

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ & ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ:**

**ΠΡΟΤΥΠΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ**  
**ΕΠΑΝΑΣΥΜΠΙΕΣΗ ΘΕΡΜΟΥ-ΥΓΡΟΥ ΑΕΡΑ**

**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ ΠΟΛΩΝΙΔΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΜΠΟΝΤΟΖΟΓΛΟΥ ΒΑΣΙΛΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής**

**ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΛΙΟΣ 1998**

αρ. εισ. 112/ΠΑ.....



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ**  
**ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 1987/1  
Ημερ. Εισ.: 21-07-1998  
Δωρεά:  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
1998  
ΠΟΛ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν σκοπό την υπολογιστική μελέτη της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, καθώς και την πειραματική λειτουργία της, τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων και την βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας. Η λειτουργία της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης στηρίζεται στην ενσωμάτωση των βασικών αρχών της μηχανικής συμπίεσης ατμών (MVC- mechanical vapor compression), της εξάτμισης εκτόνωσης (flash evaporation) και της κλασματικής απόσταξης (rectification) σε μια πρωτότυπη συνεργία.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αρχικά γίνεται μια ανασκόπηση των διάφορων μεθόδων αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα. Δίνεται κυρίως έμφαση στις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης, αλλά παρουσιάζεται και η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης. Ταυτόχρονα δίνονται και κάποια στοιχεία για το κόστος λειτουργίας των διάφορων μεθόδων όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης μαζί με ένα σκαρίφημα της συσκευής όπου περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής της: Με μια θερμοδυναμική ανάλυση που γίνεται υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας στο στάδιο της συμπίεσης (αδιαβατική συμπίεση). Στη συνέχεια υπολογίζεται θερμοδυναμικά η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής για την πλήρη συμπύκνωση των υδρατμών. Η θερμοδυναμική αυτή ανάλυση έδειξε ότι η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που διαθέτουμε στη συσκευή.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα διάφορα τμήματα και η διαδικασία συναρμολόγησης της συσκευής. Αναλύονται οι μέθοδοι κατασκευής των τμημάτων της συσκευής και περιγράφονται τα όργανα μέτρησης και η αντιμετώπιση διάφορων προβλημάτων.

Έπειτα ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις και οι διάφορες διορθώσεις οι οποίες έγιναν για τη βελτίωση των συνθηκών λειτουργίας. Με το σχολιασμό των αποτελεσμάτων των διάφορων πειραμάτων που έγιναν, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Η συσκευή αρχικά είχε πολλές απώλειες, γεγονός που οδήγησε στο λύσιμο της συσκευής για τις απαραίτητες διορθώσεις.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μια αναλογική αύξηση της ποσότητας του αποσταγμένου νερού που παράγεται.

- Όσο υψηλότερη είναι η στάθμη του νερού στη συσκευή, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του αποσταγμένου νερού που παράγεται.

- Έχουμε απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Όσο μειώνουμε αυτές τις απώλειες, τόσο αυξάνει η ποσότητα του γλυκού νερού που παίρνουμε.

- Η λειτουργία της συσκευής με αλμυρό νερό έδειξε ότι η ποσότητα γλυκού νερού που παίρνουμε είναι λίγο μικρότερη από αυτή που παίρνουμε όταν η συσκευή λειτουργεί με καθαρό νερό.

- Η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας ήταν πολύ μεγαλύτερη από αυτή που ήταν διαθέσιμη, γεγονός που οδήγησε ξανά στο λύσιμο της συσκευής και την προσθήκη ελασμάτων τα οποία αύξησαν την επιφάνεια εναλλαγής.

- Τέλος, ο συμπιεστής δεν μπορούσε να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες άνω 70 °C, καθώς παρουσίαζε προβλήματα λειτουργίας. Η χρήση ενός καλύτερου συμπιεστού ίσως να έδινε καλύτερα αποτελέσματα.

Στο τελευταίο τμήμα της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται ο αναλυτικός υπολογισμός της απαιτούμενης επιφάνειας εναλλαγής και του συντελεστή απόδοσης σε kWh/m<sup>3</sup> αποσταγμένου νερού.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απονείμω στον επιβλέπων καθηγητή της διπλωματικής εργασίας κ. Βασίλη Μποντόζογλου για τη συμπαράσταση, τη διάθεση και τη καθοδήγηση του καθ' όλο το διάστημα εκπλήρωσης της μελέτης. Επίσης θα πρέπει να απονεμηθούν οι θερμές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Μιχάλη Βλαχογιάννη για την αμέριστη βοήθεια του, χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον τελειόφοιτο φοιτητή κ. Παναγιώτη Μαροπάκη για τη βοήθεια που πρόσφερε.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b>	<b>1</b>
1.1.ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2 ΕΞΑΤΜΙΣΗ	6
1.2.1. Εξάτμιση πολλαπλών βαθμίδων	6
1.2.1.1. Εξατμιστήρια μακρών σωλήνων	7
1.2.1.2. Εξατμιστήρια με κατακόρυφους σωλήνες	9
1.2.1.3. Εξατμιστήρια βυθιζόμενων σωλήνων	12
1.2.1.4. Εξατμιστήρια οριζόντιων σωλήνων	12
1.2.1.5. Εξατμιστήρια χαμηλής θερμοκρασίας	12
1.2.2. Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση	12
1.2.3. Εξάτμιση με επανασυμπύεση ατμών	15
1.2.4. Προβλήματα θερμικών μεθόδων	17
1.2.5. Εγκαταστάσεις εξάτμισης με ηλιακή ενέργεια	18
1.3. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ	19
<b>2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ</b>	<b>22</b>
2.1. Η ΠΡΟΤΥΠΗ ΣΥΣΤΕΥΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ	22
2.2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	24
2.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΝΑΛΛΑΓΗΣ	27

<b>3.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....</b>	<b>39</b>
3.1. Κατασκευή της συσκευής.....	39
3.2. Συναρμολόγηση της συσκευής.....	43
3.3. Όργανα μέτρησης .....	44
3.4. Βαθμονόμηση υγρασιομέτρου-Χαρακτηριστική καμπύλη συμπίεστή.....	45
<b>4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ.....</b>	<b>47</b>
<b>5. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ.....</b>	<b>67</b>
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>76</b>
<b>7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>78</b>
Α. Διαγράμματα κατανάλωσης ενέργειας στο συμπίεστή.....	79
Β. Πίνακες και αναφορές τεχνικών μεθόδων .....	83
Γ. Τεχνικά και κατασκευαστικά στοιχεία του συμπίεστή και του υλικού του πορώδους διαφράγματος .....	86
Δ. Βαθμονόμηση υγρασιομέτρου .....	102
<b>8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>104</b>

# **1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ- ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

## **1.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Η αφαλάτωση είναι μια φυσική διεργασία αποχωρισμού των αλάτων από υδατικά διαλύματα και χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα, ως καθαρά βιομηχανική μέθοδος, για την παραγωγή καθαρού νερού για κάθε χρήση, οικιακή ως πόσιμο νερό, βιομηχανική και αγροτική.

Ο πλανήτης μας διαθέτει μια ολική επιφάνεια  $510 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$ . Από αυτή την επιφάνεια τα 3/4 αποτελούνται από θάλασσες. Τα διάφορα φυσικά νερά των πηγών, των ποταμών και των λιμνών έχουν πολύ χαμηλή περιεκτικότητα αλάτων, ενώ στο θαλασσινό νερό η περιεκτικότητα των αλάτων είναι μεγαλύτερη. Τόσο η ποσότητα, όσο και οι χημικές ιδιότητες των διαλυμένων αλάτων επηρεάζουν την γεύση και την χρησιμότητα του νερού γενικά. Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο βιβλίο "αρχές διεργασιών αφαλάτωσης" των Δεληγιάννη και Μπελεσιώτη ανάλογα με την ποσότητα των ολικών διαλυμένων αλάτων (Total Dissolved Solids, TDS), κατατάσσονται σε:

1. κατάλληλο πόσιμο νερό με 500 ppm TDS.
2. Ελαφρώς αλμυρό νερό με 1000 ppm TDS, το οποίο γίνεται αποδεκτό και ως πόσιμο νερό.
3. Αλμυρό νερό με 1000 ως 2000 ppm TDS, το οποίο μόνο σε ακραίες περιπτώσεις γίνεται αποδεκτό για οικιακή χρήση.
4. Γλυφό νερό με περιεκτικότητα αλάτων από 2000 ως 10000 ppm TDS. Η χρησιμοποίηση του προκαλεί διάφορες διαταραχές.
5. Πολύ αλμυρό νερό με  $\text{TDS} > 10000 \text{ ppm}$ .
6. Θαλάσσιο και ωκεάνιο νερό με περιεκτικότητα αλάτων από 10000 ως 42000 ppm TDS.

Στον πίνακα 1.1 δίνονται ενδεικτικά τα άλατα που περιέχονται σε διάφορες θάλασσες και ωκεανούς.

Η καταλληλότητα των νερών, ανάλογα με τη χρήση, δίνεται από πρότυπα προδιαγραφών, όπου αναφέρεται το είδος των αλάτων και τα όρια που τίθενται στην περιεκτικότητά τους. Για το πόσιμο νερό οι προδιαγραφές είναι πολύ αυστηρές, και έχουν δοθεί από τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας, ο οποίος εδρεύει στη Γενεύη (World Health Organization, WHO, Geneva). Στον



πίνακα 1.2. δίνονται οι τιμές των κυριότερων αλάτων σε ανώτατο δεκτό όριο και σε ανώτατο επιτρεπτό όριο, όπως αυτές έχουν θεσπιστεί από τον WHO.

Θάλασσα ή Ωκεανός	Άλατα ppm	Θάλασσα ή Ωκεανός	Άλατα ppm
Βαλτική	7.000	Ατλαντικός	36.000
Κασπία	13.500	Μεσόγειος	39.000
Μαύρη	20.000	Ερυθρά	43.000
Λευκή	28.000	Κόλπος του Καρά-	
Βόρειος Ατλαντικός	29.000	Μπογάζ (Κασπία)	164.000
Ειρηνικός	33.600	Νεκρά	220.000

**Πίνακας 1.1.1. Μέση τιμή των ολικά διαλυμένων αλάτων.**

Συστατικά		Περιεκτικότητα εις mg/l	
		Ανώτατο δεκτό	Ανώτατο επιτρεπτό
Υλικά διαλυμένα άλατα	TDS	500	1500
Χλωριούχα	Cl	200	600
Θειικά	SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	200	400
Λοβέστιο	Ca <sup>2+</sup>	75	100
Μαγνήσιο	Mg <sup>2+</sup>	30	150
Φθοριούχα	F <sup>-</sup>	0.7	1.7
Νιτρικά	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<50	100
Χαλκός	Cu <sup>2+</sup>	0.05	1.5
Σίδηρος	Fe <sup>3+</sup>	0.10	1.0
Χλωριούχο νάτριο	NaCl	250	-
Υδρογόνο σε μονάδες	pH	7.0 έως 8.5	6.5 έως 9.2

**Πίνακας 1.1.2 Προδιαγραφές για το πόσιμο νερό της W.H.O.**

Από τις μεθόδους αφαλάτωσης που έχουν προταθεί, αυτές που βρήκαν ευρεία εφαρμογή και κυκλοφορούν στο εμπόριο τα τελευταία 30 ως 40 χρόνια είναι οι εξής:

- Η εξάτμιση ή όπως συνήθως αναφέρεται η απόσταξη
- Η ηλεκτροδιάλυση
- Η ανάστροφος ή αντίστροφος ώσμωσης
- Οι υβριδικές μέθοδοι
- Η ψύξη

Η περιγραφή των μεθόδων αυτών περιγράφεται αναλυτικά στο βιβλίο των Δεληγιάννη και Μπελεσιώτη "Αρχές διεργασιών αφαλάτωσης".

Η εξάτμιση είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος αφαλάτωσης και σήμερα αποτελεί το 76% των συνολικών μεθόδων αφαλάτωσης για εγκαταστάσεις παροχή μεγαλύτερη των 4000 m<sup>3</sup>/d, και το 60% των εγκαταστάσεων με παροχή 100 ως 4000 m<sup>3</sup>/d. Η εξάτμιση λειτουργεί με ενέργεια που προσφέρεται κυρίως ως θερμότητα. Η θερμότητα, η οποία προσάγεται, αποχωρίζει το νερό από τα άλατα, ως ατμό, ο οποίος συμπυκνώνεται σε καθαρό νερό. Η διεργασία αυτή γίνεται σε συσκευές που ονομάζονται εξατμιστήρια, η λειτουργία των οποίων στηρίζεται στην αλλαγή φάσης: υγρό-αέριο-υγρό.

Ανάλογα με τις παραμέτρους, στις οποίες δίνεται έμφαση κατά την λειτουργία των εξατμιστηρίων, μορφοποιούνται διάφορες παραλλαγές της μεθόδου, με αποτέλεσμα τα διάφορα εξατμιστήρια να διαφέρουν μεταξύ τους, τόσο κατασκευαστικά όσο και λειτουργικά. Οι κυριότερες μέθοδοι εξάτμισης είναι:

1. Εξάτμιση με πολλές βαθμίδες (Multiple-Effect-Evaporation, ME)
2. Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση (Multi-Stage-Flash-Evaporation, MSF)
3. Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor-Compression, VC)
4. Εξάτμιση με χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας (Renewable Energy)

Η ηλεκτροδιάλυση πρωτοεμφανίστηκε σε βιομηχανική κλίμακα κοντά στο 1960. Η βασική αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι ο αποχωρισμός των αλάτων από το νερό με την εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος σε ιοντικές μεμβράνες. Η ηλεκτροδιάλυση αντιπροσωπεύει σήμερα περίπου το 2,3% της παραγωγής του αφαλατωμένου νερού για εγκαταστάσεις μεγαλύτερες των 4000 m<sup>3</sup>/d και το 5,7% για παροχή 100 ως 4000 m<sup>3</sup>/d.

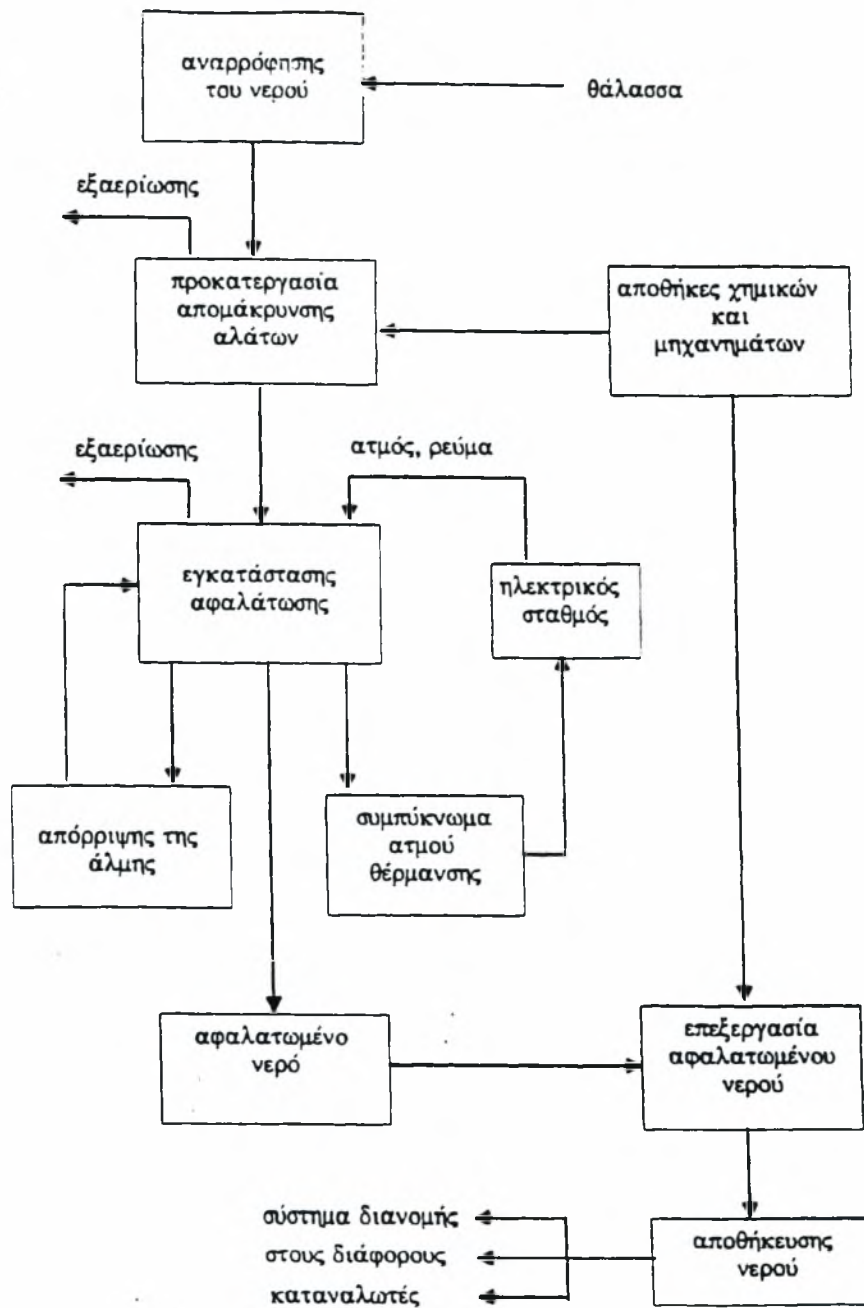
Η αντίστροφος ώσμωση εφαρμόστηκε επίσης γύρω στα 1962, αρχικά για την αφαλάτωση μόνο κανονικών και υφάλμυρων νερών. Από το 1972, και μετά από εκτεταμένες έρευνες για τη βελτίωση των ημιπερατών μεμβρανών, άρχισε να εφαρμόζεται σε βιομηχανική κλίμακα για το θαλάσσιο νερό. Η αντίστροφος ώσμωση χρησιμοποιεί μηχανική ενέργεια για τη λειτουργία της, υπό μορφή πίεσης σε ημιπερατές μεμβράνες, και διαχωρίζει το νερό από τα περιεχόμενα άλατα σε ένα διάλυμα, με μικρή γενικά κατανάλωση ενέργειας. Η αντίστροφος ώσμωση σήμερα αποτελεί το 33% των εγκαταστάσεων με χωρητικότητα 100 ως 4000 m<sup>3</sup>/d, και το 19,5% των εγκαταστάσεων με χωρητικότητα μεγαλύτερη των 4000 m<sup>3</sup>/d.

Οι υβριδικές μέθοδοι είναι συνδυασμοί διάφορων μεθόδων σε παράλληλη λειτουργία για την οικονομική εκμετάλλευση της ενέργειας. Οι μέθοδοι αυτοί έχουν βρει μόνο μεμονωμένες εφαρμογές.

Η μέθοδος της ψύξης δεν έχει βρει ακόμα βιομηχανική εφαρμογή, παρόλο που είναι μια απλή μέθοδος στην εφαρμογή της. Όπως είναι γνωστό, ο πάγος, ο οποίος σχηματίζεται κατά την ψύξη του θαλάσσιου νερού, αποτελείται από γλυκό νερό, ενώ τα άλατα συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του πάγου.

Ανεξάρτητα από την μέθοδο αφαλάτωσης, η όλη εγκατάσταση περιλαμβάνει διάφορες προκατεργασίες και εργασίες που είναι κοινές για όλες τις μεθόδους.

Στο διάγραμμα 1.1 φαίνεται η πορεία λειτουργίας μιας εγκατάστασης αφαλάτωσης.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα πορείας της λειτουργίας μιας εγκατάστασης αφαλάτωσης. ανεξάρτητα από τη μέθοδο που εφαρμόζεται για την αφαλάτωση.

## 1.2 ΕΞΑΤΜΙΣΗ

Η πολύ βασική αρχή της μεθόδου είναι η αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο, τους ατμούς οι οποίοι συμπυκνώνονται σε υγρό, τον καθαρό διαλύτη, και ο οποίος είναι απαλλαγμένος από τα άλατα του αρχικού διαλύματος. Η εξάτμιση, ανάλογα με τον τύπο των εξατμιστηρίων που χρησιμοποιούνται ή με το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιείται, κατατάσσεται σε τέσσερις μεγάλες ομάδες, η κάθε μια από τις οποίες μπορεί να περιλαμβάνει ειδικές υποδιαίρεσεις.:

- Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (Multiple-Effect-Evaporation-ή ME)
- Πολυβάθμιος εκρηκτική εξάτμιση (Multi-Stage-Flash-Evaporation ή MSF)
- Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor Compression ή VC)
- Απόσταξη με ηλιακή ενέργεια (Solar Distillation)

### 1.2.1. ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ (ME)

Τα εξατμιστήρια πολλαπλών βαθμίδων χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία σχεδόν από την εποχή που ανακαλύφθηκε ο ατμός. Τα εξατμιστήρια πολλαπλών βαθμίδων αποτελούνται από μια δέσμη σωλήνων με οριζόντια ή κατακόρυφη διάταξη, και από ένα περίβλημα ή κέλυφος που περιβάλλει τους σωλήνες. Τα εξατμιστήρια πολλαπλών βαθμίδων προσφέρονται στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία κατασκευών, και ανάλογα με τη διάταξη των σωλήνων κατατάσσονται σε :

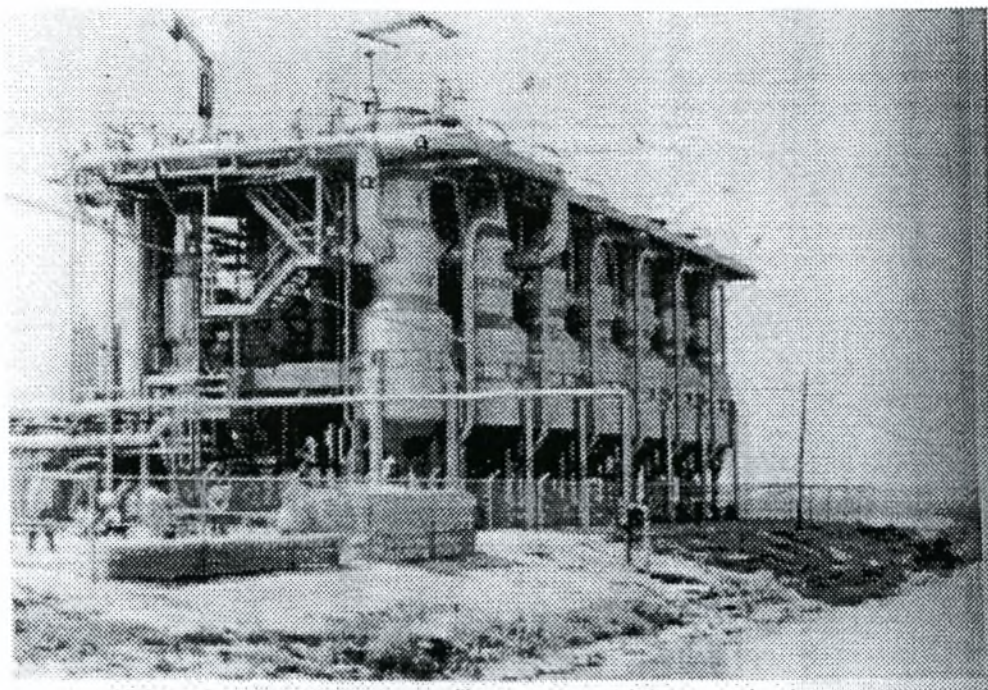
- Εξατμιστήρια μακρών σωλήνων (Long-Tube-Vertical-Evaporators ή LTV)
- Εξατμιστήρια κατακόρυφων σωλήνων με αναρριχόμενο υμένα (Vertical-Tube-climbing-film Evaporator ή VTE)
- Εξατμιστήρια κατακόρυφων σωλήνων με κατερχόμενο υμένα (Vertical-Tube-falling-film Evaporator ή VTE)
- Εξατμιστήρια με βυθισμένους σωλήνες (Submerged-Tube-falling-film-Evaporator, STE)
- Εξατμιστήρια με οριζόντιους σωλήνες (Horizontal-Tube-Evaporator, HTME)
- Εξατμιστήρια πολλαπλών βαθμίδων χαμηλής θερμοκρασίας

Η περιγραφή των μεθόδων αυτών περιγράφεται αναλυτικά στο βιβλίο των Δεληγιάννη και Μπελεσιώτη "Αρχές διεργασιών αφαλάτωσης".

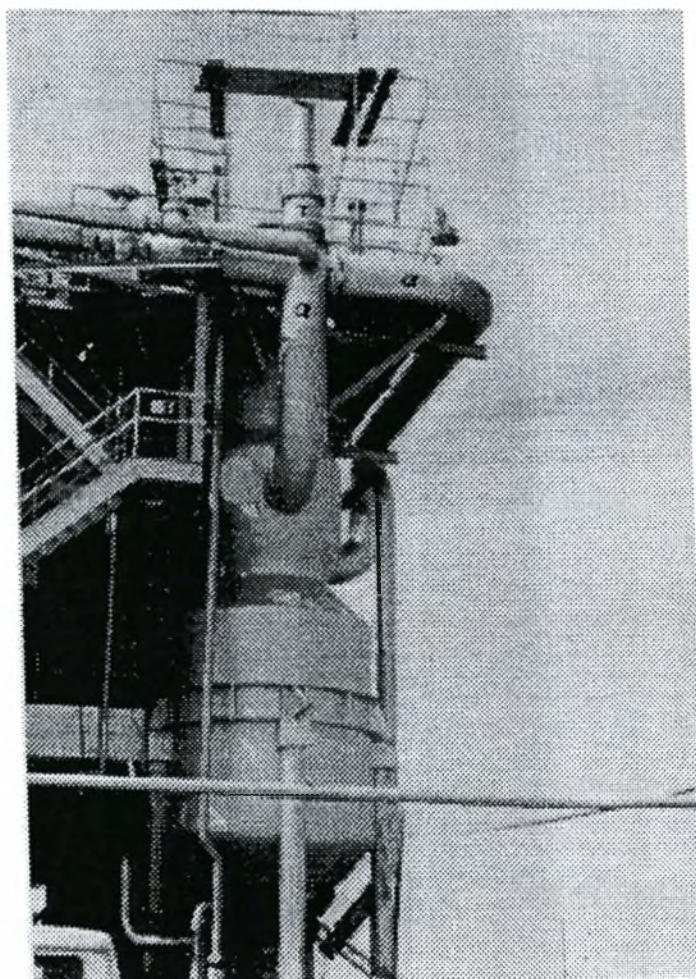
#### **1.2.1.1 Εξατμιστήρια μακρών σωλήνων**

Αποτελούνται από μακρούς κατακόρυφους σωλήνες, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί η άλμη που βράζει, ενώ ο ατμός θέρμανσης παρέχει τη θερμότητα του και συμπυκνώνεται στη εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων. Η μέθοδος αυτή μελετήθηκε εντατικά από το γραφείο αλμύρων νερών (Office of saline water ή OSW) το οποίο ιδρύθηκε από το υπουργείο εσωτερικών των ΗΠΑ γύρω στα 1960. Η μέθοδος αυτή μελετήθηκε σε μια εγκατάσταση παροχής  $3790 \text{ m}^3/\text{d}$ , που τοποθετήθηκε στο Freeport του Texas. Η εγκατάσταση αρχικά είχε 12 βαθμίδες, ενώ αργότερα προστέθηκαν άλλες 5. Τα εξατμιστήρια ήταν κατασκευασμένα αποκλειστικά από χάλυβα και χυτοσίδηρο. Οι φωτογραφίες των σχημάτων 1.2.1. και 1.2.2. δείχνουν αυτή την εγκατάσταση. Η πρώτη φωτογραφία είναι η γενική όψη της εγκατάστασης με μια σειρά από επτά βαθμίδες στην πρώτη γραμμή. Στους σωλήνες α κυκλοφορεί ο ατμός θέρμανσης στην πρώτη βαθμίδα με δυνατότητα πρόσδοσης θερμότητας και στη δεύτερη βαθμίδα. Οι παραγόμενοι ατμοί κυκλοφορούν από βαθμίδα σε βαθμίδα μέσα από τους σωλήνες ε. Στη δεύτερο σχήμα δίνεται η φωτογραφία της πρώτης βαθμίδας του εξατμιστηρίου





Σχήμα 1.2.1.: Γενική άποψη της εγκατάστασης LTV, του OSW στο Freeport του Texas, παραγωγής νερού περίπου  $3800 \text{ m}^3 / \text{d}$

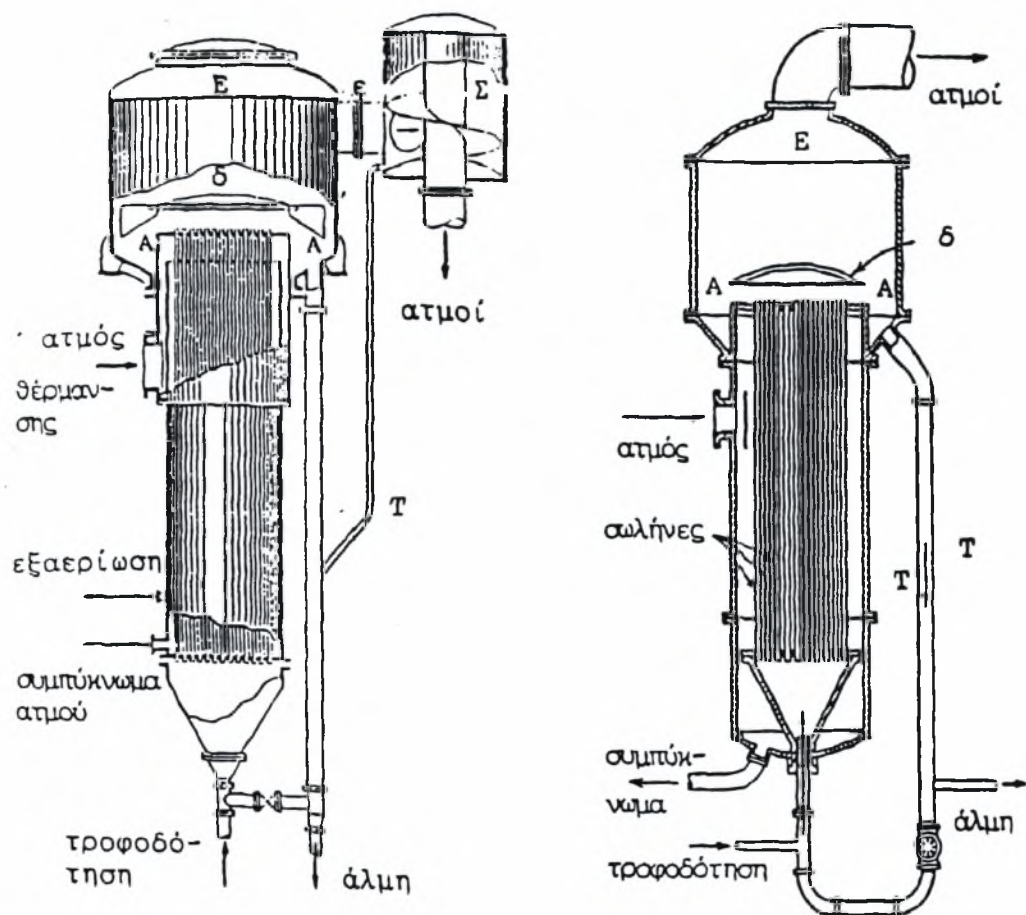


## **Σχήμα 1.2.2. Λεπτομέρεια μιας βαθμίδας, της πρώτης του σχήματος 1.2.1.**

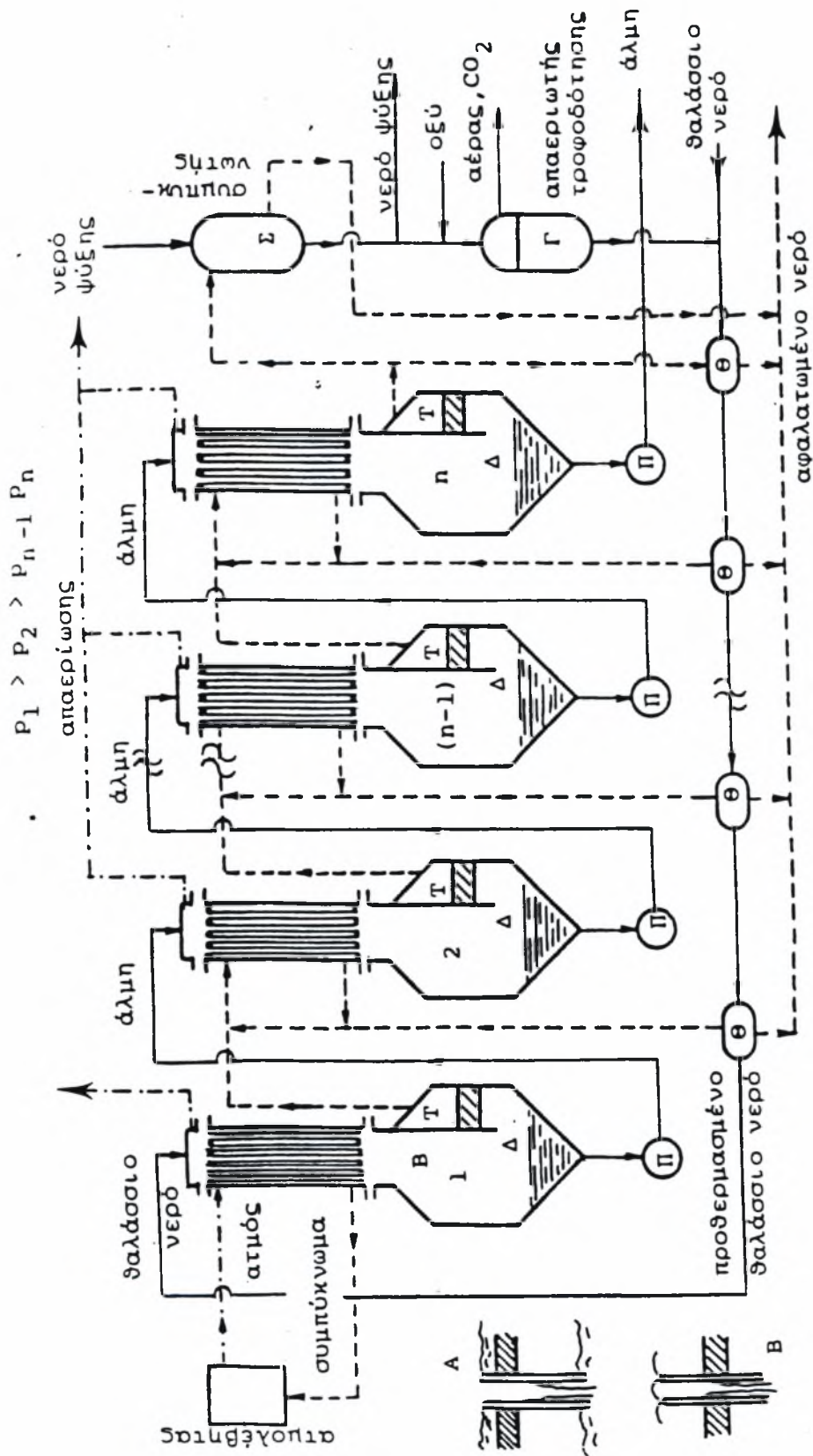
### **1.2.1.2. Εξατμιστήρια με κατακόρυφους σωλήνες**

Στα εξατμιστήρια με κατακόρυφους σωλήνες ανήκουν αυτά με αναρριχώμενο υμένα νερού και αυτά με κατερχόμενο υμένα. Στα πρώτα η τροφοδότηση της άλμης γίνεται από το κάτω μέρος του εξατμιστηρίου, στο εσωτερικό της δέσμης των σωλήνων ενώ στα δεύτερα η τροφοδότηση γίνεται από το πάνω μέρος, στο εσωτερικό των σωλήνων. Στο σχήμα 1.2.3 δίνεται η τομή ενός εξατμιστηρίου μακρών σωλήνων. Όταν τα εξατμιστήρια αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται ως μονοβάθμια, η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντική. Η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας οδήγησε στην κατασκευή εξατμιστηρίων με περισσότερες από μία βαθμίδες, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση θερμότητας του όλου συστήματος. Σε μια εγκατάσταση με πολλές βαθμίδες, ο ατμός θέρμανσης εισάγεται μόνο στην πρώτη βαθμίδα, όπου θερμαίνει την άλμη ως τη θερμοκρασία βρασμού. Οι ατμοί που σχηματίζονται στην πρώτη βαθμίδα χρησιμοποιούνται σαν ατμός θέρμανσης στη δεύτερη βαθμίδα, η οποία βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση από την πρώτη, ώστε το διάλυμα της άλμης να βράζει σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Στις περισσότερες εγκαταστάσεις εξατμιστηρίων πολλαπλών βαθμίδων, η κυκλοφορία της άλμης και των ατμών γίνεται κατά ομοροή. Στο σχήμα 1.2.4. δίνεται η διάταξη μιας μονάδας εξατμιστηρίων με  $n$  βαθμίδες, και με κυκλοφορία ατμού και άλμης κατά ομοροή. Οι διακεκομμένες γραμμές δίνουν την πορεία των ατμών και του αφαλατωμένου νερού, ενώ οι συνεχείς αυτή του διαλύματος και της άλμης.





**Σχήμα 1.2.3:** Εξατμιστήρια με μικρούς κάθετους σωλήνες LTV, με τροφοδότηση από το κάτω μέρος των σωλήνων.



Σχήμα 1.2.4: Διάταξη εξατμιστηρίων πολλαπλών βαθμίδων (ME) με κατακόρυφους μακρούς σωλήνες και κατερχόμενο υμένα υγρού.

Όπου: Β είναι το κατώτερο μέρος των σωλήνων, Σ είναι ο συμπυκνωτής, Δ είναι η δεξαμενή, Τ είναι ο διαχωριστής

#### **1.2.1.3 Εξατμιστήρια βυθιζόμενων σωλήνων**

Τα εξατμιστήρια αυτά αποτελούν παραλλαγή αυτών με κατακόρυφους σωλήνες, και έχουν χρησιμοποιηθεί εκτετάμενα στα ποντοπόρα πλοία, και σε μικρές συσκευές αφαλάτωσης, ενώ παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα συγκριτικά με τα εξατμιστήρια κατακόρυφων σωλήνων.

#### **1.2.1.4 Εξατμιστήρια οριζόντιων σωλήνων**

Τα εξατμιστήρια με οριζόντιους σωλήνες έχουν τις ίδιες αρχές λειτουργίας με αυτά των κατακόρυφων σωλήνων

#### **1.2.1.5 Εξατμιστήρια χαμηλής θερμοκρασίας**

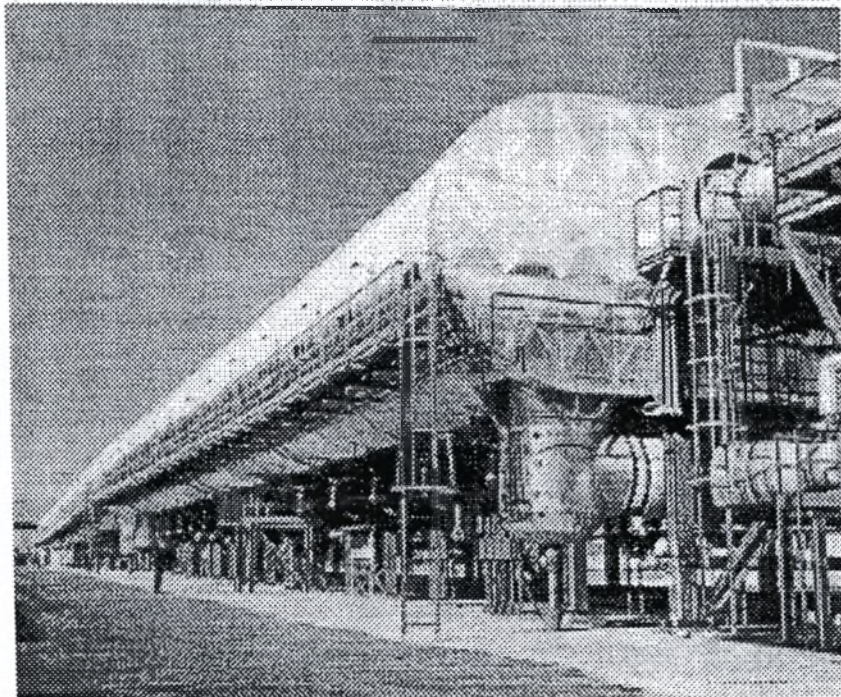
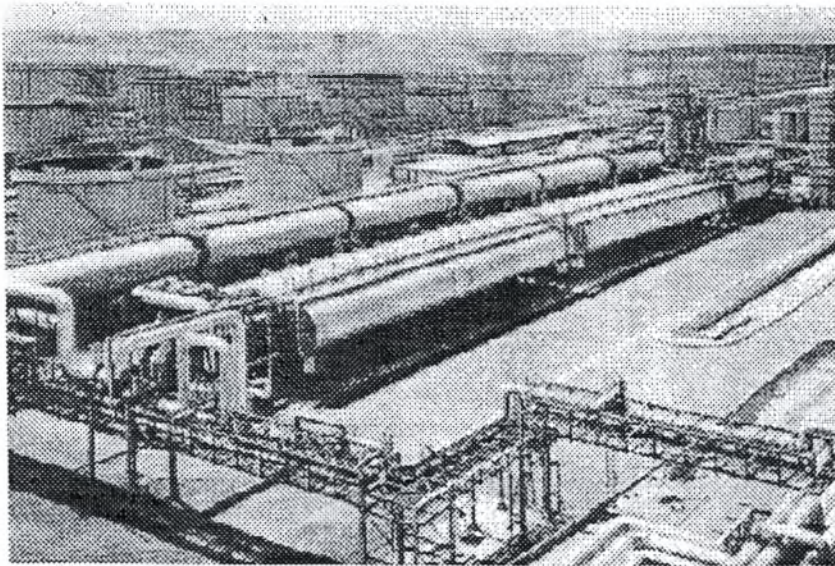
Τα εξατμιστήρια χαμηλής θερμοκρασίας είναι ειδικά κατασκευασμένες πολυβάθμιες μονάδες για την αξιοποίηση της θερμότητας ατμού χαμηλής θερμοκρασίας.

### **1.2.2. ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗ (MSF)**

Η πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση εφαρμόζεται σε μεγάλης βιομηχανικής κλίμακας εγκαταστάσεις με μεγάλες παροχές σε αφαλατωμένο νερό. Η μεγαλύτερη μονάδα αφαλάτωσης με τη μέθοδο αυτή είναι αυτή που βρίσκεται στο πετροχημικό συγκρότημα της S.I.R., στο Πόρτο Τορρές, στη Σαρδηνία. Αποτελείται από εξατμιστήριο με μακρούς σωλήνες με 31 βαθμίδες, και καλύπτει τις ανάγκες με αφαλατωμένο νερό της πετροχημικής βιομηχανίας, με παροχή 400 ως 2200 m<sup>3</sup>/h, ανάλογα με τη ζήτηση. Στη φωτογραφία του σχήματος 1.2.5. φαίνεται αυτή η εγκατάσταση.

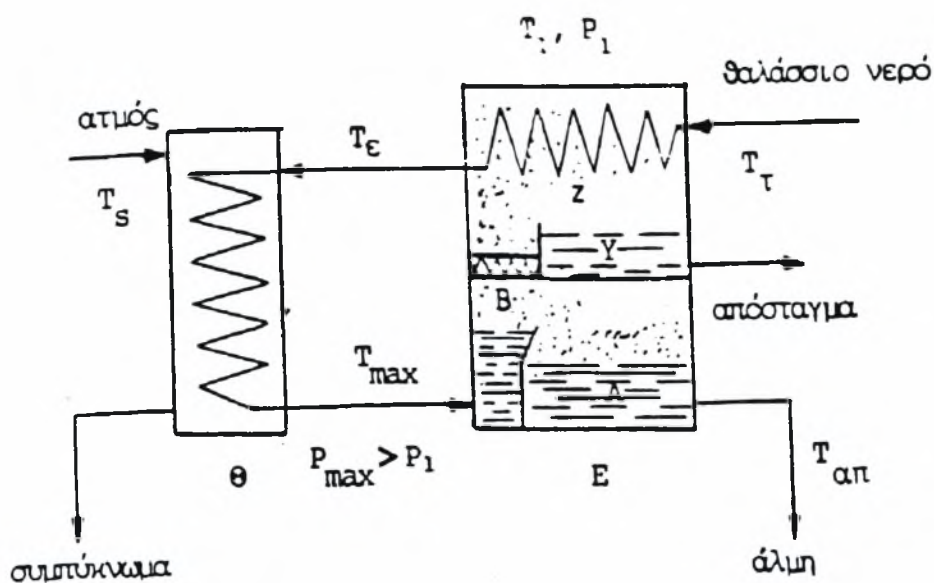
Οι ατμοί μπορούν να παραχθούν από ένα διάλυμα που βρίσκεται στο σημείο βρασμού του, είτε με νέα προσθήκη θερμότητας, ή με ελάττωση της πίεσης, οπότε σχηματίζονται οι ατμοί με στιγμιαία εκτόνωση. Στη δεύτερη κατηγορία κατατάσσεται η εκρηκτική εξάτμιση





**Σχήμα 1.2.5:** Φωτογραφία της μεγαλύτερης μοναδιαίας σειράς αφαλάτωσης με τη μέθοδο MSF στο Porto-Torres της Σαρδηνίας. ( Η μονάδα, αυτή τη στιγμή είμαι εκτός λειτουργίας.)

Όταν μια ποσότητα θαλασσινού νερού θερμανθεί, για μια ορισμένη πίεση, σε θερμοκρασία ελάχιστα χαμηλότερη από το σημείο βρασμού του, και στη συνέχεια εισαχθεί σε ένα θάλαμο Ε, ο οποίος βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση από αυτήν του διαλύματος, τότε θα συμβεί ένας εκρηκτικός, απότομος βρασμός του διαλύματος στο θάλαμο Ε. Σε όλη τη μάζα του υγρού σχηματίζονται στιγμιαία φυσαλίδες και το νερό εξατμίζεται, ως ότου, για την πίεση που επικρατεί, επέλθει ισορροπία του διαλύματος με τους σχηματιζόμενους ατμούς. Ο εκρηκτικός αυτός βρασμός, με τον σχηματισμό ατμών, έχει ως συνέπεια την ψύξη του διαλύματος. Για να είναι δυνατή μια νέα εκρηκτική εξάτμιση στην επόμενη βαθμίδα πρέπει η πίεση στο θάλαμο της να είναι χαμηλότερη από αυτή που αντιστοιχεί στο σημείο βρασμού του διαλύματος στην προηγούμενη βαθμίδα. Το σχήμα 1.2.6. δείχνει την πορεία ροής του διαλύματος της άλμης και των θερμοκρασιών για μια μονοβάθμια εγκατάσταση εκρηκτικής εξάτμισης με νέου τύπου εξατμιστήρια, όπου εξάτμιση και συμπύκνωση γίνονται στον ίδιο θάλαμο.



**Σχήμα 1.2.6. Σχηματική παράσταση μονοβάθμιας εκρηκτικής εξάτμισης, με θάλαμο εξάτμισης μιας βαθμίδας Ε και θερμαντή της άλμης Θ.**

Το θαλάσσιο νερό εισάγεται στους σωλήνες του συμπυκνωτή Σ όπου θερμαίνεται από τους ατμούς που συμπυκνώνονται εξωτερικά των σωλήνων, ως τη θερμοκρασία  $t_e$ , από αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος  $t_T$ . Οι ατμοί



θερμοκρασίας  $T_1$  και πίεσης  $p_1$  συμπυκνώνονται σχηματίζοντας το αφαλατωμένο νερό, το οποίο συλλέγεται στον υποδοχέα Υ. Το θαλάσσιο νερό τροφοδότησης από το θάλαμο Ε εισάγεται σε θερμοκρασία  $t_e$  στον εναλλάκτη θερμότητας του θερμαντού Θ, όπου θερμαίνεται ως την ανώτερη θερμοκρασία του συστήματος  $t_{max}$  από ατμό προερχόμενο από ατμολέβητα. Μέσα στο θερμαντή της άλμης το διάλυμα βρίσκεται στην υψηλότερη πίεση του συστήματος  $p_{max} > p_1$ . Το διάλυμα σε θερμοκρασία και πίεση  $t_{max}$  και  $p_{max}$  εισάγεται στο εξατμιστήριο Ε, όπου εκτονώνεται στιγμιαία σχηματίζοντας ατμούς. Οι ατμοί αφού περάσουν μέσα από το διαχωριστή Β, όπου συγκρατούνται οι σταγόνες του νερού που παρασύρονται με τον ατμό, ψύχονται στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων του συμπυκνωτή Σ, από το θαλάσσιο νερό που κυκλοφορεί στους σωλήνες του συμπυκνωτή.

Στην εκρηκτική εξάτμιση, η ροή του θαλάσσιου νερού γίνεται πάντα σε αντιροή με την πορεία της άλμης, σε αντίθεση με τη μέθοδο εξάτμισης με πολλαπλές βαθμίδες.

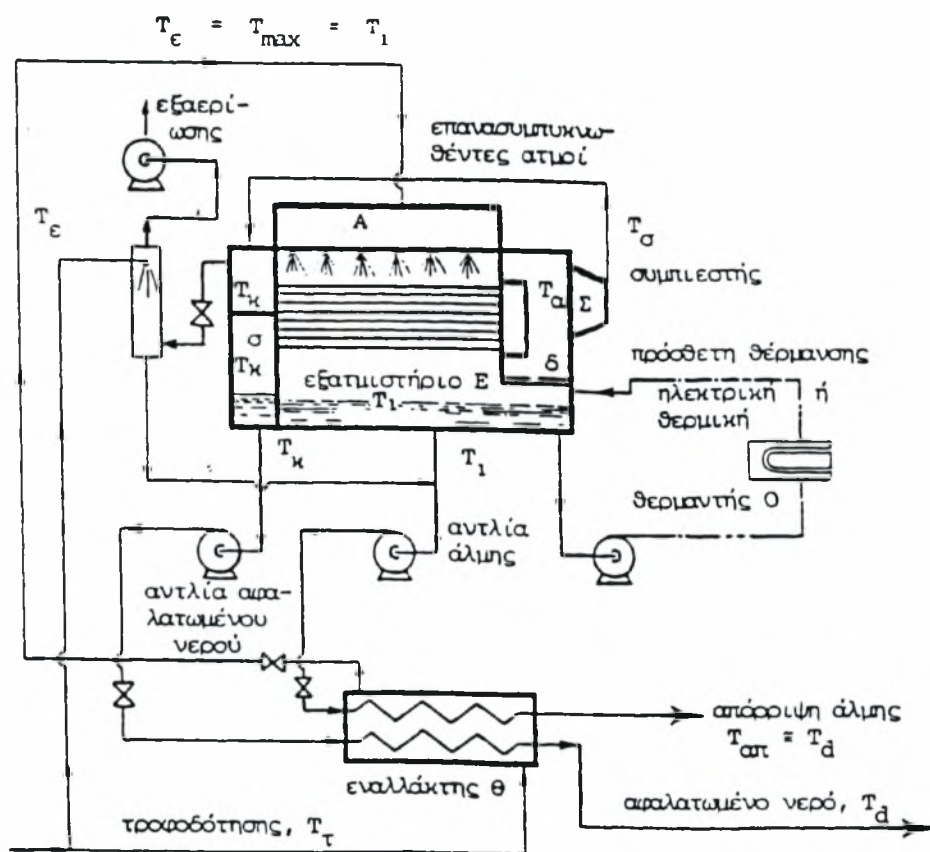
Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων MSF είναι:

- Κατασκευάζονται σε πολύ μεγάλες χωρητικότητες, οι οποίες ,μέχρι στιγμής, φθάνουν κατά ανώτατο όριο τα 23000 m<sup>3</sup>/d για λειτουργία της εγκατάστασης σε θερμοκρασίες κάτω των 90°C και τα 31000 m<sup>3</sup>/d για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 90°C.
- Κατεργάζονται νερά τροφοδότησης με αλμυρότητα ως 50 g/Kg παράγοντας αφαλατωμένο νερό με περιεκτικότητα σε άλατα μικρότερη των 25 ppm, που αντιστοιχεί σε 1 ως 3 μS/cm.
- Ο ατμός που χρησιμοποιείται έχει συνήθως χαμηλό κόστος.
- Απαιτούν μεγάλη επιφάνεια εγκατάστασης σχετικά με τις άλλες μεθόδους αφαλάτωσης.
- Η ενέργεια για την κίνηση των αντλιών είναι μεγάλη, διότι διακινούνται μεγάλες ποσότητες άλμης κατά την επανακυκλοφορία.

### **1.2.3. ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΜΕ ΕΠΑΝΑΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΩΝ**

Η μέθοδος με επανασυμπίεση ατμών, VC, χρησιμοποιείται σε βιομηχανική κλίμακα από το 1930. Στην εξάτμιση με μηχανική επανασυμπίεση ατμών, ο συμπιεστής τροφοδοτείται με ενέργεια από μια εξωτερική πηγή, όπως μια

τουρμπίνα, μια μηχανή ντίζελ κλπ ή ακόμα και με ηλεκτρικό ρεύμα. Ανάλογα με τον τύπο του εξατμιστηρίου και την μέθοδο επανασυμπίεσης, οι συμπιεστές λειτουργούν σε χαμηλές ή σε υψηλές πιέσεις. Στο σχήμα 1.2.7. δίνεται η πορεία των ρευστών μιας εγκατάστασης με μηχανική επανασυμπίεση ατμών (Mechanical Vapor Compression).



**Σχήμα 1.2.7. Διάγραμμα τυπικής εγκατάστασης αφαλάτωσης με επανασυμπίεση ατμών.**

Ένα μέρος από το θαλάσσιο νερό προθερμαίνεται στον πολλαπλό εναλλάκτη θερμότητας  $\Theta$ , από την άλμη και το αφαλατωμένο νερό, από τη θερμοκρασία  $t_\tau$  σε θερμοκρασία  $t_\epsilon$ , η οποία συνήθως είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία βρασμού  $t_1$  της άλμης στο εξατμιστήριο  $E$ . Η άλμη θερμοκρασίας  $t_1$  κατά την είσοδο της στον εναλλάκτη, και το αφαλατωμένο νερό θερμοκρασίας  $t_k$ , ψύχονται στον εναλλάκτη μέχρι θερμοκρασίας  $t_d$  και  $t_{ap}$ , και ισχύει γενικά  $t_d \equiv t_{ap}$ . Η διαφορά  $\Delta t = t_1 - t_\epsilon$  συμπληρώνεται στο επάνω τμήμα του εξατμιστηρίου, και πριν είσοδο της άλμης στα ακροφύσια. Πρακτικά εφόσον

υπάρχει καλή μόνωση των μηχανημάτων θεωρείται ότι  $t_1=t_{\max}=t_e$ . Οι ατμοί οι οποίοι παράγονται από το βρασμό της άλμης στο εξατμιστήριο έχουν θερμοκρασία κορεσμού  $t_a=t_1-t_{av}$ . Σε αυτή τη θερμοκρασία αναρροφώνται από τον συμπιεστή και συμπιέζονται ισοεντροπικά σε θερμοκρασία  $t_c$ , και στη συνέχεια εκτονώνται σε θερμοκρασία κορεσμού  $t_k$  στους σωλήνες του συμπυκνωτή παρέχοντας την αισθητή θερμότητα τους καθώς ψύχονται από η θερμοκρασία  $t_c$  στην  $t_k$ . Το υπόλοιπο τμήμα του θαλάσσιου νερού τροφοδότησης χρησιμοποιείται στη ψύξη των μη συμπυκνούμενων αερίων, όπου θερμαίνεται και αφού αναμιχθεί με την άλμη, η οποία αναρροφάται από το εξατμιστήριο, μεταφέρεται στον εναλλάκτη Θ. Σε περίπτωση που η επανασυμπίεση δεν αυξάνει αρκετά το θερμικό περιεχόμενο των ατμών ή όταν υπάρχει σχετικά αυξημένη απώλεια θερμότητας, υπάρχει βοηθητικός θερμαντής Ο, ο οποίος λειτουργεί με βοηθητικές πηγές θερμότητας. Η επαναθέρμανση ατμών με θερμοσυμπίεση χρησιμοποιεί έναν εκτοξευτή ατμού ο οποίος λειτουργεί με μικρές ποσότητες ατμού υψηλής πίεσης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει διαθέσιμος ατμός υψηλής πίεσης.

#### **1.2.4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ**

Τα κύρια προβλήματα που παρουσιάζονται στη θερμική αφαλάτωση του θαλασσινού νερού είναι:

##### **1.Επικαθίσεις αλάτων στις θερμαντικές επιφάνειες.**

Το γεγονός αυτό περιορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των μονάδων. Έχουν προταθεί ειδικές μέθοδοι αποσκλήρυνσης, που θα επέτρεπαν την αύξηση της θερμοκρασίας από 120 °C σε 180 °C, οπότε θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες βαθμίδες με οικονομικότερα αποτελέσματα (40% λιγότερος θερμαντικός ατμός).

##### **2. Υλικά κατασκευής.**

Το θαλασσινό νερό είναι πολύ διαβρωτικό. Οι συσκευές, οι σωληνώσεις κ.λ.π. μπορούν να κατασκευαστούν μόνο από υλικά υψηλής ποιότητας που να αντέχουν στις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Μέχρι τώρα έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς κράματα χαλκού-νικελίου, όπως π.χ. CuNi10Fe<sub>1,2</sub> και CuNi30Fe<sub>0,5</sub> (το τελευταίο για θερμοκρασίες πάνω από 120 °C).

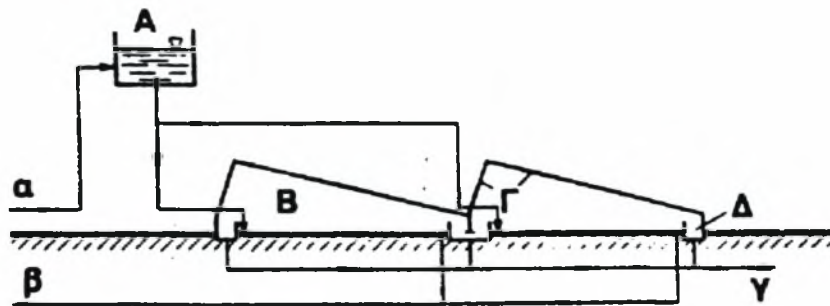


Κράματα αλουμινίου αντέχουν τη θερμοκρασία των 130 °C. Τον τελευταίο καιρό άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως το τιτάνιο(Ti). Τα ανοξείδωτα κράματα δεν χρησιμοποιούνται εδώ γιατί παρουσιάζουν την διάβρωση διάτρησης.

Παρατηρούμε ότι τόσο οι αποθέσεις αλάτων, όσο και η διάβρωση περιορίζουν τα θερμοκρασιακά επίπεδα στην αφαλάτωση, γύρω στους 120 °C. Παρ' όλα τα ακριβά υλικά που χρησιμοποιούνται, το μεγαλύτερο μέρος του κόστους παραγωγής του πόσιμου νερού είναι έξοδα ενέργειας που αντιστοιχούν στο 30% ως 50% των συνολικών εξόδων. Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις θα ήταν λογικό να αναζητήσουμε μια φθηνή πηγή ενέργειας. Μια τέτοια πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή ενέργεια.

### 1.2.5. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Μια από της πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας είναι η εγκατάσταση στο νησί της Πάτμου που προτάθηκε από τον Έλληνα καθηγητή Δεληγιάννη, και παράγει 50 m<sup>3</sup>/ημέρα. Η αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης φαίνεται στο σχήμα 1.2.8.( Σωτηρόπουλος,1996)



Α. Δεξαμενή νερού, Β. Μονάδα εξάτμισης, Γ. Γυάλινο κάλυμμα, Δ. Συλλογή αποστάγματος, α. Είσοδος θαλασσινού νερού, β. Έξοδος συμπυκνωμένου διαλύματος, γ. Πόσιμο νερό

### **Σχήμα 1.2.8.: Απόσταξη θαλασσινού νερού με ηλιακή ενέργεια**

Το θαλασσινό νερό αφού περάσει από τα κατάλληλα φίλτρα οδηγείται σε αβαθείς λεκάνες, οι οποίες έχουν καλυφθεί από τζάμια. Οι λεκάνες έχουν εσωτερικά επίχρισμα ασφάλτου ή επένδυση μαύρου ελαστικού. Οι ηλιακές

ακτίνες περνούν το γυαλί και το νερό, και απορροφώνται στον πυθμένα της λεκάνης. Το νερό θερμαίνεται και εξατμίζεται από την επιφάνεια του. Οι ατμοί συμπυκνώνονται στην επιφάνεια του τζαμιού (Γ) και ρέουν κατά μήκος της κεκλιμένης επιφάνειας, όπου και συγκεντρώνονται στο αγωγό (Δ). Το συμπύκνωμα στην επιφάνεια του τζαμιού, λόγω αυξημένης αντανakλαστικότητας, ελαττώνει την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού παράγονται 5-6 λίτρα /m<sup>2</sup> και ημέρα. Το χειμώνα μόνο το 10% αυτής της ποσότητας παράγεται.

Η εγκατάσταση στην Πάτμο έχει έκταση 8650 m<sup>2</sup>. Η λειτουργία είναι διακεκομμένης μορφής, δηλαδή το θαλασσινό νερό αφήνεται να εξατμιστεί ως το σημείο όπου θα αρχίσουν να αποτίθενται ανθρακικά ή θειικά άλατα, και στη συνέχεια ανανεώνεται.

Τον τελευταίο καιρό άρχισαν να σχεδιάζονται και μονάδες αφαλάτωσης πολλαπλών βημάτων, όπου η θερμική ενέργεια παίρνεται από ηλιακή μέσω ηλιοσυλλεκτών. Επειδή οι απαιτούμενες θερμοκρασίες είναι της τάξης των 120-130 °C για την παραγωγή του απαιτούμενου ατμού χρησιμοποιούνται κύλινδρο-παραβολικά ηλιόθερμα.

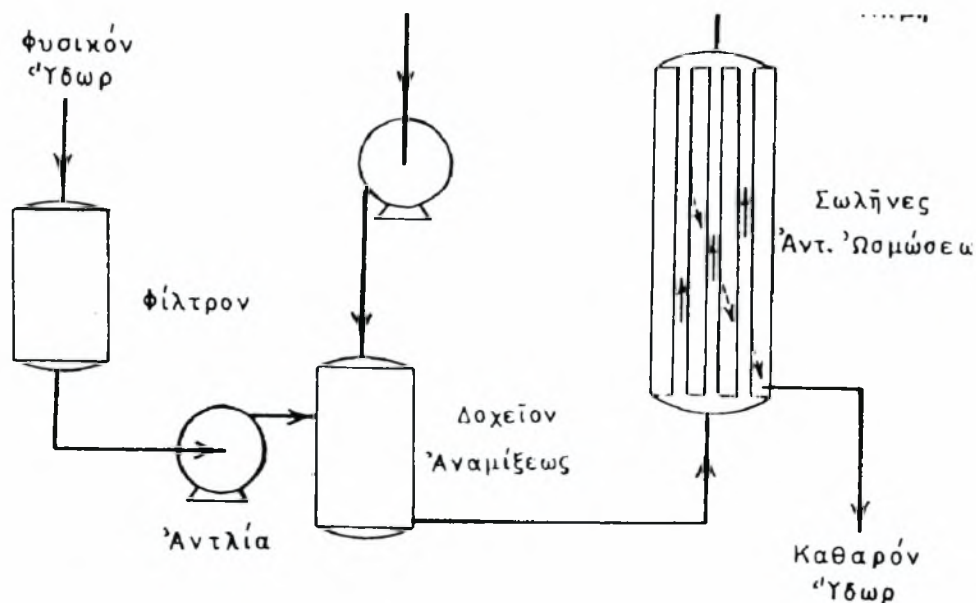
### **1.3. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ**

Όπως είδη αναφέρθηκε παραπάνω, η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης είναι συνέπεια μια εξωτερικής πίεσης P, μεγαλύτερης της οσμωτικής Π, σε ένα πυκνό διάλυμα το οποίο διαχωρίζεται από ένα αραιό διάλυμα με ένα ημιπερατό τοίχωμα ή μια διεκλεκτική μεμβράνη. Η αριθμητική τιμή της οσμωτικής πίεσης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του νερού σε άλατα, και της θερμοκρασίας του νερού, ενώ είναι ανεξάρτητη από την μεμβράνη. Οι κυριότερες διατάξεις που μεμβρανών που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Πορώδεις σωλήνες (½ inch).
- Πλάκες μετά στηριγμάτων (Plate and frame ).
- Σπειροειδή περιβλήματα (Spiral wound).
- Τριχοειδείς σωλήνες (Permasep).

Οι τρεις πρώτες διατάξεις χρησιμοποιούν μεμβράνες οξεικής κυτταρίνης, ενώ η τέταρτη χρησιμοποιεί τριχοειδείς σωλήνες nylon.

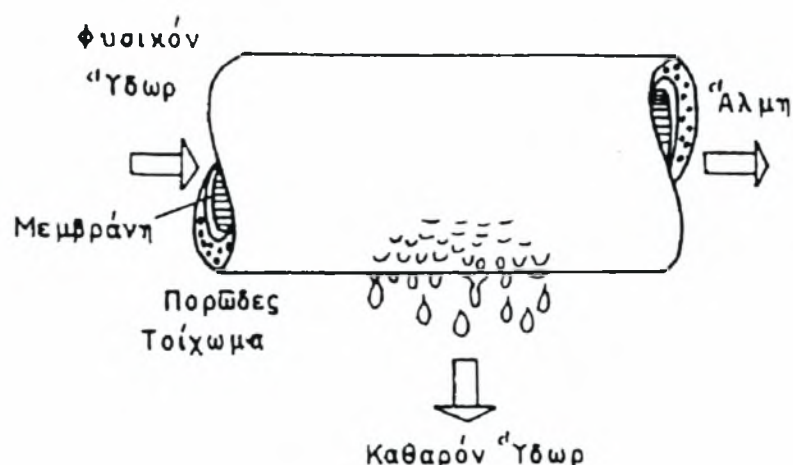
Το σχήμα 1.3.1. παριστάνει το διάγραμμα ροής μιας μονάδας αφαλάτωσης με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης με το σύστημα πορώδων σωλήνων. Αρχικά, το θαλασσινό νερό είναι αναγκαίο να καθαριστεί με κατακάθιση ή διήθηση, από τα διάφορα αιωρήματα (άμμος, υδροξείδιο του σιδήρου κ.λ.π.), τα οποία προκαλούν φράξη των πόρων των μεμβρανών. Έπειτα συμπιέζεται με αντλίες σε πίεση 30 bar μέσα σε πορώδεις σωλήνες, όπου επέρχεται διαχωρισμός σε καθαρό πόσιμο νερό και συμπυκνωμένο διάλυμα αλάτων (άλμη).



**Σχήμα 1.3.1. Διάγραμμα ροής μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης  
όσμωσης.**

Σε όλους τους διαχωρισμούς με μεμβράνες, παρατηρείται το φαινόμενο της πολώσεως συγκεντρώσεως (concentration polarization), το οποίο είναι εντονότερο στην αντίστροφη όσμωση. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών (π.χ. αλάτων), λόγω της ροής του νερού διαμέσου της μεμβράνης. Με αυτό τον τρόπο αυξάνει η οσμωτική πίεση του διαλύματος κοντά στην μεμβράνη, με αποτέλεσμα την ελάττωση της ροής του νερού και συγχρόνως την αύξηση του ρυθμού διάχυσης των διαλυμένων ουσιών. Η πόλωση συγκεντρώσεως των μεμβρανών μπορεί να προκαλέσει αποθέσεις δυσδιάλυτων αλάτων (π.χ. ανθρακικού ασβεστίου) ή κολλοειδών μεγαλομορίων, τα οποία ελαττώνουν σημαντικά το ρυθμό ροής του νερού.

Για την ελάττωση της πολώσεως συγκεντρώσεως χρησιμοποιούνται μεγάλες ταχύτητες στους σωλήνες, οι οποίες επιτυγχάνονται με επανακυκλοφορία το διαλύματος. Ο μηχανισμός διαχωρισμού με το σύστημα του πορώδους σωλήνα φαίνεται στο σχήμα 1.3.2.. Το καθαρό νερό διέρχεται διαμέσου της μεμβράνης προς το εξωτερικό του σωλήνα όπου συλλέγεται και απομακρύνεται από το σύστημα. Το ποσοστό του λαμβανόμενου καθαρού νερού αποτελεί περίπου το 80% της τροφοδοτήσεως.



**Σχήμα 1.3.2.: Πορώδης σωλήνας με μεμβράνη αντίστροφης όσμωσης.**

Η άλμη που εξέρχεται από το σύστημα βρίσκεται υπό πίεση και μέρος της ενέργειας μπορεί να ανακτηθεί με εκτόνωση σε ειδικό στρόβιλο. Για οικονομικούς λόγους, η εκτόνωση αυτή ενδείκνυται μόνο σε συστήματα υψηλής πίεσης (100 bar).

## **2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ**

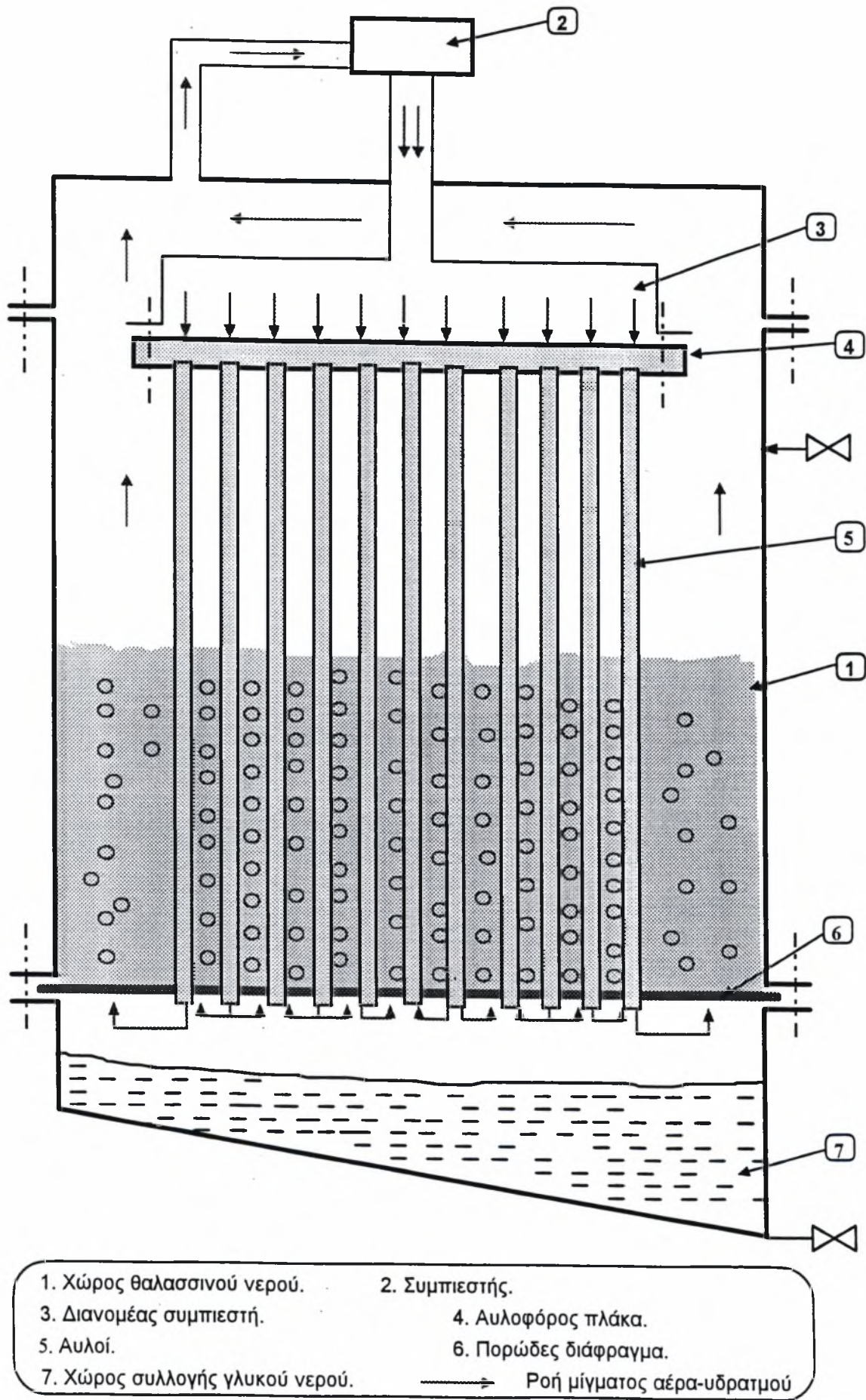
### **2.1 Η ΠΡΟΤΥΠΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

Η πρότυπη συσκευή αφαλάτωσης έχει κατασκευαστεί και έχει τοποθετηθεί στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών. Η βασική ιδέα της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης στηρίζεται στην ενσωμάτωση των βασικών αρχών της μηχανικής συμπίεσης ατμών (MVC-mechanical vapor compression), της εξάτμισης εκτόνωσης (flash evaporation), και της κλασματικής απόσταξης (rectification), σε μια καινούργια μέθοδο εξάτμισης, η οποία μπορεί να αποτελέσει μια πρότυπη μέθοδο θερμικής αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού (Λίτινας, 1997). Το σκαρίφημα της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης φαίνεται στο σχήμα 2.1. Τα κύρια μέρη της συσκευής είναι ο χώρος του θαλασσινού νερού (1), ο συμπιεστής (2) και ο διανομέας του (3), η αυλοφόρος πλάκα (4) και οι αυλοί που βυθίζονται στο θαλασσινό νερό (5), το πορώδες διάφραγμα (6) και ο χώρος συλλογής του γλυκού νερού. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι τα κατασκευαστικά σχέδια της συσκευής εκπονήθηκαν από τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Βλαχογιάννη Μιχάλη, ο οποίος είχε την επίβλεψη και την όλη επιμέλεια της κατασκευής των διάφορων τμημάτων της συσκευής.

#### **Αρχή λειτουργίας**

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής βασίζεται στη χρήση αέρα ως εργαζόμενου μέσου σε ένα κλειστό κύκλο, αποτελούμενο από το στάδιο της εξάτμισης και της συμπύκνωσης. Αέρας εισέρχεται στο χώρο του θαλασσινού νερού (1) με τη μορφή φυσαλίδων μικρής διαμέτρου. Στο χώρο του θαλασσινού νερού γίνεται η εξάτμιση του νερού και η διάχυση του προκύπτοντος υδρατμού στον αέρα της φυσαλίδας. Οι φυσαλίδες διαμορφώνονται κατά το πέρασμα του αέρα διαμέσου του πορώδους διαφράγματος (6) και δημιουργούν άφθονη επιφάνεια για εξάτμιση. Ταυτόχρονα η παρουσία φυσαλίδων προκαλεί ανάδευση του νερού με αποτέλεσμα αφενός την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας, αφετέρου τη μείωση του σχηματισμού των επικαθίσεων. Το κορεσμένο μίγμα αέρα-υδρατμού που προκύπτει, συμπιέζεται από τον συμπιεστή (2) σε ελαφρά υψηλότερη πίεση (κατά  $\Delta P \approx 0,15 \text{ bar}$ ) και οδηγείται από τον διανομέα του συμπιεστή (3) στους αυλούς (5). Εξαιτίας της αυξημένης πίεσης, η συμπύκνωση προκύπτει σε υψηλότερη θερμοκρασία μέσα στους αυλούς και η αποδιδόμενη λανθάνουσα θερμότητα μεταδίδεται στο στάδιο της εξάτμισης (χώρος θαλασσινού νερού). Το συμπύκνωμα κυλάει στους αυλούς και συλλέγεται στο χώρο συλλογής του γλυκού νερού (7) στο κάτω μέρος της συσκευής, ενώ ο αέρας και η ποσότητα του υδρατμού, που δεν έχει συμπυκνωθεί, ανακυκλώνεται.





**Σχήμα 2.1:** Αρχή λειτουργίας πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης

## 2.2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σ' αυτή την παράγραφο θα μελετηθούν, από θερμοδυναμική σκοπιά, η βελτιστοποίηση συνθηκών λειτουργίας όσον αφορά την ποσότητα νερού που συμπυκνώνεται ανά mole αέρα.

### α. Λειτουργία της συσκευής με καθαρό νερό.

Αρχικά, υποτίθεται ότι η συσκευή λειτουργεί με καθαρό νερό. Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή της αρχής λειτουργίας της συσκευής το αέριο μίγμα αέρα-υδρατμού, που προκύπτει από το στάδιο της εξάτμισης, είναι κορεσμένο. Δηλαδή, το μίγμα περιέχει τη μέγιστη ποσότητα υδρατμού που μπορούν να πάρουν οι φυσαλίδες αέρα, από το νερό. Οπότε, η μερική πίεση του υδρατμού στο μίγμα είναι ίση με την τάση ατμών του νερού στη θερμοκρασία του μίγματος, δηλαδή  $P_{\text{υδρατμού}} = P_{\text{sat}}$ .

Ο υπολογισμός της ποσότητας του υδρατμού που συμπυκνώνεται ανά mole. αέρα που διακινείται στη συσκευή, γίνεται με την παρακάτω βηματική διαδικασία:

Αν θεωρήσουμε ότι η πίεση πριν τον συμπιεστή είναι  $P_1$  και η θερμοκρασία  $T_1$ , και ότι ο συμπιεστής προκαλεί μια αύξηση της πίεσης κατά  $\Delta P = 0,1$  bar, τότε η πίεση μετά τον συμπιεστή θα είναι  $P_2 = P_1 + \Delta P$ . Τότε έχουμε:

- Το μοριακό κλάσμα του αέρα στο μίγμα, σε πίεση  $P_1$  θα είναι:

$$Y_{\text{αέρα}} = \frac{(P_1 - P_{\text{sat}})}{P_1} = \text{moles}_{\text{αέρα}} / \text{moles}_{\text{μίσματος}} \quad (2.1)$$

- Η ποσότητα του υδρατμού ανά mole. αέρα, σε πίεση  $P_1$  και  $P_2$ , δηλ. το πηλίκο του μοριακού κλάσματος του υδρατμού προς το μοριακό κλάσμα του αέρα, σε πίεση  $P_1$  και  $P_2$ , θα είναι:

$$\frac{P_{\text{sat}}}{P_1 - P_{\text{sat}}} \quad (2.2)$$

$$\text{και } \frac{P_{\text{sat}}}{P_2 - P_{\text{sat}}} \quad (2.3)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις, η πρώτη εκφράζει την ποσότητα του υδρατμού πριν το συμπιεστή και η δεύτερη την ποσότητα του υδρατμού μετά το συμπιεστή και το στάδιο της συμπύκνωσης, λίγο πριν την είσοδο του αερίου μίγματος αέρα-υδρατμού ξανά στο χώρο του νερού.

- Οπότε αφαιρώντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, υπολογίζεται η ποσότητα του υδρατμού που συμπυκνώθηκε. Δηλαδή,

$$(2.2) - (2.3) = \text{moles}_{\text{υδρατμού}} / \text{moles}_{\text{αέρα}} \text{ που συμπυκνώθηκαν.} \quad (2.4)$$

• Πολλαπλασιάζοντας με το  $MB(H_2O)=18$ , υπολογίζεται η μάζα του υδρατμού που συμπυκνώθηκε σε

$$Kg_{\text{υδρατμού}}/moles_{\text{αέρα}} \quad (2.5)$$

Η ενέργεια που θα δαπανηθεί στο συμπιεστή, θα υπολογιστεί ανά  $Kg$  υδρατμού που συμπυκνώνεται, σύμφωνα με τον παρακάτω υπολογισμό:

Το πρώτο βήμα που θα πρέπει να γίνει, θεωρώντας ότι το μίγμα βρίσκεται σε κατάσταση ιδανικού αερίου, θα είναι να υπολογιστεί η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του μίγματος,  $C_{p\text{μίγματος}}$ . Η θερμοχωρητικότητα του μίγματος υπολογίζεται παίρνοντας τη μέση μοριακή θερμοχωρητικότητα των μερών του μίγματος. Αν  $Y_{\text{υδρατμού}}$  και  $Y_{\text{αέρα}}$  είναι τα μοριακά κλάσματα του υδρατμού και του αέρα στο μίγμα, αντίστοιχα, τότε:

$$\begin{aligned} C_{p\text{μίγματος}} &= Y_{\text{υδρατμού}} C_{p\text{υδρατμού}} + Y_{\text{αέρα}} C_{p\text{αέρα}} \\ &= (moles_{\text{υδρατμού}}/moles_{\text{μίγματος}}) C_{p\text{υδρατμού}} + (moles_{\text{αέρα}}/moles_{\text{μίγματος}}) C_{p\text{αέρα}} \\ &= \left( \frac{P_{\text{SAT}}}{P_1} \right) \cdot C_{p\text{υδρατμού}} + \left( \frac{(P_1 - P_{\text{SAT}})}{P_1} \right) \cdot C_{p\text{αέρα}}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

σε  $Joule/mol.$  μίγματος  $K$ ,

όπου από θερμοδυναμικούς πίνακες λαμβάνεται:

$C_{p\text{υδρατμού}}=1,9 \text{ KJ/Kg } K=34,2 \text{ J/mol.K}$  και  $C_{p\text{αέρα}}=1 \text{ KJ/Kg } K=29 \text{ J/mol.K}$ , για τις ειδικές θερμοχωρητικότητες του υδρατμού και του αέρα, αντίστοιχα.

Θεωρείται ότι η πίεση πριν το συμπιεστή είναι  $P_1$  και η θερμοκρασία  $T_1$ , και ότι ο συμπιεστής προκαλεί μια αύξηση της πίεσης κατά  $\Delta P=0,1 \text{ bar}$ . Οπότε η πίεση μετά το συμπιεστή θα είναι  $P_2=P_1+\Delta P$ .

Θεωρώντας τη συμπίεση ισοεντροπική ( $\Delta S=0$ ), η θερμοκρασία εξόδου του μίγματος από το συμπιεστή θα είναι:

$$T_2' = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R}{C_{p\text{μίγματος}}}}, \text{ σε } K \quad (2.7)$$

όπου  $R=8,314 \text{ J/mol } K$  είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων.

Η πραγματική θερμοκρασία εξόδου του μίγματος από το συμπιεστή θα είναι:

$$T_2 = T_1 + \frac{(T_2' - T_1)}{n}, \text{ σε } K \quad (2.8)$$

όπου  $n=0,75$  λαμβάνεται ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή.

Το ισοεντροπικό έργο του συμπιεστή θα είναι:

$$W_s(\text{ισοεντροπικό}) = C_{p\text{μίγματος}}(T_2' - T_1), \text{ σε } Joule/mole. \text{ μίγματος}, \quad (2.9)$$



ενώ το πραγματικό έργο θα είναι:

$$W_s(\text{πραγματικό}) = W_s(\text{ισοεντροπικό})/\eta, \text{ σε Joule/ mol. μίγματος.} \quad (2.10)$$

Στη συνέχεια διαιρώντας το πραγματικό έργο του συμπιεστή (σχ. (2.10)) με τη σχέση (2.1) υπολογίζεται η ενέργεια που δαπανάται στο συμπιεστή ανά mole. αέρα σε

$$\text{Joule/moles}_{\text{αέρα}} \quad (2.11)$$

Τέλος, διαιρώντας τις σχέσεις (2.11) με την (2.5), υπολογίζεται η ενέργεια που δαπανάται στο συμπιεστή ανά Kgr υδρατμού που συμπυκνώθηκε ή ανά Kgr νερού που παράχθηκε σε

$$\text{Joule/Kgr}(\text{H}_2\text{O}) = \text{KJ/m}^3(\text{H}_2\text{O}), \quad (2.12)$$

αφού η πυκνότητα του νερού είναι  $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$ .

### **β. Λειτουργία της συσκευής με θαλασσινό νερό-Επίδραση αλατιού (NaCl)**

Σ' αυτήν την περίπτωση, όταν η συσκευή λειτουργεί με θαλασσινό νερό, στην υγρή φάση υπάρχουν δύο συστατικά, το αλάτι (NaCl) και το νερό. Συνήθως, η περιεκτικότητα σε αλάτι του θαλασσινού νερού είναι 3%. Οπότε, το μοριακό κλάσμα του νερού στην υγρή φάση είναι  $\chi_i = 0,97$ , ενώ στην αέρια φάση είναι  $y_i = 1$ . Εφαρμόζοντας το νόμο του Raoult,  $y_i P = \chi_i P_{\text{sat.}}$ , για το νερό προκύπτει  $P = 0,97 P_{\text{sat.}}$ . Δηλαδή, η μερική πίεση του υδρατμού στο αέριο μίγμα, τώρα, είναι  $P_{\text{υδρατμού}} = 0,97 P_{\text{sat.}}$ . Επομένως, ο παραπάνω υπολογισμός πρέπει να γίνει με τη νέα μερική πίεση του υδρατμού.

Στο παράρτημα Α παρατίθεται τα διαγράμματα κατανάλωσης ενέργειας στον συμπιεστή. Ο υπολογισμός έγινε από το κ. Χρ. Απόστολου κατά την εκπόνηση της διπλωματικής του εργασίας.

Από τα διαγράμματα αυτά πάρθηκαν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Το πρώτο διάγραμμα απεικονίζει τη δαπάνη ενέργειας στο συμπιεστή σε kWh / m<sup>3</sup> συμπυκνόμενου υδρατμού, συναρτήσει της απομάκρυνσης της πίεσης λειτουργίας  $P_1$  από τις συνθήκες κορεσμού, και της θερμοκρασίας  $T_1$ , για λειτουργία με καθαρό νερό. Το συμπέρασμα είναι ότι μας συμφέρει να λειτουργούμε κοντά στην πίεση κορεσμού, και με όσο το δυνατό υψηλότερη θερμοκρασία. Από το δεύτερο διάγραμμα του παραρτήματος Α προκύπτει ότι η παρουσία αλατιού προκαλεί αύξηση της δαπανώμενης ενέργειας με αναλογικό τρόπο. Στο τρίτο διάγραμμα φαίνεται ότι όσο πιο κοντά στην πίεση κορεσμού είμαστε, και όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία έχουμε τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα συμπυκνώματος που παίρνουμε. Το ίδιο συμπέρασμα βγαίνει και για λειτουργία της συσκευής με θαλασσινό νερό.

Η λειτουργία της συσκευής έδειξε ότι η θεωρία απέχει πολύ από την πράξη. Τα αποτελέσματα που πήραμε, και τα οποία αναλυτικότερα περιγράφονται στο τέταρτο κεφάλαιο,

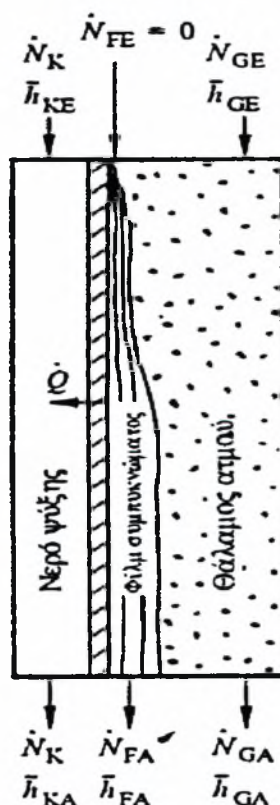
μας ανάγκασαν να αναζητήσουμε τις αιτίες που προκαλούσαν τη μεγάλη διαφορά στην ποσότητα νερού που έπρεπε να πάρουμε και από αυτή που πήραμε. Αφού λοιπόν έγιναν όλες εκείνες τις αλλαγές που περιγράφονται στο τέταρτο κεφάλαιο, αποφασίστηκε η αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής. Παρακάτω περιγράφεται ο αναλυτικός προσδιορισμός της επιφάνειας εναλλαγής, ο οποίος στηρίχθηκε στη μέθοδο που περιγράφεται στο βιβλίο VDI-Warmeatlas

### 2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΝΑΛΛΑΓΗΣ

Η πρότυπη συσκευή αφαλάτωσης στηρίζεται στην επανασυμπίεση θερμού-υγρού αέρα. Στην περίπτωση μας οι ατμοί συμπυκνώνονται στις αντίστοιχες δεδομένες θερμοκρασίες του ψυκτικού μέσου, ενώ ο αέρας δεν συμπυκνώνεται. Κατά την διάρκεια της συμπύκνωσης εμφανίζεται μια αντίσταση συναγωγής στο συμπύκνωμα, μια αντίσταση συναγωγής στην αέρια φάση, και μια αντίσταση μεταφοράς ύλης στην αέρια φάση.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο της συμπύκνωσης προκύπτουν από τα ισοζύγια παροχής και ενέργειας της υγρής και της αέριας φάσης, σε συνδυασμό με τις σχέσεις μεταφοράς και ύλης.

Για το ισοζύγιο παροχής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, ισχύει :



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Ροής Διαδικασίας Συμπύκνωσης

$$N'_{GE} - N'_{GA} = N'_{FA} \quad (2.13)$$

και για το ισοζύγιο θερμότητας ισχύει

$$N'\bar{h}_{GE} - N'_{GA}\bar{h}_{GA} = N'_{FA}\bar{h}_{FA} + Q' \quad (2.14)$$

$$Q' = N'(\bar{h}_{KA} - \bar{h}_{KE}) \quad (2.15)$$

όπου:

$N'$  είναι η γραμμομοριακή ροή σε mole/s,

$\bar{h}$  είναι η γραμμομοριακή ενθαλπία σε J/mole

$Q'$  είναι η θερμοροή σε W

ο δείκτης E δηλώνει την είσοδο στον συμπυκνωτή

ο δείκτης A δηλώνει την έξοδο στον συμπυκνωτή

ο δείκτης K δηλώνει το ψυκτικό μέσο

ο δείκτης G δηλώνει το αέριο

ο δείκτης F δηλώνει το συμπύκνωμα

Τα συστατικά του μίγματος θεωρούμε ότι συμπεριφέρονται ιδανικά, και για θερμοκρασία αναφοράς  $0^\circ \text{C}$  (υγρή κατάσταση) ισχύει :

$$\bar{h}_F = \bar{c}_{PF} T_F \quad (2.16)$$

$$\bar{h}_G = \Delta\bar{h}_V(0^\circ \text{C}) + \bar{c}_{PG} T_G \quad (2.17)$$

$$\Delta\bar{h}_V(T) = \Delta\bar{h}_V(0^\circ \text{C}) + (\bar{c}_{PG} - \bar{c}_{PF}) T \quad (2.18)$$

$$\text{με ενθαλπία εξάτμισης:} \quad \Delta\bar{h}_V(T) = \bar{h}_G(T) - \bar{h}_F(T) \quad (2.19)$$

Όπου :

ο δείκτης G δηλώνει το αέριο

ο δείκτης F δηλώνει το συμπύκνωμα

$T$  είναι η θερμοκρασία

$\bar{h}$  είναι η γραμμομοριακή ενθαλπία σε J/mole

$\bar{c}_P$  είναι η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα σε J/mole K

Οι θερμοκρασίες  $T_G, T_F, T$  τίθενται σε βαθμούς  $^\circ \text{C}$ . Από την εξίσωση (2) συνεπάγεται ότι:

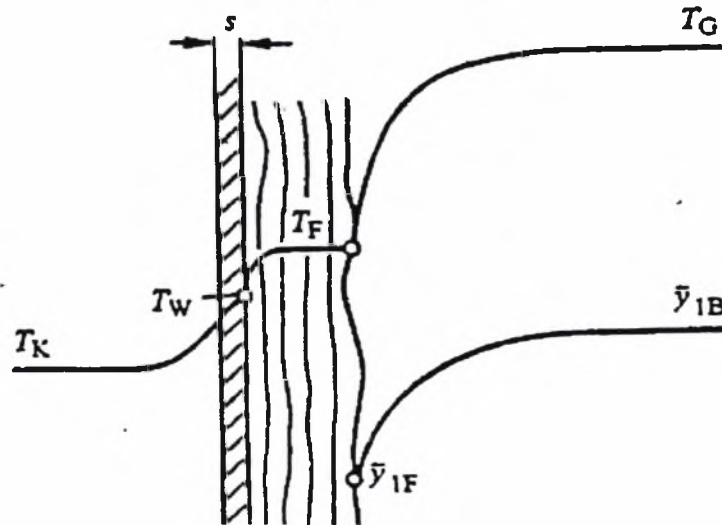
$$Q' = N'_{GE} \bar{c}_{PG} (T_{GE} - T_{GA}) + (N'_{GE} - N'_{GA}) \Delta\bar{h}_V(T_{GA}) + N'_{FA} \bar{c}_{PF} (T_{GA} - T_{FA}) \quad (2.20)$$

Η ολική θερμοροή, που απάγεται προς το ψυκτικό μέσο, αποτελείται από την ψύξη της ροής του αερίου από την  $T_{GE}$  στην  $T_{GA}$ , τη συμπύκνωση του ατμού στην  $T_{GA}$ , και την υπόψυξη του συμπυκνώματος στην  $T_{FA}$ .

Η θέρμανση του ψυκτικού μέσου προκύπτει από την εξίσωση (3)

$$Q' = N'(\bar{h}_{KA} - \bar{h}_{KE}) \quad (2.21)$$

Το σχήμα 2.3 δίνει τις κινητήριες διαφορές της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης για τη μεταφορά θερμότητας και ύλης



Σχήμα 2.3: Προφίλ θερμοκρασίας και περιεκτικότητας.

### Μετάδοση θερμότητας

Η θερμοροή που απάγεται τοπικά προς το ψυκτικό μέσο είναι :

$$q' = k'(T_F - T_K) \quad (2.22)$$

Ο συντελεστής θερμότητας  $k'$  αποτελείται από τους συντελεστές συναγωγής του συμπυκνώματος, του τοιχώματος του σωλήνα και της πλευράς του ψυκτικού μέσου :

$$1/k' = 1/\alpha_F + 1/\lambda_R + 1/\alpha_K \quad (2.23)$$

Η κινητική σχέση για τη θερμοροή  $q_G$  που μεταδίδεται από το αέριο είναι :

$$q_G = \alpha_G E_T (T_G - T_F) \quad (2.24)$$

όπου  $E_T$  είναι η διόρθωση Ackermann

$$E_T = \phi_T / (1 - \exp(-\phi_T)) \quad (2.25)$$

$$\text{με } \phi_T = n' \bar{c}_{PG} / \alpha_G \quad (2.26)$$

όπου  $n'$  είναι η τοπικά συμπυκνούμενη ροή σε  $\text{mol/m}^2\text{s}$

$C_{PG}$  είναι η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα σε J/mole K από πλευράς αερίου, και  $\alpha_G$  ο συντελεστής συναγωγής του αερίου

Ο τοπικός συντελεστής συναγωγής  $\alpha_F$ , στην οριακή περίπτωση όπου παραλείπονται οι διατμητικές τάσεις, υπολογίζεται από τα σχέση

$$Nu_{x,L,T=0} = 0,693((1 - \rho_D/\rho)/Re_{F,x})^{1/3} \quad (2.27)$$

όπου:  $\rho_D$  η πυκνότητα του ατμού σε Kg/m<sup>3</sup>

$\rho$  η πυκνότητα του αερίου σε Kg/m<sup>3</sup>

και  $Re_{F,x}$  είναι ο αριθμός Reynolds ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση

$$Re_{F,x} = \Gamma/n \quad (2.28)$$

$\Gamma$  ορίζεται η ροή μάζας του συμπυκνώματος  $M'_F$  ανοιγμένη στο πλάτος εκροής του συμπυκνώματος  $b = n\pi d$

$$\Gamma = M'_F/n\pi d \quad (2.29)$$

$n$  ο αριθμός των παραλλήλων σωλήνων μέσα στους ποίους ρέει ο ατμός, και  $d$  η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων

Ο τοπικός συντελεστής συναγωγής  $\alpha_F$ , υπολογίζεται από τον τοπικό αριθμό

$$Nu_x = \alpha_{F,x} \varphi / \lambda \quad (2.30)$$

όπου  $\lambda$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του νερού, και  $\varphi$  το χαρακτηριστικό μήκος, το οποίο προκύπτει από το κινηματικό ιξώδες  $\nu$  του συμπυκνώματος και τη βαρύτητα  $g$ :

$$\varphi = (\nu^2 / g)^{1/3} \quad (2.31)$$

Ο συντελεστής συναγωγής του ψυκτικού μέσου είναι πολύ μεγάλος και του δίνουμε μια τιμή προσεγγιστικά κοντά στις 10000 W/m<sup>2</sup>K, ενώ ο συντελεστής συναγωγής του αερίου υπολογίζεται από τη σχέση

$$Nu_x = 3,66 \quad (2.32)$$

και

$$Nu_x = 1,615 \sqrt[3]{Re Pr di/l} \quad (2.33)$$

για μικρές και μεγάλες τιμές  $Re Pr di / x$  αντίστοιχα.

### Μεταφορά ύλης

Κατά τη συμπύκνωση καθαρού ατμού παρουσία αδρανούς αερίου, στη αέρια φάση εμφανίζεται μια αντίσταση μεταφοράς ύλης. Το ρεύμα ύλης που συμπυκνώνεται τοπικά καθορίζεται από τη διαφορά μεταξύ της περιεκτικότητας του πυρήνα της ροής και της επιφάνειας του συμπυκνώματος (σχήμα 2.3)

$$n' = n_G \beta_G \ln((r_1' - \bar{y}_{1F}) / (r_1' - \bar{y}_{1B})) \quad (2.34)$$

όπου:

$n'$  είναι η τοπικά συμπυκνούμενη ροή σε mol/m<sup>2</sup>s,

$n$  η γραμμομοριακή πυκνότητα σε mol/m<sup>3</sup>

$\beta_G$  ο συντελεστής μεταφοράς ύλης από πλευράς αερίου, σε m/s

$$r_1 = n_1' / n' \quad (2.35),$$

όπου ο δείκτης 1 δηλώνει τον ατμό και ο δείκτης 2 αέριο

$$\bar{y}_{1B} = N_{G1}' / N_G' \quad (2.36),$$

Όπου  $N'$  είναι η γραμμομοριακή ροή

Ο δείκτης G δηλώνει το αέριο, ο δείκτης B δηλώνει τον πυρήνα της ροής, και  $\bar{y}$  είναι το μοριακό κλάσμα στην αέρια φάση.

Ο συντελεστής μεταφοράς ύλης  $\beta_G$  προκύπτει από τις ίδιες εξισώσεις με τις οποίες υπολογίζεται και ο συντελεστής συναγωγής  $\alpha_G$ , αν στη θέση των αριθμών  $Nu$  και  $Pr$  τεθούν οι αριθμοί  $Sh$  και  $Sc$ .

Εδώ βασίζεται και η σχέση του Lewis, μια προσέγγιση η οποία συσχετίζει το συντελεστή συναγωγή με τον συντελεστή μεταφοράς ύλης:

$$\alpha_G = n_G \beta_G \bar{c}_{PG} Le^{0.6} \quad (2.37)$$

$$\text{με αριθμό Lewis: } Le = \lambda_G / n_G \bar{c}_{PG} \delta_G \quad (2.38)$$

όπου ο δείκτης G δηλώνει το αέριο,  $\bar{c}_{PG}$  είναι η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα σε J/mole K από πλευράς αερίου,  $n$  η γραμμομοριακή πυκνότητα σε mol/m<sup>3</sup>, και  $\lambda$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Κατά την συμπύκνωση καθαρού ατμού, σε ροή ατμού /αερίου μειώνεται κατά μήκος της διαδρομής συμπύκνωσης η περιεκτικότητα σε ατμό και η θερμοκρασία της ροής αερίου / ατμού. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται και οι κινητήριες διαφορές της πυκνότητας και της θερμοκρασίας. Για τον προσδιορισμό της τοπικής ροής της ύλης  $n'$  και της τοπικής θερμοροής  $q'$ , απαιτείται η τοπική θερμοκρασία του συμπυκνώματος  $T_F$

### Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του συμπυκνώματος

Στη συμπύκνωση καθαρών κορεσμένων ατμών, η ολική αντίσταση συναγωγής βρίσκεται στο συμπύκνωμα και στο ψυκτικό μέσο. Αν ο ατμός περιέχει επιπρόσθετα και αδρανές αέριο, στην περίπτωση μας αέρα, τότε αυτό συσσωρεύεται συμπαρασυρόμενο από την ροή του ατμού. Αποτέλεσμα είναι η μείωση της μερικής πίεσης του ατμού  $p_1$  και του μοριακού κλάσματος του ατμού  $y_{1F}$  στην επιφάνεια του συμπυκνώματος. Έτσι μειώνεται η θερμοκρασιακή διαφορά  $T_F - T_K$  μεταξύ του συμπυκνώματος και του ψυκτικού μέσου. Η θερμοκρασία του συμπυκνώματος  $T_F$  μπορεί να προσδιοριστεί με τις σχέσεις της μετάδοσης θερμότητας :

$$N'_F \bar{c}_{PF} (dT_F / dA) + k'(T_F - T_K) = n' \Delta \bar{h}_{v1}(T_F) + \alpha_G E_T (T_G - T_F) \quad (2.39)$$

όπου:

ο δείκτης K δηλώνει το ψυκτικό μέσο

ο δείκτης G δηλώνει το αέριο

ο δείκτης F δηλώνει το συμπύκνωμα

$N'$  είναι η γραμμομοριακή ροή σε mole/s,

$\bar{c}_F$  είναι η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα σε J/mole K

$\Delta \bar{h}_v(T)$  είναι η γραμμομοριακή ενθαλπία εξάτμισης σε J/mole

$dA$  είναι η διαφορική επιφάνεια εναλλαγής

$T$  είναι η θερμοκρασία

$k'$  ο συντελεστής θερμότητας

$\alpha_G$  ο συντελεστής συναγωγής του αερίου

$E_T$  είναι η διόρθωση Ackermann  $E_T = \varphi_T / (1 - \exp(-\varphi_T))$

Αν ο ατμός συμβολιστεί με δείκτη 1, και το αδρανές αέριο με δείκτη 2, τότε με  $n'_2 = 0$ , προκύπτουν οι σχέσεις  $n'_1 = n'$  και  $r_1 = 1$  και συνεπώς, λόγω της σχέσης (21) προκύπτει ότι :



$$n_1' = n_G \beta_G \ln((1 - \bar{y}_{1F}(T_F)/(1 - \bar{y}_{1B})) \quad (2.40)$$

όπου: Ο δείκτης F δηλώνει το συμπύκνωμα, ο δείκτης B δηλώνει τον πυρήνα της ροής,  $n_1'$  είναι η τοπικά συμπυκνωμένη ροή σε mol/m<sup>2</sup>s,  $N$  η γραμμομοριακή πυκνότητα σε mol/m<sup>3</sup>,  $\beta_G$  ο συντελεστής μεταφοράς ύλης από πλευράς αερίου, σε m/s,  $\bar{y}_{1,s} = N_{s,1}' / N_{s,1}'$ ,

όπου  $N'$  είναι η γραμμομοριακή ροή. Επειδή ισχύει  $\bar{y}_1 + \bar{y}_2 = 1$  η σχέση (26) γίνεται

$$n_1' = n_G \beta_G \ln(\bar{y}_{2F}(T_F)/(\bar{y}_{2B})) \quad (2.40 \alpha)$$

Επειδή στην επιφάνεια του συμπυκνώματος επικρατεί ισορροπία και ο αέρας είναι κορεσμένος, ισχύει:

$$y_{1F} = p_1^*(T_F)/p \quad (2.40 \beta)$$

Η τάση ατμών  $p_1^*$  μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες σχέσεις, όπως π.χ. με την εξίσωση του Antoine:

$$\ln p_1^* = A - B/(C + T) \quad (2.41)$$

Οι τιμές των A, B, C δίνονται στη βιβλιογραφία για όλες σχεδόν τις ουσίες που είναι σημαντικές στην τεχνική.

Κατά τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του συμπυκνώματος, αμελούμε την μεταβολή της ενθαλπίας του συμπυκνώματος. Έτσι από την εξίσωση (2.39) προκύπτει η εξίσωση προσδιορισμού της θερμοκρασίας του συμπυκνώματος  $T_F$ , η οποία λύνεται με δοκιμή και επαλήθευση:

$$k'(T_F - T_K) = n_G \beta_G \Delta \bar{h}_{V1} \ln(\bar{y}_{2F}(T_F)/(\bar{y}_{2B})) + \alpha_G E_T (T_G - T_F) \quad (2.42)$$

$$\text{με } \phi_T = n_1' \bar{c}_{PG1}/a_G = n_G \beta_G \bar{c}_{PG1}/a_G \ln(\bar{y}_{2F}(T_F)/\bar{y}_{2B}) \quad (2.43\alpha)$$

Με τη χρήση της σχέσης του Lewis (εξίσωση (24)) η παραπάνω σχέση γίνεται

$$\phi_T = \bar{c}_{PG1} / \bar{c}_{PG} Le^{0.6} \ln(\bar{y}_{2F} / \bar{y}_{2B}) \quad (2.43\beta)$$

Αν είναι γνωστή η θερμοκρασία του συμπυκνώματος  $T_F$  μπορεί να υπολογιστεί η ροή ύλης  $n_1'$  που συμπυκνώνεται τοπικά, από την εξίσωση (2.40a), και η θερμοροή  $q'$  που απάγεται από την εξίσωση (2.22).

### Προσδιορισμός των τοπικών παροχών ροής

Αφού η ροή του αδρανούς αερίου  $N_{G2}'$  (σε mole/s) είναι σταθερή κατά την διάρκεια της συμπύκνωσης, η τοπική περιεκτικότητα σε αδρανές αέριο προκύπτει από τη σχέση:

$$\bar{y}_{2B,i} = N_{G2}' / N_{G,i}' = N_{G2}' / (N_{G1,i}' + N_{G2}') \quad (2.44)$$



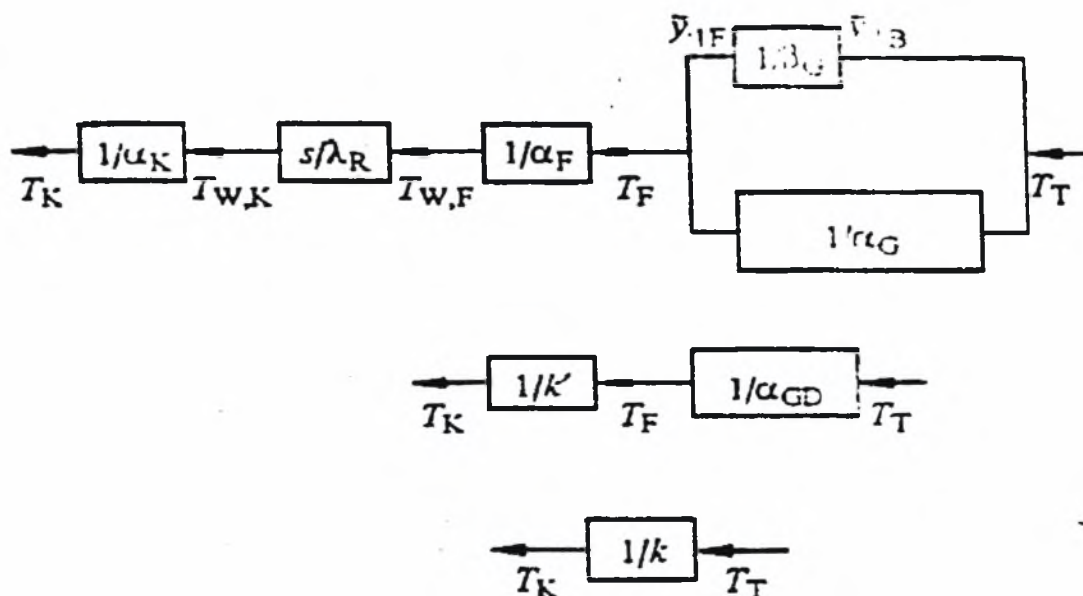
Η ροή ύλης  $n_1$  που συμπυκνώνεται τοπικά και η θερμοροή  $q'$  που παράγεται, προκύπτουν με τη βοήθεια της θερμοκρασίας του συμπυκνώματος, η οποία προσδιορίζεται με τη μέθοδο δοκιμής και επαλήθευσης. Προς αυτό απαιτούνται οι τοπικές θερμοκρασίες του συμπυκνώματος, του μίγματος αερίου-ατμού και του ψυκτικού μέσου, καθώς και οι τοπικές σταθερές ύλης και οι συντελεστές μεταφοράς.

### Προσδιορισμός της τοπικής θερμοκρασίας $T_G$ του μίγματος αερίου-ατμού

Όταν πρόκειται για κορεσμένα μίγματα αερίου-ατμού, η τοπική θερμοκρασία του μίγματος  $T_G$  είναι σε κάθε θέση ίση με τη θερμοκρασία υγροποίησης  $T_T(\bar{y}_{1B})$ , που αντιστοιχεί στην τοπική περιεκτικότητα του ατμού, και η οποία υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης (2.41). Αν σε κάποιο σημείο η θερμοκρασία πέσει κάτω από τη θερμοκρασία υγροποίησης  $T_T(\bar{y}_{1B})$ , τότε μπορεί να σχηματιστεί νέφος. Για το λόγο αυτό, όταν επιτευχθεί η θερμοκρασία υγροποίησης, το μίγμα αερίου ατμού στην παραπέρα πορεία της συμπύκνωσης θεωρείται κορεσμένο, και η  $T_G$  υπολογίζεται από την εξίσωση (2.41). Η θερμοκρασία  $T_K$  θεωρείται σταθερή κατά το μήκος της διαδρομής συμπύκνωσης.

### Κατανομή των αντιστάσεων στην αέρια φάση, στο συμπύκνωμα και στο ψυκτικό μέσο

Στην σχήμα 2.4 φαίνονται οι μεμονωμένες αντιστάσεις που καθορίζουν την συμπύκνωση.



**Σχήμα 2.4 :** Συντελεστές αντίστασης συναγωγής θερμότητας και μεταφοράς ύλης στην αέρια φάση, στο συμπύκνωμα και στο ψυκτικό μέσο

Στο σχήμα 2.4, η μεταφορά θερμότητας κατευθύνεται από μέσα προς τα έξω, δηλαδή από δεξιά προς τα αριστερά. Οι παράλληλες αντιστάσεις συναγωγής θερμότητας και μεταφοράς ύλης  $1/a_G$  και  $1/\beta_G$  στην αέρια φάση, και οι αντιστάσεις συναγωγής θερμότητας στο συμπύκνωμα  $1/a_F$ , στο τοίχωμα του σωλήνα  $s/\lambda_R$ , και στο ψυκτικό μέσο  $1/a_K$ , είναι διατεταγμένες στη σειρά .

Ένα απλοποιημένο παράδειγμα σύζευξης προκύπτει αν εισαχθούν οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας  $k$  και  $k'$ , και ο υποθετικός συντελεστής συναγωγής του μίγματος αερίου-ατμού  $a_{GD}$ . Με τον υπολογισμό της θερμοκρασίας  $T_F$  του συμπυκνώματος από τη εξίσωση (2.41), μπορούν να προσδιοριστούν οι λόγοι των αντιστάσεων από τη σχέση :

$$q' = k(T_T - T_K) = k'(T_F - T_K) = a_{GD}(T_T(y_{1B}) - T_F) \quad (2.45)$$

όπου:

$k$  και  $k'$  οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας,

$a_{GD}$  υποθετικός συντελεστής συναγωγής του μίγματος αερίου-ατμού

$q'$  η θερμορροή

$T_T(\bar{y}_{1B})$  θερμοκρασία υγροποίησης,  $T$  είναι η θερμοκρασία και

ο δείκτης K δηλώνει το ψυκτικό μέσο

ο δείκτης F δηλώνει το συμπύκνωμα.

Η θερμοκρασία του συμπυκνώματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου και μικρότερη από τη θερμοκρασία υγροποίησης

$(T_K < T_F < T_T)$ . Η αντίσταση στην αέρια φάση είναι καθοριστική όταν ο λόγος

$$k'/a_{GD} = (T_T(y_{1B}) - T_F)/(T_F - T_K) \quad (2.46)$$

είναι μεγάλος ( $(k' > a_{GD}, k \equiv a_{GD}, T_F \equiv T_K)$ ), σχήμα 2.4).

Αντίστοιχα όταν ο λόγος  $k'/a_{GD}$  είναι μικρός ( $k' \ll a_{GD}, T_F \equiv T_T$ ), η ολική αντίσταση βρίσκεται από την πλευρά του ψυκτικού μέσου ( $k' = k$ )

Η θέση της θερμοκρασίας  $T_F$  του συμπυκνώματος μεταξύ της θερμοκρασίας  $T_G$  του αερίου, και της θερμοκρασίας  $T_K$  του ψυκτικού μέσου εξαρτάται από την κατανομή των αντιστάσεων συναγωγής θερμότητας και μεταφοράς ύλης. Η κατανομή των αντιστάσεων μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της συμπύκνωσης, αφού το αδρανές αέριο συσσωρεύεται στο

μίγμα ατμού - αερίου. Σε πολλές περιπτώσεις, με τον υπολογισμό των θερμοκρασιών  $T_{FE}$  και  $T_{FA}$  του συμπυκνώματος στην είσοδο και στην έξοδο του συμπυκνωτή αντίστοιχα, μπορεί να προσδιοριστεί αν η συνολική διεργασία συμπύκνωσης καθορίζεται από την συναγωγή θερμότητας ή από την μεταφορά ύλης.

### Συμπύκνωση που καθορίζεται από την συναγωγή θερμότητας

Αφού στην έξοδο του συμπυκνωτή το μίγμα έχει τη μικρότερη τελική περιεκτικότητα σε ατμό, δηλαδή την υψηλότερη περιεκτικότητα σε αδρανές αέριο, πρέπει να ελεγχθεί αν στην έξοδο είναι καθοριστική η αντίσταση συναγωγής θερμότητας. Ως πρακτικός κανόνας αναφέρεται ότι η συνολική διεργασία συμπύκνωσης καθορίζεται από τη συναγωγή θερμότητας εφόσον στην έξοδο ισχύει

$$(k'/a_{GD})_A < 0,5$$

όπου,  $k'$  είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, και

$a_{GD}$  ο υποθετικός συντελεστής συναγωγής του μίγματος αερίου-ατμού, ενώ ο δείκτης A δηλώνει την έξοδο.

Η σχέση αυτή ικανοποιείται για μικρή περιεκτικότητα σε αδρανές αέριο, για υψηλές τιμές των  $\alpha_G$  και  $\beta_G$ , και για υψηλές ταχύτητες αερίου, όπου  $\beta_G$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς ύλης και  $\alpha_G$  ο συντελεστής συναγωγής.

Η επιφάνεια εναλλαγής σε αυτή την περίπτωση προκύπτει από την εξίσωση

$$A = Q' / (k' \Delta T_M) \quad (2.47)$$

όπου  $\Delta T_M$  είναι η μέση κινητήρια θερμοκρασιακή διαφορά, που υπολογίζεται με βάση τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του συμπυκνώματος, και τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ψυκτικού μέσου. Η συνολικά απαγόμενη θερμορροή  $Q'$  υπολογίζεται από το ολοκληρωμένο ισοζύγιο, ενέργειας, της, εξίσωσης: (2.20)

$$Q' = N'_{GE} \bar{c}_{PG} (T_{GE} - T_{GA}) + (N'_{GE} - N'_{GA}) \Delta \bar{h}_V (T_{GA}) + N'_{FA} \bar{c}_{PF} (T_{GA} - T_{FA})$$

με ενθαλπία εξάτμισης

$$\Delta \bar{h}_V (T) = \bar{h}_G (T) - \bar{h}_F (T) \quad (2.19)$$

όπου, ο δείκτης G δηλώνει το αέριο

ο δείκτης F δηλώνει το συμπύκνωμα

$T$  είναι η θερμοκρασία, και  $N'$  είναι η γραμμομοριακή ροή σε mole/s,

### Συμπύκνωση που καθορίζεται από την μεταφορά ύλης

Επειδή στην πορεία της συμπύκνωσης συσσωρεύεται το αδρανές αέριο, αυξάνεται η αντίσταση μεταφοράς ύλης. Γι' αυτό πριν από όλα πρέπει να ελέγχεται αν στην είσοδο του συμπυκνωτή είναι καθοριστική η αντίσταση μεταφοράς ύλης. Με τη θερμοκρασία του συμπυκνώματος  $T_{FE}$  στην είσοδο υπολογίζεται από την εξίσωση (2.46) ο λόγος των αντιστάσεων  $(k'/a_{GD})_E$ . Στην περίπτωση που είναι  $(k'/a_{GD})_E > 2$  εφαρμόζεται η μέθοδος υπολογισμού που θα περιγραφεί παρακάτω. Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται για υψηλές περιεκτικότητες σε αδρανές αέριο και για χαμηλές τιμές των  $\alpha_G$  και  $\beta_G$ , και για χαμηλές ταχύτητες αερίου, όπου  $\beta_G$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς ύλης και  $\alpha_G$  ο συντελεστής συναγωγής.

Όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία  $T_F$  του συμπυκνώματος μπορεί να υπολογιστεί η ροή της ύλης  $n_1'$  που συμπυκνώνεται τοπικά, καθώς και η μείωση της παροχής του αερίου  $N_G'$  που προκύπτει από αυτή την συμπύκνωση.

Αποδεικνύεται ότι με τη θεώρηση σταθερής θερμοκρασίας  $T_F$  του συμπυκνώματος και επομένως σταθερής περιεκτικότητας σε αδρανές αέριο  $y_{2F}$  (νόμος του Antoine) στην επιφάνεια του φιλμ, μπορεί να ολοκληρωθεί κλειστά το διαφορικό ισοζύγιο παροχής. Από τα ισοζύγια

$$dN_G' = -n_1' dA \quad (2.48)$$

$$N_{G2}' = N_G \bar{y}_{2B} \quad (2.49)$$

και τη σχέση μεταφοράς ύλης

$$n_1' = n_G \beta_G \ln(\bar{y}_{2F}(T_F)/\bar{y}_{2B}) \quad (2.40a)$$

όπου  $n_1'$  είναι η ροή ύλης που συμπυκνώνεται τοπικά, και

$N'$  είναι η γραμμομοριακή ροή σε mole /s,

προκύπτει η αδιάστατη επιφάνεια εναλλαγής με την απλοποιημένη υπόθεση σταθερής πυκνότητας αερίου και σταθερών συντελεστών μεταφοράς ύλης.

$$n_G \beta_G A / N_{G2}' = (-1/\bar{y}_{2F}) \int_{x_E}^{x_A} dx / \ln x \quad (2.50)$$

$$\text{με } x = \bar{y}_{2F} / \bar{y}_{2B} \quad (2.51)$$

$$\text{Με το χαρακτηριστικό μέγεθος } NTU_{G2} \equiv n_G \beta_G A / N_{G2}' \quad (2.52)$$

και το λογαριθμικό ολοκλήρωμα

$$Li(x) = \int dx / \ln x = \ln(\ln x) + \ln x + (\ln x)^2 / 2 \cdot 2! + (\ln x)^3 / 3 \cdot 3! + \dots \quad (2.53)$$

$$\text{προκύπτει: } NTU_{G2} = 1/\bar{y}_{2F} [Li(x_E) - Li(x_A)] \quad (2.54)$$

Η σειρά συγκλίνει μετά από τέσσερις ή πέντε όρους της σειράς. Η ελάχιστη επιφάνεια εναλλαγής Α μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (2.54)

όπου  $n_G$  είναι η γραμμομοριακή πυκνότητα του αερίου, και  $\beta_G$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς ύλης.

Για τον υπολογισμό των σταθερών ύλης χρησιμοποιήθηκαν ειδικές σχέσεις, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.



### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η εργαστηριακή συσκευή αφαλάτωσης. Συγκεκριμένα, περιγράφονται αναλυτικά τα διάφορα μέρη της συσκευής, και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή και την συναρμολόγηση αυτών των τμημάτων. Τέλος παρουσιάζεται η διαδικασία βαθμονόμησης του συμπιεστή και του υγρασιόμετρου.

#### 3.1 Κατασκευή της συσκευής

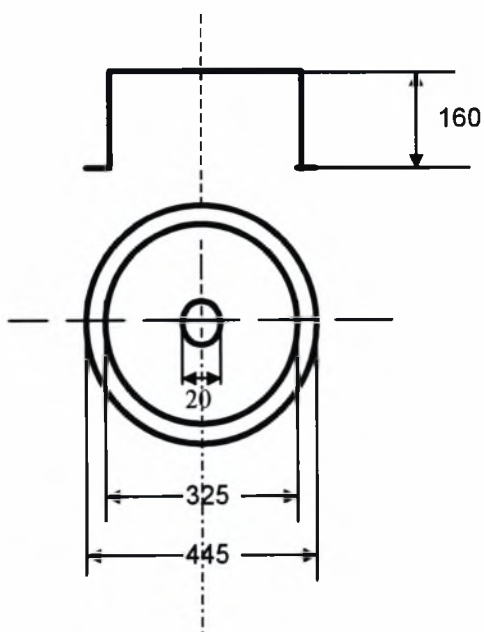
Στο σχήμα 3.2 φαίνεται το σκαρίφημα της συσκευής. Τα τμήματα , τα οποία αποτελούν την συσκευή, είναι:

##### 1. Συμπιεστής

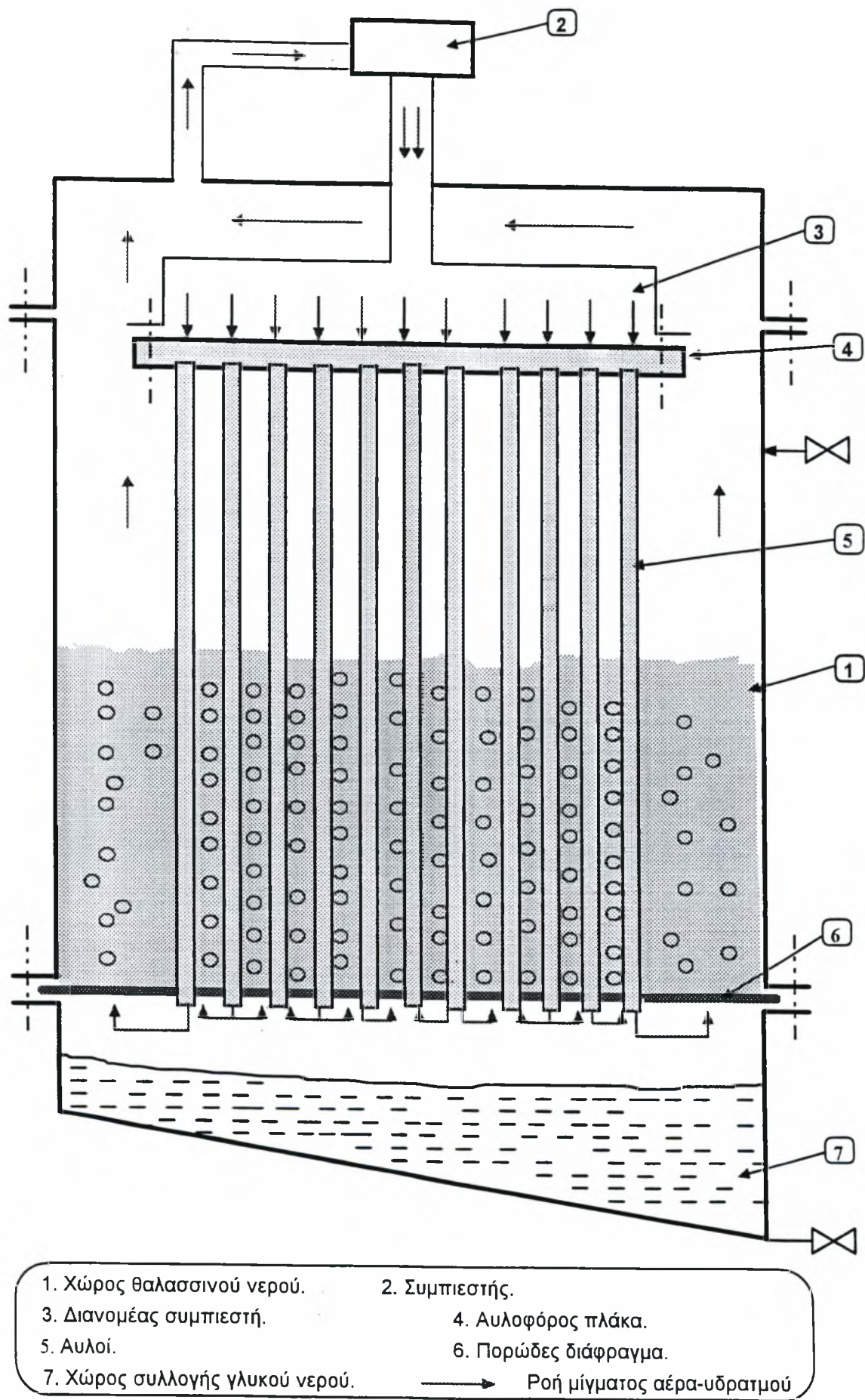
Ο συμπιεστής είναι ένας μικρός εργαστηριακός συμπιεστής τύπου DTE 6 της κατασκευάστριας εταιρείας PICOLINO. Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του συμπιεστή είναι η παροχή του  $6,0 / 7,2 \text{ m}^3/\text{h}$ , η ονομαστική του ισχύς  $0,25/0,30 \text{ kW}$  και η ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα  $2750/3300 \text{ min}^{-1}$  στα  $50/60 \text{ Hz}$  , η οποία μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πίεσης κατά  $\Delta p_{\max}=1 \text{ bar}$ . Όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τα κατασκευαστικά στοιχεία του συμπιεστή βρίσκονται στο διαφημιστικό φυλλάδιο του που περιέχεται στο παράρτημα.

##### 2. Καπάκι

Το σκαρίφημα του καπακιού 1 σε όψη και κάτοψη φαίνεται στο σχήμα 3.1. Πρόκειται για ένα κυλινδρικό τεμάχιο, το οποίο είναι κατασκευασμένο από πολυεστέρα στις εγκαταστάσεις της εταιρείας Τσιανάκας Α.Ε., που βρίσκεται στη βιομηχανική περιοχή Βόλου.



Σχήμα 3.1: Σκαρίφημα καπακιού 1.

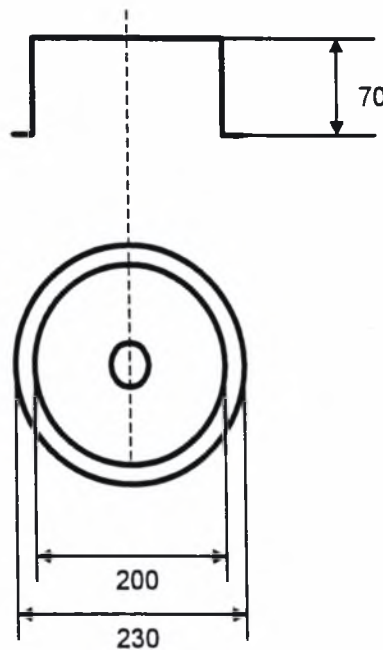


**Σχήμα 3.2:** Αρχή λειτουργίας πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης

### 3. Διανομέας συμπιεστή

Ο διανομέας του συμπιεστή χρησιμεύει για να διανέμει ομοιόμορφα το αέριο μίγμα αέρα-υδρατμού, που έρχεται από τον συμπιεστή, στους αυλούς. Το σκαρίφημα του διανομέα του συμπιεστή σε όψη και κάτοψη φαίνεται στο σχήμα 3.3.

Ο διανομέας κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο και το υλικό κατασκευής του είναι μπρούντζος. Το πάχος του τοιχώματος είναι τέτοιο ώστε να αντέχει σε πιέσεις τάξεις ως και 2 bar.



Σχήμα 3.3: Σκαρίφημα διανομέα συμπιεστή.

### 4. Αυλοφόρος πλάκα

Η αυλοφόρος πλάκα είναι ένας κυλινδρικός δίσκος διαμέτρου 230 mm και πάχους 20 mm, πάνω στην οποία έχουν ανοιχτεί οπές για την στήριξη αυλών. Η στήριξη των αυλών πάνω στην αυλοφόρο πλάκα έγινε με εκτόνωση του τμήματος των αυλών που εφάπτεται στις οπές, με ειδικό εκτονωτικό εργαλείο. Το υλικό της αυλοφόρου πλάκας είναι μπρούντζος.

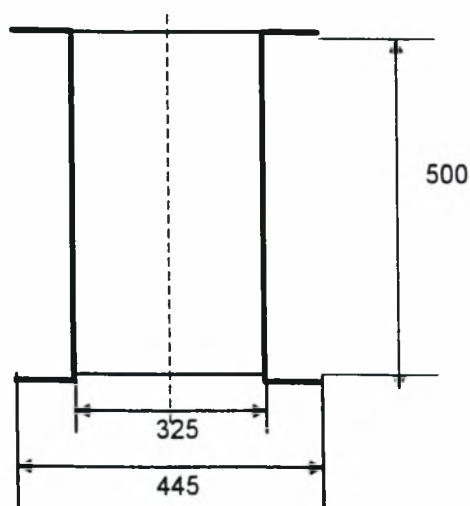
### 5. Αυλοί

Οι αυλοί είναι χαλκοσωλήνες του εμπορίου 3/4 in με εσωτερική διάμετρο 8,5mm και εξωτερική 10 mm, και έχουν μήκος 500mm. Οι αυλοί έχουν τοποθετηθεί στην αυλοφόρο πλάκα και οι οπές έχουν ανοιχτεί έτσι ώστε ανά τρεις να σχηματίζουν ισόπλευρο τρίγωνο. Το πλήθος των αυλών είναι 25.

## 6. Κέλυφος

Το κέλυφος αποτελεί το κεντρικό τμήμα της συσκευής, όπου γίνεται η εξάτμιση, και περιέχει τους αυλούς μέσα στους οποίους γίνεται η συμπύκνωση του υδρατμού. Το σκαρίφημα του κελύφους φαίνεται στο σχήμα 3.4.

Πρόκειται για ένα κυλινδρικό τεμάχιο το οποίο είναι κατασκευασμένο και αυτό από πολυεστέρα, όπως και το καπάκι 1.



Σχήμα 3.4: Σκαρίφημα κελύφους

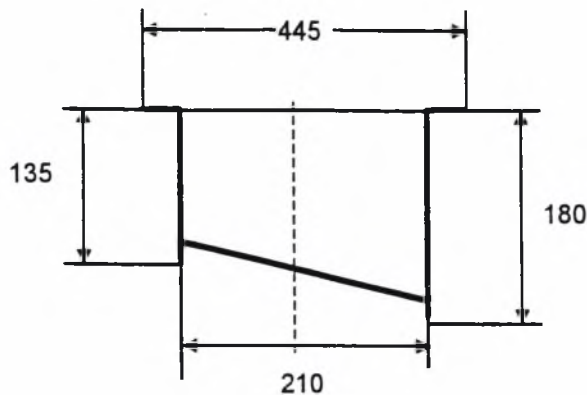
## 7. Πορώδες διάφραγμα

Το πορώδες διάφραγμα βρίσκεται ανάμεσα στο κέλυφος και στο καπάκι 2. Αποτελεί τον πάτο του κελύφους. Είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα, με την τεχνική της κονιομεταλλουργίας και αφήνει να περνάει ο αέρας, αλλά όχι το νερό. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού του υλικού υπάρχουν στο φυλλάδιο που περιέχεται στο παράρτημα. Πάνω στο πορώδες διάφραγμα έχουν ανοιχτεί οπές σύμφωνα με τη διάταξη των αυλών, για να στηριχτούν οι αυλοί.

## 8. Καπάκι 2

Το καπάκι 2 αποτελεί το κάτω μέρος της συσκευής όπου καταλήγει ο υδρατμός που συμπυκνώνεται στους αυλούς, δηλαδή είναι ο χώρος συλλογής του γλυκού νερού. Είναι κατασκευασμένο από πολυεστέρα και πρόκειται για ένα κυλινδρικό τεμάχιο του οποίου η κάτω βάση είναι κεκλιμένη. Το σκαρίφημα του καπακιού φαίνεται στο σχήμα 3.5.

Στο παράρτημα δίνονται τα σκαριφήματα, αλλά και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες πολλών τμημάτων της συσκευής.



**Σχήμα 3.5:** Σκαρίφημα καπακιού 2.

### 3.2 Συναρμολόγηση της συσκευής

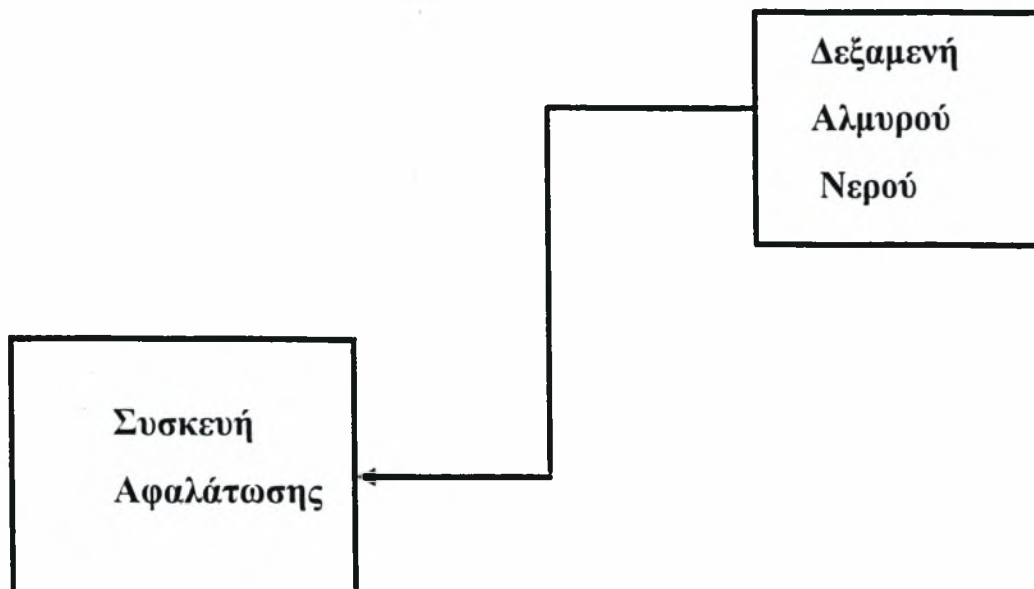
Η συναρμολόγηση της συσκευής έγινε στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών. Όπως προαναφέρθηκε, το κέλυφος κατασκευάστηκε σε συνεργασία με την εταιρία Τσιανάκας Α.Ε.. Το υλικό είναι πολυεστέρας και ο λόγος χρησιμοποίησης του είναι η αντοχή του σε διάβρωση, η δυνατότητα οπτικής παρατήρησης της στάθμης του νερού καθώς και το μικρό βάρος σε σύγκριση μετά άλλα υλικά. Το κέλυφος αποτελείται από τρία τμήματα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κοχλίες σύσφιξης. Η κατεργαστικότητα του υλικού είναι ένας επιπλέον λόγος χρησιμοποίησης του καθώς οι περισσότερες συνδέσεις με τα υπόλοιπα τμήματα της συσκευής έγιναν στο εργαστήριο Φ.Χ.Δ.

Η στεγανοποίηση έγινε με τη βοήθεια ελαστομερούς σιλικόνης (αντοχή μέχρι και  $200^{\circ}\text{C}$ ) καθώς και στεγανοποιητικής κόλλας σιλικόνης (LOGO). Ανάμεσα από τα διάφορα τμήματα του κελύφους τοποθετήθηκε φλάντζα από λάστιχο εμπορίου για περαιτέρω στεγανοποίηση.

Η εισαγωγή του αλμυρού νερού βασίστηκε στο νόμο της βαρύτητας. Η δεξαμενή αλμυρού νερού τοποθετήθηκε ψηλότερα από τη συσκευή όπως φαίνεται στο σχήμα. Για την εισαγωγή και την εξαγωγή του νερού από τη συσκευή χρησιμοποιήθηκαν βάνες εμπορίου. Τα παραπάνω στεγανοποιητικά υλικά εφαρμόστηκαν για την στεγανοποίηση στα σημεία σύνδεσης των βανών.

Η σύνδεση του συμπιεστή με τη συσκευή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ελαστικών σωλήνων κατάλληλης διαμέτρου. Η προμήθεια των ρακόρ και των συνδέσμων έγινε από καταστήματα υδραυλικών ανάλογα με την συνδεσμολογία. Ωστόσο απαραίτητη προϋπόθεση ήταν το υλικό κατασκευής να είναι ορείχαλκος ή χαλκός για καλύτερη αντοχή σε διάβρωση και οξείδωση. Η στεγανοποίηση του διαφράγματος επιτεύχθηκε με τη βοήθεια ελαστικών ροδελών σιλικόνης.





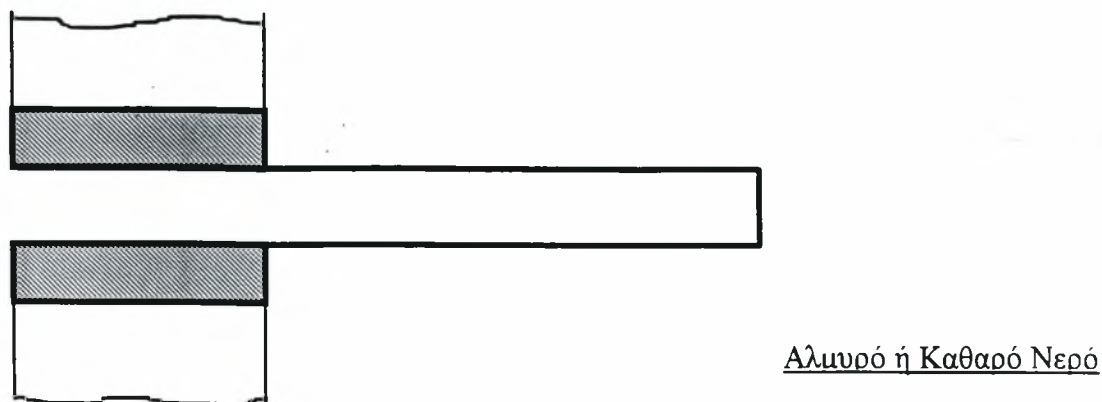
**Σχήμα 3.6 :** Τροφοδότηση αλμυρού νερού στη συσκευή αφαλάτωσης

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε την προσπάθεια αποφυγής συγκολλήσεων σε οποιοδήποτε τμήμα της συσκευής. Η χαμηλή αντοχή στη διάβρωση, η δυσκολία αποσυναρμολόγησης αλλά και η δυσκολία επέμβασης σε περίπτωση διαρροών, είναι μερικοί από τους λόγους που καθιστούν την συγκόλληση απαγορευτική μέθοδο συναρμολόγησης στην προτεινόμενη συσκευή αφαλάτωσης.

### **3.3 Όργανα μέτρησης**

Για την μέτρηση των θερμοκρασιών χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K, τα οποία τοποθετήθηκαν σε διάφορες θέσεις πάνω στη συσκευή. Η μέθοδος πρόσδεσης των θερμοστοιχείων βασίζεται στη θεωρία του προβόλου. Κατασκευάστηκε ένας πρόβολος, με εσωτερική οπή λίγο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του θερμοστοιχείου (σχήμα 3.7). Η απόκλιση της μέτρησης είναι της τάξης των 2-3 °C.

Η μέτρηση της διαφοράς πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο του συμπιεστή έγινε με τη βοήθεια ενός υδραργυρικού μανομέτρου το οποίο κατασκευάστηκε στο εργαστήριο. Τέλος η μέτρηση της υγρασίας του αέρα λίγο πριν την είσοδο στον συμπιεστή έγινε με τη βοήθεια υγρασιόμετρου. Η μέτρηση της υγρασίας του αέρα είναι απαραίτητη για τον έλεγχο κορεσμού του αέρα σε σχέση με το ύψος της στήλης του νερού.



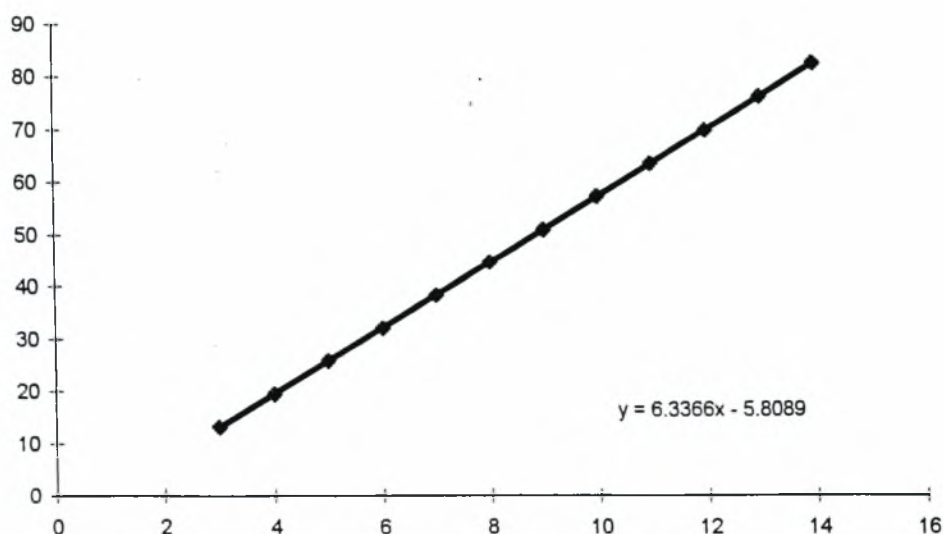
Σχήμα 3.7: Τρόπος Πρόσδεσης του θερμοστοιχείου πάνω στη συσκευή

### 3.4 Βαθμονόμηση Υγρασιομέτρου-Χαρακτηριστική καμπύλη συμπίεστη

Η βαθμονόμηση του υγρασιομέτρου έγινε με βάση τη σχέση που συνδέει την ένταση του ρεύματος και την υγρασία :

$$RH=C_1+C_2I$$

Αρχικά τοποθετήθηκε το υγρασιόμετρο σε διάλυμα σταθερής υγρασίας 75,3% και στη συνέχεια σε διάλυμα σταθερής υγρασίας 11,3%. Και στις δυο περιπτώσεις η μέτρηση της έντασης του ρεύματος έγινε αφού είχε περάσει αρκετός χρόνος παραμονής του υγρασιομέτρου στο διάλυμα. Στο σχήμα 3.8 απεικονίζεται η γραμμική εξάρτηση της υγρασίας και της έντασης του ρεύματος, καθώς και οι σταθερές  $C_1$  και  $C_2$ .

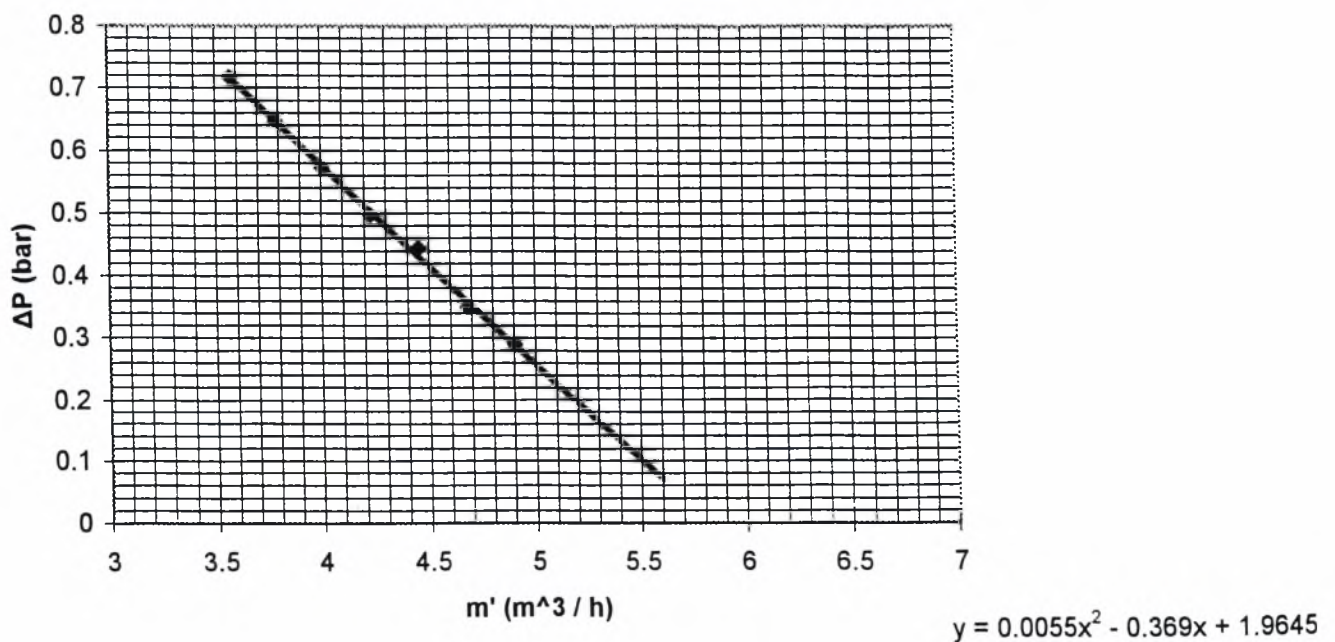


Σχήμα 3.8 :Βαθμονόμηση υγρασιομέτρου

Από την κατασκευαστική εταιρεία του συμπιεστή δίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη του συμπιεστή. Ωστόσο αυτή σπάνια συμπίπτει με την πραγματική χαρακτηριστική καμπύλη του συμπιεστή, για διάφορους λόγους. Η πραγματική καμπύλη του συμπιεστή προέκυψε από μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο με τη βοήθεια ενός ροόμετρου και μιας στήλης υδραργύρου. Αφού ρυθμίζαμε την παροχή μετρούσαμε τη διαφορά πίεσης  $\Delta P$ . Εξαιτίας των ελάχιστων διαρροών του αέρα, η καμπύλη που δίνεται παρακάτω είναι και πάλι προσεγγιστική, αλλά πιο κοντά στην πραγματική.

L/MIN	m <sup>3</sup> /h	ύψος στήλης(cm)	$\Delta P$ (bar)
81,7	4,902	22	0,289473684
78	4,68	26,6	0,35
74,2	4,452	33,8	0,444736842
70,5	4,23	37,8	0,497368421
66,7	4,002	43,5	0,572368421
63,1	3,786	49,2	0,647368421
59,5	3,57	54,6	0,718421053

**Πίνακας 3.1:** Πειραματικές τιμές για τη δημιουργία της χαρακτηριστικής καμπύλης του συμπιεστή.



**Σχήμα3.9:** Χαρακτηριστική καμπύλη συμπιεστή

#### **4.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά οι μετρήσεις, οι οποίες είχαν γίνει χωρίς να ληφθούν υπό όψη τυχόν διαρροές, και τα προβλήματα που παρουσιάζονται κάθε φορά που τίθεται σε λειτουργία για πρώτη φορά μια πειραματική συσκευή. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων αυτών των μετρήσεων δημιούργησε την πεποίθηση ότι στη συσκευή υπάρχουν διαρροές καθώς και άλλες ατέλειες, οι οποίες μας οδήγησαν στη συνέχεια στο λύσιμο της συσκευής και στη διόρθωση, στο μέγιστο δυνατό βαθμό, των ατελειών αυτών.

Έγιναν τέσσερις σειρές μετρήσεων, η τελευταία από τις οποίες δίνει τα ακριβέστερα αποτελέσματα.

Η θέρμανση του νερού, για αποδοτικότερη λειτουργία της συσκευής έγινε με τη βοήθεια αντίστασης και τη χρήση ελεγκτή θερμοκρασίας.

##### **1<sup>η</sup> Σειρά μετρήσεων**

Αρχικά η συσκευή λειτούργησε με καθαρό νερό, χωρίς τη χρήση της αντίστασης. Αυτό σημαίνει ότι νερό και αέρας είχαν περίπου την ίδια θερμοκρασία, γύρω στους 20°C. Εφοδιάσαμε την συσκευή με ποσότητες 8,10 και 11Kg νερού, αλλά το αποτέλεσμα ήταν να μην πάρουμε σχεδόν καθόλου ποσότητα νερού και για τις τρεις περιπτώσεις, για λειτουργία της συσκευής περίπου για δύο ώρες.

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω ποσότητες νερού για τις θερμοκρασίες των 25°C, 35°C και 40°C για το ίδιο χρονικό διάστημα. Οι ποσότητες καθαρού νερού που ελήφθησαν ήταν αμελητέες. Στους 50°C και για δύο ώρες λειτουργίας της συσκευής ελήφθησαν περίπου 22 ml. Στους 60°C, και για μια ώρα λειτουργίας ελήφθησαν 30 ml, ενώ στους 70°C για μία ώρα λειτουργίας ελήφθησαν 37 ml καθαρού νερού. Τα αποτελέσματα αυτά στην αρχή ήταν ενθαρρυντικά καθώς με αύξηση της θερμοκρασίας η ποσότητα του νερού που ελήφθη αυξανόταν αναλογικά.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα παραπάνω αποτελέσματα σε πίνακες καθώς και η γραφική απεικόνιση της ποσότητας νερού που παράχθηκε συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Για λειτουργία της συσκευής για μία ώρα και για ποσότητα 8 kg πήραμε τα ακόλουθα αποτελέσματα :

Θερμοκρασία σε °C	20	25	35	40	50	60	70
ποσότητα νερού που παράχθηκε σε ml	0	0	2	5	11	30	40



**Πίνακας 4.1**

Για ποσότητα 10 kg και μια ώρα λειτουργίας, πήραμε τα ακόλουθα αποτελέσματα :

Θερμοκρασία σε °C	20	25	35	40	50	60	70
Ποσότητα νερού που παράχθηκε σε ml	0	0	2	6	13	34	41

**Πίνακας 4.2**

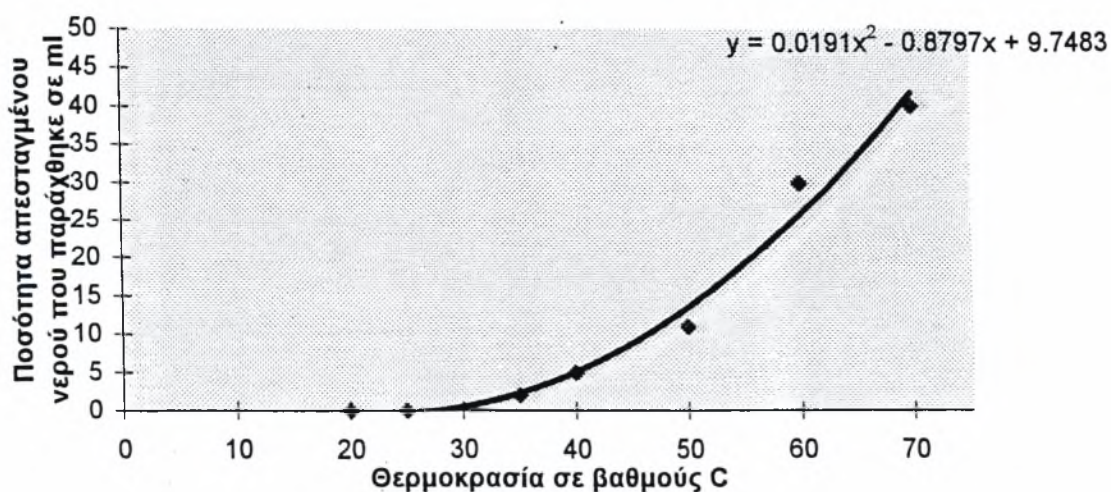
Για ποσότητα νερού 11 kg, και για μια ώρα λειτουργίας πάρθηκαν οι εξής μετρήσεις :

Θερμοκρασία σε °C	20	25	35	40	50	60	70
Ποσότητα νερού που παράχθηκε σε ml	0	0	3	7	14	36	42

**Πίνακας 4.3**

Τα παρακάτω γραφήματα δείχνουν γραφικά τη σχέση θερμοκρασίας και ποσότητας καθαρού νερού που πάρθηκε από τη λειτουργία της συσκευής.

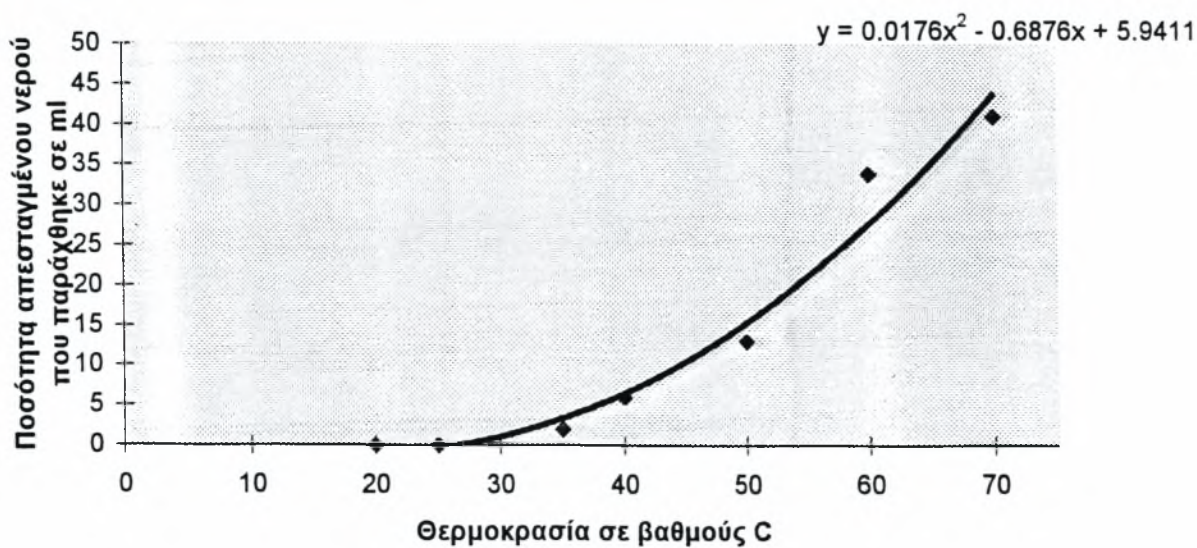
*Λειτουργία της συσκευής με τροφοδότηση 8 kg καθαρού νερού*



**Σχήμα 4.1 :** Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής

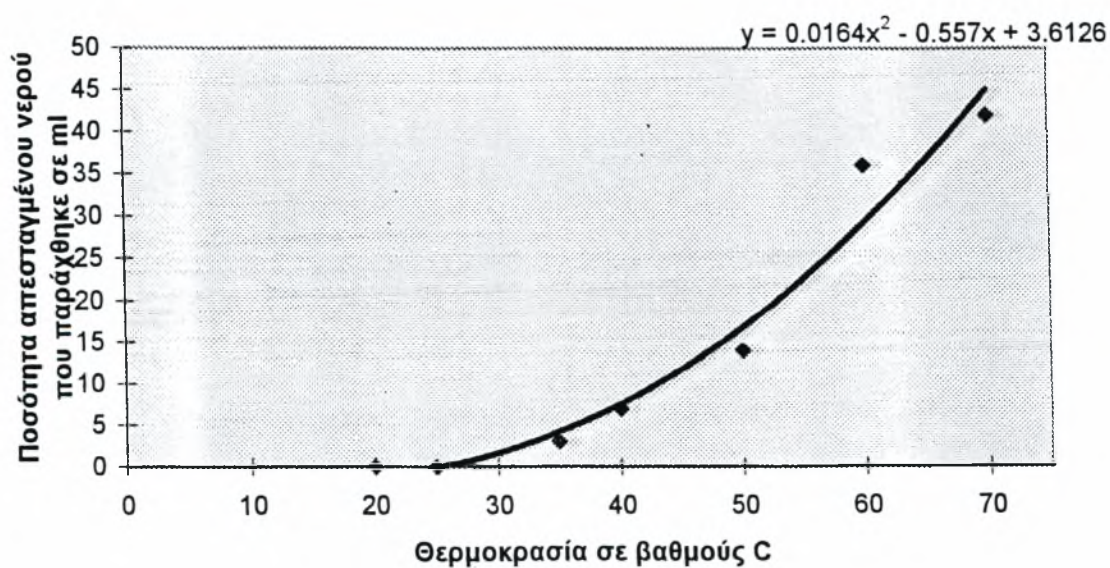


Λειτουργία της συσκευής με τροφοδότηση 10 kg καθαρού νερού



Σχήμα 4.2 : Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής

Λειτουργία της συσκευής με τροφοδότηση 1 l καθαρού νερού



Σχήμα 4.3 : Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία

Στη συνέχεια δοκιμάσαμε να λειτουργήσουμε τη συσκευή σε θερμοκρασία 80°C. Όμως με τα από 15 min λειτουργίας παρουσιάστηκαν προβλήματα στη λειτουργία του συμπιεστή. Αυτά οφειλόταν στο γεγονός ότι η συμπύκνωση άρχιζε μέσα στο συμπιεστή, με αποτέλεσμα η παρουσία του συμπυκνώματος μέσα στο συμπιεστή να δημιουργεί έντονα προβλήματα λειτουργίας του συμπιεστή.

Μετά την παραπάνω σειρά μετρήσεων, η συσκευή λειτούργησε με αλμυρό νερό. Οι ποσότητες νερού που ελήφθησαν ήταν λίγο χαμηλότερες από αυτές που ελήφθησαν για καθαρό νερό στις αντίστοιχες θερμοκρασίες και ποσότητες τροφοδοσίας αλμυρού νερού. Οι ποσότητες αυτές, στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε ανάλυση. Συγκεκριμένα με τη βοήθεια αγωγιμομέτρου μετρήθηκε η αγωγιμότητα του νερού, η οποία μετριέται σε  $\mu\text{S}$ . Οι μετρήσεις αυτές μας έδειξαν ότι το συμπύκνωμα είχε σημαντικές ποσότητες αλάτων. Το γεγονός αυτό μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι διαρροές της συσκευής είναι σημαντικές.

Αρχικά προσπαθήσαμε να μειώσουμε τις απώλειες πίεσης λόγω τριβών, τις οποίες αρχικά αμελήσαμε, μειώνοντας το μήκος των ελαστικών σωλήνων που συνέδεαν την είσοδο και την έξοδο του συμπιεστή με την συσκευή. Στη συνέχεια προσπαθήσαμε να μειώσουμε τις απώλειες θερμότητας. Για το σκοπό αυτό μονώσαμε τους ελαστικούς σωλήνες που συνδέουν τη συσκευή με τον συμπιεστή με κατάλληλη μονωτική ταινία..

Ακολούθως η συσκευή τέθηκε ξανά σε λειτουργία. Τα αποτελέσματα όμως ήταν και πάλι αποθαρρυντικά, αφού η αγωγιμότητα του αποσταγμένου νερού ήταν και πάλι μεγαλύτερη των 3,5  $\mu\text{S}$ . Έτσι αναγκαστήκαμε να ξαναλύσουμε τη συσκευή, και να στεγανοποιήσουμε ξανά και με μεγαλύτερη προσοχή τα επιμέρους τμήματα της συσκευής. Η στεγανοποίηση της συσκευής έγινε με τη βοήθεια ελαστομερούς σιλικόνης (αντοχή μέχρι τους 200°C ) καθώς και στεγανοποιητικής κόλλας σιλικόνης (LOGO). Ανάμεσα στα διάφορα τμήματα του κελύφους τοποθετήθηκε φλάντζα από λάστιχο εμπορίου για περαιτέρω στεγανοποίηση. Η επαναλειτουργία της συσκευής αυτή τη φορά έδωσε συμπύκνωμα του οποίου η αγωγιμότητα ήταν κάτω από τα 3,5  $\mu\text{S}$ , όπως επιτρέπει ο αγορανομικός έλεγχος.

## 2<sup>η</sup> Σειρά μετρήσεων

Οι μετρήσεις που έγιναν φαίνονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες :

*Λειτουργία της συσκευής με 12 kg τροφοδοσίας καθαρού νερού για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία:*

Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50
Ποσότητα που παράχθηκε σε ml	0	4	7	12

**Πίνακας 4.4**

*Λειτουργία της συσκευής με 17 kg τροφοδοσίας καθαρού νερού για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία:*

Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50
Ποσότητα που παράχθηκε σε ml	0	4	8	14

**Πίνακας 4.5**

*Λειτουργία της συσκευής με 12 kg τροφοδοσίας αλμυρού νερού για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία:*

Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50
Ποσότητα που παράχθηκε σε ml	0	3	5	9

**Πίνακας 4.6**

*Λειτουργία της συσκευής με 17 kg τροφοδοσίας αλμυρού νερού για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία:*

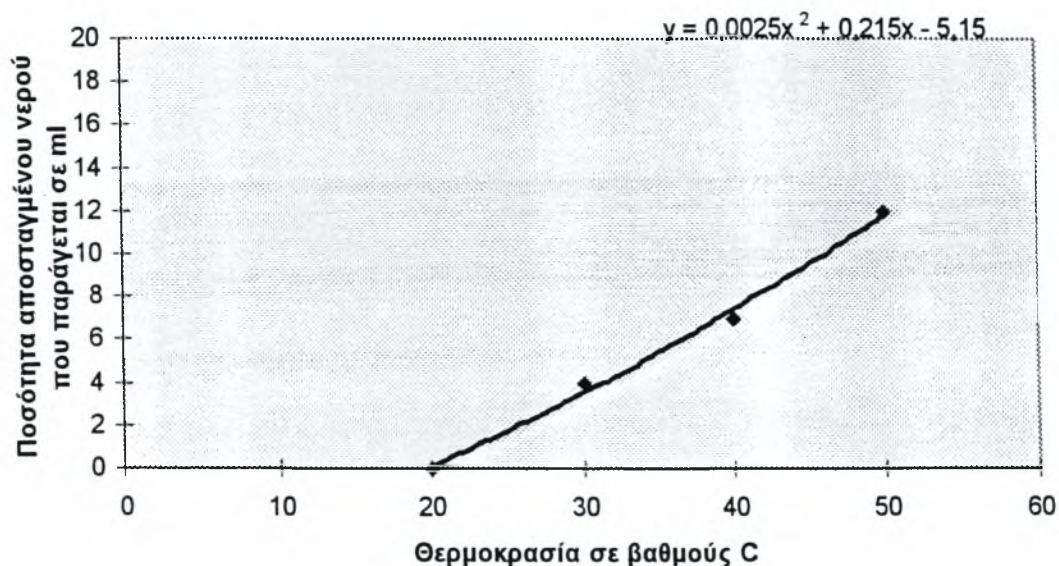
Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50
Ποσότητα που παράχθηκε σε ml	0	3	6	11

**Πίνακας 4.7**

Παρακάτω παρουσιάζεται γραφικά η ποσότητα αποσταγμένου νερού που παράχθηκε, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, για την παραπάνω σειρά μετρήσεων.

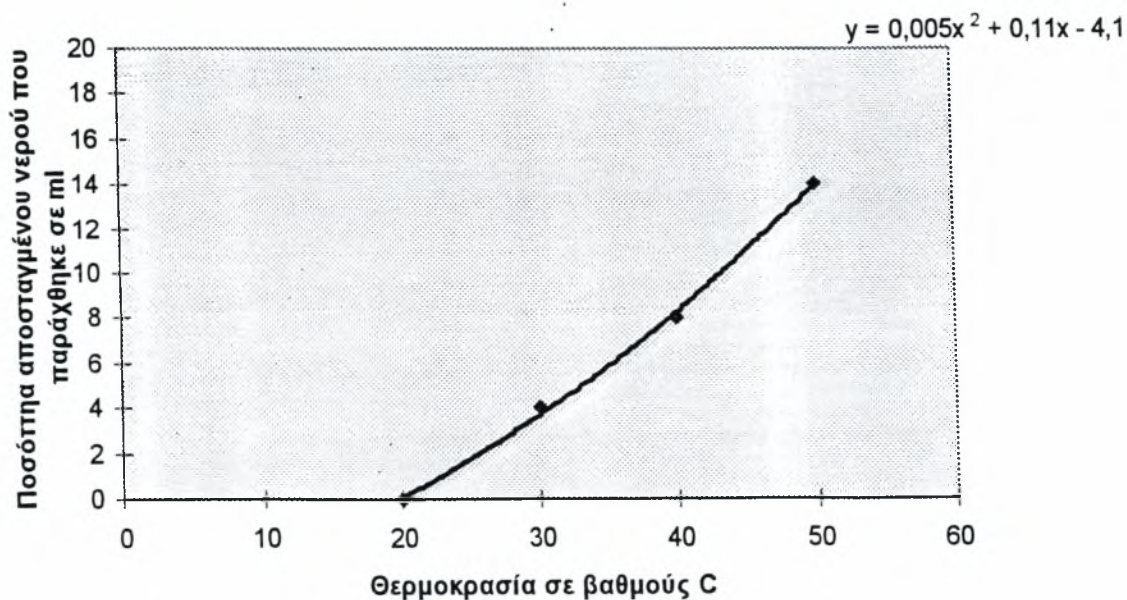


Λειτουργία της συσκευής με 12 kg τροφοδοσίας καθαρού νερού για μια ώρα λειτουργίας σε κάθε θερμοκρασία



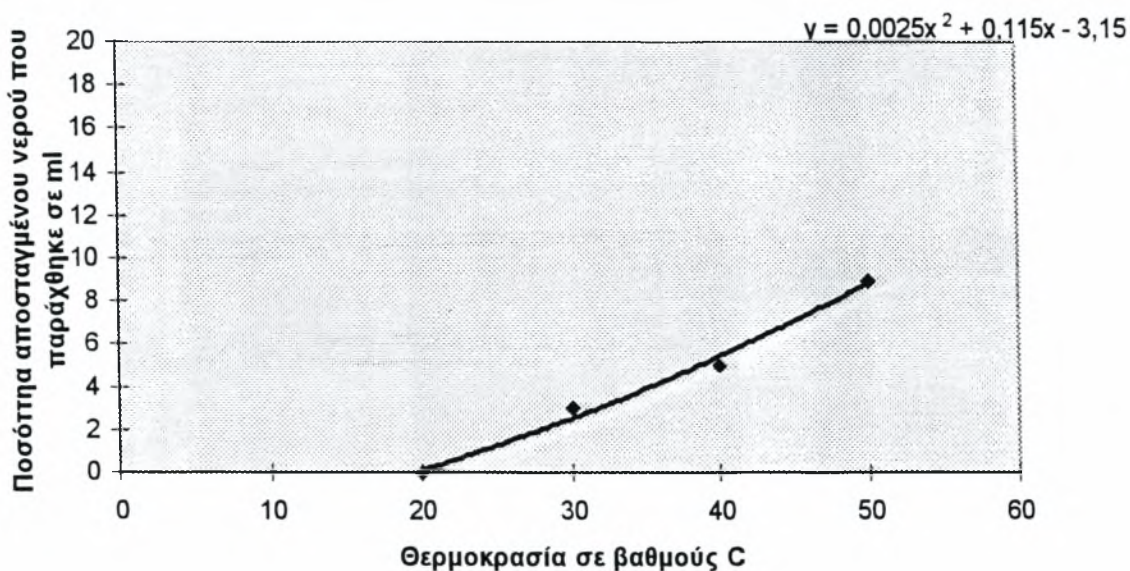
Σχήμα 4.4 : Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία

Λειτουργία της συσκευής με 17 kg τροφοδοσίας καθαρού νερού για μια ώρα λειτουργίας σε κάθε θερμοκρασίας



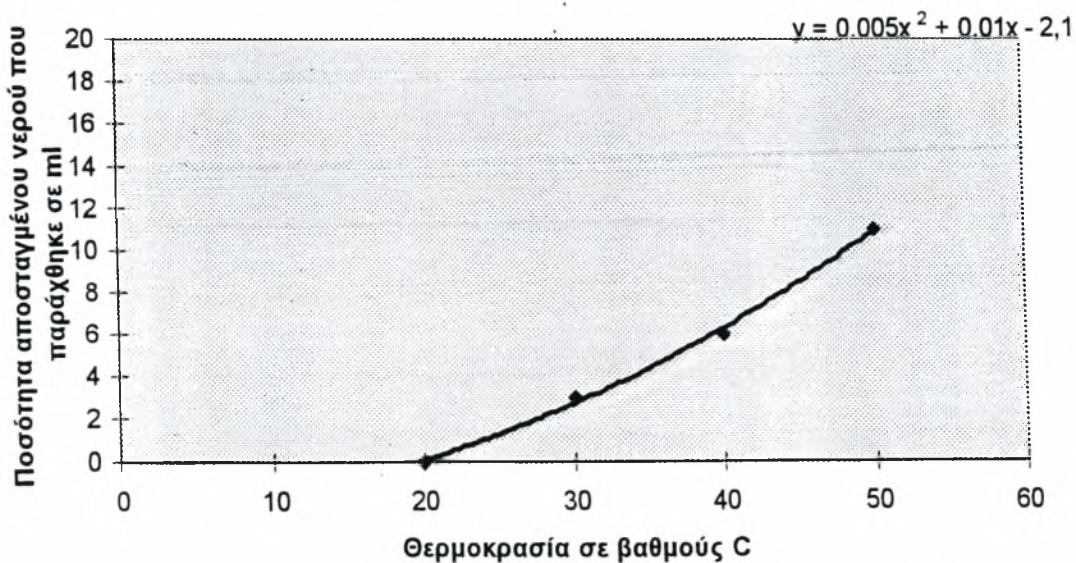
**Σχήμα 4.5 :** Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία

Λειτουργία της συσκευής με 12 kg τροφοδοσίας αλμυρού νερού για μια ώρα λειτουργίας σε κάθε θερμοκρασίας



**Σχήμα 4.6 :** Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία

Λειτουργία της συσκευής με 17 kg τροφοδοσίας αλμυρού νερού για μια ώρα λειτουργίας σε κάθε θερμοκρασίας





**Σχήμα 4.7 :** Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία

Ενώ όμως τα αποτελέσματα από πλευράς αγωγιμότητας ήταν ικανοποιητικά, οι ποσότητες του συμπυκνώματος ήταν πάρα πολύ μικρές σε σχέση με το χρόνο λειτουργίας της συσκευής. Το γεγονός αυτό μας έδωσε το ερέθισμα να στραφούμε σε άλλη κατεύθυνση. Στο κεφάλαιο 2.3, όπου έγινε προσδιορισμός της επιφάνειας εναλλαγής αποδείχθηκε ότι η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής θεωρητικά για την περίπτωση μας είναι μεγαλύτερη από αυτή που έχουμε.

Αυτό σημαίνει ότι δεν προλαβαίνει να συμπυκνωθεί ο ατμός, και έτσι ο κορεσμένος αέρας ανακυκλοφορεί συνεχώς, χωρίς να προλαβαίνει να συμπυκνωθεί. Έτσι αποφασίστηκε με κάποιο τρόπο να αυξηθεί η μεταφορά θερμότητας. Στις παρακάτω παραγράφους δίνονται εν συντομία μερικές μέθοδοι αύξησης της μεταφοράς θερμότητας

**Περιγραφή μεθόδων αύξησης της μεταφοράς θερμότητας**

Ο σκοπός, για τον οποίο έγιναν μελέτες, ώστε να επιτευχθεί αύξηση στη μεταφορά θερμότητας ήταν η επιθυμία να πετύχουμε υψηλές ροές θερμότητας. Από τη εξίσωση ροής θερμότητας  $q/A = h(T_{surface} - T_{fluid})$  ή εναλλακτικά

$$q/A = U(T_{hot\_fluid} - T_{cold\_fluid}), \text{ όπου}$$

A είναι η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας

q είναι η ροή θερμότητας

h είναι ο συντελεστής συναγωγής

U είναι ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας

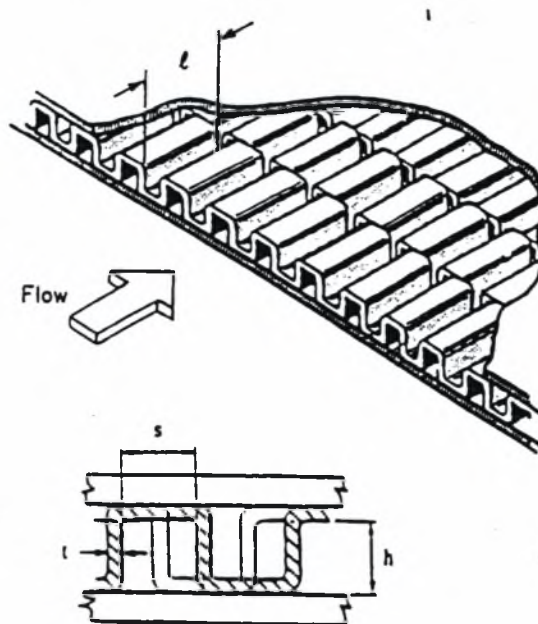
και T είναι η θερμοκρασία,

φαίνεται ότι η ροή θερμότητας μπορεί να αυξηθεί είτε με την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς, είτε με την αύξηση του συντελεστή θερμότητας είτε με τη μείωση της επιφάνειας εναλλαγής.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για αύξηση της ροής θερμότητας, μερικές από τις οποίες τίθενται στον παρακάτω πίνακα. Η περιγραφή αυτών των τεχνικών δίδονται στο παράρτημα Β

Η αύξηση της ροής θερμότητας στην ελεύθερη ροή είναι πολύ σημαντική, γιατί αυτή η ροή αντιπροσωπεύει την κύρια θερμική αντίσταση σε έναν εναλλάκτη θερμότητας δύο ρευστών. Γενικά για να αυξηθεί η ροή θερμότητας σε ροές αερίων, χρησιμοποιούνται διακοπτόμενα

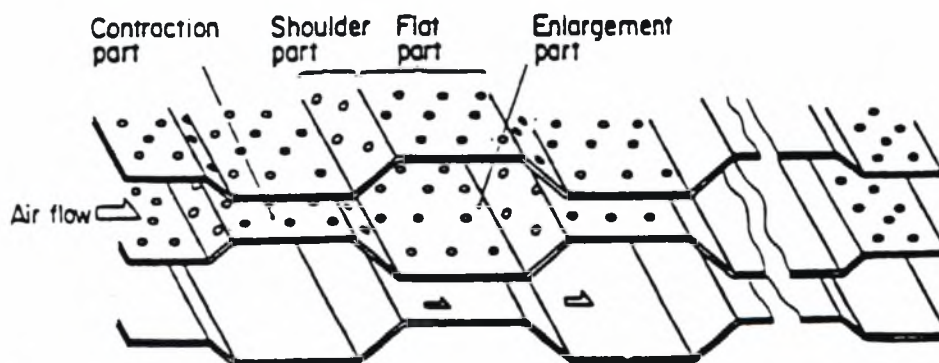
περύγια.(σχήμα 4.8) ιδέα της παραπάνω χρήσης είναι να αυξηθεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας πάνω στη εκτεταμένη επιφάνεια.



**Σχήμα 4.8 :** Διακοπτόμενα περύγια και η γεωμετρία τους

Η μελέτη της μεταφοράς θερμότητας καθώς και των χαρακτηριστικών της τριβής της ροής έχει δείξει ότι το φαινόμενο είναι περίπλοκο και δεν έχει ακόμα διευκρινιστεί πλήρως.

Ένας πρωτότυπος εναλλάκτης θερμότητας απεικονίζεται στο σχήμα 4.9.

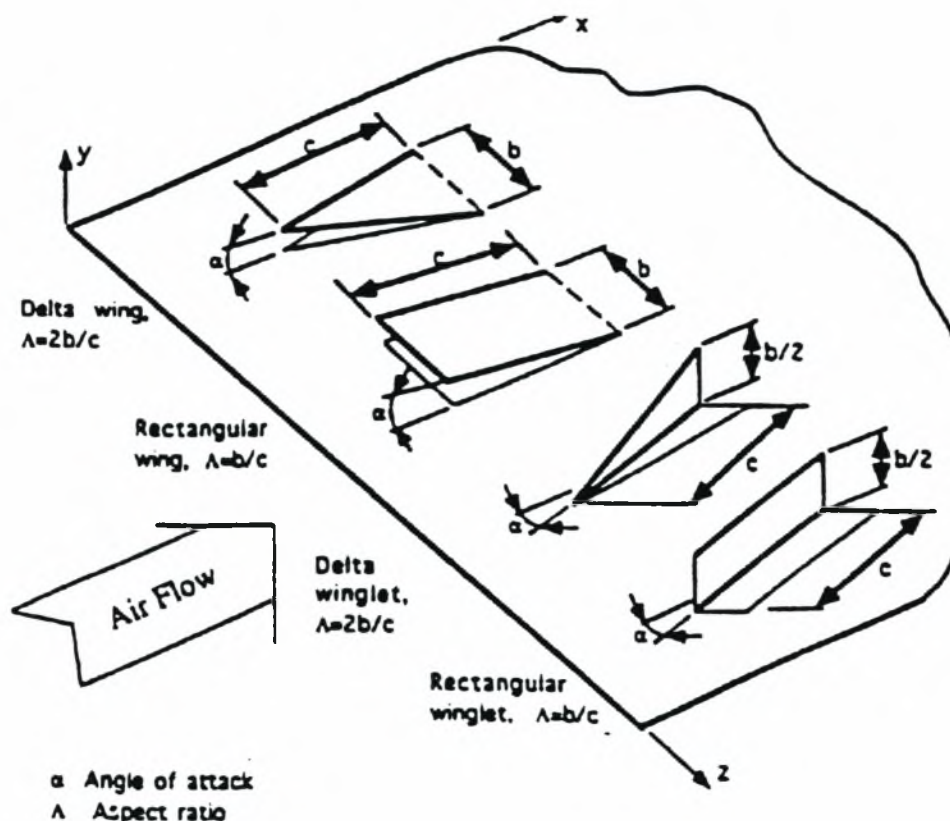


**Σχήμα 4.9:** Πρωτότυπος εναλλάκτης θερμότητας

Εδώ η ροή είναι είτε παράλληλη είτε αντίθετη. Η ροή στο στενότερο τμήμα του καναλιού έχει μεγαλύτερη ταχύτητα και μικρότερη πίεση από τη ροή στο πιο φαρδύ τμήμα του καναλιού. Αφού λοιπόν μετασχηματίζονται τα τοιχώματα του καναλιού θα υπάρχει και μια αύξηση στη

εγκάρσια ροή του αερίου. Το γεγονός αυτό διακόπτει τη αξονική ροή, προκαλώντας με τον τρόπο αυτό μια αύξηση στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Μια εξειδικευμένη, σημαντική όμως εξέλιξη παρουσιάζει η χρήση διαφόρων κομματιών τα οποία παράγουν δίνες. Μερικά τέτοια κομμάτια φαίνονται στο σχήμα 4.10



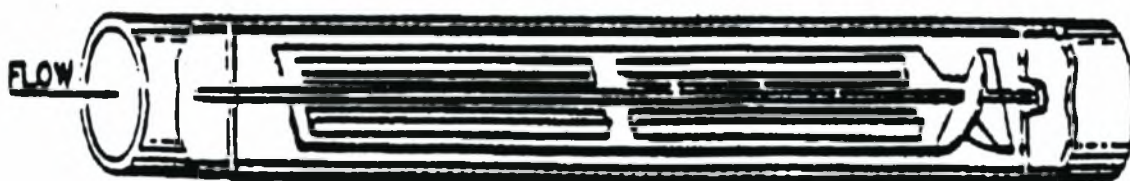
**Σχήμα 4.10:** Διαμήκης παραγωγοί δινών, γεωμετρικά καθορισμένοι

Τα κομμάτια αυτά μπορούν να ενσωματωθούν στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας είτε με συγκόλληση των κομματιών, είτε με τη βοήθεια τρυπανιών. Οι δίνες διακόπτουν τη ροή και αυξάνουν τη συντελεστή θερμότητας. Από την άλλη όμως έχουμε μια αύξηση της πτώσης πίεσης η οποία δυσκολεύει τη μεταφορά θερμότητας. Με κατάλληλη, όμως, τοποθέτηση των κομματιών μπορούμε να πετύχουμε αύξηση της μεταφοράς θερμότητας. Μία πρόσφατη αναφορά, η οποία ασχολείται με την παραγωγή δινών, είναι αυτή του Gentry (1996).

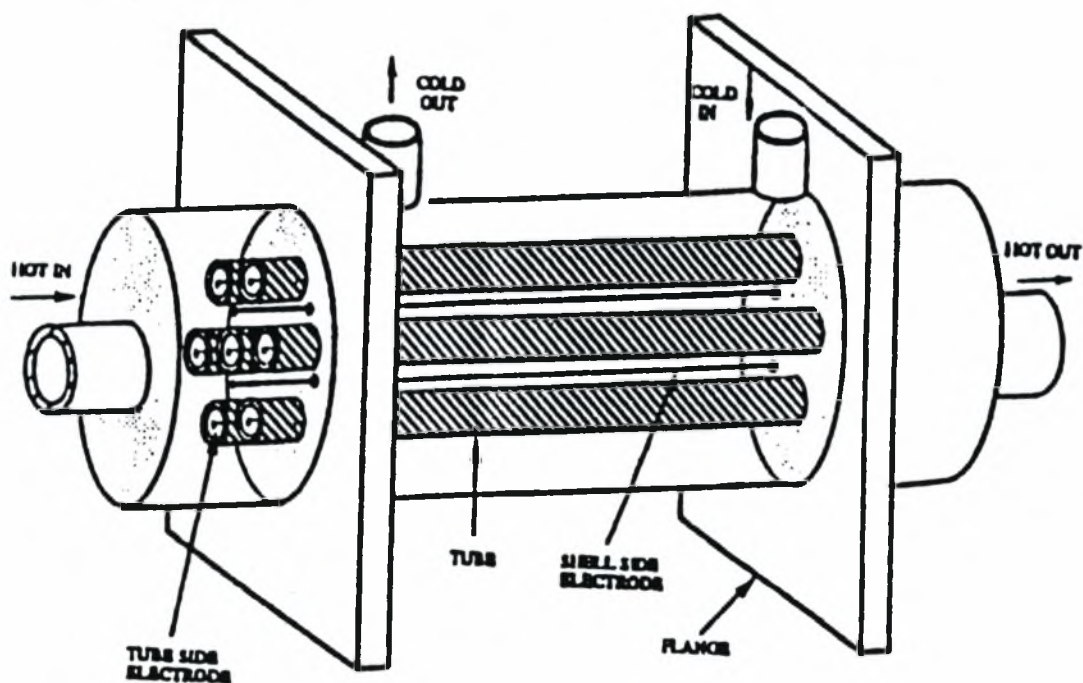
Στο σχήμα 4.11 απεικονίζεται ένα ακόμη παράδειγμα αύξησης της ροής θερμότητας. Εδώ η αύξηση της μεταφοράς θερμότητας επιτυγχάνεται με στροβιλισμό της ροής. Το ένθετο στοιχείο περιστρέφεται με τη βοήθεια του ρέοντος ρευστού.

Μια άλλη μέθοδος αύξησης της μεταφοράς θερμότητας, η οποία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, και έχει βρει αρκετά μεγάλη εφαρμογή σε χώρες όπως η Αγγλία, η Ιαπωνία και οι

Ηνωμένες πολιτείες, είναι η ηλεκτροϋδροδυναμική. Η κύρια ιδέα αυτής της μεθόδου είναι η τοποθέτηση ηλεκτροδίων και η δημιουργία υψηλής τάσης μεταξύ της κύριας ροής και της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας. Με τον τρόπο αυτό οι ηλεκτρικές δυνάμεις οι οποίες σχηματίζονται, δημιουργούν δευτερεύουσες ροές οι οποίες αυξάνουν τη μεταφορά θερμότητας, ειδικά σε χαμηλές ταχύτητες της κύριας ροής. Στο σχήμα 4.12 απεικονίζεται η παραπάνω μέθοδος. Η δαπάνη ενέργειας, λόγω των ηλεκτροδίων είναι μικρή σχετικά με την ενέργεια άντλησης.



Σχήμα 4.11: Περιστρεφόμενο στοιχείο προστιθέμενο μέσα σε σωλήνα



Σχήμα 4.12: Σχηματική όψη ενός ηλεκτροϋδροδυναμικού εναλλάκτη θερμότητας.



### 3<sup>η</sup> Σειρά μετρήσεων

Αφού μελετήθηκαν όλες οι παραπάνω μέθοδοι αύξησης της μεταφοράς θερμότητας αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη διαδικασία :

Αρχικά έγινε προσθήκη λεπτών χάλκινων ελασμάτων μέσα στους σωλήνες, όπου γίνεται η συμπίκνωση. Τα ελάσματα αυτά προτού προστεθούν είχαν στρεβλωθεί. Τα στρεβλωμένα αυτά ελάσματα εκτός από την αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής, προκαλούσαν επίσης και στροβιλισμό της ροής, που όπως ειπώθηκε παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Τα ελάσματα αυτά είχαν μήκος 0,5 m και 7 mm πλάτος, προκαλούσαν δηλαδή μια αύξηση επιφάνειας εναλλαγής  $dA = 25 \cdot 0,007 \cdot 0,5 \cdot 2m^2 = 0,175m^2$ . Η αρχική επιφάνεια εναλλαγής που υπήρχε ήταν  $A = 2\pi RL25 = 0,314m^2$ , όπου R η διάμετρος των αυλών και L το μήκος τους. Προκαλέσαμε δηλαδή μια αύξηση κατά περίπου 50%.

Επίσης για καλύτερη κατανομή του αέρα στους αυλούς, που βγαίνει από τον συμπιεστή, διαμορφώθηκε ο χώρος του καπακιού 1, τομή του οποίου φαίνεται στο τρίτο κεφάλαιο, με την προσθήκη ενός ελάσματος κάθετο στη ροή του αέρα που εξέρχεται από τον συμπιεστή.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα παραπάνω αποτελέσματα σε πίνακες καθώς και η γραφική απεικόνιση της ποσότητας νερού που παράχθηκε συναρτήσει της θερμοκρασίας.

*Λειτουργία της συσκευής με 12 kg τροφοδοσίας καθαρού νερού, σε κάθε θερμοκρασία*

Ώρες λειτουργίας	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>
Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50
Ποσότητα που παράχθηκε σε ml	0	7	9	16

**Πίνακας 4.8**

Στην παραπάνω μέτρηση η διαφορά της πίεσης ήταν η εξής

Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50
ΔΡ σε bar	8/76	9/76	11/76	13/76

**Πίνακας 4.9**



Λειτουργία της συσκευής με 17 kg τροφοδοσίας καθαρού νερού, σε κάθε θερμοκρασία

Ωρες λειτουργίας	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>
Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50	60
Ποσότητα παράχθηκε σε ml	0	8	12	30	45

**Πίνακας 4.10**

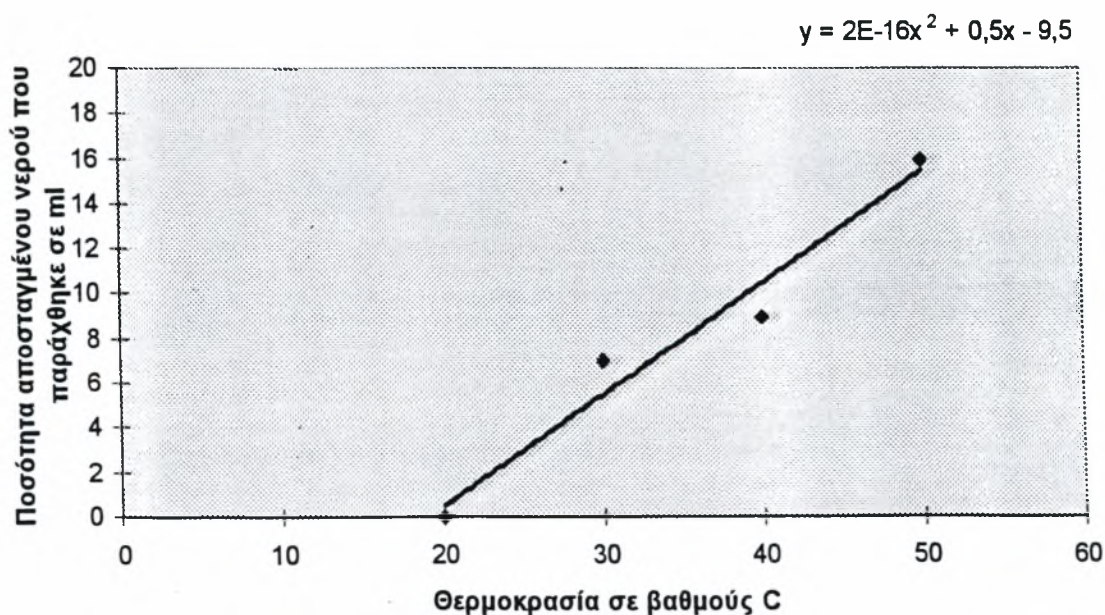
Η διαφορά της πίεσης κυμάνθηκε ως εξής :

Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50	60
ΔP σε bar	8/76	11/76	15/76	18/76	20/76

**Πίνακας 4.11**

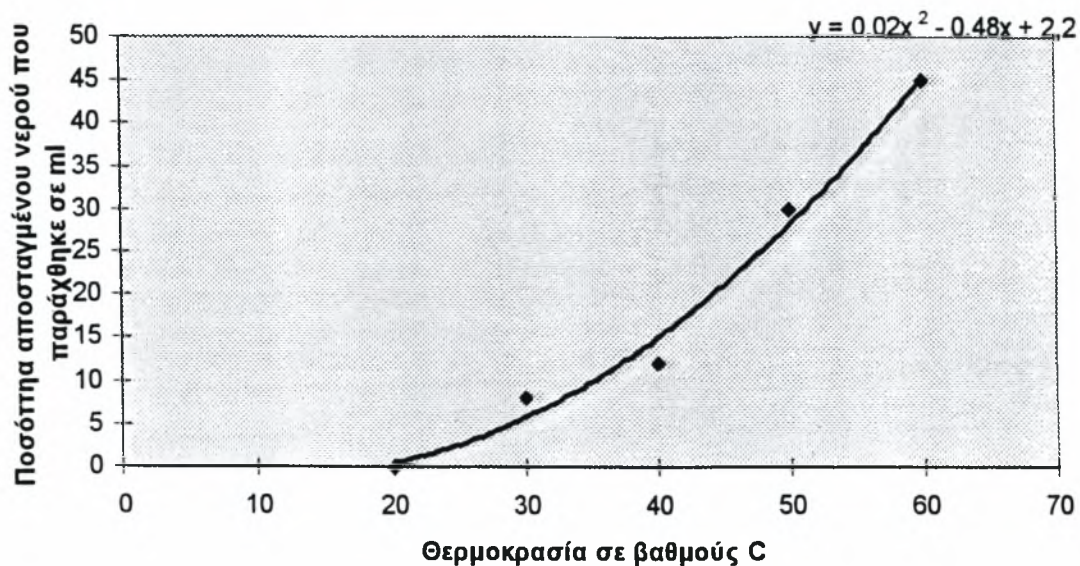
Η γραφική απεικόνιση των παραπάνω αποτελεσμάτων φαίνεται στα παρακάτω σχήματα

Λειτουργία της συσκευής με 12 kg τροφοδοσίας καθαρού νερού για μια ώρα λειτουργίας σε κάθε θερμοκρασία



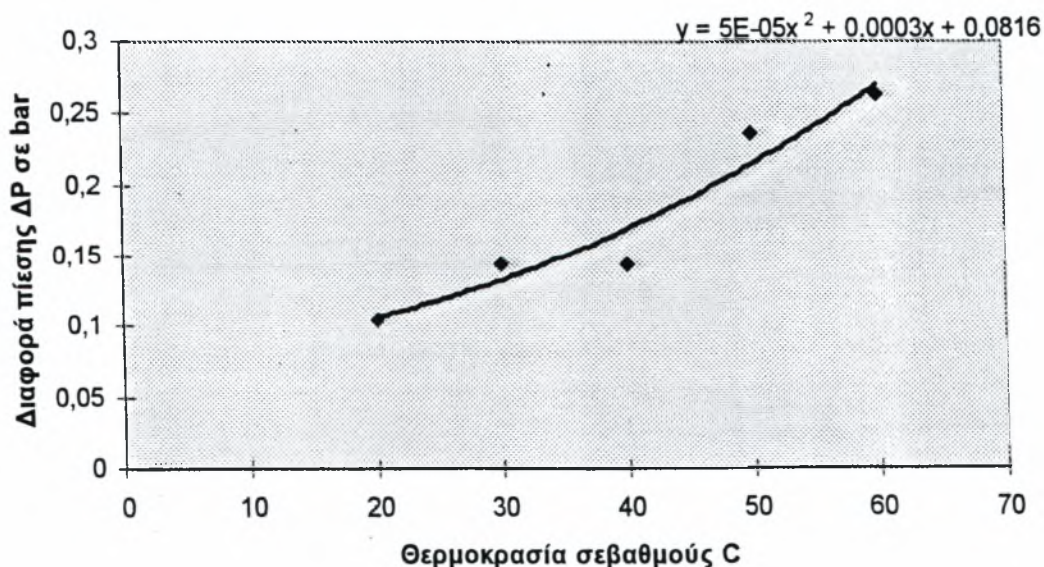
**Σχήμα 4.13 :** Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία

Λειτουργία της συσκευής με 17 kg τροφοδοσίας καθαρού νερού για μια ώρα λειτουργίας σε κάθε θερμοκρασία



Σχήμα 4.12 : Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία

Η διαφορά πίεσης και στις δύο περιπτώσεις είχαν παρόμοια συμπεριφορά και με πολύ μικρές διαφοροποιήσεις, σε σχέση με τη θερμοκρασία. Η γραφική αυτή απεικόνιση φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 4.15 : Μεταβολή της διαφοράς πίεσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία



#### 4<sup>η</sup> Σειρά μετρήσεων

Στη συνέχεια μονώσαμε το κέλυφος της συσκευής και το πάνω καπάκι με υαλοβάμβακα, για να μειώσουμε όσο το δυνατό περισσότερο τις απώλειες θερμότητας. Οι μετρήσεις που πήραμε για λειτουργία της συσκευής στις ίδιες συνθήκες ήταν οι ακόλουθες :

Για λειτουργία της συσκευής με 12 kg καθαρό νερό πήραμε τα ακόλουθα αποτελέσματα :

Περίοδος λειτουργίας	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>
Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50
Ποσότητα που Παράχθηκε σε ml	7	20	35	45

**Πίνακας 4.12.**

Η διαφορά της πίεσης κυμάνθηκε ως εξής :

Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50
ΔΡ σε bar	11/76	11/76	12/76	12/76

**Πίνακας 4.13**

Για λειτουργία της συσκευής με 17 kg καθαρό νερό πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα :

Περίοδος λειτουργίας	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	6 <sup>η</sup>
Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50	60	70
Ποσότητα που παράχθηκε	7	15	28	40	60	90

**Πίνακας 4.14**

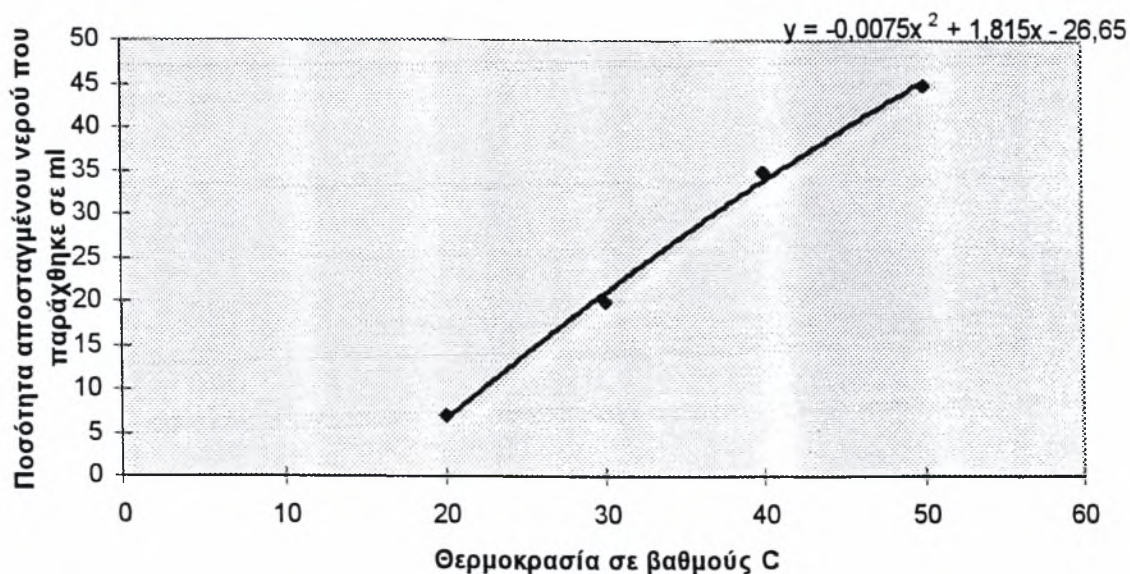
Η μεταβολή της διαφοράς πίεσης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα

Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50	60	70
ΔΡ	12/76	12/76	13/76	13/76	14/76	15/76

**Πίνακας 4.15**

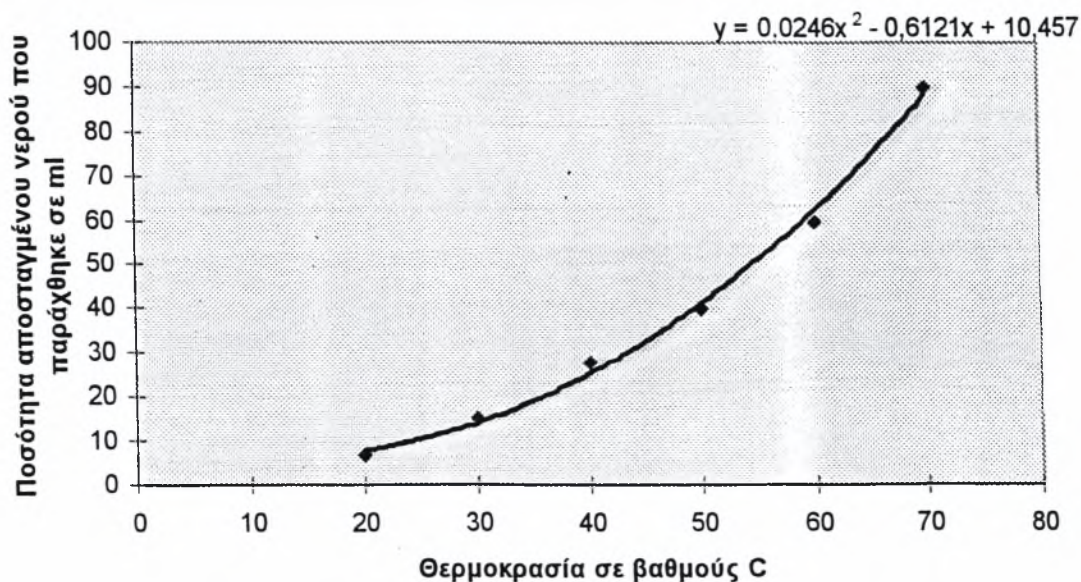
Η γραφική απεικόνιση των παραπάνω αποτελεσμάτων φαίνεται στα παρακάτω σχήματα :

Λειτουργία της συσκευής με 12 kg τροφοδοσίας καθαρού νερού για μια ώρα λειτουργίας σε κάθε θερμοκρασία



Σχήμα 4.16 : Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία

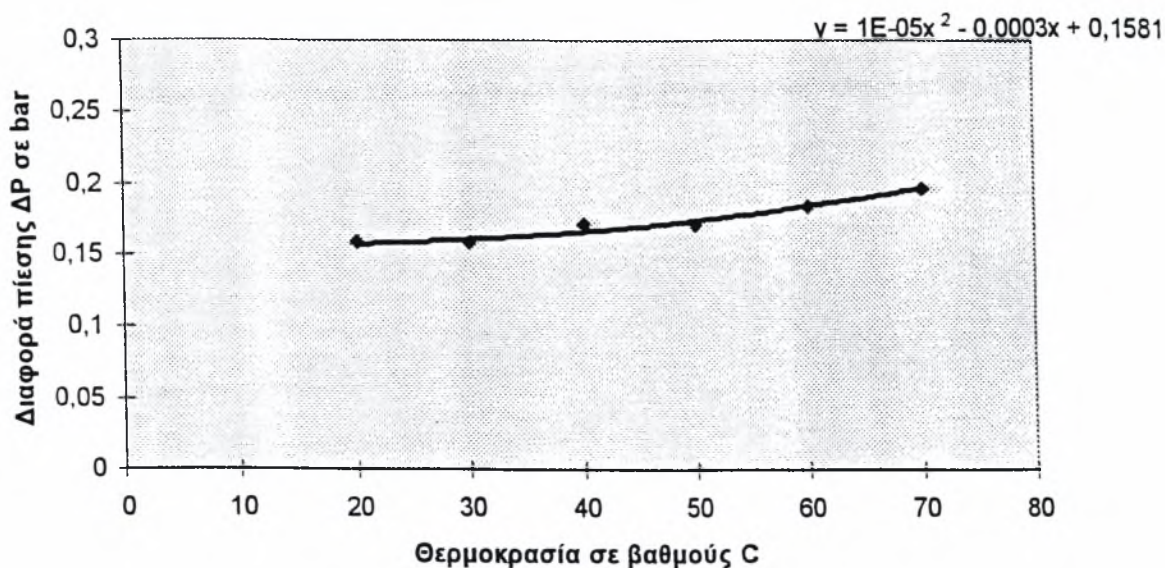
Λειτουργία της συσκευής με 17 kg τροφοδοσίας καθαρού νερού για μια ώρα λειτουργίας σε κάθε θερμοκρασία



Σχήμα 4.17 : Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία



Η διαφορά πίεσης και στις δύο περιπτώσεις είχαν παρόμοια συμπεριφορά και με πολύ μικρές διαφοροποιήσεις, σε σχέση με τη θερμοκρασία. Η γραφική αυτή απεικόνιση φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 4.18 : Μεταβολή της διαφοράς πίεσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Η τελευταία μέτρηση που έγινε ήταν με τροφοδότηση της συσκευής με 20 kg αλμυρού νερού.

Ωρες λειτουργίας	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>
Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50	60
Ποσότητα αποσταγμένου νερού που παράχθηκε σε ml	10	13	18	25	35

Πίνακας 4.16

Η διαφορά της πίεσης κυμάνθηκε ως εξής :

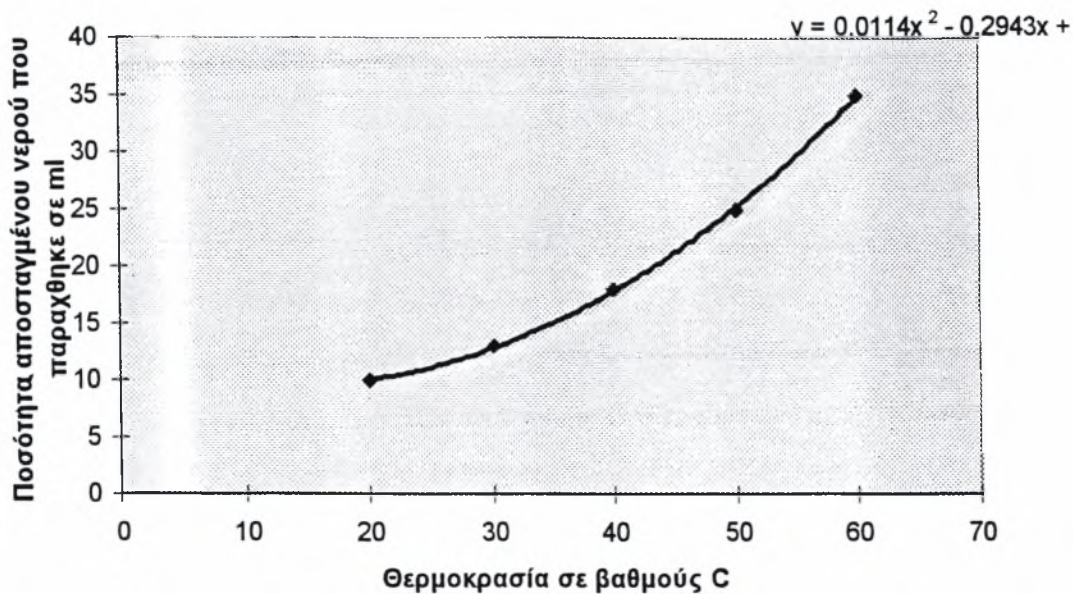
Θερμοκρασία σε °C	20	30	40	50	60
ΔP σε bar	12/76	13/76	14/76	14/76	15/76

Πίνακας 4.17

Η γραφική απεικόνιση των παραπάνω αποτελεσμάτων φαίνεται στα παρακάτω σχήματα :

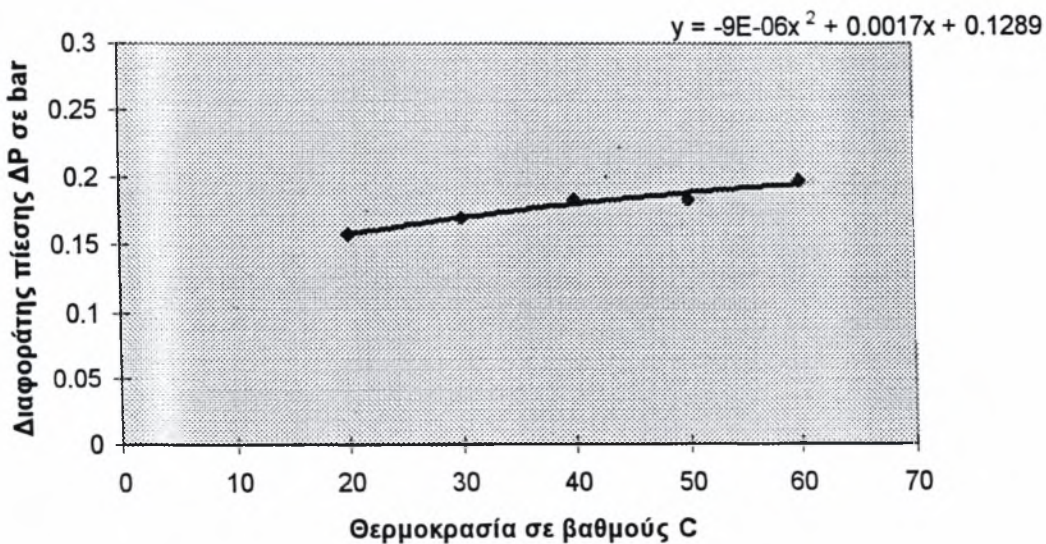


Λειτουργία της συσκευής με 20 kg τροφοδοσίας αλμυρού νερού για μια ώρα λειτουργίας σε κάθε θερμοκρασία



Σχήμα 4.19 : Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται σε σχέση με τη θερμοκρασία για μια ώρα λειτουργίας της συσκευής σε κάθε θερμοκρασία

Η γραφική απεικόνιση της διακύμανσης της διαφοράς της πίεσης  $\Delta P$  φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.20 : Μεταβολή της διαφοράς πίεσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

## ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η πρώτη σειρά μετρήσεων ήταν απλώς μια σειρά μετρήσεων από την οποία δεν μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα, γιατί όπως είπαμε και παραπάνω είχαμε πολλές απώλειες. Στη δεύτερη σειρά μετρήσεων, αν και οι ποσότητες ήταν πολύ μικρές, φαίνεται ότι η ποσότητα αποσταγμένου νερού που παράχθηκε αυξάνει αναλογικά με αύξηση της θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η συσκευή. Αυτό συμβαίνει γιατί με αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και η τάση ατμών με αποτέλεσμα, εφόσον θεωρήσουμε τη συμπεριφορά του μίγματος ως ιδανικού αερίου, να αυξάνεται και το ποσοστό του ατμού στο μίγμα, σύμφωνα με το νόμο του Rault.

Επίσης με αύξηση της ποσότητας του νερού, με το οποίο τροφοδοτείται η συσκευή, αυξάνει και η ποσότητα του αποσταγμένου νερού που παίρνουμε. Το συμπέρασμα αυτό εξηγείται με βάση το γεγονός ότι με αύξηση της μάζας νερού τροφοδοσίας της συσκευής αυξάνεται η στήλη του νερού μέσα στο κέλυφος, αυξάνεται δηλαδή η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, και έτσι αυξάνεται η ποσότητα αποσταγμένου νερού που παίρνουμε.

Η λειτουργία της συσκευής με αλμυρό νερό έδειξε ότι η ποσότητα γλυκού νερού που παίρνουμε είναι λίγο μικρότερη από αυτή που παίρνουμε όταν η συσκευή λειτουργεί με καθαρό νερό. Αυτό εξηγείται και πάλι με υπόθεση θερμοδυναμικής ισορροπίας και με το νόμο του Rault. Στην περίπτωση που η συσκευή λειτουργεί με αλμυρό νερό, στην υγρή φάση υπάρχουν δύο συστατικά, το αλάτι ( $\text{NaCl}$ ) και το νερό. Η περιεκτικότητα του αλμυρού (θαλασσινού) νερού είναι συνήθως 2.5 με 3%. Οπότε το μοριακό κλάσμα του νερού στην υγρή φάση είναι  $x_i = 0,97$  ενώ στην αέρια φάση είναι  $y_i = 1$ . Εφαρμόζοντας τον νόμο του Rault  $y_i P = x_i P_{sat}$ , για το νερό προκύπτει  $P = 0,97 P_{sat}$ . Δηλαδή η μερική πίεση του υδρατμού στην αέρια φάση είναι  $P_{\text{υδρατμού}} = 0,97 P_{sat}$ . Έτσι η ποσότητα του υδρατμού στο μίγμα θα είναι μικρότερη αφού το μοριακό κλάσμα του ατμού στο μίγμα θα είναι μικρότερη.

Η τρίτη σειρά μετρήσεων έγινε αφότου προστέθηκαν μέσα στους αυλούς λεπτά, χάλκινα, στρεβλωμένα ελάσματα. Η ποσότητες που πήραμε ήταν μεγαλύτερες από αυτές πριν την τοποθέτηση των ελασμάτων, στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας (ίδια ποσότητα νερού τροφοδοσίας και ίδιες θερμοκρασίες λειτουργίας). Η διαφορά στην ποσότητα που πάρθηκε ήταν μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη ήταν και η θερμοκρασία λειτουργίας. Αυτό συνέβαινε γιατί αύξανε συνεχώς η ποσότητα του μοριακού κλάσματος το υδρατμού στο μίγμα λόγω της αύξησης του της  $P_{sat}$ .

Η τέταρτη σειρά μετρήσεων έγινε αφότου μονώσαμε όλη τη συσκευή με υαλοβάμβακα. Οι ποσότητες που πήραμε ήταν σαφώς μεγαλύτερες ακόμα και στις χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Το γεγονός αυτό εξηγείται ως εξής : Πριν μονώσουμε τη συσκευή, η συμπύκνωση των υδρατμών άρχιζε πριν φτάσει η φυσαλίδα στο συμπιεστή, γιατί είχαμε απώλεια θερμότητας προς το περιβάλλον. Αφού έγινε η μόνωση της συσκευής η θερμοκρασία του τοιχώματος του κελύφους παρέμενε σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία που επικρατούσε μέσα στο κέλυφος, όπου κυκλοφορούσαν οι φυσαλίδες. Έτσι η συμπύκνωση δεν μπορούσε να αρχίσει πριν την είσοδο των φυσαλίδων στον συμπιεστή.

Η τελευταία μέτρηση που έγινε ήταν με τροφοδότηση της συσκευής με 20 kg αλμυρού νερού ήταν και η πιο σημαντική γιατί έδειξε ότι ακόμα και στη θερμοκρασία των 20<sup>0</sup> C η ποσότητα όχι μόνο δεν ήταν αμελητέα αλλά ήταν περίπου ίση με τη θεωρητικά προβλεπόμενη ποσότητα, και ότι στο μέλλον αν γίνει καλύτερη μόνωση της συσκευής και αυξηθεί με κάποιο τρόπο η επιφάνεια εναλλαγής ίσως να πάρουμε ακόμα μεγαλύτερες ποσότητες.

Τέλος πρέπει να πούμε ότι η διακύμανση της διαφοράς πίεση ήταν μικρή σε όλες τις περιπτώσεις και με παρόμοια συμπεριφορά, αύξανε δηλαδή με τη θερμοκρασία. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της πυκνότητας του μίγματος.

$\Delta P = 4fG^2 L/2g_c\rho D$ , όπου f είναι ο συντελεστής τριβής L το μήκος των αυλών, D η διάμετρος G η μαζική παροχή και ρ η πυκνότητα του μίγματος.

Τέλος πρέπει να τονίσουμε ότι μετά από 4 με 5 ώρες λειτουργίας ο συμπιεστής παρουσιάζει προβλήματα λειτουργίας καθώς συμβαίνει υπερθέρμανση του. Για τον ίδιο λόγο δεν μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες πάνω των 70 ~ 80 <sup>0</sup>C. Ίσως η χρησιμοποίηση ενός καλύτερου συμπιεστή έδινε πολύ καλύτερα αποτελέσματα

## 5. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ο αναλυτικός υπολογισμός της επιφάνειας εναλλαγής, ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.3.

Η πίεση πριν από τον συμπιεστή είναι περίπου 0,95 bar, ενώ μετά τον συμπιεστή είναι γύρω στ 1,1 bar. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές σταθερές ύλης, οι οποίες πάρθηκαν από το βιβλίο Warneatlas

Μονάδες	Αέρας	Ατμός	
M <sub>MB</sub>	(Kg/Kmol)	28,9	18,015
T <sub>c</sub>	K	132,1	647,3
U <sub>c</sub>	cm^3/mol	86,1	56
Z <sub>c</sub>		0,29	0,229
P <sub>c</sub>	bar		220,9
y <sub>1</sub>			0,21
	y <sub>2</sub>	0,79	

όπου:  $M_{MB}$  είναι η μοριακή μάζα σε kg/mole  $T_c$  είναι η κρίσιμη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin,  $P_c$  είναι η κρίσιμη πίεση σε bar,  $Z_c$  είναι ο κρίσιμος συντελεστής συμπιεστότητας,  $U_c$  είναι ο κρίσιμος όγκος σε cm<sup>3</sup> / mole και  $y_1$ ,  $y_2$  είναι τα μοριακά κλάσματα του ατμού και του αέρα στο μίγμα, όπου με δείκτη 1 δηλώνουμε τον ατμό και με δείκτη 2 τον αέρα.

Αρχικά θα γίνει υπολογισμός των παρακάτω παραγόντων για την είσοδο του μίγματος στον συμπυκνωτή ( είσοδος στους αυλούς) και μετά για την έξοδο.

### A. Είσοδος

#### **1. Υπολογισμός μοριακών κλασμάτων.**

Θεωρήσαμε ότι η συσκευή λειτουργεί στους 60 °C. Σε αυτή τη θερμοκρασία η πίεση κορεσμού είναι  $p_{1sat}=19,992$  kPa ή  $19,992/101,325=0,196$  bar. Οπότε το μοριακό κλάσμα του ατμού, πριν μπει το μίγμα στο συμπιεστή, για πίεση λειτουργίας πριν τον συμπιεστή 0,95 bar, θα είναι  $y_1 = p_{1sat}/p_{ολ} = p_{1sat}/0,95=0,21$ . Οπότε το μοριακό κλάσμα του αέρα πριν το συμπιεστή θα είναι  $y_2 = 1 - y_1 = 0,79$ . Επειδή τα μοριακά κλάσματα παραμένουν σταθερά κατά την πορεία τους μέσα από το συμπιεστή, οι παραπάνω τιμές θα είναι αυτές που αντιστοιχούν στην είσοδο στον συμπυκνωτή (αυλοί)

#### **2. Υπολογισμός παροχών**

Από τη χαρακτηριστική του συμπιεστή βρέθηκε ότι η ογκομετρική παροχή είναι  $V' = 5,35$  m<sup>3</sup> / hr ή σε μαζική παροχή  $M' = 0,00071619$  Kg /s.



Η μοριακή μάζα του μίγματος δίνεται από τη σχέση  $MB_M = MB_1 y_1 + MB_2 y_2$ . Τελικά βρέθηκε ότι  $MB_M = 26,61415$ .

Η γραμμομοριακή ροή του μίγματος  $N_{GE}$  στην είσοδο των αυλών (δείκτης E) για κάθε αυλό θα δίνεται από τη σχέση  $N_{GE} = M' / (MB_M \cdot 25)$ , όπου ο αριθμός 25 δηλώνει το πλήθος των αυλών. Η γραμμομοριακή ροή του ατμού και του αέρα στην είσοδο των αυλών θα είναι ίση με τη γραμμομοριακή ροή του μίγματος  $N_{GE}$ , πολλαπλασιασμένη με το μοριακό κλάσμα του ατμού και του αέρα αντίστοιχα. Τελικά είναι  $N_{1_{GE}} = 0,000226045$  mole/s, και  $N_{2_{GE}} = 0,00085036$  mole/s, όπου ο δείκτης 1 δηλώνει τον ατμό, ενώ ο δείκτης 2 τον αέρα, και ο δείκτης E δηλώνει τη είσοδο του μίγματος (G).

### 3. Υπολογισμός κρίσιμης θερμοκρασίας και πίεσης

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης θερμοκρασίας του μίγματος χρησιμοποιήθηκε η σχέση  $T_{CM} = \sum_j y_j T_{cj}$ . Τελικά είναι  $T_{CM} = 240,292$  βαθμούς Kelvin. Παρόμοια για τον υπολογισμό της κρίσιμης πίεσης του μίγματος χρησιμοποιήθηκε η σχέση  $P_{cm} = R(\sum_j y_j Z_{cj}) T_{cm} / \sum_j y_j u_{cj}$ , όπου R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων και u είναι ο ειδικός όγκος. Τελικά βρέθηκε ότι  $P_{CM} = 6941259,846$  N/m<sup>2</sup> ή 69,4 bar.

### 4. Υπολογισμός δυναμικού ιξώδους

Για το ιξώδες αραιωμένων αερίων χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση  $n^0 = [(n\xi)^{r,0} f_p^0 f_Q^0] / \xi$   
 όπου:  $(n\xi)^{r,0} = 0,807 T_r^{0,618} - 0,357 e^{-0,449 T_r} + 0,340 e^{4,058 T_r} + 0,018$ , με  $T_r = T / T_{cm}$ , και  
 Τα είναι η θερμοκρασία λειτουργίας, και ξ είναι ο αδιάστατος παράγοντας  $\xi = T_{CM}^{1/6} R^{1/6} N_A^{1/3} / M_{BM}^{1/2} P_{CM}^{2/3}$ , όπου  $N_A$  είναι η σταθερά του Avogadro,  
 και  $f_p^0, f_Q^0$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από τον παράγοντα πολικότητας  $\mu_R = \mu^2 P_C / (k T_C)^2$ , όπου μ είναι η διπολική ροπή και k η σταθερά Boltzmann., και οι τιμές των οποίων δίνονται από τις σχέσεις

$$f_p^0 = 1, \text{ για } 0 \leq \mu_R \leq 0,022$$

$$\text{και } f_Q^0 = 1 + 30,55 \left[ (0,292 - Z_c) \right]^{1,72} (0,96 + 0,1(T_r - 0,7)), \text{ για } 0,075 \leq \mu_R$$



και  $f_Q^o = 1$ , για τον ατμό και τον αέρα

Τελικά είναι  $\xi_m = 50478,7452$ , και  $n^0 = \left[ (n\xi)^{r_o} f_p^o f_Q^o \right] 1/\xi = 1,71844\text{E-}05 \text{ Ns/m}^2$

### 5. Υπολογισμός κινηματικού ιξώδους

Το κινηματικό ιξώδες θα δίνεται από τη σχέση  $\nu = n/\rho_m$ , όπου  $\rho_m$  είναι πυκνότητα του μίγματος στη θερμοκρασία εισόδου του μίγματος στο συμπυκνωτή, δηλαδή στην είσοδο των αυλών. Η πυκνότητα του μίγματος  $\rho_m$  υπολογίζεται από τη σχέση  $\rho_m = 1/u_m$ , όπου  $u_m$ , είναι ο ειδικός όγκος του μίγματος και ο οποίος υπολογίζεται από το νόμο του **Amagat** :

$u_m = \sum y_j u_j$ , όπου  $y_j$  είναι το μοριακό κλάσμα του ατμού ή του αέρα, αντίστοιχα και  $u_j$  και είναι ο ειδικός όγκος του ατμού ή του αέρα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του ατμού και του αέρα για τη θερμοκρασία εισόδου ( $63,3^0 \text{ C}$ ).

$n_1 =$	1.1E-05	Kg/ms
$n_2 =$	2.03E-05	Kg/ms
$\lambda_1 =$	0.0215	W/mK
$\lambda_2 =$	0.0288	W/mK
$\rho_1 =$	0.16	Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_2 =$	1.044	Kg/m <sup>3</sup>
$u_1 =$	6.25	m <sup>3</sup> /Kg
$u_2 =$	0.957854	m <sup>3</sup> /Kg
$u_m =$	2.069205	m <sup>3</sup> /Kg
$C_{pG1} =$	0.107944	J/molK
$C_{pG2} =$	0.034913	J/molK
$C_{pGm} =$	0.05025	J/molK

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1**

όπου:  $n_1$  και  $n_2$  είναι τα δυναμικά ιξώδη του ατμού και του αέρα αντίστοιχα,  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  είναι οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας,  $\rho$  είναι η πυκνότητα,  $u$  είναι ο ειδικός όγκος και  $C_p$  είναι η ισοβαρής ειδική θερμοχωρητικότητα. Τελικά είναι  $u_m = 2.069204981 \text{ m}^3/\text{Kg}$ , και άρα  $\rho_m = 1/u_m = 0.483277398 \text{ Kg/m}^3$ . Έτσι το κινηματικό ιξώδες θα είναι  $\nu = n/\rho_m = 3.5558\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$ .

## 6. Υπολογισμός αριθμού Reynolds και συντελεστών συναγωγής

Ο αριθμός Reynolds θα δίνεται από τη σχέση  $Re = 4M_{GE}/\pi d 25\eta_{GE}$ . Με βάση τις παραπάνω τιμές βρέθηκε ότι  $Re = 265.4576169$ . Άρα η ροή είναι μια υδροδυναμικά ανεπτυγμένη στρωτή ροή. ο τοπικός αριθμός Nu θα δίνεται από τη σχέση  $Nu = 3,66$  για μικρές τιμές  $Re Pr d_i/x$ . Έτσι μπορούμε να βρούμε το τοπικό συντελεστή συναγωγής  $a_{GE} = 0.983625 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Θεωρούμε το συντελεστή συναγωγής του ψυκτικού μέσου  $a_{KE} = 10000 \text{ W/m}^2\text{K}$

και το συντελεστή συναγωγής του συμπυκνώματος  $a_{FE}$  άπειρο. Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας  $k$  αποτελείται από τους συντελεστές συναγωγής του συμπυκνώματος, του ψυκτικού μέσου και του τοιχώματος του σωλήνα:  $1/k = 1/a_F + s/\lambda_R + 1/a_K$ ,

όπου:  $s$  είναι το πάχος του σωλήνα και  $\lambda_R$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του σωλήνα (χάλκινου). Τελικά είναι  $1/k = 0.000103413$  και  $k = 9669.966997 \text{ W/m}^2\text{K}$

## 7. Υπολογισμός του συντελεστή διάχυσης $\delta_G$

Ο τύπος που υπολογίζει το συντελεστή διάχυσης είναι ο ακόλουθος:  $\delta_G = (10^{-3} T^{1.75} ((MB_1 + MB_2)/MB_1 MB_2)^{1/2} 1,013)/p((\Sigma u_1)^{1/3} + (\Sigma u_2)^{1/3})^2$ , όπου  $T$  η θερμοκρασία σε Kelvin και η πίεση  $P$  σε bar. Οι λεγόμενοι όγκοι διάχυσης  $u$  παίρνονται από πίνακες και για την περίπτωση του ατμού και του αέρα είναι  $\Sigma u_1 = 12.7$  και  $\Sigma u_2 = 20.1$ . Τελικά υπολογίζεται ότι  $\delta_G = 2.86052E-05 \text{ m}^2/\text{s}$

## 8. Υπολογισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του μίγματος

Για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του μίγματος χρησιμοποιήθηκε η σχέση του Wassiljewa:

$$\lambda_m = \sum y_i \lambda_i / \sum y_i A_{y_i}, \text{ όπου σύμφωνα με τους Mason και Saxena ισχύει } A_{y_i} = (1 + (n_i/n_j)^{1/2} (MB_j/MB_i)^{1/4})^2 / (8 + (1 + MB_i/MB_j))^{1/2}$$

Στην έκφραση αυτή  $\lambda_i$  και  $n_i$  είναι οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας και τα ιξώδη των καθαρών συστατικών, τα οποία δόθηκαν στον πίνακα 1 αυτού του κεφαλαίου, ενώ με  $MB$  δηλώνουμε τις μοριακές μάζες των καθαρών συστατικών. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές που βρέθηκαν:

A12=	A11=	A21=	A22=
0,928856	1	1,065628	1

Τελικά βρέθηκε ότι  $\lambda_m = 0.02722657 \text{ W/mK}$

## 9. Υπολογισμός γραμμομοριακής πυκνότητας

Η γραμμομοριακή πυκνότητα δίνεται από τη σχέση:  $n = \rho_m / MB_m$ , όπου  $MB_m$  και  $\rho_m$  είναι η μοριακή μάζα και η πυκνότητα του μίγματος. Τελικά βρέθηκε ότι  $n=18.15866366 \text{ mol/m}^3$ .

## 10. Υπολογισμός αριθμού Lewis

Ο αριθμός Lewis είναι μια σχέση η οποία προσεγγίζει το συντελεστή συναγωγής και το συντελεστή μεταφοράς ύλης:

$Le = \lambda_m / n_m c_{pm} \delta$  όπου  $\lambda_m$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του μίγματος,  $n_m$  είναι η γραμμομοριακή πυκνότητα του μίγματος,  $c_{pm}$  είναι η ισοβαρής ειδική θερμοχωρητικότητα του μίγματος και  $\delta$  είναι ο συντελεστής διάχυσης του μίγματος.

## 11. Προσδιορισμός της θερμοκρασίας του συμπυκνώματος

Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.3. η θερμοκρασία του συμπυκνώματος βρίσκεται με επαναληπτική διαδικασία από τη σχέση :

$k(T_F - T_K) = a_G \phi_T (\Delta h_{v1} / c_{PG1} + (T_G - T_F) / (1 - \exp(-\phi_T)))$ , όπου  $k$  είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας  $T_F$ ,  $T_K$  είναι οι θερμοκρασίες του συμπυκνώματος και του ψυκτικού μέσου αντίστοιχα,  $a_G$  είναι ο συντελεστής συναγωγής,  $\Delta h_{v1}$  είναι η ειδική ενθαλπία εξατμίσεως  $c_p$  είναι η ισοβαρής ειδική θερμοχωρητικότητα και  $\phi_T$  ισούται με  $\phi_T = c_{PG1} / c_{PG} Le^{0.6} \ln(y_{2F} / y_{2B})$ , όπου  $y_{2F}$  είναι το ποσοστό του κλάσματος του αέρα στο συμπύκνωμα, και  $y_{2B}$  η περιεκτικότητα του αέρα.

Με επαναληπτική διαδικασία βρήκαμε ότι η  $T_F$  είναι περίπου  $60,0001^\circ\text{C}$

## Β Έξοδος

Με ανάλογες διαδικασίες με τις παραπάνω βρήκαμε για την έξοδο, όπου αλλάζει η θερμοκρασία υγροποίησης και το κλάσμα του  $\text{mole}$  των δύο συστατικών του μίγματος, τα ακόλουθα :

Η θέση της θερμοκρασίας  $T_F$  του συμπυκνώματος μεταξύ της θερμοκρασίας  $T_G$  του αερίου και της θερμοκρασίας  $T_K$  του ψυκτικού μέσου εξαρτάται από την κατανομή των αντιστάσεων συναγωγής θερμότητας και μεταφοράς ύλης στο ψυκτικό μέσο. Η κατανομή των αντιστάσεων μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης, αφού τι αδρανές αέριο συσσωρεύεται στο μίγμα ατμού / αερίου. Με τον υπολογισμό των θερμοκρασιών του συμπυκνώματος στην είσοδο και στην έξοδο του συμπυκνωτή μπορεί να διαπιστωθεί αν η

συνολική διεργασία συμπύκνωσης καθορίζεται από τη συναγωγή θερμότητας ή τη μεταφορά ύλης.

$M' = 2.8E-05 \text{ KG/S}$
$MB_M = 26.8385$
$N_{GE} = M'/(MB_M * 25) = 8.50E-04 \text{ mol/s}$
$y_1 = 0,19$
$y_2 = 0,81$
$N_{1GE} = 1.99E-04 \text{ mol/s}$
$N_{2GE} = 8.50E-04 \text{ mol/s}$
$T_{CM} = 229.988 \text{ K}$
$P_{CM} = 6622875.976 \text{ N/m}^2 \text{ ή } 66.2287 \text{ bar}$
$T_r = T/T_{cm} = (273+61)/229,988 = 1,45$
$\xi = 51488.21414 \text{ m}^2/\text{Ns}$
$u_m = 2.142768544 \text{ m}^3/\text{Kg}$
$\rho_m = 1/u_m = 0.466685962 \text{ Kg/m}^3$
$v = n/\rho_m = 3.71081E-05 \text{ m}^2/\text{s}$
$1/k = 1/a_F + s/\lambda_R + 1/a_K = 0.000654434 \text{ m}^2\text{K/W}$
$k = 1528.037498 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
$\delta_G = 2.82468E-05 \text{ m}^2/\text{s}$
$\lambda_m = \sum y_i \lambda_i / \sum y_i A_i = 0.027222313 \text{ W/mK}$
$Le = \lambda_m / n_m c_{pm} \delta = 1136.945362$
$n_m = 17.38867531 \text{ mol/m}^3$

Αφού στην έξοδο το μίγμα έχει τη μικρότερη περιεκτικότητα σε ατμό, δηλαδή την υψηλότερη περιεκτικότητα σε αδρανές αέριο (αέρας), πρέπει να ελεγχθεί αν στην έξοδο είναι καθοριστική η αντίσταση συναγωγής. Ως πρακτικός κανόνας αναφέρεται ότι η συνολική διεργασία συμπύκνωσης καθορίζεται από τη συναγωγή θερμότητας εφόσον στην έξοδο ισχύει

$$(k/a_{GD})_A < 0,5,$$

όπου:  $k$  είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας  $a_{GD}$  είναι ένας υποθετικός συντελεστής συναγωγής του μίγματος αέρα / ατμού, και ο δείκτης  $A$  δηλώνει τη έξοδο από τον συμπυκνωτή.

Επειδή στην πορεία της συμπύκνωσης συσσωρεύεται το αδρανές αέριο, αυξάνεται η αντίσταση μεταφοράς ύλης. Γι' αυτό πριν από όλα ελέγχεται αν στην είσοδο του συμπυκνωτή είναι καθοριστική η αντίσταση μεταφοράς ύλης. Στην περίπτωση αυτή ισχύει :

$(k/a_{GD})_E > 2$ . Ο λόγος  $(k/a_{GD})$  προσδιορίζεται από τη σχέση :

$(k/a_{GD}) = (T_T - T_F) / T_F - T_K$ , όπου  $T_T$  είναι η θερμοκρασία υγροποίησης στην είσοδο και στη έξοδο του συμπυκνωτή.

Στην περίπτωση μας βρήκαμε ότι  $(k/a_{GD})_E = 32$  και  $(k/a_{GD})_A = 502$ . Άρα στην περίπτωση μας η συμπύκνωση καθορίζεται από τη μεταφορά ύλης.

Η επιφάνεια εναλλαγής μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση

$NTU_{G2} = 1/\bar{y}_{2F} [Li(x_E) - Li(x_A)]$ , με  $NTU_{G2} \equiv n_G \beta_G A / N_{G2}$ . Ο αναλυτικός προσδιορισμός των παραμέτρων της παραπάνω εξίσωσης καθώς και η περιγραφή τους, παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.3. Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών για τον προσδιορισμό της επιφάνειας εναλλαγής.

$y_{2FE} =$	0.819068182
$x_E =$	1.036795167
$Li(x_E) =$	-3.284046944
$y_{2FA} =$	0.815261818
$x_A =$	1.006496072
$Li(x_A) =$	-5.033311337
$y_{2FE} =$	0.817165
$NTU_{G2} =$	2.140650166
$\beta_1 =$	0.016657613
$\beta_2 =$	0.119409332
$\beta_{\pi} =$	0.068033473
$\Pi_{\pi E} =$	18.15866366
$\Pi_{\pi A} =$	17.38867531
$\Pi_{\pi EA} =$	17.77366949

Τελικά η επιφάνεια εναλλαγής προσδιορίσθηκε ότι είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που διαθέτουμε, ενώ η τιμή της ποικίλει ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκετε το μίγμα.



## Υπολογισμός κόστους λειτουργίας

Γνωρίζουμε ότι το ισοεντροπικό έργο του συμπιεστή δίνεται από τη σχέση :

$W_s = -c_p T_1 ((P_2/P_1)^{R/C_p} - 1)$ , όπου R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων,  $C_p$  είναι η ειδική ισοβαρής θερμοχωρητικότητα του μίγματος,  $P_1$  και  $P_2$  είναι η πίεση πριν και μετά τον συμπιεστή, και T είναι η θερμοκρασία.

Για θερμοκρασία λειτουργίας  $20^\circ \text{C}$  έχουμε :

$$\begin{aligned} C_{\text{μίγματος}} &= Y_{\text{υδρατμού}} C_{\text{ρυδρατμού}} + Y_{\text{αέρα}} C_{\text{ραέρα}} \\ &= (\text{moles}_{\text{υδρατμού}}/\text{moles}_{\text{μίγματος}}) C_{\text{ρυδρατμού}} + (\text{moles}_{\text{αέρα}}/\text{moles}_{\text{μίγματος}}) C_{\text{ραέρα}} \\ &= \left( \frac{P_{\text{SAT}}}{P_1} \right) \cdot C_{\text{ρυδρατμού}} + \left( \frac{(P_1 - P_{\text{SAT}})}{P_1} \right) \cdot C_{\text{ραέρα}} n \end{aligned}$$

σε Joule/mol. μίγματος K ,

όπου από θερμοδυναμικούς πίνακες για τους  $20^\circ \text{C}$  λαμβάνεται:

$C_{\text{ρυδρατμού}} = 1,9 \text{ KJ/Kg K} = 34,2 \text{ J/mol.K}$  και  $C_{\text{ραέρα}} = 1 \text{ KJ/Kg K} = 29 \text{ J/mol.K}$ , για τις ειδικές θερμοχωρητικότητες του υδρατμού και του αέρα, αντίστοιχα.

Για τους  $20^\circ \text{C}$  από το νόμο του Rault  $Y_{\text{υδρατμού}} = P_{\text{sat}}/P_{\text{ολικό}} = P_{\text{sat}}/0,95$ , όπου για τους  $20^\circ \text{C}$  είναι  $P_{\text{sat}} = 2,33 \text{ kPa} = 2330/10^5 \text{ bar} = 0,0233 \text{ bar}$ . Άρα  $Y_{\text{υδρατμού}} = 0,0233/0,95 = 0,03$ . Έτσι θα είναι και  $Y_{\text{αέρα}} = 1 - 0,03 = 0,97$

Άρα θα είναι  $C_{\text{μίγματος}} = 29,156 \text{ J/mol.K}$

Θεωρείται ότι η πίεση πριν το συμπιεστή είναι  $P_1 = 0,95 \text{ bar}$  και η θερμοκρασία  $T_1 = 20^\circ \text{C}$ , και ότι ο συμπιεστής προκαλεί μια αύξηση της πίεσης κατά  $\Delta P = 0,15 \text{ bar}$ . Οπότε η πίεση μετά το συμπιεστή θα είναι  $P_2 = P_1 + \Delta P$ .

Θεωρώντας τη συμπίεση ισοεντροπική ( $\Delta S = 0$ ), η θερμοκρασία εξόδου του μίγματος από το συμπιεστή θα είναι:

$$T_2' = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{R/C_{\text{μίγματος}}}, \text{ σε K}$$

όπου  $R = 8,314 \text{ J/mol K}$  είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων. Οπότε θα είναι  $T_2' = 32^\circ \text{C}$

Η πραγματική θερμοκρασία εξόδου του μίγματος από το συμπιεστή θα είναι:  $T_2 = T_1 + \frac{(T_2' - T_1)}{\eta}$ , σε K

όπου  $\eta = 0,75$  λαμβάνεται ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή.

Άρα θα είναι  $T_2 = 36^\circ \text{C}$

Οπότε το έργο το έργο του συμπιεστή θα είναι

$$W_s = -c_p T_1 ((P_2 / P_1)^{R/C_p} - 1) = 364 \text{ J/mole}_{\text{μίγματος}}$$

Άρα η ισχύς του συμπιεστή θα είναι  $P = 364 \text{ W s}^{-1}$  ανά mole μίγματος.

Το μοριακό βάρος του μίγματος στους  $20^\circ \text{C}$  θα είναι  $MB_m = y_1 MB_1 + y_2 MB_2 = 28,67 \text{ gr/mole}$ . Γνωρίζουμε από τη χαρακτηριστική καμπύλη του συμπιεστή ότι η ογκομετρική παροχή που δίνει ο συμπιεστής, από το σχήμα 3.9 για  $\Delta P = 0,15 \text{ bar}$  (σχήμα 4.18), είναι  $V' = 5,35 \text{ m}^3/\text{hr}$ . Στους  $20^\circ \text{C}$  είναι  $\rho_{\text{ατμού}} = 0,017 \text{ kg/m}^3$  και  $\rho_{\text{αέρα}} = 1,188 \text{ kg/m}^3$ . Η πυκνότητα του μίγματος θα είναι  $\rho_{\text{μίγματος}} = y_{\text{ατμού}} \rho_{\text{ατμού}} + y_{\text{αέρα}} \rho_{\text{αέρα}} = 1,15 \text{ kg/m}^3$ . Άρα η μαζική παροχή θα είναι  $m' = \rho_{\text{μίγματος}} V' = 6,15 \text{ kg/hr} = 214,5 \text{ mole/hr}$ . Άρα ο συμπιεστής θα καταναλώνει  $(0,364 \text{ kJ/mole}_{\text{μίγματος}}) (214,5 \text{ mole/hr}) = 78,1 \text{ kJ/hr} = 0,0217 \text{ kWh/hr}$

Για μια ώρα λειτουργίας στους  $20^\circ \text{C}$  από τον πίνακα 4.16 φαίνεται ότι η ποσότητα του νερού που παράγεται είναι  $10 \text{ ml} = 10^{-5} \text{ m}^3$ . Άρα η ενέργεια που καταναλώνεται στο συμπιεστή είναι  $0,0217 / 10^{-5} = 2170 \text{ kWh}$  ανά  $\text{m}^3$  αποσταγμένου νερού.

## 6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχε σαν σκοπό τη μελέτη μέχρι ενός σημείου, μιας καινούργιας ιδέας, η οποία είναι δυνατό να αποτελέσει μια πρότυπη μέθοδο θερμικής αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού.

Όπως προκύπτει από τη μελέτη της διπλωματικής εργασίας, η ιδέα αυτή στηρίζεται στην ενσωμάτωση των βασικών αρχών της μηχανικής συμπίεσης ατμών (MVC- mechanical vapor compression), της εξάτμισης εκτόνωσης (flash evaporation) και της κλασματικής απόσταξης (rectification) σε μια καινοτόμο μέθοδο εξάτμισης. Η μέθοδος αυτή υλοποιήθηκε στο εργαστήριο των φυσικών και χημικών διεργασιών. Η λειτουργία όμως της συσκευής έδειξε ότι η συσκευή είχε αρκετά προβλήματα όταν τέθηκε σε λειτουργία. Η συσκευή λύθηκε τέσσερις φορές και έγινε βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας. Η κατανάλωση ενέργειας σε αυτή τη μέθοδο δεν γίνεται αποκλειστικά στο στάδιο της συμπίεσης, για τη λειτουργία του συμπιεστή, αλλά ενέργεια καταναλώνεται επίσης και στην αντίσταση, η οποία λειτουργεί για να αντισταθμίσει τις απώλειες λόγω διαρροών.

Με τη θερμοδυναμική ανάλυση που έγινε υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής για τη συμπύκνωση των υδρατμών, καθώς και το κόστος λειτουργίας της συσκευής σε kWh ανά m<sup>3</sup> αποσταγμένου νερού που παράγεται.

Τα πειράματα που έγιναν, και οι μετρήσεις που πάρθηκαν οδήγησαν στην εξαγωγή μερικών συμπερασμάτων :

- Η συσκευή αρχικά είχε πολλές απώλειες, γεγονός που οδήγησε στο λύσιμο της συσκευής για τις απαραίτητες διορθώσεις.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μια αναλογική αύξηση της ποσότητας του αποσταγμένου νερού που παράγεται.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του νερού τροφοδοσίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του αποσταγμένου νερού που παράγεται.
- Έχουμε απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Όσο μειώνουμε αυτές τις απώλειες, τόσο αυξάνει η ποσότητα του γλυκού νερού που παίρνουμε.
- Η λειτουργία της συσκευής με αλμυρό νερό έδειξε ότι η ποσότητα γλυκού νερού που παίρνουμε είναι λίγο μικρότερη από αυτή που παίρνουμε όταν η συσκευή λειτουργεί με καθαρό νερό.

- Η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας ήταν πολύ μεγαλύτερη από αυτή που ήταν διαθέσιμη, γεγονός που οδήγησε ξανά στο λύσιμο της συσκευής και την προσθήκη ελασμάτων τα οποία αύξησαν την επιφάνεια εναλλαγής.

- Τέλος, ο συμπιεστής δεν μπορούσε να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες άνω  $70^{\circ}\text{C}$ , καθώς παρουσίαζε προβλήματα λειτουργίας. Η χρήση ενός καλύτερου συμπιεστού ίσως να έδινε καλύτερα αποτελέσματα.

- Το κυριότερο συμπέρασμα που προκύπτει όμως από την πειραματική διαδικασία είναι ότι για τη θερμοκρασία των  $20^{\circ}\text{C}$  η ποσότητα που παίρνουμε συμφωνεί με τις θερμοδυναμικές προβλέψεις. Με άλλα λόγια, για τη θερμοκρασία των  $20^{\circ}\text{C}$  αποδείχθηκε η αρχή λειτουργίας της συσκευής.

Συνέχιση της διπλωματικής εργασίας θα αποτελούσε η συνέχεια των πειραμάτων με αλλαγές και συνδυασμούς παραγόντων όπως η θερμοκρασία, η ποσότητα του νερού τροφοδοσίας, καθώς και η χρήση καλύτερου συμπιεστή. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε επίσης η λειτουργία της συσκευής σε χαμηλότερες πιέσεις από αυτές που δοκιμάστηκαν. Επίσης η αναζήτηση καινούργιων αποτελεσματικών μεθόδων αύξησης της επιφάνειας εναλλαγής θα βοηθούσε στην βελτίωση της λειτουργίας της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης.

## **7.ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

**A. Διαγράμματα κατανάλωσης ενέργειας στο συμπιεστή.**

**B. Πίνακες και αναφορές τεχνικών μεθόδων.**

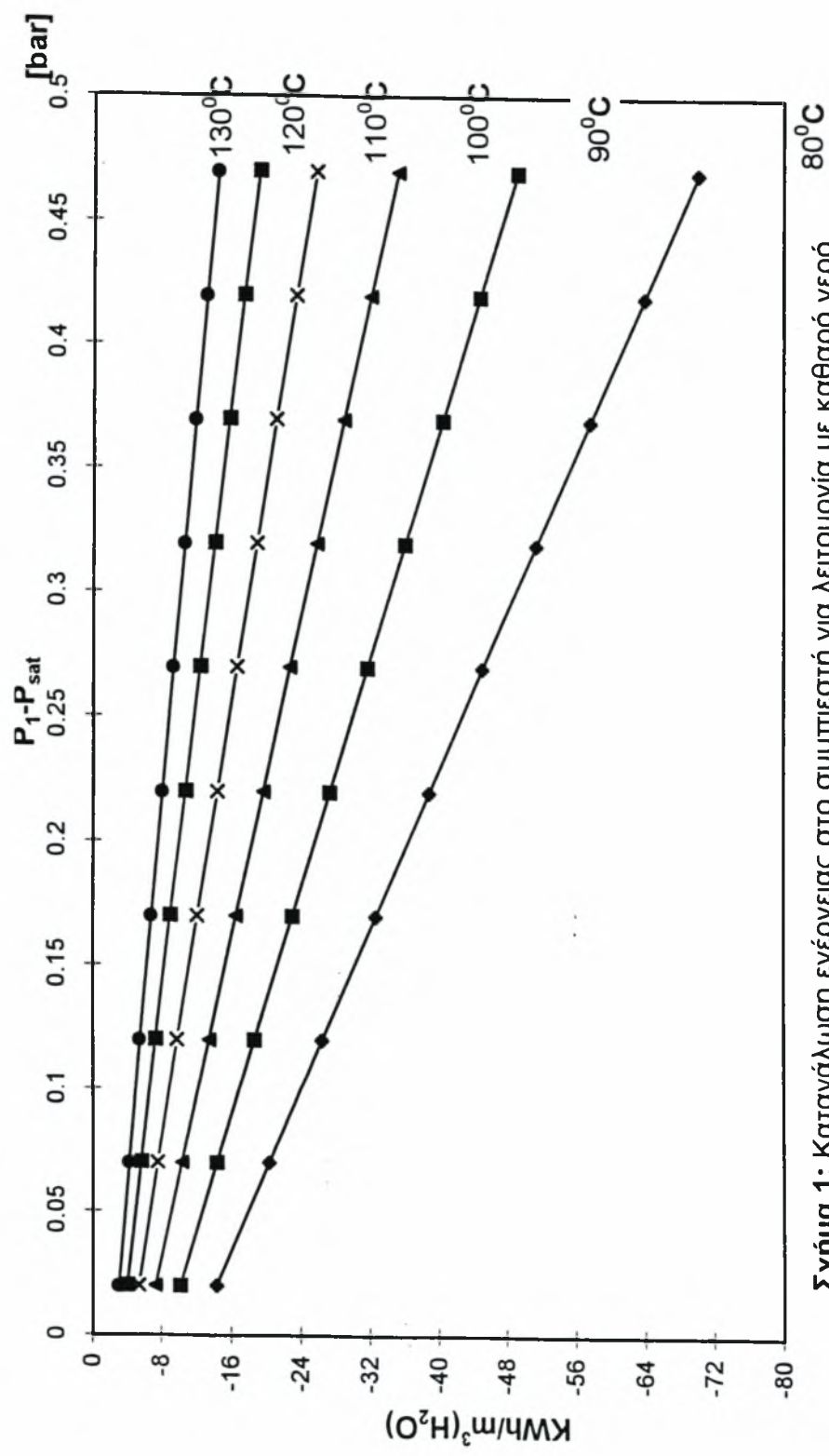
**Γ. Πίνακας υπολογισμού βαθμονόμησης υγρασιομέτρου.**

**Δ. Τεχνικά και κατασκευαστικά στοιχεία συμπιεστή και υλικού πορώδους  
διαφράγματος**

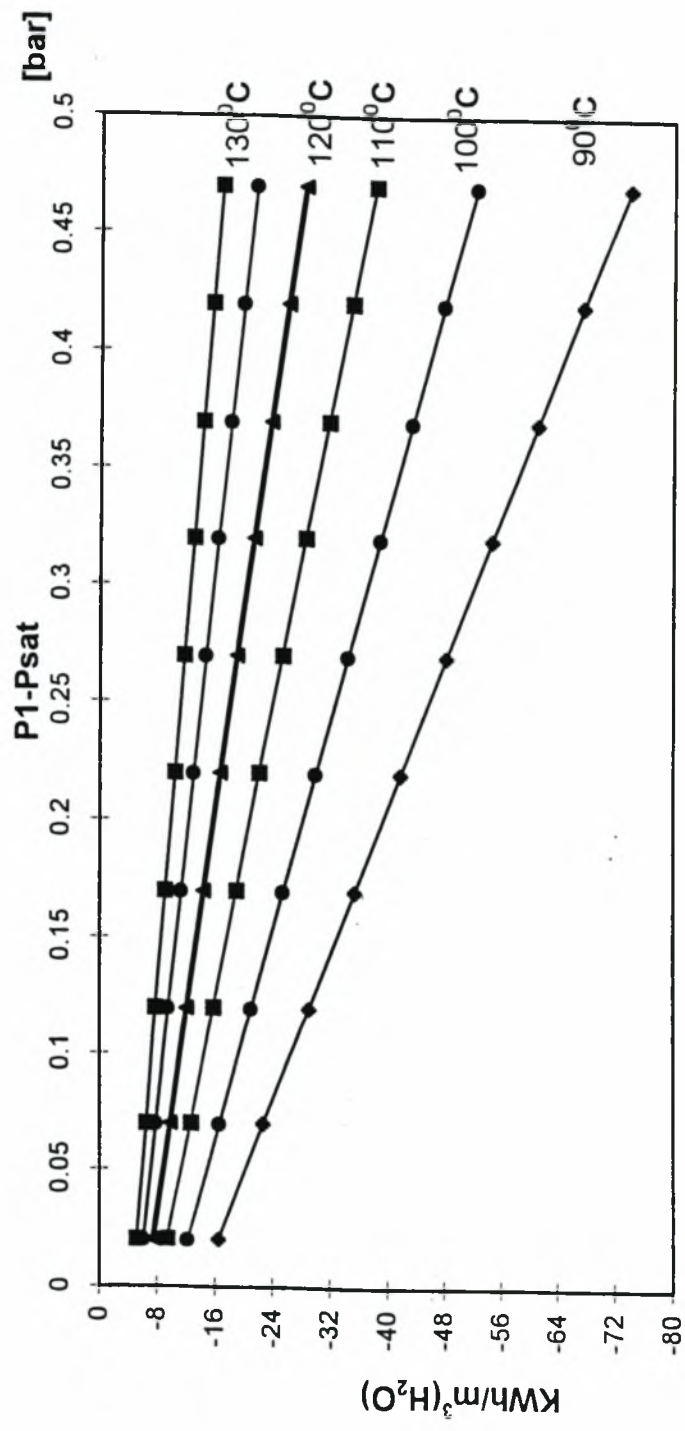


## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**

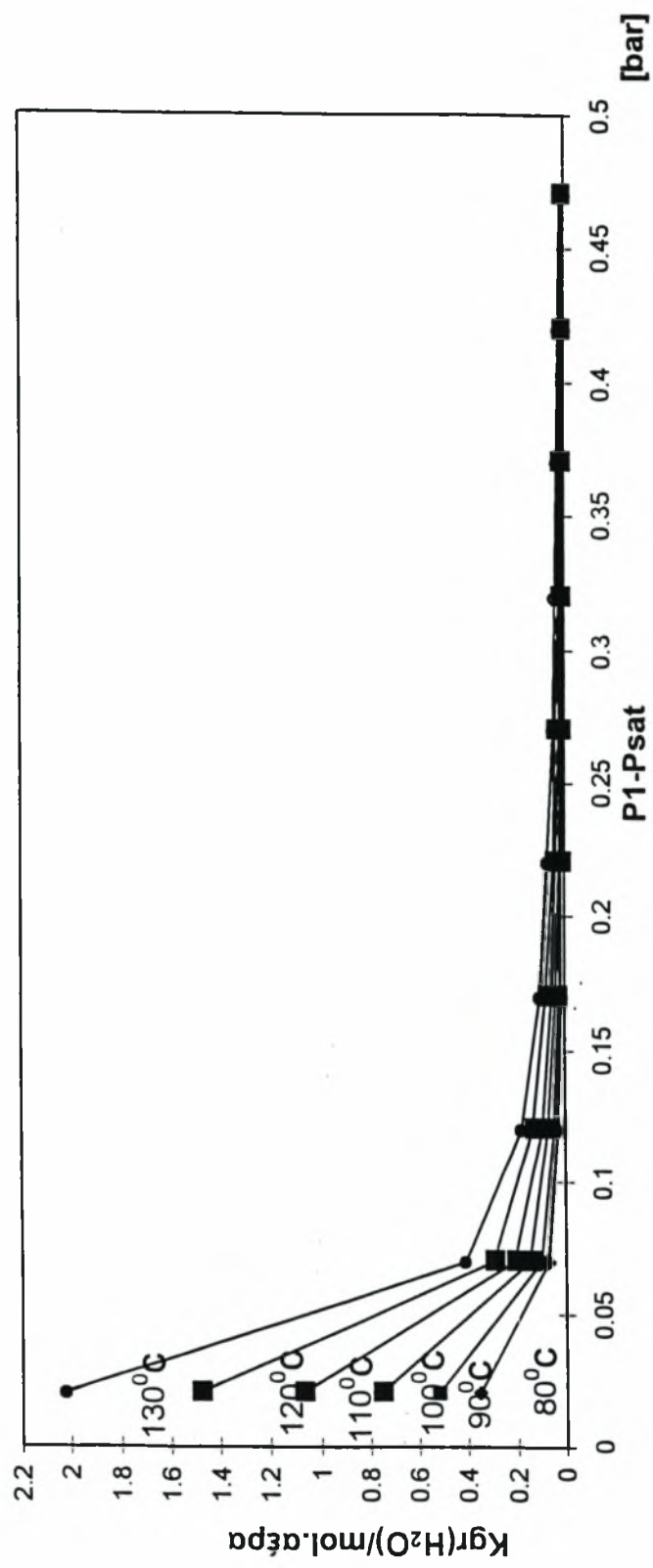
**Διαγράμματα κατανάλωσης ενέργειας στο συμπιεστή**



Σχήμα 1: Κατανάλωση ενέργειας στο συμπιεστή για λειτουργία με καθαρό νερό. 80°C



Σχήμα 2: Κατανάλωση ενέργειας στο συμπιεστή για λειτουργία με θαλασσινό νερό.



Σχήμα 2.: Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται ανά mol. αέρα συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας, για λειτουργία με καθαρό νερό.



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

### **Πίνακες και αναφορές τεχνικών μεθόδων**

Passive techniques
Treated surfaces
Rough surfaces
Extended surfaces
Displayed enhancement devices
Swirl flow devices
Coiled tubes
Surface tension devices
Additives for fluids
Active techniques
mechanical aids
Surface vibration
Fluid vibration
Electrostatic fields
Suction and injection
Jet impingement
Compound enhancement
Rough surface with a twisted-tape swirl flow device

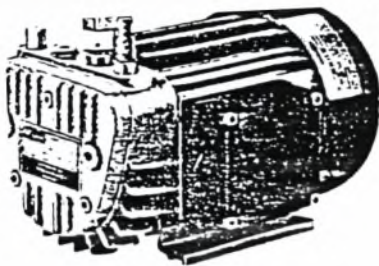
**Πίνακας 1:** Κατάταξη τεχνικών ανύψωσης επιφάνειας εναλλαγής

Treated surfaces	O Connor and You
Rough surfaces	
Extended surfaces	Ciofalo and Collins
Displayed enhancement devices	Eckels
Swirl flow devices	Fiebig and Sanchez
Coiled tubes	Eason
Surface tension devices	Fukusako
Additives for fluids	Mcgills and Carey
mechanical aids	Lee and Singh
Surface vibration	Soria and norton
Fluid vibration	Hong
Electrostatic fields	Ohadi
Suction and injection	Inagaki and Komori
Jet impingement	Chen
Compound enhancement	Gau and Lee

**Πίνακας 2:**Προσωπικότητες που ασχολήθηκαν με την ανύψωση της μεταφοράς θερμότητας

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**

- . Τεχνικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά συμπιεστή και υλικού πορώδους διαφράγματος**



**ACCOLINO**

Urehschieberverdichter. Kompakte, einbaufreundliche Bauart, besonders leiser Lauf, korrosionsschutzter Rotor, Druckanschluß von oben und stirnseitig möglich. Schlauchanschluß, Ansaugschalldämpfer und Druckbegrenzungsventil sind serienmäßig. Volumenstrom 3.5 bis 9.6 m<sup>3</sup>/h, Überdrücke bis 1 bar.

Dry running rotary vane compressors. Compact design, easy to build into machines, very low noise level, corrosion proof rotors. Pressure connections can be fitted onto the top or front. Hose connector, inlet silencer and pressure relief valve fitted as standard. Capacities from 3.5 to 9.6 m<sup>3</sup>/hr, pressure upto 1 bar.

Ce petit compresseur sec a palettes est d'une conception tres compacte et facilement integrable. Son fonctionnement est particulierement silencieux. Il beneficie d'un rotor traite anti-corrosion. La tuyauterie de refoulement peut se monter soit par le haut, soit de maniere frontale. Les debits vont de 3.5 a 9.6 m<sup>3</sup>/h pour une surpression jusqu'a 1 bar.

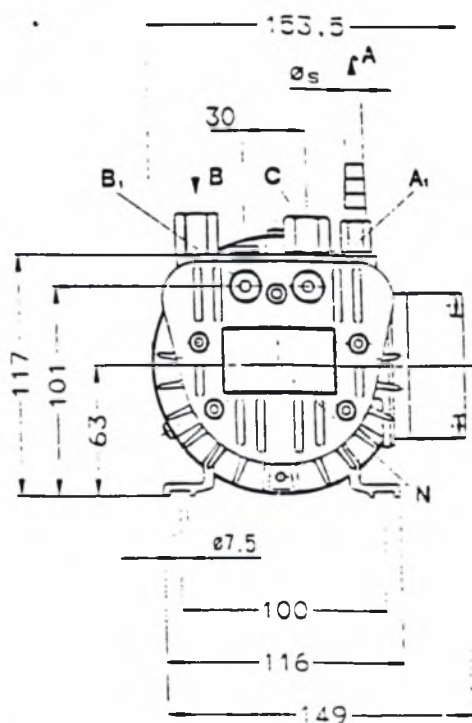
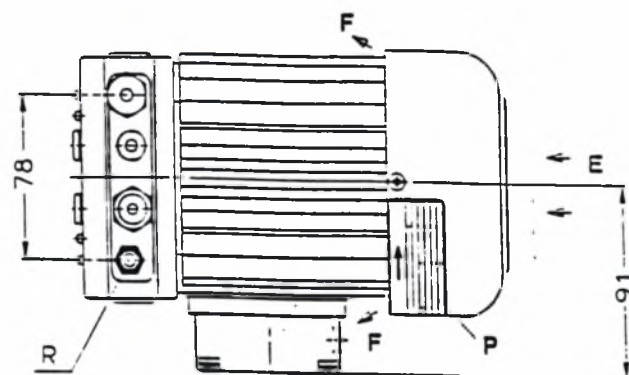
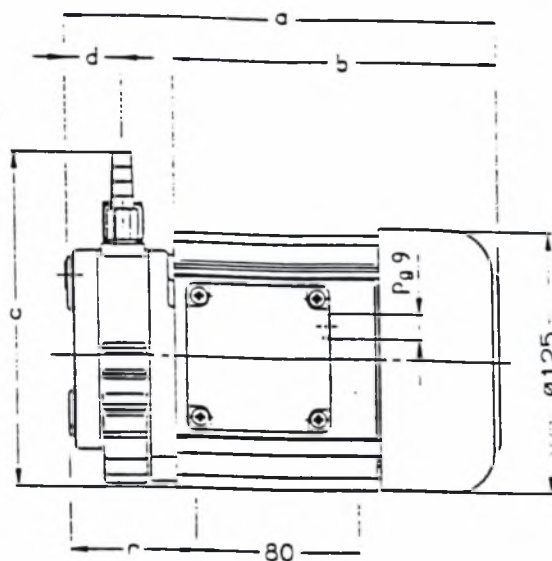
Piccolo compressore a palette funzionante a secco in esecuzione compatta, facile da montare, funzionamento particolarmente silenzioso, rotore trattato anticorrosione, attacco della pressione dall'alto o frontale. Incorpora attacco portagomma, silenziatore sull'aspirazione e valvola limitatrice di pressione. Portate da 3.5 a 9.6 m<sup>3</sup>/h, sovrappressione fino ad 1 bar.

**DTE**

DTE 3

DTE 6

DTE 8



[mm]

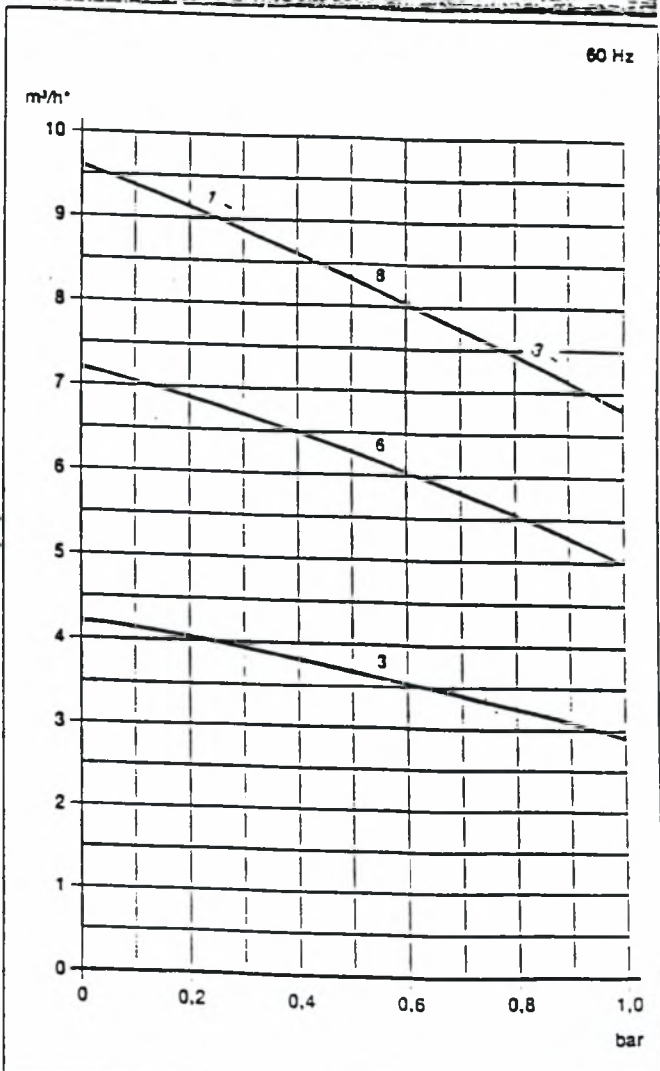
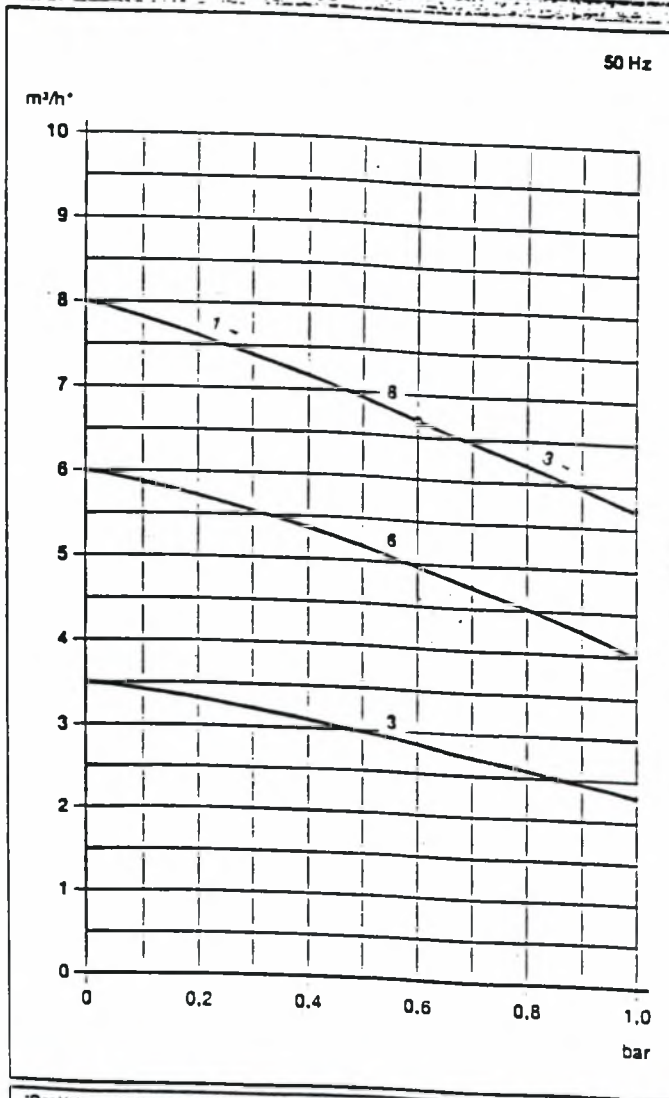
	A	Druck-Anschluß Alternativer Druck-Anschluß	Pressure connection Pressure connection alternative	Raccordo surpressione Raccordo alternat surpression	Attacco pressione Attacco pressione alternativo
	B <sub>1</sub>	Ansaugung Alternative Ansaugung	Suction Suction alternative	Aspiration Aspiration alternative	Aspirazione Aspirazione alternativa
	C	Druck-Begrenzungsventil	Pressure limitation valve	Limiteur surpression	Valvola limitatrice di pressione
	E	Kühlluft-Eintritt	Cooling air entry	Entree air refroidissement	Entrata aria di raffreddamento
	F	Kühlluft-Austritt	Cooling air exit	Sortie air refroidissement	Uscita aria di raffreddamento
	N	Datenschild	Data plate	Etiquette caracteristique	Targhetta dati
	P	Motordatenschild	Motor data label	Etiquette caracterist. moteur	Targhetta dati del motore
DTE		3	6	8	
[mm]	a	209	224	249	
	b	158	158	179	
	c	152	158	158	
	d	24	38	27	
	r	59	74	79	
	øS	9	12	12	
	R	G 1/8	G 3/8	G 3/8	



bar	0.1 Hz	4.2	6.0	9.0
3 ~		1.0	7.2	9.6
1 ~			1.0	0.6 (1 ~) 1.0 (3 ~)
200-255/346-440 V (50/60 Hz) ↓				
230 V ± 10% (50/60 Hz) ✓				
kW (50 Hz)	3 ~	0.12	0.25	0.37
	1 ~	0.12	0.25	0.35
kW (60 Hz)	3 ~	0.145	0.30	0.44
	1 ~	0.145	0.30	0.42
A (50 Hz)	3 ~	1.1/0.63	1.4/0.81	2.42/1.4
	1 ~	1.3	2.3	3.9
A (60 Hz)	3 ~	0.9/0.52	1.44/0.83	2.25/1.3
	1 ~	1.4	2.5	3.4
min <sup>-1</sup>	50 Hz		2750	
	60 Hz		3300	
dB(A)	50 Hz	57	60	64
	60 Hz	58	61	66
kg		6.3	7.9	9.1
ZRD		6	6	12
ZRK		6 (03)	12 (03)	12 (03)
ZMS (50 Hz)	3 ~	16/10	16/10	40/16
	1 ~	16	24	40
ZMS (60 Hz)	3 ~	10/10	16/10	24/16
	1 ~	16	40	40

m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom	Capacity	Volume engendré	Portata volumetrica
bar	Überdruck	Pressure rating	Surpression	Sovrapressione
3 ~/1 ~	Motorausführung	Motor version	Execution moteur	Esecuzione motore
kW	Motorleistung	Motor rating	Puissance moteur	Potenza motore
A	Stromaufnahme	Current drawn	Intensité absorbée	Corrente nominale
min <sup>-1</sup>	Drehzahl	Speed	Vitesse rotation	Numero giri
dB(A)	mittlerer Schallpegel	Average noise level	Niveau sonore moyen	Rumorsità media
kg	max. Gewicht	Weight max.	Poids max.	Peso massimo
ZRD	Zubehör	Optional extras	Accessoires	Accessori
ZRK	Druck-Regulierventil	Pressure regulating valve	Valve de réglage pression	Valvola regolazione pressione
ZMS	Rückschlagventil	Non return valve	Clapet anti-retour	Valvola di non ritorno
	Motorschutzschalter	Motor starter	Démarrateur moteur	Interruttore magnetotermico

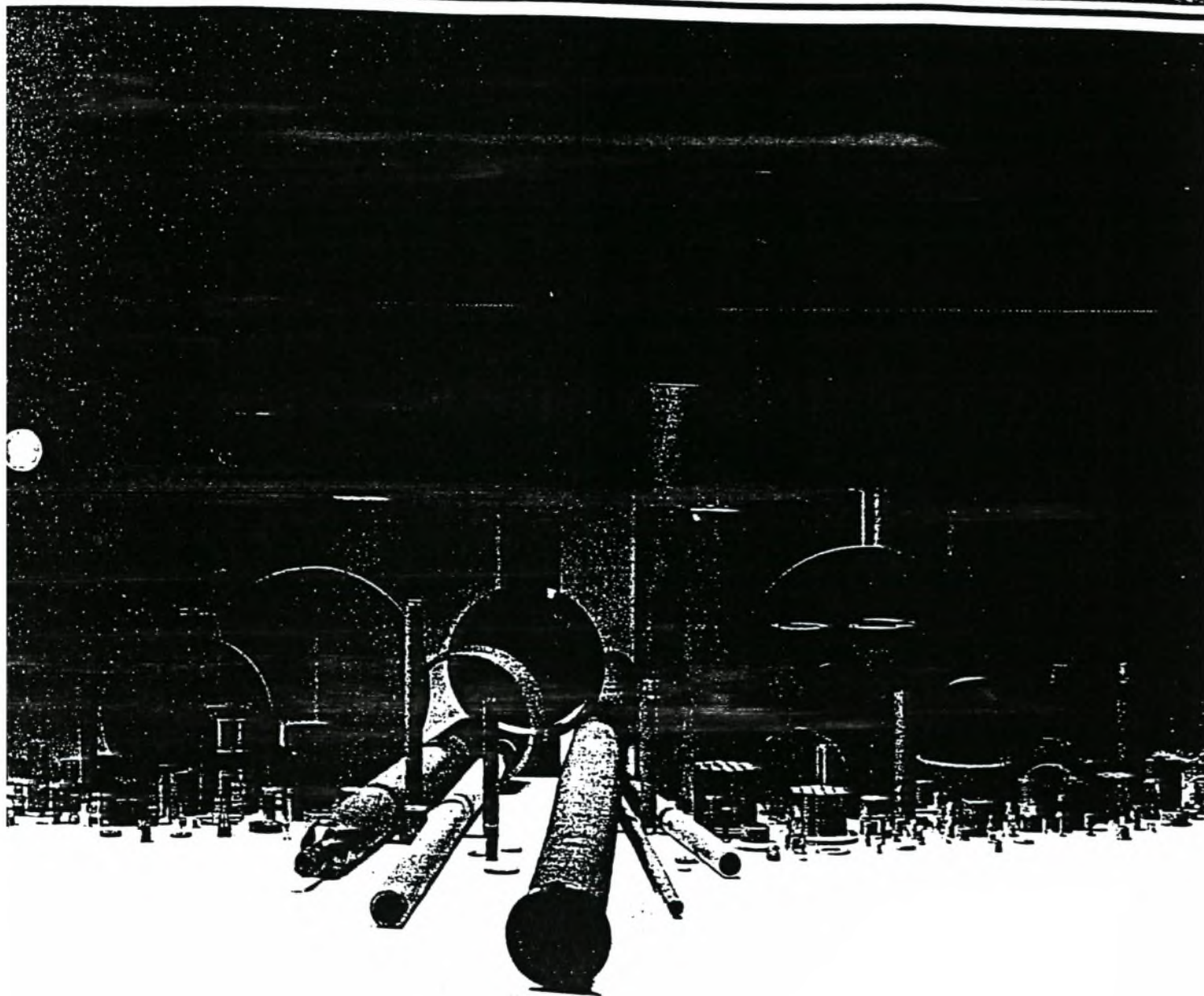


\*Der Volumenstrom bezieht sich auf freie atmosphärische Luft von 1 bar (abs.) und 20° C. / The capacity refers to free atmospheric air at 1 bar (abs.) and 20° C. / La portata si riferisce alla pressione atmosferica di 1 bar (abs.) e 20° C.  
 Kennlinien und Tabellenangaben beziehen sich auf betriebswarme verdichtete. / Curves and tables refer to compressor at normal operating temperature. / Les courbes et tableaux sont établis, compresseur à température de fonctionnement. / Le curve caratteristiche ed i dati riportati nelle tabelle si riferiscono al compressore con funzionamento a regime.  
 Technische Änderungen vorbehalten! / We reserve the right to alter technical information! / Sous réserve de modification technique! / Salvo modifiche tecniche!



# Precision Porous Metals

## ENGINEERING GUIDE



**mott**



MOTT METALLURGICAL CORPORATION

*Controlled Porosity For Precision Products*



## Introduction

The advent of controlled porosity manufacturing processes has presented to the design engineer a whole new dimension in materials technology. It offers the designer unique properties of pore volume, pore size, particle retentivity, vibration suppression, noise suppression, capillary attraction, electrical resistivity, specific surface, gas permeability, liquid permeability, abrasability, or conversely wear resistance, differential permeability and low specific weight, all in a variety of metallic alloys. A few typical industrial applications resulting from engineering ingenuity in the application of one or more of these unique properties of porous material are shown in later pages of this brochure.

The common denominator of all of these applications is the porosity within the porous wall. Porosity is a physical constant of a porous wall and should not be confused with the permeability of the porous wall. By definition, porosity is a percentage of void volume within a porous structure, but this definition does not relate to the intercommunication of the individual pores, nor does it relate to the size of the individual pores. The extremes can be represented by a block of metal with a single hole contrasted to the same block of metal with an infinite number of minute holes, with both blocks having exactly the same percentage void volume. The permeability, however, of the two blocks would be totally different if we define permeability as the resistance to passage of a specific flow of fluid per unit of area. Furthermore, the capillary attraction, specific surface, electrical resistivity, thermal conductivity, noise suppression, vibration suppression and mechanical properties would be vastly different between the two structures.

## Pore Interconnection

Departing now from the theoretical model to a more practical porous structure as produced from metallic powder, the important consideration becomes the interconnection of the various pores comprising the total porosity. Where fluid flow is important, the ideal porous material will contain no "blind porosity" defined as a pore which originates and terminates within the pore structure, thus contributing nothing to fluid transport through the porous wall. The ideal porous material, therefore, must be constructed of completely spherical, uniformly sized particles where it is geometrically impossible to generate blind porosity short of compressing the structure to 100% relative density. Whereas spherical particles are commonly used in the nonferrous alloys such as bronze, they are much more difficult to fabricate in the ferrous alloys such as stainless steel. Therefore, they are used only in special applications in stainless steel technology, where application requirements are stringent enough to support the additional costs of an all-spherical porous structure.

## Pore Size Uniformity

Having defined the porosity per se, we must now examine the pore size uniformity in the porous structure. In general, porous structures fabricated from metallic powder always exhibit a distribution of pore sizes, this distribution being generated by the statistical

packing of particles as they are consolidated into a porous matrix. During the packing phenomenon, particles tend to "bridge" and form pores within the structure that are larger than those formed by geometrically perfectly spaced particles in the lattice. Various manufacturing techniques can be employed to minimize the bridging effect, but it is virtually impossible to eliminate it entirely, even when completely spherical metallic particles comprise the matrix. By analysis and experimentation over the last 30 years, Mott Metallurgical Corporation engineers have developed processes which create controlled porous structures to yield predetermined characteristics to a high degree of precision. This is the meaning of controlled porosity for precision products.

## Manufacturing Controlled Porosity Media

Consolidation of pregraded powder into a porous aggregate can be accomplished by heat alone, in what is known as the "no pressure sintering process", or the powder can be precompressed into a form by the application of controlled pressure and subsequently heated to the sintering temperature. When one is manufacturing porous sheet stock for example, which is to be later formed into a cylinder and welded to create a filter element, the precompression technique is preferred because it offers:

- Precise thickness control ( $\pm .005$ ).
- Reorientation of loose powder to minimize the bridging effect mentioned above and produce a more uniform porous structure and permeability.
- Precompression of all particles in the aggregate so that each particle is bonded to several of its neighbors, leaving no particles free to break loose and migrate into the effluent stream.

The sintering process is carried out at temperatures approaching the melting point of the particular alloy being used and in a controlled atmosphere. The atmosphere is usually reducing in nature and serves to remove surface oxide films from the powder particles and protect these surfaces throughout the sintering cycle. While the porous structure is at the sintering temperature and under the influence of the reducing sintering atmosphere, individual particles metallurgically bond to their neighbors by the process of solid state diffusion, thus transforming the precompacted form into a coherent matrix with interconnected porosity.

It is obvious that reproducibility of permeability and pore size must be a direct function of the powder particle size and size distribution and precise control over the processing stages. Mott Metallurgical processes involve pregrading of all powder to precise sieve analyses (particle size distributions) and stringent monitoring of the processing variables such as compacting pressure, sintering time, temperature, and atmosphere; density control, permeability control and pore size control. Each lot produced is checked for permeability uniformity, pore size uniformity, carbon content, corrosion resistance and chemistry. The result is consistent, reproducible quality available only with Mott porous media.



Porous Metal Topics	Page(s)
Design Considerations	4
Engineering Properties	5
Flow Characteristics	5-6
Standard Shapes	7
Fabricating/Cleaning	8
Application Engineering	9-13
Typical Applications	14-15



# Properties of Porous Media

The principal useful properties of porous materials are: degree of porosity (usually expressed as a weight percentage), pore size, pore size distribution and permeability of the porous media to fluid flow (expressed as a flow vs. differential pressure characteristic curve).

The most convenient way to measure the pore size of a porous structure is known as the bubble point method. This method involves immersing the porous component in a fluid which completely wets the porous surface (one which forms a zero angle of contact with the porous surface) and then slowly pressurizing the porous structure. If one notes the pressure at which the first stream of bubbles forms, one can compute the approximate pore diameter by the equation  $R = 2 \sigma / \Delta P$  where  $R$  is the radius of an equivalent capillary,  $\sigma$  is the surface tension between the fluid and the metal and  $\Delta P$  represents the measured differential pressure.

It should be noted, however, that since the observation is made on the surface of the porous media, this method will yield only the pore size of that surface. (The magnified views of standard Mott porous media micron grades shown below illustrate surface pore size variations.) Where there is any depth to the porous structure, this measurement does not describe the pore structure immediately below the surface. In a filter application, for example, it is important to know the contaminant particle size that will be re-

tained by the filter membrane (its "degree of filtration"). Although the initial bubble formation pressure can be related to the degree of filtration as shown in the graph on page 5, the calculated degree of filtration at the same pressure would be many times that actually observed in empirical testing.

The difference between calculated and observed values for degree of filtration is attributed to the "depth effect" of a porous matrix and is related to the tortuosity of the flow path through a porous wall and the multiplicity of minute crevices which tend to entrain particulate matter in a flowing stream.

The liquid and gaseous permeability of porous media is a function of fluid viscosity and density, pore size and pore size distribution, and thickness of the porous wall. Experimental testing has proven that the differential pressure required to achieve any given flow is directly proportional to the thickness of the porous wall for an isopermeable structure. Graphs showing flow vs. differential pressure for air and liquids of various viscosities are given on pages 5 and 6.

The mechanical properties of porous metals are, of course, considerably lower than those of the same alloys in wrought or 100% dense form. A table of mechanical properties for type 316L stainless steel porous sheet is given on page 5.

## Closely Controlled Powder Fractions Assure Uniformity and Precision Porosity of Mott Media

100X views of standard Mott micron grades.



10μ dia., 100X

100μ dia., 100X



# Designing With Mott Porous Metals

Mott Metallurgical Corporation manufactures precision porous metal products in sheet, rod, seamless tube and a variety of pre-formed configurations. These products are used in many diverse applications as demonstrated on later pages. It is interesting to note in these varied applications how particular properties such as pore size, pore volume and permeability can help perform such a wide scope of industrial functions. Design ingenuity, sound engineering and productive capacity are Mott hallmarks that make such innovations possible.

## Design Considerations

When engineering porous products, designers should be aware of the basic capabilities and limitations of the alternative manufacturing processes. This will allow the fabrication of cost-effective finished products with the best combination of desired properties.

The prime consideration in a porous product is the porosity itself—characterized by pore size, pore size distribution, number of pores per unit of area and, to a lesser extent, pore shape.

Pore size can be controlled by the particle size of the powder and by the relative density established during manufacturing. Pore size distribution is controlled by the particle size distribution of the powder and the consolidation technique coupled with the sintering procedure.

Obviously, the finer the powder particle size, the finer the pore size in the finished product. Also, the higher the finished product density, the finer the pore size. However, if one attempts to achieve a fine pore structure by controlling particle size alone and allows the finished product to have a low density, there is a substantial sacrifice in mechanical strength.

It follows, therefore, that components fabricated by the "no pressure sintering" method are generally of lower structural integrity than components fabricated using precompression and subsequent sintering. Where permeability is the primary concern, as in the manufacture of air bearings, pore size is usually a minor consideration and permeability is best controlled by means of processing variables. Where strength is not a prime consideration, the "no pressure sintering" technique is usually less expensive and is normally employed in the manufacture of porous bronze and other nonferrous alloys. Porous components fabricated from stainless steel, Monel, Inconel and other ferrous or high temperature alloys, on the other hand, are normally preformed and subsequently sintered. Usually, the applications of these materials require high strength, corrosion resistance and/or temperature resistance.

When metallic powders are precompressed in dies, it should be understood that they compress only in the direction of applied pressure and do not flow hydrostatically as would be the case with plastic resins during injection molding. Therefore, in designing preformed porous metallic components, one should avoid undercuts, lateral holes, threads, double tapers, abrupt cross-sectional changes, fragile appendages, etc.

Porous structures can be machined by conventional techniques but the machining operation will almost invariably close the surface pores due to metal flow. If an active surface of the porous material is to be machined, it is necessary to reactivate these pores upon completion. Mott Metallurgical Corporation has developed a proprietary technique for pore reactivation. Where unique structures are required, it is recommended that Mott perform the entire service of machining and pore reactivating.

By virtue of the Mott process for producing porous metallic structures, a significant degree of ductility is imparted to the structures. Therefore, subsequent forming operations may be performed within limits. Mott Series 1100 Type 316L stainless steel sheet, 1/16" thick, can be bent to a minimum radius of 5/8" or roll-formed into cylinders with a minimum 1-1/4" diameter. Mott seamless porous tubes can be bent or formed in generous arcs to make air bearings. All porous structures exhibit relatively poor fatigue life, however.

## Design Properties of Porous Metals

- |                             |                                |
|-----------------------------|--------------------------------|
| 1. Pore Volume              | 8. Abradability                |
| 2. Pore Size                | 9. Specific surface            |
| 3. Particle retentivity     | 10. Gas permeability           |
| 4. Vibration dampening      | 11. Liquid permeability        |
| 5. Low thermal conductivity | 12. Uniformity of permeability |
| 6. Capillary attraction     | 13. Controlled non-uniformity  |
| 7. Electrical resistivity   | 14. Surface tension            |

## Porous Media Selection

When selecting porous metals for precision filter designs and other products, utilize the technical information and the comprehensive flow vs. pressure drop data on pages 5 and 6. First, determine the application conditions or requirements for:

1. Particle retention
2. Pressure drop
3. Flow rate
4. Operating fluid—type, density, viscosity
5. Process temperature
6. System pressure
7. Corrosive effects, if any

Then select the porous media and calculate required component sizes based on:

1. Metal or alloy
2. Active surface area
3. Component configuration
4. Available fluid flow and pressure
5. System conditions



# Engineering Properties of Porous Metal Media

All information is based on Mott porous stainless steel sheet. Particle retention data will apply to other metals and alloys, but mechanical properties may differ depending upon alloy.

## Mechanical Properties

Filtration Grade microns	Standard Thickness inches	Minimum Ultimate Tensile Strength PSI	Yield Strength at 0.2% Offset PSI	Elongation %	Young's Modulus X 10 <sup>6</sup> PSI
0.2	.039	30,000	26,000	4.0	10.0
0.5	.047	23,500	21,000	3.3	7.5
2	.062	17,700	13,200	3.0	5.5
5	.062	13,300	9,200	3.0	4.0
10	.062	10,500	7,500	2.4	3.0
20	.062	7,000	5,700	2.1	2.3
40	.078	4,500	3,500	2.0	2.3
100	.093	3,900	3,000	1.9	2.2

## Corrosion Resistance

Mott porous products are available in a wide variety of metals and alloys, the most prevalent of which are listed below. Where corrosion poses a potential problem, the designer can easily specify materials with resistance to specific liquids or gases.

Material	Code	Material	Code
316L SS	A	Alloy 20	N
304L SS	C	310SS	P
347 SS	E	Gold	Q
430 SS	G	Platinum	R
Nickel 200	H	Silver	S
*Monel 400	J	Titanium	T
*Inconel 600	K	*Hastelloy B-2	U
*Hastelloy C-276	L	*Hastelloy C-22	V
*Hastelloy X	M		

\*Registered Trademarks:

Monel, Inconel—International Nickel Co., Inc.

Hastelloy—Haynes International, Inc.

## Recommended Maximum Service Temperatures

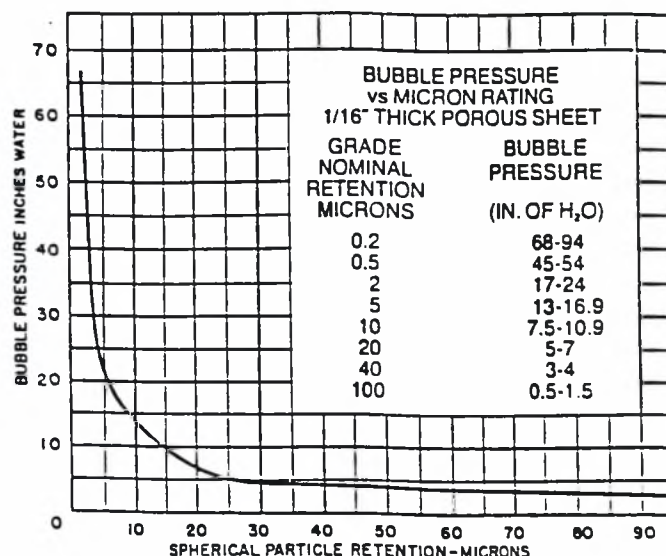
### Oxidizing Atmospheres

316L SS	750°F
Inconel	1100°F
Hastelloy X	1450°F

### Reducing or Neutral Atmospheres

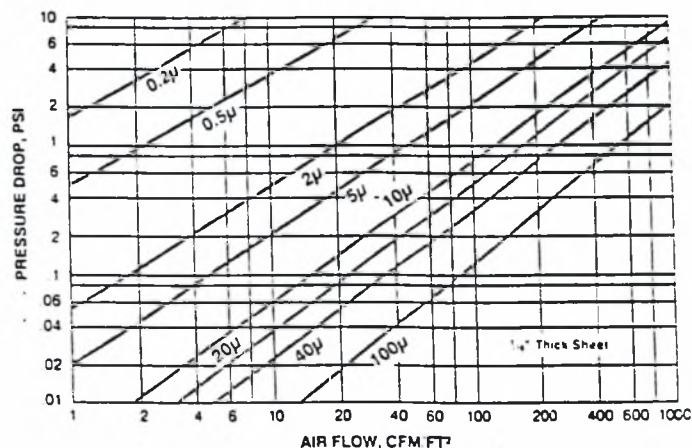
316L SS	1000°F
Inconel	1500°F
Hastelloy X	1700°F

## Spherical Particle Retention



## Mott Porous Media Gas Flow Characteristics

These flow curves are presented as a design aid in the development of applications using Mott porous sheet media. The air flow graph has data for all micron grades determined under ambient conditions.



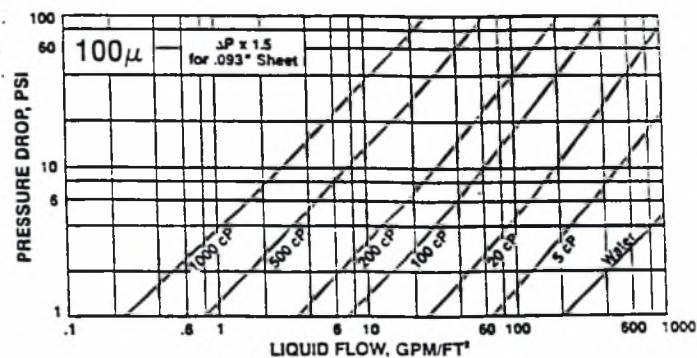
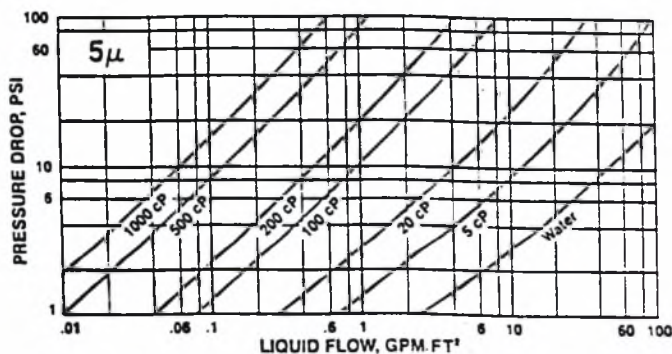
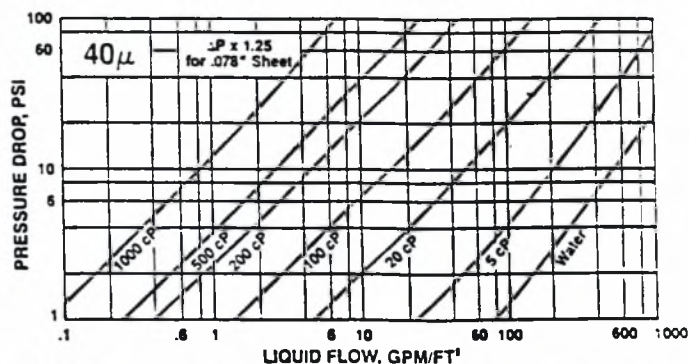
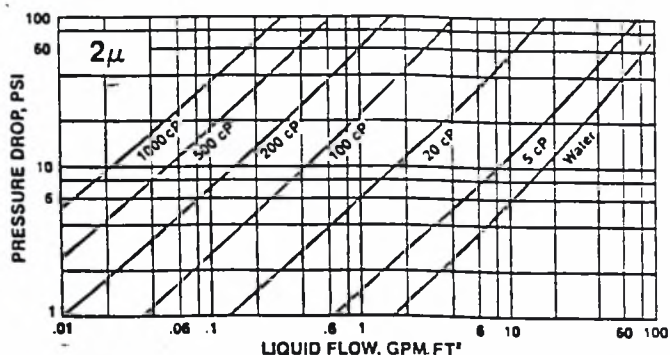
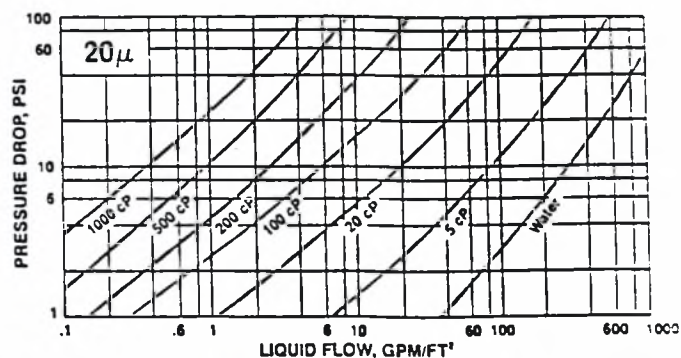
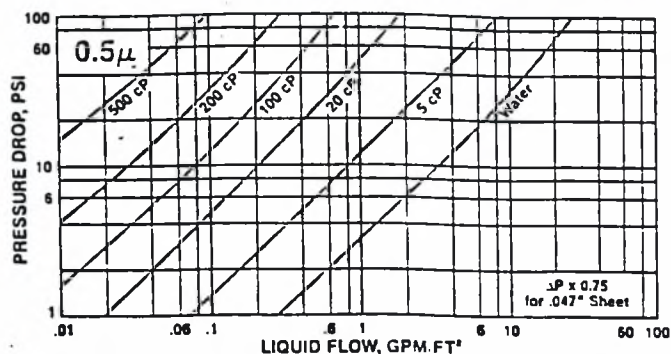
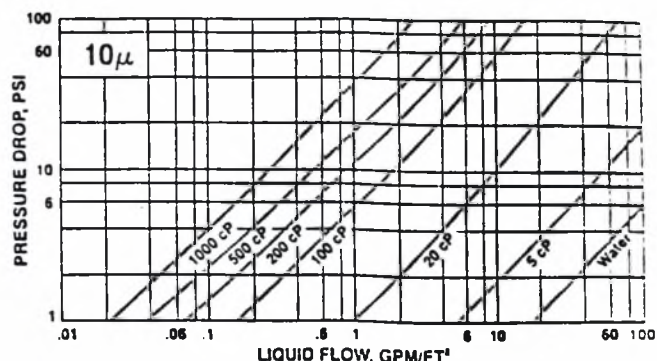
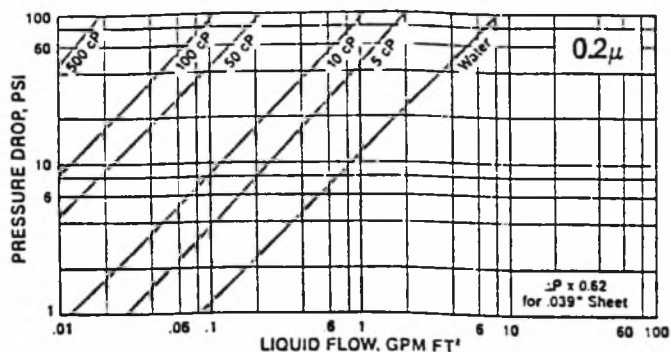
### Notes to Flow Graph

1. All data is normalized to .062 in. thickness. Differential pressure varies in direct proportion to sheet thickness. Standard sheet thickness varies with micron grade—see table of Mechanical Properties, page 5.
2. Flow curves are presented in a log-log format; be sure to note correct numerical values for each log cycle.
3. Flow characteristics given are for porous media only. To determine total pressure drop of a system, combine losses through media, fittings, housing, piping and valves as appropriate.
4. These flow characteristics were derived using 316L SS porous media. They are structure-related, not material-related, hence they apply to all available alloys.
5. These flow characteristics are typical and should be used for general reference only.

# MOTT POROUS Media Liquid Flow Characteristics

These flow curves are presented as a design aid, to help in the development of applications using Mott porous sheet media. Flow

data for water and higher viscosity liquids are given in the graphs below, organized according to the eight standard micron grades:



## Notes to Flow Graphs

1. All data is normalized to .062 in. thickness. Differential pressure varies in direct proportion to sheet thickness. Standard sheet thickness varies with micron grade—see table of Mechanical Properties, page 5.
2. Flow curves are presented in a log-log format; be sure to note correct numerical values for each log cycle.
3. Flow characteristics given are for porous media only. To determine total pressure drop of a system, combine losses through media, fittings, housing, piping and valves as appropriate.
4. These flow characteristics were derived using 316L SS porous media. They are structure-related, not material-related, hence they apply to all available alloys.
5. Liquid flow data were generated using water for viscosity of one centipoise and silicone oil for all higher viscosities.
6. These flow characteristics are typical and should be used for general reference only.



# Standard Mott Porous Metal Shapes

## Ordering Information, Stock Lists

Standard shapes of Mott precision porous media offer inexpensive means of satisfying application requirements. Mott normally stocks the items marked "\*" for prompt shipment. Many other sizes are available, often from stock—consult Mott.

Order all items by catalog number as indicated. Standard material is 316L SS and does not require specification. A wide range of other materials is available; see table on page 5. To specify an alternate metal or alloy, add material code from table as a suffix (examples below). For standard tolerances see DB 1091.

## Discs

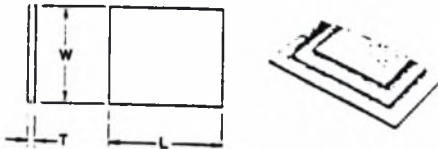


Mott porous 316L SS discs, Series 1000.  
Order by Catalog No.:  
1000-D-T-Micron Grade

D, in.	T, in.	Micron Grade							
		0.2	0.5	2	5	10	20	40	100
.062	.039		*	*	*	*	*		
.062	.062		*	*	*	*	*		
.093	.062		*	*	*	*	*		
.125	.039		*	*	*	*	*		
.125	.062		*	*	*	*	*		
.125	.125		*	*	*	*	*	*	
.188	.062		*	*	*	*	*	*	
.188	.125		*	*	*	*	*	*	
.250	.031		*	*	*	*	*	*	
.250	.039		*	*	*	*	*	*	
.250	.062		*	*	*	*	*	*	
.250	.125		*	*	*	*	*	*	*
.375	.039		*	*	*	*	*	*	
.375	.062		*	*	*	*	*	*	
.375	.125		*	*	*	*	*	*	*
.500	.039		*	*	*	*	*	*	
.500	.062		*	*	*	*	*	*	*
.500	.125		*	*	*	*	*	*	*
.625	.062		*	*	*	*	*	*	*
.625	.125		*	*	*	*	*	*	*
.750	.062	*	*	*	*	*	*	*	*
.750	.125	*	*	*	*	*	*	*	*
.875	.062	*	*	*	*	*	*	*	*
.875	.125	*	*	*	*	*	*	*	*
1.000	.062	*	*	*	*	*	*	*	*
1.000	.125	*	*	*	*	*	*	*	*

Also available: discs from .031" to 8.375" dia., some in stock. Larger discs cut from porous sheet are also available.

## Sheets



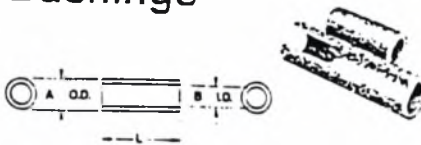
Mott porous 316L SS sheets, Series 1100.  
Order by Catalog No.:  
1100-W-L-T-Micron Grade

W, in.	L, in.	T, in.	Micron Grade							
			0.2	0.5	2	5	10	20	40	100
8 1/2	10	.039	*							
8 1/2	10	.047		*						
8 1/2	10	.062		*	*	*	*	*	*	
8 1/2	10	.078		*	*	*	*	*	*	*
8 1/2	10	.093		*	*	*	*	*	*	*
10	12	.039	*							
10	12	.047		*						
10	12	.062		*	*	*	*	*	*	*
10	12	.078		*	*	*	*	*	*	*
10	12	.093		*	*	*	*	*	*	*
10	12	.125	*	*	*	*	*	*	*	*

Other sizes and thicknesses also available, some in stock.

1100-10-12-.093-100

## Bushings



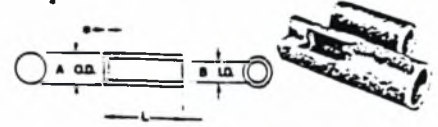
Mott porous 316L SS bushings, Series 1300.

Order by Catalog No.:  
1300-A-B-L-Micron Grade

A,in.	B,in.	L,in.	Micron Grade						
			0.5	2	5	10	20	40	100
.250	.125	1.000	•	•	•	•	•	•	
.375	.250	1.000	•	•	•	•	•	•	

Also available: bushings from .138" to 4.528" O.D., some in stock.

## Cups



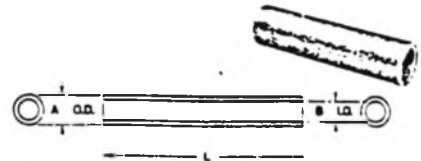
\*Min. end thickness = wall thickness

Mott porous 316L SS cups, Series 1200.  
Order by Catalog No.:  
1200-A-B-L-Micron Grade

A, in.	B, in.	L, in.	Micron Grade							
			0.2	0.5	2	5	10	20	40	100
.125	.062	.125		*	*	*	*	*	*	
.170	.070	.640		*	*	*	*	*	*	
.250	.125	1.000		*	*	*	*	*	*	
.317	.093	1.463	*	*	*	*	*	*	*	*
.375	.250	1.000		*	*	*	*	*	*	
.500	.375	1.000		*	*	*	*	*	*	
.678	.553	.840		*	*	*	*	*	*	
.812	.641	1.060		*	*	*	*	*	*	

Also available: cups from .078" to 1.310" O.D., some in stock.

## Seamless Tubes



Mott porous 316L SS seamless tubing, Series 1400.

Order by Catalog No.:  
1400-A-B-L-Micron Grade

A,in.	B,in.	L,in.	Micron Grade							
			0.5	2	5	10	20	40	100	
.250	.125	6	•	•	•	•				
.375	.250	•	•	•	•		•			
.500	.375	•	•	•	•	•	•			
.625	.500	•	•	•	•	•	•			
.750	.625	•	•	•	•	•	•	•		
1.000	.750	•	•	•	•	•	•	•	•	

\*Lengths in stock 6", 12", 18", 24".

Also available: longer tubes and other diameters, some in stock.

## Ordering Examples

1000-.750-.062-5 denotes a porous disc with .750" diameter, .062" thickness, 5 micron porosity, of 316L stainless steel.

1100-8 1/2-10-.078-40-K denotes a porous sheet 8 1/2" wide, 10" long, .078" thick, with 40 micron porosity, of Inconel 600.

1300-.375-.250-1.000-10 denotes a porous bushing with .375" O.D., .250" I.D., 1" length, 10 micron porosity, of 316L SS.

1400-.750-.625-24-0.5-J denotes a porous seamless tube with .750" O.D., .625" I.D., 24" length, 0.5 micron porosity, of Monel 400.

# Fabricating With Standard Shapes

## Forming

Mott porous materials have significant ductility so that cold-forming operations are possible within certain limits. For example, Mott standard 316L SS porous sheet,  $\frac{1}{16}$ " thick, can be roll-formed into cylinders with a minimum diameter of  $1\frac{1}{4}$ " to produce filter cartridges (smaller diameter tubes can be formed from thinner sheets). Mott seamless porous tubes can be bent in generous longitudinal arcs to form air film rolls or air bearings.

## Machining

Although Mott porous metal can be machined by conventional techniques, the pressure and tearing action of the cutting tool will smear close the surface porosity, rendering the machined component virtually impermeable. More exotic electrical discharge machining will not close the surface pores.

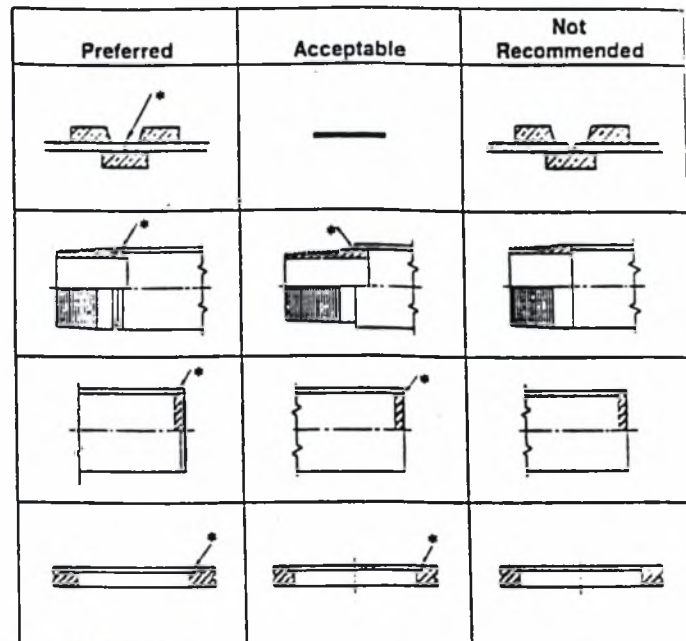
If conventional machining techniques are used, it is recommended that only water soluble oils be employed as lubricants during the machining operation. After machining, consult Mott Metallurgical Corporation for reactivation of closed pores.

## Brazing

Brazing porous metal is extremely difficult. The porous material acts as a wick, so when the molten braze is applied, it is soaked up into the pores, filling the voids and destroying the porosity. Mott Metallurgical has a special brazing technology which avoids this problem—consult Mott for information.

## Welding

Mott porous stainless steel products can be readily welded to themselves and to solid metal mating parts, provided certain precautions are taken. The most important thing to remember is the intrinsic porosity of the material. Approximately 50% of the apparent volume of porous metals is void space. When melted by a welding arc, the voids collapse; additional metal must be added to compensate for their volume. Metal can be added during the welding process with a filler rod or can be provided in the weld preparation of the mating solid component, as shown in the accompanying illustrations.



\* Strike arc here.

Any standard shielded arc welder that will deliver 2-25 amperes may be used. The shielding gas is normally argon or helium; recommended flow rate is 15 standard cubic feet per hour at the torch. The welding electrode should be 2% thoroated tungsten, sharpened to a needle point. The most popular diameters are .060" and .040". Wherever possible, porous parts to be welded should be clamped in place; heat sinks or chills should be mounted as close as possible to the weld bead. When joining porous media to solid members, the "Preferred" designs in the illustration often provide the necessary heat sinks without requiring separate chills.

## Cleaning Porous Media

The best cleaning procedure for a porous metal product depends on the nature of its application. If it has been used as a barrier filter and all the retained particulate matter is on the surface, a simple reverse flush with clean fluid or gas will normally restore its original permeability.

If the porous material has been used as a depth-type filter and particulates are entrained within its pores, ultrasonic cleaning is recommended. If there is a solvent for the contaminant and this solvent is nonreactive with the porous media, it is advisable to backflush with the solvent before ultrasonic cleaning.

During any blowback or backwash operation, intermittent pulses of gas or liquid are far more effective in cleaning porous media than a steady reverse flow. Also quite effective is alternately filling the pores with liquid and then blowing them open with either air or steam, using short pulse action.

If the contaminant is combustible, it can quite often be removed from the pores by salt-bath cleaning at an elevated temperature. If the salt-bath temperature exceeds 750°F, however, the bath should be nitrogen-blanketed to avoid oxidation of the porous media upon removal from the protecting salt.

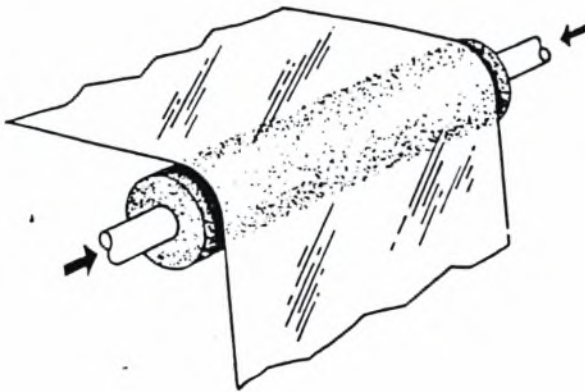
Conventional oven burning, preferably with a steam blanket, has also been used with good results, but some deterioration of the porous media may occur due to oxidation. Any combustion process should be followed by ultrasonic cleaning to remove combustion byproducts and other particulate matter.

Detailed cleaning recommendations are available from Mott Metallurgical for specific applications.

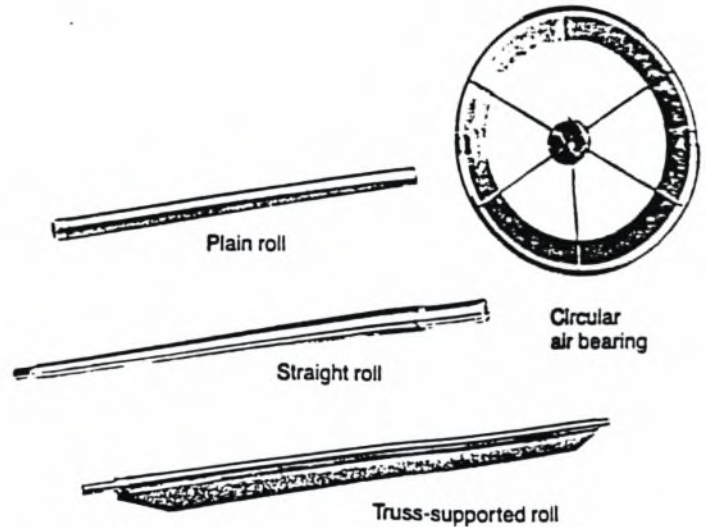


# Application Engineering With Mott Porous Products

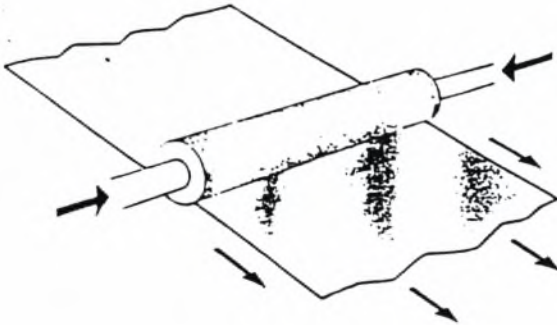
## Air Film Rolls/Air Bearings



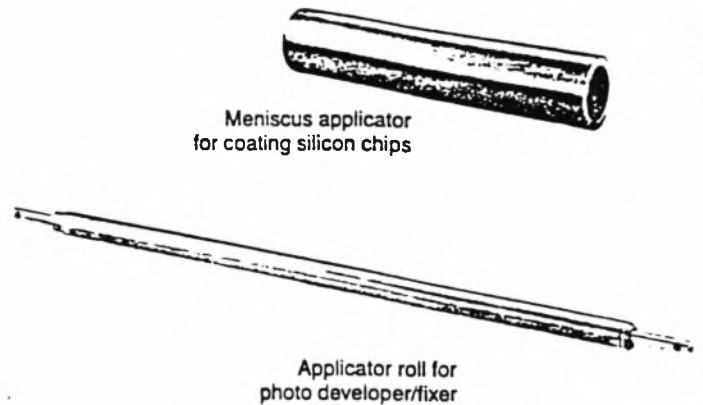
**Design properties:** pore size, air permeability.  
**Function:** support moving webs on boundary layer of gas.



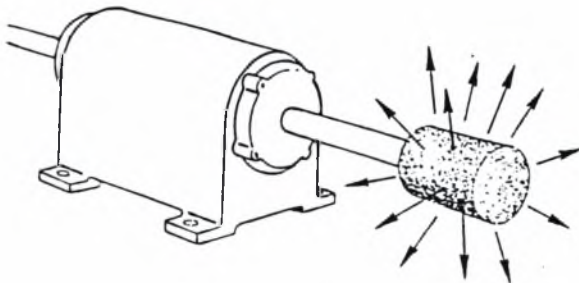
## Applicators



**Design property:** liquid permeability.  
**Function:** apply coatings on moving webs, oilers, photo developers.

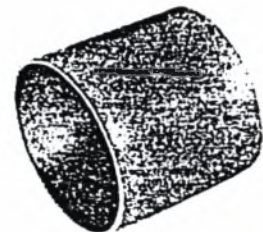


## Atomizers

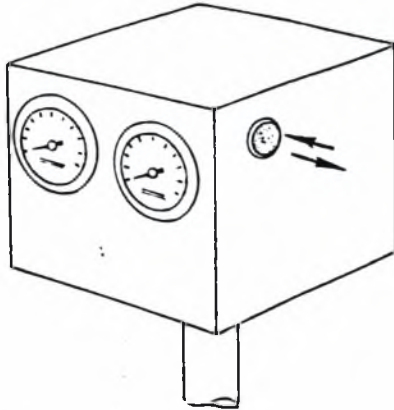


**Design property:** pore size.  
**Function:** centrifugally disperse and dispense liquid in fine mist chemical spraying humidifiers.

Atomizer cylinder for air-craft crop spraying of insecticides and fertilizers



## Breathers/Pressure Equalizers



**Design properties:** pore size, permeability.  
**Function:** relieve vapor pressure, allow pressure equalization while excluding contaminants.



Breather assembly with surfactant-treated porous element

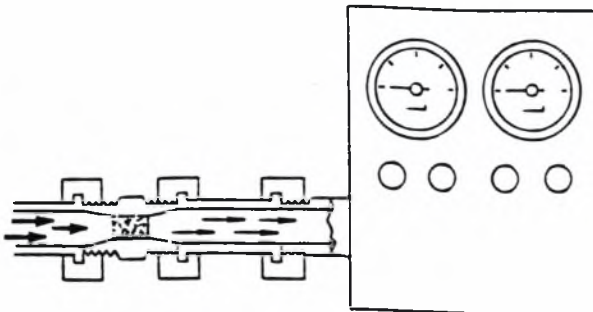


Threaded breather cups



Breather disc

## Controlled Leaks/Flow Restrictors



**Design property:** pore size.  
**Function:** control or meter small volumes of gas or liquid.



Restrictor mounted in tube union compression fitting



Restrictor mounted in male adaptor compression fitting



Restrictor mounted in hex nipple

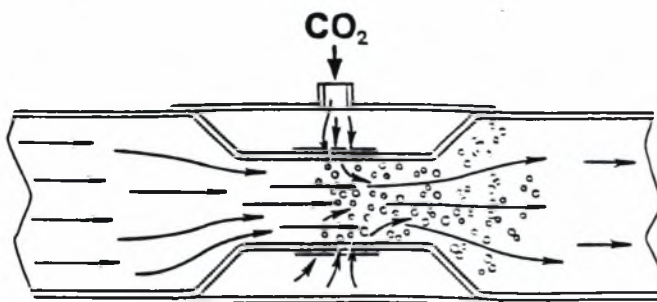


Controlled leak for spectrograph

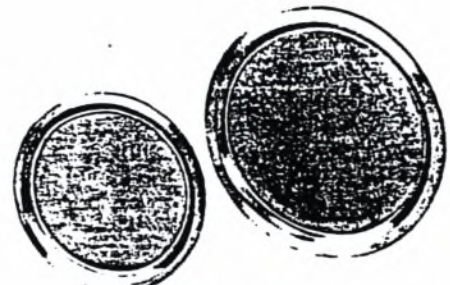


Encapsulated restrictor

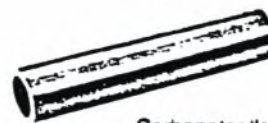
## Carbonators



**Design properties:** pore size, gas permeability.  
**Function:** inject fine dispersion of CO<sub>2</sub> into flowing liquid.



Carbonating discs for brewery applications



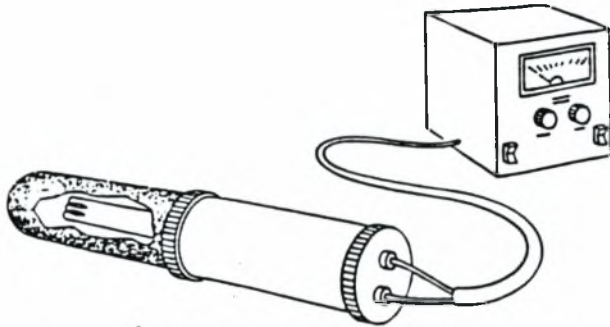
Carbonator "stone"



Carbonator tube

# th Mott Porous Products

## Sensor Protectors



**Design properties:** pore size, permeability, corrosion resistance.  
**Function:** protect instrument sensors.



Analyzer flame  
arrestor

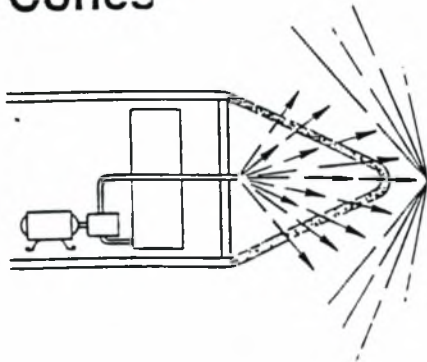


Dual sensor  
protector



Flammable gas  
sensor protector

## Nose Cones

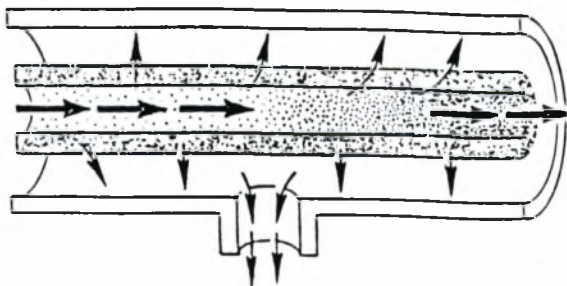


**Design properties:** controlled differential permeability, thermodynamic resistance, corrosion resistance.  
**Function:** boundary layer displacement and control.

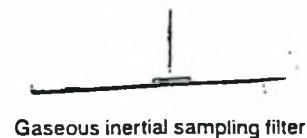


Nose cones for transpiration cooling studies

## Inertial Filters/Concentrators



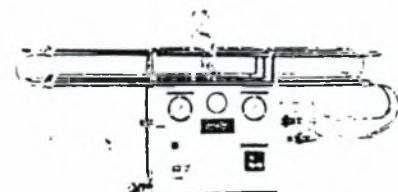
**Design properties:** pore size, permeability, interior smoothness.  
**Function:** nonclogging inertial filtration and/or solids concentration.



Gaseous inertial sampling filter



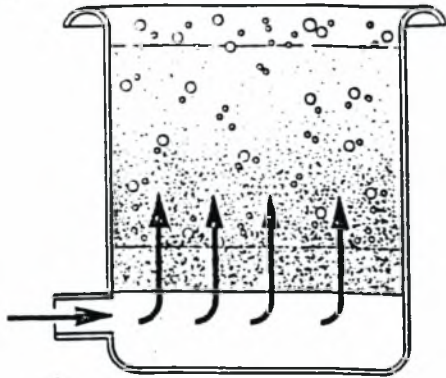
Laboratory inertial filter



Pilot inertial filter system



## Fluidizers

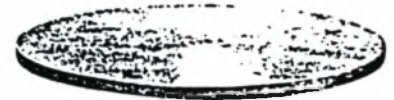


**Design properties:** pore size, gas permeability.  
**Function:** uniformly disperse gas into particle bed (e.g., in catalytic reactors).

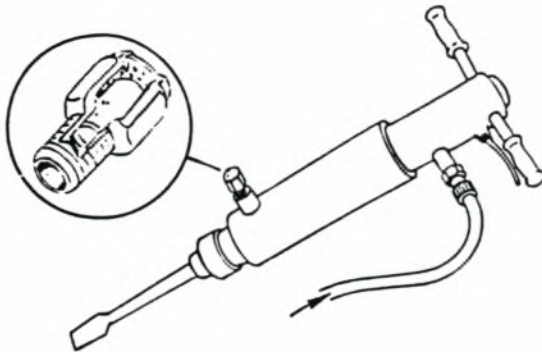


Fluidizing pad,  
threaded mounting

Fluidizing pad  
for fluid beds



## Silencers



**Design properties:** acoustical dampening,  
corrosion resistance.  
**Function:** attenuate noise output of pneumatic  
devices (noise pollution control).



Silencer  
assembly

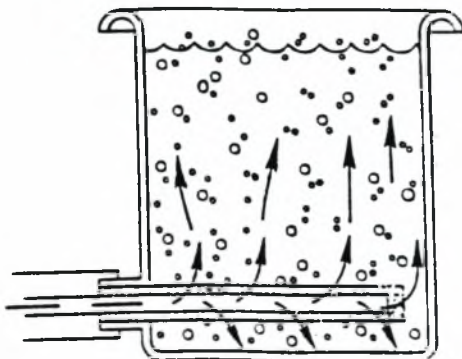


Threaded  
silencer cups



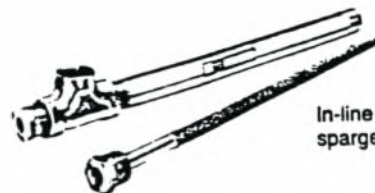
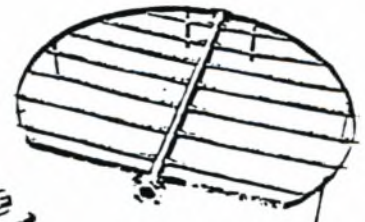
Acoustical  
resistors

## Spargers



**Design properties:** pore size, permeability.  
**Function:** aerate liquids, solids or gases.

Multiple sparger  
assembly for  
vessel bottom



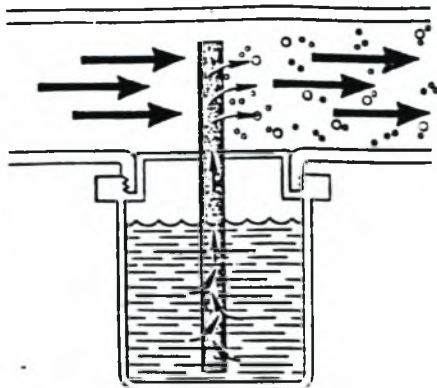
In-line continuous  
sparger assembly



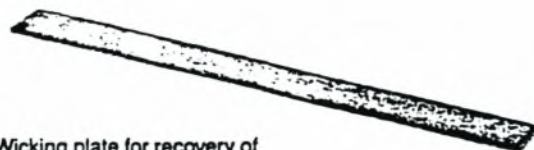
Sparger tube



## Wicks



**Design properties:** pore size, capillary attraction.  
**Function:** absorb liquids for dispersion or removal.

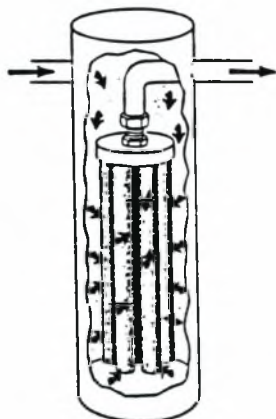


Wicking plate for recovery of excess ink on high-speed printer

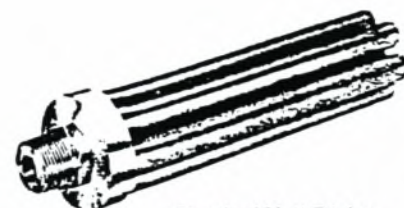


Capillary rods for lubrication of precision spindle bearings

## Multitube Filters



**Design properties:** pore size, permeability, large surface area.  
**Function:** extended area filtration.



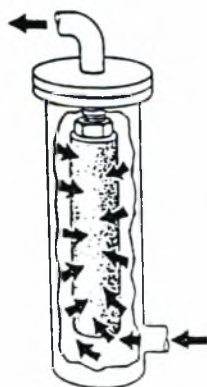
Standard Mott 7-tube filter element



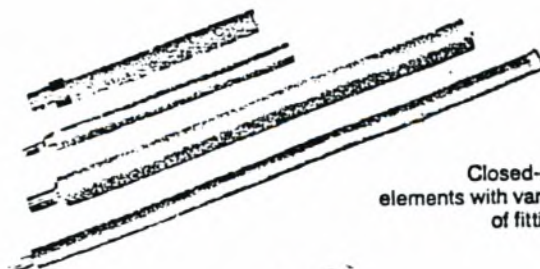
19-tube element and housing for high-pressure ethylene filtration



## Filter Elements/Cartridges



**Design properties:** controlled porosity, broad size range.  
**Function:** high efficiency gas/solids or liquid/solids separation.



Closed-end elements with variety of fittings



Open-end gasketed elements

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ**

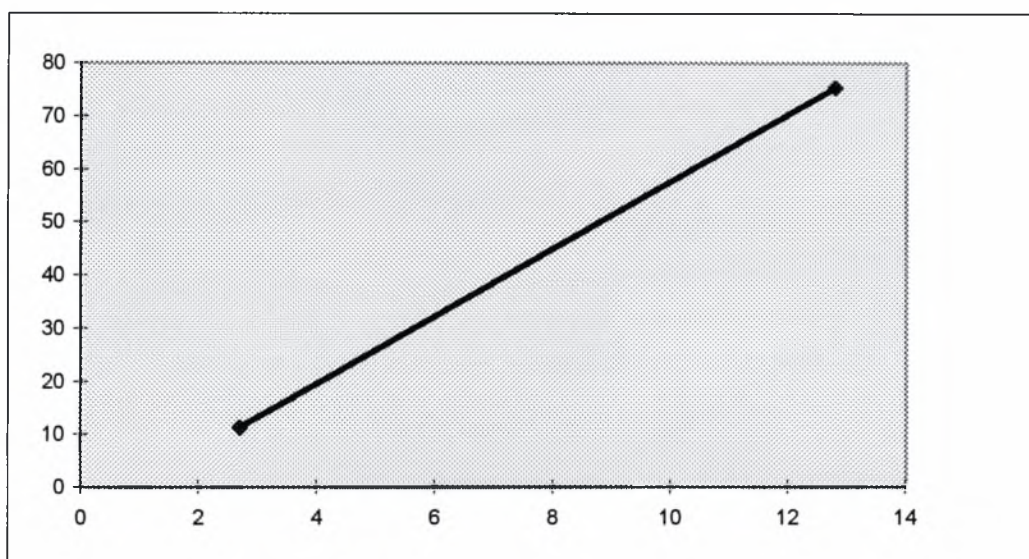
### **Βαθμονόμηση υγρασιόμετρου**

# ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΥΓΡΑΣΙΟΜΕΤΡΟΥ

I	RH
12.8	75.3
2.7	11.3

a= 6.3366  
b= -5.8089

RH	I
0	0.916722
100	16.69806



## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Λίτινας Γ., "Μέθοδος βελτίωσης του συντελεστή απόδοσης στις διεργασίες εξάτμισης", Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας, GR 1002436.
2. Πασπαλά Κ. Γ., "Μετάδοση Θερμότητας", Εκδόσεις Σαλονικίδη, Θεσσαλονίκη, 1993.
3. Σαραβάκου Γ. Δ., "Τεχνική Φυσικών Διαχωρισμών", Αθήνα, 1976.
4. Σωτηρόπουλου Β. Α., "Εξατμιστήρες", Εκδόσεις "Σύγχρονη Παιδεία", Θεσσαλονίκη, 1996.
5. VDI "Wärmeatlas". Ελληνική μετάφραση. Έκτη έκδοση
6. .Smith J.M., Van Ness H.C.,. 'Εισαγωγή στη θερμοδυναμική', Εκδόσεις Τζιόλα, 4<sup>η</sup> έκδοση, 1990
7. Bergles A.E., '*Heat transfer Enhancement - The Encouragement and accommodation of high heat fluxes*', Transactions of the ASME, Vol 119, 1997.
8. Δεληγιάννη-Μπελεσιώτη, Μέθοδοι και συστήματα αφαλάτωσης. Αρχές διεργασιών αφαλάτωσης..

