



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ/ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΩΝ :
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΚΡΟΦΗ-
ΣΗΣ »**

**«TREATMENT/MANAGEMENT OF PETROLEUM TANK RESIDUES: CASE STUDY
OF THERMAL DEPRECIATION TECHNOLOGY SYSTEM »**

ΧΑΤΖΗΜΠΑΛΙΩΤΗΣ ΑΝΤΩΝΗΣ

Μηχανικός περιβάλλοντος και μηχανικός αντιρρύπανσης

Επιβλέπων καθηγητής

ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Θεσσαλονίκη

ΙΟΥΝΙΟΣ 2026

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην πραγματοποίηση και ολοκλήρωσή της.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνου, για την επιστημονική του καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές, τις εύστοχες παρατηρήσεις και τη συνεχή υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η εμπειρία, η επιστημονική του κατάρτιση και η διαθεσιμότητά του να προσφέρει ουσιαστική καθοδήγηση συνέβαλαν καθοριστικά στη διαμόρφωση και ολοκλήρωση της ερευνητικής αυτής προσπάθειας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στην εταιρεία **INTERGEO ΕΠΕ**, η οποία μου παρείχε τη δυνατότητα να πραγματοποιήσω το πειραματικό μέρος της εργασίας, καθώς και να αποκτήσω πολύτιμη πρακτική εμπειρία στον τομέα της επεξεργασίας πετρελαϊκών αποβλήτων. Η πρόσβαση στον απαραίτητο εξοπλισμό, στις εγκαταστάσεις και στα δεδομένα της εταιρείας αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχή διεξαγωγή της έρευνας. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τη διοίκηση και όλους τους συνεργάτες της εταιρείας για την άψογη συνεργασία, την προθυμία τους να μοιραστούν τις γνώσεις και την εμπειρία τους, καθώς και για την πολύτιμη υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης.

Τέλος, επιθυμώ να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη προς την οικογένειά μου για την αμέριστη αγάπη, την αδιάκοπη στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Η εμπιστοσύνη τους στις δυνατότητές μου και η διαρκής συμπαράστασή τους αποτέλεσαν τη σημαντικότερη πηγή δύναμης και κινήτρου για την επίτευξη των ακαδημαϊκών και επαγγελματικών μου στόχων.

Η ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί το επιστέγασμα μιας απαιτητικής αλλά ιδιαίτερα δημιουργικής και εποικοδομητικής ερευνητικής διαδρομής. Η συμβολή όλων όσων με στήριξαν σε αυτή την προσπάθεια υπήρξε ανεκτίμητη και τους εκφράζω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	4
Λέξεις-κλειδιά	5
ABSTRACT	6
Keywords	7
1. Εισαγωγή.....	8
Σκοπός της Εργασίας.....	9
2. Επεξεργασία και διαχείριση καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών	11
2.1 Μηχανικές / Φυσικές Διαδικασίες.....	15
2.1.1 Φυγοκέντριση	16
2.1.2 Διφασική φυγοκέντριση.....	18
2.1.3 Τριφασική φυγοκέντριση.....	21
2.1.4 Φύλτραυση.....	25
2.1.5 Επίπλευση με αέρα (Air flotation).....	30
2.1.6 Επεξεργασία ψύξης/απόψυξης.....	32
3. Χημικές Τεχνολογίες.....	34
3.1 Χημική Διάσπαση Γαλακτωμάτων	35
3.1.1 Εκχύλιση με Διαλύτες.....	37
3.1.2 Μέθοδοι οξείδωσης	39
3.1.3 Σταθεροποίηση/στερεοποίηση πετρελαϊκών αποβλήτων	42
3.1.4 Ηλεκτροχημική Επεξεργασία Πετρελαϊκών Καταλοίπων	44
4. Θερμικές / Ενεργειακές Μέθοδοι.....	47
4.1 Σύστημα Θερμικής Εκρόφησης.....	47
4.1.1 Πυρόλυση	50
4.1.2 Αποτέφρωση	52
4.1.3 Αναερόβια χώνευση.....	54
5. Περίπτωση μελέτης	56
5.1 Περιγραφή Μονάδας Προ επεξεργασίας με Τριφασική Φυγοκέντριση	56
5.1.2 Σύστημα τεχνολογίας θερμικής εκρόφησης.	58
5.1.3 Απόδοση και Περιβαλλοντική Απόκριση.....	60
5.1.4 Συνολική Απόδοση Εγκατάστασης Θερμικής Εκρόφησης.....	69
6. Αποτελέσματα	70
7. Συμπεράσματα.....	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80

Περίληψη

Η διαχείριση και η επεξεργασία των καταλοίπων που προέρχονται από δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαιοειδών αποτελεί ένα σύνθετο περιβαλλοντικό και τεχνολογικό ζήτημα για τη βιομηχανία πετρελαίου, τις εγκαταστάσεις αποθήκευσης καυσίμων και τις μονάδες διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων. Τα συγκεκριμένα απόβλητα, γνωστά ως πετρελαϊκά κατάλοιπα δεξαμενών, σχηματίζονται κατά τη μακροχρόνια αποθήκευση και διακίνηση πετρελαϊκών προϊόντων και χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα σύνθετη φυσικοχημική σύσταση. Περιέχουν σημαντικές ποσότητες υδρογονανθράκων, νερού, ανόργανων στερεών, ασφατενίων, ρητινών, πτητικών οργανικών ενώσεων, πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων και άλλων οργανικών ενώσεων με αυξημένη περιβαλλοντική επικινδυνότητα. Η πολυπλοκότητα της σύστασής τους, σε συνδυασμό με την υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικό φορτίο και τη δυσκολία αποτελεσματικού διαχωρισμού των επιμέρους φάσεων, καθιστά απαραίτητη την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας με στόχο τη μείωση του περιβαλλοντικού φορτίου, την ανάκτηση αξιοποιήσιμων πετρελαϊκών συστατικών και την ασφαλή τελική διαχείριση των υπολειμμάτων. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται και αξιολογούνται οι κυριότερες σύγχρονες τεχνολογίες επεξεργασίας καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών, οι οποίες περιλαμβάνουν μηχανικές, χημικές και θερμικές διεργασίες. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας τους, οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα των διεργασιών και τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά μιας ολοκληρωμένης μονάδας θερμικής εκρόφησης. Οι μηχανικές μέθοδοι αποτελούν βασικό στάδιο επεξεργασίας και περιλαμβάνουν τη φυγοκέντρωση, τη διφασική και τριφασική φυγοκέντρωση, τη φίλτρωση και την επίπλευση με αέρα. Οι διεργασίες αυτές βασίζονται στον φυσικό διαχωρισμό των διαφορετικών φάσεων του αποβλήτου και συμβάλλουν στην απομάκρυνση νερού και στερεών, καθώς και στην ανάκτηση πετρελαϊκών κλασμάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην τριφασική φυγοκέντρωση ως μέθοδο προεπεξεργασίας, καθώς επιτρέπει τον ταυτόχρονο διαχωρισμό πετρελαίου, νερού και στερεών, βελτιώνοντας την απόδοση των επόμενων σταδίων επεξεργασίας.

Παράλληλα, εξετάζονται οι χημικές τεχνικές επεξεργασίας, όπως η χημική διάσπαση γαλακτωμάτων πετρελαίου νερού, η εκχύλιση με διαλύτες και οι μέθοδοι οξειδωσης. Οι συγκεκριμένες διεργασίες συμβάλλουν στη διάσπαση σταθερών γαλακτωμάτων, στη μείωση του οργανικού φορτίου και στην αποτελεσματικότερη ανάκτηση υδρογονανθράκων. Η χρήση χημικών παραγόντων και οξειδωτικών μέσων αποτελεί συμπληρωματική προσέγγιση, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι συμβατικές φυσικές μέθοδοι δεν επαρκούν για την πλήρη απομάκρυνση των οργανικών ρύπων.

Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις θερμικές και ενεργειακές τεχνολογίες επεξεργασίας, όπως η θερμική εκρόφηση, η πυρόλυση, η αποτέφρωση και η αναερόβια χώνευση. Η θερμική εκρόφηση αποτελεί μία από τις πλέον προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας πετρελαϊκών καταλοίπων και βασίζεται στην εφαρμογή ελεγχόμενης θερμικής ενέργειας για την απομάκρυνση πτητικών και ημιπτητικών οργανικών ενώσεων από τη στερεή ή ημιστερεή φάση. Κατά τη διεργασία, οι υδρογονάνθρακες μεταφέρονται στην αέρια φάση και στη συνέχεια οδηγούνται σε συστήματα ψύξης και συμπύκνωσης, όπου είναι δυνατή η ανάκτηση αξιοποιήσιμων πετρελαϊκών κλασμάτων.

Στο πλαίσιο της εργασίας αναλύεται η λειτουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος επεξεργασίας, το οποίο περιλαμβάνει μονάδα προεπεξεργασίας με τριφασική φυγοκέντριση και μονάδα θερμικής εκρόφησης. Παρουσιάζονται τα βασικά λειτουργικά τμήματα της εγκατάστασης, όπως τα συστήματα παραλαβής και τροφοδοσίας των αποβλήτων, ο θάλαμος θερμικής επεξεργασίας, το σύστημα αδρανοποίησης με άζωτο για την αποφυγή δημιουργίας εκρηκτικών ατμοσφαιρών, οι μονάδες μεταφοράς θερμότητας, τα συστήματα ψύξης και συμπύκνωσης ατμών, καθώς και οι τεχνολογίες επεξεργασίας απαερίων για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών εκπομπών.

Η συνολική αξιολόγηση των τεχνολογιών καταδεικνύει ότι η συνδυασμένη εφαρμογή μηχανικών, χημικών και θερμικών διεργασιών μπορεί να επιτύχει αποτελεσματική επεξεργασία των πετρελαϊκών καταλοίπων, υψηλή ανάκτηση υδρογονανθράκων και σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η θερμική εκρόφηση, σε συνδυασμό με κατάλληλα στάδια προεπεξεργασίας, αποτελεί μία αξιόπιστη, περιβαλλοντικά ασφαλή και τεχνολογικά ώριμη λύση για τη βιώσιμη διαχείριση επικίνδυνων πετρελαϊκών αποβλήτων. Η εφαρμογή της συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών κινδύνων, στην ανάκτηση πολύτιμων ενεργειακών πόρων, στη μείωση του τελικού όγκου προς διάθεση και στη συμμόρφωση των βιομηχανικών εγκαταστάσεων με τις σύγχρονες περιβαλλοντικές απαιτήσεις, τη σχετική νομοθεσία και τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης.

Λέξεις-κλειδιά

Θερμική εκρόφηση χαμηλής/υψηλής θερμοκρασίας, Επικίνδυνα πετρελαϊκά απόβλητα, Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, Σύστημα αδρανοποίησης αζώτου, Σύστημα ψύξης και συμπύκνωσης ατμών, Έλεγχος πτητικών οργανικών ενώσεων, Ανάκτηση οργανικών ρύπων, Περιβαλλοντική τεχνολογία.

ABSTRACT

The management and treatment of residues originating from petroleum storage tanks constitute a complex environmental and technological issue for the petroleum industry, fuel storage facilities, and hazardous waste management plants. These specific wastes, known as petroleum tank residues, are formed during the long-term storage and handling of petroleum products and are characterized by a particularly complex physicochemical composition. They contain significant quantities of hydrocarbons, water, inorganic solids, asphaltenes, resins, volatile organic compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other organic compounds with increased environmental hazard. The complexity of their composition, in combination with their high organic content and the difficulty of effective separation of the individual phases, makes the application of advanced treatment technologies necessary, with the aim of reducing the environmental burden, recovering valuable petroleum components, and ensuring the safe final management of the remaining residues.

In the present thesis, the main modern technologies for the treatment of petroleum storage tank residues are presented and evaluated, including mechanical, chemical, and thermal processes. In addition, their operating principles, the factors affecting the efficiency of the processes, and the main technical characteristics of an integrated thermal desorption unit are presented. Mechanical methods constitute the basic treatment stage and include centrifugation, two-phase centrifugation, three-phase centrifugation, filtration, and dissolved air flotation. These processes are based on the physical separation of the different phases of the waste and contribute to the removal of water and solids, as well as to the recovery of petroleum fractions. Particular emphasis is given to three-phase centrifugation as a pretreatment method, since it allows the simultaneous separation of oil, water, and solids, improving the performance of the subsequent treatment stages.

At the same time, chemical treatment techniques are examined, such as the chemical breaking of oil-water emulsions, solvent extraction, and oxidation methods. These specific processes contribute to the breaking of stable emulsions, the reduction of the organic load, and the more effective recovery of hydrocarbons. The use of chemical agents and oxidizing media constitutes a complementary approach, particularly in cases where conventional physical methods are not sufficient for the complete removal of organic pollutants.

Particular reference is made to thermal and energy treatment technologies, such as thermal desorption, pyrolysis, incineration, and anaerobic digestion. Thermal desorption constitutes one of the most advanced technologies for the treatment of petroleum residues and is based on the application of controlled thermal energy for the removal of volatile and semi-volatile organic

compounds from the solid or semi-solid phase. During the process, the hydrocarbons are transferred to the gaseous phase and are subsequently directed to cooling and condensation systems, where the recovery of valuable petroleum fractions is possible.

Within the framework of the present thesis, the operation of an integrated treatment system is analyzed, which includes a pretreatment unit with three-phase centrifugation and a thermal desorption unit. The basic operational sections of the installation are presented, such as the waste reception and feeding systems, the thermal treatment chamber, the nitrogen inerting system for the prevention of the formation of explosive atmospheres, the heat transfer units, the vapor cooling and condensation systems, as well as the off-gas treatment technologies for the reduction of environmental emissions.

The overall evaluation of the technologies demonstrates that the combined application of mechanical, chemical, and thermal processes can achieve effective treatment of petroleum residues, high hydrocarbon recovery, and significant reduction of environmental impacts. Thermal desorption, in combination with appropriate pretreatment stages, constitutes a reliable, environmentally safe, and technologically mature solution for the sustainable management of hazardous petroleum waste. Its application contributes to the reduction of environmental risks, the recovery of valuable energy resources, the reduction of the final volume requiring disposal, and the compliance of industrial facilities with modern environmental requirements, the relevant legislation, and the principles of sustainable development.

Keywords

Low/high temperature thermal desorption, Petroleum hazardous residues, Polycyclic aromatic hydrocarbons, Nitrogen inerting system, Vapor cooling and condensation unit, Volatile organic compounds control, Organic contaminant recovery, Environmental treatment technologies.

1. Εισαγωγή

Η πετρελαϊκή βιομηχανία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κλάδους της παγκόσμιας οικονομίας, διαδραματίζοντας καθοριστικό ρόλο στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της σύγχρονης κοινωνίας. Παράλληλα, οι δραστηριότητες εξόρυξης, μεταφοράς, αποθήκευσης και επεξεργασίας πετρελαίου συνοδεύονται από την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων αποβλήτων, τα οποία απαιτούν κατάλληλη διαχείριση προκειμένου να περιοριστούν οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και στη δημόσια υγεία. Μεταξύ αυτών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα κατάλοιπα δεξαμενών πετρελαιοειδών, τα οποία σχηματίζονται κατά τη λειτουργία δεξαμενών αποθήκευσης αργού πετρελαίου και πετρελαϊκών προϊόντων. Τα κατάλοιπα αυτά αποτελούν σύνθετα και ετερογενή μίγματα υδρογονανθράκων, νερού και στερεών υλικών, ενώ συχνά περιέχουν επικίνδυνες ουσίες, όπως πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες και άλλα οργανικά συστατικά με τοξικές ή και καρκινογόνες ιδιότητες. Η ανεπαρκής διαχείρισή τους μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή ρύπανση του εδάφους, των υπόγειων υδάτων και της ατμόσφαιρας, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη και εφαρμογή αποτελεσματικών τεχνολογιών επεξεργασίας. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογικές προσεγγίσεις για την επεξεργασία των καταλοίπων πετρελαιοειδών, οι οποίες περιλαμβάνουν φυσικές, χημικές και θερμικές μεθόδους. Παρότι οι συμβατικές τεχνικές μπορούν να επιτύχουν σημαντικό βαθμό ανάκτησης πετρελαίου και διαχωρισμού φάσεων, συχνά παρουσιάζουν περιορισμούς ως προς την πλήρη απομάκρυνση των οργανικών ρύπων από τη στερεή φάση. Για τον λόγο αυτό, οι θερμικές τεχνολογίες έχουν αποκτήσει αυξανόμενο ενδιαφέρον, καθώς προσφέρουν υψηλά ποσοστά απορρύπανσης και δυνατότητα ανάκτησης αξιοποιήσιμων υδρογονανθρακικών κλασμάτων. Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνολογία της Θερμικής Εκρόφησης αναγνωρίζεται διεθνώς ως μία από τις πλέον αποτελεσματικές λύσεις για την επεξεργασία πετρελαϊκών καταλοίπων. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στη θέρμανση του αποβλήτου υπό ελεγχόμενες συνθήκες, με στόχο την εξάτμιση και απομάκρυνση των οργανικών ρυπαντών, επιτρέποντας παράλληλα την ανάκτηση σημαντικού μέρους των υδρογονανθράκων που περιέχονται στο υλικό. Αυξανόμενη αυστηροποίηση της περιβαλλοντικής νομοθεσίας σε διεθνές και ευρωπαϊκό επίπεδο έχει καταστήσει αναγκαία την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας επικίνδυνων αποβλήτων. Ειδικότερα, η Οδηγία 2008/98/ΕΚ για τα απόβλητα θέτει ως βασική προτεραιότητα την πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, την ανάκτηση υλικών και ενέργειας και την ελαχιστοποίηση της τελικής διάθεσης, προωθώντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης. Στο πλαίσιο αυτό, τα κατάλοιπα δεξαμενών πετρελαιοειδών αποτελούν μια ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία αποβλήτων, καθώς συνδυάζουν υψηλή περιβαλλοντική επικινδυνότητα με σημαντικό δυναμικό ανάκτησης πολύτιμων υδρογονανθράκων. Σύμφωνα με

τους Hu και συνεργάτες (Hu et al., 2013), οι ποσότητες πετρελαϊκής ύλης που παράγονται παγκοσμίως ανέρχονται σε εκατομμύρια τόνους ετησίως, δημιουργώντας σημαντικές προκλήσεις τόσο για τη βιομηχανία όσο και για τους αρμόδιους φορείς περιβαλλοντικής διαχείρισης. Η σύνθετη φυσικοχημική δομή των καταλοίπων, καθώς και η παρουσία σταθερών γαλακτωμάτων νερού σε πετρέλαιο, δυσχεραίνουν την αποτελεσματική επεξεργασία τους μέσω συμβατικών τεχνικών διαχωρισμού. Ως αποτέλεσμα, μεγάλο μέρος των στερεών υπολειμμάτων εξακολουθεί να περιέχει σημαντικές συγκεντρώσεις οργανικών ρύπων, οι οποίες καθιστούν απαραίτητη την εφαρμογή πρόσθετων τεχνολογιών απορρύπανσης.

Η θερμική εκρόφιση έχει προσελκύσει ιδιαίτερο ερευνητικό και βιομηχανικό ενδιαφέρον λόγω της υψηλής αποδοτικότητας που παρουσιάζει στην απομάκρυνση οργανικών ρυπαντών από εδάφη, ύλες και πετρελαϊκά κατάλοιπα. Σύμφωνα με τους Hasan και συνεργάτες (Hasan et al., 2024) η τεχνολογία μπορεί να επιτύχει ποσοστά απομάκρυνσης ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων που υπερβαίνουν το 95%, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις προσεγγίζουν ή και ξεπερνούν το 99%. Επιπλέον, η λειτουργία της σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες επιτρέπει την ανάκτηση σημαντικού μέρους των υδρογονανθράκων χωρίς εκτεταμένη θερμική διάσπαση των συστατικών τους, προσφέροντας τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά οφέλη. Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην κατανόηση της εφαρμογής της θερμικής εκρόφισης στη διαχείριση καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών, μέσω της ανάλυσης της τεχνολογίας, των λειτουργικών παραμέτρων και των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων της. Παράλληλα, αξιολογείται ο ρόλος της τεχνολογίας ως εργαλείου ανάκτησης πόρων και μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, σε συμφωνία με τις σύγχρονες απαιτήσεις βιώσιμης βιομηχανικής ανάπτυξης και κυκλικής οικονομίας.

Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συστηματική μελέτη και αξιολόγηση τεχνολογιών επεξεργασίας πετρελαιοειδών καταλοίπων δεξαμενών, με έμφαση στις φυσικοχημικές και θερμικές διεργασίες που εφαρμόζονται σε βιομηχανική κλίμακα για την απορρύπανση και ταυτόχρονη ανάκτηση υδρογονανθράκων. Κεντρικό αντικείμενο της μελέτης αποτελεί η εις βάθος ανάλυση της θερμικής εκρόφισης, ως βασικής τεχνολογίας επεξεργασίας ρυπασμένων στερεών και ημι στερεών αποβλήτων, με στόχο την κατανόηση του μηχανισμού λειτουργίας της, των λειτουργικών παραμέτρων, των επιμέρους σταδίων της διεργασίας και της συνολικής της απόδοσης σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες. Παράλληλα, εξετάζεται ο ρόλος της θερμικής εκρόφισης ως τεχνολογίας ανάκτησης πόρου, μέσω της παραγωγής ανακτήσιμων πετρελαϊκών κλασμάτων και της μείωσης του περιβαλλοντικού φορτίου των αποβλήτων. Επιπλέον,

η εργασία αποσκοπεί στην ενσωμάτωση της θερμικής εκρόφησης σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης πετρελαιοειδών καταλοίπων, το οποίο περιλαμβάνει προεπεξεργασία, θερμική επεξεργασία και διαχείριση παραγόμενων ρευμάτων, με στόχο την επίτευξη υψηλής αποδοτικότητας και προσέγγισης μηδενικού υπολείμματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των ανακτηθέντων υδρογονανθράκων ως δευτερογενή πρώτη ύλη που δύναται να επιστρέψει σε διυλιστηριακές διεργασίες.

Τέλος, η εργασία στοχεύει στη συγκριτική αξιολόγηση της θερμικής εκρόφησης έναντι άλλων θερμικών, μηχανικών και φυσικοχημικών τεχνολογιών, αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς και τη συνολική της συμβολή στη βιώσιμη και αποδοτική διαχείριση επικίνδυνων βιομηχανικών αποβλήτων.

Μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία βασίστηκε σε συνδυασμό βιβλιογραφικής έρευνας και μελέτης πραγματικής βιομηχανικής εγκατάστασης επεξεργασίας πετρελαιοειδών καταλοίπων δεξαμενών. Αρχικά πραγματοποιήθηκε εκτενής ανασκόπηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας σχετικά με τις διαθέσιμες τεχνολογίες διαχείρισης και επεξεργασίας πετρελαιοειδών λασπών, με έμφαση στις μηχανικές, φυσικοχημικές και θερμικές μεθόδους επεξεργασίας. Η βιβλιογραφική έρευνα περιέλαβε επιστημονικά άρθρα, τεχνικές δημοσιεύσεις, ερευνητικές εργασίες και διεθνείς μελέτες που αφορούν τις τεχνολογίες φυγοκέντρισης, εκχύλισης με διαλύτες, θερμικής εκρόφησης, πυρόλυσης, αποτέφρωσης, οξείδωσης και αναερόβιας χώνεψης.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε τεχνική ανάλυση της εγκατάστασης επεξεργασίας πετρελαιοειδών αποβλήτων της εταιρείας INTERGEO, με σκοπό την κατανόηση της συνολικής διάταξης της μονάδας, των επιμέρους σταδίων επεξεργασίας και του τρόπου λειτουργίας του εξοπλισμού. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη μονάδα θερμικής εκρόφησης υπό κενό, η οποία αποτελεί τον βασικό πυρήνα της εγκατάστασης και το κύριο αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε καταγραφή και αξιολόγηση των βασικών λειτουργικών χαρακτηριστικών του συστήματος, όπως οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, η χρήση αδρανούς ατμόσφαιρας αζώτου, το σύστημα συμπύκνωσης ατμών, η επεξεργασία απαερίων και η διαχείριση των παραγόμενων στερεών, υγρών και αέριων ρευμάτων. Η μεθοδολογική προσέγγιση περιέλαβε επίσης την ανάλυση της προεπεξεργασίας των αποβλήτων μέσω τριφασικής φυγοκέντρησης, η οποία χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό των στερεών, της υδατικής και της ελαιώδους φάσης πριν από τη θερμική επεξεργασία. Εξετάστηκε ο ρόλος της προθέρμανσης, της χρήσης απογαλακτοποιητών και πολυηλεκτρολυτών, καθώς και η επίδρασή τους στη βελτίωση της αποδοτικότητας του διαχωρισμού και στη μείωση του φορτίου που οδηγείται στη

μονάδα θερμικής εκρόφησης. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε ποιοτική αξιολόγηση των τεχνολογιών που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία ως προς την αποδοτικότητα απομάκρυνσης υδρογονανθράκων, την ανάκτηση πετρελαϊκών κλασμάτων, τις ενεργειακές απαιτήσεις, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και τη δυνατότητα αξιοποίησης των παραγόμενων προϊόντων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη σύγκριση της θερμικής εκρόφησης με άλλες θερμικές τεχνολογίες, όπως η πυρόλυση και η αποτέφρωση, προκειμένου να αξιολογηθούν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί κάθε μεθόδου.

Τέλος, αξιολογήθηκε η συνολική λειτουργική φιλοσοφία της εγκατάστασης υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας και της προσέγγισης μηδενικού υπολείμματος. Εξετάστηκε η δυνατότητα ανάκτησης σημαντικών ποσοτήτων υδρογονανθράκων, οι οποίοι μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ως δευτερογενής πρώτη ύλη ή καύσιμο σε διυλιστηριακές εγκαταστάσεις, καθώς και η παραγωγή επεξεργασμένων στερεών υπολειμμάτων με σημαντικά μειωμένο περιβαλλοντικό κίνδυνο. Μέσα από τη συνδυασμένη ανάλυση βιβλιογραφικών δεδομένων και πραγματικών βιομηχανικών εφαρμογών, η εργασία επιδιώκει να αναδείξει τον ρόλο της θερμικής εκρόφησης ως μιας σύγχρονης και αποδοτικής τεχνολογίας για τη βιώσιμη διαχείριση πετρελαιοειδών αποβλήτων.

2. Επεξεργασία και διαχείριση καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών

Η ορθολογική διαχείριση των καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη συμμόρφωση με τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις και τη βιώσιμη λειτουργία των εγκαταστάσεων αποθήκευσης. Τα κατάλοιπα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή ετερογένεια και συνήθως αποτελούνται από γαλακτώματα πετρελαίου νερού, στερεά ιζήματα, ασφαλένια και υδρογονάνθρακες μεγάλου μοριακού βάρους. Η επεξεργασία τους αποσκοπεί τόσο στην ανάκτηση πολύτιμων πετρελαϊκών κλασμάτων όσο και στη μείωση της επικινδυνότητας των παραγόμενων αποβλήτων μέσω φυσικών, χημικών και θερμικών μεθόδων επεξεργασίας. Τα κατάλοιπα δεξαμενών πετρελαιοειδών αποτελούν ένα σύνθετο και ιδιαίτερα ετερογενές ρεύμα αποβλήτων που παράγεται κατά την αποθήκευση, μεταφορά και διαχείριση αργού πετρελαίου και πετρελαϊκών προϊόντων. Η δημιουργία τους οφείλεται κυρίως στη σταδιακή καθίζηση στερεών σωματιδίων, στη συσσώρευση βαρέων πετρελαϊκών κλασμάτων και στην παρουσία νερού, τα οποία με την πάροδο του χρόνου σχηματίζουν ιλυώδη κατάλοιπα στον πυθμένα των δεξαμενών. Η σύνθεση των καταλοίπων αυτών εξαρτάται από το είδος του αποθηκευμένου προϊόντος, τις συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης και τη διάρκεια παραμονής του υλικού στη δεξαμενή, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ομοιόμορφη διαχείρισή τους. Τα κατάλοιπα δεξαμενών περιέχουν συνήθως σημαντικές ποσότητες υδρογονανθράκων, οι οποίοι

αποτελούνται από παραφινικές, ναφθενικές και αρωματικές ενώσεις, καθώς και βαριά πετρελαϊκά κλάσματα όπως ρητίνες και ασφαλτένια. Παράλληλα, περιλαμβάνουν ελεύθερο ή γαλακτωματοποιημένο νερό, ανόργανα στερεά υλικά όπως άμμο, σκουριά και σωματίδια μετάλλων, ενώ συχνά ανιχνεύονται και πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή περιβαλλοντική ανθεκτικότητα και αυξημένη τοξικότητα. Επιπλέον, ενδέχεται να περιέχονται ίχνη βαρέων μετάλλων, όπως νικέλιο, βανάδιο, χρώμιο και μόλυβδος, τα οποία προέρχονται είτε από το ίδιο το αργό πετρέλαιο είτε από φαινόμενα διάβρωσης των δεξαμενών και του σχετικού εξοπλισμού.



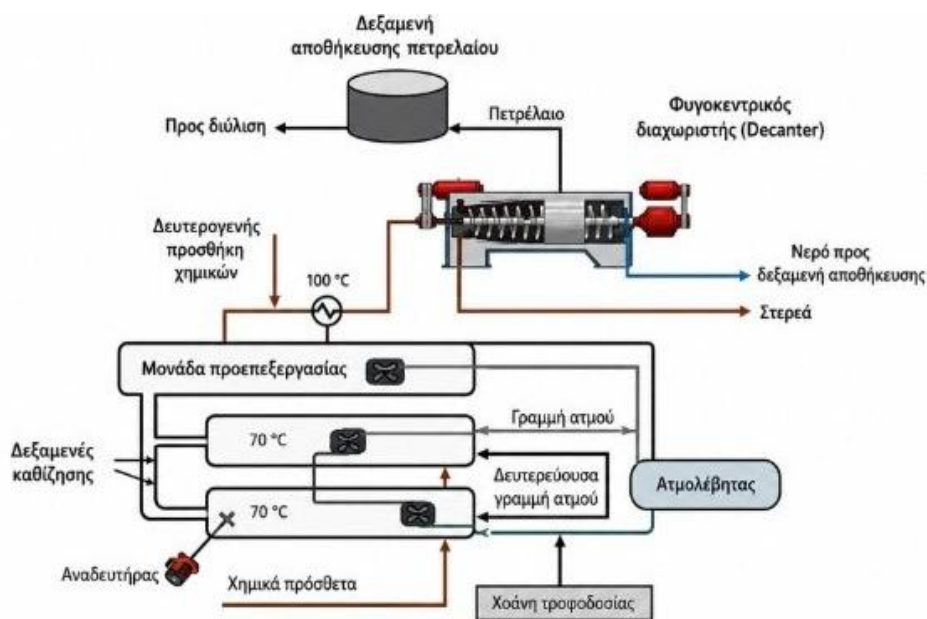
Εικόνα 1. Εγκατάσταση δεξαμενών αποθήκευσης πετρελαιοειδών διυλιστηρίου σε παραθαλάσσια περιοχή.

Η παρουσία των παραπάνω συστατικών καθιστά τα κατάλοιπα δεξαμενών πετρελαιοειδών ένα περιβαλλοντικά επιβαρυνόμενο απόβλητο, η ανεξέλεγκτη διάθεση του οποίου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ειδικότερα, η διείσδυση υδρογονανθράκων στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη ρύπανση και υποβάθμιση των φυσικών πόρων, ενώ οι πτητικές οργανικές ενώσεις που περιέχονται στα κατάλοιπα είναι δυνατόν να συμβάλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στη δημιουργία κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία. Παράλληλα, οι τοξικές οργανικές ενώσεις και τα βαρέα μέταλλα δύνανται να εισέλθουν στα οικοσυστήματα και να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις στους ζώντες οργανισμούς μέσω φαινομένων βιοσυσσώρευσης και βιομεγέθυνσης. Για τους λόγους αυτούς, η αποτελεσματική επεξεργασία των καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών αποτελεί αναγκαία πρακτική για τις σύγχρονες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Πέρα από την υποχρέωση

συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις της περιβαλλοντικής νομοθεσίας, η επεξεργασία των καταλοίπων συμβάλλει στη μείωση της περιβαλλοντικής επικινδυνότητας, στον περιορισμό των ποσοτήτων αποβλήτων που απαιτούν τελική διάθεση και στην ανάκτηση πολύτιμων υδρογονανθρακικών κλασμάτων που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να αξιοποιηθούν ενεργειακά. Η προσέγγιση αυτή συνάδει με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας, καθώς προωθεί την εξοικονόμηση φυσικών πόρων και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Παρότι η επεξεργασία των καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών αποτελεί απαραίτητη περιβαλλοντική πρακτική, οι ίδιες οι διεργασίες επεξεργασίας ενδέχεται να συνοδεύονται από ορισμένους περιβαλλοντικούς κινδύνους, εφόσον δεν εφαρμόζονται κατάλληλα μέτρα ελέγχου και διαχείρισης. Ειδικότερα, κατά την επεξεργασία των καταλοίπων είναι δυνατόν να παραχθούν αέριες εκπομπές που περιέχουν πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), υδρογονάνθρακες και προϊόντα θερμικής αποδόμησης, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στη δημιουργία δευτερογενών ρύπων. Επιπλέον, η διαχείριση των υγρών αποβλήτων που προκύπτουν από τα στάδια διαχωρισμού και καθαρισμού απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς ενδέχεται να περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών ενώσεων, αιωρούμενων στερεών και ιχνοστοιχείων μετάλλων που μπορούν να επιβαρύνουν τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα.

Σύμφωνα με τους Motevali και συνεργάτες (Motevali et al., 2022) η επεξεργασία των πετρελαϊκών καταλοίπων έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, με στόχο τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης υδρογονανθράκων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα κατάλοιπα δεξαμενών χαρακτηρίζονται από πολύπλοκη σύσταση, καθώς περιέχουν νερό, πετρέλαιο, ανόργανα στερεά και οργανικές ενώσεις σε διαφορετικές αναλογίες. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επεξεργασίας εξαρτάται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του αποβλήτου, ενώ συχνά απαιτείται συνδυασμός τεχνολογιών για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων διαχωρισμού και αξιοποίησης των ανακτώμενων υλικών. Επιπλέον, οι Motevali και συνεργάτες (Motevali et al., 2022) επισημαίνουν ότι η σύγχρονη διαχείριση των πετρελαϊκών καταλοίπων δεν περιορίζεται μόνο στην απομάκρυνση των ρύπων, αλλά εστιάζει και στις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Η ανάκτηση πετρελαϊκών κλασμάτων από τα κατάλοιπα συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης πρώτων υλών και στην εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων. Παράλληλα, η εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας μπορεί να περιορίσει τον όγκο των αποβλήτων που οδηγούνται σε τελική διάθεση, μειώνοντας έτσι το κόστος διαχείρισης και τους περιβαλλοντικούς κινδύνους που συνδέονται με την αποθήκευση ή την απόρριψή τους όπως αναφέρουν ο Shi και οι συνεργάτες του (Shi et al., 2018). Η επεξεργασία των καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών αποτελεί κρίσιμη αναγκαιότητα για τις βιομηχανίες του πετρελαϊκού

και ενεργειακού τομέα, τόσο από περιβαλλοντική όσο και από οικονομική και κανονιστική σκοπιά. Η συνεχής παραγωγή τέτοιων καταλοίπων κατά τις διαδικασίες αποθήκευσης, μεταφοράς και διακίνησης πετρελαϊκών προϊόντων οδηγεί στη συσσώρευση σημαντικών ποσοτήτων αποβλήτων, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό ρυπαντικό φορτίο και απαιτούν κατάλληλη διαχείριση. Η ανεπαρκής επεξεργασία τους μπορεί να προκαλέσει σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, να αυξήσει το κόστος διάθεσης και να εκθέσει τις επιχειρήσεις σε κυρώσεις λόγω μη συμμόρφωσης με την ισχύουσα περιβαλλοντική νομοθεσία. Παράλληλα, η εφαρμογή κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας επιτρέπει την ανάκτηση σημαντικών ποσοτήτων υδρογονανθράκων που διαφορετικά θα απορρίπτονταν ως απόβλητα. Η ανάκτηση αυτή συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης πρώτων υλών, στη βελτίωση της αποδοτικότητας των παραγωγικών διαδικασιών και στη μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους των εγκαταστάσεων. Επιπλέον, η μείωση του όγκου και της επικινδυνότητας των παραγόμενων αποβλήτων περιορίζει τις απαιτήσεις για τελική διάθεση και μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των βιομηχανικών δραστηριοτήτων.



Εικόνα 2. Ολοκληρωμένη βιομηχανική διαδικασία καθαρισμού και διαχωρισμού φάσεων, η οποία βασίζεται σε θερμική, και χημική προεπεξεργασία πριν από τον τελικό μηχανικό διαχωρισμό (Elektorowicz & Habibi 2005).

Στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον, όπου η βιώσιμη ανάπτυξη και η κυκλική οικονομία αποτελούν βασικούς άξονες περιβαλλοντικής πολιτικής, η επεξεργασία των καταλοίπων

πετρελαιοειδών δεν αντιμετωπίζεται πλέον αποκλειστικά ως διαδικασία διαχείρισης αποβλήτων, αλλά ως μέσο ανάκτησης πόρων και βελτιστοποίησης της περιβαλλοντικής επίδοσης των επιχειρήσεων. Για τον λόγο αυτό, οι τεχνολογίες επεξεργασίας, όπως η φυγοκέντριση και η θερμική εκρόφηση, αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία, καθώς προσφέρουν τη δυνατότητα αποτελεσματικής απορρύπανσης, ανάκτησης πολύτιμων υδρογονανθράκων και συμμόρφωσης με τις αυξανόμενες περιβαλλοντικές απαιτήσεις της βιομηχανίας. Στο πλαίσιο αυτό, η φυγοκέντριση και η θερμική εκρόφηση αποτελεί μία από τις πλέον αποτελεσματικές τεχνολογίες επεξεργασίας καταλοίπων πετρελαιοειδών. Η μέθοδος βασίζεται στη θέρμανση του αποβλήτου σε κατάλληλες θερμοκρασίες, με σκοπό την απομάκρυνση των οργανικών ρύπων μέσω εξάτμισης και εκρόφησης από τη στερεή φάση. Οι εξατμιζόμενοι υδρογονάνθρακες μπορούν να συλλεχθούν και να ανακτηθούν για περαιτέρω αξιοποίηση, ενώ το τελικό στερεό υλικό παρουσιάζει σημαντικά μειωμένη περιεκτικότητα σε οργανικούς ρύπους και κατά συνέπεια χαμηλότερη περιβαλλοντική επικινδυνότητα. Ως εκ τούτου, η θερμική εκρόφηση αποτελεί μια τεχνολογία που συνδυάζει την αποτελεσματική απορρύπανση με τη δυνατότητα ανάκτησης χρήσιμων υλικών, συμβάλλοντας στη βιώσιμη διαχείριση των καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών.

2.1 Μηχανικές / Φυσικές Διαδικασίες

Οι μηχανικές και φυσικές διεργασίες διαχωρισμού αποτελούν θεμελιώδεις αντικείμενο της Χημικής Μηχανικής και βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε τομείς όπως η Περιβαλλοντική Μηχανική, η Βιοτεχνολογία, και η επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων. Οι διεργασίες αυτές βασίζονται στην εκμετάλλευση διαφορών σε φυσικές ιδιότητες των συστατικών ενός μίγματος, όπως η πυκνότητα, το μέγεθος των σωματιδίων, το ιξώδες, η διαπερατότητα και η συμπεριφορά τους υπό την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων. Σε αντίθεση με τις χημικές μεθόδους επεξεργασίας, οι φυσικές διεργασίες δεν επιφέρουν ουσιαστική μεταβολή στη χημική σύσταση των επιμέρους συστατικών, γεγονός που επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων υλικών και τη μείωση της παραγωγής δευτερογενών αποβλήτων. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η αυξανόμενη απαίτηση για εφαρμογή βιώσιμων τεχνολογιών, η ανάγκη περιορισμού της ενεργειακής κατανάλωσης, η ελαχιστοποίηση της χρήσης χημικών προσθέτων και η υιοθέτηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας έχουν οδηγήσει σε ανανεωμένο ενδιαφέρον για τη βελτιστοποίηση συμβατικών τεχνολογιών φυσικού διαχωρισμού. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη σημασία έχουν αποκτήσει η φυγοκέντριση, η φίλτρωση και η επίπλευση με διαλυμένο αέρα οι οποίες θεωρούνται ώριμες, αξιόπιστες και οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες για την επεξεργασία σύνθετων βιομηχανικών ρευμάτων και αποβλήτων σύμφωνα με τους Hasan και συνεργάτες (Hasan, et al., 2024).

Η φυγοκέντριση βασίζεται στην ανάπτυξη φυγόκεντρων δυνάμεων που είναι πολλαπλάσιες της δύναμης της βαρύτητας, επιταχύνοντας σημαντικά τον διαχωρισμό συστατικών με διαφορετική πυκνότητα. Μέσω της τεχνολογίας αυτής είναι δυνατός ο αποτελεσματικός διαχωρισμός στερεών σωματιδίων από υγρά, καθώς και ο διαχωρισμός μη αναμίξιμων υγρών φάσεων, όπως το πετρέλαιο και το νερό. Αντίστοιχα, η φίλτρανση επιτυγχάνει τον διαχωρισμό μέσω της διέλευσης του μίγματος από πορώδη μέσα, τα οποία συγκρατούν τα στερεά σωματίδια και επιτρέπουν τη διέλευση της υγρής φάσης. Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας εξαρτάται από παραμέτρους όπως το μέγεθος των πόρων του φίλτρου, η πίεση λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά των στερεών σωματιδίων και οι φυσικοχημικές ιδιότητες του προς επεξεργασία υλικού. Οι τεχνολογίες αυτές εφαρμόζονται εκτενώς στην επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών λυμάτων, στις βιοδιεργασίες παραγωγής βιοτεχνολογικών προϊόντων, και ποτών, στην παραγωγή βιοκαυσίμων, καθώς και στην εξορυκτική και πετρελαϊκή βιομηχανία. Στις εφαρμογές διαχείρισης πετρελαϊκών καταλοίπων, οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για τον διαχωρισμό των τριών βασικών φάσεων των αποβλήτων, δηλαδή του πετρελαίου, του νερού και των στερεών ιζημάτων, με στόχο τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης υδρογονανθράκων και τη μείωση του όγκου των αποβλήτων που απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, οι φυσικές μέθοδοι διαχωρισμού συχνά αδυνατούν να επιτύχουν πλήρη απορρύπανση των στερεών καταλοίπων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για πολύπλοκα πετρελαϊκά απόβλητα που περιέχουν σταθερά γαλακτώματα νερού σε πετρέλαιο, λεπτόκοκκα στερεά και προσροφημένους οργανικούς ρύπους. Για τον λόγο αυτό, η φυγοκέντριση και η φίλτρανση χρησιμοποιούνται συνήθως ως στάδια προεπεξεργασίας στο πλαίσιο ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων. Μέσω της μείωσης της περιεκτικότητας σε νερό και της ανάκτησης μέρους των υδρογονανθράκων, προετοιμάζουν το υλικό για επόμενα στάδια επεξεργασίας, όπως χημικές τεχνικές εκχύλισης ή θερμικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της θερμικής εκρόφησης. Ως εκ τούτου, οι μηχανικές και φυσικές διεργασίες εξακολουθούν να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη σύγχρονη διαχείριση πετρελαϊκών καταλοίπων, συμβάλλοντας τόσο στην ανάκτηση πόρων όσο και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των σχετικών βιομηχανικών δραστηριοτήτων.

2.1.1 Φυγοκέντριση

Η φυγοκέντριση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες μηχανικού διαχωρισμού που εφαρμόζονται στη διαχείριση πετρελαϊκών καταλοίπων, ελαιωδών βιομηχανικών αποβλήτων και σύνθετων βιομηχανικών ιλύων. Η τεχνολογία βασίζεται στην επιτάχυνση του φυσικού μηχανισμού διαχωρισμού λόγω της ανάπτυξης ισχυρού φυγοκεντρικού πεδίου, το οποίο επιτρέπει

τον αποτελεσματικό διαχωρισμό συστατικών με διαφορετική πυκνότητα σε πολύ μικρότερους χρόνους σε σχέση με τις συμβατικές διεργασίες καθίζησης. Σύμφωνα με τους Hasan και συνεργάτες (Hasan, et al., 2024) η δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας, η υψηλή δυναμικότητα επεξεργασίας και η ικανότητα ανάκτησης χρήσιμων συστατικών έχουν οδηγήσει στην ευρεία εφαρμογή της τεχνολογίας σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων.

Στην περίπτωση των πετρελαϊκών αποβλήτων, η φυγοκέντριση χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάκτηση υδρογονανθράκων, την απομάκρυνση της υδατικής φάσης και τη μείωση της περιεκτικότητας σε στερεά πριν από επόμενα στάδια επεξεργασίας. Τα συγκεκριμένα απόβλητα παρουσιάζουν ιδιαίτερα σύνθετη σύσταση, καθώς περιλαμβάνουν πετρελαϊκά κλάσματα, νερό, ασφαλτένια, ρητίνες, μεταλλικά συστατικά και ανόργανα στερεά. Η παρουσία των συστατικών αυτών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία σταθερών γαλακτωμάτων πετρελαίου νερού, τα οποία περιορίζουν την αποτελεσματικότητα των συμβατικών μεθόδων διαχωρισμού και απαιτούν συνδυασμό μηχανικών, θερμικών και χημικών τεχνικών επεξεργασίας όπως αναφέρουν ο Hu και οι συνεργάτες του (Hu et al., 2013).

Η λειτουργία των φυγοκεντρικών συστημάτων βασίζεται στην περιστροφή ενός τυμπάνου υψηλής ταχύτητας, μέσα στο οποίο δημιουργείται ισχυρό φυγοκεντρικό πεδίο. Η αυξημένη δύναμη που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του εξοπλισμού επιταχύνει τη μετακίνηση των σωματιδίων και των σταγονιδίων, επιτρέποντας τον διαχωρισμό τους σύμφωνα με τις διαφορές πυκνότητας. Τα συστατικά μεγαλύτερης πυκνότητας, όπως τα στερεά σωματίδια, μετακινούνται προς την εξωτερική περιοχή του τυμπάνου, ενώ οι ελαφρύτερες φάσεις σχηματίζουν διαφορετικές ζώνες διαχωρισμού στο εσωτερικό του συστήματος. Στα πετρελαϊκά απόβλητα, η οργανική φάση συγκεντρώνεται πλησιέστερα στον άξονα περιστροφής, η υδατική φάση καταλαμβάνει ενδιάμεση θέση και τα στερεά απομακρύνονται προς την περιφέρεια του τυμπάνου σύμφωνα με τους Hu και συνεργάτες (Hu et al., 2013).

Ο σημαντικότερος τύπος βιομηχανικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία πετρελαϊκών αποβλήτων είναι ο φυγοκεντρητής τύπου decanter. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός αποτελείται από ένα οριζόντιο κυλινδρικό τύμπανο και έναν εσωτερικό κοχλία μεταφοράς στερεών, ο οποίος περιστρέφεται με ελαφρώς διαφορετική ταχύτητα από το τύμπανο. Η διαφορά αυτή στη γωνιακή ταχύτητα, γνωστή ως διαφορική ταχύτητα περιστροφής, καθορίζει τον χρόνο παραμονής των στερεών στο εσωτερικό της μονάδας και επηρεάζει άμεσα την αφυδάτωση και την ποιότητα του τελικού στερεού υπολείμματος όπως αναφέρουν ο Brouwers και οι συνεργάτες του (Brouwers et al., 2023).

Οι βιομηχανικοί φυγοκεντρητές λειτουργούν συνήθως σε εύρος ταχυτήτων περιστροφής 2.500–5.000 rpm, ενώ οι αναπτυσσόμενες φυγοκεντρικές επιταχύνσεις μπορούν να

κυμαίνονται περίπου μεταξύ 2.000 και 6.000 φορές την επιτάχυνση της βαρύτητας, ανάλογα με τη διάμετρο του τυμπάνου και τον σχεδιασμό του εξοπλισμού. Η δυναμικότητα επεξεργασίας εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας και μπορεί να κυμαίνεται από περίπου 1 έως 40 m³/h σε εφαρμογές βιομηχανικής επεξεργασίας πετρελαϊκών καταλοίπων σύμφωνα με έρευνα των Brouwers και συνεργατών (Brouwers et al., 2023).

Ο χρόνος παραμονής αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους σχεδιασμού και λειτουργίας. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής του υλικού μέσα στον φυγοκεντρική κυμαίνεται συνήθως από 30 δευτερόλεπτα έως περίπου 5 λεπτά

Η απόδοση της διεργασίας επηρεάζεται σημαντικά από τις φυσικοχημικές ιδιότητες της τροφοδοσίας. Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ πετρελαίου, νερού και στερεών, το ιξώδες της οργανικής φάσης, η συγκέντρωση στερεών και η σταθερότητα των γαλακτωμάτων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού.

Παράλληλα, η χημική προεπεξεργασία χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου τα γαλακτώματα παρουσιάζουν υψηλή σταθερότητα. Οι απογαλακτωματοποιητές (demulsifiers) συμβάλλουν στη διάσπαση των σταθερών γαλακτωμάτων πετρελαίου νερού, ενώ πολυηλεκτρολύτες και ανόργανα κροκιδωτικά, όπως το πολυχλωριούχο αργίλιο (PAC), ενισχύουν τη συσσωμάτωση λεπτών στερεών σωματιδίων και βελτιώνουν την απόδοση του μηχανικού διαχωρισμού σύμφωνα με τους Sellami και συνεργάτες (Sellami et al., 2016).

Τα υλικά κατασκευής των βιομηχανικών φυγοκεντρικών επιλέγονται ώστε να παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και διάβρωση. Συνήθως χρησιμοποιούνται ανοξείδωτοι χάλυβες υψηλής αντοχής, κυρίως AISI 304 και AISI 316, λόγω της ανθεκτικότητάς τους σε περιβάλλοντα που περιέχουν υδρογονάνθρακες, άλατα και χημικά πρόσθετα. Τα περιστρεφόμενα τμήματα, όπως το τύμπανο και ο κοχλίας, κατασκευάζονται με αυξημένες μηχανικές αντοχές ώστε να ανταποκρίνονται στις υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη συνεχή λειτουργία όπως αναφέρουν οι Brouwers και συνεργάτες (Brouwers et al., 2023).

2.1.2 Διφασική φυγοκέντρωση

Η διφασική φυγοκέντρωση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές των φυγοκεντρικών συστημάτων στην επεξεργασία πετρελαϊκών αποβλήτων, καθώς χρησιμοποιείται κυρίως για τον διαχωρισμό της στερεής φάσης από το υγρό κλάσμα και την ανάκτηση μέρους των εγκλωβισμένων υδρογονανθράκων. Η διφασική φυγοκέντρωση έχει ως κύριο στόχο την παραγωγή ενός στερεού υπολείμματος με μειωμένη υγρασία και ενός ενιαίου υγρού ρεύματος, στο οποίο η οργανική και η υδατική φάση δεν έχουν ακόμη διαχωριστεί. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται

κυρίως ως στάδιο προεπεξεργασίας πριν από περαιτέρω διεργασίες διαχωρισμού ή καθαρισμού όπως αναφέρουν ο Tamborrino και οι συνεργάτες του (Tamborrino et al., 2020).

Στις εφαρμογές επεξεργασίας πετρελαϊκής λάσπης, η τεχνολογία εφαρμόζεται σε κατάλοιπα δεξαμενών αποθήκευσης, ελαιοδιαχωριστών και απόβλητα διυλιστηρίων, όπου απαιτείται η απομάκρυνση στερεών σωματιδίων και η μείωση του οργανικού φορτίου. Τα απόβλητα αυτά περιέχουν συνήθως μεταλλικά οξείδια, άμμο, προϊόντα διάβρωσης, ασφαλένια και ρητίνες, τα οποία αυξάνουν το ιξώδες και δυσχεραίνουν τον διαχωρισμό. Η εφαρμογή διφασικού φυγοκεντρικού διαχωρισμού επιτρέπει τη σημαντική μείωση της ποσότητας των στερεών που οδηγούνται σε τελική διάθεση, ενώ παράλληλα αυξάνει την ανάκτηση πετρελαϊκών συστατικών σύμφωνα με τους Hu και συνεργάτες (Hu et al., 2013).

Τα κύρια κατασκευαστικά υλικά είναι ανοξείδωτοι χάλυβες υψηλής αντοχής, κυρίως AISI 304 και AISI 316, λόγω της ανθεκτικότητάς τους όπως αναφέρθηκε και γενικότερα σε όλους τους τύπους φυγοκεντρικών.

Η παροχή τροφοδοσίας εξαρτάται από τη δυναμικότητα της μονάδας και κυμαίνεται συνήθως από 1 έως 30 m³/h σε βιομηχανικές εφαρμογές επεξεργασίας πετρελαϊκών αποβλήτων. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής του υγρού στο εσωτερικό του συστήματος είναι σχετικά μικρός και κυμαίνεται περίπου μεταξύ 30 δευτερολέπτων και 5 λεπτών, ενώ ο χρόνος παραμονής των στερεών μπορεί να φτάσει τα 5–20 λεπτά, ανάλογα με τη ρύθμιση της διαφορικής ταχύτητας του κοχλίου. Η αύξηση του χρόνου παραμονής βελτιώνει την αφυδάτωση του στερεού υπολείμματος, όμως μειώνει τη συνολική δυναμικότητα επεξεργασίας όπως αναφέρουν ο Brouwers και οι συνεργάτες του (Brouwers et al., 2023).

Η απόδοση της διφασικής φυγοκέντρισης επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση της τροφοδοσίας και κυρίως από το ιξώδες, την περιεκτικότητα σε στερεά και τη σταθερότητα των γαλακτωμάτων. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται συχνά θερμική προεπεξεργασία πριν από την είσοδο του αποβλήτου στον φυγοκεντρητή. Η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 60–90 °C, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το ιξώδες της πετρελαϊκής φάσης και διευκολύνει την απομάκρυνση των εγκλωβισμένων υδρογονανθράκων. Παράλληλα, η χρήση απογαλακτωματοποιητών και πολυηλεκτρολυτών μπορεί να βελτιώσει τη συσσωμάτωση μικρών σταγονιδίων και να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού σύμφωνα με τους Sellami και συνεργάτες (Sellami et al., 2016). Σε κατάλληλα ρυθμισμένες συνθήκες λειτουργίας, η διφασική φυγοκέντρωση μπορεί να επιτύχει απομάκρυνση στερεών μεγαλύτερη από 90–95%, ενώ η ανάκτηση πετρελαϊκών συστατικών από την υγρή φάση μπορεί να κυμανθεί περίπου μεταξύ 80–95%, ανάλογα με τη σύσταση του αποβλήτου και την εφαρμοζόμενη προεπεξεργασία. Σύμφωνα με τους Tamborrino και συνεργάτες (Tamborrino et al., 2020) η

τελική υγρασία του στερεού υπολείμματος εξαρτάται κυρίως από τη διαφορική ταχύτητα του κοχλίου και μπορεί να μειωθεί σε επίπεδα περίπου 20–40%, γεγονός που περιορίζει το κόστος μεταφοράς και τελικής διάθεσης.

Η ενεργειακή κατανάλωση των βιομηχανικών μονάδων διφασικής φυγοκέντρισης κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1–5 kWh/m³ επεξεργασμένου υλικού, ανάλογα με το ιξώδες και το ποσοστό στερεών. Για παράδειγμα, μία μονάδα δυναμικότητας 20 m³/h με κατανάλωση 3 kWh/m³ απαιτεί περίπου 60 kWh ανά ώρα λειτουργίας. Το επενδυτικό κόστος εξαρτάται από τη δυναμικότητα, τον βαθμό αυτοματοποίησης και τον βοηθητικό εξοπλισμό. Για βιομηχανικούς decanter φυγοκεντρητές επεξεργασίας πετρελαϊκών αποβλήτων, το κόστος αγοράς κυμαίνεται περίπου από 100.000 έως 500.000 €, ενώ ολοκληρωμένες μονάδες με δεξαμενές, συστήματα θέρμανσης, δοσομέτρηση χημικών και αυτοματισμούς μπορούν να φτάσουν περίπου 0,5–1,5 εκατομμύρια €. Το λειτουργικό κόστος εκτιμάται συνήθως σε 2–7 €/m³ επεξεργασμένου αποβλήτου, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας, της συντήρησης και των χημικών πρόσθετων σύμφωνα και με τους Brouwers και συνεργάτες (Brouwers et al., 2023).

Τα βασικά πλεονεκτήματα της διφασικής φυγοκέντρισης είναι η συνεχής λειτουργία, η υψηλή δυναμικότητα επεξεργασίας, η περιορισμένη απαίτηση χώρου εγκατάστασης και η σημαντική μείωση του όγκου των στερεών αποβλήτων. Επιπλέον, η ανάκτηση πετρελαϊκών συστατικών συμβάλλει στη μείωση των απωλειών υδρογονανθράκων και στη βελτίωση της συνολικής οικονομικής απόδοσης της επεξεργασίας.

Ωστόσο, η τεχνολογία παρουσιάζει περιορισμούς, καθώς δεν επιτρέπει τον πλήρη διαχωρισμό πετρελαίου και νερού και επομένως συχνά απαιτείται επόμενο στάδιο επεξεργασίας. Επιπλέον, σταθερά γαλακτώματα, υψηλή περιεκτικότητα σε ασφαλτένια και πολύ λεπτόκοκκα στερεά μπορούν να μειώσουν την απόδοση του συστήματος.

Συνολικά, η διφασική φυγοκέντριση αποτελεί μία αποτελεσματική τεχνολογία προεπεξεργασίας πετρελαϊκών αποβλήτων, ιδιαίτερα όταν απαιτείται γρήγορη απομάκρυνση στερεών και μείωση του όγκου των αποβλήτων πριν από θερμικές, χημικές ή τριφασικές διεργασίες. Η εφαρμογή της σε ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων συμβάλλει στην ανάκτηση δευτερογενών πόρων και στη μείωση του περιβαλλοντικού φορτίου των τελικών υπολειμμάτων σύμφωνα με τους Hu και συνεργάτες (Hu et al., 2013).

Ωστόσο, η αυξημένη μηχανική καταπόνηση του κοχλίου και του τυμπάνου οδηγεί επίσης σε ανάγκη τακτικής συντήρησης και αντικατάστασης φθαρμένων εξαρτημάτων.

Συνολικά, η διφασική φυγοκέντριση αποτελεί μία αποτελεσματική τεχνολογία προεπεξεργασίας πετρελαϊκών αποβλήτων, ιδιαίτερα όταν απαιτείται γρήγορη απομάκρυνση στερεών και μείωση του όγκου των αποβλήτων πριν από θερμικές, χημικές ή τριφασικές διεργασίες. Η

εφαρμογή της σε ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων συμβάλλει στην ανάκτηση δευτερογενών πόρων και στη μείωση του περιβαλλοντικού φορτίου των τελικών υπολειμμάτων όπως αναφέρουν ο Hu και οι συνεργάτες του (Hu et al., 2020).

2.1.3 Τριφασική φυγοκέντρωση

Η τριφασική φυγοκέντρωση αποτελεί εξέλιξη της διφασικής τεχνολογίας και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ταυτόχρονος διαχωρισμός στερεών σωματιδίων, υδατικής και οργανικής φάσης από σύνθετα πετρελαϊκά απόβλητα. Η βασική διαφορά σε σχέση με τη διφασική διάταξη είναι η δυνατότητα ανεξάρτητης ανάκτησης του πετρελαϊκού και του υδατικού κλάσματος, γεγονός που επιτρέπει υψηλότερο βαθμό αξιοποίησης των ανακτημένων υδρογονανθράκων και μειώνει το οργανικό φορτίο του τελικού υδατικού ρεύματος. Η τεχνολογία εφαρμόζεται κυρίως σε κατάλοιπα δεξαμενών αποθήκευσης, πετρελαϊκές λάσπες, απόβλητα διυλιστηρίων και άλλες ιλύες υψηλής περιεκτικότητας σε υδρογονάνθρακες σύμφωνα με έρευνα των Hu συνεργατών (Hu et al., 2013).

Ο τριφασικός φυγοκεντρικής τύπου tricanter, ο οποίος διαθέτει κατάλληλα σχεδιασμένα συστήματα εξόδου για την ξεχωριστή συλλογή των τριών παραγόμενων ρευμάτων. Η ρύθμιση της διεπιφάνειας μεταξύ της ελαφριάς οργανικής και της βαρύτερης υδατικής φάσης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο λειτουργίας, καθώς καθορίζει την καθαρότητα του ανακτημένου πετρελαίου και την περιεκτικότητα του νερού σε υπολειμματικούς υδρογονάνθρακες. Η παράμετρος αυτή ελέγχεται μέσω της γεωμετρίας των στομιών εξόδου, της παροχής τροφοδοσίας και των χαρακτηριστικών του προς επεξεργασία αποβλήτου όπως αναφέρουν ο Brouwers και οι συνεργάτες του (Brouwers et al., 2023).



Εικόνα 3. Βιομηχανικός φυγοκεντρικής διαχωρισμού τριών φάσεων, γνωστό και ως Tricanter. Στην εικόνα 3 απεικονίζεται ένας βιομηχανικός φυγοκεντρικής διαχωρισμού τριών φάσεων. Χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό μειγμάτων που αποτελούνται από δύο υγρά με διαφορετική πυκνότητα και ένα στερεό. Σε βιομηχανικές εφαρμογές επεξεργασίας πετρελαϊκών καταλοίπων, οι τριφασικοί φυγοκεντρητές λειτουργούν συνήθως σε ταχύτητες περιστροφής 2.500–5.000 rpm, με αντίστοιχες φυγοκεντρικές επιταχύνσεις περίπου $3.000\text{--}6.000 \times g$. Η παροχή τροφοδοσίας εξαρτάται από το μέγεθος του εξοπλισμού και κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5 και 50 m³/h, ενώ βιομηχανικές μονάδες μεγάλης κλίμακας μπορούν να υπερβούν τις τιμές αυτές. Η διαφορική ταχύτητα μεταξύ τυμπάνου και κοχλία αποτελεί σημαντική παράμετρο ελέγχου και κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1–30 rpm. Χαμηλότερες τιμές αυξάνουν τον χρόνο παραμονής των στερεών και βελτιώνουν την αφυδάτωσή τους, ενώ υψηλότερες τιμές ευνοούν την ταχύτερη απομάκρυνση στερεών και την αύξηση της δυναμικότητας σύμφωνα με τους Brouwers και συνεργάτες (Brouwers et al., 2023).

Ο χρόνος παραμονής του υλικού αποτελεί σημαντικό σχεδιαστικό χαρακτηριστικό της τριφασικής διεργασίας. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στο εσωτερικό του τυμπάνου κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1 και 10 λεπτών, ανάλογα με τον ενεργό όγκο του εξοπλισμού και την παροχή τροφοδοσίας. Η επιλογή του βέλτιστου χρόνου αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ απόδοσης διαχωρισμού και παραγωγικότητας της μονάδας.

Η απόδοση της τριφασικής φυγοκέντρισης εξαρτάται σημαντικά από την προεπεξεργασία της τροφοδοσίας. Σε πετρελαϊκά απόβλητα υψηλού ιξώδους εφαρμόζεται συνήθως προθέρμανση σε θερμοκρασίες 60–90 °C όπως και στον διφασικό, ώστε να μειωθεί το ιξώδες της οργανικής

φάσης και να διευκολυνθεί η απελευθέρωση των εγκλωβισμένων σταγονιδίων πετρελαίου από το νερό και τα στερεά. Παράλληλα, η χρήση απογαλακτωματοποιητών (demulsifiers) και πολυηλεκτρολύτων ενισχύει τη διάσπαση σταθερών γαλακτωμάτων και βελτιώνει την καθαρότητα των παραγόμενων φάσεων όπως σύμφωνα με τους Sellami και συνεργάτες (Sellami et al., 2016).

Σε βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, η ανάκτηση πετρελαϊκής φάσης από πετρελαϊκές λάσπες μπορεί να κυμανθεί περίπου μεταξύ 85–95%, ενώ με συνδυασμό θερμικής και χημικής προεπεξεργασίας έχουν αναφερθεί αποδόσεις μεγαλύτερες από 97%. Η περιεκτικότητα των στερεών υπολειμμάτων σε υπολειμματικούς υδρογονάνθρακες μπορεί να μειωθεί σε επίπεδα περίπου 3–5%, μειώνοντας σημαντικά το κόστος μεταφοράς και τελικής διάθεσης. Παράλληλα, η υδατική φάση παρουσιάζει μειωμένο οργανικό φορτίο και μπορεί να οδηγηθεί σε επόμενα στάδια επεξεργασίας με μικρότερες απαιτήσεις καθαρισμού.

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα λειτουργικά κόστη, ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις συνεχούς λειτουργίας σύμφωνα με τους Brouwers και συνεργάτες (Brouwers et al., 2023).



Εικόνα 4. Βιομηχανική μονάδα τριφασικής φυγοκέντρισης για την επεξεργασία πετρελαιοειδών αποβλήτων, αποτελούμενη από δεξαμενές προθέρμανσης, σύστημα δοσομέτρησης πολυηλεκτρολύτη και απογαλακτωματοποιητή (demulsifier), δίκτυο σωληνώσεων ατμού και δεξαμενή συλλογής του ανακτημένου ελαίου.

Το κόστος εγκατάστασης ενός τριφασικού φυγοκεντρική εξαρτάται από τη δυναμικότητα, τον βαθμό αυτοματοποίησης και τον απαιτούμενο βοηθητικό εξοπλισμό. Για βιομηχανικές εφαρμογές επεξεργασίας πετρελαϊκών αποβλήτων, το κόστος αγοράς του βασικού εξοπλισμού κυμαίνεται περίπου μεταξύ 150.000 και 700.000 €, ενώ ολοκληρωμένες μονάδες που περιλαμβάνουν δεξαμενές προθέρμανσης, συστήματα δοσομέτρησης χημικών, αυτοματισμούς και συστήματα ελέγχου μπορούν να φθάσουν περίπου 0,8–2 εκατομμύρια €. Το λειτουργικό κόστος υπολογίζεται συνήθως μεταξύ 2–8 €/m³ επεξεργασμένου αποβλήτου, συμπεριλαμβάνοντας ηλεκτρική ενέργεια, συντήρηση, αναλώσιμα και χημικά πρόσθετα.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τριφασικής φυγοκέντρισης είναι η δυνατότητα ολοκληρωμένου διαχωρισμού τριών φάσεων σε ένα μόνο στάδιο, η ανάκτηση πετρελαϊκών συστατικών υψηλής αξίας. Η τεχνολογία επιτρέπει τη μείωση του όγκου των τελικών αποβλήτων, περιορίζει τις απαιτήσεις αποθήκευσης και συμβάλλει στην επαναχρησιμοποίηση υδρογονανθράκων, σύμφωνα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η τριφασική φυγοκέντριση παρουσιάζει υψηλότερο κόστος επένδυσης και λειτουργίας σε σχέση με τη διφασική διάταξη, λόγω της πολυπλοκότερης κατασκευής και των απαιτήσεων ελέγχου των τριών εξερχόμενων ρευμάτων. Επιπλέον, η παρουσία πολύ σταθερών γαλακτωμάτων, υψηλών συγκεντρώσεων ασφαλτένιων και λεπτόκοκκων στερεών μπορεί να περιορίσει την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού και να απαιτήσει πρόσθετη χημική ή θερμική επεξεργασία.

Συνολικά, η τριφασική φυγοκέντριση αποτελεί μία από τις πιο ολοκληρωμένες τεχνολογίες μηχανικού διαχωρισμού για την επεξεργασία πετρελαϊκών καταλοίπων, καθώς συνδυάζει την ανάκτηση υδρογονανθράκων, την απομάκρυνση στερεών και τη μείωση του οργανικού φορτίου σε μία συνεχή διεργασία. Η χρήση της ως στάδιο προεπεξεργασίας πριν από θερμικές ή προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας συμβάλλει στη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης των εγκαταστάσεων διαχείρισης πετρελαϊκών αποβλήτων όπως αναφέρουν ο Oliveira και ο συνεργάτης του (Oliveira & França, 2023).



Εικόνα 5. Φυγοκεντρικός διαχωριστής, εξοπλισμένο με σύστημα κίνησης SIMP συνεχούς και αυτόματης προσαρμογής της διαφορικής ταχύτητας.

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται ένας τριφασικός φυγοκεντρικός διαχωριστής, κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 316. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα σύγχρονης τεχνολογίας τριφασικού διαχωρισμού και χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές της χημικής, πετρελαϊκής και περιβαλλοντικής βιομηχανίας.

2.1.4 Φίλτραυση

Η φίλτραυση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες φυσικοχημικές διεργασίες διαχωρισμού που εφαρμόζονται στην επεξεργασία ελαιώδους λάσπης και υγρών βιομηχανικών αποβλήτων, καθώς επιτρέπει την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, σταγονιδίων πετρελαίου, κολλοειδών σωματιδίων και άλλων ανεπιθύμητων συστατικών από ένα υγρό ρεύμα. Η βασική αρχή λειτουργίας της στηρίζεται στη διέλευση του προς επεξεργασία ρευστού μέσω ενός πορώδους ή ημιπερατού μέσου, το οποίο επιτρέπει τη διέλευση της υγρής φάσης, ενώ συγκρατεί σωματίδια ή ενώσεις που παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέγεθος ή διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες.

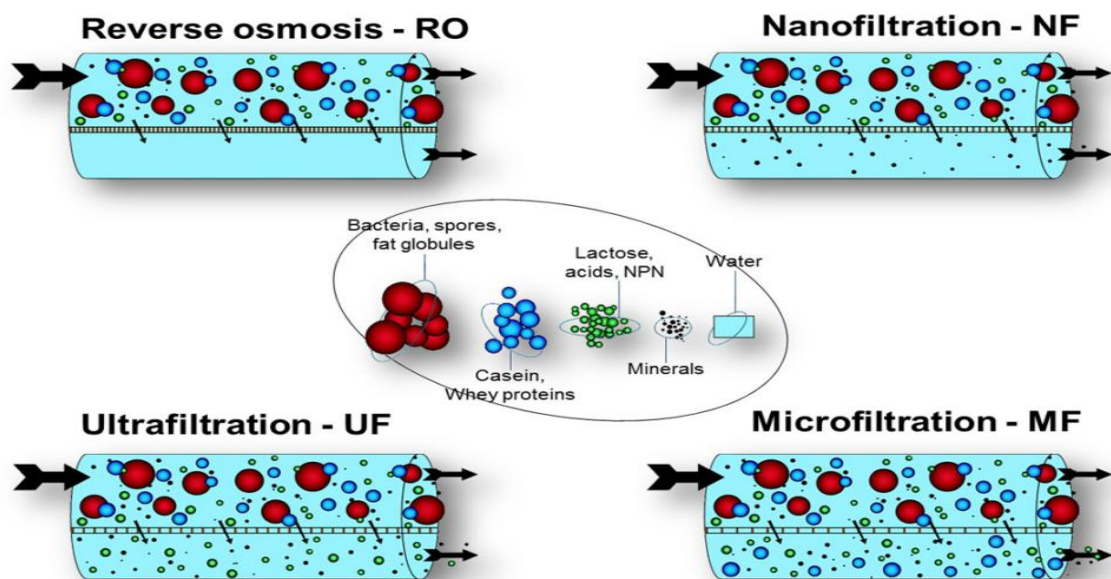
Οι διεργασίες φίλτραυσης διακρίνονται σε συμβατικές τεχνικές και προηγμένες τεχνολογίες διαχωρισμού. Οι συμβατικές μέθοδοι περιλαμβάνουν φίλτρα άμμου, κοκκώδη υλικά, φίλτρα φυσιγγίων και άλλα πορώδη μέσα, στα οποία ο διαχωρισμός πραγματοποιείται κυρίως μέσω μηχανικής συγκράτησης των στερεών σωματιδίων. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως ως προκαταρκτικά στάδια επεξεργασίας, καθώς μειώνουν το φορτίο αιωρούμενων στερεών και

προστατεύουν τις επόμενες μονάδες επεξεργασίας. Ωστόσο, παρουσιάζουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση πολύ λεπτών σωματιδίων, διαλυμένων οργανικών ενώσεων και σταθερών γαλακτωμάτων πετρελαίου-νερού, τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικά συστατικά των πετρελαϊκών καταλοίπων σύμφωνα με τους Abdelrasoul και συνεργάτες (Abdelrasoul et al., 2022).

Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται ένα βιομηχανικό σύστημα φιλτραρίσματος με μεμβράνες, το οποίο χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό υγρών ρευμάτων μέσω ημιπερατών μεμβρανών. Οι μεμβρανικές διεργασίες αποτελούν προηγμένες τεχνολογίες διαχωρισμού υψηλής εκλεκτικότητας, καθώς επιτρέπουν την απομάκρυνση συστατικών με βάση το μέγεθος των σωματιδίων, το μοριακό βάρος και τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες.



Εικόνα 6. Συστήματα διήθησης με μεμβράνες τοποθετημένες σε κυλινδρικές μονάδες φίλτρων. Οι τεχνολογίες διαχωρισμού με μεμβράνες διακρίνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7, οι οποίες διαφοροποιούνται κυρίως ως προς το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης, την απαιτούμενη πίεση λειτουργίας και τα συστατικά που μπορούν να συγκρατήσουν.



Εικόνα 7. Βασικές κατηγορίες τεχνολογιών μεμβρανών που εφαρμόζονται στην επεξεργασία βιομηχανικών πετρελαϊκών αποβλήτων, συγκεκριμένα η μικροδιήθηση (microfiltration, MF), η υπερδιήθηση (ultrafiltration, UF), η νανοδιήθηση (nanofiltration, NF) και η αντίστροφη όσμωση (reverse osmosis, RO).

Οι βασικές κατηγορίες διαχωρισμού με μεμβράνες είναι η μικροδιήθηση (Microfiltration, MF), η υπερδιήθηση (Ultrafiltration, UF), η νανοδιήθηση (Nanofiltration, NF) και η αντίστροφη όσμωση (Reverse Osmosis, RO). Η λειτουργία τους βασίζεται στη χρήση ημιπερατών μεμβρανών, μέσω των οποίων πραγματοποιείται μεταφορά συστατικών υπό την επίδραση διαφοράς πίεσης μεταξύ της πλευράς τροφοδοσίας και της πλευράς του διηθήματος. Το ρεύμα που διέρχεται από τη μεμβράνη ονομάζεται διήθημα, ενώ το ρεύμα που συγκρατείται και εμπλουτίζεται σε ανεπιθύμητα συστατικά ονομάζεται συμπύκνωμα. Ο μηχανισμός διαχωρισμού δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος των σωματιδίων, αλλά επηρεάζεται επίσης από το μοριακό βάρος, το φορτίο, τη χημική σύσταση και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών και της επιφάνειας της μεμβράνης όπως αναφέρουν ο Abdelrasoul και οι συνεργάτες του (Abdelrasoul et al., 2022).

Η μικροδιήθηση αποτελεί διεργασία χαμηλής πίεσης και χρησιμοποιεί μεμβράνες με μέγεθος πόρων περίπου 0,1–10 μm , λειτουργώντας συνήθως σε πιέσεις 0,1–2 bar. Εφαρμόζεται κυρίως για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, βακτηρίων, μεγάλων κολλοειδών σωματιδίων και ελεύθερων σταγονιδίων πετρελαίου. Η υπερδιήθηση χρησιμοποιεί μικρότερους πόρους, περίπου 0,01–0,1 μm , και λειτουργεί σε πιέσεις 1–10 bar. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την απομάκρυνση γαλακτωματοποιημένων υδρογονανθράκων, κολλοειδών ενώσεων, μακρομορίων και λεπτόκοκκων στερεών, τα οποία δεν μπορούν να απομακρυνθούν αποτελεσματικά με

συμβατικές τεχνικές. Η νανοδιήθηση λειτουργεί σε επίπεδο πόρων περίπου 1–10 nm και απαιτεί υψηλότερες πιέσεις, συνήθως 5–25 bar. Μέσω αυτής επιτυγχάνεται απομάκρυνση οργανικών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους, πολυσθενών ιόντων και σημαντικού ποσοστού διαλυμένων αλάτων. Η αντίστροφη όσμωση αποτελεί την πλέον εκλεκτική μορφή μεμβρανικού διαχωρισμού και χρησιμοποιεί σχεδόν μη πορώδεις μεμβράνες υπό υψηλές πιέσεις, οι οποίες μπορούν να φθάσουν τα 30–70 bar. Η διεργασία αυτή επιτρέπει την απομάκρυνση διαλυμένων αλάτων, οργανικών ενώσεων και μικρορύπων, παράγοντας νερό υψηλής καθαρότητας σύμφωνα με τους Judd και συνεργάτες (Judd et al., 2017).

Τα υλικά κατασκευής των μεμβρανών αποτελούν σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των συστημάτων φίλτρανσης. Οι περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιούν πολυμερείς μεμβράνες, όπως πολυσουλφόνη, πολυαμίδιο και πολυβινυλιδενοφθορίδιο (PVDF), λόγω του χαμηλού κόστους και της καλής διαπερατότητάς τους. Σε εφαρμογές επεξεργασίας ελαιωδών και πετρελαϊκών αποβλήτων χρησιμοποιούνται επίσης κεραμικές μεμβράνες, κατασκευασμένες από υλικά όπως οξείδιο αλουμινίου, οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, χημικούς καθαρισμούς και έντονα ρυπασμένα ρεύματα.

Στην επεξεργασία ελαιώδους λάσπης και πετρελαϊκών καταλοίπων, Οι τεχνολογίες μεμβρανών εφαρμόζονται συνήθως μετά από αρχικά στάδια διαχωρισμού, όπως η καθίζηση, φυγοκέντριση, επίπλευση ή χημική αποσταθεροποίηση γαλακτωμάτων. Η προεπεξεργασία είναι απαραίτητη λόγω της σύνθετης σύστασης των αποβλήτων αυτών, τα οποία περιέχουν νερό, ελεύθερους και γαλακτωματοποιημένους υδρογονάνθρακες, ασφαλτένια, ρητίνες και λεπτόκοκκα ανόργανα στερεά. Η παρουσία αυτών των συστατικών μπορεί να προκαλέσει ρύπανση της μεμβράνης και μείωση της απόδοσης του συστήματος.

Η απόδοση των μεμβρανικών μονάδων επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως η πίεση λειτουργίας, η θερμοκρασία, το pH, η συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών, το ιξώδες του ρευστού, η ταχύτητα διασταυρούμενης ροής και τα χαρακτηριστικά της μεμβράνης. Σημαντικός περιορισμός αποτελεί το φαινόμενο ρύπανσης της μεμβράνης (fouling), το οποίο προκαλείται από την προσκόλληση οργανικών ενώσεων, στερεών σωματιδίων και πετρελαϊκών συστατικών στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό των πόρων. Η ρύπανση της μεμβράνης οδηγεί σε μείωση της ροής διηθήματος, αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης και συχνότερες ανάγκες καθαρισμού. Για τον περιορισμό του φαινομένου εφαρμόζονται τεχνικές όπως η λειτουργία διασταυρούμενης ροής, η περιοδική αντίστροφη πλύση, ο χημικός καθαρισμός και η κατάλληλη επιλογή σταδίων προεπεξεργασίας. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται η απόδοση της μεμβράνης και αυξάνεται η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού. Η αποτελεσματικότητα των μεμβρανικών συστημάτων

αξιολογείται μέσω της ποιότητας του παραγόμενου διηθήματος, της απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών, της μείωσης του οργανικού φορτίου και της απομάκρυνσης πετρελαϊκών υδρογονανθράκων. Η μικροδιήθηση και η υπερδιήθηση μπορούν να επιτύχουν απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και σταγονιδίων πετρελαίου μεγαλύτερη από 90%, ενώ σε βελτιστοποιημένες συνθήκες η απομάκρυνση πετρελαϊκών υδρογονανθράκων μπορεί να ξεπεράσει το 95%. Η νανοδιήθηση και η αντίστροφη όσμωση παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα απομάκρυνσης διαλυμένων οργανικών ενώσεων και αλάτων, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού.

Ο χρόνος παραμονής του ρευστού στις μεμβρανικές μονάδες εξαρτάται από την παροχή τροφοδοσίας, την επιφάνεια της μεμβράνης, τη διαμόρφωση του εξοπλισμού και τον τρόπο λειτουργίας. Σε βιομηχανικά συστήματα συνεχούς λειτουργίας κυμαίνεται συνήθως από λίγα λεπτά έως περίπου 60 λεπτά. Στη μικροδιήθηση κυμαίνεται περίπου μεταξύ 5–30 λεπτών, στην υπερδιήθηση 10–40 λεπτών, στη νανοδιήθηση 5–20 λεπτών, ενώ στην αντίστροφη όσμωση βρίσκεται συνήθως στην περιοχή 1–10 λεπτών όπως αναφέρουν ο Judd και οι συνεργάτες του (Judd et al., 2017). Οι χρόνοι αυτοί επιλέγονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματικός διαχωρισμός χωρίς υπερβολική αύξηση της εναπόθεσης ρύπων στη μεμβράνη. Για τον λόγο αυτό οι βιομηχανικές μονάδες λειτουργούν συχνά με διασταυρούμενη ροή, ώστε να περιορίζεται το fouling και να διατηρείται υψηλή απόδοση.

Το κόστος εφαρμογής των μεμβρανικών τεχνολογιών εξαρτάται από τον τύπο της μεμβράνης, τη δυναμικότητα της μονάδας, την ποιότητα του αποβλήτου και τις απαιτήσεις προεπεξεργασίας. Για βιομηχανικές εφαρμογές επεξεργασίας πετρελαϊκών αποβλήτων, το επενδυτικό κόστος κυμαίνεται περίπου από 500 έως 3000 € ανά m^3 ημερήσιας δυναμικότητας, ενώ για συστήματα υψηλής πίεσης όπως η αντίστροφη όσμωση μπορεί να υπερβεί τα 3000–5000 €/(m^3/day). Το λειτουργικό κόστος επηρεάζεται κυρίως από την κατανάλωση ενέργειας, τον καθαρισμό, την αντικατάσταση μεμβρανών και τη συντήρηση του εξοπλισμού. Για μικροδιήθηση και υπερδιήθηση κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0,2–1,5 €/m³ επεξεργασμένου νερού, ενώ για αντίστροφη όσμωση μπορεί να φτάσει περίπου 1–3 €/m³ όπως αναφέρουν ο Abdelrasoul και οι συνεργάτες του (Abdelrasoul et al., 2022).

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών μεμβρανών είναι η υψηλή αποτελεσματικότητα διαχωρισμού, η δυνατότητα απομάκρυνσης πολύ μικρών σωματιδίων και διαλυμένων ενώσεων, η παραγωγή νερού υψηλής ποιότητας, η ανάκτηση χρήσιμων συστατικών και η μικρή απαίτηση χώρου εγκατάστασης. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά μπορούν να αυτοματοποιηθούν πλήρως, επιτρέποντας σταθερό έλεγχο των λειτουργικών παραμέτρων και συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων μέσω επαναχρησιμοποίησης του νερού.

Ωστόσο, παρουσιάζουν και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, η κατανάλωση ενέργειας στις διεργασίες υψηλής πίεσης, η ανάγκη τακτικής συντήρησης και η περιορισμένη διάρκεια ζωής των μεμβρανών λόγω φθοράς και ρύπανσης. Το φαινόμενο ρύπανσης-υποβάθμισης της μεμβράνης αποτελεί τον σημαντικότερο λειτουργικό περιορισμό, καθώς μειώνει τη διαπερατότητα της μεμβράνης και αυξάνει τις απαιτήσεις καθαρισμού. Συνολικά, η φίλτρηση και ιδιαίτερα οι τεχνολογίες μεμβρανών αποτελούν μία από τις πλέον αποτελεσματικές λύσεις για την προ επεξεργασία ελαιωδών αποβλήτων και πετρελαϊκών καταλοίπων. Η υψηλή απόδοση διαχωρισμού, η δυνατότητα ανάκτησης νερού και η προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές βιομηχανικές εφαρμογές καθιστούν τις τεχνολογίες αυτές σημαντικό εργαλείο για τη σύγχρονη διαχείριση αποβλήτων, παρά τις απαιτήσεις που σχετίζονται με το κόστος, την ενέργεια και τη συντήρηση.

2.1.5 Επίπλευση με αέρα (Air flotation)

Η επίπλευση με αέρα αποτελεί μία ευρέως εφαρμοζόμενη φυσικοχημική τεχνική για τον διαχωρισμό του πετρελαίου από την ελαιώδη λάσπη, αξιοποιώντας τη δημιουργία φυσαλίδων αερίου που προσκολλώνται στα σταγονίδια του πετρελαίου και διευκολύνουν την ανύψωσή τους προς την επιφάνεια. Κατά τη διεργασία, το μίγμα ελαιώδους λάσπης και νερού έρχεται σε επαφή με τις φυσαλίδες αέρα, με αποτέλεσμα τη λέπτυνση και τελικά τη θραύση της διεπιφανειακής μεμβράνης που περιβάλλει τα σταγονίδια του πετρελαίου. Η διαδικασία αυτή ευνοεί τη συσσωμάτωση των σταγονιδίων και τον αποτελεσματικό διαχωρισμό τους από τη στερεή φάση, οδηγώντας σε αυξημένη ανάκτηση πετρελαίου σύμφωνα με τους Scharnberg και συνεργάτες (Scharnberg et al., 2023).

Η αποτελεσματικότητα της επίπλευσης επηρεάζεται από πληθώρα λειτουργικών και φυσικοχημικών παραμέτρων, όπως οι ιδιότητες της ελαιώδους λάσπης, η αλατότητα, η θερμοκρασία, το pH του συστήματος, το μέγεθος των παραγόμενων φυσαλίδων, η παρουσία χημικών προσθέτων και ο χρόνος παραμονής της διεργασίας. Ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας είναι η ένταση της ανάδευσης, καθώς η αύξηση της ταχύτητας ανάδευσης ενισχύει τις διατμητικές δυνάμεις, διευκολύνοντας την αποκόλληση του πετρελαίου από την επιφάνεια των στερεών σωματιδίων και βελτιώνοντας τον διαχωρισμό. Ωστόσο, όταν η ταχύτητα ανάδευσης υπερβαίνει το βέλτιστο επίπεδο, διαταράσσεται ο σχηματισμός σταθερού αφρού, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της συνολικής απόδοσης της διεργασίας όπως αναφέρουν ο Li και οι συνεργάτες του (Li et al., 2023).

Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η συνδυασμένη εφαρμογή της επίπλευσης με αέρα και της φυγοκέντρισης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τόσο την ανάκτηση πετρελαίου όσο και την

περιβαλλοντική απόδοση της διεργασίας. Η ολοκληρωμένη αυτή προσέγγιση επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση της υδατικής φάσης που ανακτάται κατά την επεξεργασία, περιορίζοντας την παραγωγή δευτερογενών αποβλήτων και μειώνοντας την κατανάλωση νερού. Παράλληλα, έχουν αναφερθεί ιδιαίτερα υψηλές αποδόσεις, με ποσοστό ανάκτησης αργού πετρελαίου που φτάνει το 93,7%, περιεκτικότητα υπολειμματικού πετρελαίου στη στερεή φάση μόλις 3,1% και περιεκτικότητα στερεών στο ανακτημένο πετρέλαιο μόλις 0,8%, γεγονός που υποδηλώνει σημαντική βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος σύμφωνα με τους Li και συνεργάτες (Li et al., 2023).

Η απόδοση της τεχνολογίας μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω μέσω του συνδυασμού της επίπλευσης με μηχανικές τεχνικές προεπεξεργασίας. Η εφαρμογή της συνδυασμένης αυτής μεθόδου διευκολύνει την αποδέσμευση του εγκλωβισμένου πετρελαίου από τη στερεή μήτρα της λάσπης, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της απόδοσης διαχωρισμού. Επιπλέον, οι Scharnberg και οι συνεργάτες (Scharnberg et al., 2023) αναφέρουν ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση οδήγησε σε μείωση της περιεκτικότητας του υπολειμματικού πετρελαίου στην επεξεργασμένη λάσπη σε περίπου 0,8%, ενώ τόσο η περιεκτικότητα του ανακτημένου νερού σε πετρέλαιο όσο και η περιεκτικότητα στερεών στο ανακτημένο πετρέλαιο διατηρήθηκαν σε επίπεδα χαμηλότερα του 0,5%.

Εξίσου σημαντικός παράγοντας για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας αποτελεί το μέγεθος των φυσαλίδων αέρα. Η χρήση μικροφυσαλίδων έχει αποδειχθεί σημαντικά αποδοτικότερη σε σύγκριση με τις συμβατικές λεπτές φυσαλίδες, παρουσιάζοντας περίπου 1,7 φορές υψηλότερη ικανότητα απομάκρυνσης του πετρελαίου. Παράλληλα, η τιμή του pH επηρεάζει σημαντικά τη σταθερότητα του γαλακτώματος και, κατ' επέκταση, την απόδοση της επίπλευσης. Υπό ήπια αλκαλικές συνθήκες ($\text{pH} \approx 9$) έχουν αναφερθεί ποσοστά απομάκρυνσης της τάξης του 60,68%, ενώ η οξίνιση του συστήματος σε pH περίπου 3 αποσταθεροποιεί αποτελεσματικότερα το γαλάκτωμα, επιτρέποντας την επίτευξη αποδόσεων που προσεγγίζουν το 75%. Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν ότι η βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη μέγιστη αξιοποίηση της τεχνολογίας επίπλευσης στην ανάκτηση πετρελαίου από ελαιώδεις λάσπες.

Η επίπλευση με αέρα χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας σε σύγκριση με πιο σύνθετες τεχνολογίες επεξεργασίας. Το κόστος εγκατάστασης μιας μονάδας επίπλευσης εκτιμάται περίπου σε 100–500 €/m³ ημερήσιας δυναμικότητας επεξεργασίας, ενώ το λειτουργικό κόστος κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5 και 30 €/τόνο ελαιώδους λάσπης, κυρίως λόγω της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή αέρα ή μικροφυσαλίδων και της πιθανής χρήσης χημικών προσθέτων. Ο χρόνος παραμονής της λάσπης στη

δεξαμενή επίπλευσης είναι μικρός και συνήθως κυμαίνεται από 10 έως 60 λεπτά, γεγονός που επιτρέπει την εφαρμογή της σε συνεχή βιομηχανικά συστήματα σύμφωνα με τους Scharnberg και συνεργάτες (Scharnberg et al., 2023). Παρότι το κόστος είναι χαμηλότερο από τις θερμικές διεργασίες, η ανάγκη συνδυασμού με άλλες τεχνολογίες (π.χ. φυγοκέντρωση ή χημική επεξεργασία) μπορεί να αυξήσει το συνολικό κόστος επεξεργασίας.

2.1.6 Επεξεργασία ψύξης/απόψυξης

Η επεξεργασία ψύξης/απόψυξης αποτελεί μία φυσική τεχνολογία διαχωρισμού πετρελαϊκών γαλακτωμάτων, η οποία βασίζεται στις διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες της υδατικής και της πετρελαϊκής φάσης. Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως για την επεξεργασία ελαιωδών ιλύων, πετρελαϊκών καταλοίπων και σταθερών γαλακτωμάτων νερού–πετρελαίου, με στόχο την αποσταθεροποίηση της γαλακτωματικής δομής, την απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας και την ανάκτηση πετρελαϊκών συστατικών.

Η βασική αρχή λειτουργίας της διεργασίας στηρίζεται στη σημαντική διαφορά μεταξύ του σημείου πήξης του νερού και των πετρελαϊκών ενώσεων. Κατά το στάδιο της ψύξης, το νερό που βρίσκεται διασκορπισμένο στο γαλάκτωμα μετατρέπεται σε κρυστάλλους πάγου, με αποτέλεσμα τη διαστολή της υδατικής φάσης και τη δημιουργία μηχανικών τάσεων στη δομή του συστήματος. Η ανάπτυξη των κρυστάλλων πάγου προκαλεί διάρρηξη της διεπιφάνειας νερού–πετρελαίου και μειώνει τη σταθερότητα του γαλακτώματος. Κατά την επακόλουθη απόψυξη, τα τμήματα νερού συνενώνονται σε μεγαλύτερα σταγονίδια, επιτρέποντας τον ευκολότερο διαχωρισμό της υδατικής και της ελαιώδους φάσης. Για τον λόγο αυτό, η μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί ως μία μορφή φυσικής απογαλακτωματοποίησης, καθώς δεν απαιτεί την προσθήκη χημικών απογαλακτωματοποιητών όπως αναφέρουν οι Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2020). Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας επηρεάζεται από σημαντικές λειτουργικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία ψύξης και απόψυξης, ο ρυθμός ψύξης, ο χρόνος παραμονής, η περιεκτικότητα σε νερό, η αλατότητα, η συγκέντρωση επιφανειοδραστικών ουσιών και η περιεκτικότητα σε στερεά σωματίδια. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τον σχηματισμό και την ανάπτυξη των κρυστάλλων πάγου, καθώς και την ικανότητα διαχωρισμού των πετρελαϊκών σταγονιδίων από την υδατική φάση.

Σύμφωνα με τους Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2020) ο χρόνος παραμονής αποτελεί κρίσιμη παράμετρο της διεργασίας, καθώς απαιτείται επαρκής χρόνος ώστε να ολοκληρωθεί η ψύξη της υδατικής φάσης και η αποσταθεροποίηση του γαλακτώματος. Σε εργαστηριακές και πιλοτικές εφαρμογές έχουν αναφερθεί χρόνοι ψύξης της τάξης των 6–48 ωρών, ενώ σε εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας η συνολική διάρκεια της διεργασίας μπορεί να φθάσει σε μερικές

ημέρες, ανάλογα με τον όγκο του υλικού, το πάχος της επεξεργαζόμενης μάζας, τη θερμοκρασία λειτουργίας και την απόδοση του ψυκτικού συστήματος. Το στάδιο της απόψυξης είναι συνήθως μικρότερης διάρκειας, καθώς η τήξη των κρυστάλλων πάγου πραγματοποιείται ταχύτερα από τον σχηματισμό τους. Η εφαρμογή τεχνικών ταχείας θέρμανσης, όπως η μικροκυματική θέρμανση, μπορεί να επιταχύνει το στάδιο της απόψυξης και να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού όπως αναφέρουν οι Zhang και συνεργάτες (Zhang et al., 2012). Η απόδοση της τεχνολογίας εξαρτάται σημαντικά από τη σύσταση του αρχικού αποβλήτου και τις εφαρμοζόμενες συνθήκες λειτουργίας. Σε μελέτες με χρήση ψύξης μέσω ξηρού πάγου έχουν αναφερθεί ποσοστά απομάκρυνσης νερού μεγαλύτερα από 70% από ελαιώδεις ιλύς, ενώ η ανάκτηση πετρελαϊκών συστατικών έχει φθάσει περίπου το 65,7%. Επιπλέον, η συνδυασμένη εφαρμογή ψύξης/απόψυξης με μικροκυματική θέρμανση έχει παρουσιάσει δυνατότητα διαχωρισμού πετρελαίου–νερού μεγαλύτερη από 90% σε κατάλληλα χαρακτηρισμένα γαλακτώματα όπως αναφέρουν οι Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2020).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της επεξεργασίας ψύξης/απόψυξης είναι ότι αποτελεί μία τεχνολογία χαμηλής χημικής επιβάρυνσης, καθώς ο διαχωρισμός πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω φυσικών φαινομένων αλλαγής φάσης χωρίς την ανάγκη προσθήκης χημικών αντιδραστηρίων. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η δημιουργία δευτερογενών αποβλήτων και διευκολύνεται η ανάκτηση πετρελαϊκών κλασμάτων με ενεργειακή αξία. Επιπλέον, η μέθοδος μπορεί να παρουσιάσει αυξημένο ενδιαφέρον σε ψυχρές περιοχές, όπου οι φυσικές χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να αξιοποιηθούν για τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων.

Ωστόσο, η εφαρμογή της τεχνολογίας συνοδεύεται από σημαντικούς περιορισμούς. Ο κυριότερος αφορά την αυξημένη ενεργειακή απαίτηση για τη δημιουργία και διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται τεχνητά συστήματα ψύξης. Η ενεργειακή κατανάλωση της διεργασίας έχει αναφερθεί ότι μπορεί να κυμαίνεται περίπου μεταξύ 100–300 kWh ανά τόνο επεξεργασμένου υλικού, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και την απόδοση του ψυκτικού εξοπλισμού. Το αντίστοιχο λειτουργικό κόστος εξαρτάται από το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και τον τύπο της τεχνολογίας ψύξης, αλλά βιβλιογραφικές εκτιμήσεις για εφαρμογές θερμικής διαχείρισης με έντονη απαίτηση ψύξης τοποθετούν το κόστος περίπου στην περιοχή των 20–80 € ανά τόνο επεξεργασμένου υλικού.

Σύμφωνα με τους Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2020) το κόστος λειτουργίας αυξάνεται όταν χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές, όπως η ψύξη με ξηρό πάγο, λόγω του κόστους παραγωγής και μεταφοράς του ψυκτικού μέσου. Επιπλέον, οι μεγάλοι χρόνοι παραμονής οδηγούν σε αυξημένες απαιτήσεις εξοπλισμού και μειωμένη δυναμικότητα επεξεργασίας, γεγονός που

περιορίζει την οικονομική ανταγωνιστικότητα της μεθόδου σε σχέση με άλλες τεχνολογίες απογαλακτωματοποίησης.

Παράλληλα, η απόδοση της διεργασίας δεν είναι ίδια για όλα τα είδη πετρελαϊκών αποβλήτων. Ιδιαίτερα σταθερά γαλακτώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε πετρέλαιο, στερεά σωματίδια ή επιφανειοδραστικές ενώσεις μπορούν να παρουσιάσουν μειωμένη απόκριση στην ψύξη/απόψυξη. Έχει αναφερθεί ότι η μέθοδος μπορεί να είναι λιγότερο κατάλληλη για την επεξεργασία υλούς πυθμένα δεξαμενών με υψηλή περιεκτικότητα σε πετρέλαιο, όπου ο διαχωρισμός των φάσεων παραμένει περιορισμένος.

Συνολικά, η επεξεργασία ψύξης/απόψυξης αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη φυσική μέθοδο για τον διαχωρισμό πετρελαίου και νερού σε ελαιώδη απόβλητα, παρουσιάζοντας σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η απουσία χημικών προσθέτων, η δυνατότητα ανάκτησης πετρελαϊκών προϊόντων και η χαμηλή παραγωγή δευτερογενών ρύπων. Παρόλα αυτά, η ευρεία εφαρμογή της σε βιομηχανική κλίμακα περιορίζεται από τις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, τους μεγάλους χρόνους παραμονής και το αυξημένο λειτουργικό κόστος.

3. Χημικές Τεχνολογίες

Χημικές Τεχνολογίες Επεξεργασίας Πετρελαϊκών Καταλοίπων

Οι χημικές τεχνολογίες επεξεργασίας αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους άξονες διαχείρισης επικίνδυνων και βιομηχανικών αποβλήτων, καθώς επιτρέπουν τη μετατροπή, απομάκρυνση ή σταθεροποίηση ρυπογόνων συστατικών μέσω χημικών αντιδράσεων και φυσικοχημικών αλληλεπιδράσεων. Σε αντίθεση με τις μηχανικές μεθόδους διαχωρισμού, οι οποίες βασίζονται κυρίως σε διαφορές φυσικών ιδιοτήτων, όπως η πυκνότητα και το μέγεθος των σωματιδίων, οι χημικές τεχνικές επηρεάζουν άμεσα τη μοριακή δομή των ρύπων, οδηγώντας είτε στην αποδόμησή τους είτε στον μετασχηματισμό τους σε λιγότερο επικίνδυνες μορφές. Για τον λόγο αυτό αποτελούν βασικό στάδιο επεξεργασίας σε πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις διαχείρισης πετρελαϊκών αποβλήτων. Στην περίπτωση των καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών, οι χημικές τεχνικές χρησιμοποιούνται κυρίως για τη διάσπαση γαλακτωμάτων, την ανάκτηση υδρογονανθράκων και τη βελτίωση της απόδοσης των επόμενων σταδίων επεξεργασίας. Η χημική διάσπαση γαλακτωμάτων πραγματοποιείται με τη χρήση απογαλακτωματοποιητών, οι οποίοι διευκολύνουν τον διαχωρισμό της ελαιώδους και της υδατικής φάσης, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα της συνολικής διεργασίας σύμφωνα με τους Sellami και συνεργάτες (Sellami et al., 2016).

Μία ακόμη ιδιαίτερα διαδεδομένη χημική τεχνική είναι η εκχύλιση με οργανικούς διαλύτες, η οποία αξιοποιεί τη διαφορά διαλυτότητας των υδρογονανθράκων σε κατάλληλα οργανικά

μέσα. Κατά τη διεργασία αυτή, ο διαλύτης έρχεται σε επαφή με την πετρελαϊκή ιλύ και διαλύει τα οργανικά κλάσματα που περιέχονται σε αυτήν. Στη συνέχεια, το μίγμα διαλύτη και υδρογονανθράκων διαχωρίζεται από τα στερεά και το νερό, ενώ ακολουθεί στάδιο ανάκτησης του διαλύτη μέσω απόσταξης ή άλλης κατάλληλης τεχνολογίας. Σύμφωνα με τους Shi και συνεργάτες (Shi et al., 2018), η μέθοδος μπορεί να επιτύχει υψηλά ποσοστά ανάκτησης πετρελαίου, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στη σημαντική μείωση του όγκου των αποβλήτων που απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία.

Η αποτελεσματικότητα της εκχύλισης επηρεάζεται από διάφορες λειτουργικές παραμέτρους, όπως η φύση του διαλύτη, η αναλογία διαλύτη προς στερεό υπόστρωμα, η θερμοκρασία λειτουργίας, ο χρόνος επαφής και η ένταση ανάδευσης. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το ιξώδες της πετρελαϊκής ιλύος και διευκολύνει τη μεταφορά μάζας μεταξύ των φάσεων, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης της διεργασίας. Παράλληλα, η επιλογή κατάλληλου διαλύτη είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς επηρεάζει τόσο την ποσότητα των ανακτώμενων υδρογονανθράκων όσο και το ενεργειακό κόστος της μετέπειτα ανάκτησής του.

Πέραν της εκχύλισης και της διάσπασης γαλακτωμάτων, σημαντική θέση στις χημικές τεχνολογίες κατέχουν η χημική οξείδωση και η σταθεροποίηση επικίνδυνων συστατικών. Η χημική οξείδωση χρησιμοποιεί ισχυρά οξειδωτικά μέσα, όπως το υπεροξείδιο του υδρογόνου και το όζον, για τη διάσπαση σύνθετων οργανικών ενώσεων και τη μείωση της τοξικότητας των αποβλήτων. Αντίστοιχα, η σταθεροποίηση εφαρμόζεται για την αδρανοποίηση βαρέων μετάλλων και άλλων επικίνδυνων συστατικών, περιορίζοντας την κινητικότητά τους στο περιβάλλον. Στη σύγχρονη βιομηχανική πρακτική, οι χημικές τεχνικές σπάνια λειτουργούν ως αυτόνομα συστήματα επεξεργασίας. Αντίθετα, συνδυάζονται με μηχανικές διεργασίες, όπως η φυγοκέντριση και η φιλτράνση, καθώς και με θερμικές μεθόδους, όπως η θερμική εκρόφηση. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης υδρογονανθράκων, τη μείωση του όγκου των αποβλήτων και τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης της εγκατάστασης. Ως αποτέλεσμα, οι χημικές τεχνικές αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης πετρελαϊκών καταλοίπων, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην προστασία του περιβάλλοντος και στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας.

3.1 Χημική Διάσπαση Γαλακτωμάτων

Η χημική διάσπαση γαλακτωμάτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες προεπεξεργασίας καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών, καθώς στοχεύει στην αποσταθεροποίηση των ιδιαίτερα ανθεκτικών γαλακτωμάτων πετρελαίου–νερού που σχηματίζονται κατά την αποθήκευση και διακίνηση πετρελαϊκών προϊόντων. Τα κατάλοιπα δεξαμενών αποτελούνται

συνήθως από ένα σύνθετο μίγμα υδρογονανθράκων, νερού και στερεών σωματιδίων, όπου η παρουσία ασφατενίων, ρητινών, παραφινών, ενώσεων θείου και άλλων φυσικών επιφανειοδραστικών ουσιών συμβάλλει στη δημιουργία σταθερών γαλακτωμάτων τύπου νερού σε πετρέλαιο. Η σταθερότητα αυτών των γαλακτωμάτων δυσχεραίνει τον φυσικό ή μηχανικό διαχωρισμό των φάσεων και περιορίζει την ανάκτηση του πολύτιμου πετρελαϊκού κλάσματος.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος εφαρμόζεται η προσθήκη ειδικών χημικών παραγόντων, γνωστών ως απογαλακτωματοποιητών, οι οποίοι δρουν στη διεπιφάνεια πετρελαίου–νερού αποδυναμώνοντας ή καταστρέφοντας το προστατευτικό φιλμ που σχηματίζεται από τα ασφατενία και τις ρητίνες. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η διεπιφανειακή τάση, διευκολύνεται η συνένωση των μικρών σταγονιδίων νερού σε μεγαλύτερα και επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερος διαχωρισμός των δύο φάσεων μέσω καθίζησης ή φυγοκέντρισης σύμφωνα με τους Li και συνεργάτες (Li et al., 2023).

Οι ουσίες αυτές είναι συνήθως πολυμερικές οργανικές ενώσεις, όπως πολυοξυπροπυλένια, πολυαμίνες και πολυαλκοόλες, οι οποίες αντικαθιστούν τα φυσικά σταθεροποιητικά του γαλακτώματος και διευκολύνουν τη συνένωση των μικρών σταγονιδίων νερού σε μεγαλύτερα συσσωματώματα σύμφωνα με τους Sami και συνεργάτες (Sami et al., 2016). Η διαδικασία αυτή, γνωστή ως συσσωμάτωση, οδηγεί στη μείωση της διασποράς του νερού μέσα στο πετρέλαιο και επιτρέπει τον αποτελεσματικό διαχωρισμό των δύο φάσεων μέσω καθίζησης ή φυγοκέντρισης. Η χημική διάσπαση γαλακτωμάτων εφαρμόζεται σχεδόν πάντοτε σε συνδυασμό με θέρμανση και μηχανική ανάδευση. Η θέρμανση μειώνει το ιξώδες του πετρελαίου, αυξάνει την κινητικότητα των σταγονιδίων και διευκολύνει τη μεταξύ τους σύγκρουση, ενώ η ανάδευση εξασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή του απογαλακτωματοποιητή σε όλο τον όγκο του αποβλήτου. Στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές, η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 60 και 95 °C, καθώς σε αυτό το εύρος επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση της αποδοτικότητας χωρίς υπερβολική ενεργειακή κατανάλωση όπως αναφέρουν οι Alara και οι συνεργάτες του (Alara et al., 2022). Παράλληλα, η απαιτούμενη δόση απογαλακτωματοποιητή κυμαίνεται συνήθως από 50 έως 500 ppm, ανάλογα με τη σύσταση και τη σταθερότητα του γαλακτώματος. Η επιλογή της βέλτιστης δόσης πραγματοποιείται συνήθως μέσω εργαστηριακών δοκιμών, οι οποίες επιτρέπουν την αξιολόγηση διαφορετικών χημικών παραγόντων και συνθηκών λειτουργίας. Εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι ο χρόνος παραμονής του μίγματος μετά την προσθήκη των χημικών, ο οποίος συνήθως κυμαίνεται από 10 έως 60 λεπτά. Το χρονικό αυτό διάστημα επιτρέπει την ολοκλήρωση των φαινομένων αποσταθεροποίησης και συνένωσης των σταγονιδίων, ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός διαχωρισμός των φάσεων. Επιπλέον, το pH του συστήματος μπορεί να επηρεάσει τη διαλυτότητα και τη δραστηριότητα

ορισμένων απογαλακτωματοποιητών, με τις περισσότερες εφαρμογές να λειτουργούν αποτελεσματικά σε εύρος pH μεταξύ 6,5 και 8,5 σύμφωνα με τους Li και συνεργάτες (Li et al., 2023). Η αποτελεσματικότητα της χημικής διάσπασης γαλακτωμάτων αξιολογείται κυρίως με βάση την ποσότητα και την ποιότητα του ανακτημένου πετρελαίου. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, όταν η διεργασία συνδυάζεται με μηχανικές μεθόδους διαχωρισμού, όπως η φυγοκέντριση ή η καθίζηση, η ανάκτηση πετρελαίου μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 85% και 98%. Παράλληλα, η περιεκτικότητα του ανακτημένου πετρελαίου σε νερό και στερεά μπορεί να μειωθεί σε επίπεδα χαμηλότερα του 1%, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές σε διεργασίες διύλισης ή περαιτέρω αξιοποίηση σύμφωνα με τους Alara και συνεργάτες (Alara et al., 2022). Επιπλέον, η απομάκρυνση σημαντικού μέρους της υδατικής φάσης οδηγεί σε συνολική μείωση του όγκου των αποβλήτων κατά 30–50%, γεγονός που περιορίζει τις απαιτήσεις των επόμενων σταδίων επεξεργασίας.

Η χημική διάσπαση γαλακτωμάτων απαιτεί σχετικά απλό εξοπλισμό, όπως δεξαμενές ανάμιξης, συστήματα δοσομέτρησης χημικών, αναδευτήρες και αντλίες, με το κόστος εγκατάστασης για μια μικρή έως μεσαία μονάδα να κυμαίνεται συνήθως από 40.000 έως 150.000 €. Το κόστος επεξεργασίας ανέρχεται περίπου σε 8–30 €/m³ αποβλήτου και περιλαμβάνει την κατανάλωση χημικών αντιδραστηρίων, την ηλεκτρική ενέργεια, τη συντήρηση του εξοπλισμού και τη διαχείριση της παραγόμενης ιλύος όπως αναφέρουν ο Li και οι συνεργάτες του (Li et al., 2023). Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά της, η μέθοδος παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε ιλύος, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη βελτιστοποίηση τόσο της δόσης των χημικών όσο και των συνθηκών λειτουργίας. Επιπλέον, η χρήση χημικών προσθέτων συνεπάγεται με την παραγωγή δευτερογενών αποβλήτων και αυξάνει τις απαιτήσεις περιβαλλοντικής διαχείρισης. Παρόλα αυτά, λόγω του σχετικά χαμηλού λειτουργικού κόστους και της σημαντικής βελτίωσης που προσφέρει στην απόδοση των επόμενων διεργασιών διαχωρισμού, η χημική διάσπαση γαλακτωμάτων εξακολουθεί να αποτελεί βασικό στάδιο προ επεξεργασίας στις σύγχρονες εγκαταστάσεις διαχείρισης πετρελαϊκών καταλοίπων όπως αναφέρουν οι Alara και οι συνεργάτες του (Alara et al., 2022).

3.1.1 Εκχύλιση με Διαλύτες

Η εκχύλιση με διαλύτες αποτελεί μία από τις πλέον αποτελεσματικές χημικές τεχνολογίες για την ανάκτηση υδρογονανθράκων από πετρελαϊκά κατάλοιπα, ιλύες δεξαμενών και άλλα απόβλητα της πετρελαϊκής βιομηχανίας. Η μέθοδος βασίζεται στην επιλεκτική διάλυση των οργανικών ρύπων σε κατάλληλους οργανικούς διαλύτες, επιτρέποντας τον διαχωρισμό τους από τη

στερεά μήτρα και την υδατική φάση. Στόχος της διεργασίας είναι η απομάκρυνση των υδρογονανθράκων που βρίσκονται προσροφημένοι ή εγκλωβισμένοι στα στερεά σωματίδια της ιλύος, μειώνοντας σημαντικά τη συγκέντρωση των ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων στο τελικό στερεό υπόλειμμα σύμφωνα με τους Humadi και συνεργάτες (Humadi et al., 2023).

Η βασική αρχή λειτουργίας της εκχύλισης στηρίζεται στη μεταφορά των οργανικών ενώσεων από τη στερεά φάση προς τον διαλύτη λόγω της υψηλής διαλυτότητάς τους σε αυτόν. Κατά την επαφή του αποβλήτου με τον οργανικό διαλύτη, οι υδρογονάνθρακες διαλύονται και μεταφέρονται στην υγρή φάση, ενώ τα στερεά σωματίδια παραμένουν διαχωρισμένα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται διαχωρισμός των στερεών από το εκχύλισμα και ακολουθεί ανάκτηση του διαλύτη μέσω εξάτμισης ή απόσταξης, ώστε να καταστεί δυνατή η επαναχρησιμοποίησή του. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ταυτόχρονα ανάκτηση πολύτιμων υδρογονανθράκων και μείωση της επικινδυνότητας του στερεού υπολείμματος. Σύμφωνα με τους Humadi και συνεργάτες (Humadi et al., 2023) η επιλογή του κατάλληλου διαλύτη αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την αποδοτικότητα της διεργασίας. Οι διαλύτες επιλέγονται με βάση την ικανότητά τους να διαλύουν αποτελεσματικά τα πετρελαϊκά κλάσματα, τη χαμηλή τοξικότητα, την ευκολία ανάκτησης και το χαμηλό σημείο βρασμού τους. Στη βιομηχανική πρακτική χρησιμοποιούνται συχνά ελαφρά πετρελαϊκά κλάσματα, όπως η νάφθα και η κηροζίνη, καθώς και οργανικοί διαλύτες όπως το εξάνιο και ορισμένοι αρωματικοί διαλύτες, όπως το τολουένιο. Σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμόζονται μίγματα διαλυτών, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη εκλεκτικότητα και υψηλότερη απόδοση ανάκτησης για διαφορετικές κατηγορίες υδρογονανθράκων. Η απόδοση της εκχύλισης επηρεάζεται από μια σειρά λειτουργικών παραμέτρων. Ο λόγος διαλύτη προς ιλύ αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθώς καθορίζει τη διαθέσιμη ποσότητα διαλύτη για τη διάλυση των οργανικών ενώσεων. Συνήθως εφαρμόζονται λόγοι από 2:1 έως 5:1, με την αύξηση της ποσότητας διαλύτη να βελτιώνει την αποδοτικότητα της εκχύλισης, αλλά ταυτόχρονα να αυξάνει το ενεργειακό και οικονομικό κόστος ανάκτησής του. Παράλληλα, η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζει σημαντικά την κινητική της διεργασίας. Θερμοκρασίες μεταξύ 20 και 60 °C χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μείωση του ιξώδους του πετρελαϊκού κλάσματος και τη βελτίωση της μεταφοράς μάζας μεταξύ στερεής και υγρής φάσης. Επιπλέον, η ένταση της ανάδευσης και ο χρόνος επαφής συμβάλλουν στην αύξηση της επιφάνειας επαφής μεταξύ διαλύτη και αποβλήτου, βελτιώνοντας περαιτέρω την απομάκρυνση των υδρογονανθράκων.

Η εκχύλιση με διαλύτες απαιτεί πιο πολύπλοκο και ακριβό εξοπλισμό, όπως μονάδα εκχύλισης, δεξαμενές αποθήκευσης, συστήματα ασφαλείας και μονάδα ανάκτησης του διαλύτη, με το κόστος εγκατάστασης να κυμαίνεται συνήθως από 100.000 έως 400.000 € για μια μικρή έως

μεσαία μονάδα. Το κόστος επεξεργασίας κυμαίνεται περίπου σε 15–70 €/m³ αποβλήτου και επηρεάζεται κυρίως από την κατανάλωση και την ανάκτηση του διαλύτη, την απαιτούμενη ενέργεια, τη συντήρηση του εξοπλισμού και τη διαχείριση των παραγόμενων υπολειμμάτων.

Η εκχύλιση με διαλύτες θεωρείται μία από τις πιο αποδοτικές τεχνολογίες για την απομάκρυνση οργανικών ρύπων από στερεά πετρελαϊκά κατάλοιπα. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι αποδόσεις απομάκρυνσης των ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 90% και 99%, ανάλογα με τη σύσταση του αποβλήτου και τις συνθήκες λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, η τελική περιεκτικότητα σε συνολικούς πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες (TPH) στα επεξεργασμένα στερεά μπορεί να μειωθεί σε επίπεδα μικρότερα του 1% κατά βάρος ή σε συγκεντρώσεις της τάξης των 100–500 mg/kg, επιτρέποντας σε πολλές περιπτώσεις την ασφαλέστερη διάθεση ή ακόμη και την επαναχρησιμοποίηση των στερεών υλικών. Παράλληλα, η ανάκτηση του χρησιμοποιούμενου διαλύτη μπορεί να υπερβεί το 95–99% όπως αναφέρουν ο Humadi και οι συνεργάτες του (Humadi et al., 2023), γεγονός που επηρεάζει καθοριστικά τη βιωσιμότητα και το λειτουργικό κόστος της μεθόδου. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά της, η τεχνολογία παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Η χρήση μεγάλων ποσοτήτων οργανικών διαλυτών συνεπάγεται αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας λόγω της πτητικότητας και της ευφλεκτότητάς τους, καθώς και αυστηρό έλεγχο των εκπομπών πτητικών οργανικών ενώσεων. Επιπλέον, η ανάγκη ανάκτησης και ανακύκλωσης των διαλυτών αυξάνει την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης και το ενεργειακό κόστος της διεργασίας σύμφωνα με τους Humadi και συνεργάτες (Humadi et al., 2023). Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη φιλικότερων προς το περιβάλλον διαλυτών, καθώς και για τον συνδυασμό της εκχύλισης με άλλες τεχνολογίες, όπως η φυγοκέντρωση, η χημική απογαλακτωματοποίηση και η θερμική εκρόφηση.

Συνολικά, η εκχύλιση με διαλύτες αποτελεί μία ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδο ανάκτησης υδρογονανθράκων από πετρελαϊκά κατάλοιπα, προσφέροντας υψηλά ποσοστά απορρύπανσης και σημαντική μείωση του όγκου των επικίνδυνων αποβλήτων. Η δυνατότητα ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης τόσο του πετρελαίου όσο και του διαλύτη καθιστά τη μέθοδο ελκυστική από τεχνική και οικονομική άποψη, ιδιαίτερα όταν ενσωματώνεται σε ολοκληρωμένα συστήματα επεξεργασίας πετρελαϊκών αποβλήτων.

3.1.2 Μέθοδοι οξείδωσης

Οι οξειδωτικές τεχνολογίες αποτελούν μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες χημικών μεθόδων για την επεξεργασία πετρελαιοειδών λασπών, καθώς βασίζονται στην αποδόμηση των οργανικών ρύπων μέσω ισχυρών οξειδωτικών αντιδράσεων. Σκοπός των διεργασιών αυτών είναι

η μετατροπή των πετρελαϊκών υδρογονανθράκων και των υπόλοιπων οργανικών συστατικών της λάσπης σε απλούστερες και περιβαλλοντικά ασφαλέστερες ενώσεις, κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), νερό (H_2O) και ανόργανα άλατα, μειώνοντας σημαντικά το οργανικό φορτίο, την τοξικότητα και την επικινδυνότητα του αποβλήτου. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται η συμβατική χημική οξείδωση, οι προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες (Advanced Oxidation Processes – AOPs), η υγρή οξείδωση με αέρα (Wet Air Oxidation – WAO) και η υπερκρίσιμη οξείδωση σε νερό (Supercritical Water Oxidation – SCWO), οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τον μηχανισμό δράσης, τις συνθήκες λειτουργίας και την αποδοτικότητά τους, σύμφωνα με τους El-Gawad και συνεργάτες (El-Gawad et al., 2023).

Η χημική οξείδωση αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες για την αποδόμηση των πετρελαϊκών υδρογονανθράκων και εφαρμόζεται κυρίως σε πετρελαιοειδείς λάσπες με υψηλό οργανικό φορτίο. Η διεργασία βασίζεται στη χρήση ισχυρών οξειδωτικών αντιδραστηρίων, όπως το υπεροξείδιο του υδρογόνου, το αντιδραστήριο Fenton, το υπερμαγγανικό κάλιο και το όζον, τα οποία αντιδρούν με τις οργανικές ενώσεις και προκαλούν τη διάσπασή τους σε απλούστερα προϊόντα. Ιδιαίτερα αποτελεσματική θεωρείται η διεργασία Fenton, κατά την οποία το υπεροξείδιο του υδρογόνου αντιδρά παρουσία ιόντων σιδήρου (Fe^{2+}), παράγοντας ρίζες υδροξυλίου (OH) με εξαιρετικά υψηλό οξειδωτικό δυναμικό. Οι ρίζες αυτές αντιδρούν μη εκλεκτικά με τις οργανικές ενώσεις, οδηγώντας στην αποικοδόμηση τόσο των αλειφατικών όσο και των αρωματικών υδρογονανθράκων. Σύμφωνα με τους El-Gawad και συνεργάτες (El-Gawad et al., 2023), η μέθοδος παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή αποτελεσματικότητα για ελαφρύτερα πετρελαϊκά κλάσματα, ενώ το υπερμαγγανικό κάλιο εμφανίζει καλύτερη απόδοση σε υδρογονάνθρακες μεγαλύτερου μοριακού βάρους.

Μία ακόμη σημαντική τεχνολογία αποτελεί η υγρή οξείδωση με αέρα (Wet Air Oxidation – WAO), η οποία εφαρμόζεται κυρίως σε απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση οργανικών ενώσεων και υψηλή υγρασία. Κατά τη διεργασία αυτή, η οξείδωση πραγματοποιείται σε υδατικό περιβάλλον παρουσία μοριακού οξυγόνου ή συμπιεσμένου αέρα υπό αυξημένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Οι σύνθετοι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες μετατρέπονται αρχικά σε οργανικά ενδιάμεσα προϊόντα και στη συνέχεια σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η καταλυτική υγρή οξείδωση αποτελεί εξέλιξη της συμβατικής WAO, καθώς η χρήση μεταλλικών καταλυτών επιταχύνει τις αντιδράσεις οξείδωσης και επιτρέπει την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων ακόμη και σε ηπιότερες συνθήκες λειτουργίας. Σύμφωνα με τους El-Gawad και συνεργάτες (El-Gawad et al., 2023) οι εφαρμογές καταλυτικής υγρής οξείδωσης έχουν επιτύχει απομάκρυνση πετρελαϊκών συστατικών έως περίπου 90–93%, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του συνολικού όγκου της πετρελαιοειδούς λάσπης.

Η υπερκρίσιμη οξείδωση σε νερό (Supercritical Water Oxidation – SCWO) αποτελεί μία από τις πλέον προηγμένες τεχνολογίες οξείδωσης. Η διεργασία πραγματοποιείται σε συνθήκες όπου το νερό βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση (θερμοκρασία άνω των 374 °C και πίεση μεγαλύτερη από 22,1 MPa), επιτρέποντας την πλήρη ανάμιξη των οργανικών ενώσεων με το οξειδωτικό μέσο και την ταχεία οξείδωσή τους. Σύμφωνα με τους El-Gawad και συνεργάτες (El-Gawad et al., 2023), η απομάκρυνση των οργανικών ρύπων μπορεί να υπερβαίνει το 90%, όμως η εφαρμογή της απαιτεί ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.

Η αποτελεσματικότητα των οξειδωτικών διεργασιών επηρεάζεται από λειτουργικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, το pH, το είδος και η συγκέντρωση του οξειδωτικού μέσου, τον χρόνο παραμονής, την περιεκτικότητα της πετρελαιοειδούς λάσπης σε υδρογονάνθρακες, την υγρασία, την περιεκτικότητα σε στερεά και την παρουσία καταλυτών. Σύμφωνα με τους El-Gawad και συνεργάτες (El-Gawad et al., 2023), η βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτών αυξάνει σημαντικά τον βαθμό αποδόμησης των οργανικών ενώσεων και μειώνει την κατανάλωση χημικών αντιδραστηρίων και ενέργειας.

Οι οξειδωτικές μέθοδοι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς επιτυγχάνουν υψηλή απομάκρυνση οργανικών ρύπων, σημαντική μείωση της τοξικότητας και του οργανικού φορτίου, τον περιορισμό του όγκου της πετρελαιοειδούς λάσπης και την δυνατότητα επεξεργασίας αποβλήτων με υψηλή περιεκτικότητα σε πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες. Επιπλέον, μπορούν να συνδυαστούν με φυσικές ή θερμικές τεχνολογίες, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση της επεξεργασίας. Ωστόσο, σύμφωνα με τους El-Gawad και συνεργάτες (El-Gawad et al., 2023), παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως η υψηλή κατανάλωση χημικών αντιδραστηρίων, οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις, ιδιαίτερα στις διεργασίες WAO και SCWO, η ανάγκη χρήσης εξειδικευμένου εξοπλισμού ανθεκτικού σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, καθώς και η πιθανότητα σχηματισμού δευτερογενών παραπροϊόντων όταν οι συνθήκες λειτουργίας δεν είναι κατάλληλα ελεγχόμενες.

Ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, τη συγκέντρωση των οργανικών ρύπων και τις συνθήκες λειτουργίας. Οι διεργασίες Fenton και συμβατικής χημικής οξείδωσης ολοκληρώνονται συνήθως σε 15–60 λεπτά, ενώ οι διεργασίες WAO και SCWO απαιτούν χρόνους παραμονής περίπου 30 λεπτών έως 3 ωρών, σύμφωνα με τους El-Gawad και συνεργάτες (El-Gawad et al., 2023).

Σύμφωνα με διαθέσιμα βιβλιογραφικά δεδομένα, το λειτουργικό κόστος των οξειδωτικών μεθόδων εξαρτάται κυρίως από την κατανάλωση οξειδωτικών αντιδραστηρίων, τις ενεργειακές απαιτήσεις και τον απαιτούμενο εξοπλισμό. Για τις συμβατικές διεργασίες χημικής οξείδωσης

και Fenton εκτιμάται γενικά μεταξύ 50 και 300 €/t επεξεργασμένης πετρελαιοειδούς λάσπης, ενώ η υγρή οξείδωση με αέρα παρουσιάζει υψηλότερο κόστος λόγω λειτουργίας σε αυξημένες θερμοκρασίες και πιέσεις. Η υπερκρίσιμη οξείδωση σε νερό αποτελεί την πλέον δαπανηρή τεχνολογία της κατηγορίας, καθώς απαιτεί εξοπλισμό υψηλής πίεσης, ειδικά υλικά κατασκευής και ιδιαίτερα υψηλή ενεργειακή κατανάλωση. Παρά το αυξημένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, οι μέθοδοι οξείδωσης αποτελούν ιδιαίτερα αποτελεσματικές τεχνολογίες για την αποδόμηση των οργανικών ρύπων και τη σημαντική μείωση της επικινδυνότητας των πετρελαιοειδών λασπών, όταν κύριος στόχος είναι η μέγιστη απορρύπανση και η ασφαλής τελική διάθεση των αποβλήτων, σύμφωνα με τους El-Gawad και συνεργάτες (El-Gawad et al., 2023).

3.1.3 Σταθεροποίηση/στερεοποίηση πετρελαϊκών αποβλήτων

Η σταθεροποίηση/στερεοποίηση (Stabilization/Solidification) αποτελεί μία χημική και φυσικοχημική τεχνική επεξεργασίας, η οποία εφαρμόζεται για τη μείωση της κινητικότητας των ρύπων και την ασφαλή διαχείριση πετρελαϊκών αποβλήτων, όπως ελαιώδεις ιλύες από δεξαμενές αποθήκευσης, κατάλοιπα διυλιστηρίων και άλλα πετρελαϊκά παραπροϊόντα. Η μέθοδος δεν αποσκοπεί στην καταστροφή των οργανικών ρύπων, αλλά στη μετατροπή τους σε λιγότερο διαλυτές και λιγότερο κινητικές μορφές μέσω χημικής δέσμευσης και φυσικού εγκλωβισμού στη στερεή μήτρα σύμφωνα με τους Cao και συνεργάτες (Cao et al., 2022).

Η βασική αρχή λειτουργίας της διεργασίας στηρίζεται στην ανάμιξη του πετρελαϊκού αποβλήτου με κατάλληλους συνδετικούς και σταθεροποιητικούς παράγοντες σε συγκεκριμένες αναλογίες. Κατά την προσθήκη των υλικών αυτών πραγματοποιούνται αντιδράσεις ενυδάτωσης, καθίζησης, προσρόφησης και χημικής δέσμευσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας συμπαγούς στερεής δομής που εγκλωβίζει τους ρύπους και περιορίζει τη μεταφορά τους προς το περιβάλλον. Παράλληλα, η σταθεροποίηση μειώνει τη διαλυτότητα και την εκπλυσιμότητα κυρίως των ανόργανων ρύπων, όπως τα βαρέα μέταλλα, ενώ η στερεοποίηση βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού υλικού σύμφωνα με τους Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2020). Οι χρησιμοποιούμενοι παράγοντες στερεοποίησης μπορούν να διακριθούν σε ανόργανους και οργανικούς. Οι ανόργανοι συνδετικοί παράγοντες χρησιμοποιούνται συχνότερα λόγω του χαμηλότερου κόστους και της ευρείας διαθεσιμότητάς τους και περιλαμβάνουν κυρίως τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, ασβέστη, γύψο και πυριτικά υλικά. Οι οργανικοί παράγοντες, όπως εποξειδικές ρητίνες και ρητίνες ουρίας, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτείται αυξημένη ικανότητα εγκλωβισμού οργανικών ρύπων όπως αναφέρουν οι Cao και συνεργάτες (Cao et al., 2022).

Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας επηρεάζεται από σημαντικούς λειτουργικούς παράγοντες, όπως η χημική σύσταση του αποβλήτου, η περιεκτικότητα σε πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες, το είδος και η αναλογία του συνδετικού υλικού, η τιμή του pH, η περιεκτικότητα σε υγρασία, ο χρόνος ανάμιξης και οι συνθήκες ωρίμανσης του στερεοποιημένου υλικού. Το pH αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους, καθώς επηρεάζει τη διαλυτότητα των μετάλλων και την ικανότητα δέσμευσής τους στη στερεή μήτρα. Σε αλκαλικό περιβάλλον, η ακινητοποίηση πολλών μετάλλων ενισχύεται λόγω σχηματισμού δυσδιάλυτων υδροξειδίων και άλλων σταθερών ενώσεων. Έχει αναφερθεί ότι σε τιμές pH μεγαλύτερες από 7 η αποτελεσματικότητα ακινητοποίησης μετάλλων σε στερεοποιημένη ελαιώδη ιλύ μπορεί να υπερβαίνει το 93%, ενώ σε περισσότερο αλκαλικές συνθήκες η συγκράτηση ορισμένων μετάλλων, όπως το νικέλιο, μπορεί να ξεπεράσει το 98% σύμφωνα με τους Cao και συνεργάτες (Cao et al., 2022). Ο χρόνος παραμονής της διεργασίας περιλαμβάνει τόσο το στάδιο ανάμιξης όσο και το στάδιο ωρίμανσης του στερεοποιημένου υλικού. Η ανάμιξη των αποβλήτων με τα συνδετικά υλικά πραγματοποιείται συνήθως σε χρονικό διάστημα από 10 έως 60 λεπτά, ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή των αντιδραστηρίων. Στη συνέχεια απαιτείται περίοδος ωρίμανσης, η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 7 έως 28 ημέρες, προκειμένου να ολοκληρωθούν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης και να αποκτήσει το υλικό την απαιτούμενη μηχανική αντοχή και σταθερότητα. Ο χρόνος ωρίμανσης εξαρτάται από τον τύπο του συνδετικού υλικού, την αναλογία νερού/στερεών και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η απόδοση της τεχνολογίας έχει αξιολογηθεί σε πετρελαϊκές ιλύς με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικούς ρύπους. Σε σχετικές εφαρμογές έχει αναφερθεί ότι ελαιώδεις ιλύες με αρχική περιεκτικότητα σε πετρέλαιο περίπου 20–80% μπορούν να υποβληθούν αποτελεσματικά σε διεργασία στερεοποίησης, ενώ οι συγκεντρώσεις πετρελαϊκών οι συγκεντρώσεις των εκχυλιζόμενων συστατικών στα εκπλύματα του τελικού υλικού μπορούν να μειωθούν σε επίπεδα περίπου 2–5 mg/L σύμφωνα με τους Zhang και συνεργάτες (Zhang et al., 2018). Επιπλέον, η χρήση συνδυασμών τσιμέντου, ιπτάμενης τέφρας και φωσφογύψου έχει οδηγήσει στην παραγωγή στερεοποιημένων υλικών με ικανοποιητική μηχανική αντοχή, αντοχή στην έκπλυση και σταθερότητα σε κύκλους ψύξης–απόψυξης όπως αναφέρουν οι Cao και συνεργάτες (Cao et al., 2022).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της σταθεροποίησης/στερεοποίησης είναι η δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλων ποσοτήτων πετρελαϊκών αποβλήτων με σχετικά απλό εξοπλισμό και χωρίς απαίτηση πολύπλοκων θερμικών εγκαταστάσεων. Επιπλέον, η μέθοδος μειώνει σημαντικά την κινητικότητα των ρύπων, περιορίζει τον κίνδυνο έκπλυσης και μπορεί να μετατρέψει ένα επικίνδυνο απόβλητο σε σταθερό υλικό κατάλληλο για ασφαλή διάθεση ή, σε ορισμένες

περιπτώσεις, για επαναχρησιμοποίηση σε τεχνικές εφαρμογές, όπως υλικά οδοστρώσας. Παράλληλα, η χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων, όπως η ιπτάμενη τέφρα, μπορεί να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διεργασίας.

Όπως αναφέρουν οι Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2020), η τεχνολογία παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Το σημαντικότερο μειονέκτημα είναι ότι οι οργανικοί ρύποι δεν καταστρέφονται, αλλά απλώς ακινητοποιούνται στη στερεή μήτρα, γεγονός που απαιτεί μακροχρόνια παρακολούθηση της σταθερότητας του υλικού. Επιπλέον, η προσθήκη μεγάλων ποσοτήτων συνδετικών υλικών αυξάνει τον συνολικό όγκο του τελικού προϊόντος, γεγονός που μπορεί να αυξήσει τις απαιτήσεις μεταφοράς και διάθεσης. Η απόδοση της διεργασίας μπορεί επίσης να μειωθεί σε απόβλητα με πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε πετρέλαιο, καθώς οι υδρογονάνθρακες μπορούν να παρεμποδίσουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης και τη δημιουργία ισχυρής στερεής δομής.

Το λειτουργικό κόστος της σταθεροποίησης/στερεοποίησης εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα και το είδος των χρησιμοποιούμενων συνδετικών υλικών, το κόστος ανάμιξης, την κατανάλωση ενέργειας και τις απαιτήσεις τελικής διάθεσης. Σε γενικές εφαρμογές με χρήση τσιμέντου και ανόργανων υλικών, το κόστος επεξεργασίας εκτιμάται περίπου στην περιοχή των 50–150 € ανά τόνο επεξεργασμένου αποβλήτου, ανάλογα με τη σύσταση της ιλύος και την απαιτούμενη ποσότητα πρόσθετων υλικών. Η χρήση ακριβότερων οργανικών ρητινών μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος, ενώ αντίθετα η αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, όπως η ιπτάμενη τέφρα, μπορεί να μειώσει το συνολικό οικονομικό φορτίο.

Σύμφωνα με τους Cao και συνεργάτες (Cao et al., 2022), η σταθεροποίηση/στερεοποίηση αποτελεί μία αποτελεσματική φυσικοχημική τεχνολογία για τη διαχείριση πετρελαϊκών αποβλήτων, καθώς επιτυγχάνει σημαντική μείωση της κινητικότητας των ρύπων, βελτίωση των χαρακτηριστικών του υλικού και ασφαλέστερη τελική διαχείριση. Παρότι δεν οδηγεί σε πλήρη απομάκρυνση ή καταστροφή των υδρογονανθράκων, αποτελεί μία πρακτική λύση για απόβλητα όπου απαιτείται σταθεροποίηση και περιορισμός της περιβαλλοντικής επικινδυνότητας.

3.1.4 Ηλεκτροχημική Επεξεργασία Πετρελαϊκών Καταλοίπων

Η ηλεκτροχημική επεξεργασία αποτελεί μία σύγχρονη χημική τεχνολογία επεξεργασίας πετρελαϊκών καταλοίπων, η οποία αξιοποιεί την εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος για την αποσταθεροποίηση γαλακτωμάτων, την ανάκτηση υδρογονανθράκων και την απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων. Η μέθοδος βασίζεται στην ανάπτυξη ηλεκτροχημικών αντιδράσεων στα ηλεκτρόδια και στη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του αποβλήτου, το οποίο προκαλεί μετακίνηση φορτισμένων σωματιδίων και σταγονιδίων μέσω

φυσικοχημικών μηχανισμών. Για τον λόγο αυτό κατατάσσεται στις προηγμένες χημικές τεχνολογίες επεξεργασίας και εφαρμόζεται ολοένα συχνότερα ως στάδιο προεπεξεργασίας ή σε συνδυασμό με μηχανικές και βιολογικές διεργασίες σύμφωνα με τους Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2022).

Η αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας βασίζεται στην εφαρμογή συνεχούς ρεύματος χαμηλής έντασης μεταξύ δύο ή περισσότερων ηλεκτροδίων, τα οποία τοποθετούνται μέσα στον ηλεκτροχημικό αντιδραστήρα. Κατά τη λειτουργία της διεργασίας πραγματοποιούνται ταυτόχρονα φαινόμενα ηλεκτρόλυσης, ηλεκτροόσμωσης, διάχυσης και ηλεκτρομετανάστευσης, τα οποία συμβάλλουν στον διαχωρισμό της τριφασικής μίξης πετρελαίου–νερού–στερεών. Παράλληλα, στην περίπτωση χρήσης ηλεκτροδίων σιδήρου ή αλουμινίου, παράγονται μεταλλικά ιόντα που οδηγούν σε ηλεκτροκροκιδωτική δράση, σχηματίζοντας υδροξείδια μετάλλων τα οποία προσροφούν κολλοειδή σωματίδια, οργανικές ενώσεις και αιωρούμενα στερεά, διευκολύνοντας τον διαχωρισμό των φάσεων όπως αναφέρουν οι Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2022).

Η αποδοτικότητα της διεργασίας επηρεάζεται από πληθώρα λειτουργικών παραμέτρων. Ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες είναι το υλικό και η γεωμετρία των ηλεκτροδίων, η εφαρμοζόμενη ένταση ρεύματος ή η βαθμίδα δυναμικού, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αποβλήτου, η τιμή του pH, η θερμοκρασία λειτουργίας, η περιεκτικότητα σε στερεά καθώς και η χρήση κατάλληλων ηλεκτρολυτών ή ανόργανων αλάτων. Η αύξηση της αγωγιμότητας μειώνει την απαιτούμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η προσθήκη ηλεκτρολυτών, όπως χλωριούχου νατρίου, ή διαλύματος χλωριούχου σιδήρου (FeCl_3), μπορεί να ενισχύσει την ηλεκτροκροκιδωτική δράση και να βελτιώσει σημαντικά την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και τη σημαντική μείωση της θολότητας της υδατικής φάσης. Αντίστοιχα, η επιλογή κατάλληλης βαθμίδας δυναμικού επιδρά άμεσα στον ρυθμό απογαλακτωμάτων και στην απόδοση ανάκτησης πετρελαίου σύμφωνα με τους Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2022).

Στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές εφαρμόζονται βαθμίδες δυναμικού της τάξης του 0,5–3 V/cm, ενώ η πυκνότητα ρεύματος κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 10 και 60 mA/cm², ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της πετρελαϊκής ιλύος. Ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής κυμαίνεται συνήθως από 20 έως 90 λεπτά, διάστημα κατά το οποίο ολοκληρώνονται οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και επιτυγχάνεται ο αποτελεσματικός διαχωρισμός των φάσεων. Υπό βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, η ανάκτηση υδρογονανθράκων μπορεί να υπερβεί το 90%, ενώ η θολερότητα της υδατικής φάσης και η συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών μειώνονται σημαντικά. Παράλληλα, η τεχνολογία παρουσιάζει υψηλή αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), βαρέων μετάλλων και άλλων οργανικών ρύπων,

συμβάλλοντας στη μείωση της συνολικής επικινδυνότητας των αποβλήτων όπως αναφέρουν οι Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2022).

Σημαντικό πλεονέκτημα της ηλεκτροχημικής επεξεργασίας αποτελεί η περιορισμένη χρήση χημικών αντιδραστηρίων, η δυνατότητα υψηλού βαθμού αυτοματοποίησης, ο μικρός απαιτούμενος χώρος εγκατάστασης και η ταχεία ολοκλήρωση της επεξεργασίας. Επιπλέον, η μέθοδος παράγει μικρότερες ποσότητες δευτερογενούς ιλύος συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνικές χημικής κροκίδωσης, ενώ μπορεί να συνδυαστεί αποτελεσματικά με φυγοκέντρωση, φιλτράνση, θερμική εκρόφηση ή βιολογικές διεργασίες, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση της εγκατάστασης. Τα τελευταία χρόνια διερευνάται επίσης ο συνδυασμός της ηλεκτροχημείας με μικροβιακές τεχνολογίες, όπου η εφαρμογή ηλεκτρικών πεδίων ευνοεί τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών και διεγείρει τη μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών, οδηγώντας σε αυξημένους ρυθμούς βιοαποδόμησης των πετρελαϊκών υδρογονανθράκων σύμφωνα με τους Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2022).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά της, η τεχνολογία παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αυξηθεί σημαντικά σε απόβλητα χαμηλής αγωγιμότητας, ενώ παρατηρείται σταδιακή φθορά των ηλεκτροδίων, γεγονός που απαιτεί περιοδική αντικατάσταση ή καθαρισμό τους. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα της διεργασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση της πετρελαϊκής ιλύος, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας για κάθε εφαρμογή. Ωστόσο, η υψηλή απόδοση ανάκτησης πετρελαίου, η σημαντική απομάκρυνση οργανικών ρύπων και η δυνατότητα ενσωμάτωσης σε ολοκληρωμένα συστήματα επεξεργασίας καθιστούν την ηλεκτροχημική επεξεργασία μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες διαχείρισης πετρελαϊκών καταλοίπων όπως αναφέρουν οι Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2022).

Η ηλεκτροχημική επεξεργασία απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό, ο οποίος περιλαμβάνει ηλεκτροχημικό αντιδραστήρα, ηλεκτρόδια, τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος, δεξαμενές ανάμιξης, αντλίες και σύστημα αυτοματισμού. Για μονάδες μικρής έως μεσαίας δυναμικότητας, το συνολικό κόστος εγκατάστασης κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 80.000 και 300.000 €, ανάλογα με τη δυναμικότητα της εγκατάστασης, το υλικό των ηλεκτροδίων και τον βαθμό αυτοματοποίησης. Το λειτουργικό κόστος ανέρχεται περίπου σε 5–20 €/m³ αποβλήτου και περιλαμβάνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, τη συντήρηση ή αντικατάσταση των ηλεκτροδίων, τη χρήση βοηθητικών χημικών όπου απαιτείται, καθώς και τη συντήρηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Παρότι η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί σημαντικό μέρος του λειτουργικού κόστους, η υψηλή απόδοση ανάκτησης υδρογονανθράκων και η μείωση του όγκου των αποβλήτων αντισταθμίζουν σε μεγάλο βαθμό το συνολικό κόστος επεξεργασίας, καθιστώντας τη

μέθοδο τεχνικά και οικονομικά ανταγωνιστική σύμφωνα με τους Chen και συνεργάτες (Chen et al., 2022).

4. Θερμικές / Ενεργειακές Μέθοδοι

Οι θερμικές τεχνολογίες παρουσιάζουν το σημαντικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να επεξεργαστούν ακόμη και ιδιαίτερα πολύπλοκα και έντονα ρυπασμένα κατάλοιπα, στα οποία οι μηχανικές και χημικές μέθοδοι εμφανίζουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα. Η υψηλή περιεκτικότητα των πετρελαιοειδών λασπών σε υδρογονάνθρακες μεγάλου μοριακού βάρους, ασφαλτένια, ρητίνες, παραφίνες και σταθεροποιημένα γαλακτώματα δυσχεραίνει συχνά τον διαχωρισμό των φάσεων με συμβατικές τεχνολογίες. Αντίθετα, η εφαρμογή θερμικής επεξεργασίας επιτρέπει την αποδόμηση ή απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων ανεξάρτητα από τη μορφή με την οποία αυτοί βρίσκονται μέσα στη στερεή μήτρα. Για τον λόγο αυτό, οι θερμικές μέθοδοι θεωρούνται συχνά τεχνολογίες τελικής επεξεργασίας, καθώς μπορούν να παράγουν στερεά υπολείμματα με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε ολικούς πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες και σημαντικά μειωμένη περιβαλλοντική επικινδυνότητα σύμφωνα με τους Duan και συνεργάτες (Duan et al., 2023).

Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για την ενεργειακή αξιοποίηση των καταλοίπων πετρελαιοειδών μέσω θερμοχημικών διεργασιών. Τεχνολογίες όπως η πυρόλυση και η θερμική εκρόφηση δεν στοχεύουν μόνο στην περιβαλλοντική αποκατάσταση αλλά και στην ανάκτηση ενέργειας ή δευτερογενών καυσίμων, συμβάλλοντας στις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων. Ωστόσο, οι υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια, το αυξημένο κόστος επένδυσης και η ανάγκη για σύνθετα συστήματα ελέγχου εκπομπών περιορίζουν συχνά τη βιομηχανική εφαρμογή ορισμένων από αυτές τις τεχνολογίες.

4.1 Σύστημα Θερμικής Εκρόφησης

Η διεργασία εντάσσεται σε ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης πετρελαιοειδών αποβλήτων ως τελικό στάδιο απορρύπανσης στερεών ρευμάτων υψηλού ρυπαντικού φορτίου. Σε προηγμένες βιομηχανικές διατάξεις, η θερμική εκρόφηση δεν λειτουργεί απομονωμένα αλλά ως μέρος μιας ολοκληρωμένης αλυσίδας επεξεργασίας, όπου προηγούνται στάδια φυσικομηχανικού διαχωρισμού και ακολουθεί η θερμική απομάκρυνση των υπολειμματικών υδρογονανθράκων. Σύμφωνα με τους Xu και συνεργάτες (Xu et al., 2021) η συνδυαστική εφαρμογή προεπεξεργασίας και η θερμική εκρόφηση αυξάνει σημαντικά την απόδοση απομάκρυνσης ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων, επιτρέποντας την παραγωγή στερεού

υπολείμματος με χαρακτηριστικά κατάλληλα για περαιτέρω αξιοποίηση ή ασφαλή διάθεση. Σε τυπικές βιομηχανικές εφαρμογές επεξεργασίας καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών, το στερεό υπόλειμμα που προκύπτει από μηχανικά στάδια διαχωρισμού οδηγείται στην θερμική εκρόφηση για την απομάκρυνση των προσροφημένων και εγκλωβισμένων υδρογονανθράκων. Κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας, οι οργανικές ενώσεις μεταφέρονται στην αέρια φάση και στη συνέχεια οδηγούνται σε σύστημα επεξεργασίας απαερίων, όπου επιτυγχάνεται συμπύκνωση των υδρογονανθράκων και ο διαχωρισμός τους από την υδατική φάση. Όπως αναφέρεται από τον Li και τους συνεργάτες του (Li et al., 2024), η αποτελεσματική διαχείριση των παραγόμενων αερίων ρευμάτων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη συνολική περιβαλλοντική απόδοση της μονάδας, καθώς καθορίζει το επίπεδο εκπομπών πτητικών οργανικών ενώσεων και τη δυνατότητα ανάκτησης αξιοποιήσιμων προϊόντων. Η θερμική εκρόφηση παρουσιάζει επίσης σημαντική ενεργειακή και περιβαλλοντική βελτιστοποίηση όταν συνδυάζεται με συστήματα ανάκτησης θερμότητας και αξιοποίησης των παραγόμενων αερίων ως δευτερεύον καύσιμο. Σε πολλές εφαρμογές, μέρος των μη συμπυκνώσιμων αερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη της θερμικής λειτουργίας της μονάδας, μειώνοντας έτσι την εξωτερική ενεργειακή απαίτηση. Σύμφωνα με τους Hasan και συνεργάτες (Hasan et al., 2024), η βελτιστοποίηση των θερμοδυναμικών συνθηκών λειτουργίας (θερμοκρασία, χρόνος παραμονής και ρυθμός ροής αερίων) μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αποδοτικότητα απομάκρυνσης υδρογονανθράκων, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει τη δημιουργία δευτερογενών ρευμάτων αποβλήτων. Σε ολοκληρωμένα συστήματα επεξεργασίας πετρελαιοειδών καταλοίπων, η θερμική εκρόφηση λειτουργεί συμπληρωματικά με μηχανικές διεργασίες προεπεξεργασίας, επιτυγχάνοντας σταδιακή μείωση της ρυπαντικής φόρτισης. Το τελικό στερεό προϊόν χαρακτηρίζεται από σημαντικά μειωμένη περιεκτικότητα σε ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH), γεγονός που επιτρέπει τη διαχείρισή του ως αδρανές υλικό ή την αξιοποίησή του σε εφαρμογές αποκατάστασης εδαφών, σύμφωνα με τα ισχύοντα περιβαλλοντικά όρια. Όπως αναφέρεται από τον Hasan και τους συνεργάτες του (Hasan, et al., 2024), η θερμική εκρόφηση αποτελεί μία από τις πλέον αξιόπιστες τεχνολογίες για την επίτευξη υψηλών ποσοστών απορρύπανσης (>95–99%), ιδιαίτερα σε σύνθετα πετρελαιοειδή απόβλητα με υψηλή περιεκτικότητα σε βαρέα κλάσματα. Συνολικά, η θερμική εκρόφηση υπό κενό και ελεγχόμενες συνθήκες αδρανούς ατμόσφαιρας αποτελεί μία ώριμη τεχνολογία περιβαλλοντικής αποκατάστασης, η οποία συνδυάζει υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων, δυνατότητα ανάκτησης υδρογονανθράκων και σημαντική μείωση του τελικού όγκου αποβλήτων. Η εφαρμογή της σε συνδυασμό με κατάλληλα στάδια προεπεξεργασίας και επεξεργασίας απαερίων οδηγεί σε συστήματα ολοκληρωμένης διαχείρισης με υψηλό βαθμό

περιβαλλοντικής συμμόρφωσης και λειτουργικής αποδοτικότητας όπως αναφέρουν ο Li και οι συνεργάτες του (Li et al., 2024).

Η θερμική εκρόφηση αποτελεί μία από τις πλέον αποτελεσματικές τεχνολογίες επεξεργασίας πετρελαϊκών καταλοίπων, καθώς βασίζεται στη θέρμανση του υλικού σε ελεγχόμενες θερμοκρασίες με σκοπό την εξάτμιση και τον διαχωρισμό των υδρογονανθράκων και άλλων πτητικών συστατικών από τη στερεή φάση. Η εφαρμογή περιστροφικών συστημάτων θερμικής εκρόφησης επιτρέπει την αποτελεσματική απομάκρυνση των οργανικών ρύπων από τα πετρελαϊκά ιζήματα, ενώ παράλληλα συμβάλλει στην ανάκτηση σημαντικών ποσοτήτων πετρελαϊκών κλασμάτων που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει υψηλή απόδοση επεξεργασίας και θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για κατάλοιπα με υψηλή περιεκτικότητα σε έλαια και υδρογονάνθρακες μεγάλου μοριακού βάρους. Η βελτιστοποίηση των λειτουργικών παραμέτρων μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση της διεργασίας. Η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας για την προθέρμανση του εισερχόμενου υλικού ή άλλων σταδίων της εγκατάστασης αυξάνει τη συνολική ενεργειακή απόδοση και μειώνει το λειτουργικό κόστος. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη βιωσιμότητα της θερμικής εκρόφησης ως μεθόδου διαχείρισης καταλοίπων δεξαμενών πετρελαιοειδών, καθώς συνδυάζει την αποτελεσματική απορρύπανση με την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της επεξεργασίας. Η θερμική εκρόφηση αποτελεί καθιερωμένη τεχνολογία επεξεργασίας ρυπασμένων στερεών υλικών, όπως εδάφη, ιλύες, ιζήματα και πετρελαιοειδείς λάσπες, με στόχο την αποτελεσματική απομάκρυνση πτητικών και ημι-πτητικών οργανικών ρύπων μέσω ελεγχόμενης θέρμανσης όπως αναφέρουν ο Li και οι συνεργάτες του (Li et al., 2024). Η διεργασία βασίζεται στη μεταφορά μάζας των ρυπαντών από τη στερεά στην αέρια φάση, χωρίς απαραίτητα να πραγματοποιείται οξείδωση ή καύση του υποστρώματος, γεγονός που τη διαφοροποιεί θεμελιωδώς από τις θερμικές διεργασίες καταστροφής σύμφωνα και με τους Khan και συνεργάτες (Khan et al., 2021). Η τεχνολογία εφαρμόζεται εκτεταμένα σε πετρελαιοειδείς λάσπες από καθαρισμούς δεξαμενών, απόβλητα διυλιστηρίων, ρυπασμένα εδάφη με υδρογονάνθρακες, καθώς και ιλύες που περιέχουν BTEX, PAHs και άλλες πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs/SVOCs). Η βασική αρχή λειτουργίας της διεργασίας στηρίζεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού, η οποία οδηγεί σε μείωση της προσρόφησης των οργανικών ενώσεων στη στερεά μήτρα και ταυτόχρονη αύξηση της τάσης ατμών τους, επιτρέποντας την απομάκρυνσή τους μέσω ροής αερίων. Η θερμική εκρόφηση διακρίνεται σε χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας λειτουργία, με εύρος περίπου 100–400°C, ανάλογα με τη φύση των ρύπων και τη θερμική σταθερότητα του υλικού. Η απόδοση απομάκρυνσης ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) υπερβαίνει συχνά το 90–

99% , καθιστώντας τη διεργασία ιδιαίτερα αποτελεσματική για την παραγωγή απορρυπασμένων στερεών υπολειμμάτων.

Η διεργασία βασίζεται σε διαδοχικά στάδια φυσικοχημικών φαινομένων: θέρμανση του στερεού, αποδυνάμωση δυνάμεων προσρόφησης, αύξηση της μερικής πίεσης των οργανικών ενώσεων, και μεταφορά μάζας προς την αέρια φάση. Η διαδικασία δεν στοχεύει στη χημική καταστροφή των ρύπων αλλά στην απομάκρυνσή τους μέσω εξάτμισης και εκρόφησης, γεγονός που επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων υδρογονανθράκων σε συμπυκνωμένη μορφή. Το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 100–400°C, με χρόνο παραμονής 4-6 ώρες υπό συνθήκες ελαφράς υποπίεσης. Η απόδοση επηρεάζεται από τη σύσταση του υλικού, την κοκκομετρία, την υγρασία και την αρχική συγκέντρωση ρύπων σύμφωνα με τις αναφορές των Murungi και συνεργατών (Murungi et al., 2022).

4.1.1 Πυρόλυση

Η πυρόλυση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες θερμοχημικές διεργασίες αξιοποίησης της ελαιώδους λάσπης, καθώς επιτυγχάνει ταυτόχρονα τη μείωση του όγκου των αποβλήτων και την ανάκτηση προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας. Η διεργασία βασίζεται στη θερμική αποσύνθεση των οργανικών συστατικών της ελαιώδους λάσπης σε περιβάλλον απουσίας οξυγόνου ή παρουσία αδρανούς αερίου, συνήθως αζώτου, σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 200 έως και 1000 °C σύμφωνα με τους Wang και συνεργάτες (Wang et al., 2022). Κατά την πυρόλυση παράγονται τρία βασικά κλάσματα: το υγρό προϊόν (πυρολυτικό έλαιο), το αέριο προϊόν και το στερεό ανθρακούχο υπόλειμμα (πυρολυτικός άνθρακας ή biochar), τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν ενεργειακά ή ως πρώτες ύλες σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές όπως αναφέρουν ο Motevali και οι συνεργάτες του (Motevali et al., 2022).

Η απόδοση και η σύσταση των προϊόντων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λειτουργίας της διεργασίας, με κυριότερο παράγοντα τη θερμοκρασία. Έρευνες έχουν δείξει ότι σε αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης και σε θερμοκρασίες μεταξύ 460 και 650 °C μπορεί να επιτευχθεί μετασχηματισμός του 70–84% των πετρελαϊκών συστατικών που περιέχονται στην ελαιώδη λάσπη σε προϊόντα πυρόλυσης. Αντίστοιχα, οι Hasan και συνεργάτες (Hasan et al., 2024) διαπίστωσαν ότι η λειτουργία στους 400 °C για περίπου 20 λεπτά οδηγεί στην παραγωγή πυρολυτικού ελαίου υψηλής ποιότητας με σχετικά χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Επιπλέον, σύμφωνα με τη μελέτη των Motevali και συνεργατών (Motevali et al., 2022), η θερμοκρασιακή περιοχή μεταξύ 200 και 500 °C θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματική για την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων της ελαιώδους λάσπης. Οι Hasan και οι συνεργάτες του (Hasan et al., 2024) κατέληξαν ότι η βέλτιστη θερμοκρασία πυρόλυσης είναι περίπου 500 °C, καθώς

στις συνθήκες αυτές παράγεται έλαιο με θερμογόνο δύναμη περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερη από εκείνη της αρχικής ελαιώδους λάσπης. Η χημική του σύσταση προσομοιάζει εκείνη του πετρελαίου ντίζελ, γεγονός που επιτρέπει την ανάμειξή του με συμβατικά καύσιμα ή την περαιτέρω διύλισή του για την παραγωγή άλλων πετρελαϊκών προϊόντων.

Η σύσταση του παραγόμενου αέριου κλάσματος μεταβάλλεται επίσης ανάλογα με τη θερμοκρασία της διεργασίας. Τα κυριότερα συστατικά του είναι το υδρογόνο (H_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4) και άλλοι ελαφροί υδρογονάνθρακες. Σύμφωνα με τους Motevali και συνεργάτες (Motevali et al., 2022), η παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνεται σημαντικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες, με μέγιστη συγκέντρωση περίπου στους $577\text{ }^{\circ}C$. Το αέριο αυτό διαθέτει σημαντική θερμογόνο αξία και μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών απαιτήσεων της ίδιας της μονάδας πυρόλυσης, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της διεργασίας. Ωστόσο, πριν από την ενεργειακή του αξιοποίηση είναι συχνά απαραίτητος ο καθαρισμός του, καθώς ενδέχεται να περιέχει ενώσεις θείου και άλλων διαβρωτικών ή επιβλαβών συστατικών, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στον εξοπλισμό και να αυξήσουν τις ατμοσφαιρικές εκπομπές όπως αναφέρουν ο Hasan και οι συνεργάτες του (Hasan et al., 2024).

Στη βιομηχανική εφαρμογή της τεχνολογίας χρησιμοποιούνται κυρίως αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης, οι οποίοι προσφέρουν υψηλή απόδοση μεταφοράς θερμότητας και ομοιόμορφη θέρμανση του υλικού. Μετά την έξοδο των προϊόντων από τον αντιδραστήρα ακολουθεί συνήθως η διέλευσή τους από κυκλώνα για την απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων και στη συνέχεια από συμπυκνωτή, όπου πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των υγρών και αέριων προϊόντων σύμφωνα και με τους Motevali και συνεργάτες (Motevali et al., 2022).

Το στερεό προϊόν της πυρόλυσης, γνωστό ως πυρολυτικός άνθρακας, περιέχει λιγότερο από 0,3% υπολειμματικό έλαιο και επομένως δεν απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για την άνεκτηση πετρελαίου. Παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, η οποία υπερβαίνει το 50%, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο είτε ως στερεό καύσιμο είτε ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ενεργού άνθρακα. Επιπλέον, σύμφωνα με την έρευνα των Motevali και συνεργατών (Motevali et al., 2022) μετά από κατάλληλη ενεργοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσροφητικό υλικό για την απομάκρυνση ρύπων από υδατικά διαλύματα, ενώ με την κατάλληλη επεξεργασία για τη μείωση της περιεκτικότητας σε βαρέα μέταλλα μπορεί να αξιοποιηθεί και ως βελτιωτικό εδάφους, συμβάλλοντας στη βελτίωση της αναλογίας άνθρακα προς άζωτο και στη γονιμότητα των εδαφών.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα της πυρόλυσης, η εφαρμογή της συνοδεύεται από ορισμένους περιορισμούς. Η διεργασία απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που συνεπάγεται

αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Επιπλέον, η ανάγκη αφυδάτωσης της ελαιώδους λάσπης πριν από την επεξεργασία μπορεί να αυξήσει σημαντικά το συνολικό κόστος, σε σημείο που σε ορισμένες περιπτώσεις να υπερβαίνει τα οικονομικά οφέλη από την ανάκτηση των προϊόντων όπως αναφέρουν ο Hasan και οι συνεργάτες του (Hasan et al., 2024).

Παράλληλα, κατά την καύση των παραγόμενων αερίων ενδέχεται να εκπέμπονται οξείδια του αζώτου (NO_x) και του θείου (SO_x), καθιστώντας αναγκαία την εγκατάσταση συστημάτων ελέγχου των εκπομπών. Ωστόσο, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πυρόλυσης θεωρούνται μικρότερες συγκριτικά με άλλες θερμοχημικές διεργασίες, όπως η αποτέφρωση και η αεριοποίηση, γεγονός που καθιστά την τεχνολογία ιδιαίτερα ελκυστική για τη βιώσιμη διαχείριση της ελαιώδους λάσπης και την προώθηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας.

Η διάρκεια παραμονής στην πυρόλυση είναι ο χρόνος κατά τον οποίο το υλικό ή τα παραγόμενα αέρια παραμένουν μέσα στον αντιδραστήρα σε υψηλή θερμοκρασία. Ο χρόνος αυτός επηρεάζει σημαντικά την απόδοση και τη σύσταση των τελικών προϊόντων. Στην ταχεία πυρόλυση είναι συνήθως από 0,5 έως 2 δευτερόλεπτα, ενώ στην αργή πυρόλυση μπορεί να διαρκεί από λίγα λεπτά έως αρκετές ώρες, ανάλογα με τη διεργασία και το επιθυμητό προϊόν.

Η πυρόλυση απαιτεί σημαντική αρχική επένδυση λόγω της ανάγκης χρήσης αντιδραστήρων υψηλής θερμοκρασίας, συστημάτων παροχής αδρανούς αερίου, συμπυκνωτών και μονάδων διαχωρισμού προϊόντων. Το κόστος εγκατάστασης βιομηχανικών μονάδων πυρόλυσης εκτιμάται περίπου μεταξύ 1.000 και 3.500 €/τόνο ημερήσιας δυναμικότητας επεξεργασίας, ενώ το λειτουργικό κόστος κυμαίνεται περίπου μεταξύ 80 και 250 €/τόνο ελαιώδους λάσπης, κυρίως λόγω της απαιτούμενης ενέργειας για θέρμανση και πιθανής προεπεξεργασίας αφυδάτωσης. Ο χρόνος παραμονής στον αντιδραστήρα είναι σχετικά σύντομος και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 10 και 60 λεπτών, με χαρακτηριστική τιμή περίπου 20 λεπτά για παραγωγή υψηλής ποιότητας πυρολυτικού ελαίου. Σύμφωνα με τους Wang και συνεργάτες (Wang et al., 2022), παρά το υψηλό αρχικό κόστος, η ανάκτηση υγρού καυσίμου, αερίου με θερμογόνο αξία και ανθρακούχου υπολείμματος μπορεί να βελτιώσει την οικονομική απόδοση της διεργασίας.

4.1.2 Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση αποτελεί μία θερμική μέθοδο επεξεργασίας της ελαιώδους λάσπης, κατά την οποία το οργανικό κλάσμα του αποβλήτου οξειδώνεται πλήρως παρουσία επαρκούς ποσότητας οξυγόνου και, σε ορισμένες περιπτώσεις, με τη χρήση κατάλληλων επιταχυντών καύσης. Η βασική αρχή της διεργασίας στηρίζεται στη μετατροπή των οργανικών συστατικών της λάσπης σε αέρια προϊόντα καύσης και ανόργανα υπολείμματα, οδηγώντας σε σημαντική μείωση του

τελικού όγκου του αποβλήτου. Η αποτελεσματικότητα της αποτέφρωσης επηρεάζεται από διάφορες λειτουργικές παραμέτρους, όπως ο τύπος του εξοπλισμού καύσης, η θερμοκρασία λειτουργίας, ο χρόνος παραμονής, η παροχή οξυγόνου και ο ρυθμός τροφοδοσίας της ελαιώδους λάσπης. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτών είναι απαραίτητη για την επίτευξη υψηλού βαθμού καταστροφής των οργανικών ρύπων και τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής αξιοποίησης του αποβλήτου σύμφωνα με μελέτες των Wang και συνεργατών (Wang et al., 2022).

Παρά το γεγονός ότι η αποτέφρωση μπορεί να οδηγήσει σε αποτελεσματική απομάκρυνση των οργανικών συστατικών, η διεργασία συνοδεύεται από την παραγωγή καυσαερίων και στερεών υπολειμμάτων τέφρας, τα οποία απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία πριν από την τελική διάθεση ή αξιοποίησή τους. Τα κύρια αέρια προϊόντα περιλαμβάνουν διοξείδιο του θείου (SO_2), οξείδια του αζώτου (NO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), καθώς και αιωρούμενα σωματίδια διαφορετικού μεγέθους, όπως PM_{10} και $\text{PM}_{2.5}$. Επιπλέον, ενδέχεται να υπάρχουν βαρέα μέταλλα, χλωριωμένες ενώσεις και άλλοι αέρια ρύποι, όπως τα οξείδια του αζώτου και του θείου, οι οποίοι απαιτούν εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων ελέγχου εκπομπών ώστε να περιορίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διεργασίας σύμφωνα με τους Wang και συνεργάτες (Wang et al., 2022) και τους Hasan και συνεργάτες (Hasan et al., 2024). Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα σχετικά με την αποτέφρωση της ελαιώδους λάσπης έχει επικεντρωθεί κυρίως στη σύγκausη με άλλα εύφλεκτα υλικά, όπως ο άνθρακας και η βιομάζα. Η προσέγγιση αυτή αποσκοπεί στη βελτίωση των χαρακτηριστικών καύσης, στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και στη δημιουργία εναλλακτικών καυσίμων με μεγαλύτερη περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Η παρουσία πρόσθετων καυσίμων μπορεί να βελτιώσει τη θερμογόνο δύναμη του μίγματος και να ενισχύσει τη σταθερότητα της διεργασίας, μειώνοντας παράλληλα την ανάγκη για εξωτερική παροχή ενέργειας.

Μία σύγχρονη προσέγγιση της θερμικής επεξεργασίας αποτελεί η καύση υπό συνθήκες υπόκαυσης (smoldering combustion), η οποία παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους αποτέφρωσης. Η τεχνολογία αυτή χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις, δυνατότητα ολοκληρωμένης επεξεργασίας του αποβλήτου και μειωμένες εκπομπές, καθώς η διεργασία πραγματοποιείται χωρίς τη δημιουργία έντονης φλόγας. Η απόδοσή της εξαρτάται από τη σύσταση της ελαιώδους λάσπης, τα χαρακτηριστικά καύσης του υλικού, την παροχή οξυγόνου και την εξωτερική θερμική ενίσχυση. Ο ακριβής έλεγχος της παροχής οξυγόνου αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθώς υπερβολικά υψηλές τιμές μπορούν να προκαλέσουν καύση με ανοικτή φλόγα, ενώ ανεπαρκής παροχή οξυγόνου μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή της διεργασίας όπως αναφέρουν ο Hasan και οι συνεργάτες του (Hasan et al., 2024).

Κατά την εφαρμογή της υπόκαυσης συχνά χρησιμοποιούνται αδρανή υλικά, όπως η άμμος, προκειμένου να βελτιωθεί η πορώδης δομή του μίγματος, να ενισχυθεί η κυκλοφορία του αέρα και να διατηρηθούν σταθερές οι συνθήκες καύσης. Έχει αναφερθεί ότι η κατάλληλη αναλογία άμμου προς ελαιώδη λάσπη μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της απόδοσης επιβράδυνσης της φλόγας και στη σταθεροποίηση της θερμικής διεργασίας. Συγκεκριμένα, αναλογία άμμου προς ελαιώδη λάσπη 2:3 έχει παρουσιάσει ιδιαίτερα αποτελέσματα, επιτρέποντας τη μείωση της ποσότητας της ελαιώδους λάσπης σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% και την επίτευξη απομάκρυνσης πετρελαϊκών συστατικών άνω του 98% σύμφωνα με τις αναφορές των Wang και συνεργατών (Wang et al., 2022) και των Hasan συνεργατών (Hasan et al., 2024).

Συνολικά, η αποτέφρωση και οι εξελιγμένες παραλλαγές της, όπως η υπόκαυση, αποτελούν αποτελεσματικές τεχνολογίες για τη μείωση του όγκου και της επικινδυνότητας της ελαιώδους λάσπης. Παρόλο που απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη διαχείριση των παραγόμενων εκπομπών και των στερεών υπολειμμάτων, η δυνατότητα ενεργειακής ανάκτησης και η υψηλή απομάκρυνση των οργανικών ρύπων καθιστούν τις μεθόδους αυτές σημαντικές επιλογές στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης πετρελαϊκών αποβλήτων.

Η αποτέφρωση αποτελεί μία από τις ακριβότερες τεχνολογίες επεξεργασίας ελαιώδους λάσπης, καθώς απαιτεί εγκαταστάσεις υψηλής θερμοκρασίας και προηγμένα συστήματα ελέγχου εκπομπών. Το κόστος εγκατάστασης μονάδων αποτέφρωσης κυμαίνεται περίπου μεταξύ 500 και 2.000 €/τόνο ετήσιας δυναμικότητας, ενώ το λειτουργικό κόστος βρίσκεται συνήθως στην περιοχή των 100–300 €/τόνο αποβλήτου, κυρίως λόγω της κατανάλωσης καυσίμου, της συντήρησης και της επεξεργασίας των καυσαερίων. Ο χρόνος παραμονής της λάσπης στον θάλαμο καύσης είναι περιορισμένος και κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 30 λεπτών και 2 ωρών σύμφωνα με τους Wang και συνεργάτες (Wang et al., 2022), ανάλογα με τον σχεδιασμό του συστήματος. Παρότι επιτυγχάνεται μεγάλη μείωση του όγκου του αποβλήτου, το υψηλό κόστος λειτουργίας και η ανάγκη διαχείρισης των παραγόμενων εκπομπών αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα όπως αναφέρουν ο Hasan και οι συνεργάτες του (Hasan et al., 2024).

4.1.3 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία ιδιαίτερα ελκυστική βιολογική μέθοδο για την επεξεργασία της ελαιώδους λάσπης, καθώς συμβάλλει τόσο στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη διάθεση του αποβλήτου όσο και στην ανάκτηση ενέργειας μέσω της παραγωγής βιοαερίου. Ωστόσο, η εφαρμογή της αποκλειστικά στην ελαιώδη λάσπη παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις, καθώς οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες αποτελούνται από αλειφατικές, αρωματικές και πολικές ενώσεις με διαφορετικό βαθμό βιοαποδομησιμότητας.

Επιπλέον, ορισμένες από αυτές τις ενώσεις εμφανίζουν τοξική δράση έναντι συγκεκριμένων ομάδων αναερόβιων μικροοργανισμών, γεγονός που μπορεί να αναστείλει τη μικροβιακή δραστηριότητα και να μειώσει την απόδοση της διεργασίας σύμφωνα με τους Pucci και συνεργάτες (Pucci et al., 2013). Παράλληλα, η ελαιώδης λάσπη χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών και μικροβιακού πληθυσμού, στοιχεία απαραίτητα για την αποτελεσματική πραγματοποίηση των βιοχημικών διεργασιών της αναερόβιας αποδόμησης.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω περιορισμών εφαρμόζεται η αναερόβια χώνευση (anaerobic co-digestion), κατά την οποία η ελαιώδης λάσπη υποβάλλεται σε ταυτόχρονη επεξεργασία με άλλα οργανικά υποστρώματα, όπως η ιλύς από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων ή τα ζωικά απόβλητα. Η προσθήκη των υποστρωμάτων αυτών βελτιώνει σημαντικά τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, καθώς εμπλουτίζει το μίγμα με ενεργούς μικροοργανισμούς, εξισορροπεί τη σχέση άνθρακα προς άζωτο (C/N), μειώνει τη συγκέντρωση τοξικών συστατικών μέσω αραίωσης, ενισχύει τη μικροβιακή ποικιλότητα και επιτρέπει την εφαρμογή υψηλότερου οργανικού φορτίου. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται η σταθερότητα της διεργασίας και επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις παραγωγής βιοαερίου.

Η ιλύς εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών λυμάτων αποτελεί ένα από τα πλέον κατάλληλα συγχωνευόμενα υποστρώματα, καθώς είναι ευρέως διαθέσιμη και διαθέτει τόσο τους απαραίτητους μικροοργανισμούς όσο και τα θρεπτικά στοιχεία που απαιτούνται για την αποτελεσματική αποδόμηση της οργανικής ύλης. Σε σχετική μελέτη, οι (Janajreh et al., 2020) διερεύνησαν την αναερόβια χώνευση ελαιώδους λάσπης με στερεά προερχόμενα από μονάδα επεξεργασίας λυμάτων και διαπίστωσαν ότι η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου επιτεύχθηκε όταν το μίγμα αποτελούνταν από 60% ελαιώδη λάσπη και 40% ιλύ, σε μεσόφιλες συνθήκες λειτουργίας (35 °C) και παρουσία επιπλέον νερού σε αντιδραστήρα διαλείποντος έργου. Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες, περίπου το 43% των πτητικών στερεών μετατράπηκε σε βιοαέριο, γεγονός που αναδεικνύει τις δυνατότητες ενεργειακής αξιοποίησης της διεργασίας.

Εκτός από την ιλύ αστικών λυμάτων, η χρήση γεωργικών υπολειμμάτων ως συγχωνευόμενων υποστρωμάτων έχει επίσης αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική. Η υψηλότερη απόδοση της διεργασίας καταγράφηκε σε αναλογία 4:1 μεταξύ φυτικής βιομάζας και ελαιώδους λάσπης, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η κατάλληλη επιλογή και αναλογία συγχωνευόμενων υποστρωμάτων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την παραγωγή βιοαερίου και τη συνολική απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, η σταδιακή προσαρμογή των μικροβιακών κοινοτήτων στο συγκεκριμένο μίγμα υποστρωμάτων συμβάλλει στην αύξηση της βιολογικής δραστηριότητας και στην αποτελεσματικότερη μετατροπή της οργανικής ύλης σε βιοαέριο, βελτιώνοντας τη συνολική

απόδοση της αναερόβιας χώνευσης όπως αναφέρουν ο Yang και οι συνεργάτες του (Yang et al., 2020).

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία από τις οικονομικά πιο ανταγωνιστικές τεχνολογίες επεξεργασίας ελαιώδους λάσπης, καθώς παρουσιάζει χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με τις θερμικές μεθόδους. Το κόστος εγκατάστασης για μονάδες αναερόβιας χώνευσης κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 500 και 1.500 €/m³ δυναμικότητας αντιδραστήρα, ενώ το λειτουργικό κόστος εκτιμάται περίπου σε 20–80 €/τόνο επεξεργασμένης λάσπης, ανάλογα με την ανάγκη προεπεξεργασίας, θέρμανσης και διαχείρισης του βιοαερίου. Ο χρόνος παραμονής στον αναερόβιο αντιδραστήρα είναι σχετικά μεγάλος λόγω της αργής βιολογικής αποδόμησης και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 15 και 40 ημερών σύμφωνα με τους Appels και συνεργάτες (Appels et al., 2008). Η μεγάλη διάρκεια παραμονής αποτελεί έναν από τους βασικούς περιορισμούς της μεθόδου, καθώς απαιτείται σημαντικός όγκος αντιδραστήρων, αυξάνοντας το αρχικό κόστος επένδυσης. Ωστόσο, η παραγωγή βιοαερίου μπορεί να αντισταθμίσει μέρος του λειτουργικού κόστους μέσω ενεργειακής ανάκτησης.

5. Περίπτωση μελέτης

5.1 Περιγραφή Μονάδας Προ επεξεργασίας με Τριφασική Φυγοκέντρωση

Η τριφασική φυγοκέντρωση της συγκεκριμένης μονάδας αποτελεί μία προηγμένη μηχανική διεργασία διαχωρισμού που βασίζεται στην επίδραση ισχυρού φυγοκεντρικού πεδίου για την ταυτόχρονη διαχωριστική κατανομή τριών φάσεων διαφορετικής πυκνότητας, δηλαδή στερεής, υδατικής και ελαιώδους όπως έχει παρουσιαστεί παραπάνω και απεικονίζεται στην εικόνα 8. Η αποδοτικότητα της διεργασίας εξαρτάται άμεσα από τη δυναμική ισορροπία μεταξύ φυγοκεντρικής δύναμης, ρεολογικών ιδιοτήτων του μίγματος και διαφορικής ταχύτητας μεταξύ του περιστρεφόμενου κάδου και του κοχλία. Η ρύθμιση της διαφορικής ταχύτητας αποτελεί κρίσιμη παράμετρο ελέγχου, καθώς καθορίζει τον χρόνο παραμονής των στερεών στο εσωτερικό του συστήματος και συνεπώς επηρεάζει τόσο τον βαθμό αφυδάτωσης του στερεού κλάσματος όσο και την καθαρότητα των παραγόμενων υγρών φάσεων. Επιπλέον, η απόδοση επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία μειώνει το ιξώδες του μίγματος και ενισχύει τη συνένωση των ελαιωδών σταγονιδίων, καθώς και από τη χημική προ επεξεργασία με απογαλακτωματοποιητές, οι οποίοι αποσταθεροποιούν τα γαλακτώματα και διευκολύνουν τον διαχωρισμό.

Η διεργασία ενσωματώνεται ως στάδιο προ επεξεργασίας πριν από θερμικές ή χημικές τεχνικές, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση του οργανικού φορτίου και ανάκτηση αξιοποιήσιμου πετρελαϊκού κλάσματος. Η χρήση σύγχρονων φυγοκεντρητών με δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές φυγοκεντρικές επιταχύνσεις ($>3000\text{ g}$) και συστήματα αυτόματης ρύθμισης διαφορικής ταχύτητας επιτρέπει τη συνεχή βελτιστοποίηση της διεργασίας υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες τροφοδοσίας. Παράλληλα, η ενσωμάτωση συστημάτων χημικής δοσομέτρησης και θερμικής προθέρμανσης συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας διαχωρισμού, μειώνοντας την υπολειμματική περιεκτικότητα νερού και στερεών στο ανακτημένο πετρέλαιο και ενισχύοντας τη συνολική ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση της μονάδας. Ο μέσος χρόνος παραμονής του ρευστού στη μονάδα φυγοκέντρισης εκτιμάται σε περίπου 1,5 λεπτό, ενώ η ογκομετρική παροχή λειτουργίας ανέρχεται σε περίπου $6\text{ m}^3/\text{h}$. Η διεργασία πραγματοποιείται με ταχύτητα περιστροφής της φυγοκεντρικής διάταξης 4.000 rpm (στροφές ανά λεπτό), η οποία εξασφαλίζει την ανάπτυξη των απαιτούμενων φυγοκεντρικών δυνάμεων για τον αποτελεσματικό διαχωρισμό των φάσεων.



Εικόνα 8. Τριφασικός φυγοκεντρικός διαχωριστής για την επεξεργασία αποβλήτων δεξαμενών πετρελαιοειδών.

Η προ επεξεργασία των πετρελαιοειδών αποβλήτων που έχει εγκατασταθεί στη συγκεκριμένη βιομηχανική μονάδα της INTERGEO αποτελεί κρίσιμο στάδιο για τη σταθεροποίηση της τροφοδοσίας και τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης των επόμενων διεργασιών. Αρχικά, το απόβλητο υφίσταται μηχανική ομογενοποίηση και εξισορρόπηση ροής σε δεξαμενές εξισορρόπησης. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται θερμική προθέρμανση με χρήση ατμού, η οποία μειώνει σημαντικά το ιξώδες της ελαιώδους φάσης και ενισχύει την αποσταθεροποίηση των

γαλακτωμάτων νερού πετρελαίου. Παράλληλα, πραγματοποιείται δοσομέτρηση χημικών βοηθητικών ουσιών, όπως απογαλακτωματοποιητών και πολυηλεκτρολυτών, με στόχο τη διάσπαση των διεπιφανειακών μεμβρανών που σταθεροποιούν το γαλάκτωμα και τη διευκόλυνση της συνένωσης των διασπαρμένων σταγονιδίων όπως αναφέρουν ο Sami και οι συνεργάτες του (Sami et al., 2016). Ακολούθως, το προ επεξεργασμένο ρεύμα οδηγείται στην τριφασική φυγοκέντριση, όπου επιτυγχάνεται διαχωρισμός σε ελαιώδη, υδατική και στερεή φάση. Τα βαρύτερα κλάσματα και τα υψηλού μοριακού βάρους υπολείμματα υδρογονανθράκων, τα οποία προσροφώνται ή εγκλωβίζονται στη στερεή φάση, δεν απορρίπτονται ως τελικό απόβλητο αλλά αξιοποιούνται περαιτέρω ως τροφοδοσία στη θερμική εκρόφηση. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ενσωμάτωση των δύο τεχνολογιών σε ένα ενιαίο σύστημα επεξεργασίας, όπου η φυγοκέντριση λειτουργεί ως στάδιο ανάκτησης ελαφρύτερων και μεσαίων κλασμάτων, ενώ η θερμική εκρόφηση στοχεύει στην ανάκτηση των υπολειμματικών υδρογονανθράκων από το στερεό υπόλειμμα. Η συνδυασμένη αυτή προσέγγιση οδηγεί σε προσέγγιση μηδενικού υπολείμματος, καθώς μεγιστοποιείται η ανάκτηση αξιοποιήσιμου πετρελαίου και ελαχιστοποιείται ο τελικός όγκος επικίνδυνων αποβλήτων που απαιτούν διάθεση ή περαιτέρω επεξεργασία.

5.1.2 Σύστημα τεχνολογίας θερμικής εκρόφησης.

Η θερμική εκρόφηση αποτελεί μία προηγμένη φυσικοχημική διεργασία επεξεργασίας στερεών και ημι-στερεών αποβλήτων, η οποία εφαρμόζεται ευρέως για την απορρύπανση ρυπασμένων εδαφών, ιζημάτων, βιομηχανικών ιλύων και καταλοίπων πετρελαϊκών διεργασιών. Η βασική αρχή της διεργασίας στηρίζεται στην εφαρμογή ελεγχόμενης θερμικής ενέργειας υπό συνθήκες μειωμένης πίεσης και αδρανούς ατμόσφαιρας, με σκοπό την απομάκρυνση πτητικών και ημιπτητικών οργανικών ενώσεων από τη στερεά μήτρα, χωρίς να επιδιώκεται η χημική καταστροφή των υδρογονανθράκων. Με τον τρόπο αυτό, η θερμική εκρόφηση διαφοροποιείται ουσιαστικά από διεργασίες όπως η πυρόλυση και η αποτέφρωση, καθώς βασίζεται κυρίως στον διαχωρισμό και την ανάκτηση των οργανικών συστατικών και όχι στην οξείδωσή τους.

Η τεχνολογία εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα πετρελαϊκών αποβλήτων, όπως απόβλητα γεωτρήσεων, ελαιώδεις λάσπες από καθαρισμούς δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων, κατάλοιπα διυλιστηρίων, καθώς και ρυπασμένα εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε ολικούς πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες (TPH). Η διεργασία πραγματοποιείται συνήθως σε θερμοκρασίες 100–400 °C, ανάλογα με τη σύσταση και τη σταθερότητα των ρύπων, ενώ η εφαρμογή κενού (50–1000 mbar) μειώνει τα σημεία ζέσεως των οργανικών ενώσεων, ενισχύει τη μεταφορά μάζας και περιορίζει τους περιορισμούς διάχυσης, επιτρέποντας αποτελεσματικότερη απομάκρυνση των υδρογονανθράκων από τη στερεά φάση.

Στη μονάδα θερμικής εκρόφησης υπό κενό της εταιρίας INTERGEO, όπου πραγματοποιείται η περίπτωση μελέτης της παρούσας εργασίας, η θέρμανση του υλικού επιτυγχάνεται μέσω έμμεσης μεταφοράς θερμότητας με διαθερμικό έλαιο θερμοκρασίας περίπου 400 °C, με αποτέλεσμα το επεξεργαζόμενο υλικό να φθάνει σε θερμοκρασίες έως περίπου 380 °C. Η δημιουργία αδρανούς ατμόσφαιρας αζώτου στον θάλαμο επεξεργασίας αποτρέπει την οξείδωση των οργανικών συστατικών και μειώνει τον κίνδυνο αυτανάφλεξης, εξασφαλίζοντας ασφαλή λειτουργία της διεργασίας σύμφωνα με τους Kastanek και συνεργάτες (Kastanek et al., 2016).

Κατά τη λειτουργία της μονάδας, η θερμική ενέργεια προκαλεί την εξάτμιση του νερού, των ελαφρών υδρογονανθράκων και των βαρύτερων πετρελαϊκών κλασμάτων, ακόμη και ενώσεων με υψηλά σημεία ζέσεως, χωρίς να προκαλείται σημαντική θερμική διάσπαση των οργανικών ενώσεων. Η διεργασία πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών σταδίων θέρμανσης, εκρόφησης και απομάκρυνσης των παραγόμενων ατμών από το στερεό υπόλειμμα, επιτρέποντας τον αποτελεσματικό διαχωρισμό των φάσεων και την ανάκτηση πετρελαϊκών κλασμάτων υψηλής ενεργειακής αξίας σύμφωνα με τους Xu και συνεργάτες (Xu et al., 2024).

Οι παραγόμενοι ατμοί οδηγούνται αρχικά σε σύστημα φίλτρανσης υψηλής απόδοσης για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών σωματιδίων και στη συνέχεια σε μονάδα συμπίκνωσης, όπου πραγματοποιείται ο διαχωρισμός τους σε υδατική και ελαιώδη φάση. Η υδατική φάση οδηγείται σε περαιτέρω επεξεργασία στη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων πριν από τη διάθεσή της, ενώ η ελαιώδης φάση αποτελεί ανακτημένο μίγμα υδρογονανθράκων που μπορεί να αξιοποιηθεί ως δευτερογενές καύσιμο ή να υποβληθεί σε περαιτέρω διυλιστηριακή επεξεργασία για παραγωγή προϊόντων υψηλότερης αξίας. Με τον τρόπο αυτό, η διεργασία συμβάλλει στην ανάκτηση πόρων και όχι στην καταστροφή τους όπως αναφέρουν οι Wang και συνεργάτες (Wang et al., 2023).

Τα μη συμπυκνώσιμα αέρια οδηγούνται σε σύστημα επεξεργασίας απαερίων, όπου πραγματοποιείται αρχικά επεξεργασία μέσω πλυντρίδας απαερίων για την απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων, υδατοδιαλυτών ενώσεων και μέρους των συμπυκνώσιμων οργανικών συστατικών. Στη συνέχεια, το αέριο ρεύμα διέρχεται από σύστημα προσρόφησης με ενεργό άνθρακα, όπου επιτυγχάνεται η απομάκρυνση υπολειμματικών πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) και άλλων οργανικών ρύπων. Η συγκεκριμένη διάταξη συμβάλλει στη σημαντική μείωση των ατμοσφαιρικών εκπομπών και στη συμμόρφωση με τα ισχύοντα περιβαλλοντικά όρια, βελτιώνοντας τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση της μονάδας σύμφωνα με τους Zhang και συνεργάτες (Zhang et al., 2024).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της θερμικής εκρόφησης είναι η υψηλή αποτελεσματικότητά της στην επεξεργασία αποβλήτων με αυξημένη περιεκτικότητα σε πετρελαϊκούς ρύπους, όπου οι

συμβατικές φυσικοχημικές μέθοδοι παρουσιάζουν περιορισμένη απόδοση λόγω της ισχυρής προσρόφησης των υδρογονανθράκων στη στερεά φάση. Η διεργασία οδηγεί σε σημαντική μείωση της συγκέντρωσης των ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) στο στερεό υπόλειμμα, καθιστώντας το υλικό κατάλληλο είτε για ασφαλή διάθεση είτε για επαναχρησιμοποίηση, ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας.

Η απόδοση της διεργασίας επηρεάζεται σημαντικά από κρίσιμες λειτουργικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία λειτουργίας, ο χρόνος παραμονής, οι συνθήκες κενού και η αποτελεσματική ανάκτηση θερμότητας. Όπως αναφέρουν οι Zhang και συνεργάτες (Zhang et al., 2024), η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και της συνολικής αποτελεσματικότητας της τεχνολογίας.

Συνολικά, η θερμική εκρόφηση υπό κενό αποτελεί μία τεχνολογία απορρύπανσης και ανάκτησης που συνδυάζει υψηλή απομάκρυνση οργανικών ρύπων, ανάκτηση υδρογονανθράκων και μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η απουσία χημικών αντιδραστηρίων, η παραγωγή καθαρότερου στερεού υπολείμματος και η αξιοποίηση των ανακτημένων πετρελαϊκών κλασμάτων καθιστούν τη διεργασία ιδιαίτερα κατάλληλη για τη βιώσιμη διαχείριση πετρελαιοειδών καταλοίπων και την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας σύμφωνα με τους Xu και συνεργάτες (Xu et al., 2024) και τους Wang και συνεργάτες (Wang et al., 2023).

5.1.3 Απόδοση και Περιβαλλοντική Απόκριση

Η συνολική απόδοση της θερμικής εκρόφησης χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά απορρύπανσης, με μείωση TPH άνω του 95–99% και σημαντική ανάκτηση υδρογονανθράκων. Παράλληλα, το τελικό στερεό υπόλειμμα καθίσταται αδρανές και κατάλληλο για ασφαλή διάθεση ή περαιτέρω αξιοποίηση. Η ανάκτηση ενέργειας μέσω αξιοποίησης των παραγόμενων αερίων συμβάλλει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της μονάδας, μειώνοντας τις συνολικές απαιτήσεις καυσίμου όπως αναφέρουν ο Zhang και οι συνεργάτες του (Zhang et al., 2024). Ως εκ τούτου, η θερμική εκρόφηση αποτελεί τεχνολογία που συνδυάζει απορρύπανση, ανάκτηση πόρων και ενεργειακή αποδοτικότητα.



Εικόνα 9. Εγκατάσταση θερμικής εκρόφησης στην μονάδα της INTERGEO στην Θεσσαλονίκη.

Στην παρούσα Εικόνα 9 απεικονίζεται το ολοκληρωμένο σύστημα θερμικής εκρόφησης που λειτουργεί στη μονάδα επεξεργασίας της εγκατάστασης της INTERGEO. Το συγκεκριμένο μηχανολογικό σύνολο αποτελεί τον βασικό πυρήνα της διεργασίας επεξεργασίας πετρελαιοειδών καταλοίπων δεξαμενών και έχει σχεδιαστεί για την αποτελεσματική απομάκρυνση οργανικών ρύπων μέσω ελεγχόμενης θερμικής κατεργασίας υπό προκαθορισμένες συνθήκες λειτουργίας. Στο σύστημα διακρίνονται τα κύρια επιμέρους υποσυστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν τον θάλαμο θερμικής εκρόφησης (εικόνα 10), το σύστημα τροφοδοσίας (B στην εικόνα 9) και προ επεξεργασίας του υλικού (A στην εικόνα 9), το δίκτυο αγωγών μεταφοράς των παραγόμενων ατμών προς τη μονάδα ψύξης και συμπύκνωσης (Δ στην εικόνα 9), οι δεξαμενές διαθερμικού ελαίου (E στην εικόνα 9) και ο πίνακας όπως και το PLC για τους αυτοματισμούς (Γ στην εικόνα 9). Η διεργασία βασίζεται στην έμμεση ή άμεση θερμική καταπόνηση του ρυπασμένου υλικού σε ελεγχόμενο θερμοκρασιακό εύρος, με σκοπό την πτητικοποίηση των οργανικών ενώσεων χωρίς την πρόκληση φαινομένων καύσης ή πλήρους θερμικής οξείδωσης. Η λειτουργία του συστήματος υποστηρίζεται από μονάδα αδρανοποίησης με άζωτο, η οποία εξασφαλίζει τη διατήρηση χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου και την αποφυγή δημιουργίας εκρηκτικών μειγμάτων κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Παράλληλα, οι παραγόμενοι ατμοί οδηγούνται σε σύστημα συμπύκνωσης, όπου πραγματοποιείται διαχωρισμός σε υδατική και

ελαιώδη φάση, με δυνατότητα ανάκτησης υδρογονανθράκων και περαιτέρω διαχείρισης των επιμέρους ρευμάτων. Η συνολική διάταξη του εξοπλισμού αναδεικνύει τον βιομηχανικό και υψηλής τεχνολογίας χαρακτήρα της διεργασίας, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα εφαρμογής της σε πραγματικές συνθήκες επεξεργασίας επικίνδυνων πετρελαιοειδών αποβλήτων. Η εν λόγω τεχνολογία συμβάλλει ταυτόχρονα στη σημαντική μείωση του περιβαλλοντικού φορτίου, μέσω της απορρύπανσης των στερεών υπολειμμάτων και της ανάκτησης αξιοποιήσιμων υδρογονανθράκων, ενισχύοντας τη συνολική ενεργειακή και περιβαλλοντική αποδοτικότητα της εγκατάστασης.



Εικόνα 10. Περιστροφικός αντιδραστήρας ο οποίος περιβάλλεται με το θερμικό έλαιο όπου μεταφέρει την επιθυμητή θερμοκρασία μέσα στον εξατμιστήρα.

Στην παρούσα εικόνα 10 απεικονίζεται ο περιστροφικός αντιδραστήρας, ο οποίος αποτελεί το κεντρικό λειτουργικό στοιχείο του συστήματος θερμικής εκρόφησης. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός λειτουργεί ως θερμικός εξατμιστήρας, εντός του οποίου λαμβάνει χώρα η ελεγχόμενη θερμική κατεργασία των ρυπασμένων πετρελαιοειδών καταλοίπων υπό προκαθορισμένες συνθήκες λειτουργίας. Η θέρμανση του υλικού επιτυγχάνεται μέσω κυκλοφορίας θερμικού ελαίου, το οποίο λειτουργεί ως μέσο έμμεσης μεταφοράς θερμότητας και διατρέχει το εξωτερικό και εσωτερικό σύστημα θέρμανσης του κυλινδρικού θαλάμου. Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει ομοιόμορφη θερμική κατανομή κατά μήκος του αντιδραστήρα, αποφεύγοντας την άμεση επαφή της φλόγας με το επεξεργαζόμενο υλικό και συνεπώς την ανεξέλεγκτη θερμική οξείδωση των

οργανικών συστατικών. Η ρύθμιση και ο έλεγχος της θερμοκρασίας πραγματοποιείται μέσω συστήματος αυτοματισμού PLC, το οποίο επιτρέπει την ακριβή παρακολούθηση και ρύθμιση των κρίσιμων θερμοδυναμικών παραμέτρων της διεργασίας, εξασφαλίζοντας υψηλό επίπεδο λειτουργικής ασφάλειας και επαναληψιμότητας των συνθηκών επεξεργασίας. Παράλληλα, η περιστροφική κίνηση του αντιδραστήρα συμβάλλει στη συνεχή ανάδευση και ομογενοποίηση του υλικού, βελτιώνοντας τη μεταφορά θερμότητας και ενισχύοντας τη μεταφορά μάζας από τη στερεά στην αέρια φάση. Η συνδυασμένη δράση θερμικής καταπόνησης και μηχανικής ανάμειξης οδηγεί σε αποτελεσματική πτητικοποίηση και απομάκρυνση των οργανικών ρύπων, αυξάνοντας τη συνολική αποδοτικότητα της διεργασίας. Ο σχεδιασμός του συστήματος διασφαλίζει σταθερές και ελεγχόμενες συνθήκες λειτουργίας, συμβάλλοντας στην επίτευξη υψηλού βαθμού απορρύπανσης των επεξεργαζόμενων καταλοίπων και στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης.



Εικόνα 11. Γραμμές ψύξεις του νερού για κάθε υποσύστημα για την εξασφάλιση επιθυμητής θερμοκρασίας.

Στην παρούσα εικόνα 11 απεικονίζονται τα ανεξάρτητα κυκλώματα ψύξης νερού της εγκατάστασης θερμικής εκρόφησης, τα οποία αντιστοιχούν σε διακριτά λειτουργικά υποσυστήματα της διεργασίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα επιμέρους συστήματα ψύξης που εξυπηρετούν τον πρώτο και τον δεύτερο συμπυκνωτή, το κύκλωμα ψύξης του διαθερμικού (θερμικού) ελαίου, το σύστημα θερμικού ελέγχου του περιστροφικού αντιδραστήρα, καθώς και τη γραμμή ψύξης του εξερχόμενου επεξεργασμένου στερεού υπολείμματος. Η χρήση ανεξάρτητων ψυκτικών κυκλωμάτων επιτρέπει τον λεπτομερή και κατά φάση έλεγχο της θερμικής συμπεριφοράς

της διεργασίας, εξασφαλίζοντας σταθερές συνθήκες λειτουργίας και υψηλή αποδοτικότητα στα κρίσιμα στάδια ανάκτησης και συμπύκνωσης των παραγόμενων ατμών. Ειδικότερα, ο πρώτος συμπυκνωτής λειτουργεί σε σχετικά υψηλότερο θερμοκρασιακό εύρος, στοχεύοντας στην ανάκτηση βαρύτερων υδρογονανθρακικών κλασμάτων, ενώ ο δεύτερος συμπυκνωτής επιτυγχάνει περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας των απαερίων, ενισχύοντας τη συνολική απόδοση υγροποίησης των πτητικών συστατικών. Παράλληλα, το κύκλωμα ψύξης του διαθερμικού ελαίου συμβάλλει στη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας του συστήματος θέρμανσης, αποτρέποντας υπερθέρμανση και διασφαλίζοντας σταθερή παροχή θερμικής ενέργειας προς τον αντιδραστήρα. Αντίστοιχα, η ελεγχόμενη ψύξη του περιστροφικού αντιδραστήρα και της γραμμής εκφόρτωσης του στερεού υπολείμματος αποτρέπει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιακών καταπονήσεων, μειώνοντας τον κίνδυνο θερμικών σοκ και ενισχύοντας τη λειτουργική ασφάλεια του εξοπλισμού. Η συνεχής καταγραφή και παρακολούθηση των θερμοκρασιακών παραμέτρων στα επιμέρους κυκλώματα ψύξης επιτρέπει τη δυναμική ρύθμιση της διεργασίας μέσω του συστήματος αυτοματισμού, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και της λειτουργικής σταθερότητας της μονάδας. Συνολικά, η συγκεκριμένη διάταξη αναδεικνύει τη σημασία της ολοκληρωμένης θερμικής διαχείρισης σε συστήματα θερμικής εκρόφησης, τόσο ως προς την αποδοτικότητα της διεργασίας όσο και ως προς τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας της εγκατάστασης.



Εικόνα 12. Συστοιχία συμπυκνωτών των πτητικών αερίων, μεταλλικά φίλτρα (strainers) αέριων πτητικών όπου με by pass επιστέφουν στον συμπυκνωτή.

Στην εικόνα 12 παρουσιάζονται ο πρώτος και ο δεύτερος συμπυκνωτής του συστήματος θερμικής εκρόφησης, οι οποίοι αποτελούν κρίσιμα στάδια της διεργασίας διαχείρισης και επεξεργασίας των παραγόμενων πτητικών ρευμάτων. Οι συγκεκριμένες μονάδες λειτουργούν σε διαδοχική διάταξη, επιτυγχάνοντας σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας των ατμών και μετατροπή των πτητικών οργανικών ενώσεων από αέρια σε υγρή φάση, μέσω ελεγχόμενης συμπίκνωσης. Η διάταξη των δύο σταδίων συμπίκνωσης επιτρέπει την επιλεκτική ανάκτηση υδρογονανθρακικών κλασμάτων διαφορετικής πτητικότητας, με τον πρώτο συμπυκνωτή να λειτουργεί σε υψηλότερο θερμοκρασιακό επίπεδο και να ευνοεί τη συμπίκνωση βαρύτερων οργανικών ενώσεων, ενώ ο δεύτερος συμπυκνωτής εξασφαλίζει περαιτέρω θερμική υποβάθμιση του ρεύματος και απομάκρυνση των ελαφρύτερων πτητικών συστατικών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αυξημένος βαθμός συνολικής ανάκτησης υδρογονανθράκων, καθώς και σημαντική μείωση του οργανικού φορτίου των απαερίων. Στην έξοδο κάθε συμπυκνωτή είναι εγκατεστημένα μεταλλικά φίλτρα τύπου strainer, τα οποία λειτουργούν ως μηχανικά στοιχεία συγκράτησης αιωρούμενων στερεών σωματιδίων ή συμπυκνωμένων σταγονιδίων που δύνανται να παρασυρθούν από τη ροή των αερίων. Σε συνθήκες αυξημένου φορτίου πτητικών ενώσεων, τα φίλτρα συμβάλλουν στη σταθεροποίηση της ροής και στη διατήρηση της λειτουργικής απόδοσης του συστήματος συμπίκνωσης. Επιπλέον, η ύπαρξη διάταξης παράκαμψης (by-pass) επιτρέπει την επανακυκλοφορία μέρους του ρεύματος προς τον συμπυκνωτή, σε περιπτώσεις όπου δεν έχει

επιτευχθεί πλήρης υγροποίηση των πτητικών συστατικών. Η λειτουργία αυτή ενισχύει τη δυναμική προσαρμογή της διεργασίας σε μεταβαλλόμενα φορτία και συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής και λειτουργικής απόδοσης του συστήματος. Συνολικά, η συγκεκριμένη διάταξη συμβάλλει τόσο στη μεγιστοποίηση της ανάκτησης υδρογονανθράκων όσο και στη μείωση των εκπομπών πτητικών οργανικών ενώσεων, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση της εγκατάστασης με τα ισχύοντα περιβαλλοντικά όρια εκπομπών όπως αναφέρουν ο Xu και οι συνεργάτες του (Xu et al., 2024).



Εικόνα 13. Α (αριστερά πάνελ αέρα (A1), ο ξηραντήρας (A2), οι δεξαμενές προπίεσης του συστήματος για κάθε module (A3.1 και A3.2) . Β (δεξιά η παραγωγή αζώτου (B1), το πάνελ αζώτου (B2) και οι δεξαμενές αζώτου (B3).

Στην παρούσα εικόνα 13 παρουσιάζονται τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα και παραγωγής αζώτου της μονάδας, τα οποία είναι κρίσιμα για τον αυτοματισμό και την ασφάλεια της διεργασίας. Το σύστημα πεπιεσμένου αέρα, μετά από αφύγρανση, τροφοδοτεί τις πνευματικές βαλβίδες και τους ενεργοποιητές της εγκατάστασης, ενώ οι δεξαμενές προπίεσης εξασφαλίζουν σταθερή παροχή και αποφυγή διακυμάνσεων πίεσης. Παράλληλα, το σύστημα παραγωγής αζώτου (PSA ή μεμβρανικής τεχνολογίας) παρέχει αδρανές αέριο υψηλής καθαρότητας για την αδρανοποίηση του αντιδραστήρα και των γραμμών ατμών. Η διατήρηση χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου περιορίζει τον κίνδυνο ανάφλεξης και σχηματισμού εκρηκτικών μειγμάτων, ενισχύοντας τη λειτουργική ασφάλεια της εγκατάστασης σύμφωνα και με την έρευνα των Li και συνεργατών (Li et al., 2022).



Εικόνα 14. Τροφοδοσία και μεταφορά εισερχομένης λάσπης.

Στην παρούσα εικόνα 14 απεικονίζεται το σύστημα τροφοδοσίας της εγκατάστασης θερμικής εκρόφησης, το οποίο αποτελεί ένα από τα πλέον κρίσιμα υποσυστήματα της συνολικής διεργασίας επεξεργασίας πετρελαιοειδών λασπών. Παράλληλα παρουσιάζεται ο κάδος υποδοχής εισερχόμενης πετρελαϊκής λάσπης, όπου πραγματοποιείται η αρχική συγκέντρωση και προσωρινή αποθήκευση του ρυπασμένου υλικού πριν την είσοδό του στη θερμική επεξεργασία. Το σύστημα τροφοδοσίας εξασφαλίζει τη σταδιακή, ελεγχόμενη και ασφαλή μεταφορά του αποβλήτου προς τον περιστροφικό αντιδραστήρα, διατηρώντας σταθερές συνθήκες παροχής. Η μεταφορά του υλικού πραγματοποιείται μέσω μηχανισμού αλυσίδας ταινιόδρομου, ο οποίος επιτρέπει τη συνεχή ανύψωση και προώθηση της λάσπης προς το σημείο τροφοδοσίας του θερμικού αντιδραστήρα. Η ομοιόμορφη τροφοδοσία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη θερμική σταθερότητα της διεργασίας, καθώς επηρεάζει άμεσα την κατανομή θερμότητας, τον χρόνο παραμονής του υλικού και τη συνολική απόδοση εκρόφησης σύμφωνα με τους Zhang και συνεργάτες (Zhang et al., 2024). Ιδιαίτερη σημασία για τη λειτουργική ασφάλεια του συστήματος έχει η παρουσία αδρανούς ατμόσφαιρας αζώτου κατά τη διαδικασία τροφοδοσίας. Η έγχυση αζώτου τόσο στον κάδο τροφοδοσίας όσο και στη γραμμή μεταφοράς συμβάλλει στη σημαντική μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου, περιορίζοντας τον κίνδυνο σχηματισμού εκρηκτικών μιγμάτων, δεδομένης της πιθανής παρουσίας πτητικών οργανικών ενώσεων στο απόβλητο. Η αδρανοποίηση αυτή αποτελεί βασικό μέτρο πρόληψης κινδύνων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας πετρελαιοειδών καταλοίπων όπως αναφέρουν ο Li και οι συνεργάτες του (Li et al., 2022). Η συνολική διάταξη του συστήματος τροφοδοσίας αναδεικνύει τη

σημασία του ελεγχόμενου χειρισμού των εισερχόμενων αποβλήτων ως κρίσιμου παράγοντα για τη σταθερότητα της θερμικής διεργασίας. Η ομαλή και συνεχής παροχή υλικού συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, στην αποφυγή διακυμάνσεων θερμοκρασίας εντός του αντιδραστήρα και στη διασφάλιση ασφαλών συνθηκών λειτουργίας της μονάδας θερμικής εκρόφησης σύμφωνα με τους Wang και συνεργάτες (Wang et al., 2023).



Εικόνα 15. Γενική άποψη της εγκατάστασης θερμικής εκρόφησης.

Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται συνολικά, η μονάδα θερμικής εκρόφησης που αποτελεί μία ιδιαίτερα αποτελεσματική τεχνολογία για την απορρύπανση εδαφών και στερεών αποβλήτων που έχουν επιβαρυνθεί με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες και άλλους οργανικούς ρύπους. Μέσω της ελεγχόμενης θέρμανσης επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των πτητικών και ημιπτητικών ρύπων, επιτρέποντας την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση ή διάθεση του επεξεργασμένου υλικού. Η υψηλή απόδοση της διεργασίας, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ανάκτησης των πετρελαϊκών κλασμάτων και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, καθιστούν τη θερμική εκρόφηση μία σύγχρονη και αξιόπιστη λύση για τη διαχείριση ρυπασμένων εδαφών, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην προστασία του περιβάλλοντος και στην εφαρμογή των αρχών της βιώσιμης ανάπτυξης.

5.1.4 Συνολική Απόδοση Εγκατάστασης Θερμικής Εκρόφησης

Η αξιολόγηση της απόδοσης της μονάδας θερμικής εκρόφησης δεν πραγματοποιείται σε επίπεδο επιμέρους μηχανικών υποσυστημάτων, αλλά στο επίπεδο της συνολικής διεργασίας, καθώς η εγκατάσταση λειτουργεί ως ολοκληρωμένο θερμοχημικό σύστημα επεξεργασίας πετρελαιοειδών καταλοίπων. Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας αποτυπώνεται κυρίως μέσω δεικτών απορρύπανσης, ανάκτησης υδρογονανθράκων και περιβαλλοντικής συμμόρφωσης. Κύριος δείκτης απόδοσης αποτελεί η συνολική απομάκρυνση ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) από το εισερχόμενο απόβλητο. Σε καλά σχεδιασμένες και βιομηχανικά βελτιστοποιημένες μονάδες θερμικής εκρόφησης, η συνολική απομάκρυνση (TPH) μπορεί να υπερβαίνει το 95–99%, οδηγώντας σε σημαντική μείωση του ρυπαντικού φορτίου του στερεού υπολείμματος και δυνατότητα ασφαλούς διαχείρισης ή περαιτέρω αξιοποίησής του σύμφωνα με τους Li και συνεργάτες (Li et al., 2022).

Παράλληλα, ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί ο βαθμός ανάκτησης υδρογονανθράκων από τη ροή των παραγόμενων ατμών. Σύμφωνα με αναφορές των Li και συνεργατών (Li et al., 2022) η διεργασία δεν περιορίζεται σε απλή απορρύπανση, αλλά επιτρέπει την ανάκτηση σημαντικού μέρους των οργανικών συστατικών σε υγρή φάση, τα οποία δύνανται να επαναχρησιμοποιηθούν ως δευτερογενές καύσιμο ή να οδηγηθούν σε περαιτέρω διύλιση. Ο βαθμός ανάκτησης κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 60–85%, ανάλογα με τη σύσταση του αποβλήτου και τις συνθήκες λειτουργίας. Η ποιότητα του τελικού στερεού υπολείμματος αποτελεί επίσης κρίσιμο δείκτη απόδοσης. Μετά την ολοκλήρωση της θερμικής εκρόφησης, το υπόλειμμα εμφανίζει σημαντικά μειωμένη περιεκτικότητα σε υδρογονάνθρακες, συχνά κάτω από 100–500 mg/kg TPH, γεγονός που επιτρέπει τη διάθεσή του ως αδρανές ή τη χρήση του σε εφαρμογές αποκατάστασης εδαφών, υπό την προϋπόθεση συμμόρφωσης με τα ισχύοντα κανονιστικά όρια όπως αναφέρουν ο Wang και οι συνεργάτες του (Wang et al., 2023). Επιπλέον, η περιβαλλοντική απόδοση της εγκατάστασης αξιολογείται μέσω της αποτελεσματικότητας των συστημάτων ελέγχου απαερίων, όπου επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των εκπομπών πτητικών οργανικών ενώσεων, εξασφαλίζοντας συμμόρφωση με τα θεσμοθετημένα όρια εκπομπών. Η συνολική λειτουργία της μονάδας χαρακτηρίζεται από κλειστό θερμικό και υλικό ισοζύγιο, με ελεγχόμενες εκροές και ελαχιστοποίηση δευτερογενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων σύμφωνα με την έρευνα των Zhang και συνεργατών (Zhang et al., 2024). Συνολικά, η θερμική εκρόφηση αποτελεί τεχνολογία υψηλής απόδοσης, η οποία συνδυάζει αποτελεσματική απορρύπανση, ανάκτηση ενεργειακά αξιοποιήσιμων κλασμάτων και περιορισμό του τελικού όγκου αποβλήτων, συμβάλλοντας στη βιώσιμη διαχείριση πετρελαιοειδών καταλοίπων.

6. Αποτελέσματα

Η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της τεχνολογίας της θερμικής εκρόφησης για την επεξεργασία πετρελαιοειδών καταλοίπων δεξαμενών, με ιδιαίτερη έμφαση στην αποδοτικότητα απορρύπανσης και, κυρίως, στη δυνατότητα ανάκτησης πολύτιμης πρώτης ύλης (υδρογονανθράκων), η οποία αποτελεί βασικό διαφοροποιητικό χαρακτηριστικό της διεργασίας έναντι συμβατικών θερμικών τεχνολογιών.

Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι η θερμική εκρόφηση επιτυγχάνει ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) από τη στερεή φάση των αποβλήτων. Η διεργασία, η οποία λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες ελεγχόμενης υποπίεσης και απουσίας οξυγόνου, οδηγεί στη μεταφορά των υδρογονανθράκων από τη στερεή μήτρα προς την αέρια φάση, χωρίς να πραγματοποιείται καύση ή πλήρης καταστροφή τους. Το γεγονός αυτό είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς επιτρέπει όχι μόνο την απορρύπανση του υλικού, αλλά ταυτόχρονα και τη διατήρηση της χημικής αξίας των οργανικών ενώσεων.

Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης είναι η επιτυχής και συστηματική ανάκτηση υδρογονανθράκων σε υγρή μορφή μέσω του συστήματος συμπύκνωσης, γεγονός που καθιστά τη θερμική εκρόφηση τεχνολογία ανάκτησης πρώτης ύλης και όχι απλής καταστροφής αποβλήτων όπως αναφέρουν ο Zhang και οι συνεργάτες του (Zhang et al., 2024). Οι ανακτώμενοι υδρογονάνθρακες παρουσιάζουν ικανοποιητικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και μπορούν να αξιοποιηθούν ως δευτερογενής πρώτη ύλη υψηλής ενεργειακής αξίας, είτε ως καύσιμο είτε ως τροφοδοσία σε διυλιστικές ή άλλες βιομηχανικές διεργασίες. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί κρίσιμο πλεονέκτημα, καθώς μετατρέπει ένα επικίνδυνο απόβλητο σε αξιοποιήσιμο ρεύμα υλικού, ενισχύοντας ουσιαστικά τη βιωσιμότητα της συνολικής διεργασίας.

Η ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων καταδεικνύει ότι η μείωση των ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) στο τελικό στερεό υπόλειμμα είναι ιδιαίτερα υψηλή, υποδηλώνοντας σχεδόν πλήρη μεταφορά των υδρογονανθράκων στη φάση ανάκτησης. Το στερεό υπόλειμμα που προκύπτει μετά την επεξεργασία παρουσιάζει σημαντικά μειωμένο οργανικό φορτίο, γεγονός που μειώνει δραστικά τον περιβαλλοντικό κίνδυνο και διευκολύνει τη διαχείρισή του. Παράλληλα, η σημαντική απομάκρυνση πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs) ενισχύει περαιτέρω την περιβαλλοντική απόδοση της διεργασίας.

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι η θερμική εκρόφηση διαφοροποιείται ουσιαστικά από τεχνολογίες όπως η αποτέφρωση, όπου οι υδρογονάνθρακες καταστρέφονται πλήρως χωρίς δυνατότητα ανάκτησης. Αντιθέτως, στη συγκεκριμένη διεργασία, η χρήση έμμεσης θέρμανσης και αδρανούς ατμόσφαιρας αζώτου επιτρέπει τη φυσική αποδέσμευση και

ανάκτηση των υδρογονανθράκων χωρίς χημική αλλοίωση, γεγονός που μετατρέπει τη διαδικασία σε τεχνολογία ανάκτησης πόρων και όχι απλής επεξεργασίας αποβλήτων όπως αναφέρουν ο Zhang και οι συνεργάτες του (Zhang et al., 2024).

Η λειτουργία του συστήματος συμπίκνωσης αποδείχθηκε κρίσιμη για την απόδοση της διεργασίας. Η ύπαρξη πολυσταδιακής συμπίκνωσης επιτρέπει τη σταδιακή υγραποίηση των εξατμιζόμενων υδρογονανθράκων, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση ανάκτησης. Τα δεδομένα δείχνουν ότι η ορθή ρύθμιση της θερμοκρασίας εξόδου των απαερίων και η αποτελεσματική ψύξη οδηγούν σε υψηλή συλλεκτική απόδοση υδρογονανθράκων, ενισχύοντας τον ρόλο της διεργασίας ως μονάδας παραγωγής δευτερογενούς πρώτης ύλης.

Η ενεργειακή ανάλυση της διεργασίας δείχνει ότι, παρότι απαιτείται σημαντική θερμική ενέργεια για την επίτευξη των απαιτούμενων συνθηκών λειτουργίας, ένα μέρος αυτής της ενέργειας μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω της αξιοποίησης των ανακτώμενων υδρογονανθράκων. Οι υδρογονάνθρακες αυτοί, λόγω της υψηλής θερμογόνου ικανότητας, αποτελούν σημαντικό ενεργειακό πόρο, ενισχύοντας περαιτέρω την έννοια της κυκλικής οικονομίας. Συνεπώς, η διεργασία δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται μόνο ως μέθοδος επεξεργασίας αποβλήτων, αλλά ως ολοκληρωμένο σύστημα ανάκτησης ενέργειας και πρώτης ύλης από απόβλητα πετρελαϊκής προέλευσης.

Η ποιότητα του τελικού στερεού υπολείμματος εξαρτάται από τη σύσταση του αρχικού υλικού και τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του οργανικού περιεχομένου, γεγονός που οδηγεί σε βελτίωση της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς του υλικού. Σύμφωνα με έρευνα των Zhang και συνεργατών (Zhang et al., 2024) η μείωση αυτή σχετίζεται άμεσα με την αποτελεσματική εκρόφιση και ανάκτηση των υδρογονανθράκων, οι οποίοι δεν καταστρέφονται αλλά μεταφέρονται και συλλέγονται ως αξιοποιήσιμη πρώτη ύλη.

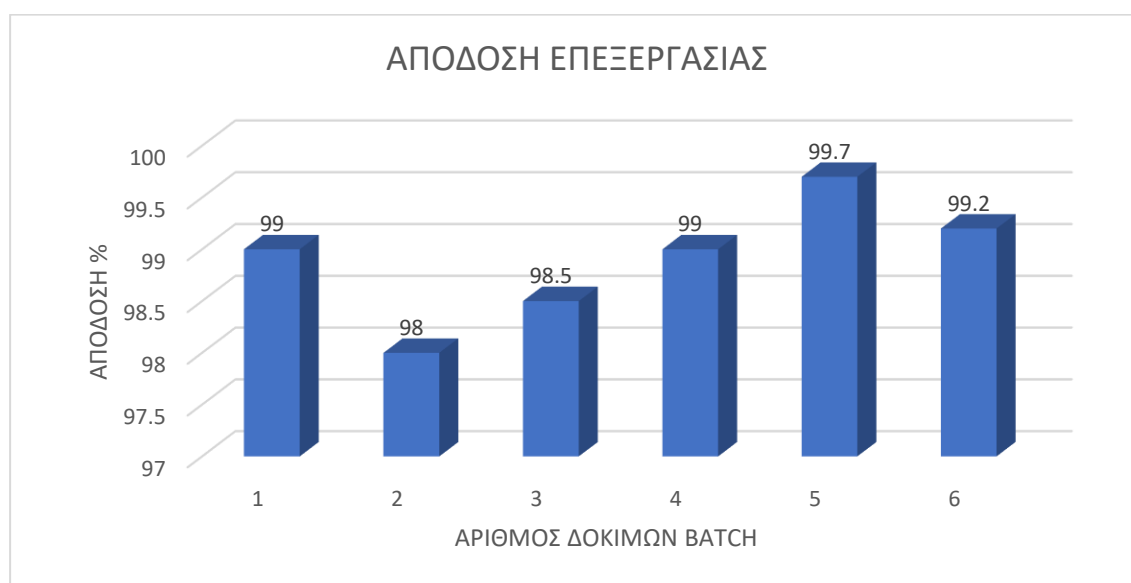
Αναφορικά με τις εκπομπές απαερίων, η εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων επεξεργασίας των μη συμπυκνώσιμων αερίων, όπως πλυντρίδα απαερίων και μονάδα προσρόφησης με ενεργό άνθρακα, συμβάλλει καθοριστικά στον περιορισμό των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) και άλλων οργανικών ρύπων. Η απόδοση των συστημάτων αυτών επηρεάζεται από τη θερμοκρασία λειτουργίας, τη σύσταση των εξατμιζόμενων ενώσεων και την αποτελεσματικότητα της προσρόφησης, ωστόσο επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός ελέγχου των εκπομπών, ενισχύοντας τη συνολική περιβαλλοντική συμμόρφωση της εγκατάστασης.

Σημαντικό εύρημα της μελέτης αποτελεί επίσης η λειτουργική ευελιξία της διεργασίας, καθώς η μονάδα μπορεί να επεξεργάζεται απόβλητα διαφορετικής σύστασης χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις στον βασικό εξοπλισμό. Παρ' όλα αυτά, η απόδοση επηρεάζεται από παραμέτρους

όπως η υγρασία, η περιεκτικότητα σε άσφαλτο και η κοκκομετρία των στερεών, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τον ρυθμό εκρόφησης και την ενεργειακή κατανάλωση.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η θερμική εκρόφηση αποτελεί μία ιδιαίτερα αποδοτική και τεχνολογικά ώριμη διεργασία, η οποία δεν περιορίζεται στην απορρύπανση των πετρελαιοειδών καταλοίπων, αλλά κυρίως λειτουργεί ως προηγμένη τεχνολογία ανάκτησης πρώτης ύλης υψηλής αξίας. Η δυνατότητα μετατροπής επικίνδυνων αποβλήτων σε αξιοποιήσιμους υδρογονάνθρακες συνιστά το σημαντικότερο πλεονέκτημα της διεργασίας, διαφοροποιώντας την ουσιαστικά από άλλες θερμικές ή μηχανικές τεχνολογίες.

Η ενσωμάτωση της θερμικής εκρόφησης σε ένα πλαίσιο κυκλικής οικονομίας αναδεικνύει τη στρατηγική της σημασία για τη σύγχρονη βιομηχανική πρακτική, καθώς συνδυάζει απορρύπανση, περιβαλλοντική προστασία και ανάκτηση πρώτης ύλης με οικονομική και ενεργειακή αξία.



Διάγραμμα 1. Αποδοτικότητα απορρύπανσης της πετρελαιοειδούς λάσπης μέσω της διεργασίας της θερμικής εκρόφησης σε 6 διαφορετικές δοκιμές (batches).

Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η αποδοτικότητα της θερμικής εκρόφησης ως προς την απορρύπανση της πετρελαιοειδούς λάσπης. Η απόδοση της διεργασίας εκτιμήθηκε από το ποσοστό μείωσης της συγκέντρωσης των ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) στο στερεό υλικό, όπως αυτό προσδιορίστηκε από τη σύγκριση της αρχικής και της τελικής συγκέντρωσης TPH μέσω εργαστηριακών αναλύσεων των δειγμάτων εδάφους. Είναι εμφανές ότι η τεχνολογία που εφαρμόζεται επιτυγχάνει εξαιρετικά υψηλά ποσοστά καθαρισμού, τα οποία κυμαίνονται σταθερά πάνω από το 98%. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη απόδοση σημειώνεται στην 5η δοκιμή, αγγίζοντας το εντυπωσιακό 99,7%, ενώ ακόμα και η χαμηλότερη τιμή (στη 2η δοκιμή)

παραμένει σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα. Η διακύμανση αυτή μεταξύ των δοκιμών υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε διαφορετικές συστάσεις λάσπης, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία της διαδικασίας για τη βιομηχανική περιβαλλοντική προστασία. Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας αξιολογείται με βάση τη μείωση της συγκέντρωσης των ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) στο επεξεργασμένο υλικό, αποτυπώνοντας τον βαθμό απομάκρυνσης των οργανικών ρύπων από τη στερεή φάση.

Παράλληλα, η ποσότητα των ανακτώμενων πετρελαιοειδών συνδέεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του αρχικού υλικού και ιδιαίτερα με τον βαθμό επιβάρυνσης της λάσπης σε υδρογονάνθρακες. Όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική συγκέντρωση πετρελαϊκών συστατικών στο υπό επεξεργασία υλικό, τόσο υψηλότερο είναι το δυναμικό ανάκτησης υδρογονανθράκων μέσω της διεργασίας. Επομένως, η απόδοση ανάκτησης πρώτης ύλης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την αρχική περιεκτικότητα του αποβλήτου σε πετρελαιοειδή, γεγονός που καθιστά τη σύσταση της τροφοδοσίας καθοριστικό παράγοντα για τη συνολική αποδοτικότητα και την οικονομική βιωσιμότητα της θερμικής εκρόφησης.

Χαρακτηριστικά παραγόμενων ρευμάτων και απόδοση της διεργασίας θερμικής εκρόφησης.

Τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων απαερίων, του τελικού στερεού υπολείμματος και των ανακτημένων υδρογονανθράκων που παρουσιάζονται στη συνέχεια βασίζονται σε βιβλιογραφικά δεδομένα από εφαρμογές θερμικής εκρόφησης σε πετρελαϊκά ρυπασμένα εδάφη, βιομηχανικές ιλύες και πετρελαϊκά κατάλοιπα. Τα δεδομένα αυτά δεν αποτελούν αναλυτικές μετρήσεις της συγκεκριμένης μονάδας θερμικής εκρόφησης της INTERGEO, αλλά αντιπροσωπεύουν τυπικά χαρακτηριστικά που έχουν αναφερθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για αντίστοιχες εφαρμογές της τεχνολογίας. Σύμφωνα με τους Zhang και συνεργάτες (Zhang et al., 2024) οι πραγματικές τιμές επηρεάζονται από τη σύσταση του προς επεξεργασία υλικού, τη θερμοκρασία λειτουργίας, τον χρόνο παραμονής, τις συνθήκες κενού και την απόδοση των επιμέρους συστημάτων καθαρισμού.

Χαρακτηριστικά τελικού στερεού υπολείμματος

Μετά την ολοκλήρωση της διεργασίας, το στερεό υπόλειμμα αποτελείται κυρίως από την ανόργανη μήτρα του αρχικού υλικού, όπως πυριτικά ορυκτά, οξείδια μετάλλων και άλλα ανόργανα συστατικά. Η θερμική εκρόφηση οδηγεί σε σημαντική απομάκρυνση των οργανικών ρύπων, ενώ τα ανόργανα στοιχεία, όπως τα μέταλλα, παραμένουν κυρίως στη στερεά φάση.

Πίνακας 1. Ενδεικτικά χαρακτηριστικά τελικού στερεού υπολείμματος μετά από θερμική εκρόφηση (Xu et al., 2024).

Παράμετρος	Ενδεικτικές τιμές μετά την επεξεργασία
Υπολειμματική υγρασία	<2 % κ.β.
Απομάκρυνση ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH)	95–99 %
Υπολειμματική συγκέντρωση TPH	<100–500 mg/kg
Μείωση πτητικών και ημιπτητικών οργανικών ενώσεων	>95 %
Απομάκρυνση ελαφρών και μεσαίων πετρελαϊκών κλάσμάτων	>95 %

Η υψηλή απομάκρυνση των ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH) καθιστά το τελικό στερεό υπόλειμμα σημαντικά καθαρότερο σε σχέση με το αρχικό υλικό και μπορεί, ανάλογα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του επεξεργασμένου υλικού και τις ισχύουσες περιβαλλοντικές απαιτήσεις, να οδηγήσει είτε σε επαναχρησιμοποίηση είτε σε ασφαλή τελική διάθεση, σύμφωνα με τους Xu και συνεργάτες (Xu et al., 2024).

Χαρακτηριστικά παραγόμενων απαερίων και σύστημα επεξεργασίας.

Κατά τη λειτουργία της θερμικής εκρόφησης, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί την εξάτμιση του νερού και την πτητικοποίηση των οργανικών ρύπων, οι οποίοι μεταφέρονται από τη στερεή μήτρα στην αέρια φάση με τη μορφή ατμών υδρογονανθράκων όπου κάποια δεν προλαβαίνουν να ανακτηθούν από τους συμπυκνωτές. Τα παραγόμενα απαέρια περιέχουν κυρίως πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), ημιπτητικές οργανικές ενώσεις (SVOCs), αλειφατικούς υδρογονάνθρακες, αρωματικές ενώσεις και ενώσεις BTEX (βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο και ξυλόλιο). Επιπλέον, ανάλογα με τη σύσταση του αρχικού αποβλήτου και τις συνθήκες λειτουργίας της διεργασίας, μπορεί να ανιχνεύονται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), σύμφωνα με τους Zhang και συνεργάτες (Zhang et al., 2024).

Στη μονάδα θερμικής εκρόφησης υπό κενό της INTERGEO, τα παραγόμενα απαέρια υποβάλλονται σε επιπλέον στάδια επεξεργασίας μέσω πλυντρίδας απαερίων και συστήματος προσρόφησης με ενεργό άνθρακα. Η πλυντρίδα συμβάλλει στη συγκράτηση αιωρούμενων σωματιδίων, υδατοδιαλυτών συστατικών και συμπυκνώσιμων οργανικών ενώσεων, ενώ το σύστημα ενεργού άνθρακα χρησιμοποιείται για την προσρόφηση υπολειμματικών πτητικών οργανικών ενώσεων πριν από την τελική διάθεση του επεξεργασμένου αέριου ρεύματος.

Πίνακας 2. Ενδεικτικά χαρακτηριστικά απαερίων και απόδοση συστημάτων καθαρισμού (Zhang et al., 2024).

Παράμετρος	Ενδεικτικά χαρακτηριστικά
Κύριοι αέριοι ρύποι	VOCs, SVOCs, ατμοί υδρογονανθράκων
Κύριες οργανικές ενώσεις	Αλειφατικοί υδρογονάνθρακες, BTEX, PAHs
Υδρατμοί	Υψηλή παρουσία λόγω εξάτμισης υγρασίας
Σύστημα επεξεργασίας μονάδας	Πλυντρίδα + ενεργός άνθρακας
Μείωση VOCs μέσω ενεργού άνθρακα	>90–95 %
Συνολική μείωση οργανικών εκπομπών μετά την επεξεργασία	>95 %

Η εφαρμογή συνδυασμού πλυντρίδας απαερίων και συστήματος προσρόφησης με ενεργό άνθρακα αποτελεί αποτελεσματική στρατηγική ελέγχου των εκπομπών, καθώς επιτρέπει την απομάκρυνση τόσο των συμπυκνώσιμων οργανικών ενώσεων όσο και των υπολειμματικών πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), συμβάλλοντας στη συμμόρφωση της μονάδας με τα ισχύοντα περιβαλλοντικά όρια εκπομπών, σύμφωνα με τους Wang και συνεργάτες (Wang et al., 2023) και Zhang και συνεργάτες (Zhang et al., 2024).

Χημική σύσταση ανακτημένων υδρογονανθράκων.

Οι οργανικοί ατμοί που παράγονται κατά τη θερμική εκρόφηση οδηγούνται σε σύστημα συμπίκνωσης, όπου πραγματοποιείται η υγροποίησή τους και ο διαχωρισμός των ανακτημένων πετρελαϊκών κλασμάτων. Τα ανακτημένα προϊόντα αποτελούνται από μίγματα υδρογονανθράκων που προϋπήρχαν στο αρχικό απόβλητο και διατηρούν σημαντικό ενεργειακό περιεχόμενο, παρουσιάζοντας χαρακτηριστικά παρόμοια με πετρελαϊκά προϊόντα.

Η χημική σύσταση των ανακτημένων υδρογονανθράκων περιγράφεται συνήθως μέσω της ανάλυσης SARA (Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes).

Πίνακας 3. Ενδεικτική σύσταση ανακτημένων υδρογονανθράκων (Xu et al., 2024).

Κλάσμα SARA	Ενδεικτική περιεκτικότητα (% κ.β.)
Κορεσμένοι υδρογονάνθρακες (Saturates)	50–70 %

Κλάσμα SARA	Ενδεικτική περιεκτικότητα (% κ.β.)
Αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Aromatics)	20–35 %
Ρητίνες (Resins)	5–15 %
Ασφαλτένια (Asphaltenes)	<10 %

Τα ανακτημένα κλάσματα αποτελούνται κυρίως από αλειφατικούς υδρογονάνθρακες μεσαίου και υψηλού μοριακού βάρους, αρωματικές ενώσεις και βαρύτερα πετρελαϊκά συστατικά. Η διατήρηση της ενεργειακής και χημικής τους αξίας αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της θερμικής εκρόφησης, καθώς επιτρέπει την ανάκτηση και αξιοποίηση των πετρελαϊκών συστατικών αντί της πλήρους καταστροφής τους μέσω διεργασιών θερμικής οξείδωσης, σύμφωνα με τους Xu και συνεργάτες (Xu et al., 2024).

Συνολικά, η θερμική εκρόφηση υπό κενό αποτελεί μία αποτελεσματική τεχνολογία απορρύπανσης και ανάκτησης πόρων, καθώς επιτυγχάνει υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης πετρελαϊκών υδρογονανθράκων, οδηγεί στην παραγωγή στερεού υπολείμματος με σημαντικά μειωμένο ρυπαντικό φορτίο και επιτρέπει την αξιοποίηση των ανακτημένων πετρελαϊκών κλασμάτων. Με τον τρόπο αυτό συμβάλλει στις αρχές της βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων και της κυκλικής οικονομίας.

7. Συμπεράσματα

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είχε ως αντικείμενο τη διερεύνηση των διαθέσιμων τεχνολογιών διαχείρισης και επεξεργασίας πετρελαιοειδών καταλοίπων δεξαμενών αποθήκευσης, με στόχο την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους και την ανάδειξη της καταλληλότερης τεχνολογικής προσέγγισης για την απορρύπανση και την αξιοποίηση των παραγόμενων αποβλήτων. Η συγκριτική αξιολόγηση των φυσικών, χημικών, βιολογικών και θερμικών διεργασιών ανέδειξε ότι καμία τεχνολογία δεν μπορεί να καλύψει από μόνη της όλες τις απαιτήσεις της επεξεργασίας, καθώς κάθε μέθοδος εξυπηρετεί διαφορετικό στάδιο και διαφορετικό σκοπό στη συνολική διαδικασία. Παράλληλα, η ανάλυση κατέδειξε ότι η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται όχι μόνο από την ικανότητα απομάκρυνσης των ρύπων αλλά και από τη δυνατότητα ανάκτησης πολύτιμων υδρογονανθράκων, το ενεργειακό κόστος, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τη συμβολή της στην κυκλική οικονομία.

Οι φυσικές μέθοδοι, όπως η φυγοκέντρωση, η διφασική και τριφασική φυγοκέντρωση, η φίλτρανση και η επίπλευση με αέρα, αποτελούν ουσιαστικά τεχνολογίες προεπεξεργασίας. Η κύρια συνεισφορά τους έγκειται στον διαχωρισμό των φάσεων, στη μείωση της περιεκτικότητας σε νερό και στερεά σωματίδια και στη βελτίωση των συνθηκών λειτουργίας των επόμενων

σταδίων επεξεργασίας. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά τους περιορίζεται όταν οι υδρογονάνθρακες είναι εγκλωβισμένοι σε σταθερά γαλακτώματα ή είναι ισχυρά προσροφημένοι στη στερεή μήτρα. Για τον λόγο αυτό, οι φυσικές διεργασίες δεν επαρκούν για την πλήρη απορρύπανση των πετρελαιοειδών καταλοίπων, αλλά λειτουργούν κυρίως ως συμπληρωματικά στάδια μιας ολοκληρωμένης μονάδας επεξεργασίας.

Αντίστοιχα, οι χημικές τεχνικές, όπως η διάσπαση γαλακτωμάτων, η εκχύλιση με διαλύτες και οι μέθοδοι οξείδωσης, παρουσιάζουν σημαντική αποτελεσματικότητα σε ειδικές εφαρμογές, καθώς διευκολύνουν τον διαχωρισμό των φάσεων ή μειώνουν το οργανικό φορτίο. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, συνοδεύονται από αυξημένες απαιτήσεις σε χημικά αντιδραστήρια, παραγωγή δευτερογενών αποβλήτων και υψηλότερο λειτουργικό κόστος. Επιπλέον, στις περιπτώσεις όπου πραγματοποιείται χημική οξείδωση, οι υδρογονάνθρακες καταστρέφονται και δεν ανακτώνται, με αποτέλεσμα να χάνεται η δυνατότητα αξιοποίησής τους ως δευτερογενούς πρώτης ύλης.

Η αξιολόγηση των υπόλοιπων θερμικών και βιολογικών τεχνολογιών ανέδειξε επίσης σημαντικούς περιορισμούς. Η πυρόλυση επιτυγχάνει τη θερμική διάσπαση των οργανικών ενώσεων και την παραγωγή δευτερογενών καυσίμων, χωρίς όμως να διατηρείται η αρχική σύσταση των υδρογονανθράκων. Η αποτέφρωση εξασφαλίζει την πλήρη καταστροφή των οργανικών ρύπων, αλλά συνοδεύεται από υψηλή ενεργειακή κατανάλωση, αυξημένες εκπομπές αερίων και οριστική απώλεια της οργανικής πρώτης ύλης. Αντίστοιχα, η αναερόβια χώνευση αποτελεί αποτελεσματική βιολογική τεχνολογία για βιοαποδομήσιμα οργανικά απόβλητα, όμως η εφαρμογή της στα πετρελαιοειδή κατάλοιπα είναι περιορισμένη λόγω της χαμηλής βιοαποδομησιμότητας των βαρέων υδρογονανθράκων.

Η συγκριτική εξέταση όλων των τεχνολογιών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι περισσότερες διεργασίες είτε περιορίζονται στον αρχικό διαχωρισμό των φάσεων είτε επιτυγχάνουν την απομάκρυνση των ρύπων μέσω καταστροφής των οργανικών ενώσεων. Καμία από αυτές δεν συνδυάζει υψηλή αποδοτικότητα απορρύπανσης με ανάκτηση των υδρογονανθράκων στην αρχική τους μορφή, γεγονός που περιορίζει την αξιοποίησή τους στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Στο πλαίσιο αυτό, η θερμική εκρόφηση αναδείχθηκε ως η πλέον ολοκληρωμένη τεχνολογία επεξεργασίας πετρελαιοειδών καταλοίπων. Η διεργασία βασίζεται στην εφαρμογή θερμικής ενέργειας υπό συνθήκες υποπίεσης και απουσίας οξυγόνου, επιτρέποντας τη μεταφορά των υδρογονανθράκων από τη στερεή και υγρή φάση στην αέρια, χωρίς να πραγματοποιείται καύση ή οξείδωση. Η χρήση αδρανούς ατμόσφαιρας, συνήθως αζώτου, αποτρέπει τη χημική αλλοίωση των οργανικών ενώσεων και διατηρεί τα χαρακτηριστικά τους, καθιστώντας δυνατή την ανάκτησή τους μέσω συμπύκνωσης.

Από την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων προκύπτει ότι η θερμική εκρόφηση επιτυγχάνει ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης των ολικών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (TPH), τα οποία σε βελτιστοποιημένες συνθήκες μπορούν να υπερβούν το 95–99 %. Η υψηλή αυτή απόδοση οφείλεται στη συνδυασμένη επίδραση της θερμοκρασίας, της υποπίεσης και της συνεχούς ροής αδρανούς αερίου, που ενισχύουν τη μεταφορά μάζας και μειώνουν τις δυνάμεις προσρόφησης μεταξύ των υδρογονανθράκων και της στερεής μήτρας. Παράλληλα, η μείωση του ιξώδους των βαρέων πετρελαϊκών κλασμάτων διευκολύνει την εξάτμιση και την απομάκρυνσή τους, αυξάνοντας σημαντικά τη συνολική αποτελεσματικότητα της διεργασίας.

Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας είναι ότι η θερμική εκρόφηση δεν περιορίζεται στην απορρόπηση του αποβλήτου, αλλά επιτρέπει την ανάκτηση των υδρογονανθράκων σε αξιοποιήσιμη μορφή. Οι ατμοί που παράγονται κατά τη διεργασία οδηγούνται σε συστήματα ελεγχόμενης συμπύκνωσης, όπου υγροποιούνται και συλλέγονται ως δευτερογενής πρώτη ύλη. Οι ανακτώμενοι υδρογονάνθρακες διατηρούν σημαντικό μέρος των φυσικοχημικών και ενεργειακών χαρακτηριστικών τους και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν είτε ως δευτερογενές καύσιμο είτε ως πρώτη ύλη σε διεργασίες διύλισης. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί το βασικό στοιχείο που διαφοροποιεί τη θερμική εκρόφηση από άλλες θερμικές τεχνολογίες, όπως η πυρόλυση και ιδιαίτερα η αποτέφρωση, στις οποίες οι οργανικές ενώσεις μετασχηματίζονται ή καταστρέφονται.

Εξίσου σημαντική είναι η ποιότητα του τελικού στερεού υπολείμματος. Μετά την ολοκλήρωση της θερμικής εκρόφησης, οι συγκεντρώσεις των υπολειπόμενων πετρελαϊκών υδρογονανθράκων μειώνονται σημαντικά, περιορίζοντας τον περιβαλλοντικό κίνδυνο και διευκολύνοντας την ασφαλή διαχείριση ή την περαιτέρω αξιοποίησή του, σύμφωνα με τις ισχύουσες περιβαλλοντικές προδιαγραφές. Η λειτουργία υπό υποπίεση συμβάλλει επιπλέον στη μείωση της απαιτούμενης θερμοκρασίας εκρόφησης, περιορίζοντας την κατανάλωση ενέργειας και αποφεύγοντας ανεπιθύμητες θερμικές αντιδράσεις που θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν την ποιότητα των ανακτώμενων προϊόντων.

Η περιβαλλοντική διάσταση της θερμικής εκρόφησης αποτελεί επίσης καθοριστικό παράγοντα της συνολικής αξιολόγησής της. Η απουσία οξυγόνου κατά τη λειτουργία περιορίζει τον σχηματισμό προϊόντων καύσης, ενώ η χρήση συστημάτων συμπύκνωσης και επεξεργασίας απαερίων μειώνει σημαντικά τις εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων. Παράλληλα, η ανάκτηση των υδρογονανθράκων μειώνει την ανάγκη εξόρυξης και επεξεργασίας νέων πρώτων υλών, συμβάλλοντας στη μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος της πετρελαϊκής βιομηχανίας.

Η δυνατότητα μετατροπής ενός επικίνδυνου αποβλήτου σε αξιοποιήσιμο προϊόν αναδεικνύει τη θερμική εκρόφηση ως τεχνολογία που ανταποκρίνεται πλήρως στις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Σε αντίθεση με τεχνολογίες που επικεντρώνονται αποκλειστικά στην ασφαλή διάθεση ή στην καταστροφή των ρύπων, η θερμική εκρόφηση επαναφέρει σημαντικό μέρος των υδρογονανθράκων στον παραγωγικό κύκλο, προσδίδοντας οικονομική και ενεργειακή αξία σε ένα υλικό που διαφορετικά θα αντιμετωπιζόταν αποκλειστικά ως επικίνδυνο απόβλητο.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας καταδεικνύουν ότι η θερμική εκρόφηση υπερτερεί έναντι των υπόλοιπων τεχνολογιών που εξετάστηκαν, καθώς αποτελεί τη μοναδική διεργασία που συνδυάζει αποτελεσματική απορρύπανση, ανάκτηση πολύτιμων υδρογονανθράκων, περιορισμένη παραγωγή δευτερογενών αποβλήτων, υψηλό επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας και ουσιαστική συμβολή στη βιώσιμη αξιοποίηση των φυσικών πόρων. Επομένως, δεν αποτελεί απλώς μία μέθοδο διαχείρισης αποβλήτων, αλλά μία ολοκληρωμένη τεχνολογία ανάκτησης πόρων και παραγωγής δευτερογενούς πρώτης ύλης.

Συμπερασματικά, η θερμική εκρόφηση συνιστά σήμερα την πλέον ώριμη και ολοκληρωμένη τεχνολογική λύση για την επεξεργασία πετρελαιοειδών καταλοίπων δεξαμενών αποθήκευσης. Η υψηλή αποδοτικότητα απορρύπανσης, η δυνατότητα ανάκτησης των υδρογονανθράκων χωρίς αλλοίωση της χημικής τους σύστασης, η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και η ουσιαστική συμβολή στην κυκλική οικονομία την καθιστούν την πλέον κατάλληλη επιλογή για τις σύγχρονες απαιτήσεις της πετρελαϊκής βιομηχανίας και της βιώσιμης διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdelrasoul, A., et al. (2022). Recent mitigation strategies on membrane fouling for oily wastewater treatment. *Membranes*, 12(1), 26.
- Alara, O. R., et al. (2022). Demulsifier: An important agent in breaking crude oil emulsions. *Chemical Engineering & Technology*, 45, 1707–1720.
- Alinnor, I. J., et al. (2020). Thermal desorption technology for remediation of hydrocarbon-contaminated soils: A review of operating parameters and performance efficiency. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104511.
- Appels, L., et al. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 755–781.
- Arena, U., et al. (2021). Energy efficiency and environmental performance of thermal treatment technologies for oily sludge remediation. *Waste Management*, 119, 181–193.
- Brouwers, J. J. H., et al. (2023). Innovative centrifugal separation technologies. *Chromatography*, 10(3), 181.
- Cao, R., et al. (2022). Study on the solidification and forming mechanism of oily sludge. *Journal of Petrochemical Universities*, 35(2), 9–14.
- Chai, X., et al. (2019). Thermal desorption of petroleum-contaminated soil: Experimental investigation and modeling of pollutant removal. *Chemosphere*, 234, 674–683.
- Chen, B., Liang, H., & Chen, H. (2020). Experimental research on oily sludge solidification technology based on environmental protection and renewable utilization. *Fresenius Environmental Bulletin*, 29, 11685–11692.
- Chen, H., et al. (2019). Catalytic ozonation combined with bead milling for efficient treatment of oily sludge. *Environmental Pollution*, 252, 1195–1203.
- Chen, H., et al. (2022). Characterization and treatment of oily sludge: A systematic review. *Journal of Environmental Management*, 315, 115178.
- Chen, H., et al. (2022). Oxidation technologies for degradation of organic pollutants in oily sludge. *Environmental Pollution*, 306, 119390.
- Elias, A., et al. (2021). Advances in three-phase decanter centrifugation in olive oil extraction. *Journal of Food Engineering*, 305, 110606.
- Elektorowicz, M., et al. (2005). Sustainable waste management: Recovery of fuels from petroleum sludge. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(1), 164–169.
- Ezugbe, E. O., et al. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: A review. *Membranes*, 10(5), 89.

- Gao, Y., et al. (2020). Utilization of pyrolytic carbon derived from oily sludge for environmental applications. *Environmental Research*, 189, 109929.
- Hasan, A. M. A., et al. (2024). Petroleum sludge formation and its treatment methodologies: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(6), 8369–8386.
- Hochberg, S. Y., et al. (2021). Materials and energy recovery from oily sludges removed from crude oil storage tanks (tank bottoms): A review of technologies. *Journal of Environmental Management*, 292, 112778.
- Hu, G., et al. (2013). Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 470–490.
- Hu, G., et al. (2021). Oil sludge deposition in storage tanks: A case study for Russian crude oil in Mohe Station. *Applied Sciences*, 11(1), 321.
- Jia, J., et al. (2019). The application of low-temperature thermal desorption for oil sludge treatment and recovery of hydrocarbons: A pilot-scale study. *Chemosphere*, 222, 596–603.
- Judd, S. J., et al. (2017). Membrane technology costs and me. *Water Research*, 122, 1–9.
- Kastanek, F., et al. (2016). Remediation of contaminated soils by thermal desorption; effect of benzoyl peroxide addition. *Journal of Cleaner Production*, 125, 309–313.
- Khan, F. I., et al. (2021). Explosion prevention in hydrocarbon processing industries: Role of inert gas systems and LEL monitoring. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 623–638.
- Khan, S., et al. (2021). A review of the application of different treatment processes for oily sludge. *Journal of Environmental Management*, 285, 112124.
- Li, H., et al. (2023). Combined air flotation and centrifugation process for oil recovery from oily sludge. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136024.
- Li, K., et al. (2024). Heat and mass transfer characteristics of oily sludge thermal desorption. *Processes*, 12(1), 227.
- Li, S., et al. (2022). A comprehensive evaluation method for soil remediation technology selection: Case study of ex situ thermal desorption. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3304.
- Li, X., et al. (2022). Nitrogen inerting systems in hazardous waste thermal treatment units: Safety analysis and operational optimization. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 75, 104687.
- Lin, C., et al. (2018). Economic assessment of oily sludge treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, 214, 282–291.

- Liu, S., et al. (2020). Advances in the treatment of oily sludge from petroleum industries: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 137, 1–19.
- Liu, X., et al. (2019). Resource recovery from oily sludge through pyrolysis technology. *Energy Conversion and Management*, 183, 615–625.
- Ma, H., et al. (2019). Vapor condensation and hydrocarbon recovery in thermal desorption systems treating oily sludge. *Chemical Engineering Journal*, 370, 363–372.
- Mantzavinos, D., et al. (2004). Enhancement of biodegradability of industrial wastewaters by chemical oxidation pre-treatment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 79, 431–454.
- Mohan, D., et al. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20, 848–889.
- Motevali, A., et al. (2022). Materials and energy recovery from oily sludges removed from crude oil storage tanks (tank bottoms): A review of technologies. *Journal of Environmental Management*, 292, 112778.
- Murungi, P. I., et al. (2022). Petroleum sludge treatment and disposal techniques: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 40358–40372.
- Oliveira, L. M., et al. (2023). Advances in industrial sludge separation and valorization. *Environmental Technology & Innovation*, 29, 102983.
- Pucci, M., et al. (2013). Biodegradation of petroleum hydrocarbons in oily sludge and effects on microbial activity. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 7285–7295.
- Rubio, J., et al. (2002). Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, 15, 139–155.
- Sami, H., et al. (2016). Study of different demulsifiers for separating oil from petroleum refinery sludge. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 36, 347–356.
- Scharnberg, A. R. A., et al. (2023). Flocculation of emulsified oil-in-water with dodecylbenzene sulfonate and polyacrylamide and floc separation by dissolved air flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 669, 131496.
- Sellami, M. H., et al. (2016). Chemical treatment process and reuse of oily-waters arising from petroleum field of HBK/Algeria. *International Journal of Waste Resources*, 6(4).
- Shi, C., et al. (2018). Solvent extraction for oil recovery from oily sludge: A comprehensive review of recent advances. *Fuel Processing Technology*, 178, 25–39.
- Tamborrino, A., et al. (2020). Three-phase centrifugation systems in olive oil extraction: Operational performance and environmental implications. *Biosystems Engineering*, 190, 1–12.

- Tang, S., et al. (2019). Pyrolysis characteristics and products analysis of oily sludge. *Energy*, 175, 650–658.
- Wang, J., et al. (2008). Treatment of oily sludge by combustion technology. *Journal of Hazardous Materials*.
- Wang, Q., et al. (2021). Control of VOC emissions from thermal desorption units using condensation and thermal oxidation systems. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127756.
- Wang, S., et al. (2023). Effects of thermal desorption on ecotoxicological characteristics of heavy petroleum-contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 857, 159405.
- Wang, Z., et al. (2022). Pyrolysis characteristics and products distribution of petroleum sludges. *Environmental Technology*, 43(12), 1819–1832.
- Xu, H., et al. (2024). Thermodynamic modeling and heat-moisture transfer characteristic analysis of in situ thermal desorption system for polluted soil. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 20(3), 279–291.
- Xu, S., et al. (2021). Optimization of operating parameters for thermal desorption of oily sludge based on oil recovery and clean solid production. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123286.
- Zhang, S., et al. (2024). Heat and mass transfer characteristics of oily sludge thermal desorption. *Processes*, 12(1), 227.