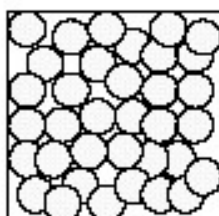
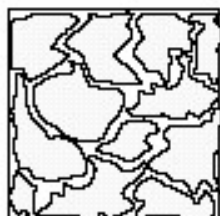


ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ Ι
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Εργαστηριακή Άσκηση

ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΙ ΡΕΥΣΤΟΣΤΕΡΕΑ ΚΛΙΝΗ

ΠΑΤΡΑ 2011

Γενικά

Η ροή ρευστών μέσα από πορώδη κλίνη συναντάται στη φύση αλλά και σε πολλές διατάξεις με τεχνολογικό ενδιαφέρον. Παραδείγματα είναι η διήθηση, η ροή νερού, πετρελαίου ή/και άλλων ρευστών μέσα στη γή, κλπ. Γενικά στις εφαρμογές αυτές πρέπει να σχετίζεται η πτώση πίεσης κατά μήκος της κλίνης με την ογκομετρική παροχή μέσα από αυτή την κλίνη. Σε αρκετά υψηλές παροχές και όταν η ταχύτητα του ρευστού είναι αντίθετη από την επιτάχυνση της βαρύτητας, είναι δυνατόν ελεύθερα σωματίδια (ή πληρωτικά υλικά) να αιωρηθούν στο ρευστό. Στην ορολογία της Χημικής Μηχανικής μία κλίνη στην πρώτη κατάσταση ονομάζεται σταθερή ή μόνιμη (fixed bed) και στη δεύτερη ρευστοποιημένη (fluidized bed).

Οι ρευστοποιημένες κλίνες χρησιμοποιούνται πολύ στις χημικές βιομηχανίες. Ειδικότερα χρησιμοποιούνται στις Φυσικές Διεργασίες (ανάμειξη, θέρμανση ή ξήρανση των σωματιδίων), στις Χημικές Διεργασίες (καταλυτικές, χημικές αντιδράσεις όπως η διάσπαση υψηλών κλασμάτων πετρελαίου για την παρασκευή χαμηλοτέρων) και στην Μεταλλουργία (φρύξη, εναλλαγή θερμότητας). Το βασικό πλεονέκτημα των ρευστοποιημένων έναντι των μόνιμων κλινών είναι η πολύ καλή ανάμειξη των σωματιδίων και του ρευστού. Έτσι επιτυγχάνεται πιο αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας και μάζας και επομένως ταχύτερες χημικές αντιδράσεις και περισσότερο ομοιόμορφες θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις συστατικών. Οι ρευστοποιημένες κλίνες προτιμούνται για διεργασίες με σωματίδια μικρού σχετικά μεγέθους, όπου οι σταθερές κλίνες παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες λόγω αυξημένης πτώσης πίεσης και χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας. Η ρευστοποίηση εφαρμόζεται σε σωματίδια διαφόρων μεγεθών με προτίμηση στην περιοχή μεγέθους 10-200 μm .

Τα πληρωτικά υλικά μπορεί να έχουν σχήμα σφαιρικό, κυλινδρικό, ή διάφορα άλλα σχήματα που έχει βρεθεί ότι επιτυγχάνουν καλύτερη επαφή στερεού και ρευστού (Σαραβάκος, 1979, McCabe et al., 1985). Συνήθως υποτίθεται ότι τα πληρωτικά υλικά είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα και ότι δεν δημιουργούνται “διάυλοι” μέσα από τους οποίους μπορεί να περάσει το ρευστό ευκολότερα (αυτό δεν είναι πάντα αλήθεια). Επίσης η διάμετρος των πληρωτικών είναι πάντα σημαντικά μικρότερη από τη διάμετρο του δοχείου στο οποίο βρίσκονται.

Θεωρία για Σταθερές Κλίνες

Γενικά υπάρχουν δύο “σχολές ή μέθοδοι” για τη μελέτη της πτώσης πίεσης μέσα από σταθερή κλίνη. Στην πρώτη μέθοδο η σταθερή κλίνη θεωρείται σαν ένα σύνολο αγωγών με περίεργη και μεταβλητή διατομή και εφαρμόζονται τύποι από την ροή σε σωλήνες. Στην δεύτερη μέθοδο η κλίνη θεωρείται ότι αποτελείται από αντικείμενα βυθισμένα στο ρευστό και η πτώση πίεσης υπολογίζεται αθροίζοντας τις αντιστάσεις στην ροή γύρω από αυτά τα αντικείμενα. Η πρώτη μέθοδος έχει βρεθεί να είναι πιο επιτυχημένη και αυτή θα αναπτυχθεί εδώ.

Ο συντελεστής τριβής για τις σταθερές κλίνες ορίζεται ανάλογα με αυτόν για ροή σε σωλήνες;

$$\frac{P_0 - P_L}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} = \frac{L}{D_p} 4f \quad (1)$$

Η τιμή που θα πάρει ο συντελεστής τριβής εξαρτάται από το αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης. Στην πρώτη περίπτωση και για κυκλικούς σωλήνες ακτίνας R είναι γνωστό ότι (τύπος Hagen-Poiseuille):

$$\langle v \rangle = \frac{P_0 - P_L}{8\mu L} R^2 \quad (2)$$

Εάν υποθέσουμε ότι η σταθερή κλίνη είναι μόνο ένας σωλήνας με περίπλοκη διατομή με υδραυλική ακτίνα R_h τότε

$$\langle v \rangle = \frac{P_0 - P_L}{2\mu L} R_h^2 \quad (3)$$

Σύμφωνα με τον συνήθη ορισμό της η υδραυλική ακτίνα είναι

$$R_h = \frac{\text{διατομή κάθετη στη ροή}}{\text{περίμετρος διατομής}} \quad (4a)$$

Αν ο παρανομαστής και ο αριθμητής αυτού του κλάσματος πολλαπλασιασθούν επί το μήκος του σωλήνα και διαιρεθούν με τον όγκο της κλίνης βρίσκουμε ότι

$$R_h = \frac{\text{όγκος διαθέσιμος για τη ροή}}{\text{συνολική επιφάνεια επαφής ρευστού-στερεών}}$$

$$= \frac{\frac{\text{όγκος κενός από σωματίδια}}{\text{όγκος κλίνης}}}{\frac{\text{συνολική επιφάνεια επαφής}}{\text{όγκος κλίνης}}} = \frac{\varepsilon}{\alpha} \quad (4\beta)$$

Ο λόγος α μπορεί να σχετισθεί με την ειδική επιφάνεια α_0 των σωματιδίων ως εξής:

$$\alpha = \alpha_0 (1 - \varepsilon) \quad (5)$$

και αυτή με τη σειρά της ορίζει τη μέση διάμετρο των σωματιδίων:

$$D_p = \frac{6}{\psi \alpha_0} \quad (6)$$

όπου ψ η σφαιρικότητα των σωματιδίων.

Ο ορισμός (6) χρησιμοποιείται επειδή στην περίπτωση σφαιρών το D_p ισούται με την διάμετρο των σφαιρών. Επίσης η μέση ταχύτητα μέσα από τα διάκενα της κλίνης $\langle v \rangle$ δεν είναι εύκολο να μετρηθεί σε αντίθεση με τη φαινόμενη ταχύτητα με την οποία όμως συνδέεται:

$$v_0 = \langle v \rangle \varepsilon \quad (7)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3)-(7) βρίσκουμε:

$$v_0 = \frac{P_0 - P_L}{2\mu L} R_H^2 \varepsilon = \frac{P_0 - P_L}{2\mu L} \frac{\varepsilon^3}{\alpha^2} = \frac{P_0 - P_L}{2\mu L} \frac{\varepsilon^3}{\alpha_0^2 (1-\varepsilon)^2} = \frac{P_0 - P_L}{2\mu L} \frac{\varepsilon^3 D_p^2 \psi^2}{36(1-\varepsilon)^2} \quad (8)$$

Οι παραδοχές στρωτής ροής και μέσης υδραυλικής ακτίνας συχνά δίνουν μεγαλύτερες τιμές παροχής για δεδομένη πτώση πίεσης από αυτές που μετρούνται. Επίσης το μήκος της διαδρομής του ρευστού μέσα από την κλίνη δεν μπορεί να είναι ίσο με το μήκος της κλίνης που είναι L αλλά κάπως μεγαλύτερο επειδή η διαδρομή του δεν είναι ευθεία αλλά ελικοειδής. Πειραματικά έχει βρεθεί ότι ο τύπος (8) μπορεί να βελτιωθεί αν το 2 στον παρονομαστή του δεξιού μέλους αντικατασταθεί από τον αριθμό 25/6. Έτσι βρίσκουμε

$$v_0 = \frac{P_0 - P_L}{L} \frac{\psi^2 D_p^2}{150 \mu} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (9)$$

Αυτή είναι η εξίσωση Blake-Kozeny και είναι ακριβής όταν $\varepsilon \leq 0.5$ και όταν η ροή είναι γραμμική, δηλαδή, $\frac{Re_p}{1-\varepsilon} = \frac{D_p G_0}{\mu} \frac{1}{1-\varepsilon} < 10$, περίπου, όπου $G_0 = \rho v_0$.

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (9) και (1) προκύπτει ο συντελεστής τριβής:

$$f = \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{75 \mu}{\psi^2 D_p G_0} \quad (10)$$

Η εξάρτηση του f από τον Re φαίνεται στο σχήμα 1.

Παρόμοιοι είναι οι συλλογισμοί για την περίπτωση που η ροή είναι καθαρά τυρβώδης. Η εξίσωση (1) θα χρησιμοποιηθεί και πάλι όμως τώρα ο συντελεστής τριβής, f , είναι συνάρτηση κυρίως των ανωμαλιών των τοιχωμάτων του σωλήνα και όχι τόσο του αριθμού Re . Υποθέτοντας ότι όλες οι σταθερές κλίνες έχουν παρόμοιες ανωμαλίες, επιτρέπει την χρήση ενός και μόνο συντελεστή f_0 . Χρησιμοποιώντας και πάλι τις εξισώσεις (4)-(7) βρίσκουμε

$$\frac{P_0 - P_L}{L} = \frac{1}{D} \frac{1}{2} \rho \langle v \rangle^2 4f_0 = f_0 \frac{6}{\psi D_p} \frac{1}{2} \rho v_0^2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (11)$$

και από πειραματικά δεδομένα έχει βρεθεί ότι $6f_0=3.5$, έτσι:

$$\frac{P_0 - P_L}{L} = \frac{1.75}{\psi D_p} \rho v_0^2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (12)$$

Αυτή είναι η σχέση Burke-Plummer και ισχύει για $\frac{Re_p}{1-\varepsilon} = \frac{D_p G_0}{\mu} \frac{1}{1-\varepsilon} > 1000$ (σχήμα 1). Από αυτή μπορεί να υπολογισθεί και ο αντίστοιχος συντελεστής τριβής της κλίνης

$$f = 0.875 \frac{1-\varepsilon}{\psi \varepsilon^3} \quad (13)$$

θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εξάρτηση του f από τον ε είναι διαφορετική για στρωτή και τυρβώδη ροή (συγκρίνετε σχέσεις (10) και (13)). Οι εξισώσεις (9) και (12) μπορούν να προστεθούν (γιατί;) οπότε:

$$\frac{P_0 - P_L}{L} = \frac{150 \mu v_0}{\psi^2 D_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1.75 \rho v_0^2}{\psi D_p} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (14)$$

ή σε αδιάστατη μορφή:

$$\frac{(P_0 - P_L) \rho}{G_0^2} \left(\frac{\psi D_p}{L} \right) \left(\frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \right) = 150 \frac{1-\varepsilon}{\psi D_p G_0 / \mu} + 1.75 \quad (15)$$

Αυτή είναι η εξίσωση Ergun (1952). Σημειώστε ότι αυτή η εξίσωση είναι απλώς μια από τις πολλές που έχουν προταθεί για την περιγραφή της πτώσης πίεσης σε σταθερές κλίνες. Μια άλλη είναι η φαινομενολογική εξίσωση Darcy:

$$v_0 = k \left(\frac{P_0 - P_L}{\mu L} \right) \quad (16)$$

όπου k η διαπερατότητα της κλίνης. Η διαπερατότητα είναι μια ιδιότητα της κλίνης και εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά και τοπολογικά χαρακτηριστικά του πληρωτικού υλικού (κατανομή μεγέθους κόκκων, πορώδες, κλπ).

Η εξίσωση (15) έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ακόμα και για αέρια υπολογίζοντας την πυκνότητα του αερίου στον αριθμητικό μέσο όρο των πιέσεων στις άκρες της κλίνης. Για ένα συμπιεστό ρευστό (αέριο) η μαζική παροχή, G_0 , είναι σταθερή κατά μήκος της κλίνης σε αντίθεση με την ταχύτητα v_0 .

Η ειδική επιφάνεια σωματιδίων μεγέθους μεγαλύτερου του $1\mu\text{m}$ μπορεί να προσδιορισθεί επίσης χρησιμοποιώντας στρωτή ροή ρευστού μέσα από μια σταθερή κλίση και εφαρμόζοντας τον τύπο (9). Έτσι μετρώντας την παροχή Q , ή την ταχύτητα v_0 για δεδομένη πτώση πίεσης, ΔP , μέσα από κλίση γνωστού μήκους L , και πορώδους ε , μπορεί να προσδιορισθεί η ειδική επιφάνεια, S , των σωματιδίων (επιφάνεια/ μονάδα μάζας πληρωτικού υλικού). Με δεδομένο ότι η ειδική επιφάνεια των σωματιδίων (συνολική επιφάνεια επαφής/ όγκος κλίνης) δίνεται από τον τύπο:

$$\alpha_v = \frac{\phi}{\psi D_p} = \rho_p S \quad (17)$$

η εξίσωση (9) μπορεί να ξαναγραφεί ως

$$v_0 = \frac{P_0 - P_L}{25 L} \frac{\phi}{\mu \rho_p^2 S^2} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (18)$$

Από την σχέση (18) μπορούμε να υπολογίσουμε την ειδική επιφάνεια, S (m^2/kg) και ακολούθως από την σχέση (17) υπολογίζουμε την μέση διάμετρο των κόκκων του πληρωτικού υλικού.

Θεωρία για ρευστοποιημένες κλίνες

Ρευστοποίηση (fluidization) στερεών σωματιδίων είναι η μετατροπή μια σταθερής κλίνης σωματιδίων σε κατάσταση που μοιάζει με ρευστή. Αυτό γίνεται με ροή αερίου ή υγρού. Τότε οι δυνάμεις τριβής μεταξύ σωματιδίων-ρευστού ισούνται με τη δύναμη βαρύτητας και τα σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα. Η ρευστοποιημένη κλίση συμπεριφέρεται συνήθως σαν ένα ψευδοπλαστικό ρευστό (μη Νευτωνικό). Τα υγρά σχετικά εύκολα προκαλούν ρευστοποίηση και δημιουργούν ομοιογενή συστήματα, όπου ο όγκος της κλίνης μεταβάλλεται συνεχώς με τη ταχύτητα του υγρού. Οι

περισσότερες όμως βιομηχανικές εφαρμογές βασίζονται στην ρευστοποίηση με αέρια οπότε δημιουργούνται ετερογενείς και ασταθείς κλίνες σωματιδίων.

Η ταχύτητα λειτουργίας του ρευστού (v) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα έναρξης της ρευστοποίησης (v_M) και μικρότερη από τη ταχύτητα παρασύρσεως ή οριακή ταχύτητα (v_t) των σωματιδίων. Συνήθως χρησιμοποιείται η φαινομενική ταχύτητα του ρευστού στην κλίση που βασίζεται στην επιφάνεια (A) του δοχείου που είναι κάθετη στη ροή, δηλαδή, $A = \pi d_T^2/4$ όπου d_T η διάμετρος του δοχείου.

Η ρευστοποίηση ορισμένης μάζας στερεών σωματιδίων που συνήθως βρίσκονται σε κυλινδρικό δοχείο χαρακτηρίζεται από την πτώση πίεσης (ΔP) σαν συνάρτηση της ταχύτητας του ρευστού (v). Το ρευστό εισέρχεται από τον πυθμένα της κλίνης των σωματιδίων χρησιμοποιώντας ένα κατανομέα (π.χ. διάτρητο δίσκο). Τυπική καμπύλη ($\Delta P, v$) φαίνεται στο σχήμα 2.

Η περιοχή (OA) αντιστοιχεί στην ροή σε σταθερή κλίση και η πτώση πίεσης (ΔP) αυξάνει με τη ταχύτητα του ρευστού (v), σύμφωνα με την εξίσωση Carman-Kozeny ή Blake-Kozeny (9), δηλαδή γραμμικά. Αυτό συμβαίνει διότι συνήθως οι συνθήκες είναι τέτοιες (μέγεθος σωματιδίων, πορώδες κλίνης, ιξώδες ρευστού) που $Re < 10$. Μεταξύ των σημείων A και B η στήλη διαστέλλεται και στο σημείο B αρχίζει η ρευστοποίηση, δηλαδή τα σωματίδια αρχίζουν να κινούνται και η κλίση συμπεριφέρεται σαν ρευστό υψηλού ιξώδους. Η ταχύτητα στο σημείο B ονομάζεται ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης (v_M). Αν η ταχύτητα του ρευστού αυξηθεί και άλλο, η (ΔP) αυξάνει πολύ λιγότερο και η κλίση «αραιώνει». Στο σημείο C περίπου παρατηρείται παράσυρση των σωματιδίων από το ρευστό.

Η δύναμη τριβής (οπισθέλκουσα) που ασκείται σ' ένα σωματίδιο που βρίσκεται μέσα στην κλίση, είναι περίπου 30-70 φορές μεγαλύτερη από την οπισθέλκουσα δύναμη που θα ασκείτο στο ίδιο σωματίδιο αν κινείτο ελεύθερα κάτω από την επίδραση της ίδιας φαινομενικής ταχύτητας του ρευστού. Στο σημείο έναρξης της ρευστοποίησης οι δυνάμεις βαρύτητας και πτώσης πίεσης του ρευστού μέσα από την κλίση ισορροπούν, δηλαδή

$$\frac{\Delta P}{L_M} = (1 - \varepsilon_M)(\rho_p - \rho)g \quad (19)$$

όπου L_M το μήκος της κλίνης κατά την έναρξη της ρευστοποίησης.

Το πορώδες της κλίνης (ϵ_M) κατά την έναρξη της ρευστοποίησης εξαρτάται από το είδος του υλικού και γενικώς αυξάνει όταν το μέγεθος των σωματιδίων ελαττώνεται όπως φαίνεται στα παραδείγματα του πίνακα 1.

Πίνακας 1 Πορώδες έναρξης ρευστοποίησης

Είδος Σωματιδίων	Μέγεθος Σωματιδίων (μm)			
	20	50	100	200
Στρογγυλή άμμος	-	0.56	0.48	0.44
Γωνιώδης άμμος	-	0.60	0.58	0.54
Ανθρακίτης	-	0.62	0.60	0.56
Ενεργός άνθρακας	0.74	0.72	0.64	-
Carborundum	-	0.61	0.56	0.48

Η πτώση πίεσης του ρευστού στην μόνιμη κλίση μέχρι το σημείο έναρξης της ρευστοποίησης δίνεται από την γενική εξίσωση Ergun (15). Στο σημείο ρευστοποίησης, ισχύει συγχρόνως και η εξίσωση (19). Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (15) και (19) μπορεί να απαλειφθεί η πτώση πίεσης και να προκύψει μια εξίσωση για τον υπολογισμό της ταχύτητας (u_M). Η εξίσωση αυτή απλοποιείται στις ακόλουθες δύο μορφές:

$$u_M = \frac{\psi^2 D_p^3 (\rho_p - \rho) g}{150 \mu} \frac{\epsilon_M^3}{1 - \epsilon_M} \text{ για } \text{Re} < 10 \quad (20)$$

$$u_M = \left(\frac{\epsilon_M^3 \psi D_p (\rho_p - \rho) g}{1.75 \rho} \right)^{1/2} \text{ για } \text{Re} > 1000 \quad (21)$$

Η φαινομενική ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης (u_M) είναι πολύ μικρότερη από την οριακή ταχύτητα παράσυρσης (u_t), η οποία στη περιοχή της στρωτής ροής δίνεται από την εξίσωση Stokes:

$$u_t = \frac{d^2 (\rho_p - \rho) g}{18 \eta} \quad (22)$$

Για χαμηλούς αριθμούς Re και οι δύο ταχύτητες, v_t και v_M εξαρτώνται από D_p^2 , ($\rho_p - \rho$) και $1/\mu$. Έτσι ο λόγος τους θα εξαρτάται μόνο από το πορώδες στην κατάσταση έναρξης ρευστοαίωρησης:

$$\frac{v_t}{v_M} = \frac{8.33 (1-\epsilon_M)}{\psi^2 \epsilon_M^3} \quad \text{Re} < 10 \quad (23)$$

Για σφαιρικά σωματίδια (όπου $\psi=1$) με $\epsilon_M=0.45$, $v_t/v_M=50$, με αποτέλεσμα μια κλίση που αρχίζει να ρευστοποιείται σε $v_M=10$ mm/s να λειτουργεί συνήθως σε ταχύτητες μέχρι $v=400$ mm/s ($<v_t$). Όταν όμως υπάρχει ευρεία κατανομή μεγέθους σωματιδίων θα υπάρχει σημαντική παράσυρση των μικρότερων που θα πρέπει να συλλέγονται σε φίλτρα. Για μη σφαιρικά σωματίδια με $\psi < 1$, η εξίσωση (23) θα μπορούσε να σημαίνει ότι η κλίση μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες ταχύτητες. Όμως η τιμή ϵ_M σ' αυτή την περίπτωση είναι κάπως μεγαλύτερη (π.χ. για $\psi=0.8$, $\epsilon_M=0.5$ και $v_t/v_M=52$) και ο λόγος v_t/v_M είναι περίπου ο ίδιος.

Σε μεγαλύτερα σωματίδια (επομένως μεγαλύτερους αριθμούς Re) η οριακή ταχύτητα δίνεται από το νόμο Newton:

$$v_t = 1.75 \sqrt{\frac{g D_p (\rho_p - \rho)}{\rho}} \quad (24)$$

οπότε

$$\frac{v_t}{v_M} = \frac{2.32}{(\psi \epsilon_M^3)^{1/2}} \quad \text{Re} > 1000 \quad (25)$$

Για σφαιρικά σωματίδια με $\epsilon_M=0.45$, $v_t/v_M=7.7$, δηλαδή ο λόγος ταχυτήτων είναι πολύ μικρότερος από πριν. Επομένως η λειτουργία της κλίνης είναι δυσκολότερη απ' ότι προηγουμένως. Σε ενδιάμεσες τιμές του Re χρησιμοποιούνται ενδιάμεσες τιμές του v_t/v_M .

Σε κλίνες σωματιδίων με ευρεία κατανομή μεγέθους αντιστοιχούν διαφορετικές ταχύτητες έναρξης ρευστοποίησης και παράσυρσης. Τότε η ταχύτητα λειτουργίας εκλέγεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ρευστοποίηση των μεγαλύτερων σωματιδίων χωρίς όμως να παρασύρονται τα μικρότερα σωματίδια. Για παράδειγμα, στην ξήρανση με ρευστοποιημένη κλίση, η ταχύτητα λειτουργίας του αέρα μπορεί να είναι $2.5 v_M$, όπου v_M η ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης των μεγαλύτερων σωματιδίων.

Το πορώδες (ε) της ρευστοποιημένης κλίνης εξαρτάται από την φαινομενική ταχύτητα του ρευστού (v) και την οριακή ταχύτητα (v_t) των σωματιδίων, σύμφωνα με την εξίσωση Richardson και Zaki (1954):

$$\frac{v}{v_t} = \varepsilon^n \quad (26)$$

όπου:

$$n=4.65 \text{ για } Re < 0.2$$

$$n=4.35 Re^{-0.03} \text{ για } 0.2 < Re < 1.0$$

$$n = 4.45 Re^{-0.1} \text{ για } 1 < Re < 500$$

$$n = 2.39 \text{ για } Re > 500$$

Οι σχέσεις αυτές είναι προσεγγιστικές και στην ενδιάμεση περιοχή, ο εκθέτης (n) είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds.

Το μήκος (L_e) της ρευστοποιημένης κλίνης (για ταχύτητες μεγαλύτερες από την v_M), μπορεί να εκφρασθεί σαν συνάρτηση του πορώδους (ε) και βάθους (L) της σταθερής κλίνης και του πορώδους (ε_e) της ρευστοποιημένης κλίνης βάσει της σχέσεως:

$$L_e = L \frac{(1-\varepsilon)}{(1-\varepsilon_e)} \quad (27)$$

Η σχέση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι σε μία κλίνη με σταθερή διατομή σ' όλο το μήκος της, ο όγκος των σωματιδίων της κλίνης δεν μεταβάλλεται πριν και μετά την ρευστοποίηση.

Κλίνες ρευστοποιημένες με αέρια είναι ασταθείς και πολύ ευαίσθητες σε μεταβολές της ταχύτητας άνω της (v_M). Είναι πολύ συνηθισμένο φαινόμενο ο σχηματισμός μεγάλων φυσαλίδων (bubbles) μέσα στην κλίνη. Σε κλίνες μικρότερης σχετικά διαμέτρου μπορεί να παρατηρηθεί ροή τύπου βλήματος (slugging), δηλαδή διακοπτόμενη από μάζες αέρα κίνηση των σωματιδίων. Αυτά τα φαινόμενα οφείλονται στην μεγάλη διαφορά πυκνότητας μεταξύ των στερεών σωματιδίων και του αερίου.

Σαν κριτήρια του τύπου ροής στην ρευστοποιημένη κλίνη, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

Ομαλή ροή

$$Fr Re \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L}{d_T} \right) < 100 \quad (28)$$

Σχηματισμός φυσαλίδων

$$Fr Re \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L}{d_T} \right) > 500 \quad (29)$$

Περιγραφή της Συσκευής

Η συσκευή αποτελείται από μια στήλη διαμέτρου $d_T=38$ mm και ύψους $L_T=500$ mm με κατάλληλες συνδέσεις στη βάση και την κορυφή για την παροχή νερού. Στη βάση υπάρχει πλέγμα που συγκρατεί το υλικό της κλίνης και έχει οπές διαμέτρου 0.5 mm (30 mesh). Υπάρχουν δύο μανόμετρα (υδραργύρου και νερού) για τη μέτρηση της πτώσης πίεσης κατά μήκος της στήλης.

Στη στήλη παρέχεται νερό μέσω ενός δοχείου χωρητικότητας 8.3 lt που είναι στηριγμένο 2.5 m περίπου πάνω από τη συσκευή. Το δοχείο τροφοδοτείται από τη βρύση και διαθέτει σύστημα υπερχειλίσσης ώστε να διατηρείται σταθερή η στάθμη του νερού και επομένως σταθερή η υδροστατική πίεση στη στήλη.

Το νερό από το δοχείο εισέρχεται στη βάση ενός ροόμετρου περιοχής μετρήσεων $50=800$ cm³/min. Η ένδειξη του ροόμετρου είναι αυτή που δείχνει το πάνω μέρος του πλωτήρα. Το νερό από την έξοδο του ροόμετρου μπορεί να οδηγηθεί στην κορυφή (βαλβίδα 1) ή στην βάση (βαλβίδα 2) της στήλης. Η κορυφή και η βάση της στήλης συνδέονται επίσης με το πάνω και το κάτω τμήμα ενός πολλαπλού συνδυασμού βαλβίδων (C). Τα δύο τμήματα είναι χωρισμένα μεταξύ τους. Το πάνω τμήμα συνδέει τις βαλβίδες (3), (5) και (7). Η (3) οδηγεί στην αποχέτευση, οι (5) και (7) στα αριστερά σκέλη των μανομέτρων. Το κάτω τμήμα συνδέει τις βαλβίδες (4), (6) και (8). Η (4) οδηγεί στην αποχέτευση, ενώ οι (6) και (8) στα δεξιά σκέλη των μανομέτρων.

Χρησιμοποιούμε επίσης ένα θερμόμετρο, ένα ποτήρι ζέσεως και μια ζυγαριά.

Λειτουργία της Συσκευής

Ανοίγουμε τη βρύση και γεμίζουμε το δοχείο υπερχειλίσης που βρίσκεται 2.5 m πάνω από τη συσκευή. Ανοίγουμε τη βαλβίδα (2) για να γεμίσει η στήλη με νερό (από κάτω προς τα πάνω) και την (3) για να οδηγηθεί το νερό στην αποχέτευση αφού περάσει από τη στήλη. Ο αέρας πάνω από το νερό ελευθερώνεται ανοίγοντας τη βίδα στην κορυφή της στήλης. Ελέγχουμε τις σωληνώσεις για ύπαρξη φυσαλίδων αέρα μέσα σ' αυτές. Απομακρύνουμε τις φυσαλίδες ρυθμίζοντας το ροόμετρο στη μέγιστη παροχή και κτυπώντας ελαφρά τους σωλήνες.

Αντιστροφή της ροής γίνεται κλείνοντας τις βαλβίδες (2) και (3) και ανοίγοντας τις (1) και (4). Ανοίγουμε τις βαλβίδες (5), (6), (7) και (8) και ελέγχουμε τις σωληνώσεις των μανομέτρων για φυσαλίδες αέρα.

Ο αέρας από τις σωληνώσεις του μανομέτρου υδραργύρου απομακρύνεται ανοίγοντας τις βαλβίδες (1) και (2) και ξεβιδώνοντας τις βίδες στην κορυφή του μανομέτρου. Ο αέρας από τις σωληνώσεις του μανομέτρου νερού απομακρύνεται με τον ίδιο τρόπο. Για να απομακρύνουμε μέρος του νερού που έχει γεμίσει τα σκέλη του μανομέτρου κλείνουμε τις βαλβίδες (1) και (2) και ανοίγουμε την (3). Κατόπιν ανοίγουμε προσεκτικά την βίδα στην κορυφή του μανομέτρου αφήνοντας τον αέρα να μπει στο μανόμετρο και να εκτοπίσει το νερό μέχρι τη μέση της κλίμακας περίπου. Ελέγχουμε τη μηδενική ένδειξη των μανομέτρων ανοίγοντας τις (1) και (2) και έχοντας κλειστές τις (3) και (4).

Για να γεμίσουμε τη στήλη με το κοκκώδες υλικό, κλείνουμε όλες τις βαλβίδες εκτός από την (4). Ξεβιδώνουμε τη βίδα στην κορυφή της στήλης για να μπει αέρας και να διώξει το νερό. Απομακρύνουμε τη στήλη από τη συσκευή ξεβιδώνοντας τη βίδα (H). Την τοποθετούμε όρθια σε δοχείο γεμάτο με νερό. Ρίχνουμε το κοκκώδες υλικό (προζυγισμένο) σιγά-σιγά. Απομακρύνουμε τη στήλη από το δοχείο και περιμένουμε να αδειάσει όλο το νερό. Επανατοποθετούμε τη στήλη στη συσκευή. Ανοίγουμε την βαλβίδα (2) ώστε το νερό να μπαίνει από την βάση και να διώξει τον αέρα από την ανοιχτή βίδα της κορυφής της στήλης η οποία ξαναβιδώνεται μόλις επιτευχθεί εξαέρωση.

Προετοιμασία για την Προφορική Παρουσίαση – Μετρήσεις – Υπολογισμοί

A) Με κενή στήλη

Μετράμε την πτώση πίεσης κατά μήκος της στήλης για ροή 1) από πάνω προς τα κάτω και 2) από κάτω προς τα πάνω. Τις μετρήσεις αυτές θα χρησιμοποιήσουμε για διόρθωση των μετρημένων ΔP .

B) Πείραμα διαπερατότητας

Ζυγίζουμε κατάλληλη ποσότητα κοκκώδους υλικού και γεμίζουμε τη στήλη ώστε να σχηματιστεί στρώμα ύψους 10 cm. Στην αρχή όλες οι βαλβίδες είναι κλειστές.

Ανοίγουμε τις βαλβίδες (5), (6), (7) και (8) των μανομέτρων και ελέγχουμε την μηδενική τους ένδειξη. Σημειώνουμε το μήκος της κλίνης.

Ανοίγουμε τις βαλβίδες (1) και (4) (ροή από πάνω προς τα κάτω). Ο σωλήνας από την στήλη πρέπει να καταλήγει σ' ένα ποτήρι που να μπορεί να υπερχειλίζει στο νεροχύτη. Στο ποτήρι τοποθετούμε θερμομότρο για να μετράμε τη θερμοκρασία του νερού που περνάει μέσα από τη συσκευή.

Μεταβάλλουμε την παροχή από 100 μέχρι 750 cm^3/min ανά 50 cm^3/min και σημειώνουμε τις ΔP . Συγχρόνως παίρνουμε μερικές μετρήσεις από το θερμομότρο (μέση θερμοκρασία του νερού). Όταν η ΔP γίνει αρκετά μεγάλη (το μανόμετρο νερού φτάνει στα όρια λειτουργίας του) κλείνουμε τις βαλβίδες (5) και (6) και παίρνουμε μετρήσεις μόνο από το μανόμετρο υδραργύρου.

- Γραφική παράσταση του $(-\Delta P / \text{mm H}_2)$ έναντι της v
- Υπολογισμός του συντελεστή τριβής, f και της διαπερατότητας, k
- Υπολογισμός της διαμέτρου κόκκων, D_p
- Υπολογισμός της ειδικής επιφάνειας, S

Πείραμα Ρευστοποίησης

Ο σωλήνας της βαλβίδας (3) πρέπει να καταλήγει σε γυάλινο δοχείο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού. Σημειώνουμε το μήκος της κλίνης και ελέγχουμε τη

μηδενική ένδειξη των μανομέτρων. Ανοίγουμε τις βαλβίδες (2) και (3) (ροή από κάτω προς τα πάνω).

Μεταβάλλουμε την παροχή όπως προηγουμένως και μετράμε κάθε φορά την πτώση πίεσης κατά μήκος της στήλης και το μήκος L της κλίνης.

- Γραφική παράσταση της πτώσης πίεσης ($-\Delta P$) έναντι της ταχύτητας ροής u . Επαναλάβετε το πείραμα με αυξανόμενες και ελαττούμενες τιμές ταχύτητας. Παρατηρείτε καμμία διαφορά;
- Εύρεση της ταχύτητας και της πίεσης ελάχιστης ρευστοποίησης (Από την καμπύλη ΔP έναντι u και υπολογιστικά, από τις εξισώσεις (5), (7)).
- Υπολογισμός του εκθέτη n και της οριακής ταχύτητας u_i από το διάγραμμα $\ln u$ με $\ln e$ (εξίσωση 26).
- Από που προκύπτει η εξίσωση (19);
- Συγκρίνετε το πορώδες και το ύψος της ρευστοποιημένης κλίνης σε διάφορες ταχύτητες λειτουργίας με το πορώδες και το ύψος της μόνιμης κλίνης. Πως συγκρίνονται οι μετρήσεις σας με τις θεωρητικές προβλέψεις από τις εξισώσεις (26) και (27);
- Ποιά σφάλματα (σε μετρήσεις και εκτέλεση) είναι πιθανά σ' αυτό το πείραμα;

Δεδομένα

Πορώδες στην έναρξη ρευστοποίησης: $\epsilon_M=0.54$

Πυκνότητα σωματιδίων άμμου: $\rho_p=2.6$

Σφαιρικότητα: $\psi=0.8$

Σύμβολα

D_p διάμετρος σωματιδίων (particles)

u_0 φαινομενική ταχύτητα δηλαδή μέση γραμμική ταχύτητα που το υγρό θα είχε στη στήλη αν δεν υπήρχαν πληρωτικά υλικά

$\langle u \rangle$	μέση ταχύτητα σε σωλήνα
u_M	φαινομενική ταχύτητα ρευστού για την έναρξη ρευστοποίησης
u_t	φαινομενική ταχύτητα ρευστού που προκαλεί παράσυρση των σωματιδίων (ανώτατη οριακή ταχύτητα που μπορεί να λειτουργήσει η ρευστοποιημένη κλίνη)
L	μήκος στερεάς κλίνης
L_M	μήκος κλίνης κατά την έναρξη ρευστοποίησης
L_e	μήκος ρευστοποιημένης κλίνης
L_T	μήκος δοχείου κλίνης
P	πίεση (pressure)
f	συντελεστής τριβής (friction)
μ, η	ιξώδες ρευστού (viscosity)
R_h	υδραυλική ακτίνα
ε	πορώδες της κλίνης (packed bed)
ε_M	πορώδες κατά την έναρξη ρευστοποίησης της κλίνης
ε_e	πορώδες ρευστοποιημένης κλίνης μήκους L_e
α_v	ειδική επιφάνεια σωματιδίων βάσει όγκου (συνολική επιφάνεια/συνολικός όγκος σωματιδίων)
S	ειδική επιφάνεια σωματιδίων βάσει μάζας (συνολική επιφάνεια/συνολική μάζα σωματιδίων)
ρ	πυκνότητα ρευστού
ρ_p ή ρ_s	πυκνότητα σωματιδίων (particles ή solids)
Re	αριθμός Reynolds, $Re=(\rho_p u D_p)/\mu$
Fr	αριθμός Froude, $Fr=u_M^2/(D_p g)$
G_0	μαζική παροχή ($G_0=\rho u_0$)
k	φαινομενολογικός συντελεστής διαπερατότητας κλίνης

ψ σφαιρικότητα σωματιδίων
 d_T εσωτερική διάμετρος δοχείου κλίνης (tank)

Βιβλιογραφία

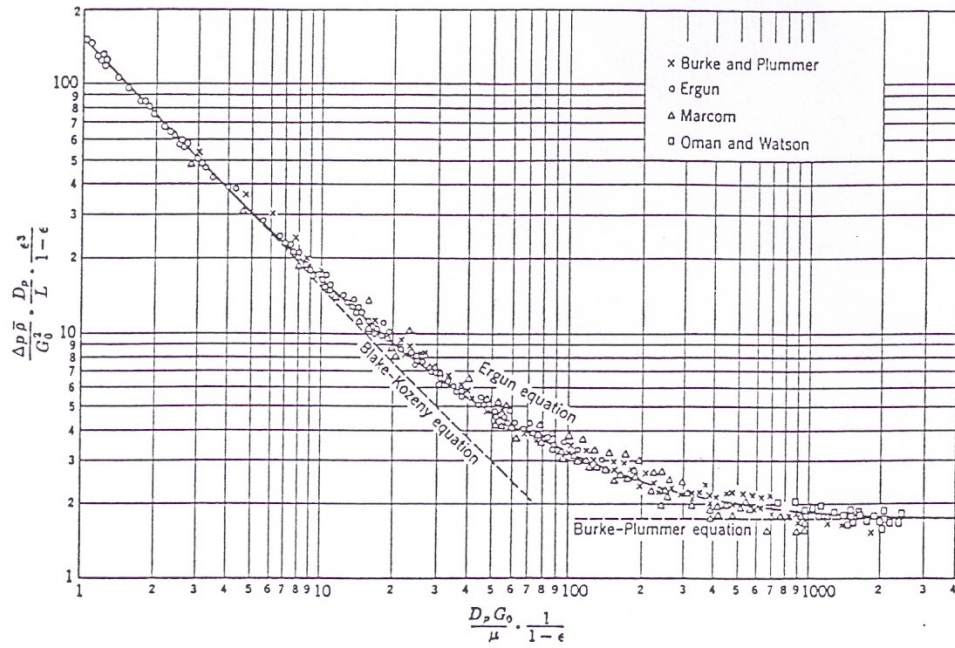
Ergun, S. Chem. Eng. Prog. **48**, 89-94 (1952).

Σαραβάκος, Τεχνική Φυσικών Διεργασιών, Αθήνα, 1979.

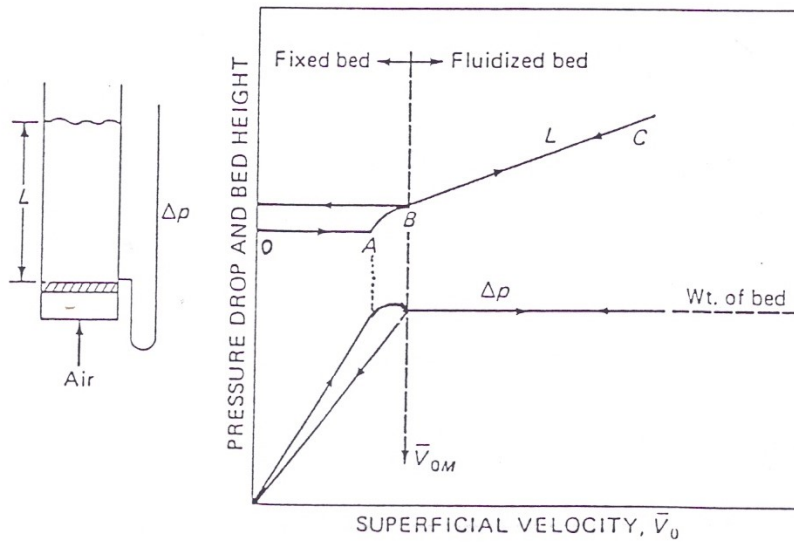
McCabe, W.L. Smith, J.C., and Harriott, P. Unit Operations of Chemical Engineering, McGraw-Hill, New York, 1985.

Richardson, J.F. and Zaki, W.N., Trans. Inst. Chem. Engrs. **32**, 35 (1954).

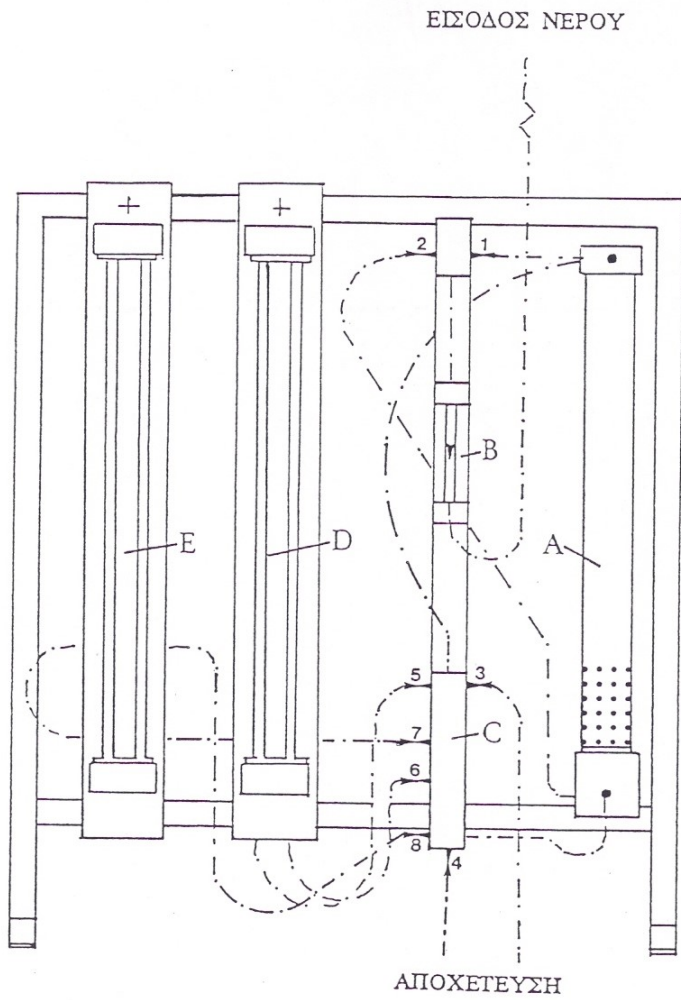
Kunii, D. and Levenspiel, O., Fluidization Engineering, Wiley, New York, 1969.



Σχήμα 1 Η Εξίσωση Ergun και οι οριακές της μορφές σε λογαριθμική κλίμακα



Σχήμα 2 Πτώση πίεσης και ύψος στήλης σαν συνάρτηση της φαινομενικής ταχύτητας



- A-ΚΛΙΝΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ
- B-ΡΟΟΜΕΤΡΟ
- C-ΣΥΣΤΗΜΑ ΒΑΛΒΙΔΩΝ
- D-MΑΝΟΜΕΤΡΟ ΝΕΡΟΥ/ΑΕΡΑ
- E-MΑΝΟΜΕΤΡΟ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ
- 1-8 ΒΑΛΒΙΔΕΣ -
- - - ΑΓΩΓΟΙ

Σχήμα 3: "Διάγραμμα της Πειραματικής Συσκευής"