ 0,55 ton νερό,
 - ✓ $0,45 \times 0,785 = 0,35$ ton βιοαποδομήσιμα και
 - ✓ $0,45 \times 0,215 = 0,10$ ton μη βιοαποδομήσιμα
- Αν υποθέσουμε ότι δεν έχει καθόλου ελεύθερο αέριο όγκο θα καταλαμβάνει $0,55/1 + 0,35/1 + 0,10/2,5 = 0,94 \text{ m}^3$
- Στο 1 ton προσθέτουμε 0,25 ton προϊόντος που καταλαμβάνει $1,538 \times 0,25 = 0,39 \text{ m}^3$, από το οποίο ο αέρας είναι $0,44 \times 0,39 = 0,17 \text{ m}^3$.
- Άρα συνολικά 1,25 ton μίγματος έχει ολικό όγκο $0,94 + 0,39 = 1,33 \text{ m}^3$ από τα οποία αέρας είναι $0,17 \text{ m}^3$ ή ποσοστό $0,17/1,33 \times 100 = 12,8\%$ το οποίο κρίνεται ικανοποιητικό
- Στην πορεία αυξάνεται και τελικά γίνεται **44%**.

5. Επάρκεια ενέργειας

Η ενέργεια η οποία απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας κατά την κομποστοποίηση και για την εξάτμιση της υγρασίας, παράγεται από την **απελευθερούμενη ενέργεια** κατά την βιοαποδόμηση.

Το αιτούμενο είναι εάν και κατά πόσο η απελευθερούμενη ενέργεια επαρκεί για την ανύψωση της θερμοκρασίας στους 60°C και για την επίτευξη υγρασίας 30% στο τελικό προϊόν.

Για να εκτιμηθεί αυτό, πρέπει να θεωρήσουμε την απαίτηση για ενέργεια 1 g στερεού στην τροφοδοσία.



Οι ενεργειακές απαιτήσεις τότε είναι (μέγιστες απαιτήσεις):

ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ: $q_s = mc_p \Delta T = 1,39 \text{ g} \times 0,25 \text{ cal/g}^\circ\text{C} \times (60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 13,9 \text{ cal}$
 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ: $q_w = (1,22 + 0,167) \times 1 \times 40 = 55,48 \text{ cal}$
 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΑΕΡΑ $q_a = 8,89 \times 0,25 \times 40 = 88,9 \text{ cal}$
 ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ: $q_v = 540 \text{ cal/g} \times 1,195 = 645,3 \text{ cal}$

ΣΥΝΟΛΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ: 803,6 cal

Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος απαιτείται για την εξάτμιση της υγρασίας.

Η απελευθερούμενη ενέργεια από την βιολογική οξείδωση θα είναι $5.500 \text{ cal/g} \times 0,785 \times 0,5 = 2.158,75 \text{ cal}$, και επομένως είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την απαιτούμενη.

Άρα η παραγόμενη ενέργεια σίγουρα επαρκεί για την ανύψωση της θερμοκρασίας και την απαιτούμενη εξάτμιση της υγρασίας.

Άρα δεν θα υπάρξει πρόβλημα επίτευξης των υψηλών θερμοκρασιών. Είναι δύσκολο να εκτιμηθούν οι απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον.

Πρόσθετος αερισμός μπορεί να απαιτηθεί για ρύθμιση της θερμοκρασίας σε ανεκτά επίπεδα ($<70^{\circ}\text{C}$).

Λόγος νερού προς βιοαποδομήσιμα

Από τις τιμές στο σχήμα ο λόγος νερού προς βιοαποδομήσιμα οργανικά στο μίγμα προς κομποστοποίηση:

$$\Lambda = \frac{1,22 + 0,167}{0,780 + 0,25 \cdot 0,65} = 1,5$$

άρα ικανοποιητικός.

Χρόνοι Παραμονής- Διάταξη σειραδίων

Ο ενδεικνυόμενος χρόνος παραμονής στο στάδιο της κομποστοποίησης είναι έως 20 ημέρες.

Με 2000 kg/d παροχή και 25% ανακυκλοφορία η συνολική παροχή θα είναι 2500 kg/d.

Με 18 ημέρες χρόνο παραμονής αυτό συνεπάγεται συνολικό βάρος 45.000 kg στο σειράδι.

Με μέσο ειδικό βάρος $(1,33/1,25+0,65)/2=0,86$ kg/l, υπολογίζουμε συνολικό όγκο περί τα 52 m³.

Θα έχουμε έξη σειράδια όγκου περίπου 9 m³ έκαστο.

Επίσης πρέπει να μεσολαβεί χώρος 3 μέτρων ανάμεσα στα σειράδια.

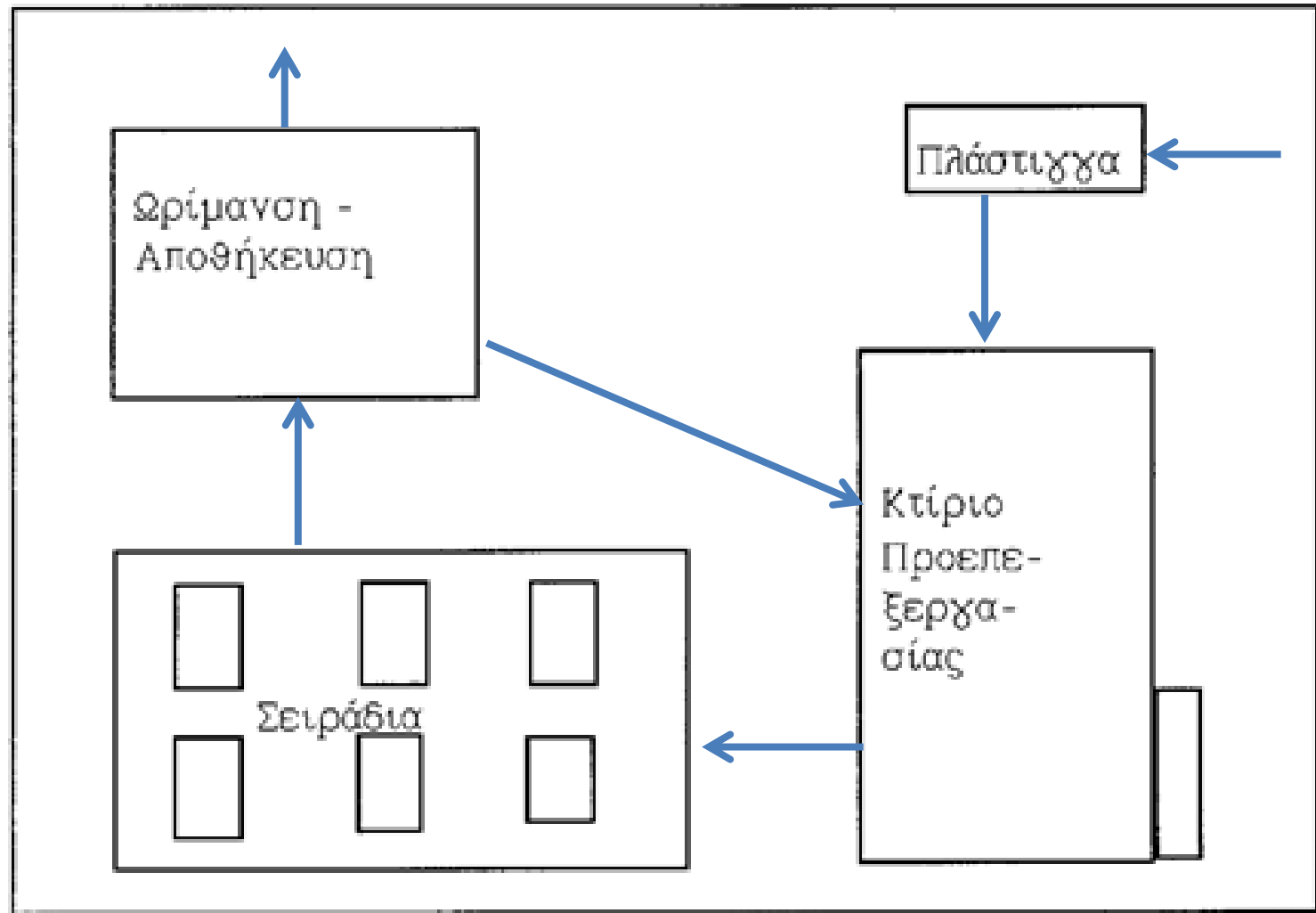
Αν είναι τριγωνικής διατομής βάσεως 2 m και ύψους 1 m, το μήκος του κάθε σειραδίου θα είναι περί τα 9 m.

Νέο σειράδι θα δημιουργείται κάθε τρίτη μέρα.

- Η προεπεξεργασία θα λαμβάνει χώρα σε καλυμμένη έκταση 400 m² και θα περιλαμβάνει υποδοχεία (σιλό) απορριμμάτων, σιλό κομπόστ, τεμαχιστή και πίνακα ηλεκτροδότησης.
- Τα απορριμματοφόρα αφού ζυγιστούν σε γεφυροπλάστιγγα θα αδειάζουν τα απορρίμματα με χρήση ράμπας στο σιλό απορριμμάτων.
- Με χρήση χοάνης θα τροφοδοτείται ο τεμαχιστής ο οποίος θα διασφαλίζει σωμάτια μεγέθους 2-5 cm.
- Θα επεξεργάζεται 500 kg/h και θα λειτουργεί επί 4ώρου βάσεως.
- Τα απορρίμματα με χρήση κοχλία θα οδηγούνται σε αναμείκτη - κόσκινο (περιστρεφόμενο τύμπανο), όπου θα αναμειγνύονται με ανακυκλοφορούμενο προϊόν από το σιλό κομπόστας (για να επιτευχθεί μείωση της υγρασίας) και απομακρύνονται σωμάτια μεγάλου όγκου (διαμέτρου άνω των 5 cm).

- Η ανάδευση θα επιτυγχάνεται με ειδικό εξάρτημα μήκους 2 μέτρων που προσαρμόζεται στο όχημα σχηματισμού-καθαίρεσης σειραδίων.
- Τα σειράδια θα είναι εφοδιασμένα και με δίκτυο στράγγισης των παραγόμενων υγρών.
- Το όχημα σχηματισμού/ καθαίρεσης των σειραδίων θα οδηγεί το προϊόν στην περιοχή ωρίμανσης - αποθήκευσης.
- Ποσότητα κομπόστ θα μεταφέρεται ημερησίως στο σιλό κομπόστ για διασφάλιση της απαιτούμενης ποσότητας ανακυκλοφορίας.

Ενδεικτική χωροθέτηση



Οικιακή κομποστοποίηση



Για να φτιάξουμε ένα κομπόστ χρειαζόμαστε

Υλικά

«Πράσινα» (αζωτούχα) και «καφέ» (άνθρακας) υλικά, προκειμένου να τραφούν οι μικροοργανισμοί που θα υποβοηθήσουν στη διάσπαση των υλικών.

Οξυγόνο

Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί στον κάδο κομποστοποίησης χρειάζονται αέρα για να επιβιώσουν. Η ανάδευση και η ανάμιξη θα συμβάλει στην εισαγωγή αέρα.

Υγρασία

Ο σωρός θα πρέπει να είναι υγρός σαν στυμμένο σφουγγάρι. Αν το μίγμα είναι υπερβολικά υγρό, προσθέστε περισσότερα «καφέ» υλικά. Αντιθέτως, αν είναι πολύ ξηρό, προσθέτουμε λίγο νερό.

Θερμότητα

Κατά τη διαδικασία της αποσύνθεσης αναπτύσσεται θερμότητα από τη δράση των μικροοργανισμών. Όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία στο κέντρο του κάδου τόσο πιο σωστά γίνεται η διαδικασία της κομποστοποίησης.

Χρόνος

Η αποσύνθεση των υλικών αργεί. Η εμφάνιση του έτοιμου κομπόστ εξαρτάται από τη φροντίδα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας.

Τι βάζουμε στον κάδο

«Καφέ» υλικά πλούσια σε άνθρακα



Ξερά φύλλα- ξερά χόρτα

Χαρτόνι

Πριονίδι

Χρησιμοποιημένα ροκανίδια
κατοικίδιων τρωκτικών

Τσόφλια αυγών

Χάρτινες αυγοθήκες

Χάρτινες τσάντες

Ρολά από χαρτί τουαλέτας
και κουζίνας

Φίλτρα γαλλικού καφέ

Σακουλάκια και υπολείμματα
τσαγιού



«Πράσινα» υλικά πλούσια σε άζωτο



Υπολείμματα φρούτων
και λαχανικών

Κομμένα άνθη

Κομμένο γρασίδι

Κλαδέματα φρέσκων
φυτών (πράσινα φύλλα)

Μονοετή και πολυετή
ζιζάνια (προσοχή να μην
έχουν ήδη σποριάσει)

Κοπριά

Φλούδες φρούτων

Υπολείμματα καφέ



Τι δεν βάζουμε στον κάδο!

Οστά

Υπολείμματα
κρέατος
και ψαριού

Περιττώματα
σκύλων ή γάτων

Αποσίγαρα

Στάχτη

Λάδια ή λίπη

Γαλακτοκομικά
προϊόντα

Πλαστικά
ή μεταλλικά
αντικείμενα

Χημικά

Τοποθέτηση κάδου

Ο κάδος τοποθετείται σε επίπεδο χώμα που κατά την αρχική τοποθέτηση σκάβεται ελαφρά, βρέχεται για να μαλακώσει και να γίνει λάσπη. Ο στόχος είναι να εφαρμόσει ο κάδος καλά στο έδαφος.

Προσθήκη υλικών

Για αρχή, τοποθετούμε καφέ υλικά σε πάχος 6-10 πόντους στον πάτο του κάδου και τα βρέχουμε ελαφρά. Σταδιακά και σιγά σιγά καθημερινά τοποθετούμε σε στρώματα πράσινα και καφέ υλικά.

Νερό

Βρέχουμε το κάθε στρώμα ελαφρά.

Τελευταίο στρώμα

Πάντοτε στο τελευταίο στρώμα βάζουμε καφέ υλικά.

Ανακάτεμα

Ανακατεύουμε με το ειδικό εξάρτημα το σωρό μία φορά την εβδομάδα για τις τέσσερις πρώτες εβδομάδες. Μετά ανακατεύουμε περιστασιακά, ελέγχοντας κάθε φορά την υγρασία.

Έτοιμο κομπόστ

Αφαιρούμε το έτοιμο κομπόστ από το κάτω μέρος.

Καν' το πιο γρήγορα

Μειώνουμε το μέγεθος των υλικών που τοποθετούμε, τεμαχίζοντάς τα.

Ανακατεύουμε το κομπόστ με τον ειδικό αναδευτήρα μία φορά την εβδομάδα.

Διατηρούμε το υλικό υγρό (σαν στυμμένο υγρό σφουγγάρι).



Πρόβλημα	Αιτία	Λύση
Οσμή	Κακός αερισμός	
	(το υλικό είναι συμπιεσμένο	Ανακατεύουμε το σωρό
	ή το υλικό είναι πολύ υγρό)	Προσθέτουμε ξερά φύλλα
Το υλικό πρέπει να μυρίζει όπως το χώμα του δάσους		
Το υλικό είναι στεγνό	Λίγο νερό	Ανακατεύουμε το σωρό προσθέτοντας νερό
	Έχουν προστεθεί πολλά ξερά φύλλα	Προσθέτουμε «πράσινα» υλικά
Το υλικό δεν έχει αναπτύξει θερμοκρασία	Δεν υπάρχουν αρκετά «πράσινα» υλικά	Προσθέτουμε πράσινα υλικά
	Το κομπόστ είναι έτοιμο	Σκούρο χρώμα, εύθρυπτο και με μυρωδιά φρέσκου χώματος σημαίνει ότι είναι έτοιμο
Ο κάδος ελκύει μυγάκια	Υπολείμματα τροφών	Σκεπάζουμε τα υπολείμματα τροφών με ξερά φύλλα