

Φαινόμενα Μεταφοράς Μάζας – Θερμότητας

1^η Διάλεξη
Βασικές αρχές και ορισμοί

Εμμανουήλ Σουλιώτης

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Ακαδημαϊκό Έτος 2018-2019

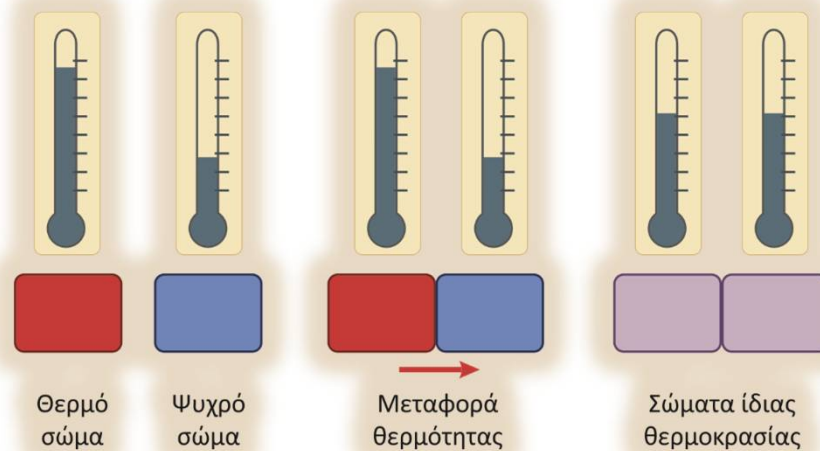
Μαθησιακοί στόχοι

- Κατανόηση του αντικειμένου της Μεταφοράς Θερμότητας και των διαφορών της από τη Θερμοδυναμική (§1.1.1)
- Παρουσίαση χαρακτηριστικών παραδειγμάτων τεχνικών εφαρμογών (§1.1.2)
- Διάκριση των μορφών ενέργειας με έμφαση στη θερμότητα και τη σχέση της με την εσωτερική ενέργεια (§1.2.4, §1.2.5)
- Εξοικείωση με βασικές έννοιες και μεγέθη που αφορούν στη Μεταφορά Θερμότητας (§1.2.1, §1.2.2, §1.2.3)
- Εισαγωγή στους τρεις βασικούς μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία) (§1.3 εισαγωγή)

Θερμότητα

Ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντος (ή μεταξύ δύο συστημάτων) εξαιτίας της μεταξύ τους **θερμοκρασιακής διαφοράς**

- Μεταφέρεται αυθόρμητα από θερμότερες (υψηλής θερμοκρασίας) σε ψυχρότερες (χαμηλής θερμοκρασίας) περιοχές
- Συνεχίζει να μεταφέρεται μέχρι το σύστημα να αποκτήσει ομοιόμορφη θερμοκρασία
- Όσο μεγαλύτερη η διαφορά θερμοκρασίας τόσο μεγαλύτερος και ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται



Θερμότητα και μορφές ενέργειας

- **Ενέργεια συστήματος**
(αποθηκευμένη στο σώμα)

- Εξωτερική ενέργεια (μακροσκοπική)
 - Κινητική ενέργεια
 - Δυναμική ενέργεια
- **Εσωτερική ενέργεια** (μικροσκοπική)
 - **Αισθητή** ενέργεια (κινητική ενέργεια μορίων, μεταβολή θερμοκρασίας)
 - **Λανθάνουσα** ενέργεια (δυναμική ενέργεια μορίων, αλλαγή φάσης)
 - Χημική ενέργεια
 - Πυρηνική ενέργεια

- **Ενέργεια διεργασιών**
(σε κατάσταση μεταφοράς)

- Έργο
- **Θερμότητα**

*Η **θερμότητα** ως μορφή ενέργειας διεργασιών σχετίζεται με **μεταβολές της εσωτερικής ενέργειας***

Η μεταφορά ενός ποσού θερμότητας από ένα θερμό σε ένα ψυχρό σώμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της εσωτερικής ενέργειας του πρώτου και την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του δεύτερου κατά το ίδιο ποσό

Ειδική Θερμότητα

Ποσό ενέργειας (θερμότητας) που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας της μονάδας μάζας του υλικού κατά ένα βαθμό

Μονάδες: J/kg·K

- Διεργασίες υπό **σταθερό όγκο**: c_v
για τέλεια αέρια: $du = c_v dT$
- Διεργασίες υπό **σταθερή πίεση**: c_p
για τέλεια αέρια: $dh = c_p dT$
- Για **ασυμπύεστα** υλικά ($\rho = \text{σταθερό}$) $c_v = c_p$:

$$du = c_p dT \quad \text{και} \quad \Delta u = \bar{c}_p \Delta T$$

$$\begin{aligned} m &= 1 \text{ kg} \\ \Delta T &= 1 \text{ K} (= 1^\circ \text{C}) \\ c_p &= 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$



$$Q = 1000 \text{ J}$$

Ενθαλπία: Το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας και του έργου ροής

$$h = u + p\nu$$

Χρησιμοποιείται σε συστήματα ροής ρευστών

Θερμοδυναμική και Μεταφορά Θερμότητας

Θερμοδυναμική

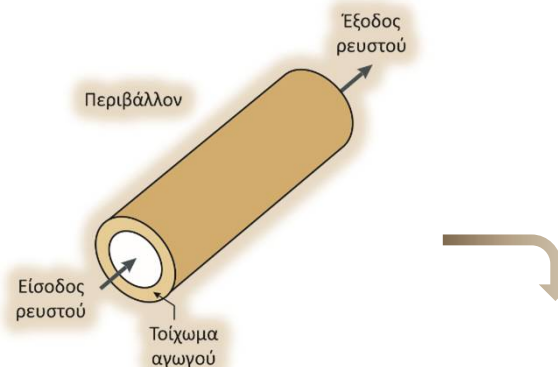
- Εξετάζει συστήματα σε **ισορροπία**
- Επιτρέπει τον υπολογισμό του συνολικού **ποσού θερμότητας** όταν ένα σύστημα μεταβαίνει από μια κατάσταση σε μια άλλη (διεργασία)
- 1^ο Θερμοδυναμικό Αξίωμα
- 2^ο Θερμοδυναμικό Αξίωμα

Μεταφορά Θερμότητας

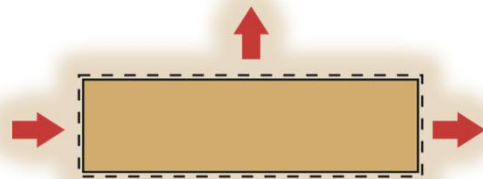
- Εξετάζει συστήματα όπου υπάρχει **διαφορά θερμοκρασίας** (δυναμικό)
- Επιτρέπει τον υπολογισμό του **ρυθμού μεταφοράς θερμότητας** στις συνθήκες της διεργασίας
 - Χρόνος που απαιτείται
 - Μέγεθος της συσκευής
- Ισοζύγιο Ενέργειας
- Κατεύθυνση μεταφοράς θερμότητας από υψηλές σε χαμηλές θερμοκρασίες

Μοντέλα θερμικής ανάλυσης

Θερμική ανάλυση αγωγού μεταφοράς ρευστού

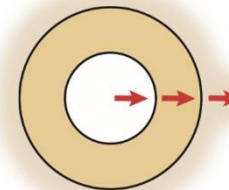


Θερμοδυναμικό μοντέλο



- **Ενεργειακό περιεχόμενο** (εσωτερική ενέργεια) στην είσοδο και στην έξοδο του αγωγού
- **Ποσό θερμότητας** στο περιβάλλον, από το 1^ο θερμοδυναμικό αξίωμα

Μοντέλο Μεταφοράς Θερμότητας



- Αναγνώριση **μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας** στο περιβάλλον
- **Συσχέτιση ρυθμού μεταφοράς με μεγέθη σχεδιασμού** (υλικό και πάχος του αγωγού, ταχύτητα ρευστού, θερμοκρασία ρευστού και περιβάλλοντος)

Χαρακτηριστικά προβλήματα

- **Μόνωση αγωγού διανομής ατμού**
 - Υπολογισμός θερμικών απωλειών χωρίς και με τη μόνωση
 - Επιλογή είδους μόνωσης (υλικό, πάχος)
 - Υπολογισμός κόστους, εξοικονόμησης, χρόνου αποπληρωμής
- **Σχεδιασμός συστήματος εναλλαγής θερμότητας**
 - Επιλογή τύπου εναλλάκτη
 - Προσδιορισμός απαιτούμενου μεγέθους εναλλάκτη
 - Ανάλυση ρίσκου: διερεύνηση της επίδρασης μεταβολών στη θερμοκρασία, παροχές, κλπ.
 - Οικονομική ή/και περιβαλλοντική βελτιστοποίηση
- **Έλεγχος λειτουργίας και επίλυση προβλημάτων**
 - Αναγνώριση προβλημάτων (π.χ. κακή απόδοση λέβητα)
 - Εντοπισμός αιτιών (π.χ. αποθέσεις στις επιφάνειες)
 - Επίλυση λειτουργικών προβλημάτων



Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδες
Θερμότητα	Q	J
Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας	\dot{q}	J/s ή W
Ροή θερμότητας	\dot{q}''	W/m ²

Σχέση Θερμότητας και Ρυθμού Μεταφοράς Θερμότητας

$$Q = \int_{\Delta t} \dot{q} dt$$

Σχέση Ροής και Ρυθμού Μεταφοράς Θερμότητας

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{q}}{A}$$

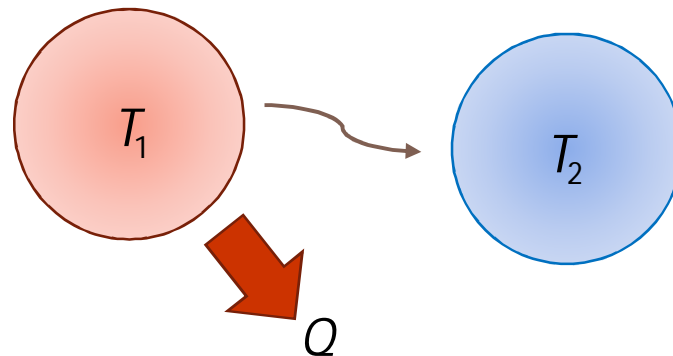
Παράδειγμα 1

Διεργασία ψύξης σφαιριδίων

Σε μια γραμμή παραγωγής, μπρούτζινα σφαιρίδια, $D = 5 \text{ cm}$, βρίσκονται σε θερμοκρασία $T_1 = 120^\circ\text{C}$ και ψύχονται με εμβάπτιση σε υδατόλουτρο. Αν μετά από $\Delta t = 5 \text{ min}$ η θερμοκρασία των σφαιριδίων γίνει $T_2 = 70^\circ\text{C}$, να υπολογιστούν:

- (α) Το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται από κάθε σφαιρίδιο στο νερό
- (β) Ο μέσος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας για κάθε σφαιρίδιο
- (γ) Η μέση ροή θερμότητας στην επιφάνεια του σφαιριδίου

Θεωρείστε σταθερές ιδιότητες των σφαιριδίων: $\rho = 8500 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 385 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$



Παράδειγμα 1 – Λύση 1/2

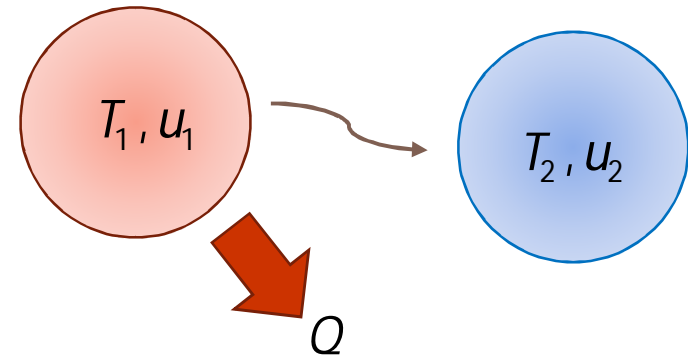
α) Ποσό θερμότητας που μεταφέρεται

Το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται από το σφαιρίδιο στο νερό είναι ίσο με τη μείωση της εσωτερικής ενέργειας του σφαιριδίου

$$Q = -m\Delta u = -m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = mc_p (T_1 - T_2)$$

$$m = \rho V = \rho \frac{\pi D^3}{6} = 8500 \times \frac{\pi \times 0.05^3}{6} = 0.556 \text{ kg} \quad \text{μάζα σφαιριδίου}$$

$$Q = 0.556 \times 385 \times (120 - 70) = 10709 \text{ J}$$



Παράδειγμα 1 – Λύση 2/2

β) Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας

- Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλεται με το χρόνο (μεταβάλλεται η διαφορά θερμοκρασίας)
- Μέσος χρονικά ρυθμός μεταφοράς θερμότητας:

$$\dot{q} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{10709}{300} = 35.697 \text{ W}$$

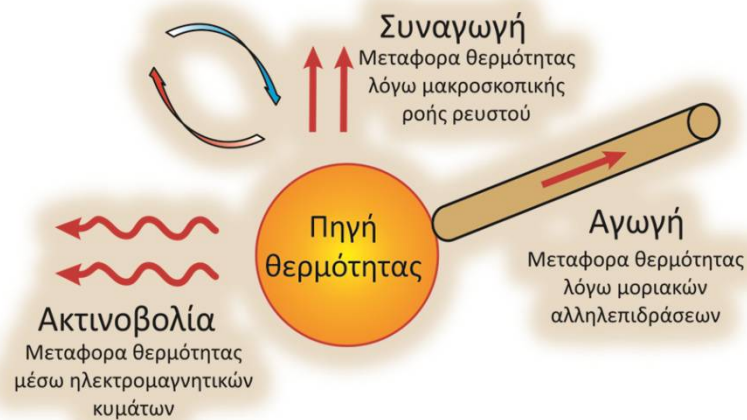
γ) Ροή θερμότητας

- Η ροή μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλεται με το χρόνο αλλά έχει την ίδια τιμή σε κάθε θέση της επιφάνειας του σωματιδίου
- Μέση χρονικά ροή θερμότητας:

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{q}}{A} = \frac{\dot{q}}{\pi D^2} = \frac{35.697}{\pi \times 0.05^2} = 4545 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

Μηχανισμός	Αιτία	Εμφάνιση
Αγωγή (conduction)	Μοριακές αλληλεπιδράσεις	Στερεά και ακίνητα ρευστά
Συναγωγή (convection)	Μακροσκοπική μετακίνηση πακέτων ρευστού	Κινούμενα ρευστά (εξαναγκασμένη ή φυσική κυκλοφορία)
Ακτινοβολία (radiation)	Ηλεκτρομαγνητικά κύματα	Σε κάθε μέσο (δεν απαιτείται ύλη)



Παράδειγμα 2

Αναγνώριση μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας

Να αναγνωριστούν και να απεικονιστούν οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σε ένα ασφαλτοστρωμένο πεζοδρόμιο και για τις συνθήκες μιας καλοκαιρινής ημέρας



Παράδειγμα 2 – Λύση

Μηχανισμοί μεταφοράς

- \dot{q}''_{solar} Προσπίπτουσα **ηλιακή ακτινοβολία**, σημαντικό μέρος της απορροφάται από το πεζοδρόμιο
- \dot{q}''_{cond} Μεταφορά θερμότητας με **αγωγή** από την επιφάνεια στο εσωτερικό του πεζοδρομίου (άσφαλτος)
- \dot{q}''_{conv} Μεταφορά θερμότητας με **συναγωγή** από την επιφάνεια του πεζοδρομίου στον αέρα, λόγω κίνησης του αέρα
- \dot{q}''_{rad} **Ακτινοβολία** που εκπέμπει η επιφάνεια του πεζοδρομίου

