Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Χημικών Μηχανικών

Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων

Εργαστήριο Θερμοδυναμικής & Φαινομένων Μεταφοράς

Διπλωματική Εργασία

Προσομοίωση διεργασιών ανακύκλωσης πολυστρωματικών συσκευασιών

Φελεκέας Δημήτριος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Μαγουλάς

Αθήνα

Ιούνιος 2019

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής & Φαινομένων Μεταφοράς της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2018-2019.

Για την πραγματοποίηση της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κύριο Κωνσταντίνο Μαγουλά, για την ευκαιρία που μου έδωσε, για την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα για τη διαμόρφωση του θέματος βάσει των προτιμήσεων μου καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις κατά τη συγγραφή της εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δρ. Γεωργία Παππά, Ε.ΔΙ.Π., για τη συνεχή παρουσία της κατά τη διάρκεια της εργασίας, τις πολύτιμες συμβουλές της καθώς και για την προθυμία της και το φιλικό κλίμα που εκείνη δημιουργούσε. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Θερμοδυναμικής & Φαινομένων Μεταφοράς.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κύριο Αθανάσιο Νικολακόπουλο, Ε.ΔΙ.Π., για τις χρήσιμες συμβουλές του περί τεχνικών ζητημάτων, αλλά και για τον χρόνο του που με προθυμία αφιέρωσε σχετικά με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς μου και την αδερφή μου, τόσο για τη βοήθεια που μου προσέφεραν προκειμένου να πετύχω την εισαγωγή μου στη Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., όσο και για τη συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους φίλους μου, εντός και εκτός σχολής, οι οποίοι με στήριξαν σε κάθε δύσκολη στιγμή που είχα. Οι ατελείωτες μελέτες στον χώρο της σχολής με τους φίλους και συμφοιτητές μου είναι εμπειρία η οποία θα με ακολουθεί από εδώ και στο εξής.

Φελεκέας Δημήτριος

Ιούνιος 2019

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες 1

Περίληψη 11

Λέξεις Κλειδιά: 12

Abstract 13

Key Words: 14

Εισαγωγή και Σκοπός της Εργασίας 15

1 Παραγωγή, Κατανάλωση Πλαστικών και Διαχείριση Πλαστικών Αποβλήτων 17

1.1 Παγκόσμιο και Ευρωπαϊκό Επίπεδο Παραγωγής και Απόρριψης Πλαστικών. 17

1.2 Κατανομή Χρήσης Πλαστικών ανά Τομέα 19

1.2 Διαχείριση Πλαστικών Αποβλήτων 21

1.4 Κατηγορίες Πλαστικών Απορριμμάτων και Τρόποι Ανακύκλωσης. 25

1.4.1 Πρωτογενής Ανακύκλωση. 25

1.4.2 Δευτερογενής Ανακύκλωση 26

1.4.3 Τριτογενής Ανακύκλωση 27

1.4.4 Τεταρτογενής Ανακύκλωση. 28

2 Η Πολυστρωματική Συσκευασία Tetra Pak. 31

2.1 Η Τεχνολογία της Συσκευασίας 32

2.2 Διαχείριση Χρησιμοποιημένων Πολυστρωματικών Συσκευασιών. 34

2.2.1 Διαχείριση χωρίς Υδροπολτοποίηση 35

2.2.2 Διαχείριση έπειτα από Υδροπολτοποίηση. 36

2.2.2.1 Υδροπολτοποίηση 37

2.2.2.2 Ανάκτηση Ενέργειας. 38

2.2.2.3 Ανακύκλωση των Υλικών. 40

3 Επιλεκτική Διάλυση-Ανακαταβύθιση (Ε.Δ.Α.) 45

3.1 Η Μέθοδος. 45

3.2 Κριτήρια Επιλογής Διαλύτη-Αντιδιαλύτη. 46

3.3 Διαλύτες-Αντιδιαλύτες 47

3.3 Περιγραφή Διεργασίας Ε.Δ.Α. 50

3.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Ε.Δ.Α. 52

4 Προσομοίωση Διεργασίας Ανακύκλωσης Πολυστρωματικής Συσκευασίας Tetra Pak 55

4.1 Μέθοδος Ονοματολογίας Διαγράμματος 55

4.2 Ανάλυση Προσομοίωσης Διεργασίας Υδροπολτοποίησης. 56
4.3 Ανάλυση Προσομοίωσης Διεργασίας Επιλεκτικής Διάλυσης/Ανακαταβύθισης. 62
4.4 Ενεργειακή Ανάλυση της Διεργασίας. 65
5 Οικονομική Αξιολόγηση Διεργασίας 69
5.1 Αντιστοίχιση Μηχανολογικού Εξοπλισμού στα Λειτουργικά Στοιχεία της Προσομοίωσης (Mapping) 69
5.2 Υπολογισμός Λειτουργικού Κόστους. 74
5.3 Υπολογισμός Κόστους Ανάκτησης. 77
5.4 Επιλογή Δυναμικότητας Μονάδας 79
5.5 Ανάλυση Προτεινόμενης Δυναμικότητας. 80
5.6 Δείκτες αξιολόγησης επένδυσης. 83
6. Σύνοψη Εργασίας, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα. 87
Βιβλιογραφία 90
Παράρτημα Πινάκων 93

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1 Παγκόσμια και ευρωπαϊκή παραγωγή πλαστικών τα έτη 2016 και 2017. 17

Εικόνα 2 Κατανομή παραγωγής πλαστικών ανά τον κόσμο. 18

Εικόνα 3 Κατανομή μάζας απόρριψης πλαστικών ανά κάτοικο ανά ημέρα. 18

Εικόνα 4 Κατανομή ζήτησης πλαστικών στην Ευρώπη ανά τομέα. 20

Εικόνα 5 Πεδίο χρήσης πολυμερικών υλικών. 21

Εικόνα 6 Ιστορική καταγραφή διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων σε παγκόσμιο επίπεδο. 22

Εικόνα 7 Ποσοστά πλαστικών αποβλήτων που ανακυκλώνονται, χρησιμοποιούνται για ανάκτηση ενέργειας ή οδηγούνται σε ταφή, ανά χώρα Ευρωπαϊκής Ένωσης το έτος 2016. 23

Εικόνα 8 Τάσεις στη διαχείριση πλαστικών αποβλήτων γενικής προέλευσης κατά τα έτη 2006 έως 2016. 24

Εικόνα 9 Τάσεις στη διαχείριση πλαστικών αποβλήτων που προέρχονται από συσκευασίες κατά τα έτη 2006 έως 2016. 24

Εικόνα 10 Οι κατηγορίες ανακύκλωσης μέσα από τη γραμμή επεξεργασίας. 29

Εικόνα 11 Ποσοστιαία κατανομή καθαρών εσόδων της εταιρίας Tetra Pak ανά τον κόσμο και ποσοστιαία κατανομή χρήσης των προϊόντων Tetra Pak. 32

Εικόνα 12 Τα στρώματα της πολυστρωματικής συσκευασίας. 33

Εικόνα 13 Διαγραμματική απεικόνιση διεργασίας υδροπολτοποίησης. 38

Εικόνα 14 Διαγραμματική απεικόνιση διεργασίας επιλεκτικής διάλυσης / ανακαταβύθισης. 51

Εικόνα 15 Διαγραμματική απεικόνιση υδροπολτοποίησης στο λογισμικό Aspen Plus. 57

Εικόνα 16 Διαγραμματική απεικόνιση Ε.Δ.Α. στο λογισμικό Aspen Plus. 62

Εικόνα 17 Διάγραμμα πάγιου κόστους-δυναμικότητας και κόστους ανάκτησης-δυναμικότητας, κόστους παρθένου υλικού 79

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1 Συμβολισμοί για την ονοματολογία εξοπλισμού και ρευμάτων. 55

Πίνακας 2 Ποσότητες και ποσοστά απαιτήσεων σε νερό καθώς και κάλυψης αυτών στον πρώτο υδροπολτοποιητή. 60

Πίνακας 3 Ποσότητες και ποσοστά απαιτήσεων σε νερό καθώς και κάλυψης αυτών στον δεύτερο υδροπολτοποιητή. 60

Πίνακας 4 Ποσότητες απωλειών σε νερό και ποσοστά αυτών επί του συνόλου. 60

Πίνακας 5 Ποσότητες παροχών για την κάλυψη των απωλειών νερού και ποσοστά αυτών επί του συνόλου. 60

Πίνακας 6 Ποσοτική και ποσοστιαία ανάκτηση χαρτιού μετά τα φίλτρα. 61

Πίνακας 7 Σύσταση ρεύματος εξόδου διεργασίας υδροπολτοποίησης που προωθείται για Ε.Δ.Α. 61

Πίνακας 8 Σύσταση ρευμάτων που εισέρχονται σε κάθε κύκλο διάλυσης. 63

Πίνακας 9 Σύσταση ρευμάτων που εξέρχονται από κάθε κύκλο διάλυσης. 63

Πίνακας 10 Σύσταση ρευμάτων εξόδου αποστασκτικής στήλης. 65

Πίνακας 11 Ποσοστά ανάκτησης υλικών. 65

Πίνακας 12 Ενέργεια που καταναλώνεται ανά εξοπλισμό ώστε να μεταβεί ένα ρεύμα από μία θερμοκρασία σε μία άλλη. 66

Πίνακας 13 Θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευμάτων που εναλλάσσονται σε κάθε εναλλάκτη καθώς και η ενέργεια εναλλαγής 67

Πίνακας 14 Κόστη μισθοδοσίας ανά ώρα. 75

Πίνακας 15 Κόστη βοηθητικών ρευμάτων και ρευμάτων ενέργειας. 76

Πίνακας 16 Κόστος ρευμάτων διεργασίας. 77

Πίνακας 17 Κόστος παρθένων υλικών. 77

Πίνακας 18 Αντιστοίχιση δυναμικότητας με συσκευασίες (τεμάχια) αλλά και με αναγκαία κατανάλωση ανά κάτοικο ετήσια. 80

Πίνακας 19 Κόστος εξοπλισμού και συνολικό κόστος εξοπλισμού μετά την εγκατάσταση. 81

Πίνακας 20 Ρυθμός κατανάλωσης βοηθητικών ρευμάτων, ηλεκτρισμού και κόστος αυτών ανά ώρα και ανά έτος 82

Πίνακας 21 Μαζική παροχή ρευμάτων στη διεργασία και κόστος αυτών ανά ώρα και ανά έτος.. 82

Πίνακας 22 Τιμές δεικτών οικονομικής αξιολόγησης. 86

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση των πλαστικών υλικών αυξήθηκε ραγδαία με εφαρμογές σε μεγάλο εύρος πεδίων, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων που εμφανίζουν καθώς και του χαμηλού κόστους αυτών. Σήμερα, η τεράστια παραγωγή και κατανάλωση πλαστικών υλικών δημιουργεί ένα μεγάλο ζήτημα σχετικά με τη διαχείριση των απορριμμάτων αλλά και την ανακύκλωσή τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα της διαχείρισης χρησιμοποιημένων πολυστρωματικών συσκευασιών Tetra Pak και πιο συγκεκριμένα την προσομοίωση διεργασίας για την ανάκτηση των επιμέρους υλικών με τελικό στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη βιωσιμότητα μίας τέτοιας μονάδας, ελέγχοντας τις διάφορες παραμέτρους που την επηρεάζουν.

Η συσκευασία Tetra Pak αποτελείται από στρώματα τριών υλικών, πολυαιθυλενίου (LDPE), χαρτιού και αλουμινίου, τα οποία προσδίδουν στη συσκευασία ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Από τα τρία αυτά υλικά, επί του παρόντος ανακυκλώνεται μόνο το χαρτί, με τη μέθοδο της υδροπολτοποίησης.

Για τον διαχωρισμό και την ανάκτηση του LDPE και του αλουμινίου, στην παρούσα εργασία διερευνάται η μέθοδος της Επιλεκτικής Διάλυσης-Ανακαταβύθισης (Ε.Δ.Α.) με χρήση του συστήματος ξυλένιο/ισοπροπανόλη ως διαλύτη/αντιδιαλύτη. Η προτεινόμενη διεργασία αποτελεί μία δευτερογενή μέθοδο ανακύκλωσης και το κυριότερο θετικό χαρακτηριστικό της είναι η διατήρηση της προστιθέμενης υψηλής αξίας που αποκτά το πολυμερές κατά το στάδιο του πολυμερισμού.

Η προσομοίωση της διεργασίας πραγματοποιήθηκε στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus V8.8. Για τον καθορισμό των συνθηκών λειτουργίας και άλλων παραμέτρων της διεργασίας αξιοποιήθηκαν αποτελέσματα και συμπεράσματα που είχαν προκύψει κατά την πειραματική ανάπτυξη της διεργασίας στο Εργαστηρίου Θερμοδυναμικής & Φαινομένων Μεταφοράς της Σχολής Χημικών Μηχανικών. Πέραν της προσομοίωσης της διεργασίας, πραγματοποιήθηκε και ενεργειακή ολοκλήρωση, προκειμένου να εξασφαλιστεί μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων της διεργασίας.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε οικονομική αξιολόγηση της διεργασίας με χρήση του εμπορικού λογισμικού Aspen Process Economic Analyzer. Για τον σκοπό αυτό, έγινε επιλογή και διαστασιολόγηση του μηχανολογικού εξοπλισμού και εξετάστηκε η μεταβολή του κόστους διαχωρισμού και ανάκτησης των υλικών ως συνάρτηση της δυναμικότητας της μονάδας. Τελικός στόχος ήταν η σύγκριση του κόστους αυτού με τις τιμές των παρθένων υλικών, η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη βιωσιμότητα μίας τέτοιας μονάδας καθώς και η ανάλυση του καταλληλότερου σεναρίου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μελέτη αυτή είναι ενθαρρυντικά. Πιο συγκεκριμένα, για δυναμικότητες διαχείρισης μεγαλύτερες των 17,000 τόνων συσκευασίας ετησίως, το κόστος ανάκτησης των επιμέρους υλικών προκύπτει χαμηλότερο της αξίας των παρθένων υλικών. Επίσης, για δυναμικότητες μεγαλύτερες των 30,000 τόνων ετησίως, η μονάδα παρουσιάζεται βιώσιμη σε οικονομική ανάλυση 10 ετών, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει το επιθυμητό περιθώριο πιθανών πρόσθετων εξόδων που αφορούν τη συλλογή και τη διαλογή των χρησιμοποιημένων συσκευασιών Tetra Pak.

Λέξεις Κλειδιά:

Ανακύκλωση, προσομοίωση, χρησιμοποιημένη συσκευασία Tetra Pak, χαρτί, αλουμίνιο, πολυαιθυλένιο, LDPE, υδροπολτοποίηση , Επιλεκτική Διάλυση - Ανακαταβύθιση (Ε.Δ.Α.), Aspen Plus V8.8, Aspen Process Economic Analyzer

Abstract

During the last decades, the use of plastic materials has been rapidly increased with applications within a wide range of fields due to their exceptional properties and low cost of production. Nowadays, the vast production and consumption of plastic materials creates a big issue regarding the waste management and recycling.

This diploma thesis is dealing with the management of used Tetra Pak multilayer packaging and, in particular, with the simulation of a process for the recovery of individual materials, with ultimate scope the drawing conclusions about the viability of such a unit, by checking the various parameters that affect it.

The Tetra Pak package consists of three materials, LDPE, paper and aluminum, which are placed in layers, giving the packaging special features. Currently the recycling of Tetra Pak packages concerns only the recovery of paper through hydropulping, a method widely used for recycling paper. In this work, for the separation and recovery of LDPE and aluminum, the Selective Dissolution-Precipitation (S.D.P.) method is investigated, employing xylene/isopropanol as Solvent/Antisolvent system. This process is a secondary recycling process and the main positive characteristic is the fact that the added high value, that the polymer acquires during the polymerization stage, is maintained.

The simulation of the whole recycling process (hydropulping and S.D.P) was carried out using the commercial software Aspen Plus V8.8. The selection of the process operational parameters was based on previous study carried out in the Thermodynamics & Transport Phenomena Laboratory concerning the experimental development of the process. Following the simulation of the experimental process, energy integration has been carried out in order to ensure minimization of the process energy requirements.

Finally, an economic evaluation was carried out using the Aspen Process Economic Analyzer commercial software. To this purpose selection and sizing of the most suitable process equipment was carried out and the variation of the total production cost with respect to the unit capacity was examined. The ultimate scope was to compare the cost of the recycled materials to that of the virgin ones, to draw conclusions about the viability of such a unit and analyze the most effective scenario.

The results of this study are encouraging. In particular, for capacities higher than 17,000 tons of used packaging per year, the cost of the recovered materials is lower than the value of virgin ones. In addition, for capacities of more than 30,000 tons per year, the unit is viable in an economic analysis of 10 years, while at the same time there is a desired margin of additional costs for collection and sorting of waste.

Key Words:

Recycling, simulation, used Tetra Pak, Paper, Aluminum, Polyethylene, LDPE, hydropulping, Selective Dissolution - Precipitation (S.D.P.), Aspen Plus V8.8, Aspen Process Economic Analyzer

Εισαγωγή και Σκοπός της Εργασίας

Είναι γεγονός ότι ο τρόπος ζωής των ανθρώπων έχει αλλάξει σημαντικά κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού και η ταυτόχρονη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων σε συνδυασμό με την ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας έχουν επιφέρει όχι μόνο νέες λύσεις αλλά και νέα ζητήματα προς διαχείριση. Προκειμένου να διασφαλιστεί μία βιώσιμη ανάπτυξη, το κόστος αποτελεί το βασικότερο κριτήριο στη λήψη αποφάσεων. Στις επικρατούσες συνθήκες, τα πλαστικά υλικά, ήδη από τον προηγούμενο αιώνα, εισήχθησαν στη ζωή του ανθρώπου και πλέον κατέχουν την πρώτη θέση σχετικά με τις εφαρμογές και τις χρήσεις τους. Τα υλικά αυτά είναι ελαφριά, αδιαπέραστα από υγρά και αέρια, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, καλές μηχανικές ιδιότητες ενώ παράλληλα, αφού παράγονται από παραπροϊόντα διύλισης, παρουσιάζουν χαμηλό κόστος.

Λόγω των ιδιοτήτων που προαναφέρθηκαν, τα πλαστικά αποτελούν τα βασικά υλικά σε τομείς στρατηγικής σημασίας όπως είναι ο τομέας της συσκευασίας, ο κατασκευαστικός, ο τομέας μεταφορών και άλλοι. Η συνεχής αύξηση της παραγωγής και της κατανάλωσης σε συνδυασμό με την μεγάλη διάρκεια ζωής τους εντείνουν το ζήτημα της διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων. Η εσφαλμένη ή και μηδαμινή διαχείριση των απορριμμάτων έχει ως αποτέλεσμα αυτά να αποτελούν τεράστια πηγή ρύπανσης του περιβάλλοντος, αλλά και των ωκεανών, αφού συχνά καταλήγουν εκεί [31]. Για την επίλυση του ζητήματος αυτού αλλά και για να επωφεληθούν οι κοινωνίες από τα πλαστικά απορρίμματα, είναι αναγκαία η προώθηση της πλέον βιώσιμης επιλογής της ανακύκλωσης, κάτι που καθιστά την επιλογή της ενεργειακής ανάκτησης μόνο ως συμπληρωματική και περιορίζει ταυτόχρονα κατά το μέγιστο βαθμό την εναπόθεση των πλαστικών σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Ο τομέας της συσκευασίας παρουσιάζει τεράστια συμβολή στις ποσότητες των πλαστικών απορριμμάτων, αποτελώντας το 40% αυτών, γεγονός που οφείλεται στην ταύτιση του κύκλου ζωής τους με την κατανάλωση του προϊόντος που αυτά συσκευάζουν [2]. Στον τομέα αυτό, ανακύκλωση επιτυγχάνεται κατά βάση σε πλαστικά μπουκάλια, δοχεία και σακούλες, τα οποία αποτελούνται από ένα υλικό. Ωστόσο με την εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας, στις συσκευασίες πλέον χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά, τα οποία απαρτίζονται από περισσότερα από ένα υλικά κατασκευής. Παράδειγμα αποτελούν οι

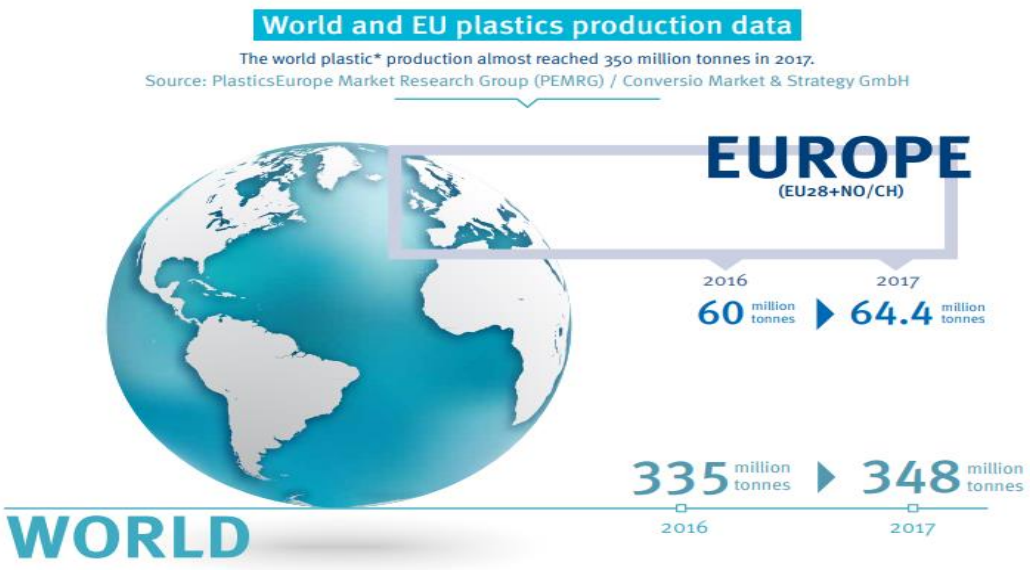
πολυστρωματικές συσκευασίες που βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα των τροφίμων, οι οποίες αποτελούνται από χαρτί, αλουμίνιο και πολυαιθυλένιο. Μέχρι σήμερα, οι εφαρμόσιμες διεργασίες, στις οποίες υπόκεινται οι εν λόγω χρησιμοποιημένες συσκευασίες, αφορούν κυρίως στην ανάκτηση του χαρτιού ενώ τα εναπομείναντα φύλλα αλουμινίου και πλαστικού αξιοποιούνται για την ανάκτηση ενέργειας ή και την ανάκτηση του αλουμινίου. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή προστιθέμενη αξία των πλαστικών, κρίνεται χρήσιμη και ιδιαίτερα σημαντική η ανάπτυξη μεθόδων ανάκτησης και του πλαστικού κλάσματος των εν λόγω συσκευασιών.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιχειρείται η προσομοίωση και η οικονομική αξιολόγηση διεργασίας ανακύκλωσης πολυστρωματικών συσκευασιών Tetra Pak. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πειραματική μελέτη της διεργασίας που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Φαινομένων Μεταφοράς επιχειρείται η αναγωγή μίας παρόμοιας διάταξης σε βιομηχανική κλίμακα, καθώς εξετάζονται οι παράμετροι ώστε αυτή η μονάδα να είναι βιώσιμη. Για τον διαχωρισμό του χαρτιού από τη συσκευασία χρησιμοποιείται η ήδη εφαρμόσιμη, για την ανακύκλωση του χαρτιού, μέθοδος της υδροπολτοποίησης ενώ για τον διαχωρισμό των φύλλων του αλουμινίου από αυτά του πολυμερούς αξιοποιείται η μέθοδος της Επιλεκτικής Διάλυσης-Ανακαταβύθισης, μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό πλαστικών μιγμάτων [18,30] αλλά και την απομάκρυνση επιβλαβών προσθέτων από τα πλαστικά απόβλητα [3].

1 Παραγωγή, Κατανάλωση Πλαστικών και Διαχείριση Πλαστικών Αποβλήτων

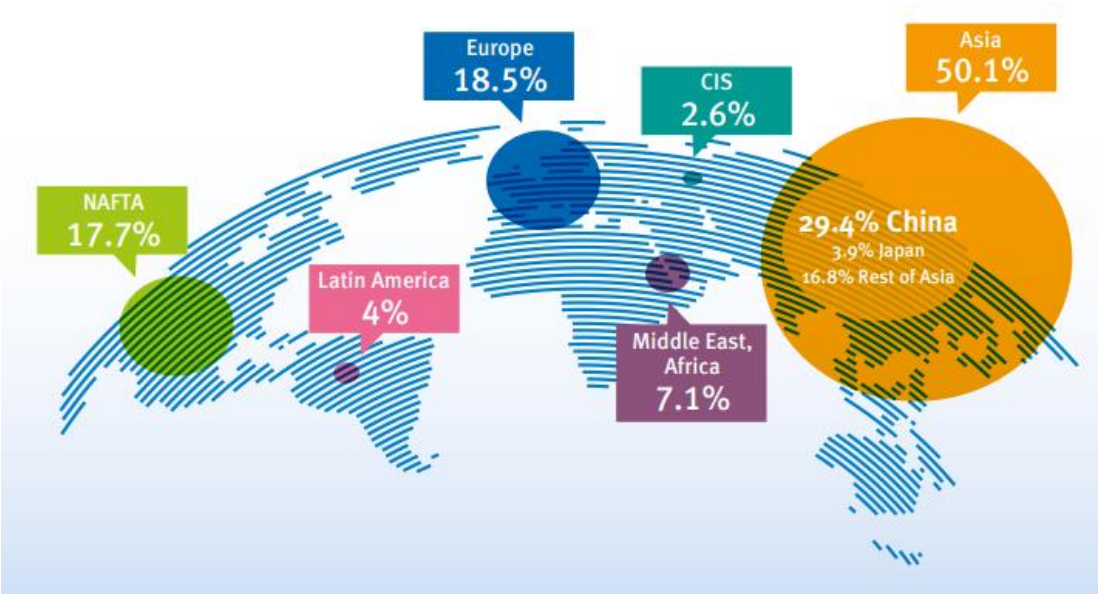
1.1 Παγκόσμιο και Ευρωπαϊκό Επίπεδο Παραγωγής και Απόρριψης Πλαστικών

Τις τελευταίες δεκαετίες, η παραγωγή υλικών από πλαστικό σημειώνει συνεχώς αυξανόμενη πορεία. Από το 1907 που επιτεύχθηκε η παραγωγή του πρώτου σύνθετου πλαστικού υλικού (Bakelite), σηματοδοτείται και η έναρξη της παγκόσμιας βιομηχανίας πλαστικών [1]. Ωστόσο η ανάπτυξη της βιομηχανίας αυτής ακολούθησε μετά τη δεκαετία του 1950, ενώ κατά τα επόμενα 65 έτη η ετήσια παραγωγή πλαστικών αυξήθηκε κατά σχεδόν 200 φορές αγγίζοντας τελικά τους 348 εκατομμύρια τόνους το 2017, πλησιάζοντας περίπου τα δύο τρίτα της μάζας του παγκόσμιου πληθυσμού (εικόνα 1). Μελετώντας την κατανομή της παραγωγής παγκοσμίως, παρατηρείται ότι η Ασία υπερτερεί καθώς θέτει στην αγορά το 50.1% της συνολικής παραχθείσας ποσότητας, ενώ πιο συγκεκριμένα στην Κίνα μεμονωμένα παράγονται ποσότητες της τάξης του 29.4% επί του συνόλου. Δεύτερη θέση στην κατάταξη λαμβάνει η Ευρώπη (18.5%) ενώ ακολουθούν η Βόρεια Αμερική (17,7%), η Μέση Ανατολή (7,1%), η Λατινική Αμερική (4%) και τέλος η Κοινοπολιτεία Ανεξάρτητων Κρατών (2.6%) (εικόνα 2) [2].



Εικόνα 1 Παγκόσμια και ευρωπαϊκή παραγωγή πλαστικών τα έτη 2016 και 2017. (Περιλαμβάνονται θερμοπλαστικά, θερμοσκληρυνόμενα, ελαστομερή, πολυουρεθάνες, κόλλες και ίνες PP ενώ δεν περιλαμβάνονται ίνες PET, PE, PA και πολυακρυλικές ίνες.)

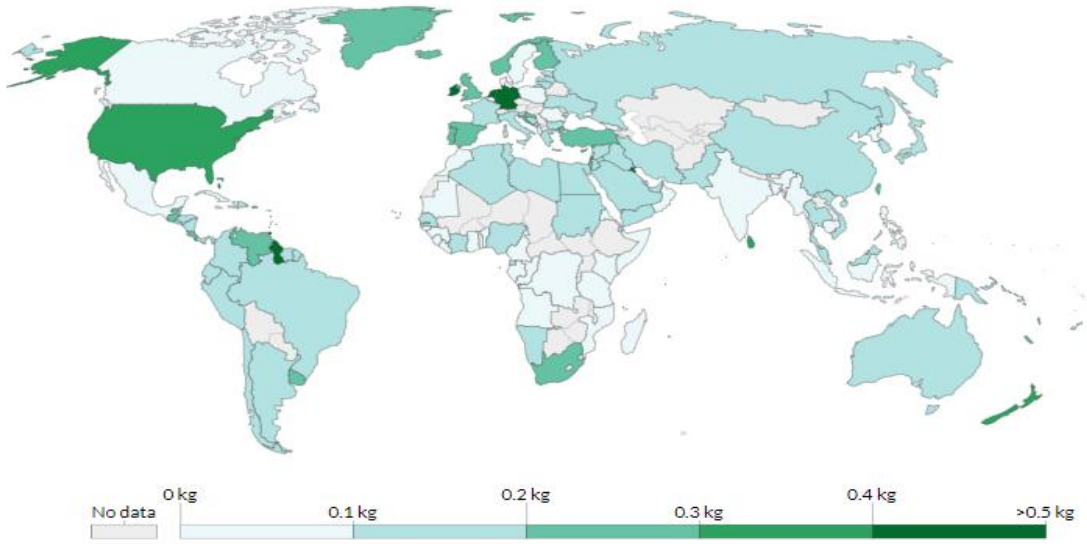
Πηγή: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.



Εικόνα 2 Κατανομή παραγωγής πλαστικών ανά τον κόσμο.

Πηγή: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης τα στατιστικά στοιχεία που σχετίζονται με την κατανομή απόρριψης των πλαστικών ανά χώρα. Πιο συγκεκριμένα στα στατιστικά που αφορούν τη μέση καθημερινή απόρριψη πλαστικών ανά κάτοικο, πρώτη θέση καταλαμβάνει η Συνεργατική Δημοκρατία της Γουιάνας (0.59 Kg/κάτοικο/ημέρα) ενώ ακολουθούν με αντίστοιχη σειρά η Γερμανία (0.49), η Ιρλανδία (0.43), η Σρι Λάνκα (0.36), οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (0.34) και η Νέα Ζηλανδία (0.33) (εικόνα 3) [2].



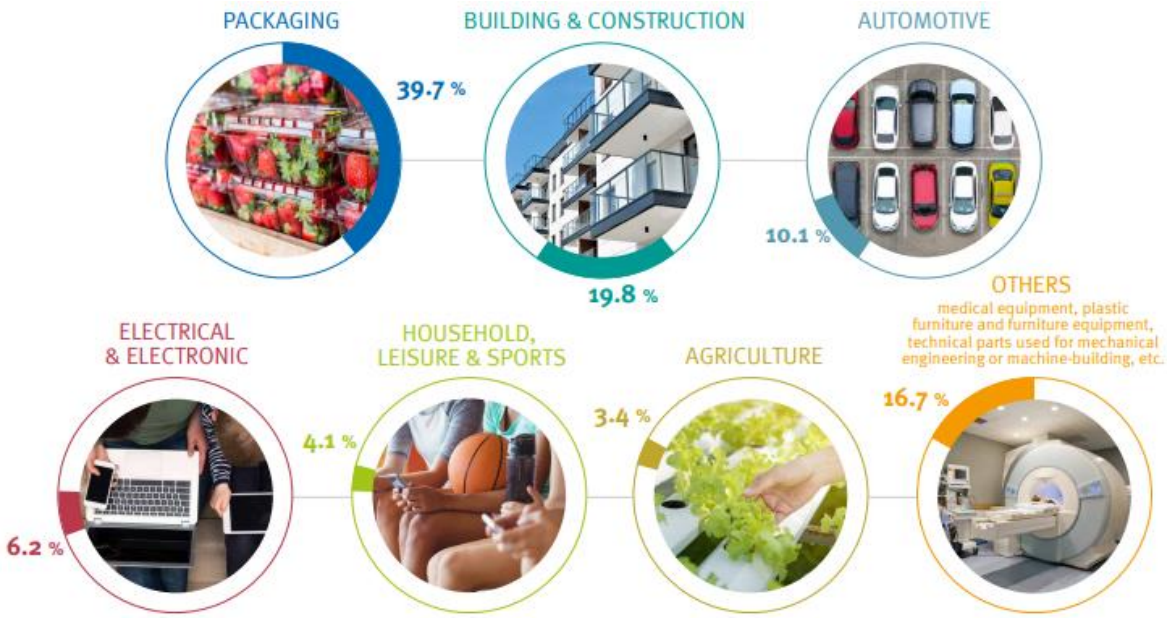
Εικόνα 3 Κατανομή μάζας απόρριψης πλαστικών ανά κάτοικο ανά ημέρα.

Πηγή: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.

1.2 Κατανομή Χρήσης Πλαστικών ανά Τομέα

Τα πλαστικά υλικά, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που εμφανίζουν, βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα τομέων. Πιο συγκεκριμένα, τα υλικά αυτά είναι φθηνά, ελαφριά, δεν διαβρώνονται από τον αέρα και το νερό ενώ δεν προσβάλλονται από οξέα ή βάσεις, δεν άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα και εμφανίζουν ανθεκτικότητα και ελαστικότητα. Για τον λόγο αυτό, βρίσκουν εφαρμογή από τον τομέα της συσκευασίας και της υφαντουργίας έως αυτόν των ηλεκτρονικών και της γεωργίας. Όπως προκύπτει λοιπόν και από έρευνα του Συνδέσμου Παραγωγών Πλαστικών (Association of Plastic Manufacturers) η οποία ανακοινώθηκε το 2018 και αφορά τους τομείς κατανάλωσης πλαστικών κατά το έτος 2017, φαίνεται ότι ο κύριος τομέας κατανάλωσης πλαστικών στην Ευρώπη είναι αυτός της συσκευασίας με ποσοστό 39,7% επί του συνόλου. Ακολουθεί η χρήση στον κατασκευαστικό τομέα, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό και σε άλλους τομείς με τα αντίστοιχα ποσοστά να φαίνονται στην εικόνα 4 [2].

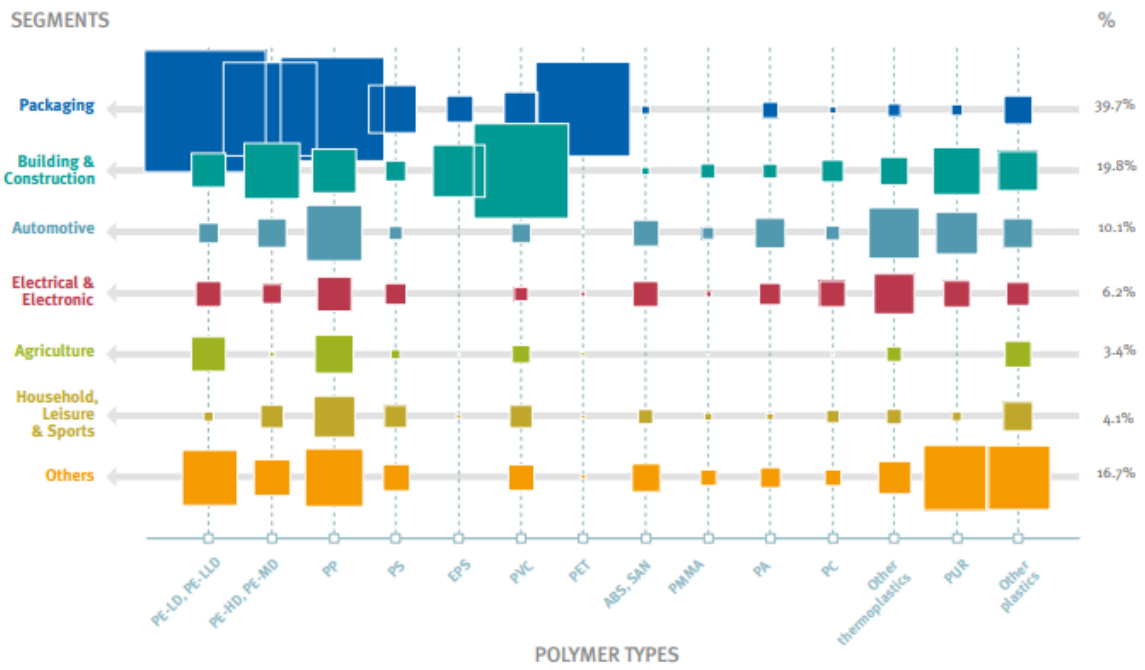
Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι τα ποσοστά ζήτησης αλλά και απόρριψης των πλαστικών εξαρτώνται άμεσα από τον χρόνο ζωής των υλικών κατά τη χρήση τους. Η συσκευασία, για παράδειγμα, παρουσιάζει προσεγγιστικά μέση διάρκεια ζωής περί τους 6 μήνες, ενώ τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα και στη βιομηχανία ολοκληρώνουν τον κύκλο ζωής τους περίπου σε 35 χρόνια. Ως εκ τούτου τα πλαστικά συσκευασίας είναι ο κυρίαρχος παράγοντας πλαστικών απορριμμάτων, συνεισφέροντας κατά 40% περίπου στη συνολική απόρριψη πλαστικών [1].



4 Κατανομή ζήτησης πλαστικών στην Ευρώπη ανά τομέα.

Πηγή: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.

Αναλύοντας περαιτέρω τον τομέα της συσκευασίας, καθώς αυτός αποτελεί την κύρια πηγή χρήσης πλαστικών αλλά και σχετίζεται με το θέμα της παρούσας μελέτης, παρατηρείται ότι χρησιμοποιείται ποικιλία πολυμερικών υλικών. Αυτά, αναφερόμενα με φθίνουσα σειρά ζήτησης και χρήσης είναι το πολυαιθυλένιο (LDPE,LLDPE,HDPE,MDPE), το πολυπροπυλένιο (PP), το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) καθώς και το πολυστυρένιο (PS,EPS). Επίσης στον τομέα αυτόν χρησιμοποιούνται και το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το πολυαμίδιο (PA), η πολυουρεθάνη (PUR) και διάφορα ακόμη θερμοπλαστικά, με μικρότερη ωστόσο συμμετοχή στο συνολικό κλάσμα χρήσης στον τομέα της συσκευασίας (εικόνα 5). Σχετικά με το πολυαιθυλένιο, κατά τη διάρκεια του 2017 απαιτήθηκαν ποσότητες ύψους 15.2 εκατομμυρίων τόνων, έναντι 14.8 το 2016, εκ των οποίων οι 8.7 εκατομμύρια τόνοι αναφέρονται αποκλειστικά σε LDPE. Αυτές οι ποσότητες απαιτήθηκαν ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες τις αγοράς σε προϊόντα όπως δίσκοι και δοχεία γενικού τύπου, αντιδιαβρωτικές επιφάνειες εργασίας, σακούλες, περιτυλίγματα, πολυστρωματικές συσκευασίες και άλλα [2].



Εικόνα 5 Πεδίο χρήσης πολυμερικών υλικών.

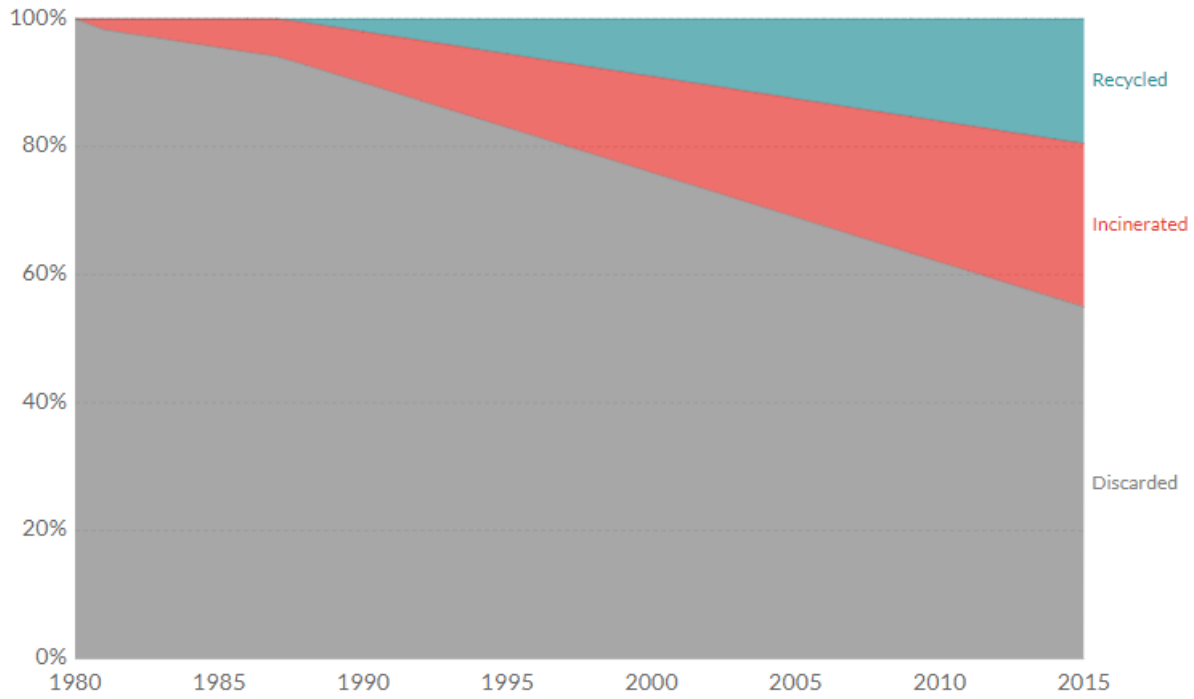
Πηγή: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.

1.2 Διαχείριση Πλαστικών Αποβλήτων

Η κατάσταση στη διαχείριση πλαστικών αποβλήτων έχει αλλάξει με την πάροδο του χρόνου. Πριν από το 1980, η ανακύκλωση και η αποτέφρωση των πλαστικών ήταν αμελητέα, με τη συνολική ποσότητα να απορρίπτεται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Από το 1980, οι ποσότητες τέτοιου είδους που αποτεφρώνονταν αυξάνονταν κατά 0.7% ανά έτος, ενώ παρόμοια αύξηση παρουσίαζε και η ανακύκλωση αλλά από το 1990 και έπειτα (εικόνα 6). Το 2015 εκτιμάται ότι το 55% των πλαστικών αποβλήτων απορρίφθηκε, το 25% αποτεφρώθηκε ενώ το εναπομένον 20% ανακυκλώθηκε. Αξιοποιώντας τα ιστορικά δεδομένα, προσεγγίζεται ότι έως το 2050 τα ποσοστά αποτέφρωσης θα αυξηθούν στο 50% των αποβλήτων, το ποσοστό που ανακυκλώνεται θα ανέλθει στο 44% ενώ τα απόβλητα που απορρίπτονται θα μειωθούν στο 6% του συνόλου [1].

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, το έτος 2016 αποτελεί κομβικό σημείο καθώς για πρώτη φορά τα απόβλητα που αξιοποιήθηκαν με διεργασίες ανακύκλωσης υπερέβησαν αυτά που οδηγήθηκαν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Κατά το έτος αυτό, συγκεντρώθηκαν για διαχείριση ποσότητες αποβλήτων ύψους 27.1 εκατομμυρίων τόνων, εκ των οποίων το 41.6%

αξιοποιήθηκε με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας, το 31.1% ανακυκλώθηκε (το 63% της ποσότητας αυτής ανακυκλώθηκε εντός της Ευρώπης) ενώ το 27.3% οδηγήθηκε σε υγειονομική ταφή [2].

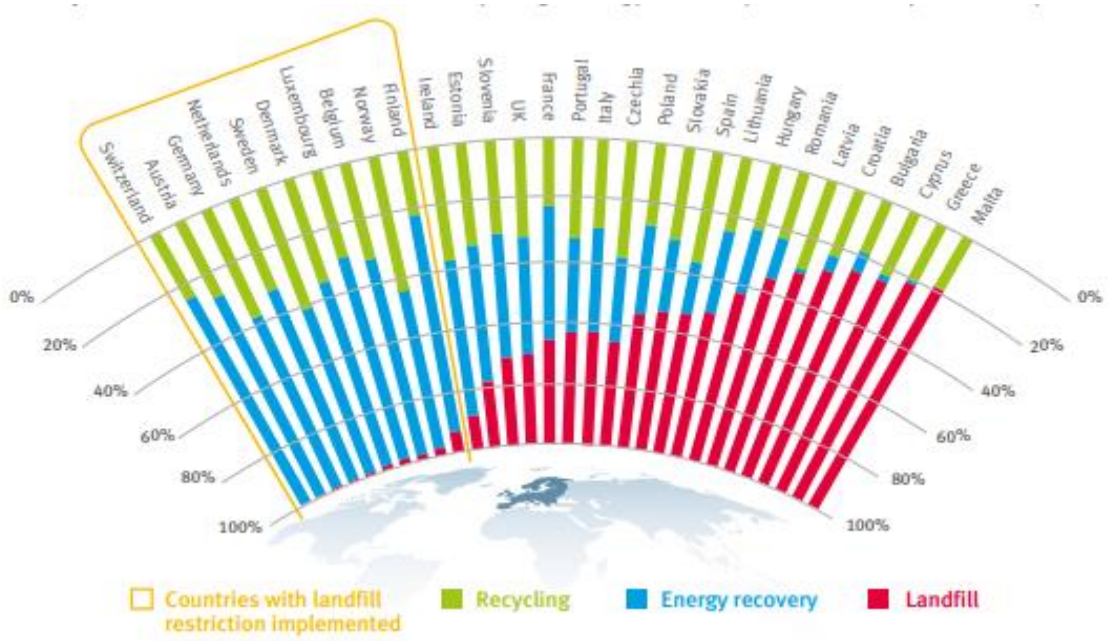


Εικόνα 6 Ιστορική καταγραφή διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων σε παγκόσμιο επίπεδο.

Πηγή: Plastic Pollution by Hannah Ritchie and Max Roser.

Γενικότερα, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 2006-2016, η τάση που επικρατεί στον τομέα διαχείρισης πλαστικών απορριμμάτων παρουσιάζει θετική πορεία. Πιο συγκεκριμένα, ενώ υπήρξε αύξηση στη συνολική συλλογή αποβλήτων κατά 11%, τα απόβλητα που ανακυκλώνονται και χρησιμοποιούνται για ανάκτηση ενέργειας αυξήθηκαν κατά 79% και 61% αντίστοιχα, με ταυτόχρονη μείωση αυτών που οδηγούνται σε υγειονομική ταφή κατά 43% (εικόνα 8). Σε αυτό το γεγονός έχουν συμβάλει οι περιορισμοί που έχουν τεθεί στον τομέα της υγειονομικής ταφής, σε χώρες όπως η Ελβετία, η Αυστρία, η Γερμανία και άλλες. Σε αυτό το πλάνο, η Ελλάδα παρουσιάζεται στην προτελευταία θέση, με το 80% περίπου των αποβλήτων της να καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής και το υπόλοιπο 20% να ανακυκλώνεται. Αξίζει να σημειωθεί πως η Ελλάδα υστερεί σε επίπεδο ανακύκλωσης ενώ φαίνεται να μην αξιοποιεί σχεδόν καθόλου ενεργειακά τα πλαστικά απόβλητά της (εικόνα 7) [2].

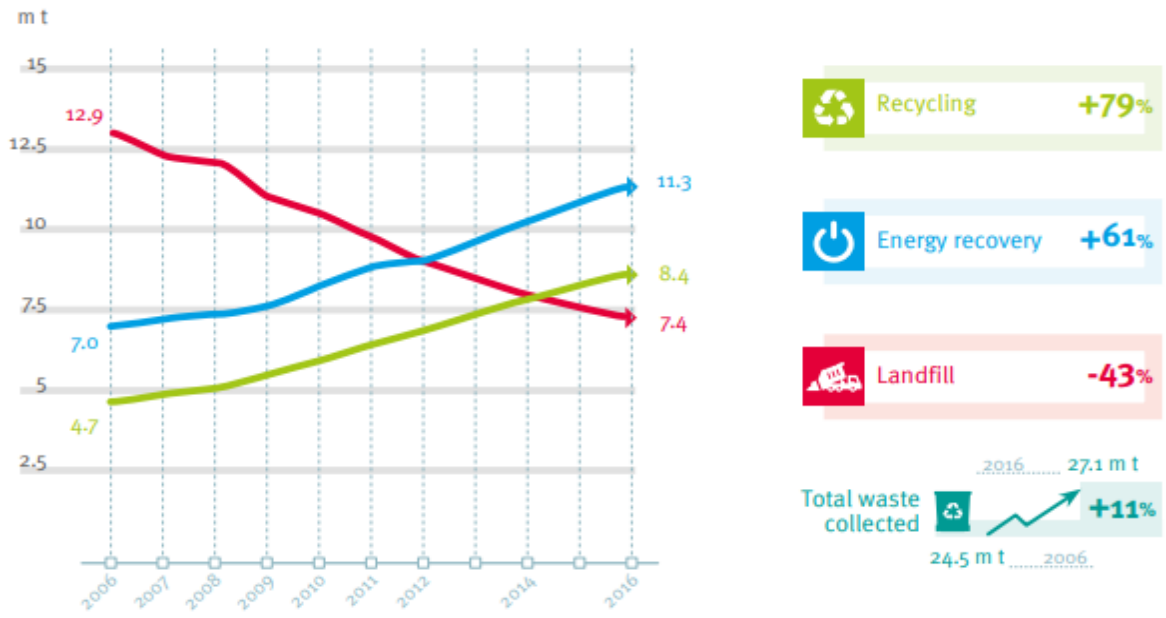
Τα πλαστικά απόβλητα που προκύπτουν από τον τομέα της συσκευασίας παρουσιάζουν καλύτερο βαθμό αξιοποίησης από ότι τα πλαστικά που προκύπτουν από τους διάφορους τομείς γενικότερα. Πιο συγκεκριμένα, κατά το 2016 συλλέχθηκαν 16.7 εκατομμύρια τόνοι απορριμμάτων που προέρχονται από συσκευασίες, εκ των οποίων το 40.8% ανακυκλώθηκε ενώ το 38.8% αξιοποιήθηκε για ανάκτηση ενέργειας. Στον κλάδο αυτό δηλαδή, μόλις το 20.4% οδηγήθηκε σε υγειονομική ταφή με το όμοιο κλάσμα αναφερόμενο στα πλαστικά απορρίμματα γενικότερα να είναι 27.3% όπως προαναφέρθηκε [2].



Εικόνα 7 Ποσοστά πλαστικών αποβλήτων που ανακυκλώνονται, χρησιμοποιούνται για ανάκτηση ενέργειας ή οδηγούνται σε ταφή, ανά χώρα Ευρωπαϊκής Ένωσης το έτος 2016.

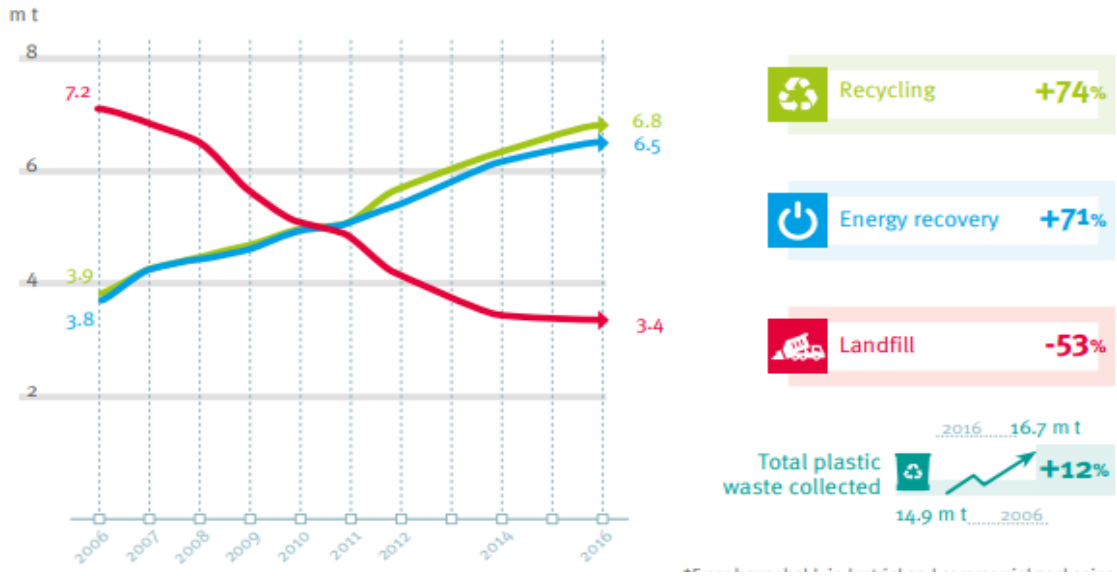
Πηγή: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.

Μελετώντας και πάλι την δεκαετία 2006 έως 2016 στον τομέα της συσκευασίας, παρατηρείται και εδώ ανοδική τάση στα ποσοστά ανακύκλωσης και ενεργειακής ανάκτησης. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια των δέκα αυτών ετών η ποσότητα των απορριμμάτων που συλλέχθηκε αυξήθηκε κατά 12% αλλά η ποσότητα που ανακυκλώνεται αυξήθηκε κατά 74% με το αντίστοιχο ποσοστό που αξιοποιήθηκε για ανάκτηση ενέργειας να αυξάνεται κατά 71%. Τέλος, όπως φαίνεται και στην εικόνα 9 τα ποσά που οδηγούνται σε υγειονομική ταφή μειώθηκαν κατά 53% [2].



Εικόνα 8 Τάσεις στη διαχείριση πλαστικών αποβλήτων γενικής προέλευσης κατά τα έτη 2006 έως 2016.

Πηγή: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.



Εικόνα 9 Τάσεις στη διαχείριση πλαστικών αποβλήτων που προέρχονται από συσκευασίες κατά τα έτη 2006 έως 2016.

Πηγή: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.

1.4 Κατηγορίες Πλαστικών Απορριμμάτων και Τρόποι Ανακύκλωσης

Τα πλαστικά απορρίμματα, ανάλογα με την προέλευσή τους, διαχωρίζονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

- 1η κατηγορία: Πλαστικά υπό μορφή σκραπ (scrap) ή αλλιώς σκάρτου παραγωγής. Τα πλαστικά αυτά μπορούν να ανακυκλωθούν μέσω της διεργασίας από την οποία προήλθαν.
- 2η κατηγορία: Ανάμεικτα φορτία πλαστικού που παρουσιάζουν μόνο πλαστικές προσμίξεις. Αυτά υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία και προορίζονται για διαφορετικές εφαρμογές.
- 3η κατηγορία: Ανάμεικτα φορτία πλαστικού που μπορεί να περιέχουν μη πλαστικές προσμίξεις. Προέρχονται από οικιακά, βιομηχανικά ή και εμπορικά απόβλητα.
- 4η κατηγορία: Καθαρά πλαστικά τυχαίας διαλογής που περιέχουν μολυντές μη πλαστικής προέλευσης. Ανάλογα με την τελική τους εφαρμογή υπόκεινται σε κατάλληλες επιπρόσθετες διεργασίες.

Με παρόμοιο τρόπο, η ανακύκλωση πλαστικών απορριμμάτων διαιρείται σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες ονομαστικά είναι η πρωτογενής, δευτερογενής, τριτογενής και τεταρτογενής ανακύκλωση (εικόνα 10). Αυτές επεξηγούνται και αναλύονται κάτωθι [3,4].

1.4.1 Πρωτογενής Ανακύκλωση

Η πρωτογενής ανακύκλωση ονομάζεται αλλιώς και εσωτερική ή ανακύκλωση κλειστού βρόχου. Κατά τη διεργασία αυτή ανακυκλώνονται με συμβατικές μεθόδους τα προϊόντα τα οποία παρουσιάζουν ελαττώματα, είτε στη μορφή είτε στη σύνθεση, που τα θέτουν εκτός προδιαγραφών, με τελικό σκοπό να προκύψουν άλλα προϊόντα που έχουν ίση αξία με το παρθένο. Καθώς το σκάρτο της παραγωγής προέρχεται από το μητρικό υλικό μπορεί να ανακυκλωθεί εντός των εγκαταστάσεων παραγωγής μέσω πρωτογενών διεργασιών ανακύκλωσης . Στην περίπτωση που το ελάττωμα παρουσιάζεται στη μορφή, ακολουθείται διεργασία κατά την οποία το υλικό τεμαχίζεται και αναμειγνύεται αρχικά με παρθένο, σε αναλογίες που κυμαίνονται από 10% έως 40% κατά βάρος, η οποία αναλογία καθορίζεται με βάση οικονομικούς και τεχνικούς παράγοντες, ώστε να ακολουθήσει μορφοποίηση. Στην

περίπτωση που το ελάττωμα παρουσιάζεται στη σύνθεση, χρησιμοποιούνται τεχνικές ανακύκλωσης ανάμεικτων πλαστικών [4]. Η διεργασία αναφέρεται μόνο σε θερμοπλαστικά υλικά και παρουσιάζει ευκολία και χαμηλό κόστος καθώς τα υλικά συνήθως απλώς μορφοποιούνται εκ νέου. Ωστόσο υπάρχουν προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν από τις αλλεπάλληλες θερμάνσεις και αφορούν χημικές αλλοιώσεις, υποβάθμιση του μοριακού βάρους, υποβάθμιση της αντοχής στον εφελκυσμό και δημιουργία παράγωγων ομάδων καρβονυλίου και υδροξυλίου, η παρουσία των οποίων μειώνει την αντοχή του υλικού σε φαινόμενα οξείδωσης σχετικά με το παρθένο [5].

Η διεργασία αυτή είναι πολύ σημαντική καθώς είναι εύκολη και οικονομική και αφορά το σκάρτο της παραγωγής που ανέρχεται στο 8-9% της συνολικής. Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι έως πρόσφατα τα υλικά αυτά καίγονταν η θάβονταν [6].

1.4.2 Δευτερογενής Ανακύκλωση

Η διεργασία αυτή είναι γνωστή και ως «φυσική» μηχανική ανακύκλωση ή ανακύκλωση μετά τη χρήση. Η δευτερογενής ανακύκλωση αναφέρεται σε καταναλωτικά πλαστικά προϊόντα τα οποία μετά τη χρήση τους απορρίπτονται τυχαία είτε καθαρά είτε ως μίγμα στα στερεά απορρίμματα. Οι κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται τα απορρίμματα που συγκαταλέγονται σε αυτό το είδος επεξεργασίας είναι δύο και συγκεκριμένα οι εξής [4,5]:

- Πλαστικά απορρίμματα που προκύπτουν αφού ολοκληρώσουν τον κύκλο ζωής τους και προέρχονται από διακριτές εφαρμογές (π.χ. απορρίμματα νοσοκομείων, βιομηχανιών, σχολείων, αγροτικών μονάδων).
- Μίγματα πλαστικών απορριμμάτων τα οποία πιθανώς να περιέχουν και μη πλαστικές προσμίξεις με άγνωστη σύσταση(π.χ. απορρίμματα νοικοκυριών).

Κατά τη δευτερογενή ανακύκλωση, παρουσιάζονται αρκετά μειονεκτήματα τα οποία οφείλονται στα διάφορα είδη πλαστικού που περιέχονται στο μίγμα, καθώς και στις μη πλαστικές προσμίξεις (φαγητά, απορρυπαντικά). Προκειμένου να περιοριστούν τα μειονεκτήματα αυτά, επιβάλλεται συχνά καθαρισμός και διαχωρισμός των απορριμμάτων προκειμένου το τελικό προϊόν να παρουσιάζει βελτιωμένες ιδιότητες. Σε περίπτωση που το ανακυκλωμένο προϊόν έχει υποδεέστερες μηχανικές ιδιότητες συγκρινόμενο με το παρθένο υλικό τότε πραγματοποιείται ανακύκλωση ανάμικτων πλαστικών απορριμμάτων. Τα

προϊόντα που προκύπτουν από την επεξεργασία αυτή χρησιμοποιούντα σε εφαρμογές όπου έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις σχετικά με τις αντοχές των υλικών [7].

1.4.3 Τριτογενής Ανακύκλωση

Η επεξεργασία αυτή είναι γνωστή και ως χημική-θερμική ανακύκλωση με ανάκτηση πρώτων υλών. Έχει σαν αποτέλεσμα τη διάσπαση του πολυμερούς στα μονομερή του τα οποία καθαρίζονται και αναπολυμερίζονται ώστε είτε να σχηματίσουν νέα, μη υποβαθμισμένα πολυμερή, έτοιμα να μορφοποιηθούν, είτε να μετατραπούν σε εκμεταλλεύσιμη ενεργειακή μορφή (π.χ. καύσιμες ύλες). Το μεγάλο πλεονέκτημα της τριτογενούς ανακύκλωσης έγκειται στην ισοδυναμία των παράγωγων υλικών σχετικά με τα παρθένα ενώ η κύρια διαφορά που παρουσιάζει η κατηγορία αυτή είναι ότι επεμβαίνει στη χημική δομή του πλαστικού ενώ στις προαναφερθείσες αυτή μένει αναλλοίωτη. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης διαδικασίας συναντάται στο ότι χάνεται η προστιθέμενη αξία που αποκτούν τα πλαστικά κατά τον πολυμερισμό, η οποία ανέρχεται στην τάξη του 50% της αξίας τους. Η τριτογενής ανακύκλωση διακρίνεται σε χημική και θερμική και χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές ώστε να προκύψει διαχωρισμός της πολυμερικής αλυσίδας σε μονομερή. Κάποιες από αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω [7]:

- Αεριοποίηση: Διεργασία κατά την οποία τα μίγματα πλαστικών μετατρέπονται σε αέριο σύνθεσης μέσω υψηλής θερμοκρασίας και ειδικών καταλυτών.
- Αποπολυμερισμός/αποικοδόμηση: Διεργασία θερμικών και μηχανικών απαιτήσεων κατά την οποία διασπάται η πολυμερική αλυσίδα σε άλλες, μικρότερου μοριακού βάρους, οι οποίες επαναχρησιμοποιούνται για τη δημιουργία παρθένων πλαστικών.
- Γλυκόλυση: Χρήση γλυκολών για τη διάσπαση της αλυσίδας των πολυμερών σε μονομερή.
- Διύλιση: Λειτουργία μονάδων στις οποίες τα πλαστικά απορρίμματα μετατρέπονται σε ελαφρά χημικά προϊόντα συγκρίσιμα με αυτά που προκύπτουν από κλασσικές μονάδες διύλισης πετρελαίου.
- Ηλεκτροκινητική αναγέννηση: Διεργασία κατά την οποία πραγματοποιείται χρήση ηλεκτρικού τόξου για τη μετατροπή των πλαστικών απορριμμάτων σε χρήσιμα βιομηχανικά αέρια.

- Καταλυτική διάσπαση: Συνεχής διεργασία η οποία επιτυγχάνει την αποσύνθεση πλαστικών μέσω χρήσης καταλυτών και τη μετατροπή τους σε ελαφριές οργανικές ενώσεις.
- Μεθανόλυση: Χρήση μεθανόλης ώστε να διασπαστεί πλήρως η πολυμερική αλυσίδα με τελικό στόχο την παραγωγή συγκεκριμένου τύπου πλαστικών.
- Πυρόλυση: Διαδικασία αποικοδόμησης πλαστικών απορριμμάτων σε έλαια και αέρια μέσω θέρμανσης, απουσία οξυγόνου και υπό υψηλές θερμοκρασίες.
- Υδρογόνωση (Hydrogenation): Αξιοποίηση υδρογονανθράκων και προσθήκη υδρογόνου σε αυτούς ώστε να δημιουργηθούν παρθένα χημικά προϊόντα υψηλής αξίας.
- Υδρόλυση (Hydrolysis): Χρήση ατμών προκειμένου να διαχωριστεί η πολυμερική αλυσίδα σε μονομερή έτοιμα για πολυμερισμό εκ νέου.

1.4.4 Τεταρτογενής Ανακύκλωση

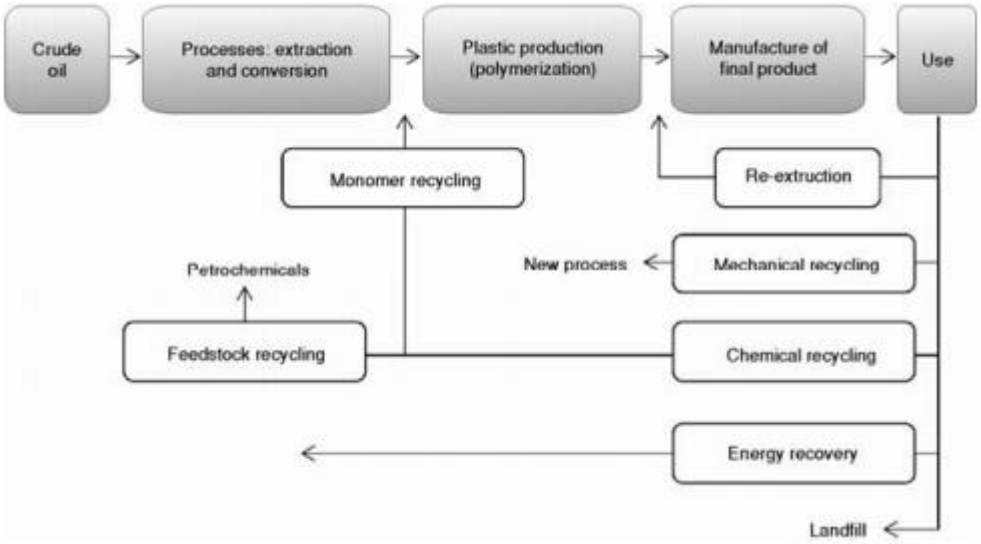
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι διεργασίες κατά τις οποίες επιχειρείται να ανακτηθεί η ενέργεια των πλαστικών μέσω της καύσης τους. Δεδομένου ότι τα πλαστικά υλικά διαθέτουν ιδιαίτερο ενεργειακό περιεχόμενο, αποτελούν πολύτιμη πηγή ενέργειας και η εφαρμογή διεργασιών της κατηγορίας αυτής θεωρείται βέλτιστος τρόπος ανάκτησης της ενέργειας αυτής με ταυτόχρονη μείωση του όγκου των πλαστικών στο 1% του αρχικού. Η θερμότητα που προκύπτει από τη διαδικασία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί ως εναλλακτική λύση έναντι των καύσιμων υλών [5,7].

Η διαδικασία της τεταρτογενούς ανακύκλωσης πραγματοποιείται σε διατάξεις καύσης όπου τα απορρίμματα καίγονται σε καμίνια ή κλιβάνους, κυλινδρικού συνήθως σχήματος. Τα απορρίμματα παραμένουν στους χώρους αυτούς για περίπου μία ώρα σε θερμοκρασία 800 έως 1200° C. Τα απορρίμματα αυτά καθώς συχνά περιέχουν επικίνδυνα βαριά μέταλλα όπως κάδμιο και υδράργυρο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στα καυσαέρια της διάταξης, μέσω των οποίων συμπαρασύρονται και αυτά. Με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος στις διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται ειδικά φίλτρα ώστε να καθαρίζονται τα επικίνδυνα καυσαέρια που προκύπτουν σαν ρεύμα απόρριψης, γεγονός που ανεβάζει τόσο το κόστος εγκατάστασης, όσο και το λειτουργικό κόστος. Οι σύγχρονες διατάξεις που αποσκοπούν στην τεταρτογενή ανακύκλωση αποτελούνται από ειδικά συστήματα καυστήρων

ρευστοποιημένης κλίνης, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται ικανοποιητική ανάκτηση ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα μέσω συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων τελευταίας γενιάς εξασφαλίζεται ο περιορισμός και ο έλεγχος των τοξικών ρύπων [7].

Οι τεχνικές της κατηγορίας αυτής αποτελούν μια εναλλακτική λύση αξιοποίησης πλαστικών αποβλήτων τα οποία είναι ανέφικτο να ανακυκλωθούν με μία από της προαναφερθείσες κατηγορίες ανακύκλωσης. Κύριο θετικό της διαδικασίας αποτελεί η αποφυγή του πολυδάπανου διαχωρισμού πλαστικών αποβλήτων, ενώ τα μειονεκτήματα είναι άνω του ενός. Αρχικά η θεωρητική μέγιστη ανάκτηση κυμαίνεται στο 70-80% του ενεργειακού περιεχομένου, με την πρακτική ανάκτηση να κινείται στο πεδίο 30-40%, καθώς το ποσό ενέργειας που καταναλώνεται κατά το τελικό στάδιο, του πολυμερισμού και της μορφοποίησης χάνεται. Ταυτόχρονα, η καύση των πλαστικών απορριμμάτων δεν είναι αυτάρκης με αποτέλεσμα να απαιτούνται ποσότητες καυσίμων ώστε η ανάκτηση ενέργειας να παραμένει σταθερή. Τέλος, οι αέριοι ρύποι που προκύπτουν είναι επικίνδυνοι και δύσκολα ελέγξιμοι [7].

Οι διάφορες κατηγορίες ανακύκλωσης μέσα από τη γραμμή παραγωγής παρουσιάζονται στο σχήμα 10.



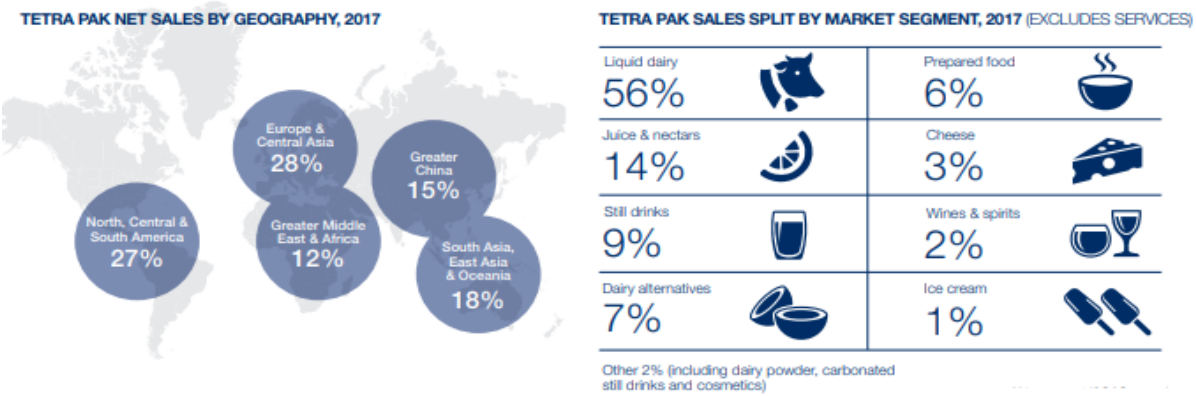
Εικόνα 10 Οι κατηγορίες ανακύκλωσης μέσα από τη γραμμή επεξεργασίας.

Πηγή: Brems, A., Baeyens, J.,& Dewil, R.,(2012). Recycling and recovery of post-consumer plastic solid waste in a European context. Thermal Science, 16(3), 669-685.

2 Η Πολυστρωματική Συσκευασία Tetra Pak

Η εταιρία AB Tetra Pak ιδρύθηκε από τον Ruben Rausing, στο Lund της Σουηδίας το 1951. Αρχικά αποτελούσε θυγατρική της εταιρίας Åkerlund & Rausing ενώ τον Μάιο του ίδιου έτους ανακοινώθηκε και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το νέο αυτό προϊόν συσκευασίας, το οποίο απευθείας κέρδισε τεράστιο ενδιαφέρον από το κοινό [6]. Η πρώτη διάταξη κατασκευής συσκευασιών Tetra Pak παραδόθηκε άμεσα και αφορούσε τον τομέα της γαλακτοκομίας στη Σουηδία, ενώ το παραγόμενο προϊόν ήταν τετραεδρικό, όγκου 100 ml [32]. Εντός των επόμενων χρόνων, η πολυστρωματική αυτή συσκευασία ανέπτυξε ραγδαία τη φήμη της, έχοντας έως το 1964 βιομηχανικές μονάδες τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική, με τις συνολικές ποσότητες παραγωγής να ανέρχονται στα 11.5 δισεκατομμύρια τεμαχίων ανά έτος. Οι πολυστρωματικές συσκευασίες αναφέρονται σε υγρά τρόφιμα όπως χυμούς και γαλακτοκομικά προϊόντα. Αρχικά η συσκευασία αποτελούταν από κερωμένο χαρτί και μόνο μετά το 1969 απέκτησε ασηπτικές ιδιότητες. Σήμερα, πολυστρωματικές συσκευασίες παράγονται από παραπάνω από μία εταιρίες με κύρια ωστόσο την Tetra Pak [8].

Σχετικά με τη μορφή της εταιρίας σήμερα, αυτή αποτελεί μέλος της Tetra Laval, όπως επίσης και οι εταιρίες Sidel και Delaval. Οι εταιρίες αυτές δραστηριοποιούνται σε διαφορετικούς χώρους της αγοράς, με την Sidel να ειδικεύεται στις πλαστικές συσκευασίες υγρών και την Delaval να παράγει προϊόντα σχετιζόμενα με την γαλακτοκομία γενικότερα. Όσον αφορά την μεγαλύτερη εταιρία του ομίλου, την Tetra Pak, έχοντας πλέον εδραιώσει τη θέση της στην αγορά, σημείωσε εντός του έτους 2017 καθαρές πωλήσεις ύψους 11.5 δισεκατομμυρίων ευρώ πραγματοποιώντας πωλήσεις 188 δισεκατομμυρίων τεμαχίων συσκευασίας σε πάνω από 160 χώρες παγκοσμίως. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί και το γεγονός ότι πλέον απασχολεί περίπου 25,000 εργαζόμενους παγκοσμίως. Η εξέλιξη που σημείωσε η εταιρία με την πάροδο του χρόνου οφείλεται όχι μόνο στην αρχική πρωτοποριακή εφεύρεση αλλά και στην εξέλιξη αυτής όπως φαίνεται από τους διάφορους τομείς τροφίμων στους οποίους χρησιμοποιείται πλέον η πολυστρωματική αυτή συσκευασία (εικόνα 11) [8].



Εικόνα 11 Αριστερά: Ποσοστιαία κατανομή καθαρών εσόδων της εταιρίας Tetra Pak ανά τον κόσμο. Δεξιά: Ποσοστιαία κατανομή χρήσης των προϊόντων Tetra Pak.

Πηγή: Tetra Laval Annual report 2017-2108

2.1 Η Τεχνολογία της Συσκευασίας

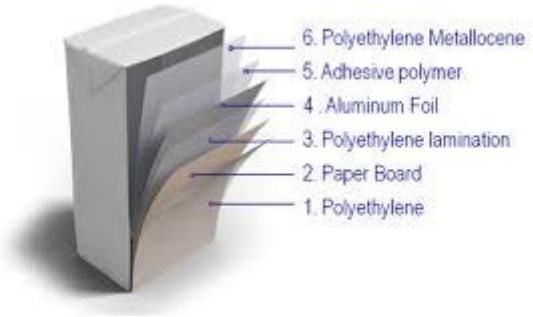
Η πολυστρωματική συσκευασία έχει καταφέρει να κερδίσει σημαντικό έδαφος στον τομέα της συσκευασίας καθώς παρουσιάζει σημαντικά προτερήματα σε σχέση με τις συμβατικές συσκευασίες. Πιο συγκεκριμένα, τη στιγμή που το γυαλί και το πλαστικό δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τις αυξανόμενες απαιτήσεις της αγοράς, η πολυστρωματική συσκευασία παρουσιάζει χαμηλό κόστος συνδυασμένο με ένα προϊόν που είναι αδιαφανές, μη τοξικό, διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία του περιεχόμενου σε αυτή υγρού ενώ διαθέτει ασηπτικές ιδιότητες ακόμη και μετά το άνοιγμα της συσκευασίας κατά την κατανάλωση. Οι ιδιότητες αυτές καθιστούν τη συσκευασία αυτή κατάλληλη για χρήση σε ευρύ φάσμα προϊόντων όπου εκτός από τα τρόφιμα περιέχει φάρμακα, χημικές ουσίες και εμπορεύματα γενικότερα [9].

Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει η πολυστρωματική συσκευασία οφείλονται στον συνδυασμό των διαφόρων υλικών που την απαρτίζουν, έκαστο εκ των οποίων με την ύπαρξή του εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Αναλύοντας λοιπόν μία συσκευασία Tetra Pak και ξεκινώντας από το εξωτερικό της συσκευασίας προς το εσωτερικό παρατηρούνται έξι διαφορετικά επίπεδα-φύλλα (εικόνα 12) [14].

- Το πρώτο στρώμα, που έρχεται και σε επαφή με το περιβάλλον, αποτελείται από πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE) και λειτουργεί ως προστασία και μόνωση

του δεύτερου στρώματος από την υγρασία και τα βακτήρια που υπάρχουν στο περιβάλλον.

- Το δεύτερο στρώμα που αποτελεί και το βασικό υλικό της συσκευασίας, αποτελείται από σκληρό χαρτί. Το στρώμα αυτό εξασφαλίζει τη σκληρότητα και την ανθεκτικότητα της συσκευασίας ενώ ταυτόχρονα, καθώς πάνω σε αυτό έχει προηγηθεί εκτύπωση, παρέχει στον καταναλωτή απαραίτητες πληροφορίες για το προϊόν που περιέχει αλλά και για τη συσκευασία. Η εκτύπωση πέρα από την πληροφόρηση, παρέχει στο προϊόν αισθητική, αυξάνοντας τον αντίκτυπο του προϊόντος στον καταναλωτή.
- Το τρίτο επίπεδο, αποτελείται από χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο και τοποθετείται εκεί προκειμένου να συγκολλήσει την επιφάνεια του χαρτιού με την αμέσως επόμενη επιφάνεια, δηλαδή αυτή του αλουμινόφυλλου.
- Το τέταρτο επίπεδο αποτελείται από αλουμίνιο. Η ύπαρξη αλουμινόφυλλου στη συσκευασία εξασφαλίζει την προστασία του περιέχοντος προϊόντος από την υπεριώδη ακτινοβολία, το οξυγόνο, τις οσμές και τα βακτήρια.
- Το πέμπτο στρώμα της συσκευασίας αποτελείται από LDPE και λειτουργεί και πάλι σαν συγκολλητικό μέσο του αλουμινόφυλλου με το στρώμα που ακολουθεί, ενώ διαχωρίζει το αλουμίνιο από το περιεχόμενο υγρό ώστε να αποφευχθεί η οξείδωση αυτού.
- Τέλος το έκτο στρώμα, αποτελούμενο και πάλι από LDPE, σφραγίζει θερμικά τη συσκευασία προσδίδοντας παραπάνω ασφάλεια στο προϊόν.



Εικόνα 12 Τα στρώματα της πολυστρωματικής συσκευασίας.

Πηγή: Shropshire Master Composters News, 2012

Κατά τη διάρκεια της στρωματοποίησης, τα διάφορα φύλλα συγκολλούνται με μια διαδικασία που ονομάζεται λαμινάρισμα, μία θερμομηχανική διεργασία η οποία περιλαμβάνει την εφαρμογή διαφόρων τιμών θερμοκρασίας και πίεσης στα διάφορα στρώματα. Με τον τρόπο αυτό, μεταξύ των φύλλων δημιουργούνται τόσο φυσικές όσο και χημικές έλξεις. Πιο συγκεκριμένα σχετικά με την πρόσφυση μεταξύ του πολυαιθυλενίου και του αλουμινίου είναι γνωστό ότι τα μόρια του LDPE διεισδύουν στην τραχιά επιφάνεια του αλουμινίου και σχηματίζουν δεσμούς μέσω μηχανικών τάσεων. Ταυτόχρονα, μεταξύ των δύο αυτών στρωμάτων δημιουργούνται και χημικοί δεσμοί επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο ακόμη μεγαλύτερη σταθερότητα [10].

Η τελική συσκευασία που προκύπτει, αποτελείται κατά μέσο όρο από 75% χαρτί, 20% πολυμερές (LDPE) και 5% αλουμίνιο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συσκευασία μπορεί να περιέχει και άλλα πολυμερή όπως υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο στα πώματα των συσκευασιών καθώς και φιλμ PET και PA ως ενίσχυση των άκρων της συσκευασίας [6].

2.2 Διαχείριση Χρησιμοποιημένων Πολυστρωματικών Συσκευασιών

Η διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις χρησιμοποιημένες πολυστρωματικές συσκευασίες δεν αποτελεί μια εύκολη διεργασία. Τα διάφορα υλικά που την απαρτίζουν σε συνδυασμό με την τεχνολογία με την οποία συγκολλούνται μεταξύ τους, απαιτούν ανάπτυξη διεργασίας ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματικός διαχωρισμός των διάφορων στρωμάτων. Η οικονομική αποδοτικότητα μίας τέτοιας διεργασίας καθώς και η συμφωνία της με τους κανόνες της Πράσινης Χημείας, αποτελεί πρόκληση σήμερα.

Οι ήδη υπάρχουσες και εφαρμόσιμες τεχνολογίες που παρουσιάζονται κάτωθι χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν διεργασίες στις οποίες το προς αξιοποίηση υλικό, δηλαδή τα λαμιναρισμένα φύλλα, χρησιμοποιείται ολόκληρο, στη μορφή που βρίσκεται στα απορρίμματα. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν διεργασίες που σαν πρώτο στάδιο περιέχουν τη διεργασία της υδροπολτοποίησης, διαδικασία ευρέως χρησιμοποιούμενη σήμερα για την ανακύκλωση χαρτιού, η οποία στην περίπτωση που μελετάται, χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του στρώματος του χαρτιού από την πολυστρωματική συσκευασία [11].

2.2.1 Διαχείριση χωρίς Υδροπολτοποίηση

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν διεργασίες κατά τις οποίες είτε επιχειρείται ανάκτηση ενέργειας από τα υλικά, είτε χρήση αυτών ως πληρωτικό υλικό σε διάφορες εφαρμογές.

1) *Ανάκτηση Ενέργειας*

Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιείται ανάκτηση ενέργειας από τα υλικά η οποία επιτυγχάνεται με διεργασίες όπως η αποτέφρωση, η αεριοποίηση και η πυρόλυση. Η επεξεργασία των συσκευασιών Tetra Pak με τη μέθοδο αυτή δεν φαίνεται να είναι αρκετά αποδοτική και η αιτία είναι η χαμηλή θερμική αξία κατά την καύση του χαρτιού. Επίσης η παρουσία συχνά υψηλών ποσοστών υγρασίας σε συνδυασμό με τα υψηλά επίπεδα τέφρας ρίχνουν ακόμη περισσότερο την ενεργειακή απόδοση της διεργασίας. Κατά τις διαδικασίες αυτές δεν προηγείται διαλογή των πολυστρωματικών συσκευασιών αλλά αυτά επεξεργάζονται σε συνδυασμό με άλλα στερεά αστικά απόβλητα. Αυτός είναι και ο μόνος λόγος που μπορεί να επιλεχθεί μία τέτοια διαχείριση, καθώς σε περίπτωση που προηγηθεί διαλογή, οπότε προστεθεί στη διεργασία και το κόστος διαλογής, πολύ πιο συμφέρουσες διεργασίες προς αξιοποίηση απορριμμάτων διατίθενται για εφαρμογή [11].

2) *Επαναχρησιμοποίηση Υλικών*

Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται και σε άλλα υλικά και περιλαμβάνει τη χρήση τεμαχισμένης συσκευασίας ως πληρωτικό υλικό σε διάφορες εφαρμογές, στις οποίες κύριο ζητούμενο είναι η χαμηλή τιμή και όχι οι καλές μηχανικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διαδικασία αυτή η συσκευασία τεμαχίζεται σε κομμάτια μήκους 1-5 mm και στα τμήματα αυτά ασκείται πίεση με ταυτόχρονη θέρμανση στους 170°C. Στα τεμάχια αυτά συχνά προστίθενται χαμηλής ποιότητας πολυολεφίνες με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού που προκύπτει, καθώς η ήδη

υπάρχουσα αναλογία πολυμερούς σε αυτό είναι χαμηλή. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει από τη διαδικασία αυτή παρουσιάζει ανθεκτικότητα στο φως και στο νερό ενώ τα επίπεδα ελαστικότητάς του κυμαίνονται και εξαρτώνται από τη διεργασία από την οποία προέκυψαν [12].

Παρά την εύκολη αυτή διεργασία για αξιοποίηση των απορριμμάτων που προκύπτουν από πολυστρωματικές συσκευασίες, ο όγκος των απορριμμάτων που αξιοποιείται με τον τρόπο αυτό είναι αμελητέος σε σχέση με τη συνολική ποσότητα Tetra Pak που απορρίπτεται. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η ύπαρξη υγρασίας ή εναπομενόντων τροφίμων στις συσκευασίες που επιμολύνουν και υποβαθμίζουν ποιοτικά τα υλικά που προκύπτουν. Για τον λόγο αυτό, σε αυτή τη διεργασία θεωρείται καταλληλότερη πρώτη ύλη το υλικό που προκύπτει από τα απορρίμματα των βιομηχανιών κατασκευής πολυστρωματικών συσκευασιών, τα οποία είναι απαλλαγμένα από τέτοιου είδους προσμίξεις. Μερικά παραδείγματα προϊόντων που προκύπτουν από τη διαδικασία αυτή είναι πλακάκια οροφών και απλές σανίδες ενώ στο μέλλον πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και σε οικιακές κατασκευές καθώς πραγματοποιούνται μελέτες σχετικά με την αντίσταση που φέρουν τα υλικά αυτά στην καύση [11].

2.2.2 Διαχείριση έπειτα από Υδροπολτοποίηση

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν πιο εξελιγμένες τεχνολογικά διεργασίες οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον τόσο επιστημονικά όσο και ενεργειακά και οικονομικά. Στις διεργασίες αυτές, το πολυστρωματικό υλικό αποτελείται από αλουμίνιο και πολυμερές, ενώ η μεγαλύτερη ποσότητα χαρτιού έχει απομακρυνθεί μέσω της υδροπολτοποίησης, η οποία παρουσιάζεται κατωτέρω. Η απομάκρυνση του χαρτιού ωφελεί καθώς πλέον μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές είτε για ανάκτηση ενέργειας, όμοιες με αυτές που προαναφέρθηκαν, είτε για ανάκτηση των επιμέρους υλικών ξεχωριστά, τα οποία να είναι ποιοτικά συγκρίσιμα με τα παρθένα [11].

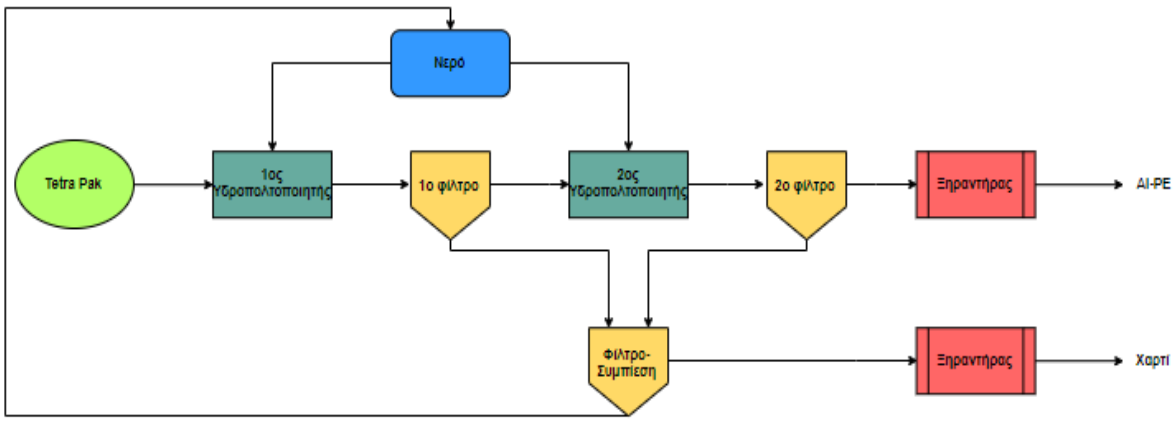
2.2.2.1 Υδροπολτοποίηση

Μέσω της διεργασίας αυτής επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός του χαρτιού από το πλαστικό και το αλουμίνιο και στη συνέχεια η ανάκτηση του χαρτιού σε μορφή χαρτοπολτού υψηλής ποιότητας [13]. Πιο συγκεκριμένα, κατά την υδροπολτοποίηση, τεμαχίζονται αρχικά οι συσκευασίες σε κατάλληλο μέγεθος και τοποθετούνται σε δοχείο υπό την παρουσία νερού θερμοκρασίας συνήθως περί τους 50°C και επιβάλλεται μηχανική ανάδευση [11]. Με την περιστροφή των λεπίδων του αναδευτήρα ωθείται το νερό στις επιφάνειες της τεμαχισμένης συσκευασίας και επιτυγχάνεται διαχωρισμός του χαρτιού από τα υπόλοιπα υλικά καθώς πολτοποιείται. Το χαρακτηριστικό που καθιστά δυνατό τον διαχωρισμό είναι το κατά πολύ μικρότερο μέγεθος των ινών χαρτιού από αυτό των φύλλων πλαστικού και αλουμινίου, τα οποία παραμένουν στο μέγεθος των αρχικών τεμαχίων και τελικά με τη χρήση φίλτρων επιτυγχάνεται η περισυλλογή των φύλλων από τον χαρτοπολτό [14]. Η διεργασία της υδροπολτοποίησης μπορεί να διαρκέσει 30 με 40 λεπτά [13].

Ένας εναλλακτικός τρόπος για την ίδια διεργασία αποτελεί η χρήση συσκευής πλύσης δύο διαμερισμάτων. Η συσκευή αυτή αξιοποιώντας τη φυγόκεντρο επιτυγχάνει τη συγκράτηση του πλαστικού και του αλουμινίου στο εσωτερικό διαμέρισμα ενώ οι ίνες χαρτιού οδηγούνται στο εξωτερικό [15].

Ανάλογα με το σύστημα και τα απαιτούμενα αποτελέσματα μπορεί να χρειαστούν επιμέρους βήματα ή ακόμη και τροποποίηση της διεργασίας. Η περιεκτικότητα του τελικού Al-PE σε ίνες χαρτιού που απομένουν είναι 1-5%. Θεωρώντας τις ίνες αυτές αμελητέες σε σχέση με το συνολικό βάρος του μίγματος Al-PE, προκύπτει ότι η ξηρή μάζα του μίγματος αποτελείται από 14% HDPE (υλικό που χρησιμοποιείται στα καπάκια των συσκευασιών) , 28% PE (εξωτερικό στρώμα) και 58% Al-PE [11]. Παρά το γεγονός ότι το καθαρισμένο από χαρτί υλικό δεν παρουσιάζει πλήρη καθαρότητα θεωρείται ικανό για περαιτέρω επεξεργασία. Θετικό της διεργασίας αποτελεί ο σχετικά απλός μηχανισμός που ακολουθείται και το γεγονός ότι είναι οικονομική. Τα αρνητικά ωστόσο δεν απουσιάζουν καθώς δεν επιτυγχάνεται πλήρης αφαίρεση των ινών του χαρτιού και ταυτόχρονα η διεργασία απαιτεί αρκετό χρόνο για να επιφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα παραπάνω θα αποτελέσουν εμπόδια στη συνέχεια της διεργασίας για την ανάκτηση των υλικών και για την βιωσιμότητα μίας διάταξης με τον σκοπό αυτό.

Αξιοποιώντας τα παραπάνω για την υδροπολτοποίηση προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα ροής (εικόνα 13).



Εικόνα 13 Διαγραμματική απεικόνιση διεργασίας υδροπολτοποίησης.

Η υδροπολτοποίηση αποτελεί το αρχικό στάδιο της διεργασίας που θα ακολουθήσει. Στη συνέχεια τα υλικά που απομένουν, δηλαδή το αλουμίνιο και το πολυαιθυλένιο, είτε αξιοποιούνται για την ανάκτηση της ενέργειάς τους, είτε διαχωρίζονται και επαναχρησιμοποιούνται ως παρθένα υλικά.

2.2.2.2 Ανάκτηση Ενέργειας

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν διεργασίες κατά τις οποίες επιχειρείται να ανακτηθεί μέρος της ενέργειας των υλικών αλλά και ποσότητα των υλικών όταν αυτό είναι εφικτό. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η αποτέφρωση και η πυρόλυση των λαμιναρισμένων φύλλων.

1) *Αποτέφρωση*

Οι τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από τα απορρίμματα αποτελεί μια ευρέως εφαρμοζόμενη λύση στην Ευρώπη. Η κύρια αιτία αυτού είναι οι απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν τα υλικά ώστε να τεθούν υπό επεξεργασία κατά αυτόν τον τρόπο είναι χαμηλές. Σχετικά με το υλικό που μελετάται, τα λαμιναρισμένα φύλλα Al-PE παρουσιάζουν σχετικά υψηλή θερμική αξία, γεγονός που τους επιτρέπει, όταν αναμειχθούν και με άλλα καύσιμα, να αποτεφρώνονται χωρίς ανάγκη πρόσθετης επεξεργασίας.

Η καύση των λαμιναρισμένων φύλλων αποτελεί κατάλληλη επιλογή για τις βιομηχανίες τσιμέντων. Αυτό συμβαίνει καθώς όχι μόνο δεν περιέχονται σε αυτά ανεπιθύμητα στοιχεία όπως είναι το θείο, το άζωτο, το φθόριο, το χλώριο και το βρώμιο, αλλά ταυτόχρονα το Al_2O_3 ,που εμφανίζεται σαν προϊόν, είναι αξιοποιήσιμο από τις βιομηχανίες αυτές. Ωστόσο, καθώς στην Ευρώπη η κατανάλωση τέτοιου είδους καυσίμων έχει φτάσει σε οριακά επίπεδα, τα λαμιναρισμένα φύλλα καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής ή πυρολύονται όπως θα αναφερθεί παρακάτω, αν και εφόσον παραμείνουμε μόνο στην κατηγορία της ανάκτησης ενέργειας [11].

2) *Πυρόλυση*

Η τεχνική της πυρόλυσης αν και θεωρείται πιο αποτελεσματική από την αποτέφρωση, συχνά παρουσιάζει απογοητευτικά αποτελέσματα. Η διεργασία αυτή πραγματοποιείται σε περιβάλλον που απουσιάζει το οξυγόνο ενώ οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 400 έως 800°C [11]. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της πυρόλυσης σήμερα περιλαμβάνει αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης και αντιδραστήρες τύπου κοχλία με υποβοήθεια μικροκυμάτων. Στις συνθήκες αυτές το πολυμερές αποικοδομείται παράγοντας αέρια προϊόντα ενώ οι βαρύτερες ενώσεις που το απαρτίζουν αποτελούν το πυρολιτικό αέριο. Το αέριο αυτό αποτελείται από μεθάνιο, βουτάνιο και υδρογόνο και παρά το ότι είναι δύσκολα διαχειρίσιμο, μπορεί να συμπυκνωθεί και να χρησιμοποιηθεί είτε άμεσα για τη συντήρηση της πυρόλυσης, είτε σαν καύσιμο σε άλλες χρήσεις.

Όσον αφορά το στερεό υπόλειμμα που παραμένει, αποτελείται από ουσία απαλλαγμένη από άνθρακα και περιέχει αλουμίνιο σε ποσοστό περίπου 60%. Ανάλογα με την ποσότητα της υγρασίας και άλλων οξυγονούχων ενώσεων που περιέχονται σε αυτό, το αλουμίνιο οξειδώνεται μερικά και τελικά περίπου η μισή ποσότητα αυτού εμφανίζεται με τη μορφή οξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3), γεγονός που κάνει αδύνατη την ανακύκλωσή του.

Για την ανακύκλωση του αλουμινίου διατίθενται εφαρμόσιμες τεχνικές κατά τις οποίες με αύξηση της θερμοκρασίας στα επίπεδα τήξης του αλουμινίου (2000 ^{O}C)

δημιουργούνται σταγόνες αλουμινίου μεταλλικής φάσης, οι οποίες είναι δυνατόν να ανακυκλωθούν.

Με την εφαρμογή της τεχνικής της πυρόλυσης επιτυγχάνεται μερική ανακύκλωση κάποιων υλικών. Ωστόσο καθώς το πολυμερές καταναλώνεται, χάνεται η υψηλή προστιθέμενη αξία που αποκτά αυτό κατά τη διαδικασία του πολυμερισμού [11].

2.2.2.3 Ανακύκλωση των Υλικών

Στην ανακύκλωση των λαμιναρισμένων φύλλων, ευκολότερη επιλογή αποτελεί η διαμόρφωση αυτών απευθείας σε ένα τελικό προϊόν [11]. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει μεθόδους όπως η θερμική συμπίεση, η έγχυση και η περιστροφική μόρφωση. Οι τεχνικές αυτές χαρακτηρίζονται από ευκολία και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση ενώ τα προϊόντα που προκύπτουν είναι ανομοιόμορφα, όχι ελκυστικά ενώ ταυτόχρονα δεν παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες με αποτέλεσμα να περιορίζονται τα πεδία χρήσης τους. Προκειμένου να εξαλειφθούν τα αρνητικά αυτά χαρακτηριστικά είναι αναγκαίο να διαχωρισθούν τα στρώματα αλουμινίου-πολυαιθυλενίου με τελικό σκοπό την ανάκτηση του μεγαλύτερου ποσοστού αυτών σε μορφή που να ανταγωνίζονται τα παρθένα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τεχνικές που εφαρμόζονται είτε σε πειραματική, είτε σε βιομηχανική κλίμακα, οι οποίες έχουν ως τελικό στόχο τον διαχωρισμό του σύνθετου υλικού και την ανάκτηση των επιμέρους.

1) *Αποκόλληση βασισμένη σε οξέα*

Η αποκόλληση των λαμιναρισμένων φύλλων με τη βοήθεια οξέων αποτελεί την πρώτη τεχνική η οποία εφαρμόζεται σε βιομηχανική κλίμακα στην Κίνα. Κατά τη διεργασία αυτή, φύλλα Al-PE έρχονται σε επαφή με υδατικό διάλυμα μεθανικού οξέος 18% σε θερμοκρασιακά όρια 60 - 80°C. Μετά από λίγο χρόνο και με την επιβολή μηχανικής ανάδευσης τα δύο στρώματα διαχωρίζονται, γεγονός που δικαιολογείται από την μερική αντίδραση του αλουμινίου στην επιφάνεια επαφής [11].

Κατά την πραγματοποιούμενη αντίδραση, το αλουμίνιο καταναλώνεται μερικά, έχοντας έτσι απώλεια 2-4% στο υλικό αυτό σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

$$CH_3COOH \leftrightarrow H^+ + CH_3COO^-$$

$$Al_2O_3 + 6H_3O^+ + 3H_2O \leftrightarrow 2[Al(OH_2)_6]^{3+}$$

Στον παραπάνω ιοντισμό του μεθανικού οξέος παράγονται πρωτόνια τα οποία καταναλώνονται στο δεύτερο στάδιο κατά την αντίδραση του αλουμινίου. Με τον τρόπο αυτό η αντίδραση του ιοντισμού μετατοπίζεται συνεχώς προς τα δεξιά με αποτέλεσμα τον τελικό πλήρη ιοντισμό του μεθανικού οξέος [9].

Στο διάλυμα προστίθεται και ποσότητα νιτρικού οξέος ώστε να ρυθιστεί το pH εντός των επιθυμητών ορίων. Όσο το αλουμίνιο αντιδρά, ο ρυθμός της αντίδρασης μειώνεται με αποτέλεσμα να χρειάζεται συμπλήρωμα φρέσκου οξέος.

Από αυτή τη διεργασία το αλουμίνιο που λαμβάνεται χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα, ενώ αναφορικά με το πλαστικό, το LDPE πιθανόν συναντάται μαζί με άλλα πολυμερή που συμμετέχουν στις πολυστρωματικές συσκευασίες. Η καθαρότητα τόσο του αλουμινίου όσο και του πλαστικού εξαρτάται και από την περιεκτικότητα της πρώτης ύλης (Al-PE) σε ίνες χαρτιού, οι οποίες με την παρουσία τους μπορούν να επηρεάσουν την αξία τους [11].

Θετικό στοιχείο της παραπάνω διεργασίας αποτελούν ο τέλειος διαχωρισμός που επιτυγχάνεται αφού λαμβάνουμε καθαρό αλουμίνιο καθώς και ο μικρός απαιτούμενος χρόνος αφού εκτιμάται ότι απαιτούνται 25 λεπτά. Αρνητικά ωστόσο παρουσιάζονται στο μη καθαρό πλαστικό που λαμβάνεται καθώς και στην επιμόλυνση του όξινου διαλύματος που χρησιμοποιείται τόσο με ίνες χαρτιού και μελάνια όσο και με διαλυμένο αλουμίνιο. Θα πρέπει να ακολουθήσει δηλαδή διεργασία για τον καθαρισμό του διαλύματος ώστε να είναι ικανή η επαναχρησιμοποίησή του σε ένα κλειστό σύστημα.

2) Αποκόλληση βασισμένη σε οργανικούς διαλύτες

Ένας διαλύτης που έχει χρησιμοποιηθεί πειραματικά για τον διαχωρισμό λαμιναρισμένων φύλλων είναι το διάλυμα βενζολίου-αιθανόλης-νερού με αναλογία κατ' όγκο 30%, 20% και 50% αντίστοιχα. Όταν τα τεμαχισμένα φύλλα προστεθούν σε δοχείο παρουσία του παραπάνω διαλύματος και κατόπιν ανάδευσης, αυτά διαχωρίζονται. Η

διεργασία διαχωρισμού διαρκεί 5 λεπτά, εφόσον πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασία 60°C και η ανάδευση έχει ρυθμό 100 rpm. Τα ανακτημένα υλικά έπειτα ξεπλένονται με αιθανόλη για 10 λεπτά και στη συνέχεια με νερό για τον ίδιο χρόνο. Τέλος πραγματοποιείται ξήρανση σε φούρνο στους 60°C για 48 ώρες.

Κατά τη διεργασία, τα λαμιναρισμένα φύλλα διαχωρίζονται σε τρία ξεχωριστά υλικά, το εσωτερικό PE, το αλουμίνιο και το εξωτερικό PE. Μέσω αναλυτικών τεχνικών έγινε σαφές ότι για να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός δεν καταναλώνεται καθόλου αλουμίνιο. Ωστόσο περίπου το 2.5% του PE φαίνεται να χάνεται μέσα στον διαλύτη σε μορφή νιφάδων.

Σχετικά με την καθαρότητα των υλικών μετά τον διαχωρισμό, στην επιφάνεια του PE παρουσιάζονται στοιχεία αλουμινίου και οξυγόνου. Στην επιφάνεια του αλουμινίου επίσης παρουσιάζονται τόσο στοιχεία άνθρακα όσο και οξυγόνου, όπου πιθανώς να εμφανίζουν κάποια χημική ένωση με το αλουμίνιο [10].

Αν και η διεργασία διαχωρισμού είναι σύντομη, η ξήρανση που απαιτείται έχει ενεργειακές απαιτήσεις και ταυτόχρονα είναι χρονοβόρα. Τα υλικά που προκύπτουν φαίνεται ότι δεν είναι πλήρως διαχωρισμένα και ταυτόχρονα ίσως να είναι και ποιοτικά υποβαθμισμένα. Ωστόσο η μέθοδος αυτή βρίσκεται ακόμη υπό διερεύνηση καθώς έχει εφαρμοστεί μόνο σε εργαστηριακή κλίμακα.

3) Αποκόλληση με χρήση χρησιμοποιημένων μαγειρικών ελαίων

Η διεργασία αυτή περιλαμβάνει μία τεχνική για την αποκόλληση των λαμιναρισμένων φύλλων, αφού η συσκευασία έχει ήδη απαλλαγεί από το χαρτί που περιλαμβάνει μέσω της διεργασίας της υδροπολτοποίησης ενώ η διεργασία είναι εφαρμοσμένη μόνο πειραματικά. Το έλαιο που χρησιμοποιείται είναι χρησιμοποιημένο και προέρχεται από λαχανικά *(ρ=0.92 g/ml, v=78 cst, smoke point=285° C).*

Κατά τη διεργασία αυτή αρχικά σε ποτήρι ζέσης προστίθενται το λάδι και τα λαμιναρισμένα φύλλα στους 140° C για 60 λεπτά εκ των οποίων τα 50 λεπτά επιβάλλεται ανάδευση. Λόγω της διαφοράς που υπάρχει στην πυκνότητα, στο άνω μέρος του ποτηριού υπάρχει λάδι και PE ενώ το αλουμίνιο κατακάθεται με λιγότερο λάδι και PE.

Το ελαφρύτερο διάλυμα του λαδιού με το PE διηθείται και το λάδι επαναχρησιμοποιείται για ένα ή ακόμα και δύο θερμικούς κύκλους. Το βαρύτερο κλάσμα

παραμένει στο δοχείο υπό τις ίδιες συνθήκες και αφού το PE διαχωριστεί από το λάδι πλένεται με τρεις διαφορετικούς διαλύτες οι οποίοι είναι η αιθυλική αλκοόλη, το χλωροφόρμιο και η ισοπροπυλική αλκοόλη και έπειτα ακολουθεί βρασμός για μία ώρα. Το αλουμίνιο που μένει πλένεται και αυτό με αιθυλική και ισοπροπυλική αλκοόλη και ακολουθεί και σε αυτό βρασμός για μία ώρα. Αφού πλυθούν τα προϊόντα, το αλουμίνιο και το PE φιλτράρονται ώστε να ελεγχθούν αναλυτικά.

Σχετικά με το ποσοστό ανάκτησης του PE επιτυγχάνεται ανάκτηση του 93% κατά βάρος του αρχικού, εκ του οποίου το 9% θεωρείται ακαθαρσίες. Όσον αφορά το αλουμίνιο, τα ποσοστά ανάκτησης του υλικού αυτού αγγίζουν το 88%, περιέχοντας ωστόσο και ποσότητα διαλύτη σε ποσοστό που ανέρχεται στο 9% της μάζας του [15].

Η διεργασία χρησιμοποιεί ως παροχές δύο χρησιμοποιημένα υλικά ώστε να προκύψουν όσο το δυνατόν καλύτερης ποιότητας, ανακυκλωμένα, τα υλικά μίας συσκευασίας Tetra Pak. Ωστόσο χρησιμοποιείται πλήθος διαλυτών οι οποίοι θα πρέπει να βρεθεί τρόπος να ανακυκλωθούν. Ταυτόχρονα η διεργασία απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες με ταυτόχρονη μη ικανοποιητική καθαρότητα στα τελικά ανακυκλωμένα υλικά.

4) Εκχύλιση LDPE με χρήση διαλύτη

Αποτελεί τη δεύτερη πιο διαδεδομένη τεχνική για την πλήρη ανακύκλωση των υλικών. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη διάλυση του PE σε οργανικούς διαλύτες παρουσία θέρμανσης και στον τελικό διαχωρισμό του από τα αδιάλυτα υλικά όπως είναι το αλουμίνιο, το χαρτί, το PET, το HDPE, το PA καθώς και άμμος ή άλλα συστατικά.

Η μέθοδος αυτή παράγει LDPE με τη μεγαλύτερη δυνατή καθαρότητα σαν κύριο προϊόν καθώς είναι δυνατός ο πλήρης διαχωρισμός των αδιάλυτων συστατικών από το πολυμερές με χρήση φίλτρων. Στη συνέχεια ο διαλύτης που φέρει το πολυμερές μπορεί είτε να ξηρανθεί, είτε να προστεθεί σε αυτόν αντιδιαλύτης ώστε να επιτευχθεί ανάκτηση του διαλυμένου πολυμερούς.

Η ανάκτηση του LDPE από το διάλυμα αποτελεί το πιο απαιτητικό στάδιο της διεργασίας ενεργειακά και τεχνικά. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στις συνθήκες ξήρανσης διότι οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε αποικοδόμηση του

πολυμερούς και συνεπακόλουθη μείωση της οικονομικής αποδοτικότητας της διεργασίας. Αναφορικά με το αλουμίνιο, μετά τη διήθηση του διαλύματος, αυτό μαζί με τα υπόλοιπα στερεά υπολείμματα μπορεί να περιέχει μέχρι και 60% κατά βάρος διαλύτη, ο οποίος απομακρύνεται με ξήρανση. Το ανακτημένο αλουμίνιο μπορεί να προκύψει με διαφορετικά επίπεδα καθαρότητας και εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης όλου του πλαστικού κλάσματος και από τον βαθμό που η τροφοδοσία Al-PE είναι απαλλαγμένη από ίνες χαρτιού [11].

Θετικό της διεργασίας αποτελεί η μεγάλη καθαρότητα που επιτυγχάνεται στο LDPE και με σχετικά απλό μηχανισμό. Αρνητικά ωστόσο εμφανίζονται καθώς αν δε γίνει χρήση αντιδιαλύτη απαιτείται ξήρανση τόσο του πολυμερούς όσο και του αλουμινίου και η διεργασία αυτή έχει υψηλές ενεργειακές αλλά και χρονικές απαιτήσεις.

Στην κατηγορία αυτή, της χρήσης δηλαδή διαλύτη για την ανάκτηση πολυμερούς, ανήκουν πολλές τεχνικές με διάφορα στάδια και διαφορετικές διεργασίες με σκοπό την τελική ανάκτηση όσο το δυνατόν καθαρότερων υλικών χωριστά. Οι μεθοδολογίες αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

3 Επιλεκτική Διάλυση-Ανακαταβύθιση (Ε.Δ.Α.)

3.1 Η Μέθοδος

Η Επιλεκτική Διάλυση-Ανακαταβύθιση (Ε.Δ.Α.) αποτελεί μια τεχνολογία ανάκτησης και διαχωρισμού θερμοπλαστικών υλικών και εντάσσεται στην κατηγορία εκχύλισης πολυμερούς με χρήση διαλύτη. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στη διαφύλαξη της προστιθέμενης αξίας που αποκτά το πλαστικό κατά τη διαδικασία του πολυμερισμού και τελικά στην επαναχρησιμοποίηση των υλικών χωρίς την υποβάθμιση της ποιότητας αυτών [16].

Γενικά, οι τεχνικές που εφαρμόζονται για τον διαχωρισμό των πλαστικών ειδών βασίζονται σε κάποια ιδιότητα τους, η οποία διαφέρει από πλαστικό σε πλαστικό. Τέτοιες ιδιότητες μπορεί να είναι η πυκνότητα, η διαλυτότητα, το χρώμα, το σχήμα και διάφορες φυσικοχημικές ιδιότητες [17].

Η μέθοδος Ε.Δ.Α. εκμεταλλεύεται τη διαφορά διαλυτότητας που παρουσιάζουν τα πολυμερή σε τυπικούς οργανικούς διαλύτες, σύμφωνα με τις συγκεκριμένες συνθήκες που επικρατούν (πίεση, θερμοκρασία). Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, είναι εφικτός ο διαχωρισμός μίγματος πολυμερών στα επιμέρους συστατικά του μέσω της διαδοχικής προσθήκης διαφορετικών διαλυτών ή ακόμη και του ίδιου κάτω από διαφορετικές συνθήκες με σκοπό τη διάλυση και την απομάκρυνση του κάθε πολυμερούς ξεχωριστά [18]. Στη συνέχεια, με προσθήκη αντιδιαλύτη επιτυγχάνεται η καταβύθιση του εκάστοτε πολυμερούς που είναι διαλυμένο. Σημειώνεται ότι η χρήση διάφορων διαλυτών για τη διάλυση των διαφορετικών ρητινών αποφεύγεται όσο είναι δυνατόν λόγω την πολυπλοκότητας που έχει ο χειρισμός τους, ενώ προτιμάται η χρήση ενός διαλύτη και η εφαρμογή μιας αλληλουχίας θερμοκρασιών διάλυσης, με την καθεμία να αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο πολυμερές [19]. Τα στάδια της μεθόδου αυτής παρουσιάζονται παρακάτω συνοπτικά[17,18] :

- Καθαρισμός της τροφοδοσίας μέσω εφαρμογής πλύσεων με νερό και υποβιβασμού μεγέθους με εφαρμογή τεμαχισμού όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο

- Σε κατάλληλο δοχείο, μέσα στο οποίο τοποθετείται ποσότητα της τροφοδοσίας, προστίθεται κατάλληλος διαλύτης που διαλύει επιλεκτικά κάτω από ορισμένες συνθήκες το ζητούμενο πολυμερές
- Χρήση κατάλληλου φίλτρου για τη διήθηση του διαλύματος με σκοπό την απομάκρυνση των αδιάλυτων συστατικών της τροφοδοσίας
- Σε κατάλληλο δοχείο προστίθεται το διάλυμα πολυμερούς και κατάλληλος αντιδιαλύτης με σκοπό την καταβύθιση του πολυμερούς
- Χρήση κατάλληλου φίλτρου για τη διήθηση του διαλύματος που προκύπτει μετά το πέρας της καταβύθισης με σκοπό την απομάκρυνση του πολυμερούς που ανακτάται. Μπορεί να ακολουθήσει και έκπλυση του ανακτημένου πολυμερούς για τον περαιτέρω καθαρισμό του
- Ξήρανση του ανακτημένου πολυμερούς
- Εφαρμογή κατάλληλης μεθόδου (κλασματική απόσταξη) για τον διαχωρισμό του μίγματος διαλύτη – αντιδιαλύτη με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή τους στη διεργασία (ανακύκλωση)

3.2 Κριτήρια Επιλογής Διαλύτη-Αντιδιαλύτη

Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η επιλογή συστήματος διαλύτη/αντιδιαλύτη αποτελεί το κυριότερο στάδιο για έναν καλό διαχωρισμό. Το καταλληλότερο ζεύγος αποσκοπεί στην ανάκτηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερων ποσοστών πλαστικού. Για την επιλογή των ουσιών, λαμβάνονται υπόψη τόσο οι τιμές της παραμέτρου διαλυτότητάς τους όσο και άλλα χαρακτηριστικά όπως είναι το κόστος, η διαθεσιμότητα, η τοξικότητα, η οσμή, η ταχύτητα εξάτμισης, το ιξώδες και η αναφλεξιμότητα [15] . Στην επιλογή του ζεύγους όμως εξετάζονται και άλλα κριτήρια, με κάποια από αυτά να αναφέρονται κάτωθι [18] :

- Ικανότητα διάλυσης του πολυμερούς
- Ρεολογική συμπεριφορά του διαλύματος
- Παραλαβή πολυμερούς σε αποδεκτή μορφή
- Μέγιστη τιμή συγκέντρωσης του διαλύματος

- Κατ΄όγκον αναλογία διαλύματος/αντιδιαλύτη
- Επίπεδα ανάκτησης διαλυτών μέσω κλασματικής απόσταξης

3.3 Διαλύτες-Αντιδιαλύτες

Κατά τη διεργασία αυτή, στη θέση διαλύτη-αντιδιαλύτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες ουσίες. Ακόμη, υπάρχουν περιπτώσεις όπου και τους δύο ρόλους μπορεί να βρίσκεται η ίδια ουσία αλλά με διαφοροποίηση στα χαρακτηριστικά της. Οι πιο σημαντικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στις θέσεις αυτές παρουσιάζονται κατωτέρω.

1) Υπερκρίσιμα υγρά

Υπερκρίσιμα υγρά ονομάζονται οι ουσίες οι οποίες διατηρούνται σε τιμές πίεσης και θερμοκρασίας πάνω από τις κρίσιμες τιμές τους. Το ενδιαφέρον χαρακτηριστικό που εμφανίζουν τα υπερκρίσιμα υγρά και το οποίο τα καθιστά καλούς διαλύτες σε διάφορες εφαρμογές είναι ότι συνδυάζουν το ιξώδες ενός αερίου και την πυκνότητα ενός υγρού. Επιτυχείς εφαρμογές τέτοιων υγρών έχουν πραγματοποιηθεί σε χρήσεις αυτών ως διαλύτες, αντιδιαλύτες ή ακόμη και πλαστικοποιητές σε διεργασίες που αφορούν τα πολυμερή, όπως είναι η τροποποίηση πολυμερών, η ανάμιξη, τα πολυμερικά σύνθετα, η σύνθεση πολυμερών, η διόγκωση πολυμερών, η παραγωγή πολυμερικών σωματιδίων.

Το CO_2 αποτελεί το πιο σύνηθες υπερκρίσιμο υγρό που χρησιμοποιείται ευρέως σε τέτοιες εφαρμογές και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μεταβαίνει εύκολα σε αυτήν την κατάσταση (T_C=304K, P_C=38MPa). Επίσης η απομάκρυνσή του από ένα σύστημα αποτελεί εύκολη διαδικασία καθώς επιτυγχάνεται με απλή αποσυμπίεση. Αποτελεί έναν καθαρό, μη τοξικό, μη εύφλεκτο, χημικά αδρανή και φθηνό διαλύτη. Για τους παραπάνω λόγους γίνεται εύκολα αντιληπτό πως αποτελεί μία ενδιαφέρουσα και πολλά υποσχόμενη λύση σχετικά με την χρήση αυτού έναντι συμβατικών οργανικών διαλυτών [20].

Στην περίπτωση της Ε.Δ.Α. που μελετάται, μία ουσία όπως το υπερκρίσιμο CO_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πολύ λεπτών πολυμερικών σωματιδίων. Κατά τη διαδικασία αυτή, μετά τη διάλυση του πολυμερούς σε κατάλληλο διαλύτη, το διάλυμα που προκύπτει ψεκάζεται σε θάλαμο υψηλής πίεσης ο οποίος περιέχει το υπερκρίσιμο CO_2. Στο

στάδιο αυτό, καθώς υπάρχει μεγάλη επιφάνεια επαφής των σταγονιδίων με το υπερκρίσιμο υγρό, ο διαλύτης διαλύεται σε αυτό με αποτέλεσμα την καταβύθιση του πολυμερούς σε μορφή σκόνης. Διάφοροι παράγοντες σχετικά με τη μορφολογία του πολυμερούς μπορούν να ρυθμιστούν αλλάζοντας μεταβλητές στις συνθήκες της διεργασίας, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και οι συγκεντρώσεις των συστατικών που συμμετέχουν, ο ρυθμός αποσυμπίεσης κ.λπ. Η χρήση υπερκρίσιμου υγρού ως αντιδιαλύτη διευκολύνει καθώς αποφεύγεται η δαπανηρή διαδικασία διαχωρισμού που απαιτείται αν ως αντιδιαλύτης χρησιμοποιηθεί συμβατικός υγρός. Αρνητικό ωστόσο της χρήσης υπερκρίσιμου υγρού σε μία διεργασία βιομηχανικής κλίμακας αποτελεί το γεγονός ότι είναι σχετικά δύσκολο και δαπανηρό καθώς απαιτούνται υψηλές πιέσεις [21].

2) Οργανικοί διαλύτες

Σχετικά με το PE, βιβλιογραφικά είναι γνωστό ότι τόσο το υψηλής όσο και το χαμηλής πυκνότητας διαλύονται στους ίδιους οργανικούς διαλύτες με τη διαφορά ότι για τη διάλυση του HDPE απαιτούνται 20 με 30° C παραπάνω [16]. Πιο συγκεκριμένα το PE διαλύεται σε αρωματικούς, αλειφατικούς, κυκλο-αλειφατικούς υδρογονάνθρακες, σε αλογονωμένους αλειφατικούς εστέρες, σε κετόνες και σε δι-n-αμυλαιθέρες σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 80°C. Αντίστοιχα, αντιδιαλύτες του PE είναι όλοι οι κοινοί οργανικοί διαλύτες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι περισσότεροι πολικοί διαλύτες, ακόμη και σε υψηλότερη θερμοκρασία, αλλά και ανόργανοι διαλύτες.

Ύστερα από πειραματικό έλεγχο, το ξυλόλιο και το τολουόλιο φαίνεται ότι παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα διάλυσης στους 85°C, με το τολουόλιο να προτιμάται λόγω της ταχύτερης διάλυσης αλλά και της δυνατότητας υψηλότερης συγκέντρωσης του διαλύματος σε LDPE (0.3 έναντι 0.2 Kg/L). Ως αντιδιαλύτης, η ακετόνη δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μια άλλη πειραματική έρευνα καταλήγει στα ζεύγη ξυλόλιο/ακετόνη, ξυλόλιο/προπανόλη, ξυλόλιο/προπανόλη-2, με όμοια θερμοκρασία διάλυσης, λαμβάνοντας εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα [11].

3) Πολικά μεταβαλλόμενοι διαλύτες (Switchable hydrophilicity solvents (SHS))

Οι διαλύτες αυτοί μπορούν να συμβάλλουν σε εξαιρετικές βελτιώσεις σχετικά με την ενεργειακή εξοικονόμηση στη μελετώμενη διεργασία και μπορούν να αντικαταστήσουν τους συμβατικούς οργανικούς οι οποίοι είναι πτητικοί, εύφλεκτοι και συχνά τοξικοί. Οι SHS είναι διαλύτες που έχουν την ιδιαιτερότητα να αλλάζουν πολικότητα με προσθήκη κα αφαίρεση CO_2 και έτσι από μη ιοντική μορφή να μετατρέπονται σε ιοντικό υγρό. Αυτή η διαχείριση και εναλλαγή της πολικότητας επιτρέπει τον σχετικά εύκολο διαχωρισμό των SHS από τα ζητούμενα προϊόντα χωρίς την κατανάλωση ενέργειας που απαιτεί η διαδικασία της ξήρανσης. Στον τομέα των πολυμερών, έχει προταθεί η χρήση του πιο αποτελεσματικού διαλύτη τύπου SHS, ο οποίος ονομάζεται DMCHA (N,N-dimethylcyclohexylamine), για την ανάκτηση τόσο πολυστυρενίου όσο και LDPE [22].

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον διαχωρισμό φύλλων Al-PE με τη χρήση DMCHA παρουσιάζεται παρακάτω:

- Υδατικό διάλυμα DMCHA αναμειγνύεται με τα φύλλα σε δεξαμενή κατόπιν θέρμανσης στους 90°C για διάστημα δύο ωρών.
- Το LDPE διαλύεται στον διαλύτη και διαχωρίζεται από το αλουμίνιο που κατακάθεται ως υπόλειμμα.
- Το αλουμίνιο ξεπλένεται με όξινο υδατικό διάλυμα (pH = 5) ώστε να καθαρίσει ο παραμένων διαλύτης.
- Το μίγμα LDPE-DMCHA που προκύπτει μεταφέρεται σε δεξαμενή διπλάσιου όγκου και τοποθετείται σε ψυχρό λουτρό.
- Το ψυχρό πλέον μίγμα τροφοδοτείται με CO_2 σε μορφή φυσαλίδων για 1 ώρα με ταυτόχρονη ανάδευση.
- Με αλλαγή της πολικότητας δημιουργείται διφασικό διάλυμα και συλλέγεται το LDPE καθώς επιπλέει.
- Το LDPE που συλλέγεται ξεπλένεται με το ίδιο διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για τον καθαρισμό του αλουμινίου.
- Τέλος αφαιρείται το CO_2 από τον διαλύτη με θέρμανση στους 40°C και ανάδευση.

Η αρχή της διεργασίας εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η ουδέτερη μορφή του DMCHA έχει χαμηλή πολικότητα και το καθιστά ικανό διαλύτη για το LDPE και έτσι κατά τον διαχωρισμό το αλουμίνιο κατακάθεται ως υπόλειμμα στον πάτο του δοχείου. Μετά την προσθήκη νερού και CO_2 η υψηλή πολικότητα του αμμωνιούχου άλατος που προκύπτει $DMCHAH^+HCO_3^-$ προκαλεί τον διαχωρισμό του άπολου LDPE το οποίο επιπλέει στην κορυφή του δοχείου. Τέλος η αφαίρεση του CO_2 με τον τρόπο που προαναφέρθηκε παράγει και πάλι ουδέτερο DMCHA σε ξεχωριστή φάση από το νερό το οποίο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί στη διεργασία [22].

Η απόδοση σχετικά με την ανάκτηση του LDPE κυμαίνεται από 70 έως 90 % ενώ η επαναφορά του διαλύτη ώστε να επαναχρησιμοποιηθεί ανέρχεται στο 80% του αρχικού. Ωστόσο με προσθήκη υδροξειδίου του καλίου (KOH) και τη διαμόρφωση του pH στις 11 μονάδες η ανάκτηση του διαλύτη βελτιώνεται με το τελικό ποσοστό να είναι 96%. Ο διαλύτης, τέλος, δεν περιέχει ανιχνεύσιμες ακαθαρσίες, γεγονός που τον καθιστά ικανό για χρήση χωρίς περαιτέρω επεξεργασία [22].

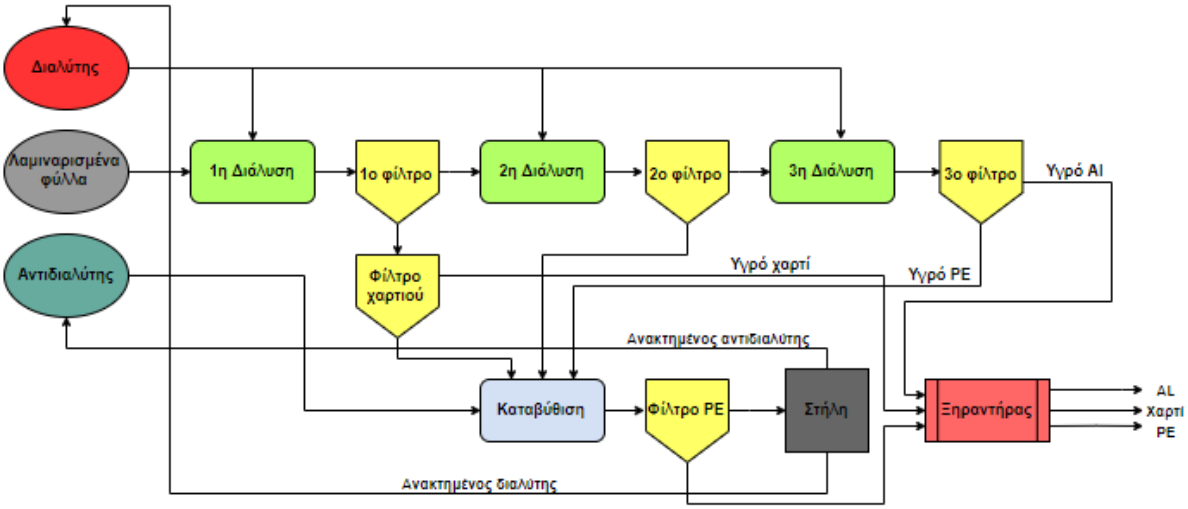
Τέλος οι καθαρότητες που προκύπτουν στα ανακτημένα υλικά είναι ικανοποιητικές καθώς το αλουμίνιο περιέχει πολυμερές σε ποσοστό μικρότερο του 2% κατά βάρος ενώ το μεταλλικό αλουμίνιο (που δεν έχει οξειδωθεί από τη διεργασία) είναι το 86% του ολικού. Επίσης το ανακτημένο LDPE περιέχει 1-2% κατά βάρος DMCHA.

Κύριο θετικό της χρήσης τέτοιου είδους διαλυτών αποτελεί το γεγονός ότι πραγματοποιείται επιλεκτική διάλυση/ανακαταβύθιση στον ίδιο διαλύτη με την προσθήκη και την αφαίρεση διοξειδίου του άνθρακα. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας, καθώς δεν πραγματοποιείται, σε κάποιο στάδιο αυτής, διαχωρισμός υγρών. Επίσης οι καθαρότητες των τελικών υλικών είναι ικανοποιητικές και ταυτόχρονα η ανάκτηση του διαλύτη ικανή ώστε κατά κύριο λόγο να επαναχρησιμοποιείται.

3.3 Περιγραφή Διεργασίας Ε.Δ.Α.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω παρουσιάζεται το προτεινόμενο διάγραμμα με τη διεργασία που ακολουθεί την υδροπολτοποίηση (εικόνα 14):

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διεργασία αυτήν, κατάλληλες ποσότητες λαμιναρισμένων φύλλων Al-PE και διαλύτη τροφοδοτούνται σε δοχείο ανάδευσης κατόπιν θέρμανσης. Το μίγμα θερμαίνεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και αναδεύεται ούτως ώστε να λάβει χώρα η διάλυση του πλαστικού. Με την ολοκλήρωση της διάλυσης το μίγμα φιλτράρεται εν θερμώ σε κατάλληλη σήτα για την απομάκρυνση του αδιάλυτου υλικού (αλουμίνιο-πλαστικό). Το αδιάλυτο υλικό προωθείται σε δεύτερη και στη συνέχεια και σε τρίτη διάλυση ώστε να επιτευχθεί η πλήρης απομάκρυνση του πολυμερούς [6].



Εικόνα 14 Διαγραμματική απεικόνιση διεργασίας επιλεκτικής διάλυσης / ανακαταβύθισης.

Στη συνέχεια, το διήθημα (διαλύτης - πλαστικό) που προέρχεται από τα φίλτρα συλλέγεται στο δοχείο καταβύθισης, παρόμοιο με το δοχείο διάλυσης αλλά μεγαλύτερου όγκου όπου προστίθεται ο αντιδιαλύτης. Καθώς τα λαμιναρισμένα φύλλα περιέχουν ποσότητα χαρτιού που έχει παραμείνει στην επιφάνεια του υλικού ακόμα και μετά τη διεργασία της υδροπολτοποίησης, μετά την πρώτη διάλυση οι ίνες αυτές συνυπάρχουν με το διαλυμένο πολυμερές στο διαλύτη. Για τον λόγο αυτό τοποθετείται φίλτρο στο σημείο αυτό για την απομάκρυνση του χαρτιού. Το δοχείο σφραγίζεται ενώ στο στάδιο αυτό δεν υπάρχουν απαιτήσεις θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα η καταβύθιση να πραγματοποιείται σε συνθήκες περιβάλλοντος. Ακολουθεί η καταβύθιση του πλαστικού σε μορφή λεπτών κόκκων με την στάγδην προσθήκη κατάλληλης ποσότητας αντιδιαλύτη [6].

Έπειτα το μίγμα διηθείται για την ανάκτηση του πλαστικού και την απομάκρυνση του μίγματος διαλύτη – αντιδιαλύτη. Σημειώνεται ότι εφαρμόζεται πίεση στο ανακτημένο πλαστικό για την καλύτερη δυνατή απομάκρυνση του διηθήματος. Τα ανακτημένα υλικά,

σκόνη LDPE και φύλλα αλουμινίου, οδηγούνται σε ξηραντήρα όπου και ξηραίνονται υπό κενό σε συγκεκριμένη θερμοκρασία μέχρι τη σταθεροποίηση της μάζας τους. Σε ξηραντήρα οδηγείται επίσης το χαρτί που απομονώθηκε από το σύνθετο υλικό, ώστε να αφαιρεθεί από αυτό η υγρασία.

Τέλος το μίγμα διαλύτη-αντιδιαλύτη προωθείται για διαχωρισμό σε αποστακτική στήλη για την ανάκτηση αυτών και την επαναχρησιμοποίησή τους σε κλειστό σύστημα. Στο μίγμα αυτό προστίθενται και οι ατμοί που προκύπτουν από την ξήρανση των ανακτημένων υλικών. Μετά τον διαχωρισμό διαλύτη-αντιδιαλύτη, αυτοί οδηγούνται στα ρεύματα τροφοδοσίας ώστε να επαναχρησιμοποιηθούν. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ο διαχωρισμός αυτός δεν είναι απαραίτητο να είναι τέλειος καθώς υπάρχουν περιθώρια ανοχής, στα οποία η ύπαρξη αντιδιαλύτη στον διαλύτη δεν επηρεάζει τη διαδικασία της διαλυτοποίησης [6].

Η εφαρμογή της μεθόδου για την ανάκτηση πολυμερών αναπτύχθηκε από τους Lynch και Neuman το 1994 [23]. Σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε πλαστικά που προκύπτουν από ανάκτηση μέσω της διεργασίας της Επιλεκτικής Διάλυσης/Ανακαταβύθισης με αναλύσεις, τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά. Πιο συγκεκριμένα, έχουν διεξαχθεί έλεγχοι ποιότητας μέσω μέτρησης του μοριακού βάρους, του δείκτη ροής τήγματος (MFI) αλλά και μέσω βαρυμετρικών, χρωματογραφικών και φασματοσκοπικών τεχνικών και τα ανακτημένα πολυμερή παρουσιάζονται ανταγωνιστικά στα παρθένα, τόσο στις κρίσιμες ιδιότητες όσο και στη μορφολογία και στις μηχανικές ιδιότητες. Σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου σε πλαστικά εκτός του LDPE, αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία στο PVC, στο PET, στο PS αλλά και στο PP. Μάλιστα, σε κάποια από τα παραπάνω πλαστικά, η μέθοδος φαίνεται να μην έχει επίδραση στις ιδιότητες των υλικών ακόμα και μετά από δεύτερο κύκλο επεξεργασίας [6].

3.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Ε.Δ.Α.

Όπως όλες οι διεργασίες, έτσι και η Ε.Δ.Α. παρουσιάζει τόσο θετικά όσο και αρνητικά χαρακτηριστικά. Όσον αφορά τα θετικά στοιχεία και ξεκινώντας από τα βασικά, η τροφοδοσία της διεργασίας αυτής δεν είναι απαραίτητο να ταξινομηθεί και μπορεί να περιέχει μίγμα διαφορετικών υλικών συσκευασίας, πολυστρωματικών και μη. Ταυτόχρονα μέσω της μεθόδου αυτής επιτυγχάνεται η μαζική μείωση του όγκου του πολυμερούς, μέσω

της διάλυσής τους στο διαλύτη, η παραλαβή υψηλής ποιότητας πολυμερούς συγκρίσιμης ποιοτικά με τα παρθένα καθώς αφαιρούνται οι ακαθαρσίες ενώ παράλληλα με τα παραπάνω διατηρείται και η υψηλή προστιθέμενη αξία που αποκτά το υλικό κατά τη διαδικασία του πολυμερισμού. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η διεργασία αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τόσο της μηχανικής ανακύκλωσης, όσο και της ανακύκλωσης τροφοδοσίας.

Τα αρνητικά της διεργασίας εντοπίζονται στην ενεργειακή κατανάλωση και τις απώλειες των διαλυτών. Πιο συγκεκριμένα, το ενεργειακό κόστος για την ξήρανση των τελικών υλικών αλλά και για τον διαχωρισμό του διαλύτη από τον αντιδιαλύτη είναι μεγάλο ενώ ταυτόχρονα οι μικρές συγκεντρώσεις που πρέπει να παρουσιάζουν τα δοχεία τόσο κατά την υδροπολτοποίηση όσο και στη διάλυση και στην καταβύθιση, απαιτούν μεγάλο εξοπλισμό και ανάδευση τεράστιας ποσότητας διαλύματος σε σχέση με το προς ανάκτηση υλικό. Ταυτόχρονα, οι χαμηλές συγκεντρώσεις που απαιτούνται οδηγούν σε χρήση μεγάλων ποσοτήτων διαλύτη, αντιδιαλύτη και νερού, οι οποίες συνεπάγονται και μεγάλες απώλειες αυτών και υψηλό κόστος για την αναπλήρωσή τους. Τέλος, τα πολυμερικά συστατικά που δε διαλύονται παραμένουν ως υπολείμματα μικρής αξίας.

4 Προσομοίωση Διεργασίας Ανακύκλωσης Πολυστρωματικής Συσκευασίας Tetra Pak

Αξιοποιώντας τις βιβλιογραφικές πηγές και τις ήδη εφαρμοσμένες τεχνικές, στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Φαινομένων Μεταφοράς του Τμήματος Χημικών Μηχανικών αναπτύχθηκε διεργασία με τελικό σκοπό τον διαχωρισμό των υλικών μιας πολυστρωματικής συσκευασίας. Η διεργασία αυτή έχει σαν πρώτο στάδιο τη διαδικασία της υδροπολτοποίησης και στη συνέχεια εφαρμόζεται η Ε.Δ.Α. για τον διαχωρισμό του LDPE με το αλουμίνιο. Πιο συγκεκριμένα στην προσομοίωση, που βασίζεται στη διεργασία αυτή, εφαρμόζονται δύο κύκλοι υδροπολτοποίησης, ενώ σχετικά με το δεύτερο διαχωρισμό χρησιμοποιούνται τρία δοχεία διάλυσης του LDPE και ένα για την καταβύθιση του πολυμερούς. Το ζεύγος διαλύτη-αντιδιαλύτη που χρησιμοποιείται είναι ξυλένιο-ισοπροπανόλη, τα οποία μετά τη χρήση τους διαχωρίζονται σε αποστακτική στήλη ώστε να ανακτηθούν και να ανακυκλωθούν στη διεργασία.

4.1 Μέθοδος Ονοματολογίας Διαγράμματος

Προκειμένου η ανάγνωση του διαγράμματος να γίνει ευκολότερα κατανοητή, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ονομασίας που ακολουθεί, τόσο για τα ρεύματα όσο και για τον εξοπλισμό (πίνακας 4.1).

Πίνακας 1 Συμβολισμοί για την ονοματολογία εξοπλισμού και ρευμάτων.

Εξοπλισμός	Σύμβολο	Εξοπλισμός	Σύμβολο
Δοχεία	**V**	Υδροπολτοποιητής	**Y**
Εναλλάκτης	**E**	Φίλτρο	**F**
Ξηραντήρας	**D**	Splitter	**S**
Στήλη	**C**		

Συστατικό	Σύμβολο	Συστατικό	Σύμβολο
Αλουμίνιο	**A**	Ξυλένιο	**X**
Ισοπροπανόλη	**I**	Χαρτί	**C**
Νερό	**W**	LDPE	**P**
MIX	**M**		

Με τον τρόπο αυτό ο εξοπλισμός ονομάζεται ως εξής:

$$A_M$$

Όπου:

- **A:** Αναφέρεται στο σύμβολο του μηχανολογικού εξοπλισμού και

- **M:** Αύξων αριθμός εξοπλισμού ανά κατηγορία.

Όμοια η ονομασία των ρευμάτων προκύπτει από δύο σκέλη, το δεύτερο από τα οποία είναι το όνομα του εξοπλισμού όπου αυτό προέρχεται, ενώ το πρώτο προκύπτει σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$A_N$$

Όπου:

- **A**: Το σύμβολο του καθαρού συστατικού στο ρεύμα εάν υπάρχει. Σε περίπτωση που αυτό δεν υπάρχει δηλαδή είναι παραπάνω από ένα, αντί του συμβόλου αυτού χρησιμοποιείται το M όπου δηλώνει μίγμα (MIX).

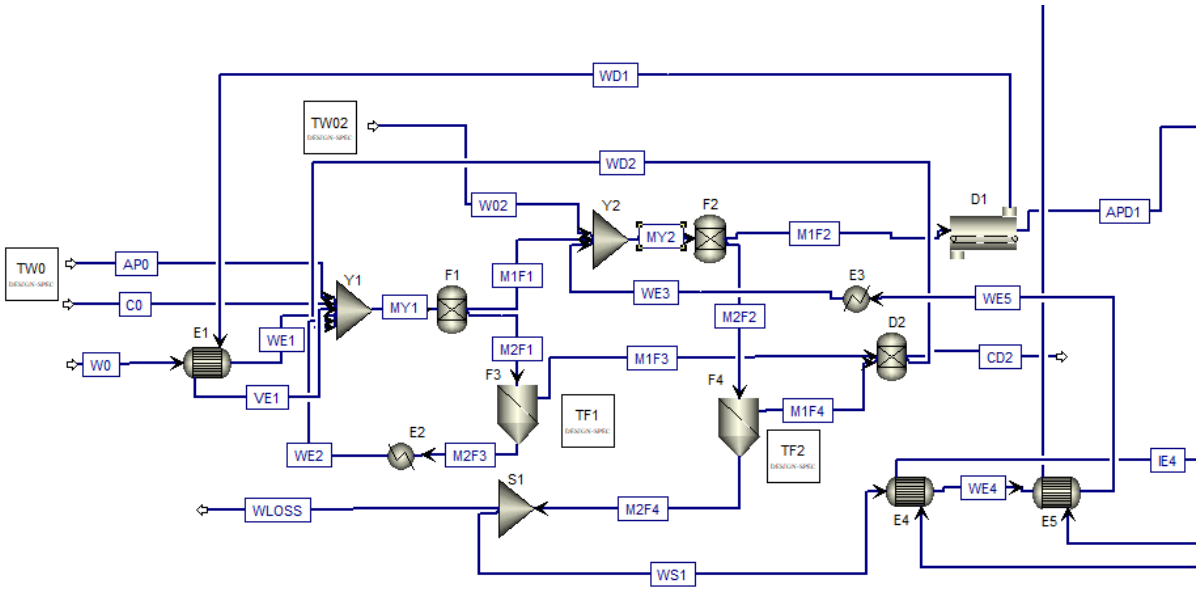
- **N**: Αν υπάρχει, λαμβάνει τιμές 0,1,2 οι οποίες δηλώνουν τροφοδοσία, ρεύμα άνω μέρους φίλτρου και κάτω μέρους αντίστοιχα.

Με τον τρόπο που περιεγράφηκε παραπάνω, παρουσιάζεται το διάγραμμα της διεργασίας που αφορά το τμήμα της υδροπολτοποίησης:

4.2 Ανάλυση Προσομοίωσης Διεργασίας Υδροπολτοποίησης

Το διάγραμμα της διεργασίας ανακύκλωσης συσκευασιών Tetra Pak, όπως προκύπτει (εικόνα 15), θα παρουσιαστεί παρακάτω. Η προσομοίωση αυτής πραγματοποιήθηκε στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus V8.8.. Οι ποσότητες που επιλέχθηκαν ως τροφοδοσία της διεργασίας είναι ενδεικτικές. Πραγματοποιείται διαχωρισμός του διαγράμματος σε δύο επιμέρους τμήματα, της υδροπολτοποίησης και του διαχωρισμού των λαμιναρισμένων φύλλων, καθώς οι διεργασίες αυτές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, με εξαίρεση κάποιες εναλλαγές θερμότητας, όπως θα φανεί από την ανάλυση. Τέλος, οι

απώλειες σε νερό προσομοιώνονται μέσω του ρεύματος W_{LOSS}, καθώς επίσης απώλειες υπάρχουν μέσω του χαρτιού, αφού κατασκευαστικά το χαρτί περιέχει 6% κατά βάρος υγρασία.



Εικόνα 15 Διαγραμματική απεικόνιση υδροπολτοποίησης στο λογισμικό Aspen Plus.

Αρχικά, η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για διάφορες δυναμικότητες προκειμένου να εξαχθεί πιο συμφέρουσα οικονομικά δυναμικότητα, ενώ η σύσταση συμπίπτει με αυτή που δίνεται από την εταιρία και είναι 20% LDPE, 5% Al και 75% χαρτί κατά βάρος. Στο παρόν κεφάλαιο ωστόσο, οι ποσότητες που επιλέχθηκαν ως τροφοδοσία της διεργασίας είναι ενδεικτικές και ανέρχονται στους 24,000 ton/yr. Με θεώρηση ότι το έτος αποτελείται από 8,000 ώρες λειτουργίας, η παροχή συσκευασίας εκφρασμένη ανά ώρα ανέρχεται στα 3,000 kg/hr.

Σχετικά με το νερό που εισάγεται στο σύστημα, βιβλιογραφικές πηγές αναφέρουν ότι η διεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με επάρκεια στην απόδοση με τη μέγιστη συγκέντρωση του χαρτιού στο νερό να είναι 8% κατά βάρος. Ωστόσο καθώς με μεγάλες συγκεντρώσεις χαρτιού η διεργασία γίνεται πιο χρονοβόρα, κατά την εφαρμογή η τιμή αυτή θα είναι πολύ χαμηλότερη [24].Από πειραματικά δεδομένα , σχετικά με την αναλογία αυτή, αναφέρεται ότι για περίπου 500 g υλικού χρησιμοποιούνται 20 L νερό, οπότε προσεγγιστικά

η αναλογία νερού και συσκευασίας στην είσοδο του συστήματος περιγράφεται από την παρακάτω σχέση [6]:

$$\frac{m_{water}}{m_{Tetra-Pack}} = 40$$

Στην είσοδο τα λαμιναρισμένα φύλλα φαίνονται σαν διαφορετικό ρεύμα από το χαρτί καθώς έτσι μόνο είναι εφικτό να τεθεί η διαφορετική κοκομετρία των δύο υλικών η οποία είναι αναγκαία για τον διαχωρισμό μετά την διάλυση του χαρτιού στο νερό.

Όπως φαίνεται λοιπόν παραπάνω, τα δύο υλικά (νερό και συσκευασία) εισέρχονται στον πρώτο υδροπολτοποιητή ώστε να απομακρυνθεί το χαρτί μέσω της μετατροπής του σε χαρτοπολτό. Στη συνέχεια το ρεύμα οδηγείται σε φίλτρο για τον διαχωρισμό του χαρτοπολτού από τα λαμιναρισμένα φύλλα. Βασιζόμενοι και πάλι στα πειραματικά δεδομένα θεωρείται ότι στην πρώτη υδροπολτοποίηση επιτυγχάνεται διάλυση του 80% του συνολικού χαρτιού, ποσότητα που απομακρύνεται παρασυρόμενη από το νερό και οδηγείται σε φίλτρο ώστε να διαχωριστούν οι ίνες, ενώ το υπόλοιπο ρεύμα χρησιμοποιείται για ανακυκλοφορία η οποία εισάγεται και πάλι στον ίδιο υδροπολτοποιητή. Η υγρασία που παρασύρεται με τα λαμιναρισμένα φύλλα θεωρείται ότι οφείλεται μόνο στο χαρτί που παραμένει προσκολλημένο στις επιφάνειες δηλαδή η ποσότητα του νερού στο ρεύμα M_1PF_1 εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{m_{water}}{m_{paper}} = 5$$

Σχετικά με τον διαχωρισμό χαρτιού-νερού θεωρείται ότι το 5% της ποσότητας των ινών στην είσοδο του φίλτρου δεν επιτυγχάνεται να συγκρατηθεί από αυτό ενώ ταυτόχρονα καθώς ασκείται πίεση στη διαδικασία αυτή, η εναπομένουσα υγρασία στο ρεύμα M_1F_3 θα εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{m_{water}}{m_{paper}} = 1$$

Στη συνέχεια, το ρεύμα των λαμιναρισμένων φύλλων οδηγείται σε δεύτερο κύκλο υδροπολτοποίησης, όμοιο με τον πρώτο. Καθώς το υπολειπόμενο προσκολλημένο χαρτί

είναι πολύ λιγότερο σε σχέση με τον πρώτο κύκλο, ενώ ταυτόχρονα η αναλογία νερού προς το συνολικό υλικό παραμένει η ίδια, θεωρείται ότι στο δοχείο αυτό επιτυγχάνεται απομάκρυνση 90% του χαρτιού από τις επιφάνειες των φύλλων στην είσοδο αυτού. Το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος του καθαρισμένου νερού χρησιμοποιείται και πάλι για ανακυκλοφορία, αυτή τη φορά στον δεύτερο υδροπολτοποιητή, ενώ το υπόλοιπο απομακρύνεται, προσομοιώνοντας έτσι τις απώλειες που θα είχε μία τέτοια διεργασία με ανοιχτά δοχεία. Μέσω της ανακυκλοφορίας αυτής καλύπτονται οι συνολικές ανάγκες σε νερό που έχει ο δεύτερος κύκλος υδροπολτοποίησης και έτσι η ποσότητα του νερού που χάνεται στο σύστημα, συμπληρώνεται μέσω της τροφοδοσίας W_0.

Τέλος, τόσο το χαρτί όσο και τα λαμιναρισμένα φύλλα οδηγούνται σε ξηραντήρες με σκοπό οι τελικές τους υγρασίες να είναι 6% και 0% κατά μάζα αντίστοιχα. Το νερό που απομακρύνεται από τις ξηράνσεις αυτές χρησιμοποιείται για ανακυκλοφορία.

Όσον αφορά το νερό, η εξισορρόπηση των απωλειών επιτυγχάνεται μέσω προσθήκης φρέσκου νερού στην αρχή της διεργασίας (W_0) ενώ οι υπόλοιπες απαιτήσεις του συστήματος καλύπτονται από τις ανακυκλοφορίες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, κατά τον κύκλο της πρώτης υδροπολτοποίησης, η ποσότητα του νερού που ανακυκλοφορεί προέρχεται από τον ίδιο υδροπολτοποιητή αλλά και από τους ξηραντήρες D_1, D_2. Ωστόσο καθώς οι ίνες χαρτιού που συγκρατούνται στο φίλτρο F_3 παρασύρουν και ποσότητα νερού, υπάρχει ανάγκη επιπλέον ποσότητας, η οποία παρέχεται στο σύστημα μέσω του ρεύματος W_0. Σχετικά με τον δεύτερο κύκλο υδροπολτοποίησης, οι απαιτήσεις σε νερό καλύπτονται σχεδόν πλήρως από ανακυκλώσεις, αφού στον υδροπολτοποιητή αυτό καταλήγουν τα ρεύματα νερού που προκύπτουν από το φίλτρο F_4, από την υγρασία που παραμένει στα λαμιναρισμένα φύλλα κατά το πρώτο φιλτράρισμα στη θέση F_1 καθώς προστίθεται και πολύ μικρή ποσότητα, για λόγους σύγκλισης της προσομοίωσης μέσω της παροχής W_{02}.

Πίνακας 2 Ποσότητες και ποσοστά απαιτήσεων σε νερό καθώς και κάλυψης αυτών στον πρώτο υδροπολτοποιητή.

Όνομα ρεύματος	Νερό (kg/hr)	Ποσοστό % απαιτήσεων συστήματος σε νερό
MY_1	150000	100
VE_6	292.5	0.195
W_0	2172.2	1.448
WD_2	2574.3	1.716
WE_2	144961	96.641

Πίνακας 3 Ποσότητες και ποσοστά απαιτήσεων σε νερό καθώς και κάλυψης αυτών στον δεύτερο υδροπολτοποιητή.

Όνομα ρεύματος	Νερό (kg/hr)	Ποσοστό % απαιτήσεων συστήματος σε νερό
MY_2	60937.5	100
M_1F_1	2812.5	4.615
W_{02}	2.793	0.005
W_{E3}	58122.2	95.380

Πίνακας 4 Ποσότητες απωλειών σε νερό και ποσοστά αυτών επί του συνόλου.

Όνομα ρεύματος	Νερό (kg/hr)	Ποσοστό % απώλειας νερού
W_{LOSS}	1998.972	91.907
CD_2	176.021	8.093

Πίνακας 5 Ποσότητες παροχών για την κάλυψη των απωλειών νερού και ποσοστά αυτών επί του συνόλου.

Όνομα ρεύματος	Νερό (kg/hr)	Ποσοστό % συμπλήρωσης απώλειας νερού
W_0	2172.2	99.872
W_{02}	2.793	0.128

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι το ποσό του νερού που εισάγεται εκ νέου στη διεργασία είναι της τάξης του 1.5% επί των απαιτήσεων του συστήματος σε αυτό (Make up τροφοδοσία) και στην ουσία εξισορροπεί τις απώλειες που φαίνονται στις δύο τελευταίες στήλες. Στο τελευταίο ρεύμα συγκεκριμένα, φαίνεται η υγρασία που περιέχεται στο παραγόμενο χαρτί η οποία είναι 6% ως προς τη συνολική μάζα του χαρτιού. Τα ρεύματα WE_3, WD_1 είναι αυτά που ανακυκλώνονται ώστε να επιτευχθεί η κατά το δυνατό μικρότερη αναπλήρωση νερού.

Σχετικά με το χαρτί που εισάγεται στο σύστημα αλλά και το ποσοστό ανάκτησης που επιτυγχάνεται, τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 6).

Πίνακας 6 Ποσοτική και ποσοστιαία ανάκτηση χαρτιού μετά τα φίλτρα.

Όνομα ρεύματος	Χαρτί (kg/hr)	Ποσοστό ως προς συνολικό χαρτί (%)
C_0	2250.00	100.00
M_1F_3	1781.25	79.17
M_1F_4	419.01	18.62
C_2	2200.26	97.79

Όπως φαίνεται, από το χαρτί που εισάγεται, το 79.2% περίπου πολτοποιείται και δεσμεύεται στο πρώτο φίλτρο, ενώ το υπόλοιπο 18.6% απομακρύνεται στο δεύτερο φίλτρο. Μέσω των ανακυκλώσεων που χρησιμοποιούνται, καθώς περιέχουν υπολείμματα ινών χαρτιού επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση απομάκρυνσης των φίλτρων από αυτή που αναφέρθηκε παραπάνω (95%) και τελικά προκύπτει ανάκτηση 97.79% του χαρτιού που περιέχει η συσκευασία στην είσοδο. Η ποσότητα του χαρτιού που δεν ανακτάται, θεωρείται ότι παραμένει προσκολλημένη στις επιφάνειες των αλουμινόφυλλων. Κατά τη διεργασία του διαχωρισμού, καθώς διαλύεται το LDPE όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, οι ίνες τελικά διαχωρίζονται από το υλικό και ανακτώνται σε δεύτερη φάση. Ωστόσο, αντί υγρασίας πλέον θα περιέχουν μίγμα διαλύτη-αντιδιαλύτη με αποτέλεσμα το συγκεκριμένο ρεύμα να θεωρείται ρεύμα απόρριψης.

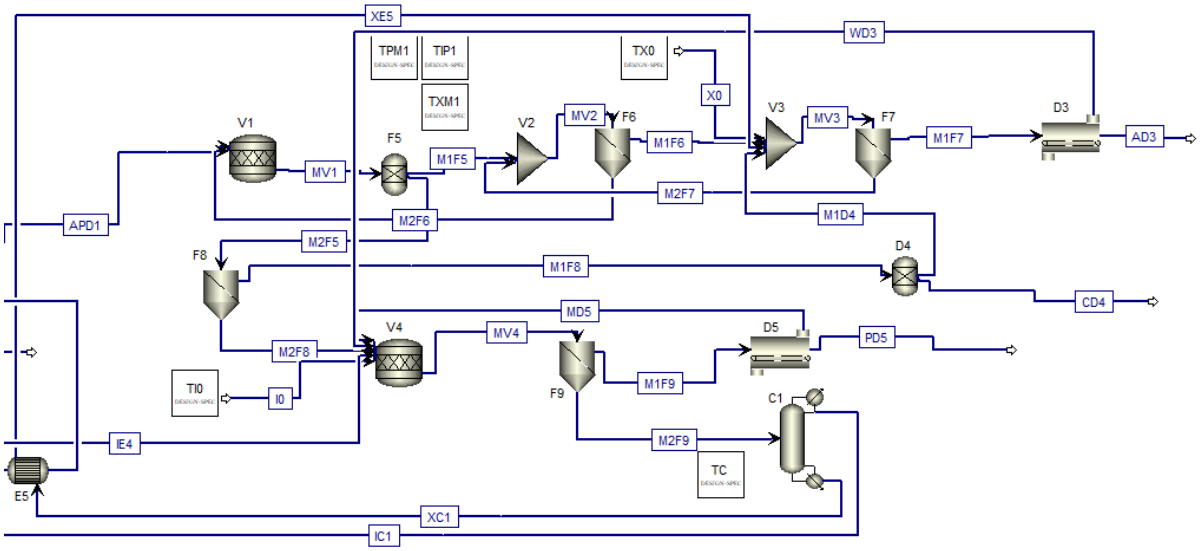
Όσον αφορά την ανάκτηση των λαμιναρισμένων φύλλων, το ρεύμα που προκύπτει και προωθείται για Επιλεκτική Διάλυση/Ανακαταβύθιση περιέχει LDPE, χαρτί και αλουμίνιο με τη σύσταση που ακολουθεί (Πίνακας 7).

Πίνακας 7 Σύσταση ρεύματος εξόδου διεργασίας υδροπολτοποίησης που προωθείται για Ε.Δ.Α.

Όνομα ρεύματος	Χαρτί (kg/hr)	Αλουμίνιο (kg/hr)	LDPE (kg/hr)
APAPDR	49.00	150.00	600.00

4.3 Ανάλυση Προσομοίωσης Διεργασίας Επιλεκτικής Διάλυσης/Ανακαταβύθισης

Το δεύτερο τμήμα της διεργασίας είναι αυτό της Επιλεκτικής Διάλυσης/Ανακαταβύθισης, και έχει σαν τελικό στόχο τον διαχωρισμό των στρωμάτων αλουμινίου-πολυαιθυλενίου, και την ανάκτησή τους. Η διεργασία αυτή ακολουθεί διαγραμματικά (εικόνα 16).



Εικόνα 16 Διαγραμματική απεικόνιση Ε.Δ.Α. στο λογισμικό Aspen Plus.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, το ξυλένιο εισάγεται στη διεργασία στο τρίτο στάδιο διάλυσης και στη συνέχεια, περιέχοντας μικρές ποσότητες πολυαιθυλενίου, οδηγείται διαδοχικά στο δεύτερο και στη συνέχεια στο πρώτο στάδιο. Η απαιτούμενη ποσότητα διαλύτη καθορίζεται με βάση την αναλογία εισόδου στο πρώτο δοχείο:

$$\frac{m_{xylene}}{m_{LDPE}} = 10.75$$

Αν και η μέγιστη διαλυτότητα του LDPE στο ξυλένιο, στις θερμοκρασίες που μελετώνται, είναι 0.2 kg/L στην πραγματικότητα οι συγκεντρώσεις που χρησιμοποιούνται είναι πολύ χαμηλότερες, της τάξης των 0.08 kg/L [16,18] . Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά είναι αναγκαίο να καλύπτονται εξ ολοκλήρου τα φύλλα με διαλύτη και επίσης είναι σημαντικό να υπάρχει και μία ανοχή ύπαρξης αντιδιαλύτη στον διαλύτη ώστε να μην απαιτείται τέλειος και συνεπώς ενεργοβόρος διαχωρισμός του μίγματος διαλύτη-αντιδιαλύτη στην αποστακτική στήλη.

Παρατηρώντας τη διεργασία το καθαρό ξυλένιο που εισάγεται στη διεργασία αρχικά αναδεύεται σε δοχείο με τα, σχεδόν απαλλαγμένα από LDPE, φύλλα αλουμινίου, τα οποία έχουν διέλθει ήδη από δύο δοχεία διάλυσης LDPE, ώστε να παρασυρθούν τα ίχνη πολυαιθυλενίου που έχουν παραμείνει στην επιφάνειά τους διαλυμένα στον υπολειπόμενο διαλύτη. Στη συνέχεια ο διαλύτης κατευθύνεται στον δεύτερο κύκλο διάλυσης, όπου αναδεύεται με τα φύλλα ώστε να επιτευχθεί αφαίρεση του LDPE που έχει απομείνει από τον πρώτο κύκλο. Τέλος, ο διαλύτης που πλέον περιέχει LDPE από την τρίτη και τη δεύτερη διάλυση, αναμειγνύεται με τα λαμιναρισμένα φύλλα Al-PE ώστε να πραγματοποιηθεί η διάλυση του μεγαλύτερου ποσοστού πολυαιθυλενίου από τις επιφάνειες του αλουμινίου. Ο διαχωρισμός του διαλύτη από τα αλουμινόφυλλα πραγματοποιείται με χρήση φίλτρου ενώ το διάλυμα που παραμένει στις επιφάνειες των φύλλων θεωρείται ίσο με 10% επί του συνόλου. Από την παραπάνω διαδικασία, οι συστάσεις των ρευμάτων που εισέρχονται στα δοχεία ανάμιξης και αυτών που συγκρατούνται από τα επιμέρους φίλτρα παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 8, Πίνακας 9).

Πίνακας 8 Σύσταση ρευμάτων που εισέρχονται σε κάθε κύκλο διάλυσης.

Παροχή (kg/hr)	1ος κύκλος	2ος κύκλος	3ος κύκλος
Ξυλένιο	0.00	12.41	13.33
Ισοπροπανόλη	0.00	3.09	3.33
LDPE	600.00	1.16	0.00
Χαρτί	49.00	0.00	0.00
Αλουμίνιο	150.00	150.00	150.00
Διαλύτης (kg/hr)	1ος κύκλος	2ος κύκλος	3ος κύκλος
Ξυλένιο	6435.75	6436.67	6436.67
Ισοπροπανόλη	1608.65	1608.89	1608.90
LDPE	1.16	0.00	0.00
Χαρτί	0.00	0.00	0.00
Αλουμίνιο	0.00	0.00	0.00
Έξοδος (kg/hr)	1ος κύκλος	2ος κύκλος	3ος κύκλος
Ξυλένιο	12.41	13.33	13.33
Ισοπροπανόλη	3.09	3.33	3.33
LDPE	1.16	0.00	0.00
Χαρτί	0.00	0.00	0.00
Αλουμίνιο	150.00	150.00	150.00

Πίνακας 9 Σύσταση ρευμάτων που εξέρχονται από κάθε κύκλο διάλυσης.

Έξοδος	1ος κύκλος	2ος κύκλος	3ος κύκλος
Ξυλένιο	12.41	13.33	13.33
Ισοπροπανόλη	3.09	3.33	3.33
LDPE	1.16	0.00	0.00
Χαρτί	0.00	0.00	0.00
Αλουμίνιο	150.00	150.00	150.00

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι θεωρείται πως η διάλυση του LDPE πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου στον πρώτο κύκλο και στη συνέχεια το παραμένον πολυμερές στις επιφάνειες οφείλεται στο διάλυμα που παραμένει πάνω στα φύλλα αλουμινίου. Επίσης με τη χρήση του διαλύτη σε αντίστροφη ροή από τα φύλλα επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του ξυλενίου καθώς η καθαρότητα του διαλύτη ελαττώνεται με αντίστοιχη αύξηση της περιεκτικότητας του πολυαιθυλενίου στις επιφάνειες αυτών. Παρατηρείται ότι ήδη από τον δεύτερο κύκλο διάλυσης, το παραμένον πολυμερές στο υλικό είναι της τάξης 10^{-3} kg/hr και για τον λόγο αυτό παρουσιάζεται στον πίνακα με μηδενική τιμή. Ωστόσο θεωρείται αναγκαία η ύπαρξη τρίτου δοχείου ώστε πρακτικά να απαλλαχτεί πλήρως το αλουμίνιο από πολυμερές. Τα καθαρά πλέον αλουμινόφυλλα που προκύπτουν προωθούνται για ξήρανση ώστε να αφαιρεθεί η υγρή φάση.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το χαρτί που δεν έχει απομακρυνθεί κατά τη διεργασία της υδροπολτοποίησης, καθώς είναι προσκολλημένο στην εξωτερική πλευρά του LDPE, μετά τη διάλυση του LDPE στον πρώτο κύκλο, απομακρύνεται μαζί με τον διάλυμα και οδηγείται σε φίλτρο για την απομάκρυνση των ινών. Μετά την απομάκρυνση του χαρτιού, το οποίο παρασύρει ίση ποσότητα υγρασίας, το ρεύμα ξηραίνεται και συμπιέζεται ώστε να ανακτηθούν τα υγρά, ενώ το υλικό που προκύπτει θεωρείται απόβλητο καθώς περιέχει ποσότητα τόσο διαλύτη όσο και αντιδιαλύτη.

Στη συνέχεια το διάλυμα εισέρχεται σε δοχείο με ανάδευση, όπου με προσθήκη αντιδιαλύτη, δηλαδή ισοπροπανόλης, λαμβάνει χώρα η ανακαταβύθιση. Η συνθήκη εισόδου της ισοπροπανόλης εδώ, έχει υπολογιστεί πειραματικά, εξαρτάται από τον διαλύτη και είναι [6] :

$$\frac{m_{isoprop}}{m_{xylene}} = 1.5$$

Ακολουθεί διαχωρισμός του στερεού πλέον LDPE ώστε να ξηρανθεί και να ολοκληρωθεί η ανάκτησή του, ενώ το μίγμα διαλύτη-αντιδιαλύτη εισέρχεται σε αποστακτική στήλη ώστε να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός αυτών και επαναχρησιμοποίησή τους. Κατά τον διαχωρισμό αυτό, έχει υπολογιστεί πειραματικά ότι η ύπαρξη έως και 20% κατά βάρος ισοπροπανόλης στο διάλυμα δεν επηρεάζει τη διάλυση του πολυμερούς [6]. Έτσι προκύπτουν τα ακόλουθα ρεύματα εξόδου της στήλης (Πίνακας 10).

Πίνακας 10 Σύσταση ρευμάτων εξόδου αποστακτικής στήλης.

Όνομα ρεύματος	Ξυλένιο (kg/hr)	Ισοπροπανόλη (kg/hr)
IC_1	6.41	8009.86
IX_1	6400.19	1600.05

Συγκεντρωτικά η απόδοση της διεργασίας σχετικά με τα ποσοστά ανάκτησης των υλικών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 11).

Πίνακας 11 Ποσοστά ανάκτησης υλικών.

	Χαρτί (kg/hr)	LDPE (kg/hr)	Al (kg/hr)
Παροχή	2250	600	150
Ανάκτηση	2200.26	596.59	150
Ποσοστό ανάκτησης %	97.79	99.43	100

4.4 Ενεργειακή Ανάλυση της Διεργασίας.

Από πειραματική μελέτη, έχει υπολογιστεί ότι η πιο συμφέρουσα θερμοκρασία για την υδροπολτοποίηση είναι οι 50° C καθώς επιτυγχάνεται πολύ μεγαλύτερη απόδοση στη δημιουργία πολτού από ότι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ ταυτόχρονα σε υψηλότερες θερμοκρασίες οι διαφορές είναι μικρές με αποτέλεσμα να μην είναι τελικά συμφέρον να εφαρμοστούν [6]. Καθώς στην αρχική διεργασία δεν χρησιμοποιούνται πτητικοί διαλύτες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός ανοιχτός προς το περιβάλλον, με αποτέλεσμα να υπάρχουν και θερμικές απώλειες. Οι απώλειες αυτές προσομοιώθηκαν προσεγγιστικά με θεώρηση ότι σε καθένα από τα φίλτρα που συγκρατούν τα λαμιναρισμένα φύλλα, υπάρχει θερμοκρασιακή πτώση 10°C.

Όμοια για τη διεργασία της Ε.Δ.Α. η ζητούμενη θερμοκρασία είναι οι 90 ^{o}C καθώς σε αυτή τη θερμοκρασία η διαλυτότητα του LDPE στο ξυλένιο είναι ικανοποιητική. Ωστόσο εδώ, λόγω χρήσης πτητικών διαλυτών, τα δοχεία είναι κλειστά και οι απώλειες θεωρούνται αμελητέες.

Στο σύστημα που μελετάται, ενέργεια υπό μορφή θερμότητας δίνεται για να καλυφθούν οι απώλειες λόγω θερμοκρασιακών πτώσεων, για την ξήρανση των προϊόντων αλλά και για τον διαχωρισμό του διαλύτη από τον αντιδιαλύτη στη στήλη. Οι ενέργειες αυτές καθώς και οι θερμοκρασιακές αλλαγές που προκαλούν στα ρεύματα που δρουν παρουσιάζονται παρακάτω πίνακα (πίνακας 12).

Πίνακας 12 Ενέργεια που καταναλώνεται ανά εξοπλισμό ώστε να μεταβεί ένα ρεύμα από μία θερμοκρασία σε μία άλλη.

Εξοπλισμός	Ενέργεια (MW)	Τ αρχική (° C)	Τ τελική (° C)
Θερμαντήρας **E_2**	-1.192	40.14	50.00
Θερμαντήρας **E_3**	-0.306	44.33	50.00
Ξηραντήρας **D_1**	-0.170	39.60	81.30
Ξηραντήρας **D_2**	-0.107	41.10	81.30
Ξηραντήρας **D_3**	-0.004	93.00	139.2
Ξηραντήρας **D_5**	-0.100	72.30	86.20
Δοχείο διάλυσης **V_1**	-0.064	86.78	90.00
Αναβραστήρας στήλης **C**	3.088		
Συμπυκνωτήρας στήλης **C**	-3.323		

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ξηραντήρες D_5 και D_1 λειτουργούν σε πίεση 0.5 bar και έτσι δικαιολογούνται οι χαμηλές θερμοκρασίες ξήρανσης. Σχετικά με την ξήρανση του χαρτιού, οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία λειτουργούν με συνδυασμό θέρμανσης και συμπίεσης, καθώς μετατρέπουν τον χαρτοπολτό σε επίπεδα φύλλα χαρτιού. Για τον λόγο αυτό, κατά την προσομοίωση της ξήρανσης του χαρτιού, η θερμοκρασία που αποκτούν τα ρεύματα εξόδου του D_2 παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού που περιέχει το χαρτί. Τέλος κατά την ξήρανση του χαρτιού στο δεύτερο σκέλος της διεργασίας, το ρεύμα πριν τη συμπίεση έχει θερμοκρασία 87 ^{o} C, οπότε δε χρειάζεται να δοθεί επιπλέον θέρμανση.

Έπειτα, στη διάταξη έγινε χρήση τριών εναλλακτών θερμότητας ώστε να αξιοποιηθεί η περίσσεια ενέργεια και να μειωθεί η ενέργεια που δαπανείται. Πιο συγκεκριμένα, ο αναφερόμενος πρώτος χρησιμοποιεί τους ατμούς που προκύπτουν από τον ξηραντήρα των λαμιναρισμένων φύλλων για να προθερμάνει το νερό εισόδου. Οι δύο εναλλάκτες που

ακολουθούν αξιοποιώντας τη θερμότητα πρώτα της κορυφής της στήλης και στη συνέχεια του ρεύματος βάσης, καλύπτουν μέρος των θερμικών απωλειών της διεργασίας της υδροπολτοποίησης. Καθώς τα ρεύματα της στήλης πρόκειται να επιστρέψουν στο σύστημα σαν ανακυκλοφορία, έχοντας θερμοκρασία υψηλότερη από αυτές που απαιτούν οι διεργασίες που συμμετέχουν, αξίζει να γίνει εκμετάλλευση της ενέργειας αυτής ώστε να διατηρήσουμε τις θερμοκρασίες στην υδροπολτοποίηση με την κατά το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 13 Θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευμάτων που εναλλάσσονται σε κάθε εναλλάκτη καθώς και η ενέργεια εναλλαγής

Εξοπλισμός		Είσοδος	Έξοδος	Μαζική ροή (kg/hr)	Θερμότητα εναλλαγής (MW)
E_1	Hot stream name	**WD_1**	**VE_1**	234	0.0605
	T (^oC)	81.34	81.34		
	Cold stream name	**W_0**	**WE_1**	1737.812	
	T (^oC)	20.00	50.00		
E_4	Hot stream name	**IC_1**	**IE_4**	8016.252	0.194
	T (^oC)	81.73	54.56		
	Cold stream name	**WS_1**	**WE_4**	46519.09	
	T (^oC)	39.56	43.15		
E_5	Hot stream name	**XC_1**	**XE_5**	8000.24	0.0638
	T (^oC)	105.47	93.00		
	Cold stream name	**WE_4**	**WE_5**	46519.09	
	T (^oC)	43.15	44.33		

5 Οικονομική Αξιολόγηση Διεργασίας

Στη συνέχεια της μελέτης, επιχειρήθηκε η οικονομική αξιολόγηση με τελικό σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη βιωσιμότητα μίας τέτοιας βιομηχανικής μονάδας. Προκειμένου να ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή, το Aspen Plus V8.8 παρέχει τη δυνατότητα οικονομικής αξιολόγησης με δύο τρόπους. Ο πρώτος αφορά τη χρήση του μοντέλου οικονομικής ανάλυσης που είναι ενσωματωμένο στο ίδιο το πρόγραμμα, ενώ ο δεύτερος περιλαμβάνει τη χρήση του Aspen Process Economic Analyzer (APEA) . Ο πρώτος τρόπος φάνηκε να ανταποκρίνεται δύσκολα στις απαιτήσεις της πολυπλοκότητας της διεργασίας με αποτέλεσμα, όπως προτείνουν και βιβλιογραφικές πηγές, η διαδικασία του οικονομικού ελέγχου και της βιωσιμότητας να ολοκληρωθούν μέσω χρήσης του APEA [36].

5.1 Αντιστοίχιση Μηχανολογικού Εξοπλισμού στα Λειτουργικά Στοιχεία της Προσομοίωσης (Mapping)

Προκειμένου να εξαχθεί το πάγιο κόστος που απαιτείται για την κατασκευή μίας βιομηχανικής μονάδας ανάκτησης των επιμέρους υλικών από πολυστρωματικές συσκευασίες Tetra Pak, είναι αναγκαίο να οριστεί ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε τμήμα της διεργασίας. Στη συγκεκριμένη διεργασία που μελετάται, ο μηχανολογικός εξοπλισμός απαρτίζεται από αναδευόμενα δοχεία ανάμιξης, φίλτρα, ενναλλάκτες, ξηραντήρες και μία αποστακτική στήλη. Για τις απαιτήσεις του βήματος αυτού είναι αναγκαίο να ληφθούν υπ’ όψη οι διεργασίες που πραγματοποιούνται σε κάθε στάδιο της διεργασίας ώστε να επιτευχθεί η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού από τους διαθέσιμους που περιέχονται στο πακέτο του Aspen Plus V8.8.

Ο εξοπλισμός που επιλέχθηκε παρουσιάζεται ανά είδος εξοπλισμού ακολούθως.

1) Φίλτρα

Στη διεργασία που περιγράφεται, πλήθος φίλτρων χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενοι διαχωρισμοί. Ο εξοπλισμός διαχωρισμού μπορεί να χωριστεί γενικότερα σε τρεις κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα φίλτρα που διαχωρίζουν μίγματα αποτελούμενα από χοντρόκοκκα στερεά και από υγρό διάλυμα το οποίο μπορεί να περιέχει και πολύ λεπτόκοκκα στερεά (π.χ. χαρτί). Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα φίλτρα που τοποθετούνται στη διεργασία της υδροπολτοποίησης, αμέσως μετά από τους υδροπολτοποιητές, διαχωρίζοντας το πολτοποιημένο χαρτί από τα αδιάλυτα λαμιναρισμένα φύλλα Al-PE αλλά και αυτά που ακολουθούν τα δοχεία διάλυσης κατά τη διεργασία της Ε.Δ.Α. διαχωρίζοντας το αλουμίνιο από το διάλυμα διαλύτη-αντιδιαλύτη-διαλυμένου LDPE. Ο διαχωρισμός αυτός χαρακτηρίζεται από ευκολία καθώς η διαφορά μεγέθους κόκκων ανάμεσα στα τελικά διαχωρισμένα ρεύματα είναι μεγάλη με αποτέλεσμα ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται να είναι απλός. Πιο συγκεκριμένα στα σημεία αυτά χρησιμοποιούνται ορθογώνιες σήτες με κινητά μέρη (VS RECTANGLE) προκειμένου να γίνεται ταυτόχρονος καθαρισμός από τα στερεά στη σήτα και να είναι δυνατή η ύπαρξη μίας συνεχούς διεργασίας. Με τέτοιου είδους εξοπλισμό αντικαθίστανται στη διεργασία τα φίλτρα F_1, F_2, F_5, F_6, F_7.

Στη δεύτερη κατηγορία εξοπλισμού διαχωρισμού ανήκουν οι συσκευές εκείνες με τις οποίες επιχειρείται ο διαχωρισμός του πολτοποιημένου χαρτιού από το διάλυμα στο οποίο είναι διεσπαρμένα. Τέτοια φίλτρα εμφανίζονται τόσο στη διεργασία της υδροπολτοποίησης (F_3, F_4) όπου δρουν στα ρεύματα έπειτα από την απομόνωση των λαμιναρισμένων φύλλων με σκοπό την συγκράτηση των ινών του χαρτιού, όσο και στη διεργασία της Ε.Δ.Α. (F_8) προκειμένου να απομονωθεί το χαρτί που δεν απομακρύνθηκε κατά την υδροπολτοποίηση. Για την εξυπηρέτηση του σκοπού της διεργασίας στα σημεία αυτά χρησιμοποιούνται συσκευές με πλέγμα χαμηλής πυκνότητας που δρα σαν σήτα για τη συγκράτηση των ινών. Το κόσκινο που χρησιμοποιείται στη μονάδα αυτή είναι κυρτό ενώ ο καθαρισμός του επιτυγχάνεται με πεπιεσμένο αέρα με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνεχείς διεργασίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι το Aspen Process Economic Analyzer διαθέτει τη συσκευή αυτή (LD STOCK) συγκεκριμένα για την απομόνωση ινών χαρτιού από υγρό διάλυμα, με αποτέλεσμα να θεωρείται η καταλληλότερη και η πιο συμφέρουσα.

Στην τρίτη κατηγορία, στην οποία ανήκει ένα μόνο φίλτρο στη διεργασία που μελετάται (F_9), επιχειρείται η απομόνωση λεπτόκοκκης σκόνης από υγρό διάλυμα. Ένα τέτοιο διαχωρισμό αποτελεί η απομόνωση κατά την τελική ανάκτηση του LDPE από διάλυμα διαλύτη-αντιδιαλύτη. Για την εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται περιστρεφόμενο φίλτρο

κενού το οποίο περιλαμβάνει πολυμερικά κόσκινα, με μορφή δίσκου, ιδανικά για συγκράτηση λεπτών κόκκων. Κατά τη λειτουργία του εξοπλισμού αυτού, το προς διαχωρισμό μίγμα εισέρχεται στη συσκευή αξονικά ενώ λόγω διαφοράς πίεσης το υγρό διέρχεται από τους πολυμερικούς δίσκους, συγκρατώντας στο εσωτερικό αυτών το στερεό. Έπειτα μέσω της περιστροφής εξασφαλίζεται και εδώ ο καθαρισμός των επιφανειών και η συλλογή του πολυμερούς.

2) Δοχεία ανάμιξης

Στην κατηγορία αυτή του εξοπλισμού ανήκουν όλα τα δοχεία που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση του συνολικού διαχωρισμού. Στη διεργασία που μελετάται, σε ορισμένα δοχεία απαιτείται εκτός από ανάδευση και θέρμανση ενώ σε άλλα η διακύμανση της θερμοκρασίας άνω ή κάτω της βέλτιστης, σε επιτρεπτά όρια, δεν αποτελεί πρόβλημα. Επίσης όλα τα δοχεία που χρησιμοποιούνται είναι κλειστά ώστε να περιοριστούν οι απώλειες τόσο σχετικά με τα υγρά που χρησιμοποιούνται όσο και σε ενέργεια με μορφή θερμότητας. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι στη διεργασία της Ε.Δ.Α. η χρήση κλειστών δοχείων είναι απαραίτητη καθώς ο διαλύτης και ο αντιδιαλύτης αποτελούν πτητικά και επικίνδυνα υγρά.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω, κλειστά αναδευόμενα δοχεία χωρίς δυνατότητα θέρμανσης τοποθετούνται στη θέση των υδροπολτοποιητών αλλά και στο δοχείο καταβύθισης. Στα σημεία αυτά η θέρμανση δεν θεωρείται απαραίτητη. Αυτό συμβαίνει διότι οι θερμοκρασίες κατά την υδροπολτοποίηση ρυθμίζονται μέσω εναλλαγών θερμότητας πριν την είσοδό τους στα δοχεία, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει ανοχή στη διακύμανση της θερμοκρασίας που πραγματοποιείται η διεργασία καθώς η απόδοση αλλάζει ελάχιστα και σε χαμηλότερες τιμές. Σχετικά με το δοχείο καταβύθισης, θεωρείται ότι η μετατροπή του πολυμερούς σε στερεό πραγματοποιείται ικανοποιητικά σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται επιβολή θερμότητας. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα δοχεία Y_1, Y_2, V_4 θεωρείται ότι συμπίπτουν με τον εξοπλισμό DAT MIXER από τους διαθέσιμους προτεινόμενους του πακέτου APEA.

Έπειτα, τα δοχεία στα οποία πραγματοποιείται η διάλυση του LDPE κατά την Ε.Δ.Α. απαιτείται να παραμένουν σταθερά στους 80° C με αποτέλεσμα εκτός από ανάδευση να απαιτείται και θέρμανση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα δοχεία V_1, V_2, V_3 να αντικαθίστανται

με αντιδραστήρες CSTR οι οποίοι στο χρησιμοποιούμενο λογισμικό παρουσιάζονται ως DAT REACTOR.

Τέλος, σχετικά με τα δοχεία αξίζει να σημειωθεί ότι οι χρόνοι παραμονής των ρευμάτων στους υδροπολτοποιητές είναι 120 λεπτά, όπως επίσης και στο πρώτο δοχείο διάλυσης (V_1). Καθώς, όπως προαναφέρθηκε, θεωρείται ότι η πλήρης διάλυση του πολυμερούς επιτυγχάνεται στο πρώτο δοχείο, ενώ στα επόμενα δύο απλά ξεπλένονται τα αλουμινόφυλλα με διαλύτη, ο χρόνος παραμονής στα δοχεία V_2, V_3 ορίστηκε ίσος με 5 λεπτά. Σχετικά με το δοχείο καταβύθισης, ο χρόνος παραμονής είναι 60 λεπτά.

3) Ξηραντήρες

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάκτηση των επιμέρους υλικών πολυστρωματικών συσκευασιών, ξηράνσεις είναι αναγκαίες σε διάφορα στάδια της διεργασίας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ένας ξηραντήρας για κάθε επιμέρους ανακτημένο υλικό (χαρτί, πολυμερές, αλουμίνιο) αλλά στη διεργασία εμφανίζονται ακόμη δύο. Ο ένας αφορά τον περιορισμό του νερού στην πρώτη διεργασία και την εξασφάλιση ότι η διεργασία της Ε.Δ.Α. δε θα περιέχει προσμίξεις νερού, γεγονός που θα δυσκόλευε τη διεργασία τόσο στον διαχωρισμό για την ανάκτηση των διαλύτη-αντιδιαλύτη, όσο και στη συμπεριφορά κατά τη διάλυση και την ανακαταβύθιση του πολυμερούς. Ο δεύτερος επιτυγχάνει την ανάκτηση ποσότητας διαλύτη-αντιδιαλύτη από το επιμολυσμένο χαρτί που απομονώνεται κατά την Ε.Δ.Α. ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες των διαλυτών.

Πιο συγκεκριμένα, μονοί περιστρεφόμενοι ξηραντήρες κενού (single vacuum rotary dryers) θεωρήθηκαν καταλληλότεροι για την ξήρανση των φύλλων Al-PE (D_1), του επιμολυσμένου χαρτιού της Ε.Δ.Α. (D_4) καθώς και για το ανακτημένο PE (D_5). Τέτοιου είδους ξηραντήρες είναι κατάλληλοι για την ξήρανση ευαίσθητων υλικών όπως τα πολυμερή. Επίσης η αιτία της επιβολής κενού στις διεργασίες αυτές οφείλεται στο γεγονός ότι με τον τρόπο αυτόν απαιτούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες και εξασφαλίζεται η μη αποικοδόμηση του πολυμερούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη λειτουργία που προορίζεται ο ξηραντήρας D_4 υπάρχουν διαθέσιμοι καταλληλότεροι ξηραντήρες. Ωστόσο καθώς η ποσότητα του χαρτιού που ανακτάται στο σημείο είναι πολύ μικρή, υπήρχαν περιορισμοί

σχετικά με τη διαστασιολόγηση του εξοπλισμού, θέτοντας τον παραπάνω ξηραντήρα μοναδική επιλογή.

Στη συνέχεια, για την ξήρανση του χαρτιού (D_2) που προκύπτει από την υδροπολτοποίηση, επιλέχθηκε ο εξοπλισμός ο οποίος να προσομοιώνει με τον καλύτερο τρόπο την τεχνολογία όπως ήδη εφαρμόζεται. Πιο συγκεκριμένα για τη λειτουργία αυτή επιλέχθηκε διπλός ατμοσφαιρικός τυμπανοειδής ξηραντήρας (double atmospheric drum dryer). Η συσκευή αυτή αποτελείται από δύο θερμαινόμενους κυλίνδρους-τύμπανα, τα οποία θερμαίνουν και συμπιέζουν ταυτόχρονα τον πολτό, επιτυγχάνοντας την απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας.

Ολοκληρώνοντας τον τομέα της ξήρανσης, για την απομάκρυνση της υγρασίας από το τελικό ανακτημένο αλουμίνιο (D_3) χρησιμοποιείται περιστρεφόμενος ξηραντήρας κενού (jacketed rotary vacuum dryer). Η ξήρανση αυτή χαρακτηρίζεται από απλότητα καθώς το αλουμίνιο αποτελεί ένα σταθερό υλικό, ενώ το κενό στην περίπτωση αυτή επιβάλλεται για εξοικονόμηση ενέργειας.

4) Εναλλάκτες

Στην παρούσα διεργασία πραγματοποιούνται θερμοκρασιακές μεταβολές των ρευμάτων σε διάφορα στάδια. Για την επίτευξη του στόχου αυτού χρησιμοποιούνται εναλλάκτες οι οποίοι θα χωριστούν παρακάτω σε τρεις επιμέρους κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι εναλλάκτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να εναλλάξουν ενέργεια υπό μορφή θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων της διεργασίας. Τέτοιου είδους εξοπλισμό αποτελούν οι E_1, E_4, E_5 οι οποίοι αντικαθίστανται με εναλλάκτες κελύφους σωλήνα. Πιο συγκεκριμένα στο λογισμικό APEA, για τους E_1 και E_5 επιλέγονται pre-engineered ενώ για τον E_4 επιλέγεται εναλλάκτης τύπου TEMA. Η μορφή των παραπάνω εξοπλισμών είναι ίδια και η διαφοροποίηση οφείλεται στη διαστασιολόγηση.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι εναλλάκτες εκείνοι που θερμαίνουν ρεύματα της διεργασίας χρησιμοποιώντας σαν θερμαντικό μέσο ρεύμα ατμού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Οι εναλλάκτες αυτοί (E_2, E_3) εμφανίζουν την ίδια μορφή με τους παραπάνω ενώ διαφέρουν ως προς την προέλευση των ρευμάτων που εναλλάσσουν. Το γεγονός αυτό

έχει σαν αποτέλεσμα την αντικατάσταση και αυτών με εναλλάκτες κελύφους σωλήνα (pre-engineered).

Στην τρίτη κατηγορία ανήκει μία μόνο συσκευή (E_6), η λειτουργία της οποίας έχει σαν σκοπό την ψύξη του νερού που προκύπτει από τον ξηραντήρα D_1 με σκοπό να μετατραπεί σε μορφή ικανή να ανακυκλοφορήσει στη διεργασία. Στο σημείο αυτό επιλέγεται αεροψυκτήρας (Air cooler).

5) Στήλη

Ολοκληρώνοντας την περιγραφή της αντικατάστασης πραγματικού μηχανολογικού εξοπλισμού στη διεργασία, αρκεί να περιγραφεί η στήλη που χρησιμοποιείται κατά τη διεργασία της Ε.Δ.Α.. Αποστακτική στήλη χρησιμοποιείται προκειμένου να διαχωριστεί το ξυλένιο (διαλύτης) από την ισοπροπανόλη (αντιδιαλύτης). Για την εξυπηρέτηση του σκοπού αυτού επιλέγεται στήλη μονής διαμέτρου με δίσκους. Στη θέση τόσο του συμπυκνωτήρα όσο και του αναβραστήρα τοποθετούνται εναλλάκτες σωλήνα κελύφους οι οποίοι λειτουργούν με τα βοηθητικά ρεύματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή με νερό ψύξης και ατμό υψηλής πίεσης αντίστοιχα. Τέλος χρησιμοποιείται φυγοκεντρική αντλία προκειμένου να επιτευχθεί η απαραίτητη αναρροή ενώ το υγρό που προκύπτει από τον συμπυκνωτήρα καταλήγει σε οριζόντιο δοχείο.

Τέλος, αξίζει να περιγραφεί ο σκοπός που εξυπηρετείται μέσω του εξοπλισμού S_1. Μέσω του τμήματος εκείνου της προσομοίωσης επιχειρείται να προσομοιωθούν οι απώλειες που θα είχε μία τέτοια διεργασία σε νερό, καθώς οι ποσότητες νερού που κυκλοφορούν στο σύστημα είναι μεγάλες. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα ο εξοπλισμός που θα επιλεγεί για το σημείο να είναι το δυνατόν απλούστερος και χωρίς έξοδα λειτουργίας. Λαμβάνοντας υπ’ όψη τα παραπάνω επιλέχθηκε οριζόντιο δοχείο με λειτουργία απλής δεξαμενής.

5.2 Υπολογισμός Λειτουργικού Κόστους

Για τις ανάγκες της έρευνας που πραγματοποιείται, απαιτείται ο καθορισμός των παραμέτρων που σχετίζονται με το κόστος λειτουργίας. Αυτές οι παράμετροι αφορούν τα

έξοδα που προκύπτουν για την κάλυψη των αμοιβών των εργαζομένων, των απαιτούμενων ρευμάτων ενέργειας (ηλεκτρισμός, ρεύματα ατμού, ρεύματα ψύξης) αλλά και των πρώτων υλών (νερό, ισοπροπανόλη, ξυλένιο) για την επίτευξη του διαχωρισμού της πολυστρωματικής συσκευασίας.

Όσον αφορά τα σημεία που δρουν τα βοηθητικά ενεργειακά ρεύματα στο σύστημα ώστε να προσφέρουν ψύξη ή θέρμανση, αυτά εντοπίζονται στην αποστακτική στήλη αλλά και στους εναλλάκτες E_2 και E_3. Πιο συγκεκριμένα, ένα σημείο της διεργασίας που χρησιμοποιείται ψύξς αποτελεί ο συμπυκνωτήρας της στήλης η οποία πραγματοποιείται μέσω νερού ψύξης. Οι απαιτήσεις της διεργασίας για υψηλές θερμοκρασίες καλύπτονται μέσω ρεύματος ατμού σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση, ο οποίος δρα τόσο στον αναβραστήρα της στήλης όσο και στους εναλλάκτες E_2 και E_3 ώστε να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη, για τη διεργασία της υδροπολτοποίησης, θερμοκρασία των 50^0 C. Στη διεργασία της Ε.Δ.Α. οι ενεργειακές απαιτήσεις καλύπτονται καθώς τα υψηλής θερμοκρασίας ρεύματα της στήλης και τα παραγόμενα ρεύματα ατμών στους ξηραντήρες επανακυκλοφορούν στην ίδια διεργασία. Μάλιστα η ενέργεια που δίνεται στο σύστημα στο σημείο της αποστακτικής στήλης καθώς υπερκαλύπτει τη συντήρηση της θερμοκρασίας στα δοχεία διάλυσης στους 80° C, αξιοποιείται πρώτα ώστε να προσφέρει την πλεονάζουσα αυτή ενέργεια στην υδροπολτοποίηση. Τέλος, ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται σε όλο το σύστημα, τόσο για τις λειτουργίες των φίλτρων όσο για τις ξηράνσεις και τις αναδεύσεις.

Σχετικά με τη μισθοδοσία αλλά και το κόστος των ρευμάτων που παρέχονται για να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας, οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές που προτείνονται από το ίδιο το πρόγραμμα και παρουσιάζονται στους πίνακες 14 και 15.

Πίνακας 14 Κόστη μισθοδοσίας ανά ώρα.

	Μονάδες	$/μονάδα
Χειριστές	κόστος/χειριστή/ώρα	20
Επιβλέποντες	κόστος/επιβλέπων/ώρα	35

Πίνακας 15 Κόστη βοηθητικών ρευμάτων και ρευμάτων ενέργειας.

	Μονάδες	$/μονάδα
Ηλεκτρισμός	Κόστος/KWH	0.0775
Καύσιμο	Κόστος/MMBTU	7.85
Νερό ψύξης	κόστος/MMGAL	120
Ατμός θέρμανσης	κόστος/LB	8.14

Τέλος, σχετικά με τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στη διεργασία αυτή, τέθηκαν οι τιμές για το νερό, την ισοπροπανόλη και το ξυλένιο. Στην πραγματικότητα, οι μόνες πρώτες ύλες για τις οποίες υπάρχουν έξοδα αγοράς είναι τα παραπάνω καθώς θεωρείται ότι η πρώτη ύλη της συσκευασίας Tetra Pak λαμβάνεται δωρεάν. Η θεώρηση αυτή γίνεται με σκοπό την εξαγωγή κόστους ανά μονάδα βάρους της συσκευασίας, ώστε να είναι δυνατόν στη συνέχεια να εκτιμηθεί το περιθώριο σχετικά με τα έξοδα που θα προστεθούν από τη συλλογή και τη διαλογή των απορριμμάτων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ένα ρεύμα που αυξάνει το λειτουργικό κόστος της διεργασίας αποτελεί το ρεύμα χαρτιού που παραμένει από την εφαρμογή της Ε.Δ.Α. και πρόκειται για μικρή ποσότητα χαρτιού που παραμένει στις συσκευασίες μετά την υδροπολτοποίηση. Το χαρτί αυτό, καθώς είναι επιμολυσμένο με διαλύτη και αντιδιαλύτη αποτελεί απόβλητο χαμηλής επικινδυνότητας με αποτέλεσμα τη δαπάνη χρημάτων για την ασφαλή διαχείρισή του.

Προκειμένου να υπολογιστούν οι τιμές των παραπάνω, αξιοποιήθηκαν βιβλιογραφικές πηγές σχετικά με την αξία των υλικών κατά τα έτη που υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αναπροσαρμογή των τιμών αυτών στη σημερινή τους αξία μέσω των δεικτών αναπροσαρμογής (plant and cost index). Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 16 [25,26,27,28].

Πίνακας 16 Κόστος ρευμάτων διεργασίας.

	$/Kg
Επιμολυσμένο χαρτί	0.0558
Ισοπροπανόλη	1.6129
Νερό	$8.377 \bullet 10^{-5}$
Ξυλένιο	1.1647

5.3 Υπολογισμός Κόστους Ανάκτησης

Η βιωσιμότητα μιας μονάδας ανακύκλωσης συσκευασιών Tetra Pak όπως αυτή που μελετάται στην παρούσα εργασία καθορίζεται από τη σύγκριση του κόστους των ανακτημένων υλικών σε σχέση με την τιμή αγοράς ίδιων υλικών αντίστοιχης ποιότητας.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός υπολογίζεται η τιμή υποθετικού υλικού ανά κιλό, βάσει των αναλογιών των παραγόμενων από τη διεργασία υλικών και των αντίστοιχων τιμών τους. Οι τιμές των παρθένων υλικών, βάσει βιβλιογραφίας και αφού έχουν αναχθεί στην παρούσα αξία του τρέχοντος έτους, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα [33,34,35].

Πίνακας 17 Κόστος παρθένων υλικών.

	Τιμή ($/Kg)
Αλουμίνιο	1.86
LDPE	1.3
Χαρτί	0.635

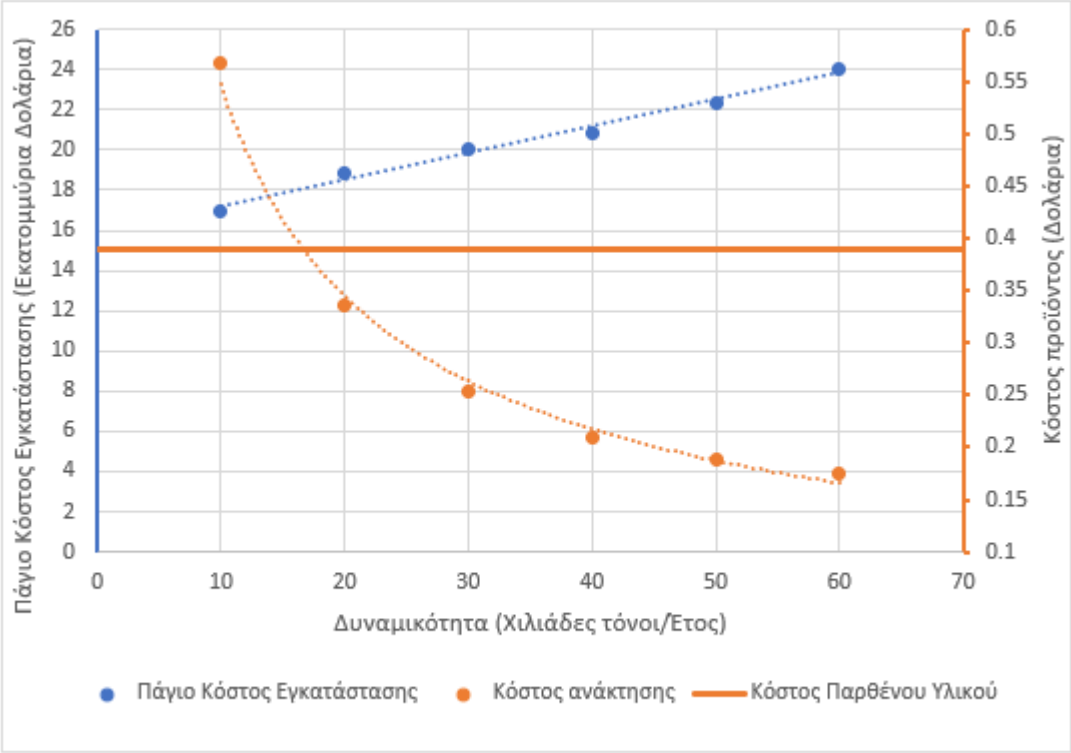
Τελικά οι αναλογίες που προκύπτουν από τη διεργασία είναι 75.83% χαρτί, 19.31% πολυμερές και 4.86% αλουμίνιο και αυτές θα είναι οι αναλογίες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς παρακάτω. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τιμή ανά κιλό της ποσότητας που ανακτάται από τη διεργασία βασισμένη στις πραγματικές τιμές των παρθένων υλικών που την απαρτίζουν προκύπτει ως εξής:

$$Τιμή_{προϊόντος} = \%_{LDPE} \bullet Τιμή_{LDPE} \bullet \%_{Al} \bullet Τιμή_{Al} \bullet \%_{pap} \bullet Τιμή_{pap} = 0.3897 \frac{\$}{Kg}$$

Προκειμένου να εξαχθεί συμπέρασμα για τη βιωσιμότητα μίας μονάδας ανάκτησης υλικών από συσκευασίες Tetra Pak, αρκεί αρχικά το κόστος ανάκτησης να είναι χαμηλότερο από την αξία που έχουν τα παρθένα υλικά. Ο παραπάνω ισχυρισμός ισχύει φυσικά μόνο με την υπόθεση ότι για τη συλλογή και τη διαλογή των απορριμμάτων δεν δαπανώνται χρήματα. Έτσι, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός του κόστους προϊόντος συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας ώστε να βρεθεί η δυναμικότητα εκείνη για την οποία το κόστος προϊόντος εξισώνεται με την τιμή που προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι η ακόλουθη:

Στον προσδιορισμό του κόστους εμπλέκονται κόστη τα οποία σχετίζονται με την εγκατάσταση (εξοπλισμός, ακίνητο, εργατικά έξοδα κλπ) και με τη λειτουργία (πρώτες ύλες, εργατικά έξοδα, καύσιμα, ρεύμα κλπ) . Πιο συγκεκριμένα, καθώς ο χρόνος απόσβεσης της εγκατάστασης έχει τεθεί στα 10 έτη, το κόστος εγκατάστασης διαιρείται με τα έτη προκειμένου να αναχθούν οι δαπάνες για το ακίνητο ανά έτος. Σε αυτό το κόστος προστίθεται και το κόστος λειτουργίας και τέλος το ετήσιο κόστος διαιρείται με την παραγωγή ανά έτος προκειμένου να προκύψει το κόστος ανάκτησης ανά κιλό προϊόντος. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία για διάφορες δυναμικότητες, υπολογίστηκε το ζητούμενο κόστος το οποίο παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα, συνοδευόμενο από το πάγιο κόστος εγκατάστασης.



Εικόνα 17 Διάγραμμα πάγιου κόστους-δυναμικότητας (μπλε καμπύλη, μπλε άξονας), κόστους ανάκτησης-δυναμικότητας (πορτοκαλί καμπύλη, πορτοκαλί άξονας), κόστους παρθένου υλικού (πορτοκαλί ευθεία, πορτοκαλί άξονας)

Όπως φαίνεται, το κόστος ανάκτησης των υλικών της συσκευασίας, όπως είναι αναμενόμενο, μειώνεται με την αύξηση της δυναμικότητας, προσεγγίζοντας τελικά μία οριακή τιμή. Πιο συγκεκριμένα, ξεκινώντας από δυναμικότητα 10,000 τόνων, το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται περί τα 17 εκατομμύρια δολάρια με το κόστος ανάκτησης να υπολογίζεται στα 0.57 δολάρια ανά κιλό, που δηλώνει ότι η διεργασία δεν είναι συμφέρουσα αφού το κόστος ανάκτησης υπερβαίνει την αξία των παρθένων υλικών (πορτοκαλί ευθεία). Τα δύο αυτά ποσά, δηλαδή το κόστος ανάκτησης και η τιμή των παρθένων υλικών, φαίνεται να εξισώνονται για δυναμικότητες που αγγίζουν τους 17,000 τόνους. Τέλος για τη μεγαλύτερη υπό μελέτη δυναμικότητα των 60,000 τόνων, το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται στα 24 εκατομμύρια δολάρια, με το κόστος ανάκτησης στην περίπτωση αυτή να είναι περίπου 0.175 δολάρια ανά κιλό.

5.4 Επιλογή Δυναμικότητας Μονάδας

Προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη δυναμικότητα για ανάλυση, είναι αναγκαίο να εξεταστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος μίας τέτοιας εγκατάστασης. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά πρέπει να πραγματοποιηθεί συσχέτιση της δυναμικότητας με τη χρήση συσκευασιών που υπάρχει στην περιοχή που θεωρητικά θα εξυπηρετεί μία τέτοια βιομηχανική μονάδα. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται αντιστοίχιση τιμών δυναμικότητας σε τεμάχια συσκευασιών. Δεδομένου ότι η παρούσα μελέτη αναφέρεται στην ανακύκλωση συσκευασιών στην περιοχή της Ελλάδας (πληθυσμός ~10,800,00) υπολογίζεται ο αριθμός συσκευασιών που αντιστοιχεί ανά κάτοικο ετησίως. Έτσι, οι δύο μεγαλύτερες δυναμικότητες απορρίπτονται, καθώς η ζητούμενη ποσότητα απορριμμάτων είναι μεγάλη, με την τελευταία μάλιστα να αγγίζει την κατανάλωση μίας συσκευασίας ανά κάτοικο ημερήσια.

Πίνακας 18 Αντιστοίχιση δυναμικότητας με συσκευασίες (τεμάχια) αλλά και με αναγκαία κατανάλωση ανά κάτοικο ετήσια.

Δυναμικότητα (tn)	Συσκευασίες (τεμ)	Συσκευασίες ανά κάτοικο ετήσια
10,000	625,000.000	58
20,000	1250,000,000	116
30,000	1,875.000,000	174
40,000	2,500.000,000	232
50,000	3,125.000,000	290
60,000	3,750.000,000	349

Σε δεύτερο στάδιο, για τη ζητούμενη επιλογή απαιτείται η επιχείρηση να χαρακτηρίζεται βιώσιμη. Για να ισχύει αυτό πρέπει το κόστος ανάκτησης των υλικών να είναι χαμηλότερο από την αξία των παρθένων υλικών. Από την καμπύλη κόστους που προηγήθηκε, προέκυψε ότι αυτό ισχύει για δυναμικότητες μεγαλύτερες από 17,000 τόνος διαχείρισης ετησίως. Ωστόσο όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, στην προσομοίωση έχει προηγηθεί θεώρηση ότι το κόστος συλλογής και διαλογής είναι μηδενικό. Εκτιμώντας ότι αυτό το κόστος θα είναι χαμηλότερο των 0.1 δολαρίων ανά κιλό και λαμβάνοντας υπ' όψη και όλα τα παραπάνω, η δυναμικότητα των 30,000 τόνων/έτος θεωρείται η καταλληλότερη προς εξέταση. Αυτό γιατί η αμέσως μικρότερη δεν παρουσιάζει το ζητούμενο περιθώριο ανοχής πρόσθετου κόστους για περισυλλογή, ενώ η αμέσως μεγαλύτερη θα είναι σίγουρα πιο συμφέρουσα και θεωρείται σημαντικότερη η εξέταση της οριακά βιώσιμης δυναμικότητας.

5.5 Ανάλυση Προτεινόμενης Δυναμικότητας

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η δυναμικότητα που επιλέχθηκε να αναλυθεί είναι αυτή των 30,000 τόνων συσκευασίας ετησίως. Η κατανάλωση συσκευασιών, ώστε να προκύψει η ζητούμενη παροχή για τη δυναμικότητα αυτή, ανέρχεται στις 174 συσκευασίες των 330ml ανά κάτοικο ετησίως, αριθμός που θεωρείται λογικός αν αναλογιστεί κανείς το πλήθος χρήσεων των πολυστρωματικών συσκευασιών.

Προκειμένου τα αποτελέσματα της ανάλυσης να είναι ρεαλιστικά, επιχειρήθηκε η εξαγωγή του περιθωρίου ανοχής που εμφανίζει η μονάδα σχετικά με το κόστος που μπορεί να προστεθεί για τη συλλογή και τη διαλογή των απορριμμάτων, διατηρώντας τη βιωσιμότητά της. Πιο συγκεκριμένα, καθώς το κόστος ανάκτησης για τη δυναμικότητα αυτή ανέρχεται στα 0.253 $ ανά κιλό συσκευασίας, υπολογίστηκε πως η μονάδα παρουσιάζεται οριακά κερδοφόρα αν το κόστος προετοιμασίας της παροχής ανέλθει στα 0.11 δολάρια ανά κιλό. Λαμβάνοντας υπό όψη τα παραπάνω επιχειρήθηκε οικονομική αξιολόγηση για τη δυναμικότητα αυτή, ενώ σαν πρόσθετες δαπάνες επιλέχθηκε το ποσό των 0.03 δολαρίων ανά κιλό.

Αναλύοντας τα πάγια έξοδα που απαιτούνται για τη λειτουργία της αναφερόμενης βιομηχανικής μονάδας, αυτά ανέρχονται στα 20,060,000 $, εκ των οποίων περίπου 955.000 $ αναφέρονται σε εργατικά έξοδα. Στις δαπάνες αυτές, οι διατάξεις που συμβάλουν περισσότερο φαίνεται να είναι οι υδροπολτοποιητές και κάποιοι ξηραντήρες. Σχετικά με τους υδροπολτοποιητές αλλά και το πρώτο δοχείο διάλυσης, καθώς ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής ανέρχεται στις 2 ώρες ενώ ταυτόχρονα στα δοχεία αυτά απαιτείται μικρή συγκέντρωση, ο όγκος που απαιτείται είναι μεγάλος με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος τους. Όσον αφορά τους ξηραντήρες, υψηλό κόστος εξοπλισμού εμφανίζουν ο D_1 και ο D_5 καθώς και οι δύο χρησιμοποιούνται για ξήρανση ευαίσθητων υλικών, αφού περιέχεται στα ρεύματα πολυμερές. Πιο αναλυτικά, τα κόστη των εξοπλισμών μεμονωμένα, καθώς και τα συνολικά κόστη μετά την εγκατάσταση αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 19.

Πίνακας 19 Κόστος εξοπλισμού και συνολικό κόστος εξοπλισμού μετά την εγκατάσταση.

Εξοπλισμός	Ονοματολογία APEA	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού	Εξοπλισμός	Ονοματολογία APEA	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού
Συμπηκνωτήρας στήλης	DHE TEMA EXCH	$96,700.00	$26,300.00	Φίλτρο F1	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Δοχείο στήλης	DHT HORIZ DRUM	$109,500.00	$18,000.00	Φίλτρο F2	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Αναβραστήρας στήλης	DRB U TUBE	$120,400.00	$33,600.00	Φίλτρο F3	DVS LD STOCK	$97,400.00	$41,800.00
Αντλία στήλης	DCP CENTRIF	$40,500.00	$6,100.00	Φίλτρο F4	DVS LD STOCK	$87,500.00	$35,200.00
Στήλη	DTW TRAYED	$292,500.00	$89,500.00	Φίλτρο F5	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Ξηραντήρας D1	EDD SINGLE VAC	$730,200.00	$589,200.00	Φίλτρο F6	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D2	EDD DOUBLE ATM	$335,500.00	$258,700.00	Φίλτρο F7	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D3	ERD JAC VACUUM	$72,700.00	$47,800.00	Φίλτρο F8	DVS LD STOCK	$84,800.00	$33,900.00
Ξηραντήρας D4	EDD SINGLE VAC	$367,600.00	$289,400.00	Φίλτρο F9	DF ROTY DISK	$192,100.00	$80,800.00
Ξηραντήρας D5	EDD SINGLE VAC	$653,700.00	$525,900.00	Δοχείο S1	DVT CYLINDER	$170,300.00	$29,100.00
Εναλλάκτης E1	DHE PRE ENGR	$50,500.00	$2,100.00	Δοχείο V1	DAT REACTOR	$545,700.00	$337,400.00
Εναλλάκτης E2	DHE PRE ENGR	$57,100.00	$6,200.00	Δοχείο V2	DAT REACTOR	$227,200.00	$82,800.00
Εναλλάκτης E3	DHE PRE ENGR	$53,100.00	$2,300.00	Δοχείο V3	DAT REACTOR	$227,200.00	$82,800.00
Εναλλάκτης E4	DHE TEMA EXCH	$61,000.00	$10,900.00	Δοχείο V4	DAT MIXER	$348,500.00	$200,400.00
Εναλλάκτης E5	DHE PRE ENGR	$51,000.00	$2,000.00	Υδροπολτοποιητής Y1	DAT MIXER	$933,400.00	$626,000.00
Συμπυκνωτήρας E6	DHE AIR COOLER	$71,100.00	$32,000.00	Υδροπολτοποιητής Y2	DAT MIXER	$575,500.00	$340,600.00

Αναφορικά με τα λειτουργικά έξοδα της μονάδας, αυτά ανέρχονται περίπου στα 6,865,000 $. Στα έξοδα αυτά συμπεριλαμβάνονται οι πρώτες ύλες, τα εργατικά, το κόστος συντήρησης, η εξασφάλιση των απαιτούμενων ρευμάτων ενέργειας καθώς και άλλες πρόσθετες χρεώσεις. Τη μεγαλύτερη συμβολή στο ποσό αυτό φαίνεται ότι έχουν οι ενεργειακές απαιτήσεις καθώς και οι πρώτες ύλες. Σχετικά με τις πρώτες ύλες, οι δαπάνες που απαιτούνται οφείλονται αρχικά στο κόστος περισυλλογής που για λόγους απλούστευσης έχει τεθεί ως κόστος αγοράς του ρεύματος της συσκευασίας, αλλά και για την κάλυψη των απωλειών που υπάρχουν στα υγρά ρεύματα των διεργασιών. Αναζητώντας τις απώλειες, αυτές εμφανίζονται στην υδροπολτοποίηση, μέσω του ρεύματος που εξυπηρετεί τον σκοπό αυτό, ενώ απώλειες υπάρχουν και σε διαλύτη και αντιδιαλύτη, μέσω του χαρτιού που απορρίπτεται κατά την Ε.Δ.Α.. Όσον αφορά τις ενεργειακές απαιτήσεις, μεγάλη κατανάλωση σε ατμό υπάρχει στον αναβραστήρα της στήλης αλλά και στους εναλλάκτες E_2 και E_3, ενώ σχετικά με την κατανάλωση σε ηλεκτρικό ρεύμα, μεγαλύτερη συμβολή παρουσιάζουν οι ξηραντήρες D_1, D_2, D_5, καθώς και η αντλία στη θέση της στήλης. Πιο αναλυτικά, παρακάτω παρουσιάζονται οι ενεργειακές καταναλώσεις αλλά και τα κόστη πρώτων υλών για το υπό μελέτη σενάριο.

Πίνακας 20 Ρυθμός κατανάλωσης βοηθητικών ρευμάτων, ηλεκτρισμού και κόστος αυτών ανά ώρα και ανά έτος

Περιγραφή	Ρυθμός	Μονάδες Ρυθμού	Κόστος ανά ώρα	Κόστος ανά έτος
Ηλεκτρισμός	617.179	KW	$47.83	$382,650.98
Νερό ψύξης	0.0785	MMGAL/H	$9.42	$75,378.24
Ρεύμα ατμού Πίεσης 100 PSI	23.476	KLB/H	$191.10	$1,528,795.54

Πίνακας 21 Μαζική παροχή ρευμάτων στη διεργασία και κόστος αυτών ανά ώρα και ανά έτος.

Ρεύμα	Μαζική Παροχή (Kg/hr)	Κόστος ανά ώρα	Κόστος ανά έτος
AP_0	937.75	$28.11	$224,867.73
C_0	2813.25	$84.33	$674,603.18
I_0	10.57	$17.05	$136,397.39
W_0	2172.84	$0.18	$1,455.83
W_{02}	2.79	$0.00	$1.87
X_0	2.98	$3.47	$27,745.16

5.6 Δείκτες αξιολόγησης επένδυσης

Προκειμένου να εξαχθεί συμπέρασμα για τη συμπεριφορά των εσόδων και των εξόδων της μονάδας αρκεί να αναλυθούν οι δείκτες αξιολόγησης της επένδυσης για το σενάριο που επιλέχθηκε, δηλαδή για δυναμικότητα 30,000 τόνων ετησίως και για πρόσθετο κόστος της τάξης των 0,03 $ ανά κιλό απορρίμματος. Παρακάτω ακολουθεί επεξήγηση των εννοιών των δεικτών ενώ οι τιμές αυτών παρουσιάζονται στον πίνακα 22.

1) Χρόνος Επιστροφής των Επενδυμένων Χρημάτων (payback period)

Ο δείκτης αυτός δηλώνει το χρονικό διάστημα που απαιτείται προκειμένου η επένδυση να έχει αποσβέσει πλήρως το αρχικό της κόστος. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό αβεβαιότητας καθώς υπάρχει ανάγκη αναπροσαρμογής των μελλοντικών χρηματοροών στην τρέχουσα χρονική στιγμή, διαδικασία στην οποία εμπλέκονται κριτήρια και δείκτες, οι οποίοι σχετίζονται με κάποιο ρίσκο για τον υπολογισμό τους. Από την έννοια του δείκτη αλλά και από όσα προαναφέρθηκαν, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη αυτού, τόσο ασφαλέστερη είναι η πρόβλεψή του και τόσο πιο συμφέρουσα θεωρείται η επένδυση [29].

2) Λογιστικός Ρυθμός Απόδοσης Χρημάτων (ARR)

Αντίθετα με τον προηγούμενο δείκτη που εστιάζει στην ταχύτητα απόσβεσης της επένδυσης, ο Λογιστικός Ρυθμός Απόδοσης Χρημάτων επικεντρώνεται στην απόδοση της επένδυσης γενικότερα. Ο δείκτης ARR ορίζεται ως το πηλίκο του μέσου ετήσιου

αναμενόμενου εισοδήματος και του μέσου κόστους της επένδυσης. Πιο αναλυτικά το μέσο ετήσιο εισόδημα υπολογίζεται από τη μέση ετήσια εισροή, όταν αφαιρεθεί από αυτή η μέση ετήσια εκροή. Αντίστοιχα η μέση ετήσια εισροή είναι η συνολική εισροή διαιρεμένη με τον χρόνο ζωής της επένδυσης. Η μέση ετήσια εκροή θεωρείται η ομοιόμορφη απόσβεση του αρχικού ποσού της επένδυσης. Τέλος, το μέσο κόστος της επένδυσης προκύπτει από τη μέση τιμή της αξίας της επένδυσης και της τελικής τιμής πώλησης. Κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου αξιολόγησης αυτής αποτελεί το γεγονός ότι παραλείπεται οποιαδήποτε αναφορά σε κόστος κεφαλαίου[29].

3) *Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV)*

Η καθαρή παρούσα αξία ορίζεται ως το άθροισμα των παρουσών αξιών των εισερχόμενων και εξερχόμενων ταμειακών ροών, με συνυπολογισμό του κόστους κεφαλαίου, κατά τη διάρκεια μίας χρονικής περιόδου. Στην πραγματικότητα, με τον δείκτη αυτό υπολογίζεται το πλεόνασμα ή η έλλειψη ταμειακών ροών σε όρους παρούσας αξίας σε σχέση με το κόστος κεφαλαίου που χρησιμοποιήθηκε σε μία επένδυση. Ο δείκτης αυτός, μαζί με τον Εσωτερικό Συντελεστή Απόδοσης (IRR) ο οποίος θα περιγραφεί παρακάτω, χρησιμοποιούνται στη συγκριτική αξιολόγηση επενδυτικών προτάσεων, όπου η ροή του εισοδήματος διαφέρει στην πάροδο του χρόνου. Το κύριο μειονέκτημα της Καθαρής Παρούσας Αξίας αποτελεί το γεγονός ότι οι εκτιμώμενες ταμειακές ροές σπανίως συμπίπτουν με τα πραγματικά αποτελέσματα, καθώς εξαρτώνται από πάρα πολλές μεταβλητές κι από τις υποκειμενικές εκτιμήσεις των αναλυτών κατά τη διάρκεια του οικονομικού προϋπολογισμού. Τέλος σχετικά με τις τιμές που λαμβάνει ο δείκτης, μηδενική τιμή αυτού σημαίνει ότι τα έσοδα από το έργο αποπληρώνουν την αρχική επένδυση, χωρίς όφελος ή ζημιά για τον επενδυτή, ενώ θετική ή αρνητική τιμή αυτού δείχνουν ότι η επένδυση είναι κερδοφόρα ή ζημιογόνα αντίστοιχα [29].

4) *Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)*

Ο δείκτης αυτός αρχικά φαίνεται να ισοδυναμεί με την παραπάνω προσέγγιση της αναγωγής σε παρούσα αξία. Ωστόσο αντί να θεωρείται δεδομένο το κόστος του κεφαλαίου και να επιχειρείται η αναγωγή σε παρούσα αξία, αναζητείται το κόστος του κεφαλαίου εκείνο που θα καθιστούσε μηδενική την παρούσα αξία της επένδυσης. Πιο συγκεκριμένα ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης είναι ένας δείκτης ο οποίος μετρά την απόδοση μίας μακροχρόνιας επένδυσης, εξισώνοντας την παρούσα αξία των μελλοντικών ταμειακών ροών πλέον της τελικής αγοραίας αξίας, με την τρέχουσα αγοραία αξία της επένδυσης. Με βάση τον δείκτη IRR η επένδυση αξιολογείται θετικά αν ο δείκτης προκύπτει μεγαλύτερος από το κόστος της επένδυσης. Αντίστοιχα, εφόσον αποτελεί και αυτός συγκριτική μέθοδο, προκειμένου για δύο επενδύσεις προτιμάται η επένδυση που έχει τη μεγαλύτερη τιμή IRR. Είναι λογικό, μία επένδυση που έχει απόδοση μικρότερη από το κόστος του κεφαλαίου να είναι οικονομικά ασύμφορη και να απορρίπτεται. Αν και η μέθοδος παρουσιάζει απλότητα και αναγνωρίζει πλήρως τη διαχρονική αξία του χρήματος, το κύριο μειονέκτημα αυτής αποτελεί το γεγονός ότι η μέθοδος υποθέτει ότι οι μελλοντικές εισροές επαναεπενδύονται με επιτόκιο ίσο με τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης. Ταυτόχρονα απαιτεί την ακριβή πρόβλεψη των ταμειακών ροών, η οποία γίνεται δυσκολότερη όταν πρόκειται για περιόδους απομακρυσμένες χρονικά από το παρόν [29].

5) Τροποποιημένος Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (MIRR)

Παρά τα αρνητικά που προαναφέρθηκαν για τον δείκτη IRR, αυτός χρησιμοποιείται ευρύτατα καθώς έχει ένα πολύ συγκεκριμένο περιεχόμενο το οποίο δίνει σαφείς ενδείξεις για την απόδοση της επένδυσης σε σχέση με το κόστος του κεφαλαίου. Από την άλλη πλευρά, η ΚΠΑ αντιπροσωπεύει ένα απόλυτο μέγεθος που δεν προσφέρει ένα μέτρο σύγκρισης ως προς κάτι άλλο. Για τους λόγους αυτούς ορίστηκε η έννοια του Τροποποιημένου Εσωτερικού Συντελεστή Απόδοσης η οποία καλείται να βελτιώσει σε αρκετές περιπτώσεις τον IRR. Ο MIRR λοιπόν βασίζεται πολύ λιγότερο στην εσφαλμένη παραδοχή της επαναπένδυσης των χρημάτων με βάση τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης. Επίσης ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται μόνο στην τελική φάση αναγωγής των μελλοντικών εισροών σε παρούσα αξία [29].

6) Δείκτης Κερδοφορίας (Profitability Index- PI)

Ο δείκτης κερδοφορίας συσχετίζει με τη μορφή πηλίκου τις εκροές και τις εισροές και στη συνέχεια ανάγει την τιμή αυτή σε παρούσα αξία. Ο δείκτης αυτός δηλαδή προκύπτει από τη διαίρεση της παρούσας αξίας των εισροών και των εκροών. Μία επένδυση αποκτά νόημα όταν η τιμή του δείκτη κερδοφορίας λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας, ενώ αν επιχειρηθεί σύγκριση μεταξύ δύο επενδύσεων με κριτήριο τον δείκτη αυτό, προτιμάται η επένδυση με τη μεγαλύτερη τιμή [29].

Λαμβάνοντας υπό όψη όλα τα παραπάνω, παρουσιάζεται ο πίνακας με τις τιμές των δεικτών που αναφέρθηκαν. Αρχικά, η τιμή που λαμβάνει ο δείκτης που σχετίζεται με τον χρόνο επιστροφής των επενδυμένων χρημάτων λαμβάνει τιμή μικρότερη των δέκα ετών, γεγονός που επιδεικνύει καθαρή κερδοφορία μετά τα δέκα έτη. Ταυτόχρονα η καθαρή παρούσα αξία είναι κατά πολύ μεγαλύτερη του μηδέν, το οποίο είναι σημείο αναφοράς κερδοφορίας, ενώ η τιμή του δείκτη κερδοφορίας είναι μεγαλύτερη της μονάδας, αποτελώντας ακόμη μία ένδειξη της βιωσιμότητας της εξεταζόμενης επένδυσης.

Πίνακας 22 Τιμές δεικτών οικονομικής αξιολόγησης.

Δείκτης	Μονάδες	Τιμή
Χρόνος Επιστροφής Επενδυμένων Χρημάτων (Payback Period)	Έτη	9.257
Λογιστικός Ρυθμός Απόδοσης (ARR)	%	18.275
Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) (10ο έτος)	Κόστος/Έτος	1,704.020
Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)	%	22.447
Τροποποιημένος Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (MIRR)	%	20.237
Δείκτης Κερδοφορίας (Profitability Index- PI)	-	1.019

6. Σύνοψη Εργασίας, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Από το 1907, που πραγματοποιήθηκε η παραγωγή του πρώτου σύνθετου πλαστικού υλικού, μέχρι σήμερα, η βιομηχανία των πλαστικών έχει αναπτυχθεί ραγδαία. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα πλαστικά υλικά σχετικά με τις μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες ενώ καθοριστικός παράγοντας για την χρήση τους σε πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών αποτελεί το χαμηλό κόστος που απαιτείται για την παραγωγή τους. Πιο συγκεκριμένα, τα τελευταία 70 έτη η παραγωγή αυξήθηκε κατά περίπου 200 φορές, αγγίζοντας το ύψος των 348 εκατομμυρίων τόνων κατά το έτος 2017.

Στους τομείς χρήσης των πλαστικών, η συσκευασία καταλαμβάνει την πρώτη θέση, καθώς οι εφαρμογές της για την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών απαιτούν ποσότητες της τάξης του 40% της συνολικής παραγωγής [2]. Σχετικά με το πολυαιθυλένιο, το οποίο αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας μελέτης, αποτελεί το πιο διαδεδομένο υλικό σε τέτοιες εφαρμογές με αποτέλεσμα κατά το έτος 2017 να παραχθούν ποσότητες ύψους 15.2 εκατομμυρίων τόνων.

Στον τομέα της συσκευασίας, πραγματοποιείται ανακύκλωση κυρίως σε πλαστικά μπουκάλια, δοχεία και σακούλες. Ωστόσο, με την ανάπτυξη πολυστρωματικών συσκευασιών που αποτελούνται από περισσότερα από ένα υλικά, προκύπτει η ανάγκη διαχείρισής τους με νέες τεχνολογίες.

Μία από τις πιο διαδεδομένες πολυστρωματικές συσκευασίες είναι η Tetra Pak, η οποία αποτελείται από χαρτί, LDPE και αλουμίνιο σε αναλογίες 75%, 25% και 5% αντίστοιχα [6]. Προς το παρόν, η ανακύκλωση τους αφορά μόνο στην ανακύκλωση του χαρτιού. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η προσομοίωση και η οικονομική αξιολόγηση βιομηχανικής μονάδας ανακύκλωσης πολυστρωματικών συσκευασιών Tetra Pak, για την ανάκτηση και των τριών υλικών που την απαρτίζουν, αξιοποιώντας την κλασσική τεχνική της υδροπολτοποίησης για την ανάκτηση του χαρτιού και την μέθοδο της Επιλεκτικής Διάλυσης/Ανακαταβύθισης για την ανάκτηση του πολυαιθυλενίου και του αλουμινίου.

Η προσομοίωση βασίστηκε σε πειραματικά δεδομένα που έχουν προκύψει στα πλαίσια προηγούμενης πειραματικής μελέτης η οποίας κατέδειξε την τεχνική εφικτότητα της προτεινόμενης διεργασίας.

Μέσω της προσομοίωσης της παραπάνω διεργασίας με χρήση του εμπορικού λογισμικού Aspen Plus V8.8, υπολογίστηκε το κόστος που απαιτείται για την ανάκτηση των υλικών. Πιο συγκεκριμένα συμπεραίνεται ότι:

- Για δυναμικότητες διαχείρισης μεγαλύτερες των 17,000 τόνων ετησίως, το κόστος ανάκτησης γίνεται χαμηλότερο από την αξία που έχουν τα παρθένα υλικά, οπότε η διεργασία γίνεται βιώσιμη.
- Η δυναμικότητα διαχείρισης που επιλέγεται για ανάλυση, θεωρείται η καταλληλότερη για την περιοχή της Ελλάδας και είναι αυτή των 30,000 τόνων ετησίως, που αντιστοιχεί σε κατανάλωση 174 συσκευασιών των 330 ml ανά κάτοικο ετησίως.

Πιο συγκεκριμένα, για τη δυναμικότητα αυτή:

- Το κόστος κεφαλαίου ανέρχεται στα 20,060,000 $ ενώ τα ετήσια λειτουργικά έξοδα ανέρχονται στα 6,865,000 $.
- Το κόστος ανάκτησης που επιτυγχάνει η δυναμικότητα αυτή είναι 0.253$ ανά κιλό παραγόμενου προϊόντος, με το αντίστοιχο παρθένο να κοστίζει 0.389$ ανά κιλό.
- Η ανοχή σε πρόσθετα έξοδα συλλογής και διαλογής για τη δυναμικότητα που επιλέχθηκε ανέρχεται στα 0.11 $ ανά κιλό.
- Με υπόθεση ότι τα πρόσθετα έξοδα θα ανέλθουν στα 0.03 $ ανά κιλό, η αποπληρωμή του κεφαλαίου διαρκεί λιγότερο των 10 ετών ενώ οι δείκτες οικονομικής αξιολόγησης δίνουν θετικά στοιχεία.

Συμπερασματικά, προκύπτει με τον συνδυασμό Υδροπολτοποίησης και Επιλεκτικής Διάλυσης/Ανακαταβύθισης είναι οικονομικά εφικτή σε βιομηχανική κλίμακα η ανάκτηση και των τριών υλικών (χαρτί, πολυαιθυλένιο, αλουμίνιο) που απαρτίζουν τις πολυστρωματικές συσκευασίες. Οι δυναμικότητες διαχείρισης για τις οποίες η μονάδα παρουσιάζεται βιώσιμη είναι απόλυτα λογικές, αφού αναφέρονται σε κατανάλωση της τάξης των 100 συσκευασιών ανά κάτοικο ημερήσια. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς επιτυγχάνεται ανάκτηση των υλικών με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή τους, γεγονός που

βοηθάει στην καταπολέμηση του τεράστιου περιβαλλοντικού ζητήματος που καλείται να αντιμετωπίσει η κοινωνία μας σήμερα, ενώ παράλληλα η διαχείριση αυτή παρουσιάζεται κερδοφόρα.

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας είναι ενθαρρυντικά και για τον λόγο αυτό εμφανίζεται μεγάλο ενδιαφέρον στην περαιτέρω μελέτη του ζητήματος. Πιο συγκεκριμένα, για μία πιο πλήρη μελέτη:

- Αξίζει να μελετηθούν περισσότερα σενάρια με διαφοροποιήσεις τόσο στη δυναμικότητα όσο και στη διάταξη της μονάδας και στις απώλειες των διαφόρων ρευμάτων.
- Σημαντική είναι η χωροθέτηση της μονάδας σε συγκεκριμένη τοποθεσία του ελλαδικού χώρου ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα πιθανά πρόσθετα έξοδα που αφορούν τη συλλογή, τη διαλογή και τη μεταφορά των απορριμμάτων.
- Ενδιαφέρον αποτελέσματα θα επιφέρει η ανάλυση της ελληνικής αγοράς συσκευασιών Tetra Pak, ώστε να υπάρξουν σαφή στοιχεία σχετικά με την κατανάλωση στην περιοχή που θα εξυπηρετεί η μελετούμενη μονάδα.

Βιβλιογραφία

[1] Ritchie, H. and Roser, M., «*Plastic Pollution*», Our World in Data, 2019. https://ourworldindata.org/plastic-pollution (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019)

[2] Plastics Europe: Association of Plastics, «*Plastics-The Facts 2018*», 2019 https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).

[3] Χρίστου Άντια, *«Ανάκτηση PVC και πλαστικοποιητών από χρησιμοποιημένα δάπεδα PVC»*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2016.

[4] *«Τεχνολογία Ανακύκλωσης Πλαστικών»*, 2019, http://users.uoi.gr/nbarkoul/%D5%EB%E9%EA%DC%20%D3%F5%F3%EA%E5%F5%E1%F3%DF%E1%F2%20%EA%E1%E9%20%C1%ED%E1%EA%FD%EA%EB%F9%F3%E7/Lecture%209_%D4%E5%F7%ED%EF%EB%EF%E3%DF%E1%20%E1%ED%E1%EA%FD%EA%EB%F9%F3%E7%F2%20%F0%EB%E1%F3%F4%E9%EA%FE%ED.pdf (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).

[5] Θεοδοσούλη Αν. Κυριακή, *«Ανακύκλωση Πλαστικών Υλικών»,* Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Κρήτη.

[6] Γεωργιοπούλου Ι. *«Ανακύκλωση υλικών πολυστρωματικής συσκευασίας Tetra Pak®. Διπλωματική εργασία»*, , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα 2018.

[7] Χριστίδης Σάββας, «*Ανακύκλωση Βιομηχανικού και Αστικού Υπολείμματος Πολυπροπυλενίου μέσω Εκβολής Αντιδρώντος Συστήματος*», Διπλωματική Εργασία, , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2015.

[8] «*Tetra Laval 2017-2018*» https://tlcomprod2.azureedge.net/static/documents/tetra-laval-2017-2018.pdf (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).

[9] ZHANG, J., YAN, D. & LI, Z. «*The Recycling of the Tetra-Pak Packages: Research on the Wet Process Separation Conditions of Aluminum and Polythene in the Tetra-Pak Packages»,* 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2009, pp.1-6.

[10] Zhang, S., Luo, K., Zhang, L. et al., *«Interfacial Separation and Characterization of Al-PE Composites During Delamination of Post-consumer Tetra Pak Materials, Journal of Chemical Technology and Biotechnology»,* 90(6), 2015, pp.1152-1159.

[11] Zawadiak J., Wojciechowski S, Piotrowski T., Krypa A., *«Tetra Pak Recycling: Current Trends and New Developments»*, American Journal of Chemical Engineering, 5(3), 2017, pp.37-42.

[12] K. Korniejenko, S. Kuciel, J. Mikuła. *«Ocena możliwości wytwarzania płyt dla potrzeb budownictwa ze zużytych opakowań typu tetra-pak»*, Archives of Foundry Engineering, 10, 2010, pp.119-124

[13] Aseptic Packaging Council*, «Recycling Aseptic Packaging: the Hydrapulping Process»,* Washington D.C., 1992.

[14] Zhang J., Yan D., Li Z. (2012), «*The Recycling of the Tetra-Pak Packages: Research on the Wet Process Separation Conditions of Aluminum and Polythene in the Tetra-Pak Packages*», Chung-kuo Tsao Chih/China Pulp and Paper 31(3), 2012, pp.20-24.

[15] Rodríguez-Gómez J.E., Silva-Reynoso Y.Q., Varela-Guerrero V., Núñez-Pineda A., Barrera-Díaz C.E., «*Development of a process using waste vegetable oil for separation of aluminum and polyethylene from Tetra Pak»*, Fuel 149, 2015, pp.90-94.
[16] Ignatyev I.A., Thielemans W., Vander Beke B*., «Recycling of Polymers: A Review»,* Wiley Online Library, ChemSusChem 2014, 7, pp.1579–1593.
[17] Pappa G., Boukouvalas C., Giannaris C., Ntaras N., Zografos V., Magoulas K., Lygeros A., Tassios D., *«The selective dissolution/precipitation technique for polymer recycling: a pilot unit application»*, Resources Conservation and Recycling 34, 2001, pp.33–44.
[18] Παππά Γεωργία, *«Ισορροπία Φάσεων σε Διαλύματα Πολυμερών: Μοντελοποίηση και Εφαρμογή στην Ανακύκλωση Πολυμερών»,* Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2002.
[19] Kannan P., Lakshmanan G., Al Shoaibi, Srinivasakannan C., Brief Communication: *«Polymer Recovery Through Selective Dissolution of Co-mingled Post-Consumer Waste Plastics»,* Department of Chemical Engineering, The Petroleum Institute, Abu Dhabi, U.A.E.
[20] Nalawade S.P., Picchioni F., Janssen L.P.B.M., *«Supercritical carbon dioxide as a green solvent for processing polymer melts: Processing aspects and applications»,* Prog. Polym. Sci. 31, 2006, 19–43.
[21] Goodship V., Ogur E.O., *«Polymer Processing with Supercritical Fluids, Smithers Rapra Publishing»*, 15(8), 2004, pp.15-16.
[22] Samorì, C., Cespi, D., Blair, P., Galletti, P., Malferrari, D., Passarini, F., … Tagliavini, E., «*Application of switchable hydrophilicity solvents for recycling multilayer packaging materials»*. Green Chemistry, 19(7), 2017, pp.1714–1720.
[23] Nauman et al., «*Polymer Recycling by Selective Dissolution»*, U.S. patent No. 5278282, 1994.
[24] Olutoye, M., «*Design of a Manually Operated Paper-Recycling Machine»*, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2005.
[25] https://www.intratec.us/chemical-markets/isopropanol-price (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).
[26] https://www.intratec.us/chemical-markets/process-water-price (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).
[27] https://www.intratec.us/chemical-markets/xylene-price (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).
[28] PERRY, R. H., & GREEN, D. W., «*Perry's chemical engineers' handbook»*, New York, McGraw-Hill, 2008.
[29] Νίκος Σακκάς, *«Αξιολόγηση Επενδύσεων, ΜΕΡΟΣ 1: Βασική Θεωρία»,* Κρήτη 2002
[30] Πουλάκης Γ. ,«Ανάκτηση Πλαστικών Υλικών από Στερέα Απορρίμματα», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1998.
[31] *«ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ»,* GREENPEACE. https://www.voria.gr/elfinder/EU_plastics_factsheet_greek_LR.pdf (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).
[32] https://www.tetrapak.com/about/history (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).

[33] https://markets.businessinsider.com/commodities/aluminum-price (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).
[34] https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/ldpe/ (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).
[35] https://www.letsrecycle.com/prices/waste-paper/ (Τελευταία πρόσβαση 24/6/2019).
[36] Aspen Capital Cost Estimator Users' Guide, Aspen Tech, 2012

Παράρτημα Πινάκων

Παράρτημα Πίνακας 1 Κόστη ανά δυναμικότητα.

Δυναμικότητα (tn/έτος)	Πάγιο κόστος (USD)	Λειτουργικό Κόστος (USD/έτος)	Κόστος Ανάκτησης (USD/Kg)
10,000	16,956,300	4,149,650	0.5679
20,000	18,846,200	5,031,540	0.3360
30,000	20,059,300	5,823,430	0.2536
40,000	20,856,600	6,548,060	0.2097
50,000	22,329,000	7,459,960	0.1884
60,000	24,069,900	8,432,540	0.1755

Παράρτημα Πίνακας 2 Κόστος εξοπλισμού μονάδας δυναμικότητας 10,000 τόνων ετησίως.

Εξοπλισμός	Ονοματολογία ΑΡΕΑ	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού	Εξοπλισμός	Ονοματολογία ΑΡΕΑ	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού
Συμπηκνωτήρας στήλης	DHE TEMA EXCH	$73,400.00	$14,600.00	Φίλτρο F1	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Δοχείο στήλης	DHT HORIZ DRUM	$80,200.00	$11,200.00	Φίλτρο F2	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Αναβραστήρας στήλης	DRB U TUBE	$91,200.00	$18,000.00	Φίλτρο F3	DVS LD STOCK	$86,100.00	$34,500.00
Αντλία στήλης	DCP CENTRIF	$34,100.00	$5,100.00	Φίλτρο F4	DVS LD STOCK	$84,800.00	$33,900.00
Στήλη	DTW TRAYED	$226,500.00	$61,200.00	Φίλτρο F5	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Ξηραντήρας D1	EDD SINGLE VAC	$481,900.00	$383,700.00	Φίλτρο F6	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D2	EDD DOUBLE ATM	$198,500.00	$148,900.00	Φίλτρο F7	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D3	ERD JAC VACUUM	$72,700.00	$47,800.00	Φίλτρο F8	DVS LD STOCK	$84,800.00	$33,900.00
Ξηραντήρας D4	EDD SINGLE VAC	$367,600.00	$289,400.00	Φίλτρο F9	DF ROTY DISK	$192,100.00	$80,800.00
Ξηραντήρας D5	EDD SINGLE VAC	$431,900.00	$342,400.00	Δοχείο S1	DVT CYLINDER	$128,500.00	$23,000.00
Εναλλάκτης E1	DHE PRE ENGR	$37,300.00	$1,300.00	Δοχείο V1	DAT REACTOR	$304,000.00	$145,800.00
Εναλλάκτης E2	DHE PRE ENGR	$53,700.00	$2,800.00	Δοχείο V2	DAT REACTOR	$199,600.00	$58,800.00
Εναλλάκτης E3	DHE PRE ENGR	$38,900.00	$1,300.00	Δοχείο V3	DAT REACTOR	$199,600.00	$58,800.00
Εναλλάκτης E4	DHE PRE ENGR	$51,500.00	$2,900.00	Δοχείο V4	DAT MIXER	$269,000.00	$139,500.00
Εναλλάκτης E5	DHE PRE ENGR	$37,000.00	$1,200.00	Υδροπολτοποιητής Y1	DAT MIXER	$508,700.00	$293,100.00
Συμπυκνωτήρας E6	DHE AIR COOLER	$70,200.00	$31,100.00	Υδροπολτοποιητής Y2	DAT MIXER	$475,000.00	$279,900.00

Παράρτημα Πίνακας 3 Κόστος εξοπλισμού μονάδας δυναμικότητας 20,000 τόνων ετησίως.

Εξοπλισμός	Ονοματολογία ΑΡΕΑ	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού	Εξοπλισμός	Ονοματολογία ΑΡΕΑ	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού
Συμπηκνωτήρας στήλης	DHE TEMA EXCH	$89,800.00	$19,900.00	Φίλτρο F1	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Δοχείο στήλης	DHT HORIZ DRUM	$107,500.00	$16,900.00	Φίλτρο F2	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Αναβραστήρας στήλης	DRB U TUBE	$103,600.00	$27,200.00	Φίλτρο F3	DVS LD STOCK	$90,300.00	$36,500.00
Αντλία στήλης	DCP CENTRIF	$38,800.00	$5,700.00	Φίλτρο F4	DVS LD STOCK	$86,100.00	$34,500.00
Στήλη	DTW TRAYED	$264,600.00	$78,500.00	Φίλτρο F5	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Ξηραντήρας D1	EDD SINGLE VAC	$625,900.00	$502,800.00	Φίλτρο F6	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D2	EDD DOUBLE ATM	$250,400.00	$190,700.00	Φίλτρο F7	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D3	ERD JAC VACUUM	$72,700.00	$47,800.00	Φίλτρο F8	DVS LD STOCK	$84,800.00	$33,900.00
Ξηραντήρας D4	EDD SINGLE VAC	$367,600.00	$289,400.00	Φίλτρο F9	DF ROTY DISK	$192,100.00	$80,800.00
Ξηραντήρας D5	EDD SINGLE VAC	$560,700.00	$448,800.00	Δοχείο S1	DVT CYLINDER	$168,500.00	$28,700.00
Εναλλάκτης E1	DHE PRE ENGR	$43,600.00	$1,900.00	Δοχείο V1	DAT REACTOR	$677,900.00	$445,300.00
Εναλλάκτης E2	DHE PRE ENGR	$55,500.00	$4,600.00	Δοχείο V2	DAT REACTOR	$218,600.00	$75,900.00
Εναλλάκτης E3	DHE PRE ENGR	$52,900.00	$2,100.00	Δοχείο V3	DAT REACTOR	$218,600.00	$75,900.00
Εναλλάκτης E4	DHE PRE ENGR	$53,400.00	$4,700.00	Δοχείο V4	DAT MIXER	$360,300.00	$161,800.00
Εναλλάκτης E5	DHE PRE ENGR	$43,200.00	$1,500.00	Υδροπολτοποιητής Y1	DAT MIXER	$724,100.00	$464,900.00
Συμπυκνωτήρας E6	DHE AIR COOLER	$71,100.00	$32,000.00	Υδροπολτοποιητής Y2	DAT MIXER	$475,400.00	$307,400.00

Παράρτημα Πίνακας 4 Κόστος εξοπλισμού μονάδας δυναμικότητας 30,000 τόνων ετησίως.

Εξοπλισμός	Ονοματολογία APEA	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού	Εξοπλισμός	Ονοματολογία APEA	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού
Συμπηκνωτήρας στήλης	DHE TEMA EXCH	$96,700.00	$26,300.00	Φίλτρο F1	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Δοχείο στήλης	DHT HORIZ DRUM	$109,500.00	$18,000.00	Φίλτρο F2	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Αναβραστήρας στήλης	DRB U TUBE	$120,400.00	$33,600.00	Φίλτρο F3	DVS LD STOCK	$97,400.00	$41,800.00
Αντλία στήλης	DCP CENTRIF	$40,500.00	$6,100.00	Φίλτρο F4	DVS LD STOCK	$87,500.00	$35,200.00
Στήλη	DTW TRAYED	$292,500.00	$89,500.00	Φίλτρο F5	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Ξηραντήρας D1	EDD SINGLE VAC	$730,200.00	$589,200.00	Φίλτρο F6	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D2	EDD DOUBLE ATM	$335,500.00	$258,700.00	Φίλτρο F7	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D3	ERD JAC VACUUM	$72,700.00	$47,800.00	Φίλτρο F8	DVS LD STOCK	$84,800.00	$33,900.00
Ξηραντήρας D4	EDD SINGLE VAC	$367,600.00	$289,400.00	Φίλτρο F9	DF ROTY DISK	$192,100.00	$80,800.00
Ξηραντήρας D5	EDD SINGLE VAC	$653,700.00	$525,900.00	Δοχείο S1	DVT CYLINDER	$170,300.00	$29,100.00
Εναλλάκτης E1	DHE PRE ENGR	$50,500.00	$2,100.00	Δοχείο V1	DAT REACTOR	$545,700.00	$337,400.00
Εναλλάκτης E2	DHE PRE ENGR	$57,100.00	$6,200.00	Δοχείο V2	DAT REACTOR	$227,200.00	$82,800.00
Εναλλάκτης E3	DHE PRE ENGR	$53,100.00	$2,300.00	Δοχείο V3	DAT REACTOR	$227,200.00	$82,800.00
Εναλλάκτης E4	DHE TEMA EXCH	$61,000.00	$10,900.00	Δοχείο V4	DAT MIXER	$348,500.00	$200,400.00
Εναλλάκτης E5	DHE PRE ENGR	$51,000.00	$2,000.00	Υδροπολτοποιητής Y1	DAT MIXER	$933,400.00	$626,000.00
Συμπυκνωτήρας E6	DHE AIR COOLER	$71,100.00	$32,000.00	Υδροπολτοποιητής Y2	DAT MIXER	$575,500.00	$340,600.00

Παράρτημα Πίνακας 5 Κόστος εξοπλισμού μονάδας δυναμικότητας 40,000 τόνων ετησίως.

Εξοπλισμός	Ονοματολογία APEA	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού	Εξοπλισμός	Ονοματολογία APEA	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού
Συμπηκνωτήρας στήλης	DHE TEMA EXCH	$116,000.00	$30,700.00	Φίλτρο F1	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Δοχείο στήλης	DHT HORIZ DRUM	$119,600.00	$19,900.00	Φίλτρο F2	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Αναβραστήρας στήλης	DRB U TUBE	$131,600.00	$41,000.00	Φίλτρο F3	DVS LD STOCK	$99,500.00	$43,100.00
Αντλία στήλης	DCP CENTRIF	$41,500.00	$6,700.00	Φίλτρο F4	DVS LD STOCK	$88,800.00	$35,800.00
Στήλη	DTW TRAYED	$318,600.00	$101,700.00	Φίλτρο F5	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Ξηραντήρας D1	EDD SINGLE VAC	$814,600.00	$659,100.00	Φίλτρο F6	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D2	EDD DOUBLE ATM	$430,900.00	$337,100.00	Φίλτρο F7	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D3	ERD JAC VACUUM	$72,700.00	$47,800.00	Φίλτρο F8	DVS LD STOCK	$84,800.00	$33,900.00
Ξηραντήρας D4	EDD SINGLE VAC	$367,600.00	$289,400.00	Φίλτρο F9	DF ROTY DISK	$192,100.00	$80,800.00
Ξηραντήρας D5	EDD SINGLE VAC	$729,000.00	$588,200.00	Δοχείο S1	DVT CYLINDER	$192,700.00	$38,600.00
Εναλλάκτης E1	DHE PRE ENGR	$50,800.00	$2,300.00	Δοχείο V1	DAT REACTOR	$423,500.00	$236,200.00
Εναλλάκτης E2	DHE TEMA EXCH	$63,100.00	$11,000.00	Δοχείο V2	DAT REACTOR	$228,700.00	$83,900.00
Εναλλάκτης E3	DHE PRE ENGR	$53,700.00	$2,800.00	Δοχείο V3	DAT REACTOR	$228,700.00	$83,900.00
Εναλλάκτης E4	DHE TEMA EXCH	$69,500.00	$11,000.00	Δοχείο V4	DAT MIXER	$366,900.00	$213,700.00
Εναλλάκτης E5	DHE PRE ENGR	$51,200.00	$2,200.00	Υδροπολτοποιητής Y1	DAT MIXER	$1,067,100.00	$740,300.00
Συμπυκνωτήρας E6	DHE AIR COOLER	$72,100.00	$33,000.00	Υδροπολτοποιητής Y2	DAT MIXER	$646,900.00	$399,500.00

Παράρτημα Πίνακας 6 Κόστος εξοπλισμού μονάδας δυναμικότητας 50,000 τόνων ετησίως.

Εξοπλισμός	Ονοματολογία APEA	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού	Εξοπλισμός	Ονοματολογία APEA	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού
Συμπηκνωτήρας στήλης	DHE TEMA EXCH	$123,400.00	$37,700.00	Φίλτρο F1	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Δοχείο στήλης	DHT HORIZ DRUM	$125,100.00	$24,100.00	Φίλτρο F2	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Αναβραστήρας στήλης	DRB U TUBE	$143,300.00	$47,400.00	Φίλτρο F3	DVS LD STOCK	$144,500.00	$86,300.00
Αντλία στήλης	DCP CENTRIF	$43,900.00	$6,900.00	Φίλτρο F4	DVS LD STOCK	$90,300.00	$36,500.00
Στήλη	DTW TRAYED	$356,400.00	$116,800.00	Φίλτρο F5	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Ξηραντήρας D1	EDD SINGLE VAC	$887,400.00	$719,300.00	Φίλτρο F6	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D2	EDD DOUBLE ATM	$523,900.00	$414,000.00	Φίλτρο F7	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D3	ERD JAC VACUUM	$72,700.00	$47,800.00	Φίλτρο F8	DVS LD STOCK	$84,800.00	$33,900.00
Ξηραντήρας D4	EDD SINGLE VAC	$367,600.00	$289,400.00	Φίλτρο F9	DF ROTY DISK	$192,100.00	$80,800.00
Ξηραντήρας D5	EDD SINGLE VAC	$793,500.00	$641,600.00	Δοχείο S1	DVT CYLINDER	$179,100.00	$35,800.00
Εναλλάκτης E1	DHE PRE ENGR	$51,400.00	$2,800.00	Δοχείο V1	DAT REACTOR	$505,000.00	$308,300.00
Εναλλάκτης E2	DHE TEMA EXCH	$74,800.00	$12,700.00	Δοχείο V2	DAT REACTOR	$229,300.00	$84,300.00
Εναλλάκτης E3	DHE PRE ENGR	$54,000.00	$3,100.00	Δοχείο V3	DAT REACTOR	$229,300.00	$84,300.00
Εναλλάκτης E4	DHE TEMA EXCH	$71,500.00	$12,800.00	Δοχείο V4	DAT MIXER	$376,800.00	$225,700.00
Εναλλάκτης E5	DHE PRE ENGR	$51,400.00	$2,400.00	Υδροπολτοποιητής Y1	DAT MIXER	$1,310,300.00	$919,000.00
Συμπυκνωτήρας E6	DHE AIR COOLER	$74,500.00	$33,900.00	Υδροπολτοποιητής Y2	DAT MIXER	$805,400.00	$518,400.00

Παράρτημα Πίνακας 7 Κόστος εξοπλισμού μονάδας δυναμικότητας 60,000 τόνων ετησίως.

Εξοπλισμός	Ονοματολογία APEA	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού	Εξοπλισμός	Ονοματολογία APEA	Συνολικό κόστος	Κόστος εξοπλισμού
Συμπηκνωτήρας στήλης	DHE TEMA EXCH	$128,100.00	$42,100.00	Φίλτρο F1	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Δοχείο στήλης	DHT HORIZ DRUM	$126,300.00	$24,900.00	Φίλτρο F2	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Αναβραστήρας στήλης	DRB U TUBE	$152,000.00	$55,400.00	Φίλτρο F3	DVS LD STOCK	$144,500.00	$86,300.00
Αντλία στήλης	DCP CENTRIF	$49,200.00	$7,600.00	Φίλτρο F4	DVS LD STOCK	$95,500.00	$40,500.00
Στήλη	DTW TRAYED	$369,000.00	$122,100.00	Φίλτρο F5	EVS RECTANGLE	$21,200.00	$14,500.00
Ξηραντήρας D1	EDD SINGLE VAC	$950,400.00	$772,200.00	Φίλτρο F6	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D2	EDD DOUBLE ATM	$614,800.00	$489,700.00	Φίλτρο F7	EVS RECTANGLE	$24,100.00	$17,200.00
Ξηραντήρας D3	ERD JAC VACUUM	$72,700.00	$47,800.00	Φίλτρο F8	DVS LD STOCK	$86,100.00	$34,500.00
Ξηραντήρας D4	EDD SINGLE VAC	$367,600.00	$289,400.00	Φίλτρο F9	DF ROTY DISK	$192,100.00	$80,800.00
Ξηραντήρας D5	EDD SINGLE VAC	$850,500.00	$688,800.00	Δοχείο S1	DVT CYLINDER	$208,300.00	$46,900.00
Εναλλάκτης E1	DHE PRE ENGR	$51,600.00	$3,000.00	Δοχείο V1	DAT REACTOR	$690,900.00	$450,500.00
Εναλλάκτης E2	DHE TEMA EXCH	$75,000.00	$12,900.00	Δοχείο V2	DAT REACTOR	$243,200.00	$96,700.00
Εναλλάκτης E3	DHE PRE ENGR	$54,300.00	$3,400.00	Δοχείο V3	DAT REACTOR	$243,200.00	$96,700.00
Εναλλάκτης E4	DHE TEMA EXCH	$71,700.00	$13,000.00	Δοχείο V4	DAT MIXER	$668,900.00	$434,500.00
Εναλλάκτης E5	DHE PRE ENGR	$52,000.00	$2,800.00	Υδροπολτοποιητής Y1	DAT MIXER	$1,356,100.00	$941,300.00
Συμπυκνωτήρας E6	DHE AIR COOLER	$76,400.00	$35,800.00	Υδροπολτοποιητής Y2	DAT MIXER	$873,500.00	$579,900.00