



Θερμικοί αισθητήρες

1. Αισθητήρας Μέτρησης Ροής

Εφαρμογές μέτρησης της ροής

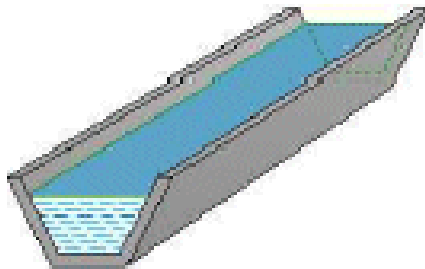
- Χορήγηση φαρμάκων σε ακριβείς ποσότητες και μέτρηση του άσθματος σε ασθενείς.
Χρήση σε αναπνευστικά συστήματα
- Διαχείριση των αποβλήτων (βιομηχανικές μονάδες).
- Διαχείριση των υδάτων των υπονόμων
- Έλεγχος του αέρα σε θερμοκήπια
- Έλεγχος του μικροκλίματος σε σύγχρονες κτιριακές εγκαταστάσεις
- Μέτρηση κατανάλωσης (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο κλπ)
- Η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων ροής είναι βασικής σημασίας τόσο για την ανάπτυξη των – χημικών κυρίως - διεργασιών όσο και για την ανάπτυξη των σχετικών προϊόντων

Ως ροή αναφέρεται η μακροσκοπική κίνηση ενός ρευστού.

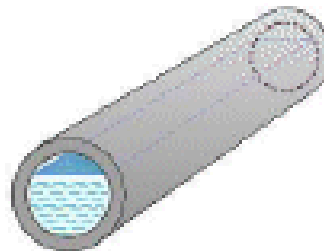
Η **μηχανική των ρευστών** είναι ένα πολύ εκτεταμένο πεδίο με ισχυρό θεωρητικό υπόβαθρο και πολυάριθμες εφαρμογές.

Ας δούμε μερικούς «τύπους» ροής:

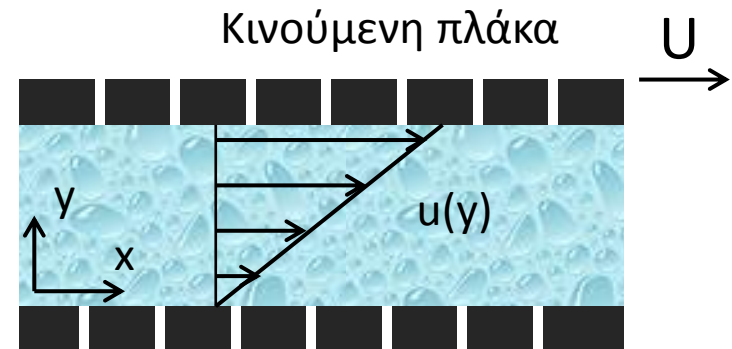
Ροή σε ανοιχτό
κανάλι



Ροή σε κλειστό
κανάλι



Ροή Couette



Ακίνητη πλάκα

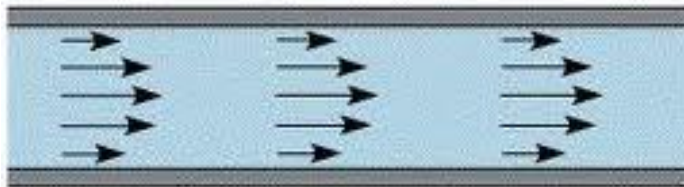
http://www.pipeflow.co.uk/public/control.php?_path=/497/595

Ως ροή αναφέρεται η μακροσκοπική κίνηση ενός ρευστού.

Η **μηχανική των ρευστών** είναι ένα πολύ εκτεταμένο πεδίο με ισχυρό θεωρητικό υπόβαθρο και πολυάριθμες εφαρμογές.

Ας δούμε μερικούς «τύπους» ροής:

Στρωτή ροή
(*Laminar flow*)

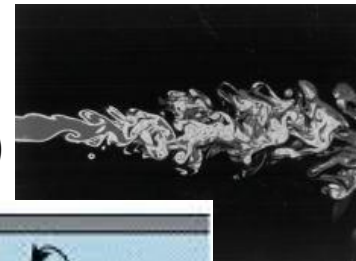


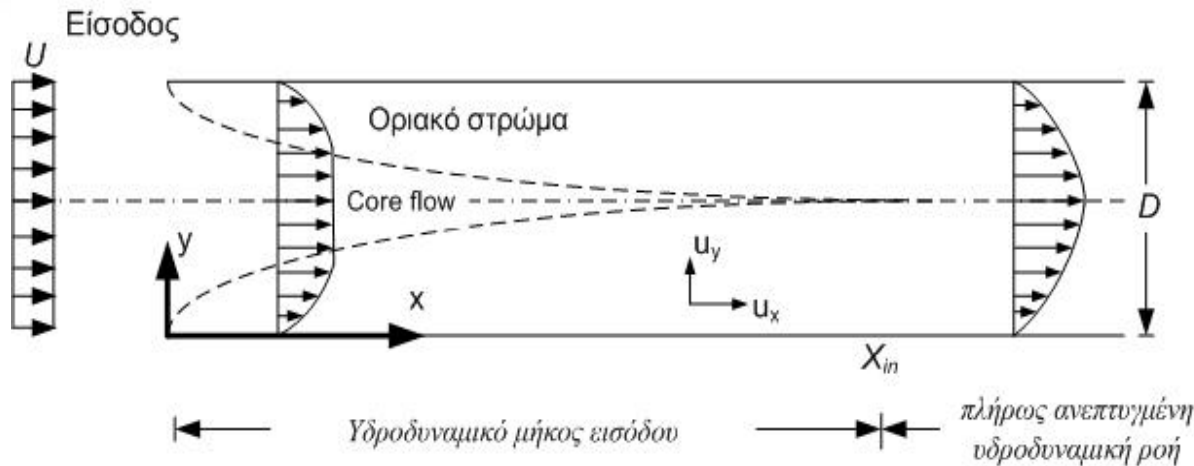
Σταθερή ταχύτητα στο
χρόνο

Τυρβώδης ροή
(*Turbulent flow*)



Εμφάνιση στροβίλων (eddies). Τυχαία
διακύμανση ταχύτητας





- u: ταχύτητα του ρευστού
- V: όγκος ρευστού
- t: χρόνος
- A: επιφάνεια σωλήνα
- U_{avg} : μέση ταχύτητα ρευστού
- $r_o = D/2$

Το αναπτυσσόμενο πεδίο ταχυτήτων ρευστού μεταξύ δύο παράλληλων πλακών

**Ρυθμός
Ροής**

$$\dot{Q} = \frac{V}{t} = A \cdot u_m = \int_{(A)} u \cdot dA$$

Ο όγκος του ρευστού που διαπερνά μια επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου

No slip

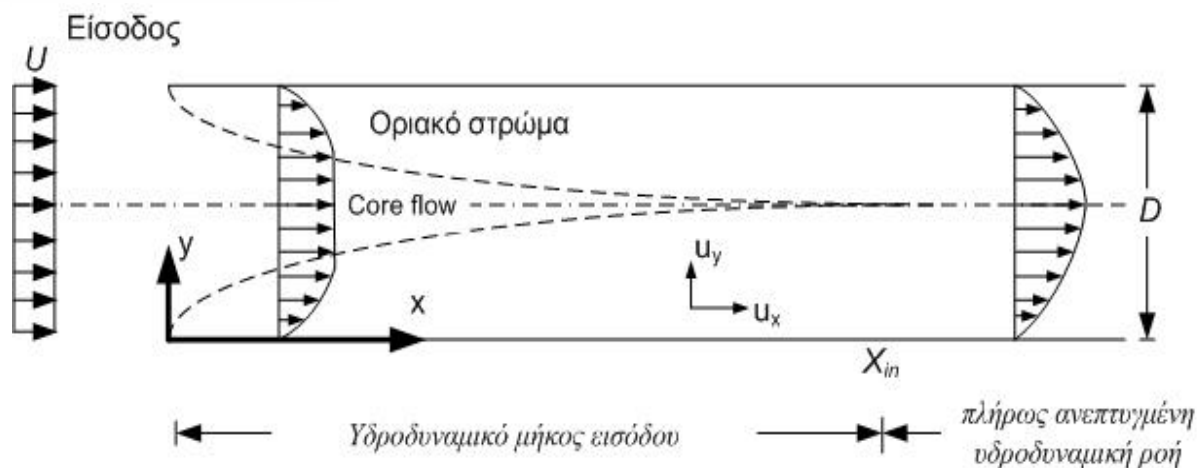
$$u_{\text{τοιχ}} = 0$$

Στα άκρα του καναλιού, το ρευστό έχει μηδενική ταχύτητα

**Προφίλ
ταχύτητας**

$$u(r) = 2U_{avg} \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right]$$

Η κατανομή της ταχύτητας του ρευστού στο σωλήνα



u : ταχύτητα του ρευστού
 ρ : πυκνότητα ρευστού
 μ : δυναμικό ιξώδες
 η : κινηματικό ιξώδες

Το αναπτυσσόμενο πεδίο ταχυτήτων ρευστού μεταξύ δύο παράλληλων πλακών

**Αριθμός
Reynolds**

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{u D}{\eta} = \frac{\text{δυνάμεις αδράνειας}}{\text{δυνάμεις ιξώδους}}$$

Ο σημαντικότερος από τους **αδιάστατους αριθμούς** που χρησιμοποιούνται στη μελέτη των ρευστών.

$0 < Re < 1800$ Στρωτή ροή

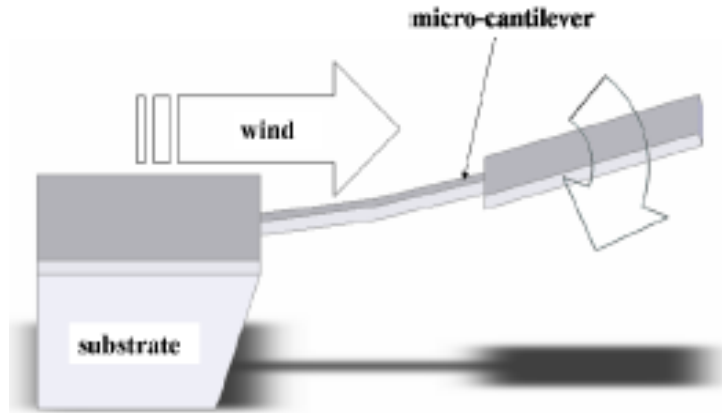
$Re > 2300$ Τυρβώδης ροή

**Υδροδυναμικό
μήκος εισόδου**

$$X_{in} \approx 0.056 Re \cdot D$$

Η απόσταση από την είσοδο όπου αποκαθίσταται η στρωτή ροή

Δοκού (cantilever)

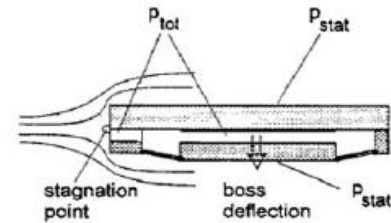
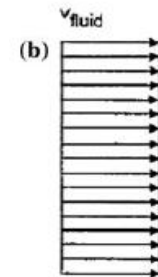
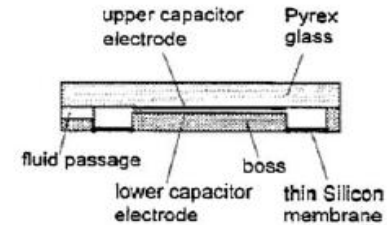


Ο αισθητήρας των Wang *et al*, όπου η ροή μετράται μέσω της εκτροπής που επιφέρει στη δοκό

Όταν μια δομή δοκού βρίσκεται εντός καναλιού όπου ρέει ένα υγρό ή αέριο, τότε αυτή εκτρέπεται από την αρχική της θέση με το εύρος της εκτροπής να είναι συνάρτηση του ρυθμού ροής. Το μέσο ανίχνευσης της εκτροπής αυτής είναι συνήθως η μεταβολή της αντίστασης που παρατηρείται σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό, λόγω της μηχανικής τάσης που προκαλείται από την παραμόρφωση αυτού.

Διαφορικής πίεσης

(a) $v_{\text{fluid}} = 0 \text{ m/s}$



Σχηματική αναπαράσταση της δομής, και της αρχής λειτουργίας του αισθητήρα των Berberig *et al*.

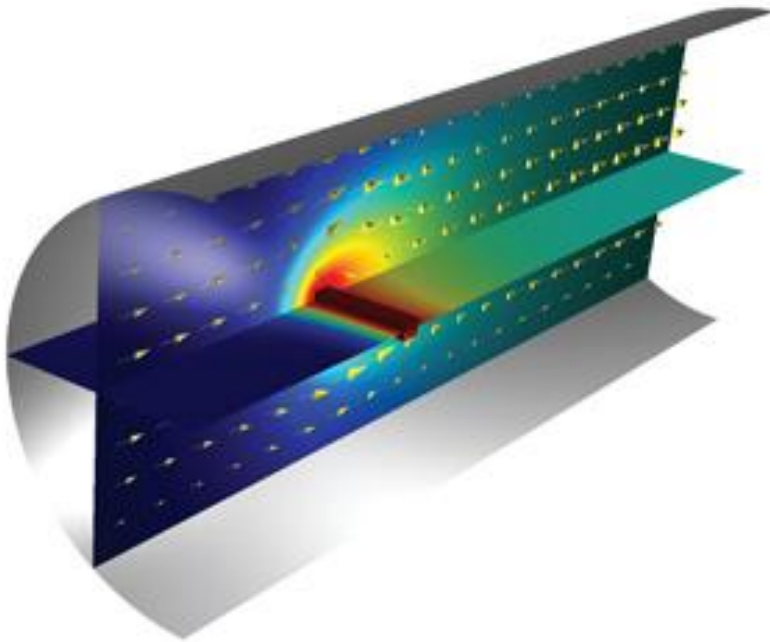
Οι αισθητήρες πίεσης βασίζονται στο γεγονός ότι η πτώση στην πίεση μεταξύ δύο σημείων εντός της ροής ενός ρευστού είναι ανάλογη της μέσης ταχύτητας αυτού. Στην Εικόνα φαίνεται η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα των Berberig *et al*. [7-10] όπου η μεταβολή στην πίεση ανιχνεύεται μέσω πυκνωτών. Το σήμα του αισθητήρα συσχετίζεται με την ταχύτητα του ρευστού μέσω της εξίσωσης του Bernoulli:

$$\rho g z + p + \frac{\rho u^2}{2} = \text{const}$$

Υπενθύμιση:

Διαγωγή (convection): Διάδοση θερμότητας μέσω της κίνησης του ρευστού.

Μακροσκοπικό φαινόμενο



Εικόνα από Comsol

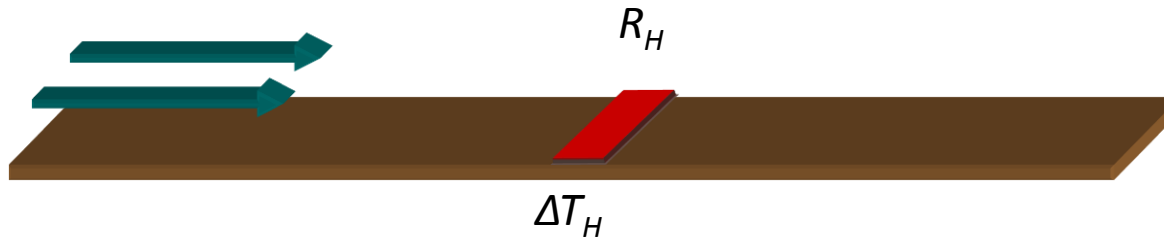
Όταν ένα ρευστό βρίσκεται σε κίνηση (ροή) τότε η θερμική ενέργεια δεν μεταφέρεται μόνο μέσω της αγωγής μεταξύ γειτονικών μορίων, αλλά και μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ίδιου του ρευστού. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας ονομάζεται **διαγωγή** και ουσιαστικά αποτελεί την υπέρθεση της μεταφοράς ενέργειας μέσω αγωγής και της ενέργειας που μεταφέρεται χωρικά από το κινούμενο ρευστό.

Η ροή αυτή της θερμότητας στην διεπιφάνεια εξαρτάται τόσο από το πεδίο θερμοκρασίας όσο και από το πεδίο ταχυτήτων, ενώ ο ακριβής προσδιορισμός της τιμής της μπορεί να είναι εξαιρετικά σύνθετος. Η αναλογία μεταξύ της ροής θερμότητας q_w και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ ρευστού T_F και τοιχώματος T_W εκφράζεται ως:

$$q_w = h(T_W - T_F)$$

h : διαγωγική σταθερά

Θερμό νήμα (Hot – Wire)



$$\text{Sensor_Signal} = \frac{R - R_o}{R_o} \propto \Delta T_H$$

- Ένας αντιστάτης (θερμαντήρας – heater) διαρρέεται από ρεύμα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμοκρασιακού πεδίου στην περιοχή του (φαινόμενο Joule). Με την κίνηση του ρευστού που βρίσκεται σε επαφή με το θερμαντήρα, επέρχεται μια θερμοκρασιακή **μεταβολή** σε αυτόν ΔT_H λόγω της διαγωγικής μεταφοράς θερμότητας. Η μεταβολή της θερμοκρασίας ανιχνεύεται μέσω της αντίστοιχης μεταβολής στην τιμή της αντίστασης του θερμαντήρα.

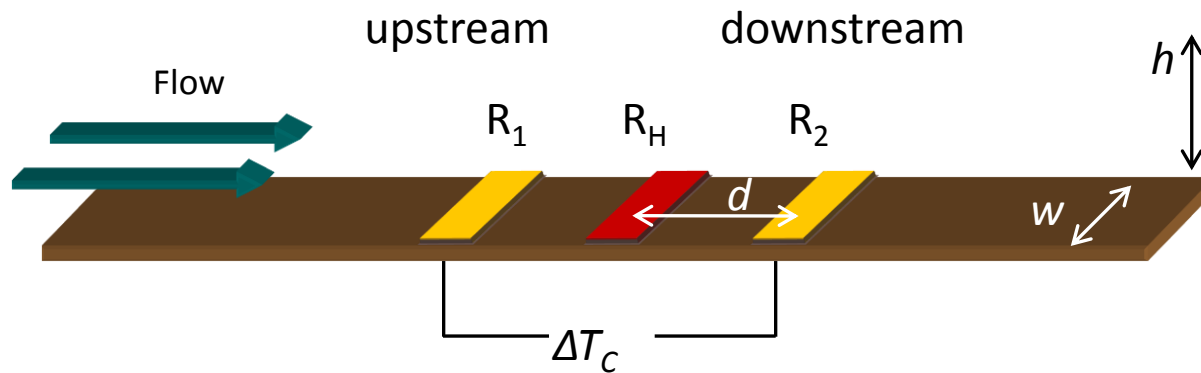
Σχέση αντίστασης
θερμοκρασίας:

$$R(T) = R_o [1 + \alpha_T (T - T_o)]$$



$$\frac{\Delta R}{R_o} = \alpha_T \Delta T$$

Calorimetric (Διαφορική μέτρηση)

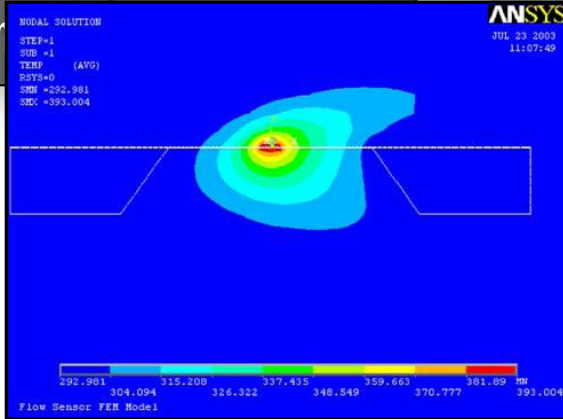


Σημαντικές Παράμετροι

- Ρεύμα/ισχύς στον θερμαντήρα I_h/P_h
- Απόσταση αισθητήριων στοιχείων d
- Ύψος και πλάτος καναλιού h, w
- Υλικά & γεωμετρία κατασκευής

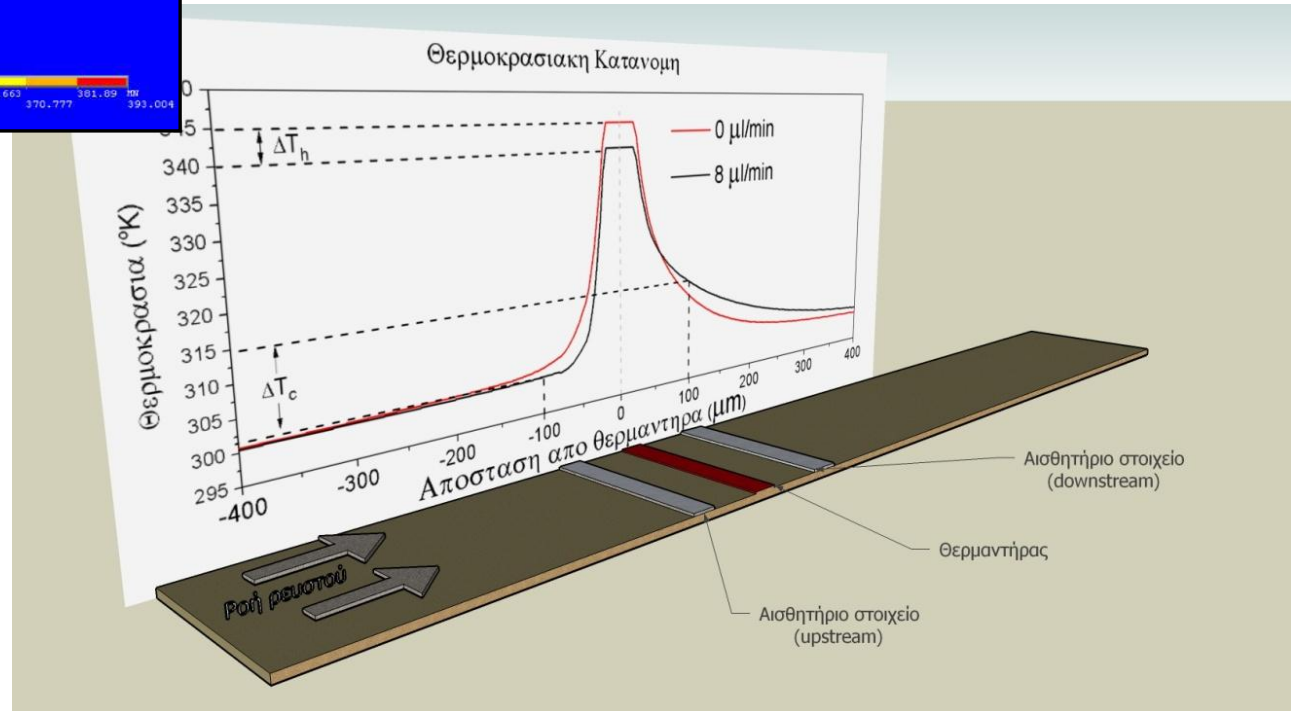
$$Sensor_Signal = \frac{R_1 - R_{1,o}}{R_{1,o}} - \frac{R_2 - R_{2,o}}{R_{2,o}} \propto \Delta T_C$$

- Δύο αισθητήρια στοιχεία εκατέρωθεν του θερμαντήρα. Η διαγωγική μεταφορά θερμότητας έχει ως συνέπεια την ψύξη του upstream και την θέρμανση του downstream στοιχείου. Το σήμα του αισθητήρα στην προκειμένη περίπτωση προέρχεται από τη **διαφορά** στη θερμοκρασία των δύο αισθητήριων στοιχείων.



Sani et al

- Τύποι αισθητήρων
στοιχείων
θερμοκρασίας:
- α. δίοδοι
 - β. τρανζίστορ
 - γ. αντιστάτες
 - δ. Θερμοστοιχεία
 - ε. Θερμίστορς



Σχηματική απεικόνιση της μεταβολής του θερμοκρασιακού πεδίου σε σχέση με τις αρχές λειτουργίας (για κατάσταση (C1)). Η οριζόντια πλάκα αναπαριστά τον αισθητήρα ροής, όπου και διακρίνονται ο θερμαντήρας και τα αισθητήρια στοιχεία. Για μηδενική ταχύτητα του ρευστού, η κατανομή της θερμοκρασία είναι συμμετρική εκατέρωθεν του θερμαντήρα (κόκκινη γραμμή). Αυτή η κατανομή παραμορφώνεται λόγω της ύπαρξης ροής (μαύρη γραμμή). Η ψύξη του θερμαντήρα κατά ΔT_h λόγω ροής διαμορφώνει το σήμα του αισθητήρα στη λειτουργία του θερμού νήματος, ενώ από τη διαφορά θερμοκρασίας ΔT_c μεταξύ των δύο αισθητήριων στοιχείων προκύπτει το σήμα κατά τη διαφορική μέτρηση θερμοκρασίας. Οι τιμές θερμοκρασίας και οι χωρικές διαστάσεις που αναφέρονται στο σχήμα είναι της τάξης μεγέθους αυτών που συναντώνται σε τυπικούς αισθητήρες μέτρησης ροής σε MEMS

Βασικό ζητούμενο στους θερμικούς αισθητήρες η υψηλή θερμική μόνωση του θερμαντήρα και των αισθητήριων στοιχείων

Τυπικοί αισθητήρες MEMS

Θερμική αγωγιμότητα Si : 149 W/(m·K)

Πάχος υποστρώματος: ~0.4mm

Μέθοδοι μόνωσης:

- Αιωρούμενες δομές
- Κοιλότητες κενού
- Πορώδες Si
- κ.ά.

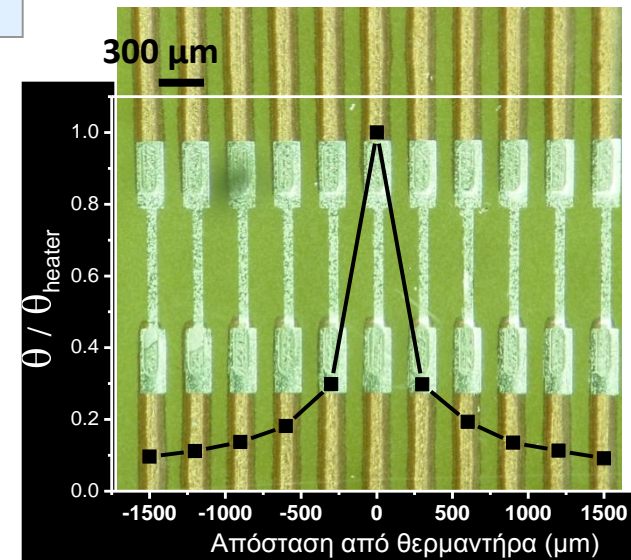
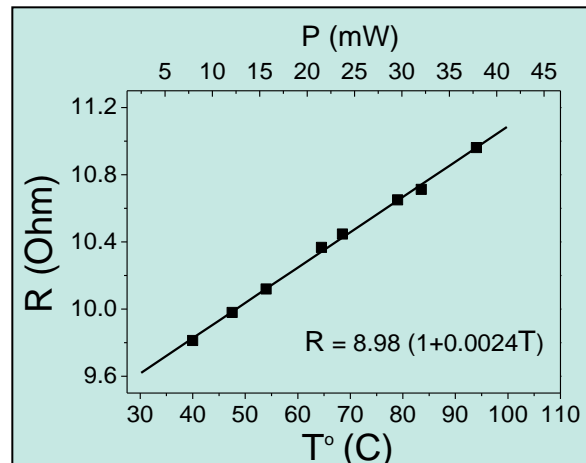
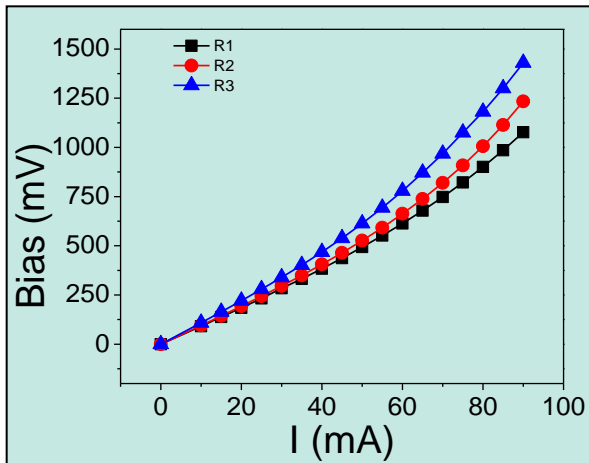
Αισθητήρες σε PCB

Θερμική αγωγιμότητα FR4 : 0.2 W/m·K

Θερμική αγωγιμότητα SU-8 : 0.2 W/m·K

Πάχος υποστρώματος : ~2mm

Αισθητήρας με πολλαπλούς αντιστάτες, όπου ο κεντρικός αντιστάτης (θερμαντήρας -heater) θερμαίνεται λόγω φαινομένου Joule. Το πλάτος της κατανομής της θερμοκρασίας στην επιφάνεια μειώνεται με αυξημένη θερμική μόνωση της συσκευής.



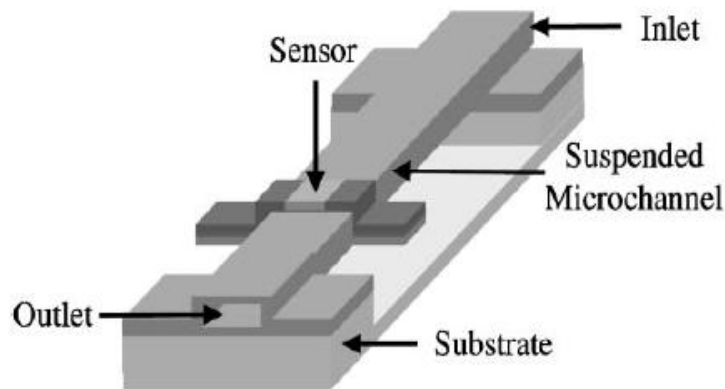
Χαρακτηριστική I-V

Χαρακτηριστική R - T

Χωρική κατανομή θερμοκρασίας

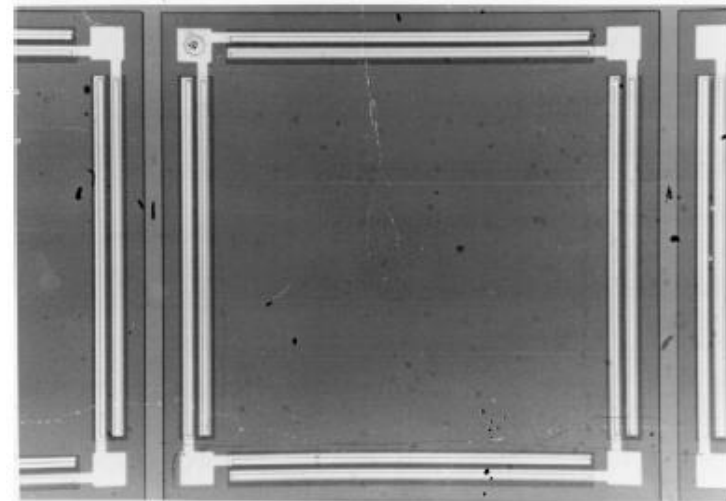
Μικρομηχανικοί αισθητήρες ροής

Αισθητήρας με μικροκανάλι



Σχηματική αναπαράσταση της δομής του αισθητήρα των Wu *et al.* Το ύψος του μικροκαναλιού είναι μόλις 2μm

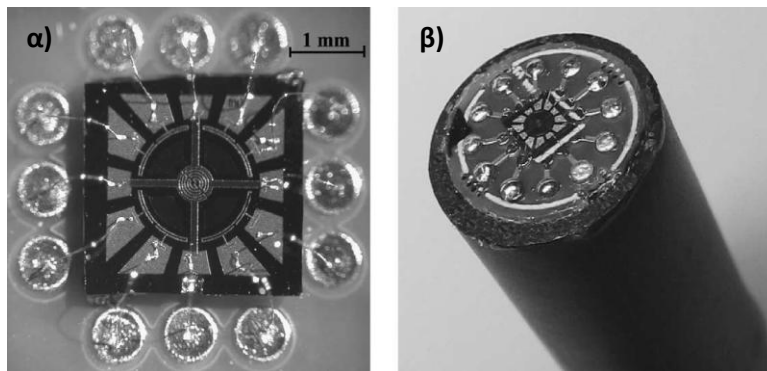
Ο πρώτος MEMS αισθητήρας ροής



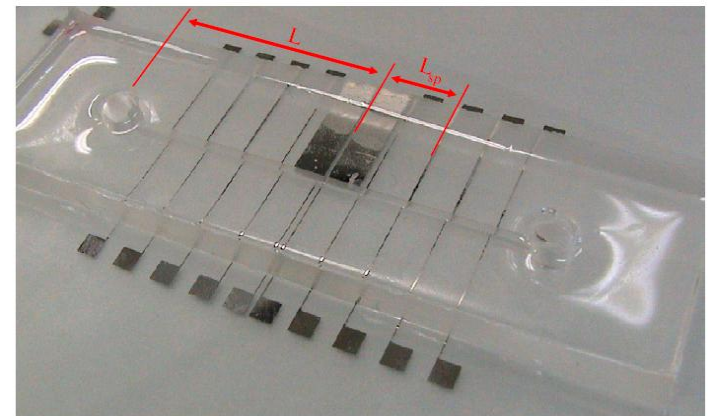
Φωτογραφία του αισθητήρα ροής των Van Putten and Middelhoek που παρουσιάστηκε το 1974. Το μέγεθος του είναι 1.5mm x 1.5mm

Μικρομηχανικοί αισθητήρες ροής

Ανίχνευση Κατεύθυνσης ροής



Αισθητήρας από πολυμερή υλικά



Ο αισθητήρας των Kim *et al.*

α) Η επιφάνεια του αισθητήρα όπου διακρίνεται η πυκνή διάταξη του wire-bonding

β) Ο αισθητήρας προσαρμοσμένος σε ειδική βάση για την διεξαγωγή των μετρήσεων κατεύθυνσης της ροής

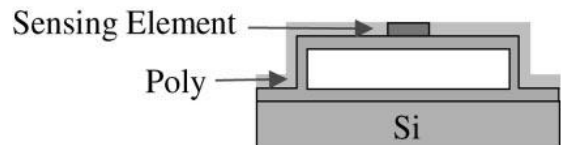
Ο αισθητήρας ροής των Kim *et al.* προσαρμοσμένος σε κανάλι από PDMS



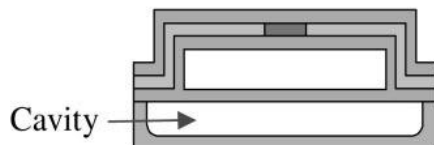
1. LPCVD nitride deposition ($1 \mu\text{m}$)
2. LPCVD PSG deposition ($\sim 2 \mu\text{m}$)
3. Patterning PSG



4. LPCVD nitride deposition ($0.5 \mu\text{m}$)
5. Etching PSG sacrificial layer

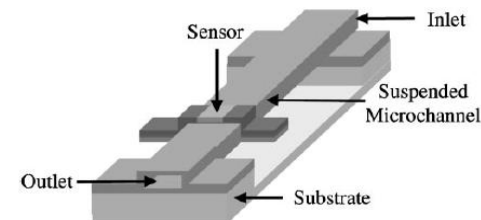


6. LPCVD polysilicon deposition ($0.5 \mu\text{m}$)
7. B⁺ implantation
8. Patterning polysilicon sensors



9. LPCVD polysilicon deposition ($0.6 \mu\text{m}$)
10. Contact hole opening and metallization
11. Si undercutting below sensor area using BrF_3

Αρχικό Στάδιο

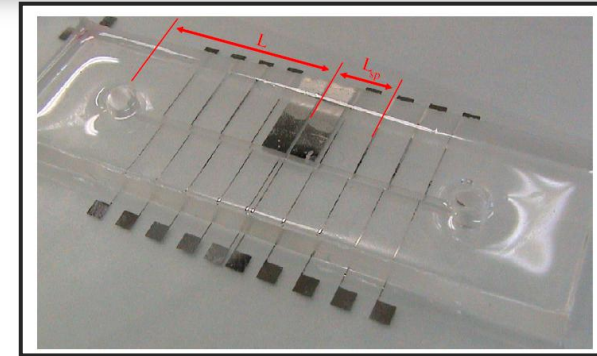
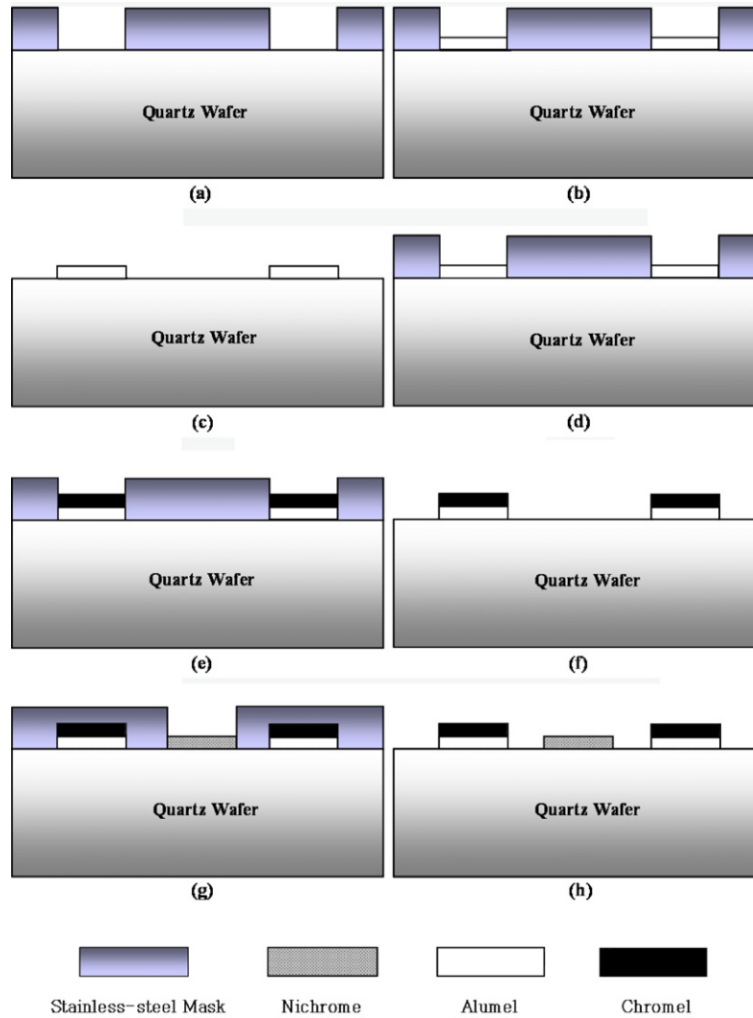


Wu. et al.

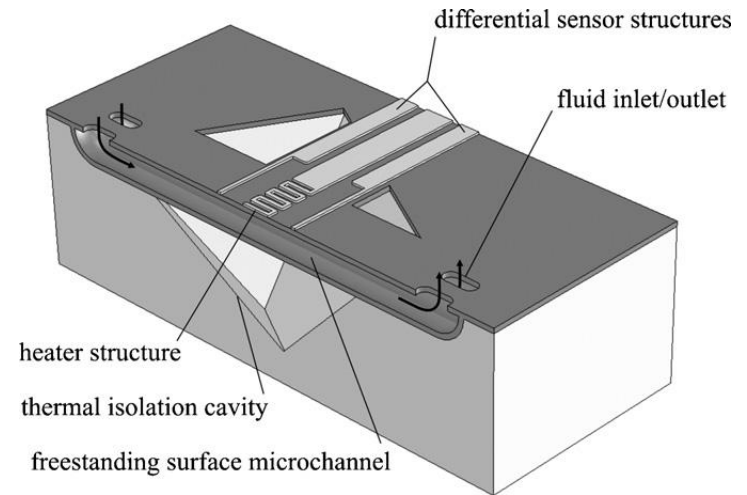
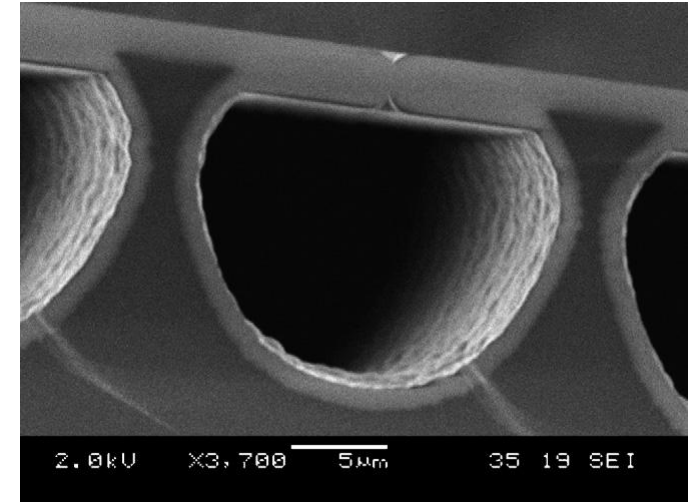
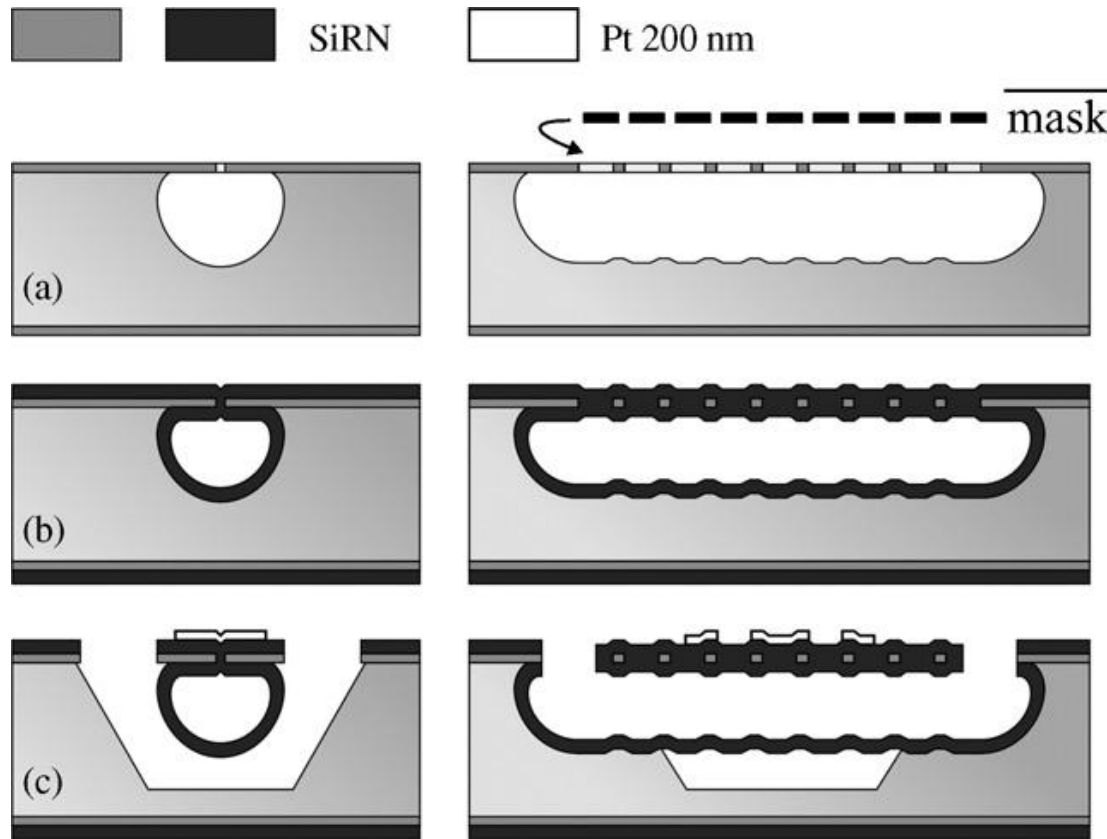
Δημιουργία
Μικροκαναλιού

Κατασκευή αισθητήριου
στοιχείου

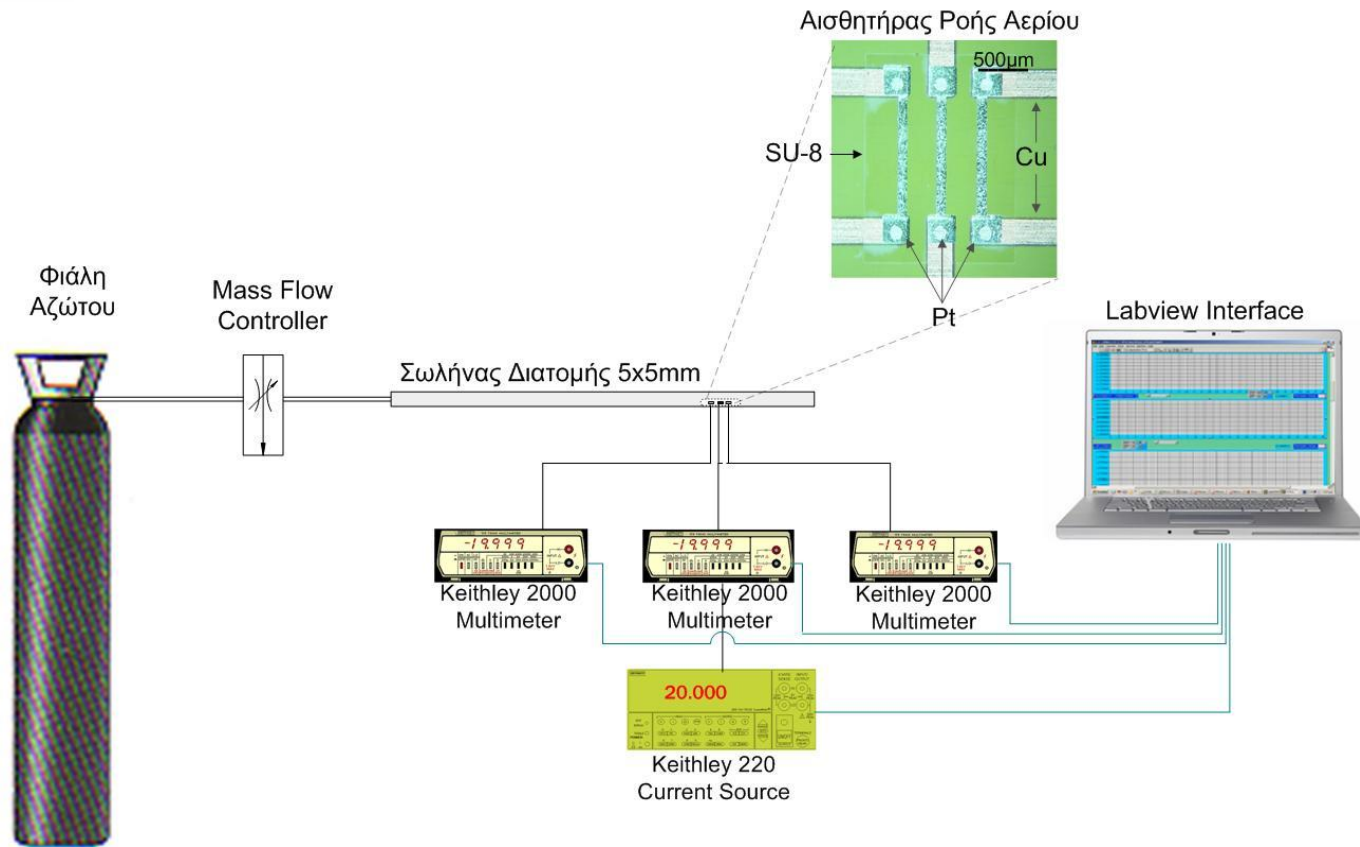
Inlet/outlet.
Δομή θερμικής μόνωσης



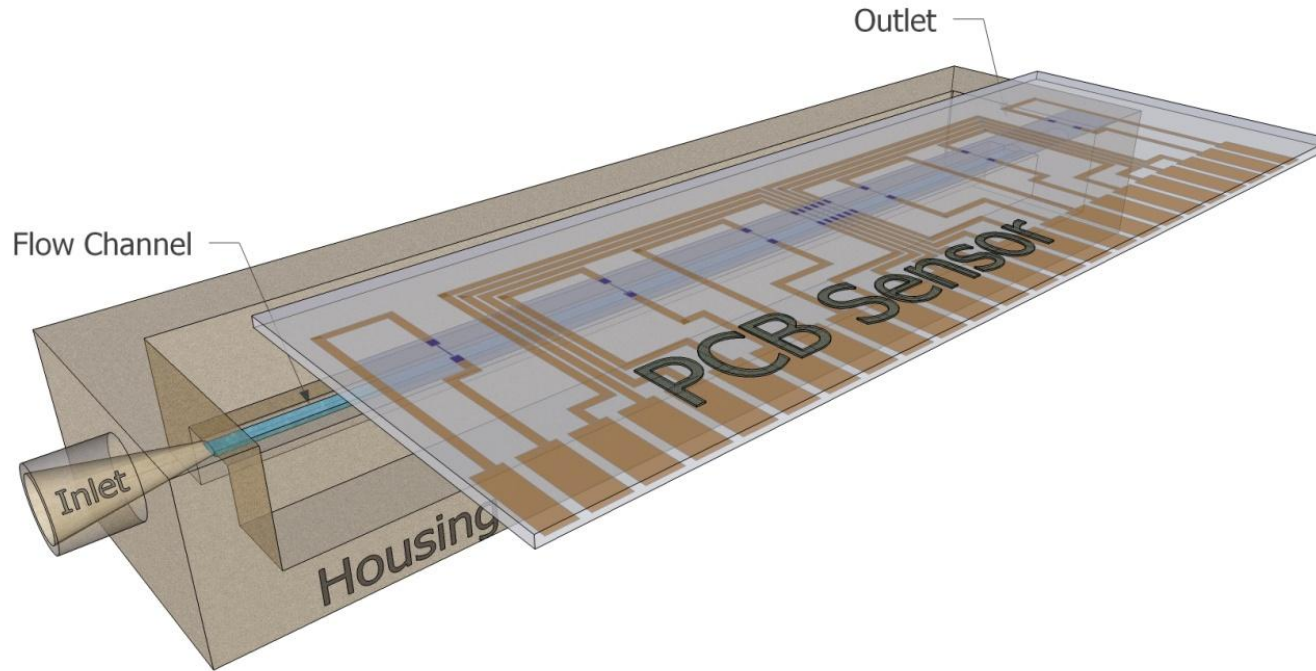
T.H. Kim. *et al.*



Dijkstra M. *et al.*



Μια τυπική μετρητική διάταξη αισθητήρα ροής αερίων. Το άζωτο περιέχεται σε φιάλη, ενώ η τιμή του ρυθμού ροής αυτού του εντός του σωλήνα ορίζεται από ειδικό ελεγκτή. Ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος σε ειδική υποδοχή του σωλήνα, ενώ συνδέεται απ' ευθείας με τον σχετικό ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Το σήμα του αισθητήρα καταγράφεται στον υπολογιστή μέσω ειδικού περιβάλλοντος ανεπτυγμένου στο Labview, όπου επιτρέπεται τόσο η παρακολούθηση του αισθητήρα σε πραγματικό χρόνο, όσο και η αποθήκευση των δεδομένων προς μεταγενέστερη επεξεργασία.

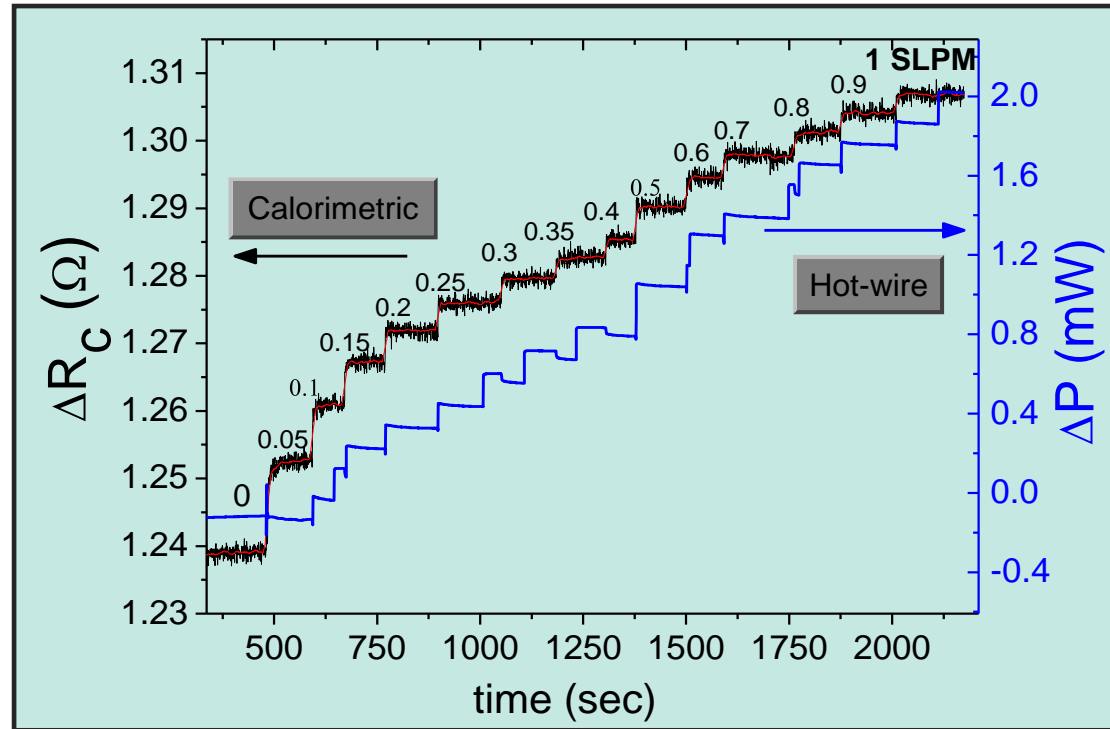


Σχηματική αναπαράσταση της συσκευασίας (packaging) αισθητήρα ροής υγρών. Ο αισθητήρας προσαρμόζεται σε μια ειδική βάση, έτσι ώστε οι αντιστάτες πλατίνες να βρίσκονται πάνω από το ορισμένο -στη βάση- κανάλι ροής. Η στεγανοποίηση του καναλιού επιτυγχάνεται μέσω ειδικού ελαστικού υλικού που προσαρμόζεται στις ειδικές υποδοχές της βάσης (δεν φαίνεται στην εικόνα)

Real Time signal

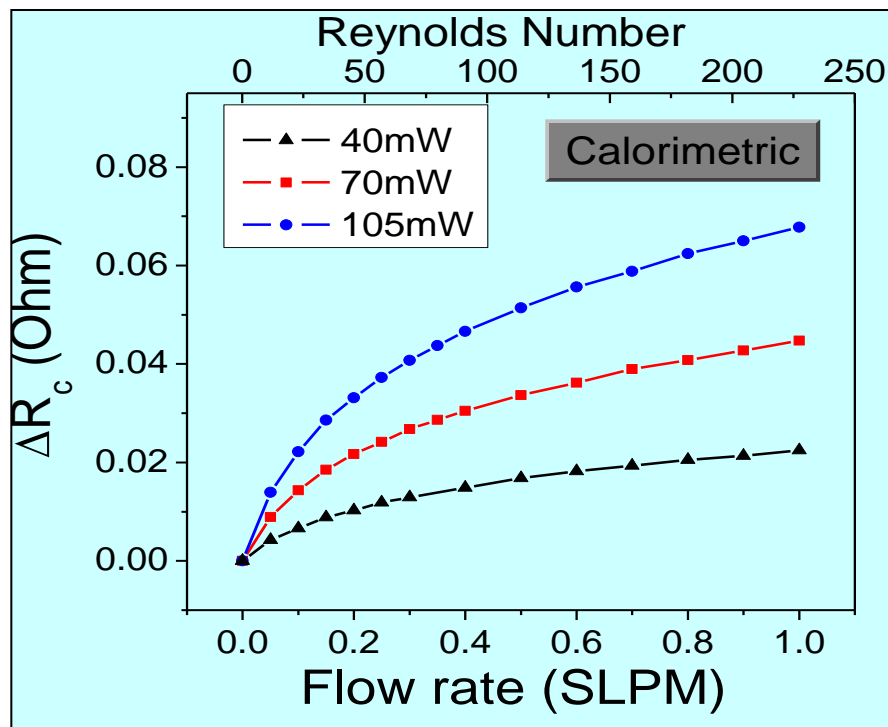
Constant Current Mode

Constant Temperature Mode

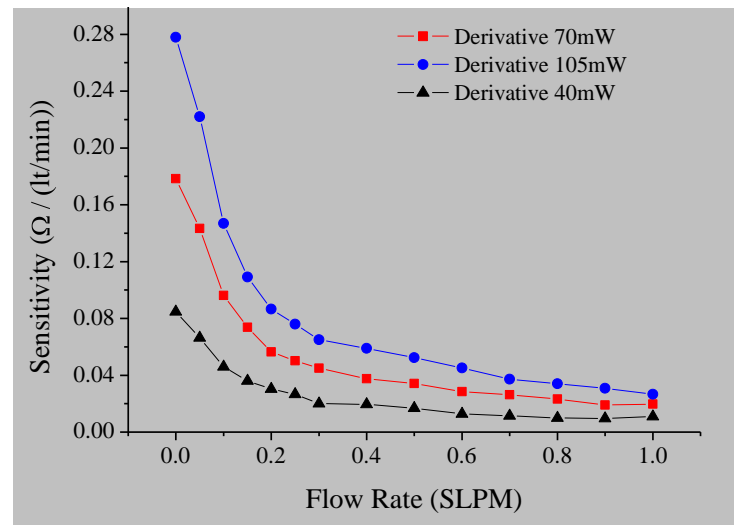


- Ανάλυση
- Signal to Noise Ratio (SNR)

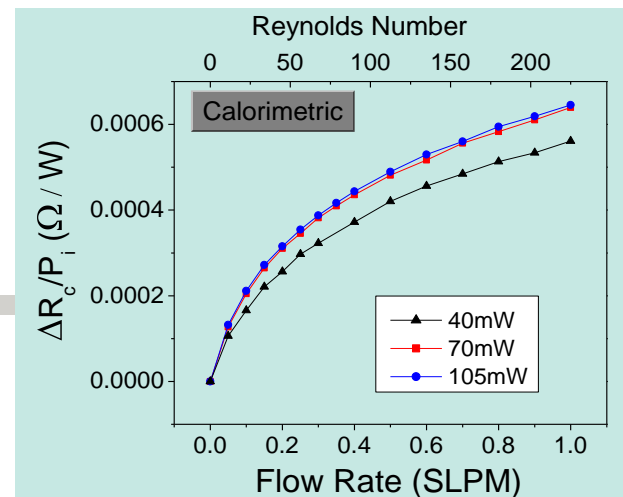
Καμπύλη Βαθμονόμησης



Ευαισθησία

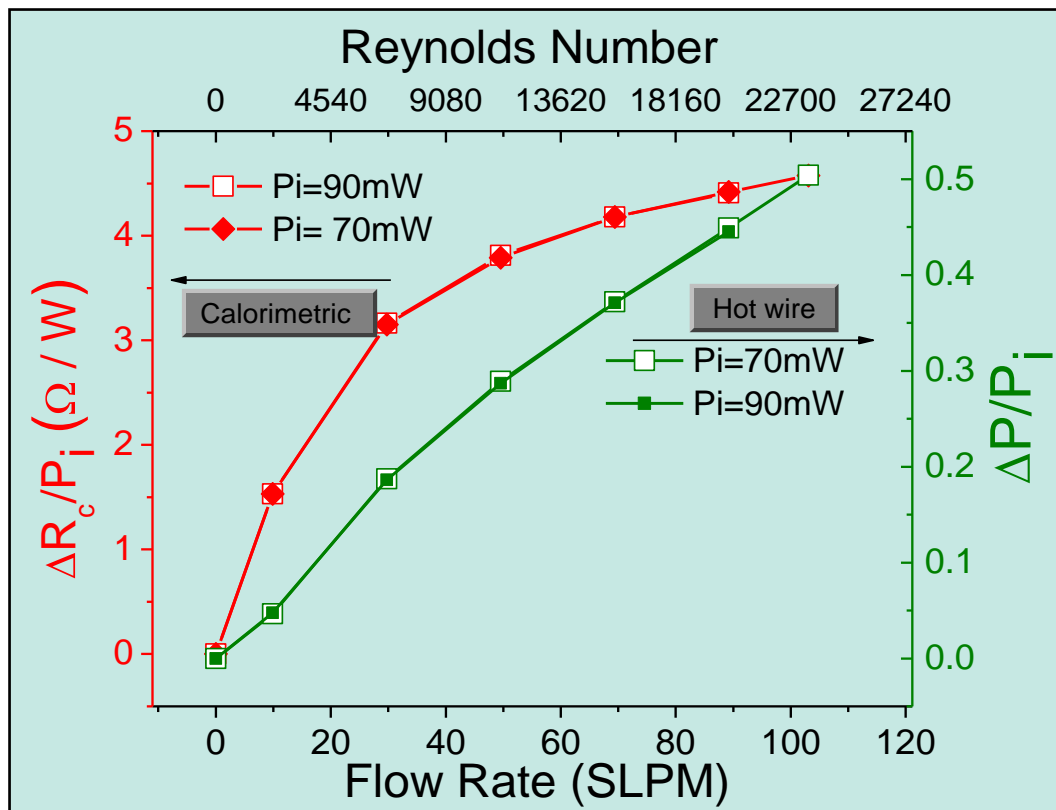


- Ευαισθησία
- Μετρητικό πεδίο



Κανονικοποίηση με αρχική ισχύ

Σύγκριση απόκρισης του αισθητήρα υπό λειτουργία στις αρχές hot-wire και calorimetric



Hot-Wire

Μεγαλύτερο μετρητικό πεδίο

Calorimetric

Δυνατότητα ανίχνευσης μικρότερων ρυθμών ροής
Ανίχνευση φοράς ροής
Ταχύτερη απόκριση

Μικρομηχανικός αισθητήρας ροής βρίσκεται τοποθετημένος σε τοίχωμα σωλήνα.

Α) Έστω επιθυμητό μετρητικό πεδίο $0 - 100 \text{ Lt / min (SLPM)}$. Ποια συνθήκη πρέπει να ισχύει έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένη η σωστή λειτουργία του αισθητήρα στο πεδίο αυτό;

Β) Για παροχή 50 Lt/min να βρεθεί η μέγιστη και η μέση ταχύτητα ροής εντός του σωλήνα.

Γ) Έστω η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα $V(Q) = A_0 + A_1 \cdot Q + A_2 \cdot Q^2 + A_3 \cdot Q^3$ με $A_0 = 2 \text{ mV}$, $A_1 = 5 \text{ mV / (L/min)}$, $A_2 = 2 \text{ mV / (L/min)}^2$, $A_3 = -1 \text{ mV / (L/min)}^3$

i) Ποια η ευαισθησία του αισθητήρα $S(Q)$; Που γίνεται αυτή μέγιστη;

ii) Να ορίσετε το μετρητικό πεδίο του αισθητήρα

Δ) Η απόκριση του αισθητήρα θα είναι ίδια αν τοποθετηθεί σε ενδιάμεσο σημείο του σωλήνα και όχι στο τοίχωμα;

Ε) Έστω ότι μειώνεται η διάμετρος του σωλήνα από $D_1 =$ σε $D_2 = D_1 / 2$. Ποιες θα είναι οι άμεσες επιδράσεις στη μορφή της ροής; (Διατηρείται σταθερή τιμή ρυθμού ροής)

Α) Έστω επιθυμητό μετρητικό πεδίο 0 – 100 lt / min (SLPM). Ποια συνθήκη πρέπει να ισχύει έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένη η σωστή λειτουργία του αισθητήρα στο πεδίο αυτό;

Ομαλή λειτουργία αισθητήρα εννοείται στρωτή ροή η οποία υφίσταται στην περιοχή όπου ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος του 1800.

$$\text{Είναι } Re = \frac{\rho u D}{\mu} < 1800$$

Τα μεγέθη της **πυκνότητας** και του **ιξώδους** έχουν να κάνουν με τη φύση του ρευστού. Για το νερό σε θερμοκρασία ~ 20°C ισχύει $\rho=1000\text{kg/m}^3$ και $\mu= 0.001 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$.

$$\text{Είναι } \frac{\rho u D}{\mu} = \left(\frac{1000 \text{ Kgr} / \text{m}^3}{0.001 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2} \right) \cdot u D = 10^6 \cdot u D \left(\frac{\text{Kgr} / \text{m}}{\text{Kgr} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{s}} \right) = 10^6 \cdot u D \left(\frac{1}{\frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \right)$$

Με λίγο προσοχή φαίνεται ότι οι μονάδες είναι «σωστές». Ο αριθμός Re είναι αδιάστατος, ενώ το μέγεθος $u \cdot D$ έχει μονάδες m^2/s .

$$\text{Τελικά από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι: } u D < 1.8 \cdot 10^{-3} \quad (1.1)$$

$$\text{Το μετρητικό πεδίο είναι 0-10 lt/min, άρα } Q_{\max} = 100 \frac{10^{-3} \text{ m}^3}{60 \text{ s}} = 1.67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\text{Γενικά όμως για το ρυθμό ροής ισχύει: } Q = u \cdot A \Rightarrow u = \frac{Q}{\pi \cdot r^2}$$

$$\text{Αντικαθιστώντας στην (1.1) } \frac{Q}{\pi \cdot r^2} \cdot 2r < 1.8 \cdot 10^{-3} \quad \text{Για } Q=Q_{\max} \text{ παίρνουμε } r > 0.59 \text{ m}$$

Άρα η τελική συνθήκη για να έχουμε στρωτή ροή είναι η ακτίνα του σωλήνα να είναι τουλάχιστον ~59cm.

B) Για παροχή 50 Lt/min να βρεθεί η μέγιστη και η μέση ταχύτητα ροής εντός του σωλήνα.

Εντός του σωλήνα, για μια πλήρως ανεπτυγμένη ροή, η κατανομή ταχυτήτων δίνεται από τον τύπο: $u(r) = 2u_{avg} \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right]$ (1.2)

με u_{avg} τη μέση ταχύτητα που συνδέεται με το ρυθμό ροής μέσω του τύπου: $Q = \frac{V}{t} = A \cdot u_{avg}$

Οπότε

$$u_{avg} = \frac{Q}{A} = \frac{50 \text{ lt} / \text{min}}{\pi r^2} = \frac{8.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}}{3.14 \cdot (0.10 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}^2} = 2.6 \text{ m} / \text{s}$$

Στη συνέχεια, ένας τρόπος για να υπολογιστεί η μέγιστη ταχύτητα του ρευστού είναι να βρούμε που έχει τη μέγιστη ταχύτητά της η ροή, και να βάλουμε αυτή την τιμή του r στην σχέση (1.2).

Για να βρεθεί το μέγιστο της (1.2), υπολογίζεται η παράγωγός της και στη συνέχεια το που μηδενίζεται:

$$\frac{du(r)}{dr} = \frac{-4u_{avg}r}{r_o^2}$$

Η οποία προφανώς έχει τιμή μηδέν για $r=0$, ενώ είναι θετική πριν και αρνητική μετά από αυτό. Οπότε αντικαθιστώντας στην (1.2) προκύπτει:

$$u_{\max}(r=0) = 2u_{avg} = 5.2 \text{ m} / \text{s}$$

Γ) Έστω η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα $V(Q) = A_0 + A_1 \cdot Q + A_2 \cdot Q^2 + A_3 \cdot Q^3$ με $A_0 = 2 \text{ mV}$, $A_1 = 5 \text{ mV / (L/min)}$, $A_2 = 2 \text{ mV / (L/min)}^2$, $A_3 = -1 \text{ mV / (L/min)}^3$

- Ποια η ευαισθησία του αισθητήρα $S(Q)$; Που γίνεται αυτή μέγιστη;
- Να ορίσετε το μετρητικό πεδίο του αισθητήρα

i) Για την ευαισθησία του αισθητήρα :

$$S(Q) = \frac{dV}{dQ} = 5 + 4Q - 3Q^2$$

Για να βρεθεί το ακρότατο, υπολογίζεται η παράγωγος αυτής:

$$\frac{dS}{dQ} = \frac{d^2V}{dQ^2} = 4 - 6Q$$

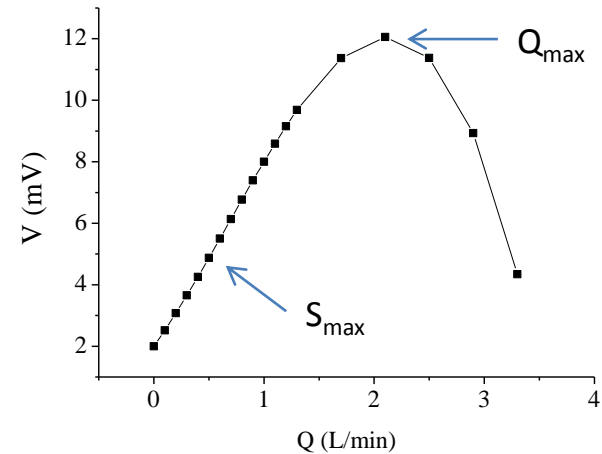
Η συνάρτηση αυτή είναι θετική για $Q < (4/6)$ και αρνητική για $Q > (4/6)$. Αντίστοιχα η S είναι αύξουσα στο $0 < Q < (4/6)$ και φθίνουσα για $Q > (4/6)$.

Στο σημείο $Q=4/6$ βρίσκεται το μέγιστο της συνάρτησης $S(Q)$ το οποίο είναι

$$S\left(\frac{4}{6}\right) = 9 \frac{\text{mV}}{(\text{L/min})}$$

ii) Ένας τρόπος ορισμού του μετρητικού πεδίου, είναι να ληφθεί η ως μέγιστη τιμή του μετρούμενου μεγέθους αυτή όπου πλέον σταματάει να ισχύει η σχέση 1-1 μεταξύ του μετρούμενου μεγέθους και της απόκρισης του αισθητήρα.

Εκεί δηλαδή όπου $S(Q_{\max}) = 0 \Rightarrow Q_{\max} = 2.1 \frac{\text{L}}{\text{min}}$

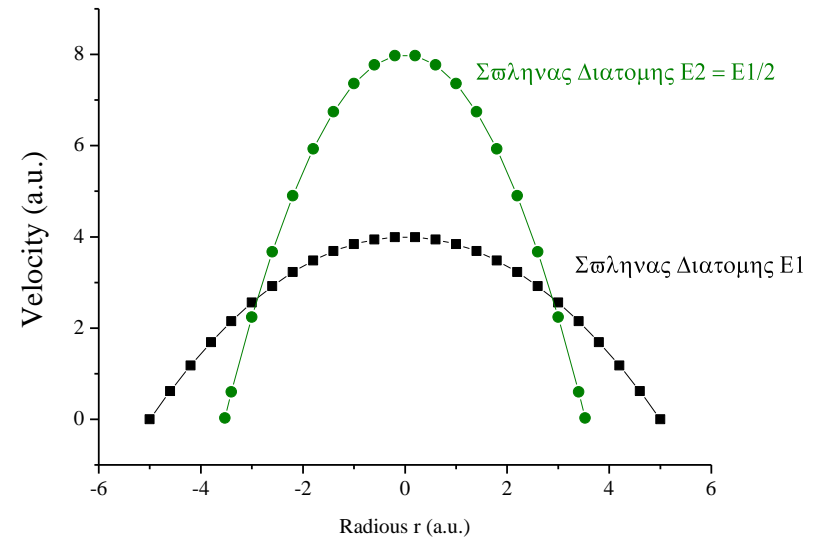


Δ) Η απόκριση του αισθητήρα θα είναι ίδια αν τοποθετηθεί σε ενδιάμεσο σημείο του σωλήνα και όχι στο τοίχωμα;

Εντός του σωλήνα, η κατανομή των ταχυτήτων ακολουθεί παραβολικό προφίλ

$$u(r) = 2u_{avg} \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \quad (1.2)$$

Τοποθετώντας τον αισθητήρα σε ενδιάμεσο σημείο και όχι στο τοίχωμα, σημαίνει ότι ο αισθητήρας θα εκτίθεται σε πολύ μεγαλύτερο πεδίο ταχυτήτων. Κατά συνέπεια η συνάρτηση μεταφοράς που δόθηκε πριν παύει να ισχύει, ενώ για την εύρεση της καινούριας συνάρτησης θα πρέπει να ξαναγίνει η διαδικασία της **βαθμονόμησης**.



Αν η συνάρτηση μεταφοράς δίνεται με όρισμα την ταχύτητα u αντί για το ρυθμό ροής Q , τότε:

- Αν ο αισθητήρας είναι σε συγκεκριμένη απόσταση από το κέντρο (r_1), τότε αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στην (1.2), προκύπτει μια τιμή ταχύτητας $u(r_1)$. Στη συνέχεια αυτή η τιμή μπορεί να εισέρθει στην συνάρτηση μεταφοράς για αν υπολογιστεί η τιμή της εξόδου V (σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας μια τέτοια προσέγγιση δεν θα έδινε ακριβή αποτελέσματα).
- Αν μεταβληθεί η διατομή ενός σωλήνα, για σταθερό ρυθμό ροής η μέση τιμή της ταχύτητας δεν παραμένει η ίδια.

Ε) Έστω ότι μειώνεται η διάμετρος του σωλήνα από D_1 σε $D_2 = D_1 / 2$. Ποιες θα είναι οι άμεσες επιδράσεις στη μορφή της ροής; (Διατηρείται σταθερή τιμή ρυθμού ροής)

Γενικά, μεταβάλλοντας την επιφάνεια της διατομής του σωλήνα, συνεπάγεται μεταβολή της ταχύτητας, εφόσον ο ρυθμός ροής παραμένει σταθερός.

$$u(r) = 2u_{avg} \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right]$$

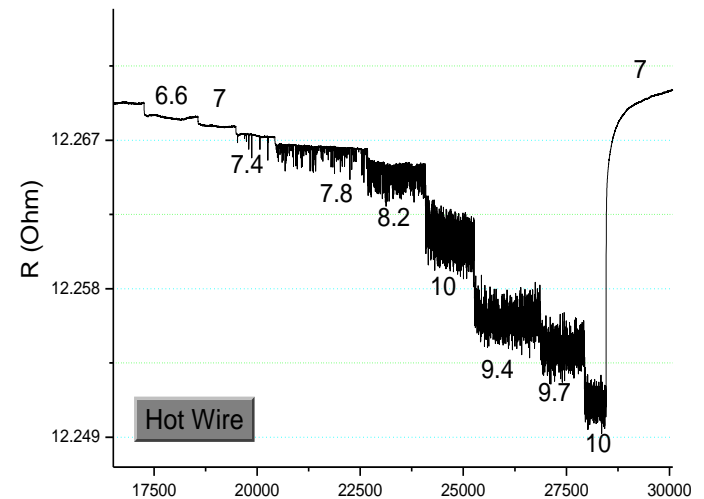
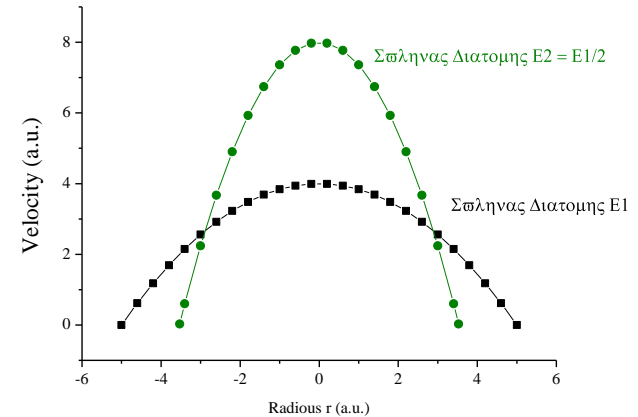
Ισχύει ότι η μέση ταχύτητα του ρευστού εντός ενός σωλήνα, είναι το μισό της μέγιστης. Ισχύει δηλαδή:

$$u_{max} = 2u_{avg}$$

Με τη u_{max} να βρίσκεται στο μέσο του σωλήνα. Υπενθυμίζεται ότι για τη μέση ταχύτητα ισχύει:

$$u_{avg} = \frac{1}{A} \int_A u dA$$

$$u_{avg} = \frac{1}{\pi r_o^2} \int_0^{r_o} \int_0^{2\pi} u(r) r dr d\theta$$



Η επίδραση της τύρβης στο σήμα του αισθητήρα σε πραγματικό χρόνο (λειτουργία θερμού νήματος). Παρατηρείται ότι αυξάνεται διαδοχικά το επίπεδο θορύβου για αυξανόμενες τιμές του ρυθμού ροής (σε SLPM)

Ε) Έστω ότι μειώνεται η διάμετρος του σωλήνα από D_1 σε $D_2 = D_1 / 2$. Ποιες θα είναι οι άμεσες επιδράσεις στη μορφή της ροής; (Διατηρείται σταθερή τιμή ρυθμού ροής)

Για την μελέτη της επίδρασης της μείωσης της διαμέτρου από D_1 σε $D_2 = D_1 / 2$, αναζητείται η επίδραση στον αριθμό Reynolds:

$$Re_2 = \frac{\rho u_{avg,2} D_2}{\mu}$$

Πέρα από την μείωση της διαμέτρου, διαφοροποιείται και η ταχύτητα. Από τη στιγμή που ο ρυθμός ροής Q παραμένει αμετάβλητος, ισχύει

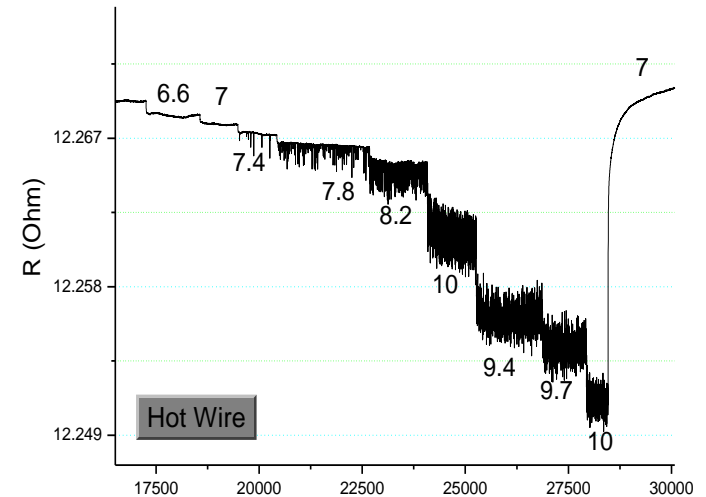
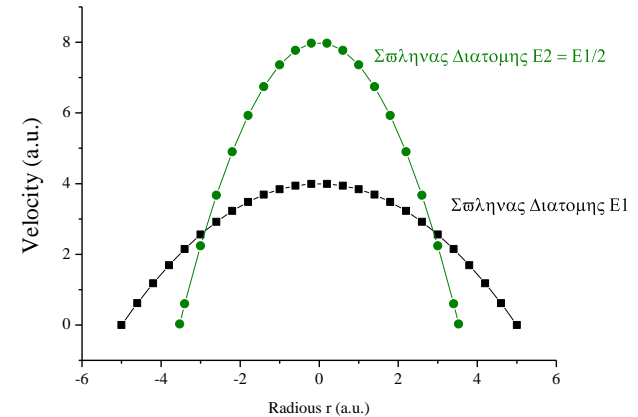
$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow E_1 u_{avg,1} = E_2 u_{avg,2} \Rightarrow u_{avg,2} = \frac{E_1 u_{avg,1}}{E_2}$$

$$u_{avg,2} = \frac{E_1 u_{avg,1}}{E_2} = 4 u_{avg,1}$$

Άρα ο αριθμός Reynolds γίνεται

$$Re_2 = 2 Re_1$$

Άρα με τη μείωση της διαμέτρου, αυξάνεται ο Re , άρα ενισχύεται η τυρβώδης συμπεριφορά της ροής.



Η επίδραση της τύρβης στο σήμα του αισθητήρα σε πραγματικό χρόνο (λειτουργία θερμού νήματος). Παρατηρείται ότι αυξάνεται διαδοχικά το επίπεδο θορύβου για αυξανόμενες τιμές του ρυθμού ροής (σε SLPM)