



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

---

## Προχωρημένα Εργαστήρια Φυσικής Ι

Ελευθέριος Ηλιόπουλος

Τμήμα Φυσικής

---

## Πείραμα I Τεχνικές Κενού

### Εισαγωγή

Η δημιουργία και η μέτρηση του κενού είναι απαραίτητη σε πολλές πειραματικές διατάξεις και εφαρμογές. Η παραμένουσα πίεση (δηλ. 'το κενό') μετράται συνήθως σε χιλιοστά της στήλης υδραργύρου (mmHg) ή Torr (1mmHg=1 Torr). Άλλες μονάδες είναι το pascal (1 pascal = 1 N/m<sup>2</sup>) και η ατμόσφαιρα (Atm) ή bar (1 bar = 1 Atm):

$$1 \text{ Atm} = 10^3 \text{ millibar} = 760 \text{ mmHg} = 10^5 \text{ Pascal}$$

Οι σύγχρονες εμπορικές συσκευές μπορούν να φθάσουν σε πιέσεις της τάξεως των 10<sup>-10</sup> mmHg, ενώ σε ορισμένα εργαστήρια μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερο κενό κατά μία με δύο τάξεις μεγέθους. Συγκριτικά αναφέρουμε ότι η παραμένουσα πίεση στο διάστημα 10<sup>-16</sup> mmHg, που αντιστοιχεί σε ένα μόριο ανά κυβικό εκατοστό.

Οι αντλίες κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές περιοχές πίεσεως η κάθε μία. Οι κυριότεροι τύποι είναι:

(α) Μηχανικές αντλίες, που μπορούν να λειτουργήσουν υπό ατμοσφαιρική πίεση και να επιτύχουν "κενό" μέχρι 10<sup>-2</sup> – 10<sup>-3</sup> mmHg. Χρησιμοποιούνται σαν βοηθητικές αντλίες, για την δημιουργία προκαταρκτικού (χαμηλού) κενού, που είναι απαραίτητο για την λειτουργία των αντλιών υψηλού κενού.

(β) Αντλίες μοριακής διαχύσεως που μπορούν να επιτύχουν κενό μέχρι 10<sup>-6</sup> – 10<sup>-8</sup> mmHg.

(γ) Αντλίες τουρμπίνας (turbo molecular), που μπορούν να επιτύχουν κενό μέχρι 10<sup>-6</sup> – 10<sup>-10</sup> mmHg.

(δ) Αντλίες ιονισμού που μπορούν να επιτύχουν κενό μέχρι 10<sup>-8</sup> – 10<sup>-10</sup> mmHg.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η χαμηλότερη πίεση που μπορεί να επιτευχθεί από ένα συγκεκριμένο σύστημα εξαρτάται από την λείανση των εσωτερικών επιφανειών της αντλίας, από την πίεση κορεσμένων ατμών των υλικών του συστήματος. Προκειμένου όμως να αποφευχθεί η επίδραση τέτοιων πτητικών υλικών σε ένα σύστημα υψηλού κενού, τα συστήματα αυτά συνήθως θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες για πολλές ώρες ή και μέρες. Για τον ίδιο λόγο χρησιμοποιούνται κρυοστατικές παγίδες για την συμπύκνωση των πτητικών ατμών. Τα υψηλότερα κενά έχουν επιτευχθεί με κρυογονικές τεχνικές.

Τέλος, η μόνωση του συστήματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαρροές. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ως σύνδεσμοι δακτύλιοι O (O-rings, όπως στο πείραμά σας), που είναι κατασκευασμένοι από καουτσούκ, ή 'gascets' από χαλκό.

### Βασικές αρχές

Ένα σύστημα κενού χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα του,  $S$  που έχει μονάδες cm<sup>3</sup>/sec. Η ταχύτητα,  $S$ , εξαρτάται από την πίεση. Για κάθε σύστημα υπάρχει μία ελάχιστη πίεση  $P_s$ , που μπορεί να επιτευχθεί με αυτό. Η προσέγγιση προς αυτό το κατώτατο όριο είναι εκθετική, και έτσι έχουμε

$$-\frac{dP}{dt} = \frac{S}{V}(P - P_s) \quad (\text{Εξ.1})$$

όπου  $V$  είναι ο συνολικός προς εκκένωση όγκος και  $P$  η στιγμιαία πίεση. Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στον προσδιορισμό της ταχύτητας  $S$ . Με ολοκλήρωση της (Εξ.1), και υποθέτοντας ότι η  $S$  είναι σταθερή, παίρνουμε:

$$P(t) = (P_0 - P_s) \cdot e^{-t \cdot \frac{S}{V}} + P_s \quad (\text{Εξ. 2})$$

όπου  $P_0$  η αρχική πίεση για  $t = 0$ .

Η ταχύτητα ενός συστήματος εξαρτάται από την ταχύτητα  $S_p$  της χρησιμοποιούμενης αντλίας και από τις σωληνώσεις που συνδέουν την αντλία με τον προς εκκένωση όγκο. Ορίζουμε σαν παροχή  $Q$  του συστήματος, τον όγκο του αερίου που εισέρχεται ή εξέρχεται από αυτό στην μονάδα του χρόνου, πολλαπλασιασμένο επί την πίεση:

$$Q = S \cdot P \quad (\text{Εξ. 3})$$

Η αγωγιμότητα  $F$  των σωληνώσεων ορίζεται από την σχέση

$$Q = F \cdot (P_1 - P_2) \quad (\text{Εξ. 4})$$

όπου  $P_1$  και  $P_2$  είναι οι τιμές της πίεσεως στα δύο άκρα του συστήματος.

Θεωρούμε τώρα ένα όγκο  $V$  υπό πίεση  $P$ , ο οποίος εκκενώνεται με ταχύτητα  $S$ . Ο όγκος αυτός είναι συνδεδεμένος με μία αντλία ταχύτητας  $S_p$  με σωλήνες αγωγιμότητας  $F$ . Έστω ότι η πίεση στην αντλία είναι  $P_p$ . Έχουμε  $Q = S \cdot P$  και  $Q = S_p \cdot P_p$ , όπου  $Q_p = Q = F \cdot (P - P_p)$ . Επομένως,

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{F} \quad (\text{Εξ. 5})$$

που συνδέει την ταχύτητα της χρησιμοποιούμενης αντλίας και την ταχύτητα εκκένωσης του συστήματος.

Η αγωγιμότητα  $F$  εξαρτάται από τον τύπο της ροής του αερίου στο σύστημα και από γεωμετρικούς παράγοντες. Η ροή του αερίου μπορεί να είναι:

(α) Ιξώδης ροή, που υπερισχύει σε υψηλές πιέσεις (δηλ. χαμηλό κενό)

(β) Μοριακή ροή, που υπερισχύει σε πολύ χαμηλές πιέσεις, όταν η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διάμετρο του αγωγού, ή μεγαλύτερη.

Για ιξώδη ροή, η παροχή  $Q$  εξαρτάται από το διαφορικό της πίεσεως. Για μακρύ ευθύγραμμο αγωγό, μήκους  $l$  και ακτίνας  $a$  (σε cm), και αν η χαμηλή πίεση είναι  $P_1$  και η υψηλή  $P_2$  (σε  $10^{-3}$  mmHg) στα άκρα του, τότε

$$Q = \frac{10\pi}{96\eta} \cdot \left(\frac{a^4}{l}\right) \cdot (P_2^2 - P_1^2) \text{ σε } 10^{-3} \text{ mmHg} \cdot \text{cm}^3/\text{s} \quad (\text{Εξ. 6})$$

όπου  $\eta$  το ιξώδες του αερίου, που για την περίπτωση του ατμοσφαιρικού αέρα είναι ίσο με  $1.845 \times 10^{-5}$  poise ( $1 \text{ poise} = 1 \text{ N/m}^2$ ).

Εξ' ορισμού,  $F = Q / (P_2 - P_1)$ . Θέτοντας  $P_{av} = (P_1 + P_2) / 2$ , παίρνουμε για ιξώδη ροή:

$$F = \frac{10\pi}{48} \cdot \frac{P_{av}}{\eta} \cdot \left(\frac{a^4}{l}\right) \text{ σε } \text{cm}^3/\text{s} \quad (\text{Εξ. 7})$$

Για να δούμε πότε αρχίζει να παίζει σημαντικό ρόλο η μοριακή ροή, χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες δύο εκφράσεις για την μέση ελεύθερη διαδρομή:

$$\lambda = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{n \cdot \delta^2} \quad (\text{Εξ. 8})$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου και  $\delta$  η μοριακή διάμετρος. Επομένως, χρησιμοποιώντας την καταστατική εξίσωση των αερίων, βρίσκουμε

$$\lambda = (8.59 \times 10^3) \cdot \eta \cdot \frac{T}{P \cdot M} \text{ σε cm} \quad (\text{Εξ. 9})$$

όπου και πάλι  $\eta$  είναι το ιξώδες του αερίου σε poises,  $P$  η πίεση σε microns,  $T$  η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin, και  $M$  η μοριακή μάζα. Έτσι, για ατμοσφαιρικό αέρα σε θερμοκρασία δωματίου και σε πίεση  $10^{-3}$  mmHg,  $\lambda = 7.3$  cm.

Για την περίπτωση μοριακής ροής, η αγωγιμότητα  $F$  για ένα σωλήνα μήκους  $l$ , μεταβλητής διατομής  $A(x)$  και περιμέτρου  $H(x)$ , δίνεται από τον τύπο.

$$F = \frac{4}{3} \cdot \bar{v} \cdot \left[ \int_{x=0}^{x=l} \frac{H(x)}{[A(x)]^2} \cdot dx \right]^{-1} \quad (\text{Εξ.10})$$

όπου  $\bar{v}$  είναι η μέση μοριακή ταχύτητα και δίνεται από τον τύπο  $\bar{v} = 14.55 \times 10^3 \sqrt{\frac{T}{M}}$  σε cm/s.

Έτσι για ένα μακρύ σωλήνα μήκους  $l$  και ακτίνας  $a$  σε cm,

$$F = \frac{1}{4} \cdot A \cdot \bar{v} \quad \text{σε cm}^3/\text{s} \quad (\text{Εξ.11})$$

**Η ταχύτητα άντλησης ελαττώνεται από τυχόν διαρροές που υπάρχουν στο σύστημα κενού. Αν υποθέσουμε ότι έχουνε σταθερό ρυθμό διαρροών  $Q_L$  (σε Torr·cm<sup>3</sup>/s), τότε η εξίσωση (1) γίνεται:**

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{S}{V}(P - P_s) + \frac{Q_L}{V} \quad (\text{Εξ.12})$$

και η λύση της γράφεται

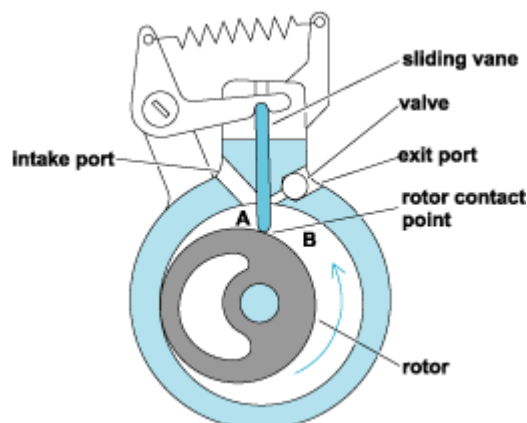
$$\left[ P - \left( P_s + \frac{Q_L}{S} \right) \right] = \left[ P_0 - \left( P_s + \frac{Q_L}{S} \right) \right] \cdot e^{-t \cdot \frac{S}{V}} \quad (\text{Εξ.13})$$

## Αντλίες: Λειτουργία και Σύντομη Περιγραφή

Στις επόμενες δύο παραγράφους περιγράφονται οι δύο τύποι αντλιών που θα χρησιμοποιήσετε στο πείραμα.

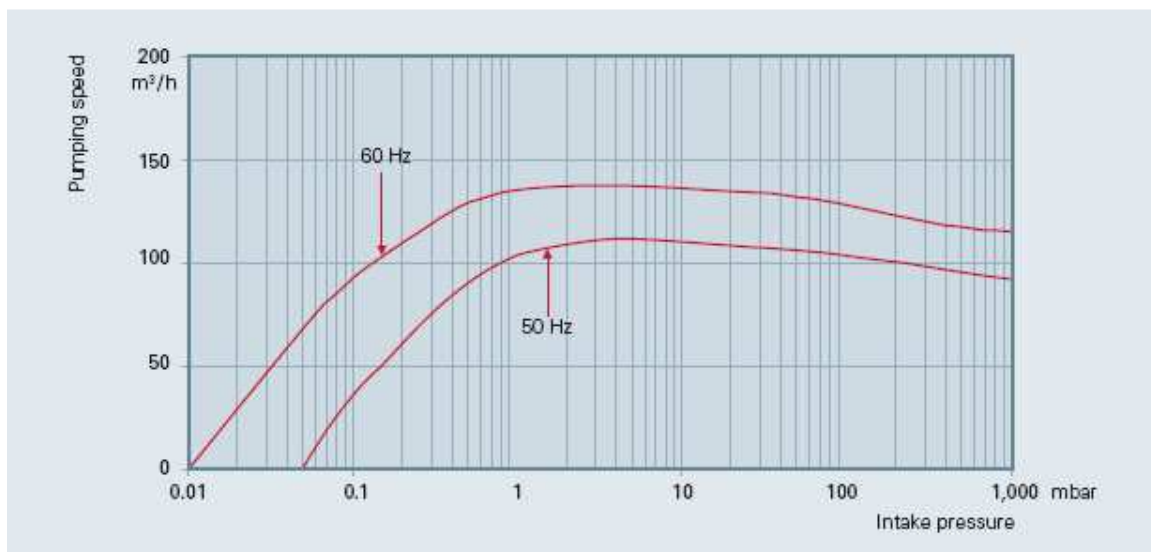
### Μηχανικές Αντλίες

Οι μηχανικές αντλίες λειτουργούν με βάση την απλή αρχή άντλησης με την χρήση εμβόλου. Λόγω του χαμηλού ιξώδους των αερίων, όλες οι μηχανικές αντλίες κενού είναι περιστροφικές και τελείως εμβαπτισμένες σε λάδι (το οποίο δρα σαν στεγανοποιητής).



Σχήμα 1: Διατομή μίας περιστροφικής αντλίας κενού τύπου Hyvac.

Στο Σχ.1 φαίνεται η διατομή μίας τέτοιας αντλίας. Ένας εκκεντρος περιστροφείας (ρότορας) συμπιέζει και εξάγει το αέριο. Όπως περιστρέφεται ο ρότορας συμπαρασύρει αέρα από την προς εκκένωση περιοχή, τον συμπιέζει και τον εξαφανίζει να διαφύγει από την έξοδο ("εξάτμιση"). Ο κύκλος εισόδου-εξόδου γίνεται πολύ γρήγορα και μπορεί να επαναλαμβάνεται σε μία ακόμη βαθμίδα (ένα ακόμη τέτοιο σύστημα) που χρησιμοποιεί τον ίδιο άξονα κίνησης, οπότε η αντλία γίνεται "δύο βαθμίδων". Το μέγιστο κενό που μπορούν να επιτύχουν οι αντλίες αυτές είναι συνάρτηση της στεγανότητας τους συστήματος στα σημεία επαφής των αξόνων και του περιστροφέα με τα τοιχώματα της αντλίας. Στην έξοδο της αντλίας τοποθετείται ένα φίλτρο για την συγκράτηση των σταγονιδίων του λαδιού που παρασύρονται προς τα έξω μαζί με τον αέρα. Στο Σχ.2 δίνεται η σχέση ταχύτητας άντλησης συναρτήσει της πίεσης για μια τέτοια περιστροφική αντλία (δύο βαθμίδων).

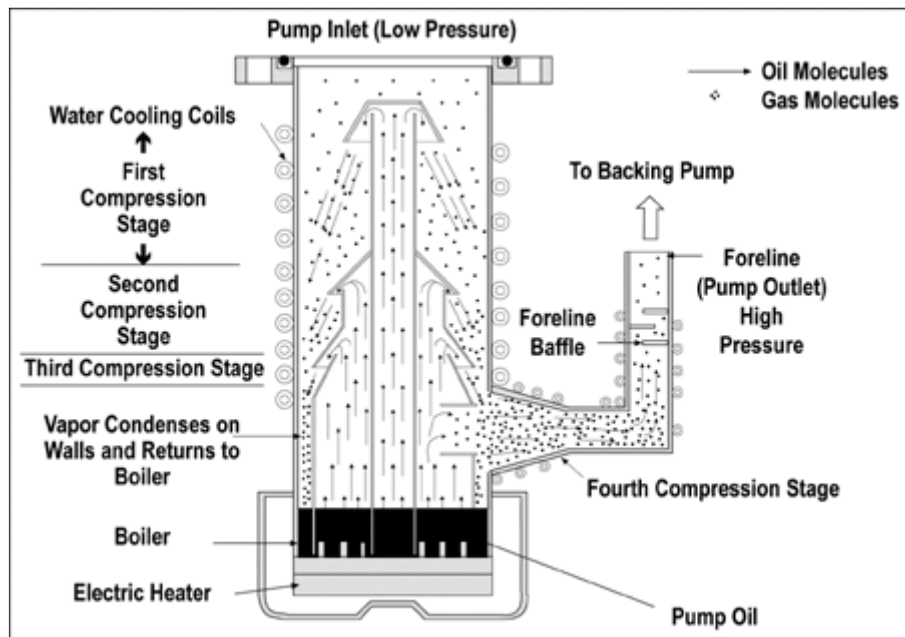


Σχήμα 2: Ταχύτητα άντλησης συναρτήσει της πίεσης για την αντλία του Σχ. 1 (Πηγή Leybold Vacuum)

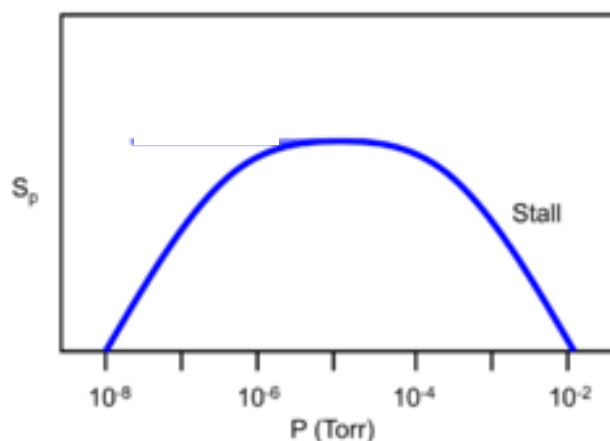
### Αντλίες Διαχύσεως ή Μοριακές Αντλίες

Οι αντλίες αυτές δεν λειτουργούν με μηχανική κίνηση. Η αρχή λειτουργίας τους φαίνεται στο Σχ.3. Στο κάτω μέρος της αντλίας υπάρχει κατάλληλο λάδι, το οποίο θερμαίνεται, εξαερώνεται και ανεβαίνει προς τα πάνω. Τα μόρια του λαδιού αναγκάζονται να περάσουν μέσα από λεπτά ακροφύσια και να κατευθυνθούν προς τα κάτω με μεγάλη ταχύτητα, παρασύροντας μαζί τους τα ελαφρότερα μόρια αέρα. Όταν το ζεστό λάδι έρθει σε επαφή με τα τοιχώματα του δοχείου, τα οποία διατηρούνται ψυχρά με την κυκλοφορία νερού, συμπυκνώνονται και επιστρέφουν στον πυθμένα του δοχείου, ακολουθώντας πάλι τον ίδιο κύκλο. Με τον τρόπο αυτό τα μόρια αερίου συγκεντρώνονται στο κάτω μέρος της αντλίας, το οποίο είναι συνδεδεμένο με μία μηχανική αντλία, η οποία αντλεί και διοχετεύει στο περιβάλλον. Η αποτελεσματικότητα μιας αντλίας διαχύσεως εξαρτάται από την ποιότητα του λαδιού που χρησιμοποιεί, από τον αριθμό και την αναβάθμιση των ακροφυσίων και από την διαφορά θερμοκρασίας λαδιού – ψυχρού εξωτερικού τοιχώματος. Συχνά τοποθετείται μία παγίδα υγρού αζώτου στην είσοδο της αντλίας διαχύσεως για την βελτίωση του κενού στον χώρο εκκένωσης. Μία μέση αντλία διαχύσεως αντλεί με ταχύτητα  $\sim 100$  lt/sec. Σημειώνεται ότι τα 100 lt αέρα υπό πίεση  $10^{-5}$  Torr ισοδυναμούν με 0.001 ml αέρα υπό ατμοσφαιρική πίεση. Επομένως, μια αντλία διαχύσεως διοχετεύει περίπου 50 ml/min στη μηχανική.

Στο Σχ.4 δίνεται η καμπύλη της ταχύτητας άντλησης μιας τέτοιας αντλίας διαχύσεως. Όπως διακρίνεται και από το σχήμα η αντλία διαχύσεως δεν μπορεί να λειτουργήσει με οποιαδήποτε αρχική πίεση, εφόσον η ταχύτητα άντλησης πέφτει στο μηδέν για υψηλές πιέσεις. Η ταχύτητα άντλησης σε χαμηλές πιέσεις περιορίζεται από την πίεση ατμών του χρησιμοποιούμενου λαδιού. Δεν πρέπει να τίθενται σε λειτουργία οι θερμαντήρες της αντλίας διαχύσεως αν η πίεση είναι μεγαλύτερη από  $10^{-2}$  mmHg, διότι διαφορετικά το λάδι οξειδώνεται και καταστρέφεται.



Σχήμα 3: Διατομή μίας αντλίας διαχύσεως



Σχήμα 4: Ταχύτητα άντλησης συναρτήσει της πίεσης για την αντλία του Σχ. 3

### Όργανα Μέτρησης του Κενού

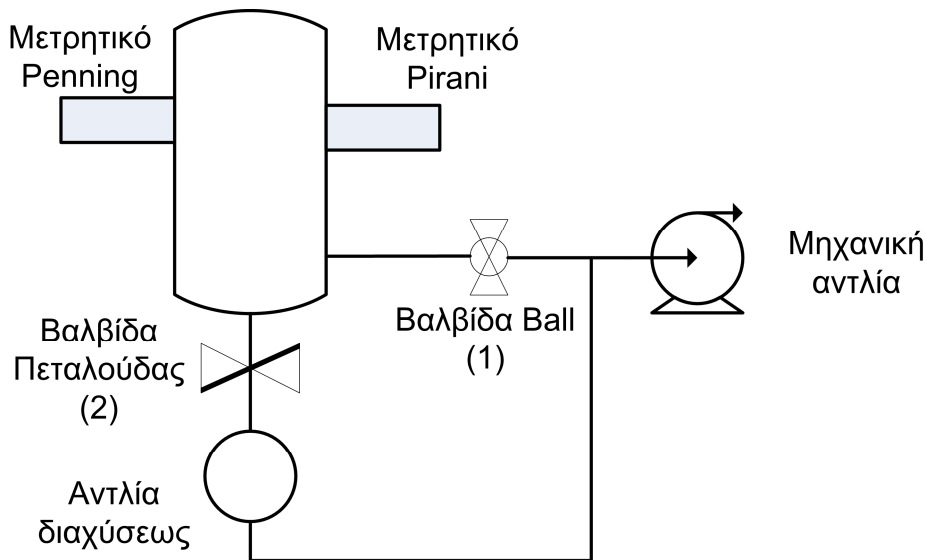
Η μέτρηση της παραμένουσας πίεσης, ιδίως για πολύ χαμηλές τιμές της, αποτελεί ένα δύσκολο πρόβλημα. Η βαθμονόμηση των διαφόρων οργάνων μέτρησης σε συνθήκες υψηλού κενού (για πιέσεις  $\leq 10^{-7}$  mmHg) εξαρτάται από την φύση του αερίου, τις ξένες προσμίξεις στο σύστημα και την κατάσταση των εσωτερικών επιφανειών του μετρητή. Οι σύγχρονοι μετρητές κενού μπορούν να μετρήσουν

παραμένουσα πίεση της τάξης των  $10^{-11} - 10^{-12}$  mmHg. Εδώ θα περιγράψουμε εν συντομία την λειτουργία δύο τύπων μετρητών που θα χρησιμοποιήσετε στο εργαστήριο:

**(α) Ο μετρητής Pirani,** που χρησιμοποιείται για πιέσεις από 1 Atm έως  $\sim 10^{-3}$  mmHg. Αποτελείται από ένα θερμαινόμενο νήμα τοποθετημένο σε περίβλημα που συνδέεται με το σύστημα κενού. Η θερμική αγωγιμότητα του αερίου που περιβάλλει το νήμα εξαρτάται από την πίεση (για πιέσεις κάτω από τα 10 Torr). Σε χαμηλές πιέσεις, όπου η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι της ίδιας τάξης μεγέθους ή μεγαλύτερη από τις διαστάσεις του μετρητή, η απώλεια ενέργειας λόγω θερμικής αγωγιμότητας στο αέριο είναι ανάλογη της πίεσης, και επιπλέον εξαρτάται από τον μηχανισμό ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ της στερεάς επιφάνειας του σύρματος και των τοιχωμάτων του δοχείου με τα μόρια του αερίου, από την μοριακή δομή και το μοριακό βάρος του αερίου. Γενικά, η θερμοκρασία ελαττώνεται με την αύξηση της πίεσης. Στην περίπτωση του μετρητή Pirani, η μέτρηση της μεταβολής αυτής της θερμοκρασίας γίνεται συνδέοντας το θερμαινόμενο νήμα (που είναι κατασκευασμένο από υλικό με υψηλό θερμικό συντελεστή) με τον ένα κλάδο μιας γέφυρας Wheatstone με την οποία μετρώνται οι μεταβολές στην αντίσταση του νήματος που οφείλονται στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Σε πολύ χαμηλές πιέσεις, η απώλεια ενέργειας λόγω θερμικής αγωγιμότητας είναι πολύ μικρότερη από την απώλεια ενέργειας λόγω ακτινοβολίας και έτσι τίθεται ένα φυσικό κατώτατο όριο στις πιέσεις που μπορούν να μετρηθούν με αυτή τη μέθοδο ( $10^{-4}$  Torr). Ο μετρητής Pirani δεν είναι απόλυτος μετρητής πίεσης και πρέπει να βαθμονομηθεί με την χρήση άλλων συσκευών.

**(β) Ο μετρητής Penning,** που μετρά την ηλεκτρική αγωγιμότητα αερίου σε χαμηλή πίεση. Υψηλή τάση (1-2 kV) εφαρμόζεται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια τα οποία βρίσκονται μέσα στην περιοχή ενός ισχυρού μόνιμου μαγνήτη. Ηλεκτρόνια εκπέμπονται από μία ψυχρή κάθοδο για να ξεκινήσει ο ιονισμός του αερίου ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Τα θετικά ιόντα που σχηματίζονται έλκονται από την κάθοδο, αλλά επειδή υπάρχει το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι τροχιές τους δεν είναι ευθύγραμμες, αλλά ελικοειδείς. Με αυτό τον τρόπο αυξάνει ο χρόνος της κίνησής τους μέσα στο αέριο, με αποτέλεσμα να γίνονται πολλαπλές κρούσεις με τα μόρια του αερίου. Έτσι δημιουργούνται νέα ιόντα και ενισχύεται το ανιχνευόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο είναι ανάλογο του αριθμού των κρούσεων και επομένως ανάλογο της πίεσης του αερίου μέσα στον θάλαμο. Λειτουργεί στην περιοχή  $10^{-3} - 10^{-6}$  mmHg.

## Πειραματικό Μέρος



Σχήμα 5: Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

Το σύστημα με το οποίο θα εργαστείτε αποτελείται από τον προς εκκένωση θάλαμο (κελί) όγκου  $V_0$ , μια μηχανική αντλία, μια αντλία διαχύσεως, δύο βαλβίδες (μία τύπου ball και μία τύπου πεταλούδας) και αγωγούς, καθώς και δύο μετρητές κενού (ένα μετρητή Pirani και ένα μετρητή Penning). Επίσης υπάρχει και ένα ηλεκτρονικό χρονόμετρο. Στο Σχ.5 δίνεται το διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.

### Μετρήσεις

- Αναγνωρίστε τα διάφορα μέρη του συστήματος κενού.
- Βεβαιωθείτε ότι και οι δύο βαλβίδες της διάταξης είναι κλειστές.
- Βάλτε σε λειτουργία την μηχανική αντλία και περιμένετε λίγα λεπτά.
- Ανοίξτε την βαλβίδα (1) τύπου Ball και αρχίστε αμέσως να παίρνετε μετρήσεις πίεσης και χρόνου. Η μέτρηση της πίεσης γίνεται με τον μετρητή θερμοζεύγους (Pirani).
- Όταν η πίεση φθάσει τα  $10^{-2}$  Torr περίπου, κλείνετε την βαλβίδα (1). Βάζετε σε λειτουργία την αντλία διαχύσεως και την αφήνετε να ζεσταθεί για 5 min.
- Όταν έχει ζεσταθεί αρκετά η αντλία διαχύσεως, ανοίγετε την βαλβίδα (2) τύπου πεταλούδας. Αρχίστε αμέσως να παίρνετε μετρήσεις πίεσης και χρόνου. Η μέτρηση της πίεσης γίνεται με τον μετρητή Penning.
- Αφού έχετε δημιουργήσει στον θάλαμο το καλύτερο κενό που μπορείτε με το σύστημα αυτό, κλείνετε την βαλβίδα (2) και μετράτε και πάλι την πίεση σαν συνάρτηση του χρόνου.

### Επεξεργασία των μετρήσεων

Μηχανική Αντλία: Παραστήστε γραφικά την μεταβολή της πίεσης συναρτήσει του χρόνου για την μηχανική αντλία. Εν συνεχεία, παραστήστε γραφικά το  $\ln P$  συναρτήσει του χρόνου  $t$ . Τι παρατηρείτε; Υπολογίστε την ταχύτητα άντλησης, καταρχήν χωρίς να λάβετε υπόψη την αγωγιμότητα των σωλήνων και τις διαρροές του συστήματος. Εν συνεχεία, υπολογίστε την αγωγιμότητα των σωληνώσεων και



διορθώστε κατάλληλα την ταχύτητα άντλησης που βρήκατε. Τέλος μπορείτε να διαφορίσετε γραφικά τη συνάρτηση  $P(t)$  που βρήκατε και να σχεδιάσετε σε ένα νέο διάγραμμα τον ρυθμό μεταβολής της πίεσης συναρτήσει της στιγμιαίας πίεσης. Να σχολιάσετε τα αποτελέσματά σας.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τα αποτελέσματα από την αντλία διαχύσεως.

Σχεδιάστε την πίεση σαν συνάρτηση του χρόνου που πήρατε στο τελευταίο μέρος του πειράματος, και υπολογίστε τον ρυθμό διαρροών από το σύστημα.

**Βιβλιογραφία:**

A.C. Mellisinos, Experiments in Modern Physics, Academic Press.

# Σημειώματα

## Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ελ. Ηλιόπουλος, 2014. «Προχωρημένα Εργαστήρια Φυσικής Ι.». Έκδοση: 1.0. Ηράκλειο 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://opencourses.uoc.gr>.

## Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

## Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

## Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

