

ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΝΕΡΓΟΒΟΡΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΑΠΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

Παν. Ιγνατιάδης & Βασ. Γκέκας

Εργ. Φαινομένων Μεταφοράς, Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείου Κρήτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε πολλές βιομηχανικές διαδικασίες χρησιμοποιούνται ενεργοβόρες διεργασίες, όπως αυτές της εξάτμισης, της αερόβιας χώνευσης και της παστεροποίησης, που σκοπό έχουν την αύξηση της συγκέντρωσης, την συμπίκνωση και την απαλλαγή ενός προϊόντος από μικροοργανισμούς. Οι διεργασίες αυτές απαιτούν θερμοκρασίες άνω των 70° C και μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τεχνολογίες μεμβρανών μπορούν να μειώσουν το λειτουργικό κόστος, αφού είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν όλες οι προηγούμενες διεργασίες χωρίς υψηλές θερμοκρασίες, αλλαγή φάσεως και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Στην εργασία αυτή θα παρουσιαστεί η χρησιμοποίηση των μεμβρανών σε αντιπαράθεση (οικονομικά και λειτουργικά στοιχεία) με υφισταμένες τεχνολογίες όπως αφαλάτωση του νερού (αντίστροφη όσμωση σε σχέση με την εξάτμιση), συμπίκνωση χυμού πορτοκαλιού (υπερδιήθηση σε σχέση με την εξάτμιση), παστεριοποίηση του γάλακτος (μικροδιήθηση σε σχέση με την θερμική επεξεργασία), επεξεργασία αποβλήτων (μικροδιήθηση σε σχέση με την αναερόβια/αερόβια χώνευση) κτλ.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην τεχνολογία μεμβρανών εντάσσονται όλες εκείνες οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν μια ημιπερατή μεμβράνη και χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό, το φιλτράρισμα, την συμπίκνωση ενός προϊόντος από το διάλυμα. Άτομα, μόρια, σωματίδια και μικροοργανισμοί μπορούν να διαχωριστούν από τα υπόλοιπα του συστήματος του μίγματος στο οποίο περιέχονται, μέσω ενός συστήματος μεμβρανών, λόγω της διαφοράς τους στο μέγεθος, στην ταχύτητα διάχυσης, στο ηλεκτρικό φορτίο κτλ. Οι τεχνικές διαχωρισμού με την τεχνολογία μεμβρανών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την δρώσα δύναμη που επικρατεί μεταξύ των δυο πλευρών της μεμβράνης όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Ταξινόμηση των διεργασιών μεμβρανών

Δρώσα δύναμη	Διεργασία	Κύριος μηχανισμός	Κύρια εφαρμογή
Συγκέντρωση	Διάλυση	Διαλυτότητα	Νεφροκάθαρση
	Διεξάτμιση	Διαλυτότητα	Ανάκτηση αρωμάτων
Τάση	Ηλεκτροδιάλυση	Ηλεκτροστατικός	Παραγωγή άλατος
Πίεση	Αντίστροφη ώσμωση	Διαλυτότητα	Αφαλάτωση νερού
	Νανοδιήθηση	Μεικτός	Διαχωρισμός μικρομορίων
	Υπερδιήθηση	Μηχανικός	Διαχωρισμός πρωτεϊνών
	Μικροδιήθηση	Μηχανικός	Ψυχρή αποστείρωση

Οι μεμβράνες κατασκευάζονται σε διάφορες μορφές και παίρνουν τη μορφή πρακτικών ενοτήτων (modules), που μπορεί να είναι επίπεδες (sheets), ελικοειδείς (spiral), ινώδεις (fibers) ή σωληνοειδείς (tubes). Οι κυριότερες λειτουργικές δυσκολίες με τη εφαρμογή των μεμβρανών στη βιομηχανία είναι η ελάττωση της πυκνότητας ροής, λόγω του fouling και της πόλωσης συγκέντρωσης (concentration polarization), και διάφορα δομικά προβλήματα όπως η διάρκεια ζωής τους, η εκλεκτικότητα τους, ο πολύ μεγάλος όγκος τους και το κόστος λειτουργία τους.

Είναι δυνατόν για ένα συγκεκριμένο βαθμό διαχωρισμού, τα συστήματα μεμβρανών να απαιτούν λιγότερη ενέργεια από άλλες φυσικοχημικές διεργασίες. Κυρίως, η τεχνολογία μεμβρανών μπορεί να αντικαταστάσει ή καλύτερα να συμπληρώσει διεργασίες που έχουν μεγάλο ενεργειακό φορτίο (εξάτμιση, απόσταξη) και υψηλό κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος (καθίζηση, κροκιδωση και χρήση χημικών). Παρακάτω, θα παρουσιαστούν στοιχεία τόσο από την τεχνολογία τροφίμων όσο και από το χώρο της βιοτεχνολογίας. Τέλος, θα αναφερθεί η εφαρμογή των μεμβρανών στην επεξεργασία νερού στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

2. ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΠΟΤΩΝ

Πολλές φορές στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών, που είναι απαραίτητη η συμύκνωση του τελικού προϊόντος που στοχεύει στην αύξηση της συγκέντρωσης του, π.χ. στη βιομηχανία χυμών πορτοκαλιού ή στη βιομηχανία επεξεργασίας ντομάτας, το τελικό προϊόν έχει συγκέντρωση 5% στερεών και είναι επιθυμητή η αύξηση της συγκέντρωσης του στα επίπεδα του 30%.

Με τη διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης, επιτυγχάνεται η διέλευση του νερού με τη εφαρμογή πίεσης ίσης με τη οσμωτική πίεση του διαλύματος.

Για 5% χυμό πορτοκαλιού η οσμωτική πίεση είναι περίπου 5 bar που ισοδυναμεί σε $5 \times 1000 \text{ lt. ATM} = 0.14 \text{ kWh}$. Για συγκέντρωση 30% η κατανάλωση ενέργειας φτάνει τα 0.84 kWh.

Με τη κλασσική μέθοδο της εξάτμισης, εάν λάβουμε υπόψη ότι η θερμότητα εξάτμισης του νερού είναι 150 kWh/m^3 , τότε χρειαζόμαστε τουλάχιστον 200-1000 φορές περισσότερο από τη ενέργεια που καταναλώνεται στην αντίστροφη όσμωση. Παρόλα αυτά, λόγω της πόλωσης συγκέντρωσης (concentration polarization), χρησιμοποιούνται μεγάλες ταχύτητες και αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας (υπό μορφή πίεσης). Το ίδιο ισχύει και για τα ρευστά με μεγάλο ιξώδες. Εξάλλου, στην εξάτμιση μπορούμε να έχουμε ανάκτηση θερμότητας με τους εναλλακτές πολλαπλών σταδίων (multi-effect evaporators) και με συστήματα μηχανικής συμπτκνώσεως ατμών (vapor recompression cycle).

Συγκριτικά, δίνονται οικονομικά στοιχεία για τις δύο διεργασίες. Θα πρέπει να τονιστεί ότι, η αντίστροφη όσμωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την εξάτμιση, λόγω του αυξημένου κόστους λειτουργίας πάνω από ένα συγκεκριμένο βαθμό διαχωρισμού. Έτσι, είναι δυνατό να έχουμε συμπτκνωση των τροφίμων με αντίστροφη όσμωση μέχρι 25-30% και για περαιτέρω συγκέντρωση να εφαρμόζεται εξάτμιση.

3. ΟΙ MEMBRANES ΣΤΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΑΙ ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Η αφυδάτωση ενός ρεύματος αλκοολών (προϊόν και της κλασματικής απόσταξης πετρελαιοειδών και βιοτεχνολογικών αντιδράσεων) γίνεται συνειδός με απόσταξη. Διεξάτμιση (Pervaporation) είναι η εκλεκτική ρόφηση ενός συστατικού, π.χ. νερού στη μεμβράνη, διάχυση του νερού στο άλλο άκρο της μεμβράνης και εξάτμιση του νερού σε ένα περιβάλλον μερικού κενού που επικρατεί από την άλλη άκρη της μεμβράνης.

Υπάρχουν τέσσερις διαδικασίες που χρειάζονται ενέργεια: α) Η άντληση του υγρού, β) η θέρμανση του υγρού, γ) η άντληση και δ) η συμπτκνωση του υγρού ατμού.

α) Άντληση υγρού: Παρόλο που η πίεση δεν παίζει κανένα ρόλο στη διεργασία της διεξάτμισης, αυξάνουμε τη πίεση για να αυξηθεί η ταχύτητα και να μειωθεί η συγκέντρωση πόλωσης.

β) Θέρμανση της υγρής φάσης: Η υγρή φάση θερμαίνεται στη μέγιστη θερμοκρασία και αποδίδει τη θερμότητα αυτή σαν λανθάνουσα θερμότητα του ατμού, τον οποίο διαχωρίζει η μεμβράνη από τη υγρή φάση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Οικονομικά αποτελέσματα μονάδας μεμβράνης παραγωγής WPC-προτεϊνών
(Στοιχεία έτους 1994: βάση 20 ώρες/μέρα, 312 μέρες/έτος, δυναμικότητα: 1000 τ.μ.)

Μεγέθη του συστήματος	
Τροφοδοσία (λίτρα/ ημέρα)	456 000
WPC- προϊόν (λίτρα/ημέρα)	81 500
WPC- προϊόν (κιλά- ξηρή βάση)	8 500
Διήθημα (λίτρα/ ημέρα)	374 500
Ροή (λίτρα/ώρα και τετρ.μέτρο)	19.5
Επένδυση κεφαλαίου(\$)	300 000
Ηλεκτρική ισχύς (kW)	60
Έξοδα (\$ /έτος)	
Απόσβεση κεφαλαίου (@0.149)	44 700
Ενέργεια (374 400 kWh @ \$0.075)	28 100
Αντικατάσταση μεμβράνης (\$75000 /18 μήνες)	50 000
Καθαρισμός	24 000
Εργασία	12 000
Έσοδα (\$ /έτος)	
Πώληση (2 644 500 κιλά @ 1.36)	3 596 500

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Προσυμπύκνωση τοματοχυμού (Συγκριτικά στοιχεία 1984- PCI)
(Από Brix 4.5 σε 8.5) Σύστημα αντίστροφης ώσμωσης: δυναμικότητα 429 τ.μ.
Εξατμιστήρας τριπλού αποτελέσματος 24 ώρες την ημέρα- 50 ημέρες το έτος

Μεγέθη του συστήματος	Αντίστροφη ώσμωση	Εξάτμιση
Τροφοδοσία (λίτρα/ ώρα)	40.000	40.000
Αφαίρεση ύδατος (λίτρα/ ώρα)	18.820	18.820
Ηλ. Ισχύς	180	32
Κατανάλωση ατμού (κιλά/ώρα)		6.775
Έξοδα (\$/έτος)		
Ηλεκτρική ενέργεια (\$0.04 /kWh)	8.640	1.536
Κόστος ατμού (\$0.18 /κιλό)		146.247
Κόστος μεμβράνης	14.112	
Σύνολο εξόδων	22.772	147.783

γ) Αντληση του υγρού ατμού: Πραγματοποιείται υπό κενό για τη συγκέντρωση των μη συμποικνωμένων ουσιών από τις διαρροές του συστήματος. Το κενό δημιουργείται από το συμποικνωτή και δεν υπάρχει αντλία κενού.

δ) Συμποικνώσει του υγρού ατμού: Γίνεται υπό κενό και σε θερμοκρασίες μεταξύ 0°C και 10°C.

Η θερμοκρασία του αναβραστήρα είναι μεγαλύτερη από αυτή που λειτουργεί το σύστημα της διεξάτμισης. Όμως, ο συμποικνωτής λειτουργεί με ψυκτικό μέσο το νερό και είναι οικονομικότερη η χρήση του.

Η απόσταξη λειτουργεί με επαναροή για να διαχωρίσει τα συστατικά του σε ικανοποιητικό βαθμό. Όσο πιο κοντά είναι τα σημεία βρασμού των στοιχείων υπό διαχωρισμό, τόσο περισσότερη επαναροή χρειάζονται. Έχει αποδειχθεί ότι η απόσταξη και η διεξάτμιση έχουν τις ίδιες ενεργειακές απαιτήσεις σε "εύκολους διαχωρισμούς". Η χρήση της διεξάτμισης γίνεται επιτακτική σε διαχωρισμό αζεοτροπικών μιγμάτων. Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιείται η διεξάτμιση μετά το αζεοτροπικό σημείο. (Έχει προηγηθεί απόσταξη μέχρι το σημείο αυτό).

4. Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΣΤΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι μεμβράνες μπορούν να εφαρμοστούν στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη διαδικασία καθαρισμού του νερού που τροφοδοτεί το λέβητα. Συνήθως, το νερό αυτό προέρχεται από τη θάλασσα (όπου είναι δυνατό) και λόγω του μεγάλου οργανικού σωματιδιακού και ιοντικού φορτίου του, δέχεται επεξεργασία που με συμβατικές μεθόδους περιλαμβάνουν τα στάδια της καθίζησης, της κροκιδώσης και του φιλτραρίσματος, για την απομάκρυνση των σωματιδίων και του οργανικού φορτίου. Εν συνεχεία, το νερό περνάει από στήλες εναλλακτών ιόντων που βασίζονται σε ζεύγη ανιονικών και κατιονικών ρητινών. Η χρήση απαερωτή με διοξείδιο του άνθρακα είναι απαραίτητη για τα πολύ αλκαλικά νερά.

Η αντίστροφη όσμωση και η ηλεκτροδιάλυση μπορούν να αφαιρέσουν τα ιόντα από το νερό. Έχουν το πλεονέκτημα ότι δημιουργούν λιγότερα απόβλητα από το σύστημα των ρητινών και δεν απαιτούν αναγέννηση. Όμως, λόγω των προβλημάτων που δημιουργούνται στη λειτουργία τους από το αδιάλυτα συστατικά, δεν είναι ικανές να λειτουργήσουν σαν αυτόνομες μονάδες καθαρισμού του νερού. Μόνο στη περίπτωση που η αρχική συγκέντρωση στερεών είναι της τάξης του 10% TDS (Total dissolved solids), μπορούν τα συστήματα των μεμβρανών να

καθαρίζουν το νερό σε ικανοποιητικό λειτουργικό κόστος. Αντίθετα σε συγκεντρώσεις κάτω του 2% είναι αντιοικονομικά, σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα.

Σε συγκεντρώσεις άνω του 10% μπορεί να γίνει ένας συνδυασμός των πρώτων σταδίων των συμβατικών συστημάτων με τα συστήματα μεμβρανών. Έτσι, θα μπορούσε να συνδυαστεί η καθίζηση και η κροκίδωση με την αντίστροφη όσμωση ή και την ηλεκτροδιάλυση.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η τεχνολογία των μεμβρανών μπορεί να συμπληρώσει θερμικές διεργασίες που έχουν μεγάλο ενεργειακό φορτίο, με σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Προσοχή θα πρέπει να δίδεται στο συγκεκριμένο βαθμό διαχωρισμού που απαιτείται καθώς και στην ύπαρξη ουσιών που μειώνουν τη ροή μέσω της μεμβράνης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] "Enzymatic acyglycerol synthesis in membrane reactor systems", Alfred de Padt, PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, 1993, 1-14.
- [2] "Strategies in the agroindustrial wastewater treatment", M. Vinas Sendic, Water Science and Technology 32(12), 1995, 113-120.
- [3] "Pressure driven membrane processes", Migel –Lopez Leira, FIDEL, Lund, Sweden.
- [4] "Αξιοποίηση απόβλητων ελαιουργείων με τεχνολογία μεμβρανών", Δ. Οικονόμου, Α. Κουτσαυτάκης, Ε. Στεφανουδάκη-Κατζουράκη, Ι. Μετζιδάκης, Ι. Ανδρουλάκης, Ν. Ινιωτάκης. Στο "Διαχείριση των υγρών απόβλητων των ελαιουργείων", ΓΕΩΤΕΕ, 1989, 156-167.
- [5] "Η τυροκομία στη πράξη", Π. Κυριακόπουλου, Τρίαινα, Αθήνα.1995, 306-308.
- [6] "Microfiltration in whey processing", H. Hanemmaaijer J.N., in "Desalination" Proceedings of the symposium on membrane technology, Tylösand, 1985, Volume 53, Elsevier.
- [7] "Food and dairy applications: The state of the art", V. Gekas, B. Hallström, G Trägårdh, in "Desalination, Proceedings of the symposium on membrane technology, Tylösand, 1985, Volume 53, Elsevier.