

**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
“ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ”**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων Τυροκομικών Μονάδων.
Επίδραση της Επίπλευσης με τη μέθοδο DAF (Dissolved Air Flotation)
στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου των αποβλήτων

Φοιτητής: ΠΑΠΑΚΩΣΤΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΑΜ: 159089

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΓΚΟΛΦΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ : ΚΑΡΑΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΧΡΥΣΗ
ΚΑΣΣΙΑΝΗ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2026

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γκολφινόπουλο Αριστείδη, για την πολύτιμη βοήθειά του στην ανάθεση του θέματος καθώς και στην επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εξετάζει την επεξεργασία υγρών αποβλήτων τυροκομικών μονάδων, με έμφαση στην επίδραση της μεθόδου επίπλευσης με διαλυμένο αέρα, γνωστής ως DAF (Dissolved Air Flotation), στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου. Τα τυροκομικά απόβλητα χαρακτηρίζονται από υψηλό οργανικό φορτίο, σημαντικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών, λιπών, πρωτεϊνών και λακτόζης, καθώς και έντονη μεταβλητότητα στη σύστασή τους, ανάλογα με την παραγωγική διαδικασία και τις πρακτικές καθαρισμού.

Στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική διερεύνηση των χαρακτηριστικών των γαλακτοκομικών και τυροκομικών αποβλήτων, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη μη ορθή διαχείρισή τους και των διαθέσιμων τεχνολογιών επεξεργασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη φυσικοχημική προεπεξεργασία και ειδικότερα στη DAF, η οποία εφαρμόζεται για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, λιπών, αφρών και επιπλεόντων υλικών.

Η ερευνητική προσέγγιση συμπληρώθηκε με μελέτη περίπτωσης τυροκομικής μονάδας των Καλαβρύτων, στην οποία πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες επισκέψεις. Από τη δεξαμενή εξισορρόπησης περίπου 130 m³/ημέρα οδηγούνται στην κύρια γραμμή DAF–οξυγένεσης–UASB και περίπου 20 m³/ημέρα τροφοδοτούν απευθείας τη δεξαμενή αερισμού. Η εκροή των τριών επιλεκτικά τροφοδοτούμενων αντιδραστήρων UASB συνενώνεται με την παράλληλη αερόβια παροχή πριν από την καθίζηση και την τελική έξοδο. Το παραγόμενο βιοαέριο αξιοποιείται στον λέβητα της μονάδας, ενώ η καθιζάνουσα ιλύς αφυδατώνεται σε ταινιοφιλτρόπρεσα. Εξετάστηκαν επίσης δεδομένα COD για την περίοδο 11/11/2025 έως 27/01/2026.

Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι η μέση συγκέντρωση COD στην είσοδο της DAF ήταν περίπου 22.122 mg/L, ενώ η αντίστοιχη μέση τιμή στην έξοδο της DAF ήταν περίπου 21.324 mg/L. Η μέση απόδοση απομάκρυνσης COD μέσω της DAF υπολογίστηκε σε περίπου 3,68%. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η DAF, στη συγκεκριμένη εγκατάσταση, δεν αποτελεί την κύρια βαθμίδα απομάκρυνσης του συνολικού οργανικού φορτίου, καθώς σημαντικό μέρος του COD των τυροκομικών αποβλήτων βρίσκεται σε διαλυμένη μορφή.

Συμπερασματικά, η DAF δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως αυτόνομη λύση πλήρους επεξεργασίας τυροκομικών αποβλήτων, αλλά ως κρίσιμο στάδιο μιας ολοκληρωμένης γραμμής

επεξεργασίας που συνδυάζει φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες. Η αξία της εντοπίζεται κυρίως στη βελτίωση της λειτουργίας των επόμενων σταδίων, στην απομάκρυνση λιπών και αιωρούμενων στερεών και στη μείωση λειτουργικών προβλημάτων στις βιολογικές βαθμίδες.

Λέξεις-κλειδιά: τυροκομικά απόβλητα, DAF, επίπλευση με διαλυμένο αέρα, COD, αιωρούμενα στερεά, φυσικοχημική προεπεξεργασία, UASB, επεξεργασία αποβλήτων.

Abstract

This Master's Thesis examines the treatment of wastewater generated by cheese-making units, with emphasis on the effect of Dissolved Air Flotation (DAF) on pollutant load reduction. Dairy and cheese-processing wastewaters are characterized by high organic load, suspended solids, fats, proteins and lactose, as well as strong variability related to production processes and cleaning practices.

The study includes an extended literature review on dairy wastewater characteristics, environmental impacts and treatment technologies. Particular emphasis is placed on physicochemical pretreatment and DAF, which is mainly applied for the removal of suspended solids, fats, oils, foam and floating materials.

The research is supported by a case study of a cheese-making unit located in Kalavryta, Greece, where on-site visits were carried out. From the equalization tank, approximately 130 m³/day are directed to the main DAF–oxygenation–UASB line, whereas approximately 20 m³/day are fed directly to the aeration tank. The effluent from three selectively operated UASB reactors is combined with the parallel aerobic stream before sedimentation and final discharge. The produced biogas is used as fuel in the plant boiler, while the settled sludge is dewatered in a belt filter press. Available COD data for the period from 11/11/2025 to 27/01/2026 were examined.

The analysis showed that the average COD concentration at the inlet of the DAF unit was approximately 22,122 mg/L, while the average COD concentration at the outlet of the DAF unit was approximately 21,324 mg/L. The average COD removal efficiency through DAF was calculated at approximately 3.68%. This indicates that DAF is not the main stage for total organic load removal in the examined installation, since a significant part of the COD is present in dissolved form.

In conclusion, DAF should not be considered a stand-alone solution for complete dairy wastewater treatment, but rather an important pretreatment step within an integrated treatment line. Its contribution is mainly associated with the removal of suspended solids and fats and with the protection of subsequent biological treatment stages.

Keywords: dairy wastewater, cheese wastewater, DAF, dissolved air flotation, COD, suspended solids, physicochemical pretreatment, UASB, wastewater treatment.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Γενικά και Θεωρητικό Υπόβαθρο

- 1.1 Γενικά
- 1.2 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας
- 1.3 Ο τυροκομικός κλάδος και η περιβαλλοντική του διάσταση
- 1.4 Πηγές και κατηγορίες υγρών αποβλήτων
- 1.5 Χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά τυροκομικών αποβλήτων
- 1.6 Τυρόγαλο και ρυπαντικό φορτίο
- 1.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις
- 1.8 Νομοθετικό πλαίσιο και περιβαλλοντική συμμόρφωση
- 1.9 Βασικές αρχές επεξεργασίας υγρών αποβλήτων
- 1.10 Φυσικές και φυσικοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας
- 1.11 Κροκίδωση και συσσωμάτωση
- 1.12 Θεωρία και λειτουργία της DAF
- 1.13 Λειτουργικές παράμετροι που επηρεάζουν τη DAF
- 1.14 Αναερόβια επεξεργασία και αντιδραστήρες UASB
- 1.15 Αερόβια επεξεργασία και καθίζηση
- 1.16 Διαχείριση ιλύος και παραπροϊόντων
- 1.17 Σύγχρονες τάσεις και κυκλική οικονομία
- 1.18 Κατανάλωση νερού και πρακτικές καθαρότερης παραγωγής
- 1.19 Διαχωρισμός ρευμάτων και διαχείριση στην πηγή
- 1.20 Δεξαμενή εξισορρόπησης και ρύθμιση pH
- 1.21 Λίπη, έλαια και γαλακτώματα στα τυροκομικά απόβλητα
- 1.22 Σχεδιαστικές παράμετροι της DAF
- 1.23 Δοκιμές jar-test και βελτιστοποίηση χημικής δόσης
- 1.24 Παρακολούθηση και έλεγχος λειτουργίας εγκατάστασης
- 1.25 Συνηθισμένα λειτουργικά προβλήματα σε DAF
- 1.26 Σχέση COD, BOD₅ και βιοαποδομησιμότητας
- 1.27 Ενεργειακές και οικονομικές παράμετροι
- 1.28 Ποιότητα εκροής και δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης
- 1.29 Υγιεινή, ασφάλεια και εργαστηριακές πρακτικές
- 1.30 Ισοζύγιο ρύπων και ερμηνεία δεδομένων εγκατάστασης

- 1.31 Τεχνική σημασία της μελέτης περίπτωσης για ελληνικές τυροκομικές μονάδες
- 1.32 Αναλυτική προσέγγιση της αναερόβιας χώνευσης
- 1.33 Παραγωγή και αξιοποίηση βιοαερίου
- 1.34 Απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών
- 1.35 Τεχνολογίες μεμβρανών και υβριδικά συστήματα
- 1.36 Προηγμένες οξειδωτικές και χημικές διεργασίες
- 1.37 Φυσικά συστήματα και τεχνητοί υγρότοποι
- 1.38 Δείκτες αξιολόγησης περιβαλλοντικής επίδοσης
- 1.39 Διαχείριση κινδύνων και αστοχιών
- 1.40 Εκπαίδευση προσωπικού και λειτουργική κουλτούρα
- 1.41 Ψηφιακή παρακολούθηση και αυτοματισμοί
- 1.42 Κοινωνική διάσταση και σχέση με την τοπική κοινωνία
- 1.43 Ολοκληρωμένη προσέγγιση σχεδιασμού
- 1.44 Χημικά καθαρισμού, CIP και επίδραση στα απόβλητα
- 1.45 Δειγματοληψία, συντήρηση δειγμάτων και αβεβαιότητα μετρήσεων
- 1.46 Εποχικότητα παραγωγής και μεταβλητότητα αποβλήτων
- 1.47 Είδος τυριού και διαφοροποίηση αποβλήτων
- 1.48 Σχεδιασμός προγράμματος παρακολούθησης
- 1.49 Πάχυνση, αφυδάτωση και διάθεση υλός
- 1.50 Περιβαλλοντικοί όροι και τεκμηρίωση συμμόρφωσης
- 1.51 Σύγκριση DAF με καθίζηση και απλή λιποσυλλογή
- 1.52 Ανάκτηση πόρων και στρατηγική μηδενικών απορρίψεων
- 1.53 Πρακτικός οδηγός για μικρές και μεσαίες τυροκομικές μονάδες

Κεφάλαιο 2: Υλικά και Μέθοδοι

- 2.1 Περιγραφή της μελέτης περίπτωσης
- 2.2 Περιγραφή της γραμμής επεξεργασίας
- 2.3 Σημεία δειγματοληψίας
- 2.4 Προσδιορισμός COD
- 2.5 Προσδιορισμός αιωρούμενων στερεών
- 2.6 Εργαστηριακός εξοπλισμός
- 2.7 Επεξεργασία δεδομένων
- 2.8 Περιορισμοί της μεθοδολογίας

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα και Συζήτηση

- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Παρουσίαση δεδομένων COD

3.3	Απόδοση απομάκρυνσης COD μέσω DAF
3.4	Στατιστική περιγραφή των μετρήσεων
3.5	Ερμηνεία της περιορισμένης μείωσης COD
3.6	Σύγκριση με τη δεξαμενή οξυγένεσης
3.7	Ρόλος της DAF ως προεπεξεργασίας
3.8	Συνολική αξιολόγηση αποτελεσμάτων
	Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και Προτάσεις
4.1	Γενικά συμπεράσματα
4.2	Συμπεράσματα για τα τυροκομικά απόβλητα
4.3	Συμπεράσματα για τη DAF
4.4	Τεχνικές προτάσεις
4.5	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα
4.6	Τελικό συμπέρασμα
	Βιβλιογραφία
	Παραρτήματα

Κεφάλαιο 1: Γενικά και Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1 Γενικά

Η παραγωγή τροφίμων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κλάδους της οικονομικής δραστηριότητας, αλλά ταυτόχρονα συνδέεται με σημαντικές περιβαλλοντικές πιέσεις. Στον κλάδο των γαλακτοκομικών και ειδικότερα των τυροκομικών μονάδων, η κατανάλωση νερού είναι αυξημένη, καθώς απαιτούνται συχνές πλύσεις δεξαμενών, σωληνώσεων, δαπέδων, καλουπιών και λοιπού εξοπλισμού. Η χρήση νερού συνοδεύεται από την παραγωγή υγρών αποβλήτων με υψηλή οργανική επιβάρυνση.

Τα υγρά απόβλητα τυροκομικών μονάδων είναι σύνθετα και μεταβλητά. Περιέχουν οργανικά συστατικά που προέρχονται από το γάλα, όπως λακτόζη, λίπη, πρωτεΐνες και άλατα, ενώ σε πολλές περιπτώσεις περιέχουν και καθαριστικά ή απολυμαντικά. Η σύστασή τους επηρεάζεται από το είδος του γάλακτος, τα παραγόμενα προϊόντα, τη διαχείριση του ορού γάλακτος, τις πρακτικές καθαρισμού και την εποχικότητα της παραγωγής.

Η μη ορθή διαχείριση των αποβλήτων αυτών μπορεί να προκαλέσει σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου σε φυσικούς αποδέκτες, ευτροφισμό, δημιουργία οσμών και επιβάρυνση εδαφικών και υδάτινων αποδεκτών. Για τον λόγο αυτό, η επεξεργασία των τυροκομικών αποβλήτων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την περιβαλλοντική συμμόρφωση και τη βιώσιμη λειτουργία των μονάδων.

1.2 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τυροκομικών μονάδων και ειδικότερα η διερεύνηση της συμβολής της επίπλευσης με διαλυμένο αέρα, δηλαδή της μεθόδου DAF, στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου. Η εργασία εξετάζει τη DAF όχι απομονωμένα, αλλά ως μέρος ολοκληρωμένης γραμμής επεξεργασίας, η οποία περιλαμβάνει δεξαμενή εξισορρόπησης, αναερόβια και αερόβια βιολογική επεξεργασία και καθίζηση.

Κεντρικός σκοπός είναι η αποτίμηση του ρόλου της DAF ως τεχνολογίας προεπεξεργασίας σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας τυροκομικής μονάδας. Η αξιολόγηση γίνεται με βάση

διαθέσιμες μετρήσεις COD και με θεωρητική ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε σχέση με τη φύση των τυροκομικών αποβλήτων.

Επιπλέον, η εργασία επιδιώκει να συνδέσει τη βιβλιογραφική γνώση με πραγματικά δεδομένα πεδίου. Οι επιτόπιες επισκέψεις σε τυροκομική μονάδα των Καλαβρύτων παρέχουν τη δυνατότητα τεχνικής τεκμηρίωσης των σταδίων επεξεργασίας, των σημείων δειγματοληψίας και των αναλυτικών μεθόδων που εφαρμόζονται.

1.3 Ο τυροκομικός κλάδος και η περιβαλλοντική του διάσταση

Ο τυροκομικός κλάδος αποτελεί σημαντικό τμήμα της αγροδιατροφικής αλυσίδας, ιδιαίτερα σε χώρες με αναπτυγμένη κτηνοτροφία και παράδοση στην παραγωγή γαλακτοκομικών προϊόντων. Η παραγωγή τυριού συνδέεται με την αξιοποίηση γάλακτος πρόβειου, γίδινου, αγελαδινού ή μίγματος αυτών, ανάλογα με το είδος του παραγόμενου προϊόντος. Στην Ελλάδα, τα τυροκομεία έχουν ιδιαίτερη σημασία λόγω της παραγωγής παραδοσιακών προϊόντων, όπως η φέτα, η μυζήθρα, η γραβιέρα και άλλα προϊόντα ονομασίας προέλευσης.

Η περιβαλλοντική διάσταση του κλάδου προκύπτει κυρίως από τη χρήση νερού, την παραγωγή υγρών αποβλήτων και τη διαχείριση παραπροϊόντων όπως το τυρόγαλο. Αν και το γάλα είναι τρόφιμο υψηλής θρεπτικής αξίας, τα οργανικά του συστατικά, όταν καταλήγουν σε υγρά απόβλητα, αποτελούν σημαντικό ρυπαντικό φορτίο. Η μετατροπή μιας πρώτης ύλης υψηλής αξίας σε ρύπο συνδέεται με απώλειες παραγωγής και με αυξημένες απαιτήσεις επεξεργασίας.

Η βιωσιμότητα των τυροκομείων δεν εξαρτάται μόνο από την ποιότητα των προϊόντων αλλά και από την ικανότητα διαχείρισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ορθολογική χρήση νερού, η ανάκτηση τυρογάλακτος, η μείωση των απωλειών γάλακτος και η αποτελεσματική επεξεργασία των αποβλήτων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για τη λειτουργική και περιβαλλοντική απόδοση μιας μονάδας.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα γαλακτοκομικά απόβλητα ανήκουν στα βιομηχανικά απόβλητα με υψηλή βιοαποδομησιμότητα αλλά και υψηλή οργανική φόρτιση. Το γεγονός αυτό δημιουργεί διπλή πρόκληση: από τη μία πλευρά είναι εφικτή η βιολογική επεξεργασία, από την άλλη όμως οι μεγάλες διακυμάνσεις και οι αιχμές φορτίου μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια στις μονάδες επεξεργασίας (Slavon, 2017; Kushwaha et al., 2011).

1.4 Πηγές και κατηγορίες υγρών αποβλήτων

Οι πηγές υγρών αποβλήτων σε μία τυροκομική μονάδα είναι πολλαπλές. Περιλαμβάνουν τα νερά πλύσης δεξαμενών, σωληνώσεων, παστεριωτών, καλουπιών, δοχείων, δαπέδων και χώρων παραγωγής. Σε αυτά προστίθενται τυχόν απώλειες γάλακτος, τυροπήγματος και ορού γάλακτος. Η ποσότητα και η ποιότητα των αποβλήτων εξαρτώνται από το μέγεθος της μονάδας, το είδος των προϊόντων και την αποδοτικότητα των πρακτικών παραγωγής.

Μία ιδιαίτερη κατηγορία αποβλήτου είναι το τυρόγαλο ή ορός γάλακτος. Το τυρόγαλο δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται απλώς ως απόβλητο, καθώς περιέχει πολύτιμα συστατικά, όπως λακτόζη, πρωτεΐνες ορού, άλατα και βιταμίνες. Ωστόσο, όταν δεν αξιοποιείται και καταλήγει στο αποχετευτικό ρεύμα, αυξάνει δραματικά το COD και το BOD των αποβλήτων.

Τα υγρά απόβλητα από πλύσεις μπορεί να είναι αραιότερα αλλά περιέχουν απορρυπαντικά, απολυμαντικά, λίπη και στερεά. Τα νερά καθαρισμού δαπέδων συχνά μεταφέρουν τυρόπηγμα και άλλα στερεά, ενώ τα υγρά από πλύσεις δεξαμενών μπορεί να περιέχουν σημαντικές συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου. Η συνδυασμένη παρουσία αυτών των ρευμάτων δημιουργεί ένα σύνθετο απόβλητο.

Η κατηγοριοποίηση των αποβλήτων σε ρεύματα υψηλού και χαμηλού φορτίου είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό επεξεργασίας. Σε πολλές περιπτώσεις, η χωριστή συλλογή ή αξιοποίηση του τυρογάλακτος μπορεί να μειώσει σημαντικά το οργανικό φορτίο που εισέρχεται στην εγκατάσταση επεξεργασίας.

1.5 Χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά τυροκομικών αποβλήτων

Τα τυροκομικά απόβλητα χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές COD και BOD₅, υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών, λίπη και έλαια, θρεπτικά στοιχεία όπως άζωτο και φώσφορο, καθώς και μεταβλητό pH. Η μεταβλητότητα του pH οφείλεται στην παραγωγική διαδικασία και στη χρήση όξινων ή αλκαλικών καθαριστικών (Britz et al., 2006; Slavon, 2017).

Το COD εκφράζει τη συνολική ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη χημική οξείδωση οργανικών και ορισμένων ανόργανων ενώσεων. Στα τυροκομικά απόβλητα, υψηλό COD οφείλεται κυρίως στη λακτόζη, τις πρωτεΐνες, τα λίπη και τα υπολείμματα γάλακτος. Το BOD₅ εκφράζει το βιοαποδομήσιμο κλάσμα του οργανικού φορτίου και συνήθως είναι επίσης υψηλό.

Τα αιωρούμενα στερεά περιλαμβάνουν σωματίδια τυροπήγματος, πρωτεϊνικά συσσωματώματα, λίπη και άλλα σωματιδιακά υλικά. Η παρουσία τους επηρεάζει τη θολότητα, τη λειτουργία των αντλιών και των αγωγών, καθώς και την απόδοση των βιολογικών διεργασιών. Τα λίπη και έλαια μπορούν να δημιουργήσουν επιφανειακές στρώσεις και να μειώσουν τη μεταφορά οξυγόνου στα αερόβια συστήματα.

Η βιβλιογραφία αναφέρει ευρεία διακύμανση των τιμών για γαλακτοκομικά και τυροκομικά απόβλητα. Ο Slavon (2017) αναφέρει ότι οι τιμές COD για τυροκομικά απόβλητα και απόβλητα ορού γάλακτος μπορεί να κυμαίνονται σε πολύ υψηλά επίπεδα, ανάλογα με τη διαχείριση του ορού και την αραίωση. Η μεταβλητότητα αυτή επιβεβαιώνει την ανάγκη δεξαμενών εξισορρόπησης και συστηματικής παρακολούθησης.

Παράμετρος	Σημασία	Σχόλιο για τυροκομικά απόβλητα
COD	Συνολικό χημικά οξειδώσιμο φορτίο	Ιδιαίτερα υψηλό λόγω λακτόζης, πρωτεϊνών, λιπών και τυρογάλακτος
BOD ₅	Βιοαποδομήσιμο οργανικό φορτίο	Συνήθως υψηλό, κατάλληλο για βιολογική επεξεργασία
TSS	Αιωρούμενα στερεά	Τυρόπηγμα, πρωτεΐνες, λίπη και σωματιδιακά υλικά
FOG	Λίπη, έλαια και γράσα	Προκαλούν αφρισμό, επιπλέοντα στρώματα και λειτουργικά προβλήματα
pH	Οξύτητα/αλκαλικότητα	Μεταβάλλεται από παραγωγή και καθαριστικά
N, P	Θρεπτικά στοιχεία	Μπορεί να συμβάλουν σε ευτροφισμό

Πίνακας 1.1: Βασικές παράμετροι ποιότητας τυροκομικών αποβλήτων.

Οι κυριότερες παράμετροι ποιότητας που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των τυροκομικών αποβλήτων συνοψίζονται στον Πίνακα 1.1. Ο πίνακας αυτός λειτουργεί ως βάση για την ερμηνεία του ρυπαντικού φορτίου και για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας επεξεργασίας. Οι συντομογραφίες TSS (Total Suspended Solids) και FOG (Fats, Oils and Grease) αποδίδονται αντίστοιχα ως ολικά αιωρούμενα στερεά και ως λίπη, έλαια και γράσα.

1.6 Τυρόγαλο και ρυπαντικό φορτίο

Το τυρόγαλο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα παραπροϊόντα της τυροκομίας. Παράγεται κατά τον διαχωρισμό του τυροπήγματος από το υγρό κλάσμα του γάλακτος και περιέχει μεγάλο μέρος της λακτόζης, των υδατοδιαλυτών πρωτεϊνών και των ανόργανων αλάτων. Η σύστασή του εξαρτάται από το είδος του τυριού, το γάλα, τις καλλιέργειες και τη διαδικασία παραγωγής (Prazeres et al., 2012).

Αν το τυρόγαλο απορριφθεί μαζί με τα υπόλοιπα υγρά απόβλητα, το οργανικό φορτίο αυξάνεται έντονα. Η λακτόζη αποτελεί κύριο συστατικό του διαλυμένου COD, ενώ οι πρωτεΐνες και τα λίπη συμβάλλουν τόσο στο διαλυμένο όσο και στο σωματιδιακό φορτίο. Για τον λόγο αυτό, πολλές σύγχρονες προσεγγίσεις δίνουν έμφαση στην αξιοποίηση του τυρογάλακτος.

Η αξιοποίηση μπορεί να περιλαμβάνει παραγωγή σκόνης ορού, συμπυκνωμάτων πρωτεϊνών, ζωοτροφών, γαλακτικού οξέος, βιοαιθανόλης ή βιοαερίου. Ωστόσο, σε μικρές και μεσαίες μονάδες η πλήρης αξιοποίηση δεν είναι πάντα οικονομικά εφικτή. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ορθή επεξεργασία του αποβλήτου καθίσταται αναγκαία.

Οι Carvalho et al. (2013) τονίζουν ότι τα απόβλητα ορού γάλακτος έχουν ιδιαίτερα υψηλό οργανικό και αλατούχο φορτίο και ότι η σύστασή τους εξαρτάται από το ποσοστό μη αξιοποιούμενου τυρογάλακτος και από την ποσότητα των νερών πλύσης. Αυτό έχει άμεση σημασία για τον σχεδιασμό της DAF, καθώς μεγάλο μέρος του COD του τυρογάλακτος είναι διαλυμένο και δεν απομακρύνεται αποτελεσματικά μόνο με επίπλευση.

1.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η ανεπεξέργαστη διάθεση τυροκομικών αποβλήτων σε επιφανειακούς αποδέκτες μπορεί να προκαλέσει σοβαρή μείωση του διαλυμένου οξυγόνου. Το υψηλό BOD οδηγεί σε κατανάλωση οξυγόνου από μικροοργανισμούς, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την υδρόβια ζωή και να οδηγήσει σε αναερόβιες συνθήκες.

Η παρουσία αζώτου και φωσφόρου μπορεί να συμβάλει στον ευτροφισμό, δηλαδή στην υπερβολική ανάπτυξη φυκών και υδρόβιας βλάστησης. Ο ευτροφισμός οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, οσμές, θολότητα και πιθανή παραγωγή τοξινών. Σε κλειστούς ή ημίκλειστους υδατικούς αποδέκτες, οι επιπτώσεις μπορεί να είναι εντονότερες.

Τα λίπη και τα επιπλέοντα υλικά μπορούν να σχηματίσουν επιφανειακά στρώματα που μειώνουν την επαφή νερού-αέρα και επηρεάζουν την ανταλλαγή οξυγόνου. Επιπλέον, μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα σε αποχετευτικά δίκτυα, αντλιοστάσια και μονάδες επεξεργασίας, αυξάνοντας τις απαιτήσεις συντήρησης.

Οι οσμές αποτελούν επίσης σημαντικό ζήτημα, ιδιαίτερα όταν τα απόβλητα αποθηκεύονται ή μεταφέρονται χωρίς κατάλληλο αερισμό ή όταν αναπτύσσονται αναερόβιες συνθήκες. Η

αποδόμηση πρωτεϊνών και λιπών μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή δύσσομων ενώσεων, οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητα ζωής των κατοίκων γύρω από τη μονάδα.

1.8 Νομοθετικό πλαίσιο και περιβαλλοντική συμμόρφωση

Η διαχείριση των υγρών αποβλήτων υπόκειται σε ευρωπαϊκό και εθνικό νομοθετικό πλαίσιο. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων αποτέλεσε βασικό κείμενο για τη συλλογή, επεξεργασία και διάθεση λυμάτων και ορισμένων βιομηχανικών αποβλήτων. Σε ελληνικό επίπεδο, η Υ.Α. οικ. 5673/400/1997 ενσωμάτωσε βασικές απαιτήσεις για την επεξεργασία αστικών λυμάτων και σχετικών βιομηχανικών ρευμάτων.

Αν και τα τυροκομικά απόβλητα δεν αντιμετωπίζονται πάντα με ενιαίο τρόπο, η διάθεσή τους πρέπει να συμμορφώνεται με τους περιβαλλοντικούς όρους της εγκατάστασης και με τα όρια εκροής που ορίζονται ανάλογα με τον αποδέκτη. Τα όρια μπορεί να αφορούν COD, BOD₅, TSS, λίπη και έλαια, pH, θρεπτικά στοιχεία και άλλες παραμέτρους.

Η περιβαλλοντική συμμόρφωση δεν περιορίζεται στην επίτευξη οριακών τιμών. Περιλαμβάνει επίσης τήρηση αρχείων, παρακολούθηση λειτουργίας, σωστή διαχείριση ιλύος, αποφυγή ανεξέλεγκτων απορρίψεων και εφαρμογή μέτρων πρόληψης. Η λειτουργική παρακολούθηση αποτελεί βασικό στοιχείο τεκμηρίωσης της ορθής λειτουργίας μιας μονάδας.

Οι πρόσφατες ευρωπαϊκές πολιτικές δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στην κυκλική οικονομία, στην επαναχρησιμοποίηση νερού, στην ανάκτηση πόρων και στη μείωση της ρύπανσης στην πηγή. Η νέα Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 αναδιατυπώνει το πλαίσιο για την επεξεργασία αστικών λυμάτων και δείχνει τη γενικότερη κατεύθυνση προς αυστηρότερη και πιο ολιστική διαχείριση των υγρών αποβλήτων.

1.9 Βασικές αρχές επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Η επεξεργασία υγρών αποβλήτων οργανώνεται συνήθως σε διαδοχικά στάδια. Η προεπεξεργασία απομακρύνει χονδρά στερεά, άμμο, λίπη και υλικά που μπορούν να προκαλέσουν μηχανικά προβλήματα. Η πρωτοβάθμια επεξεργασία αποσκοπεί στον διαχωρισμό καθιζανόντων και επιπλεόντων στερεών, ενώ η δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία στοχεύει στη μείωση του διαλυμένου και κολλοειδούς οργανικού φορτίου (Tchobanoglous et al., 2003; Metcalf & Eddy/AECOM, 2014).

Στην περίπτωση των τυροκομικών αποβλήτων, η προεπεξεργασία αποκτά ιδιαίτερη σημασία λόγω της παρουσίας λιπών και αιωρούμενων στερεών. Η απευθείας τροφοδότηση των αποβλήτων σε βιολογικούς αντιδραστήρες χωρίς επαρκή προεπεξεργασία μπορεί να οδηγήσει σε φραγές, αφρισμό, δημιουργία επιφανειακών στρωμάτων και αστάθεια της βιομάζας.

Η επιλογή τεχνολογίας εξαρτάται από την ποιότητα και ποσότητα των αποβλήτων, τις απαιτήσεις εκροής, το διαθέσιμο χώρο, το κόστος λειτουργίας, την τεχνογνωσία της μονάδας και τη δυνατότητα διάθεσης ή αξιοποίησης της παραγόμενης ιλύος. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται συνδυασμός φυσικοχημικών και βιολογικών διεργασιών.

Μία τυπική γραμμή για υψηλά οργανικά απόβλητα τροφίμων μπορεί να περιλαμβάνει εσχάρωση, δεξαμενή εξισορρόπησης, ρύθμιση pH, φυσικοχημική προεπεξεργασία όπως DAF, αναερόβια επεξεργασία για μείωση υψηλού COD, μονάδα αερόβιας επεξεργασίας για τελική βελτίωση και καθίζηση ή διαχωρισμό ιλύος.

1.10 Φυσικές και φυσικοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας

Οι φυσικές μέθοδοι επεξεργασίας βασίζονται στον μηχανικό ή φυσικό διαχωρισμό συστατικών από το υγρό απόβλητο. Περιλαμβάνουν εσχάρωση, διήθηση, καθίζηση, λιποσυλλογή και επίπλευση. Οι μέθοδοι αυτές είναι συχνά απαραίτητες πριν από τη βιολογική επεξεργασία, διότι απομακρύνουν υλικά που θα μπορούσαν να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα.

Οι φυσικοχημικές μέθοδοι συνδυάζουν φυσικό διαχωρισμό με χημική υποβοήθηση. Η κροκίδωση, η συσσωμάτωση, η χημική κατακρήμνιση και η επίπλευση με διαλυμένο αέρα αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα. Στόχος τους είναι η μετατροπή μικρών ή κολλοειδών σωματιδίων σε μεγαλύτερες κροκίδες, οι οποίες μπορούν να απομακρυνθούν ευκολότερα.

Στα τυροκομικά απόβλητα, η φυσικοχημική επεξεργασία μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την απομάκρυνση λιπών, πρωτεϊνικών κροκίδων και αιωρούμενων στερεών. Η εφαρμογή της πριν από τους βιολογικούς αντιδραστήρες μειώνει τις αιχμές φορτίου και προστατεύει τη βιομάζα από απότομες μεταβολές.

Η DAF είναι μία από τις πλέον διαδεδομένες φυσικοχημικές τεχνολογίες για απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων. Η επιτυχία της εξαρτάται από τη σωστή προετοιμασία του αποβλήτου, τη ρύθμιση pH, τη χρήση κατάλληλων κροκιδωτικών και τις υδραυλικές συνθήκες λειτουργίας.

Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζεται συγκριτικά η βασική λειτουργία, τα κύρια πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των φυσικών και φυσικοχημικών μεθόδων επεξεργασίας που μπορούν να εφαρμοστούν στα τυροκομικά απόβλητα. Η σύγκριση αυτή αναδεικνύει τον ιδιαίτερο ρόλο της DAF ως προεπεξεργασίας για την απομάκρυνση λιπών, αιωρούμενων στερεών και επιπλεόντων υλικών πριν από τη βιολογική επεξεργασία.

Μέθοδος	Κύρια λειτουργία	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Εσχάρωση	Απομάκρυνση χονδρών στερεών	Απλή και απαραίτητη προεπεξεργασία	Δεν μειώνει διαλυμένο φορτίο
Καθίζηση	Διαχωρισμός καθιζανόντων στερεών	Χαμηλό ενεργειακό κόστος	Μικρή απόδοση σε λίπη και κολλοειδή
DAF	Επίπλευση στερεών και λιπών	Κατάλληλη για λίπη, αφρούς και επιπλέοντα	Περιορισμένη μείωση διαλυμένου COD
Κροκίδωση	Αποσταθεροποίηση κολλοειδών	Βελτιώνει διαχωρισμό	Απαιτεί χημικά και παράγει ιλύ
Μεμβράνες	Φυσικός διαχωρισμός υψηλής ακρίβειας	Υψηλή ποιότητα εκροής	Κόστος και fouling

Πίνακας 1.2: Σύγκριση φυσικών και φυσικοχημικών μεθόδων επεξεργασίας.

1.11 Κροκίδωση και συσσωμάτωση

Η κροκίδωση και η συσσωμάτωση αποτελούν κρίσιμα στάδια σε πολλές φυσικοχημικές διεργασίες. Τα κολλοειδή σωματίδια των αποβλήτων συχνά παραμένουν σταθερά λόγω επιφανειακών φορτίων. Η προσθήκη κροκιδωτικού, όπως άλατα αργιλίου ή σιδήρου, μπορεί να εξουδετερώσει τα φορτία και να προκαλέσει σχηματισμό μικρών κροκίδων.

Η συσσωμάτωση ακολουθεί την κροκίδωση και περιλαμβάνει την ήπια ανάδευση, ώστε οι μικρές κροκίδες να συγκρουστούν και να σχηματίσουν μεγαλύτερα συσσωματώματα. Τα μεγαλύτερα σωματίδια μπορούν να απομακρυνθούν είτε με καθίζηση είτε με επίπλευση. Στη DAF, οι κροκίδες προσκολλώνται στις φυσαλίδες αέρα και ανέρχονται στην επιφάνεια.

Η αποτελεσματικότητα της κροκίδωσης εξαρτάται από το pH, τη δοσολογία, την αλκαλικότητα, τη θερμοκρασία, την ένταση ανάδευσης και τη σύσταση του αποβλήτου. Υπερβολική δοσολογία μπορεί να προκαλέσει επανασταθεροποίηση σωματιδίων ή αυξημένη παραγωγή ιλύος, ενώ ανεπαρκής δοσολογία οδηγεί σε χαμηλή απόδοση απομάκρυνσης.

Στα τυροκομικά απόβλητα, η παρουσία πρωτεϊνών και λιπών καθιστά την κροκίδωση ιδιαίτερα χρήσιμη. Ωστόσο, η διαλυμένη λακτόζη δεν απομακρύνεται με απλή κροκίδωση,

γεγονός που εξηγεί γιατί η μείωση του COD μπορεί να παραμένει περιορισμένη, ακόμη και όταν η απομάκρυνση στερεών και λιπών είναι ικανοποιητική.

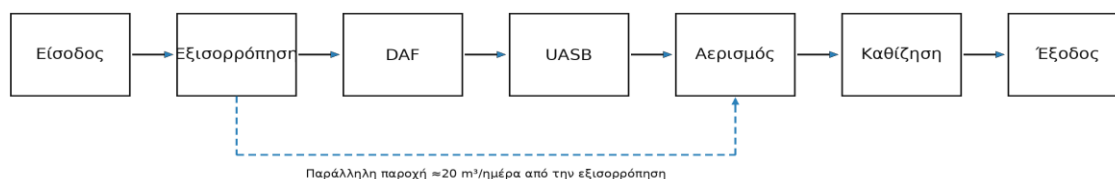
1.12 Θεωρία και λειτουργία της DAF

Η επίπλευση με διαλυμένο αέρα βασίζεται στη διάλυση αέρα στο νερό υπό πίεση και στην απελευθέρωσή του σε ατμοσφαιρική πίεση μέσα στη δεξαμενή επίπλευσης. Κατά την αποσυμπίεση δημιουργούνται μικροφυσαλίδες, οι οποίες προσκολλώνται σε σωματίδια, λίπη και κροκίδες. Το σύμπλοκο φυσαλίδας-σωματιδίου έχει μικρότερη φαινόμενη πυκνότητα και ανέρχεται στην επιφάνεια (Muñoz-Alegria et al., 2021).

Η επιφανειακή στρώση που σχηματίζεται απομακρύνεται συνήθως με μηχανικό ξέστρο ή άλλο σύστημα συλλογής επιπλέουσας υλούς. Το διαυγασμένο υγρό εξέρχεται από τη μονάδα και οδηγείται στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Η DAF χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανίες τροφίμων, διυλιστήρια, χαρτοβιομηχανίες και εγκαταστάσεις επεξεργασίας πόσιμου νερού.

Η αρχή λειτουργίας της DAF συνδέεται με φυσικές παραμέτρους όπως η διαλυτότητα του αέρα, η πίεση κορεσμού, το μέγεθος των φυσαλίδων, ο χρόνος επαφής και η υδραυλική φόρτιση. Μικρές φυσαλίδες παρέχουν μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής και αυξάνουν την πιθανότητα προσκόλλησης σε σωματίδια.

Στα τυροκομικά απόβλητα, η DAF είναι κατάλληλη για την απομάκρυνση λιπαρών και σωματιδιακών συστατικών. Όμως, επειδή μεγάλο τμήμα του COD μπορεί να είναι διαλυμένο, η DAF από μόνη της δεν μπορεί να αντικαταστήσει τη βιολογική επεξεργασία. Η αξία της εντοπίζεται στη μείωση του φορτίου προς τη βιολογική βαθμίδα και στη σταθεροποίηση της λειτουργίας. Η ενδεικτική θέση της DAF στη συνολική γραμμή παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Ενδεικτική διάταξη γραμμής επεξεργασίας με παράλληλη παροχή από την εξισορρόπηση προς τον αερισμό.

1.13 Λειτουργικές παράμετροι που επηρεάζουν τη DAF

Οι βασικές λειτουργικές παράμετροι της DAF περιλαμβάνουν την πίεση κορεσμού, τον λόγο ανακυκλοφορίας, το pH, τη δοσολογία κροκιδωτικού, τον χρόνο παραμονής και την υδραυλική φόρτιση. Η πίεση κορεσμού επηρεάζει την ποσότητα αέρα που διαλύεται στο νερό, ενώ ο λόγος ανακυκλοφορίας καθορίζει την ποσότητα κορεσμένου νερού που εισέρχεται στη δεξαμενή επίπλευσης (Muñoz-Alegria et al., 2021; Pereira et al., 2020).

Το pH επηρεάζει τη χημική μορφή των συστατικών και την αποτελεσματικότητα των κροκιδωτικών. Σε ορισμένα απόβλητα, μικρές μεταβολές του pH μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές διαφορές στον σχηματισμό κροκίδων. Για τον λόγο αυτό, η ρύθμιση pH αποτελεί συχνά βασικό στάδιο πριν από την DAF.

Ο χρόνος παραμονής πρέπει να είναι επαρκής ώστε να πραγματοποιηθεί η προσκόλληση των φυσαλίδων στα σωματίδια και η άνοδος στην επιφάνεια. Πολύ μικρός χρόνος παραμονής οδηγεί σε μειωμένη απόδοση, ενώ πολύ μεγάλος χρόνος αυξάνει τον απαιτούμενο όγκο δεξαμενής και το κόστος.

Η απόδοση της DAF πρέπει να αξιολογείται με περισσότερες από μία παραμέτρους. Η χρήση μόνο του COD μπορεί να υποεκτιμήσει την αξία της μεθόδου, ειδικά όταν το διαλυμένο οργανικό φορτίο είναι υψηλό. Συνεπώς, είναι αναγκαία η παράλληλη παρακολούθηση TSS, λιπών, θολότητας και παραγόμενης ιλύος.

Παράμετρος DAF	Επίδραση στη διεργασία	Πρακτική σημασία
Πίεση κορεσμού	Επηρεάζει την ποσότητα διαλυμένου αέρα	Καθορίζει την παραγωγή μικροφυσαλίδων
Λόγος ανακυκλοφορίας	Επηρεάζει την παροχή κορεσμένου νερού	Σχετίζεται με την επαφή φυσαλίδων-σωματιδίων
pH	Επηρεάζει κροκίδωση και φορτία σωματιδίων	Απαιτεί συχνή παρακολούθηση
Κροκιδωτικό	Βελτιώνει σχηματισμό κροκίδων	Πρέπει να βελτιστοποιείται ως προς κόστος/ιλύ
Χρόνος παραμονής	Επηρεάζει άνοδο σωματιδίων	Πολύ μικρός χρόνος μειώνει την απόδοση

Πίνακας 1.3: Κρίσιμες λειτουργικές παράμετροι της DAF.

Οι βασικές λειτουργικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση της DAF παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3. Η συστηματική παρακολούθησή τους είναι απαραίτητη, επειδή μικρές μεταβολές στη λειτουργία μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και λιπών.

1.14 Αναερόβια επεξεργασία και αντιδραστήρες UASB

Η αναερόβια επεξεργασία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για απόβλητα υψηλού οργανικού φορτίου. Βασίζεται στη δράση μικροοργανισμών που αποδομούν οργανικές ενώσεις απουσία οξυγόνου, παράγοντας κυρίως μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Η διεργασία περιλαμβάνει στάδια υδρόλυσης, οξυγένεσης, οξικογένεσης και μεθανογένεσης (Demirel et al., 2005).

Οι αντιδραστήρες UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) αποτελούν διαδομένη τεχνολογία αναερόβιας επεξεργασίας. Το απόβλητο εισέρχεται από το κάτω μέρος και κινείται ανοδικά μέσα από στρώμα αναερόβιας κοκκώδους ιλύος. Η επαφή αποβλήτου και βιομάζας οδηγεί σε αποδόμηση του οργανικού φορτίου και παραγωγή βιοαερίου (Lettinga & Hulshoff Pol, 1991).

Τα πλεονεκτήματα των UASB περιλαμβάνουν χαμηλότερη παραγωγή ιλύος σε σχέση με την αερόβια επεξεργασία, δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας μέσω βιοαερίου και υψηλή απόδοση σε απόβλητα με αυξημένο COD. Ωστόσο, απαιτείται προσεκτική λειτουργία, έλεγχος pH, αλκαλικότητας, θερμοκρασίας και οργανικής φόρτισης.

Η ύπαρξη DAF πριν από UASB μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, διότι μειώνει την είσοδο λιπών και στερεών στον αναερόβιο αντιδραστήρα. Τα λίπη μπορεί να δημιουργήσουν επιφανειακά στρώματα ή να προκαλέσουν παρεμπόδιση της μάζας της κοκκώδους ιλύος. Έτσι, η DAF συμβάλλει έμμεσα στη σταθερότητα της αναερόβιας βαθμίδας.

1.15 Αερόβια επεξεργασία και καθίζηση

Η αερόβια επεξεργασία αποτελεί συχνά το τελικό βιολογικό στάδιο σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας τυροκομικών αποβλήτων. Σε αυτήν, μικροοργανισμοί αποδομούν το οργανικό φορτίο με την παρουσία διαλυμένου οξυγόνου. Η διεργασία μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα ενεργού ιλύος, βιολογικά φίλτρα, MBR ή άλλες διατάξεις.

Η μονάδα αερόβιας επεξεργασίας είναι αποτελεσματική για την περαιτέρω μείωση του COD και του BOD₅ μετά την αναερόβια επεξεργασία. Παράλληλα, μπορεί να συμβάλει στην οξείδωση αμμωνιακού αζώτου και στη σταθεροποίηση της εκροής. Ωστόσο, απαιτεί ενέργεια για αερισμό και παράγει μεγαλύτερη ποσότητα βιολογικής ιλύος σε σχέση με την αναερόβια επεξεργασία (Chan et al., 2009).

Η καθίζηση ακολουθεί συνήθως την αερόβια βαθμίδα και έχει ως στόχο τον διαχωρισμό της βιολογικής ιλύος από το επεξεργασμένο νερό. Η απόδοση της καθίζησης επηρεάζεται από τη δομή των κροκίδων, την ηλικία ιλύος, την υδραυλική φόρτιση και την παρουσία αφρισμού ή νηματοειδών μικροοργανισμών.

Η ποιότητα της εκροής εξαρτάται από την καλή συνεργασία όλων των σταδίων. Αν η DAF δεν απομακρύνει επαρκώς τα λίπη και τα στερεά, η αερόβια βαθμίδα μπορεί να εμφανίσει αυξημένο αφρισμό και χαμηλότερη καθιζησιμότητα. Συνεπώς, η προεπεξεργασία επηρεάζει άμεσα τη λειτουργία των επόμενων σταδίων.

1.16 Διαχείριση ιλύος και παραπροϊόντων

Η επεξεργασία τυροκομικών αποβλήτων παράγει διαφορετικές μορφές ιλύος. Η DAF παράγει επιπλέον ιλύ πλούσια σε λίπη, πρωτεΐνες και σωματιδιακό οργανικό υλικό. Οι βιολογικές διεργασίες παράγουν αναερόβια ή αερόβια ιλύ, η οποία πρέπει να συλλέγεται, να παχύνεται, να αφυδατώνεται και να διατίθεται ή να αξιοποιείται σύμφωνα με τις ισχύουσες απαιτήσεις.

Η διαχείριση της ιλύος αποτελεί σημαντικό τμήμα του λειτουργικού κόστους. Η ποσότητα και η σύστασή της εξαρτώνται από την ποιότητα των αποβλήτων, την απόδοση των σταδίων επεξεργασίας και τη χρήση χημικών. Η υπερβολική χημική δόση στη DAF μπορεί να αυξήσει την παραγωγή ιλύος, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη βελτιστοποίηση.

Η ιλύς από τυροκομικά απόβλητα έχει υψηλό οργανικό περιεχόμενο και μπορεί, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, να αξιοποιηθεί ενεργειακά ή αγρονομικά. Ωστόσο, απαιτείται προσεκτική αξιολόγηση της σταθερότητας, της υγρασίας, των οσμών, των παθογόνων και των πιθανών χημικών υπολειμμάτων.

Η ορθή διαχείριση ιλύος πρέπει να εντάσσεται στον συνολικό σχεδιασμό της εγκατάστασης. Δεν αρκεί η επίτευξη καλής ποιότητας εκροής, αν η παραγόμενη ιλύς δεν μπορεί να διατεθεί με ασφαλή και οικονομικά βιώσιμο τρόπο.

1.17 Σύγχρονες τάσεις και κυκλική οικονομία

Η σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση αποβλήτων μετατοπίζεται από την απλή επεξεργασία προς την ανάκτηση πόρων. Στον γαλακτοκομικό κλάδο, αυτό σημαίνει αξιοποίηση τυρογάλακτος,

ανάκτηση πρωτεϊνών, παραγωγή βιοαερίου, επαναχρησιμοποίηση νερού και μείωση απωλειών πρώτης ύλης.

Η κυκλική οικονομία δίνει έμφαση στη μετατροπή ρευμάτων αποβλήτων σε δευτερογενείς πόρους. Το τυρόγαλο μπορεί να αποτελέσει πρώτη ύλη για τρόφιμα, ζωοτροφές ή βιοτεχνολογικές διεργασίες. Το βιοαέριο από αναερόβια επεξεργασία μπορεί να καλύψει μέρος των ενεργειακών αναγκών της μονάδας.

Η DAF μπορεί να ενταχθεί σε αυτή τη λογική ως τεχνολογία διαχωρισμού, η οποία αφαιρεί από το υγρό ρεύμα συστατικά που διαφορετικά θα επιβάρυναν τη βιολογική επεξεργασία. Ανάλογα με τη σύσταση της παραγόμενης επιπλέουσας ιλύος, μπορεί να εξεταστεί η περαιτέρω αξιοποίησή της ή η συνδυασμένη διαχείρισή της με άλλα οργανικά υπολείμματα.

Η μετάβαση σε πιο βιώσιμες πρακτικές απαιτεί τεχνική γνώση, οικονομική ανάλυση και περιβαλλοντική αξιολόγηση. Για μικρές και μεσαίες τυροκομικές μονάδες, οι λύσεις πρέπει να είναι απλές, αξιόπιστες και οικονομικά εφαρμόσιμες. Η παρούσα εργασία εστιάζει ακριβώς σε αυτή τη διάσταση, αξιολογώντας μία πραγματική εφαρμογή DAF στο πλαίσιο ολοκληρωμένης επεξεργασίας.

1.18 Κατανάλωση νερού και πρακτικές καθαρότερης παραγωγής

Η κατανάλωση νερού σε ένα τυροκομείο δεν αποτελεί απλώς λειτουργική δαπάνη, αλλά βασικό παράγοντα που καθορίζει την ποσότητα και την αραίωση των παραγόμενων αποβλήτων. Μεγάλη χρήση νερού μπορεί να μειώνει φαινομενικά τις συγκεντρώσεις ορισμένων ρύπων, αλλά αυξάνει τον συνολικό όγκο που πρέπει να επεξεργαστεί η εγκατάσταση. Αντίθετα, η μείωση της κατανάλωσης νερού χωρίς ταυτόχρονη μείωση απωλειών πρώτης ύλης μπορεί να οδηγήσει σε πιο συμπυκνωμένα απόβλητα.

Οι πρακτικές καθαρότερης παραγωγής αποσκοπούν στη μείωση της ρύπανσης πριν αυτή δημιουργηθεί. Στα τυροκομεία τέτοιες πρακτικές περιλαμβάνουν την ξηρή απομάκρυνση υπολειμμάτων πριν το πλύσιμο, τη χωριστή συλλογή τυρογάλακτος, τη μείωση υπερχειλίσεων δεξαμενών, τη συντήρηση βαλβίδων και σωληνώσεων και την εκπαίδευση του προσωπικού για αποφυγή άσκοπης χρήσης νερού.

Η εφαρμογή συστημάτων CIP μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την υγιεινή και την επαναληψιμότητα των καθαρισμών, αλλά απαιτεί σωστό προγραμματισμό. Η ανάκτηση

τελευταίων νερών έκπλυσης για προπλύσεις, η χρήση αισθητήρων αγωγιμότητας και η χωριστή συλλογή ισχυρά αλκαλικών ή όξινων διαλυμάτων μπορούν να μειώσουν την επιβάρυνση της εγκατάστασης επεξεργασίας.

Η πρόληψη έχει ιδιαίτερη σημασία γιατί κάθε λίτρο γάλακτος που χάνεται στο δίκτυο αποβλήτων αυξάνει δυσανάλογα το οργανικό φορτίο. Η μείωση των απωλειών πρώτης ύλης συνδέεται άμεσα με οικονομικό όφελος, καθώς το γάλα αποτελεί εμπορεύσιμο προϊόν, αλλά και με περιβαλλοντικό όφελος, καθώς μειώνεται το COD στην είσοδο της επεξεργασίας.

Για μικρές και μεσαίες μονάδες, οι πρακτικές καθαρότερης παραγωγής είναι συχνά πιο άμεσα εφαρμόσιμες από την εγκατάσταση πολύπλοκων τεχνολογιών. Η βελτίωση της καθημερινής λειτουργίας μπορεί να μειώσει τις αιχμές φορτίου που φτάνουν στη DAF και στα βιολογικά στάδια, βελτιώνοντας τη σταθερότητα ολόκληρης της εγκατάστασης.

1.19 Διαχωρισμός ρευμάτων και διαχείριση στην πηγή

Ο διαχωρισμός των ρευμάτων αποβλήτων στην πηγή αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές αρχές σχεδιασμού στη βιομηχανική επεξεργασία. Σε ένα τυροκομείο δεν έχουν όλα τα υγρά ρεύματα την ίδια ρυπαντική ισχύ. Τα απόνερα πλύσεων δαπέδων, οι πρώτες εκπλύσεις δεξαμενών, οι άλμες και το τυρόγαλο έχουν διαφορετική σύσταση και δεν πρέπει πάντα να οδηγούνται χωρίς διάκριση στην ίδια γραμμή επεξεργασίας.

Η χωριστή συλλογή του τυρογάλακτος είναι ιδιαίτερα κρίσιμη. Όταν το τυρόγαλο αναμειγνύεται με τα υπόλοιπα απόβλητα, αυξάνει το διαλυμένο COD και μπορεί να υπερφορτώσει τις βιολογικές βαθμίδες. Αντίθετα, όταν συλλέγεται χωριστά, μπορεί να αξιοποιηθεί ως πρώτη ύλη ή να οδηγηθεί σε ειδική επεξεργασία υψηλού οργανικού φορτίου.

Οι άλμες αποτελούν ξεχωριστό ζήτημα, διότι μπορεί να αυξήσουν σημαντικά την αγωγιμότητα και την αλατότητα του αποβλήτου. Η υψηλή αλατότητα μπορεί να επηρεάσει τους μικροοργανισμούς της βιολογικής επεξεργασίας και να προκαλέσει δυσκολίες στη διάθεση της εκροής. Επομένως, η διαχείριση άλμης απαιτεί ξεχωριστή αξιολόγηση.

Η διαχείριση στην πηγή μπορεί να περιλαμβάνει απλές πρακτικές, όπως τοποθέτηση κόσκινων σε αποχετεύσεις, συλλογή στερεών υπολειμμάτων πριν το πλύσιμο, χρήση κλειστών συστημάτων μεταφοράς και εγκατάσταση λιποσυλλεκτών. Οι πρακτικές αυτές μειώνουν το φορτίο που θα πρέπει να αντιμετωπίσει η DAF.

Ο διαχωρισμός ρευμάτων επιτρέπει επίσης καλύτερη ερμηνεία των αναλυτικών δεδομένων. Όταν όλα τα ρεύματα αναμειγνύονται, είναι δύσκολο να εντοπιστεί η πηγή μιας αιχμής COD ή λίπους. Η καταγραφή ανά στάδιο παραγωγής βοηθά στη στοχευμένη βελτίωση της λειτουργίας.

1.20 Δεξαμενή εξισορρόπησης και ρύθμιση pH

Η δεξαμενή εξισορρόπησης αποτελεί κρίσιμο στάδιο σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας τυροκομικών αποβλήτων. Ο ρόλος της είναι να ομογενοποιεί την παροχή και τη σύσταση του αποβλήτου, μειώνοντας τις αιχμές που θα έφταναν στα επόμενα στάδια. Χωρίς εξισορρόπηση, η DAF και οι βιολογικοί αντιδραστήρες θα δέχονταν απότομες μεταβολές COD, pH, λιπών και στερεών.

Η ανάδευση της δεξαμενής εξισορρόπησης είναι σημαντική, ώστε να αποφεύγεται καθίζηση στερεών και δημιουργία αναερόβιων ζωνών. Παράλληλα, πρέπει να αποφεύγεται υπερβολικός αφρισμός ή διάσπαση λιπαρών στρωμάτων που μπορεί να δυσκολέψει την επόμενη επίπλευση. Η ισορροπία ανάδευσης και η σωστή υδραυλική σχεδίαση επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργία της DAF.

Η ρύθμιση pH μπορεί να πραγματοποιείται πριν από τη DAF ή πριν από τη βιολογική βαθμίδα, ανάλογα με τη γραμμή επεξεργασίας. Στα τυροκομικά απόβλητα το pH μπορεί να μειωθεί λόγω ζυμώσεων και παραγωγής οργανικών οξέων ή να αυξηθεί λόγω αλκαλικών καθαριστικών. Οι απότομες μεταβολές pH επηρεάζουν τόσο την κροκίδωση όσο και τη βιολογική δραστηριότητα.

Για την DAF, το κατάλληλο pH εξαρτάται από το είδος κροκιδωτικού και τη σύσταση του αποβλήτου. Για παράδειγμα, τα άλατα αργιλίου και σιδήρου έχουν διαφορετικές περιοχές βέλτιστης λειτουργίας. Η επιλογή pH πρέπει να βασίζεται σε δοκιμές και όχι μόνο σε γενικές βιβλιογραφικές τιμές.

Η δεξαμενή εξισορρόπησης μπορεί να λειτουργήσει και ως σημείο ελέγχου. Η τακτική μέτρηση pH, αγωγιμότητας και θερμοκρασίας παρέχει έγκαιρη προειδοποίηση για μη κανονικές εκροές παραγωγής ή πλύσεων. Έτσι, η μονάδα μπορεί να προσαρμόζει τη δόση χημικών και τη λειτουργία των επόμενων σταδίων.

1.21 Λίπη, έλαια και γαλακτώματα στα τυροκομικά απόβλητα

Τα λίπη αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό των γαλακτοκομικών αποβλήτων. Στο γάλα, το λίπος βρίσκεται σε μορφή γαλακτωματοποιημένων σταγονιδίων, τα οποία στα απόβλητα μπορεί να εμφανίζονται ως ελεύθερο λίπος, γαλάκτωμα ή συνδεδεμένο με πρωτεΐνες και στερεά. Η φυσική μορφή του λίπους καθορίζει και την ευκολία απομάκρυνσής του.

Το ελεύθερο λίπος μπορεί να απομακρυνθεί σχετικά εύκολα με λιποσυλλογή ή επίπλευση. Αντίθετα, τα σταθερά γαλακτώματα απαιτούν αποσταθεροποίηση, συνήθως με ρύθμιση pH ή προσθήκη κροκιδωτικών. Η DAF είναι αποτελεσματική όταν τα λιπαρά σταγονίδια μπορούν να συνενωθούν ή να προσκολληθούν σε φυσαλίδες και κροκίδες.

Η παρουσία απορρυπαντικών μπορεί να σταθεροποιήσει γαλακτώματα και να δυσκολέψει την απομάκρυνση λιπών. Αυτό είναι συχνό σε απόβλητα από πλύσεις εξοπλισμού. Για τον λόγο αυτό, η χρονική στιγμή της δειγματοληψίας και η παραγωγική δραστηριότητα επηρεάζουν έντονα τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Τα λίπη μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στους αναερόβιους αντιδραστήρες, επειδή η υδρόλυσή τους είναι βραδύτερη και τα λιπαρά οξέα μπορεί να προκαλέσουν παρεμπόδιση σε υψηλές συγκεντρώσεις. Στα αερόβια συστήματα, επιφανειακά στρώματα λίπους μειώνουν τη μεταφορά οξυγόνου και ευνοούν τον αφρισμό.

Η παρακολούθηση FOG πριν και μετά τη DAF είναι επομένως αναγκαία. Μία DAF που εμφανίζει μικρή μείωση COD μπορεί να έχει μεγάλη απομάκρυνση FOG, γεγονός που θα είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη σταθερότητα της εγκατάστασης. Αυτό αποτελεί βασικό συμπέρασμα και για την παρούσα εργασία.

1.22 Σχεδιαστικές παράμετροι της DAF

Ο σχεδιασμός μιας μονάδας DAF απαιτεί αξιολόγηση υδραυλικών, φυσικοχημικών και λειτουργικών παραμέτρων. Η παροχή σχεδιασμού πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τη μέση ημερήσια παροχή αλλά και τις αιχμές. Στα τυροκομεία, οι αιχμές συχνά συμπίπτουν με καθαρισμούς ή συγκεκριμένες φάσεις παραγωγής.

Η υδραυλική φόρτιση της δεξαμενής επηρεάζει τον διαθέσιμο χρόνο για προσκόλληση φυσαλίδων και άνοδο σωματιδίων. Πολύ υψηλή φόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε παράσυρση

στερεών στην εκροή. Πολύ χαμηλή φόρτιση αυξάνει τον απαιτούμενο όγκο και το κόστος εγκατάστασης χωρίς απαραίτητα αντίστοιχη βελτίωση απόδοσης.

Η πίεση κορεσμού καθορίζει την ποσότητα αέρα που διαλύεται στο νερό. Συνήθως, η αύξηση πίεσης αυξάνει την παραγωγή φυσαλίδων, αλλά συνοδεύεται από αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση. Η βέλτιστη πίεση είναι αποτέλεσμα ισορροπίας μεταξύ απόδοσης και κόστους.

Ο λόγος ανακυκλοφορίας είναι επίσης σημαντικός. Μεγαλύτερη ανακυκλοφορία μπορεί να αυξήσει την ποσότητα μικροφυσαλίδων, αλλά αυξάνει την υδραυλική επιβάρυνση και την κατανάλωση ενέργειας. Η επιλογή του λόγου πρέπει να βασίζεται σε δοκιμές πεδίου και χαρακτηριστικά αποβλήτου.

Η απομάκρυνση της επιπλέουσας ιλύος πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται επαναιώρηση. Το μηχανικό ξέστρο, η στάθμη υγρού, η ταχύτητα απομάκρυνσης και η συχνότητα καθαρισμού επηρεάζουν την τελική ποιότητα εκροής και την περιεκτικότητα στερεών στην ιλύ.

Σχεδιαστική παράμετρος	Τεχνική σημασία	Ενδεικτικός τρόπος ελέγχου
Παροχή σχεδιασμού	Καθορίζει όγκο και υδραυλική φόρτιση	Μετρήσεις παροχής και αιχμών
Πίεση κορεσμού	Επηρεάζει παραγωγή μικροφυσαλίδων	Έλεγχος μανόμετρων και αντλίας
Ανακυκλοφορία	Καθορίζει ποσότητα κορεσμένου νερού	Ρύθμιση αντλίας ανακυκλοφορίας
Χημική δόση	Επηρεάζει σχηματισμό κροκίδων	Jar-test και παρακολούθηση εκροής
Απομάκρυνση ιλύος	Αποτρέπει επαναιώρηση	Έλεγχος ξέστρου και στάθμης

Πίνακας 1.4: Σχεδιαστικές και λειτουργικές παράμετροι DAF.

Οι σημαντικότερες σχεδιαστικές και λειτουργικές παράμετροι μιας μονάδας DAF συνοψίζονται στον Πίνακα 1.4. Οι παράμετροι αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο κατά τον αρχικό σχεδιασμό όσο και κατά τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας σε πραγματικές τυροκομικές μονάδες.

1.23 Δοκιμές jar-test και βελτιστοποίηση χημικής δόσης

Πριν από την πλήρη εφαρμογή κροκιδωτικών σε βιομηχανική κλίμακα, είναι χρήσιμη η διεξαγωγή δοκιμών jar-test. Πρόκειται για εργαστηριακή δοκιμή κροκίδωσης σε δοκιμαστική κλίμακα, κατά την οποία πολλαπλά δείγματα αναδεύονται ταυτόχρονα υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Οι δοκιμές αυτές επιτρέπουν την αξιολόγηση διαφορετικών τύπων και δόσεων χημικών, διαφορετικών pH και διαφορετικών συνθηκών ανάδευσης. Σκοπός είναι η παραγωγή κροκίδων με κατάλληλο μέγεθος και μηχανική αντοχή (Pereira et al., 2020).

Σε τυροκομικά απόβλητα, η βέλτιστη δόση μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με το ημερήσιο φορτίο, την παρουσία τυρογάλακτος και τις πλύσεις. Συνεπώς, μία δόση που λειτουργεί καλά σε μία ημέρα μπορεί να είναι ανεπαρκής ή υπερβολική σε άλλη. Αυτό καθιστά χρήσιμη την περιοδική επαναξιολόγηση της δοσολογίας.

Η υπερδοσολογία χημικών μπορεί να αυξήσει το κόστος, την παραγωγή ιλύος και την αγωγιμότητα της εκροής. Μπορεί επίσης να επηρεάσει τη βιολογική επεξεργασία, ειδικά αν τα υπολείμματα χημικών φτάνουν στους αντιδραστήρες. Αντίθετα, η υποδοσολογία οδηγεί σε ανεπαρκή σχηματισμό κροκίδων και μειωμένη απόδοση DAF.

Τα οργανικά κροκιδωτικά και οι πολυηλεκτρολύτες μπορούν να βελτιώσουν την απομάκρυνση στερεών, αλλά απαιτούν προσοχή ως προς τη συγκέντρωση, τον τρόπο παρασκευής και τον χρόνο ωρίμανσης του διαλύματος. Η μη σωστή παρασκευή πολυηλεκτρολύτη μπορεί να μειώσει την απόδοση, ακόμη και αν η θεωρητική δόση είναι σωστή.

Η βελτιστοποίηση της χημικής δόσης πρέπει να βασίζεται σε πολλαπλούς δείκτες: TSS, FOG, θολότητα, COD, όγκο ιλύος και κόστος. Η αξιολόγηση μόνο του COD μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα για μια διεργασία που κυρίως απομακρύνει σωματιδιακό υλικό.

1.24 Παρακολούθηση και έλεγχος λειτουργίας εγκατάστασης

Η σταθερή λειτουργία μιας εγκατάστασης επεξεργασίας απαιτεί συστηματική παρακολούθηση. Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να καταγράφονται περιλαμβάνουν παροχή, pH, θερμοκρασία, COD, BOD₅, TSS, FOG, διαλυμένο οξυγόνο, αγωγιμότητα, παραγωγή ιλύος και κατανάλωση χημικών. Η συχνότητα των μετρήσεων εξαρτάται από το μέγεθος και τη μεταβλητότητα της μονάδας.

Στη DAF, κρίσιμοι λειτουργικοί δείκτες είναι η καθαρότητα της εκροής, το πάχος της επιπλέουσας ιλύος, η κατανάλωση χημικών, η πίεση κορεσμού και η κατάσταση των ακροφυσίων. Μείωση παραγωγής φυσαλίδων ή φραγή ακροφυσίων μπορεί να οδηγήσει σε απότομη πτώση απόδοσης.

Στους UASB, σημαντικοί δείκτες είναι το pH, η αλκαλικότητα, τα πτητικά λιπαρά οξέα, η παραγωγή βιοαερίου και η ποιότητα της κοκκώδους ιλύος. Απότομη αύξηση οργανικής φόρτισης μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση οξέων και μείωση pH, προκαλώντας αστάθεια στη μεθανογένεση.

Στη μονάδα αερόβιας επεξεργασίας απαιτείται παρακολούθηση διαλυμένου οξυγόνου, αιωρούμενων στερεών του ανάμικτου υγρού (MLSS, Mixed Liquor Suspended Solids), καθιζησιμότητας ιλύος και αφρισμού. Η παρουσία λιπών ή επιφανειοδραστικών ουσιών μπορεί να προκαλέσει αφρισμό, ο οποίος επηρεάζει τη λειτουργία και την ποιότητα εκροής.

Η δημιουργία ημερήσιων φύλλων λειτουργίας, όπως παρατηρήθηκε στη μελέτη περίπτωσης, αποτελεί καλή πρακτική. Τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν ιστορική ανάλυση, εντοπισμό τάσεων και τεκμηρίωση προβλημάτων, ενώ είναι χρήσιμα και για περιβαλλοντικούς ελέγχους.

Στάδιο	Παράμετροι παρακολούθησης	Σκοπός
Εξισορρόπηση	pH, αγωγιμότητα, θερμοκρασία, στάθμη	Έλεγχος αιχμών και ομογενοποίησης
DAF	TSS, FOG, θολότητα, πίεση, χημικά	Αξιολόγηση προεπεξεργασίας
UASB	pH, αλκαλικότητα, VFA, βιοαέριο	Έλεγχος αναερόβιας σταθερότητας
Αερόβιο	DO, MLSS, SVI, αφρισμός	Έλεγχος βιολογικής οξείδωσης
Καθίζηση	TSS εκροής, ιλύς, διαύγεια	Έλεγχος τελικού διαχωρισμού

Πίνακας 1.5: Προτεινόμενο πρόγραμμα λειτουργικής παρακολούθησης.

Για την αξιόπιστη λειτουργία μιας εγκατάστασης επεξεργασίας απαιτείται οργανωμένο πρόγραμμα παρακολούθησης. Ένα ενδεικτικό πρόγραμμα λειτουργικού ελέγχου παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.5 και συνδέει τις κρίσιμες παραμέτρους με τη συχνότητα και τον σκοπό της μέτρησης.

1.25 Συνηθισμένα λειτουργικά προβλήματα σε DAF

Ένα συνηθισμένο πρόβλημα στη DAF είναι η ανεπαρκής δημιουργία φυσαλίδων. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε χαμηλή πίεση κορεσμού, ανεπαρκή ανακυκλοφορία, φραγμένα ακροφύσια ή προβλήματα στην αντλία. Η μείωση των μικροφυσαλίδων οδηγεί σε μειωμένη προσκόλληση στα σωματίδια και χαμηλότερη απομάκρυνση.

Άλλο πρόβλημα είναι η ασταθής ή πολύ λεπτή επιφανειακή ιλύς. Αν οι κροκίδες είναι ασθενείς, μπορεί να διασπώνται κατά την άνοδο ή την απομάκρυνση. Αν είναι υπερβολικά βαριές, μπορεί να καθιζάνουν αντί να επιπλέουν. Η ρύθμιση κροκιδωτικού, pH και ανάδευσης είναι κρίσιμη.

Η παρουσία αφρού μπορεί να έχει διπλή ερμηνεία. Ένας ελεγχόμενος αφρός μπορεί να συνδέεται με επιτυχή επίπλευση, αλλά υπερβολικός αφρισμός μπορεί να υποδηλώνει επιφανειοδραστικές ουσίες, απορρυπαντικά ή υπερβολική αεροποίηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρειάζεται έλεγχος των ρευμάτων πλύσης.

Η παράσυρση στερεών στην εκροή μπορεί να οφείλεται σε υψηλή υδραυλική φόρτιση ή σε κακή λειτουργία του συστήματος απομάκρυνσης ιλύος. Αν η επιπλέον ιλύς δεν αφαιρείται έγκαιρα, μπορεί να επαναιωρηθεί και να αυξήσει την θολότητα της εκροής.

Η αντιμετώπιση προβλημάτων DAF απαιτεί συστηματική προσέγγιση. Δεν αρκεί η αύξηση χημικής δόσης ως γενική λύση. Πρέπει να εξετάζονται η παροχή, το pH, η πίεση, η ανακυκλοφορία, το είδος αποβλήτου και η κατάσταση μηχανολογικού εξοπλισμού.

1.26 Σχέση COD, BOD₅ και βιοαποδομησιμότητας

Το COD και το BOD₅ είναι δύο διαφορετικοί αλλά συμπληρωματικοί δείκτες οργανικού φορτίου. Το COD μετρά το συνολικό χημικά οξειδώσιμο φορτίο, ενώ το BOD₅ μετρά το κλάσμα που καταναλώνεται βιολογικά σε πέντε ημέρες. Η σχέση BOD₅/COD χρησιμοποιείται συχνά ως ένδειξη βιοαποδομησιμότητας.

Στα γαλακτοκομικά απόβλητα, η βιοαποδομησιμότητα είναι συνήθως υψηλή, επειδή τα κύρια οργανικά συστατικά, όπως λακτόζη και πρωτεΐνες, μπορούν να αποδομηθούν από μικροοργανισμούς. Αυτό εξηγεί γιατί οι βιολογικές μέθοδοι είναι βασικές στην επεξεργασία τους.

Ωστόσο, υψηλή βιοαποδομησιμότητα δεν σημαίνει αυτόματα εύκολη λειτουργία. Πολύ υψηλές συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου μπορούν να υπερφορτώσουν τους αντιδραστήρες, να προκαλέσουν οξίνιση και να οδηγήσουν σε αστάθεια. Η προεπεξεργασία και η εξισορρόπηση είναι απαραίτητες για τη σταδιακή τροφοδότηση.

Η DAF επηρεάζει κυρίως το σωματιδιακό μέρος του COD. Αν το μεγαλύτερο μέρος του COD είναι διαλυμένο, η μείωση COD θα είναι περιορισμένη. Αυτό δεν σημαίνει ότι το απόβλητο δεν είναι βιοαποδομήσιμο, αλλά ότι η απομάκρυνσή του απαιτεί βιολογική και όχι απλώς φυσικοχημική διεργασία.

Για την πλήρη αξιολόγηση μιας εγκατάστασης, η ταυτόχρονη μέτρηση COD και BOD₅ επιτρέπει καλύτερη κατανόηση του οργανικού φορτίου. Σε συνδυασμό με TSS και FOG, δίνει σαφέστερη εκτίμηση για το ποιο μέρος του φορτίου απομακρύνεται από τη DAF και ποιο από τη βιολογική επεξεργασία.

1.27 Ενεργειακές και οικονομικές παράμετροι

Η επιλογή τεχνολογίας επεξεργασίας δεν βασίζεται μόνο στην περιβαλλοντική απόδοση αλλά και στο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Η DAF απαιτεί ενέργεια για αντλίες, συμπίεση ή κορεσμό αέρα και συστήματα απομάκρυνσης ιλύος. Επιπλέον, μπορεί να απαιτεί χημικά κροκίδωσης και πολυηλεκτρολύτες.

Το κόστος χημικών μπορεί να είναι σημαντικό, ιδιαίτερα όταν η δόση δεν έχει βελτιστοποιηθεί. Για τον λόγο αυτό, η οικονομική αξιολόγηση πρέπει να συνδέεται με τεχνικούς δείκτες απόδοσης. Η χαμηλότερη δυνατή δόση που επιτυγχάνει ικανοποιητική απομάκρυνση TSS και FOG είναι συνήθως προτιμότερη από την υπερδοσολογία.

Η αναερόβια επεξεργασία μπορεί να προσφέρει ενεργειακό όφελος μέσω παραγωγής βιοαερίου. Σε μονάδες υψηλού οργανικού φορτίου, η ανάκτηση ενέργειας μπορεί να αντισταθμίσει μέρος του κόστους λειτουργίας. Ωστόσο, απαιτείται σωστός σχεδιασμός και αξιοποίηση του βιοαερίου.

Η αερόβια επεξεργασία έχει υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση λόγω αερισμού. Αν η DAF και ο UASB μειώνουν το φορτίο που φτάνει στη μονάδα αερόβιας επεξεργασίας, μπορεί να μειωθεί η απαίτηση αερισμού και να βελτιωθεί η συνολική οικονομία της εγκατάστασης.

Η οικονομική αξιολόγηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη και το κόστος αστοχίας. Φραγές, αφρισμός, κακή καθίζηση και υπερβάσεις ορίων μπορούν να έχουν σημαντικό κόστος. Έτσι, μια DAF που μειώνει λειτουργικά προβλήματα μπορεί να είναι συμφέρουσα, ακόμη και αν η άμεση μείωση COD φαίνεται μικρή.

1.28 Ποιότητα εκροής και δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης

Η τελική ποιότητα εκροής καθορίζει τη δυνατότητα διάθεσης ή επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού. Για βιομηχανικά απόβλητα τροφίμων, η επαναχρησιμοποίηση μπορεί να αφορά μη κρίσιμες χρήσεις, όπως πλύσεις εξωτερικών χώρων ή άρδευση, εφόσον πληρούνται οι σχετικές απαιτήσεις ποιότητας και ασφάλειας.

Η επαναχρησιμοποίηση σε επαφή με τρόφιμα είναι ιδιαίτερα αυστηρή και συνήθως δεν αποτελεί άμεσο στόχο για μικρές μονάδες. Ωστόσο, η μείωση κατανάλωσης φρέσκου νερού και

η επαναχρησιμοποίηση σε βοηθητικές χρήσεις μπορεί να ενταχθεί σε στρατηγική κυκλικής οικονομίας.

Για να εξεταστεί η επαναχρησιμοποίηση, πρέπει να παρακολουθούνται όχι μόνο COD και BOD₅ αλλά και μικροβιολογικές παράμετροι, θρεπτικά, αγωγιμότητα, άλατα και υπολειμματικά χημικά. Ιδιαίτερα τα απόβλητα τυροκομείων μπορεί να έχουν αυξημένη αλατότητα λόγω άλμης.

Η DAF μπορεί να βελτιώσει την αισθητική ποιότητα της εκροής μειώνοντας θολότητα, στερεά και λίπη. Παρ' όλα αυτά, δεν εξασφαλίζει μόνη της εκροή κατάλληλη για επαναχρησιμοποίηση. Χρειάζεται συνδυασμός με βιολογική επεξεργασία και, όπου απαιτείται, τριτοβάθμιες διεργασίες.

Η μελλοντική αξιολόγηση μιας τυροκομικής μονάδας θα μπορούσε να περιλαμβάνει ισοζύγιο νερού και εκτίμηση δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης. Αυτό θα ενίσχυε την περιβαλλοντική απόδοση και θα μείωνε την εξάρτηση από υδατικούς πόρους.

1.29 Υγιεινή, ασφάλεια και εργαστηριακές πρακτικές

Η ανάλυση αποβλήτων σε εργαστηριακό περιβάλλον απαιτεί τήρηση κανόνων υγιεινής και ασφάλειας. Τα δείγματα αποβλήτων μπορεί να περιέχουν μικροοργανισμούς, οργανικό φορτίο και χημικά κατάλοιπα. Η χρήση γαντιών, προστατευτικών γυαλιών και εργαστηριακής ποδιάς είναι απαραίτητη.

Ο προσδιορισμός COD με φιαλίδια διχρωμικού απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, διότι τα αντιδραστήρια περιέχουν ισχυρά οξειδωτικά και οξέα. Τα φιαλίδια θερμαίνονται σε υψηλή θερμοκρασία, επομένως υπάρχει κίνδυνος εγκαύματος ή έκθεσης σε ατμούς σε περίπτωση κακού χειρισμού.

Η διαχείριση των χρησιμοποιημένων φιαλιδίων πρέπει να γίνεται ως επικίνδυνο εργαστηριακό απόβλητο και σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και τους κανονισμούς της μονάδας. Δεν πρέπει να απορρίπτονται στο κοινό δίκτυο αποχέτευσης.

Στη βαρυμετρική μέθοδο TSS, η ακρίβεια εξαρτάται από τον σωστό χειρισμό των φίλτρων. Τα φίλτρα πρέπει να ψύχονται σε ξηραντήριο, να ζυγίζονται γρήγορα και να αποφεύγεται η επιμόλυνση ή η απορρόφηση υγρασίας. Μικρές μεταβολές μάζας μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το αποτέλεσμα.

Οι εργαστηριακές πρακτικές συνδέονται άμεσα με την αξιοπιστία των δεδομένων. Εσφαλμένη αραίωση, ανεπαρκής ομογενοποίηση δείγματος ή κακή επιλογή εύρους μέτρησης μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένη εκτίμηση της απόδοσης της εγκατάστασης.

1.30 Ισοζύγιο ρύπων και ερμηνεία δεδομένων εγκατάστασης

Η ερμηνεία δεδομένων από πραγματική εγκατάσταση πρέπει να λαμβάνει υπόψη το ισοζύγιο ρύπων. Η σύγκριση δύο σημείων δειγματοληψίας είναι αξιόπιστη όταν τα δείγματα αντιστοιχούν στο ίδιο υδραυλικό πακέτο νερού και όταν λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος παραμονής. Σε αντίθετη περίπτωση, οι τιμές μπορεί να φαίνονται αντιφατικές.

Σε εγκαταστάσεις με δεξαμενές, ανακυκλοφορίες και διαφορετικούς χρόνους παραμονής, η τιμή στην έξοδο ενός σταδίου μπορεί να αντιστοιχεί σε απόβλητο που εισήλθε αρκετές ώρες νωρίτερα. Επομένως, η ταυτόχρονη δειγματοληψία σε όλα τα σημεία δεν αποτυπώνει πάντα την πραγματική απόδοση ενός σταδίου.

Για πληρέστερη ανάλυση απαιτείται καταγραφή παροχής. Η συγκέντρωση σε mg/L δεν αρκεί για υπολογισμό συνολικού φορτίου αν δεν είναι γνωστή η παροχή. Το φορτίο υπολογίζεται ως συγκέντρωση επί παροχή και εκφράζεται συχνά σε kg COD/ημέρα.

Η DAF μπορεί να μειώνει το φορτίο στερεών, ακόμη και αν η συγκέντρωση COD δεν μειώνεται εντυπωσιακά. Αν όμως η παροχή μεταβάλλεται, η εκτίμηση της πραγματικής μάζας ρύπου που απομακρύνεται απαιτεί δεδομένα παροχής. Αυτό αποτελεί σημαντική κατεύθυνση για μελλοντική εργασία.

Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε συγκεντρώσεις COD και όχι σε πλήρες ισοζύγιο μάζας. Η προσέγγιση είναι επαρκής για προκαταρκτική αξιολόγηση, αλλά η βιομηχανική βελτιστοποίηση θα απαιτούσε πιο αναλυτικό πρόγραμμα παρακολούθησης.

1.31 Τεχνική σημασία της μελέτης περίπτωσης για ελληνικές τυροκομικές μονάδες

Οι ελληνικές τυροκομικές μονάδες παρουσιάζουν συχνά μεγάλη ποικιλία ως προς το μέγεθος, την εποχικότητα, τον εξοπλισμό και τη δυνατότητα επένδυσης σε περιβαλλοντικές τεχνολογίες. Μικρές και μεσαίες μονάδες μπορεί να αντιμετωπίζουν περιορισμούς σε χώρο, κεφάλαιο, τεχνικό προσωπικό και εργαστηριακή υποστήριξη.

Η μελέτη πραγματικής μονάδας είναι επομένως σημαντική, διότι δείχνει πώς εφαρμόζονται οι τεχνολογίες στην πράξη. Η ύπαρξη DAF πριν από UASB και αερόβια επεξεργασία δείχνει μια τεχνικά ολοκληρωμένη προσέγγιση, προσαρμοσμένη σε απόβλητα με υψηλό οργανικό φορτίο.

Η περιορισμένη μείωση COD στη DAF δεν πρέπει να θεωρηθεί αποτυχία της τεχνολογίας. Αντίθετα, αναδεικνύει την ανάγκη σωστής επιλογής κριτηρίων αξιολόγησης. Για ελληνικές μονάδες, όπου συχνά η πρακτική λειτουργία έχει μεγαλύτερη σημασία από τον θεωρητικό σχεδιασμό, αυτή η διάκριση είναι κρίσιμη.

Η εργασία μπορεί να λειτουργήσει ως τεχνικό παράδειγμα για παρόμοιες μονάδες. Δείχνει ότι η DAF πρέπει να συνοδεύεται από εξισορρόπηση, βιολογική επεξεργασία και παρακολούθηση. Δείχνει επίσης ότι η μείωση ρύπανσης στην πηγή παραμένει βασικό μέτρο.

Η σύνδεση θεωρητικού υλικού και πραγματικών μετρήσεων αυξάνει την πρακτική αξία της ΜΔΕ. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί για μελλοντικές βελτιώσεις, όπως πλήρης παρακολούθηση TSS/FOG, οικονομοτεχνική ανάλυση και συγκριτική μελέτη διαφορετικών τυροκομείων.

1.32 Αναλυτική προσέγγιση της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μία σύνθετη βιολογική διεργασία στην οποία διαφορετικές ομάδες μικροοργανισμών συνεργάζονται για τη μετατροπή του οργανικού φορτίου σε βιοαέριο. Η υδρόλυση διασπά σύνθετα μόρια όπως πρωτεΐνες και λίπη σε απλούστερες ενώσεις. Η οξυγένεση μετατρέπει τα προϊόντα υδρόλυσης σε οργανικά οξέα, αλκοόλες και διοξείδιο του άνθρακα.

Η οξικογένεση και η μεθανογένεση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στάδια. Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί έχουν μικρότερους ρυθμούς ανάπτυξης και είναι ευαίσθητοι σε μεταβολές pH, τοξικότητα, υψηλή οργανική φόρτιση και συσσώρευση λιπαρών οξέων. Για τον λόγο αυτό, η σταθερή τροφοδοσία είναι κρίσιμη.

Στα τυροκομικά απόβλητα η λακτόζη αποδομείται σχετικά εύκολα, αλλά τα λίπη και οι πρωτεΐνες μπορεί να προκαλέσουν πιο σύνθετη συμπεριφορά. Η υπερβολική είσοδος λιπών στον αναερόβιο αντιδραστήρα μπορεί να δημιουργήσει λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας, τα οποία σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι πιθανό να επηρεάσουν αρνητικά τη βιομάζα.

Η DAF μειώνει μέρος αυτού του κινδύνου, επειδή απομακρύνει λιπαρά και σωματιδιακά υλικά πριν την αναερόβια επεξεργασία. Έτσι, η λειτουργία του UASB γίνεται πιο ομαλή και το οργανικό φορτίο που εισέρχεται έχει μεγαλύτερο ποσοστό διαλυμένων και πιο ομογενοποιημένων ενώσεων.

Η επιτυχία της αναερόβιας επεξεργασίας εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής, την οργανική φόρτιση, τη θερμοκρασία, την ανάδευση, την κατακράτηση βιομάζας και την απομάκρυνση του βιοαερίου. Σε βιομηχανικές μονάδες απαιτείται σταθερό πρόγραμμα παρακολούθησης ώστε να αποφεύγονται απότομες αστοχίες.

1.33 Παραγωγή και αξιοποίηση βιοαερίου

Η αναερόβια επεξεργασία υψηλού οργανικού φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή βιοαερίου. Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ μπορεί να περιέχει υδρόθειο και υδρατμούς. Η ενεργειακή αξιοποίηση του μεθανίου μπορεί να μειώσει το ενεργειακό αποτύπωμα της εγκατάστασης.

Σε τυροκομικές μονάδες, η παραγωγή βιοαερίου εξαρτάται από το διαθέσιμο βιοαποδομήσιμο οργανικό φορτίο. Η παρουσία τυρογάλακτος μπορεί να αυξήσει σημαντικά το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου, αλλά η ανεξέλεγκτη τροφοδότηση μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια. Απαιτείται επομένως ισορροπία ανάμεσα στην ενεργειακή αξιοποίηση και στη λειτουργική ασφάλεια.

Το βιοαέριο μπορεί να αξιοποιηθεί σε λέβητες, μονάδες συμπαραγωγής ή άλλες θερμικές χρήσεις. Πριν από την αξιοποίηση μπορεί να χρειαστεί αποθείωση και αφύγρανση. Η παρουσία υδρόθειου προκαλεί διάβρωση και πρέπει να ελέγχεται.

Για μικρές μονάδες, η οικονομική βιωσιμότητα της αξιοποίησης βιοαερίου εξαρτάται από την ποσότητα και τη σταθερότητα παραγωγής. Αν η παραγωγή είναι μικρή ή διακυμαινόμενη, μπορεί να μην δικαιολογείται πολύπλοκος εξοπλισμός. Ωστόσο, ακόμη και η απλή καύση με ασφαλή τρόπο μπορεί να μειώσει οσμές και εκπομπές μεθανίου.

Η σύνδεση DAF και αναερόβιας επεξεργασίας είναι σημαντική και από ενεργειακή άποψη. Αν η DAF απομακρύνει υπερβολικά μεγάλο μέρος βιοαποδομήσιμου φορτίου, μπορεί να μειώσει το δυναμικό βιοαερίου. Αν όμως απομακρύνει κυρίως λίπη και στερεά που προκαλούν

προβλήματα, βελτιώνει τη σταθερότητα χωρίς απαραίτητα να μειώνει ουσιαστικά την ενεργειακή απόδοση.

1.34 Απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών

Τα τυροκομικά απόβλητα περιέχουν άζωτο και φώσφορο, αν και η συγκέντρωσή τους μπορεί να είναι χαμηλότερη σε σχέση με το οργανικό φορτίο. Το άζωτο προέρχεται κυρίως από πρωτεΐνες και αμινοξέα, ενώ ο φώσφορος από φυσικά συστατικά του γάλακτος και από ορισμένα καθαριστικά ή πρόσθετα.

Η απομάκρυνση αζώτου σε βιολογικές εγκαταστάσεις απαιτεί συνήθως νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Η νιτροποίηση είναι αερόβια διεργασία και απαιτεί επαρκές διαλυμένο οξυγόνο, ενώ η απονιτροποίηση πραγματοποιείται σε ανοξικές συνθήκες με διαθέσιμο οργανικό άνθρακα. Η ισορροπία μεταξύ των ζωνών είναι κρίσιμη.

Η απομάκρυνση φωσφόρου μπορεί να γίνει βιολογικά ή χημικά. Η χημική κατακρήμνιση με άλατα σιδήρου ή αργιλίου μπορεί να συνδυαστεί με φυσικοχημικές διεργασίες. Αν τα χημικά προστεθούν πριν από τη DAF, μέρος του φωσφόρου μπορεί να απομακρυνθεί μαζί με τις κροκίδες.

Η DAF δεν είναι κυρίως τεχνολογία απομάκρυνσης θρεπτικών, αλλά μπορεί να συμβάλει έμμεσα απομακρύνοντας σωματιδιακά κλάσματα που περιέχουν άζωτο ή φώσφορο. Η πραγματική συμβολή εξαρτάται από τη μορφή των θρεπτικών στοιχείων στο απόβλητο.

Σε περιοχές όπου ο τελικός αποδέκτης είναι ευαίσθητος σε ευτροφισμό, η παρακολούθηση αζώτου και φωσφόρου είναι σημαντική. Η αξιολόγηση μιας εγκατάστασης μόνο με COD και TSS μπορεί να είναι ανεπαρκής, αν υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις για θρεπτικά.

1.35 Τεχνολογίες μεμβρανών και υβριδικά συστήματα

Οι τεχνολογίες μεμβρανών περιλαμβάνουν μικροδιήθηση, υπερδιήθηση, νανοδιήθηση και αντίστροφη όσμωση. Στον γαλακτοκομικό κλάδο χρησιμοποιούνται τόσο για παραγωγικούς σκοπούς, όπως συμπύκνωση πρωτεϊνών ορού, όσο και για επεξεργασία αποβλήτων. Η απόδοση τους είναι υψηλή, αλλά συνοδεύεται από τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις (Fard et al., 2020; Nagappan et al., 2018).

Η μικροδιήθηση και η υπερδιήθηση μπορούν να απομακρύνουν αιωρούμενα και κολλοειδή συστατικά, ενώ η νανοδιήθηση και η αντίστροφη όσμωση μπορούν να συγκρατήσουν μικρότερα

μόρια και άλατα. Σε απόβλητα υψηλού COD, οι μεμβράνες μπορούν να παράγουν υψηλής ποιότητας εκροή, αλλά αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της μεμβρανικής έμφραξης (fouling), δηλαδή της συσσώρευσης υλικού στην επιφάνεια ή στους πόρους της μεμβράνης, η οποία μειώνει τη διαπερατότητά της.

Η προεπεξεργασία με DAF πριν από μεμβράνες μπορεί να μειώσει το fouling απομακρύνοντας λίπη και στερεά. Αυτό αποτελεί παράδειγμα υβριδικού συστήματος, όπου κάθε τεχνολογία χρησιμοποιείται στο κατάλληλο σημείο της γραμμής. Η DAF μειώνει το σωματιδιακό φορτίο και οι μεμβράνες αναλαμβάνουν λεπτότερο διαχωρισμό.

Το κόστος των μεμβρανών, η ανάγκη καθαρισμών και η διαχείριση του συμπυκνώματος αποτελούν περιορισμούς για μικρές μονάδες. Ωστόσο, σε μονάδες που επιδιώκουν επαναχρησιμοποίηση νερού ή ανάκτηση συστατικών, οι μεμβράνες μπορούν να έχουν σημαντικό ρόλο.

Σε σύγκριση με τη DAF, οι μεμβράνες παρέχουν υψηλότερο βαθμό διαχωρισμού, αλλά είναι πιο ευαίσθητες στη σύσταση της τροφοδοσίας. Η επιλογή πρέπει να βασίζεται σε τεχνοοικονομική ανάλυση και όχι μόνο σε θεωρητική απόδοση.

1.36 Προηγμένες οξειδωτικές και χημικές διεργασίες

Οι προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες χρησιμοποιούν ισχυρά οξειδωτικά είδη, όπως ρίζες υδροξυλίου, για την αποδόμηση οργανικών ενώσεων. Παραδείγματα είναι οζονισμός, Fenton, UV/H₂O₂ και φωτοκαταλυτικές διεργασίες. Οι μέθοδοι αυτές είναι χρήσιμες για δύσκολα βιοαποδομήσιμες ενώσεις, αλλά έχουν συχνά υψηλό κόστος.

Στα τυροκομικά απόβλητα, το οργανικό φορτίο είναι γενικά βιοαποδομήσιμο. Επομένως, η χρήση προηγμένων οξειδωτικών διεργασιών ως κύρια μέθοδος επεξεργασίας δεν είναι συνήθως η οικονομικότερη επιλογή. Μπορεί όμως να εφαρμοστεί σε ειδικές περιπτώσεις, όπως σε τελική επεξεργασία ή σε ρεύματα με δύσκολα συστατικά.

Η χημική οξείδωση μπορεί να μειώσει COD, αλλά συνοδεύεται από κατανάλωση αντιδραστηρίων και πιθανή παραγωγή παραπροϊόντων. Η εφαρμογή της απαιτεί προσοχή ως προς το pH, την αλκαλικότητα και τη σύσταση του αποβλήτου. Σε υψηλά οργανικά φορτία, οι απαιτήσεις οξειδωτικού μπορεί να είναι πολύ μεγάλες.

Η DAF διαφέρει από τις οξειδωτικές διεργασίες, διότι δεν μετατρέπει χημικά το οργανικό φορτίο αλλά το διαχωρίζει φυσικά. Αυτό εξηγεί γιατί το COD μπορεί να μειώνεται λίγο όταν το οργανικό φορτίο είναι διαλυμένο. Κάθε τεχνολογία πρέπει να αξιολογείται με βάση τον μηχανισμό της.

Σε ολοκληρωμένες γραμμές επεξεργασίας, οι προηγμένες διεργασίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν μετά τη βιολογική επεξεργασία για βελτίωση χρώματος, οσμών ή μικρορυπαντών. Για την παρούσα μελέτη, η κύρια έμφαση παραμένει στη DAF ως προεπεξεργασία.

1.37 Φυσικά συστήματα και τεχνητοί υγρότοποι

Οι τεχνητοί υγρότοποι και άλλα φυσικά συστήματα επεξεργασίας χρησιμοποιούν φυτά, μικροοργανισμούς και φυσικές διεργασίες για την απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών. Μπορούν να είναι κατάλληλα για μικρές παροχές ή ως τελικό στάδιο βελτίωσης εκροής.

Το πλεονέκτημά τους είναι το χαμηλό λειτουργικό κόστος και η απλή λειτουργία. Ωστόσο, απαιτούν μεγάλη έκταση και επηρεάζονται από κλιματικές συνθήκες. Για απόβλητα υψηλού οργανικού φορτίου, όπως τυροκομικά, απαιτείται σημαντική προεπεξεργασία πριν την είσοδο σε υγρότοπο.

Η DAF μπορεί να συμβάλει σε τέτοια συστήματα μειώνοντας TSS και λίπη, τα οποία θα μπορούσαν να φράζουν το υπόστρωμα ή να δημιουργήσουν αναερόβιες ζώνες. Έτσι, η φυσικοχημική προεπεξεργασία είναι χρήσιμη ακόμα και όταν το τελικό στάδιο είναι φυσικό.

Σε αγροτικές περιοχές, οι φυσικές μέθοδοι μπορεί να έχουν πρακτικό ενδιαφέρον, ιδιαίτερα όταν υπάρχει διαθέσιμος χώρος και χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή τους πρέπει να σχεδιάζεται με βάση πραγματικά φορτία και όχι μόνο μέσες συγκεντρώσεις.

Η δυνατότητα ένταξης φυσικών συστημάτων σε τυροκομικές μονάδες συνδέεται επίσης με τη διαχείριση οσμών και την κοινωνική αποδοχή. Κακή προεπεξεργασία μπορεί να οδηγήσει σε οχλήσεις, επομένως η DAF και η εξισορρόπηση παραμένουν σημαντικές.

1.38 Δείκτες αξιολόγησης περιβαλλοντικής επίδοσης

Η αξιολόγηση μιας εγκατάστασης επεξεργασίας δεν πρέπει να περιορίζεται στις συγκεντρώσεις εκροής. Χρήσιμοι δείκτες είναι το φορτίο COD ανά τόνο επεξεργασμένου γάλακτος, η κατανάλωση νερού ανά μονάδα προϊόντος, η κατανάλωση ενέργειας, η κατανάλωση χημικών και η παραγωγή ιλύος.

Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν σύγκριση μεταξύ μονάδων διαφορετικού μεγέθους. Μια μονάδα με χαμηλή συγκέντρωση COD αλλά πολύ μεγάλη κατανάλωση νερού μπορεί να μην είναι περιβαλλοντικά καλύτερη από μια μονάδα με υψηλότερη συγκέντρωση αλλά χαμηλότερο συνολικό φορτίο.

Για την DAF, κατάλληλοι δείκτες είναι η απομάκρυνση TSS, FOG και θολότητας, η κατανάλωση χημικών ανά kg απομακρυνόμενων στερεών και η παραγωγή ιλύος. Η χρήση της ποσοστιαίας μείωσης COD ως μοναδικού δείκτη μπορεί να είναι παραπλανητική.

Η συνεχής παρακολούθηση δεικτών επιτρέπει την αξιολόγηση βελτιώσεων. Για παράδειγμα, αν μειωθούν οι απώλειες γάλακτος στην παραγωγή, θα πρέπει να μειωθεί το φορτίο εισόδου. Αν βελτιστοποιηθεί η DAF, θα πρέπει να μειωθούν τα TSS και τα λίπη στην έξοδο.

Η εισαγωγή δεικτών περιβαλλοντικής επίδοσης συνδέεται με συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης και εταιρική υπευθυνότητα. Ακόμη και σε μικρές μονάδες, απλοί δείκτες μπορούν να βελτιώσουν τη λήψη αποφάσεων.

1.39 Διαχείριση κινδύνων και αστοχιών

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων πρέπει να διαθέτουν σχέδιο αντιμετώπισης αστοχιών. Πιθανά συμβάντα περιλαμβάνουν διακοπή ρεύματος, βλάβη αντλίας, υπερχειλίση δεξαμενής, αστοχία συστήματος DAF, τοξική εισροή από καθαριστικά ή απότομη αύξηση οργανικού φορτίου.

Η διακοπή λειτουργίας της DAF μπορεί να επιτρέψει την είσοδο αυξημένων λιπών και στερεών στους βιολογικούς αντιδραστήρες. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αφρισμό, φραγές ή μείωση απόδοσης. Για τον λόγο αυτό, η συντήρηση αντλιών, ακροφυσίων, ξέστρων και συστήματος χημικών είναι κρίσιμη.

Οι δεξαμενές εξισορρόπησης μπορούν να λειτουργήσουν ως ασφαλιστική δικλείδα, παρέχοντας χρόνο αντίδρασης σε περίπτωση αιχμής ή βλάβης. Ωστόσο, πρέπει να έχουν επαρκή όγκο και σωστή διαχείριση στάθμης. Η υπερχειλίση ισχυρά φορτισμένων αποβλήτων αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό κίνδυνο.

Η καταγραφή συμβάντων και η ανάλυση αιτιών βοηθούν στη βελτίωση της λειτουργίας. Αν επαναλαμβάνεται αφρισμός μετά από συγκεκριμένες πλύσεις, μπορεί να χρειαστεί αλλαγή καθαριστικού ή τροποποίηση του προγράμματος απόρριψης.

Η διαχείριση κινδύνων δεν είναι μόνο τεχνικό θέμα αλλά και οργανωτικό. Το προσωπικό πρέπει να γνωρίζει τα κρίσιμα σημεία, τις ενέργειες σε περίπτωση συναγερμού και τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει μια παραγωγική πρακτική στην επεξεργασία.

1.40 Εκπαίδευση προσωπικού και λειτουργική κουλτούρα

Η επιτυχία μιας εγκατάστασης επεξεργασίας δεν εξαρτάται μόνο από τον εξοπλισμό αλλά και από τους ανθρώπους που τη λειτουργούν. Η εκπαίδευση προσωπικού στην παραγωγή και στην επεξεργασία αποβλήτων είναι απαραίτητη, επειδή οι ενέργειες στην παραγωγή επηρεάζουν άμεσα το φορτίο της εγκατάστασης.

Οι εργαζόμενοι πρέπει να κατανοούν ότι η απόρριψη γάλακτος, τυροπήγματος ή τυρογάλακτος στο δίκτυο αποβλήτων έχει περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος. Η απλή ενημέρωση για το COD και το BOD μπορεί να βοηθήσει στη σύνδεση καθημερινών πρακτικών με λειτουργικά προβλήματα.

Το προσωπικό της εγκατάστασης επεξεργασίας πρέπει να εκπαιδεύεται στην αναγνώριση μη κανονικών καταστάσεων, όπως αλλαγή χρώματος, έντονος αφρισμός, οσμές, μείωση φυσαλίδων DAF ή ασυνήθιστη ιλύς. Η έγκαιρη αναγνώριση μπορεί να αποτρέψει μεγαλύτερα προβλήματα.

Η λειτουργική κουλτούρα περιλαμβάνει τήρηση ημερολογίων, τακτικές μετρήσεις, καθαριότητα χώρων, προληπτική συντήρηση και επικοινωνία μεταξύ παραγωγής και επεξεργασίας. Σε πολλές μονάδες, η έλλειψη επικοινωνίας οδηγεί σε αιχμές που θα μπορούσαν να αποφευχθούν.

Η τεχνολογία DAF, όπως και κάθε τεχνολογία, αποδίδει καλύτερα όταν λειτουργεί σε πλαίσιο οργανωμένης διαχείρισης. Η εκπαίδευση και η συνεργασία αποτελούν άυλους αλλά καθοριστικούς παράγοντες περιβαλλοντικής απόδοσης.

1.41 Ψηφιακή παρακολούθηση και αυτοματισμοί

Οι σύγχρονες εγκαταστάσεις επεξεργασίας μπορούν να επωφεληθούν από συστήματα αυτοματισμού και ψηφιακής παρακολούθησης. Αισθητήρες pH, αγωγιμότητας, στάθμης, παροχής και διαλυμένου οξυγόνου μπορούν να παρέχουν συνεχή στοιχεία λειτουργίας και να μειώνουν την εξάρτηση από χειροκίνητες μετρήσεις.

Στη DAF, αισθητήρες πίεσης και παροχής ανακυκλοφορίας μπορούν να βοηθήσουν στον έλεγχο της παραγωγής φυσαλίδων. Η αυτόματη δοσομέτρηση χημικών με βάση παροχή ή θολότητα μπορεί να μειώσει την υπερδοσολογία και να βελτιώσει τη σταθερότητα.

Η συλλογή δεδομένων σε ψηφιακή μορφή επιτρέπει ανάλυση τάσεων. Για παράδειγμα, μπορεί να διαπιστωθεί αν συγκεκριμένες ημέρες ή ώρες συνδέονται με αυξημένο COD ή αφρισμό. Αυτό βοηθά στη σύνδεση παραγωγικών πρακτικών με την απόδοση της επεξεργασίας.

Η πλήρης αυτοματοποίηση μπορεί να είναι δαπανηρή για μικρές μονάδες, αλλά ακόμη και απλές λύσεις, όπως ηλεκτρονικά ημερολόγια και βασικοί αισθητήρες, μπορούν να προσφέρουν ουσιαστική βελτίωση. Η επιλογή πρέπει να είναι ανάλογη του μεγέθους και της τεχνικής δυνατότητας της μονάδας.

Η ψηφιακή παρακολούθηση δεν αντικαθιστά την τεχνική κρίση. Τα δεδομένα πρέπει να ερμηνεύονται από εκπαιδευμένο προσωπικό και να συνδυάζονται με επιτόπια παρατήρηση, εργαστηριακές αναλύσεις και συντήρηση εξοπλισμού.

1.42 Κοινωνική διάσταση και σχέση με την τοπική κοινωνία

Οι τυροκομικές μονάδες συχνά λειτουργούν σε αγροτικές ή ημιαγροτικές περιοχές και συνδέονται στενά με την τοπική οικονομία. Παράλληλα, οι οσμές, οι υπερχειλίσεις ή η ορατή ρύπανση μπορούν να δημιουργήσουν κοινωνικές αντιδράσεις. Η σωστή επεξεργασία αποβλήτων είναι επομένως ζήτημα και κοινωνικής αποδοχής.

Η διαφάνεια στη λειτουργία και η τήρηση περιβαλλοντικών όρων ενισχύουν την εμπιστοσύνη. Μια μονάδα που επενδύει σε επεξεργασία αποβλήτων, παρακολούθηση και βελτίωση λειτουργίας δείχνει υπευθυνότητα απέναντι στην τοπική κοινωνία.

Η κακή διαχείριση αποβλήτων μπορεί να επηρεάσει όχι μόνο το περιβάλλον αλλά και τη φήμη των παραγόμενων προϊόντων. Σε προϊόντα υψηλής ποιότητας και τοπικής ταυτότητας, η περιβαλλοντική επίδοση μπορεί να συνδεθεί με τη φήμη της επιχείρησης.

Η DAF και οι υπόλοιπες τεχνολογίες επεξεργασίας δεν είναι ορατές στον καταναλωτή, αλλά συμβάλλουν ουσιαστικά στη βιωσιμότητα της παραγωγής. Η σύνδεση ποιότητας προϊόντος και περιβαλλοντικής υπευθυνότητας αποκτά ολοένα μεγαλύτερη σημασία.

Η παρούσα εργασία, εστιάζοντας σε πραγματική μονάδα, αναδεικνύει ότι η περιβαλλοντική διαχείριση δεν είναι θεωρητικό ζήτημα αλλά καθημερινή πρακτική με τεχνικές, οικονομικές και κοινωνικές προεκτάσεις.

1.43 Ολοκληρωμένη προσέγγιση σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός μιας εγκατάστασης επεξεργασίας τυροκομικών αποβλήτων πρέπει να ξεκινά από την παραγωγή και όχι από την έξοδο του αποχετευτικού αγωγού. Πρέπει να αποτυπωθούν οι ποσότητες γάλακτος, τα προϊόντα, οι πλύσεις, οι απώλειες, το τυρόγαλο, οι άλμες και οι περίοδοι αιχμής.

Στη συνέχεια απαιτείται χαρακτηρισμός αποβλήτων με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Μία μόνο μέτρηση δεν επαρκεί για σχεδιασμό, επειδή η μεταβλητότητα μπορεί να είναι μεγάλη. Οι τιμές COD, BOD₅, TSS, FOG, pH και παροχής πρέπει να εξετάζονται σε συνδυασμό.

Η επιλογή DAF πρέπει να βασίζεται στη μορφή του ρυπαντικού φορτίου. Αν το πρόβλημα είναι κυρίως λίπη και στερεά, η DAF μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμη. Αν το φορτίο είναι κυρίως διαλυμένη λακτόζη, απαιτείται βιολογική επεξεργασία και η DAF λειτουργεί επικουρικά.

Η ολοκληρωμένη γραμμή πρέπει να περιλαμβάνει εξισορρόπηση, φυσικοχημική προεπεξεργασία, βιολογική αποδόμηση και τελικό διαχωρισμό. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρειαστούν και τριτοβάθμια στάδια ή επαναχρησιμοποίηση.

Η παρούσα μελέτη υποστηρίζει την ανάγκη τέτοιας ολοκληρωμένης προσέγγισης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι κανένα στάδιο δεν πρέπει να αξιολογείται απομονωμένα. Η DAF, ο UASB και η μονάδα αερόβιας επεξεργασίας λειτουργούν συμπληρωματικά.

1.44 Χημικά καθαρισμού, CIP και επίδραση στα απόβλητα

Τα συστήματα καθαρισμού στη θέση τους, γνωστά ως CIP, είναι απαραίτητα για την υγιεινή των γαλακτοκομικών εγκαταστάσεων. Περιλαμβάνουν συνήθως προπλύση με νερό, αλκαλικό καθαρισμό, ενδιάμεση έκπλυση, όξινο καθαρισμό, τελική έκπλυση και απολύμανση. Κάθε στάδιο δημιουργεί υγρό ρεύμα με διαφορετική σύσταση (Bylund, 1995; International Dairy Federation, 2019).

Τα αλκαλικά καθαριστικά απομακρύνουν κυρίως οργανικά υπολείμματα, λίπη και πρωτεΐνες. Τα όξινα καθαριστικά απομακρύνουν ανόργανα άλατα και πέτρα γάλακτος. Η εναλλαγή όξινων και αλκαλικών ρευμάτων μπορεί να προκαλέσει έντονες μεταβολές pH στη δεξαμενή εξισορρόπησης, επηρεάζοντας τη DAF και τη βιολογική επεξεργασία.

Η παρουσία απολυμαντικών μπορεί επίσης να επηρεάσει τη μικροβιακή δραστηριότητα στους βιολογικούς αντιδραστήρες. Αν μεγάλες ποσότητες απολυμαντικού οδηγηθούν απευθείας στη βιολογική βαθμίδα, μπορεί να προκληθεί παροδική τοξικότητα ή μείωση απόδοσης. Για αυτό απαιτείται αραίωση, εξισορρόπηση και κατάλληλος χρονισμός απορρίψεων.

Για τη DAF, τα καθαριστικά μπορούν να επηρεάσουν τη σταθερότητα γαλακτωμάτων. Ορισμένα απορρυπαντικά σταθεροποιούν μικρά λιπαρά σταγονίδια, δυσκολεύοντας την επίπλευση. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να απαιτείται αυξημένη χημική υποβοήθηση ή αλλαγή διαδικασίας καθαρισμού.

Η καταγραφή του προγράμματος CIP σε σχέση με τις αναλύσεις αποβλήτων είναι χρήσιμη πρακτική. Αν οι υψηλές ή χαμηλές αποδόσεις DAF συμπίπτουν με συγκεκριμένα στάδια καθαρισμού, μπορεί να εντοπιστεί η αιτία και να βελτιωθεί η διαχείριση των ρευμάτων.

1.45 Δειγματοληψία, συντήρηση δειγμάτων και αβεβαιότητα μετρήσεων

Η αξιοπιστία των αναλυτικών αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δειγματοληψία. Σε απόβλητα με υψηλή ανομοιογένεια, όπως τα τυροκομικά, ένα στιγμιαίο δείγμα μπορεί να μην αντιπροσωπεύει τη μέση ποιότητα του ρεύματος. Η χρήση σύνθετων δειγμάτων μπορεί να δώσει αντιπροσωπευτικότερη αποτύπωση της ημερήσιας λειτουργίας.

Η ομογενοποίηση του δείγματος πριν από την ανάλυση είναι κρίσιμη, ιδιαίτερα για COD και TSS. Αν το δείγμα περιέχει μεγάλα σωματίδια ή λίπη, η λήψη μικρού όγκου χωρίς ανάδευση

μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη μεταβλητότητα. Για τον λόγο αυτό, τα δείγματα πρέπει να αναδεύονται ήπια πριν από τη λήψη υποδείγματος.

Η συντήρηση των δειγμάτων επηρεάζει επίσης τα αποτελέσματα. Τα οργανικά απόβλητα μπορεί να αρχίσουν να ζυμώνονται ή να μεταβάλλουν pH και COD με την πάροδο του χρόνου. Η ψύξη και η γρήγορη ανάλυση μειώνουν τις μεταβολές. Για ορισμένες παραμέτρους απαιτούνται ειδικές συντηρήσεις σύμφωνα με πρότυπες μεθόδους.

Η αραίωση στα δείγματα υψηλού COD αποτελεί πιθανή πηγή σφάλματος. Μικρή ανακρίβεια στην αραίωση πολλαπλασιάζεται στην τελική τιμή. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιούνται κατάλληλες πιπέτες, ογκομετρικά σκεύη και επαναληπτικές μετρήσεις όπου είναι δυνατό.

Η αβεβαιότητα δεν ακυρώνει τη χρησιμότητα των δεδομένων, αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ερμηνεία. Όταν η διαφορά εισόδου-εξόδου DAF είναι πολύ μικρή, μέρος της μπορεί να βρίσκεται εντός του αναλυτικού και δειγματοληπτικού σφάλματος. Αυτό ενισχύει την ανάγκη παράλληλων δεικτών όπως TSS και FOG.

1.46 Εποχικότητα παραγωγής και μεταβλητότητα αποβλήτων

Η παραγωγή γάλακτος και τυροκομικών προϊόντων παρουσιάζει εποχικότητα, ιδιαίτερα σε μονάδες που χρησιμοποιούν πρόβειο ή γίδινο γάλα. Η ποσότητα και η σύσταση του γάλακτος μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους, επηρεάζοντας την παραγωγή τυριού και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων.

Η εποχικότητα μπορεί να οδηγήσει σε περιόδους υψηλής παραγωγής, όπου η εγκατάσταση επεξεργασίας λειτουργεί κοντά στα όριά της, και σε περιόδους χαμηλότερης παραγωγής, όπου η τροφοδοσία είναι μικρότερη. Οι βιολογικοί αντιδραστήρες χρειάζονται σταθερότητα και μπορεί να επηρεαστούν από απότομες μεταβολές.

Το είδος του προϊόντος επηρεάζει επίσης τα απόβλητα. Παραγωγή τυριών με υψηλές απώλειες ορού ή παραγωγή προϊόντων με διαφορετικές πλύσεις μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικό COD, TSS και FOG. Η παραγωγή γιαουρτιού ή άλλων γαλακτοκομικών προϊόντων δημιουργεί διαφορετικά ρεύματα.

Η DAF πρέπει να μπορεί να ανταποκρίνεται σε αυτή τη μεταβλητότητα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με επαρκή εξισορρόπηση, ρυθμιζόμενη δοσομέτρηση χημικών και συχνή παρακολούθηση. Μια σταθερή ρύθμιση δεν είναι πάντα κατάλληλη για όλες τις εποχές.

Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε δεδομένα περιόδου Νοεμβρίου–Ιανουαρίου. Για πλήρη ετήσια αξιολόγηση θα ήταν χρήσιμη συλλογή δεδομένων σε διαφορετικές εποχές και σε διαφορετικές παραγωγικές συνθήκες. Αυτό θα βοηθούσε στη βελτίωση του σχεδιασμού και της λειτουργίας.

1.47 Είδος τυριού και διαφοροποίηση αποβλήτων

Διαφορετικά τυριά δημιουργούν διαφορετικά απόβλητα. Η παραγωγή φέτας, σκληρών τυριών, μυζήθρας ή άλλων προϊόντων διαφέρει ως προς τη θερμική επεξεργασία, την πήξη, τη στράγγιση, την αλάτιση και την ωρίμανση. Κάθε διαφοροποίηση επηρεάζει τις ποσότητες τυρογάλακτος, άλμης και στερεών υπολειμμάτων.

Η παραγωγή τυριών άλμης μπορεί να δημιουργεί ρεύματα με υψηλή αγωγιμότητα λόγω αλατιού. Η υψηλή αλατότητα μπορεί να επηρεάσει τη βιολογική επεξεργασία και να περιορίσει δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης. Η χωριστή διαχείριση άλμης μπορεί να είναι απαραίτητη.

Η παραγωγή μυζήθρας ή προϊόντων από ορό γάλακτος μπορεί να μεταβάλλει τη σύσταση του τελικού αποβλήτου, επειδή αξιοποιεί μέρος του τυρογάλακτος. Αντίθετα, αν ο ορός δεν αξιοποιείται, το φορτίο στην εγκατάσταση αυξάνεται. Η στρατηγική αξιοποίησης ορού είναι επομένως κεντρική.

Τα σκληρά τυριά μπορεί να έχουν διαφορετικές απώλειες στερεών και διαφορετικές απαιτήσεις πλύσεων. Η ωρίμανση, η κοπή και η συσκευασία δημιουργούν επίσης ρεύματα πλύσης με διαφορετικό φορτίο. Η χαρτογράφηση ανά προϊόν βοηθά στην καλύτερη πρόληψη ρύπανσης.

Για τον σχεδιασμό DAF, το είδος τυριού έχει σημασία επειδή επηρεάζει τη μορφή του φορτίου. Αν το φορτίο είναι κυρίως λιπαρό ή σωματιδιακό, η DAF μπορεί να έχει υψηλή απόδοση σε TSS/FOG. Αν είναι κυρίως διαλυμένη λακτόζη, η μείωση COD θα παραμένει χαμηλή.

1.48 Σχεδιασμός προγράμματος παρακολούθησης

Ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα παρακολούθησης πρέπει να καθορίζει ποια σημεία μετρώνται, ποιες παράμετροι αναλύονται, με ποια συχνότητα και με ποια μέθοδο. Για την αξιολόγηση της DAF, τα ελάχιστα σημεία είναι η είσοδος και η έξοδος της DAF. Για τη συνολική εγκατάσταση απαιτούνται επίσης σημεία μετά τον UASB, μετά το αερόβιο και στην τελική εκροή.

Οι βασικές παράμετροι πρέπει να περιλαμβάνουν COD, BOD₅, TSS, FOG, pH, θερμοκρασία και παροχή. Σε πιο πλήρη παρακολούθηση προστίθενται αγωγιμότητα, ολικό άζωτο, αμμωνιακό άζωτο, ολικός φώσφορος, θολότητα, αλκαλικότητα και δείκτες ιλύος.

Η συχνότητα μετρήσεων πρέπει να σχετίζεται με τη μεταβλητότητα. Σε περιόδους σταθερής λειτουργίας μπορεί να αρκούν εβδομαδιαίες ή δεκαπενθήμερες αναλύσεις για ορισμένες παραμέτρους. Σε περιόδους αιχμής ή προβλημάτων απαιτείται συχνότερη παρακολούθηση.

Η καταγραφή της παραγωγικής δραστηριότητας την ημέρα της δειγματοληψίας είναι εξίσου σημαντική με την ανάλυση. Χωρίς πληροφορία για το είδος προϊόντος, την ποσότητα γάλακτος και τις πλύσεις, η ερμηνεία μιας υψηλής τιμής COD είναι περιορισμένη.

Το πρόγραμμα παρακολούθησης πρέπει να είναι πρακτικό. Μία μικρή μονάδα δεν μπορεί πάντα να πραγματοποιεί πολλές αναλύσεις καθημερινά. Ωστόσο, ακόμη και ένα βασικό αλλά σταθερό πρόγραμμα είναι πολύ καλύτερο από σποραδικές μετρήσεις χωρίς συνέπεια.

1.49 Πάχυνση, αφυδάτωση και διάθεση ιλύος

Η ιλύς που παράγεται από τη DAF έχει συνήθως υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά, λίπη και νερό. Πριν από τη διάθεση ή αξιοποίηση, μπορεί να απαιτηθεί πάχυνση ή αφυδάτωση. Η μείωση υγρασίας μειώνει τον όγκο μεταφοράς και το κόστος διαχείρισης.

Η αφυδάτωση μπορεί να γίνει με κλίνες ξήρανσης, ταινιοφιλτρόπρες, φυγοκεντρητές ή άλλες τεχνολογίες. Η επιλογή εξαρτάται από την ποσότητα ιλύος, το διαθέσιμο χώρο και το κόστος. Σε μικρές μονάδες, απλές λύσεις μπορεί να είναι πιο βιώσιμες.

Η χημική σύνθεση της ιλύος επηρεάζεται από τα κροκιδωτικά. Αν χρησιμοποιούνται άλατα σιδήρου ή αργιλίου, η ανόργανη περιεκτικότητα αυξάνεται. Αν χρησιμοποιούνται πολυηλεκτρολύτες, πρέπει να εξεταστεί η επίδραση στη διάθεση.

Η πιθανή αξιοποίηση της ιλύος ως οργανικό υπόλειμμα πρέπει να εξετάζεται με βάση νομοθετικές απαιτήσεις και αναλύσεις. Η υψηλή οργανική περιεκτικότητα μπορεί να είναι πλεονέκτημα, αλλά οι οσμές, η υγρασία και η σταθερότητα αποτελούν περιορισμούς.

Η διαχείριση της ιλύος πρέπει να ενσωματώνεται στον σχεδιασμό DAF. Μία ρύθμιση που επιτυγχάνει ελαφρώς καλύτερη απομάκρυνση αλλά διπλασιάζει την ποσότητα ιλύος μπορεί να μην είναι συνολικά βέλτιστη.

1.50 Περιβαλλοντικοί όροι και τεκμηρίωση συμμόρφωσης

Οι τυροκομικές μονάδες λειτουργούν υπό περιβαλλοντικούς όρους που καθορίζουν απαιτήσεις για διαχείριση αποβλήτων, εκπομπές, ύλ και παρακολούθηση. Η συμμόρφωση απαιτεί όχι μόνο σωστή λειτουργία αλλά και τεκμηρίωση με μετρήσεις, αρχεία και διαδικασίες.

Τα ημερήσια ή εβδομαδιαία φύλλα λειτουργίας μπορούν να τεκμηριώνουν τη λειτουργία της εγκατάστασης. Περιλαμβάνουν μετρήσεις, παρατηρήσεις, βλάβες, ποσότητες χημικών και πιθανές αποκλίσεις. Η συστηματική τήρηση αρχείου διευκολύνει τον έλεγχο και τη βελτίωση.

Η τεκμηρίωση είναι σημαντική σε περίπτωση υπέρβασης ορίων. Αν υπάρχει ιστορικό λειτουργικών δεδομένων, μπορεί να εντοπιστεί η αιτία και να αποδειχθεί ότι λήφθηκαν διορθωτικά μέτρα. Χωρίς δεδομένα, η διαχείριση γίνεται αντιδραστική και όχι προληπτική.

Η DAF μπορεί να αποτελέσει κρίσιμο σημείο ελέγχου στην περιβαλλοντική συμμόρφωση. Αν η μονάδα δεν λειτουργεί σωστά, τα επόμενα στάδια επιβαρύνονται και αυξάνεται ο κίνδυνος υποβάθμισης τελικής εκροής. Η παρακολούθηση της DAF πρέπει επομένως να περιλαμβάνεται στα αρχεία.

Η συμμόρφωση δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται μόνο ως υποχρέωση. Η σωστή τεκμηρίωση βοηθά τη μονάδα να κατανοήσει τη λειτουργία της, να μειώσει κόστος και να προλαμβάνει προβλήματα.

1.51 Σύγκριση DAF με καθίζηση και απλή λιποσυλλογή

Η καθίζηση βασίζεται στη βαρύτητα και είναι κατάλληλη για σωματίδια που έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από το νερό. Η λιποσυλλογή βασίζεται στην άνοδο ελεύθερων λιπών λόγω χαμηλότερης πυκνότητας. Η DAF ενισχύει την επίπλευση δημιουργώντας μικροφουσαλίδες που προσκολλώνται σε σωματίδια και λίπη.

Σε τυροκομικά απόβλητα, πολλά σωματίδια είναι μικρά, κολλοειδή ή συνδεδεμένα με λίπος. Η απλή καθίζηση μπορεί να μην είναι επαρκής. Η DAF είναι συχνά πιο κατάλληλη, επειδή μπορεί να απομακρύνει ελαφρά και κολλοειδή υλικά με χημική υποβοήθηση.

Η απλή λιποσυλλογή μπορεί να απομακρύνει ελεύθερα λίπη, αλλά όχι σταθερά γαλακτώματα. Τα γαλακτώματα απαιτούν αποσταθεροποίηση και μικροφουσαλίδες για αποτελεσματικό διαχωρισμό. Αυτό εξηγεί τη συχνή χρήση DAF σε βιομηχανίες τροφίμων.

Η DAF έχει υψηλότερο κόστος και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από έναν απλό λιποσυλλέκτη. Απαιτεί αντλίες, πίεση, ανακυκλοφορία και συχνά χημικά. Η επιλογή της δικαιολογείται όταν το φορτίο λιπών και στερεών είναι υψηλό ή όταν απαιτείται προστασία ευαίσθητων βιολογικών σταδίων.

Η σύγκριση πρέπει να γίνεται με βάση πραγματικά δεδομένα. Αν μια μονάδα έχει χαμηλό λιπαρό φορτίο, απλούστερα συστήματα μπορεί να αρκούν. Σε τυροκομικές μονάδες με έντονα γαλακτώματα και υψηλό TSS, η DAF προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

1.52 Ανάκτηση πόρων και στρατηγική μηδενικών απορρίψεων

Η στρατηγική μηδενικών απορρίψεων δεν σημαίνει απαραίτητα ότι δεν παράγονται απόβλητα, αλλά ότι κάθε ρεύμα αξιολογείται ως πιθανός πόρος. Στα τυροκομεία, τα πιο σημαντικά ρεύματα είναι το τυρόγαλο, τα λίπη, η ιλύς και το επεξεργασμένο νερό.

Το τυρόγαλο έχει μεγάλη αξία λόγω πρωτεϊνών και λακτόζης. Η ανάκτηση πρωτεϊνών ορού μέσω μεμβρανών ή άλλων τεχνολογιών μπορεί να μετατρέψει ένα ρυπαντικό ρεύμα σε προϊόν. Η βιωσιμότητα εξαρτάται από την ποσότητα, την ποιότητα και την αγορά.

Η ιλύς από DAF μπορεί να περιέχει οργανική ύλη που θεωρητικά μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά, αλλά η υψηλή υγρασία και τα χημικά πρόσθετα δυσκολεύουν την άμεση αξιοποίηση. Η συνδυασμένη επεξεργασία με άλλα οργανικά υπολείμματα μπορεί να είναι επιλογή.

Το επεξεργασμένο νερό μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε ορισμένες μη κρίσιμες χρήσεις, αν πληροί τις απαιτήσεις ποιότητας. Η επαναχρησιμοποίηση μειώνει την κατανάλωση νερού και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αλλά απαιτεί αξιόπιστη τελική ποιότητα.

Η DAF σε μια τέτοια στρατηγική λειτουργεί ως τεχνολογία διαχωρισμού και προετοιμασίας. Διαχωρίζει υλικά, προστατεύει επόμενα στάδια και μπορεί να διευκολύνει την ανάκτηση πόρων, εφόσον ο σχεδιασμός γίνει ολιστικά.

1.53 Πρακτικός οδηγός για μικρές και μεσαίες τυροκομικές μονάδες

Μια μικρή ή μεσαία τυροκομική μονάδα που επιθυμεί να βελτιώσει τη διαχείριση αποβλήτων πρέπει πρώτα να καταγράψει τα ρεύματα παραγωγής. Ποια ποσότητα γάλακτος επεξεργάζεται, πόσο τυρόγαλο παράγεται, πού καταλήγουν οι πλύσεις και ποιες είναι οι ώρες αιχμής;

Το δεύτερο βήμα είναι η βασική αναλυτική παρακολούθηση. Ακόμη και λίγες συστηματικές μετρήσεις COD, TSS, FOG και pH μπορούν να αποκαλύψουν τις κύριες πηγές φορτίου. Οι μετρήσεις πρέπει να συνδέονται με το ημερήσιο πρόγραμμα παραγωγής.

Το τρίτο βήμα είναι η πρόληψη: αποφυγή απωλειών γάλακτος, συλλογή τυρογάλακτος, ξηρός καθαρισμός στερεών, ορθολογική χρήση νερού και έλεγχος καθαριστικών. Αυτά τα μέτρα μειώνουν το φορτίο πριν φτάσει στην επεξεργασία.

Το τέταρτο βήμα είναι η τεχνική επιλογή. Αν υπάρχουν πολλά λίπη και στερεά, η DAF είναι κατάλληλη προεπεξεργασία. Αν το πρόβλημα είναι κυρίως διαλυμένο COD από τυρόγαλο, απαιτείται βιολογική επεξεργασία και πιθανή αξιοποίηση ορού.

Το πέμπτο βήμα είναι η συνεχής βελτίωση. Η μονάδα πρέπει να παρακολουθεί την απόδοση, να προσαρμόζει τη χημική δόση, να συντηρεί εξοπλισμό και να εκπαιδεύει το προσωπικό. Η περιβαλλοντική διαχείριση είναι συνεχής διαδικασία και όχι εφάπαξ εγκατάσταση εξοπλισμού.

Κεφάλαιο 2: Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Περιγραφή της μελέτης περίπτωσης

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες επισκέψεις σε τυροκομική μονάδα των Καλαβρύτων. Οι επισκέψεις είχαν ως βασικό σκοπό την καταγραφή της υφιστάμενης διαδικασίας διαχείρισης και επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων της μονάδας, με ιδιαίτερη έμφαση στη λειτουργία της DAF και στη σύνδεσή της με τις επόμενες αναερόβιες και αερόβιες βαθμίδες.

Η μονάδα επιλέχθηκε ως μελέτη περίπτωσης, επειδή διαθέτει οργανωμένη εγκατάσταση επεξεργασίας που συνδυάζει φυσικοχημικά και βιολογικά στάδια. Η μελέτη περίπτωσης επιτρέπει την αποτίμηση της DAF σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και όχι σε ιδανικοποιημένη εργαστηριακή διάταξη.

Κατά τις επισκέψεις συλλέχθηκε φωτογραφικό υλικό, καταγράφηκαν τα σημεία δειγματοληψίας και εξετάστηκε ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για προσδιορισμό COD και αιωρούμενων στερεών. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν δεδομένα COD που είχαν καταγραφεί από τη λειτουργία της εγκατάστασης.

2.2 Περιγραφή της γραμμής επεξεργασίας

Υδραυλική κατανομή της παροχής. Η συνολική ημερήσια παροχή που φθάνει στη δεξαμενή εξισορρόπησης είναι περίπου 150 m³/ημέρα. Από αυτή, περίπου 130 m³/ημέρα κατευθύνονται στην κύρια γραμμή που τροφοδοτεί την αναερόβια επεξεργασία, ενώ περίπου 20 m³/ημέρα παρακάμπτουν τη DAF και τους αντιδραστήρες UASB και οδηγούνται απευθείας στη δεξαμενή αερισμού. Η διαίρεση αυτή αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της πραγματικής λειτουργίας της εγκατάστασης και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ερμηνεία των αναλυτικών μετρήσεων. Μελλοντικά προβλέπεται η διοχέτευση ολόκληρης της παροχής στην αναερόβια γραμμή, ώστε το σύνολο του υδραυλικού και οργανικού φορτίου να υποβάλλεται σε αναερόβια επεξεργασία πριν από τη δεξαμενή αερισμού.

Εξισορρόπηση, ρύθμιση pH και DAF. Το ρεύμα των περίπου 130 m³/ημέρα μεταφέρεται με υποβρύχια αντλία από τη δεξαμενή εξισορρόπησης στη δεξαμενή εισόδου. Εκεί προστίθεται με δοσομετρική αντλία το αλκαλικό διάλυμα που στη μονάδα αναφέρεται ως «σόδα» και, με τη

βοήθεια αναδευτήρων, επιτυγχάνεται ομογενοποίηση και ρύθμιση του pH στην περιοχή 5,0–6,0. Στη συνέχεια το υγρό ρεύμα οδηγείται στη μονάδα επίπλευσης διαλυμένου αέρα (DAF). Οι φυσαλίδες αέρα προσκολλώνται στη λιπαρή και σωματιδιακή φάση και τη μεταφέρουν στην επιφάνεια, από όπου περιστρεφόμενα ξέστρα την απομακρύνουν προς τον λιποσυλλέκτη.

Έξοδος DAF και οξυγένεση. Μετά την απομάκρυνση της επιπλέουσας λιπαρής φάσης, η υγρή εκροή της DAF συγκεντρώνεται στη δεξαμενή εξόδου και ακολούθως μεταφέρεται στη δεξαμενή οξυγένεσης. Από τη βαθμίδα αυτή τροφοδοτούνται κατ' επιλογή οι διαθέσιμοι αναερόβιοι αντιδραστήρες UASB.

Αναερόβια επεξεργασία στους UASB. Η εγκατάσταση διαθέτει τρεις αντιδραστήρες UASB, οι οποίοι τροφοδοτούνται επιλεκτικά ανάλογα με την τρέχουσα παροχή και το φορτίο κάθε αντιδραστήρα. Κάθε UASB διαθέτει ανεξάρτητη αντλία ανακυκλοφορίας, με την οποία σχηματίζεται κλειστό υδραυλικό κύκλωμα και ενισχύεται η επαφή της αναερόβιας βιομάζας με το οργανικό υπόστρωμα. Οι μικροοργανισμοί αποδομούν πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και υπολειμματικά λιπαρά μέσω διαδοχικών βιοχημικών σταδίων, με αποτέλεσμα τη μείωση του οργανικού φορτίου και την παραγωγή βιοαερίου, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου. Το βιοαέριο που παράγεται στους τρεις αντιδραστήρες συλλέγεται σε ειδική δεξαμενή αποθήκευσης και χρησιμοποιείται ως καύσιμο στον καυστήρα του λέβητα του εργοστασίου. Ο λέβητας παράγει τον ατμό που απαιτείται για τις παραγωγικές και λειτουργικές ανάγκες της μονάδας, επιτρέποντας την ενεργειακή αξιοποίηση μέρους του οργανικού φορτίου των αποβλήτων.

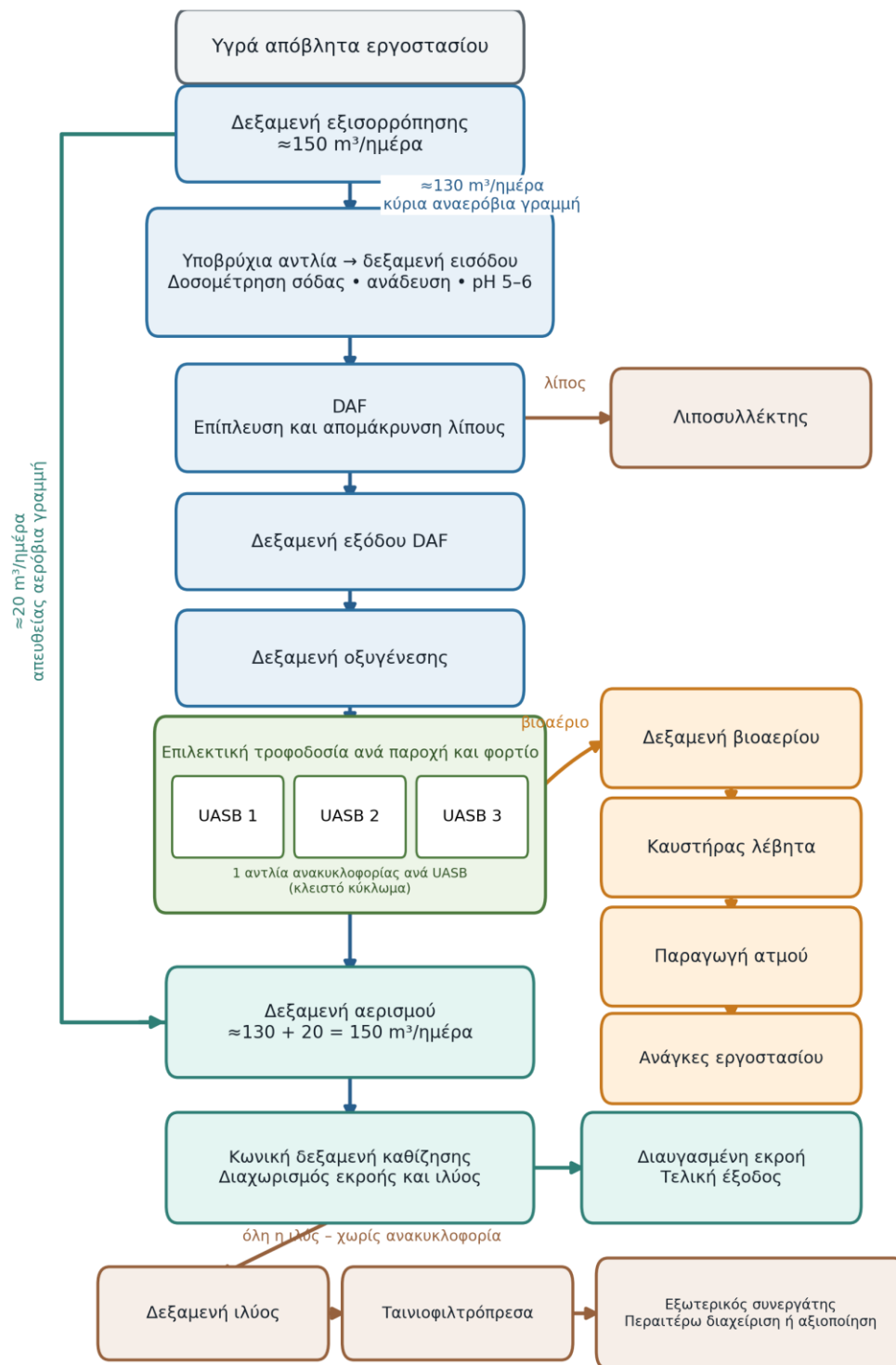
Αερόβια επεξεργασία. Η υγρή εκροή μειωμένου οργανικού φορτίου από τους UASB, περίπου 130 m³/ημέρα, καταλήγει στη δεξαμενή αερισμού. Στο ίδιο σημείο εισέρχεται και η παράλληλη παροχή περίπου 20 m³/ημέρα από τη δεξαμενή εξισορρόπησης. Επομένως, η συνολική παροχή προς την αερόβια βαθμίδα είναι περίπου 150 m³/ημέρα. Η παροχή αέρα διατηρεί τις απαιτούμενες αερόβιες συνθήκες και υποστηρίζει την περαιτέρω αποδόμηση του υπολειμματικού οργανικού φορτίου.

Καθίζηση και τελική εκροή. Η δεξαμενή αερισμού επικοινωνεί υδραυλικά με τη μεγάλη κωνική δεξαμενή καθίζησης. Στη δεξαμενή αυτή η βιολογική ιλύς καθιζάνει και διαχωρίζεται από τη διαυγασμένη υγρή φάση. Η επεξεργασμένη εκροή οδηγείται στην τελική έξοδο και διατίθεται

στον προβλεπόμενο περιβαλλοντικό αποδέκτη σύμφωνα με τους όρους λειτουργίας της εγκατάστασης.

Διαχείριση της ιλύος. Το σύνολο της καθιζάνουσας ιλύος οδηγείται στη δεξαμενή ιλύος· δεν εφαρμόζεται ανακυκλοφορία της προς τη δεξαμενή αερισμού. Από τη δεξαμενή αποθήκευσης η ιλύς μεταφέρεται στην ταινιοφιλτρόπρεσα για μηχανική αφυδάτωση. Το αφυδατωμένο υλικό παραλαμβάνεται από εξωτερικό συνεργάτη για περαιτέρω διαχείριση ή αξιοποίηση, όπως η χρήση του ως τροφοδοτικού υλικού σε ειδική μονάδα παραγωγής βιοαερίου.

Συνολική αποτύπωση. Η αναθεωρημένη υδραυλική και λειτουργική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Η φωτογραφική τεκμηρίωση των σταδίων εξισορρόπησης και DAF, αναερόβιας επεξεργασίας και ενεργειακής αξιοποίησης, καθώς και αερόβιας επεξεργασίας και διαχείρισης ιλύος, παρουσιάζεται αντίστοιχα στα Σχήματα 2.2–2.4.



Υγρή ροή: μπλε/πράσινο • Ροή λίπους και ιλύος: καφέ • Ροή βιοαερίου/ενέργειας: πορτοκαλί

Σχήμα 2.1: Αναθεωρημένη γραμμή επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και παράπλευρες ροές λίπους, βιοαερίου και ιλύος. Πηγή: σχηματική απεικόνιση του συγγραφέα βάσει στοιχείων πεδίου.



(α) Δεξαμενή εξισορρόπησης



(β) Δεξαμενή εισόδου και ρύθμισης pH



(γ) Μονάδα DAF



(δ) Λιποσυλλέκτης

Σχήμα 2.2: Βαθμίδες εξισορρόπησης και DAF: (α) δεξαμενή εξισορρόπησης, (β) δεξαμενή εισόδου και ρύθμισης pH, (γ) μονάδα επίπλευσης διαλυμένου αέρα και (δ) λιποσυλλέκτης.



Σχήμα 2.3: Αναερόβια γραμμή και αξιοποίηση βιοαερίου: (α) δεξαμενή εξόδου DAF, (β) δεξαμενή οξυγένησης, (γ) οι τρεις αντιδραστήρες UASB και (δ) δεξαμενή αποθήκευσης βιοαερίου.



Σχήμα 2.4: Αερόβια επεξεργασία και διαχείριση ιλύος: (α) δεξαμενή αερισμού, (β) δεξαμενή καθίζησης, (γ) δεξαμενή ιλύος και παρακείμενη τελική έξοδος και (δ) ταινιοφιλτρώπρεσα αφυδάτωσης.

2.3 Σημεία δειγματοληψίας

Κατά τις επιτόπιες επισκέψεις καταγράφηκαν έξι σημεία δειγματοληψίας. Τα σημεία αυτά επιτρέπουν τη συσχέτιση των αναλυτικών τιμών με τα αντίστοιχα στάδια επεξεργασίας και την αξιολόγηση της επίδρασης της DAF.

Η αντιστοίχιση των δειγμάτων είναι: δείγμα 1 δεξαμενή εισόδου DAF, δείγμα 2 δεξαμενή εξόδου DAF, δείγμα 3 δεξαμενή οξυγένεσης, δείγμα 4 έξοδος αντιδραστήρα, δείγμα 5 δεξαμενή αερισμού (δείγμα για τον προσδιορισμό αιωρούμενων στερεών) και δείγμα 6 τελική έξοδος. Ιδιαίτερη σημασία έχει η σύγκριση μεταξύ της δεξαμενής εισόδου DAF και της δεξαμενής εξόδου DAF. Η αντιστοίχιση των σημείων συνοψίζεται στον Πίνακα 2.1.

Η επιλογή των σημείων δειγματοληψίας επιτρέπει την αποτίμηση τόσο της συνολικής γραμμής όσο και επιμέρους σταδίων. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σε πραγματικές

εγκαταστάσεις οι χρόνοι παραμονής και οι ανακυκλοφορίες μπορεί να επηρεάσουν την άμεση σύγκριση τιμών.

Δείγμα	Σημείο	Περιγραφή
1	Δεξαμενή εισόδου DAF	Τροφοδοσία της μονάδας DAF
2	Δεξαμενή εξόδου DAF	Εκροή μετά την επίπλευση
3	Δεξαμενή οξυγένεσης	Ρεύμα πριν από την τροφοδοσία των UASB
4	Έξοδος αντιδραστήρα	Εκροή μετά την αναερόβια επεξεργασία
5	Δεξαμενή αερισμού	Δείγμα για τον προσδιορισμό αιωρούμενων στερεών (TSS)
6	Τελική έξοδος	Τελική επεξεργασμένη εκροή

Πίνακας 2.1: Αντιστοίχιση σημείων δειγματοληψίας.

2.4 Προσδιορισμός COD

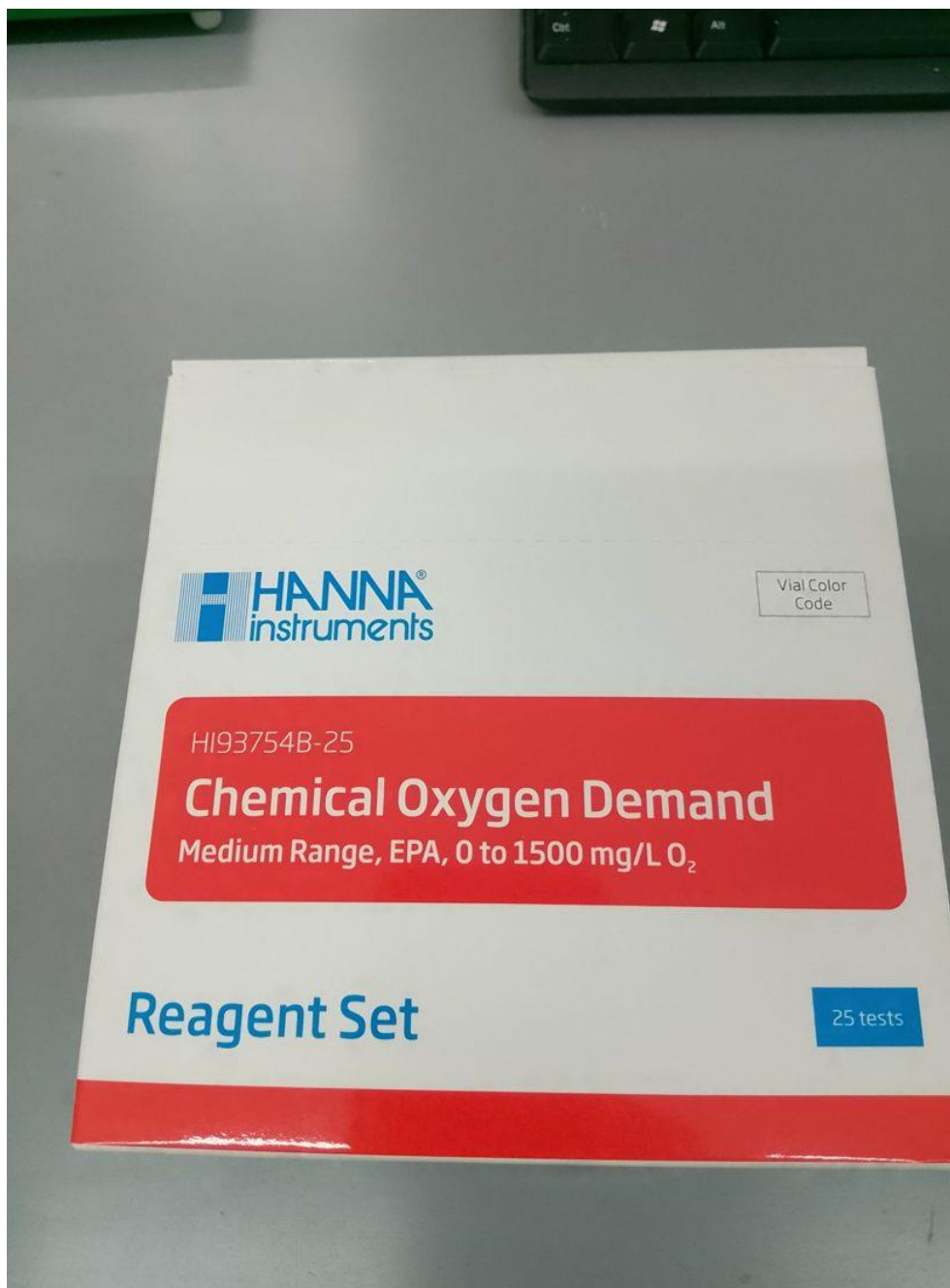
Ο προσδιορισμός του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο κλειστού φιαλιδίου και χρήση έτοιμων αντιδραστηρίων Hanna Instruments. Χρησιμοποιήθηκαν φιαλίδια μεσαίου εύρους HI93754B-25 και υψηλού εύρους HI93754C-25, ανάλογα με την αναμενόμενη συγκέντρωση του δείγματος (APHA et al., 2017).

Λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου των τυροκομικών αποβλήτων, σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται αραιώση ώστε η τελική ένδειξη να βρίσκεται εντός του εύρους μέτρησης. Τα φιαλίδια υποβάλλονται σε θερμική χώνευση σε θερμοαντιδραστήρα VELP Scientifica ECO 8 στους 150°C για δύο ώρες και ακολουθεί φωτομετρική μέτρηση.

Η μέτρηση COD επιλέχθηκε ως βασικός δείκτης για την παρούσα εργασία, επειδή αποτυπώνει το συνολικό οργανικό φορτίο και επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ εισόδου και εξόδου DAF. Ωστόσο, όπως αναλύεται στα αποτελέσματα, το COD δεν περιγράφει μόνο το σωματιδιακό φορτίο που απομακρύνει η DAF, αλλά και το διαλυμένο οργανικό κλάσμα. Ο βασικός εξοπλισμός και τα αντιδραστήρια της μεθόδου παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.5 και 2.6.



Σχήμα 2.5: Θερμοαντιδραστήρας VELP Scientifica ECO 8 και φιαλίδια για τον προσδιορισμό COD.



Σχήμα 2.6: Φιαλίδια αντιδραστηρίων COD Hanna Instruments με διαφορετικά εύρη μέτρησης.

2.5 Προσδιορισμός αιωρούμενων στερεών

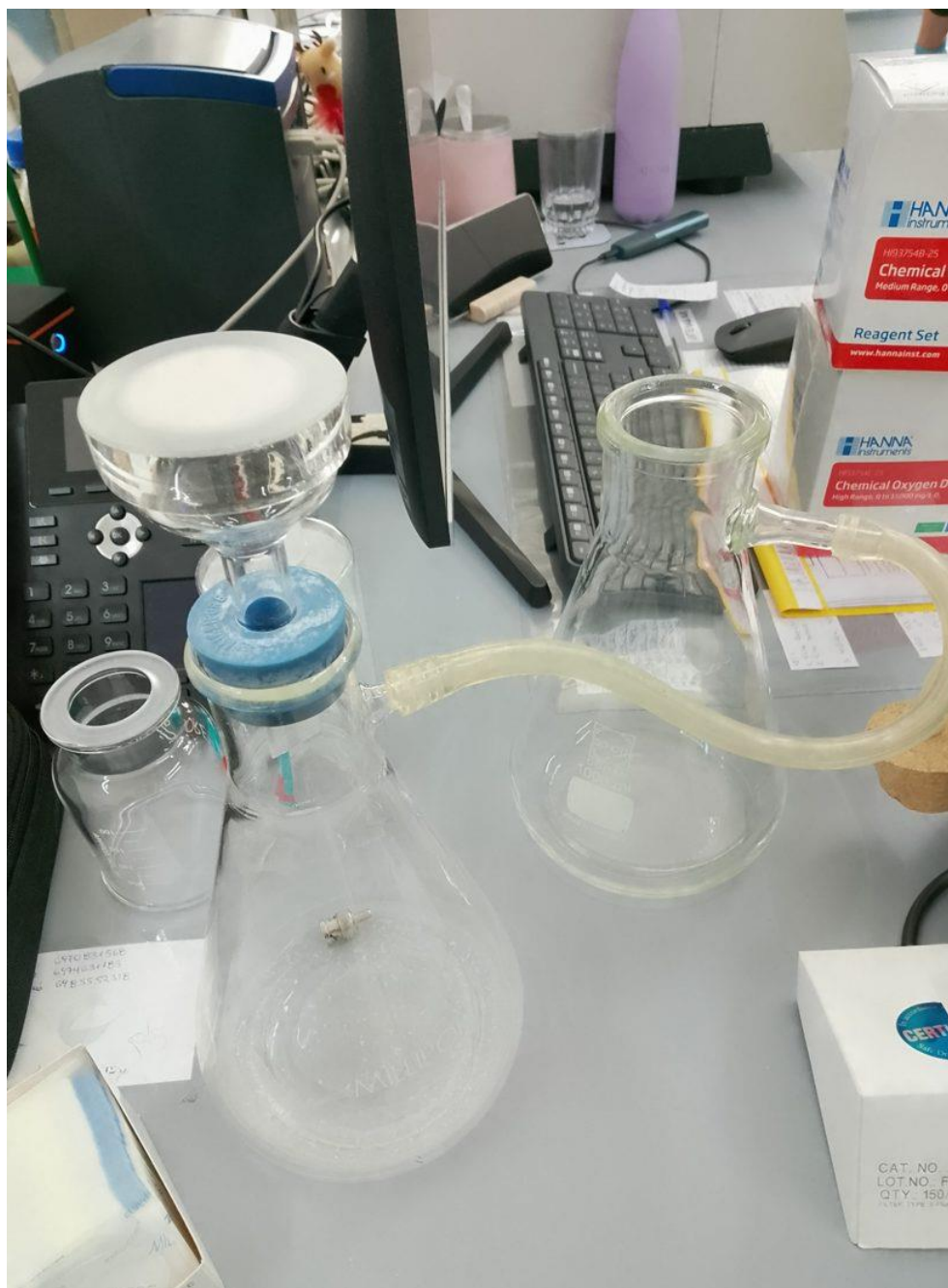
Τα αιωρούμενα στερεά προσδιορίστηκαν με βαρυμετρική μέθοδο διήθησης. Χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα Millipore διαμέτρου 47 mm και πόρων 0,45 μm, καθώς και εργαστηριακή διάταξη διήθησης υπό κενό. Η μέθοδος βασίζεται στη ζύγιση του φίλτρου πριν και μετά τη διήθηση γνωστού όγκου δείγματος (APHA et al., 2017).

Πριν τη χρήση, τα φίλτρα ξηραίνονται σε φούρνο στους 103–105°C, ψύχονται σε ξηραντήριο με silica gel και ζυγίζονται. Μετά τη διήθηση, τα φίλτρα ξηραίνονται εκ νέου, ψύχονται και ζυγίζονται. Η διαφορά μάζας αντιστοιχεί στα αιωρούμενα στερεά που κατακρατήθηκαν.

Η συγκέντρωση TSS υπολογίζεται από τη σχέση $TSS = [(A - B) \times 1000] / V$, όπου A είναι η τελική μάζα φίλτρου, B η αρχική μάζα φίλτρου και V ο όγκος του δείγματος σε L. Η παράμετρος TSS είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αξιολόγηση της DAF, διότι η μέθοδος απομακρύνει κυρίως σωματιδιακό και επιπλέον φορτίο. Τα φίλτρα και ο σχετικός εξοπλισμός προετοιμασίας και μέτρησης παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.7–2.10.



Σχήμα 2.7: Φίλτρα Millipore 0,45 μm για βαρυμετρικό προσδιορισμό αιωρούμενων στερεών.



Σχήμα 2.8: Εργαστηριακή διάταξη διήθησης υπό κενό.



Σχήμα 2.9: Ξηραντήριο με silica gel για ψύξη φίλτρων πριν τη ζύγιση.



Σχήμα 2.10: Θερμοζυγός/εργαστηριακός εξοπλισμός ξήρανσης για φίλτρα.

2.6 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός που καταγράφηκε περιλάμβανε θερμοαντιδραστήρα για COD, αντιδραστήρια κλειστού φιαλιδίου, φούρνο ξήρανσης, ξηραντήριο, φίλτρα, διάταξη διήθησης υπό κενό, ζυγό ακριβείας και βοηθητικό γυάλινο εξοπλισμό. Ο εξοπλισμός αυτός καλύπτει βασικές αναλυτικές ανάγκες ελέγχου αποβλήτων.

Η ύπαρξη εργαστηριακού ελέγχου εντός ή κοντά στη μονάδα είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι επιτρέπει τακτική παρακολούθηση της ποιότητας των αποβλήτων. Η παρακολούθηση COD, pH, TSS και άλλων παραμέτρων συμβάλλει στη λήψη λειτουργικών αποφάσεων.

Σε εγκαταστάσεις με υψηλή μεταβλητότητα αποβλήτων, η συστηματική μέτρηση δεν αποτελεί απλώς υποχρέωση συμμόρφωσης, αλλά εργαλείο ελέγχου και βελτιστοποίησης. Η απόδοση της DAF και των βιολογικών σταδίων μπορεί να επηρεαστεί έντονα από μεταβολές στην παραγωγή.

2.7 Επεξεργασία δεδομένων

Για την αξιολόγηση της DAF χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα COD για την περίοδο από 11/11/2025 έως 27/01/2026. Οι τιμές αφορούσαν τη δεξαμενή εισόδου DAF, τη δεξαμενή εξόδου DAF και τη δεξαμενή οξυγένεσης. Τα δεδομένα οργανώθηκαν σε πίνακες και υπολογίστηκε η απόδοση απομάκρυνσης COD.

Η απόδοση απομάκρυνσης υπολογίστηκε με τη σχέση: $\text{Απόδοση (\%)} = [(C_{\text{εισόδου}} - C_{\text{εξόδου}}) / C_{\text{εισόδου}}] \times 100$. Η σχέση εφαρμόστηκε για κάθε ημερομηνία μέτρησης. Επιπλέον, υπολογίστηκαν μέσες τιμές, ελάχιστες και μέγιστες τιμές και τυπικές αποκλίσεις. Ενδεικτικό ημερήσιο έντυπο καταγραφής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11.

Η ανάλυση περιορίζεται κυρίως στο COD. Για πληρέστερη αξιολόγηση της DAF θα ήταν απαραίτητη η συστηματική καταγραφή TSS, λιπών και ελαίων, θολότητας και παραγωγής ιλύος. Παρ' όλα αυτά, τα διαθέσιμα δεδομένα επιτρέπουν τεκμηριωμένη προκαταρκτική αποτίμηση της συμβολής της DAF στο οργανικό φορτίο.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 27/1/2026		ΔΕΣΑΜΕΝΗ ΟΞΥΓΕΝΕΙΣΗ		ΔΕΣΑΜΕΝΗ ΔΕΡΜΙΟΥ	
ΟΡΑ ΕΝΑΡΣΗΣ: 7:20		Δ. ΟΞΥΓ. ΙΣΤΑΘΜΗ		ΜΕΤΡΗΣΗ Ο2: 6,55	
		Δ. ΟΞΥΓ. ΜΕΤΡΗΣΗ pH: 5,95			
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ					
ΜΕΤΡΗΣΗ 1 ₍₁₎		ΜΕΤΡΗΣΗ 2 ₍₁₎		ΜΕΤΡΗΣΗ 3 ₍₁₎ : 4222	
ΠΡ. ΜΕΤΡΗΣΗ ₍₁₎		ΠΡ. ΜΕΤΡΗΣΗ ₍₁₎		ΠΡ. ΜΕΤΡΗΣΗ ₍₁₎ : 40638	
ΥΠΟΛΟΙΠΟ ₍₁₎		ΥΠΟΛΟΙΠΟ ₍₁₎		ΥΠΟΛΟΙΠΟ ₍₁₎	
ΣΥΝΟΛΟ ₍₁₎					
ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΑΑ		ΣΤΗΡΟΝ			
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΙ UASB 1		ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗ		ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΙ UASB 3	
ΜΕΤΡΗΣΗ 1 ₍₁₎		ΜΕΤΡΗΣΗ 2 ₍₁₎		ΜΕΤΡΗΣΗ 3 ₍₁₎ : 3916	
ΠΡ. ΜΕΤΡΗΣΗ ₍₁₎		ΠΡ. ΜΕΤΡΗΣΗ ₍₁₎		ΠΡ. ΜΕΤΡΗΣΗ ₍₁₎ : 3779	
ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ₍₁₎		ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ₍₁₎		ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ₍₁₎	
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΙ UASB 1		ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗ		ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΙ UASB 3	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ:		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ:		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ:	
ΜΕΤΡΗΣΗ pH:		ΜΕΤΡΗΣΗ pH:		ΜΕΤΡΗΣΗ pH:	
ΜΕΤΡΗΣΗ pH ₍₁₀₀₎ :		ΜΕΤΡΗΣΗ pH ₍₁₀₀₎ :		ΜΕΤΡΗΣΗ pH ₍₁₀₀₎ :	
ΜΕΤΡΗΣΗ 5,75 ₍₁₎ :		ΜΕΤΡΗΣΗ 5,75 ₍₁₎ :		ΜΕΤΡΗΣΗ 5,75 ₍₁₎ :	
ΜΕΤΡΗΣΗ 4,30 ₍₁₎ :		ΜΕΤΡΗΣΗ 4,30 ₍₁₎ :		ΜΕΤΡΗΣΗ 4,30 ₍₁₎ :	
ΛΟΓΟΣ ΑΝΤΙΔ ₍₁₎		ΛΟΓΟΣ ΑΝΤΙΔ ₍₁₎		ΛΟΓΟΣ ΑΝΤΙΔ ₍₁₎	
ΕΝΑΡΣΗ:		ΛΗΞΗ:		ΙΣΤΑΘΜΗ ΔΕΕ: C	
ΜΕΤΡΗΣΗ 1 ₍₁₎ :		ΜΕΤΡΗΣΗ 2 ₍₁₎ :		ΜΕΤΡΗΣΗ 3 ₍₁₎ :	
ΠΡ. ΜΕΤΡΗΣΗ ₍₁₎ :		ΠΡ. ΜΕΤΡΗΣΗ ₍₁₎ :		ΠΡ. ΜΕΤΡΗΣΗ ₍₁₎ :	
ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ₍₁₎		ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ₍₁₎		ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ₍₁₎	
ΣΥΝ. ΤΡΟΦ.					
ΠΡΟΣΕΤΑ ΙΚΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ					
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΙ UASB 1		ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΙ UASB 2		ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΙ UASB 3	
ΜΑΓΝΗΣΙΟ:		ΜΑΓΝΗΣΙΟ:		ΜΑΓΝΗΣΙΟ:	
ΣΙΔΗΡΟΣ:		ΣΙΔΗΡΟΣ:		ΣΙΔΗΡΟΣ:	
ΔΙΑΛΥΜΑ:					
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: ΜΕΤΑΤΥΠΩ 3667					
1) Στάθμη DAF					
2) Στάθμη DAF					
3) Οξυγόνο					
4) Στάθμη (3)					
5) Αποσύνθεση					
6) Τέλος Εξέτασης					
7/					

Σχήμα 2.11: Ημερήσιο έντυπο λειτουργικής παρακολούθησης εγκατάστασης.

2.8 Περιορισμοί της μεθοδολογίας

Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε δεδομένα μίας συγκεκριμένης τυροκομικής μονάδας και μίας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Τα αποτελέσματα δεν πρέπει να γενικεύονται άκριτα σε όλες τις τυροκομικές μονάδες, καθώς η σύσταση των αποβλήτων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες.

Οι μετρήσεις προέρχονται από πραγματική λειτουργία και όχι από πλήρως ελεγχόμενο πειραματικό σχεδιασμό. Αυτό σημαίνει ότι οι διακυμάνσεις μπορεί να οφείλονται σε μεταβολές παροχής, παραγωγής, πλύσεων και ανακυκλοφοριών. Ωστόσο, η πραγματική φύση των δεδομένων αποτελεί και σημαντικό πλεονέκτημα, διότι αποτυπώνει συνθήκες πεδίου.

Η ερμηνεία εστιάζει κυρίως στη σχέση COD εισόδου και εξόδου DAF. Η DAF όμως αξιολογείται πληρέστερα με παραμέτρους όπως TSS και FOG. Επομένως, η εργασία αναγνωρίζει ότι η μικρή μείωση COD δεν ισοδυναμεί με μηδενική τεχνική αξία της DAF.

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα και Συζήτηση

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα διαθέσιμα δεδομένα COD από τη λειτουργία της εγκατάστασης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων της τυροκομικής μονάδας. Η ανάλυση επικεντρώνεται στη μεταβολή του COD πριν και μετά τη DAF, καθώς και στη σύγκριση με τη δεξαμενή οξυγένεσης.

Η παράμετρος COD χρησιμοποιείται ως βασικός δείκτης οργανικού ρυπαντικού φορτίου. Ωστόσο, η ερμηνεία της απόδοσης της DAF γίνεται με προσοχή, επειδή η DAF απομακρύνει κυρίως σωματιδιακό και λιπαρό φορτίο, ενώ το COD περιλαμβάνει και διαλυμένες οργανικές ενώσεις.

3.2 Παρουσίαση δεδομένων COD

Ημερομηνία	Είσοδος DAF (mg/L)	Έξοδος DAF (mg/L)	Δεξαμενή οξυγένεσης (mg/L)
11/11/2025	17.500	16.440	16.280
18/11/2025	22.280	19.380	18.900
24/11/2025	22.640	22.020	21.480
08/12/2025	22.540	20.920	21.860
15/12/2025	22.620	21.620	21.880
22/12/2025	22.620	22.500	21.300
29/12/2025	22.580	22.560	21.940
05/01/2026	22.740	22.500	22.480
12/01/2026	22.940	22.680	22.560
27/01/2026	22.760	22.620	22.420

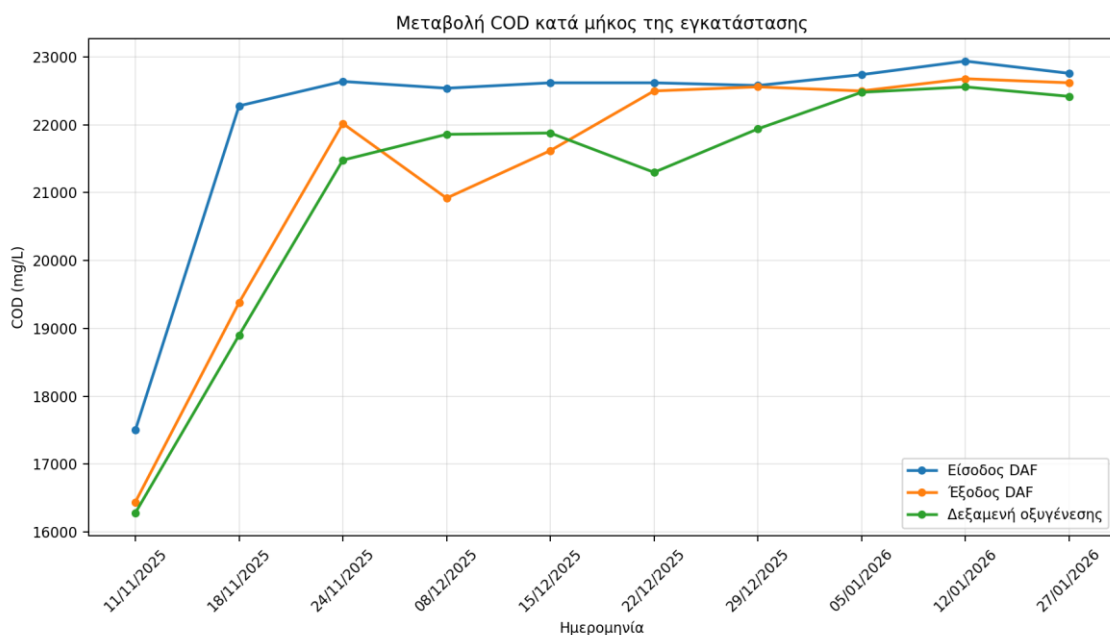
Πίνακας 3.1: Μετρήσεις COD στη δεξαμενή εισόδου DAF, στη δεξαμενή εξόδου DAF και στη δεξαμενή οξυγένεσης.

Οι μετρήσεις ανά ημερομηνία και σημείο δειγματοληψίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Οι τιμές COD στην είσοδο της DAF κυμαίνονται από 17.500 έως 22.940 mg/L. Η πρώτη μέτρηση της σειράς εμφανίζει χαμηλότερη τιμή, ενώ στις περισσότερες επόμενες ημερομηνίες οι τιμές βρίσκονται πάνω από 22.000 mg/L. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει το υψηλό οργανικό φορτίο των αποβλήτων της μονάδας.

Οι τιμές στην έξοδο της DAF παραμένουν επίσης υψηλές, γεγονός που υποδηλώνει ότι η DAF δεν απομακρύνει το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού COD. Η παρατήρηση αυτή είναι συμβατή με τη θεωρητική λειτουργία της μεθόδου, καθώς μεγάλο μέρος του COD των τυροκομικών

αποβλήτων βρίσκεται σε διαλυμένη μορφή. Η χρονική μεταβολή των τριών σειρών απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Μεταβολή COD στη δεξαμενή εισόδου DAF, στη δεξαμενή εξόδου DAF και στη δεξαμενή οξυγένεσης.

Πηγή: επεξεργασία δεδομένων της παρούσας εργασίας.

3.3 Απόδοση απομάκρυνσης COD μέσω DAF

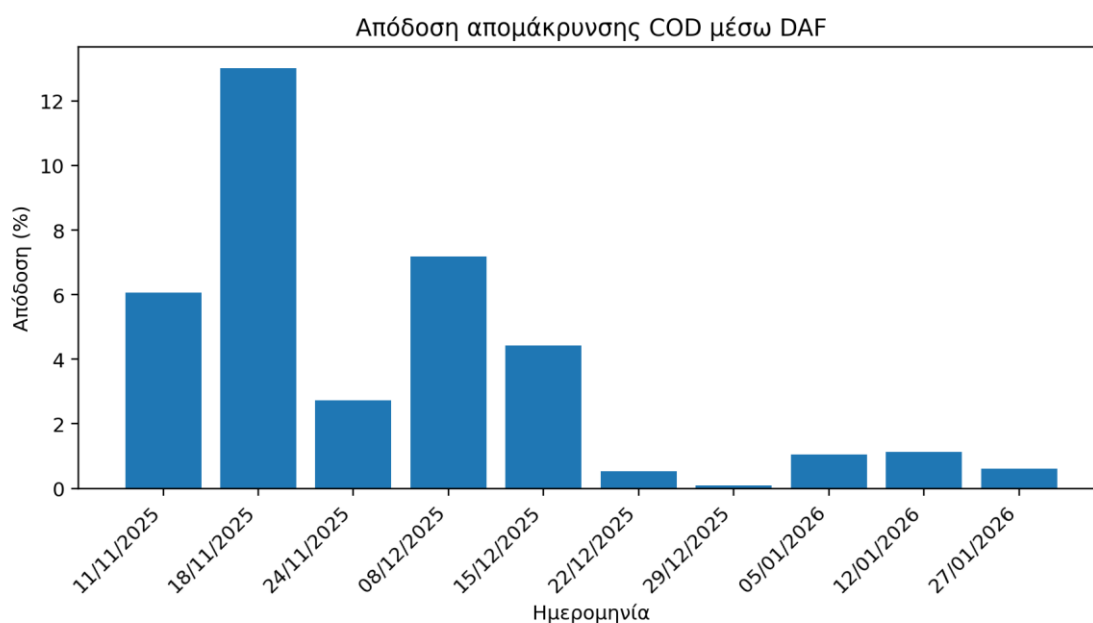
Ημερομηνία	Είσοδος DAF	Έξοδος DAF	Μείωση COD	Απόδοση (%)
11/11/2025	17.500	16.440	1.060	6,06
18/11/2025	22.280	19.380	2.900	13,02
24/11/2025	22.640	22.020	620	2,74
08/12/2025	22.540	20.920	1.620	7,19
15/12/2025	22.620	21.620	1.000	4,42
22/12/2025	22.620	22.500	120	0,53
29/12/2025	22.580	22.560	20	0,09
05/01/2026	22.740	22.500	240	1,06
12/01/2026	22.940	22.680	260	1,13
27/01/2026	22.760	22.620	140	0,62

Πίνακας 3.2: Υπολογισμός απόδοσης απομάκρυνσης COD μέσω DAF.

Οι επιμέρους μειώσεις και οι αντίστοιχες αποδόσεις απομάκρυνσης COD συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2.

Η μέση απόδοση απομάκρυνσης COD μέσω της DAF υπολογίστηκε σε 3,68%. Η μέση απόλυτη μείωση COD ήταν περίπου 798 mg/L. Η μέγιστη απόδοση εμφανίστηκε στις 18/11/2025, ενώ η ελάχιστη στις 29/12/2025.

Η διακύμανση των τιμών δείχνει ότι η απόδοση της DAF επηρεάζεται από τη σύσταση του αποβλήτου και πιθανώς από τις λειτουργικές συνθήκες. Παράλληλα, οι χαμηλές τιμές σε αρκετές ημερομηνίες υποδηλώνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού φορτίου δεν ήταν σε μορφή που μπορεί να απομακρυνθεί με επίπλευση. Η ποσοστιαία απόδοση ανά ημερομηνία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Ποσοστιαία απόδοση απομάκρυνσης COD μέσω DAF ανά ημερομηνία. Πηγή: επεξεργασία δεδομένων της παρούσας εργασίας.

3.4 Στατιστική περιγραφή των μετρήσεων

Στατιστικό μέγεθος	Είσοδος DAF	Έξοδος DAF	Δεξαμενή οξυγένεσης
Μέση τιμή (mg/L)	22.122	21.324	21.110
Ελάχιστη τιμή (mg/L)	17.500	16.440	16.280
Μέγιστη τιμή (mg/L)	22.940	22.680	22.560
Τυπική απόκλιση (mg/L)	1.633	2.005	1.998

Πίνακας 3.3: Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων COD.

Τα βασικά περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των μετρήσεων συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3.

3.5 Ερμηνεία της περιορισμένης μείωσης COD

Η περιορισμένη μείωση του COD μέσω της DAF μπορεί να ερμηνευθεί με βάση τη φύση της διεργασίας. Η DAF απομακρύνει σωματίδια, λίπη και κροκίδες που μπορούν να προσκολληθούν σε μικροφυσαλίδες και να ανυψωθούν στην επιφάνεια. Δεν αποτελεί όμως διεργασία χημικής οξείδωσης ή βιολογικής αποδόμησης.

Στα τυροκομικά απόβλητα σημαντικό μέρος του COD οφείλεται στη λακτόζη και σε άλλες διαλυμένες οργανικές ενώσεις. Αυτές οι ενώσεις δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά με επίπλευση. Συνεπώς, η DAF μπορεί να μειώνει σημαντικά το TSS και τα λίπη, αλλά να εμφανίζει περιορισμένη επίδραση στο συνολικό COD.

Το αποτέλεσμα της παρούσας μελέτης δεν ακυρώνει την τεχνική αξία της DAF. Αντίθετα, αναδεικνύει ότι η αξιολόγηση της μεθόδου πρέπει να βασίζεται σε κατάλληλους δείκτες, όπως TSS, FOG, θολότητα και λειτουργική σταθερότητα των επόμενων σταδίων.

3.6 Σύγκριση με τη δεξαμενή οξυγένεσης

Η μέση τιμή COD στη δεξαμενή οξυγένεσης ήταν 21.110 mg/L, ελαφρώς χαμηλότερη από τη μέση τιμή των 21.324 mg/L στη δεξαμενή εξόδου DAF. Η δεξαμενή οξυγένεσης βρίσκεται μετά τη δεξαμενή εξόδου DAF και πριν από τους αντιδραστήρες UASB, επομένως οι δύο σειρές αντιστοιχούν σε διαδοχικά σημεία της κύριας παροχής των περίπου 130 m³/ημέρα.

Σε ορισμένες ημερομηνίες η τιμή COD στη δεξαμενή οξυγένεσης εμφανίζεται μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή στη δεξαμενή εξόδου DAF. Η διαφορά αυτή δεν τεκμηριώνει αύξηση του οργανικού φορτίου από τη διεργασία οξυγένεσης, καθώς οι στιγμιαίες μετρήσεις μπορεί να μην αφορούν το ίδιο υδραυλικό πακέτο. Ο χρόνος παραμονής, η ανάμιξη, οι μεταβολές της τροφοδοσίας και η αναλυτική αβεβαιότητα μπορούν να επηρεάζουν την άμεση σύγκριση των δύο σημείων.

Για ακριβέστερη αξιολόγηση της μεταβολής μεταξύ της εξόδου DAF και της δεξαμενής οξυγένεσης απαιτούνται συγχρονισμένες ζεύξεις δειγμάτων, καταγραφή της παροχής και συνεκτίμηση του χρόνου παραμονής. Τα διαθέσιμα δεδομένα επιτρέπουν περιγραφική σύγκριση των δύο σημείων, αλλά όχι αυτοτελή υπολογισμό απόδοσης της δεξαμενής οξυγένεσης.

3.7 Ρόλος της DAF ως προεπεξεργασίας

Η DAF λειτουργεί ως φυσικοχημική προεπεξεργασία της κύριας παροχής των περίπου 130 m³/ημέρα πριν από τη δεξαμενή οξυγένεσης και τους αντιδραστήρες UASB. Η παράλληλη παροχή των περίπου 20 m³/ημέρα από τη δεξαμενή εξισορρόπησης δεν διέρχεται από τη DAF, αλλά οδηγείται απευθείας στη δεξαμενή αερισμού. Η απομάκρυνση λιπών και στερεών από την κύρια γραμμή προστατεύει τις αντλίες, τις σωληνώσεις και τους αναερόβιους αντιδραστήρες.

Η ύπαρξη επιφανειακής ιλύος στη DAF δείχνει ότι το σύστημα διαχωρίζει υλικό από το υγρό ρεύμα. Το υλικό αυτό, αν παρέμενε στο απόβλητο, θα μπορούσε να οδηγήσει σε αφρισμό, επιφανειακά στρώματα ή μειωμένη μεταφορά μάζας στα επόμενα στάδια.

Συνεπώς, ακόμη και με μέση μείωση COD περίπου 3,68%, η DAF μπορεί να θεωρηθεί απαραίτητη ως τεχνολογική βαθμίδα προετοιμασίας του αποβλήτου.

3.8 Συνολική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι τα απόβλητα της εξεταζόμενης μονάδας έχουν πολύ υψηλό COD και απαιτούν ολοκληρωμένη επεξεργασία. Η DAF μειώνει περιορισμένα το συνολικό COD, αλλά λειτουργεί ως κρίσιμο στάδιο απομάκρυνσης σωματιδιακού και λιπαρού φορτίου.

Η συνολική γραμμή επεξεργασίας συνδυάζει τη φυσικοχημική προεπεξεργασία DAF της κύριας παροχής, τρεις επιλεκτικά τροφοδοτούμενους αντιδραστήρες UASB, παράλληλη απευθείας παροχή προς την αερόβια βαθμίδα, καθίζηση, τελική έξοδο και αφυδάτωση της ιλύος. Η ολοκληρωμένη αυτή διάταξη είναι τεχνικά ορθότερη από την εφαρμογή μίας μεμονωμένης μεθόδου, επειδή τα τυροκομικά απόβλητα περιέχουν τόσο σωματιδιακό όσο και διαλυμένο οργανικό φορτίο.

Η μελέτη καταδεικνύει τη σημασία της ορθής επιλογής δεικτών αξιολόγησης. Αν η DAF αξιολογηθεί αποκλειστικά μέσω COD, η συμβολή της μπορεί να υποεκτιμηθεί. Αν όμως συνυπολογιστούν TSS, λίπη και λειτουργική προστασία των βιολογικών βαθμίδων, η σημασία της είναι σαφής.

Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και Προτάσεις

4.1 Γενικά συμπεράσματα

Η εργασία διερεύνησε την επεξεργασία υγρών αποβλήτων τυροκομικής μονάδας με έμφαση στη συμβολή της DAF στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου. Η μελέτη συνδύασε θεωρητική βιβλιογραφική ανάλυση και πραγματικά δεδομένα πεδίου, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση του ζητήματος.

Η υφιστάμενη γραμμή επεξεργασίας διαχωρίζεται μετά τη δεξαμενή εξισορρόπησης σε δύο παροχές. Η κύρια παροχή, περίπου $130 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$, διέρχεται από τη δεξαμενή εισόδου και ρύθμισης pH, τη DAF, τη δεξαμενή εξόδου, τη δεξαμενή οξυγένεσης και έναν ή περισσότερους από τους τρεις UASB. Η δεύτερη παροχή, περίπου $20 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$, οδηγείται απευθείας από την εξισορρόπηση στη δεξαμενή αερισμού, όπου συνενώνεται με την εκροή των UASB. Ακολουθούν καθίζηση και τελική έξοδος, ενώ το σύνολο της ιλύος οδηγείται σε δεξαμενή αποθήκευσης και ταινιοφιλτρόπρεσα χωρίς ανακυκλοφορία προς τον αερισμό. Το παραγόμενο βιοαέριο αξιοποιείται ως καύσιμο στον λέβητα του εργοστασίου.

4.2 Συμπεράσματα για τα τυροκομικά απόβλητα

Τα τυροκομικά απόβλητα χαρακτηρίζονται από υψηλό COD, υψηλό BOD₅, αιωρούμενα στερεά, λίπη, πρωτεΐνες και λακτόζη. Η σύστασή τους είναι μεταβλητή και επηρεάζεται από την παραγωγική διαδικασία, το είδος των προϊόντων, τις πλύσεις και τη διαχείριση του τυρογάλακτος.

Η μέση τιμή COD στην είσοδο της DAF της εξεταζόμενης εγκατάστασης ήταν περίπου 22.122 mg/L , γεγονός που επιβεβαιώνει την υψηλή οργανική επιβάρυνση του αποβλήτου. Η τιμή αυτή καθιστά αναγκαία τη συνδυασμένη επεξεργασία και όχι απλή φυσική απομάκρυνση.

4.3 Συμπεράσματα για τη DAF

Η μέση απόδοση απομάκρυνσης COD μέσω της DAF ήταν περίπου 3,68%. Η τιμή αυτή δείχνει ότι η DAF, στη συγκεκριμένη εγκατάσταση, δεν αποτελεί κύρια βαθμίδα απομάκρυνσης του συνολικού οργανικού φορτίου.

Η περιορισμένη μείωση COD οφείλεται στο γεγονός ότι σημαντικό μέρος του COD βρίσκεται σε διαλυμένη μορφή. Παρά ταύτα, η DAF είναι σημαντική για την απομάκρυνση λιπών,

αιωρούμενων στερεών, αφρών και επιπλεόντων υλικών, καθώς και για την προστασία των επόμενων σταδίων.

4.4 Τεχνικές προτάσεις

Προτείνεται η συστηματική παρακολούθηση TSS και λιπών πριν και μετά τη DAF, ώστε να αξιολογείται πληρέστερα η πραγματική απόδοση της μεθόδου. Η χρήση μόνο του COD δεν είναι επαρκής δείκτης για τεχνολογίες επίπλευσης.

Προτείνεται επίσης η βελτιστοποίηση του pH, της δοσολογίας κροκιδωτικού, της πίεσης κορεσμού και του λόγου ανακυκλοφορίας. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απομάκρυνση στερεών και λιπών.

Η δεξαμενή εξισορρόπησης πρέπει να λειτουργεί με τρόπο που μειώνει τις αιχμές φορτίου. Παράλληλα, η μονάδα πρέπει να περιορίζει τις απώλειες γάλακτος και τυρογάλακτος στην πηγή, διότι η πρόληψη της ρύπανσης είναι πιο αποδοτική από την επεξεργασία υψηλά φορτισμένων αποβλήτων.

4.5 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μελλοντική έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί σε πειραματική βελτιστοποίηση της DAF με διαφορετικά κροκιδωτικά, πολυηλεκτρολύτες και τιμές pH. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της απομάκρυνσης COD, TSS και FOG σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Προτείνεται επίσης η παρακολούθηση της εγκατάστασης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ώστε να ληφθούν υπόψη εποχικές μεταβολές στην παραγωγή. Η σύγκριση διαφορετικών τυροκομικών μονάδων θα μπορούσε να δώσει πιο γενικεύσιμα συμπεράσματα.

Τέλος, χρήσιμη θα ήταν μία οικονομοτεχνική αξιολόγηση της DAF, η οποία θα περιλαμβάνει κόστος ενέργειας, χημικών, συντήρησης, διαχείρισης ιλύος και πιθανή εξοικονόμηση από τη σταθερότερη λειτουργία των βιολογικών σταδίων.

4.6 Τελικό συμπέρασμα

Η DAF αποτελεί χρήσιμη τεχνολογία προεπεξεργασίας για τυροκομικά απόβλητα, αλλά δεν επαρκεί ως αυτόνομη μέθοδος πλήρους επεξεργασίας. Η αξία της έγκειται στην απομάκρυνση

στερεών, λιπών και επιπλεόντων υλικών και στη βελτίωση της λειτουργίας των επόμενων βιολογικών βαθμίδων.

Η παρούσα μελέτη δείχνει ότι η ολοκληρωμένη επεξεργασία τυροκομικών αποβλήτων απαιτεί συνδυασμό προεπεξεργασίας, αναερόβιας επεξεργασίας, αερόβιας επεξεργασίας και τελικού διαχωρισμού. Με σωστή παρακολούθηση και βελτιστοποίηση, η DAF μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βιώσιμη λειτουργία των τυροκομικών μονάδων.

Βιβλιογραφία

- APHA, AWWA, WEF. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd Edition. American Public Health Association.
- Carvalho, F., Prazeres, A. R., & Rivas, J. (2013). Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the Total Environment*, 445–446, 385–396. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.038>
- Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment. Official Journal of the European Communities.
- Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast). Official Journal of the European Union.
- Kushwaha, J. P., Srivastava, V. C., & Mall, I. D. (2011). An overview of various technologies for the treatment of dairy wastewaters. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(5), 442–452. <https://doi.org/10.1080/10408391003663879>
- Metcalf & Eddy/AECOM. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th Edition. McGraw-Hill Education.
- Muñoz-Alegría, J. A., et al. (2021). Dissolved Air Flotation: A Review from the Perspective of System Parameters and Applications. *Tecnológicas*, 24(51).
- Nagappan, S., Phinney, D. M., & Heldman, D. R. (2018). Management of Waste Streams from Dairy Manufacturing Operations Using Membrane Filtration and Dissolved Air Flotation. *Applied Sciences*, 8(12), 2694. <https://doi.org/10.3390/app8122694>
- Pereira, M. S., Borges, A. C., Muniz, G. L., Heleno, F. F., & Faroni, L. R. D. (2020). Dissolved air flotation optimization for treatment of dairy effluents with organic coagulants. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101270. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101270>
- Slavov, A. K. (2017). General Characteristics and Treatment Possibilities of Dairy Wastewater – A Review. *Food Technology and Biotechnology*, 55(1), 14–28. <https://doi.org/10.17113/ftb.55.01.17.4520>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th Edition. McGraw-Hill.
- Υ.Α. οικ. 5673/400/1997 (ΦΕΚ 192/Β/14.03.1997). Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων.
- International Dairy Federation. (2019). Wastewater Treatment in Dairy Processing. Bulletin of the International Dairy Federation, No. 500/2019.
- Lettinga, G., & Hulshoff Pol, L. W. (1991). UASB-process design for various types of wastewaters. *Water Science and Technology*, 24(8), 87–107.
- Demirel, B., Yenigün, O., & Onay, T. T. (2005). Anaerobic treatment of dairy wastewaters: A review. *Process Biochemistry*, 40(8), 2583–2595.
- Prazeres, A. R., Carvalho, F., & Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48–68.
- Britz, T. J., van Schalkwyk, C., & Hung, Y.-T. (2006). Treatment of dairy processing wastewaters. In *Waste Treatment in the Food Processing Industry*. CRC Press.
- Bylund, G. (1995). Dairy Processing Handbook. Tetra Pak Processing Systems AB.
- Fard, A. K., et al. (2020). Membrane and hybrid processes for dairy wastewater treatment: technical considerations and limitations. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009). A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155, 1–18.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α: Αναλυτικός πίνακας COD

Οι αναλυτικές τιμές και οι υπολογισμένες αποδόσεις απομάκρυνσης COD παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.1.

Ημερομηνία	Είσοδος DAF	Έξοδος DAF	Δεξαμενή οξυγένεσης	Μείωση COD	Απόδοση DAF (%)	Σχετική διαφορά COD εισόδου DAF– οξυγένεσης (%)
11/11/2025	17.500	16.440	16.280	1.060	6,06	6,97
18/11/2025	22.280	19.380	18.900	2.900	13,02	15,17
24/11/2025	22.640	22.020	21.480	620	2,74	5,12
08/12/2025	22.540	20.920	21.860	1.620	7,19	3,02
15/12/2025	22.620	21.620	21.880	1.000	4,42	3,27
22/12/2025	22.620	22.500	21.300	120	0,53	5,84
29/12/2025	22.580	22.560	21.940	20	0,09	2,83
05/01/2026	22.740	22.500	22.480	240	1,06	1,14
12/01/2026	22.940	22.680	22.560	260	1,13	1,66
27/01/2026	22.760	22.620	22.420	140	0,62	1,49

Πίνακας Π.1: Αναλυτικές τιμές και υπολογισμένες αποδόσεις COD.

Παράρτημα Β: Τύποι υπολογισμών

Η απόδοση απομάκρυνσης μιας παραμέτρου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Απόδοση απομάκρυνσης (\%)} = [(C_{\text{εισόδου}} - C_{\text{εξόδου}}) / C_{\text{εισόδου}}] \times 100$$

Για τα αιωρούμενα στερεά εφαρμόζεται η βαρυμετρική σχέση:

$$\text{TSS (mg/L)} = [(A - B) \times 1000] / V$$

όπου Α είναι η τελική μάζα φίλτρου μετά τη διήθηση και ξήρανση, Β η αρχική μάζα ξηρού φίλτρου και V ο όγκος του δείγματος σε λίτρα.

Παράρτημα Γ: Προτεινόμενο πρόγραμμα λειτουργικής παρακολούθησης

Το παρόν παράρτημα προτείνει ένα πρακτικό πρόγραμμα παρακολούθησης για τυροκομική μονάδα με γραμμή επεξεργασίας που περιλαμβάνει εξισορρόπηση, DAF, UASB, μονάδα αερόβιας επεξεργασίας και καθίζηση. Το πρόγραμμα μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τις απαιτήσεις των περιβαλλοντικών όρων, τη δυναμικότητα της μονάδας και τη διαθεσιμότητα εργαστηριακού εξοπλισμού. Η προτεινόμενη διάρθρωση συνοψίζεται στον Πίνακα Π.2.

Σημείο	Παράμετροι	Συχνότητα	Σκοπός
Είσοδος εγκατάστασης	pH, COD, TSS, FOG, παροχή	1–2 φορές/εβδομάδα ή σε αιχμές	Έλεγχος αρχικού φορτίου
Έξοδος DAF	COD, TSS, FOG, θολότητα	1–2 φορές/εβδομάδα	Αξιολόγηση προεπεξεργασίας
UASB	pH, αλκαλικότητα, VFA, βιοαέριο	Τακτικά, ανάλογα με τη σταθερότητα	Έλεγχος αναερόβιας διεργασίας
Μονάδα αερόβιας επεξεργασίας	DO, pH, MLSS, αφρισμός	Ημερήσια παρατήρηση / εργαστηριακά περιοδικά	Έλεγχος αερόβιας λειτουργίας
Τελική εκροή	COD, BOD ₅ , TSS, pH, N, P όπου απαιτείται	Σύμφωνα με όρους διάθεσης	Τεκμηρίωση συμμόρφωσης

Πίνακας Π.2: Ενδεικτικό πρόγραμμα παρακολούθησης ανά σημείο της εγκατάστασης.

Για τη DAF προτείνεται, πέρα από τη μέτρηση COD, η συστηματική παρακολούθηση TSS και FOG. Οι παράμετροι αυτές αντιστοιχούν καλύτερα στον μηχανισμό λειτουργίας της επίπλευσης και επιτρέπουν πιο δίκαιη αξιολόγηση της μεθόδου. Η καταγραφή της κατανάλωσης χημικών είναι επίσης απαραίτητη για την εκτίμηση του λειτουργικού κόστους.

Σε περίπτωση απότομης αύξησης αφρισμού, θολότητας ή οσμών, πρέπει να γίνεται έκτακτη δειγματοληψία και να καταγράφονται οι παραγωγικές δραστηριότητες της ημέρας. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται μετά από πλύσεις CIP, αλλαγές προϊόντων, απόρριψη άλμης ή πιθανή είσοδο τυρογάλακτος στο δίκτυο αποβλήτων.

Παράρτημα Δ: Ενδεικτικό ημερήσιο φύλλο ελέγχου DAF

Το ακόλουθο υπόδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρακτικό εργαλείο για την καθημερινή παρακολούθηση της DAF. Η χρήση τέτοιου φύλλου βοηθά στον εντοπισμό τάσεων, στη συσχέτιση προβλημάτων με παραγωγικά γεγονότα και στη βελτίωση της συντήρησης. Το υπόδειγμα παρουσιάζεται στον Πίνακα Π.3.

Έλεγχος	Κανονική κατάσταση	Πιθανή απόκλιση	Προτεινόμενη ενέργεια
Πίεση συστήματος	Σταθερή στην επιθυμητή περιοχή	Χαμηλή ή ασταθής πίεση	Έλεγχος αντλίας, διαρροών και ακροφυσίων
Φυσαλίδες	Ομοιόμορφη παραγωγή μικροφυσαλίδων	Μείωση ή ανομοιομορφία	Καθαρισμός ακροφυσίων και έλεγχος ανακυκλοφορίας
Επιφανειακή ιλύς	Σταθερή στρώση που απομακρύνεται εύκολα	Πολύ λεπτή ή διαλυόμενη ιλύς	Έλεγχος pH, κροκιδωτικού και ανάδευσης
Εκροή DAF	Μειωμένη θολότητα και λίπη	Θολή εκροή ή επιπλέοντα	Έλεγχος υδραυλικής φόρτισης και χημικής δόσης
Χημικά	Σταθερή κατανάλωση	Απότομη αύξηση δόσης	Έλεγχος σύστασης εισόδου και δοκιμή jar-test

Πίνακας Π.3: Υπόδειγμα ημερήσιου ελέγχου λειτουργίας DAF.

Η τήρηση ημερήσιου φύλλου δεν υποκαθιστά τις εργαστηριακές αναλύσεις, αλλά παρέχει άμεση πληροφόρηση για τη λειτουργία. Συχνά, οι οπτικές παρατηρήσεις, όπως αφρισμός, χρώμα, πάχος

ιλύος και οσμής, προηγούνται των αναλυτικών ενδείξεων και μπορούν να λειτουργήσουν ως πρώιμη προειδοποίηση.

Για να έχει αξία το φύλλο ελέγχου, πρέπει να συμπληρώνεται με συνέπεια και να συνδέεται με το πρόγραμμα παραγωγής. Η καταγραφή ότι την ίδια ημέρα πραγματοποιήθηκε έντονη πλύση ή παραγωγή συγκεκριμένου προϊόντος μπορεί να εξηγήσει μεταβολές στην απόδοση της DAF.

Παράρτημα Ε: Ενδεικτικό σχέδιο μελλοντικής πειραματικής διερεύνησης

Μία μελλοντική πειραματική διερεύνηση θα μπορούσε να οργανωθεί με στόχο τη βελτιστοποίηση της DAF σε πραγματικό τυροκομικό απόβλητο. Η διερεύνηση θα περιλάμβανε μεταβολή pH, δοσολογίας κροκιδωτικού, πολυηλεκτρολύτη, πίεσης κορεσμού και λόγου ανακυκλοφορίας. Για κάθε συνθήκη θα μετρώνται COD, TSS, FOG, θολότητα και όγκος παραγόμενης ιλύος. Ο ενδεικτικός σχεδιασμός συνοψίζεται στον Πίνακα Π.4.

Μεταβλητή	Ενδεικτικά επίπεδα	Κύριες αποκρίσεις
pH	5, 6,5, 8	TSS, FOG, θολότητα, COD
Κροκιδωτικό	50, 100, 200, 300 mg/L	Σχηματισμός κροκίδων και ιλύς
Πολυηλεκτρολύτης	0,5, 1, 2 mg/L	Σταθερότητα κροκίδων
Πίεση	3, 4, 5, 6 bar	Παραγωγή φυσαλίδων
Ανακυκλοφορία	10, 20, 30%	Απόδοση επίπλευσης

Πίνακας Π.4: Ενδεικτικός σχεδιασμός μελλοντικών δοκιμών DAF.

Η εφαρμογή τέτοιου σχεδιασμού θα επέτρεπε την αποσαφήνιση του κατά πόσο η χαμηλή μείωση COD της παρούσας μελέτης οφείλεται στη φύση του αποβλήτου ή σε μη βέλτιστες λειτουργικές συνθήκες. Παράλληλα, θα παρείχε δεδομένα για την πραγματική απομάκρυνση TSS και FOG, που είναι οι πιο κατάλληλοι δείκτες για τη DAF.

Τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να αναλυθούν στατιστικά με υπολογισμό μέσων τιμών, τυπικών αποκλίσεων και, όπου υπάρχουν επαναλήψεις, με ανάλυση διακύμανσης. Έτσι, η βελτιστοποίηση θα βασιζόταν σε τεκμηριωμένα δεδομένα και όχι μόνο σε εμπειρικές ρυθμίσεις.