

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ TETRA-PAK

Ι. Γεωργιοπούλου*, Δ. Φελεκέας, Γ. Παππά, Κ. Μαγουλάς
Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα
(*ioulia.p.geo@gmail.com)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι πολυστρωματικές συσκευασίες Tetra Pak αποτελούν σήμερα ένα σημαντικό ποσοστό των υλικών συσκευασίας υγρών προϊόντων διατροφής και συνεπακόλουθα των αστικών στερεών αποβλήτων. Η ανακύκλωση των συσκευασιών αυτών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς αποτελούνται από τρία διαφορετικά υλικά (χαρτί, χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο-LDPE και Αλουμίνιο-Al). Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη μεθόδου ανακύκλωσης των συσκευασιών αυτών καθώς και τον έλεγχο της τεχνολογικής εφικτότητας και της οικονομικότητας της διεργασίας με στόχο την ανάκτηση και των τριών υλικών χωρίς υποβάθμιση της ποιότητάς τους. Για τον σκοπό αυτό αναπτύσσεται αρχικά πειραματική διαδικασία, κατά την οποία η ανάκτηση του χαρτιού επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της υδροπολτοποίησης ενώ η ανάκτηση των LDPE και Al με τη μέθοδο της Επιλεκτικής Διάλυσης-Ανακαταβύθισης (ΕΔΑ) ^[1,2]. Στη συνέχεια πραγματοποιείται προσομοίωση της διεργασίας και εκτίμηση του κόστους λειτουργίας με χρήση του εμπορικού λογισμικού Aspen Plus ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συσκευασία Tetra Pak εισήχθη στην αγορά από την ομώνυμη εταιρεία το 1951, ενώ μετά το 1969 απέκτησε ασηπτικές ιδιότητες που παρουσιάζει μέχρι και σήμερα με μικρές διαφοροποιήσεις. Η ασηπτική συσκευασία Tetra Pak προκύπτει από μια διεργασία λαμιναρίσματος χαρτιού (75% κ.β.), LDPE (20% κ.β.) και Al (5% κ.β.) και αποτελείται από 6 στρώματα (Πίνακας 1).^[3]

Πίνακας 1. Διάκριση των στρωμάτων της συσκευασίας Tetra Pak και επεξήγηση του ρόλου τους.

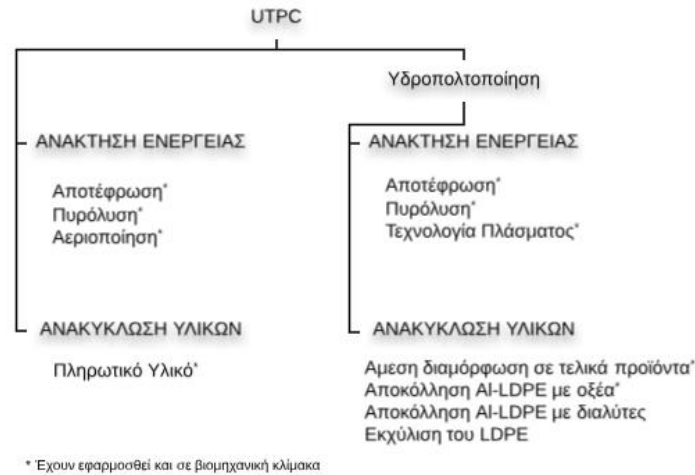
A/A	Υλικό	Λειτουργία/Ρόλος
1.	Εξωτερικό LDPE	Προστατεύει τη συσκευασία έναντι υγρασίας και άλλων εξωτερικών επιδράσεων και τις τυπωμένες πληροφορίες.
2.	Χαρτί	Εξασφαλίζει άκαμπτο σχήμα, συμβάλλει στη σταθερότητα και στην αντοχή της συσκευασίας. Επάνω του πραγματοποιείται η εκτύπωση.
3.	LDPE	Συγκολλητικό στρώμα μεταξύ χαρτιού και αλουμινίου.
4.	Al	Φράγμα για την υπεριώδη ακτινοβολία, το οξυγόνο, τις οσμές και τα βακτήρια.
5.	LDPE	Συγκολλητικό στρώμα μεταξύ αλουμινίου και LDPE.
6.	Εσωτερικό LDPE	Στρώμα σφράγισης του υγρού περιεχομένου της συσκευασίας.

Μόνο το 2017 η εταιρεία Tetra Pak προμήθευσε με 188 δις συσκευασίες περισσότερες από 160 χώρες και πάνω από 46 δις ανακυκλώθηκαν. Οι τεχνολογίες ανακύκλωσης τους που έχουν εφαρμοσθεί καθώς και άλλες που έχουν μελετηθεί παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 ^[1]. Όσες δεν αποσκοπούν στην ανάκτηση ενέργειας, περιορίζονται κυρίως στην ανάκτηση του χαρτιού, ενώ στην περίπτωση ανάκτησης και των τριών υλικών, όπως κατά την αποκόλληση με οξέα, συνήθως το πλαστικό είναι υποβαθμισμένο καθώς μπορεί να περιέχει μικρές ποσότητες Al.

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η ανάκτηση και των τριών υλικών που συμμετέχουν στη συσκευασία Tetra Pak, μέσω μεθόδων που δεν επηρεάζουν την ποιότητά τους και επιτρέπουν την χρήση τους σε παρόμοιες εφαρμογές.

Για την ανάκτηση του χαρτιού εφαρμόσθηκε η μέθοδος της υδροπολτοποίησης, γνωστή για την εφαρμογή της σε διεργασίες ανακύκλωσης χαρτιού, κατά την οποία το χαρτί μαζί με νερό

πολτοποιείται υπό ανάδευση. Για την ανάκτηση του LDPE και του Al πραγματοποιήθηκε η μέθοδος της ΕΔΑ - επιτυχώς εφαρμοσμένη σε μεμονωμένα πλαστικά ή και μίγματα τους (PVC, PET, PS, LDPE, HDPE και PP) ^[4-9] - κατά την οποία το πλαστικό, κάτω από ορισμένες συνθήκες, διαλύεται σε κατάλληλο διαλύτη, απομακρύνονται τα αδιάλυτα συστατικά και στη συνέχεια καταβυθίζεται με την προσθήκη κατάλληλου αντιδιαλύτη^[2].

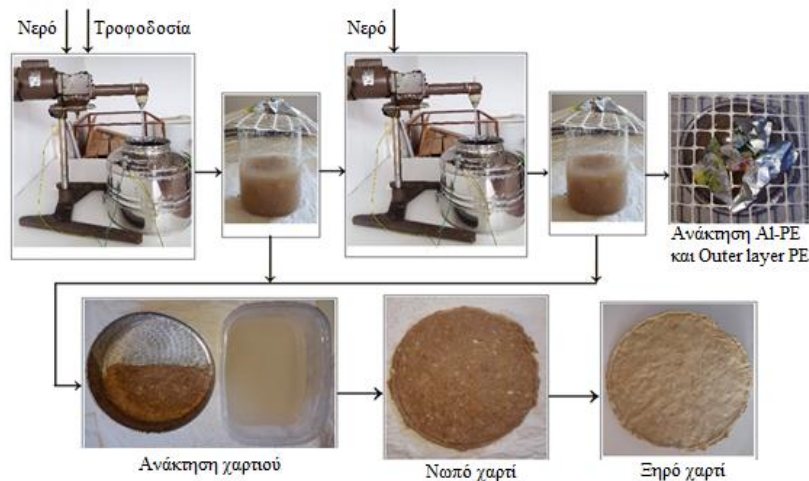


Σχήμα 1. Τρέχουσες τεχνολογίες ανακύκλωσης των χρησιμοποιημένων συσκευασιών Tetra Pak, UTPC (Used Tetra Pak Carton).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Υδροπολοποίηση

Αναφορικά με την υδροπολοποίηση, τα βήματα που ακολουθούνται περιλαμβάνουν πλύσιμο, στέγνωμα και τεμαχισμό των συσκευασιών. Ακολουθούν δύο στάδια ανάδευσης με νερό για τη διάλυση του χαρτιού και διαχωρισμού του χαρτοπολτού από τα φύλλα Al-PE και την εξωτερική επίστρωση LDPE με διήθηση (coarse filtration) για βελτίωση της ανάκτησης του χαρτιού. Στη συνέχεια ο χαρτοπολτός συμπιέζεται και ξηραίνεται ^[10].

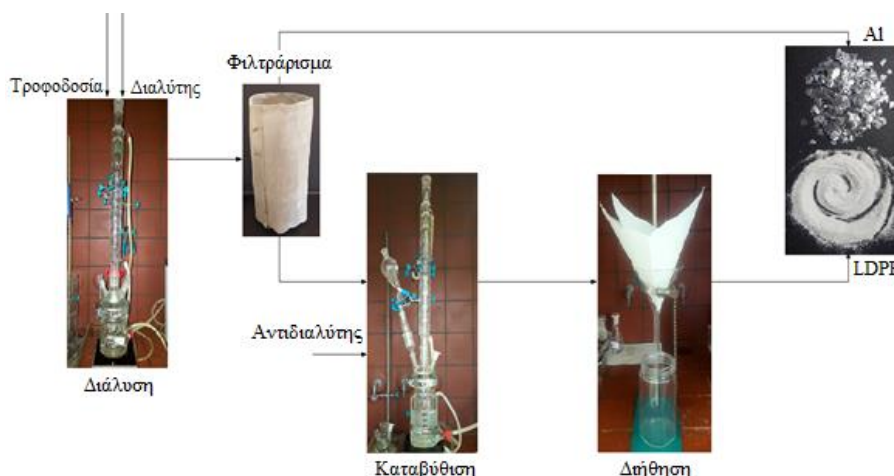


Σχήμα 2. Τα πειραματικά στάδια της υδροπολοποίησης.

Επιλεκτική Διάλυση-Ανακαταβύθιση

Αντιστοίχως, η ΕΔΑ εφαρμόζεται χωριστά στα λαμιναρισμένα φύλλα Al-PE και την εξωτερική επίστρωση LDPE. Πραγματοποιείται διάλυση του LDPE σε ξυλόλιο στους 85°C υπό ανάδευση, εν θερμώ διήθηση για την απομάκρυνση των αδιάλυτων συστατικών (Al και υπολείμματα χαρτιού), στάγδην προσθήκη ισοπροπανόλης στο διάλυμα πολυμερούς (ίδιες συνθήκες με διάλυση) για την καταβύθιση του LDPE και διήθηση του μίγματος για την παραλαβή LDPE. Όλα τα προϊόντα ξηραίνονται για την απομάκρυνση των διαλυτών. Μετά την πρώτη εφαρμογή της ΕΔΑ στα

λαμιναρισμένα φύλλα Al-PE ακολουθούν άλλα δύο ίδια στάδια, για περαιτέρω καθαρισμό του Al και βελτίωση της ανάκτησης του LDPE, ενώ στην περίπτωση της εξωτερικής επίστρωσης LDPE η ΕΔΑ εφαρμόζεται μία φορά ^[10].



Σχήμα 3. Τα πειραματικά στάδια της ΕΔΑ.

Τα ανακτημένα υλικά αναλύονται με τις μεθόδους της θερμοσταθμικής ανάλυσης (TGA) και της διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης (DSC).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στους Πίνακες 2 και 3 παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα ανάκτησης των υλικών της συσκευασίας θεωρώντας μια μέση αρχική περιεκτικότητα αυτών: 75% χαρτί, 20% LDPE και 5% Al.

Πίνακας 2. Ανάκτηση υλικών από το στάδιο της υδροπολοποίησης

Υλικό	Ποσοστό Συνολικής Μάζας (%)	Ανάκτηση (%)
Τροφοδοσία	100	
Χαρτί	72,7	96,9
Al-PE (laminated)	21	24,8
PE outer layer	3,9	
Απώλειες	2,4	

Πίνακας 3. Ανάκτηση LDPE και Al από τα λαμιναρισμένα φύλλα Al-PE σε κάθε στάδιο εφαρμογής της Ε.Δ.Α.

	Ποσοστό Συνολικής Μάζας (%)	
	LDPE	Al
1 ^η Ε.Δ.Α.	68,2	-
2 ^η Ε.Δ.Α.	3,6	-
3 ^η Ε.Δ.Α.	2,5	25,2
Σύνολο	74,3	25,2
Απώλειες (%)	0.5	

Σημειώνεται ότι η παρουσία υπολειμμάτων χαρτιού στα υπόλοιπα προϊόντα είναι αναπόφευκτη. Θεωρώντας ότι οι απώλειες αφορούν μόνο το χαρτί συμπεραίνεται ότι τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με τη θεωρητική σύσταση της συσκευασίας και ότι η ανάκτηση του χαρτιού είναι αρκετά υψηλή, 96,9%. Επιπρόσθετα, από την TGA στα φύλλα Al-PE (Σχήμα 5 – καμπύλη Al-PE laminate) προέκυψε η σύστασή τους (LDPE 75% κ.β. και Al 25% κ.β.) και συνεπακόλουθα η σύσταση των συσκευασιών Tetra Pak η οποία φαίνεται να είναι 75, 5, 15 και 5% κ.β. χαρτί, Al, εσωτερικό LDPE και εξωτερικό LDPE αντίστοιχα.

Από την ΕΔΑ στα φύλλα Al-PE προκύπτει λευκή λεπτόκοκκη και εύκολα διαχειρίσιμη σκόνη LDPE, φύλλα Al (Σχήμα 4.α.) και απώλειες περίπου 0,5% κ.β. Θεωρώντας ότι οι απώλειες αφορούν μόνο

το LDPE, συμπεραίνεται ότι η ανάκτηση του είναι αρκετά υψηλή (>99%). Στην περίπτωση της εξωτερικής επίστρωσης LDPE, προέκυψε χρωματισμένο από την εκτύπωση της συσκευασίας και εμφανώς υποβαθμισμένο πλαστικό σε σκόνη και μεγαλύτερα συσσωματώματα.



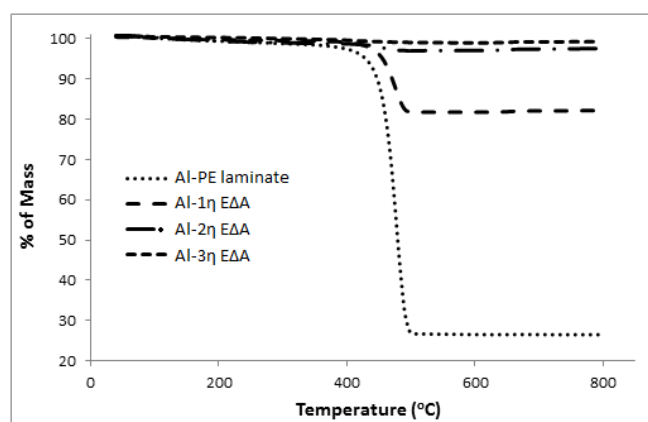
α.

β.

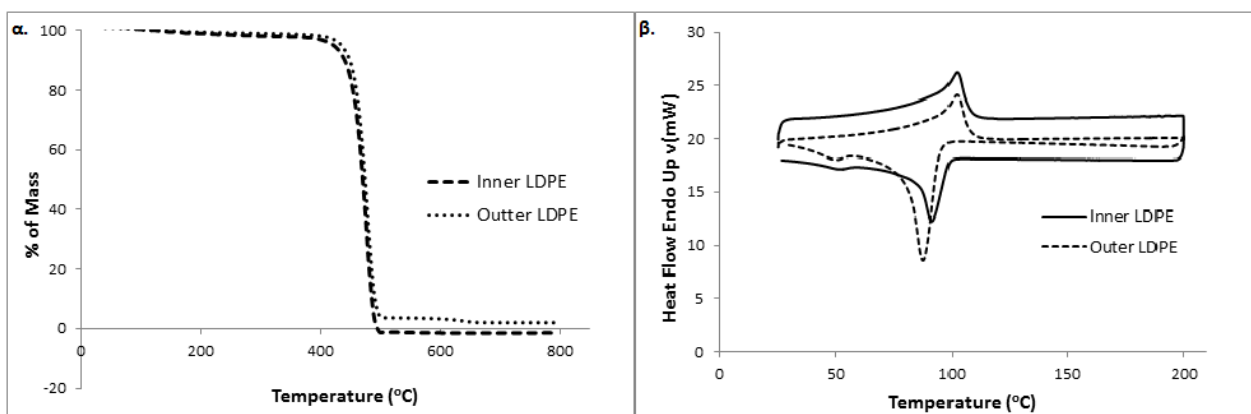
γ.

Σχήμα 4. Τα προϊόντα α. της υδροπολτοποίησης (Χαρτί, Al-PE laminate και Outer Layer PE) και της ΕΔΑ από β. τα Al-PE laminates(LDPE και Al) και γ. την Outer layer PE.

Από την TGA στο ανακτημένο Al μετά από κάθε ΕΔΑ, προκύπτει ότι η καθαρότητα του σταδιακά αυξάνεται σταδιακά, ξεπερνώντας τελικά το 99% μετά την 3^η ΕΔΑ αντίστοιχα (Σχήμα 5). Από την TGA στο ανακτημένο LDPE από την εσωτερική και την εξωτερική πλευρά της συσκευασίας (Σχήμα 6) προκύπτει ότι το εσωτερικό LDPE αποικοδομείται όμοια με τυπικά δείγματα LDPE, πλήρως σε ένα μόνο ομαλό στάδιο (481,8°C), ενώ για το εξωτερικό LDPE εντοπίζεται και άγνωστο υλικό (1,5% κ.β.) που αποικοδομείται στους 647,5°C αφήνοντας στερεό υπόλειμμα. Αυτά τα πρόσθετα συστατικά πιθανόν σχετίζονται με το μελάνι που χρησιμοποιείται στην εκτύπωση της συσκευασίας. Τέλος, από την DSC προκύπτει η θερμοκρασία τήξης και κρυστάλλωσης των δειγμάτων (εσωτερικό: 102,1 και 89,7°C – εξωτερικό: 102,2 και 91,6°C).



Σχήμα 5. Αποτελέσματα TGA για τα φύλλα Al-PE και το Al μετά από κάθε κύκλο ΕΔΑ.

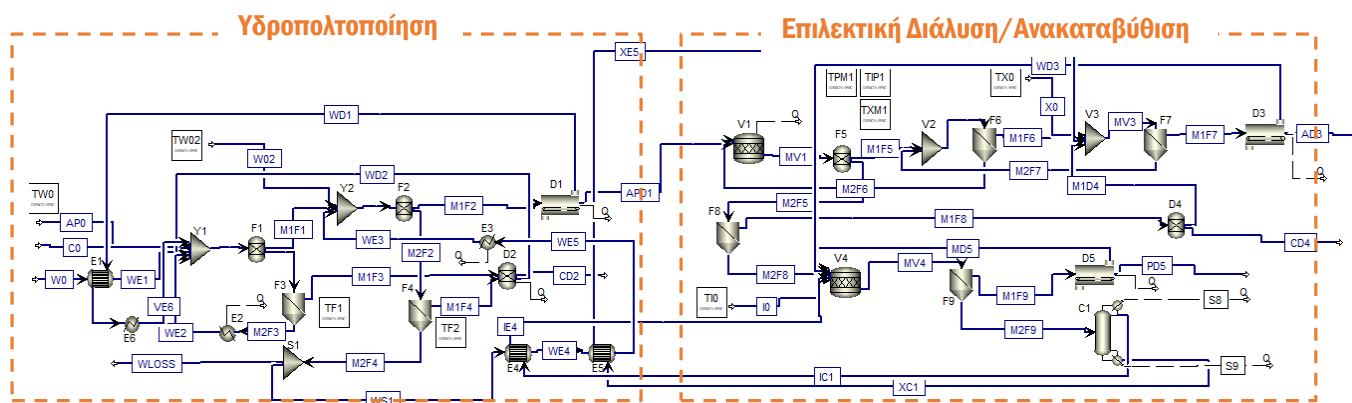


Σχήμα 6. Αποτελέσματα α. TGA, β. DSC για τα το εσωτερικό LDPE και το εξωτερικό LDPE.

ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Για την οικονομική αξιολόγηση της προτεινόμενης διεργασίας για την ανακύκλωση των συσκευασιών Tetra Pak πραγματοποιήθηκε αρχικά προσομοίωση της με χρήση του λογισμικού Aspen Plus για την επίλυση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας και στη συνέχεια οικονομική ανάλυση της με το λογισμικό Aspen Plus Economic Analyzer.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής όπως προέκυψε από την προσομοίωση στο Aspen Plus. Οι δύο διεργασίες, της υδροπολτοποίησης για την ανάκτηση του χαρτιού και της ΕΔΑ για την ανάκτηση του ΑΙ και του LDPE έχουν συνδεθεί και ολοκληρωθεί ενεργειακά.

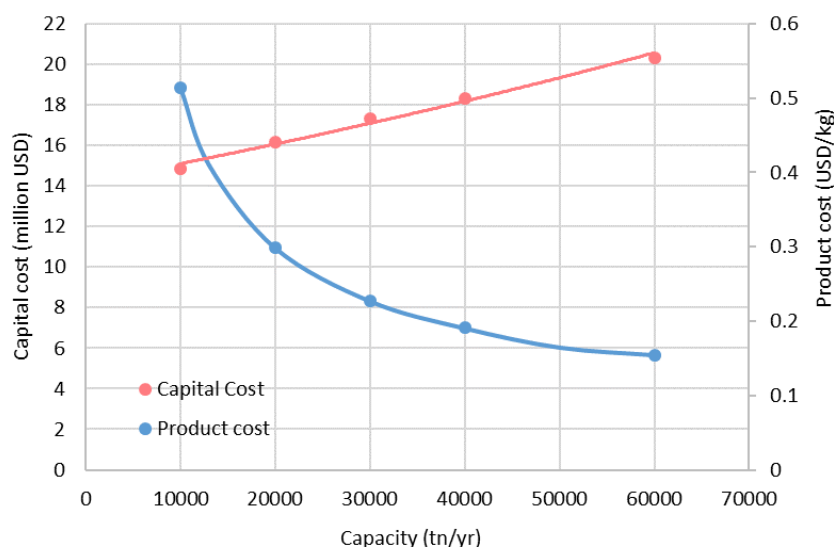


Σχήμα 7. Διάγραμμα ροής διεργασίας ανακύκλωσης συσκευασίας Tetra Pak.

Η συσκευασία (AP_0, C_0) τροφοδοτείται στη διεργασία μαζί με κατάλληλη ποσότητα νερού (W_0) ώστε να δημιουργηθεί πολτός στον υδροπολτοποιητή (Y_1). Μέσω φίλτρων (F_1, F_3) διαχωρίζονται αρχικά τα λαμιναρμένα φύλλα από τον πολτό και στη συνέχεια το χαρτί από το νερό. Ακολουθεί δεύτερο στάδιο υδροπολτοποίησης για την απομάκρυνση του χαρτιού που έχει παραμείνει στα λαμιναρμένα φύλλα. Τα προϊόντα ξηραίνονται ενώ τα ρεύματα νερού που προκύπτουν από τους διαχωρισμούς ανακυκλώνονται στη διεργασία. Μέσω του ρεύματος W_{Loss} προσομοιώνονται οι απώλειες του νερού στο σύστημα.

Τα απαλλαγμένα από χαρτί φύλλα (APD_1) τροφοδοτούνται σε δοχεία διάλυσης του πολυμερούς με την κατάλληλη ποσότητα διαλύτη. Η διάλυση πραγματοποιείται σε τρία διαδοχικά στάδια για την αύξηση της ανάκτησης του πλαστικού. Ο διαλύτης, εισάγεται αρχικά στο τρίτο δοχείο (V_3), όπου απαιτείται διαλύτης απαλλαγμένος από πλαστικό για μέγιστη απομάκρυνση του υπολειπόμενου πλαστικού, και μαζί με το πλαστικό που διαλύει οδηγείται στο δεύτερο και στη συνέχεια στο πρώτο δοχείο διάλυσης (V_1). Στο φίλτρο (F_8) απομακρύνεται πιθανή υπολειπόμενη ποσότητα χαρτιού, που έχει παραμείνει μετά την υδροπολτοποίηση. Το διαλυμένο στο ξυλόλιο LDPE οδηγείται στο δοχείο ανακαταβύθισης (V_4) όπου προστίθεται κατάλληλη ποσότητα ισοπροπανόλης και μέσω φίλτρου (F_9) απομακρύνεται το στερεό πλέον LDPE ενώ το μίγμα διαλύτη/αντιδιαλύτη οδηγείται σε στήλη (C_1) προς διαχωρισμό και ανακυκλοφορία. Τα τελικά προϊόντα ξηραίνονται και τα ρεύματα διαλυτών που προκύπτουν από τους ξηραντήρες (D_3, D_4, D_5) ανακυκλώνονται στη διεργασία. Τέλος, τα εξερχόμενα από τη στήλη θερμά ρεύματα αξιοποιούνται ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες της υδροπολτοποίησης.

Με χρήση του λογισμικού Aspen Plus Economic Analyzer πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση μηχανολογικού εξοπλισμού στα τμήματα της προσομοίωσης και διαστασιολόγησή του καθώς και υπολογισμός του κόστους εγκατάστασης και του λειτουργικού κόστους. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η εξάρτηση του κόστους της επένδυσης αλλά και του μέσου κόστους προϊόντων από τη δυναμικότητα της μονάδας.



Σχήμα 8. Κόστος επένδυσης και μέσο κόστος προϊόντων από την εφαρμογή της ΕΔΑ για την ανακύκλωση συσκευασίας Tetra Pak.

Παρατηρείται ότι για δυναμικότητες μεγαλύτερες από 50.000 tn/yr το κόστος προϊόντων πρακτικά σταθεροποιείται. Για δυναμικότητα περίπου ίση με 30000 tn/yr, το κόστος προϊόντων εξισώνεται με την τιμή αγοράς αντίστοιχων προϊόντων, δηλαδή χαρτιού, ΑΙ και LDPE. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι στους υπολογισμούς δεν έχει συμπεριληφθεί το κόστος συλλογής και προεπεξεργασίας των συσκευασιών Tetra Pak, που θα αυξήσει το τελικό κόστος προϊόντων. Σε κάθε περίπτωση η προτεινόμενη μέθοδος φαίνεται να αποτελεί μια καλή προοπτική όχι απλά για την αξιοποίηση ενός πολύ σημαντικού ρεύματος απορριμμάτων αλλά και για την ανάκτηση μη υποβαθμισμένων προϊόντων και συνεπώς με μεγάλο εύρος εφαρμογών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε διεργασία για την ανακύκλωση συσκευαστικών Tetra Pak. Η πειραματική εφαρμογή της διεργασίας υπέδειξε ότι εξαιρώντας την εξωτερική επίστρωση LDPE που είναι επιμολυσμένη με μελάνια, τα υπόλοιπα υλικά της συσκευασίας Tetra Pak δύναται να ανακτηθούν σε καθαρές μορφές και ικανοποιητικά ποσοστά, ενώ οι απώλειες υλικών μπορούν να περιοριστούν με κατάλληλο σχεδιασμό και τεχνική βελτίωση της διεργασίας. Η προκαταρκτική μελέτη σκοπιμότητας της προτεινόμενης διεργασίας έδειξε ότι σε κατάλληλες δυναμικότητες η διεργασία μπορεί να είναι ανταγωνιστική, παράγοντας προϊόντα σε τιμές αντίστοιχες με αυτές του υφίστανται στην αγορά πρώτων υλών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Zawadiak, S. Wojciechowski, T. Piotrowski, A. Krypa. *AICHE* 5(3) (2017) 37-42.
- [2] Pappa G, Boukouvalas C, Giannaris C, Ntaras N, Zografos V, Magoulas K, Lygeros A, Tassios D. (2001). *Res. Conserv. Recycl.* 34:33-44.
- [3] Rausing R, Method of packaging sterile filling material under aseptic conditions, U.S. Patent No. 3466841, 1969.
- [4] Papaspyrides CD, Poulakis JG, Varelides PC (1994). *Res. Conserv. Recycl.* 12: 177-184.
- [5] Kampouris EM, Diakoulaki DC, Papaspyrides CD (1986). *J. Vinyl Technol.* 8(2):79-82.
- [6] Poulakis JG, Papaspyrides CD (2001). *J. of Applied Polym. Sc.* 81(1): 91-95.
- [7] Kampouris EM, Papaspyrides CD, Lekakou CN (1987). *Conserv. and Rec.* 10(4):315.
- [8] Kampouris EM, Papaspyrides CD, Lekakou CN (1988). *Poly. Eng. & Sc.* 28(8): 534-537.
- [9] Poulakis JG, Papaspyrides CD, *Adv. Polym. Technol.* (1995) 14(3):237.
- [10] Γεωργιοπούλου Ι. Ανακύκλωση υλικών πολυστρωματικής συσκευασίας Tetra Pak®. Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Δεκέμβριος 2015