



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

# Εργαστηριακή Άσκηση 1

---

## *Εναλλαγή Θερμότητας*

## 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.

Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση της παροχής των ρευμάτων και του τρόπου ροής τους (αντιρροή/ ομορροή) σε έναν εναλλάκτη διπλού σωλήνα.

# Εναλλάκτες Θερμότητας

---

## Ορισμός

**Εναλλάκτης Θερμότητας** ονομάζεται η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών διαφορετικής θερμοκρασίας ( $\Delta T =$  διαφορά δυναμικού, ωθούσα δύναμη) με στόχο **την ψύξη/θέρμανση ή την ανάκτηση θερμότητας**.

# Εναλλάκτες Θερμότητας

---

## Ανάκτηση θερμότητας και χρησιμοποίησή της:

- ❑ στην ίδια διεργασία, όπου ανακτάται ποσό ανάλογο με τις ανάγκες της διεργασίας (π.χ. προ-θέρμανση ρεύματος εισόδου στη διεργασία), ή
- ❑ σε άλλη διεργασία, όπου όμως δημιουργείται πρόβλημα αν διακόπει η λειτουργία μίας εκ των δύο διεργασιών (π.χ. παραγωγή ατμού με τη θερμότητα καυσαερίων)

# Τύποι Εναλλακτών

---

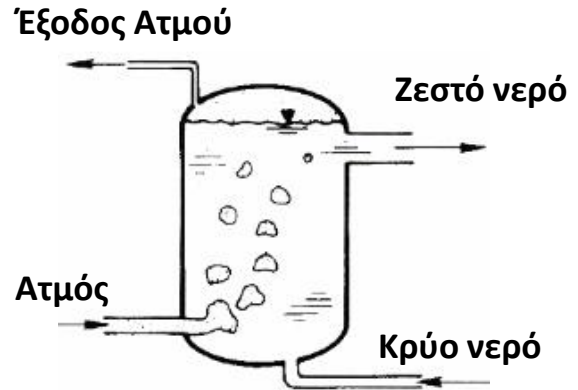
Η κατηγοριοποίηση των εναλλακτών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους:

- ❑ Διαδικασία μεταφοράς θερμότητας (άμεση/έμμεση επαφή)
- ❑ Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας
- ❑ Αλλαγή φάσης
- ❑ Κατασκευή
- ❑ Είδος ροής
- ❑ Πυκνότητα κατασκευαστικών στοιχείων

# Τύποι Εναλλακτών

## Διαδικασία μεταφοράς θερμότητας

- Εναλλάκτης άμεσης επαφής (ρευστά διαφορετικής φάσης έρχονται σε επαφή και εν συνεχεία διαχωρίζονται)

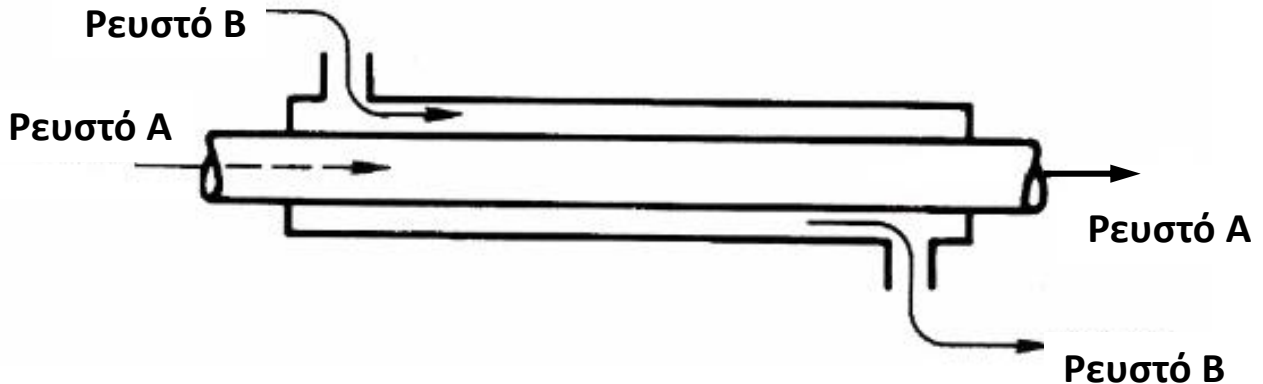


- Εναλλάκτης έμμεσης επαφής (ύπαρξη διαχωριστικής επιφάνειας, μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά θερμότητας)

# Τύποι Εναλλακτών

Κατασκευή

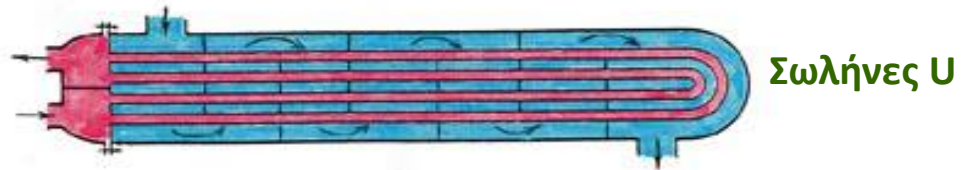
- Εναλλάκτης διπλού σωλήνα (ομοκεντρικός κυκλικής διατομής)



# Τύποι Εναλλακτών

Κατασκευή

- Εναλλάκτης κελύφους-σωλήνων (αυλών)



Απλή  
διαδρομή

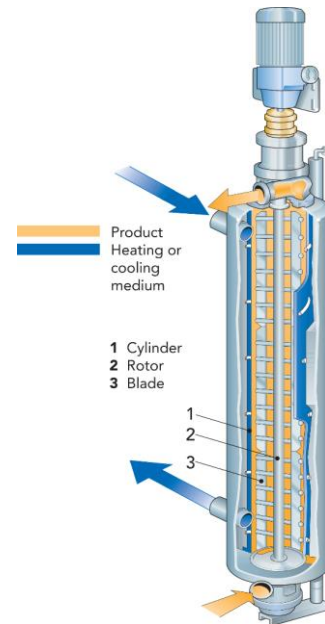




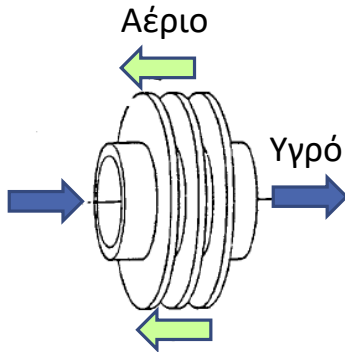
# Τύποι Εναλλακτών

- Εναλλάκτης αποξέομενης επιφάνειας

## Κατασκευή



### □ Εναλλάκτης προεκτεταμένης επιφάνειας

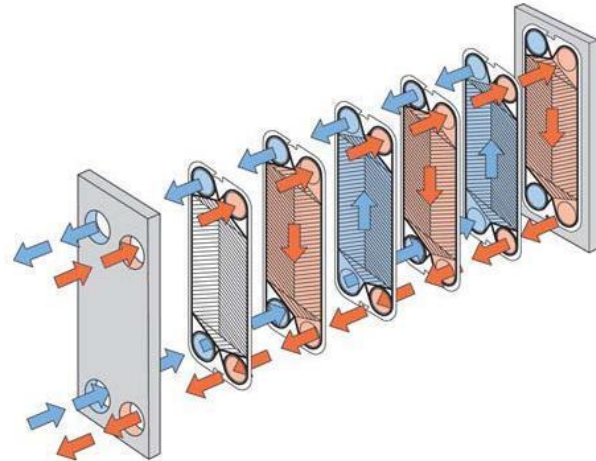


Πτερύγια ή άκανθες χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας προς την πλευρά του ρευστού (συνήθως αερίου) όπου ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι μικρός.

# Τύποι Εναλλακτών

Κατασκευή

- Εναλλάκτης με πλάκες



# Τύποι Εναλλακτών

---

Κατασκευή

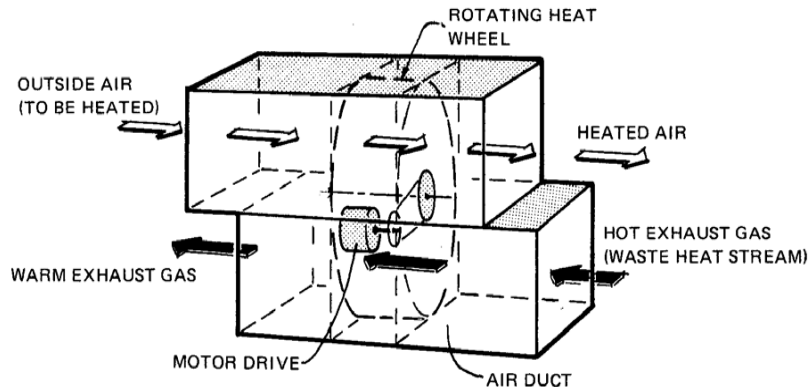
- Εναλλάκτης με πλάκες



# Τύποι Εναλλακτών

Κατασκευή

## □ Εναλλάκτης με περιστρεφόμενο δίσκο (αέρα-αέρα)



Ανάλογα με το υλικό κατασκευής μπορεί να γίνει και ανάκτηση της υγρασίας.  
**Πρόβλημα** η πιθανότητα ανάμειξης των δύο αερίων.

# Σύγκριση βασικών τύπων εναλλάκτη

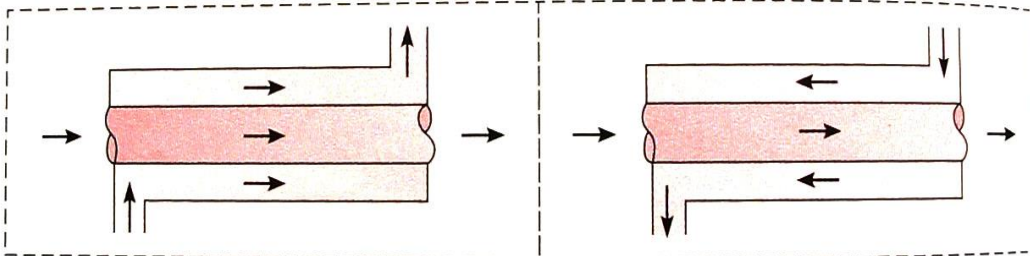
Εναλλάκτης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Κελύφους-σωλήνων	<ul style="list-style-type: none"><li>• Μεγάλο εύρος P &amp; T</li><li>• Διαχείριση ρευστών όλων των φάσεων</li><li>• Εύκολος καθαρισμός</li><li>• Ευέλικτος σχεδιασμός</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Απαραίτητη η μόνωση</li><li>• Καταλαμβάνει μεγαλύτερο χώρο</li><li>• Οι δονήσεις μπορεί να προκαλέσουν βλάβη στον εναλλάκτη</li></ul>
Πλακών	<ul style="list-style-type: none"><li>• Απαιτεί λιγότερο χώρο</li><li>• Πιο οικονομική λύση</li><li>• Ευελιξία ως προς το είδος του υγρού και το θερμικό φορτίο</li><li>• Υψηλός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας</li><li>• Μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε αστοχίες λειτουργίας</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ακατάλληλος για πτητικά υγρά</li><li>• Κίνδυνος διαρροής</li><li>• Υψηλότερη πτώση πίεσης</li><li>• Ακατάλληλος για υψηλές T και ΔT.</li></ul>

# Τύποι Εναλλακτών

Είδος ροής

□ Ομοροή

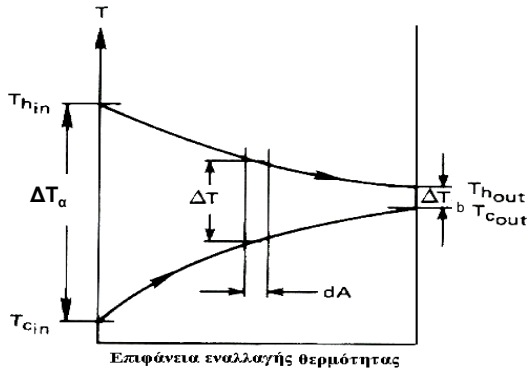
□ Αντιροή



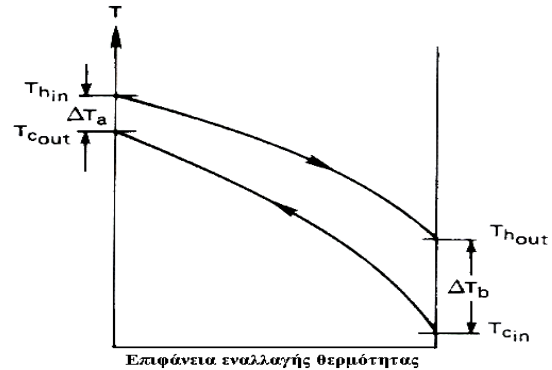
# Τύποι Εναλλακτών

Είδος ροής

□ Ομοροή



□ Αντιροή

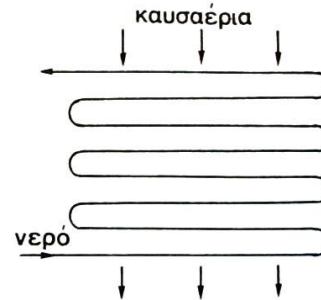
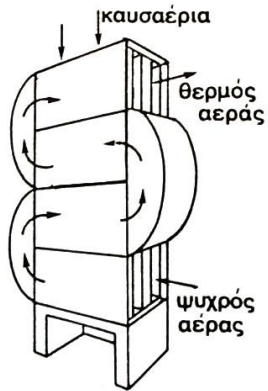




# Τύποι Εναλλακτών

Είδος ροής

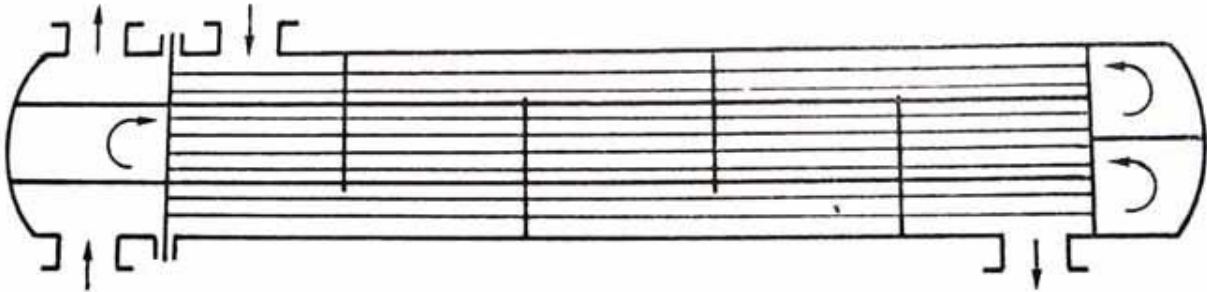
## □ Σταυρωτή ροή



# Τύποι Εναλλακτών

Είδος ροής

- Μικτή ροή

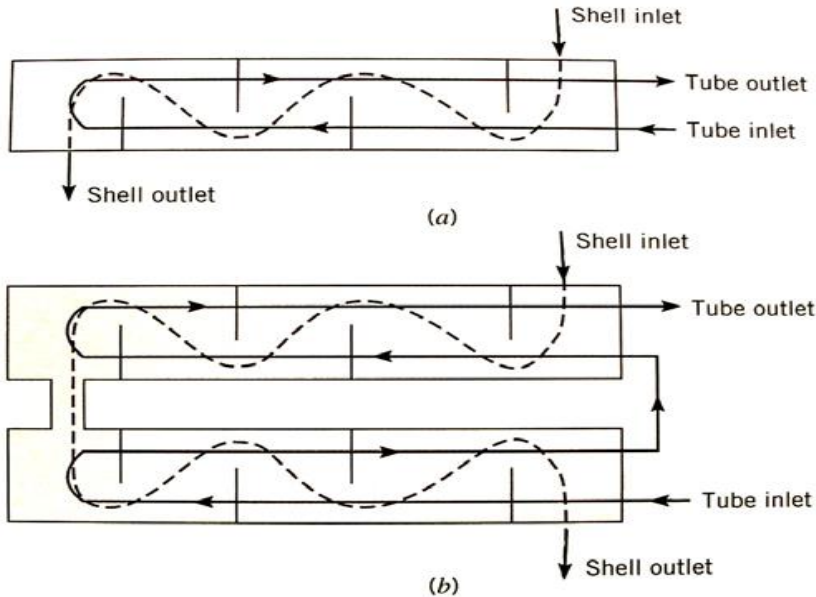


Εναλλάκτης πολλαπλών διαδρομών

# Τύποι Εναλλακτών

Είδος ροής

## □ Μικτή ροή



## Κριτήρια επιλογής εναλλάκτη

---

- ❑ Είδος εφαρμογής (π.χ. υγρό, αέριο, θερμοευαίσθητο ρευστό)
- ❑ Πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας
- ❑ Χαρακτηριστικά των ρευστών που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχίες (π.χ. αιωρούμενα στερεά)
- ❑ Διαθέσιμα θερμά ή ψυχρά ρεύματα
- ❑ Θερμοκρασιακή διαφορά
- ❑ Περιορισμοί της διεργασίας και της συνολικής εγκατάστασης
- ❑ Καθαρισμός και συντήρηση
- ❑ Δυνατότητα αύξησης της δυναμικότητας για μελλοντική χρήση
- ❑ Κόστος
- ❑ Μηχανολογικά/ κατασκευαστικά θέματα (υλικό κατασκευής, θερμική καταπόνηση κτλ.)

# Βασικές Εξισώσεις

---

- Ολικά ισοζύγια ενέργειας για το θερμό και το ψυχρό ρεύμα του εναλλάκτη

$$q = \dot{m}_h (h_{h,i} - h_{h,o})$$

$$q = \dot{m}_c (h_{c,o} - h_{c,i})$$

$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o})$$

$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i})$$

Θερμοχωρητικότητα (C) κάθε ρεύματος

## Βασικές Εξισώσεις

---

- Ολικό ισοζύγιο ενέργειας του εναλλάκτη

$$Q_{\text{hot}} = Q_{\text{cold}} + Q_{\text{απωλειών}}$$

## Βασικές Εξισώσεις

---

- Εξίσωση μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{AB}$$

Εναλλάκτης διπλού σωλήνα:  $\Delta T_{AB} = \Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)}$

$$\Delta T_a = \begin{pmatrix} T_{hi} - T_{ci} \\ T_{hi} - T_{co} \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{ομορροή} \\ \text{αντιρροή} \end{array} \quad \Delta T_b = \begin{pmatrix} T_{ho} - T_{co} \\ T_{ho} - T_{ci} \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{ομορροή} \\ \text{αντιρροή} \end{array}$$

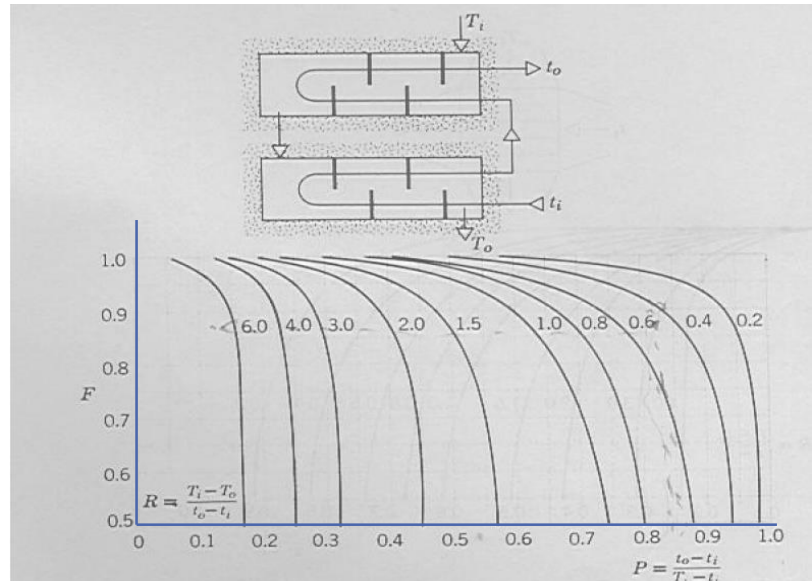
# Βασικές Εξισώσεις

- Μέθοδος μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς

## Σύνθετος Εναλλάκτης

$$q = U \cdot F \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

Συντελεστής διόρθωσης

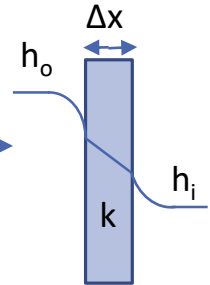




# Βασικές Εξισώσεις

- Μέθοδος μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς  
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $U$

- Επίπεδο τοίχωμα: 
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_o}$$



← Στην περίπτωση αποθέσεων προστίθεται ο όρος  $R_f$  ( $R_f = \Delta x_i / k_f$ ).

- Κυλινδρικό τοίχωμα: 
$$\frac{1}{UA_m} = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{\Delta r}{A_m k} + \frac{1}{A_o h_o}$$

$$A_m = \frac{A_o - A_i}{\ln\left(\frac{A_o}{A_i}\right)} \quad \Delta r = r_o - r_i$$

i: εσωτερική επιφάνεια (A)/ ακτίνα (r)

o: εξωτερική επιφάνεια/ ακτίνα

# Πειραματική διάταξη

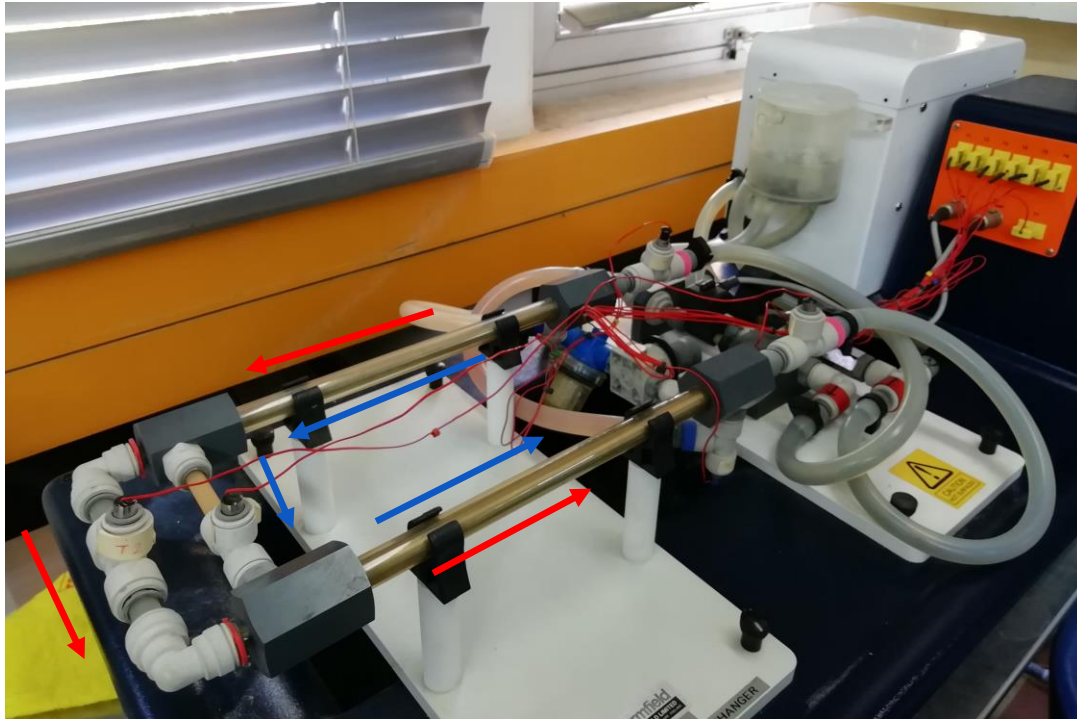
## Εναλλάκτης διπλού σωλήνα



*(Armfield- Heat Exchanger Teaching Equipment)*

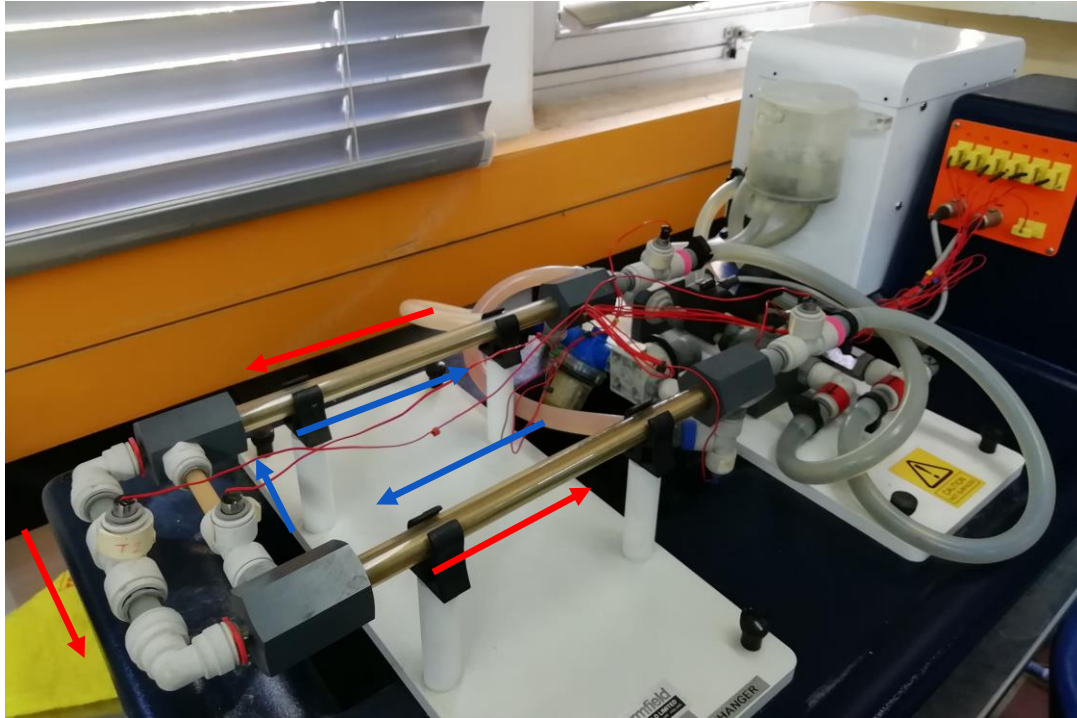
# Πειραματική διάταξη

Ομορροή

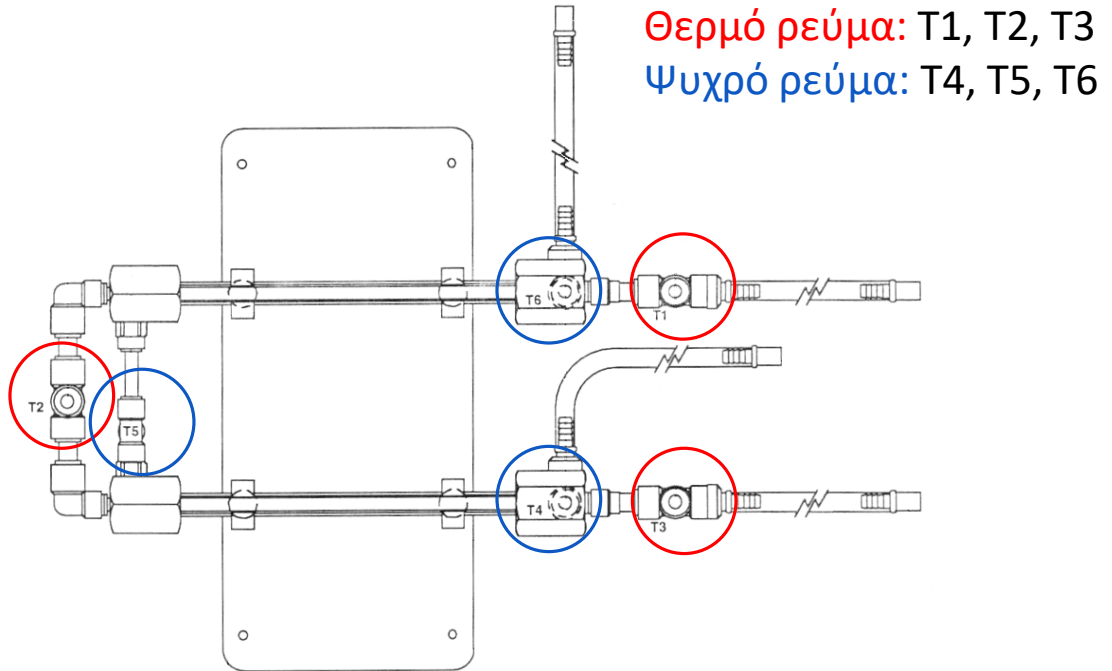


# Πειραματική διάταξη

Αντιρροή



# Πειραματική διάταξη



**Θερμό ρεύμα:** T1, T2, T3  
**Ψυχρό ρεύμα:** T4, T5, T6

# Πειραματική διάταξη



# Πειραματική διαδικασία

---

Αρχικά ο εναλλάκτης συνδέεται με τη μονάδα εξυπηρέτησης ώστε να λειτουργεί **κατά αντιρροή** και τίθενται σε λειτουργία τα κυκλώματα παροχής θερμού (ενεργοποίηση μονάδας θέρμανσης και ανακυκλοφορίας) και ψυχρού (άνοιγμα δικτύου εργαστηρίου) νερού.

Αφού η θερμοκρασία στη μονάδα θέρμανσης φτάσει την επιθυμητή τιμή (**60°C**), ακολουθούνται τα ακόλουθα βήματα:

- ❑ Ρυθμίζεται η παροχή του ψυχρού και του θερμού νερού στη μέγιστη τιμή.
- ❑ Παρακολουθείται πότε θα φτάσει το σύστημα σε ισορροπία (μόνιμη κατάσταση) και καταγράφονται οι θερμοκρασίες και οι ροές: **T1, T2, T3, T4, T5, T6, Fhot, Fcold**.

# Πειραματική διαδικασία

---

- ❑ Επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις για διάφορους συνδυασμούς παροχών. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τρία επίπεδα ροών **(1, 1.5 και 2 lt/min)** για κάθε ρεύμα με αποτέλεσμα να προκύπτουν 9 συνδυασμοί παροχών.
- ❑ Ο εναλλάκτης συνδέεται κατ' ομορροή.
- ❑ Επαναλαμβάνονται τα αρχικά βήματα και οι αντίστοιχες μετρήσεις.



# Ερωτήματα

---

- (1) Μεθοδολογικό διάγραμμα ροής και οργάνων.
- (2) Για δεδομένες παροχές και θερμοκρασίες των εισερχομένων ρευμάτων και σε μόνιμες συνθήκες αντιρροής να υπολογιστεί:
  - (α) ο ρυθμός εναλλαγής θερμότητας,
  - (β) ο ρυθμός θερμικών απωλειών,
  - (γ) ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας,
  - (δ) ο συνολικός συντελεστής θερμικών απωλειών,
- (3) Να υπολογιστούν τα μεγέθη του ερωτήματος (2) και για ομορροή και να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

## Ερωτήματα

---

(4) Να συγκριθεί ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, όπως υπολογίστηκε παραπάνω, με τον υπολογιζόμενο από εμπειρικές εξισώσεις ή εκτιμήσεις της βιβλιογραφίας.

(5) Να σχεδιαστεί το διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας των ρευμάτων ως προς την ανταλλάσσομενη θερμότητα για τέσσερις (4) περιπτώσεις αντιρροής και τις αντίστοιχες για ομορροή.

(6) Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις να εξετασθεί η επίδραση των παροχών στον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

<http://survivingtheworld.net/ScienceComic4.html>