



ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ I & II

Εργαστηριακή Άσκηση 3: ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

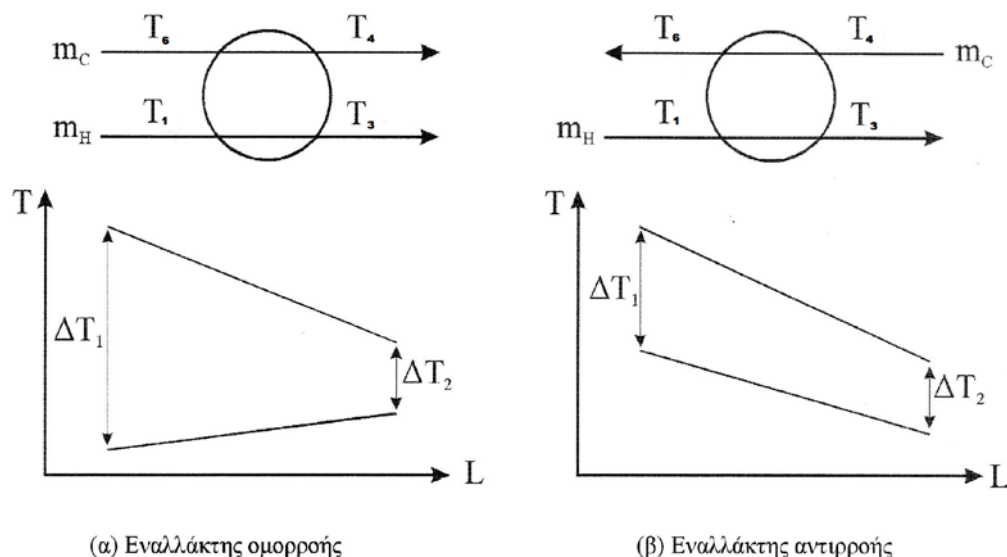
Σκοπός

Σκοπός της άσκησης είναι η πειραματική μελέτη του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ δύο υγρών ρευμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας και ο προσδιορισμός των βασικών μεγεθών και παραμέτρων της διεργασίας αυτής.

Θεωρία

Οι εναλλάκτες είναι από τις σημαντικότερες συσκευές (εγκαταστάσεις) στη χημική βιομηχανία, οι οποίες φέρουν σε επαφή δύο ρευστά διαφορετικής θερμοκρασίας με σκοπό την εναλλαγή ή ανάκτηση θερμότητας. Υπάρχουν διάφορα είδη εναλλακτών, όπως εναλλάκτες διπλού σωλήνα, κελύφους σωλήνων, πλακών, αποξεώμενης επιφάνειας κ.ά.

Ένας *εναλλάκτης διπλού σωλήνα* αποτελείται από δύο ομόκεντρους σωλήνες όπου στον εσωτερικό σωλήνα κυκλοφορεί το ένα ρευστό και στον ενδιάμεσο χώρο το άλλο. Η θερμότητα ανταλλάσσεται μεταξύ των δύο ρευμάτων μέσω του τοιχώματος του εσωτερικού σωλήνα που τα διαχωρίζει. Ανάλογα με τη κατεύθυνση της ροής των δύο ρευστών ο εναλλάκτης μπορεί να λειτουργεί σε συνθήκες ομορροής (τα δύο ρευστά ρέουν προς την ίδια κατεύθυνση) ή σε συνθήκες αντιρροής (τα δύο ρευστά ρέουν προς αντίθετες κατευθύνσεις).



Σχήμα 1. Τυπικά διαγράμματα εναλλακτών ομορροής και αντιρροής.

Η μαθηματική περιγραφή ενός εναλλάκτη διπλού σωλήνα (ομορροής ή αντιρροής) περιλαμβάνει τις ακόλουθες εξισώσεις:

- (1) Ρυθμός παροχής θερμότητας από το θερμό ρεύμα $Q_H = m_H C_{pH} (T_1 - T_3)$
- (2) Ρυθμός παραλαβής θερμότητας από το ψυχρό ρεύμα $Q_C = m_C C_{pC} \Delta T_C$
 $\Delta T_C = T_4 - T_6$, ομορροή
 $\Delta T_C = T_6 - T_4$, αντιρροή
- (3) Ρυθμός απωλειών θερμότητας $Q_{απωλειών} = Q_H - Q_C$
- (4) Ρυθμός μεταφερόμενης θερμότητας $Q = Q_H = U A \Delta T_{ln}$
- (5) Μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$
 $\Delta T_1 = T_1 - T_6$, $\Delta T_2 = T_3 - T_4$
- (6) Αποδοτικότητα $\varepsilon = \frac{m_H C_{pH} (T_1 - T_3)}{(mCp)_{min} \Delta T_{max}} = \frac{Q}{Q_{max}}$
 $\Delta T_{max} = T_1 - T_6$, ομορροή
 $\Delta T_{max} = T_1 - T_4$, αντιρροή
- (7) Αριθμός βαθμίδων μεταφοράς $NTU = \frac{AU}{(mCp)_{min}}$
- (8) Συνολικός συντελεστής μεταφοράς $\frac{1}{UA_m} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\Delta r}{k A_m} + \frac{1}{h_o A_o} + R_{αποθέσεων}$
 $A_m = \frac{A_o - A_i}{\ln\left(\frac{A_o}{A_i}\right)}$

Όπου:

- $Q_{απωλειών}$: Ρυθμός απωλειών θερμότητας (kW)
- Q_H : Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας θερμού ρεύματος (kW)
- Q_C : Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ψυχρού ρεύματος (kW)
- m : Μαζική Παροχή (kg/s)
- C_p : Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg·K)
- U : Συνολικός Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (kW/m²·K)
- ΔT_{ln} : Λογαριθμική Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ρευστών ρευμάτων (K)
- ε : Απόδοση (-)
- NTU : Αριθμός βαθμίδων (-)
- A : Επιφάνεια (m²)
- h_i : Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στον εσωτερικό σωλήνα (kW/m²·K)
- h_o : Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στον ενδιάμεσο χώρο (kW/m²·K)
- k : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του τοιχώματος (kW/m·K)

Δr : Πάχος τοιχώματος (m).

$R_{αποθέσεων}$: Αντίσταση αποθέσεων (K/kW)

Πειραματικό μέρος

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από:

- Μονάδα εξυπηρέτησης (φέρει τις διατάξεις που απαιτούνται για τις μετρήσεις καθώς και τη ρύθμιση της θερμοκρασίας και την ανακυκλοφορία του θερμού νερού). Διαγράμματα της μονάδας εξυπηρέτησης παρουσιάζονται στα Σχήματα 4, 5 και 6 μαζί με το σχετικό υπόμνημα (Πίνακας 1) του Παραρτήματος Α.
- Εναλλάκτη (αποτελείται από δύο ξεχωριστά τμήματα συνδεδεμένα εν σειρά σε σχήμα U για περιορισμό του συνολικού μήκους και για να είναι ευκολότερη η μέτρηση της θερμοκρασίας στο μέσο της διαδρομής).
 - Εσωτερικός σωλήνας από ανοξείδωτο χάλυβα
 - Εξωτερικός σωλήνας από διάφανο ακρυλικό σωλήνα (περιβάλλει τον εσωτερικό).Το θερμό ρεύμα περνάει στον εσωτερικό σωλήνα και το ψυχρό εξωτερικά (ανάμεσα στον ανοξείδωτο και ακρυλικό σωλήνα). Στα Σχήματα 7 και 8 του Παραρτήματος Α παρουσιάζονται το σχεδιάγραμμα του εναλλάκτη και οι τρόποι σύνδεσης σε ομορροή και αντιρροή.
- Το δίκτυο νερού του Εργαστηρίου που τροφοδοτεί το ψυχρό νερό.



Σχήμα 2. ARMFIELD – Heat Exchanger Teaching Equipment.
HT30X service unit (μονάδα εξυπηρέτησης) with the HT31 Tubular Heat Exchanger

Σημειώνεται ότι τα ρευστά που χρησιμοποιούνται είναι νερό χαμηλής (ψυχρό ρεύμα) και υψηλής θερμοκρασίας (ψυχρό και θερμό ρεύμα αντίστοιχα). Μάλιστα το θερμό ρεύμα επιλέγεται να ρέει στον εσωτερικό σωλήνα και το ψυχρό ρεύμα στο χώρο ανάμεσα στους δύο σωλήνες.

Αρχικά τίθενται σε λειτουργία τα κυκλώματα παροχής θερμού (ενεργοποίηση μονάδας θέρμανσης και ανακυκλοφορίας) και ψυχρού (άνοιγμα δικτύου εργαστηρίου) νερού.

1. Ο εναλλάκτης συνδέεται με τη μονάδα εξυπηρέτησης ώστε να λειτουργεί κατ' ομορροή.
2. Ρυθμίζεται η παροχή ψυχρού νερού στο 2.5 L/min.
3. Το σημείο αναφοράς στο ρυθμιστή θερμοκρασίας τοποθετείται στους 60°C και ξεκινάει ο κυκλοφορητής θερμού νερού.
4. Ρυθμίζεται η παροχή θερμού νερού στο 2.5 L/min.

5. Παρακολουθείται πότε θα φτάσει το σύστημα σε ισορροπία και καταγράφονται οι θερμοκρασίες και οι ροές: $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, F_{hot}, F_{cold}$.

6. Επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις για τους εξής συνδυασμούς παροχών:

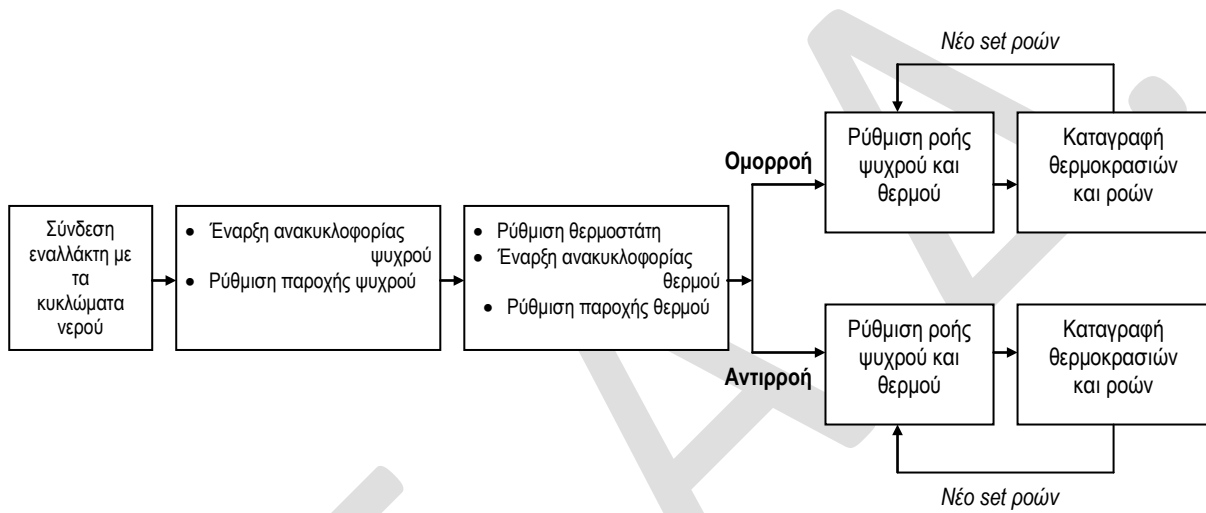
Θερμού 1.5 1.5 2.5 L/min

Ψυχρού 2.5 1.5 1.5 L/min

7. Ο εναλλάκτης συνδέεται κατ' αντιρροή.

8. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 έως 6.

Από τα παραπάνω βήματα έχουμε πάρει συνολικά 8 σειρές μετρήσεων (4 διαφορετικές παροχές σε ομορροή και 4 σε αντιρροή).



Σχήμα 3. Μεθοδολογικό διάγραμμα μετρήσεων.

Τεχνικά Δεδομένα

- Εσωτερική διάμετρος χαλυβδοσωλήνα: $d_i = 8.3 \text{ mm}$
- Εξωτερική διάμετρος χαλυβδοσωλήνα: $d_o = 9.5 \text{ mm}$.
- Εσωτερική διάμετρος ακρυλικού σωλήνα: $D_i = 12.0 \text{ mm}$
- Εξωτερική διάμετρος ακρυλικού σωλήνα: $D_o = 18.0 \text{ mm}$.
- Συνολικό μήκος εναλλάκτη: $L = 0.660 \text{ m}$.

Ζητούμενα

1. Ο υπολογισμός του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας του ψυχρού και θερμού ρεύματος (ισοζύγιο ενέργειας) σε κάθε συνδυασμό παροχής (αναφέρατε με σαφήνεια τυχόν παραδοχές).
2. Ο υπολογισμός των θερμικών απωλειών σε κάθε συνδυασμό παροχής.
3. Ο υπολογισμός του συνολικού συντελεστή μεταφοράς με βάση την εσωτερική επιφάνεια του χαλυβδοσωλήνα από τη θερμότητα που δίδει το θερμό ρεύμα σε κάθε συνδυασμό παροχής.
4. Ο θεωρητικός υπολογισμός των επιμέρους συντελεστών και του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του χαλυβδοσωλήνα) με βάση τα στοιχεία μιας από τις σειρές μετρήσεων.
5. Ο υπολογισμός του αριθμού βαθμίδων μεταφοράς, όπως και της αποδοτικότητας (effectiveness) του εναλλάκτη.

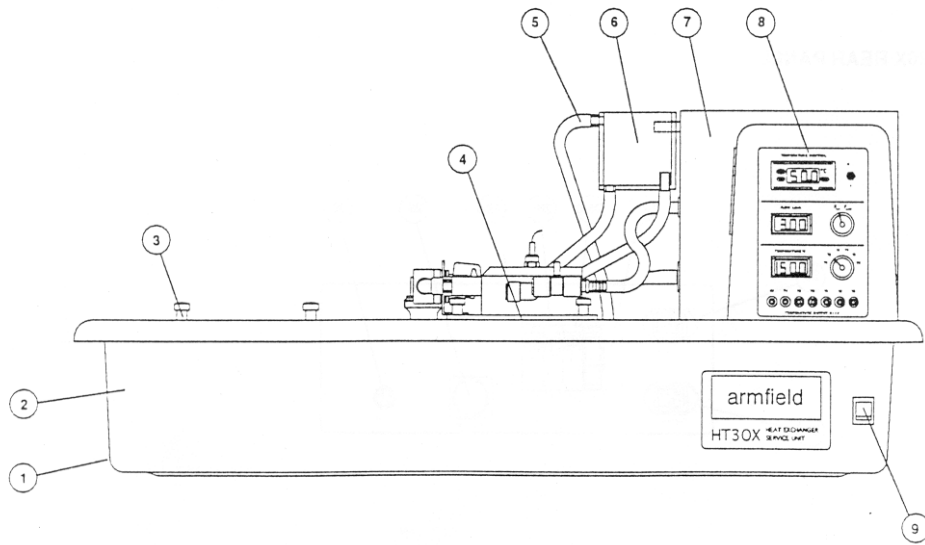
6. Η διαγραμματική απεικόνιση των θερμοκρασιών του θερμού και ψυχρού ρεύματος κατά το μήκος του εναλλάκτη για όλες τις σειρές μετρήσεων.
7. Η διαγραμματική απεικόνιση των θερμοκρασιών (T) ως συνάρτηση της μεταφερόμενης θερμικής ενέργειας (ΔQ).
8. Επίλυση υπολογιστικού θέματος.

Σε κάθε μια από τις παραπάνω ερωτήσεις θα πρέπει να γίνεται σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Να επισημανθεί η επίδραση παραμέτρων (π.χ. μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς με την παροχή). Να διερευνηθούν τυχόν περιπτώσεις όπου τα πειραματικά αποτελέσματα δεν συμβαδίζουν με τη θεωρία (π.χ. αρνητικές απώλειες, συντελεστής μεταφοράς μικρότερος για μεγαλύτερη ροή κλπ).

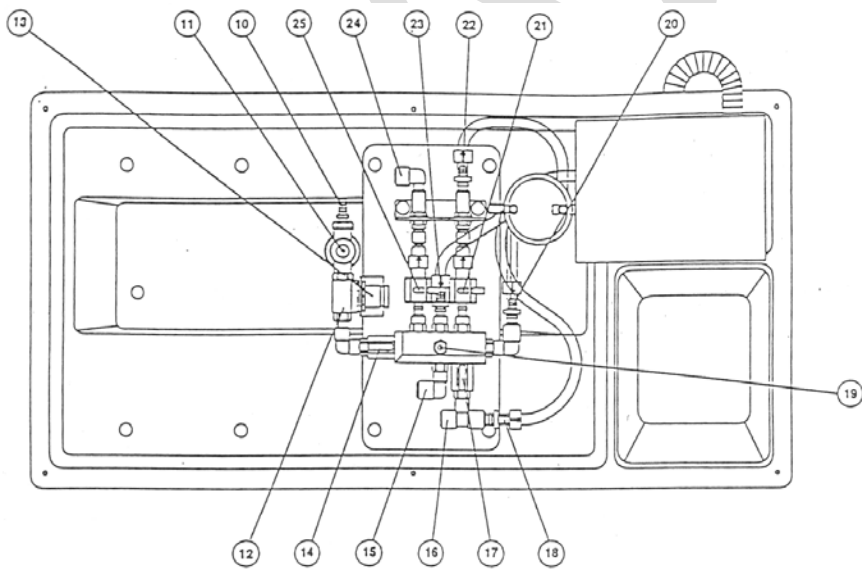
Βιβλιογραφία

1. Κροκίδα Μ., Μαρίνος – Κουρής Δ. & Μαρούλης Ζ., 2003, *Σχεδιασμός Θερμικών διεργασιών*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ.
2. McCabe W.L., Smith J.C. and Harriott P., 2003, *Βασικές Φυσικές Διεργασίες Μηχανικής*, 6η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα.
3. Perry R.H. and Green D.W., 1997, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7th ed., McGraw-Hill.
4. Σαραβάκος Γ.Δ., 1979, *Τεχνική Θερμικών Διεργασιών*, Β' έκδοση, έκδοση ΕΜΠ.
5. Μαρίνος-Κουρής Δ. και Παρλιάρου – Τσάμη Ε., 1994, *Ασκήσεις Φυσικών Διεργασιών*, εκδόσεις Παπασωτηρίου.
6. Geankoplis C.J., 1993, *Transport Processes and Unit Operations*, 3rd ed., Prentice-Hall.
7. Coulson J., Richardson J., Backhurst J. and Harker J., 1996, *Chemical Engineering, vol I*, 5th ed., Pergamon Press.
8. Walas S.M., 1988, *Chemical Process Equipment*, Butterworths.
9. Κουμούτσος Ν. και Λυγερού Β., 1992, *Μεταφορά θερμότητας*, έκδοση ΕΜΠ.
10. Incropera F.P. and DeWitt D.P., J., 1996, *Introduction to Heat Transfer*, Wiley.
11. Δ. Ασημακόπουλος, Β. Λυγερού, Α. Αραμπατζής, 2012, *Μεταφορά Θερμότητας και Μάζα*, εκδόσεις Παπασωτηρίου.

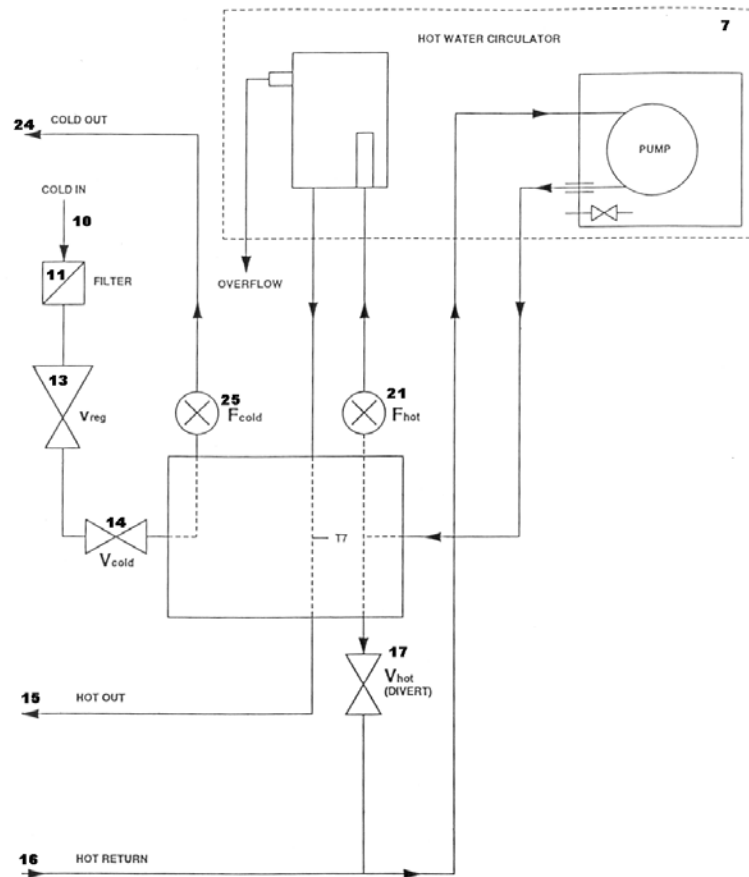
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α



Σχήμα 4. Μονάδα εξυπηρέτησης (πλάγια όψη).



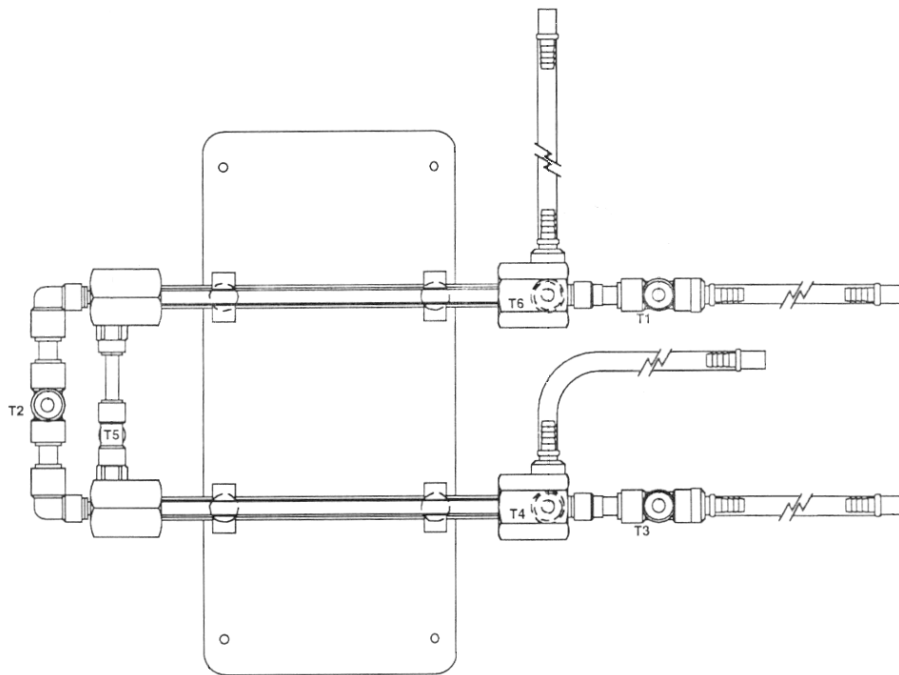
Σχήμα 5. Μονάδα εξυπηρέτησης: Σημεία συνδέσεων και μετρήσεων (κάτοψη).



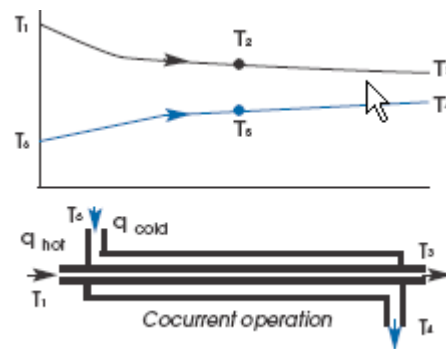
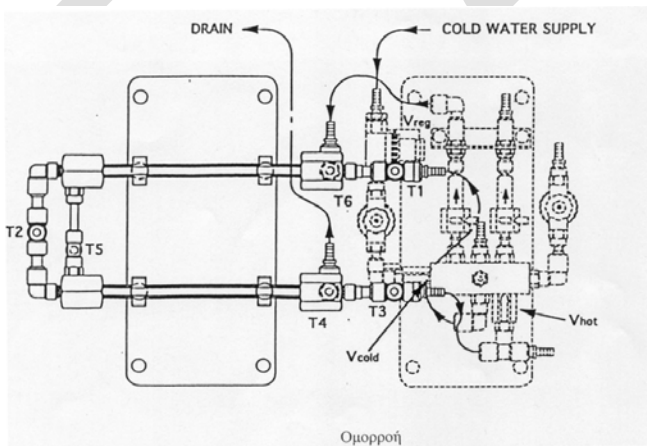
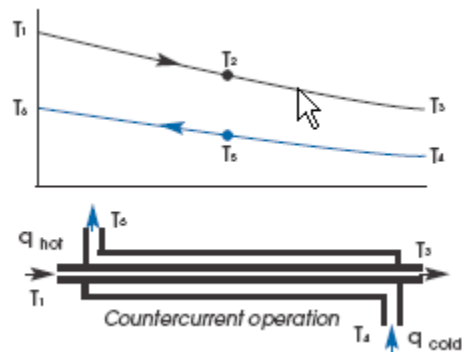
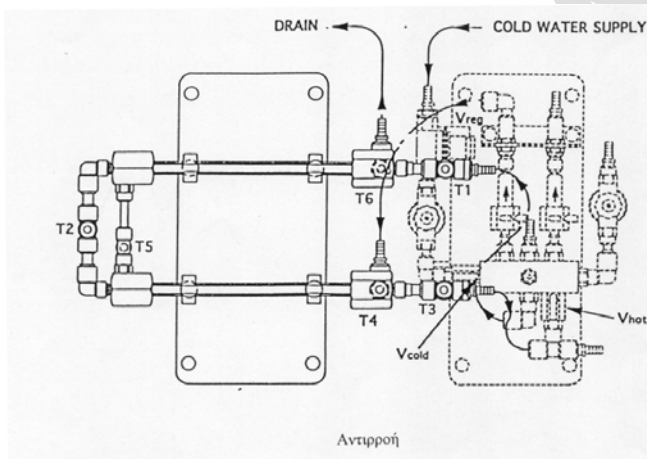
Σχήμα 6. Μονάδα εξυπηρέτησης: Υδραυλικά.

Πίνακας 1. Υπόμνημα.

| | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | Βαλβίδα εκκένωσης βάσης | 13 | Ρυθμιστής πίεσης |
| 2 | Βάση | 14 | Βαλβίδα ελέγχου ροής ψυχρού νερού |
| 3 | Στηρίγματα προσαρμογής | 15 | Έξοδος θερμού νερού προς εναλλάκτη |
| 4 | Βάση στήριξης | 16 | Επιστροφή θερμού νερού από εναλλάκτη |
| 5 | Υπερχείλιση δοχείου νερού | 17 | Βαλβίδα ελέγχου ροής θερμού νερού |
| 6 | Δοχείο θερμού νερού | 18 | Σύνδεση με κυκλοφορητή (είσοδος) |
| 7 | Μονάδα θέρμανσης / / κυκλοφορίας θερμού νερού | 19 | Αισθητήρας θερμοκρασίας θερμού νερού |
| 8 | Κονσόλα ελέγχου | 20 | Σύνδεση με κυκλοφορητή (έξοδος) |
| 9 | Κεντρικός διακόπτης | 21 | Αισθητήρας ροής θερμού νερού |
| 10 | Σύνδεση ψυχρού νερού (με βρύση) | 22 | Σύνδεση με δοχείο θερμού νερού (είσοδος) |
| 11 | Φίλτρο | 23 | Σύνδεση με δοχείο θερμού νερού (έξοδος) |
| 12 | Λαβή προσαρμογής ρυθμιστή πίεσης | 24 | Έξοδος ψυχρού νερού προς εναλλάκτη |
| | | 25 | Αισθητήρας ροής ψυχρού νερού |



Σχήμα 7. Εναλλάκτης.



Σχήμα 8. Τρόποι σύνδεσης σε ομορροή και αντιρροή.