

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

$\Sigma XO\Lambda H$ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ :

ΜΟΝΑΔΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ



ΑΜΡΟΥ ΤΖΟΥΜΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΡΟΓΔΑΚΗΣ – ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

AOHNA 2014

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2013-2014 στα πλαίσιο εκπλήρωσης των υποχρεώσεών μου ως φοιτητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Το αποτέλεσμα της εργασίας επετεύχθη με τη σημαντική βοήθεια του κ. Εμμανουήλ Ρογδάκη - Καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, τον οποίο οφείλω να ευχαριστήσω βαθύτατα για την συνεργασία μας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να επισημάνω ότι η παραχώρηση σημειώσεων σε σχέση με την αντίστροφη όσμωση, από μέρους του κ .Εμμανουήλ Ρογδάκη αποτέλεσαν έναυσμα και κινητήριος δύναμη για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

> Αμρού Τζούμα Αθήνα, Μάρτιος 2014

Περίληψη

Η πλήρης περιγραφή των στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης αντίστροφης όσμωσης είναι απαραίτητη για να μπορεί να γίνει εκτίμηση της απόδοσης του στοιχείου κάτω από διαφορετικές συνθήκες καθώς και να μπορεί να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του. Στην συγκεκριμένη μελέτη αναπτύχτηκε μια μέθοδος περιγραφής στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης που συνδυάζει το μοντέλο της μη αντιστρέψιμης θερμοδυναμικής με τις μέσες τιμές της πίεσης, της παροχής και της συγκέντρωσης κατά μήκος του στοιχείου. Το μοντέλο της μη αντιστρέψιμης θερμοδυναμικής περιγράφει την ροή της διαλυταίας ουσίας διάμεσου της μεμβράνης μέσα από μηχανισμούς διάχυσης αλλά και από συμβατικούς μηχανισμούς. Η ανάγκη για χρήσεις μέσων τιμών έγκειται στο γεγονός ότι λόγω του τρόπου κατασκευής του στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης οι υδροδυναμικές συνθήκες δεν παραμένουν σταθερές σε όλο το μήκος του στοιχείου. Το γεγονός αυτό αποτελεί πρόβλημα γιατί η συγκέντρωση, η πίεση και η ροή μεταβάλλονται με άγνωστο τρόπο κατά μήκος του στοιχείου. Έτσι, πρέπει να αναπτυχτεί ένα μοντέλο που να μπορεί να προσδιορίσει τα μεγέθη αυτά.

Για την εύρεση παροχών διαπέρασης και ποσοστών απόρριψης σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας έγινε χρήση του λογισμικού R.O.S.A. Τα αποτελέσματα αυτά αναλύθηκαν και προσαρμόστηκαν σύμφωνα με το μοντέλο της μη αντιστρέψιμης θερμοδυναμικής και υπολογίστηκαν οι τρεις φαινομενολογικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν την μεμβράνη του στοιχείου δηλαδή (1) η παράμετρος της υδραυλικής διαπερατότητας (2) η παράμετρος της διαπερατότητας διαλυμένης ουσίας και (3) ο συντελεστής ανάκλασης.

Για τα στοιχεία αντίστροφης όσμωσης για μονοϊοντική παροχή τροφοδοσίας αλατιού NaCl ο συντελεστής ανάκλασης υπολογίστηκε ίσος με 1. Αυτό δείχνει ότι για τα στοιχεία μελέτης η ροή διαλυταίας ουσίας εξαρτάται μόνο από την διαφορά της συγκέντρωσης, στις δύο πλευρές του στοιχείου και ότι η ροή είναι γραμμική σχέση της ολικής διαφοράς πίεσης.

Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός μοντέλου βασισμένου στην θεωρία της μη αντιστρέψιμης θερμοδυναμικής, το οποίο θα μπορεί να περιγράψει στοιχεία μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης που χρησιμοποιούνται σε διεργασίες αφαλάτωσης. Το μοντέλο αυτό θα πρέπει να μπορεί να υπολογίζει διάφορα χαρακτηριστικά της αφαλάτωσης όπως για παράδειγμα τις ροές διαπέρασης του διαλύτη καθώς και τις ροές διαπέρασης του διαλύτη καθώς και τις ροές όιαπέρασης των διαλυτών ουσιών. Αρχικά, περιγράψαμε το μοντέλο της μη αντιστρέψιμης θερμοδυναμικής πάνω στης διεργασίες της αντίστροφής όσμωσης. Στη συνέχεια, επικεντρωθήκαμε στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και των ιδιαιτεροτήτων των στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης και την επίδραση τους πάνω στο θερμοδυναμικό μοντέλο. Ακολούθως, βρήκαμε τα αποτελέσματα-δεδομένα για τις ροές των στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης και υπολογίσαμε το μοντέλο μεταφοράς σε σχέση με τα δεδομένα και υπολογίσαμε τις παραμέτρους του μοντέλου μεταφοράς

Περιεχόμενα

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ	.8
1.1 Εισαγωγή	.8
1.2 Ορισμός της αντίστροφης όσμωσης	.9
1.3 Περιγραφή και ορολογία της αντίστροφής όσμωσης	11
1.4 Εμπορικές εφαρμογές των Α.Ο. και ΝΔ. μεμβρανών	12
2. Περιγραφή της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση 1	12
2.1.1 Τροφοδοσία θαλασσινού νερού1	14
2.1.2 Προκατεργασία νερού τροφοδότησης1	15
2.1.3 Μεταφορά προκατεργασμένου νερού μέσω αντλιών υψηλής πίεσης 1	17
2.1.4 Αφαλάτωση του νερού σε μονάδα αντίστροφης όσμωσης	17
2.2.4.1 Μεμβράνες διαχωρισμού	18
2.2.4.2 Διαμόρφωση μεμβρανών των στοιχείων αφαλάτωσης	22
2.2.4.3 Διαμόρφωση μονάδας αφαλάτωσης2	28
2.2.5 Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης	30
2.2.6 Τελική κατεργασία του αφαλατωμένου νερού	33
2.2.7 Απόρριψη του υπολείμματος (άλμης)	34
3 Μοντέλα μεταφοράς μεμβρανών στην αντίστροφη όσμωση	37
3.1 Κατηγορίες μοντέλων μεταφοράς αντίστροφης όσμωσης	37
3.1.1 Μοντέλο Kedem και Katchalsky3	38
3.2.2 Μοντέλο Spiegler και Kedem3	38
4. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ	41
4.1 Γενική περιγραφή στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης	41
4.2 Μη μεμβρανοειδή στοιχεία4	42
4.2.1 Ο Ρόλος του διαχωριστικού πλέγματος τροφοδοσίας άλμης	43
4.2.2 Το διαχωριστικό πλέγμα ρεύματος διαπέρασης	13
4.2.3 Σωλήνας διαπέρασης4	43
4.2.4 Καπάκι	43
4.3 Πραγματικά μεγέθη στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης	14
4.3.1 Μεταβολή συγκέντρωσης 4	14
4.3.2 Μεταβολή της παροχής κατά μήκος του στοιχείου	45
4.3.3 Πτώση πίεσης	45
4.3.4 Αύξηση συγκέντρωσης λόγω πόλωσης4	46

4.3.5 Υπολογισμός οσμωτικής πίεσης	47
5 ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ	49
5.1. SW30XHR-440i	49
5.2 SW30XLE-440i	50
5.3 SW30ULE-440i	51
6. Λογισμικό R.O.S.A.	52
6.1 Γενική περιγραφή λογισμικού R.O.S.A	52
6.2 Project information	53
6.3 Feedwater data	54
6.4 Scaling information	55
6.5 System configuration	56
6.6 Report	57
7. Συνθήκες μελέτης στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης	58
7.1 Συνθήκες μεταβολής πίεσης	58
7.2 Συνθήκες μεταβολής συγκέντρωσης	58
7.3 Συνθήκες μεταβολής συγκέντρωσης	59
7.4 Αποτελέσματα R.O.S.A	59
7.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων R.O.S.A	64
8. Αναπτυξη κώδικα περιγραφής στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξη	5 65
8.1 Θεωρητική επίλυση μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky	65
8.2 Ανάπτυξη κώδικα εύρεσης φαινομενολογικών παραμέτρων	67
8.2.1 Περιγραφή script εντολών εύρεσης των φαινομενολογικών	
παραμέτρων	67
8.2.2 Δεδομένα εισόδου script εντολών	70
8.2.3 Ανάλυση εντολών	70
8.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για υπολογισμό φαινομενολογικών	
παραμέτρων μοντέλου spiegler-kedem-katchalsky	71
8.4 Δημιουργία script εντολών περιγραφής στοιχείων σπειροειδούς περιέλ	λιξης
βασισμένο στο μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky	80
8.4.1 Δεδομένα εισόδου script περιγραφής στοιχείων σπειροειδούς	
περιέλιξης	82
8.5 Ανάλυση script εντολών περιγραφής στοιχείων	82
9 Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky	83
9.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	83
9.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και λογισμικού R.O.S.A	95

9.3 Τελικά συμπεράσματα	. 95
10. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	.96
10.1 Επιλογή στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης	.96
10.2 Αξιολόγηση περιγραφής στοιχείων σπειροειδους περιέλιξης	.96
10.3 Συμπεράσματα για της συνθήκες μελέτης	.97
10.4 Αξιολόγηση Λογισμικού R.O.S.A	. 98
10.5 Συμπεράσματα για αποτελέσματα λογισμικού R.O.S.A	. 98
10.6 Σχολιασμός Υπολογισμού φαινομενολογικών παραμέτρων	. 99
10.7 Σχολιασμός και συμπεράσματα αποτελεσμάτων φαινομενολογικών	
συντελεστών	.99
10.9 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky.	100
Βιβλιογραφία	988

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1	Σχεδιαγράμματα όσμωσης και αντίστροφής όσμωσης	10
Εικόνα 2.1	Τρισδιάστατη απεικόνιση διάταξης μονάδας αφαλάτωσης RO	13
Εικόνα 2.2	Υπόγεια άντληση θαλασσινού νερού από παραλιακό πηγάδι	14
Εικόνα 2.3	Κατηγοριοποίηση προβλημάτων των μεμβρανών λόγω νερού	15
Εικόνα 2.4	Διάγραμμα ροής προκατεργασίας θαλασσινού νερού	16
Εικόνα 2.5	Αντλία υψηλής πίεσης κατάλληλη για αντίστροφη όσμωση	17
Εικόνα 2.6	Μορφολογική κατηγοριοποίηση μεμβρανών	18
Εικόνα 2.7	Κατηγοριοποίηση μεμβρανών βάση διαμέτρου των πόρων	19
Εικόνα 2.8	Δομή οξεϊκής κυτταρίνης	20
Εικόνα 2.9	Δομή αρωματικών πολυαμιδίων	21
Εικόνα 2.10	Εγκάρσια τομή κοίλης ίνας – στοιχείου κοίλων ινών	23
Εικόνα 2.11	Σχηματική απεικόνιση στοιχείου κοίλων ινών σε διαμήκη τομή	23
Εικόνα 2.12	Σχηματική απεικόνιση στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης	25
Εικόνα 2.13	Εγκάρσια τομή στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης	25
Εικόνα 2.14	Σχηματική απεικόνιση σωληνωτού στοιχείου	26
Εικόνα 2.15	Σχηματική απεικόνιση στοιχείου με δίσκους και πλαίσια	27
Εικόνα 2.16	Διαμόρφωση μονού σταδίου	28
Εικόνα 2.17	Διαμόρφωση δύο σταδίων	29
Εικόνα 2.18	Απεικόνιση λειτουργίας υδροστροβίλου Pelton	31
Εικόνα 2.19	Απεικόνιση ανάκτησης ενέργειας μέσω υδροστροβίλου Pelton	32
Εικόνα 2.20	Συσκευή επιφανειακής απόρριψης άλμης	36
Εικόνα 4.1	Περιγραφή Στοιχείου Σπειροειδούς περιέλιξης	42
Εικονα 4.2	Μεταβολή της συγκέντρωσης καθώς πλησιάζουμε την μεμβράνη	46
Εικόνα 6.1	Καρτέλα Project information του λογισμικού R.O.S.A	53
Εικόνα 6.2	Καρτέλα Feedwater του λογισμικού R.O.S.A	54
Εικόνα 6.3	Καρτέλα Scaling του λογισμικού R.O.S.A	55

Εικόνα 6.4	Καρτέλα System Configuration του λογισμικού R.O.S.A	56
Εικόνα 6.5	Καρτέλα Report του λογισμικού R.O.S.A	57

Ευρετήριο Πινάκων και Διαγραμμάτων

Πίνακας 5.1		40
		49
Πίνακας 5.2	Τεχνικά χαρακτηριστικά SW30XLE-440i	50
Πίνακας 5.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά SW30ULE-440i	51
Διάγραμμα 7.1	Απόρριψη συναρτήσει πίεσης.	60
Διάγραμμα 7.2	Παροχή διαπέρασης συναρτήσει πίεσης.	60
Διάγραμμα 7.3	Απόρριψη συναρτήσει συγκέντρωσης	61
Διάγραμμα 7.4	Παροχή διαπέρασης συναρτήσει συγκέντρωσης	62
Διάγραμμα 7.5	Απόρριψη συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας.	63
Διάγραμμα 7.6	Παροχή διαπέρασης συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας.	63
Διάγραμμα 8.1	Λύσεις εξίσωσης 8.5 συναρτήσει πίεσης	72
Διάγραμμα 8.2	Λύσεις εξίσωσης 8.5 συναρτήσει συγκέντρωσης.	72
Διάγραμμα 8.3	Λύσεις εξίσωσης 8.5 συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας.	73

Διάγραμμα 8.4	Υδραυλική διαπερατότητα L_p συναρτήσει πίεσης	74
Διάγραμμα 8.5	Υδραυλική διαπερατότητα διαλυμένης ουσίας $P_{s}^{}$ συναρτήσει πίεσης.	74
Διάγραμμα 8.6	Υδραυλική διαπερατότητα L_p συναρτήσει συγκέντρωσης	75
Διάγραμμα 8.7	Υδραυλική διαπερατότητα διαλυμένης ουσίας P_s συναρτήσει συγκέντρωσης.	76
Διάγραμμα 8.8	Υδραυλική διαπερατότητα L_p συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας	76
Διάγραμμα 8.9	Υδραυλική διαπερατότητα διαλυμένης ουσίας P_s συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας.	77
Πίνακας 8.1	Συνοπτικός πίνακας φαινομενολογικών παραμέτρων για SW30XHR- 400i.	78
Πίνακας 8.2	Συνοπτικός πίνακας φαινομενολογικών παραμέτρων για SW30ULE- 400i.	78
Πίνακας 8.3	Συνοπτικός πίνακας φαινομενολογικών παραμέτρων για SW30XLE- 400i.	79
Πίνακας 8.4	Συνοπτικός πίνακας φαινομενολογικών παραμέτρων όλων των μεταβολών μαζί.	79
Διάγραμμα 9.1	Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30XHR-440i.	83
Διάγραμμα 9.2	Ποσοστό απόρριψη μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30XHR-440i.	84
Διάγραμμα 9.3	Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30XHR-440ι.	84
Διάγραμμα 9.4	Ποσοστό Απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30XHR-440i.	85
Διάγραμμα 9.5	Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30XHR-440i.	86
Διάγραμμα 9.6	Ποσοστό Απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30XHR-440i.	86

Διάγραμμα 9.7	Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30ULE-440i.	88
Διάγραμμα 9.8	Ποσοστό Απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30ULE-440i.	88
Διάγραμμα 9.9	Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30ULE-440i.	89
Διάγραμμα 9.10	Ποσοστό απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30ULE-440i.	89
Διάγραμμα 9.11	Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30ULE-440i.	90
Διάγραμμα 9.12	Ποσοστό απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30ULE-440i.	90
Διάγραμμα 9.13	Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30XLE-440i.	92
Διάγραμμα 9.14	Ποσοστό απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30XLE-440i	92
Διάγραμμα 9.15	Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30XLE-440i.	93
Διάγραμμα 9.16	Ποσοστό απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30XLE-440i.	93
Διάγραμμα 9.17	Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30XLE-440i.	94
Διάγραμμα 9.18	Ποσοστό απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30XLE-440i.	94

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Η ιδέα της αντίστροφης όσμωσης είναι γνωστή εδώ και πολλά χρόνια. Στην πραγματικότητα μελέτες διεξάγονταν ήδη από το 1784 από τον Γάλλο Nolle και από πολλούς άλλους επιστήμονες τους δύο αιώνες που ακολούθησαν (Raid,1966;manson,1991). Ωστόσο, η χρήση της αντίστροφης όσμωσης (RO) σαν εφαρμόσιμη μέθοδος διαχωρισμού έγινε σχετικά πρόσφατα.Στην πραγματικότητα μόνο στα τέλη της δεκαετίας του 1950 ο Raid έδειξε ότι οξικές κυτταρικές μεμβράνες ήταν ικανές να διαχωρίσουν το αλάτι από το νερό, αλλά ακόμα και τότε οι παροχές ήταν περιορισμένες και εμπόδιζαν την εμπορική τους χρήση (Reid and breton,1959; Ferguson,1980; Lonsdal,1982; Applegate 1984). Στην συνέχεια στης αρχές 1960, οι Loeb και Sourirajan ανέπτυξαν ασύμμετρες οξικές κυτταρικές μεμβράνες με σχετικά μεγάλη αντοχή σε μεγάλες παροχές και με υψηλά ποσοστά διαχωρισμού,καθιστώντας την αντίστροφη όσμωση πρακτική και εφαρμόσιμη. (Loeb and Sourirajan,1962; Loeb, 1981; Sourirajan and Matsuura, 1985;).

Από τότε αναπτύχθηκαν νέες γενιές μεμβρανών, οι λεπτού στρώματος και οι σύνθετες μεμβράνες που αντέχουν σε μεγάλο εύρος pH, υψηλές θερμοκρασίες και διαβρωτικά χημικά περιβάλλοντα και υποστηρίζουν μεγάλες ροές και ποσοστά διαχωρισμού, με αποτέλεσμα να εφαρμοστούν σε πολλές εμπορικές εφαρμογές, πέραν από τις παραδοσιακές διεργασίες αφαλάτωσης θαλασσινού και υφάλμυρου νερού. Επίσης έχουν προστεθεί χρήσεις όπως η παραγωγή αποσταγμένου νερού, η επεξεργασία λυμάτων ,τροφών καθώς και πολλές άλλες. (Bhattacharyya et al.,1992),ενώ εκτιμάται ότι οι πωλήσεις μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης έχουν ανέλθει σε \$118 εκατομμύρια δολάρια το 1990 με προοπτικές περαιτέρω αύξησης (Riley,1990)

Κινητήρια δύναμη ανάπτυξης και χρήσης μεμβρανών υπήρχε το γεγονός ότι η αντίστροφη όσμωση βασίζεται στην διαφορά πίεσης και έτσι δεν εμπεριέχει ενεργοβόρες διαδικασίες αλλαγών φάσης και δεν χρειάζεται ακριβά διαλυτικά και υλικά προσρόφησης, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους διαχωρισμού όπως η απόσταξη, η εκχύλιση, η ανταλλαγή ιόντων και η προσρόφηση. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της αντίστροφης όσμωσης είναι ο απλός σχεδιασμός και η λειτουργία της συγκριτικά με άλλες μεθόδους διαχωρισμού. Επίσης η αντίστροφη όσμωση έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί ταυτόχρονο διαχωρισμό ανόργανων και οργανικών ουσιών. Ενώ η νανοδιήθηση δίνει τη δυνατότητα επιλεκτικού διαχωρισμού βασισμένου στο μοριακό μέγεθος, βάρος, και φορτίο. Τέλος η αντίστροφη όσμωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υβριδικά συστήματα με άλλες διεργασίες, όπως η απόσταξη και η διεξάτμιση με σκοπό τον αποτελεσματικό και επιλεκτικό διαχωρισμό (Bhattacharyya).[1]

1.2 Ορισμός της αντίστροφης όσμωσης.

Οσμώση ειναι το φυσικό φαινόμενο στο οποίο ο διαλύτης ενός μίγματος περνά μέσα από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη από την πλευρά που έχει χαμηλότερη συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας στη πλευρά με την υψηλότερη συγκέντρωση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1(a) η ροή του νερού συνεχίζεται μέχρις ότου επιτευχθεί χημική ισορροπία ή η διαφορά πίεσης των δύο πλευρών να ισούται με την οσμωτική πίεση του διαλύματος. Για να αντιστραφεί η ροή του διαλύτη πρέπει να ασκηθεί πίεση μεγαλύτερη της οσμωτικής διαφοράς (σχήμα 1(β)). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα των διαχωρισμό του νερού από την διαλυμένη ουσία και σαν καθαρό νερό να ρέει από την πλευρά της υψηλής συγκέντρωσης προς την χαμηλή. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται σαν αντίστροφη όσμωση (επίσης αναφέρεται ως υπερδιήθηση).[1]

Οι μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης δρουν σαν ημιδιαπερατά εμπόδια της ροής με αποτέλεσμα να επιτρέπουν το επιλεκτικό πέρασμα συγκεκριμένων μορίων (κυρίως νερό) και να εμποδίζουν ολικώς ή μερικώς το διάβα άλλων. Η εν δυνάμει διαφορά χημικού δυναμικού είναι η αιτία μεταφοράς του διαλύτη και της διαλυμένης ουσίας κατά μήκος της μεμβράνης: Δ_{μs} .Το χημικό δυναμικό του νερού εκφράζεται συνήθως με διαφορά πίεσης μεταξύ των πλευρών (Bhattacharyya and Williams, 1992).[2]

9



(a)





1.3 Περιγραφή και ορολογία της αντίστροφής όσμωσης.

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος αντίστροφης όσμωσης είναι σχετικά απλός . Αποτελείται από μια παροχή νερού, μια μονάδα προεπεξεργασίας μια αντλία υψηλής πίεσης της διάταξης των μεμβρανών και σε μερικές περιπτώσεις από μεταεπεξεργαστικές διατάξεις. Σχεδιάγραμμα αντίστροφης όσμωσης φαίνεται στην εικόνα 2.1.

Οι τρείς ροές (και οι σχετικές μεταβλητές της αντίστροφης όσμωσης φαίνονται στην εικόνα 2.1: η παροχή τροφοδοσίας, η παραγόμενη παροχή που ονομάζεται παροχή διαπέρασης και το συμπυκνωμένο ρεύμα τροφοδοσίας που ονομάζεται συμπύκνωμα η παρακράτημα. Το νερό που περνά από την μεμβράνη μετριέται σε όρους παροχής νερού.

Σε πολλά συστήματα το νερό που συλλέγεται σαν συμπύκνωμα επιστρέφει στην δεξαμενή τροφοδοσίας με αποτέλεσμα η περιεκτικότητα σε διαλυμένη ουσία συνεχώς να αυξάνεται. Για τον λόγο αυτό στα συνεχή μεμβρανοειδή συστήματα απαιτείται συνεχής τροφοδοσία φρέσκου νερού.

Πολλές φορές η ροή κανονικοποιείται σε σχέση με την αρχική ή την αποσταγμένη ροή νερού *Ι_{wo} <u>J</u>w* ή σαν πτώση ροής.

Πτώση ροής =
$$I - \frac{j_w}{j_{wo}}$$

Η διαφορά πιέσης μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης συμβολίζεται με Δ_p και η διαφορά της οσμωτικής πίεσης ως Δπ. Η κινητήρια δύναμη που προκαλεί την ροή του νερού διαμέσου της μεμβράνης είναι η διαφορά($\Delta_p - \sigma \Delta \Pi$) και όπου σ ο συντελεστής ανάκλασης staverman. Η ορολογία των διαδικασιών αντίστροφής όσμωσης καθιερώθηκε από τον Gekas (1988).[1]

1.4 Εμπορικές εφαρμογές των Α.Ο. και ΝΔ. μεμβρανών.

Το 90% των μεμβρανών που κατασκευάζονται χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πόσιμου νερού και για την παραγωγή αποσταγμένου. Στην αρχή πολλοί πίστευαν ότι η επεξεργασία βιομηχανικών διεργασιών και των εκροών τους θα αποτελούσε την κύρια εφαρμογή τους. Στην συνέχεια όμως διαψεύστηκαν λόγω του φαινομένου της ρύπανσης της μεμβράνης ,καθώς και ότι στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές που δεν απαιτείται πλήρη απομάκρυνση των διαλυμένων ουσιών. οι ΝΔ. μεμβράνες είναι πιο οικονομικές.

- Ο καθαρισμός των αστικών αποβλήτων
- Η ανάκτηση ψυκτικού υγρού
- Η αφαίρεση χρώματος
- Η συμπύκνωση ή αφαλάτωση τροφίμων
- Η αφαίρεση οργανικών ουσιών και πολυσθενών ιόντων από το νερό
- Η αφαίρεση βρώσιμων ελαίων από οργανικά διαλύματα
- Ο διαχωρισμός των αμινοξέων, πεπτιδίων και πρωτεϊνών από βιοεργασίες.

2.1 Περιγραφή της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση.

Η αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση, όπως έχει αναφερθεί, μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε θαλασσινό, είτε σε υφάλμυρο νερό με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η περίπτωση του θαλασσινού νερού ως πρώτη ύλη, αποτελεί εξαιρετικής σημασίας περίπτωση, διότι όπως είναι γνωστό, τα μεγαλύτερο μέρος των υδατικών αποθεμάτων του πλανήτη βρίσκεται σε μορφή αλμυρού νερού στις θάλασσες. Η αξιοποίηση αυτού λοιπόν, του δυναμικού αποτελεί άμεσο στόχο για να λυθούν τα προβλήματα λειψυδρίας, σε περιοχές που βρέχονται από θάλασσα και δεν έχουν πρόσβαση σε γλυκό νερό ή είναι ασύμφορη η μεταφορά του εκεί. Οι μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη όσμωση ακολουθούν μια πορεία λειτουργίας, η οποία μπορεί να χωριστεί σύμφωνα με τη σειρά των σταδίων που την αποτελούν. [3]

Συνοπτικά λοιπόν έχουμε:

- Προκατεργασία νερού τροφοδότησης
- Συμπίεση προκατεργασμένου νερού τροφοδότησης σε αντλία υψηλής πίεσης
- Αφαλάτωση του νερού σε μονάδα αντίστροφης όσμωσης
- Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης
- Τελική κατεργασία του αφαλατωμένου νερού
- Απόρριψη του υπολείμματος (άλμης)



Εικόνα 2.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση διάταξης μονάδας αφαλάτωσης RO

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., Advanced membrane technology and applications, p. 65, Wiley,2008

2.1.1 Τροφοδοσία θαλασσινού νερού

Οι εγκαταστάσεις άντλησης του θαλασσινού νερού αποτελούν το πρώτο βασικό σημείο της εγκατάστασης, προκειμένου να εξασφαλίζεται η συνεχής και επαρκής τροφοδοσία θαλασσινού νερού στη μονάδα. Υπάρχουν δύο διαμορφώσεις στις εγκαταστάσεις τροφοδοσίας:

- Η επιφανειακή άντληση
- Η υπόγεια άντληση από πηγάδι (φρέαρ)

Η επιλογή γίνεται ανάλογα με τη δυναμικότητα της μονάδας και της θέσης της ως προς τη θάλασσα.[3]



Εικόνα 2.2: Υπόγεια άντληση θαλασσινού νερού από παραλιακό πηγάδι

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., Advanced membrane technology and applications, p. 52, Wiley, 2008

2.1.2 Προκατεργασία νερού τροφοδότησης

Το θαλασσινό νερό που χρησιμοποιείται στην αφαλάτωση, περιέχει πλήθος συστατικών, που πρέπει να απομακρυνθούν πλήρως ή να μειωθεί δραστικά ο αριθμός τους, ώστε να καταστεί δυνατή η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης.

Πέραν των αλάτων, περιέχονται διάφορα αιωρούμενα συστατικά, κολλοειδείς ουσίες και μικροοργανισμοί, που η παρουσία τους ρυπαίνει και αποσαθρώνει τις μεμβράνες, ελαττώνοντας έτσι την απόδοση της εγκατάστασης και το χρόνο ζωής των μεμβρανών. Ειδικότερα παρουσιάζονται προβλήματα όπως:

Επιθέματα (scaling) στην επιφάνεια των μεμβρανών από υπέρβαση του ορίου διαλυτότητας ή λόγω σχηματισμού αδιάλυτων αλάτων εξαιτίας τοπικών αντιδράσεων.

- Επικάθιση στην επιφάνεια της μεμβράνης κολλοειδών συστατικών
- Προσρόφηση από τις πολυμερείς ομάδες της μεμβράνης, διαφόρων μακρομορίων που περιέχονται στο νερό και σχηματισμός λεπτού στρώματος ζελατινοειδούς μορφής
- Απόφραξη των καναλιών κυκλοφορίας της άλμης, από τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια.



Εικόνα 2.3: Κατηγοριοποίηση προβλημάτων των μεμβρανών λόγω νερού τροφοδότησης Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes, p. 61, Springer, 2009 Συνεπώς, είναι απαραίτητο το στάδιο της προκατεργασίας του νερού τροφοδότησης, ώστε να αποφευχθούν τα προαναφερθέντα προβλήματα[3]. Μια συνήθης αντιμετώπιση του προβλήματος περιέχει τα παρακάτω στάδια:

- Διαχωρισμός σωματιδίων μεγάλου μεγέθους (> 10mm) με στατικά κόσκινα/σχάρες (screens)
- Προσθήκη χλωρίου (chlorination), κροκιδωτικών μέσων (flocculation agents), και οξέως για τη ρύθμιση του pH (acid addition)
- Πήξη/κροκίδωση (coagulation/flocculation)
- Φιλτράρισμα μέσω φίλτρων άμμου και φίλτρων διπλού μέσου άμμου - ανθρακίτη (slow sand filters/dual media sand – anthracite filters)
- Αποχλωρίωση / καθαρισμός επικαθίσεων (dechlorination/antiscalants)
- Φιλτράρισμα σωματιδίων μεγέθους 5-10 μm μέσω φίλτρων τύπου cartridge (cartridge filters) [3]



Εικόνα 2.4: Διάγραμμα ροής προκατεργασίας θαλασσινού νερού Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes, p. 67, Springer, 2009

2.1.3 Μεταφορά προκατεργασμένου νερού μέσω αντλιών υψηλής πίεσης

Μετά την ολοκλήρωση της προκατεργασίας, το νερό τροφοδότησης περνά από τις αντλίες υψηλής πίεσης, όπου αυξάνεται η πίεσή του στο βαθμό που απαιτείται από τη διεργασία. Η πίεση μετά το στάδιο αυτό κυμαίνεται συνήθως στα 55 – 85 bar, όμως η τιμή αυτή καθορίζεται από την περιεκτικότητα του νερού σε άλατα τροφοδότησης και τη διαμόρφωση της μονάδας αφαλάτωσης.[3]



Εικόνα 2.5: Αντλία υψηλής πίεσης κατάλληλη για αντίστροφη όσμωση

Πηγή: <u>www.ksb.com</u>

2.1.4 Αφαλάτωση του νερού σε μονάδα αντίστροφης όσμωσης

Τα στοιχεία μεμβρανών (modules) αποτελούν την καρδιά της μονάδας αφαλάτωσης, διότι εκεί επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός νερού και αλάτων. Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός στοιχείου μεμβρανών είναι:

- Οι μεμβράνες διαχωρισμού
- Το δοχείο πίεσης (pressure vessel) με τον βοηθητικό εξοπλισμό

Ο σχεδιασμός των στοιχείων είναι κατάλληλος, ώστε το υψηλής πίεσης προκατεργασμένο νερό τροφοδοσίας να μεταφέρεται στην επιφάνεια της μεμβράνης, όπου εκεί γίνεται ο διαχωρισμός, και στη συνέχεια να συλλέγεται το αφαλατωμένο νερό (permeate) ξεχωριστά από το απορριπτόμενο ρεύμα της άλμης (retentate/concentrate).

Το σημαντικότερο μέρος ενός στοιχείου, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, αποτελούν οι μεμβράνες διαχωρισμού. Υπάρχει μια σχετικά μεγάλη ποικιλία σε είδη μεμβρανών σήμερα, όμως οι κυριότερες μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στην αντίστροφη όσμωση περιορίζονται σε 2-3 κατηγορίες. Παρακάτω περιγράφεται η τεχνολογία, τα στοιχεία των μεμβρανών και οι διαμορφώσεις τους που χρησιμοποιούνται σε εμπορικές εφαρμογές.[3]

2.2.4.1 Μεμβράνες διαχωρισμού

Οι μεμβράνες διαχωρισμού αποτελούν ουσιαστικά μια λεπτή πολυμερική διεπιφάνεια επαφής, που καθορίζει τη διέλευση των χημικών ειδών, με τα οποία βρίσκεται σε επαφή. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως προς την μορφολογία τους σε: [3]

- Πυκνής δομής
- Πορώδους δομής, με δύο υποκατηγορίες: Συμμετρικές και Ασύμμετρες (ανισοτροπικές)
- Σύνθετες λεπτού υμενίου



Εικόνα 2.6: Μορφολογική κατηγοριοποίηση μεμβρανών

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes, p. 43, Springer, 2009

Στην περίπτωση των μεμβρανών πορώδους μορφής, μια περαιτέρω κατηγοριοποίηση ως προς το μέγεθος των πόρων είναι αυτή που εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.7: Κατηγοριοποίηση μεμβρανών βάση διαμέτρου των πόρων

Πηγή: Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, p.7, Wiley, 2004

Στην περίπτωση της αντίστροφης όσμωσης οι μεμβράνες, που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι κυρίως 3 τύπων:

1. Μεμβράνες οξεϊκής κυτταρίνης (cellulose acetate membranes - CA)

Οι μεμβράνες οξεϊκής κυτταρίνης είναι οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν για αντίστροφη όσμωση σε βιομηχανικό επίπεδο το 1960. Από τότε, έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο ποσοστό από διαφορετικού υλικού μεμβράνες, καθώς παρουσιάζουν ευπάθεια στη χημική και βιολογική διάβρωση και χρησιμοποιούνται σε στενά όρια pH. Έχουν όμως το πλεονέκτημα της αντοχής στο χλώριο, του χαμηλού κόστους και της μακροχρόνιας παρουσίας στην αγορά.

Είναι ασύμμετρες πορώδεις μεμβράνες που αποτελούνται κατά βάση από οξεϊκή κυτταρίνη και συναντώνται συνήθως στη μορφή της τριοξεϊκής κυτταρίνης (tri- acetate cellulose). [3]



Εικόνα 2.8: Δομή οξεϊκής κυτταρίνης

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes, p. 47, Springer, 2009

2. Μεμβράνες αρωματικών πολυαμιδίων (aromatic polyamide membranes -PA)

Οι μεμβράνες αρωματικών πολυαμιδίων σχεδιάστηκαν για να ξεπεράσουν τα προβλήματα των αντίστοιχων της οξεϊκής κυτταρίνης. Βρήκαν τεράστια απήχηση τις προηγούμενες δεκαετίες, λόγω κυρίως της εταιρίας DuPont, η οποία χρησιμοποίησε τις μεμβράνες αυτές σε διάταξη κοίλων ινών, με την ονομασία Permasep B-9 και B-10. Από το 2001 οι μεμβράνες αυτές αποσύρθηκαν από την DuPont και πλέον χρησιμοποιούνται σε σύνθετες μορφές (composite polyamide) από άλλες εταιρίες.[3]

Είναι ασύμμετρες μεμβράνες και χρησιμοποιούνται συνήθως σε διατάξεις ενός σταδίου, με τροφοδοσία θαλασσινού νερού.[3]



Εικόνα 2.9: Δομή αρωματικών πολυαμιδίων

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes, p. 47, Springer, 2009

3. Σύνθετες μεμβράνες λεπτού υμενίου (thin film composite membranes – TFC)

Οι σύνθετες μεμβράνες λεπτού υμενίου ξεκίνησαν να παρασκευάζονται τη δεκαετία του 1970, λόγω κυρίως της αδυναμίας των πολυμερικών συστατικών των άλλων τύπων, να σχηματίσουν ασύμμετρες μεμβράνες με επιθυμητά πάχη. Έτσι, άρχισαν να παρασκευάζονται μεμβράνες με πορώδες υπόστρωμα (πχ. οξεϊκή κυτταρίνη), στην επιφάνεια του οποίου αποτίθεται με ψεκασμό ή εμβάπτιση λεπτό υμένιο.

Σήμερα, οι σύνθετες μεμβράνες έχουν πολύ ευρεία χρήση στην αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση και αποτελούν τον τομέα, όπου διεξάγεται και η μεγαλύτερη έρευνα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σύνθετης μεμβράνης αποτελεί η μεμβράνη αρωματικών πολυαμιδίων διασταυρούμενων αλυσίδων (cross-linked aromatic polyamide composite membrane). [3]

2.2.4.2 Διαμόρφωση μεμβρανών των στοιχείων αφαλάτωσης

Τα στοιχεία μεμβρανών χωρίζονται σε τέσσερις κύριους τύπους, ανάλογα με τη μορφή που λαμβάνει το σύστημα μεμβράνη – δοχείο πίεσης:

1. Στοιχεία κοίλων ινών (hollow fiber modules)

Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από χιλιάδες κοίλες ίνες ασύμμετρων μεμβρανών, με μέγεθος όσο περίπου μία ανθρώπινη τρίχα, τοποθετημένα κατά το διαμήκη άξονα του κυλινδρικού δοχείου πίεσης στο οποίο περιέχονται. Συγκεκριμένα, οι κοίλες ίνες έχουν διαστάσεις εσωτερικής διαμέτρου 0,1 – 50 μm και εξωτερικής διαμέτρου 0,5 – 100 μm και σχηματίζουν ένα κυλινδρικό θύσανο διαμέτρου 5 – 10 cm, ο οποίος βρίσκεται μέσα στο δοχείο πίεσης.

Η μεταφορά του νερού γίνεται ακτινικά, μέσω σωλήνα τροφοδοσίας στο εσωτερικό του δοχείου, από την εξωτερική πλευρά της μεμβράνης προς την εσωτερική κοιλότητα των ινών. Έτσι, το αφαλατωμένο νερό, μεταφέρεται μέσω των κοίλων ινών προς το άκρο του δοχείου πίεσης, απ' όπου

και εξέρχεται, ενώ το απορριπτόμενο ρεύμα (άλμη) εξέρχεται από διαφορετικό σημείο του δοχείου, χωρίς να έρχεται σε επαφή με το αφαλατωμένο νερό.

Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν τη μεγαλύτερη επιφάνεια μεμβράνης ανά στοιχείο, παρουσιάζουν όμως τη μικρότερη ροή, αλλά και ευαισθησία σε ρύπανση και επικαθίσεις. Σημαντικοί εκπρόσωποι της κατηγορίας αυτής, αποτέλεσαν τα στοιχεία της DuPont B-10, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον τις περασμένες δεκαετίες. [3]



Εικόνα 2.10: Εγκάρσια τομή κοίλης ίνας – στοιχείου κοίλων ινών

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., Advanced membrane technology and applications, p. 137, Wiley, 2008



Εικόνα 2.11: Σχηματική απεικόνιση στοιχείου κοίλων ινών σε διαμήκη τομή

Πηγή: Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, p.148, Wiley, 2004

2. Στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης (spiral wound modules)

Τα στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης αποτελούνται από πολλές επίπεδες μεμβράνες, οι οποίες ανά δύο συγκολλούνται από τρείς πλευρές σχηματίζοντας ένα είδος φακέλου. Μεταξύ των μεμβρανών τοποθετείται ένα στήριγμα από πορώδες υλικό, το οποίο συγκρατεί τις μεμβράνες ξεχωριστά εμποδίζοντάς τες να ενωθούν εξαιτίας της επικρατούσας πίεσης. Οι δύο άκρες των μεμβρανών του ανοικτού τμήματος προσκολλώνται σε ένα σωλήνα με οπές, από όπου απομακρύνεται το αφαλατωμένο νερό. Συνήθως τοποθετούνται ως και 26 φάκελοι μεμβρανών στον κεντρικό σωλήνα. Οι φάκελοι χωρίζονται μεταξύ τους από πλαστικό πλέγμα, το οποίο ονομάζεται χώρισμα του καναλιού της άλμης'. Το σύστημα φακέλων – χωρισμάτων τυλίγεται γύρω από τον κεντρικό σωλήνα τροφοδοσίας, μέσα στο κυλινδρικό δοχείο πίεσης, σχηματίζοντας έτσι την σπειροειδή περιέλιξη. Η ροή του νερού τροφοδοσίας είναι αξονική και παράλληλη με το απορριπτόμενο υγρό (άλμη), ενώ το αφαλατωμένο νερό ρέει ακτινικά ως προς το δοχείο πίεσης και κατά μήκος των μεμβρανών. Κάθε δοχείο πίεσης περιέχει συνήθως 4-6 στοιχεία μεμβρανών, έχει μήκος περίπου 1m (40 inches) και διάμετρο περίπου 10 cm (4 inches) [3]

Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στις σύγχρονες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, καθώς το χαμηλό τους κόστος σε συνδυασμό με τη ευκολία στον καθαρισμό που παρέχουν, τα καθιστούν πολύ ελκυστικά.

24



Εικόνα 2.12: Σχηματική απεικόνιση στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης

Πηγή: Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, p.144, Wiley, 2004



Εικόνα 2.13: Εγκάρσια τομή στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης

Πηγή: Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, p.144, Wiley, 2004

3. Σωληνωτά στοιχεία (tubular modules)

Τα σωληνωτά στοιχεία μοιάζουν, ως προς τη διάταξη, με τα στοιχεία κοίλων ινών. Οι μεμβράνες σχηματοποιούνται σε σωλήνες διαμέτρου 0,7 – 2,5 cm και τοποθετούνται κατά μήκος του κυλινδρικού δοχείου πίεσης. Το νερό τροφοδότησης ρέει κατά μήκος των σωληνωτών μεμβρανών και το αφαλατωμένο νερό ρέει ακτινικά ως προς τη ροή τροφοδοσίας. Η απορριπτόμενη άλμη εξέρχεται από το άκρο του στοιχείου, με κατεύθυνση ομόρροπη ή αντίρροπη σε σχέση με την τροφοδοσία. Τα στοιχεία αυτά δεν χρησιμοποιούνται σήμερα σχεδόν καθόλου στις μονάδες αντίστροφης όσμωσης, αλλά βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις υπερδιήθησης και μικροδιήθησης (πχ. συμπύκνωση φρουτοχυμών), στις οποίες το όφελος που προκύπτει από την αντίσταση των στοιχείων στη ρύπανση, ξεπερνά το υψηλό τους κόστος. [3]



Εικόνα 2.14: Σχηματική απεικόνιση σωληνωτού στοιχείου

Πηγή: Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, p.143, Wiley, 2004

4. Στοιχεία με δίσκους και πλαίσια (plate-and-frame modules)

Τα στοιχεία μεμβρανών με δίσκους και πλαίσια αποτελούνται από επίπεδες μεμβράνες, οι οποίες τοποθετούνται ανάμεσα σε δίσκους. Οι δίσκοι τοποθετούνται αλλεπάλληλα σε κατακόρυφη διάταξη και χωρίζονται μεταξύ τους από πλαίσια, που φέρουν κανάλια για την κυκλοφορία του νερού. Το όλο σύστημα τοποθετείται σε ένα κατακόρυφο δοχείο (σωλήνα) πίεσης.

Τα στοιχεία αυτά επιτυγχάνουν πολύ υψηλές πιέσεις λειτουργίας (ως 120 bar) και υψηλό βαθμό συμπύκνωσης, σε σχέση με τα άλλα στοιχεία, όμως το κόστος τους είναι ιδιαίτερα υψηλό και ως εκ τούτου, δεν χρησιμοποιούνται στην αφαλάτωση νερού, αλλά σε άλλες διεργασίες χημικής μηχανικής.[3]



Εικόνα 2.15: Σχηματική απεικόνιση στοιχείου με δίσκους και πλαίσια

Πηγή: Kucera J., Reverse osmosis – industrial applications and processes, p. 59, Scrivener Publishing (Wiley),2010

2.2.4.3 Διαμόρφωση μονάδας αφαλάτωσης

Τα στοιχεία μεμβράνης, εκτός της περίπτωσης των στοιχείων με δίσκους και πλαίσια, τοποθετούνται παράλληλα, σε σειρά ή σε συνδυασμό, ώστε να δημιουργηθεί μια διαμόρφωση κατάλληλη για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας. Η διαμόρφωση επιλέγεται ανάλογα με τις συνθήκες του νερού τροφοδοσίας και κυρίως ανάλογα με τις απαιτήσεις για το αφαλατωμένο νερό σε άλατα, βόριο, χλώριο κλπ. Οι πιο συνήθεις διαμορφώσεις που συναντώνται στην πράξη είναι:

Διαμόρφωση μονού σταδίου

Στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία (modules) τοποθετούνται παράλληλα με κοινή είσοδο και έξοδο. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα ανακυκλοφορίας της άλμης για μεγαλύτερη ανάκτηση. Η διαμόρφωση αυτή είναι πολύ δημοφιλής, καθώς χρησιμοποιείται από πολλές μικρές και μεσαίες μονάδες παγκοσμίως. Η ανάκτηση που επιτυγχάνουν (αφαλατωμένο νερό /συνολική τροφοδοσία) κυμαίνεται μεταξύ 15 – 40%. Η μέγιστη δυνατή ποιότητα νερού που παράγουν είναι ως 200 ppm άλατα (TDS), 100 ppm χλώριο και 0,5 ppm βόριο, που είναι μέσα στα αποδεκτά όρια για χρήση από τον άνθρωπο.



Εικόνα 2.16: Διαμόρφωση μονού σταδίου

Πηγή: Marcovecchio M., Aguirre P., Scenna N., Global optimal design of RO networks for SW desalination:modeling and algorithm, Desalination 184 (1–3), p. 260, Elsevier, 2005

Διαμόρφωση πολλαπλών σταδίων

Στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία (modules) τοποθετούνται σε σειρά ανά στάδια. Δηλαδή, η είσοδος του επόμενου σταδίου είναι είτε το αφαλατωμένο απορριπτόμενη νερό TOU προηγούμενου, 3TÌ3 η άλμη. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο στάδια και σε λίγες περιπτώσεις τρία και περισσότερα. Η διαμόρφωση αυτή επιλέγεται όταν υπάρχει ανάγκη για νερό υψηλής καθαρότητας προϊόντος. Λόγω της ύπαρξης ń μεγάλη ανάκτηση περισσοτέρων του ενός σταδίων, η ανάκτηση που επιτυγχάνεται κυμαίνεται μεταξύ 60 – 85%, ανάλογα με τον αριθμό των σταδίων. Το μειονέκτημα αυτών των διαμορφώσεων είναι το υψηλότερο κόστος και η μεγάλη πολυπλοκότητα των εγκαταστάσεων σε σχέση με την περίπτωση μονού σταδίου. [3]



Εικόνα 2.17: Διαμόρφωση δύο σταδίων

Πηγή: Marcovecchio M., Aguirre P., Scenna N., Global optimal design of RO networks for SW desalination: modeling and algorithm, Desalination 184 (1–3), p. 260, Elsevier, 2005

2.2.5 Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης

Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού αποτελεί μια διεργασία υψηλής έντασης ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας από την αντλία υψηλής πίεσης για τη μεταφορά του προκατεργασμένου νερού, συνεισφέρει σχεδόν κατά 80% στο συνολικό ποσό ενέργειας που απαιτείται, και εν τέλει στο ενεργειακό κόστος της μονάδας. Συνεπώς, είναι φανερή η ανάγκη για λήψη μέτρων ενεργειακής εξοικονόμησης.

Οι μεθοδολογίες εξοικονόμησης ενέργειας στρέφονται κυρίως στην ανάκτηση ενέργειας από το απορριπτόμενο ρεύμα της άλμης. Στην περίπτωση αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με μέσο όρο μετατροπής 15-40%, η πίεση λειτουργίας κυμαίνεται συνήθως στα 55 – 70 bar, οπότε και η πίεση της εξερχόμενης άλμης κυμαίνεται μεταξύ 50 – 65 bar. Το δυναμικό αυτό, λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης, κυρίως μέσω υποβοήθησης της αντλίας υψηλής πίεσης.

Τα συστήματα ανάκτησης ενέργειας (energy recovery systems – ERS) κατηγοριοποιούνται, ως προς την διάταξη εξοικονόμησης που χρησιμοποιείται, σε :

- Συστήματα ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας (hydraulic energy recovery systems)
- Υδροστροβίλους Pelton (Pelton wheel turbines)

Φυγοκεντρικές αντλίες αντίστροφης λειτουργίας (reverse running centrifugal pumps)

- Συστήματα άμεσης ανάκτησης ενέργειας / ισοβαρή συστήματα ανάκτησης (direct energy recovery systems / isobaric systems)
- Εναλλάκτες πίεσης (έργου) (pressure/work exchangers)

α. Υδροστρόβιλοι Pelton (Pelton wheel turbines)

Οι υδροστρόβιλοι Pelton αποτελούν ένα δοκιμασμένο σύστημα ανάκτησης ενέργειας, με πάνω από 30 χρόνια επιτυχούς εφαρμογής. Η λειτουργία του βασίζεται στον τροχό Pelton (Pelton wheel), όπου οδηγείται το ρεύμα της άλμης και κινεί τον άξονα που είναι προσαρμοσμένος στη διάταξη. Ο άξονας αυτός είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον κινητήρα της αντλίας υψηλής πίεσης, ώστε να μειώνει το φορτίο της αντλίας και να εξοικονομεί ενέργεια.

Το βασικό μειονέκτημα της διάταξης αυτής είναι οι διπλές απώλειες που υπάρχουν κατά τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική (περιστροφική) και εκ νέου σε υδραυλική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η απόδοση της διάταξης να κυμαίνεται γύρω στο 80%.[3]



Εικόνα 2.18: Απεικόνιση λειτουργίας υδροστροβίλου Pelton

Πηγή: <u>www.isoenergy.co.uk</u>



Εικόνα 2.19: Απεικόνιση ανάκτησης ενέργειας μέσω υδροστροβίλου Pelton

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., Advanced membrane technology and applications, p. 89, Wiley, 2008

β. Φυγοκεντρικές αντλίες αντίστροφης λειτουργίας (reverse running centrifugal pumps)

Οι φυγοκεντρικές αντλίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στρόβιλοι ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας (hydraulic energy recovery turbines), εάν αντιστραφεί η ροή εισόδου και η περιστροφή της φτερωτής. Λειτουργούν κατά τον ίδιο τρόπο με τους υδροστρόβιλους Pelton, μεταφέρουν δηλαδή μέσω άξονα στην αντλία υψηλής πίεσης την ενέργεια που ανακτούν. Αποτελούν δημοφιλή συστήματα με ευρεία χρήση σε παλιότερες μονάδες αφαλάτωσης. Παρουσιάζουν το ίδιο μειονέκτημα με τους υδροστρόβιλους Pelton, δηλαδή τη μειωμένη απόδοση λόγω διπλής μετατροπής της ενέργειας. Η απόδοση της διάταξης κυμαίνεται γύρω στο 75 - 80% για τις σύγχρονες εφαρμογές.[3]
γ. Εναλλάκτες πίεσης (έργου) (pressure/work exchangers)

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 άρχισε να χρησιμοποιείται ένα νέο σύστημα για ανάκτηση ενέργειας σε μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού αντίστροφης όσμωσης. Το σύστημα αυτό ονομάζεται εναλλάκτης πίεσης και λειτουργεί ως αντλία θετικής εκτοπίσεως. Η σημαντική του διαφορά από τα προηγούμενα συστήματα είναι ότι δεν είναι συνδεδεμένο με την αντλία υψηλής πίεσης, αλλά λειτουργεί παράλληλα με αυτή. Έτσι, επιτυγχάνει βαθμό απόδοσης κοντά στο 95%.

Η διάταξη αποτελείται από ένα πλαστικό δοχείο πίεσης, στο οποίο βρίσκεται ένα κεραμικός σωλήνας και μέσα του, ένας κεραμικός ρότορας, ο οποίος περιστρέφεται πάνω σε ένα λεπτό υμένιο νερού. Με την είσοδο στη διάταξη της άλμης υψηλής πίεσης, ο ρότορας περιστρέφεται και εκτοπίζει το θαλασσινό νερό υπό υψηλή πίεση και απορρίπτει την άλμη σε χαμηλότερη πίεση. Το θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης διοχετεύεται σε μια βοηθητική αντλία, η οποία το μεταφέρει στην εγκατάσταση.

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ανάκτηση ενέργειας, και επίσης μειώνεται η απαιτούμενη δυναμικότητα της αντλίας υψηλής πίεσης. Τα μειονεκτήματα που έχουν αυτές οι διατάξεις είναι το υψηλό αρχικό κόστος και η αύξηση κατά 1 – 2% της αλμυρότητας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, λόγω ανάμειξής του με το ρεύμα της άλμης.[3]

2.2.6 Τελική κατεργασία του αφαλατωμένου νερού

Η ποιότητα του αφαλατωμένου νερού που εξέρχεται από τις μεμβράνες εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του νερού τροφοδότησης και την διάταξη της μονάδας. Οι μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού μονού σταδίου επεξεργασίας (single stage seawater desalination units) επιτυγχάνουν τη μείωση των αλάτων υπό την έννοια των ολικών διαλυμένων στερεών (total dissolved solids – TDS) στα όρια των 500 ppm, αλλά και τη μείωση της συγκέντρωσης βορίου στο 1 ppm.

Η τιμή αυτή της συγκέντρωσης βορίου στο διάλυμα είναι αποδεκτή σύμφωνα με τις οδηγίες της Ε.Ε. για την ποιότητα του νερού. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας δίνει ως όριο το 0,5 ppm, ειδικά για περιπτώσεις χρήσης του νερού σε καλλιέργειες ευαίσθητων φυτών σε βόριο. Συνεπώς, αν και γενικά η ποιότητα του εξερχόμενου αφαλατωμένου νερού ως προς βόριο είναι αποδεκτή, μπορεί να πραγματοποιηθεί περεταίρω μείωση του βορίου μέσω:

- Αύξησης των σταδίων επεξεργασίας του θαλασσινού νερού
- Επεξεργασίας του αφαλατωμένου νερού από:
 - Μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης
 - Ρητίνες ιοντοεναλλαγής

Πέρα από βόριο, το αφαλατωμένο νερό παρουσιάζει συνήθως ακόμα ένα πρόβλημα: την έλλειψη μεταλλικών στοιχείων (Ca, Mg). Στην περίπτωση αυτή το αποτέλεσμα είναι αποδεκτό για χρήση από τους ανθρώπους και τα ζώα, όμως δημιουργούνται δευτερεύοντα προβλήματα, όπως η διάβρωση των σωληνώσεων μεταφοράς του αφαλατωμένου νερού εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο.

Κρίνεται συνεπώς αναγκαία η χημική σταθεροποίηση του αφαλατωμένου νερού με άλατα ασβεστίου, ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο του 'κόκκινου νερού', όπου εμφανίζονται προϊόντα διάβρωσης των σωληνώσεων στο νερό και το χρωματίζουν. Σε ορισμένες περιπτώσεις πραγματοποιείται και εμπλουτισμός του νερού με μαγνήσιο, κυρίως για γεωργική χρήση σε ειδικές καλλιέργειες. [3]

2.2.7 Απόρριψη του υπολείμματος (άλμης)

Το τελικό στάδιο της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση αποτελεί η απόρριψη του υπολείμματος, δηλαδή της άλμης. Το στάδιο αυτό, αν και εκ πρώτης όψεως φαίνεται απλό, παρουσιάζει δύο σημαντικά προβλήματα που έχουν να κάνουν με το χώρο απόρριψης:

- Την πολύ υψηλή συγκέντρωση σε άλατα, και κατ' επέκταση οσμωτική πίεση της άλμης.
- Την παρουσία στο ρεύμα απόρριψης χημικών που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα στάδια για τον καθαρισμό του νερού και των μεμβρανών.

Η συγκέντρωση της άλμης σε άλατα μπορεί να είναι από 50 – 100% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του θαλασσινού νερού τροφοδότησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή οσμωτική πίεση του διαλύματος (περίπου 50 bar), τιμή πολύ μεγαλύτερη αυτής του θαλασσινού νερού. Συνεπώς, η απόρριψη ενός τέτοιου ρεύματος κατευθείαν στη θάλασσα μπορεί να βλάψει τα τοπικά οικοσυστήματα, διότι τα είδη που τα αποτελούν είναι προσαρμοσμένα στις συνήθεις συνθήκες οσμωτικής πίεσης.

Το πρόβλημα αυτό λύνεται κυρίως μέσω:

 Αραίωσης της άλμης με θαλασσινό νερό και απόρριψη του μίγματος αυτού, στην περίπτωση ύπαρξης απορριπτόμενου ρεύματος θαλασσινού νερού από άλλη διεργασία (πχ. εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας δίπλα σε μονάδα αφαλάτωσης). Έτσι, το τελικό απορριπτόμενο μίγμα έχει συγκέντρωση σε

άλατα μεγαλύτερη κατά 10 – 15% σε σχέση με το θαλασσινό νερό, που είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια.

Απευθείας εκτόξευσης του υπολείμματος στην επιφάνεια της θάλασσας με χρήση κατάλληλης διάταξης. Όταν δεν είναι δυνατή η αραίωση της άλμης, τότε μια λύση είναι η απ' ευθείας απόρριψή της στη θάλασσα. Όμως, η απόρριψη αυτή δεν πρέπει να γίνεται στον πυθμένα, καθώς η κίνηση των υδάτων εκεί είναι πολύ αργή και δεν γίνεται σωστή ανάμειξη, με αποτέλεσμα την δημιουργία περιοχών με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η επιφανειακή απόρριψη της άλμης μέσω εκτόξευσης, όπου επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμειξη και ομογενοποίηση.[3]



Εικόνα 2.20: Συσκευή επιφανειακής απόρριψης άλμης

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., Advanced membrane technology and applications, p. 81, Wiley, 2008

Διοχέτευσης της άλμης σε αλυκές (salt evaporation ponds), με σκοπό την ανάκτηση των αλάτων μέσω εξάτμισης του νερού, είτε σε ηλιακές λίμνες (solar ponds), με σκοπό την παραγωγή ενέργειας.

Η παρουσία στο ρεύμα απόρριψης, χημικών που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα στάδια για τον καθαρισμό του νερού και των μεμβρανών, αποτελεί το δεύτερο σημαντικό παράγοντα που πρέπει να αντιμετωπιστεί για την ασφαλή απόρριψη της άλμης στη θάλασσα. Τα χημικά που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας και με χαμηλό περιεχόμενο σε φώσφορο. Επίσης, πρέπει τα χρησιμοποιημένα χημικά καθαρισμού των μεμβρανών να αδρανοποιούνται πριν απορριφθούν, ώστε να ελαχιστοποιείται η επιβάρυνση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.[3]

3 Μοντέλα μεταφοράς μεμβρανών στην αντίστροφη όσμωση

Αν και η ροή και τα φαινόμενα μεταφοράς στο διάλυμα που ανακυκλοφορεί στο χώρο μεταξύ των μεμβρανών αφαλάτωσης είναι σημαντικά, αυτά δεν καθορίζουν την απόδοση της διεργασίας. Αυτή καθορίζεται από τη μεταφορά νερού και αλάτων διαμέσου των μεμβρανών. Συνεπώς, καθίσταται απαραίτητο να χαρακτηριστεί και να περιγραφεί μαθηματικά η μεταφορά μέσω μεμβρανών, ώστε να αναπτυχθούν μοντέλα προσομοίωσης της διεργασίας αφαλάτωσης.[4]

3.1 Κατηγορίες μοντέλων μεταφοράς αντίστροφης όσμωσης

Εκτενείς αναλύσεις που περιγράφουν τα μοντέλα μεταφοράς μεμβρανών μπορούν να βρεθούν στα βιβλία των Soltanien, Gill, Mason και Lonsdale. Τα μοντέλα μεμβρανών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία βασίζεται στην μη αναστρέψιμη θερμοδυναμική και η μεμβράνη εξετάζεται μακροσκοπικά θεωρώντας ότι παρατηρούνται αργά μεταβαλλόμενα φαινόμενα κοντά στο σημείο ισορροπίας της μεμβράνης και ότι δεν χρησιμοποιούνται μοριακοί μηχανισμοί μεταφοράς. Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη όταν υπάρχουν διαφορετικές παροχές με διαφορετικά σωματίδια μεταφοράς καθώς επίσης και όταν οι δομικές ιδιότητες της μεμβράνης είναι άγνωστες. Στην δεύτερη κατηγορία μοντέλων υποθέτονται διάφορετικοί μηχανισμοί μεταφοράς και ανάλογα οι ροές συσχετίζονται με τις κινητήριες δυνάμεις του συστήματος, ενώ γίνεται χρήση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων της μεμβράνης και του διαλύματος. Μέρικα παράδειγμα αυτών ιδιοτήτων είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης (όπως το μέγεθος και η πυκνότητα των πόρων) και οι φυσικές ιδιότητες όπως η διαλυτότητα, και η διαχυτότητα της διαλυμένης ουσίας και του διαλύτη. Εάν έχουμε διαθέσιμες όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την περιγραφή μπορεί να υπολογιστεί η απόδοση του συστήματος χωρίς να έχουμε πειραματικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης εγκατάστασης.[4]

3.1.1 Μοντέλο Kedem και Katchalsky.

Οι Kedem και Katchalsky ανέπτυξαν το πρώτο μοντέλο μεταφοράς για μη ηλεκτρικά φορτισμένη μεμβράνη αντίστροφης όσμωσης βασισμένη στις αρχές της μη αντιστρέψιμής θερμοδυναμικής. Μελέτησαν την ολική ογκομετρική παροχή διαπέρασης και την παροχή διάχυσης της διαλυμένης ουσίας σαν δύο ανεξάρτητες ροές και την οσμωτική διαφορά πίεσης σαν την κινητήρια δύναμη που δρα κατά μήκος της μεμβράνης. Παρατήρησαν ότι οι παροχές διαπέρασης έχουν γραμμική συσχέτιση με τις κινητήριες δυνάμεις και τις φαινομενολογικές παραμέτρους όπως για παράδειγμα ο συντελεστής αναλογικότητας. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο η ολική ογκομετρική παροχή της διαλυμένης ουσίας J_s δίνονται από της σχέσεις:

$$J_{w} = L_{p} \cdot (\Delta P - \sigma \Delta \Pi_{m})$$

$$J_{s} = P_{s} \cdot \Delta \Pi + \langle C_{s} \rangle (1 - \sigma) \cdot J_{w}$$
(3.1)
(3.2)

Τα ΔP , $\Delta \Pi_m$ και < C_s > είναι η διαφορά πίεσης της μεμβράνης η διαφορά οσμωτικής πίεσης της διαλυμένης ουσίας και η μέση συγκέντρωση σε αλάτι αντίστοιχα. Οι τρείς φαινομενολογικές παράμετροι που εμφανίζονται στο μοντέλο είναι σ ο συντελεστής ανάκλασης P_s η διαπερατότητα της διαλυμένης ουσίας και L_p η υδραυλική διαπερατότητα.[4]

3.2.2 Μοντέλο Spiegler και Kedem.

Οι Spiegler και Kedem βελτίωσαν το παραπάνω μοντέλο εφαρμόζοντας τις γραμμικές σχέσεις μεταξύ των όρων και των δυνάμεων σε τοπικό επίπεδο και όχι σε όλη την μεμβράνη. Έτσι σύμφωνα με αυτό το μοντέλο σε μεγάλες ογκομετρικές παροχές με υψηλές συγκεντρώσεις η επίδραση του J_w στο J_s δεν δίνεται από την σχέση 3.2. Για αυτό το λόγο γίνεται χρήση του τοπικού συντελεστή διαπερατότητας ξ και τις ειδικής

υδραυλικής διαπερατότητας *l_p* και του τοπικού συντελεστή ανάκλασης σ έτσι δίνονται οι παρακάτω σχέσεις:[4]

$$J_{w} = l_{p} \cdot \left(\frac{dp}{dx} - \sigma \frac{d\pi}{dx}\right)$$

$$J_{s} = \xi \cdot \frac{dc_{s}}{dx} + (1 - \sigma) \cdot C_{s} \cdot J_{w}$$
(3.3)
(3.4)

Στους πάνω τύπους τα *p*, *C*_s και π είναι οι διαφορές των μεγεθών στις δύο πλευρές της μεμβράνης. Συγκρίνοντας τις εξισώσεις 3.3 και 3.4 με της 3.1 και 3.2 η σχέση μεταξύ τοπικών και ολικών συντελεστών δίνεται από:

$$L_p = \frac{l_p}{\Delta x}$$

και

$$P_s = \frac{\xi}{V \cdot R \cdot T \cdot \Delta x}$$

Οι ολική παροχή διαλυμένης ουσίας N_s συσχετίζεται με την ολική παροχή σύμφωνα με την σχέση:

$$J_s = J_w C_p \tag{3.5}$$

Εάν υποθέσουμε ότι ο τοπικός συντελεστής διαπερατότητας ξ και ο συντελεστής ανάκλασης σ είναι σταθεροί η εξίσωση 3.4 μπορεί να ολοκληρωθεί με οριακές συνθήκες:

$$x = 0$$
, $C_s = C_m$
 $x = \Delta x$, $C_s = C_p$

και μας δίνει λύση:

$$\frac{J_w(1-\sigma)\Delta x}{\xi} = \ln(\frac{C_p\sigma}{C_p - C_m(1-\sigma)})$$
(3.6)

Εισάγοντας το ποσοστό απόρριψης r που ορίζεται ως

$$r = 1 - \frac{C_p}{C_m} \tag{3.7}$$

Στην εξίσωση 3.6 και μετά από πράξεις καταλήγουμε σε μια εξίσωση που συσχετίζει το ποσοστό απόρριψης *r* με την παροχή *J*_w

$$r = \frac{\sigma(1-F)}{1-\sigma F} \tag{3.8}$$

Όπου:

$$F = e^{-\frac{1-\sigma}{P_s}J_w} \operatorname{\kappaat} \mathbf{P}_s = \frac{\xi}{\Delta x}$$
(3.9)

και αν ο συντελεστής ανάκλασης είναι κοντά στην μονάδα τότε η 3.8 απλοποιείται σε:

$$\frac{J_s}{J_w} = (\frac{1}{r} - 1)$$
(3.10)

4. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ

4.1 Γενική περιγραφή στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης

Τα στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης αποτελούνται από πολλές επίπεδες μεμβράνες, οι οποίες ανά δύο συγκολλούνται από τρείς πλευρές σχηματίζοντας ένα είδος φακέλου. Μεταξύ των μεμβρανών τοποθετείται ένα στήριγμα από πορώδες υλικό, το οποίο συγκρατεί τις μεμβράνες ξεχωριστά εμποδίζοντάς τες να ενωθούν εξαιτίας της επικρατούσας πίεσης. Οι δύο άκρες των μεμβρανών του ανοικτού τμήματος προσκολλώνται σε ένα σωλήνα με οπές, από όπου απομακρύνεται το αφαλατωμένο νερό. Συνήθως τοποθετούνται ως και 26 φάκελοι μεμβρανών στον κεντρικό σωλήνα. Οι φάκελοι χωρίζονται μεταξύ τους από πλαστικό πλέγμα, το οποίο ονομάζεται 'διαχωριστικό πλέγμα τροφοδοσίας'. Το σύστημα φακέλων χωρισμάτων τυλίγεται γύρω από τον κεντρικό σωλήνα τροφοδοσίας, μέσα στο κυλινδρικό δοχείο πίεσης, σχηματίζοντας έτσι την σπειροειδή περιέλιξη. Η ροή του νερού τροφοδοσίας είναι αξονική και παράλληλη με το απορριπτόμενο υγρό (άλμη), ενώ το αφαλατωμένο νερό ρέει ακτινικά ως προς το δοχείο πίεσης και κατά μήκος των μεμβρανών. Κάθε δοχείο πίεσης περιέχει συνήθως 4-6 στοιχεία μεμβρανών, έχει μήκος περίπου 1m (40 inches) και διάμετρο περίπου 10 cm (4 inches).

Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στις σύγχρονες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, καθώς το χαμηλό τους κόστος σε συνδυασμό με τη ευκολία στον καθαρισμό που παρέχουν, τα καθιστούν πολύ ελκυστικά.[3]

4.2 Μη μεμβρανοειδή στοιχεία

Τα στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης αποτελούνται από 4 σημαντικά μη μεμβρανοειδή στοιχεία

- Το διαχωριστικό πλέγμα τροφοδοσίας άλμης
- Το διαχωριστικό πλέγμα παροχής διαπέρασης
- Τον σωλήνα διαπέρασης
- Και το καπάκι [5]



Εικόνα 4.2: Περιγραφή Στοιχείου Σπειροειδούς περιέλιξης.

Πηγή: Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, p.152, Wiley, 2004

4.2.1 Ο Ρόλος του διαχωριστικού πλέγματος τροφοδοσίας άλμης

Το διαχωριστικό πλέγμα τροφοδοσίας έχει δύο ρόλους: να διατηρεί ανοιχτό το κανάλι του ρεύματος τροφοδοσίας εμποδίζοντας τα φύλλα τις μεμβράνης να ενωθούν, καθώς επίσης βοηθάει στο να ανακατεύει το ρεύμα τροφοδοσίας με αποτέλεσμα να μην συσσωρεύονται άλατα και άλλες ουσίες στην επιφάνεια της μεμβράνης.[5]

4.2.2 Το διαχωριστικό πλέγμα ρεύματος διαπέρασης

Σκοπός του διαχωριστικού πλέγματος διαπέρασης είναι να κρατάει ανοιχτό το κανάλι διαπέρασης και να εμποδίζει τα φύλλα της μεμβράνης να ενωθούν.Συνήθως κατασκευάζεται από πολυεστερικές ίνες, έτσι ώστε το ρεύμα διαπέρασης να έχει ποιοτικά υδραυλικά χαρακτηριστικά.[5]

4.2.3 Σωλήνας διαπέρασης

Ο σωλήνας διαπέρασης συλλέγει το ρεύμα διαπέρασης και συνδέεται σε σειρά με άλλους σωλήνες διαπέρασης άλλων στοιχείων. Επίσης σε αυτόν συνδέονται και διαγνωστικές συσκευές για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών του ρεύματος διαπέρασης καθώς και για τον εντοπισμό διαρροών ή ελαττωμάτων του στοιχείου.[5]

4.2.4 Καπάκι

Το καπάκι των στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης είναι πολύ σημαντικό για την λειτουργία του στοιχείου και εκτελεί πολλές λειτουργίες. Μερικές από αυτές είναι:

- Να εμποδίζει την αξονική κίνηση των φύλλων της μεμβράνης
- Να μεταφέρει αξονικές δυνάμεις από στοιχείο σε στοιχείο καθώς και στο περίβλημα

 Και να εμποδίζει τις διαρροές στο στοιχείο σφραγίζοντας το στοιχείο περιέλιξης από το δοχείο πίεσης[5]

4.3 Πραγματικά μεγέθη στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης

Λόγω της κατασκευής και της φύσης των στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης τα πραγματικά μεγέθη της πίεσης, της συγκέντρωσης και της ροής που επικρατούν στην επιφάνεια της μεμβράνης είναι διαφορετικά από τα ονομαστικά μεγέθη τροφοδοσίας. Έτσι, πρέπει να βρεθούν οι σχέσεις που μπορούν να υπολογίσουν τα μεγέθη αυτά. [6]

4.3.1 Μεταβολή συγκέντρωσης

Λόγω της σταδιακής αφαλάτωσης κατά μήκος του στοιχείου δεν έχουμε σταθερή συγκέντρωση. Για αυτό το λόγο πρέπει να υπολογιστεί μια μέση συγκέντρωση στο ρεύμα τροφοδοσίας, Ένας τύπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης στο ρεύμα παροχής συναρτήσει του ποσοστού ανάκτησης μπορεί να δοθεί από την σχέση

$$C_{fci} = C_{fi} \cdot \frac{\ln(\frac{1}{1-Y})}{Y}$$
(4.1)

Όπου C_{fci} η μέση συγκέντρωση στο ρεύμα κατά μήκος του στοιχείου Και C_{fi} η συγκέντρωση στο ρεύμα τροφοδοσίας και Υ το ποσοστό ανάκτησης.[6]

4.3.2 Μεταβολή της παροχής κατά μήκος του στοιχείου

Λόγω της σταδιακής απορρόφησης παροχής από το στοιχείο, η ροή δεν είναι σταθερή σε όλο το μήκος του στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης, γι' αυτό επιβάλλεται να βρεθεί μια σχέση που να συνδέει την μέση ροή του στοιχείου με μετρίσιμα μεγέθη, όπως η παροχή τροφοδοσίας και η παροχή διαπέρασης. Μία απλή σχέση που μπορεί να μας δώσει μια μέση παροχή είναι η προφανής

$$q_{fc} = F - \frac{Q}{2} \tag{4.2}$$

Όπου *q*_{fc} η μέση ροή κατά μήκος του στοιχείου και F η παροχή τροφοδοσίας Q η παροχή διαπέρασης.[6]

4.3.3 Πτώση πίεσης

Λόγω των περιελίξεων του διαχωριστικού πλέγματος και της σταδιακής απορρόφησης παροχής από την μεμβράνη παρατηρείται μια πτώση πίεσης ΔΡ. Μια σχέση από την οποία προκύπτει αυτή η απώλεια συναρτήσει της μέσης ροής είναι

$$\Delta P_{fc} = 0.01 \cdot q_{fc}^{1.7}$$
(4.3)

Όπου ΔP_{fc} η πτώση πίεσης σε psi και Q_{fc} η μέση ροή κατά μήκος του στοιχείου σε gallons per minute[6]

4.3.4 Αύξηση συγκέντρωσης λόγω πόλωσης

Λόγω της επιλεκτικής απόρριψης των μεμβρανών Α.Ο. παρατηρείται το φαινόμενο η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας να είναι υψηλότερη κοντά στην μεμβράνη σε σχέση με την γενική παροχή. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η αύξηση συγκέντρωσης λόγω πόλωσης. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου δεν μπορεί να γίνει απευθείας χρήση των προηγούμενων τύπων διότι εμπεριέχουν την συγκέντρωση κοντά στην μεμβράνη *C_m*. Επειδή είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί πειραματικά η αύξηση συγκέντρωσης λόγω πόλωσης, γίνεται επιτακτική ανάγκη να εκφραστεί η αύξηση συγκέντρωσης λόγω πόλωσης, συγκέντρωσης της μεμβράνης σε σχέση με τις μετρήσιμες ποσότητες, όπως η συγκέντρωση στο ρεύμα τροφοδοσίας και στο ρεύμα διαπέρασης.



Εικονα 4.2. Μεταβολή της συγκέντρωσης καθώς πλησιάζουμε την μεμβράνη. Πηγή: Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, p.102, Wiley, 2004

Ένας τύπος που μπορεί να μας δώσει έναν συντελεστή για την αύξηση της συγκέντρωσης πάνω στην μεμβράνη του στοιχείου για τα διαμέτρου 8-inch στοιχεία της εταιρίας Filmtec συναρτήσει του ποσοστού ανάκτησης είναι[4]

$$pfi = e^{0.7 \cdot Y} \tag{4.4}$$

Όπού *p*_{fi} ο συντελεστής πόλωσης και Υ το ποσοστό ανάκτησης.

4.3.5 Υπολογισμός οσμωτικής πίεσης

Για τον υπολογισμό της οσμωτικής πίεσης εκτός από τον νόμο του van't Hoff $\pi = C \cdot R \cdot (273 + T)$ μπορεί να γίνει με αρκετά καλή ακρίβεια και χρήση του εμπειρικού τύπου

$$\pi = 1.12 \cdot (273 + \mathrm{T}) \cdot \sum m_j \tag{4.5}$$

όπου $\sum m_j$ το άθροισμα των μοριακών συγκεντρώσεων όλων των ουσιών που εμπεριέχονται στο διάλυμα και Τ η θερμοκρασία σε oC [6]

4.4 Συνδυασμός μοντέλου Spieger-Kedem-Katchalsky και εξισώσεων στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης.

Αφού τροποποιήθηκαν ανάλογα τα δεδομένα εισόδου σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στα πραγματικά μεγέθη που διέπουν την επιφάνεια της μεμβράνης τροποποιούνται ανάλογα και οι εξισώσεις του μοντέλου μη αντιστρέψιμης θερμοδυναμικής Spieger-Kedem-Katchalsky.

Έτσι οι βασικές σχέσεις

$$J_w = L_p(\Delta P - \sigma \cdot \Delta \pi)$$

και

$$J_s = P_s \cdot (C_m - C_p) + (1 - \sigma) \cdot J_w \cdot C_s$$

μετατρέπονται σε:

$$J_{w} = L_{p} \cdot (P_{fi} - \frac{\Delta P_{fc}}{2} - P_{pi} - \sigma \cdot (\pi - \pi_{pi}))$$
(4.6)

και

$$J_s = P_s \cdot (C_{fci} - C_{pi}) + (1 - \sigma) \cdot J_w \cdot C_s$$

$$(4.7)$$

Όπου *P_{pi}* η πίεση στο ρεύμα διαπέρασης και π η μέση οσμωτική πίεση στην επιφάνεια της μεμβράνης του στοιχείου. [4].

5 ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ

Στην συγκεκριμένη μελέτη διαλέξαμε τρία στοιχεία μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης που χρησιμοποιούνται σε μονάδες αφαλάτωσης την SW30XHR-440i, την SW30ULE-440i και την SW30XLE-440i.

5.1. SW30XHR-440i

Η SW30XHR-440i χρησιμοποιείται σε συστήματα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης και έχει τα υψηλότερα ποσοστά απόρριψης από όλα τα στοιχεία της DOW Filmtec. Έτσι, ανταποκρίνεται στις υψηλότερες απαιτήσεις ποιότητας νερού. Επίσης, το πολύ πυκνό διαχωριστικό της πλέγμα που διαθέτει της δίνει σχετικά χαμηλό κόστος καθαρισμού καθώς και μεγάλο προσδόκιμο ζωής.[7]



Πίνακας 5.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά SW30XHR-440i

 $\Pi_{\Pi\gamma\dot{\eta}}$: DOW TILMTEC Membranes DOW FILMTEC SW30XHR-440*i* Seawater Reverse Osmosis Element with *i*LEC Interlocking Endcaps

5.2 SW30XLE-440i

Η SW30XLE-440i αποτελεί επιλογή για συστήματα αφαλάτωσης με παροχές μεσαίας αλμυρότητας και θερμοκρασίας, οι οποίες δεν απαιτούν πολύ υψηλά ποσοστά απόρριψης, αλλά μεγάλα ποσοστά ανάκτησης και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επίσης η SW30XLE-440i διαθέτει (και αυτή) πολύ πυκνό διαχωριστικό πλέγμα σαν την SW30XHR που της προσφέρει χαμηλό κόστος καθαρισμού και σχετικά μεγάλο προσδόκιμο ζωής.[8]



Πίνακας 5.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά SW30XLE-440i

 $\Pi_{\eta\gamma\dot{\eta}}$: DOWTM FILMTECTM Membranes DOWTM FILMTECTM **SW30XLE-440***i* Seawater Reverse Osmosis Element with *i*LECTM Interlocking Endcaps

5.3 SW30ULE-440i

Η SW30ULE-440i έχει την μεγαλύτερη υδραυλική διαπερατότητα στην κατηγορία των στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης αντίστροφης όσμωσης και έχει ποσοστά απόρριψης που πλησιάζουν στο 99,55%. Έτσι, προορίζεται για χρήση σε συστήματα που απαιτούν μεγάλα ποσοστά ανάκτησης ή σαν προστάδιο για συστήματα με υψηλές απαιτήσεις ποιότητας νερού.[9]



Πίνακας 5.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά SW30ULE-440i

 $\Pi_{\Pi\gamma\dot{\eta}}$: DOWTM FILMTECTM Membranes DOWTM FILMTECTM **SW30ULE-440***i* Seawater Reverse Osmosis Element with *iLEC*TM Interlocking Endcaps

6. Λογισμικό R.O.S.A.

6.1 Γενική περιγραφή λογισμικού R.O.S.A.

Για την εύρεση αποτελεσμάτων για την λειτουργία των μεμβρανών έγινε χρήση του εταιρικού προγράμματος R.O.S.A. 9.1 της εταιρίας D.O.W και το οποίο χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό συστημάτων αντίστροφης όσμωσης με στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης που διαθέτει εμπορικά η ίδια.

Το R.O.S.A. είναι ένα σύγχρονο εργαλείο σχεδιασμού συστημάτων αντίστροφης όσμωσης που παρέχει στον σχεδιαστή μηχανικό, πολλές δυνατότητες να σχεδιάσει τα στάδια επεξεργασίας, αλλά και να παραμετροποιήσει μεταβλητές εισόδου και εξόδου.

Η χρήση του προγράμματος είναι σχετικά απλή και αποτελείται από 4 στάδια:

- To Project information(πληροφορίες μελέτης)
- Το Feedwater data (ανάλυση παροχής νερού)
- To Scaling information (Πληροφορίες επικαθίσεων)
- To system configuration (σχεδιασμός συστήματος)
- Και το Report(εξαγωγή αποτελεσμάτων)

6.2 Project information

Το Project information αποτελεί την αρχική καρτέλα του προγράμματος, όπου γίνονται οι βασικές ρυθμίσεις του, όπως η επιλογή των βασικών μονάδων πού θα χρησιμοποιηθούν για την πίεση, την παροχή, την θερμοκρασία αλλά και η επιλογή της βασικής ουσίας που θα γίνουν οι περεταίρω συσχετισμοί.

ROS	A Contro	ol Panel -	- metavoli piesis sw30x	hr-440i					
le	Options	Help	Custom Demoste Flour	0.00 344	Sustan Food Flour	250.00 214	Custon Deservery	0.07%	
			System Ferneate Flow.	0.68 m/d	System Feeu Flow.	200.00 m/d	System necovery.	0.27%	Case
	- Project I	nformation							- Case
	Notes	:			Project Name:	metavoli piesi:	s sw30xhr-440i		-
									-
								~	-
	- Project 0	Cases							
	Notes	for Current (Case: 1 🔽	Add Case	Delete Case	tanage Pre-	stage ΔP: 0.000	bar	
	27								
	- Project P	Preferences							
	Analus	sis Bur			Small 0	Commercial Syste	em		
	Circles	No by.				i i			
	Comp	any Name:							
	Balan	ce Analysis	With: NaCl	*					
	Units !	Set	Flow: m3/d, Pressu	re: bar 🔽		JOW			
	Temp	erature Unit	Celsius (*C)	*		Water &	Process Solution	ons	
	Defau	lt Project Fo	older: C:\Program Files\D(w Chemical\R	OSA9\MyProjects				
				1.6	0.0 0 0 0				
1.11	Project Info	ormation 2	2] Feedwater Data 3] Scalin	g Information	4) System Configuration	5 Report 6	Uost Analysis		
		Sunday	, February 23, 2014		Opened project 'metavo	oli piesis sw30xh	ır-440i'		

Εικόνα 6.1: Καρτέλα Project information του λογισμικού R.O.S.A

6.3 Feedwater data

Το feedwater data αποτελεί το βήμα στο οποίο γίνεται ο πλήρης καθορισμός της σύστασης του ρεύματος παροχής. Ο καθορισμός αυτός περιλαμβάνει τον τύπο του νερού δηλαδή το βαθμό που είναι ρυπαντικό για την μεμβράνη μετρούμενο σε S.D.I. (Silt Density Index), την περιεκτικότητα των διαφόρων ιόντων στο ρεύμα παροχής, την θερμοκρασία, και το pH.

le <u>O</u> p	ptions <u>H</u> elp Suste	m Permeate F	low: 0.68 m ³ /	d Sus	tem Feed Flowr 250	00 m³/d Sustem Becoveru: 0.27%		
W Fe	Vater Type: Wastewater with	n DOW Ultrafi (%) Feed	Itration, SDI < 2	2.5 Fee	ed Streams: 1	Open Water Profile Library		
	lons Ammonium (NH4, + NH2)	mg/l	ppm CaCO3	meq/l	Total Conc.(mg/l)	Specify Individual Solutes	-	
	Potassium (K)	0	0.000	0.000	0.00	Total Dissolved Solids: 35000.0 mg/l		
	Sodium (Na)	13768.12	29943.710	598.874	13768.12	Feed Parameters		
	Magnesium (Mg) Caloium (Ca)	0	0.000	0.000	0.00	Temperature: 25.0 °C		
	Strontium (Sr)	0	0.000	0.000	0.00	Flow Rate: 250.0 m³/d		
	Barium (Ba)	0	0.000	0.000	0.00	pH: 7.0		
	Carbonate (CO3)	0	0.000	0.000	0.00			
	Nitrate (NO3)	0	0.000	0.000	0.00	Charge Balance		
	Chloride (Cl)	21231.89	29943.710	598.874	21231.89	Cations: 0.00		
	Fluoride (F)	0	0.000	0.000	0.00	Add Calcium		
	Silica (SO4)	0	0.000 n.a.	0.000 n.a.	0.00	Adjust Cations		
-	Boron (B)	0	n.a.	n.a.	n.a.	Adjust Anions		
System Temp: 25.0 °C System pH: 7.00 Save Water Profile to Library Adjust All Ions								
1) Proi	iect Information 2) Feedware	er Data 31 S	caling Informat	ion 41 Syste	em Configuration 51	Report 6) Cost Analysis		

Εικόνα 6.2: Καρτέλα Feedwater του λογισμικού R.O.S.A

6.4 Scaling information

Το scaling information είναι το στάδιο στο οποίο μπορούμε να κάνουμε διόρθωση pH με την προσθήκη χημικών, καθώς και αποσκλήρυνση με την προσθήκη ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου, έτσι ώστε να μειώσουμε την διάβρωση τις μεμβράνης και την δημιουργία επικαθίσεων.

2	Options	<u>H</u> elp				
		S	ystem Permeate Fl	ow: 0.68 m³/d	System Feed Flow:	250.00 m³/d System Recovery: 0.27%
	Scaling (Calculations Option	ns			lon-exchange Leakage
		o obemicale adder	a			
	0 11	o chemicais added	1			Ca Leakage: 0.1 (mg/L)
	0.0	ser-adjusted pH				Mg Leakage: 0 (mg/L)
	0 101	n-exchange soften	ning			
Г			Feed	Adi Feed	Concentrate	Recovery and Temperature
	, pH		7.0	7.0	7.07	Becovery: IEIDE (%)
F	LSI		-14.312	-14.312	-14.104	
F	Stiff &	Davis Index	-15.248	-15.248	-15.094	Temperature: 25.0 °C
	TDS (r	ng/l)	35,000	35,000	41,176	 Use original feed
	lonic S	trength (molal)	0.621	0.621	0.735	O Use adjusted feed
	HC03	(mg/l)	0.002	0.002	0.003	
	CO2 (n	ng/l)	0.000	0.000	0.000	
	CO3 (m	ng/l)	0.000	0.000	0.000	
	CaSO4	l (% Saturation)	0.0	0.0	0.0	User-adjusted pH
	BaSO4	f (% Saturation)	0.0	0.0	0.0	Dosing Chemical: H2SO4 🗸
	SrSO4	(% Saturation)	0.0	0.0	0.0	
	CaF2 (% Saturation)	0.0	0.0	0.0	pH: 7.0 GO
	5102 (2	& Saturation)	0.0	0.0	0.0	Concentrate S&DSI: -15.094 G0
	мдин	1j2 (% Saturation)	0.0	0.0	0.0	
						1

Εικόνα 6.3: Καρτέλα Scaling του λογισμικού R.O.S.A

6.5 System configuration

Στην καρτέλα του system configuration γίνεται ο σχεδιασμός όλου του συστήματος επεξεργασίας. Εδώ, μπορούμε να καθορίσουμε την παροχή, την πίεση, τα στάδια της επεξεργασίας, τον τύπο των στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και το πώς θα τοποθετηθούν (παράλληλα ή σε σειρά), τον βαθμό επίπτωσης της ρύπανσης, τα επιθυμητά ποσοστά απόρριψης, τις επιθυμητές ροές διαπέρασης καθώς και τον βαθμό απόδοσης της αντλίας.

🗄 RO	SA Control Panel - metavoli piesis sw30xhr-440i	
Eile	Options Help	
_	System Permeate Flow: 0.68 m³/d System Feed Flow: 250.00 m³/d System Recovery: 0.27%	
	No. Passes Current Pass Dosing Chemical: None None None I I I I I I I I Interview None None Configuration for Pass 1 Interview None Interview None None	L'ase:
	Stages in Pass: 1 Permeate flow to be calculated. None m²/d Flow Factor: 1.00 Pass recovery to be calculated. Blend Permeate None m²/d Operating Temp: 25.0 *C Feed Flow: 250.00 m²/d Pass 2 Conc to Pass 1 Feed None m²/d	-
	Configuration for Stage 1 in Pass 1 Stage in Pass: Stage 1 V Feed Pressure: 27.00 bar Pump Efficiency Boost (2-pass): Calc V Back Pressure: None bar Concentrate	
	✓ Same back pressure for all stages Pressure vessels in each stage: 1 Elements in each vessel: 1 Total elements in stage: 1 Products: SW30XHR-440i ✓ Use the same element in the pass	
[1]	Project Information 2) Feedwater Data 3) Scaling Information 4) System Configuration 5) Report 6) Cost Analysis	
	Sunday, February 23, 2014 Opened project 'metavoli piesis sw30xhr-440i'	

Εικόνα 6.4: Καρτέλα System Configuration του λογισμικού R.O.S.A

6.6 Report

Το Report αποτελεί το τελευταίο στάδιο, στο οποίο δίνεται η αναφορά για τα αποτελέσματα σχετικά με το ρεύμα διαπέρασης και συμπύκνωσης.



Εικόνα 6.5: Καρτέλα Report του λογισμικού R.O.S.A

7. Συνθήκες μελέτης στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης

Στην συγκεκριμένη μελέτη εξετάσαμε τα στοιχεία μεμβρανών σε σχέση με τον τρόπο που ανταποκρίνονται στην μεταβολή της πίεσης, της συγκέντρωσης και της παροχής με την βοήθεια του λογισμικού R.O.S.A.

7.1 Συνθήκες μεταβολής πίεσης

Οι συνθήκες που εξετάσαμε για το πώς μεταβάλλεται το ρεύμα διαπέρασης συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης είναι οι εξής:

- Εύρος πίεσης 37-75 bar με βήμα 2 bar
- Παροχή τροφοδοσίας 250 m3/d
- Συγκέντρωση NaCl 35000 mg/l TDS
- Θερμοκρασία 25 C
- Συντελεστής ρύπανσης 1
- Ποιότητα νερού SDI<2

7.2 Συνθήκες μεταβολής συγκέντρωσης

Οι συνθήκες εξέτασης για το πώς μεταβάλλεται το ρεύμα διαπέρασης σε σχέση με την μεταβολή της συγκέντρωση NaCl στο ρεύμα τροφοδοσίας είναι:

- Εύρος συγκέντρωσης 25000-45000 mg/l με βήμα 1000 mg
- Παροχή τροφοδοσίας 250 m^3/d
- pH 7
- Θερμοκρασία 25 C
- Συντελεστής ρύπανσης 1
- Πίεση 55 bar
- Ποιότητα νερού SDI<2

7.3 Συνθήκες μεταβολής συγκέντρωσης

Οι συνθήκες εξέτασης για το πώς μεταβάλλεται το ρεύμα διαπέρασης σε σχέση με την μεταβολή της παροχή τροφοδοσίας είναι

- Παροχή τροφοδοσίας 100-300 m^3/d με βήμα 10 m^3/d
- Συγκέντρωση 35000 mg/l Nacl
- Πίεση 55 bar
- pH 7
- Θερμοκρασία 25 C
- Συντελεστής ρύπανσης 1
- Ποιότητα νερού SDI<2

7.4 Αποτελέσματα R.O.S.A.

Αφού καθορίστηκαν οι συνθήκες μελέτης, έγινε η εισαγωγή των δεδομένων τροφοδοσίας στο λογισμικό R.O.S.A. και προέκυψαν τα αποτελέσματα για το ρεύμα διαπέρασης του κάθε στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης.

Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων για τις παροχές διαπέρασης και για τα ποσοστά απόρριψης σε κάθε μεταβολή.









Διάγραμμα 7.2: Παροχή διαπέρασης συναρτήσει πίεσης.

Στα διαγράμματα 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το πώς ανταποκρίνονται τα στοιχεία τις μελέτης σε σχέση με την πίεση τροφοδοσίας. Παρατηρούμε ότι και τα τρία στοιχεία παρουσιάζουν τον ίδιο τρόπο μεταβολής σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης, δηλαδή μια γρήγορη αύξηση του ποσοστού τους μέχρι τα 55 bar και έπειτα σταθεροποίηση του, ειδικά για τις SW30XHR-440i και SW30XLE-440i, ενώ για την SW30ULE το ποσοστό απόρριψης αυξάνει απλά με μικρότερο ρυθμό. Όσον αφορά τις παροχές διαπέρασης παρατηρείται μία σχετικά γραμμική σχέση μεταξύ πίεσης και παροχής διαπέρασης και για τα τρία στοιχεία

Διαγράμματα αποτελεσμάτων R.O.S.A. για μεταβολή Συγκέντρωσης



Διάγραμμα 7.3: Απόρριψη συναρτήσει συγκέντρωσης.



Διάγραμμα 7.4: Παροχή διαπέρασης συναρτήσει συγκέντρωσης.

Στα διαγράμματα 7.3 και 7.4 γίνεται παρουσίαση του ποσοστού απόρριψης και της παροχής διαπέρασης σε σχέση με την συγκέντρωση στο ρεύμα τροφοδοσίας. Όπως είναι αναμενόμενο, η αύξηση της συγκέντρωσης στο ρεύμα τροφοδοσίας έχει αρνητική επίπτωση στο ποσοστό απόρριψης αλλά και στην παροχή διαπέρασης. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι η μεγάλη πτώση του ποσοστού απόρριψης της SW3ULE-440i στις υψηλές συγκεντρώσεις. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από το γεγονός ότι λόγω της μεγάλης υδραυλικής διαπερατότητας του στοιχείου έχουμε μεγάλες συγκεντρώσεις κατά μήκος του στοιχείου που αυξάνουν την συγκέντρωση στο ρεύμα διαπέρασης.

Διαγράμματα αποτελεσμάτων R.O.S.A. για μεταβολή παροχής







Διάγραμμα 7.6: Παροχή διαπέρασης συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας.

Στα διαγράμματα 7.5 και 7.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαπέρασης σε σχέση με την παροχή τροφοδοσίας. Η αύξηση της παροχής έχει θετική επίδραση και στο ποσοστό απόρριψης, αλλά και στην παροχή διαπέρασης Ειδικά παρατηρούμε ότι η SW30XHR-440i επηρεάζεται σε πολύ μικρό βαθμό από την μεταβολή της παροχής, τόσο στην παροχή διαπέρασης όσο και στο ποσοστό απόρριψης. Αντίθετα η SW30ULE-440i επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την μεταβολή της παροχής τροφοδοσίας.

7.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων R.O.S.A.

Τα μεγαλύτερα ποσοστά απόρριψης, καθώς και οι μικρότερες παροχές διαπέρασης παρατηρήθηκαν στην SW30XHR-440i. Αντίθετα τα χαμηλότερα ποσοστά απόρριψης και οι μεγαλύτερες παροχές διαπέρασης παρατηρήθηκαν στην SW30ULE-440i. Η SW30XLE-440i έδωσε ενδιάμεσες απορρίψεις και παροχές διαπέρασης.

Στην μεταβολή της πίεσης παρατηρούμε ότι και τα τρία στοιχεία έχουν σχετικά σταθεροποιημένο βαθμό απόρριψης για πιέσεις άνω των 60 bar ενώ η παροχή διαπέρασης ακολουθεί μια γραμμική αύξηση με την πίεση.

Η αύξηση της συγκέντρωσης στο ρεύμα τροφοδοσίας προκαλεί μια σχετικά γραμμική πτώση στην παροχή του ρεύματος διαπέρασης και για τα τρία στοιχεία, ενώ στον βαθμό απόρριψης παρατηρείται μεγάλη πτώση για συγκεντρώσεις άνω των 35000 mg/l και ειδικά για την SW30ULE-440.

Με την αύξηση της παροχής τροφοδοσίας παρατηρείται αύξηση της παροχής διαπέρασης και του ποσοστού απόρριψης γεγονός που είναι λογικό γιατί μειώνεται η συγκέντρωση αλάτων στην επιφάνεια της μεμβράνης.

8. Αναπτυξη κώδικα περιγραφής στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η περιγραφή των στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης σύμφωνα με το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky Όπως περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η περιγραφή της μεμβράνης καθορίζεται από τρεις φαινομενολογικές παραμέτρους: τον συντελεστή ανάκλασης σ , την υδραυλική διαπερατότητα L_p και την διαπερατότητα της διαλυμένης ουσίας P_s .

8.1 Θεωρητική επίλυση μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky

Το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky προτείνει μια σχέση μεταξύ της ροής της διαλυμένης ουσίας J_w και του λογαρίθμου των φαινομενολογικών παραμέτρων της μεμβράνης. Έτσι, κάνοντας χρήση της πραγματικής απόρριψης της μεμβράνης r και του συντελεστή ανάκλασης σ , η εξίσωση 3.9 τροποποιείται στην παρακάτω εξίσωση [10]

$$\ln(X) = -\frac{(1-\sigma)}{P_s} \cdot J_w$$
8.1

Και η παράμετρος Χ μπορεί να βρεθεί από την σχέση

$$X = \left(\frac{1}{(1-\sigma)} - \frac{1}{1-r}\right) \cdot \frac{(1-\sigma)}{\sigma}$$
8.2

Η εξίσωση 3.2 με οριακές συνθήκες

$$x = 0$$
, $C_s = C_m$
 $x = \Delta x$, $C_s = C_p$

Γίνεται

$$J_s = P_s \cdot (C_m - C_p) + (1 - \sigma) \cdot J_w \cdot C_s$$
8.3

Και λύνοντας ως προς Ps έχουμε

$$P_s = \frac{J_s - J_w \cdot C_s \cdot (1 - \sigma)}{C_m - C_p}$$
8.4

Και αντικαθιστώντας το *P_s* που δίνεται από σχέση 8.4 στην σχέση 8.1 μας δίνει την παρακάτω εξίσωση

$$\ln\left[\left(\frac{1}{(1-\sigma)}-z\right)\cdot\frac{1-\sigma}{\sigma}\right]+\frac{(1-\sigma)}{a-b\cdot(1-\sigma)}\cdot J_{w}=0$$
 8.5

Όπου

$$z = \frac{1}{1-r}$$
, $a = \frac{J_s}{(C_m - C_p)}$ Kal $b = \frac{J_w \cdot C_s}{(C_m - C_p)}$

Κάνοντας χρήση των εξισώσεων 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 και 4.6 των στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης μπορούν να υπολογιστούν τα μεγέθη της συγκέντρωσης και της πίεσης στην επιφάνεια της μεμβράνης του στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης.[10]

8.2 Ανάπτυξη κώδικα εύρεσης φαινομενολογικών παραμέτρων

Για να λυθεί η εξίσωση 8.5 και να μπορέσει να γίνει προσδιορισμός του συντελεστή ανάκλασης σ και εν συνεχεία εύρεση των φαινομενολογικών παραμέτρων υδραυλικής διαπερατότητας L_p και διαπερατότητας διαλυμένης ουσίας P_s γίνεται χρήση του λογισμικού MatLab και ανάπτυξη κώδικα (script εντολών).

Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται πλήρης παρουσίαση του κώδικα (script εντολών) εύρεσης των φαινομενολογικών συντελεστών.

8.2.1 Περιγραφή script εντολών εύρεσης των φαινομενολογικών παραμέτρων

Εδώ γίνεται η παρουσίαση του script εντολών για τον προσδιορισμό των φαινομενολογικών παραμέτρων για το κάθε σημείο που υπολογίστηκε με το λογισμικό R.O.S.A.

Script υπολογισμού φαινομενολογικών παραμέτρων

1 for i=1:21

2 Cfi(i)=data_mCfi_se_mg_per_liter(i) % Μετατροπή της συγκέντρωσης από mg/l σε ppm (σαν αριθμός είναι ο ίδιος).

3 F(i)=data_mF_se_m3_per_d(i)/0.00378541178 % Μετατροπή της παροχής απο m^3/d σε gallons/d.

4 Pfi(i)=data_mPfi_se_bar(i)*14.503773800721815 % Μετατροπή της πίεσης παροχής απο bar σε psi.

5 Ppi(i)=data_mPpi_se_bar(i)*14.503773800721815 % Μετατροπή της πίεσης του ρεύματος διαπέρασης απο bar se psi(για την συγκεκριμένη μελέτη 0).

6 Qi(i)=data_mQi_se_m3_per_d(i)/0.00378541178% Μετατροπή της ολικής παροχής του ρεύματος διαπέρασης από M^3/d σε g/d.

7 Se(i)=data_mSe_se_m2(i)/0.09290304 % Μετατροπή της επιφάνειας της μεμβράνης απο M^2 σε ft^2.

8 TCF(i)=data_TCF(i) % Συντελεστής θερμοκρασίας και για θερμοκρασία 25 C ίσος με μονάδα

9 Smj(i)=Cfi(i)*0.034223/1000 %Μετατροπή της συγκέντρωσης από ppm σε μοριακή συγκέντρωση ανά mol/mg.

10 Ri(i)=data_Ri_se_tis_ekato(i)/100 % Μετατροπή της απόρριψης από ποσοστό τις εκατό σε ποσοστό με βάση την μονάδα.

11 T(i)=data_T(i)

12 end

13 %από κάτω αρχίζουν οι υπολογισμοί.

14 for i=1:21

15 Yi(i)=Qi(i)/F(i)% Υπολογισμός ποσοστού ανάκτησης.

16 qfc(i)=0.5*(F(i)+F(i)*(1-Yi(i)))/(24*60)% Υπολογισμός της μέσης παροχής κατα πλάτος της μεμβράνης καθώς και μετατροπή της σε gallons per minute. 17 dPfci(i)=0.01*qfc(i)^1.7 %Υπολογισμός πτώσης υδραυλικής πίεσης κατα πλάτος της μεμβράνης σε psi.

18 Ofi(i)=1.12*(273+T(i))*Smj(i)% Υπολογισμός οσμωτικής πίεσης στο ρεύμα παροχής σε psi.

19 pfi(i)=exp(0.7*Yi(i)) %Υπολογισμός συντελεστή πόλωσης.

20 Cfci(i)=Cfi(i)*log(1/(1-Yi(i)))/Yi(i)%Υπολογισμός της μέσης συγκέντρωσης κατά πλάτος της μεμβράνης σε ppm.

21 Cci(i)=((2*Cfci(i)/Cfi(i))-1)*Cfi(i)%Υπολογισμός της συγκέντρωσης στο ρεύμα συμπικνώματος σε ppm.

22 Cpi(i)=Cfi(i)-(Ri(i)*Cfi(i))% Υπολογισμός συγκέντρωσης στο ρεύμα διαπέρασης σε ppm.

23 avO(i)=Ofi(i)*Cfci(i)*pfi(i)/Cfi(i)% Υπολογισμός μέσης οσμωτικής πίεσης στο ρεύμα κατα πλάτος της μεμβράνης σε ppm.

24 Opi(i)=Ofi(i)*(1-Ri(i))% Υπολογισμός Οσμωτικής πίεσης στο ρεύμα διαπέρασης σε ppm.

25% Μετατροπή των παραπάνω μεγεθών σε μετρικό σύστημα ώστε να μπορέσει να γίνει

26 %Υπολογισμός των φαινομενολογικών παραμέτρων.

27 mSe(i)=Se(i)*0.09290304% Μετατροπή της επιφάνειας της μεμβράνης απο ft^2 σε m^2.

28 mCfi(i)=Cfi(i)/1000% Μετατροπή της συγκέντρωσης στο ρεύμα παροχής απο ppm σε kg/m³.

29 mF(i)=(F(i)*0.00378541178)/(24*3600)% Μετατροπή της παροχής από gpd σε m^3/s.

30 mQi(i)=(Qi(i)*0.00378541178)/(24*3600)% Μετατροπή της παροχής διαπέρασης από gpd σε m^3/s.

31 mPfi(i)=Pfi(i)*6894.744825% Μετατροπή της πίεσης παροχής από psi σε N/m^2.

32 mqfc(i)=(qfc(i)/0.00378541178)/60% Μετατροπή της μέσης παροχής κατα πλάτος της μεμβράνης από gpm σε m^3/s.

33 mdPfc(i)=dPfci(i)*6894.744825% Μετατροπή της μέσης πίεσης κατα πλάτος της μεμβράνης από psi σε N/m^2.

34 mOfi(i)=Ofi(i)*6894.744825% Μετατροπή της οσμωτικής πίεσης της παροχής από psi σε N/m².

35 mCfci(i)=Cfci(i)/1000% Μετατροπή της συγκέντρωσης στο ρεύμα παροχής κατά πλάτος της μεμβράνης από ppm σε kg/m³.

36 mCci(i)=Cci(i)/1000% Μετατροπή της συγκέντρωσης του ρεύματος συμπύκνωσης από ppm σε kg/m^3.

37 mCpi(i)=Cpi(i)/1000% Μετατροπή της συγκέντρωσης στο ρεύμα διαπέρασης από ppp σε kg/m^3.
38 mavO(i)=avO(i)*6894.744825% Μετατροπή της μέσης οσμωτικής στο ρεύμα κατά πλάτος της μεμβρανης απο psi σε N/m^3.

39 mOpi(i)=Opi(i)*6894.744825% Μετατροπή της οσμωτικής πίεσης στο ρεύμα διαπέρασης απο psi σε N/m^3.

40 %Υπολογισμοί για το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky και υπολογισμός των

41%φαινομενολογικών συντελεστών.

42 mCfcip(i)=mCfci(i)*pfi(i)%Υπολογισμός της συγκέντρωσης πάνω στην μεμβράνη πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή πόλωσης.

43 Rtrue(i)=(mCfcip(i)-mCpi(i))/mCfcip(i)% Υπολογισμός του ποσοστού της πραγματικής απόρριψης.

44 z(i)=1/(1-Rtrue(i))% Υπολογισμός τής μεταβλητής z.

45 js(i)=(mCpi(i)*mQi(i))/mSe(i)% Υπολογισμός της ροής της διαλυμένης ουσίας σε kg/m^2.

46 a(i)=js(i)/(mCfcip(i)-mCpi(i))% Υπολογισμός της μεταβλητής a.

47 jw(i)=mQi(i)/mSe(i)% Υπολογισμός της ροής του νερού σε m/s.

48 mCs(i)=(mCfci(i)-mCpi(i))/(log(mCfci(i))-log(mCpi(i)))% Υπολογισμός του λογαριθμικού μέσου της συγκέντρωσης κατά μήκος της μεμβράνης

49 b(i)=(jw(i)*mCs(i))/(mCfcip(i)-mCpi(i))% Υπολογισμός της μεταβλητής b 50 test1=@(s) log((1/(1-s)-z(i))*(1-s)/s)+(1-s)/(a(i)-b(i)*(1-s))*jw(i)%

Κατασκευή της συνάρτησης για καθορισμό του συντελεστή ανάκλασης σ. 51 apot_s(i)=fsolve(test1,0.1)% Επίλυση συνάρτησης για τον καθορισμό του συντελεστή ανάκλασης σ.

52 Lp(i)=jw(i)/(mPfi(i)-0.5*mdPfc(i)-Ppi(i)-mavO(i)+mOpi(i))% Υπολογισμός της υδραυλικής διαπερατότητας μετρούμενο σε m^2.s/kg.

53 Ps(i)=js(i)/(mCfcip(i)-mCpi(i))% Υπολογισμός της υδραυλικής διαπερατότητας της διαλυμένης ουσίας μετρούμενο σε kg/m^2.

54 r(i)=1/(Ps(i)/jw(i)+1)%Υπολογισμός του πραγματικού ποσοστού απόρριψης σύμφωνα με το μοντέλο Spiegel-Kedem όταν ο συντελεστής ανάκλασης είναι μονάδα

55 NPD(i)=mPfi(i)-0.5*mdPfc(i)-Ppi(i)-mavO(i)+mOpi(i)%Προσδιορισμός της πραγματικής διαφοράς πίεσης μεταξύ

56 %των δύο πλευρών της μεμβράνης(net pressure difference)

57 NCD(i)=(mCfcip(i)-mCpi(i))%Προσδιορισμός της πραγματικής διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ

58 %των δύο πλευρών της μεμβράνης (net concetration difference) 59 end

8.2.2 Δεδομένα εισόδου script εντολών

Ως δεδομένα για το script έχουμε τις παρακάτω μεταβλητές όπου έχουν αποθηκευτεί τα δεδομένα και τα αποτελέσματα του λογισμικού R.O.S.A.

- data_mCfi_se_mg_per_liter: Συγκέντρωση παροχής στο ρεύμα τροφοδοσίας σε mg/l
- data_mF_se_m3_per_d: Παροχή τροφοδοσίας σε m³/d
- data_mPfi_se_bar: Πίεση παροχής σε bar
- data_mPpi_se_bar: Πίεση ρεύματος διαπέρασης (σταθερό ίσον με 0 για την συγκεκριμένη μελέτη)
- data_mQi_se_m3_per_d: Ολική παροχή διαπέρασης σε m³/d
- data_mSe_se_m2: Επιφάνεια μεμβράνης σε m²
- TCF: Συντελεστής επίδρασης θερμοκρασίας και για θερμοκρασία 25 °C ίσον με μονάδα
- Data_Ri_se_tis_ekato: Ποσοστό απόρριψης NaCl τις εκατό

8.2.3 Ανάλυση εντολών

Το script εντολών χωρίζεται σε τρείς φάσεις. Στην πρώτη φάση (γραμμές 1-11 γίνεται η μετατροπή στις κατάλληλες μονάδες για να μπορούν να υπολογιστούν τα μεγέθη της πίεσης, συγκέντρωσης και παροχής του στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης).

Έπειτα, γίνεται ο υπολογισμός των παραπάνω μεγεθών (γραμμές 13-23) σύμφωνα με της εξισώσεις που έχουν περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια.

Μετέπειτα, γίνεται μετατροπή των διαφόρων μεγεθών σε μετρικό σύστημα έτσι ώστε να μπορεί να γίνει υπολογισμός των φαινομενολογικών παραμέτρων σύμφωνα με το μοντέλο Spiegler-Kedem-Kachalsky.

Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστούν τα διάφορα μεγέθη, όπως οι ροές, οι συγκεντρώσεις και ο βαθμός απόρριψης καθώς και οι μεταβλητές *a*, *b* και *z*.

Με γνωστά τα παραπάνω μεγέθη κατασκευάζεται η συνάρτηση για τον προσδιορισμό του συντελεστή ανάκλασης σύμφωνα με την εξίσωση 8.5

(γραμμή 50) και από γραφική ανάλυση προσδιορίζεται η λύση της που είναι και η τιμή του συντελεστή ανάκλασης *σ*.

Σε όλα τα σημεία μελέτης η λύση του συντελεστή ανάκλασης σ δεν βρίσκεται μέσα στο φάσμα των αποδεκτών τιμών 0-1. Έτσι καθορίζεται η τιμή του σ ίση με τη μονάδα. Και με υπολογισμένο τον συντελεστή ανάκλασης σ μπορούν να υπολογιστούν η υδραυλική διαπερατότητα L_p , η υδραυλική διαπερατότητα διαλυμένης ουσίας P_s καθώς και ο βαθμός πραγματικής απόρριψης (επειδή ο συντελεστής ανάκλασης προκύπτει μονάδα, ο υπολογισμός του βαθμού απόρριψης γίνεται βάση της σχέσης 3.10) σύμφωνα με το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky καθώς και οι καθαρές διαφορές πίεσης και συγκέντρωσης NPD και NCD (γραμμές 51-56).

8.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για υπολογισμό φαινομενολογικών παραμέτρων μοντέλου spiegler-kedemkatchalsky

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις τρεις φαινομενολογικούς παραμέτρους του μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky για τα τρία στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης SW30XHR-440i, SW30ULE-440i και SW30XLE-440i.

Αποτελέσματα συντελεστή ανάκλασης για όλες τις συνθήκες μελέτης







Διάγραμμα 8.2: Λύσεις εξίσωσης 8.5 συναρτήσει συγκέντρωσης.



Διάγραμμα 8.3: Λύσεις εξίσωσης 8.5 συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας.

Στα παραπάνω διαγράμματα 8.1, 8.2 και 8.3 παρουσιάζονται οι λύσεις της εξίσωσης 8.5 για όλα τα σημεία μελέτης συναρτήσει της πίεσης, της συγκέντρωσης και της παροχής τροφοδοσίας. Παρατηρούμε ότι οι λύσεις της εξίσωσης 8.5 είναι πάντα αρνητικές και έξω από το εύρος των αποδεκτών λύσεων (0-1). Από τη μελέτη της εξίσωσης 8.5 παρατηρούμε ότι μόνο όταν το σ τείνει κοντά στην μονάδα μας δίνει λύση στο σύστημα. Έτσι κάνουμε την παραδοχή ότι ο συντελεστής ανάκλασης είναι ίσος με μονάδα και με αυτό δεδομένο γίνεται υπολογισμός της υδραυλικής διαπερατότητας L_p και της διαπερτότητας της διαλυμένης ουσίας $P_{\rm c}$.

Αποτελέσματα υδραυλικής διαπερατότητας Lp και της διαπερατότητας διαλυμένης ουσίας Ps συναρτήσει της πίεσης



Διάγραμμα 8.4: Υδραυλική διαπερατότητα L_p συναρτήσει πίεσης.



Διάγραμμα 8.5: Υδραυλική διαπερατότητα διαλυμένης ουσίας P_s συναρτήσει πίεσης.

Στα διαγράμματα 8.4 και 8.5 παρουσιάζονται οι φαινομενολογικές παράμετροι υδραυλικής διαπερατότητας L_p και της υδραυλικής διαπερατότητας L_p και της υδραυλικής διαπερατότητας διαλυμένης ουσίας P_s για κάθε σημείο μελέτης συναρτήσει της πίεσης, Από το διάγραμμα 8.1 παρατηρούμε ότι και τα τρία στοιχεία παρουσιάζουν σχετικά σταθερή υδραυλική διαπερατοτητα. Με μια σχετικά μικρή γραμμική πτώση του L_p συναρτήσει της πίεσης όσον αφορά την υδραυλική διαπερατότητα της διαλυμένης ουσίας P_s , παρατηρούμε ότι η διακύμανση του και για τα τρία στοιχεία είναι ελάχιστη και ελαφρά γραμμική.

Αποτελέσματα υδραυλικής διαπερατότητας Lp και διαπερατότητας διαλυμένης ουσίας Ps συναρτήσει της συγκέντρωσης



Διάγραμμα 8.6: Υδραυλική διαπερατότητα L_p συναρτήσει συγκέντρωσης.



Διάγραμμα 8.7: Υδραυλική διαπερατότητα διαλυμένης ουσίας *P*_s συναρτήσει συγκέντρωσης.

Αποτελέσματα υδραυλικής διαπερατότητας Lp και της διαπερατότητας διαλυμένης ουσίας Ps συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας



Διάγραμμα 8.8: Υδραυλική διαπερατότητα L_p συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας.



Διάγραμμα 8.9: Υδραυλική διαπερατότητα διαλυμένης ουσίας *P_s* συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας.

Στα διαγράμματα 8.6, 8.7, 8.8 και 8.9 παρατηρούμε ότι και η υδραυλική διαπερατότητα *L_p* και η διαπερατότητα διαλυμένης ουσίας παραμένουν σχεδόν σταθερές και στην μεταβολή της συγκέντρωσης και της παροχής Γενικά η σταθερότητα αυτή και των τριών μεταβολών, μας προδιαθέτει ότι το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky θα είναι ικανό να περιγράψει και τα τρία στοιχεία.

Όσον αφορά στον σχολιασμό των τριών στοιχείων μεταξύ τους τα αποτελέσματα των L_p και P_s είναι τα αναμενόμενα. Δηλαδή η SW30ULE-440i παρουσιάζει τα υψηλότερα L_p και P_s αφού παρουσιάζει τις μεγαλύτερες παροχές διαπέρασης και τα χαμηλότερα ποσοστά απόρριψης με τη SW30XLE-440i να παρουσιάζει τα ανάλογα αποτελέσματα και στην τελευταία θέση η SW30XHR-440i να παρουσιάζει τα χαμηλότερα L_p Και P_s αφού έχει την χαμηλότερη παροχή διαπέρασης και τα υψηλότερα ποσοστά απόρριψης

77

Συνοπτικοί πίνακες υδραυλικής διαπερατότης Lp και υδραυλικής διαπερατότητας διαλυμένης ουσίας

Αφού έγινε ο πλήρης υπολογισμός των φαινομενολογικών παραμέτρων για κάθε σημείο μελέτης στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι μέσες τιμές καθώς και οι best fit τιμές για κάθε στοιχείο σπειροειδούς περιέλιξής.

Αναλυτικά έχουμε

SW30XHR-440i	L_p average (m².s/Kg)	L_p Best fit (m².s/Kg)	P_s Average (m/s)	P _s Best fit (m/s)	σ
Πίεση	$2.5427 \cdot 10^{-12}$	$2.5430 \cdot 10^{-12}$	$1.1482 \cdot 10^{-8}$	$1.1482 \cdot 10^{-8}$	1
Συγκέντρωση	$2.5435 \cdot 10^{-12}$	$2.5440 \cdot 10^{-12}$	$1.1475 \cdot 10^{-8}$	$1.1480 \cdot 10^{-8}$	1
Παροχή τροφοδ.	$2.5400 \cdot 10^{-12}$	$2.5410 \cdot 10^{-12}$	$1.1421 \cdot 10^{-8}$	$1.1421 \cdot 10^{-8}$	1

Πίνακας 8.1: Συνοπτικός πίνακας φαινομενολογικών παραμέτρων για SW30XHR-400i.

SW30ULE-440i	L_p average (m².s/Kg)	L_p Best fit (m².s/Kg)	P_s Average (m/s)	P _s Best fit (m/s)	σ
Πίεση	$4.4284 \cdot 10^{-12}$	$4.1230 \cdot 10^{-12}$	$3.5072 \cdot 10^{-8}$	$3.5240 \cdot 10^{-8}$	1
Συγκέντρωση	$4.4374 \cdot 10^{-12}$	$4.5050 \cdot 10^{-12}$	$3.5108 \cdot 10^{-8}$	3.4850 \cdot 10^{-8}	1
Παροχή τροφοδ.	$4.3927 \cdot 10^{-12}$	$4.4030 \cdot 10^{-12}$	$3.4698 \cdot 10^{-8}$	$3.4650 \cdot 10^{-8}$	1

Πίνακας 8.2: Συνοπτικός πίνακας φαινομενολογικών παραμέτρων για SW30ULE-400i.

SW30XLE-440i	L_p average (m².s/Kg)	L_p Best fit (m².s/Kg)	P_s Average (m/s)	P _s Best fit (m/s)	σ
Πίεση	$3.7244 \cdot 10^{-12}$	$3.4920 \cdot 10^{-12}$	$1.9131 \cdot 10^{-8}$	$1.9200 \cdot 10^{-8}$	1
Συγκέντρωση	$3.7319 \cdot 10^{-12}$	$3.7850 \cdot 10^{-12}$	$1.9142 \cdot 10^{-8}$	$1.9010 \cdot 10^{-8}$	1
Παροχή τροφοδ.	$3.7060 \cdot 10^{-12}$	$3.7120 \cdot 10^{-12}$	$1.8972 \cdot 10^{-8}$	$1.8950 \cdot 10^{-8}$	1

Πίνακας 8.3: Συνοπτικός πίνακας φαινομενολογικών παραμέτρων για SW30XLE-400i.

Στοιχεία περιέλιξης	Lp average (m ² .s/Kg)	Lp Best fit (m².s/Kg)	Ps Average (m/s)	Ps Best fit (m/s)	σ
SW30XHR-440i	$2.5421 \cdot 10^{-12}$	$2.5411 \cdot 10^{-12}$	$1.1460 \cdot 10^{-8}$	$1.1459 \cdot 10^{-8}$	1
SW30ULE-440i	$4.4195 \!\cdot\! 10^{-12}$	$4.3437 \cdot 10^{^{-12}}$	$3.4959 \cdot 10^{-8}$	$3.4913 \cdot 10^{-8}$	1
SW30XLE-440i	$3.7202 \cdot 10^{-12}$	$3.663 \cdot 10^{-12}$	$1.9081 \cdot 10^{-8}$	$1.9053 \cdot 10^{-8}$	1

Πίνακας 8.4: Συνοπτικός πίνακας φαινομενολογικών παραμέτρων όλων των μεταβολών μαζί.

Από τον πίνακές 8.1, 8.2 και 8.3 παρατηρούμε ότι οι μέσες τιμές των φαινομενολογικών συντελεστών L_p και P_s έχουν μικρή διαφορά από τις καλύτερα προσαρμοσμένες τιμές (best fit) γεγονός λογικό, διότι από τα διαγράμματα δεν παρατηρούνται ακραίες τιμές. Ενώ παράλληλα παρατηρείται μια γραμμική διασπορά των φαινομενολογικών συντελεστών L_p και P_s . Έτσι επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τις μέσες τιμές των φαινομενολογικών συντελευτών καθώς παρατηρήθηκαν καλύτερα αποτελέσματα σε δοκιμές του παρακάτω κώδικα.

8.4 Δημιουργία script εντολών περιγραφής στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης βασισμένο στο μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky

Αφού έχουμε προσδιορίσει τα P_s και L_n και σ το μόνο που μένει είναι

να κατασκευαστεί το script εντολών που θα περιγράφει πλήρως το στοιχείο σπειροειδούς περιέλιξης.

Script περιγραφής στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης

1 Ps=1.1459e-08;% Συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας διαλυμένης ουσίας υπολογισμένος απο το script υπολογισμού.

2 Lp=2.5411e-12;% Συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας υπολογισμένος απο το script υπολογισμού.

3 % Μετατροπή των δεδομένων εισόδου σε κατάλληλες μονάδες για τον υπολογισμό.

4 % τών συνθηκών που διέπουν το στοιχείο σπειροειδούς περιέλιξής. 5 for i=1:21

6 Cfi(i)=data_mCfi_se_mg_per_liter(i);% Μετατροπή συγκέντρωσης παροχής τροφοδοσίας σε ppm.

7 F(i)=data_mF_se_m3_per_d(i)/0.00378541178;% Μετατροπή της παροχής σε gpd.

8 Pfi(i)=data_mPfi_se_bar(i)*14.503773800721815;% Μετατροπή της πίεσης παροχής σε psi.

9 Ppi(i)=data_mPpi_se_bar(i)*14.503773800721815;% Μετατροπή της πίεσης της παροχής διαπέρασης σε ppm.(Στην συγκεκριμένη μελέτη 0). 10 Se(i)=data_mSe_se_m2(i)/0.09290304;% Μετατροπή της επιφάνειας της μεμβράνης σε ft^2.

11 TCF(i)=data_TCF(i);% Συντελεστής επίδρασης θερμοκρασίας για 25c μοναδα.

. 12 Smj(i)=Cfi(i)*0.034223/1000;% Μετατροπή της συγκέντρωσής σε mol/mg. 13 T(i)=data_T(i);% Θερμοκρασία σε C.

14 end

15 % Κατάστρωση εξισώσεων για υπολογισμό της παροχής διαπέρασης.

16 syms x;% Μεταβλητή για υπολογισμό της παροχής διαπέρασης σε gpd 17 for i=1:21

18 mx=sym(((x*0.0037854117840007)/24)/3600); % Εξίσωση για μετατροπή της παροχής διαπέρασης σε m^3/s.

19 Ofi(i)=1.12*(273+T(i))*Smj(i);% Εξίσωση για υπολογισμό της οσμωτικής πίεσης παροχής.

20 rx=sym(1/((Ps/(mx/data_mSe_se_m2(i)))+1));% Εξισωση για υπολογισμο της πραγματικής απόρριψης με το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky. 21 Yx=sym(x/F(i));% Εξίσωση για τον υπολογισμό του ποσοστού ανάκτησης. 22 Cfcix=sym(Cfi(i)*log(1/(1-Yx))/Yx);% Εξίσωση για τον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης στην επιφάνεια της μεμβράνης χωρις την επίδραση της πολωσης.

23 pfix=sym(exp(0.7*Yx));% Εξισωση υπολογισμού του συντελεστή πόλωσης. 24 avOx=sym(Ofi(i)*Cfcix/Cfi(i)*pfix);% Εξίσωση υπολογισμού της μέσης οσμωτικής πίεσης με την επίδραση του φαινομένου της πόλωσης.

25 qfcx=sym(0.5*(F(i)+F(i)-x)/(24*60));% Εξίσωση υπολογισμού μέσης παροχής κατα πλατος της μεμβράνης σε gpm.

26 dPfcx=sym(0.01*qfcx^1.7);% Εξίσωση υπολογισμού πτώσης πίεσης στο στοιχείο μεμβράνης.

27 Opix=sym(avOx*(1-rx));% Εξίσωση υπολογισμού οσμωτικής πίεσης στο ρεύμα διαπέρασης.

28 Qix1(i)=solve(mx-Lp*data_mSe_se_m2(i)*TCF(i)*(Pfi(i)-0.5*dPfcxavOx+Opix)/0.00014503773773);%Εξίσωση επίλυσης για του παραπάνω συστήματος

29 end

30 Qix=double(Qix1)% Μετατροπή της μεταβλητής της παροχής διαπέρασης απο symbolic σε double.

31 % Παρακάτω υπολογισμοί των υπόλοιπων μεγεθών.

32 for i=1:21

33 mQi(i)=((Qix(i)*0.0037854117840007)/24)/3600% Μετατροπή της παροχής διαπέρασης σε m^3/s.

34 r(i)=(1/((Ps/(mQi(i)/data_mSe_se_m2(i)))+1))% Υπολογισμός του πραγματικού ποσοστού απόρριψης.

35 Yi(i)=Qix(i)/F(i)% Ποσοστό ανάκτησης.

36 qfc(i)=0.5*(F(i)+F(i)*(1-Yi(i)))/(24*60);% Υπολογισμός μέσης παροχής κατα πλάτος της μεμβράνης σε gpm.

37 dPfci(i)=0.01*qfc(i)^1.7;% Υπολογισμός πτώσης πίεσης στο στοιχείο της μεμβράνης σε ppm.

38 Ofi(i)=1.12*(273+T(i))*Smj(i);% Υπολογισμός οσμωτικής πίεσης στο ρεύμα τροφοδοσίας σε ppm.

39 pfi(i)=exp(0.7*Yi(i));% Υπολογισμός συντελεστή πόλωσης.

40 Cfci(i)=Cfi(i)*log(1/(1-Yi(i)))/Yi(i);% Υπολογισμός μέσης συγκέντρωσης στο ρεύμα παροχής σε ppm.

41 Ri(i)=(Cfi(i)-((1-r(i))*Cfci(i)*pfi(i)))/Cfi(i)% Υπολογισμός συντελεστή απόρριψης.

42 Cci=(1-Yi(i)*(1-Ri(i)))/(1-Yi(i))*Cfi(i)% Υπολογισμός στο ρεύμα συγκέντρωσης σε ppm.

43 Cpi(i)=Cfi(i)-(Ri(i)*Cfi(i))% Υπολογισμός συγκέντρωσης στο ρεύμα διαπέρασης σε ppm.

44 avO(i)=Ofi(i)*Cfci(i)*pfi(i)/Cfi(i)% Υπολογισμός μέσης οσμωτική πιέσης στο ρεύμα παροχής σε ppm.

45 Opi(i)=Ofi(i)*(1-Ri(i))% Υπολογισμός οσμωτικής πίεσης στο ρεύμα διαπέρασης.

46 end

47 for i=1:21

48 apot_Qi_se_m3_per_d(i)=Qix(i)*0.00378541178% Μετατροπή της παροχής διαπέρασης σε m^3/d.

49 apot_Cpi_se_mg_per_liter(i)=Cpi(i)% Μετατροπή της συγκέντρωσης σε mg/l(σαν αριθμός ίδιος).

50 apot_Ri_se_tis_ekata(i)=Ri(i)*100% Μετατροπή της απόρριψης από ποσοστό με βάση την μονάδα σε ποσοστό τις εκατό. 51 end

8.4.1 Δεδομένα εισόδου script περιγραφής στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης

Τα δεδομένα εισόδου είναι οι φαινομενολογικοί παράμετροι *L_p*, *P_s* και σ, που προσδιορίζουν την μεμβράνη καθώς και τα στοιχεία της παροχής τροφοδοσίας. Τα στοιχεία αυτά είναι αποθηκεμένα στις παρακάτω μεταβλητές

- Data_mCfi_se_per_liter: Συγκέντρωση παροχής τροφοδοσίας σε ppm
- **Data_mF_se_per_d**: Παροχή τροφοδοσίας σε m³/d.
- Data_mPfi_se_bar: Πίεση παροχής τροφοδοσίας σε bar.
- Data_mPfi_se_bar: Πίεση παροχής διαπέρασης σε bar.
- Data_mSe_se_m2: Επιφάνεια μεμβράνης σε m²
- Data_TCF: Συντελεστής επίδρασης θερμοκρασίας
- Data_T: Θερμοκρασία °C
- Ps: Υδραυλική διαπερατότητα διαλυμένης ουσίας.
- Lp: Υδραυλική διαπερατότητα

8.5 Ανάλυση script εντολών περιγραφής στοιχείων

Αρχικά πρέπει να γίνει μετατροπή των δεδομένων εισόδου σε κατάλληλες μονάδες, έτσι ώστε να μπορούν να προσδιοριστούν τα διάφορα μεγέθη που διέπουν το στοιχείο σπειροειδούς περιέλιξης (γραμμές 1-14)

Το επόμενο βήμα είναι να καταστρωθούν οι εξισώσεις των μεγεθών που διέπουν την μεμβράνη καθώς και οι εξισώσεις του μοντέλου Spieger-Kedem-Katchalsky για το ρεύμα διαπέρασης με άγνωστο την παροχή στο ρεύμα διαπέρασης (γραμμές 18-28). Στην γραμμή 28 γίνεται η επίλυση του συστήματος εξισώσεων και υπολογισμός της παροχής διαπέρασης . Αφού έχει υπολογιστεί η παροχή διαπέρασης αυτό που μένει είναι να υπολογιστεί ο βαθμός απόρριψης καθώς και όλα τα υπόλοιπα μεγέθη της μεμβράνης (γραμμές 33-52).

9 Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky

9.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Με υπολογισμένες τις μέσες τιμές για τις φαινομενολογικές παραμέτρους *L_p*, *P_s* και σ για το κάθε στοιχείο, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για το ρεύμα διαπέρασης. Αυτά παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων και σε συσχέτιση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του λογισμικού R.O.S.A.

Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky συναρτήσει πίεσης για το στοιχείο SW30XHR-440i



Διάγραμμα 9.1: Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30XHR-440i.



Διάγραμμα 9.2: Ποσοστό απόρριψη μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30XHR-440i.

Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky συναρτήσει συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30XHR-440i



Διάγραμμα 9.3: Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30XHR-440ι.





Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30XHR-440i



Διάγραμμα 9.5: Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30XHR-440i.



Διάγραμμα 9.6: Ποσοστό Απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30XHR-440i.

Στα διαγράμματα 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5 ,9,6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky για το στοιχείο SW30XHR-440i.Από τα διαγράμματα είναι φανερό ότι το μοντέλο μπορεί με αρκετή ακρίβεια να περιγράψει το στοιχείο, τόσο στον βαθμό απόρριψης όσο και στην παροχή διαπέρασης δίνοντας σε όλες τις μεταβολές παραπλήσια αποτελέσματα με το λογισμικό R.O.S.A., εκτός από την μεταβολή συναρτήσει της πίεσης. Έτσι παρατηρείται στο διάγραμμα 9.1 μια σχετική απόκλιση στην παροχή διαπέρασης για μεγάλες πιέσεις (άνω των 65 bar) η οποιά όμως δεν ξεπερνά το 12%.

Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky συναρτήσει πίεσης για το στοιχείο SW30ULE-440i



Διάγραμμα 9.7: Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30ULE-440i.



Διάγραμμα 9.8: Ποσοστό Απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30ULE-440i.

Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky συναρτήσει συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30ULE-440i



Διάγραμμα 9.9: Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30ULE-440i.





Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky συναρτήσει παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30ULE-440i



Διάγραμμα 9.11: Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30ULE-440i.



Διάγραμμα 9.12: Ποσοστό απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30ULE-440i.

Στα διαγράμματα 9.7, 9.8, 9.9, 9.10, 9.11, 9.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky για το στοιχείο SW30ULE-440i καθώς και τα αποτελέσματα του λογισμικού R.O.S.A. Και εδώ παρατηρούμε την ίδια συμπεριφορά του στοιχείου SW30ULE-440i με αυτή του SW30XHR-440i. Δηλαδή προκύπτουν πολύ καλά αποτελέσματα για όλες τις μεταβολές εκτός από τις υψηλές πιέσεις, στις οποίες παρατηρείται μια διαφορά στις παροχές διαπέρασης.

Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky συναρτήσει πίεσης για το στοιχείο SW30XLE-440i



Διάγραμμα 9.13: Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30XLE-440i.



Διάγραμμα 9.14: Ποσοστό απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της πίεσης για το στοιχείο SW30XLE-440i.

Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky συναρτήσει συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30XLE-440i



Διάγραμμα 9.15: Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30XLE-440i.



Διάγραμμα 9.16: Ποσοστό απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της συγκέντρωσης για το στοιχείο SW30XLE-440i.

Αποτελέσματα μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky συναρτήσει

παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30XLE-440i



Διάγραμμα 9.17: Παροχή διαπέρασης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30XLE-440i.



Διάγραμμα 9.18: Ποσοστό απόρριψης μοντέλου S.K.K. και λογισμικού R.O.S.A συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για το στοιχείο SW30XLE-440i.

Στα διαγράμματα 9.13, 9.14, 9.15, 9.16, 9.17, 9.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky για το στοιχείο SW30XLE-440i σε σχέση με τα αντίστοιχα του R.O.S.A.

Επίσης για το SW30XLE-440i μπορεί να ειπωθούν τα ίδια συμπεράσματα όπως με την SW30XHR-440i και SW30ULE-440i. Δηλαδή παρατηρούνται πολύ καλά αποτελέσματα για όλες τις μεταβολές και μικρές αποκλίσεις για τις υψηλές πιέσεις.

9.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και λογισμικού R.O.S.A.

Από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων για τις τρεις μεταβολές της πίεσης, της συγκέντρωσης και της παροχής του ρεύματος τροφοδοσίας βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου δεν έχουν μεγάλη απόκλιση από τα αντίστοιχα αποτελέσματα του λογισμικού R.O.S.A.

Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky με τις κατάλληλες μετατροπές για τις συνθήκες στην επιφάνεια της μεμβράνης, μπορεί να περιγράψει με αρκετή ακρίβεια τα στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης.

9.3 Τελικά συμπεράσματα

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων, συμπεραίνουμε ότι η υδραυλική διαπερατότητα των στοιχείων SW30XHR-440i, SW30ULE-440i και SW30XLE-440i δεν ακολουθεί πλήρως γραμμική σχέση με την ολική διαφορά πίεσης όπως προτείνει το μοντέλο Spiegler-Kedem-katchalsky, όμως είναι αρκετά γραμμική για να μας δώσει μια πολύ καλή εικόνα για τις αναμενόμενες παροχές διαπέρασης. Όσον αφορά την απόρριψη τα αποτελέσματα ήταν άριστα και στις περισσότερές περιπτώσεις συμπίπτουν με αυτές του λογισμικού R.O.S.A. Έτσι μπορεί να ειπωθεί με σιγουριά σύμφωνα με την εξίσωση 4.6 για σ ίσον 1 ότι η ροή της διαλυμένης ουσίας είναι γραμμική συνάρτηση της διαφοράς συγκέντρωσης στις δυο πλευρές της μεμβράνης του στοιχείου.

10. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

10.1 Επιλογή στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης

Στην παρούσα εργασία κάναμε επιλογή τριών διαδεδομένων στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης, των SW30XHR-440i,SW30ULE-440i και SW30XLE-440i της εταιρίας Dow.filmtec που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού για να εξετάσουμε κατά πόσο μπορεί το μοντέλο της μη αντιστρέψιμης θερμοδυναμικής Spigler-Kedem-Katchalsky να περιγράψει τον τρόπο μεταφοράς του διαλύτη και της διαλυμένης ουσίας δια μέσου της μεμβράνης των στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης.

Τα στοιχεία αυτά έχουν σχετικά χαμηλά ποσοστά ανάκτησης, αλλά πολύ υψηλά ποσοστά απόρριψης, που ξεπερνούν το 99%. Έτσι, το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky θα πρέπει να μπορεί να υπολογίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια το ποσοστό απόρριψης, ώστε να μπορεί να έχει πρακτική εφαρμογή.

10.2 Αξιολόγηση περιγραφής στοιχείων σπειροειδους περιέλιξης

Όπως ειπώθηκε ο σκοπός μας σε αυτήν την εργασία είναι να εξετάσουμε κατά πόσο μπορεί να εφαρμοστεί το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky σε μονάδες αφαλάτωσης με στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης. Για να γίνει αυτό πρέπει να μπορούν τα μεγέθη της πίεσης και της συγκέντρωσης στην επιφάνεια της μεμβράνης να μπορούν να συσχετιστούν με την συγκέντρωση, την πίεση και την παροχή που επικρατούν στο ρεύμα τροφοδοσίας. Για την συσχέτιση αυτή κάναμε χρήση των σχέσεων που αναφέρονται στο κεφάλαιο 4. Οι σχέσεις αυτές μας βοηθούν να προσδιορίσουμε τις μέσες συνθήκες που επικρατούν κατά μήκος του στοιχείου. Τα μειονεκτήματα αυτών των σχέσεων είναι κυρίως δύο. Πρώτον, αναφέρονται σε μέσες τιμές που επικρατούν στο ρεύμα παροχής κατά μήκος του στοιχείου, με αποτέλεσμα να μην γνωρίζουμε πώς μεταβάλλονται τα μεγέθη της πίεσης, της συγκέντρωσης και της ροής συναρτήσει του μήκους του στοιχείου. Δεύτερο και πιο σημαντικό είναι ότι εμπεριέχουν την μέση παροχή διαπέρασης (σαν ποσοστό ανάκτησης) δηλαδή μία άγνωστη μεταβλητή του συστήματος. Αυτό προκαλεί αλληλεξάρτηση του μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky και των εξισώσεων περιγραφής του στοιχείου, με αποτέλεσμα όσο ποιο ακριβές είναι το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky για την μεμβράνη του στοιχείου, τόσο πιο ακριβείς θα είναι οι μέσες τιμές για το ρεύμα παροχής κατά μήκος του στοιχείου.

10.3 Συμπεράσματα για της συνθήκες μελέτης

Για τίς συνθήκες μελέτης διαλέξαμε να εξετάσουμε τα στοιχεία SW30XHR-440i, SW30ULE-440i και SW30XLE-440i κάτω από τις τρεις πιο συνήθεις μεταβολές, που μπορούν να προκύψουν στο ρεύμα τροφοδοσίας: την μεταβολή της πίεσης, της συγκέντρωσης και αυτή της παροχής τροφοδοσίας. Όσο αφορά τις σταθερές παραμέτρους δηλαδή pH, θερμοκρασία, συντελεστή ρύπανσης, ποιότητα νερού (S.D.I), διαλυταία ουσία κ.α., διαλέξαμε κάποιες τυπικές τιμές. Όσον αφορά το εύρος των μεταβλητών μελέτης έγινε γύρω από τυπικές συνθήκες λειτουργίας και το αλάτι (NaCI) να είναι η διαλυταία ουσία που επιλέχτηκε για να υπολογιστεί η απόρριψη αφού είναι κατά μακράν η ουσία με την μεγαλύτερη συγκέντρωση στο θαλασσινό νερό.

Οι συνθήκες που διαλέξαμε διαφέρουν από αυτές που επικρατούν σε μία μονάδα αφαλάτωσης, όπως για παράδειγμα η επίδραση του φαινομένου της ρύπανσης της μεμβράνης, η οποία επηρεάζει την παροχή στο ρεύμα διαπέρασης καθώς και η παρουσία πολλών διαφορετικών ιόντων στο ρεύμα τροφοδοσίας που έχουν διαφορετική απόρριψη το καθένα. Όλα αυτά επηρεάζουν την λειτουργία του στοιχείου, αλλά για λόγους σταθερότητας των συνθηκών πρέπει να τα αγνοήσουμε.

97

10.4 Αξιολόγηση Λογισμικού R.O.S.A.

Λόγω της μη δυνατής εύρεσης πειραματικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό R.O.S.A., που διαθέτει η εταιρία D.O.W. για σχεδιασμό συστημάτων αντίστροφης όσμωσης, με τη χρήση στοιχείων που διαθέτει η ίδια εμπορικά.

Το πρόβλημα με τα αποτελέσματα του λογισμικού είναι ότι επειδή δεν είναι πειραματικά, δεν γνωρίζουμε σε ποιό βαθμό ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα ή ποιο είναι το εύρος απόκλισης.

10.5 Συμπεράσματα για αποτελέσματα λογισμικού R.O.S.A

Από τα αποτελέσματα του R.O.S.A., διαγράμματα 7.1,7.2,7.3,7.4,7.5 και 7.6 και από τα σχήματα 5.1,5.2 και 5.3 παρατηρήσαμε ότι τα στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης ανταποκρίνονται στα ονομαστικά χαρακτηριστικά τους, τόσο στην απόρριψη όσο και στην παροχή διαπέρασης ενώ συγχρόνως αιτιολογούν τον γενικό σκοπό χρήσης του κάθε στοιχείου, σύμφωνα με τον οποίο το SW30XHR-440i απευθύνεται σε εφαρμογές που η ποιότητα της παροχής διαπέρασης αποτελεί κύριο στόχο. Η SW30XLE-440i δίνει λίγο μικρότερα ποσοστά απόρριψης αλλά πολύ μεγαλύτερες παροχές διαπέρασης και έτσι απευθύνεται σε συστήματα που απαιτούν σχετικά μεγάλες παροχές διαπέρασης, αλλά με μικρό κόστος στην ποιότητα του ρεύματος διαπέρασης Η SW30ULE παρουσίασε πολύ μεγαλύτερες παροχές διαπέρασης αλλά και πολύ χαμηλά ποσοστά απόρριψης σε σχέση με άλλα στοιχεία. Έτσι, απευθύνεται σε εφαρμογές που τα υψηλά ποσοστά ανάκτησης αποτελούν κύριο στόχο και οι σχετικά υψηλές συγκέντρωσεις στο ρεύμα διαπέρασης δεν αποτελούν πρόβλημα.

10.6 Σχολιασμός Υπολογισμού φαινομενολογικών παραμέτρων

Ο προσδιορισμός των φαινομενολογικών παραμέτρων έγινε με την χρήση του λογισμικού Matlab και με βάση τις σχέσεις του μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3 και τις σχέσεις του Κεφαλαίου 4. Βασική σχέση αποτελεί η εξίσωση 8.5 της οποίας η λύση μας προσδιορίζει τον συντελεστή σ. Για τα συγκεκριμένα σπειροειδή στοιχεία είναι αρνητική και μη αποδεκτή. Για αυτό κάναμε ανάλυση της εξίσωσης και παρατηρήσαμε ότι όταν το σ τείνει στην μονάδα η εξίσωση 8.5 τείνει στο 0 Έτσι, κάναμε την παραδοχή ότι ο φαινομενολογικός συντελεστής ανάκλασης σ είναι μονάδα για τα συγκεκριμένα στοιχεία. Έτσι, για τον υπολογισμό της υδραυλικής διαπερατότητας της L_p και διαπερατότητας διαλυμένης ουσίας Ρ έγινε χρήση των σχέσεων 4.6 και 4.7 και για σ ίσο με μονάδα. Από τον υπολογισμό αυτό προκύπτει ότι η παροχή διαπέρασης διαλύτη J, είναι γραμμικά ανάλογη με την ολική διαφορά πίεσης (υδραυλική μείων οσμωτικής), καθώς και ότι η παροχή διαπέρασης διαλυμενης ουσίας είναι γραμμικά ανάλογη της διαφοράς συγκέντρωσης στις δύο πλευρές της μεμβράνης αντίστοιχα.

10.7 Σχολιασμός και συμπεράσματα αποτελεσμάτων φαινομενολογικών συντελεστών

Από τα διαγράμματα 8.1,8.2 και 8.3 παρατηρήσαμε ότι οι λύσεις της εξίσωσης 8.5 είναι αρνητικές και μελετώντας την καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής ανάκλασης σ είναι ίσος με μονάδα. Έτσι κατασκευάσαμε τα διαγράμματα 8.4-8.9 και τους πίνακες 8.1,8.2 και 8.3 για τις παραμέτρους L_p και P_s και για τα τρία στοιχεία. Αυτό που παρατηρουμε είναι ότι παραμένουν σταθεροί οι φαινομενολογικοί παράμετροι (στοιχείο που είναι και το ζητούμενο για την ακρίβεια του μοντέλου), εκτός από την μελέτη μεταβολής της πίεσης όπου οι φαινομενολογικοί παράμετροι L_p και P_s παρουσιάζουν μια γραμμική μεταβολή συναρτήσει της πίεσης. Αυτή η μη

99

σταθερότητα στους συντελεστές L_p και P_s μας οδηγεί, να καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι η παροχή διαπέρασης δεν ακολουθεί γραμμική σχέση με την ολική διαφορά πίεσης (υδραυλική μείον οσμωτική) όπως ορίζει το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky. Οι μεταβολές του συντελεστή Ps συναρτήσει της πίεσης ερμηνεύονται από το γεγονός ότι λόγω λανθασμένου υπολογισμού της παροχής διαπέρασης υπολογίζεται λανθασμένα και η συγκέντρωση στην επιφάνεια της μεμβράνης, που έχει επίπτωση στον συντελεστή υδραυλικής διαπερατότητας διαλυμένης ουσίας.

10.8 Συμπεράσματα για Script εντολών περιγραφής στοιχείων σπειροειδούς περιέλιξης.

Το μοντέλο περιγραφής βασίζεται στην επιλογή των κατάλληλων φαινομενολογικών παραμέτρων που υπολογίσαμε για κάθε μεμβράνη σε κάθε σημείο μελέτης. Στους συγκεντρωτικούς πίνακες 8.1,8.2 και 8.3 παρατηρούμε ότι και οι μέσες τιμές και οι καλύτερα προσαρμοσμένες (best fit) τιμές είναι παρόμοιες. Έτσι, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τις μέσες τιμές του μοντέλου που παρουσιάζονται στον πίνακα 8.4

10.9 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky

Τα αποτελέσματα επαληθεύουν όσα είχαμε προβλέψει από τα αποτελέσματα των *L_p* και *P_s* σε σχέση με την σταθερότητα τους, συναρτήσει της συγκέντρωσης, της παροχής και την μικρή απόκλιση για την μεταβολή της πίεσης.

Τα αποτελέσματα που μας δίνει το μοντέλο Spiegler-Kedem-Katchalsky και για τα τρία στοιχεία είναι απόλυτα ακριβή και αντίστοιχα του λογισμικού R.O.S.A.. Ακόμα και συναρτήσει της πίεσης, η διαφορά των αποτελεσμάτων R.O.S.A. και του μοντέλου Spiegler-Kedem-Katchalsky δεν ξεπερνά το 12%. Μάλιστα τα ποσοστά απόρριψης συναρτήσει της συγκέντρωσης και της παροχής τροφοδοσίας είναι σχεδόν απόλυτα. Το γεγονός αυτό επαληθεύει την επιλογή συντελεστή ανάκλασης σ ίσον με μονάδα και παράλληλα ότι η παροχή διαπέρασης διαλυμένης ουσίας J_s είναι γραμμική συνάρτηση της διαφοράς συγκέντρωσης στις δύο πλευρές της μεμβράνης του στοιχείου.

Επίσης, από την απόκλιση των αποτελεσμάτων συναρτήσει της πίεσης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η παροχή διαπέρασης δεν είναι πλήρως γραμμική σχέση με την ολική διαφορά υδραυλικής και οσμωτικής πίεσης, αλλά αρκετά γραμμική για να μας δώσει μια πολύ καλή εκτίμηση ειδικά για πιέσεις κάτω των 60 bar.

Βιβλιογραφία

[1] Michael E. Williams, Ph.D., P.E., A Brief Review of Reverse Osmosis Membrane Technology, Corporation and Williams Engineering Services Company, Inc, 2003 ETT

[2] Norman N. Li, Fane A., Antoni G. Fane, W.S. Winston Ho, Takeshi Matsuura, Advanced membrane technology and applications. Wiley(A JOHN WILEY AND SONS ,INC.,PUBLICATION),Hoboken, New Jersey, 2008

[3] Κωνσταντίνος Αρβανίτης, Γεώργιος Μαυρωτάς, Βελτιστοποίηση Μονάδας Αφαλάτωσης Αντιστροφής Όσμωσης με Χρήση Μαθηματικού Προγραμματισμού, Αθήνα, 2011

[4] Vineet K. Gupta ,Experimental and Theoretical studies in reverse osmosis and nanofiltration, OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center, 2003

[5] Lau Kok Keong, Feed spacer of spiral wound membrane module for nanofiltration and reverse osmosis: modeling, simulation and design

[6] FILMTEC Membranes System Design: System Performance Projection Tech manual excerpt

[7] DOW™ FILMTEC™ SW30XHR-440i seawater reverse osmosis element with iLEC™ Interlocking endcaps

[8] DOW™ FILMTEC SW30XLE-440*i* seawater reverse osmosis element with *iLEC* Interlocking endcaps

[9] DOW $^{\text{TM}}$ FILMTEC $^{\text{TM}}$ SW30ULE-440*i* seawater reverse osmosis element with *iLEC* $^{\text{TM}}$ interlocking endcaps

[10] A.M. Hidalgo, G. León, M. Gómez, M.D. Murcia, E. Gómez, J.L. Gómez.Application of the Spiegler–Kedem–Kachalsky model to the removal of4-chlorophenol by different nanofiltration membranes

[11] Norman N. Li, Fane A., Antoni G. Fane, W.S. Winston Ho, Takeshi Matsuura, Advanced membrane technology and applications. Wiley(A JOHN WILEY AND SONS ,INC.,PUBLICATION),Hoboken, New Jersey, 2008

[12] Review of Reverse Osmosis Membranes And Transport Models.

[13] Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes, p. 61, Springer, 2009

[14] <u>www.ksb.com</u>

[15] Richard W. Baker , Membrane technology and applications, 2nd edition, p.7, Wiley(JOHN WILEY AND SONS,Ltd), Menio Park, California, 2004

[16] Jane Kucera, Reverse osmosis: Design, Processes and Applications for Engineers, , Scrivener Publishing (Wiley),2010

- [17] <u>http://www.dowwaterandprocess.com/</u>
- [18] http://www.dow.com/
- [19] http://www.lenntech.com/
- [20] http://www.lenntech.com/products/membrane/filmtec-.htm
- [21] www.isoenergy.co.uk
- [22] <u>www.hohusa.net</u>