

Άσκηση 6. Ρευστοποίηση κλίνης

ΧΡΗΣΤΟΣ ΜΠΟΥΚΟΥΒΑΛΑΣ

Σκοπός της άσκησης

- Η πειραματική μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης κλινών σωματιδίων και
- ο προσδιορισμός των ρευστοδυναμικών χαρακτηριστικών τους.

Θεωρία

- Κλίνη ονομάζουμε ένα στρώμα υλικού, συνήθως από σωματίδια
- Σταθερή ή Ρευστοποιημένη
- Μια στερεή κλίνη (fixed or packed bed) είναι μια κλίνη με πληρωτικό υλικό σωματίδια (π.χ. κόκκοι άμμου, ανθρακίτη, ενεργοί άνθρακες, silica gel, κλπ) διαφόρων κοκκομετριών και βρίσκει εφαρμογές στην διήθηση νερού, στην προσρόφηση, στις καταλυτικές αντιδράσεις και γενικά σε διεργασίες διαχωρισμού σωματιδίων, μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

Θεωρία

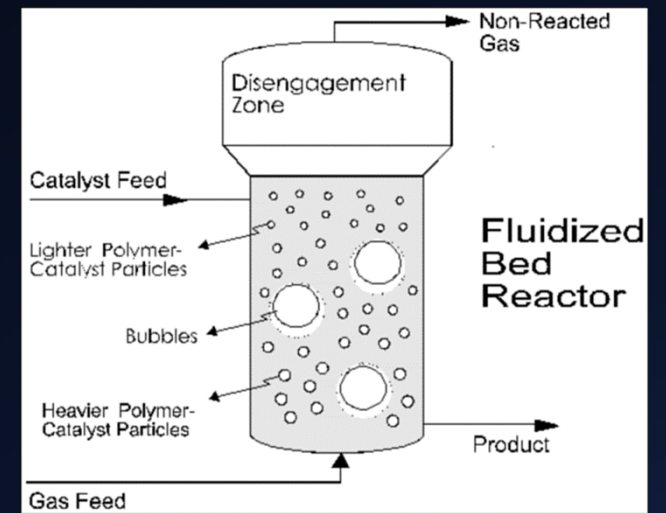
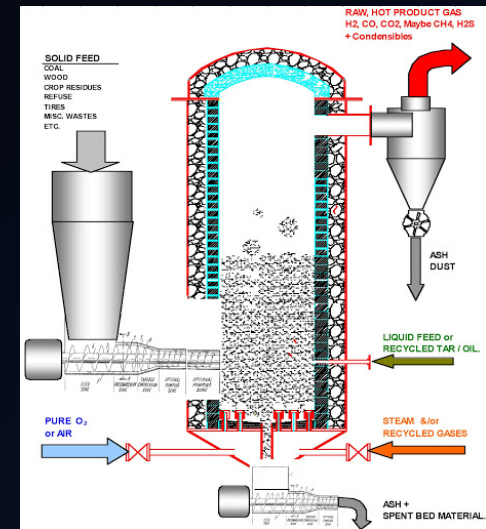
- Ως ρευστοποιημένη κλίνη εννοούμε μια κλίνη σωματιδίων τα οποία κινούνται τυχαία και ασταμάτητα μέσα στην κλίνη με την βοήθεια μιας ρευστής φάσης.
- Οι ρευστοποιημένες κλίνες χρησιμοποιούνται πολύ στις χημικές βιομηχανίες (ανάμιξη, θέρμανση ή ξήρανση σωματιδίων), στις χημικές διεργασίες (καταλυτικές, χημικές αντιδράσεις όπως η διάσπαση υψηλών κλασμάτων πετρελαίου για την παρασκευή χαμηλότερων) και στην μεταλλουργία (φρύξη, εναλλαγή θερμότητας).
- Τα πληρωτικά υλικά μπορεί να έχουν σχήμα σφαιρικό, κυλινδρικό, ή διάφορα άλλα σχήματα που έχουν βρεθεί ότι επιτυγχάνουν καλή επαφή στερεού και ρευστού.

Θεωρία

Πλεονεκτήματα ρευστοποιημένων κλινών (σε σχέση με τις στερεές)

- i. Έντονη ανάμειξη των σωματιδίων και του ρευστού
- ii. Ισοθερμοκρασιακές συνθήκες λειτουργίας, χωρίς σχηματισμό «θερμών σημείων»
- iii. Πολλαπλάσιοι ρυθμοί πραγματοποίησης της επιδιωκόμενης διεργασίας
- iv. Μικρότερη πτώση πίεσης
- v. Μεγάλοι συντελεστές μεταφοράς και θερμότητας
- vi. Επιτρέπεται η συνεχής ανάκτηση-αναγέννηση- ανακύκλωση της στερεής φάσης δίχως την διακοπή της λειτουργίας της διαδικασίας

Παραδείγματα



Παραδείγματα



Παραδείγματα

- i. <https://www.youtube.com/watch?v=IFhrpSJZzck>
- ii. <https://www.youtube.com/watch?v=My4RA5I0FKs>

Είδη ρευστοποίησης

Ανάλογα με τη πυκνότητα των σωματιδίων και το είδος του ρευστού παρατηρούνται δύο είδη ρευστοποίησης:

- **Ομοιόμορφη ρευστοποίηση:** Τα σωματίδια κινούνται ως ανεξάρτητα σώματα κατά τυχαίες διευθύνσεις διαμέσου όλου του όγκου του υγρού. Η κίνηση γίνεται εντονότερη με αύξηση της ταχύτητας αλλά η μέση πυκνότητα της κλίνης είναι ίδια παντού για δεδομένη ταχύτητα. Σε μεγάλες ταχύτητες η κλίνη εμφανίζει μεγάλη διαστολή.
- **Ανομοιόμορφη ρευστοποίηση:** Συνήθως δημιουργούνται φυσαλίδες ρευστού στις οποίες δεν συναντώνται σωματίδια και μόνο ένα μικρό κλάσμα του ρευστού ρέει στα κανάλια των σωματιδίων. Αποτελεί ανεπιθύμητο φαινόμενο λόγω διακυμάνσεων στην πτώση πίεσης και την εύκολη παράσυρση των σωματιδίων.

Είδη ρευστοποίησης

Το φαινόμενο της ρευστοποίησης ελέγχεται ουσιαστικά από δύο είδη δυνάμεων, τις δυνάμεις αδράνειας και τις δυνάμεις βαρύτητας. Ο λόγος των δυνάμεων αυτών εκφράζεται ποσοτικά από τον αδιάστατο **αριθμό Froude, Fr** .

$$Fr = \frac{u_{\varphi}^2}{gd_{\sigma}}$$

Σημαντική επίδραση στη διαμόρφωση της κλίνης, ιδιαίτερα στις μικρές ταχύτητες, παίζει κι ο **αριθμός Reynolds, Re** (δυνάμεις αδράνειας vs ιξώδεις δυνάμεις).

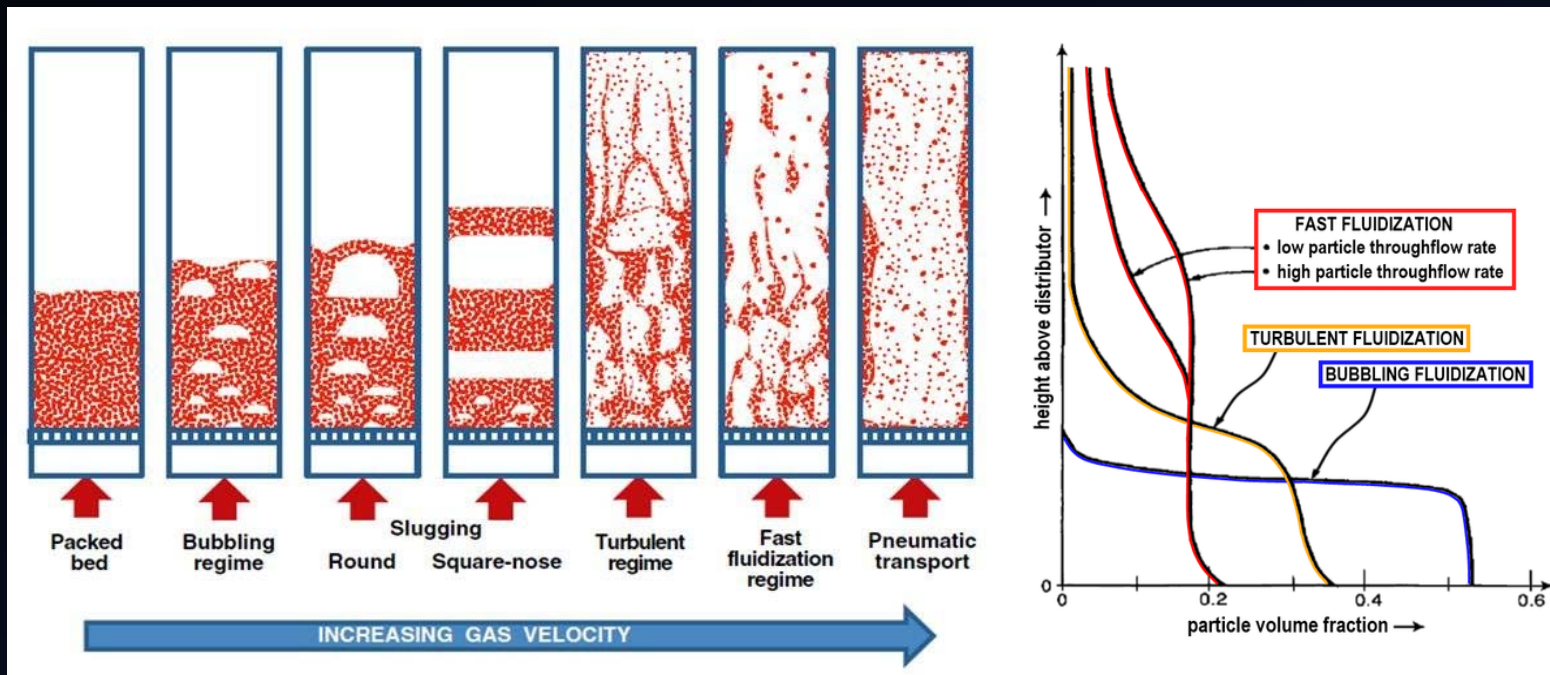
$$Re = \frac{\rho u_{\varphi} d_{\sigma}}{\mu}$$

$$(Fr^*)(Re^*) \left(\frac{\rho_{\sigma} - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{l^*}{D} \right) < 100 \rightarrow \text{Ομοιόμορφη Ρευστοποίηση}$$

$$(Fr^*)(Re^*) \left(\frac{\rho_{\sigma} - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{l^*}{D} \right) > 100 \rightarrow \text{Ανομοιόμορφη Ρευστοποίηση}$$

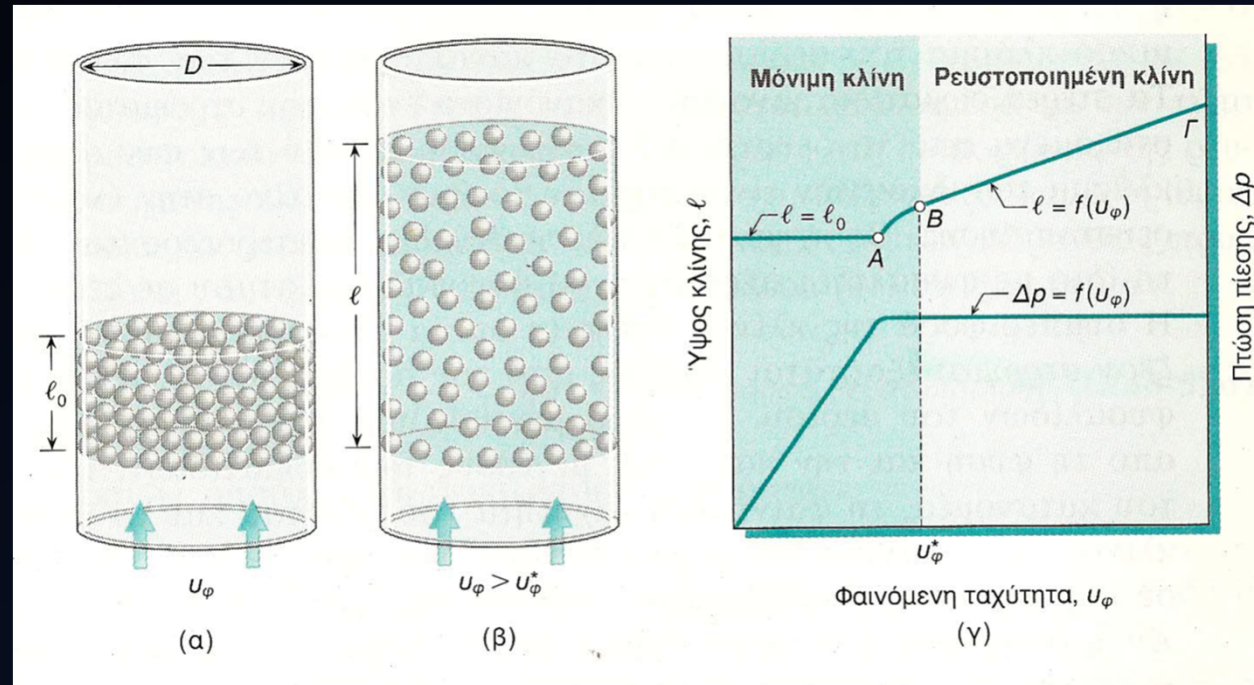
Οι αριθμοί Fr και Re υπολογίζονται στο σημείο έναρξης ρευστοποίησης.

Είδη ρευστοποίησης



Μοντελοποίηση

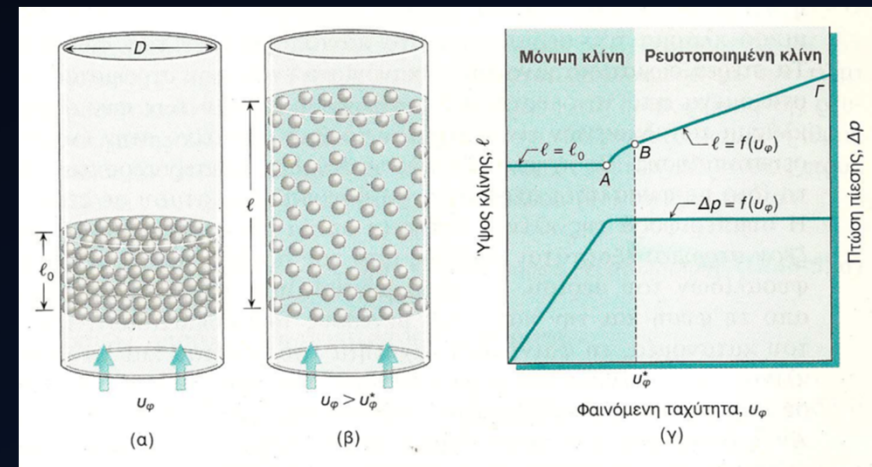
Θεωρούμε ένα κατακόρυφο κυλινδρικό δοχείο, διαμέτρου D , στο οποίο περιέχεται ένα στρώμα σωματιδίων, μέσης διαμέτρου d_σ , το οποίο έχει αρχικό ύψος l_0 .



Μοντελοποίηση

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της διεργασίας της ρευστοποίησης είναι:

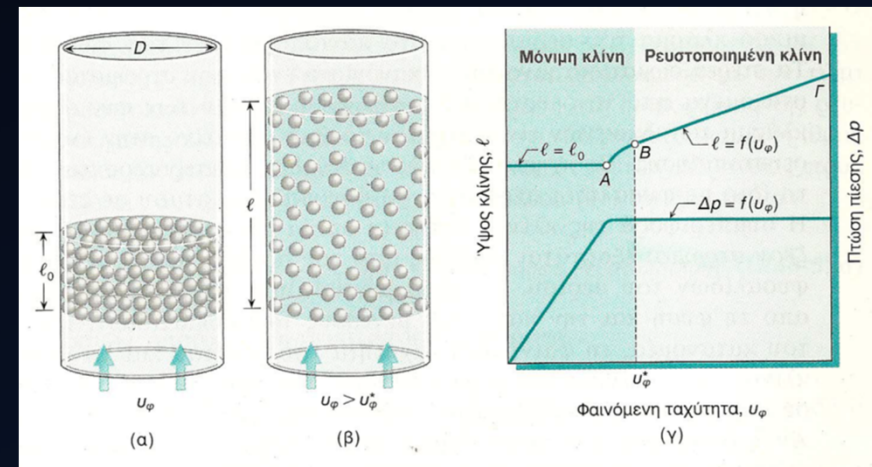
- **Πορώδες κλίνης, ε** : το κλάσμα του όγκου του στρώματος το οποίο είναι ελεύθερο σωματιδίων ($= 1 - V_s/V$). Η τιμή εξαρτάται από το σχήμα και τη κατανομή μεγέθους των σωματιδίων αλλά και από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του στρώματος των στερεών.
- **Ύψος κλίνης, l** : Το ύψος της κλίνης στα διάφορα στάδια ρευστοποίησης.
- **Πτώση πίεσης, ΔP** : Η πτώση πίεσης που παρατηρείται όταν ένα ρευστό περνά από στρώμα στερεών



Μοντελοποίηση

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της διεργασίας της ρευστοποίησης είναι:

- **Ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης, u_{ϕ}^*** : η φαινόμενη ταχύτητα του ρευστού τη στιγμή που αρχίζει η αιώρηση των σωματιδίων (αληθής ρευστοποίηση).
- **Ελάχιστο πορώδες, ε^*** : το πορώδες του στρώματος όταν αρχίζει η αληθής ρευστοποίηση. Εξαρτάται από το είδος του υλικού και γενικά αυξάνεται με την ελάττωση του μεγέθους των σωματιδίων.
- **Ύψος κλίνης, l^*** : Το ύψος της κλίνης όταν αρχίζει η αληθής ρευστοποίηση.

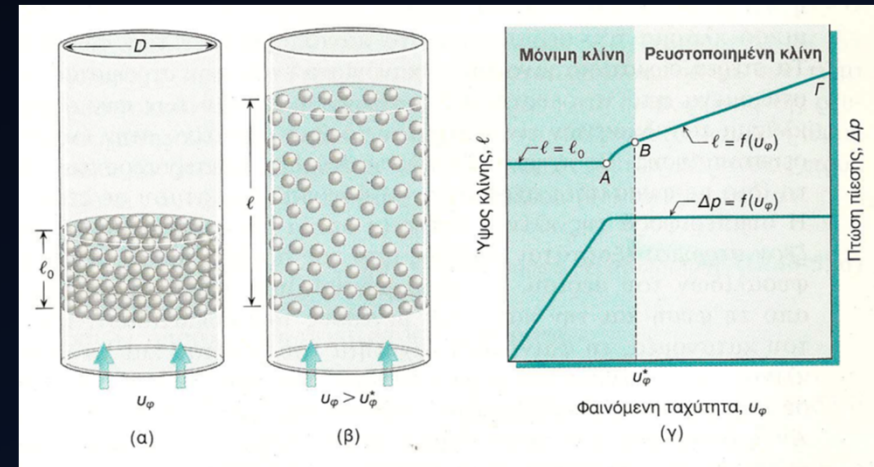


Μοντελοποίηση

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της διεργασίας της ρευστοποίησης είναι:

- **Ταχύτητα παράσυρσης, u_{φ}^o** : η οριακή ταχύτητα του ρευστού, πέραν της οποίας, τα σωματίδια συμπαρασύρονται από το ρευστό και η κλίση παύει να υφίσταται.

$$u_{\varphi}^* < u_{\varphi} < u_{\varphi}^o$$



Μοντελοποίηση

Η βασική εξίσωση που περιγράφει τη διεργασία της ρευστοποίησης για σφαιρικά σωματίδια είναι η εξίσωση *Ergun*:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \left(\frac{l}{d_\sigma}\right) \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}\right) \left(\frac{150(1-\varepsilon)\mu u_\phi}{\rho d_\sigma} + 1.75u_\phi^2\right)$$

Διαφορετική μορφή της εξίσωσης *Ergun* είναι η εξής:

$$f = \frac{150(1-\varepsilon)}{Re} + 1.75 \quad \text{όπου} \quad f = \left(\frac{\Delta p}{\rho u_\phi^2}\right) \left(\frac{d_\sigma}{l}\right) \left(\frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon}\right)$$

- Για $Re < 10 \rightarrow f = \frac{150(1-\varepsilon)}{Re}$
- Για $Re > 1000 \rightarrow f = 1.75$

Μοντελοποίηση

Για μη σφαιρικά σωματίδια, χρησιμοποιείται η παρακάτω διόρθωση:

$$d_{\sigma} = d_e \Psi$$

<i>Τυπικές τιμές σφαιρικότητας σωματιδίων διαφόρων υλικών</i>			
ΥΛΙΚΟ	Ψ	ΥΛΙΚΟ	Ψ
Σφαιρικά σωματίδια	1	Γωνιώδη σωματίδια	0,65
Στρογγυλή άμμος	0,83	Φυλλίδια μίκας	0,28
Λεπτόκοκκος άνθρακας	0,73	Γραφίτης	0,2

Μοντελοποίηση

Στο σημείο έναρξης ρευστοποίησης (B):

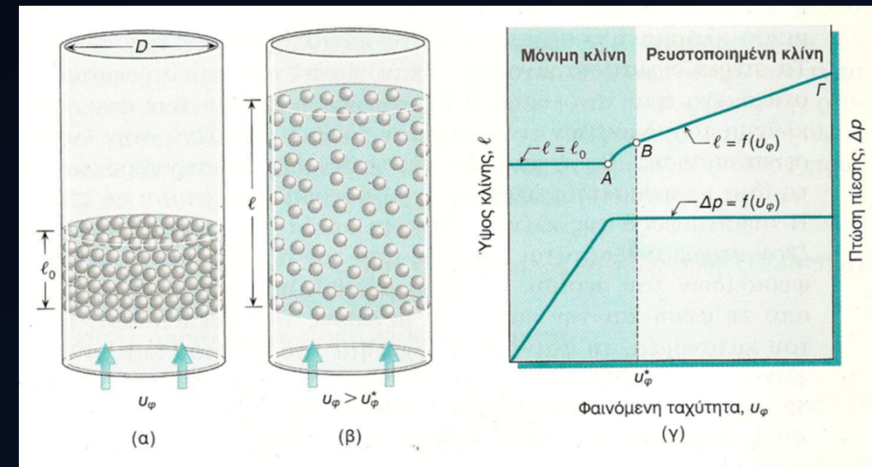
η πτώση πίεσης, Δp , της ροής διαμέσου της κλίνης είναι ίση με τη συνισταμένη του βάρους του στρώματος των στερεών σωματιδίων και της άνωσης ανηγμένη στη μονάδα επιφάνειας της εγκάρσιας διατομής της κλίνης

$$\Delta p = g(1 - e^*)(\rho_\sigma - \rho)l^*$$

Ταυτόχρονα, η εξίσωση Ergun γίνεται

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \left(\frac{l^*}{d_\sigma}\right) \left(\frac{1 - \varepsilon^*}{\varepsilon^{*3}}\right) \left(\frac{150(1 - \varepsilon^*)\mu u_\phi^*}{\rho d_\sigma} + 1.75u_\phi^{*2}\right)$$

Η λύση του συστήματος μπορεί να μας δώσει τις τιμές 2 παραμέτρων (πχ. Δp , u_ϕ^* γνωστά $\rightarrow \varepsilon^*$ και l^*)



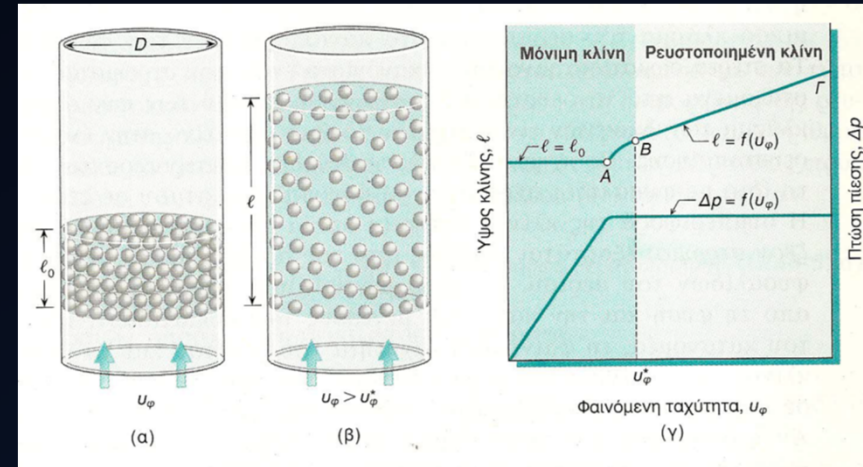
Μοντελοποίηση

Σε ταχύτητες **μεγαλύτερες** του σημείου έναρξης ρευστοποίησης (δεξιά του Β):

$$l = l^* \frac{1 - \varepsilon^*}{1 - \varepsilon}$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \left(\frac{l}{d_\sigma} \right) \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \left(\frac{150(1 - \varepsilon)\mu u_\phi}{\rho d_\sigma} + 1.75u_\phi^2 \right)$$

Για κάθε σημείο Δp , u_ϕ , η λύση του συστήματος μπορεί να μας δώσει τις τιμές των ε και l (ε^* και l^* γνωστά από το προηγούμενο βήμα)



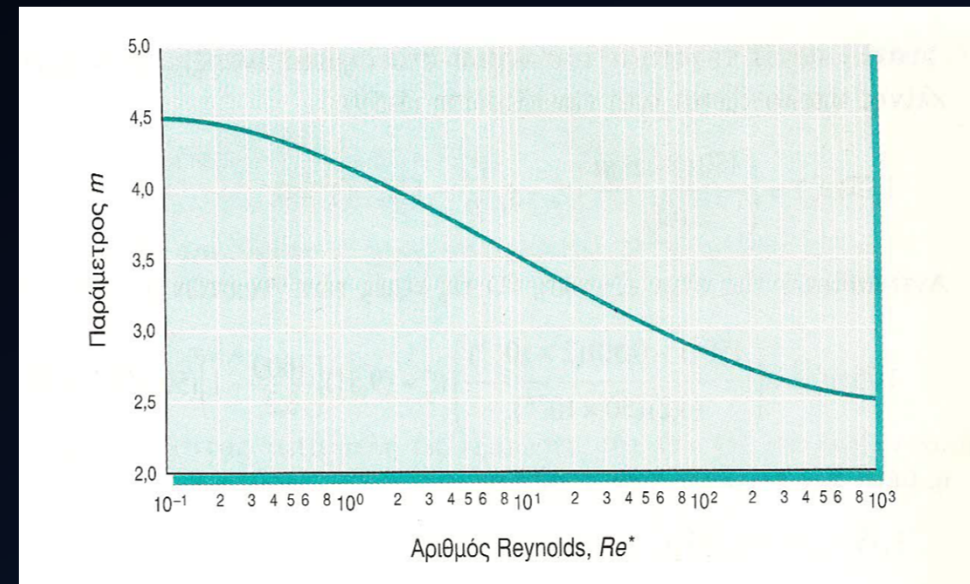
Μοντελοποίηση

Για την πρόβλεψη της ταχύτητας (σε ταχύτητες **μεγαλύτερες** του σημείου έναρξης ρευστοποίησης):

- Για **ομοιόμορφη** ρευστοποίηση

$$\frac{u_{\phi}}{u_{\phi}^*} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*}\right)^m, \text{ where } m \text{ from diagram at } (*)$$

[Lewis, Gilliland, Bauer]



Μοντελοποίηση

Για την πρόβλεψη της ταχύτητας (σε ταχύτητες **μεγαλύτερες** του σημείου έναρξης ρευστοποίησης):

- Για **ανομοιόμορφη** ρευστοποίηση

$$\frac{l}{l^*} = \frac{u_b - u_\varphi^*}{u_b - u_\varphi}, \quad \text{where } u_b = 0.7\sqrt{gd_b}$$

όπου d_b : ισοδύναμη διάμετρος φυσαλίδας

Πειραματικό μέρος

Περιγραφή συσκευής

Η πειραματική διάταξη βρίσκεται στο χώρο του Ημιβιομηχανικού Εργαστηρίου.

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

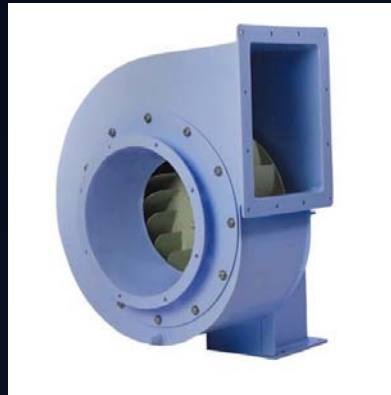
- **Φυσητήρας**



Πειραματικό μέρος

Φυσητήρας

- Δημιουργεί τη ροή αέρα εντός της κλίνης.
- Η εισαγωγή του αέρα γίνεται στο κέντρο του φυσητήρα
- Ο κινητήρας περιστρέφοντας τη φτερωτή αναγκάζει τον αέρα σε κυκλική κίνηση αυξάνοντας την κινητική του ενέργεια
- Η έξοδος του γίνεται περιμετρικά όπου έχει αποκτήσει την μέγιστη γραμμική ταχύτητα.



Πειραματικό μέρος

Περιγραφή συσκευής

Η πειραματική διάταξη βρίσκεται στο χώρο του Ημιβιομηχανικού Εργαστηρίου.

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

- Φυσητήρας
- Διαχύτης (κατανομέας)



Πειραματικό μέρος

Διαχύτης (κατανομέας ροής αέρα)

- Βρίσκεται στην έξοδο του φυσητήρα
- Ο ρόλος του είναι να κατανέμει τη ροή του αέρα ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια εισόδου στην στήλη της κλίνης
- Αποτελείται από μικρές σφαίρες που συγκρατούνται σταθερές από μεταλλικό πλέγμα



Πειραματικό μέρος

Περιγραφή συσκευής

Η πειραματική διάταξη βρίσκεται στο χώρο του Ημιβιομηχανικού Εργαστηρίου.

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

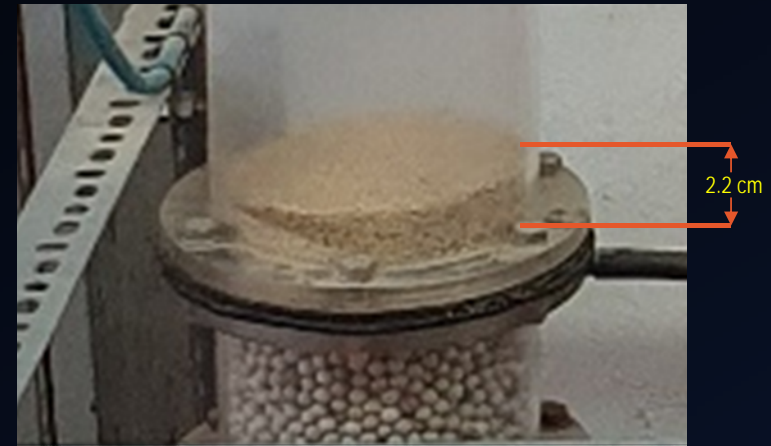
- Φυσητήρας
- Διαχύτης (κατανομέας)
- Δοχείο ρευστοποίησης και κλίση σωματιδίων



Πειραματικό μέρος

Δοχείο ρευστοποίησης και κλίση σωματιδίων

- Βρίσκεται μετά τον κατανομέα ροής
- Κατακόρυφος σωλήνα από plexiglass
- Είδος σωματιδίων: άμμος
- Μάζα σωματιδίων: $m=0.5 \text{ kg}$
- Πυκνότητα σωματιδίων: $\rho=2900 \text{ kg/m}^3$
- Διάμετρος σωματιδίων: $d_{\sigma} = 655 \mu\text{m}$
- Ύψος στρώματος άμμου: 2.2 cm
- Περίμετρος σωλήνα: 43 cm



Πειραματικό μέρος

Περιγραφή συσκευής

Η πειραματική διάταξη βρίσκεται στο χώρο του Ημιβιομηχανικού Εργαστηρίου.

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

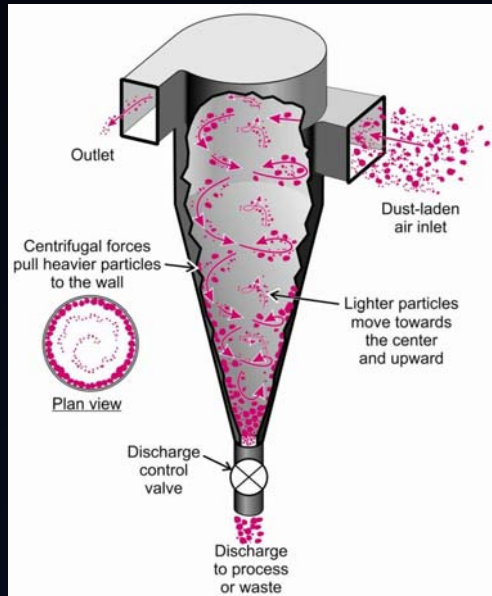
- Φυσητήρας
- Διαχύτης (κατανομέας)
- Δοχείο ρευστοποίησης και κλίση σωματιδίων
- Κυκλώνας



Πειραματικό μέρος

Κυκλώνας

- Επιτελεί το διαχωρισμό των σωματιδίων (που παρασύρονται) από τον αέρα



Πειραματικό μέρος

Περιγραφή συσκευής

Η πειραματική διάταξη βρίσκεται στο χώρο του Ημιβιομηχανικού Εργαστηρίου.

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

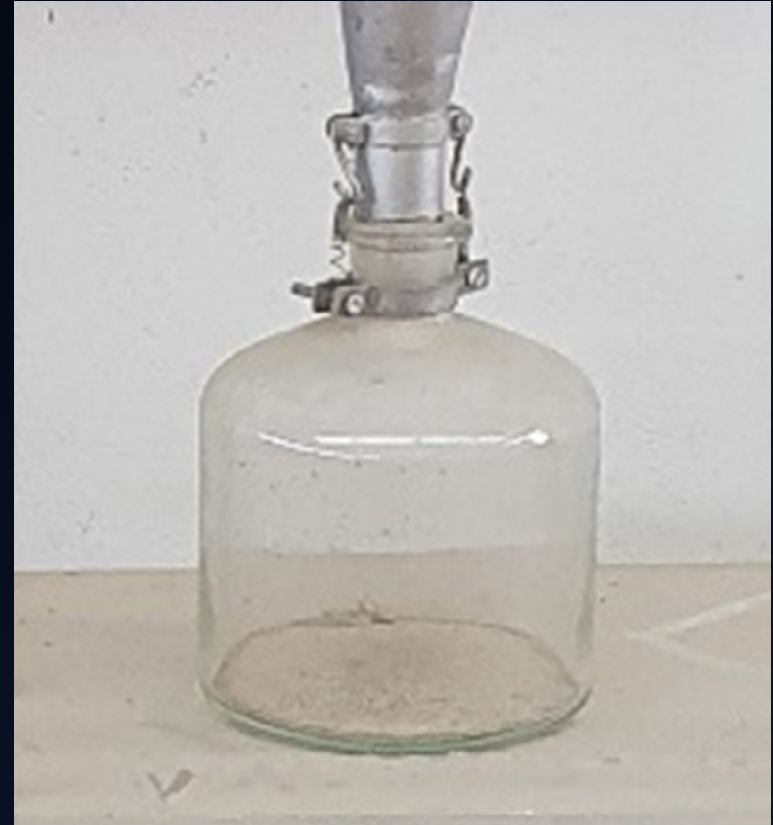
- Φυσητήρας
- Διαχύτης (κατανομέας)
- Δοχείο ρευστοποίησης και κλίση σωματιδίων
- Κυκλώνας
- Δοχείο συλλογής σωματιδίων



Πειραματικό μέρος

Δοχείο συλλογής σωματιδίων

- Βρίσκεται στο κάτω μέρος του κυκλώνα και συλλέγονται εκεί τα σωματίδια που έχουν διαχωριστεί



Πειραματικό μέρος

Περιγραφή συσκευής

Η πειραματική διάταξη βρίσκεται στο χώρο του Ημιβιομηχανικού Εργαστηρίου.

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

- Φυσητήρας
- Διαχύτης (κατανομέας)
- Δοχείο ρευστοποίησης και κλίση σωματιδίων
- Κυκλώνας
- Δοχείο συλλογής σωματιδίων
- **Αισθητήρια καταγραφής/ελέγχου**



Πειραματικό μέρος

Αισθητήρια καταγραφής/ελέγχου

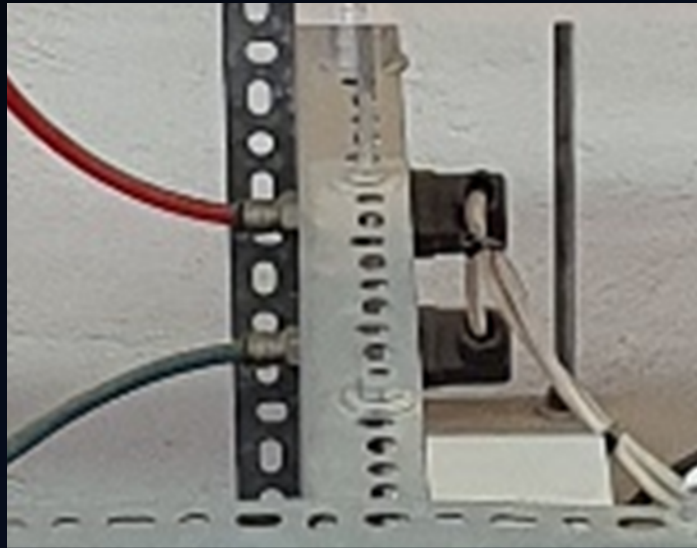
- Αισθητήρια πίεσης



Πειραματικό μέρος

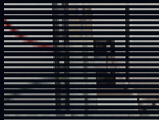
Αισθητήρια καταγραφής/ελέγχου

- Αισθητήρια πίεσης



Πειραματικό μέρος

Αισθητήρια καταγραφής/ελέγχου

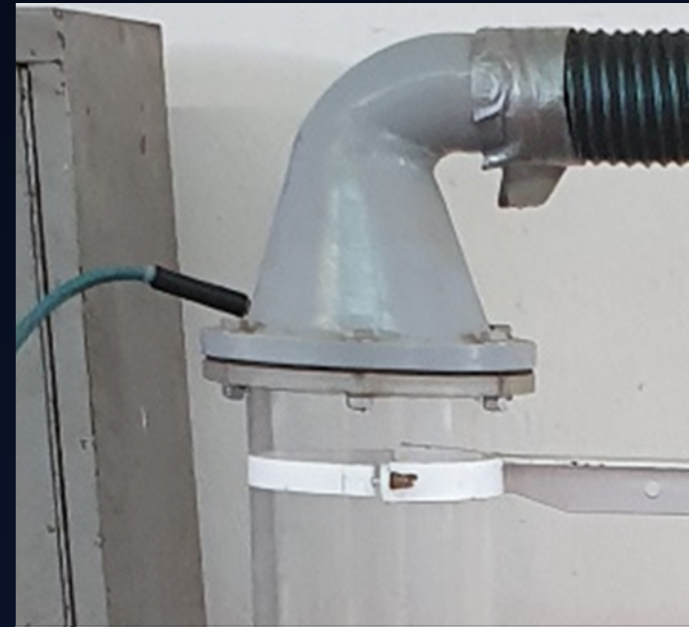
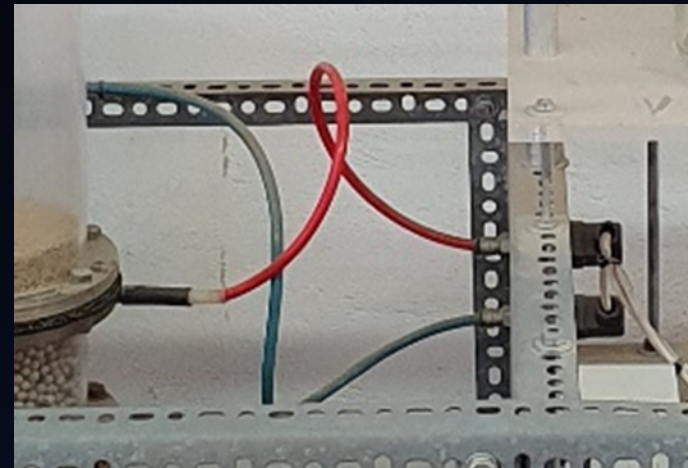
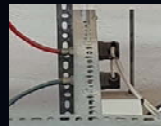
- Αισθητήρια πίεσης 
- Σημεία λήψης σήματος πίεσης (είσοδος και έξοδος στήλης)



Πειραματικό μέρος

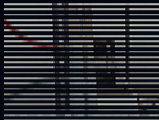



Αισθητήρια καταγραφής/ελέγχου

- Αισθητήρια πίεσης
- Σημεία λήψης σήματος πίεσης (είσοδο και έξοδο στήλης)



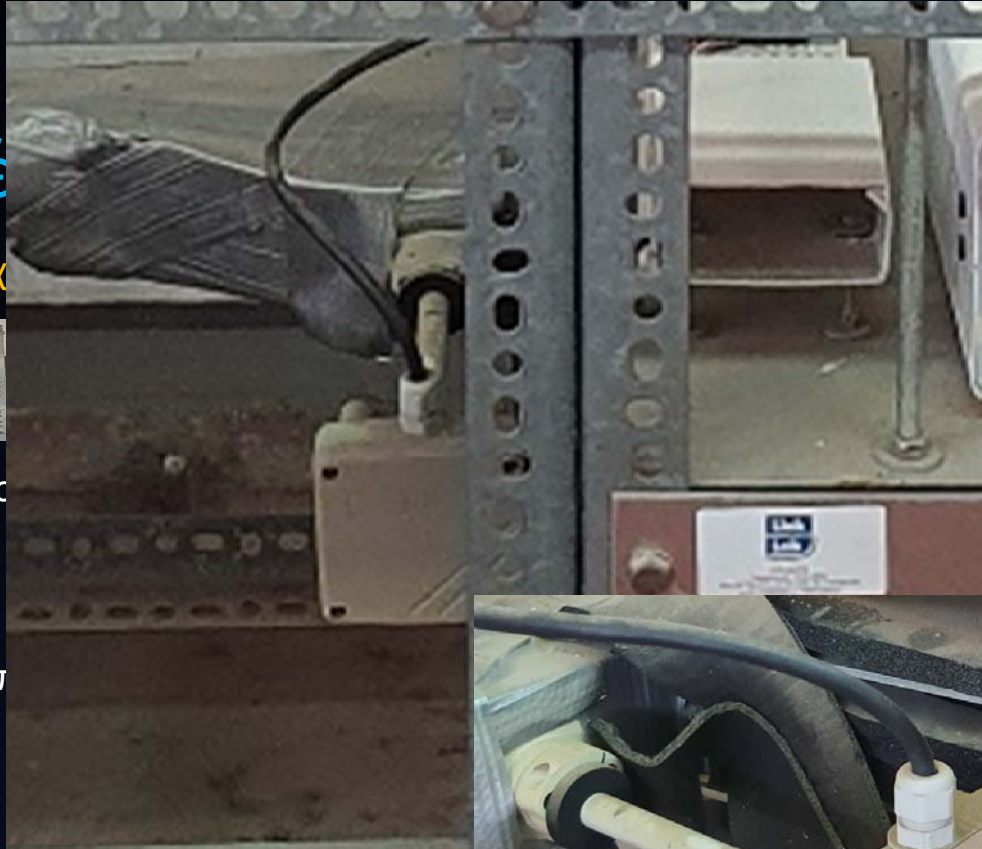
Πειραματικό μέρος

Αισθητήρια καταγραφής/ελέγχου

- Αισθητήρια πίεσης 
- Σημεία λήψης σήματος πίεσης (είσοδος και έξοδος στήλης)  
- Ροόμετρο καταγραφής της παροχής του αέρα 

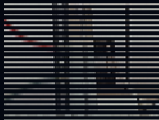





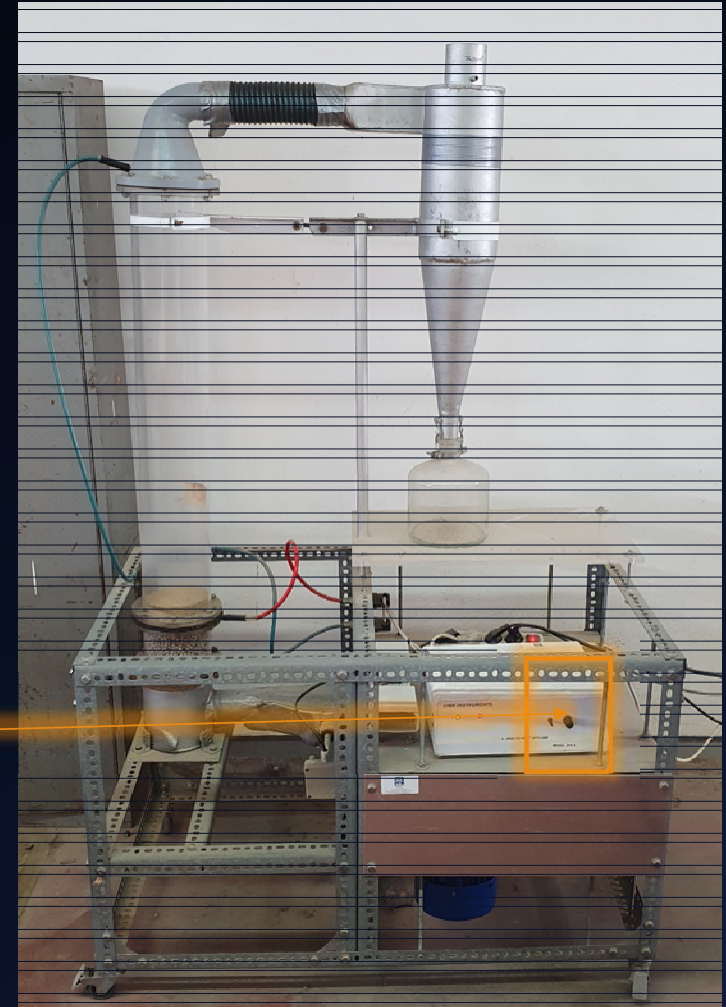
Πειραματικό μέ



Πειραματικό μέρος



Αισθητήρια καταγραφής/ελέγχου

- Αισθητήρια πίεσης 
- Σημεία λήψης σήματος πίεσης (είσοδος και έξοδος στήλης) 
- Ροόμετρο καταγραφής της παροχής του αέρα 
- Ρυθμιστής της παροχής του αέρα 



Πειραματικό μέρος

Αισθητήρια καταγραφής/ελέγχου

- Αισθητήρια πίεσης 
- Σημεία λήψης σήματος πίεσης (είσοδος και έξοδος στήλης) 
- Ροόμετρο καταγραφής αέρα
- Ρυθμιστής της παροχής



Πειραματικό μέρος

Αισθητήρια καταγραφής/ελέγχου

- Αισθητήρια πίεσης



- Σημεία λήψης σήματος πίεσης (είσοδος και έξοδος στήλης)



- Ροόμετρο καταγραφής της παροχής του αέρα



- Ρυθμιστής της παροχής του αέρα



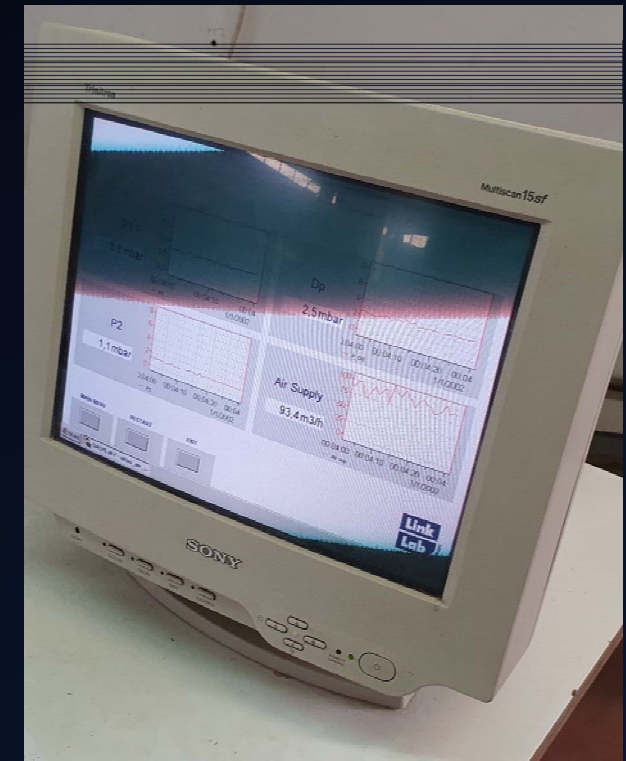
Πειραματικό μέρος

Περιγραφή συσκευής

Η πειραματική διάταξη βρίσκεται στο χώρο του Ημιβιομηχανικού Εργαστηρίου.

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

- Φυσητήρας
- Διαχύτης (κατανομέας)
- Δοχείο ρευστοποίησης και κλίση σωματιδίων
- Κυκλώνας
- Δοχείο συλλογής σωματιδίων
- Αισθητήρια καταγραφής/ελέγχου
- Καταγραφικό (PC)



Ηλεκτρονικό κύκλωμα με Η/Υ για τη καταγραφή και απεικόνιση των μετρήσεων της ροής και της πτώσης πίεσης του αέρα.

Πειραματικό μέρος

Εκτέλεση πειράματος

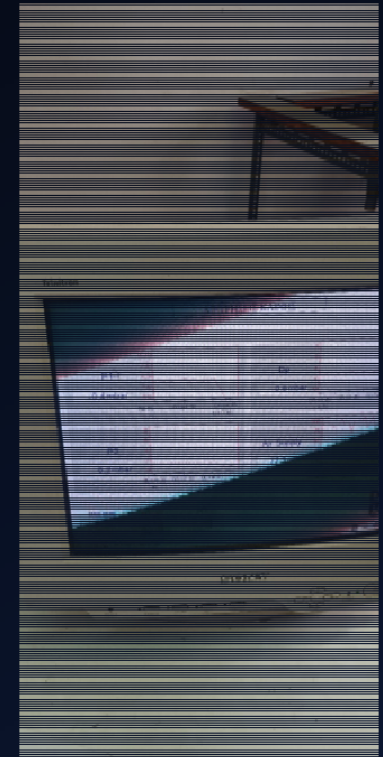
Στόχος είναι η καταγραφή των συνθηκών της ρευστοποίησης σε διάφορες ροές αέρα.

- Αρχικά ρυθμίζουμε την ροή του αέρα σε μηδενική τιμή και καταγράφουμε τις ενδείξεις της πίεσης στην είσοδο και έξοδο της στήλης. Αν δεν δίνουν 0, οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για την διόρθωση των υπόλοιπων μετρήσεων.
- Στη συνέχεια ανεβάζουμε σε βήματα τη ροή του αέρα και αφού περιμένουμε κατάλληλο χρόνο ισορροπίας, καταγράφουμε τις τιμές των πιέσεων (εισόδου, εξόδου) και της ροής του αέρα τρεις φορές (δίνεται καινούργια ένδειξη κάθε 20 δευτερόλεπτα).
- Εντοπίζουμε οπτικά την ταχύτητα στην οποία θεωρούμε ότι έχει επιτευχθεί η έναρξη της ρευστοποίησης
- Στο σημείο έναρξης ρευστοποίησης, στη μέγιστη παροχή αέρα και σε μία ενδιάμεση ροή καταγράφουμε και το ύψος της στήλης (οπτική μέτρηση με μέτρο)

Ακολουθούν εικόνες και βίντεο από την εκτέλεση του πειράματος

Πειραματικό μέρος

Εκτέλεση πειράματος

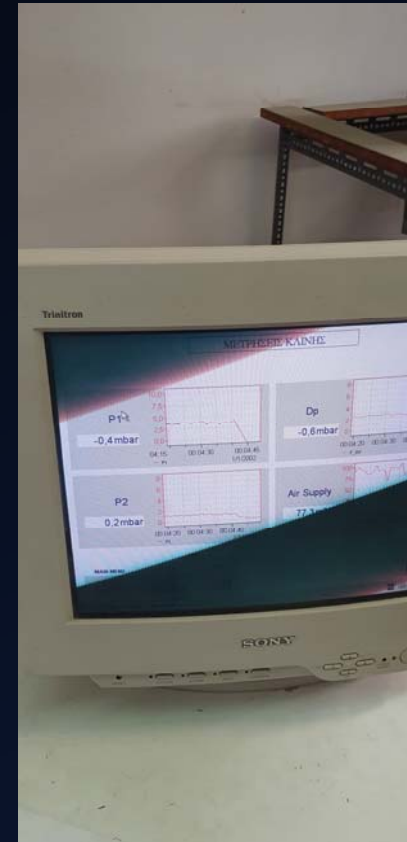


Πειραματικό μέρος

Εκτέλεση πειράματος

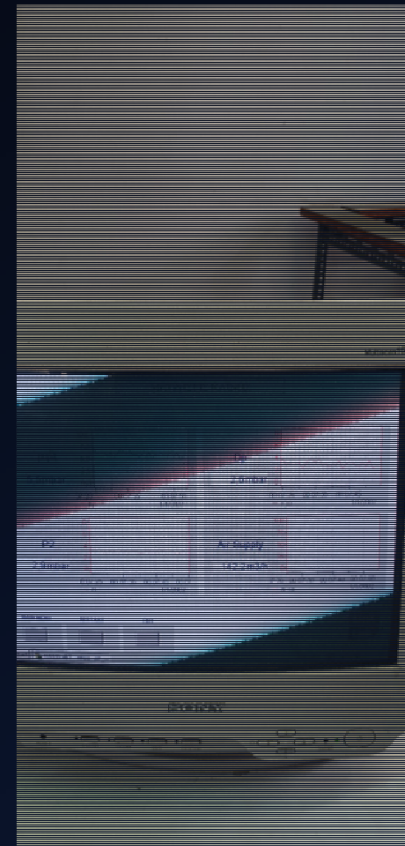


≈ 5 cm



Πειραματικό μέρος

Εκτέλεση πειράματος



Πειραματικό μέρος

Ενδεικτικές μετρήσεις πειράματος

α/α	Πίεση εισόδου (mbar)	Πίεση εξόδου (mbar)	Παροχή αέρα (m ³ /h)			Ύψος (cm)
			A	B	C	
1	-0.3	0.9	0	0	0	2.2
2	0.5	0.9	2.3	2.8	2.5	2.2
3	2.4	1	20.3	21.7	23.6	2.2
4	3.8	1.1	56.0	57.7	58.9	-
5	4.3	1.4	69.7	73.9	71.9	-
6	4.7	1.5	77.5	79.9	75.3	5
7	4.6	1.7	83.3	88.2	83.8	6.5
8	5.3	2.3	99.9	107	102.4	7
9	6.4	3.3	136.7	134	136	8.5
10	7.5	3.8	146.6	145.1	142.1	10

Επεξεργασία αποτελεσμάτων

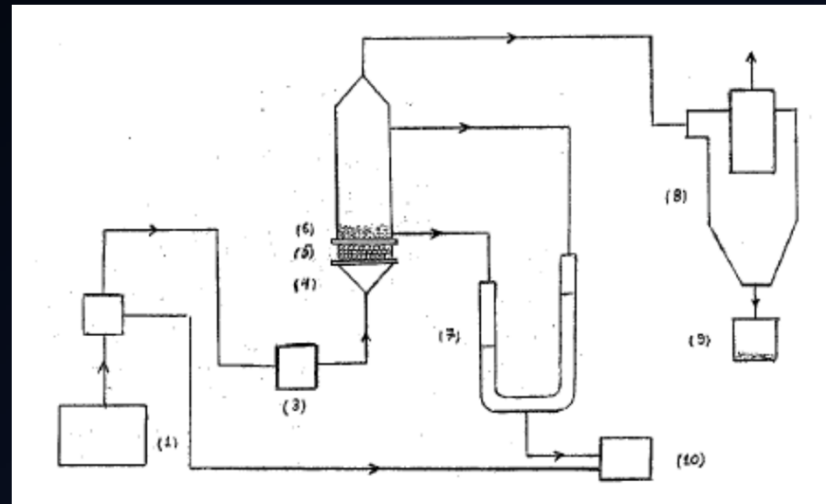
Ζητούμενα

1. Το μεθοδολογικό διάγραμμα ροής και οργάνων.
2. Η πτώση πίεσης συναρτήσει της φαινόμενης ταχύτητας.
3. Η ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης, το ύψος έναρξης ρευστοποίησης και το ελάχιστο πορώδες. Σύγκριση του τελευταίου με τιμές από τη βιβλιογραφία.
4. Το πορώδες και το ύψος της κλίνης συναρτήσει της ταχύτητας. Ελέγξτε πως συμπεριφέρονται οι συναρτήσεις που προβλέπουν την ταχύτητα.
5. Τα πειραματικά σφάλματα.

Επεξεργασία αποτελεσμάτων

1. Το μεθοδολογικό διάγραμμα ροής και οργάνων

Φτιάξτε ένα διάγραμμα ροής και οργάνων όπου φαίνονται τα βασικά στοιχεία της συσκευής.

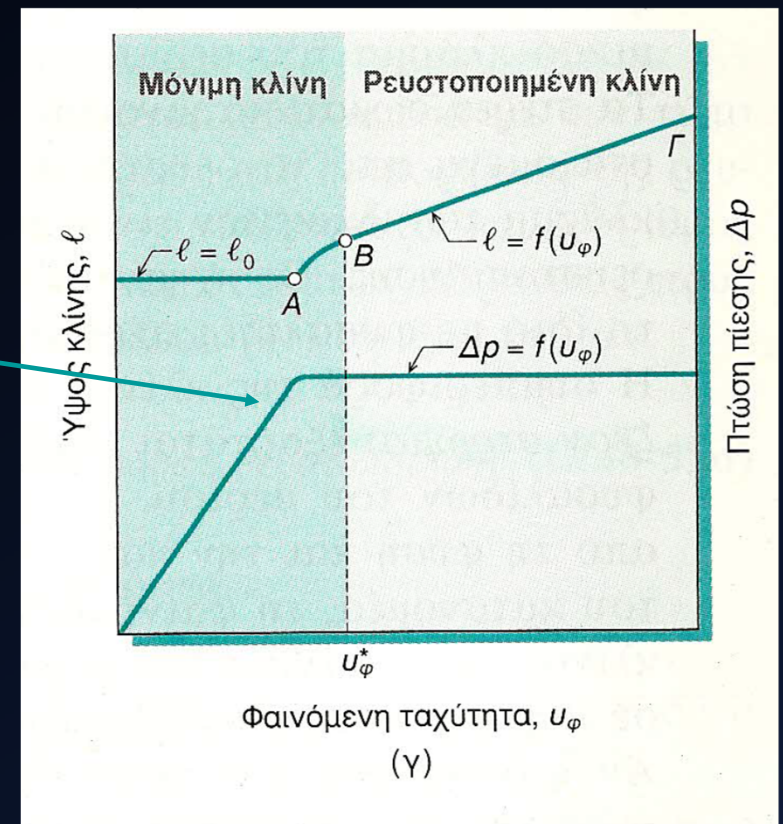


Επεξεργασία αποτελεσμάτων

2. Η πτώση πίεσης συναρτήσει της φαινόμενης ταχύτητας

Φτιάξτε το σχετικό διάγραμμα από τα πειραματικά δεδομένα

Για την ταχύτητα u_φ χρησιμοποιείστε το μ.ο. των τριών μετρήσεων.



Επεξεργασία αποτελεσμάτων

3. Η ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης, το ύψος έναρξης ρευστοποίησης και το ελάχιστο πορώδες. Σύγκριση του τελευταίου με τιμές από τη βιβλιογραφία.

- Εντοπίστε την ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης στο προηγούμενο διάγραμμα με βάση τη συμπεριφορά της κλίνης κατά την εκτέλεση του πειράματος και τη μορφή του διαγράμματος που σχηματίζεται
- Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων, υπολογίστε το ύψος έναρξης ρευστοποίησης και το ελάχιστο πορώδες.
- Συγκρίνετε τις τιμές του ελάχιστου πορώδους με τιμές της βιβλιογραφίας.

$$\Delta p = g(1 - e^*)(\rho_\sigma - \rho)l^*$$

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \left(\frac{l^*}{d_\sigma}\right) \left(\frac{1 - e^*}{\varepsilon^{*3}}\right) \left(\frac{150(1 - e^*)\mu u_\phi^*}{\rho d_\sigma} + 1.75u_\phi^{*2}\right)$$

Επεξεργασία αποτελεσμάτων

4. Το πορώδες και το ύψος της κλίνης συναρτήσει της ταχύτητας. Ελέγξτε πως συμπεριφέρονται οι συναρτήσεις που προβλέπουν την ταχύτητα.

- Φτιάξτε τα δύο διαγράμματα που αναφέρονται.

Τα ζεύγη (ε, u_ϕ) και (l, u_ϕ) θα προκύψουν από τη λύση των

εξισώσεων:
$$l = l^* \frac{1 - \varepsilon^*}{1 - \varepsilon}$$

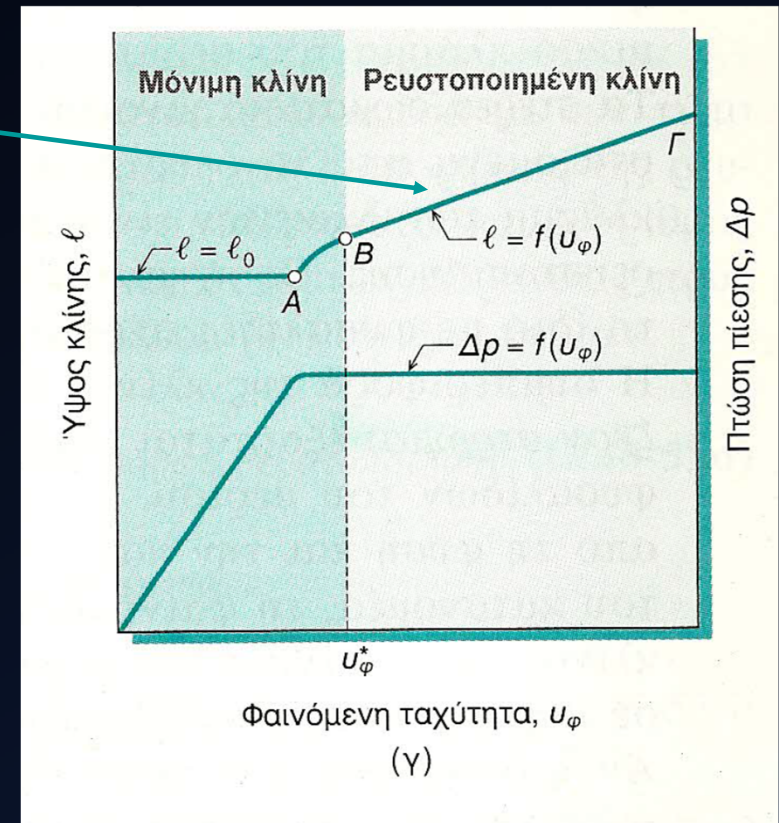
$$\frac{\Delta P}{\rho} = \left(\frac{l}{d_\sigma}\right) \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}\right) \left(\frac{150(1 - \varepsilon)\mu u_\phi}{\rho d_\sigma} + 1.75u_\phi^2\right)$$

σε κάθε πειραματικό σημείο (για $u_\phi > u_\phi^*$).

- Συγκρίνετε τις τιμές του l με τις αντίστοιχες πειραματικές.
- Προσθέστε στα διαγράμματα τις συναρτήσεις:

- *Lewis, Gilliland, Bauer*

- $$\frac{l}{l^*} = \frac{u_b - u_\phi^*}{u_b - u_\phi}, \quad \text{where } u_b = 0.7\sqrt{gd_b}$$



Επεξεργασία αποτελεσμάτων

5. Τα πειραματικά σφάλματα

Για ένα πειραματικό σημείο (για $u_{\phi} > u_{\phi}^*$), υπολογίστε το σφάλμα στη μέτρηση του u_{ϕ} (% τυπικής απόκλισης σ των μετρήσεων επί του μ.ο.).

Με την ίδια διαδικασία που ακολουθήσατε στο προηγούμενο ερώτημα, υπολογίστε το ε (και το I) για :

- $u_{\phi} - \% \sigma * u_{\phi} \rightarrow \varepsilon^-$
- $u_{\phi} + \% \sigma * u_{\phi} \rightarrow \varepsilon^+$

Συγκρίνεται τα ε^- , ε και ε^+ και σχολιάστε τη μετάδοση του αρχικού σφάλματος στο πορώδες της κλίνης.

Βιβλιογραφία

1. Παπαϊωάννου Α., Μηχανική των Ρευστών II, εκδόσεις Δ. Μαυρομάτη, 1996.
2. McCabe W.L., Smith J.C. and Harriott P., Βασικές Φυσικές Διεργασίες Μηχανικής, 6η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, 2003.