



Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση περιβαλλοντικών συστημάτων I

Μάθημα 8^ο

*(Προκαταρκτική Σχεδίαση και
Διαστασιολόγηση Εξοπλισμού)*

Δρ. Ιψάκης Δημήτρης

Χημικός Μηχανικός, Έκτακτο Διδακτικό Προσωπικό ΠΔΜ



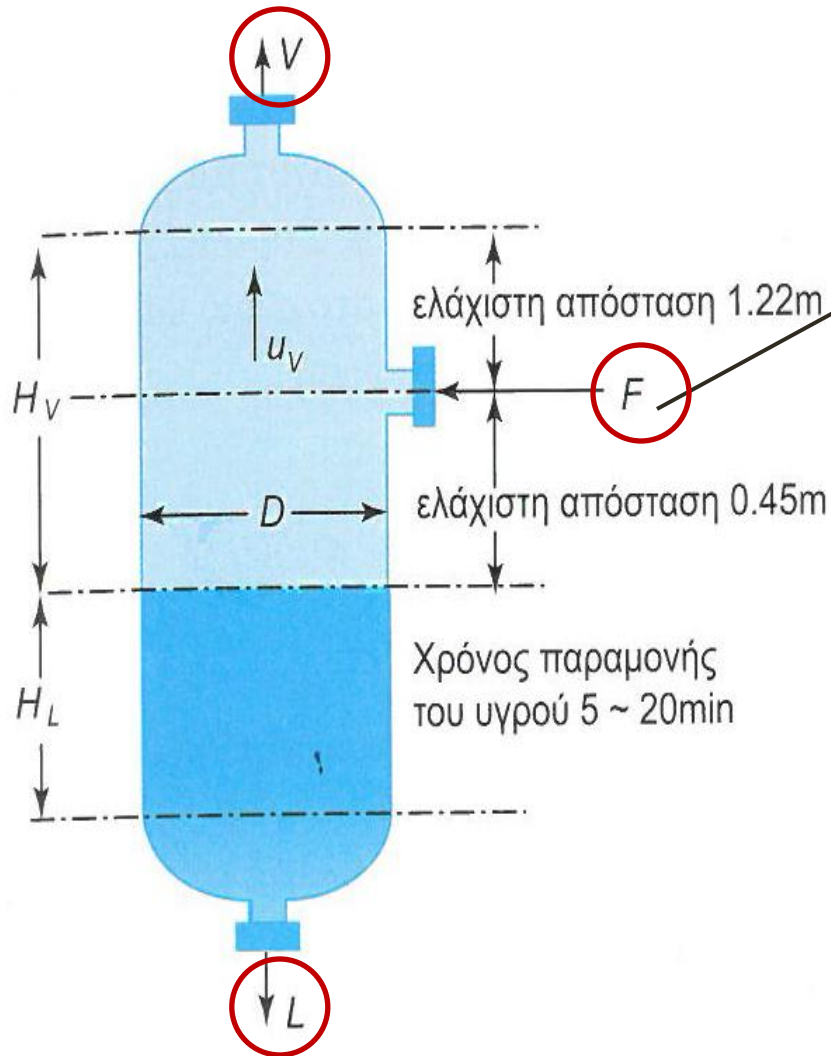
Εισαγωγή

- Όπως είδαμε, κατά τον προσδιορισμό του κόστους f.o.b. (Cr^0) χρησιμοποιούμε ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε εξοπλισμός (**π.χ. την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας σε m^2 για εναλλάκτες θερμότητας**).
- Επίσης, σε κάθε εξοπλισμό συναντάμε διαφορετικά υλικά κατασκευής (**π.χ. CS, SS304, SS316**).
- Οι συνηθέστερες συνθήκες λειτουργίας είναι $40-260^\circ C$ και $1-10\text{bar}$ και απαιτούν φθηνά υλικά.
- Γίνεται κατανοητό ότι λειτουργία άνω των $260^\circ C$ και 10bar **προφανώς και θα συνοδεύεται από υψηλότερο κόστος και πιο εξειδικευμένα υλικά**.

Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού



Κατακόρυφο Δοχείο Διαχωρισμού

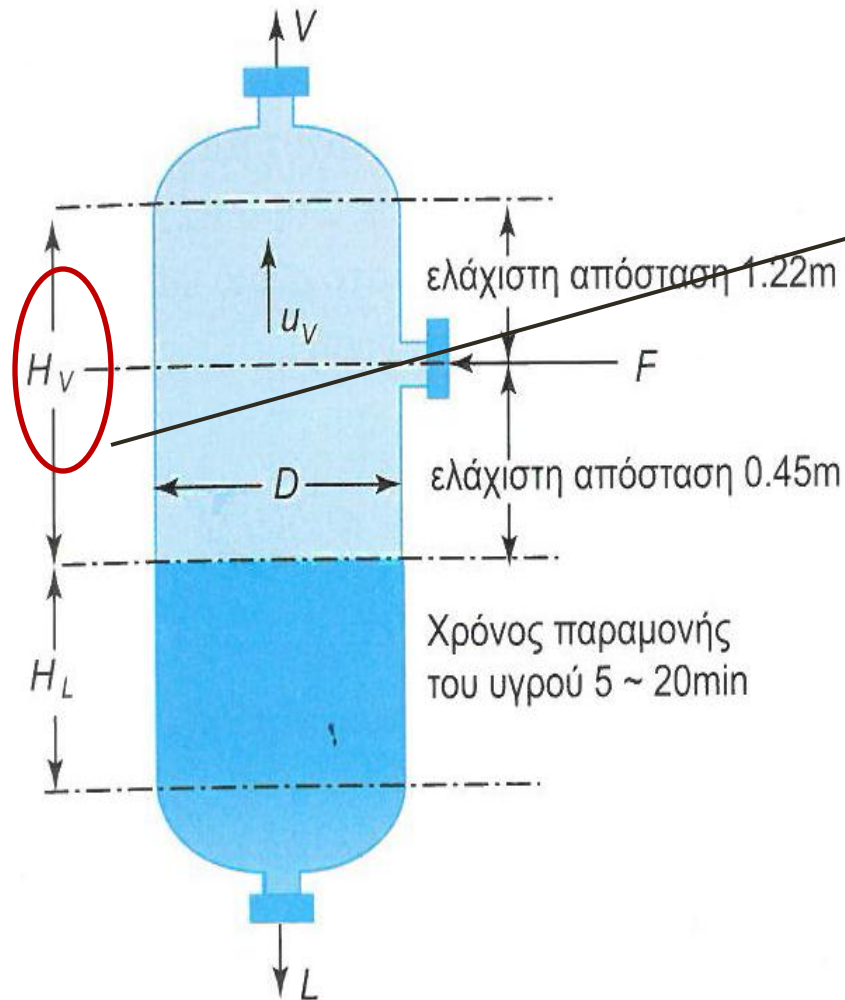


F είναι η συνολική ροή εισόδου και περιέχει υγρό (L) και αέριο (V).
Δηλαδή $F=L+V$

Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού



Κατακόρυφο Δοχείο Διαχωρισμού

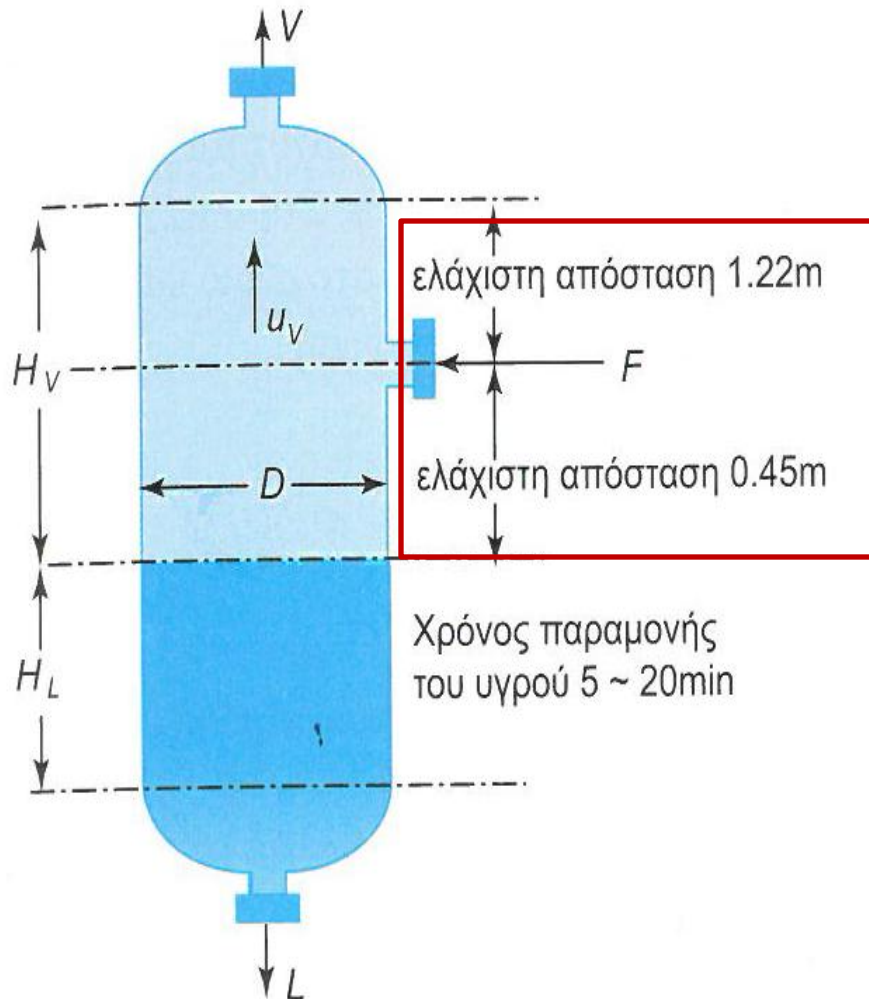


H_V είναι το ύψος που θα καταλάβει το αέριο μέσα στο δοχείο.



Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού

Κατακόρυφο Δοχείο Διαχωρισμού

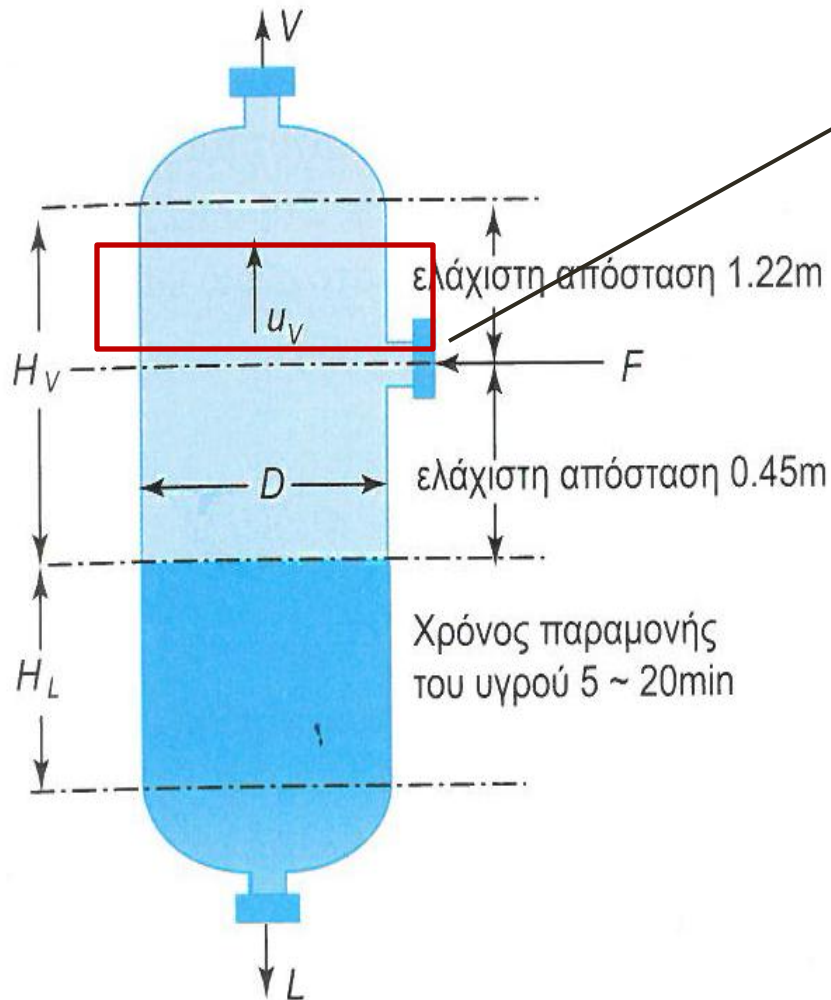


Το ελάχιστο ύψος H_V που αντιστοιχεί στην παρουσία του αερίου εντός του κατακόρυφου δοχείου διαχωρισμού ορίζεται σχεδιαστικά ως $1.22+0.45=1.67\text{m}$.

Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού



Κατακόρυφο Δοχείο Διαχωρισμού

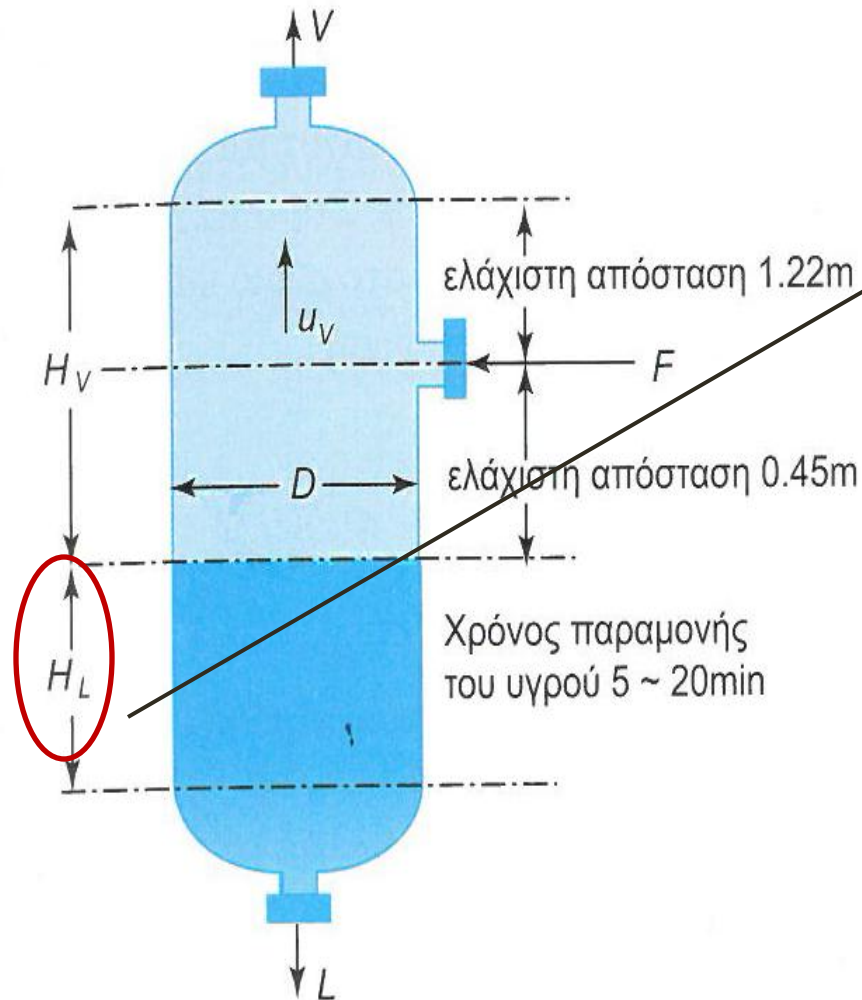


u_V η ταχύτητα ροής αερίου σε m/s.

Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού



Κατακόρυφο Δοχείο Διαχωρισμού

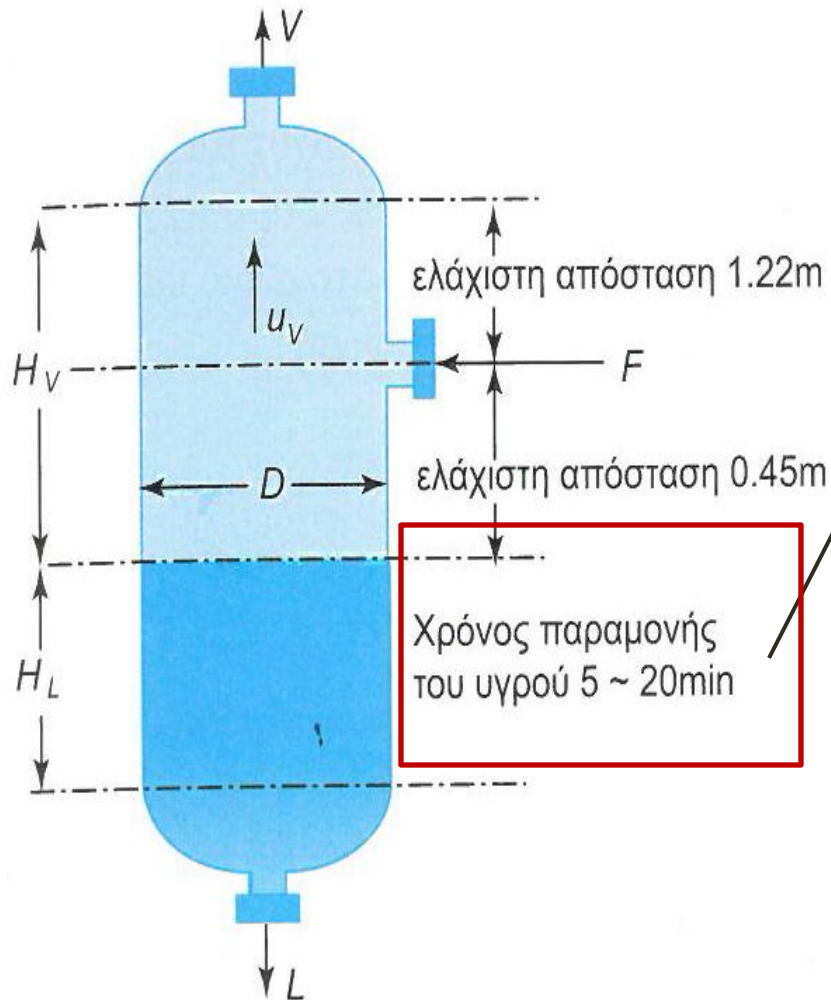


H_L είναι το ύψος που θα καταλάβει το υγρό μέσα στο δοχείο.

Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού



Κατακόρυφο Δοχείο Διαχωρισμού



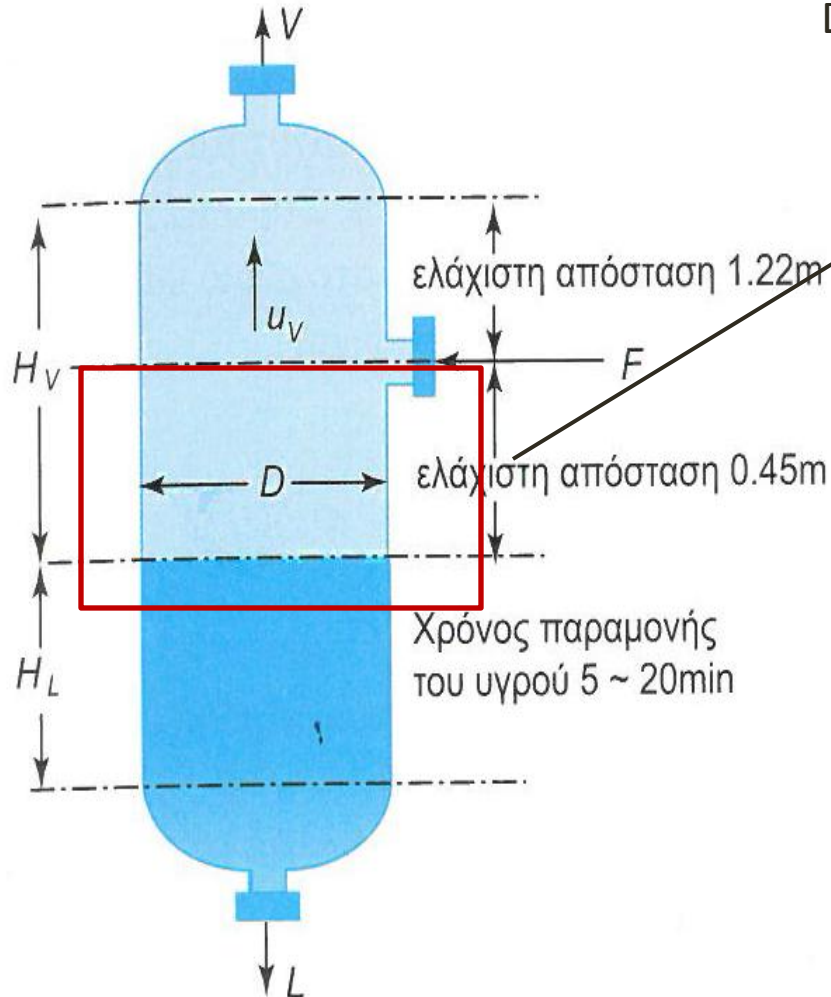
τ είναι ο χρόνος παραμονής του υγρού στο δοχείο. Ως παραδοχή θεωρούμε $5 < \tau < 20\text{min}$

Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού



Κατακόρυφο Δοχείο Διαχωρισμού

D είναι η διάμετρος του δοχείου.





Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού

Κατακόρυφο Δοχείο Διαχωρισμού

- **Βήμα 0.** Διαθέσιμα δεδομένα η ροή εισόδου (kg/h) $F=L+V$, η σύσταση (% mol ή % κ.β.), η θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) και η πίεση (bar). Παράλληλα, είναι γνωστές οι πυκνότητες ρ_L (kg/m^3) και ρ_V (kg/m^3).
- **Βήμα 1.** Σχέση 8.32. Θεωρούμε έναν χρόνο παραμονής μεταξύ $\tau=5-20\text{min}$ (συνήθως 10min), τα υπόλοιπα είναι γνωστά (L , ρ_L). Εδώ προσδιορίζουμε τον όγκο που θα καταλάβει το υγρό στο δοχείο μας V_L (m^3).
- **Βήμα 2.** Σχέση 8.33. Με γνωστές τις πυκνότητες ρ_L (kg/m^3) και ρ_V (kg/m^3) προσδιορίζουμε την ταχύτητα αερίου u_V . Το K παίρνει τις τιμές $0.11\text{m}/\text{s}$ αν υπάρχει φίλτρο για κατακράτηση σταγόνων και την τιμή $0.0305\text{m}/\text{s}$ αν δεν υπάρχει φίλτρο.



Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού

Κατακόρυφο Δοχείο Διαχωρισμού

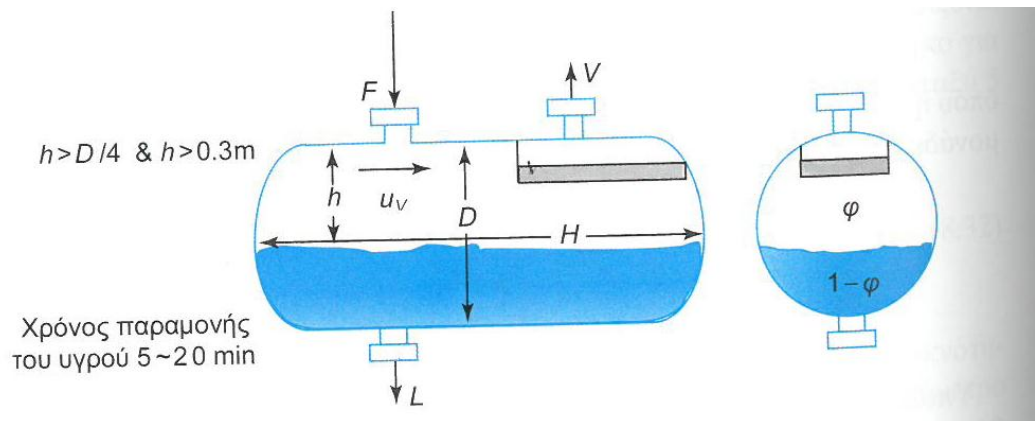
- **Βήμα 3.** Σχέση 8.34. Με γνωστή από το Βήμα 2 την ταχύτητα αερίου u_v , προσδιορίζεται η διάμετρος D (m). Τα υπόλοιπα είναι γνωστά (V, ρ_v).
- **Βήμα 4.** Σχέση 8.35. Με γνωστή από το Βήμα 3 την διάμετρο D , με γνωστό από το Βήμα 1 τον όγκο V_L που θα καταλάβει το υγρό στο δοχείο μας, προσδιορίζουμε το ύψος H_L (m) που θα αφορά το ύψος του υγρού στο δοχείο .
- **Βήμα 5.** Σχέση 8.36. Ελέγχουμε τον περιορισμό μεταξύ H_L (m), H_V (m) και D και βρίσκουμε το ύψος του αερίου H_V στο δοχείο. Το τελικό ύψος είναι $H=H_V+H_L$.



Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού

Οριζόντιο Δοχείο Διαχωρισμού

- **Βήμα 0 και Βήμα 1.** Ίδια με πριν για το κατακόρυφο δοχείο διαχωρισμού.
- **Βήμα 2.** Σχέση 8.33. Με γνωστές τις πυκνότητες ρ_L (kg/m^3) και ρ_V (kg/m^3) προσδιορίζουμε την ταχύτητα αερίου u_V . Το K παίρνει τις τιμές 0.11m/s αν υπάρχει φίλτρο για κατακράτηση σταγόνων και την τιμή 0.0305m/s αν δεν υπάρχει φίλτρο. **Όμως, το νέο u_V θα πρέπει να προσαυξηθεί κατά 25% για τα οριζόντια δοχεία διαχωρισμού.**
- **Βήμα 3. Σχέση 8.34'.** Με γνωστή από το Βήμα 2 την ταχύτητα αερίου u_V , προσδιορίζεται η διάμετρος D (m). Τα υπόλοιπα είναι γνωστά (V , ρ_V). **Το φ αφορά το κλάσμα διατομής και λαμβάνει εμπειρικές τιμές 0-1.**

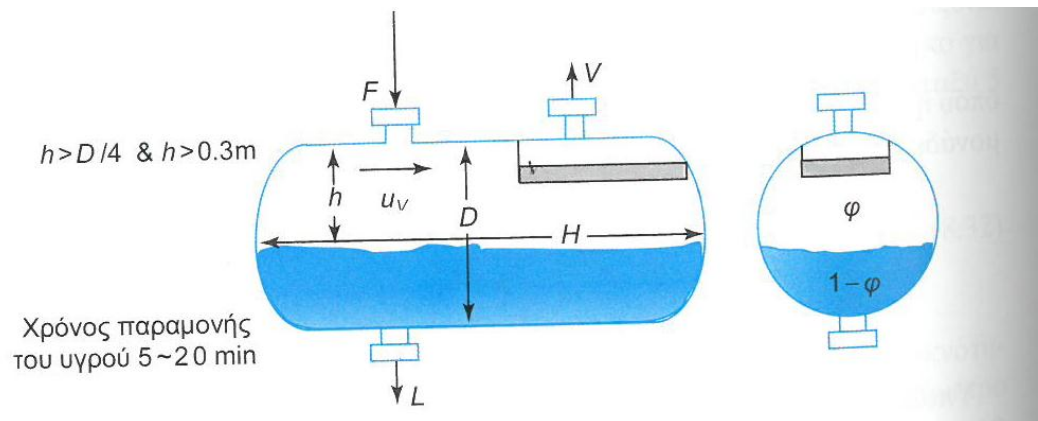




Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού

Οριζόντιο Δοχείο Διαχωρισμού

- **Βήμα 4. Σχέση 8.35'.** Με γνωστή από το Βήμα 3 την διάμετρο D , με γνωστό από το Βήμα 1 τον όγκο V_L που θα καταλάβει το υγρό στο δοχείο μας, προσδιορίζουμε το **συνολικό ύψος/μήκος H (m) που θα αφορά το συνολικό ύψος (ή πλέον μήκος) του δοχείου.**
- **Βήμα 5. Ελέγχουμε τον περιορισμό μεταξύ H (m) και D (m) που είναι $H/D > 3$.**





Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας

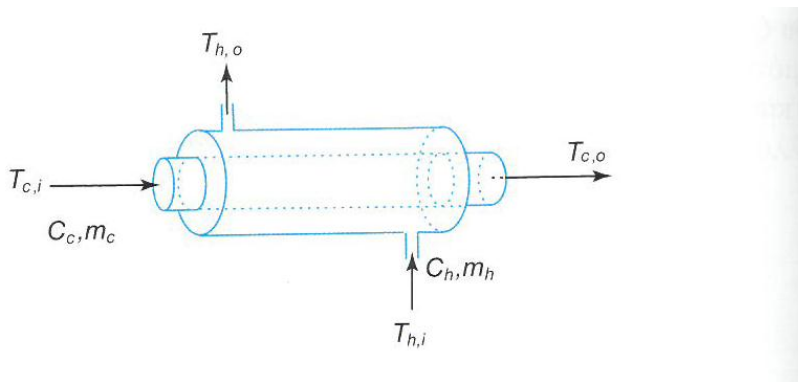
Εναλλάκτης Θερμότητας 2 εισόδων και 2 εξόδων (χωρίς αλλαγή φάσης)

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LM}$$

Q η θερμότητα εναλλαγής σε W (J/s).

U ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε W/m²/K.

ΔT_{LM} η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας σε K.



$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right)}$$

Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας



Εναλλάκτης Θερμότητας 2 εισόδων και 2 εξόδων

Πίνακας 8.1. Αντιπροσωπευτικές τιμές ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

	Θερμό ρευστό	Ψυχρό ρευστό	U (kW·m ⁻² ·K ⁻¹)
Χωρίς αλλαγή φάσης	Ατμός	Νερό	1.50 – 4.00
		Οργανικά	0.60 – 1.20
		Αέρια	0.03 – 0.30
		Βαριά έλαια	0.06 – 0.40
	Νερό	Νερό	0.90 – 1.70
	Οργανικά		0.30 – 0.90
	Αέρια		0.02 – 0.30
	Ελαφρά έλαια		0.40 – 0.90
	Βαριά έλαια		0.06 – 0.30
	Οργανικά		0.10 – 0.40
Αλλαγή φάσης	Ατμός	Νερό	2.00 – 4.00
	Ατμοί οργανικών (κορ.)		0.60 – 1.20
	Ελαφροί υδρογονάνθρακες		0.40 – 1.20
	Βαριοί υδρογονάνθρακες		0.06 – 0.20
	Ατμός*	Νερό	1.50 – 4.00
		Ελαφρά έλαια	0.30 – 0.90
		Βαριά έλαια	0.06 – 0.40
		Οργανικά	0.60 – 1.20

* μέγιστη ροή θερμότητας σε αναβραστήρες 31.5 kW·m⁻²

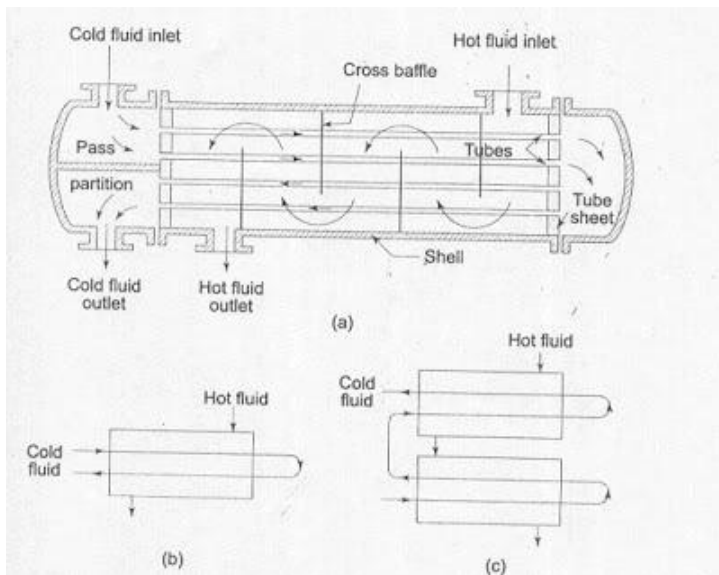


Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας

Εναλλάκτης Θερμότητας πολλαπλών διαβάσεων (χωρίς αλλαγή φάσης)

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \cdot F_T$$

Αδιάστατος συντελεστής διορθώσεως που λαμβάνει υπόψη την πολύπλοκη δομή των εναλλακτών.



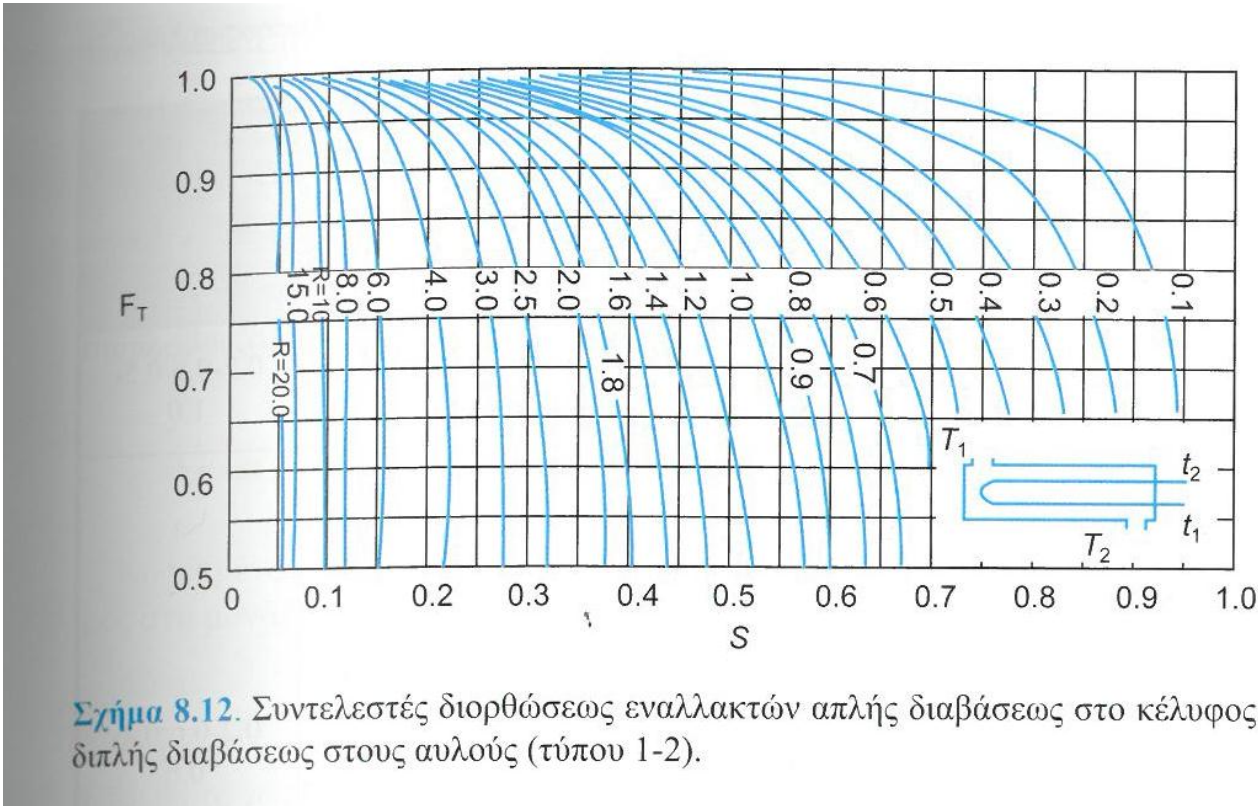
$$F_T = \frac{(1 + R^2)^{0.5} \cdot \ln\left(\frac{1 - S}{1 - R \cdot S}\right)}{(R - 1) \cdot \ln\left(\frac{2 - S \cdot [R + 1 - (1 + R^2)^{0.5}]}{2 - S \cdot [R + 1 + (1 + R^2)^{0.5}]}\right)}$$

$$R = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{c,o} - T_{c,i}} \text{ and } S = \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}}$$



Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας

Εναλλάκτης Θερμότητας πολλαπλών διαβάσεων (χωρίς αλλαγή φάσης)



Σχήμα 8.12. Συντελεστές διορθώσεως εναλλακτών απλής διαβάσεως στο κέλυφος και διπλής διαβάσεως στους αυλούς (τύπου 1-2).

Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας



Εναλλάκτης Θερμότητας Πολλαπλών Διαβάσεων

Πίνακας 8.3. Κριτήρια για την επιλογή τύπου εναλλάκτη θερμότητας κελύφους-αυλών.

	Μέγιστη επιφάνεια (m ²)	Μέγιστη πίεση (bar)	Μέγιστη θερμοκ. (°C)	Μέγιστη ογκομ. παροχή (m ³ /s)	Τυπική πτώση πίεσης (bar) αυλοί/κέλυφ.
Διπλού σωλήνα (double-riple)	10	1000	600	1	0.2-0.6/0.5-1.0
Σταθερού καθρέπτη (fixed tube sheet)	800	140		15	0.2-0.6/0.2-0.6
Τύπου φουρκέτας (U-tube)					
Πλωτής κεφαλής (Floating head)	1000				

- ❑ Η επιφάνεια εναλλαγής εναλλάκτη δεν μπορεί να ξεπερνά τα 1000m².
- ❑ Η πτώση πίεσης στους εναλλάκτες είναι 20-60kPa.

Πίνακας 8.4. Ιδιότητες επιλεγμένων θερμικών ρευστών (από το Perry's Handbook).

Όνομασία	Περιοχή χρήσης (°C)	Καν. σημείο βρασμού (°C)	ΔH _{vap} (kJ/kg)	C _p (kJ/kg K)	k (W/m K)	η _i (cP)	ρ _i ^{100°C} (kg/m ³)
Νερό	100-260	100	2256.7	4.2 ^{100°C}	0.68	0.284 ^{100°C}	958
Dowtherm A	150-400	260	290.7	2.2 ^{257°C}	0.131	0.3 ^{315°C}	997
Dowtherm E	200-400	178	276.8	1.725 ^{150°C}	0.11	0.3 ^{205°C}	1181
Mobiltherm 600		>315		2.43 ^{260°C}	0.115	0.595 ^{260°C}	900
Terminol FR-2	150-400	340		1.4 ^{260°C}	0.098	0.63 ^{260°C}	1380
NaK	400-800	825		1.05 ^{315°C}	27.02	0.24 ^{315°C}	840 ^{315°C}

- ❑ Οι διπλανοί πίνακες δίνουν ορισμένες πληροφορίες για το πώς να επιλέγετε θερμικά ρευστά (ψυκτικό κυρίως είναι το νερό) και πώς να επιλέγετε τύπο εναλλάκτη θερμότητας.



Επιλογή Υλικών Κατασκευής

- ❑ Ο ανθρακούχος χάλυβας (S, CS) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διεργασίες >450°C.
- ❑ S304 και SS316 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διεργασίες έως 650°C.
- ❑ Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες χρειάζονται πιο κατάλληλα υλικά όπως Monel, Titanium.

Πίνακας 8.6 Ενδεικτικός πίνακας επιλογής υλικού κατασκευής (Στοιχεία από Perry's Handbook, 7th ed., Πίνακας 28-2).

	Όξινα & αναγωγ. διαλύματα (πολλά οργ. οξέα, φωσφ. οξύ,...)	Όξινα & οξειδωτικά διαλύματα (νιτρικό οξύ, ...)	Ήπια αλκαλικά & καυστικά διαλύματα	Ουδέτερα διαλ. π.χ. άλατα	Τυρβώδη ροή νερού
Κοινός χάλυβας	1	0	4	3	3
Ανοξ. Χάλυβας 304 (18Cr,8Ni)	3	6	5	4	6
Ανοξ. Χάλυβας (18Cr,12Ni,2.5Mo)	4	5	5	5	6
Monel	5	0	6	6	6
Titanium	3	6	2	6	6



Επιλογή Υλικών Κατασκευής

Πίνακας 8.7 Ενδεικτικός πίνακας καταλληλότητας υλικού (Στοιχεία από Coulson & Richardson's *Chemical Engineering*).

Διαβάθμιση επιλογής: Π – προτείνεται

π – προτείνεται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος μόνο

X – δεν προτείνεται

- – δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα

	Κοινός χάλυβας	Ανοξ. Χάλυβας 304 (18Cr,8Ni)	Ανοξ. Χάλυβας 316 (16Cr,12Ni,2Mo)	Hastelloy	Titanium
Ακετόνη	Π	Π	Π	Π	Π
H ₂ SO ₄ , <10%	X	X	X	Π	π
HCl, >25%	X	X	X	X	X
Ελαϊκό οξύ	X	Π	Π	Π	Π
Αμμωνία	X	Π	Π	Π	Π
Φουρφουράλη	Π	X	X	Π	Π



Επιλογή Υλικών Κατασκευής

Πίνακας 8.8 Σχετικό κόστος υλικών κατασκευής μηχανολογικού εξοπλισμού (Στοιχεία από Coulson & Richardson's *Chemical Engineering*).

Υλικό	Σχετικό κόστος
Κοινός χάλυβας	1
Ανοξ. Χάλυβας 304	5
Inconel	12
Αλουμίνιο	18
Monel	19
Νικέλιο	35
Τιτάνιο	60

Ανασκόπηση 8^{ου} Μαθήματος



- Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Δοχείων Διαχωρισμού
- Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας
 - **Εναλλάκτης Θερμότητας 2 εισόδων και 2 εξόδων (απλής μετάβασης)**
 - **Εναλλάκτης Θερμότητας Πολλαπλών Διαβάσεων**
- Επιλογή Υλικών Κατασκευής



Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση περιβαλλοντικών συστημάτων I

Μάθημα 8^ο

*(Προκαταρκτική Σχεδίαση και
Διαστασιολόγηση Εξοπλισμού)*

Δρ. Ιψάκης Δημήτρης

Χημικός Μηχανικός, Έκτακτο Διδακτικό Προσωπικό ΠΔΜ

Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας



Εναλλάκτης Θερμότητας Πολλαπλών Διαβάσεων

Πίνακας 8.2. Αντιπροσωπευτικές τιμές μερικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

	Ρευστό	$h(\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1})$
Υγρά – Χωρίς αλλαγή φάσης	Νερό	5.00 – 7.50
	Οργανικά-πητητικά	1.50 – 2.00
	Οργανικά-ενδιάμεσα	0.70 – 1.50
	Οργανικά-βαριά	0.20 – 0.50
Αέρια – Χωρίς αλλαγή φάσης	Ενδιάμεσα & βαριά οργανικά	0.03 – 0.30
	Πτητικά αέρια (Αέρας, N_2 , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , ...) σε πίεση < 10 bar	0.10 – 0.40
	Πτητικά αέρια (Αέρας, N_2 , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , ...) σε πίεση > 10 bar	0.50 – 0.80
Συμπύκνωση	Ατμός	4.00 – 10.00
	Οργανικά-πητητικά	1.50 – 2.00
	Οργανικά-ενδιάμεσα	1.50 – 4.00
	Οργανικά-βαριά	0.60 – 2.00
	Υδρογονάνθρακες	0.60 – 2.50
Εξάτμιση	Νερό	3.00 – 10.00
	Οργανικά-πητητικά	3.00 – 5.00
	Οργανικά-ενδιάμεσα	1.00 – 3.00
	Οργανικά-βαριά	0.60 – 2.50