



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΠΜΣ: Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις
Σ.Ε.Μ.Φ.Ε

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

<<Πειραματική μελέτη της ροής αερίων σε μικροκανάλια στην αρχή της μεταβατικής περιοχής>>



ΚΑΠΑΡΙΑΝΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

| | |
|---|------------|
| Περίληψη..... | 3 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή..... | 4 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση παρόμοιων εργασιών..... | 6 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η πειραματική διάταξη..... | 27 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για κάθε διάταξη μικροκαναλιών..... | 32 |
| 4.1.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr4 πλάτους 286,78μm, ύψους 18,27 μm, εργαζόμενο μέσο He..... | 33 |
| 4.1.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr4 πλάτους 286,78μm, ύψους 18,27 μm, εργαζόμενο μέσο Ar..... | 41 |
| 4.1.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr4 πλάτους 286,78μm, ύψους 18,27 μm, εργαζόμενο μέσο Αέρας..... | 48 |
| 4.2.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr1 πλάτους 283,91 μm, ύψους 22,17 μm, εργαζόμενο μέσο He..... | 53 |
| 4.2.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr1 πλάτους 283,91 μm, ύψους 22,17 μm, εργαζόμενο μέσο Ar..... | 58 |
| 4.2.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr1 πλάτους 283,91 μm, ύψους 22,17 μm, εργαζόμενο μέσο Αέρας..... | 63 |
| 4.3.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr 2 πλάτους 285,85 μm, ύψους 19,03 μm, εργαζόμενο μέσο He..... | 68 |
| 4.3.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr 2 πλάτους 285,85 μm, ύψους 19,03 μm, εργαζόμενο μέσο Ar..... | 73 |
| 4.3.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr 2 πλάτους 285,85 μm, ύψους 19,03 μm, εργαζόμενο μέσο Αέρας..... | 78 |
| 4.4.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 2 πλάτους 283,88 μm, ύψους 31,72 μm, εργαζόμενο μέσο He..... | 83 |
| 4.4.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 2 πλάτους 283,88 μm, ύψους 31,72 μm, εργαζόμενο μέσο Ar..... | 90 |
| 4.4.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 2 πλάτους 283,88 μm, ύψους 31,72 μm, εργαζόμενο μέσο Αέρας..... | 97 |
| 4.5.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 3 πλάτους 282,55 μm, ύψους 29,63 μm, εργαζόμενο μέσο He..... | 102 |
| 4.5.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 3 πλάτους 282,55 μm, ύψους 29,63 μm, εργαζόμενο μέσο Ar..... | 107 |

| | |
|---|-----|
| 4.5.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 3 πλάτους 282,55 μm, ύψους 29,63 μm, εργαζόμενο μέσο Αέρας..... | 112 |
| 4.6.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 4 πλάτους 282,35 μm, ύψους 29,91 μm, εργαζόμενο μέσο He..... | 117 |
| 4.6.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 4 πλάτους 282,35 μm, ύψους 29,91 μm, εργαζόμενο μέσο Ar..... | 122 |
| 4.6.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 4 πλάτους 282,35 μm, ύψους 29,91 μm, εργαζόμενο μέσο Αέρας..... | 127 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων συγκεντρωτικά.....

| | |
|---|-----|
| 5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το κάθε μικροκανάλι..... | 132 |
| 5.1.1: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr4 πλάτους 286,78μm, ύψους 18,27 μm..... | 132 |
| 5.1.2: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr1 πλάτους 283,91μm, ύψους 22,17 μm..... | 135 |
| 5.1.3: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr2 πλάτους 285,85 μm, ύψους 19,03 μm..... | 137 |
| 5.1.4: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr2 πλάτους 283,88 μm, ύψους 31,72 μm..... | 139 |
| 5.1.5: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr3 πλάτους 282,55 μm, ύψους 29,63 μm..... | 141 |
| 5.1.6: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr4 πλάτους 282,35 μm, ύψους 29,91 μm..... | 143 |
| 5.2: Σύγκριση των μικροκαναλιών..... | 145 |
| 5.2.1.a: 55-0045-01 Nr1, 55-0045-01 Nr2, 55-0045-01 Nr4 για He..... | 145 |
| 5.2.1.b: 55-0045-01 Nr1, 55-0045-01 Nr2, 55-0045-01 Nr4 για Ar..... | 146 |
| 5.2.1.c: 55-0045-01 Nr1, 55-0045-01 Nr2, 55-0045-01 Nr4 για Αέρα... | 148 |
| 5.2.2.a: 55-0045-02 Nr2, 55-0045-02 Nr3, 55-0045-02 Nr4 για He..... | 150 |
| 5.2.2.b: 55-0045-02 Nr2, 55-0045-02 Nr3, 55-0045-02 Nr4 για Ar..... | 151 |
| 5.2.2.c: 55-0045-02 Nr2, 55-0045-02 Nr3, 55-0045-02 Nr4 για Αέρα... | 153 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Σχόλια – Συμπεράσματα.....

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....

Περίληψη:

Πειραματική μελέτη της ροής αερίων σε μικροκανάλια στην αρχή της μεταβατικής περιοχής

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκε η ροή των αερίων ηλίου, αργού και αέρα σε διατάξεις μικροκαναλιών. Οι διατάξεις αυτές είναι κατασκευασμένες από PMMA και αποτελούνται από οκτώ κανάλια η κάθε μια που έχουν μήκος 5000 μm , πλάτος 285 μm και βάθος 20 μm και 30 μm . Η ροή των αερίων δημιουργήθηκε λόγω διαφοράς πίεσης μεταξύ δυο δεξαμενών και οι τιμές του αριθμού Knudsen κυμάνθηκαν από 0,2 έως 1,69 δηλαδή στην περιοχή ολίσθησης και στην αρχή της μεταβατικής περιοχής της ροής. Η παροχή μάζας μετρήθηκε μέσω των πιέσεων των δεξαμενών και συγκρίθηκε με θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη λύση της γραμμικοποιημένης εξίσωσης BGK. Η απόκλιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων αποδίδεται κυρίως σε διαρροές και ανακριβή μέτρηση των διαστάσεων των καναλιών και του όγκου των δεξαμενών.

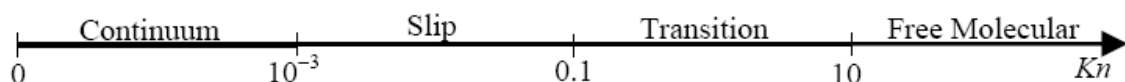
Abstract:

Experimental study of gas flow through micro channels in the early transition regime

The flow of three gases, helium, argon and air through micro channels is examined experimentally in this study. The channels are made from PMMA and were 5000 μm long, with depths of 20 μm and 30 μm and width of 285. The cause of the flow was the pressure difference of the two tanks and Knudsen number varied from 0,2 to 1,69 (slip and early transition flow regimes). The mass flow rate was based on the pressure at the channels inlet and it was compared to computational results obtained by solving the linearized BGK equation. Differences between theory and experiment are primarily attributed to mass leak and uncertainties with regard to channel dimensions and tank volume.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια οι ολοένα και αυξανόμενες εφαρμογές των MEMS και η ανάπτυξη της τεχνολογίας κενού και διαστήματος έχουν επιφέρει ανάλογη αύξηση του ενδιαφέροντος για τη ροή αερίων σε μικροκανάλια. Η θεωρία του συνεχούς μέσου αποτυγχάνει να προβλέψει την συμπεριφορά της ροής αερίου όταν οι διαστάσεις των αγωγών μειωθούν πάρα πολύ ή ισοδύναμα όταν ο αριθμός Knudsen (λόγος της ελεύθερης διαδρομής των μορίων προς μια χαρακτηριστική διάσταση του καναλιού, συνήθως βάθος) αυξηθεί πάνω από την τιμή 0,01.



Σχήμα 1. 1: Περιοχές της ροής (Flow of Rarefied Gases, Princeton: University Press. Schaaf, S.A. & P.L. Chambre, 1961)

| Kn | Model |
|---|--|
| $\rightarrow 0$ (continuum, without molecular diffusion) | Euler equations |
| $\leq 10^{-3}$ (continuum, with molecular diffusion) | Navier-Stokes equations with no-slip wall boundary conditions |
| $10^{-3} < Kn \leq 0.1$ (continuum transition) | Navier-Stokes equations with 1 st order slip boundary conditions at wall |
| $0.1 < Kn \leq 10$ (transition) | Burnett equations with higher order slip boundary conditions at wall; Moment equations; DSMC; Lattice Boltzmann |
| $Kn > 10$ (free molecular) | Collision-less Boltzmann equations; DSMC; Lattice Boltzmann |

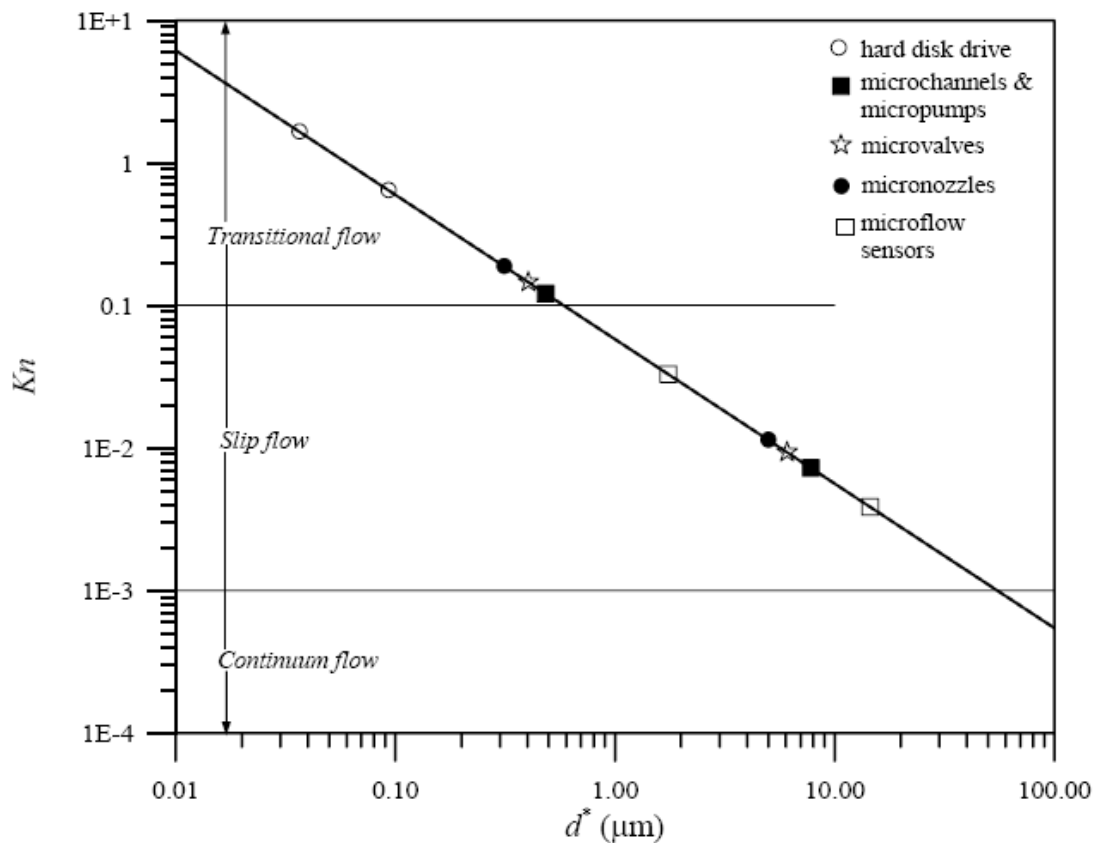
Πίνακας 1. 1: Κατηγοριοποίηση των περιοχών της ροής με βάση τη μέθοδο επίλυσης (Gad-el-Hak, M. 1999 “The fluid mechanics of microdevices – The Freeman scholar lecture,” ASME Journal of Fluids Engineering, vol. 121, no. 1, pp. 6-33.).

Οι περιοχές της ροής βασισμένες στην τιμή του αριθμού Knudsen φαίνονται στο σχήμα 1.1. Για $Kn \rightarrow 0$ το ρευστό θεωρείται συνεχές και η ροή μοντελοποιείται από τις εξισώσεις Euler. Για τιμές του αριθμού Knudsen μικρότερες από 10^{-3} το ρευστό θεωρείται συνεχές μέσο και για η επίλυση της ροής γίνεται με τις εξισώσεις Navier – Stokes. Όταν ο αριθμός Knudsen παίρνει τιμές στο διάστημα από 10^{-3} έως 10 η ροή βρίσκεται σε μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ συνεχούς μέσου και ελεύθερης μοριακής ροής. Για τιμές του αριθμού Knudsen από 10^{-3} έως 0,1 είναι αναγκαία η εισαγωγή οριακής συνθήκης ολίσθησης στις εξισώσεις Navier – Stokes γιατί σε

αυτήν την περιοχή της ροής, η οποία ονομάζεται περιοχή ολίσθησης, τα μόρια του ρευστού που βρίσκονται σε επαφή με το τοίχωμα έχουν μη μηδενική ταχύτητα. Τέλος όταν ο αριθμός Knudsen λαμβάνει τιμές στην μεταβατική περιοχή ($0,1 < Kn < 10$) η ροή μοντελοποιείται από τις εξισώσεις Burnett με 2^{ης} τάξης οριακές συνθήκες ή από τη μέθοδο άμεσης προσομοίωσης Monte Carlo (DSMC). Για $Kn > 10$ τα μόρια του αερίου συγκρούονται πιο συχνά με τα τοιχώματα παρά μεταξύ τους συνεπώς η ροή μπορεί να θεωρηθεί ελεύθερη μοριακή και μοντελοποιείται από την εξίσωση Boltzmann.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο διαχωρισμός της ροής στις παραπάνω περιοχές έγινε με βάση εμπειρικά δεδομένα, γι' αυτό και τα όρια μεταξύ των περιοχών δεν είναι απόλυτα, αλλά εξαρτώνται συχνά από την εκάστοτε γεωμετρία και γενικότερα τις συνθήκες που επικρατούν.

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει σε ποιές περιοχές της ροής εμπίπτουν διάφορα μικρορευστομηχανικά συστήματα. Βλέπουμε πως πολλές σημαντικές εφαρμογές βρίσκονται στην περιοχή ολίσθησης και στη μεταβατική περιοχή οπότε είναι σημαντικό να διερευνηθεί η συμπεριφορά της ροής σε αυτές τις περιοχές.



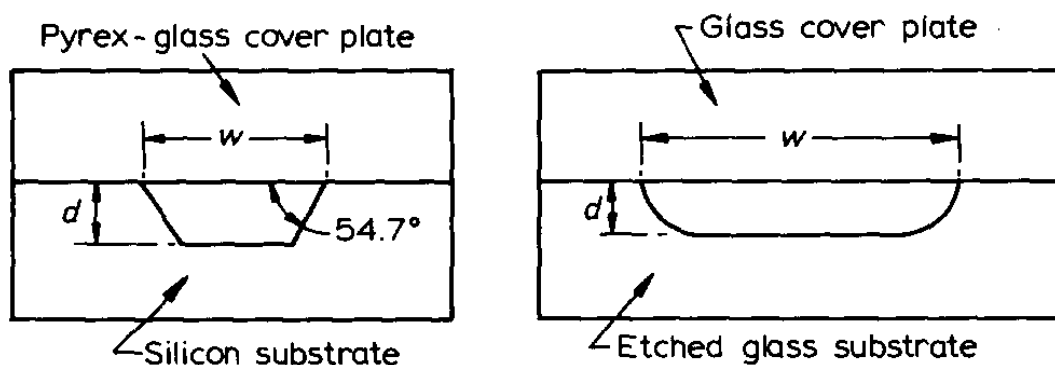
Σχήμα 1. 2: Χαρακτηριστικά μήκη μικρορευστομηχανικών συστημάτων (Karniadakis, G.E. & A. Beskok, 2002 Microflows: Fundamentals and Simulation. New York: Springer-Verlag Inc.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΑΡΟΜΟΙΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

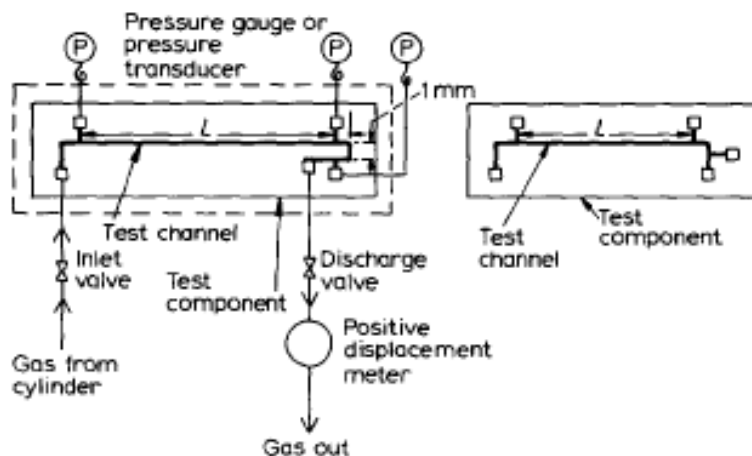
Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule-Thomson refrigerators (1983)

Wu Peiyi and W.A. Little

Το 1983 οι Peiyi και Little μέτρησαν το συντελεστή τριβής για ροή αερίων σε μικροκανάλια πλάτους από 130 έως 200 μm και βάθους από 30 έως 60 μm . Το σχήμα των καναλιών φαίνεται στο σχήμα 1. Για την κατασκευή των μικροκαναλιών χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές της λιθογραφίας και εγχάραξης σε υποστρώματα πυριτίου και γυαλιού.



Σχήμα 2.1: Διατομή των μικροκαναλιών που χρησιμοποίησαν οι Peiyi και Little



Σχήμα 2.2: Σχεδιάγραμμα της πειραματικής διάταξης

Οι διαστάσεις των καναλιών μετρήθηκαν με τη βοήθεια μικροσκοπίου με ενσωματωμένο μικρόμετρο και φαίνονται στον πίνακα 1.

Table 1. The test channels

| No | Substrate | ω, μ | d, μ | L, mn | D_h, μ | Surface conditions of channel | Tested gases | Bend condition |
|------|-----------|---------------|----------|----------------|------------|--|----------------|------------------|
| S(1) | silicon | 136 | 41 | 7.6 | 55.81 | smooth except a few discrete protuberances | N_2, H_2, Ar | 90° bend |
| S(2) | silicon | 144.6 | 39.6 | 40.3 | 55.92 | a part of the channel surface is rough | N_2 | 180° bend |
| S(3) | silicon | 146 | 65 | 7.6 | 72.38 | smooth | N_2, H_2 | 90° bend |
| G(1) | glass | 133 | 28 | 30.3 | 45.46 | the groove is etched by abrasion, a cover plate is bonded with lens adhesive NO A61 | N_2 | 90° bend |
| G(2) | glass | 149 | 63 | 30.3 | 83.08 | as above | N_2, H_2 | 90° bend |
| G(3) | glass | 188 | 46 | 40.3 | 72.25 | heating the etched glass piece at 500°C for 4 h before bonding with NO A61 | N_2 | 180° bend |
| G(4) | glass | 200 | 46 | 40.3 | 73.30 | heating the etched glass piece at 625°C for 30 min before bonding with NO A61 | N_2 | 180° bend |
| G(5) | glass | 195 | 48 | 7.6 | 75.28 | a glass cover plate coated with a thin film of low melting point glass is bonded to the etched glass piece at 630°C for 30 min | N_2, H_2 | 90° bend |

Πίνακας 2.1: Διαστάσεις μικροκαναλιών που χρησιμοποιήθηκαν

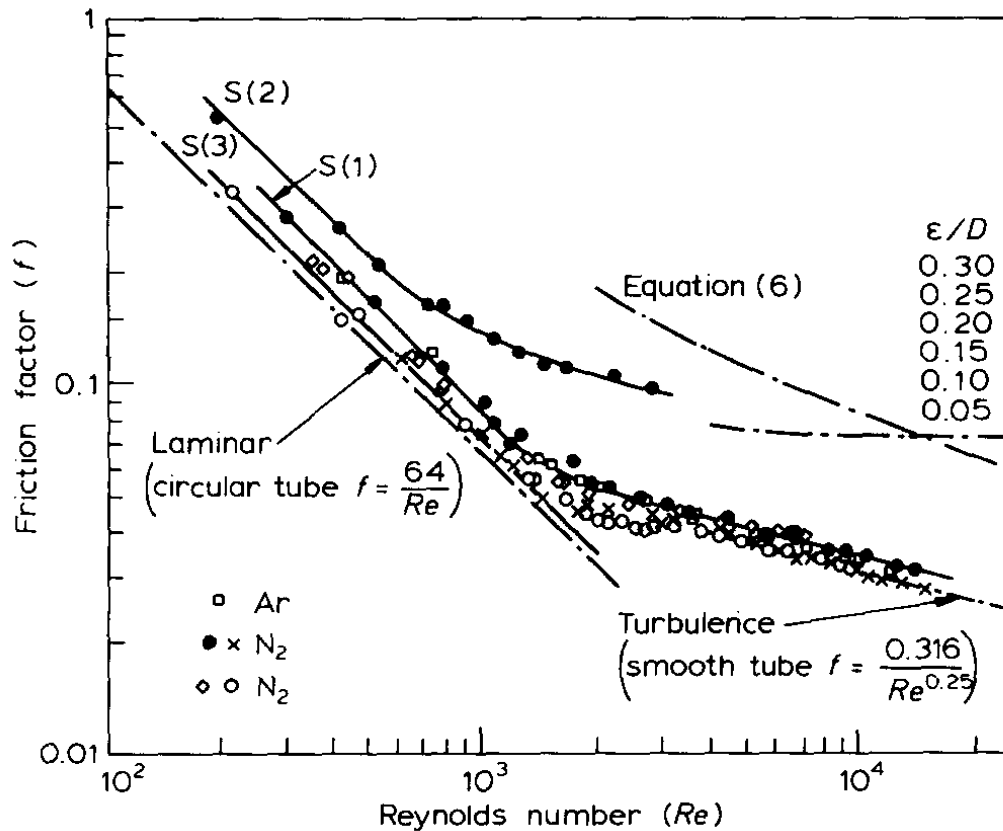
Αποτελέσματα

Για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής χρησιμοποιήσαν τη σχέση:

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1} = \frac{1}{2} G^2 \frac{RT_m}{p_1^2} \left[f \frac{L}{D_h} \frac{p_1}{p_m} + 2 \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right) \right]$$

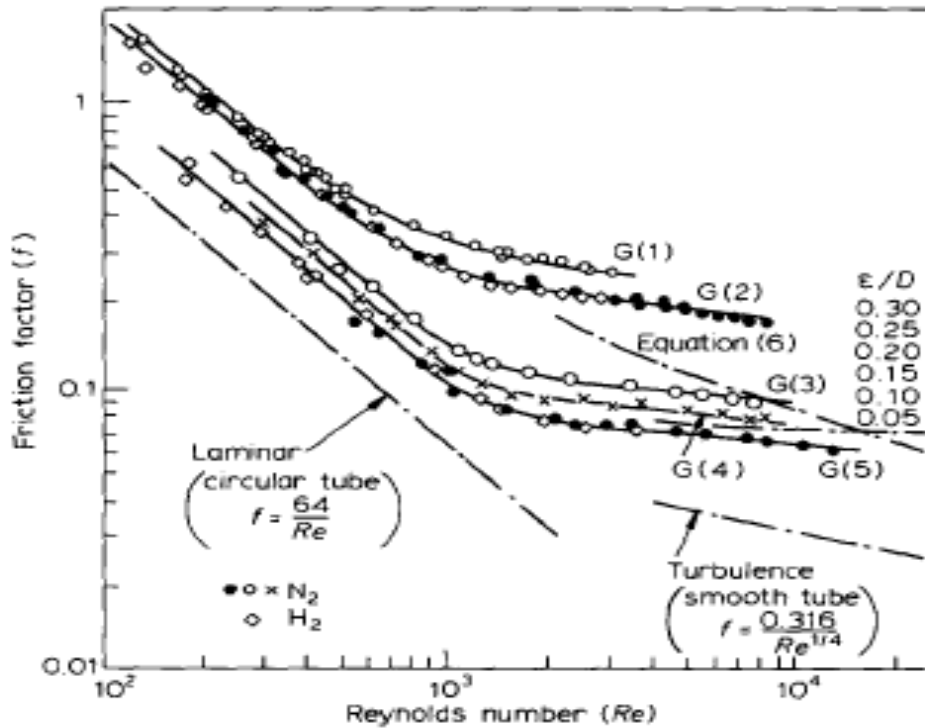
η οποία προκύπτει από το θεώρημα της ορμής σε συνδυασμό με τον νόμο τέλειων αερίων.

Στο σχήμα 3 βλέπουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα μικροκανάλια από πυρίτιο. Η διακεκομμένη γραμμή είναι από το διάγραμμα Moody και έχει συμπεριληφθεί στο σχήμα 3 για συγκρίσεις. Το κανάλι S(3) έχει λεία επιφάνεια και οι μετρήσεις για αυτό συμφωνούν σχεδόν απόλυτα με το διάγραμμα Moody. Η επιφάνεια του καναλιού S(1) είναι κι αυτή εν γένει λεία όμως υπάρχουν κάποιες προεξοχές στον πάτο του καναλιού που δυσχεραίνουν τη ροή. Ο συντελεστής τριβής για το S(1) βρέθηκε κατά 10% μεγαλύτερος στην περιοχή τυρβώδους ροής και κατά 30 % μεγαλύτερος στην περιοχή στρωτής ροής από το συντελεστή τριβής αντίστοιχου λείου σωλήνα. Το κανάλι S(2) έχει ένα τραχύ τμήμα σε ένα μέρος της επιφάνειας του το οποίο προέρχεται από οξείδωση της επιφάνειας κατά την εγχάραξη. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για αυτά τα τρία κανάλια οι Peiyi και Little συμπέραναν ότι η τραχύτητα παίζει σημαντικό ρόλο στη ροή σε μικροκανάλια



Σχήμα 2.3: Συντελεστής τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds για τα μικροканάλια πυριτίου

Αντίστοιχα το σχήμα 4 απεικονίζει τα αποτελέσματα για τα κανάλια από γυαλί τα οποία έχουν τραχύτερες επιφάνειες από τα κανάλια πυριτίου. Για τα κανάλια G(1) και G(2) ο συντελεστής τριβής βρέθηκε 3 με 3,5 φορές μεγαλύτερος στην περιοχή στρωτής ροής και 4 με 5 φορές μεγαλύτερος στην περιοχή τυρβώδους ροής από το συντελεστή τριβής λείου σωλήνα. Επίσης βρήκαν ότι η μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή λαμβάνει χώρα για $Re = 400$.



Σχήμα 2.4: Συντελεστής τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds για τα μικροκανάλια γαλιού

Συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν την εργασία είναι τα εξής:

Η τιμή του συντελεστή τριβής στα μικροκανάλια εξαρτάται από τη μέθοδο εγχάραξης και τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την ένωση των τμημάτων από τα οποία αποτελούνται τα κανάλια αφού αυτές οι διεργασίες καθορίζουν την τραχύτητα των επιφανειών. Επίσης η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή συμβαίνει για μικρότερο αριθμό Reynolds στα τραχύτερα κανάλια .

Gas flow in micro-channels (1993)

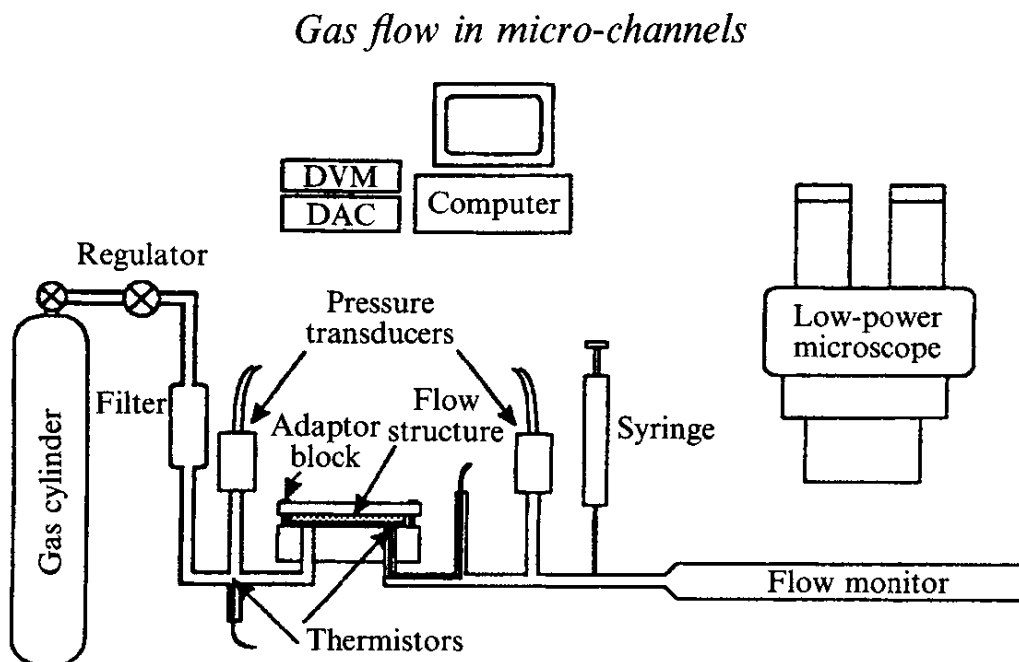
John C. Harley, Yufeng Huang, Haim H. Bau and Jay N. Zemel

Η εργασία των Harley et al. περιλαμβάνει πειραματική και θεωρητική μελέτη ροής αερίων μέσω μικροκαναλιών. Χαρακτηριστικά της ροής που μελέτησαν ήταν ο μικρός αριθμός Reynolds, αριθμός Mach λίγο μικρότερος του 1 και το εύρος του αριθμού Knudsen ήταν από 0,001 έως 0,4. Τα αέρια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν άζωτο, ήλιο και αργόν και τα κανάλια κατασκευάστηκαν από πυρίτιο. Οι διαστάσεις τους είναι 100μm πλάτος, 10000 μm μήκος και βάθος από 0,5 έως 20 μm και φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 2.

Το πείραμά τους περιλάμβανε τη μέτρηση της πτώσης πίεσης για τη ροή των αερίων που προαναφέρθηκαν μέσω μικροκαναλιών. Για την εύρεση του συντελεστή τριβής βρέθηκε πρώτα το προφίλ ταχύτητας με τη προσέγγιση τοπικά πλήρως αναπτυγμένης ροής.

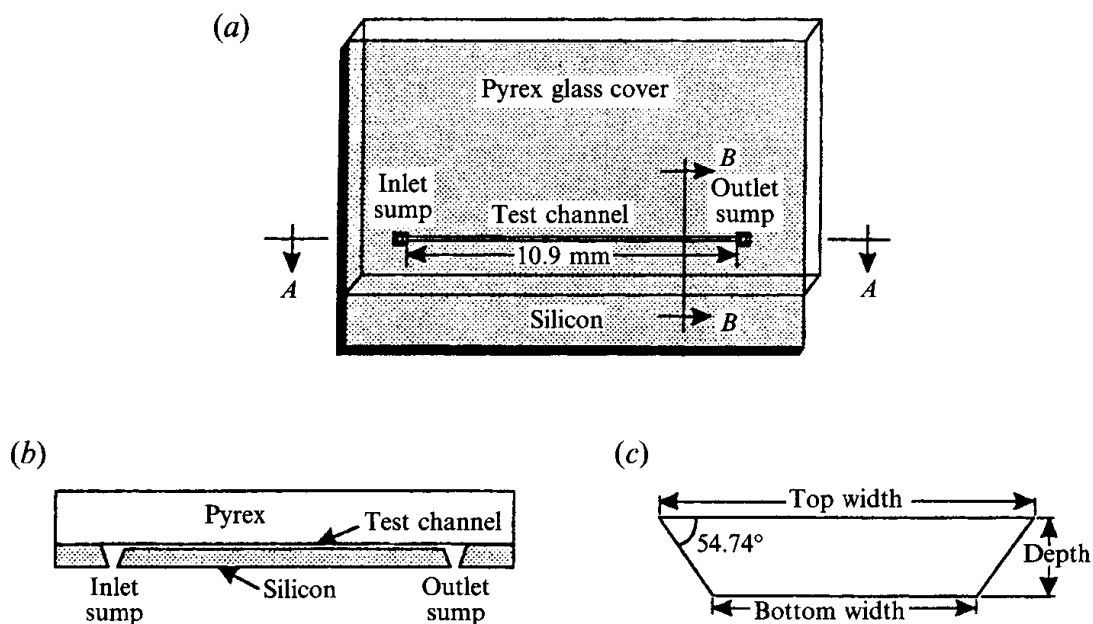
Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήσαν φαίνεται στο σχήμα 5.



Σχήμα 2.5: Σχεδιάγραμμα της πειραματικής διάταξης των Harley et al.

Τα μικροκανάλια κατασκευάστηκαν με λιθογραφία και ανισοτροπική εγχάραξη με διάλυμα KOH (η οποία δίνει διατομή σχήματος τραπέζιου) πάνω σε υπόστρωμα πυρίτιου και οι όψεις τους φαίνονται στο σχήμα 6.



Σχήμα 2.6: Όψεις των μικροκαναλιών

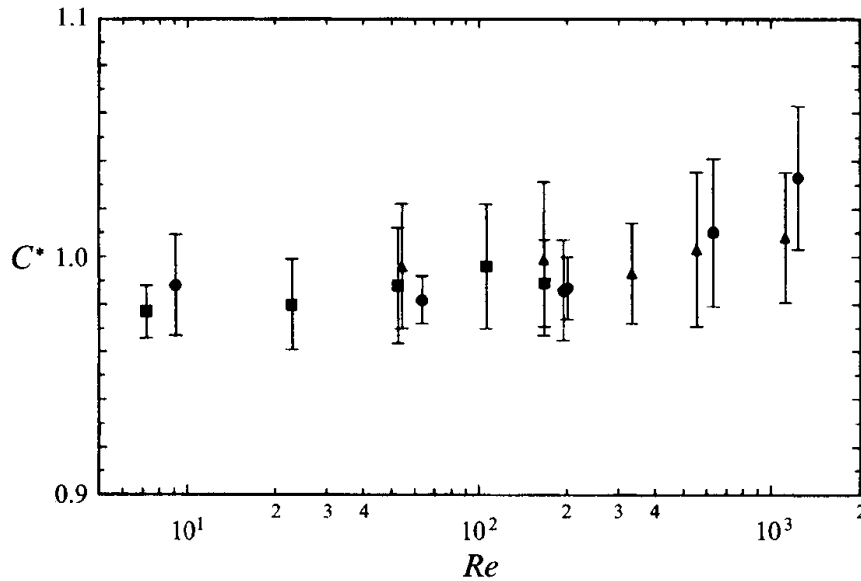
| Channel | Top width (μm) | Bottom width (μm) | Depth (μm) | Hydraulic diameter (μm) | Length × 10 ³ (μm) | Theoretical C _f (Shah & London 1978) | Gases tested |
|---------|----------------|-------------------|------------|-------------------------|-------------------------------|---|-------------------------|
| JH6 | 96.6 | 96.9 | 0.51 | 1.01 | 10.9 | 95.13 | N ₂ , He |
| V3 | 105.7 | 99.2 | 2.73 | 5.24 | 11.03 | 90.90 | N ₂ |
| JP9 | 95.4 | 85.8 | 4.66 | 8.68 | 10.9 | 88.51 | N ₂ , He |
| JH10 | 102.5 | 93.8 | 4.78 | 8.97 | 10.9 | 89.24 | N ₂ |
| JH21 | 100.5 | 85.2 | 8.33 | 14.85 | 11.05 | 82.91 | N ₂ , He, Ar |
| JH3 | 94.4 | 80.0 | 11.04 | 19.18 | 10.18 | 79.95 | N ₂ , He, Ar |
| V127 | 99.3 | 75.5 | 15.98 | 26.03 | 11.08 | 74.10 | N ₂ , He, Ar |
| JH5 | 246.8 | 220.3 | 19.79 | 35.91 | 10.18 | 84.94 | N ₂ , He, Ar |

Πίνακας 2.2: : Διαστάσεις μικροκαναλιών που χρησιμοποιήθηκαν

Αποτελέσματα

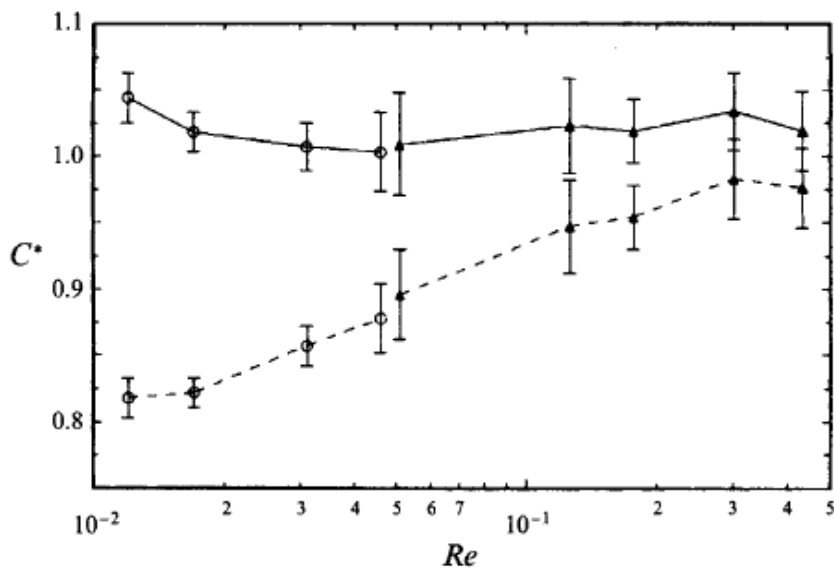
Σημαντικό ρόλο στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων παίζει η ακριβής μέτρηση των διαστάσεων των καναλιών. Για την μέτρηση τους χρησιμοποίησαν όργανα όπως οπτικό μικροσκόπιο και συμβολόμετρο με laser επιτυγχάνοντας έτσι ακρίβεια ±1% για το βάθος και ±2% για το πλάτος. Η πίεση και θερμοκρασία των αερίων μετρήθηκαν κατά την είσοδο και την έξοδο των αερίων από τα κανάλια και η παροχή όγκου μετρήθηκε με ακρίβεια καλύτερη του ±2,2%.

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 8 διαφορετικά μικροκανάλια (πίνακας 2) και 3 αέρια: άζωτο, ήλιο και αργόν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή του αριθμού Poiseuille που βρήκαν πειραματικά διαιρεμένο με τον θεωρητικό αριθμό Poiseuille. $C^* = (P_0)_{\text{exp}} / (P_0)_{\text{theory}}$



Σχήμα 2.7: C^* συναρτήσεως του αριθμού Reynolds (●: Άζωτο, ■: Ήλιο, ▲: Αργόν)

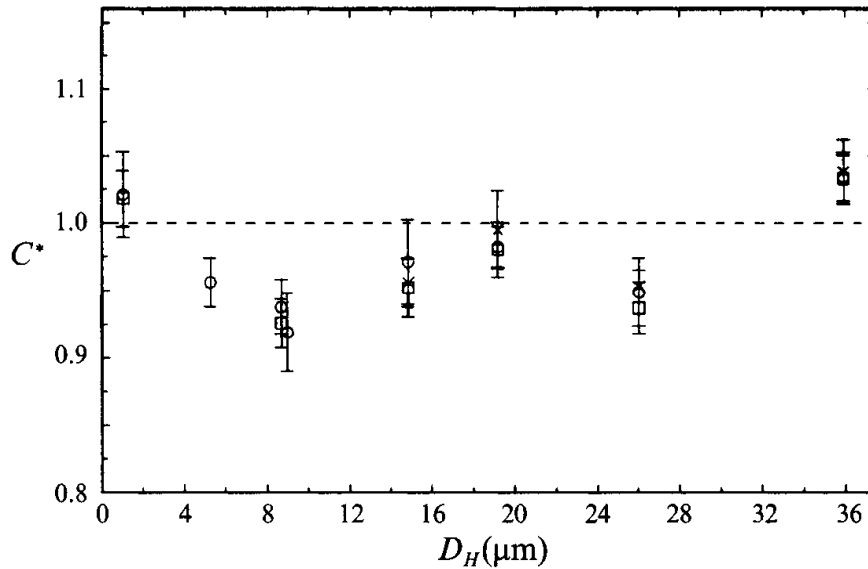
Στο σχήμα 7 βλέπουμε το $C^* = (P_0)_{\text{exp}} / (P_0)_{\text{theory}}$ συναρτήσεως του αριθμού Reynolds για το κανάλι JH3, βάθους 11,04μm. Η πίεση εισόδου κυμάνθηκε από 0,2 έως 2,1 Mpa και η πίεση στην έξοδο ήταν ίση με την ατμοσφαιρική. Η τιμή του αριθμού Knudsen κυμάνθηκε από 0,017 έως 0,000275, δηλαδή η ροή ήταν στην περιοχή της συνεχούς ροής. Όπως φαίνεται από το σχήμα 7 η τιμή του C^* βρίσκεται μεταξύ 1,03 και 0,98 κάτι που σημαίνει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τα θεωρητικά για το συγκεκριμένο πείραμα.



Σχήμα 2.8: C^* συναρτήσεως του αριθμού Reynolds. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το C^* υπολογισμένο με συνθήκη μη ολίσθησης και η συνεχής γραμμή με συνθήκη ολίσθησης (▲: Άζωτο, ○: Ήλιο)

Το σχήμα 8 απεικονίζει το C^* συναρτήσεως του αριθμού Reynolds για το κανάλι JH6 βάθους 0,51μm. Η πίεση κυμάνθηκε από 1,1 έως 3,4 Mpa στην είσοδο ενώ στην έξοδο ήταν ίση με την ατμοσφαιρική. Η τιμές του αριθμού Knudsen κυμάνθηκαν από

0,004 έως 0,373 δηλαδή μεταβατική ροή. Συνεπώς για αυτό το κανάλι στους υπολογισμούς ελήφθη υπόψη η συνθήκη ολίσθησης στο τοίχωμα (συνεχής γραμμή). Το μοντέλο με συνθήκη μη ολίσθησης (διακεκομένη γραμμή) παρουσιάζει εμφανή απόκλιση από τη θεωρία.



Σχήμα 9: C^* συναρτήσει της υδραυλικής διαμέτρου D_H (○: άζωτο, □: ήλιο, x: αργόν)

Στο σχήμα 9 βλέπουμε το C^* συναρτήσει της υδραυλικής διαμέτρου για όλα τα κανάλια και για αέρια άζωτο, ήλιο και αργόν.

| Channel | Knudsen number, Kn | | | |
|---------|----------------------|---------------|--------------|---------------|
| | Nitrogen | | Helium | |
| | At the inlet | At the outlet | At the inlet | At the outlet |
| JH10 | 0.003 | 0.014 | — | — |
| JP9 | 0.002 | 0.014 | 0.004 | 0.041 |
| V3 | 0.002 | 0.023 | — | — |
| JH6 | 0.012 | 0.129 | 0.025 | 0.363 |

Πίνακας 2.3: Μέγιστοι αριθμοί Knudsen εξόδου για άζωτο και ήλιο

Συμπεράσματα

Από αυτήν την εργασία εξάχθηκαν τα εξής συμπεράσματα: Η πίεση μπορεί να θεωρηθεί σταθερή σε κάθε διατομή των καναλιών κάθετη στη διεύθυνση της ροής και η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας μπορεί να αμεληθεί. Συνεπώς η υπόθεση της ισόθερμης, τοπικά πλήρους αναπτυγμένης ροής οδηγεί σε θεωρητικά αποτελέσματα που συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις πειραματικές παρατηρήσεις. Συγκεκριμένα τα πειραματικά αποτελέσματα είχαν λιγότερο από 8% απόκλιση από τις προβλέψεις της θεωρίας ποσοστό που είναι μικρότερο από το 12% που είναι η πειραματική αβεβαιότητα όπως την υπολόγισαν για αυτό το πείραμα οι ερευνητές.

Gaseous Slip Flow in Long Microchannels (1997)

Errol B. Arkilic, Martin A. Schmidt, Member, IEEE, and Kenneth S. Breuer

Άλλη μια εργασία που ασχολείται με τη μελέτη ροής αερίων διαμέσου μικροκαναλιού πειραματικά και θεωρητικά είναι αυτή που δημοσίευσαν οι Arkilic et al. το 1997. Το θεωρητικό κομμάτι περιλαμβάνει μια διδιάστατη ανάλυση των εξισώσεων Navier-Stokes η οποία σε συνδυασμό με το νόμο των τέλειων αερίων έδειξε πως η μηδενικής τάξης αναλυτική λύση για την παροχή μάζας βρίσκεται κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα.

Το αέριο που χρησιμοποιήθηκε γι' αυτό το πείραμα ήταν το ήλιο, η πίεση εισόδου κυμάνθηκε από 1,6 έως 4,2 , η πίεση εξόδου ήταν ίση με την ατμοσφαιρική και οι διαστάσεις των καναλιών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

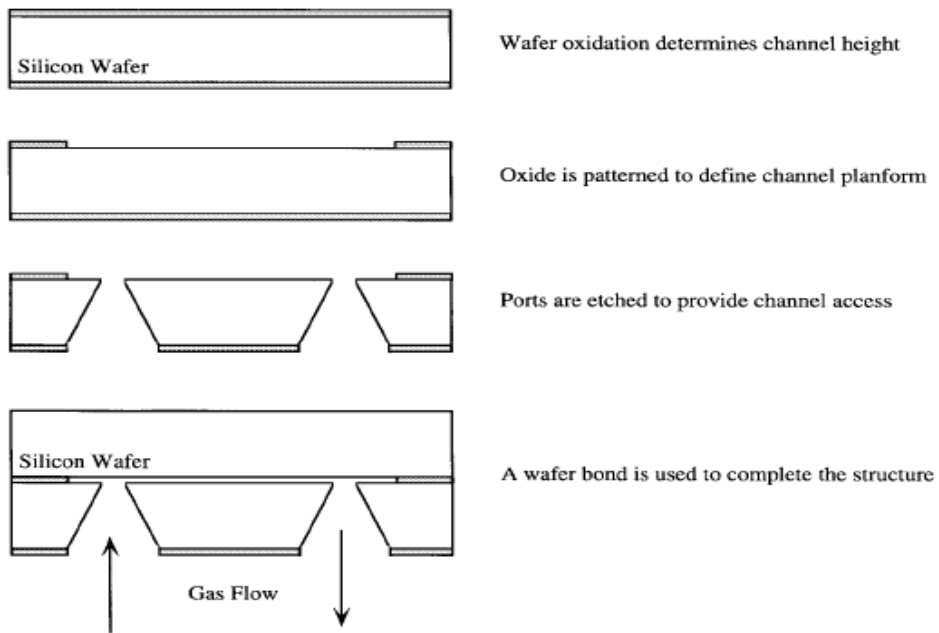
TABLE II
RESULTS OF MICROCHANNEL CHARACTERIZATION

| Parameter | Nominal Value (μm) | Variation (μm) |
|-------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| length (L) | 7500 | ± 10 |
| width (w) | 52.25 | ± 0.25 |
| height (H) | 1.33 | ± 0.01 |
| surface roughness | $\leq 0.65 \times 10^{-3}$ | NA |

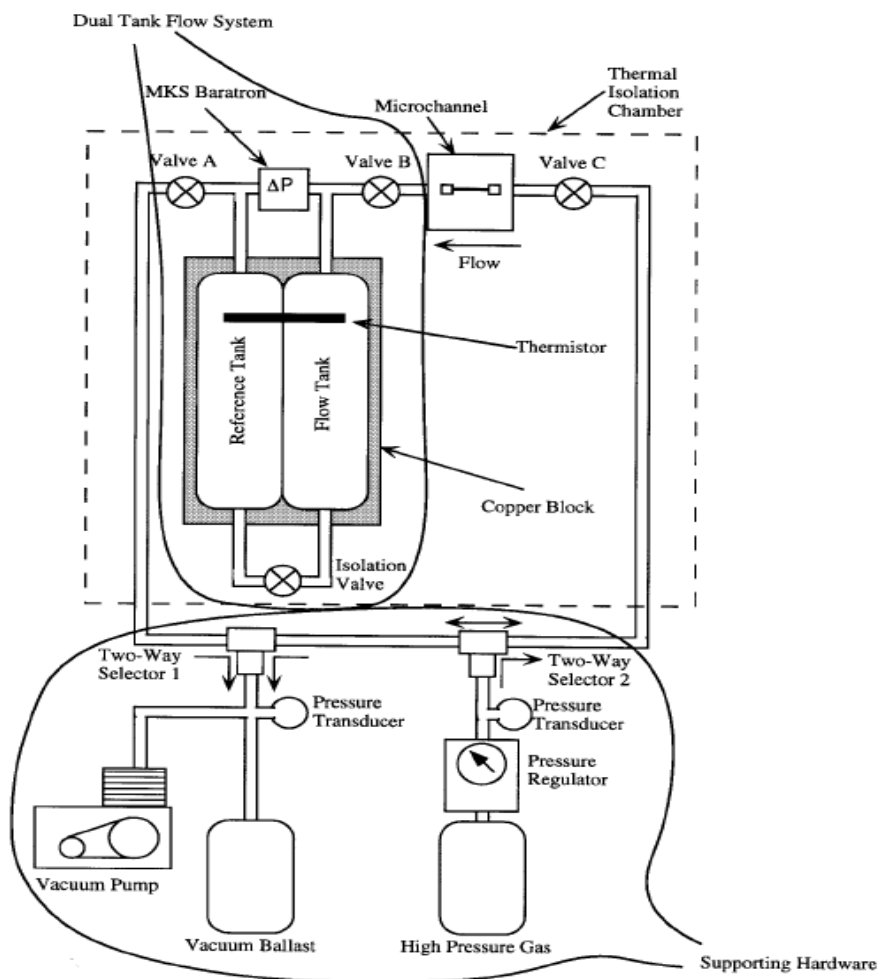
Πίνακας 2.4: Διαστάσεις των καναλιών

Πειραματική διάταξη

Για την κατασκευή του καναλιού αρχικά αναπτύχθηκε ένα οξειδίο πάνω σε ένα υπόστρωμα πυριτίου και στη συνέχεια με λιθογραφία και εγχάραξη του οξειδίου σε διάλυμα HF σχηματίστηκε το κανάλι. Το ύψος του καναλιού καθορίστηκε από το πάχος του οξειδίου το οποίο είχε τη ίδια τιμή παντού. Στη συνέχεια έγινε εναπόθεση νιτριδίου του πυριτίου πάνω στο υπόστρωμα το οποίο λειτούργησε ως μάσκα για την εγχάραξη του υποστρώματος με σκοπό στο σχηματισμό της εισόδου και της εξόδου του καναλιού. Τελευταίο βήμα της διαδικασίας ήταν το «καπάκωμα» με ένα άλλο υπόστρωμα πυριτίου. Τα βήματα κατασκευής του καναλιού φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.10: Κατασκευή των καναλιών



Σχήμα 2.11: Σχεδιάγραμμα της πειραματικής διάταξης

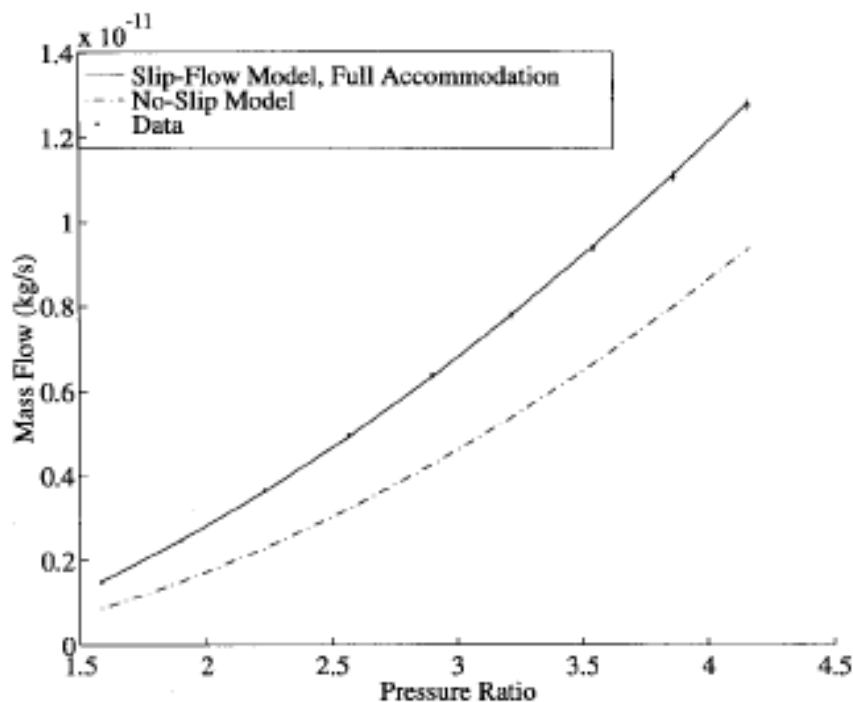
Αποτελέσματα

Στον πίνακα 5 μπορούμε να δούμε τις συνθήκες που επικράτησαν σε αυτό το πείραμα, από τις οποίες μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι βρισκόμαστε στην μεταβατική περιοχή της ροής.

| Parameter | Range or Mean Value |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Outlet Pressure (P_o) | 100 kPa |
| Pressure Ratio ($p_0(L)$) | 1.6-4.2 |
| Temperature (T) | 314 K |
| Outlet Mach Number (M) | $(1.3 - 11) \times 10^{-4}$ |
| Outlet Knudsen Number (K) | 0.155 |
| Reynolds Number (R) | $(1.4 - 12) \times 10^{-3}$ |

Πίνακας 2.5: Πειραματικές συνθήκες για ροή ηλίου σε μικροκανάλια

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα της παροχής μάζας όπως μετρήθηκε πειραματικά συναρτήσει του λόγου πιέσεων μεταξύ εισόδου και εξόδου. Από το σχήμα αυτό βλέπουμε πως τα πειραματικά δεδομένα προσαρμόζονται καλύτερα στις θεωρητικές εκτιμήσεις που δίνει το μοντέλο των εξισώσεων Navier-Stokes με οριακή συνθήκη ολίσθησης.



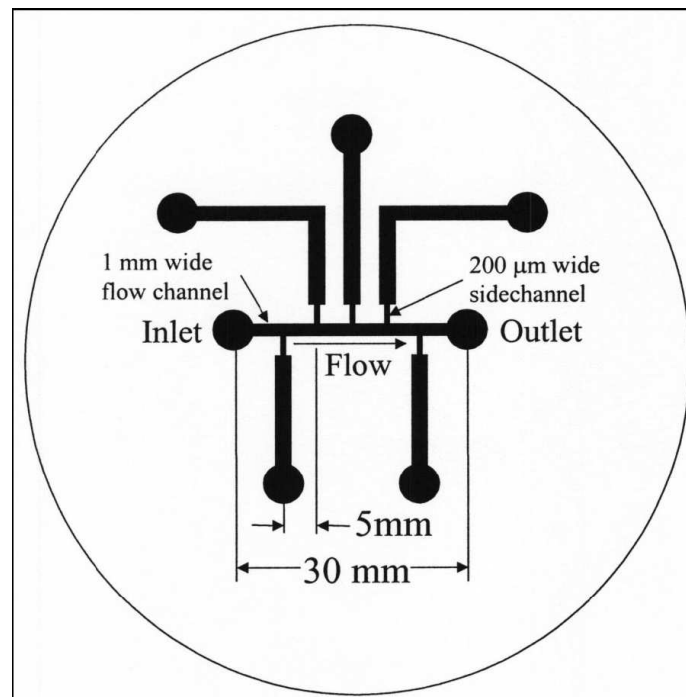
Σχήμα 2.11: Παροχή μάζας συναρτήσει του λόγου πίεσης

Experimental Investigation of Gas Flow in Microchannels (2004)

Stephen E. Turner, Lok C. Lam, Mohammad Faghri, Otto J. Gregory

Σε αυτήν την εργασία οι Turner et al. μελέτησαν την επίδραση της συμπίεσότητας, της αραιοποίησης και της τραχύτητας στη ροή αερίων σε μικροκανάλια που δημιουργήθηκαν με εγχάραξη σε υποστρώματα πυριτίου. Για το σκοπό αυτό μέτρησαν την πίεση σε επτά σημεία κατά μήκος των καναλιών και μέσω αυτής υπολόγισαν τον αριθμό Knudsen, τον αριθμό Mach και τον συντελεστή τριβής σε αυτά τα σημεία. Όλες οι μετρήσεις έγιναν στην περιοχή στρωτής ροής.

Στο σχήμα 12 φαίνεται η κάτοψη των μικροκαναλιών και στον πίνακα 5 οι διαστάσεις τους. Εκτός από το βασικό κανάλι ροής υπάρχουν άλλα πέντε παράπλευρα κανάλια τα οποία οδηγούν σε αισθητήρες πίεσης.



Σχήμα 2.12: Κάτοψη καναλιού

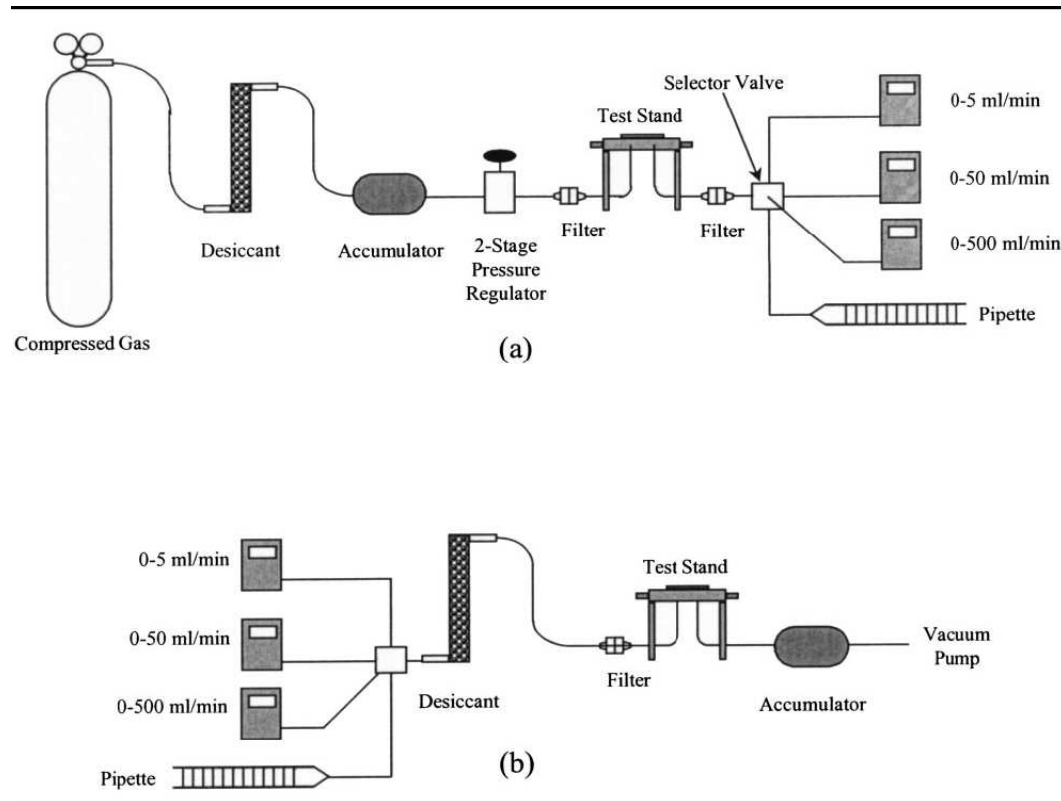
Table 1 Microchannel dimensions

| Channel | W (μm) | H (μm) | L (μm) | D_h (μm) | ε (μm) | ε/H |
|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 031 | 1053 | 2.349 | 26.80 | 4.688 | 0.0082 | 0.004 |
| 072 | 1056 | 5.213 | 26.69 | 10.375 | 0.0096 | 0.002 |
| 024 | 1061 | 12.285 | 26.82 | 24.289 | 0.052 | 0.004 |
| 186 | 1059 | 21.430 | 26.59 | 42.010 | 0.031 | 0.002 |
| 319 | 994 | 50.097 | 26.87 | 95.384 | 0.054 | 0.001 |
| 110g | 1051 | 5.178 | 26.75 | 10.305 | 0.33 | 0.06 |
| 110d | 1100 | 9.916 | 25.12 | 19.655 | 0.18 | 0.02 |
| 110b | 1056 | 50.201 | 25.20 | 95.846 | 1.62 | 0.03 |

Πίνακας 2.5: Διαστάσεις μικροκαναλιών

Η πειραματική διάταξη

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε γι' αυτό το πείραμα αποτελείται από δυο τμήματα. Στο πρώτο (σχήμα 13 a) διεξήχθη το πείραμα στο οποίο η πίεση του αερίου ήταν μεγαλύτερη από την πίεση της ατμόσφαιρας και στο δεύτερο τμήμα (σχήμα 13 b) έγινε πείραμα στο οποίο η πίεση του αερίου ήταν μικρότερη της ατμοσφαιρικής.



Σχήμα 2.13: Η πειραματική διάταξη

Για να μελετηθεί η επίδραση της αραιοποίησης στο συντελεστή τριβής οι ερευνητές πήραν μετρήσεις σε κανάλια με μικρή τραχύτητα και για χαμηλές ταχύτητες ροής έτσι ώστε ο αριθμός Mach να είναι μικρός. Ο αριθμός Knudsen (ενδεικτικός του βαθμού αραιοποίησης) αυξήθηκε αλλάζοντας το ρέων αέριο από άζωτο σε ήλιο. Η επίδραση της συμπιεστότητας στον συντελεστή τριβής μελετήθηκε αυξάνοντας τον αριθμό Mach διατηρώντας τη ροή συνεχή ($Kn < 0,001$) σε ένα λείο κανάλι. Τέλος η επίδραση της τραχύτητας μελετήθηκε μέσω της σύγκρισης του συντελεστή τριβής για κανάλια ίδιου ύψους αλλά με διαφορετικές τραχύτητες.

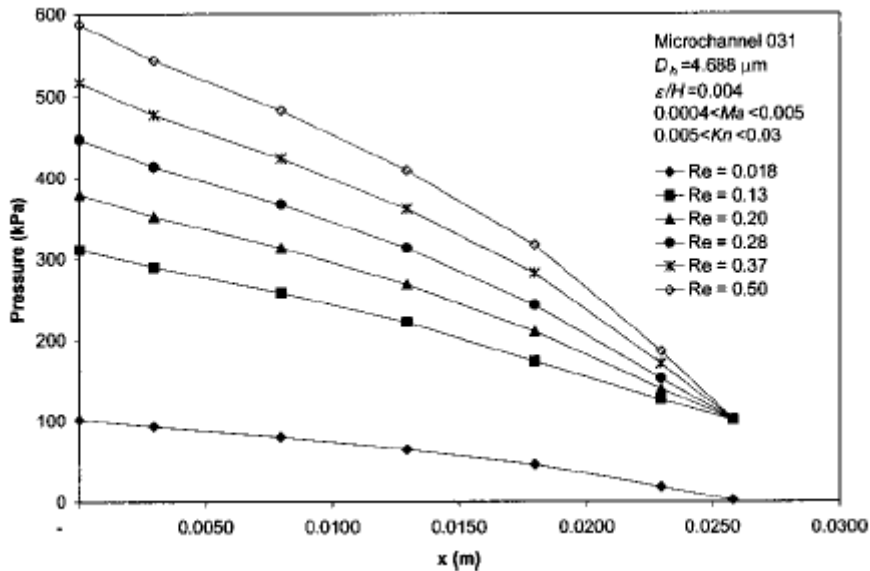
Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν τα αέρια άζωτο και ήλιο για όλα τα κανάλια εκτός από το μικρότερο (031) για το οποίο χρησιμοποιήθηκε αέρας. Ο συντελεστής τριβής υπολογίστηκε από την παρακάτω εξίσωση.

$$f = \frac{D_h}{L} \left[\frac{p_1^2 - p_2^2}{RTG^2} - 2 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \right]$$

η οποία προέρχεται από συνδυασμό των εξισώσεων διατήρησης μάζας και ορμής σε μια διάσταση, υποθέτοντας συμπιεστή και ισόθερμη ροή με οριακή συνθήκη μη ολίσθησης.

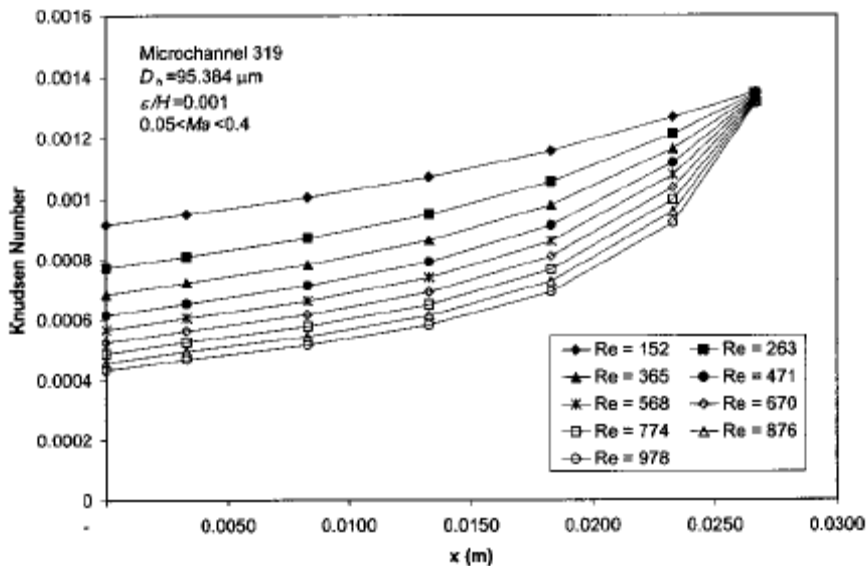
Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Σε κάθε πείραμα η πίεση μετρήθηκε στην είσοδο, στην έξοδο και σε άλλες 5 ισαπέχουσες θέσεις μεταξύ τους κατά μήκος του καναλιού (σχήμα 14).



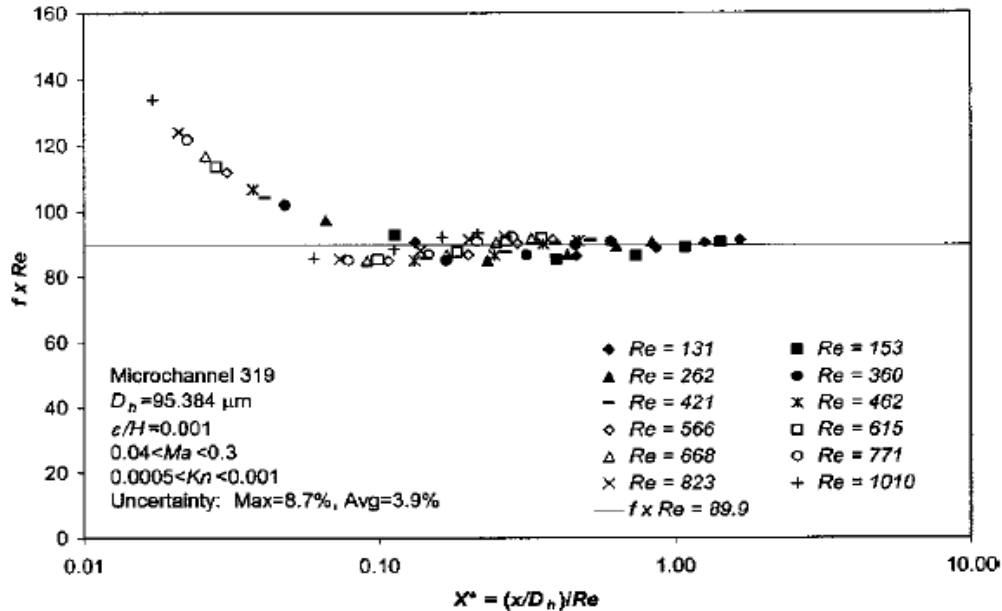
Σχήμα 2.14: Αξονική διανομή της πίεσης για ροή αέρα στο κανάλι 031

Από τις μετρήσεις που πάρθηκαν για την πίεση υπολογίστηκε ο αριθμός Knudsen σε κάθε μια από τις 7 θέσεις (σχήμα 15). Από το παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε πως ο αριθμός Knudsen προσεγγίζει μια σταθερή τιμή καθώς η πίεση προσεγγίζει την ατμοσφαιρική.



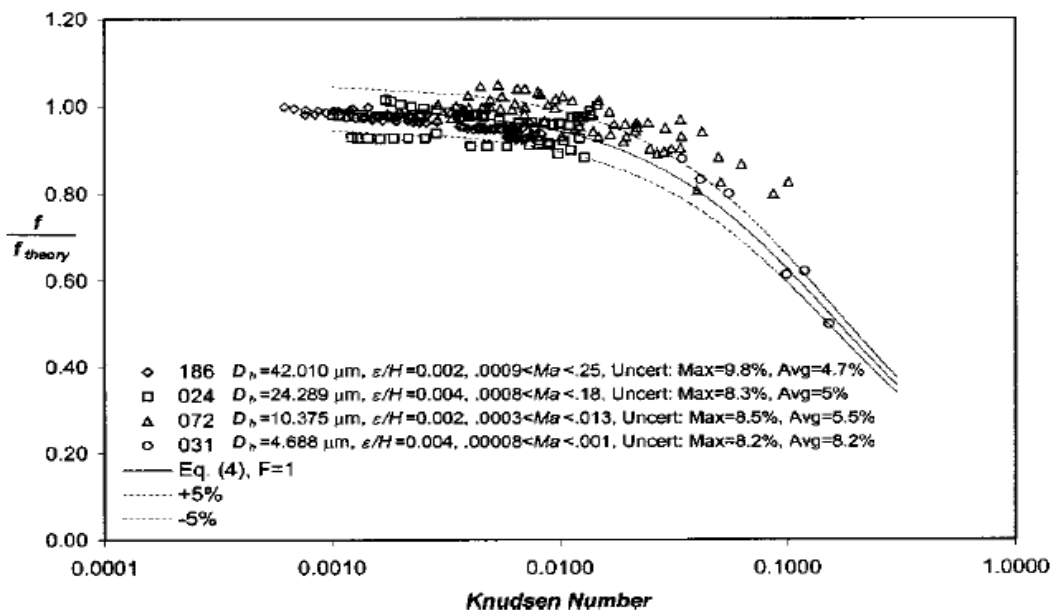
Σχήμα 2.15: Αριθμός Knudsen για ροή αέρα στο κανάλι 319

Στο σχήμα 16 φαίνεται το διάγραμμα του συντελεστή τριβής πολλαπλασιασμένου με τον αριθμό Reynolds ($f \times Re$) συναρτήσει του $X^* = (x/D_h)/Re$. Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε από αυτό το διάγραμμα είναι ότι η γεωμετρία εισόδου επηρεάζει σημαντικά το συντελεστή τριβής.



Σχήμα 2.16: Τοπικός συντελεστής τριβής για ροή αζώτου στο κανάλι 319

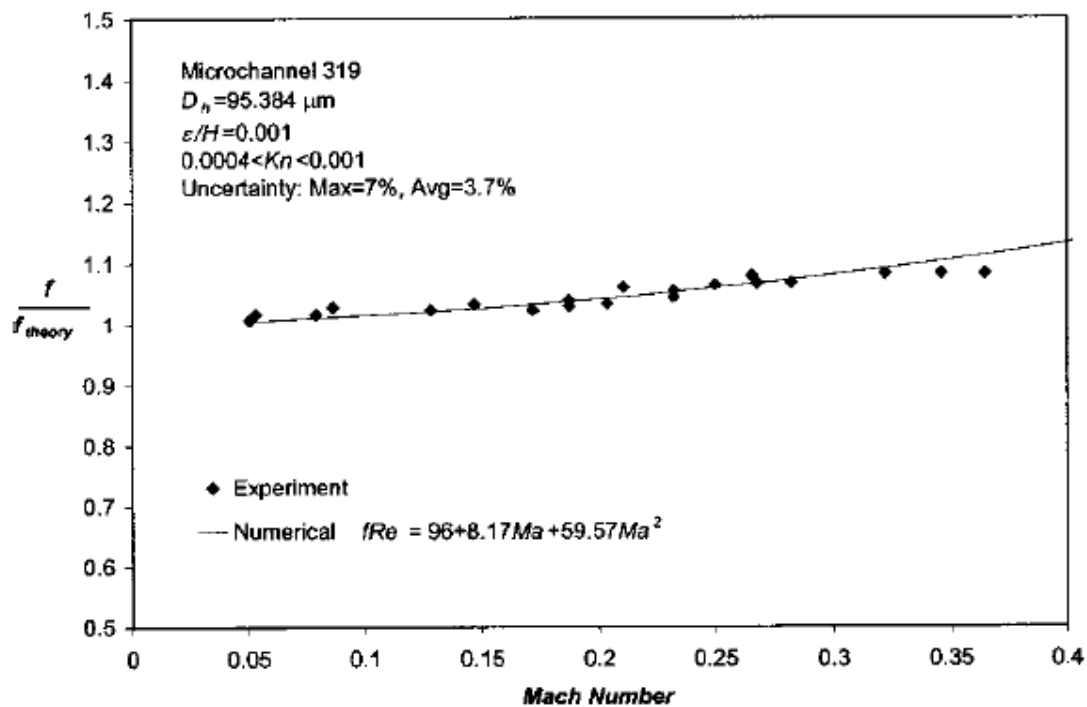
Για να εξεταστεί ξεχωριστά η επίδραση της αραιοποίησης στη ροή από την επίδραση της συμπίεστος και της τραχύτητας πάρθηκαν μετρήσεις σε συνθήκες χαμηλού αριθμού Reynolds και Mach σε μικροκανάλια με μικρή τραχύτητα επιφάνειας. Για κάθε κανάλι εξετάστηκαν αέρια με διαφορετική μέση ελεύθερη διαδρομή (λ) δηλαδή διαφορετικό αριθμό Knudsen.



Σχήμα 2.17: Επίδραση της αραιοποίησης στο συντελεστή τριβής

Το σχήμα 17 δείχνει ότι οι πειραματικές και θεωρητικές τιμές για το συντελεστή τριβής βρίσκονται κοντά για την περιοχή συνεχούς ροής ($Kn < 0,01$). Για μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Knudsen η πειραματική τιμή του συντελεστή τριβής είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή που προβλέπεται από τη θεωρία (έως και 50%). Οι ερευνητές απέδωσαν αυτή την απόκλιση στο γεγονός ότι για $Kn > 0,01$ ισχύει η οριακή συνθήκη ολίσθησης στα τοιχώματα.

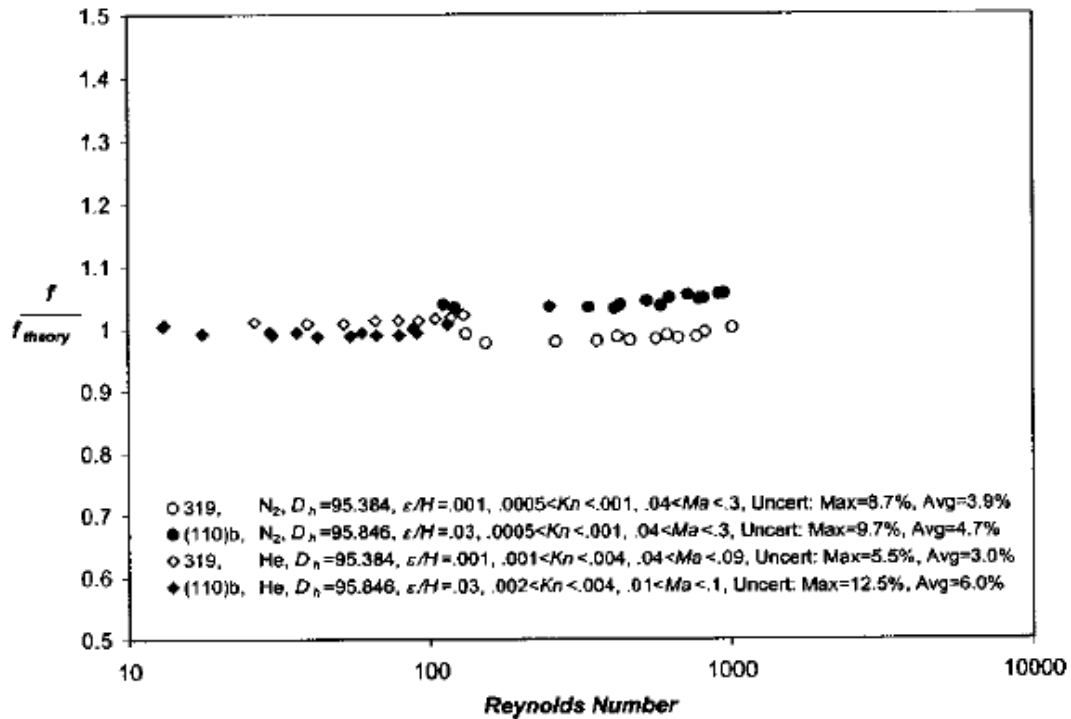
Για τη μελέτη της επίδρασης της συμπίεστος έγινε πείραμα στο οποίο ο αριθμός Knudsen ήταν μικρότερος του 0,001 και η τραχύτητα του καναλιού 319 πολύ μικρή έτσι ώστε να απομονωθεί η επίδραση της συμπίεστος από αυτές της αραιοποίησης και της τραχύτητας



Σχήμα 2.18: Επίδραση της συμπίεστος στο συντελεστή τριβής

Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε πως η θεωρητική και τα πειραματική τιμή του συντελεστή τριβής έχουν πολύ μικρή διαφορά για μικρούς αριθμούς Mach και η διαφορά αυτή αυξάνει όσο μεγαλώνει ο αριθμός Mach. Για $Mach=0,35$ η πειραματική τιμή του συντελεστή τριβής ήταν κατά 8% μεγαλύτερη από τη θεωρητική.

Για τη μελέτη της επίδρασης της τραχύτητας κατασκευάστηκαν μικροκανάλια με ίδιες διαστάσεις αλλά διαφορετικές τραχύτητες (η διαφορά στην τραχύτητα μεταξύ δυο καναλιών ήταν περίπου 30 φορές) και διατηρήθηκαν οι ίδιες συνθήκες ροής. Στο σχήμα 19 βλέπουμε πως η επίδραση της τραχύτητας στο συντελεστή τριβής για κανάλια ύψους 50 μm και ροή αζώτου και ηλίου είναι πολύ μικρή, κάτω του 2%.



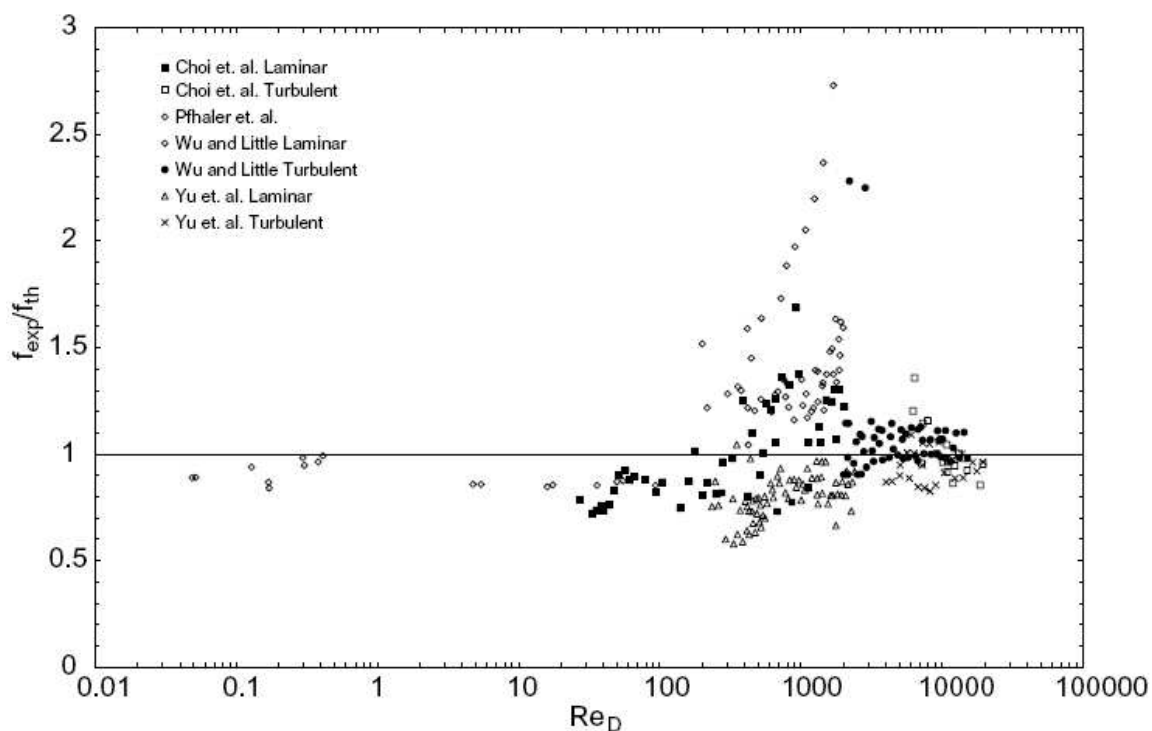
Σχήμα 2.19: Επίδραση της τραχύτητας στο συντελεστή τριβής

Οι ερευνητές διεξήγαγαν παρόμοια πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της τραχύτητας δοκιμάζοντας διάφορα ύψη καναλιών και αέρια και πάντα η διαφορά στο συντελεστή τριβής ήταν μικρότερη του 6%, δηλαδή μικρότερη από την πειραματική αβεβαιότητα. Συνεπώς οι ερευνητές κατέληξαν ότι δεν μπορεί να βγει ασφαλές συμπέρασμα για την επίδραση της τραχύτητας.

An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements (2004)

M.J. Kohl, S.I. Abdel-Khalik, S.M. Jeter, D.L. Sadowski

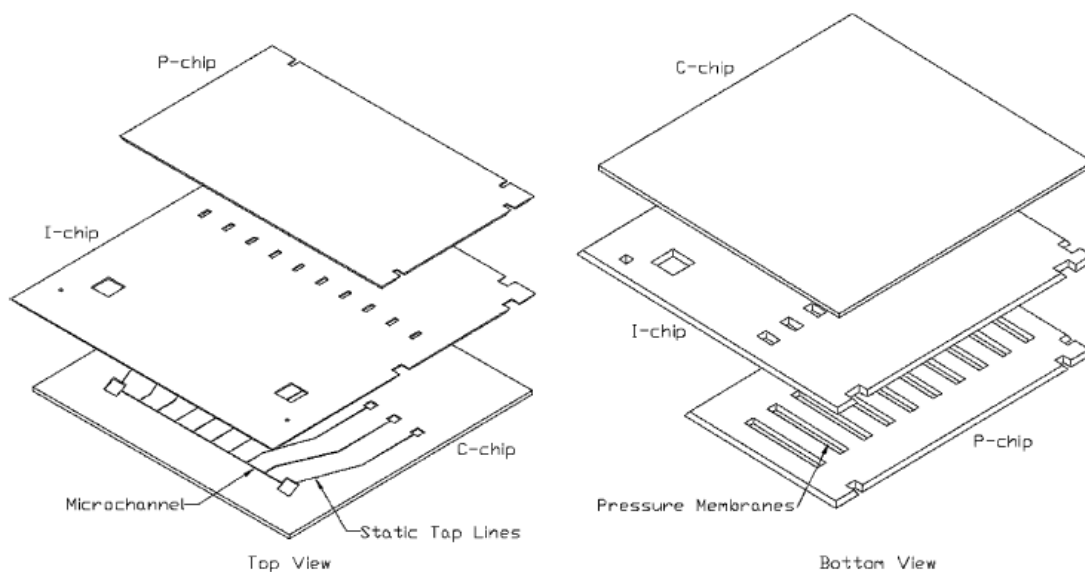
Το 2004 οι παραπάνω ερευνητές αφού μελέτησαν προσεχτικά εργασίες σχετικές με τη ροή αερίων σε μικροκανάλια τοποθέτησαν όλα τα πειραματικά αποτελέσματα για το συντελεστή τριβής σε ένα διάγραμμα (σχήμα 20) στο οποίο φαίνεται πως τα δεδομένα κατανέμονται τυχαία πάνω και κάτω από την ευθεία $f_{\text{exp}}/f_{\text{theory}}=1$. Δηλαδή αν τα δεδομένα από μια εργασία εξεταστούν μεμονωμένα η απόκλιση από τη θεωρία είναι σαφής σε αρκετές περιπτώσεις, ενώ αν εξεταστούν όλα τα δεδομένα μαζί η συμφωνία με τη θεωρία φαίνεται να είναι μεγαλύτερη. Αυτή η παρατήρηση τους οδήγησε στο συμπέρασμα πως οι αποκλίσεις που έχουν παρατηρηθεί μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών του συντελεστή τριβής είναι πιθανότατα προϊόν σφαλμάτων των μετρήσεων και όχι κάποιου «φαινομένου» που δεν είχε εξερευνηθεί μέχρι τότε.



Σχήμα 2.20: Συντελεστής τριβής συναρτήσει αριθμού Reynolds

Τα σφάλματα των μετρήσεων προκύπτουν από το γεγονός ότι το πολύ μικρό μέγεθος των καναλιών καθιστά ανακριβή τη μέτρηση των διαστάσεων και η πίεση και η θερμοκρασία δεν μπορούν να μετρηθούν απευθείας μέσα στο κανάλι. Οπότε οι ερευνητές κατασκεύασαν έτσι την πειραματική διάταξη ώστε οι αισθητήρες να είναι ενσωματωμένοι στον αγωγό που οδηγεί τη ροή στο μικροκανάλι, ακριβώς πριν την είσοδο και μετά την έξοδο του καναλιού.

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 21 το σύστημα των μικροκαναλιών αποτελείται από τρία chips. Το chip που βρίσκεται κάτω περιέχει τα κανάλια και το πάνω chip περιέχει μεμβράνες που λειτουργούν ως αισθητήρες πίεσης.



Σχήμα 2.21: Όψεις μικροκαναλιών

| Channel | h (μm) | w (μm) | D_h (μm) | L/D_h | $(fRe)_{inc}$ | R_a (μm) | Re_{max} (air) | Re_{max} (water) |
|---------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---------|---------------|-------------------------|------------------|--------------------|
| a | 24.2 ± 0.1 | 25.6 ± 0.1 | 24.9 | 401.9 | 56.93 | 0.33 | 5319.2 | 114.4 |
| b | 25.9 ± 0.1 | 101.1 ± 0.2 | 41.2 | 533.6 | 72.56 | 0.38 | 5983.2 | 210.6 |
| c | 43.6 ± 0.1 | 101.0 ± 0.2 | 60.9 | 361.1 | 64.30 | 0.33 | 10521.7 | – |
| d | 85.6 ± 0.2 | 101.8 ± 0.2 | 93.0 | 236.6 | 57.28 | 0.27 | 16732.3 | 1643.4 |
| e | 98.4 ± 0.2 | 101.3 ± 0.2 | 99.8 | 220.4 | 56.91 | 0.47 | 18814.3 | 2067.7 |

Πίνακας 2.6: Διαστάσεις μικροκαναλιών

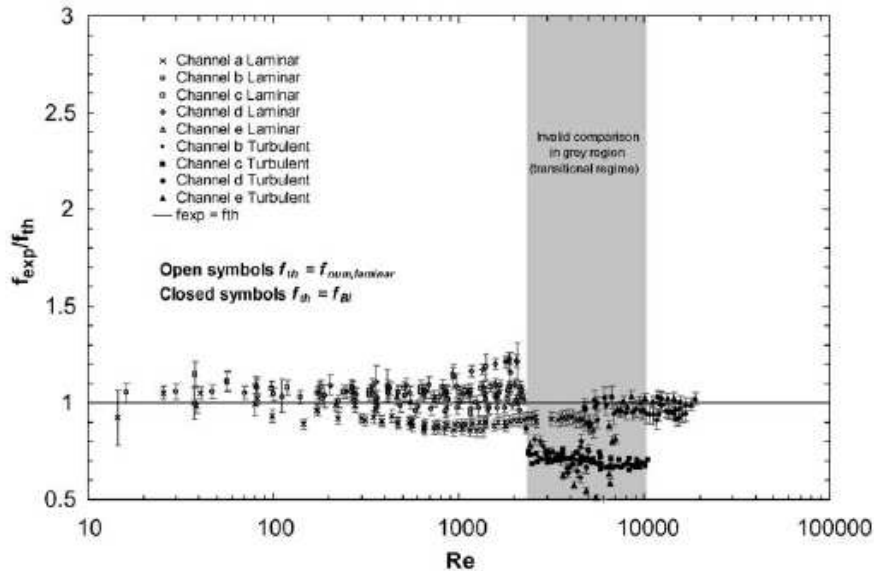
Ο αέρας διοχετεύτηκε στα κανάλια μέσω μιας φιάλης πεπιεσμένου αέρα και στη συνέχεια από την έξοδο των καναλιών οδηγήθηκε σε ένα κυλινδρικό δοχείο γεμάτο νερό. Ο χρόνος που χρειάστηκε ο αέρας να εκτοπίσει το νερό από τον κυλινδρικό δοχείο γνωστού όγκου μετρήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για να βρεθεί η παροχή μάζας του αέρα μέσω του νόμο των ιδανικών αερίων.

$$\dot{m} = \frac{V\rho}{\Delta t} = \frac{V\Delta P}{RT\Delta t} \quad \text{όπου } \Delta P = P_{in} - P_{out}$$

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συντελεστής τριβής από τις σχέσεις της συμπιεστής, αδιαβατικής ροής.

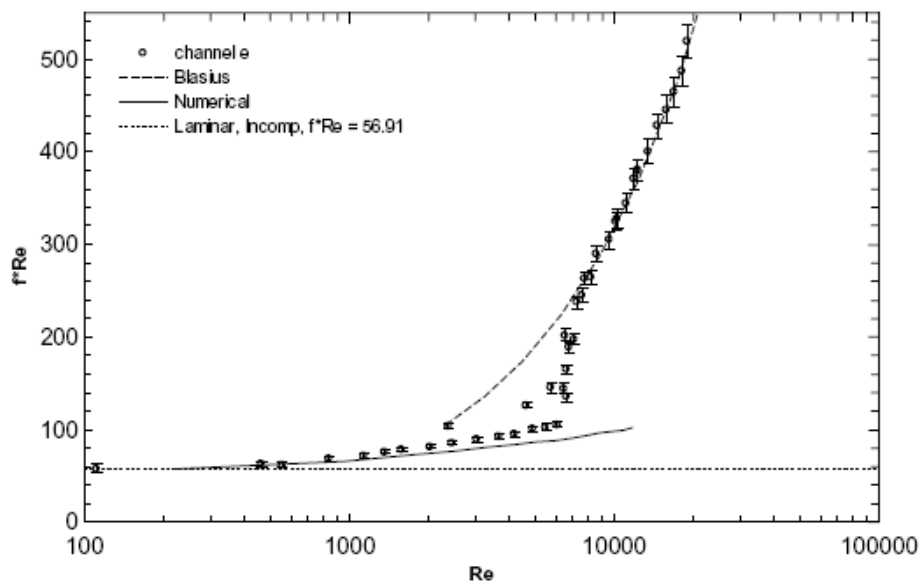
Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Στο σχήμα 22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τη μορφή του συντελεστή τριβής (διαιρεμένου με τη θεωρητική τιμή του) συναρτήσει του αριθμού Reynolds. Για $Re < 2300$ (στρωτή ροή) και $Re > 10^4$ τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα συμφωνούν πολύ ικανοποιητικά. Στην περιοχή μετάβασης για $2300 < Re < 10^4$ (το γκρι μέρος του διαγράμματος) τα αποτελέσματα όπως αναμενόταν δεν συμφωνούν γιατί για $Re > 2300$ το f_{theory} υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση του Blasius $f = 0,316Re^{-0,25}$ η οποία δεν ισχύει για την περιοχή μετάβασης.



Σχήμα 2.22: f πειραματικό προς f θεωρητικό συναρτήσει αριθμού Reynolds για αέρα

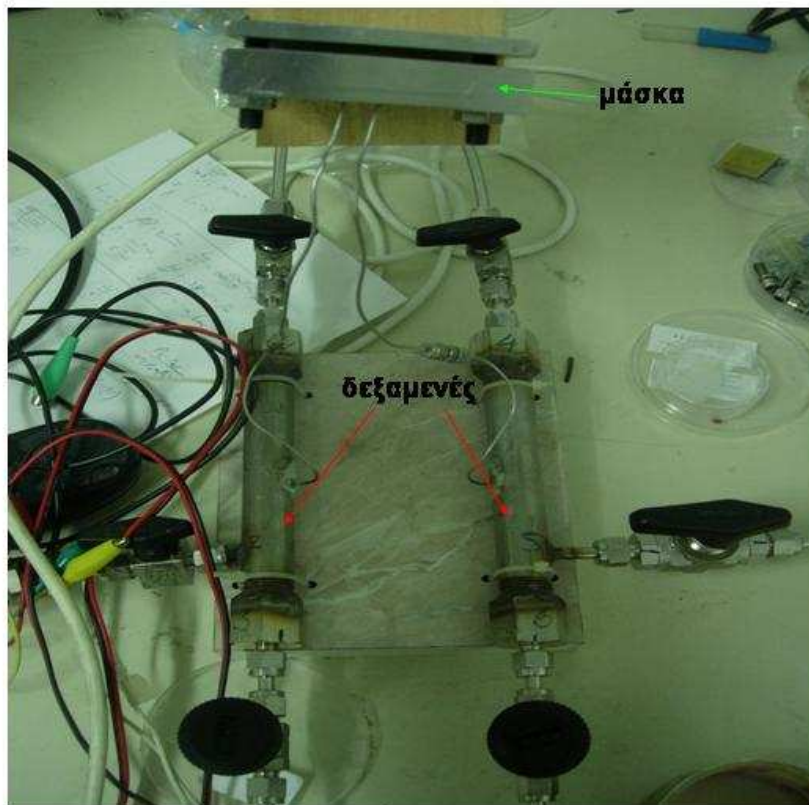
Μια μη αναμενόμενη παρατήρηση που προέκυψε από αυτό το πείραμα ήταν οι αυξημένοι κρίσιμοι αριθμοί Reynolds σε κάποια κανάλια. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα όπου η μετάβαση στην τυρβώδη ροή γίνεται για $Re = 6000$. Αυτή η καθυστέρηση στη μετάβαση στην τυρβώδη ροή οι ερευνητές την απέδωσαν στις μεγάλες επιταχύνσεις μέσα στο κανάλι.



Σχήμα 2.23: Συντελεστής τριβής συναρτήσει αριθμού Reynolds για ροή αέρα στο κανάλι e

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Ο σκοπός του παρόντος πειράματος ήταν να μελετηθεί η ροή αερίων που διέρχονται μέσα από μικροκανάλια. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε γι' αυτό το σκοπό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.1: Η πειραματική διάταξη

Από την εικόνα 3.1 μπορούμε να δούμε τις δυο δεξαμενές που συνδέονται με ένα μικρό σωλήνα στο μέσο του οποίου παρεμβάλλεται μια μεταλλική μάσκα που περιέχει τη διάταξη των μικροκαναλιών. Ο ρόλος της μάσκας είναι να ελαχιστοποιεί τις διαρροές κρατώντας σφιχτά ενωμένα τη διάταξη μικροκαναλιών με τις άκρες του σωλήνα. Η κάθε μια από τις δεξαμενές συνδέεται με έναν αισθητήρα πίεσης και επίσης υπάρχει σύνδεση των δεξαμενών μέσω σωλήνωσης με φιάλη που περιέχει πεπιεσμένο αέριο και με αντλία κενού.

- **Δεξαμενές**

Οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα.

Έχουν πάχος τοιχώματος 0,5 cm

Έχουν όγκο 35 ml

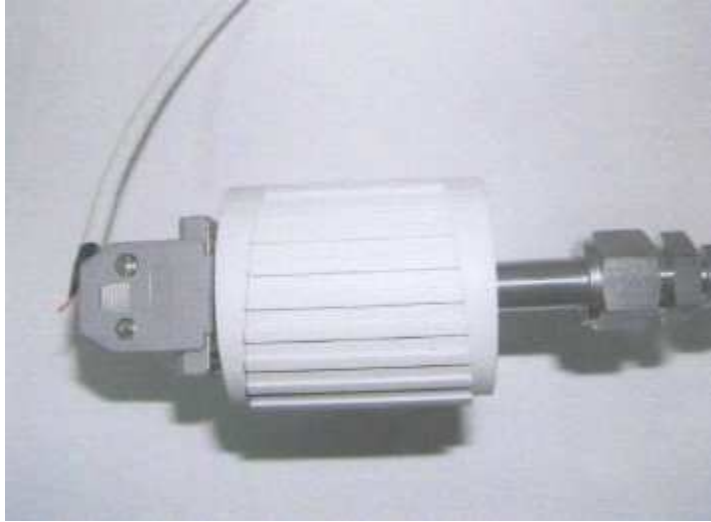
- **Αισθητήρες πίεσης**

1) Leybold ceravac transmitter CTR90

Αισθητήρας χωρητικού τύπου με εύρος μετρήσεων 0,01-100 Torr και ακρίβεια 0,2%.

Σήμα εξόδου 0-10: V γραμμικό.

Τάση τροφοδοσίας: $\pm 15V$ ή $\pm 24V$ DC



Εικόνα 3.2: Leybold ceravac transmitter CTR90

2) MKS Baratron 622A

Αισθητήρας χωρητικού τύπου με εύρος μετρήσεων 0-20 Torr και ακρίβεια 0,15%.

Σήμα εξόδου 0-10: V γραμμικό.

Τάση τροφοδοσίας: $\pm 15V$ DC



Εικόνα 3.3: MKS Baratron 622A

- **Αντλία κενού**

Περιστροφικού τύπου αντλία της εταιρίας General Europe Vacuum μοντέλο 3GP-1.

Ονομαστική πίεση: 10 Pa

Πραγματική πίεση (σε συνθήκες λειτουργίας): 60 Pa

Ονομαστική παροχή: 3 m³/h

Τάση τροφοδοσίας: 220 V, 50 Hz

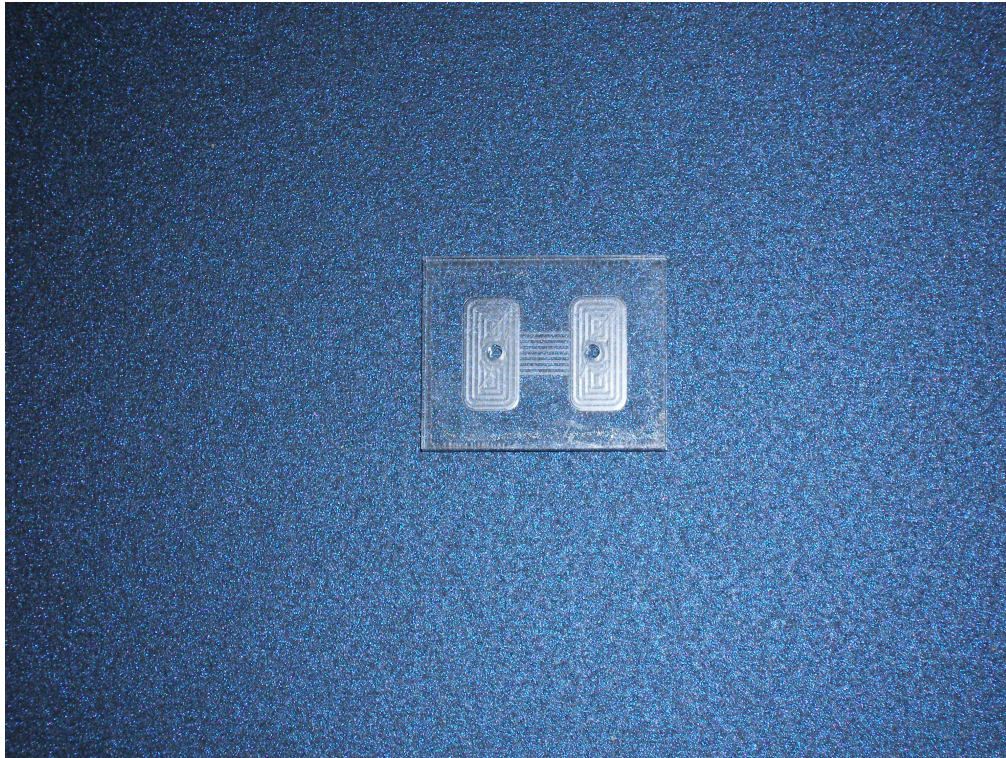
Διαστάσεις: 290x110x240 mm



Εικόνα 3.3: Αντλία κενού

- **Διατάξεις μικροκαναλιών**

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν έξι διατάξεις μικροκαναλιών ορθογωνικής διατομής από PMMA. Κάθε διάταξη έχει οκτώ κανάλια που οι διαστάσεις τους ήταν περίπου 285 μm πλάτος και 20 μm βάθος για τρεις από τις διατάξεις και 285 μm πλάτος και 30 μm βάθος για τις άλλες τρεις. Το μήκος όλων των καναλιών είναι 5000 μm.



Εικόνα 3.4: Διάταξη μικροκαναλιών



Εικόνα 3.5: Διάταξη μικροκαναλιών και μεταλλική μάσκα

Η φιλοσοφία του πειράματος

Η πειραματική διαδικασία είχε ως εξής:

Η μια δεξαμενή διατηρήθηκε σε χαμηλή πίεση (περίπου 1 torr) με τη βοήθεια της αντλίας. Η άλλη δεξαμενή τροφοδοτήθηκε με αέριο μέχρι να φτάσει η πίεση στα 90 torr περίπου. Η διαφορά πίεσης μεταξύ των δεξαμενών εξαναγκάζει το αέριο να μετακινηθεί διαμέσου των μικροκαναλιών από τη δεξαμενή που βρίσκεται σε υψηλή πίεση προς τη δεξαμενή που βρίσκεται σε χαμηλή πίεση. Μετρήσεις της πίεσης των δυο δεξαμενών πάρθηκαν με συχνότητα 10 Hz για τις έξι διατάξεις μικροκαναλιών για ήλιο, αργό και αέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΙΚΡΟΚΑΝΑΛΙΩΝ

Στο εργαστήριο έγιναν μετρήσεις σε 6 διατάξεις μικροαγωγών ο καθένας από τους οποίους αποτελείται από 8 μικροκανάλια ορθογωνικής διατομής. Οι 3 από αυτούς τους μικροαγωγούς έχουν κανάλια με ύψος γύρω στα 20 μm και πλάτος γύρω στα 285 μm και οι άλλοι 3 έχουν ύψος γύρω στα 30 μm και πλάτος γύρω στα 282 μm . Οι διαστάσεις τους φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 4.1.

| Όνομα καναλιού | 55-0045-01 Nr 1 | 55-0045-01 Nr 2 | 55-0045-01 Nr 4 | 55-0045-02 Nr 2 | 55-0045-02 Nr 3 | 55-0045-02 Nr4 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| b (μm) | 283,91 | 285,85 | 286,78 | 283,88 | 282,55 | 282,35 |
| h (μm) | 22,17 | 19,03 | 18,27 | 31,72 | 29,63 | 29,91 |
| D_h (μm) | 41,128 | 35,684 | 34,352 | 57,064 | 53,635 | 54,090 |
| A (μm^2) | 6,294 | 5,440 | 5,239 | 9,005 | 8,372 | 8,445 |

Πίνακας 4.1: Διαστάσεις μικροκαναλιών

Σε κάθε διάταξη μικροκαναλιών μελετήθηκε η ροή ηλίου (He), αργού (Ar) και αέρα (Air). Η σταθερά R και το ιξώδες μ για κάθε αέριο φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Η θερμοκρασία θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 298 K για την πλειονότητα των περιπτώσεων και ίση με 293 K για κάποιες λόγω της ύπαρξης θεωρητικών αποτελεσμάτων σε αυτή τη θερμοκρασία έτσι ώστε να γίνει σύγκριση.

| T=298 K | He | Ar | Air |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| R (j/kg K) | 2076,9 | 208 | 287 |
| μ (kg/ms) | $1,9955 \times 10^{-5}$ | $2,26 \times 10^{-5}$ | $1,82 \times 10^{-5}$ |

Πίνακας 4.2: Ιδιότητες των αερίων στους 298 kelvin

| T=293 K | He | Ar | Air |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| R (j/kg K) | 2076,9 | 208 | 287 |
| μ (kg/ms) | $1,95 \times 10^{-5}$ | $2,28 \times 10^{-5}$ | $1,873 \times 10^{-5}$ |

Πίνακας 4.3: Ιδιότητες των αερίων στους 293 kelvin

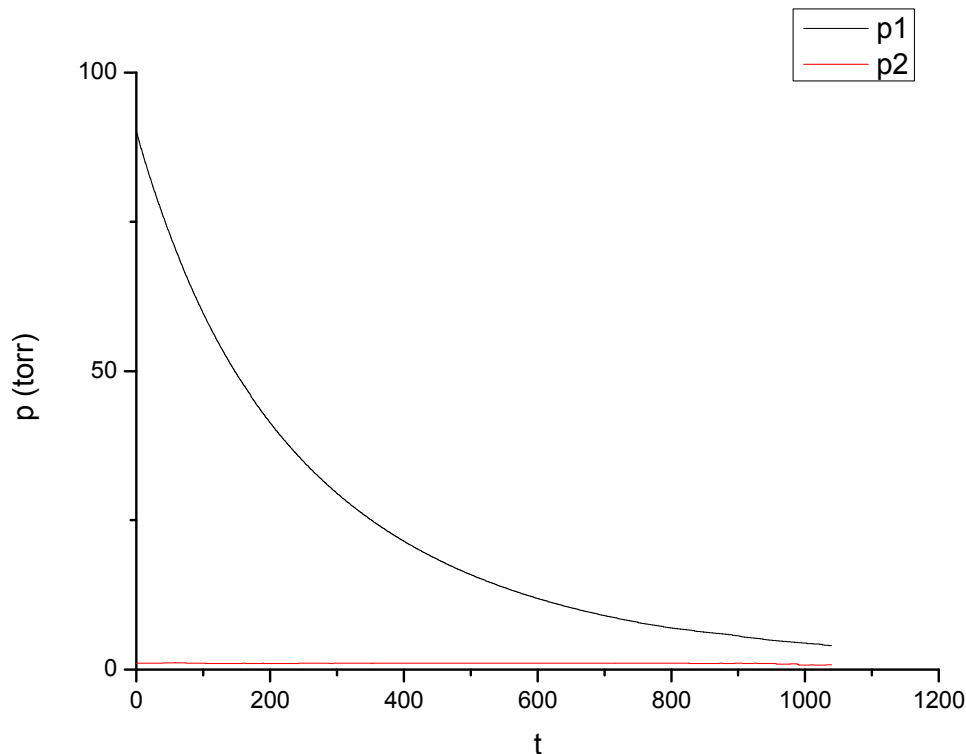
Ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας επεξεργασίας των μετρήσεων για μια περίπτωση: Μικροκανάλι: 55-0045-01 Nr4, εργαζόμενο μέσο : He. Οι υπόλοιπες περιπτώσεις θα παρουσιαστούν συνοπτικά αφού ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία.

4.1.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr4 πλάτους 286,78μm, ύψους 18,27 μm, εργαζόμενο μέσο He

Μικροκανάλι: 55-0045-01 Nr4, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 286,78\mu\text{m} \times 18,27\mu\text{m}$

Αέριο: He $R=2076,9$, $\mu=1,9955 \times 10^{-5}$ kg/ms για $T=298\text{K}$

Η αρχική πίεση στη δεξαμενή 1 ήταν 90,028 torr ενώ η πίεση στη δεξαμενή 2 διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή, κοντά στο 1 torr, με τη βοήθεια αντλίας. Λόγω της διαφοράς πίεσης το αέριο κινείται διαμέσου των μικροκαναλιών από τη δεξαμενή 1 προς τη δεξαμενή 2. Οι πιέσεις των δεξαμενών συναρτήσει του χρόνου όπως μετρήθηκαν από τους αισθητήρες πίεσης φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.1.a. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου

Παροχή μάζας

Η παροχή μάζας του αερίου που εξέρχεται από τη δεξαμενή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$pV = mRT \rightarrow \frac{dp}{dt} V = \frac{dm}{dt} RT \rightarrow \dot{m} = \frac{V}{RT} \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

όπου $V=35\text{ml}$ ο όγκος της κάθε δεξαμενής και p η πίεση της δεξαμενής 1.

Για τον υπολογισμό του $\frac{dp}{dt}$ έγινε fitting στην καμπύλη $p(t)$ με τη βοήθεια του

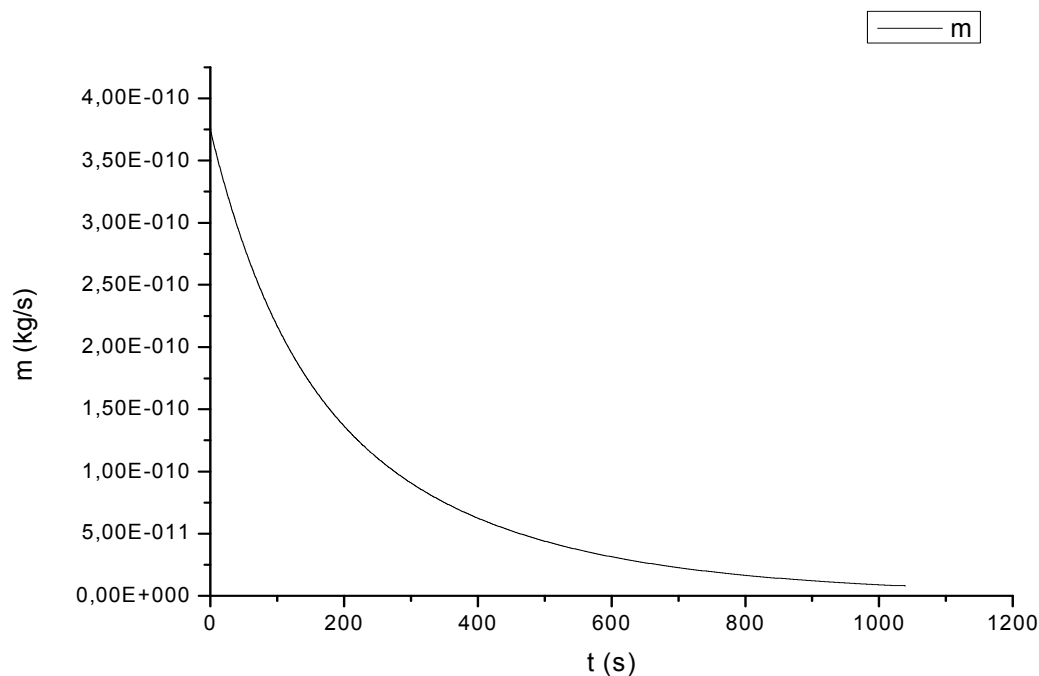
προγράμματος origin και βρέθηκε η εξής συνάρτηση:

$$p=17,466\exp(-t/483,24)+58,072\exp(-t/263,876)+13,621\exp(-t/96,798)+0,865$$

(p σε torr) και παραγωγίζοντας ως προς τον χρόνο έχουμε:

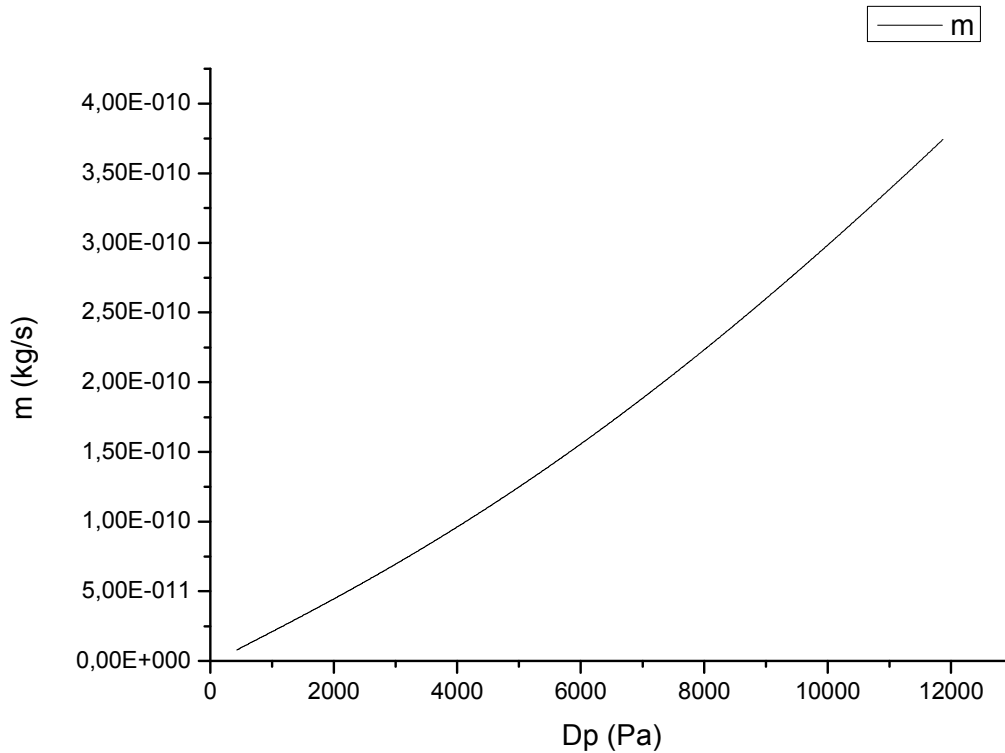
$$\frac{dp}{dt} = -0,036\exp(-t/483,24)-0,220\exp(-t/263,876)-0,141\exp(-t/96,798)$$

Η κάθε διάταξη περιλαμβάνει 8 μικροκανάλια συνεπώς η παροχή μάζας του ενός μικροκαναλιού είναι αυτή της σχέσης (1) διαιρεμένη με το 8.



Σχήμα 4.1.a. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου

Επειδή παρατηρήθηκαν κάποιες πιθανές ανακρίβειες στις μετρήσεις των αισθητήρων (σκαμπανεβάσματα στο διάγραμμα $p(t)$) κρίθηκε σκόπιμο να γίνει fitting και στην καμπύλη της διαφοράς πίεσης των δεξαμενών ($Dp = p_1 - p_2$) συναρτήσει του χρόνου για να εξομαλυνθούν αυτά τα σκαμπανεβάσματα. Με τη βοήθεια του origin βρήκαμε:
 $Dp = 9812,869\exp(-t/298,358)+1923,315\exp(-t/94,693)+128,446$ (Dp σε Pascal)



Σχήμα 4.1.a. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

Ταχύτητα

Η μέση ταχύτητα του αερίου μέσα στο μικροκανάλι υπολογίζεται ως εξής:

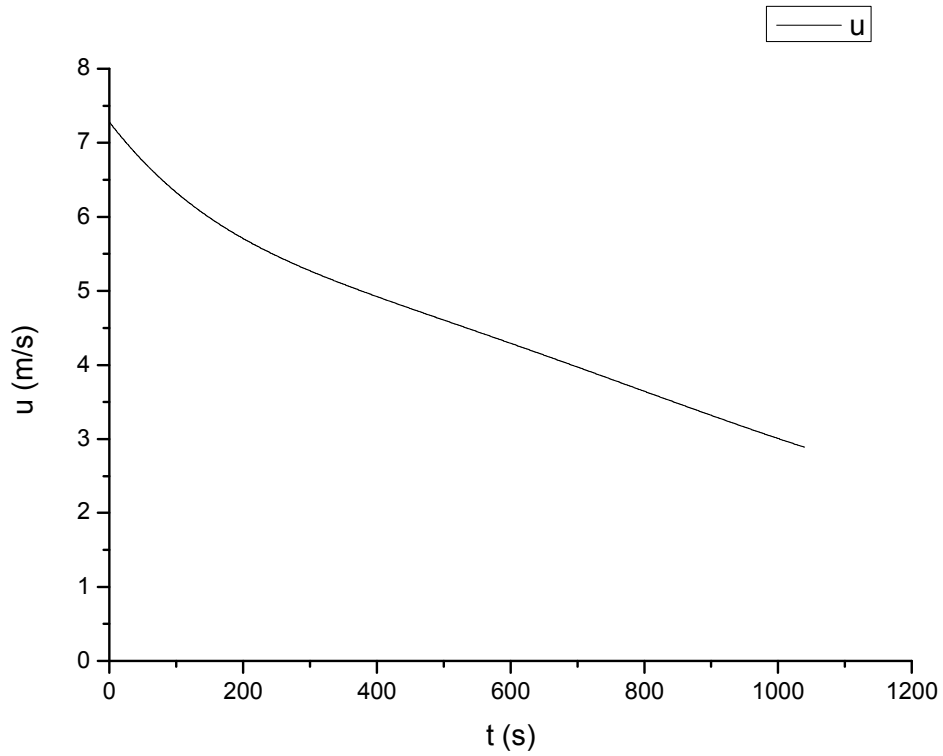
$$\dot{m} = \bar{\rho}uA \rightarrow \dot{m} = \frac{\bar{p}}{RT} uA \rightarrow u = \frac{\dot{m}RT}{\bar{p}A} \quad \text{όπου } \bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$$

Μετά από fitting στην καμπύλη $\frac{p_1 + p_2}{2} - t$ βρήκαμε την παρακάτω σχέση:

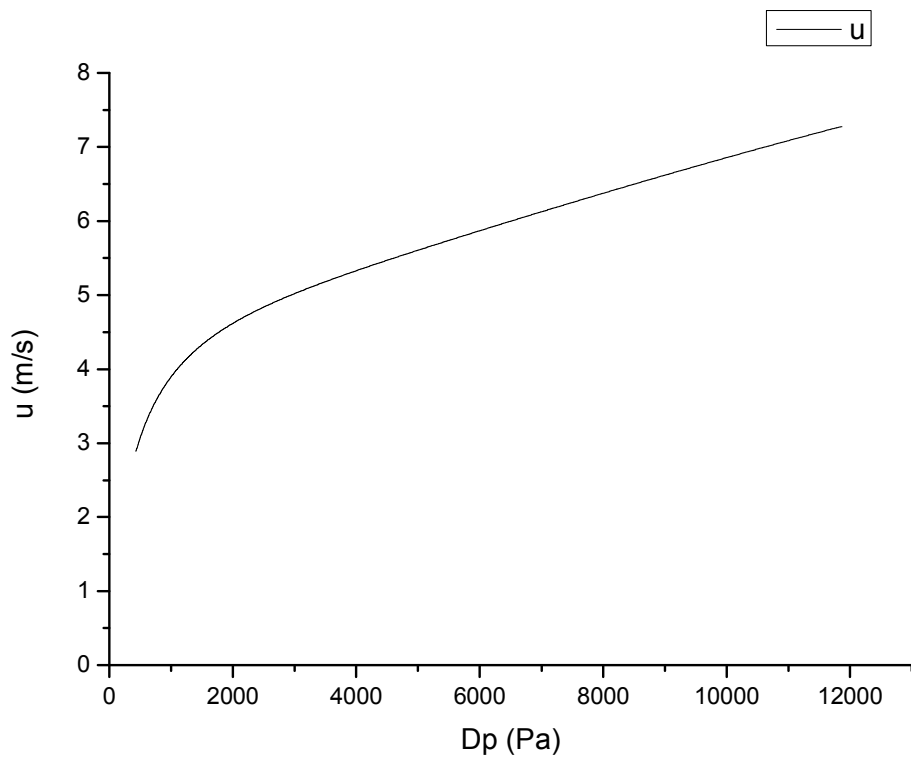
$$\frac{p_1 + p_2}{2} = 4698,847\exp(-t/282,921)+949,18\exp(-t/98,233)+12511,91\exp(-t/59319,132)$$

-12087,117

(p σε Pascal)



Σχήμα 4.1.a. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου

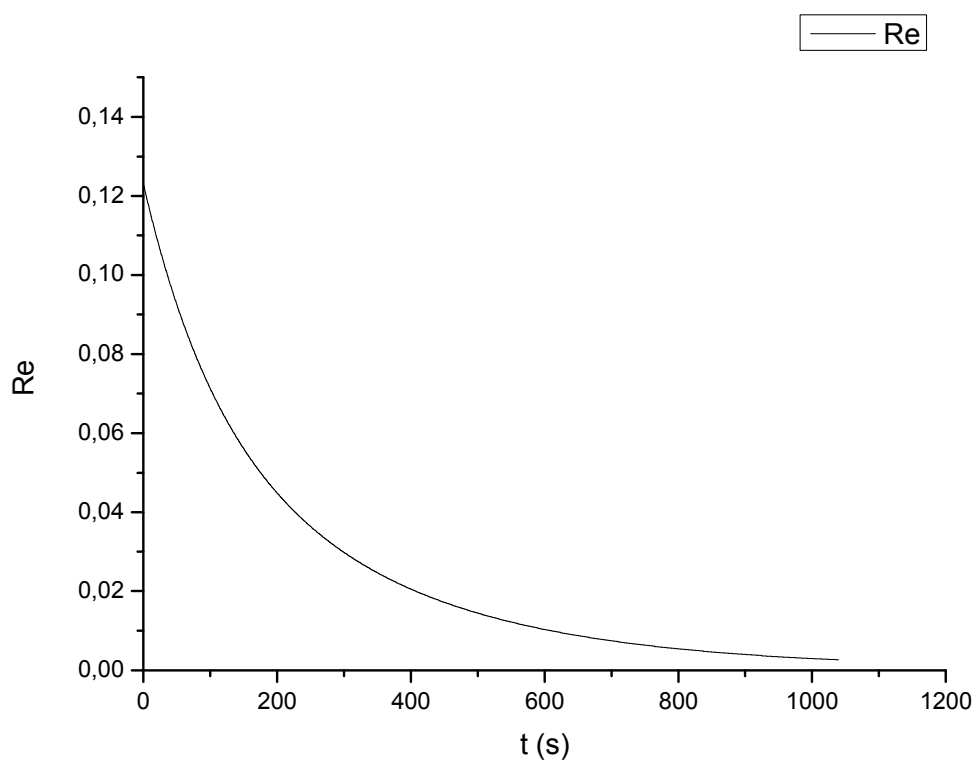


Σχήμα 4.1.a. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

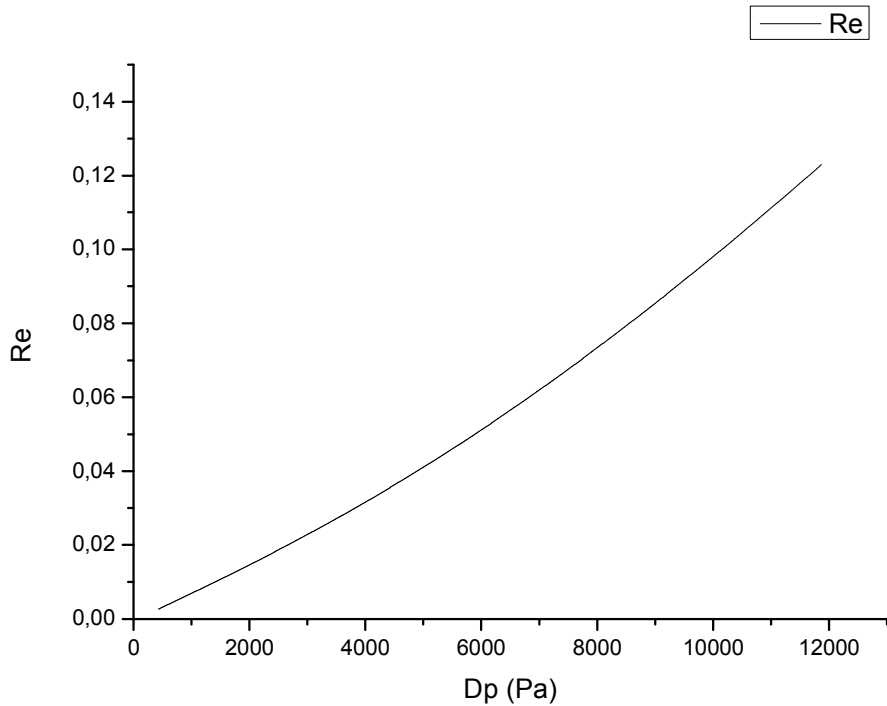
Αριθμός Reynolds

Ο αριθμός Reynolds στο μικροκανάλι υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Re} = \frac{u\bar{\rho}D_h}{\mu} \rightarrow \text{Re} = \frac{u\bar{\rho}D_h}{\mu RT} \quad \text{όπου} \quad D_h = \frac{4bh}{2(b+h)} \quad \text{η υδραυλική διάμετρος του μικροκαναλιού}$$



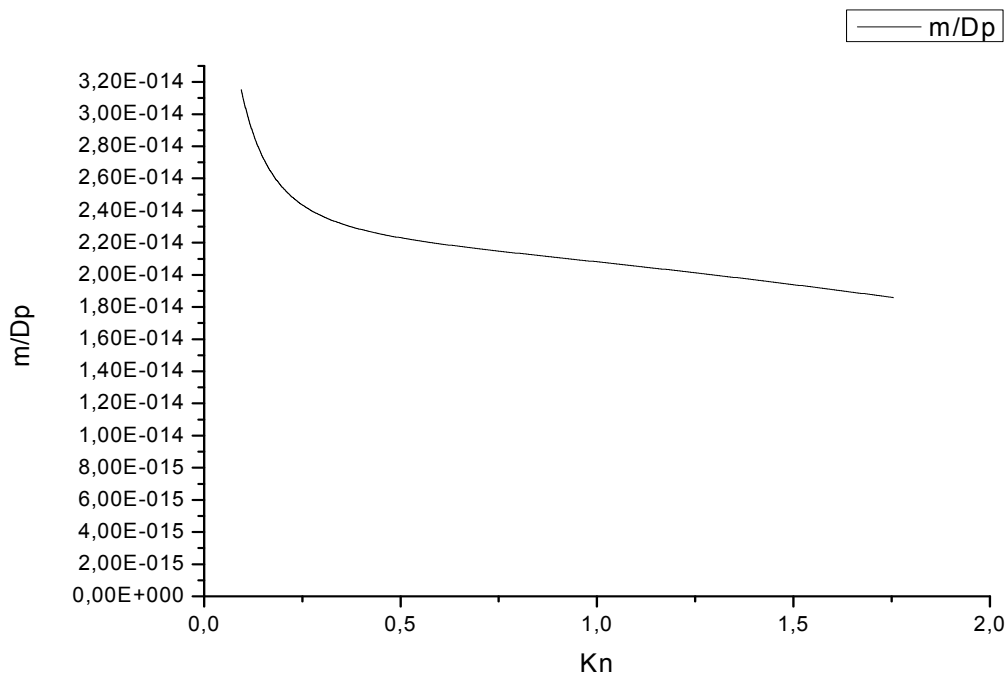
Σχήμα 4.1.a. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



Σχήμα 4.1.a. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

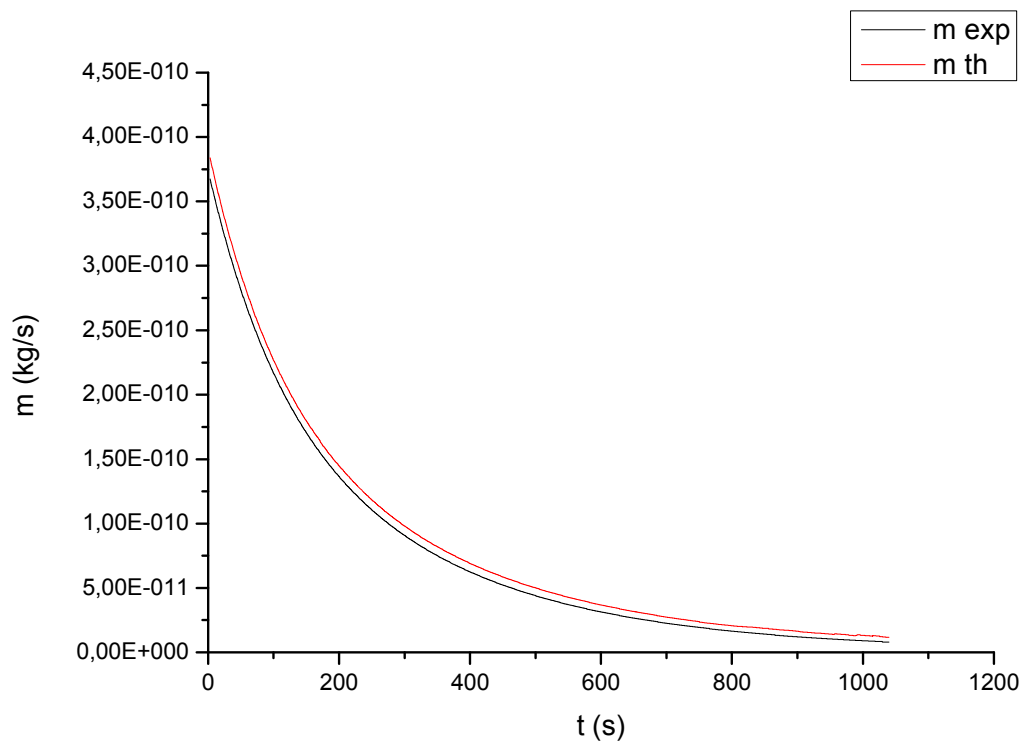
Αριθμός Knudsen

Ο αριθμός Knudsen στο μικροκανάλι υπολογίζεται από τη σχέση: $Kn = \frac{\sqrt{\pi \mu \sqrt{2RT}}}{2 \bar{p} D_h}$



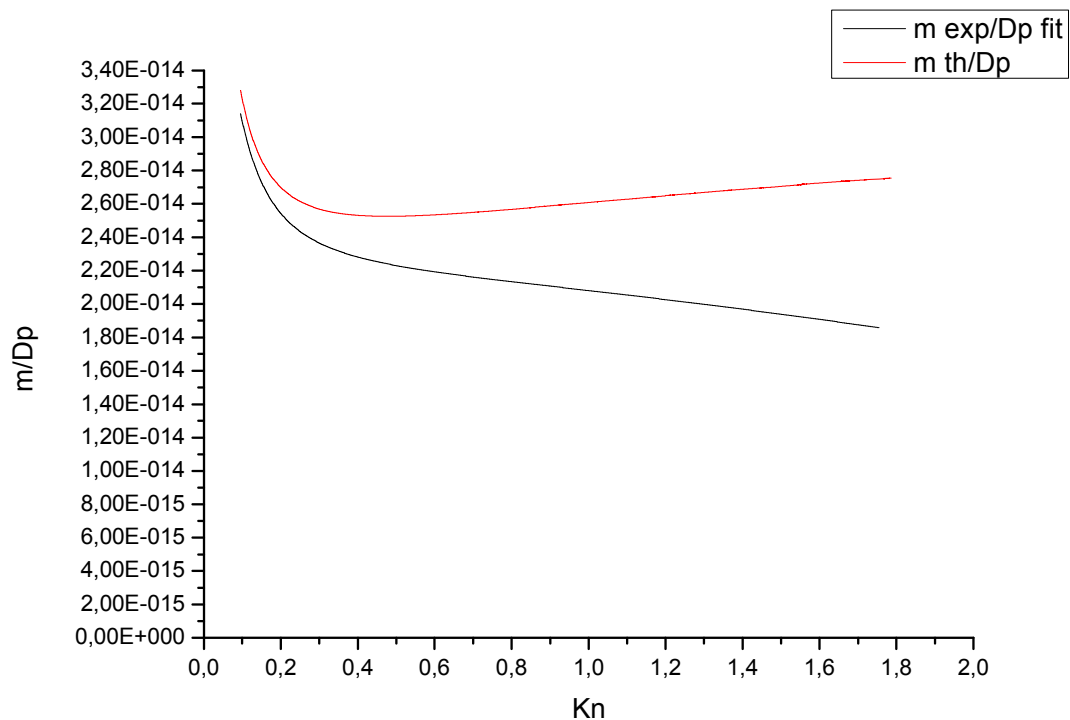
Σχήμα 4.1.a. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

Σύγκριση πειραματικής (m_{exp}) και θεωρητικής (m_{th}) παροχής μάζας



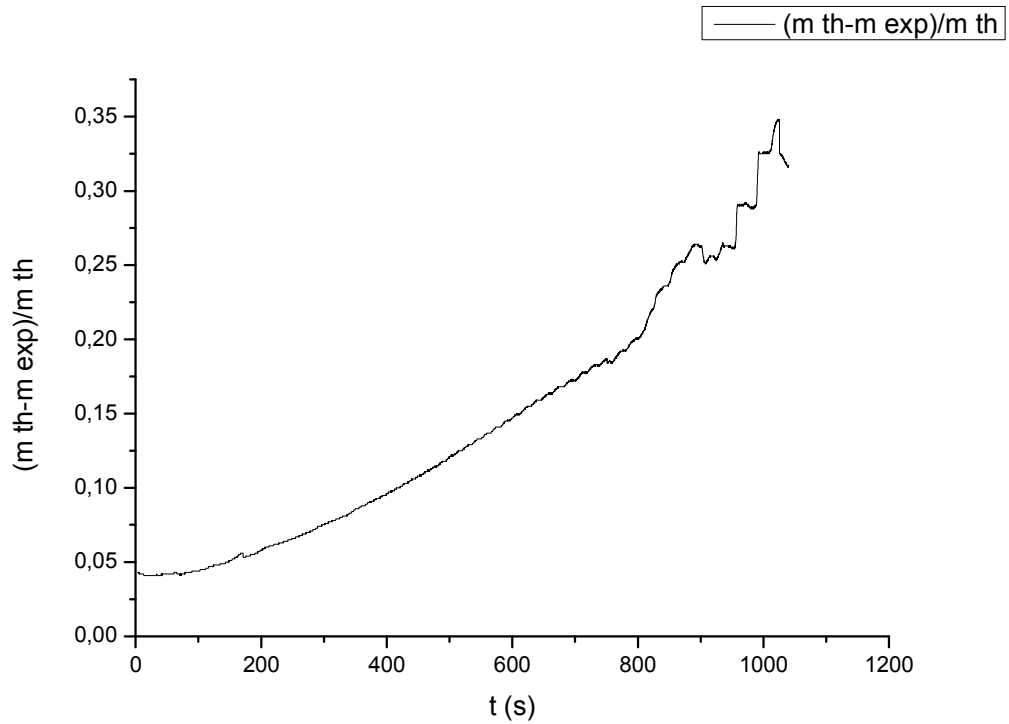
Σχήμα 4.1.a. 9: Πειραματική (m_{exp}) και θεωρητική (m_{th}) παροχή μάζας

Στη συνέχεια συγκρίνονται η πειραματική παροχή μάζας διαιρεμένη με το D_p fit, με τη θεωρητική παροχή μάζας διαιρεμένη με την πραγματική τιμή του D_p .

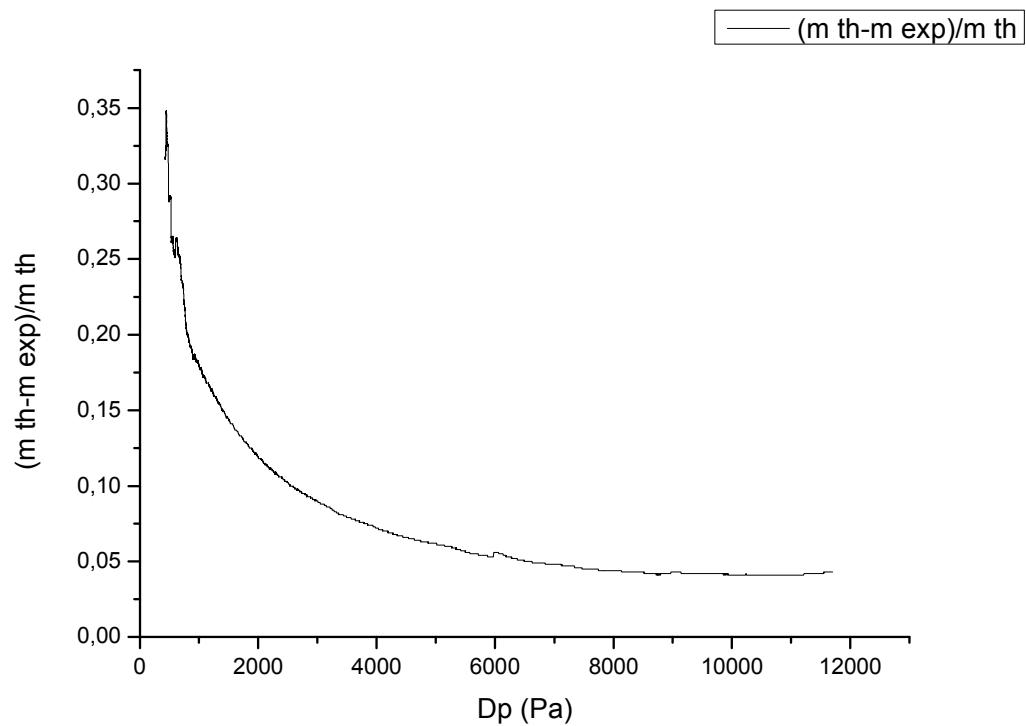


Σχήμα 4.1.a. 10: Πειραματική (m_{exp}) και θεωρητική (m_{th}) παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

Τέλος βλέπουμε τα διαγράμματα της διαφοράς της θεωρητικής από την πειραματική παροχή μάζας διαιρεμένη με την τιμή της θεωρητικής παροχής μάζας συναρτήσει του χρόνου και της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών (D_p).



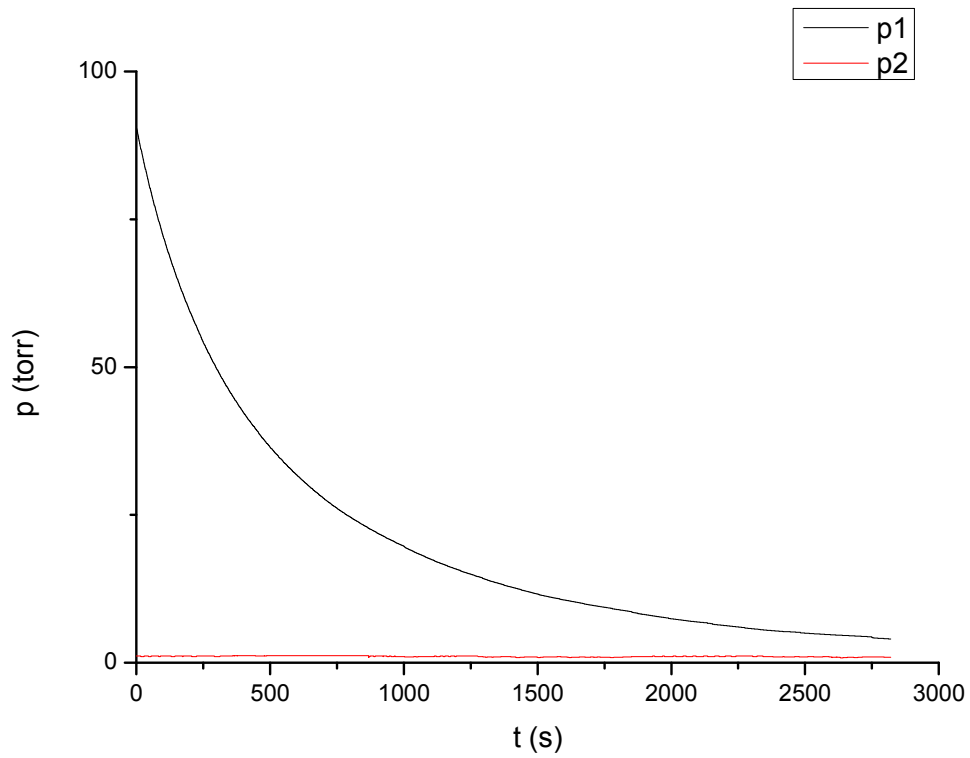
Σχήμα 4.1.a. 11: Αδιαστατοποιημένη διαφορά θεωρητικής και πειραματικής παροχής μάζας συναρτήσει χρόνου



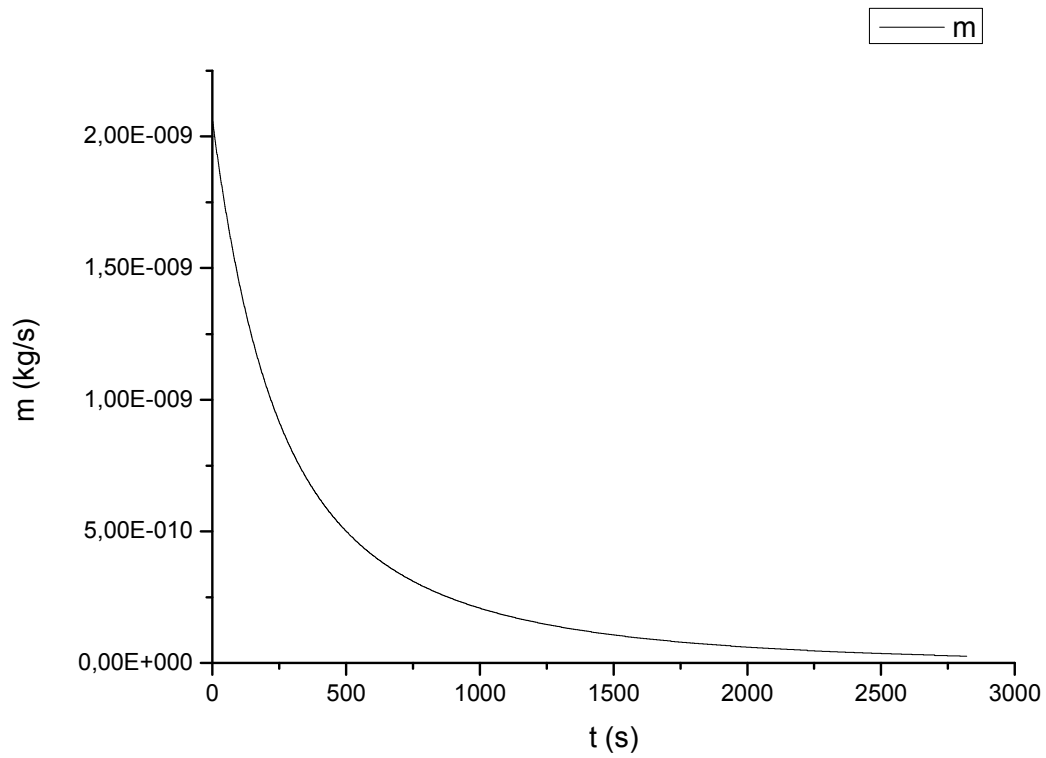
Σχήμα 4.1.a. 12: Αδιαστατοποιημένη διαφορά θεωρητικής και πειραματικής παροχής μάζας συναρτήσει διαφοράς πιέσεων των δεξαμενών

4.1.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr4 πλάτους 286,78μm, ύψους 18,27 μm, εργαζόμενο μέσο Ar

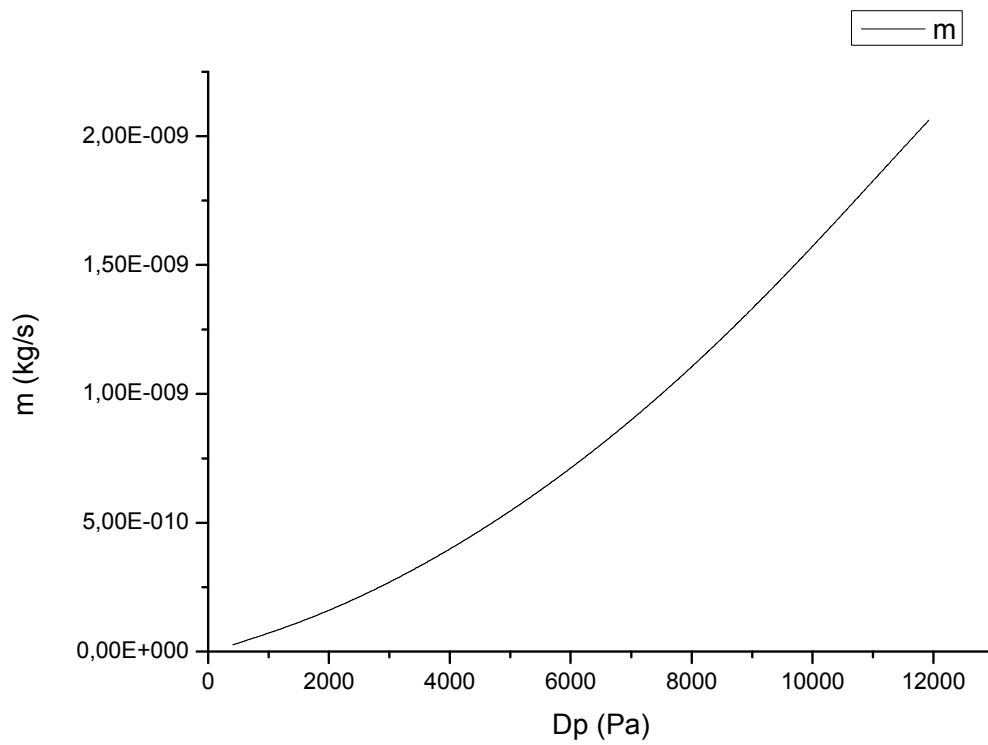
Μικροκανάλι: 55-0045-01 Nr4, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 286,78\mu\text{m} \times 18,27\mu\text{m}$
Αέριο: Ar $R=208$, $\mu=2,28 \times 10^{-5}$ kg/ms για $T=293\text{K}$



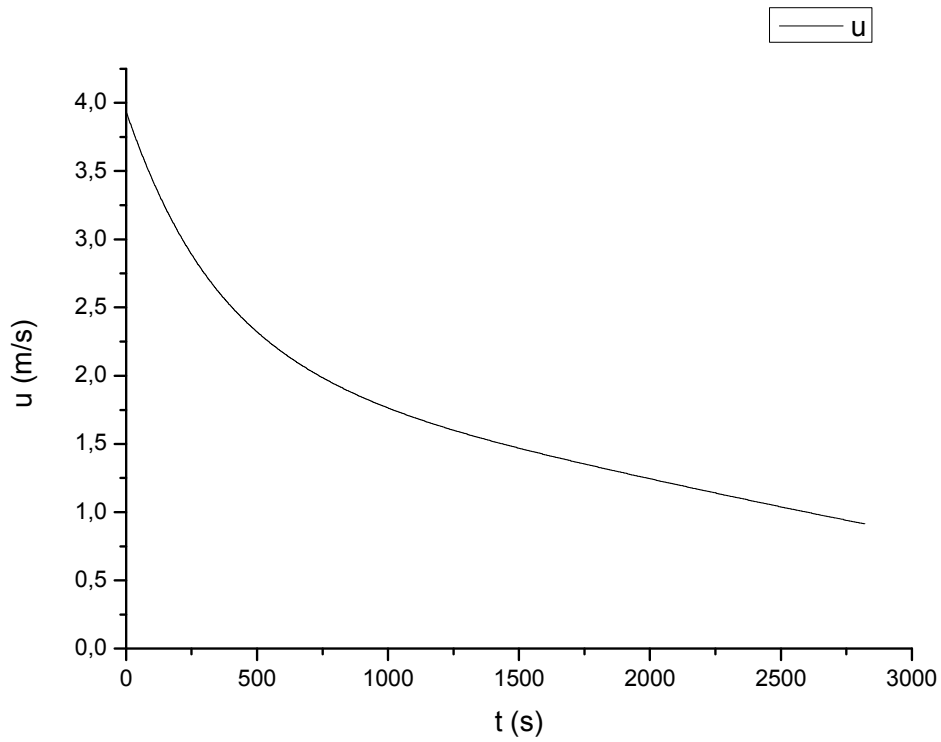
Σχήμα 4.1.b. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



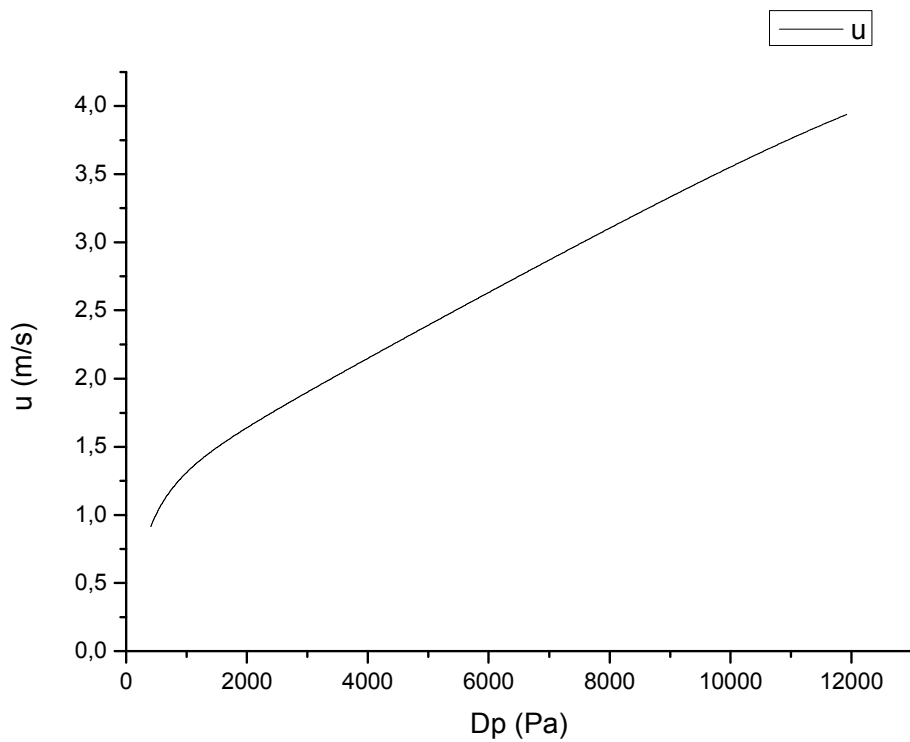
Σχήμα 4.1.b. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



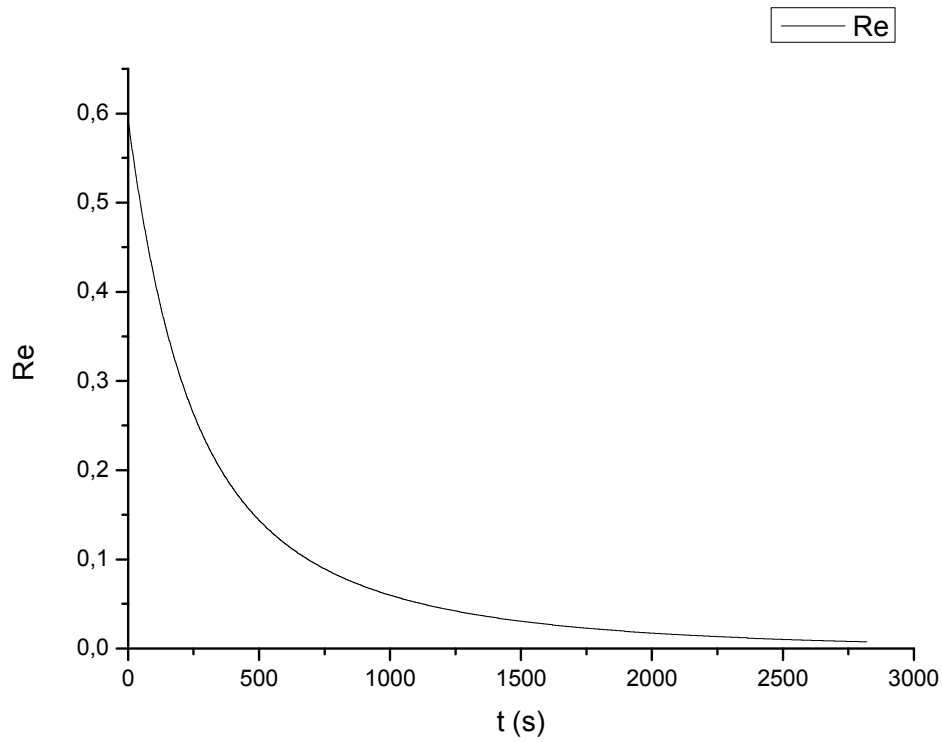
Σχήμα 4.1.b. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



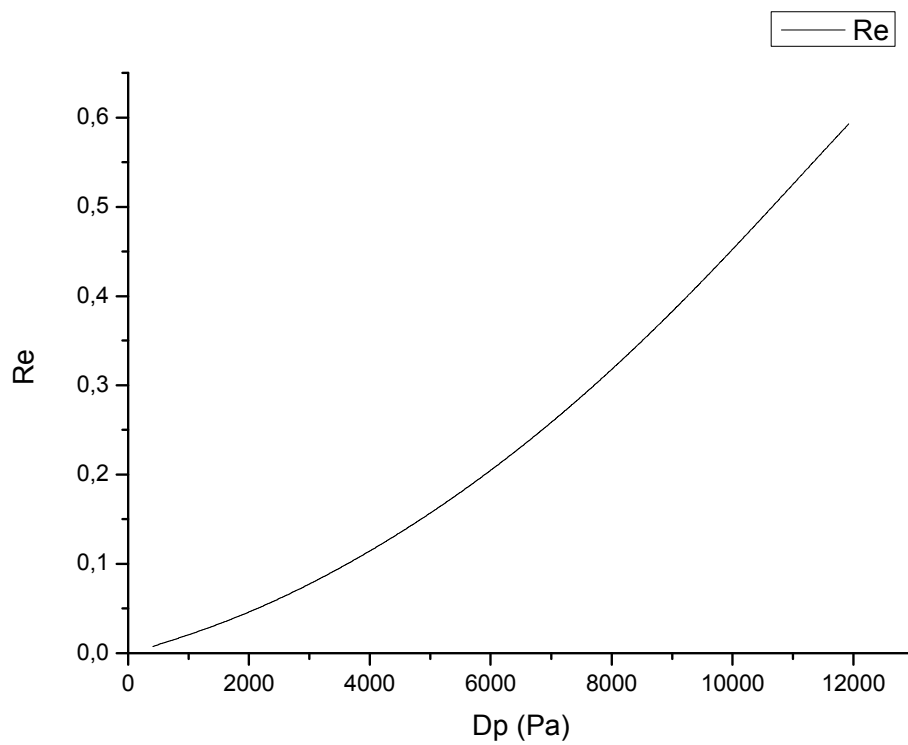
Σχήμα 4.1.b. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



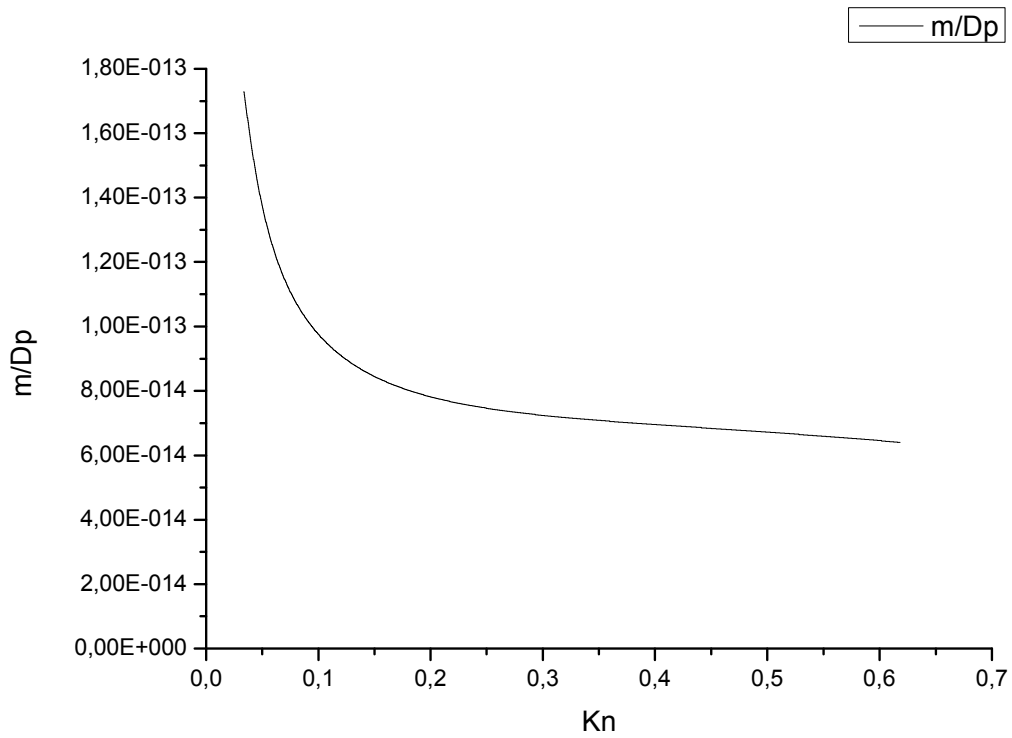
Σχήμα 4.1.b. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



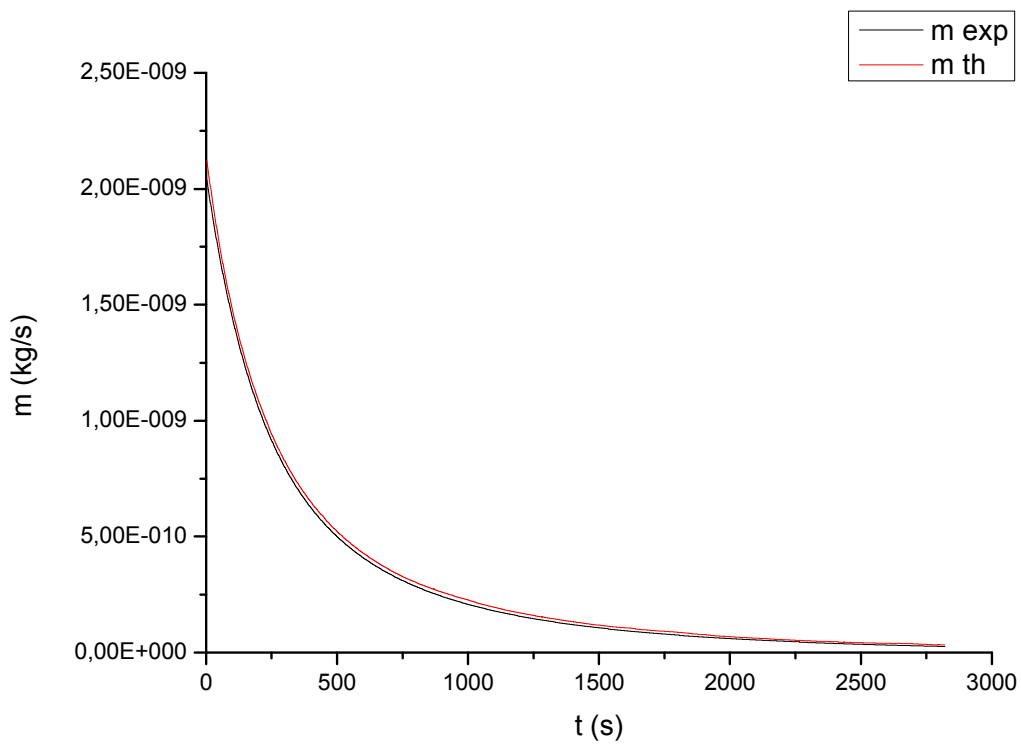
Σχήμα 4.1.b. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



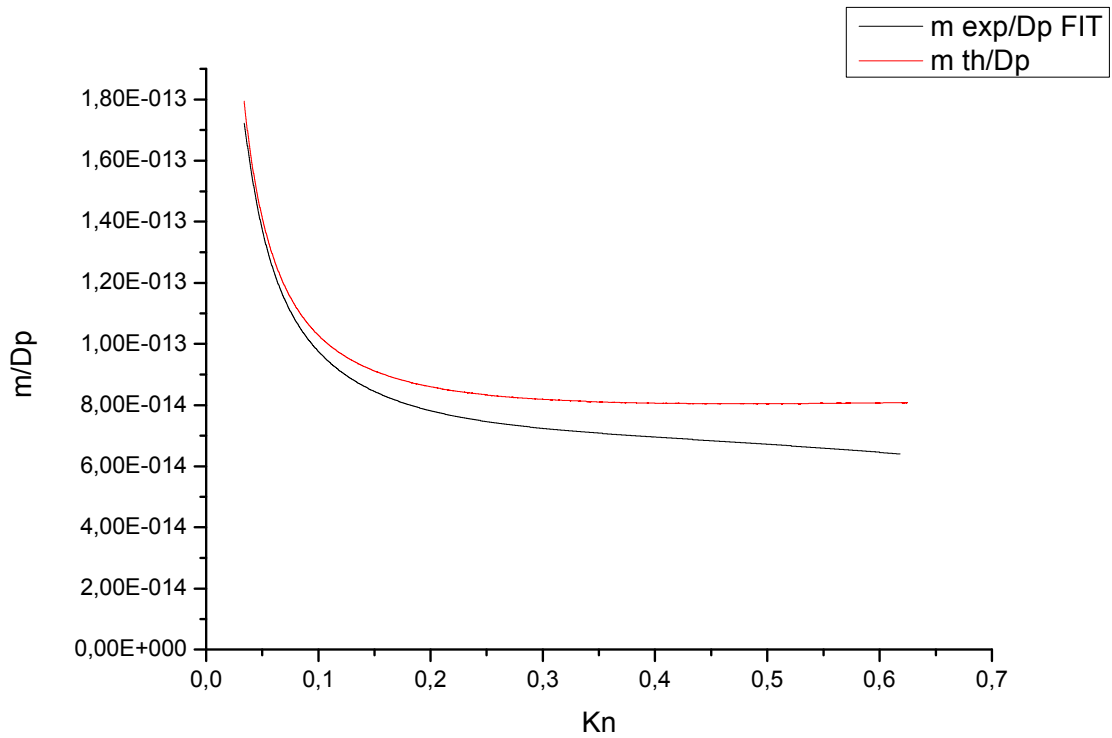
Σχήμα 4.1.b. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



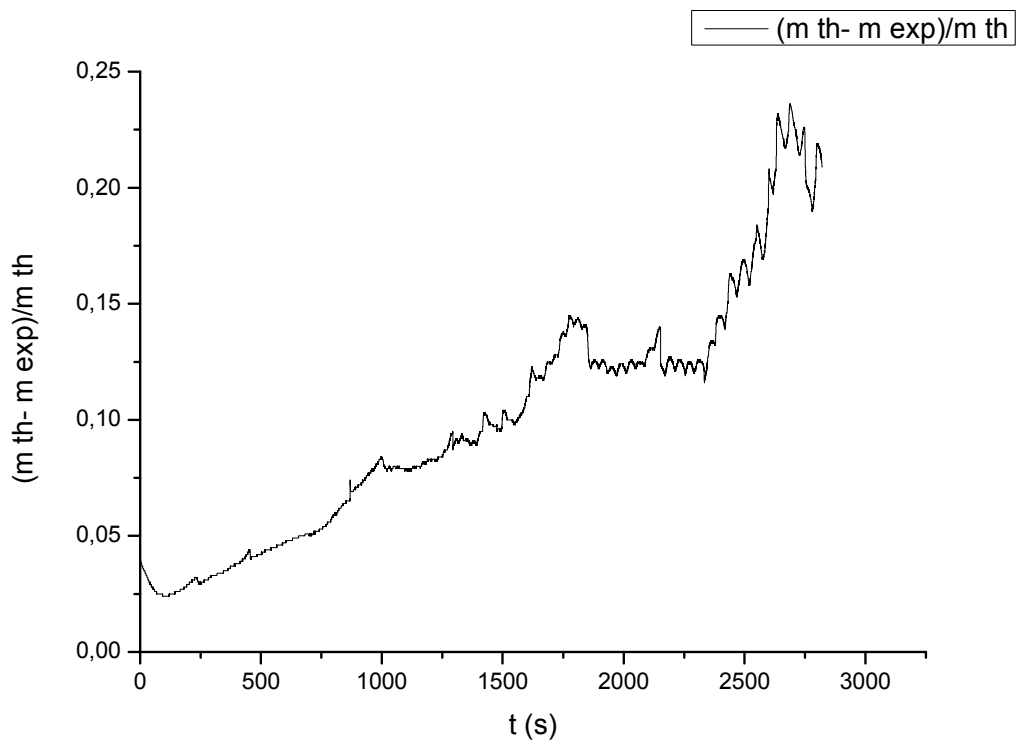
Σχήμα 4.1.b. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen



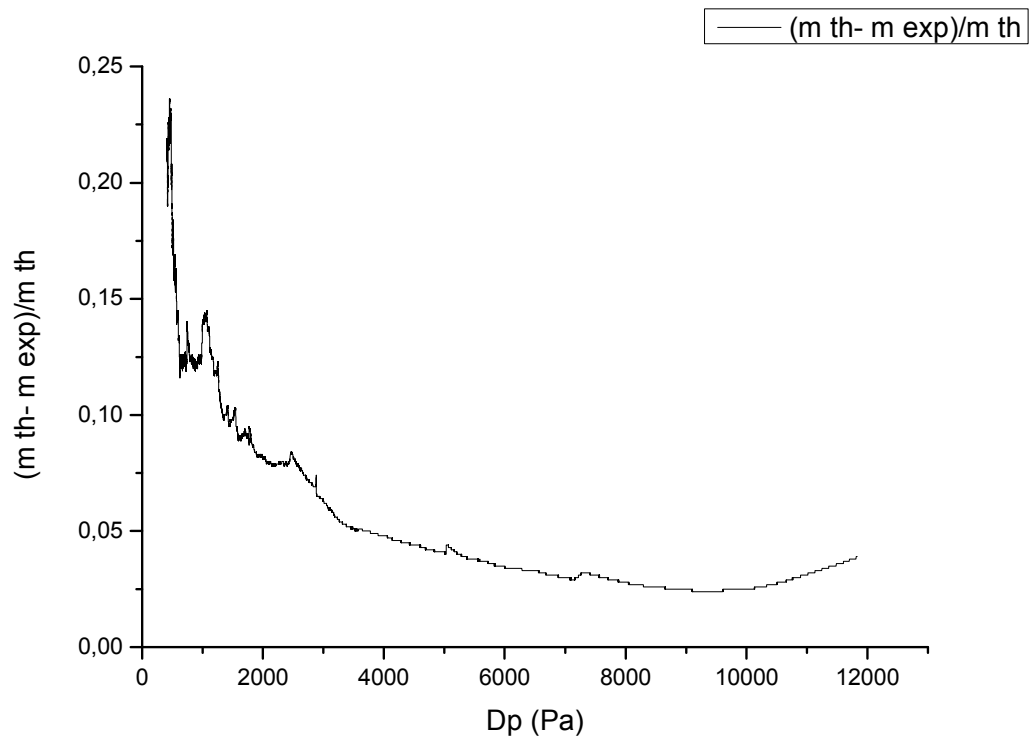
Σχήμα 4.1.b. 9: Πειραματική ($m \text{ exp}$) και θεωρητική ($m \text{ th}$) παροχή μάζας



Σχήμα 4.1.b. 10: Πειραματική ($m \text{ exp}$) και θεωρητική ($m \text{ th}$) παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



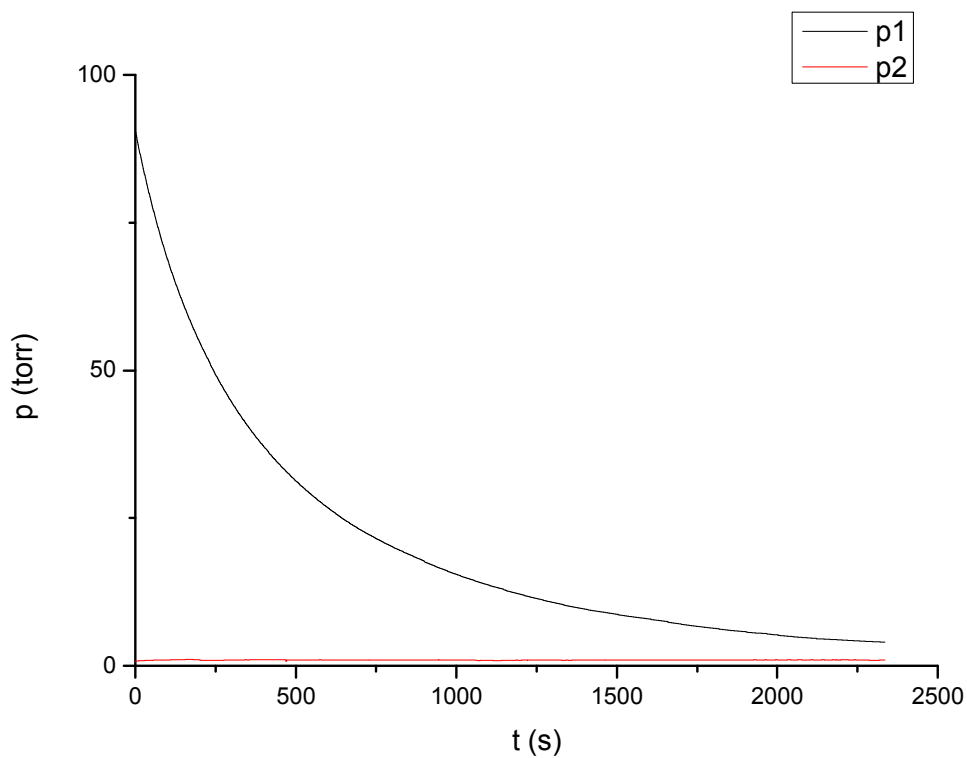
Σχήμα 4.1.b. 11: Αδιαστατοποιημένη διαφορά θεωρητικής και πειραματικής παροχής μάζας συναρτήσει χρόνου



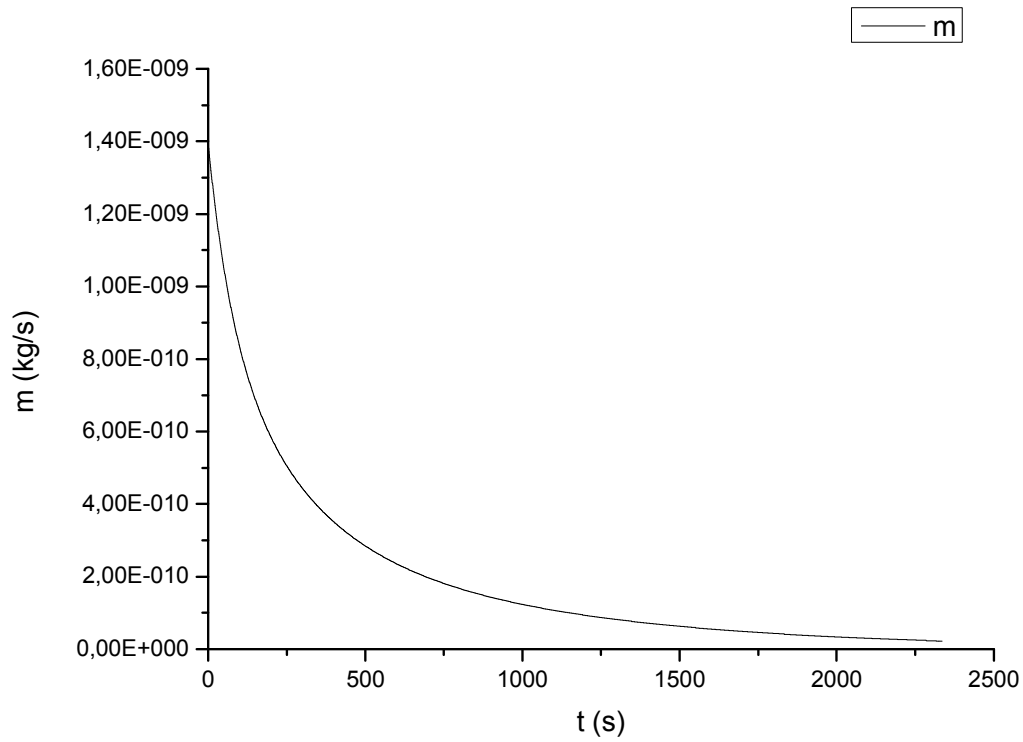
Σχήμα 4.1.b. 12: Αδιαστατοποιημένη διαφορά θεωρητικής και πειραματικής παροχής μάζας συναρτήσει διαφοράς πίεσεων των δεξαμενών

4.1.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr4 πλάτους 286,78μm, ύψους 18,27 μm, εργαζόμενο μέσο Αέρας

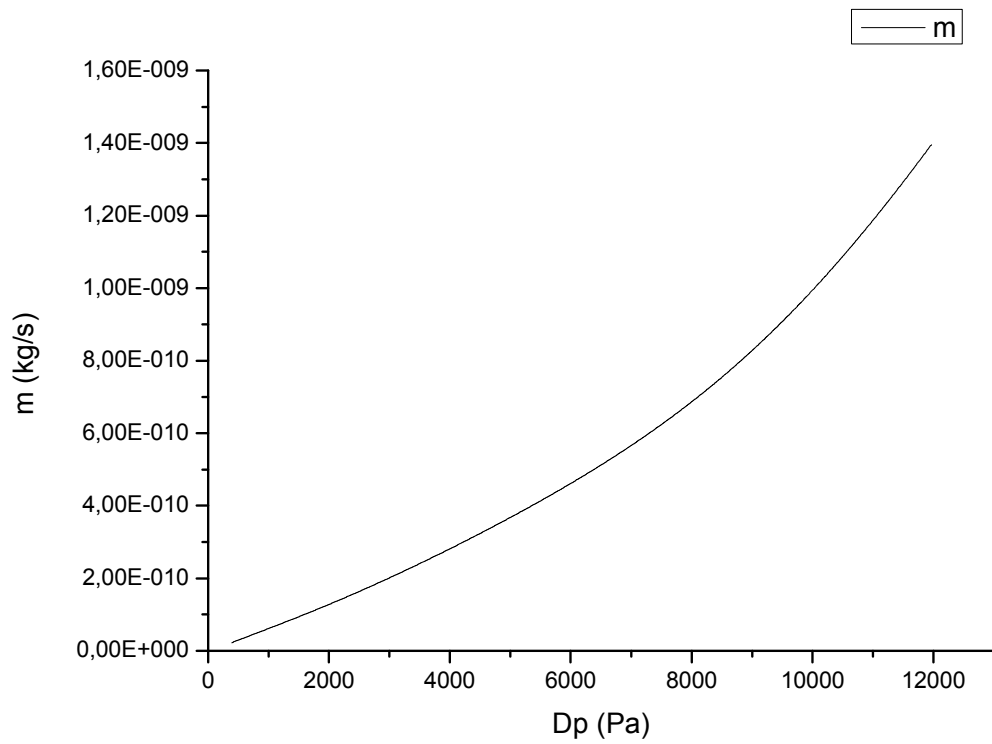
Μικροκανάλι: 55-0045-01 Nr4, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 286,78\mu\text{m} \times 18,27\mu\text{m}$
Αέριο: Αέρας $R=287$, $\mu=1,82 \times 10^{-5}$ kg/ms για $T=298\text{K}$



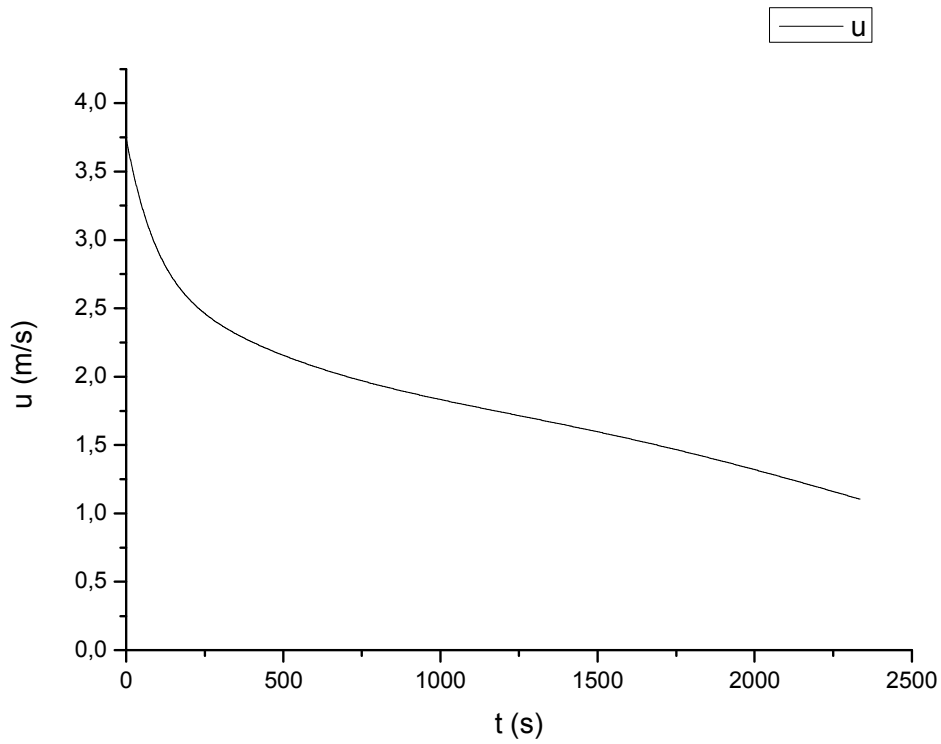
Σχήμα 4.1.c. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



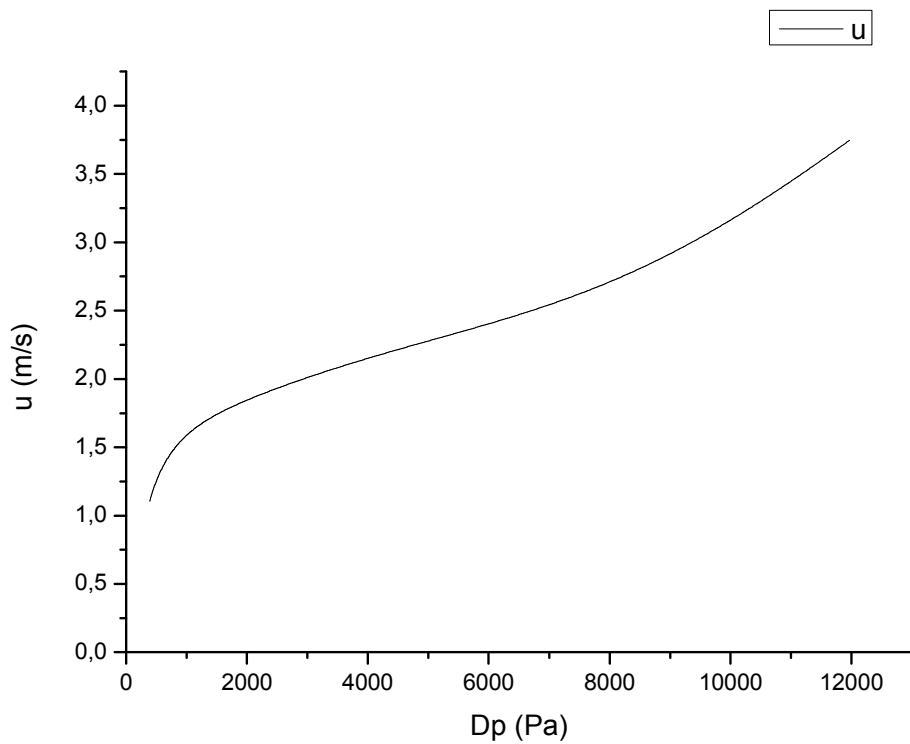
Σχήμα 4.1.ε. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



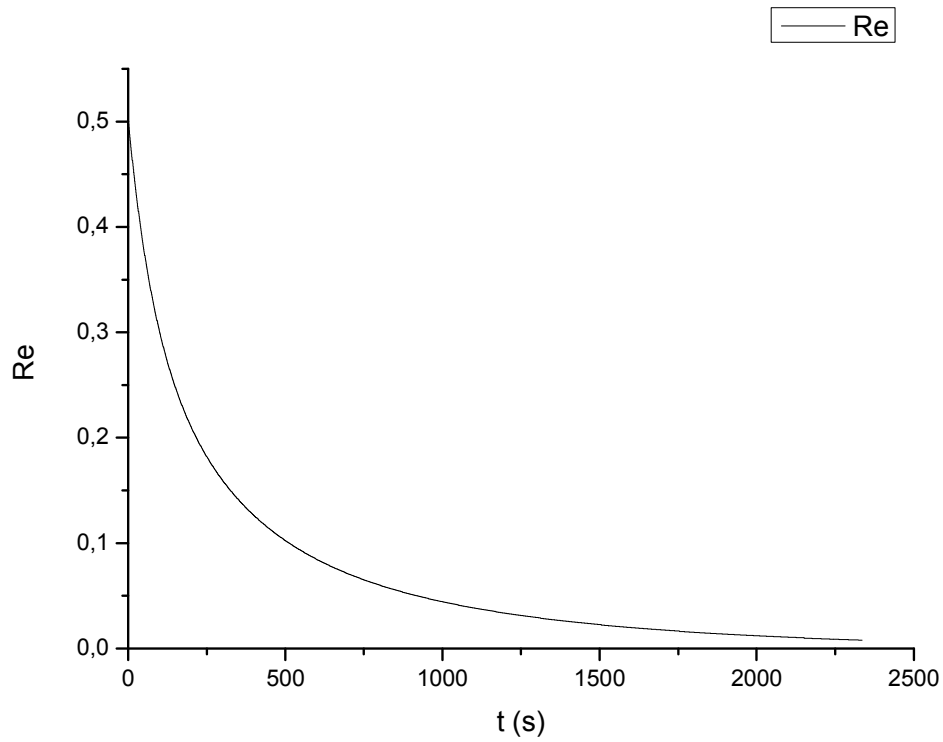
Σχήμα 4.1.ε. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



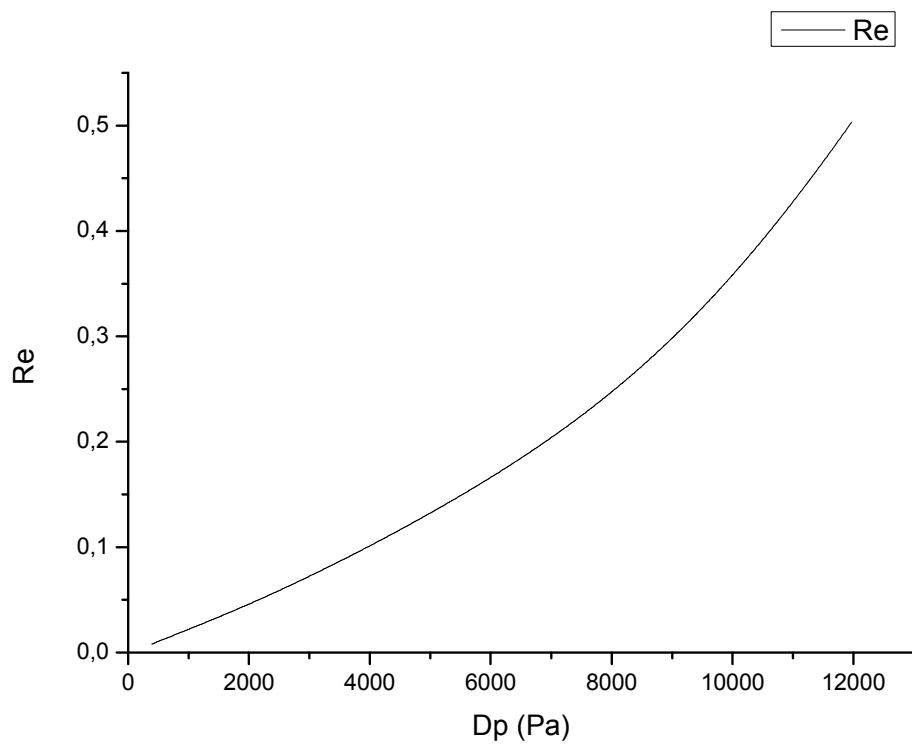
Σχήμα 4.1.c. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



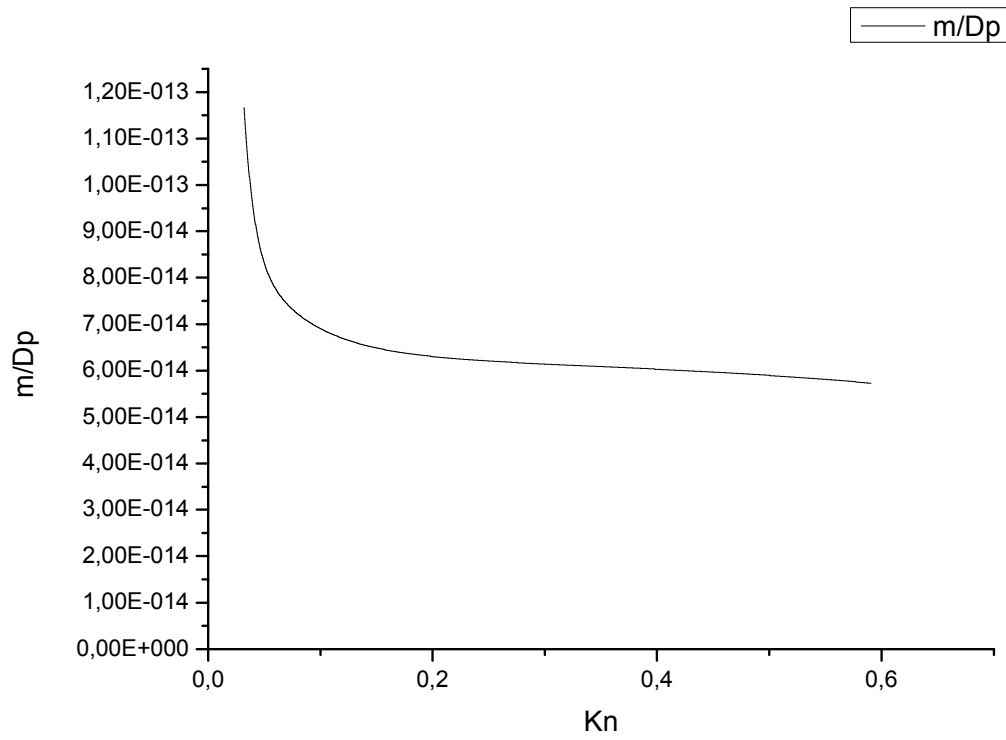
Σχήμα 4.1.c. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.1.ε. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



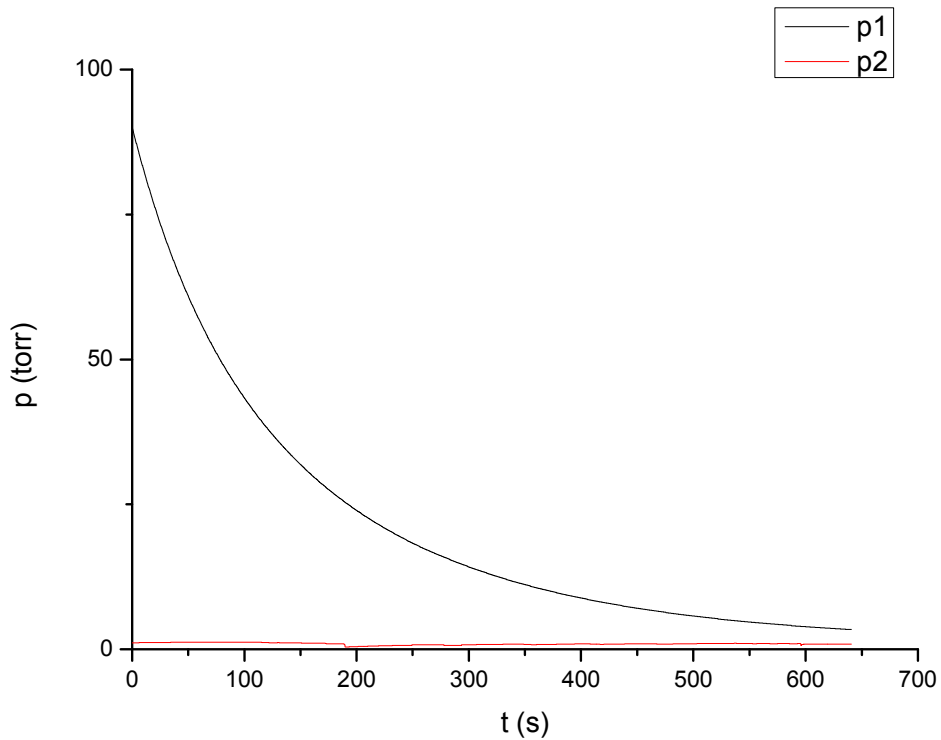
Σχήμα 4.1.ε. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



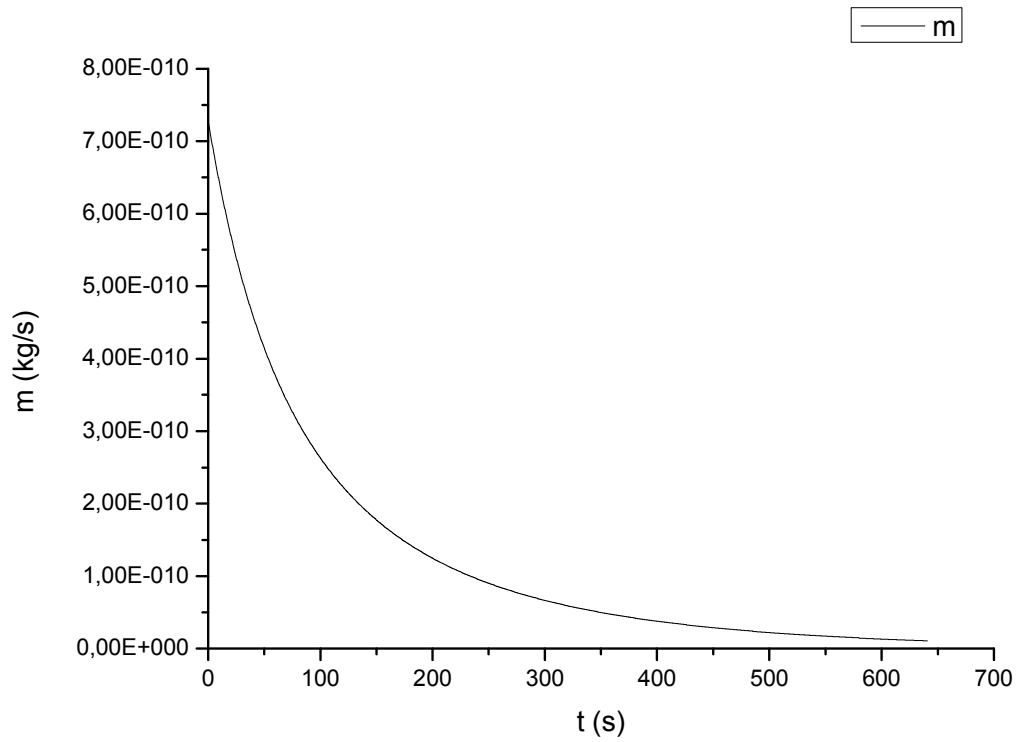
Σχήμα 4.1.ε. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.2.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr1 πλάτους 283,91 μm , ύψους 22,17 μm , εργαζόμενο μέσο He

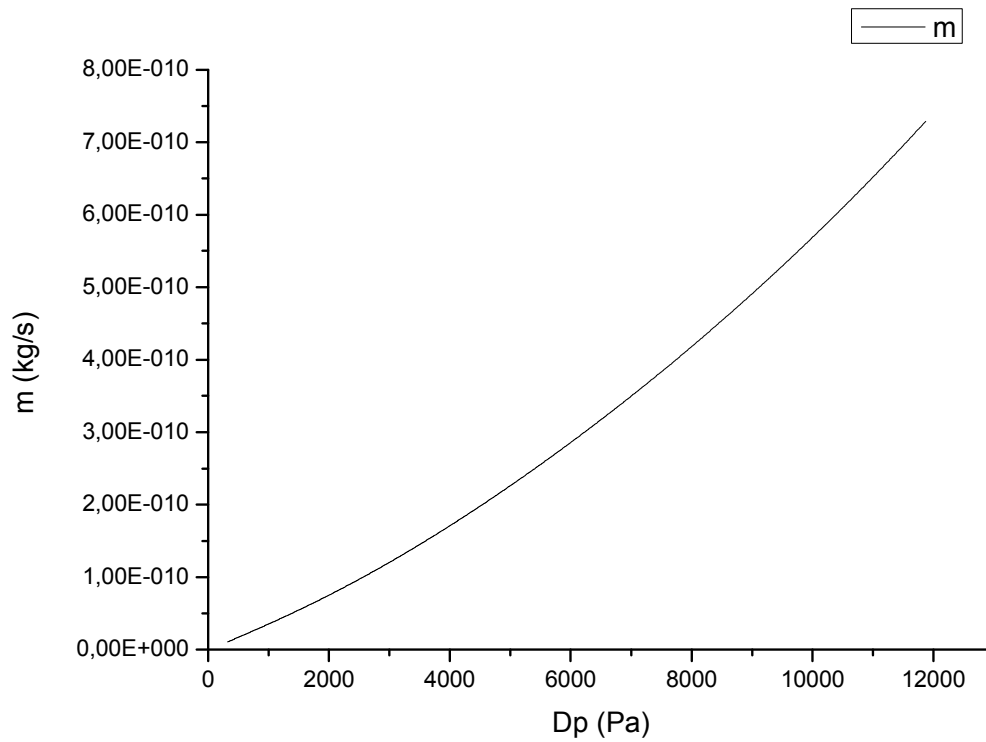
Μικροκανάλι: 55-0045-01 Nr1, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 283,91 \mu\text{m} \times 22,17\mu\text{m}$
Αέριο: He $R=2076,9$, $\mu=1,9955 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



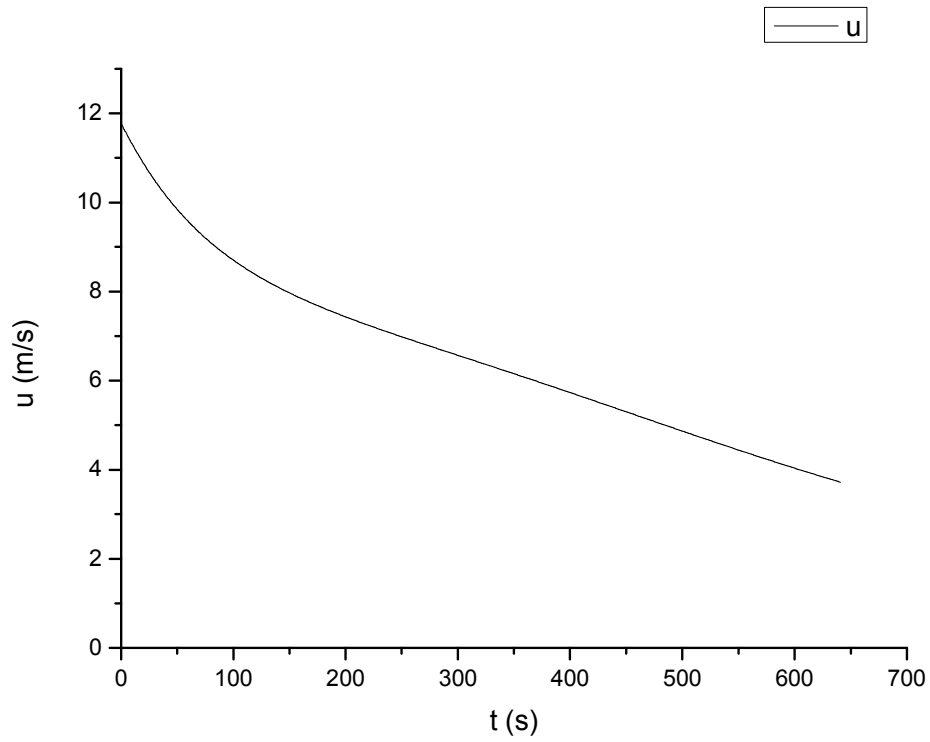
Σχήμα 4.2.a. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



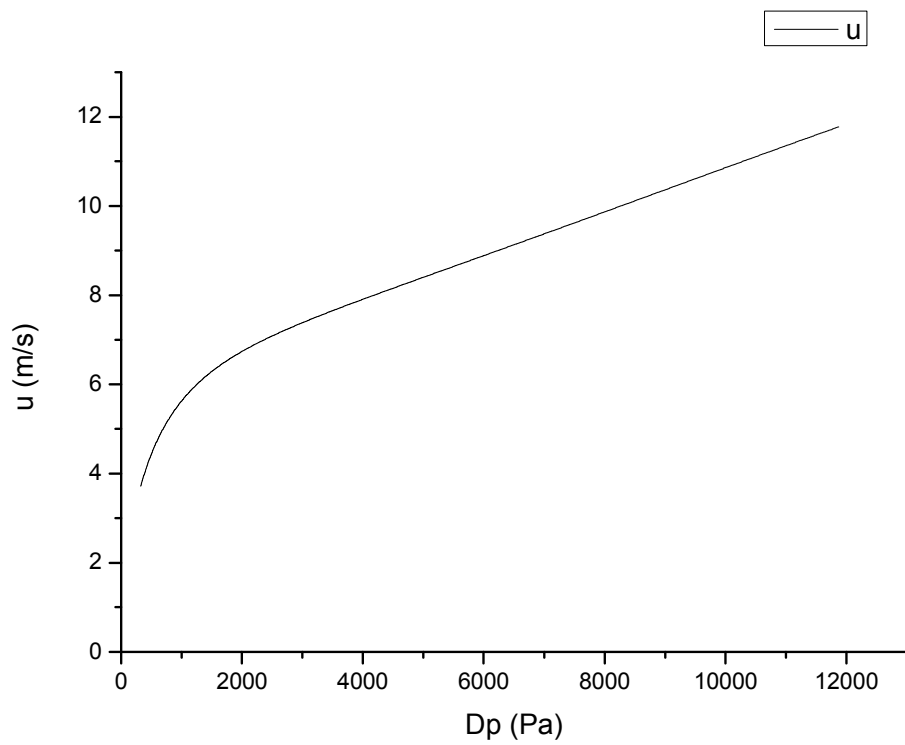
Σχήμα 4.2.a. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



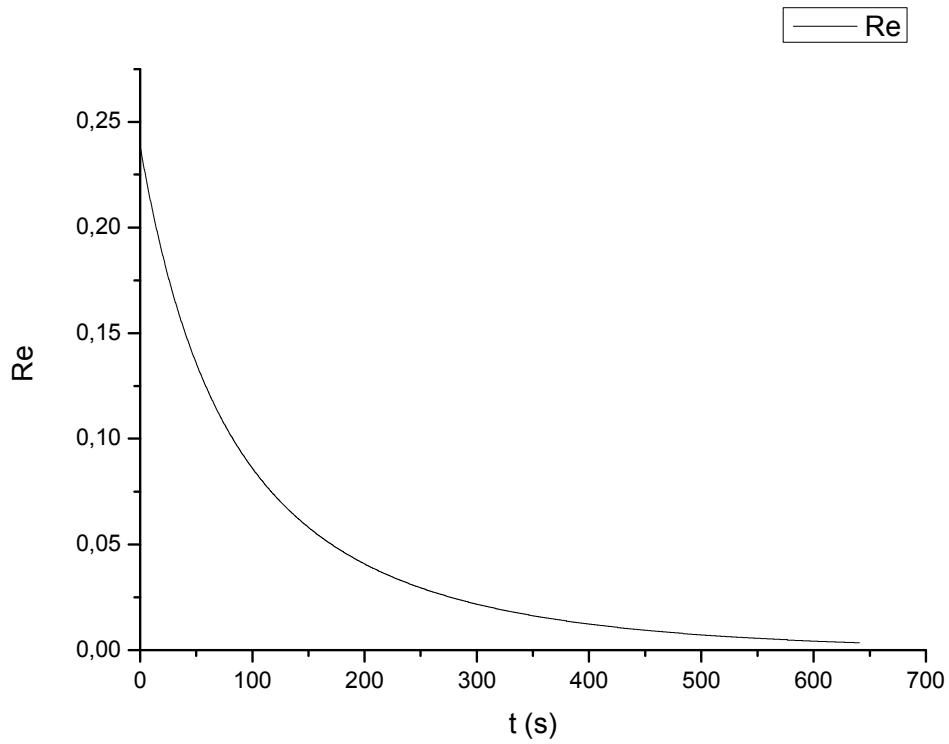
Σχήμα 4.2.a. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



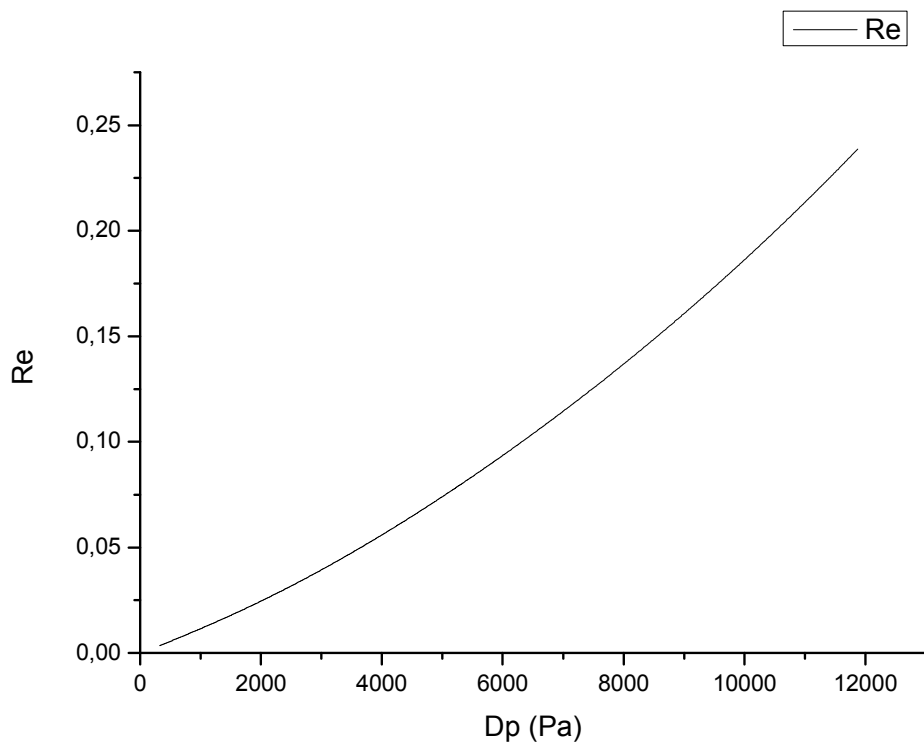
Σχήμα 4.2.α. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



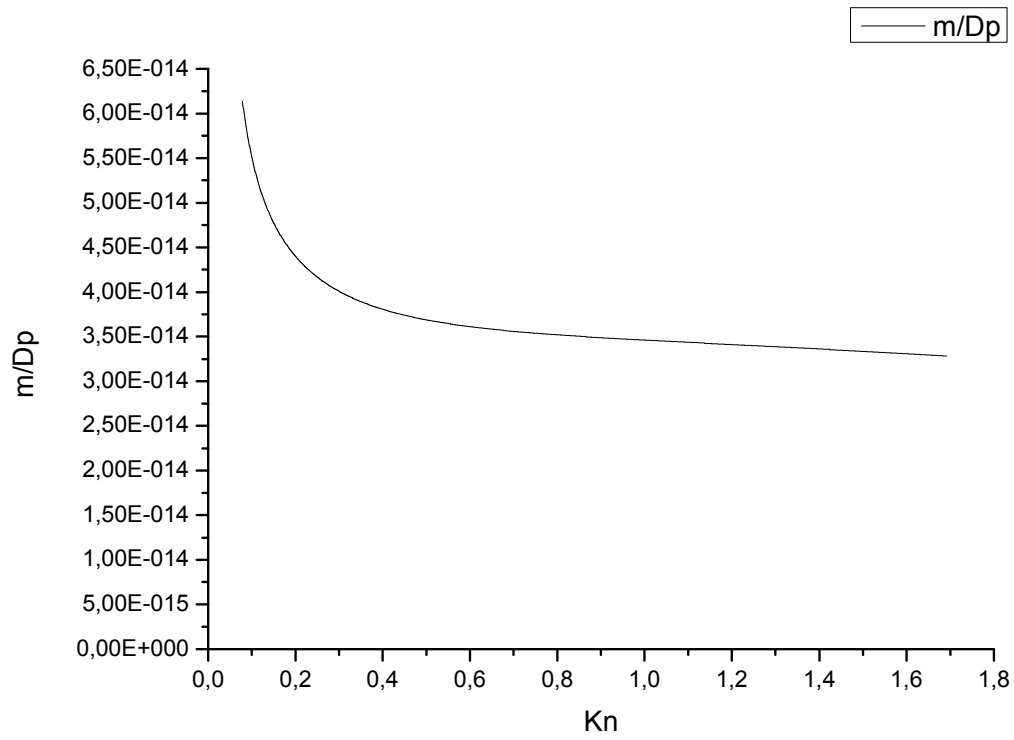
Σχήμα 4.2.α. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.2.a. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



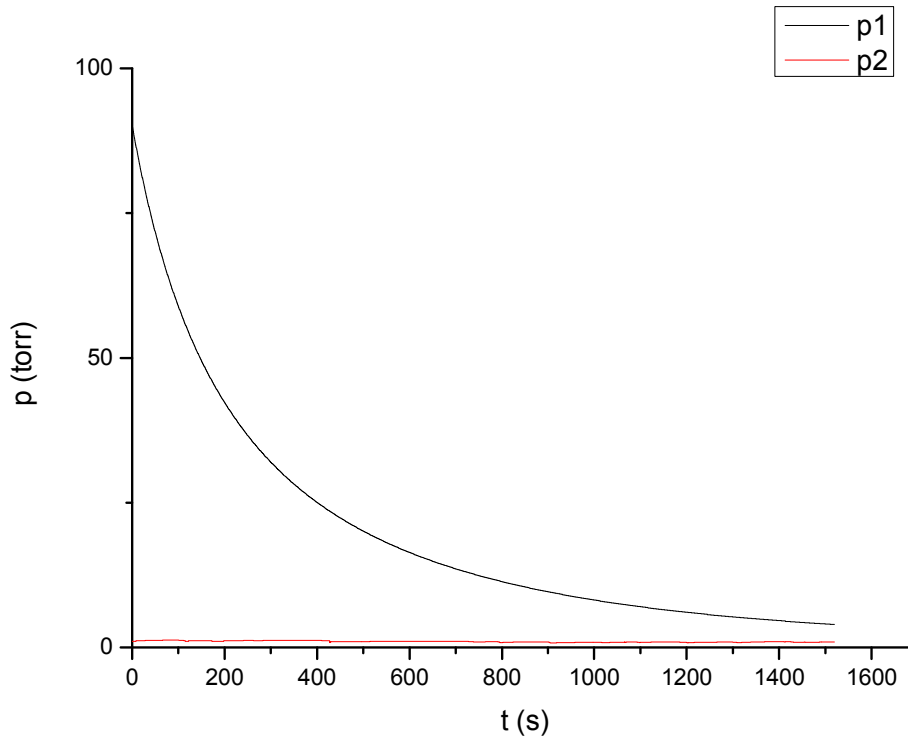
Σχήμα 4.2.a. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



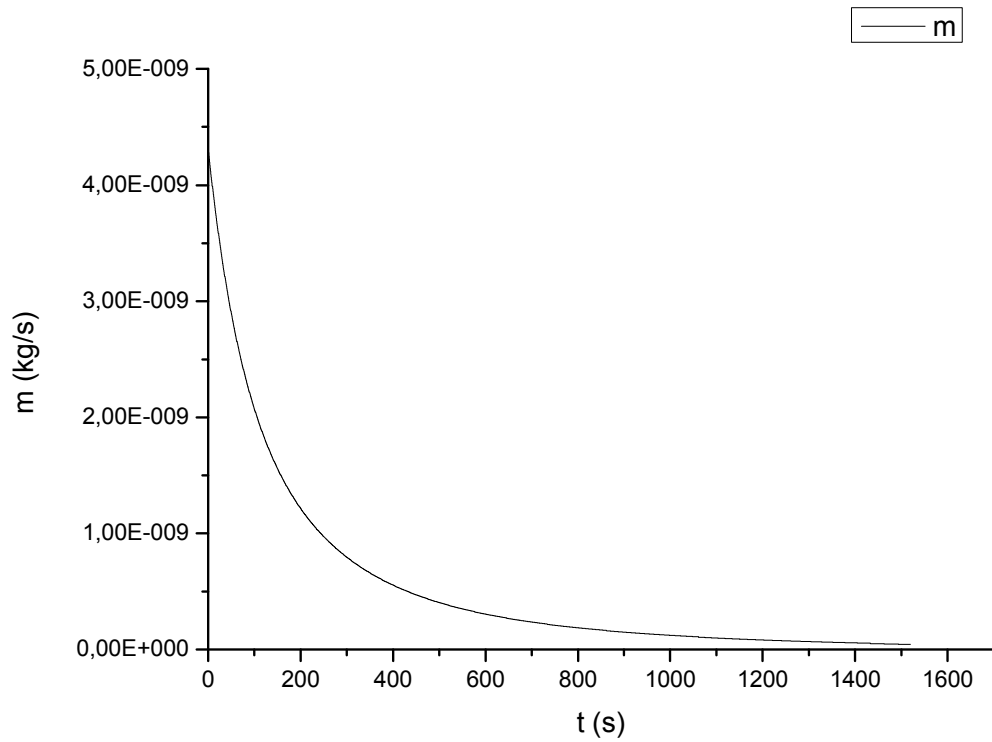
Σχήμα 4.2.a. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.2.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr1 πλάτους 283,91 μm , ύψους 22,17 μm , εργαζόμενο μέσο Ar

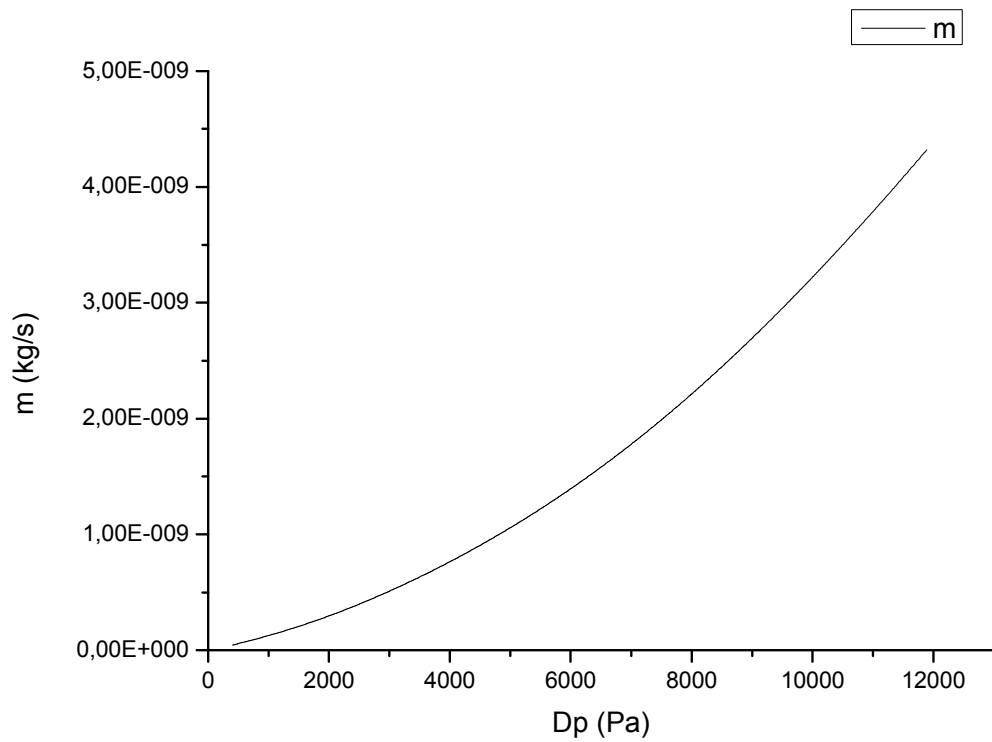
Μικροκανάλι: 55-0045-01 Nr1, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 283,91 \mu\text{m} \times 22,17\mu\text{m}$
Αέριο: Ar $R=208$, $\mu=2,28 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=293\text{K}$



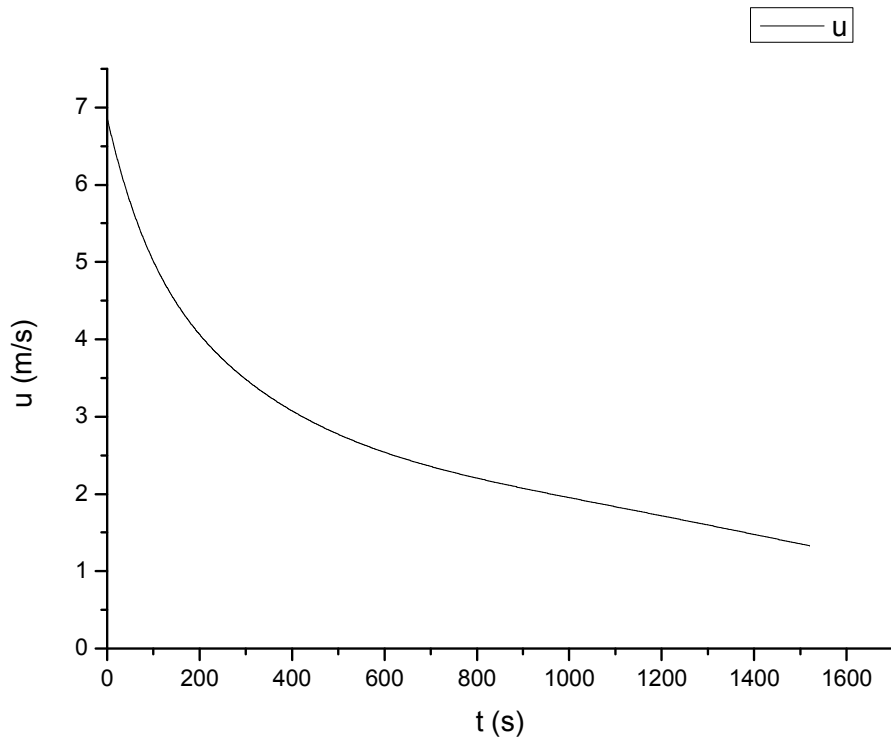
Σχήμα 4.2.b. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



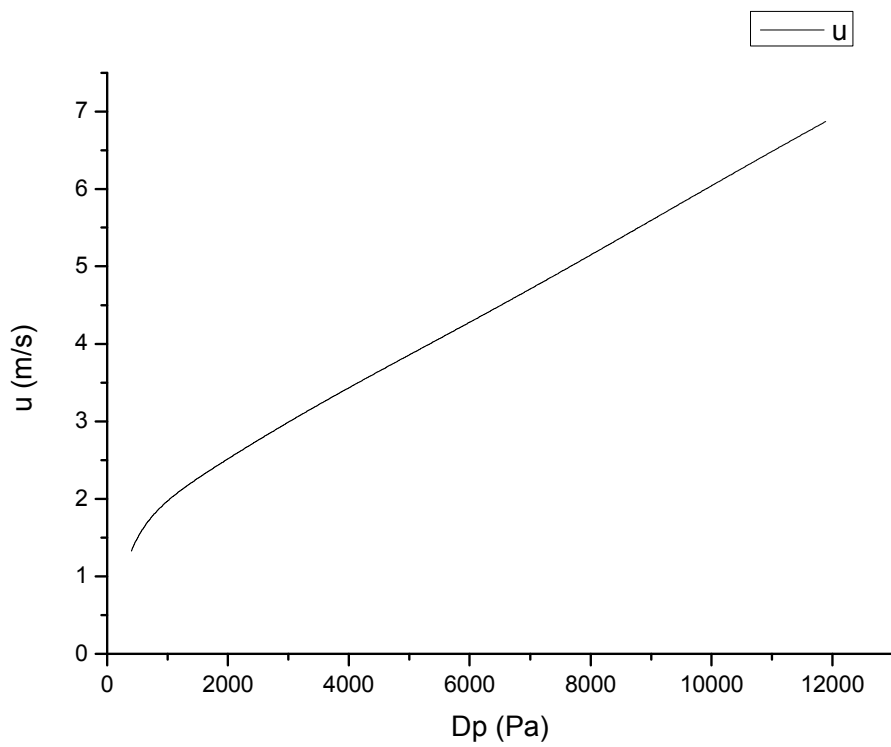
Σχήμα 4.2.b. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



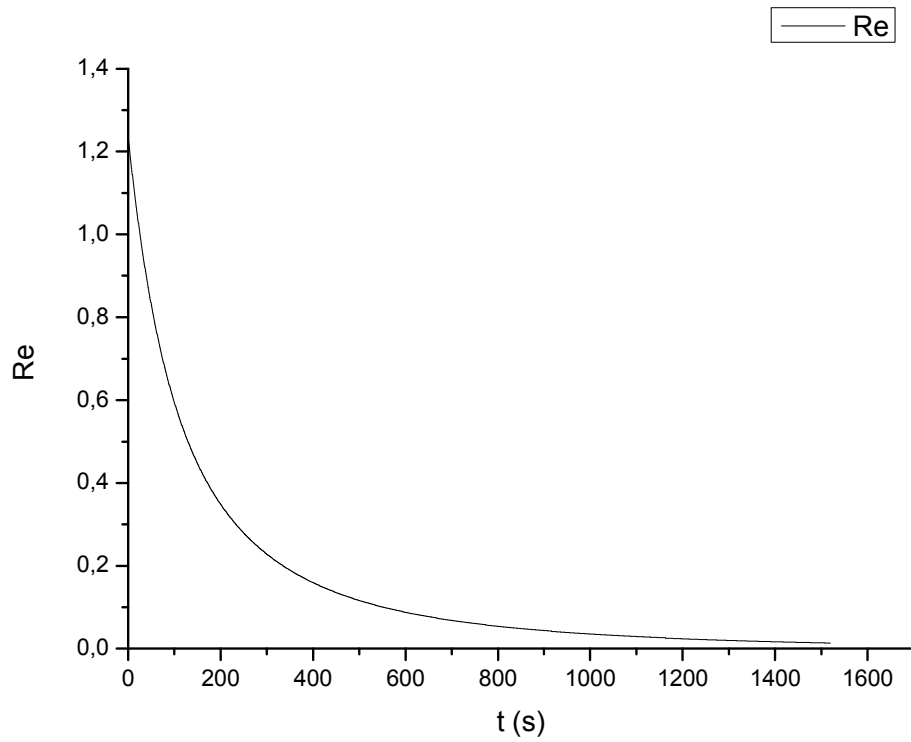
Σχήμα 4.2.b. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



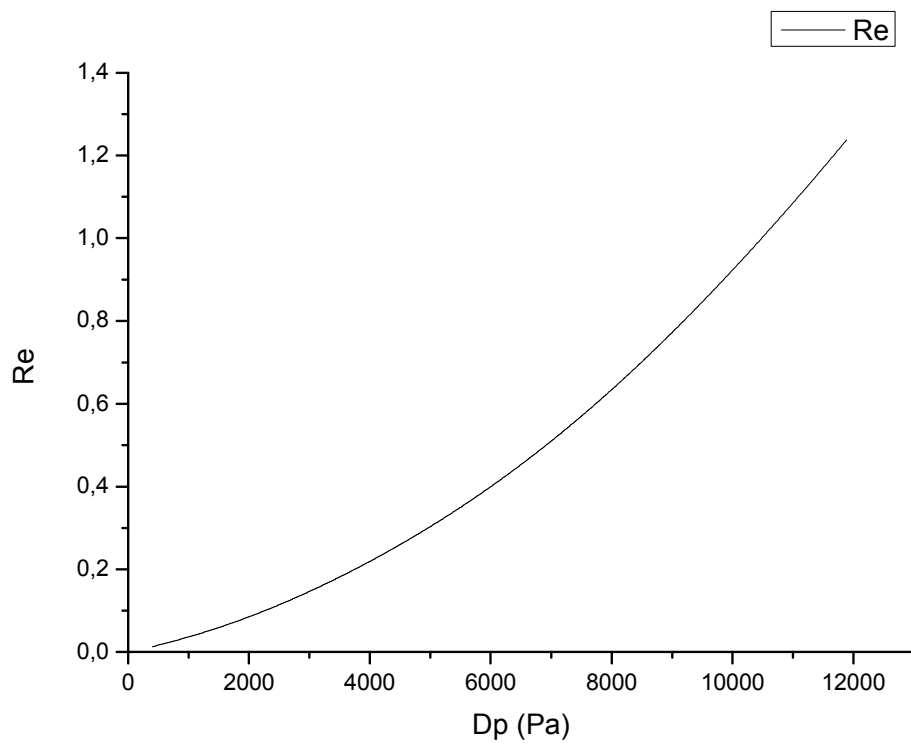
Σχήμα 4.2.b. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



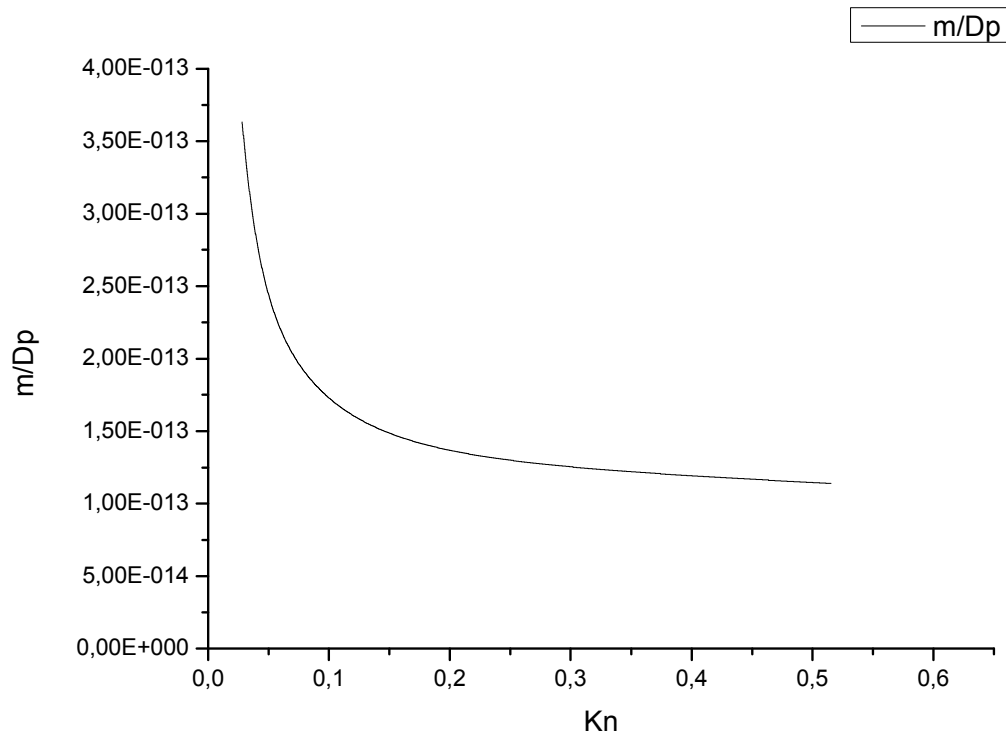
Σχήμα 4.2.b. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.2.b. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



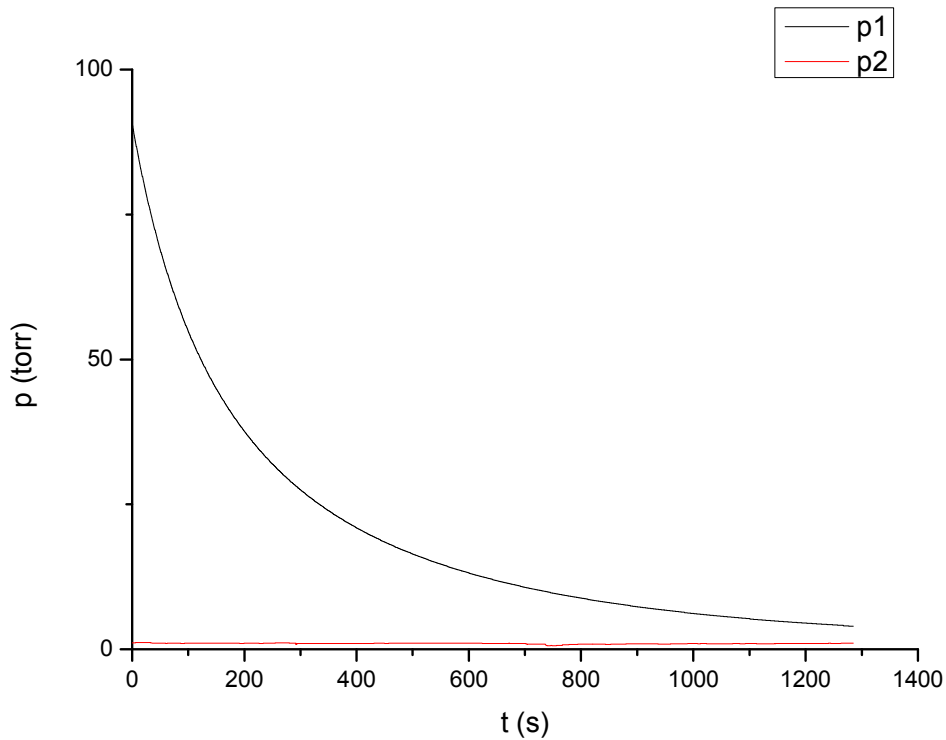
Σχήμα 4.2.b. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



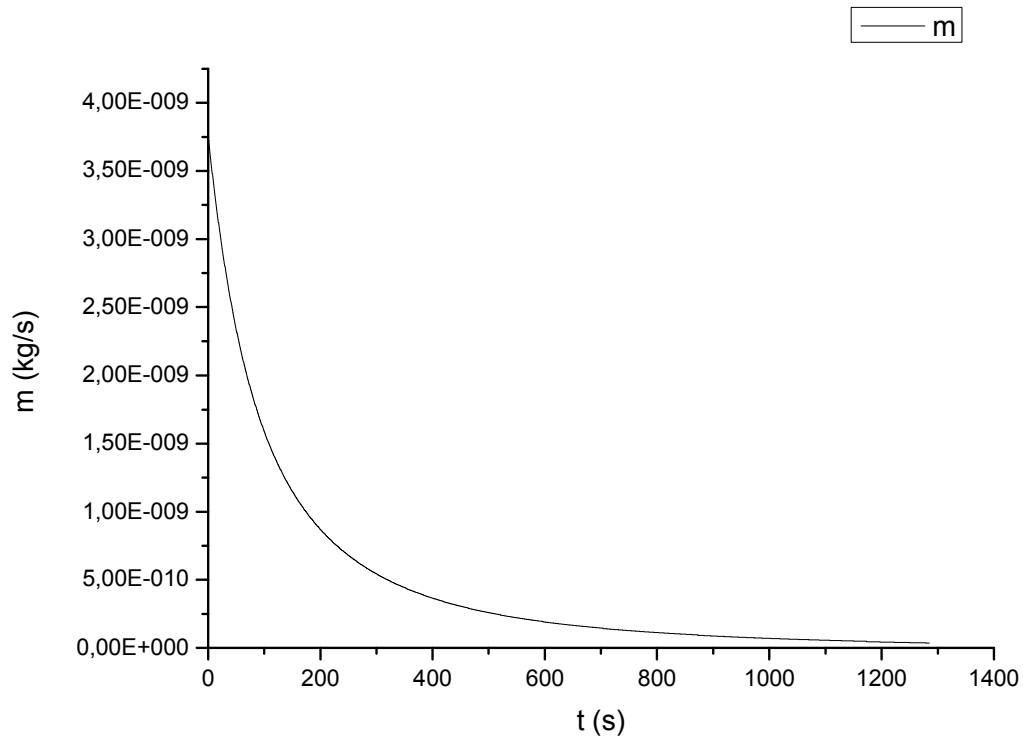
Σχήμα 4.2.b. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.2.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr1 πλάτους 283,91 μm, ύψους 22,17 μm, εργαζόμενο μέσο Αέρας

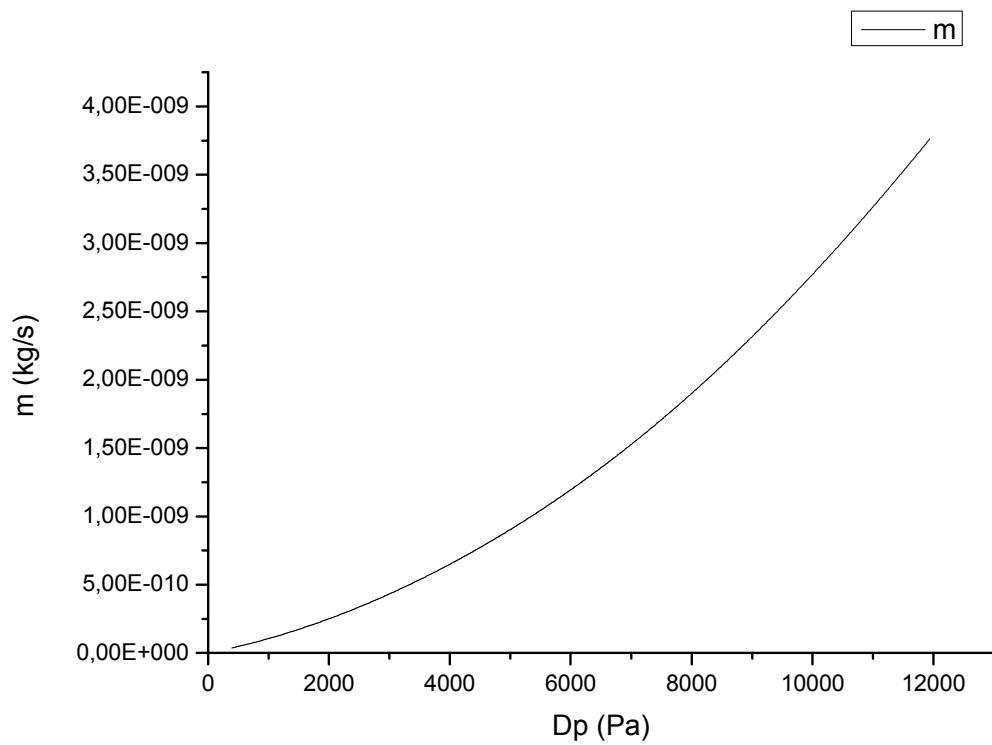
Μικροκανάλι: 55-0045-01 Nr1, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 283,91 \mu\text{m} \times 22,17\mu\text{m}$
Αέριο: Αέρας $R=287$, $\mu=1,82 \times 10^{-5}$ kg/ms για $T=298\text{K}$



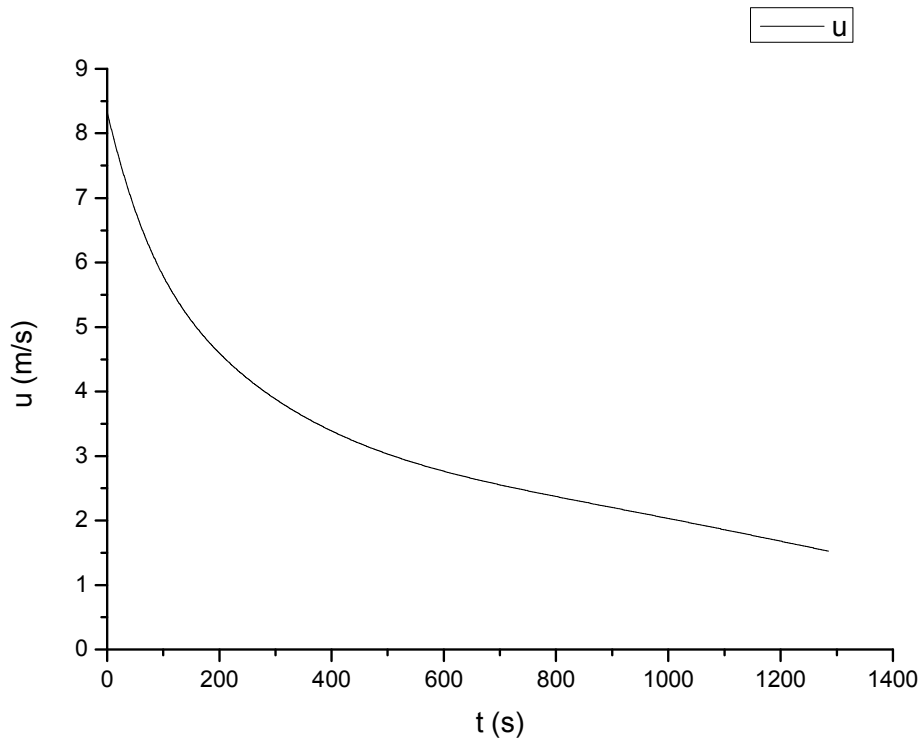
Σχήμα 4.2.c. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



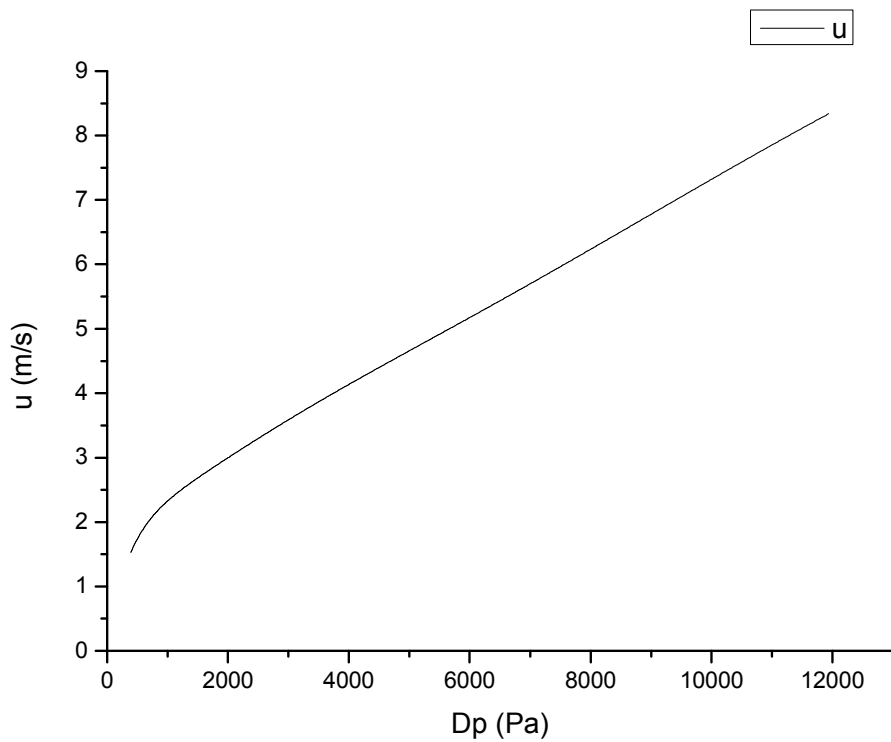
Σχήμα 4.2.ε. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



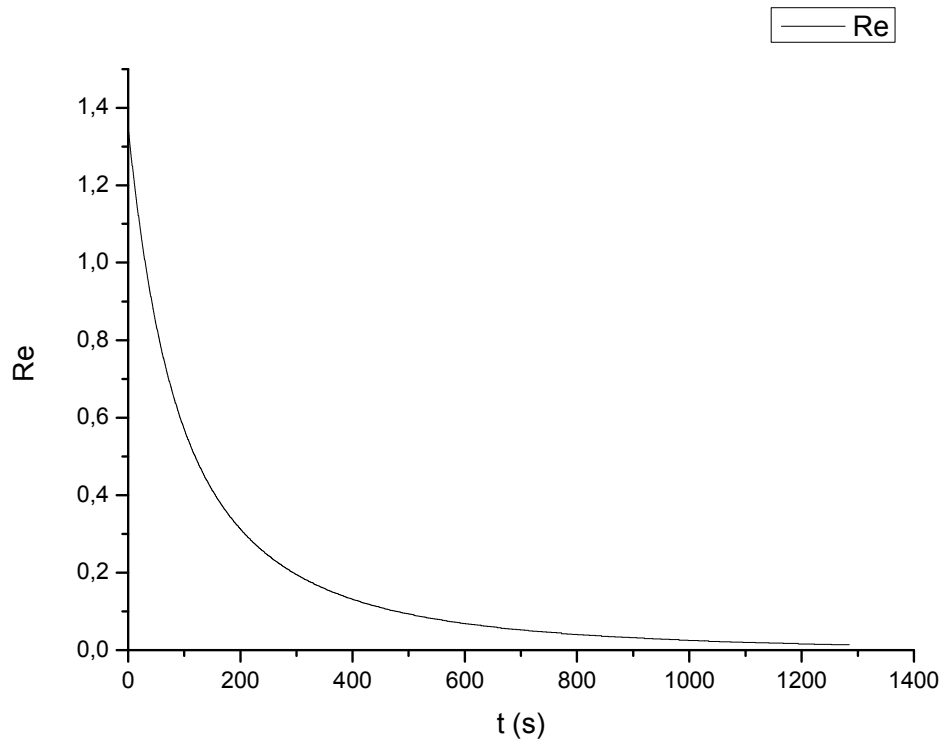
Σχήμα 4.2.ε. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



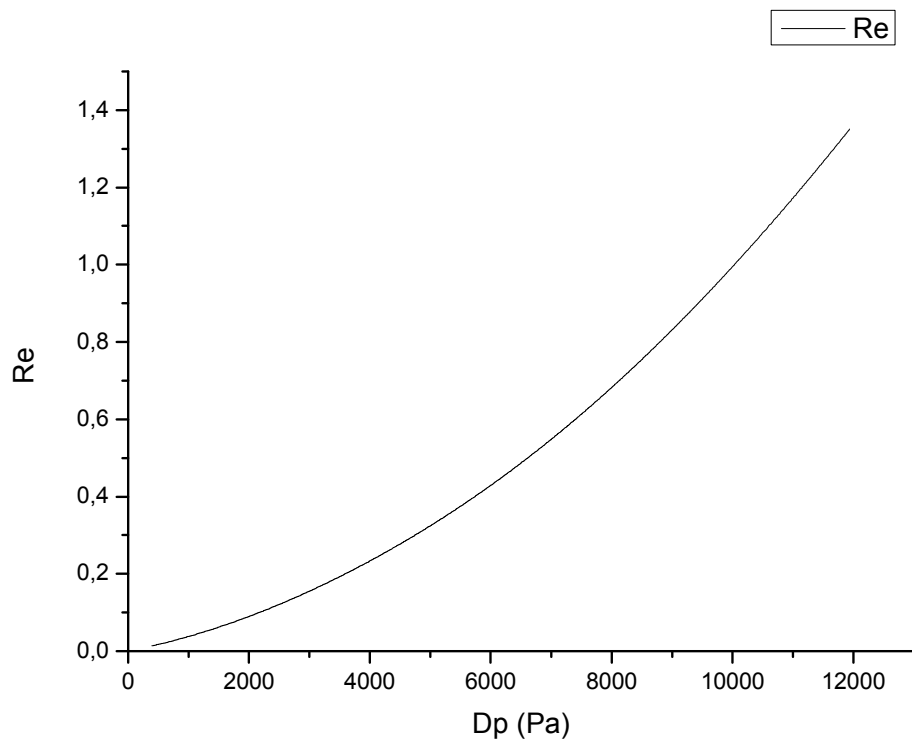
Σχήμα 4.2.ε. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



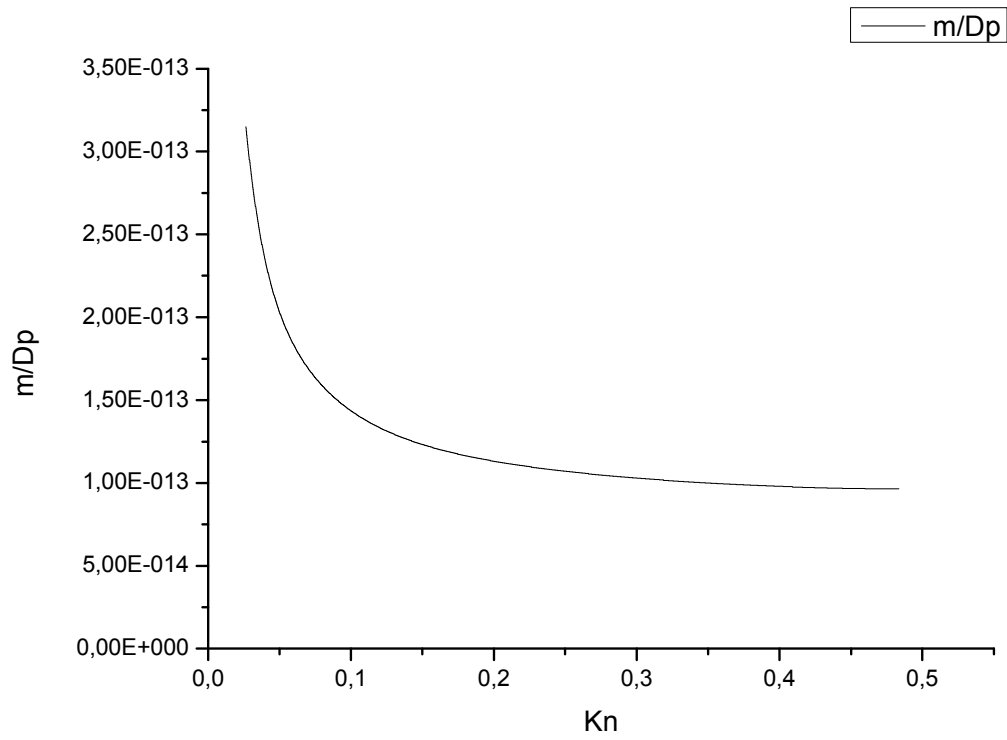
Σχήμα 4.2.ε. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.2.ε. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



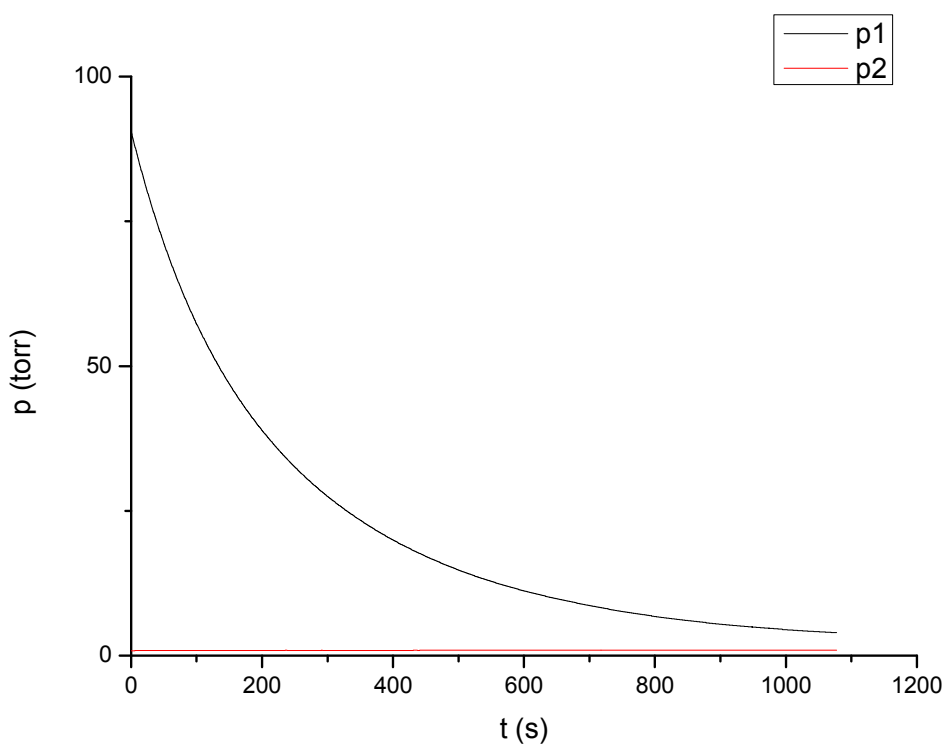
Σχήμα 4.2.ε. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



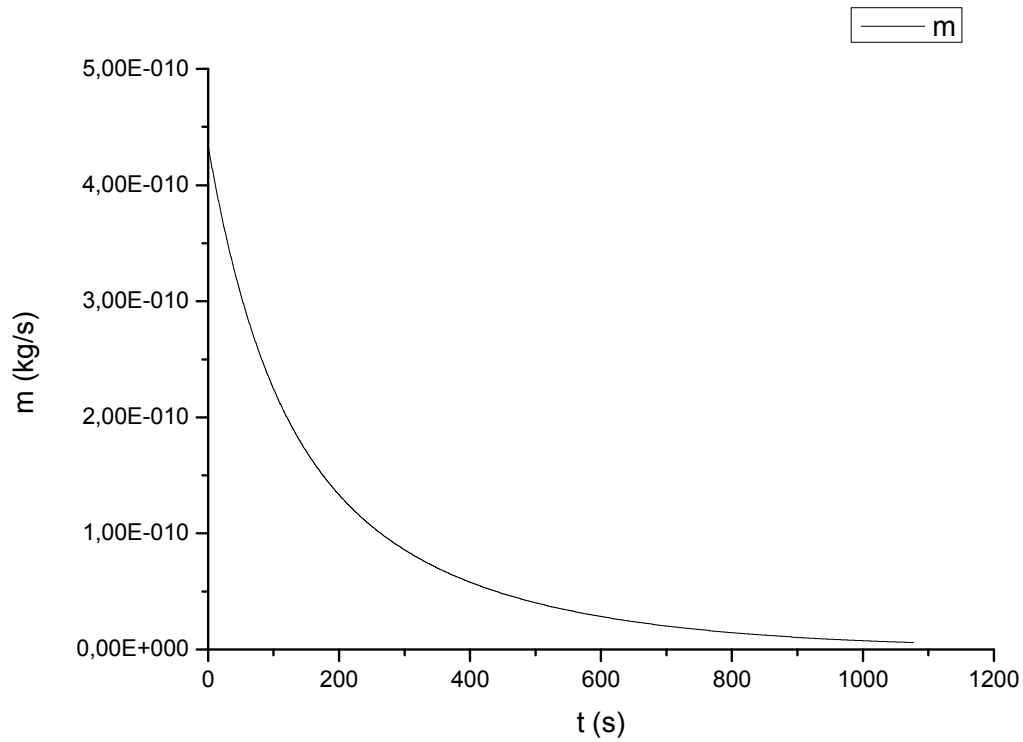
Σχήμα 4.2.c. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.3.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr 2 πλάτους 285,85 μm , ύψους 19,03 μm , εργαζόμενο μέσο He

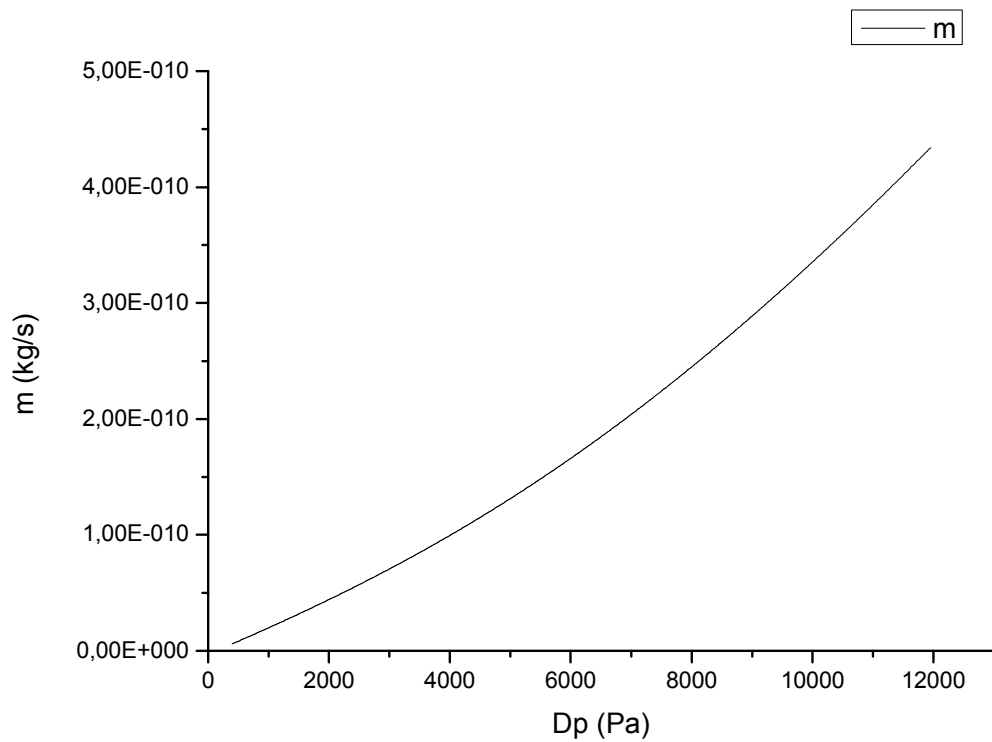
Μικροκανάλι: 55-0045-01 Nr2, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 285,85 \mu\text{m} \times 19,03 \mu\text{m}$
Αέριο: He $R=2076,9$, $\mu=1,9955 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



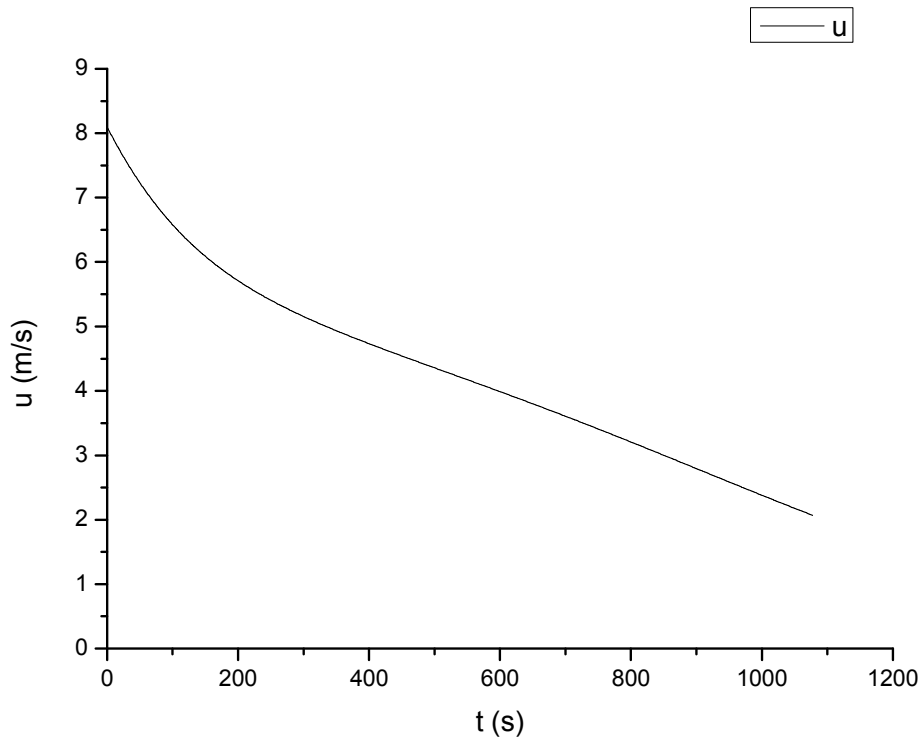
Σχήμα 4.3.a. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



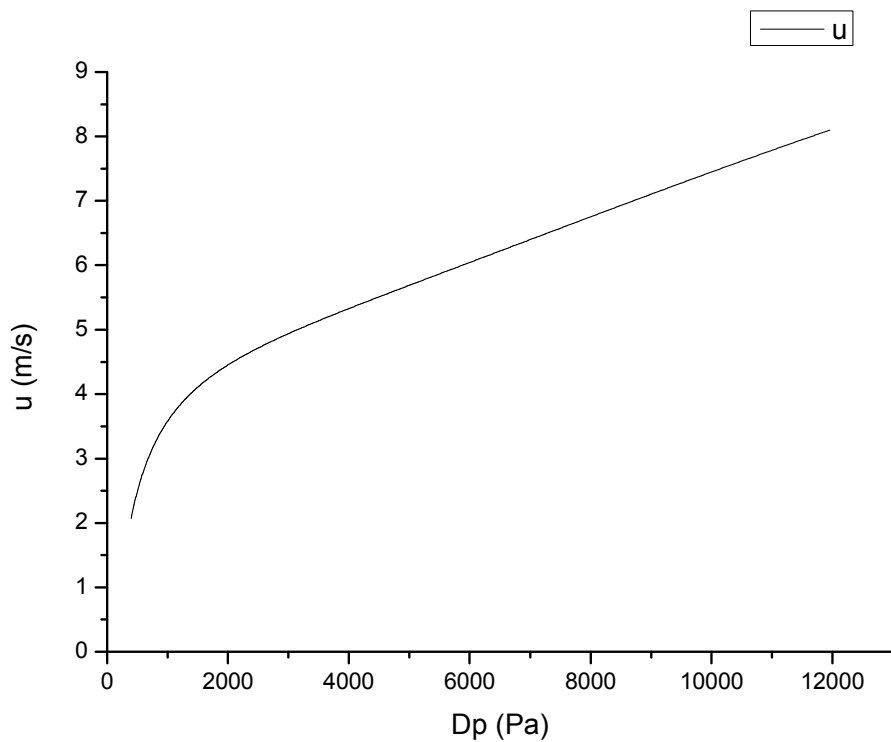
Σχήμα 4.3.a. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



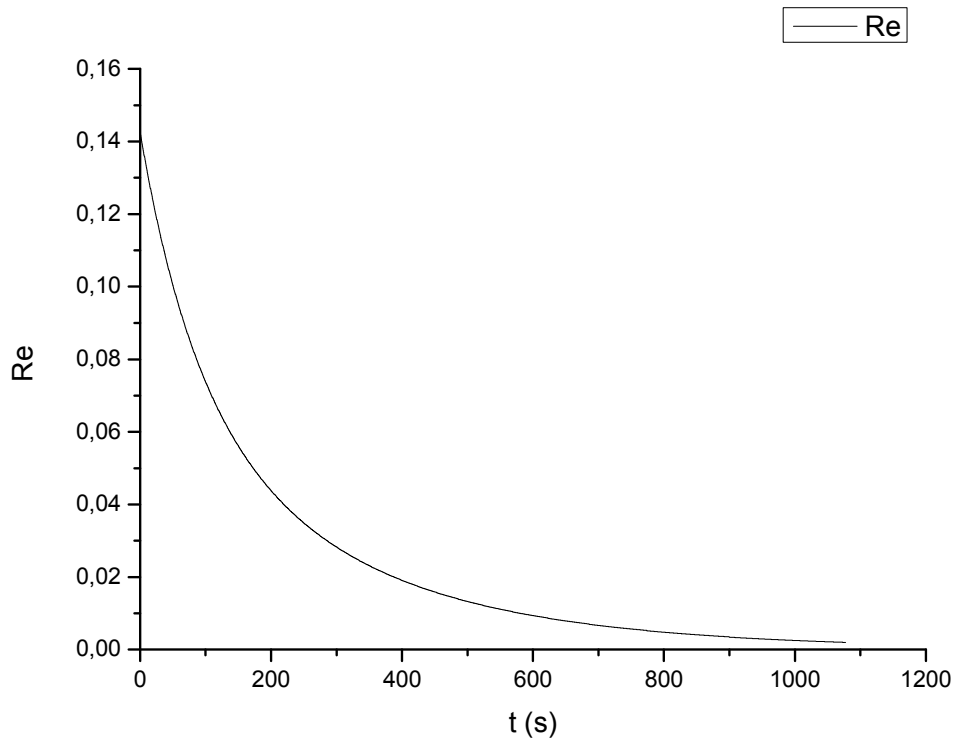
Σχήμα 4.3.a. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



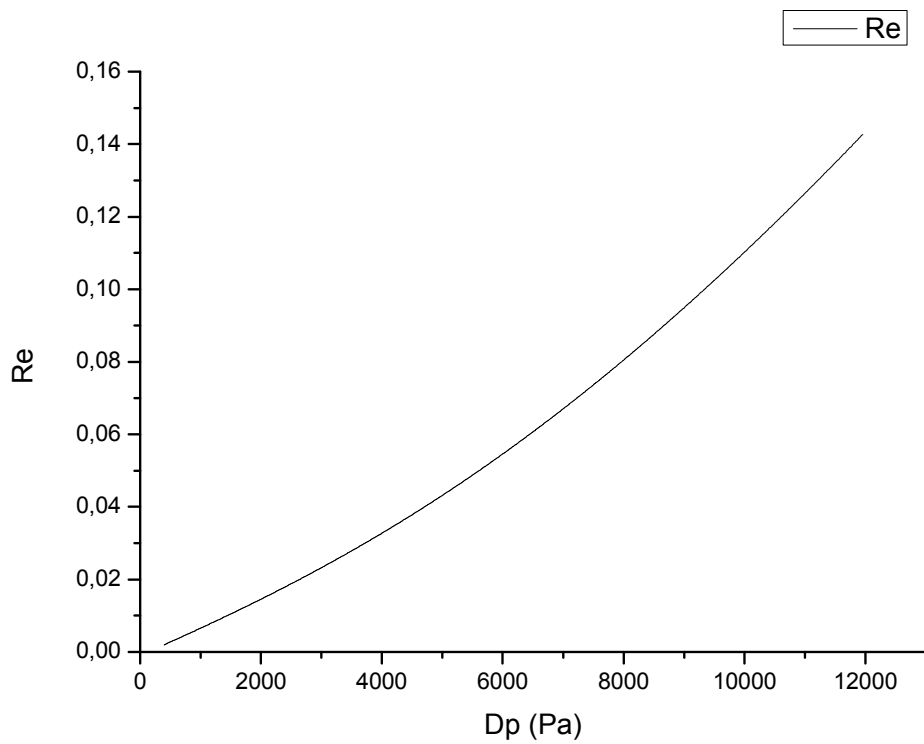
Σχήμα 4.3.α. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



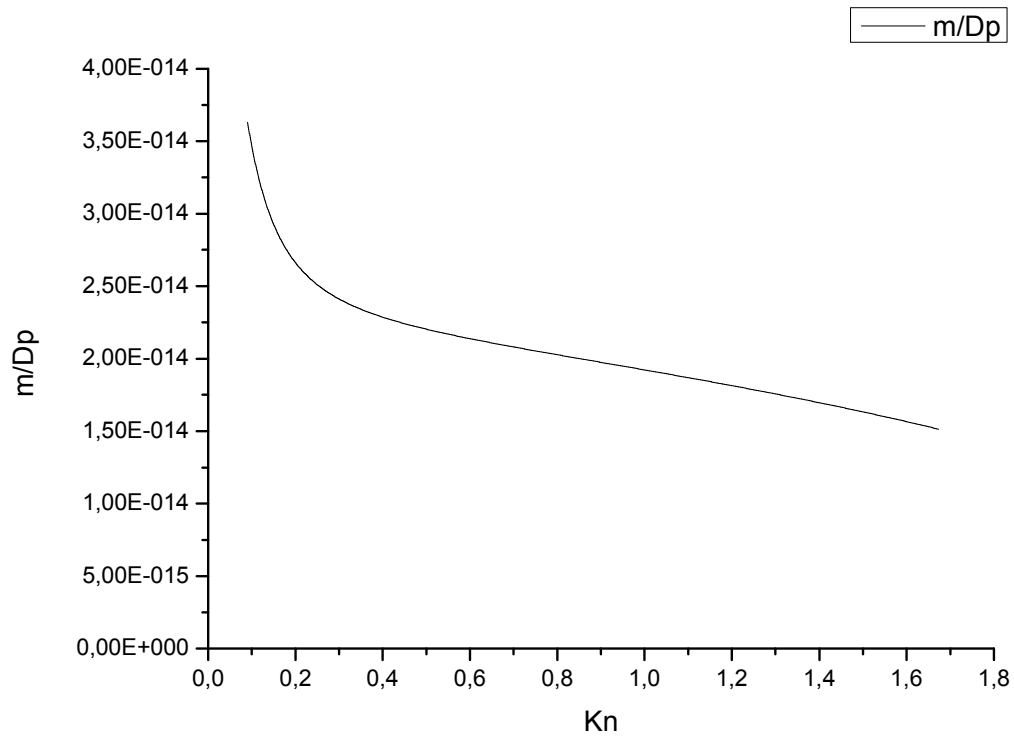
Σχήμα 4.3.α. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.3.a. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



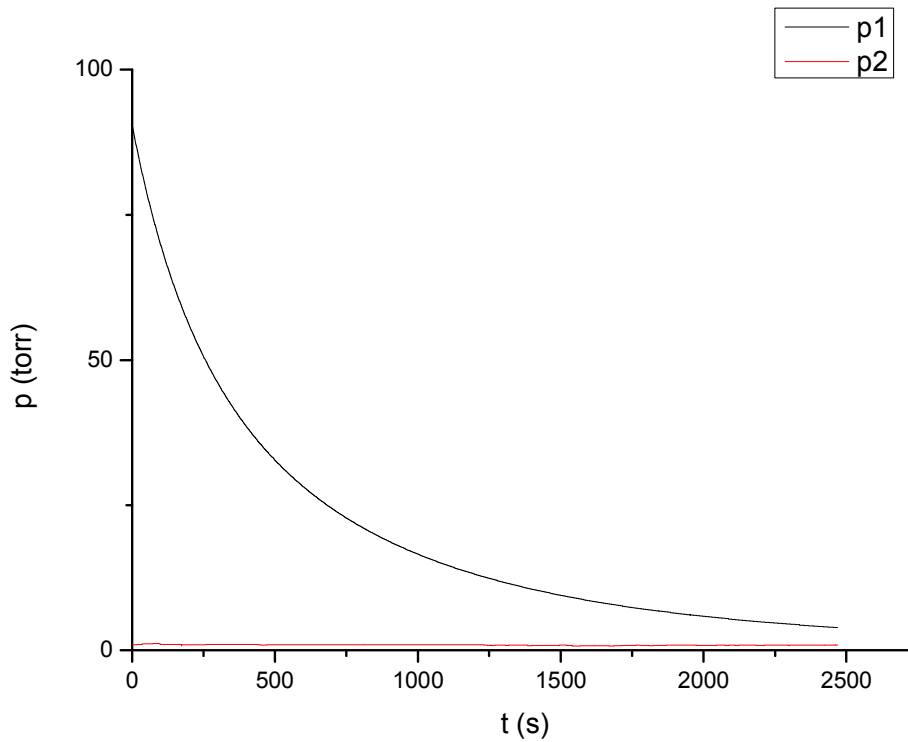
Σχήμα 4.3.a. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



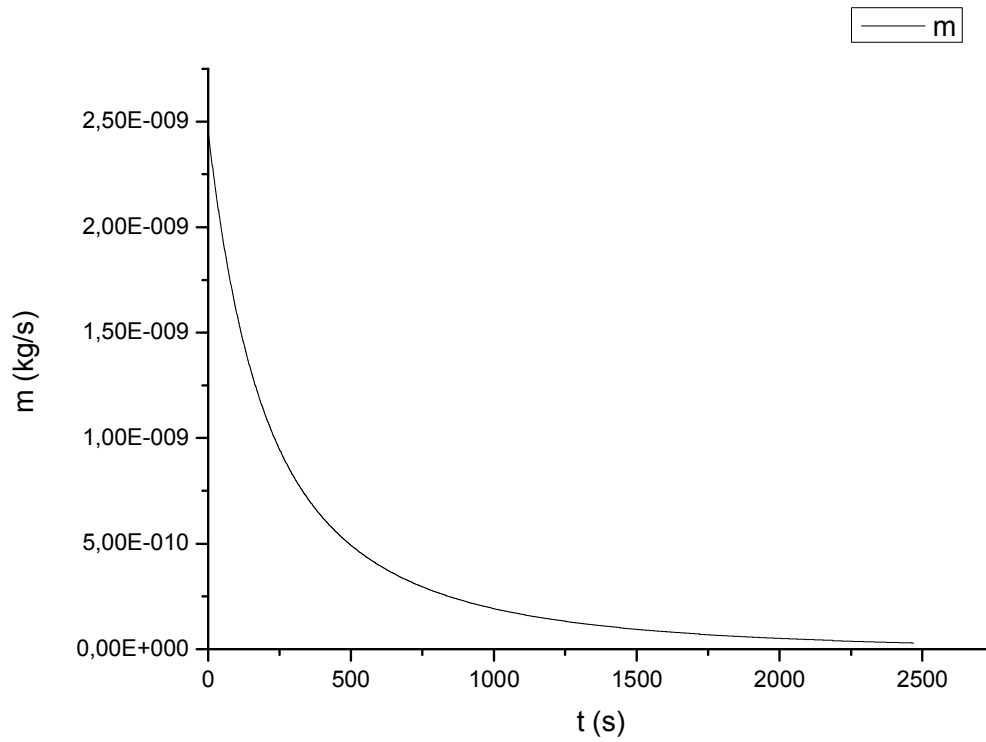
Σχήμα 4.3.a. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.3.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr 2 πλάτους 285,85 μm , ύψους 19,03 μm , εργαζόμενο μέσο Ar

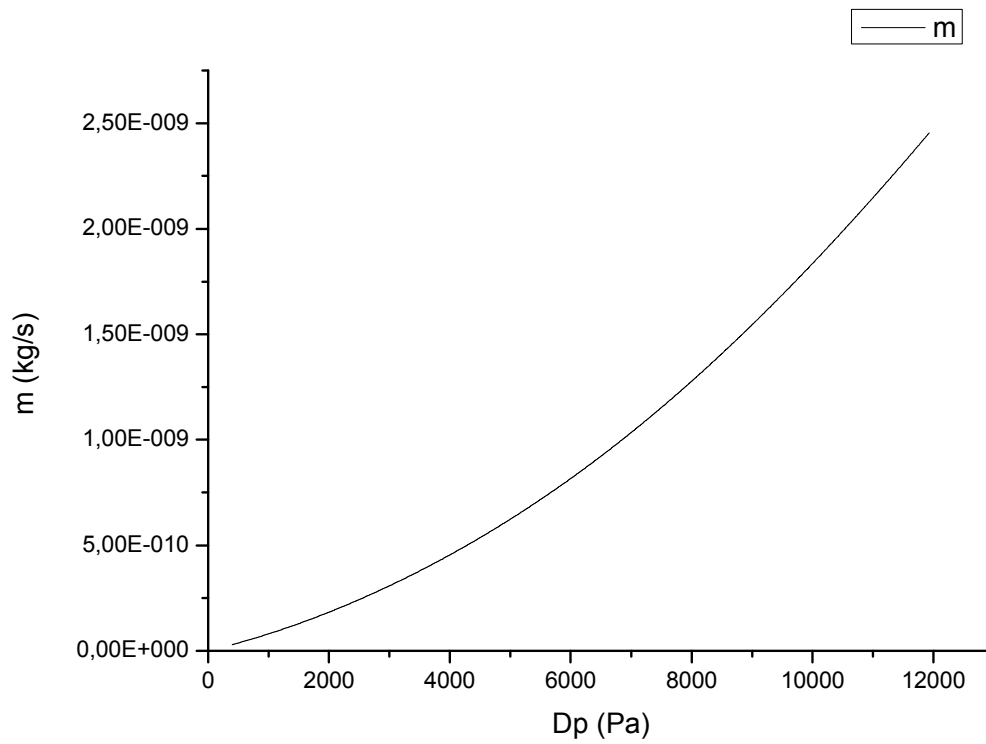
Μικροκανάλι: 55-0045-01 Nr2, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 285,85 \mu\text{m} \times 19,03 \mu\text{m}$
Αέριο: Ar $R=208$, $\mu=2,28 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=293\text{K}$



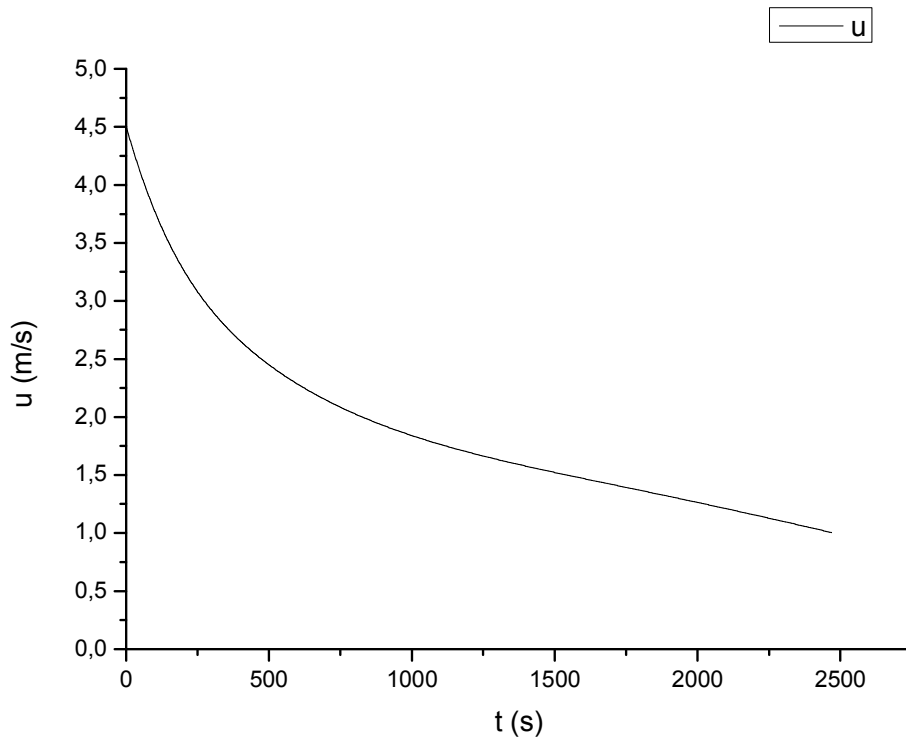
Σχήμα 4.3.b. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



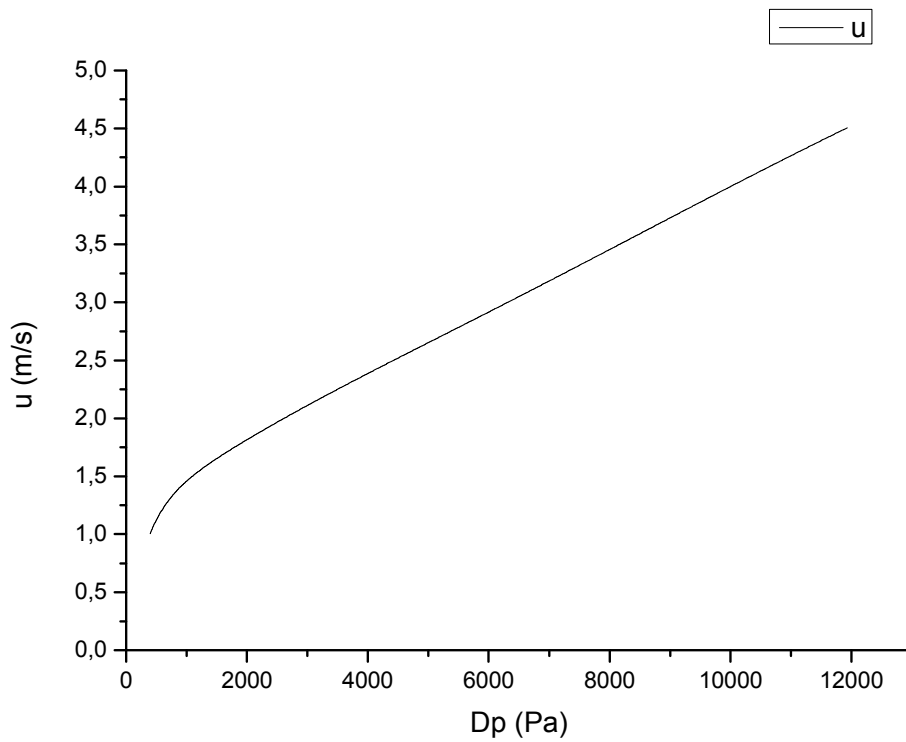
Σχήμα 4.3.b. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



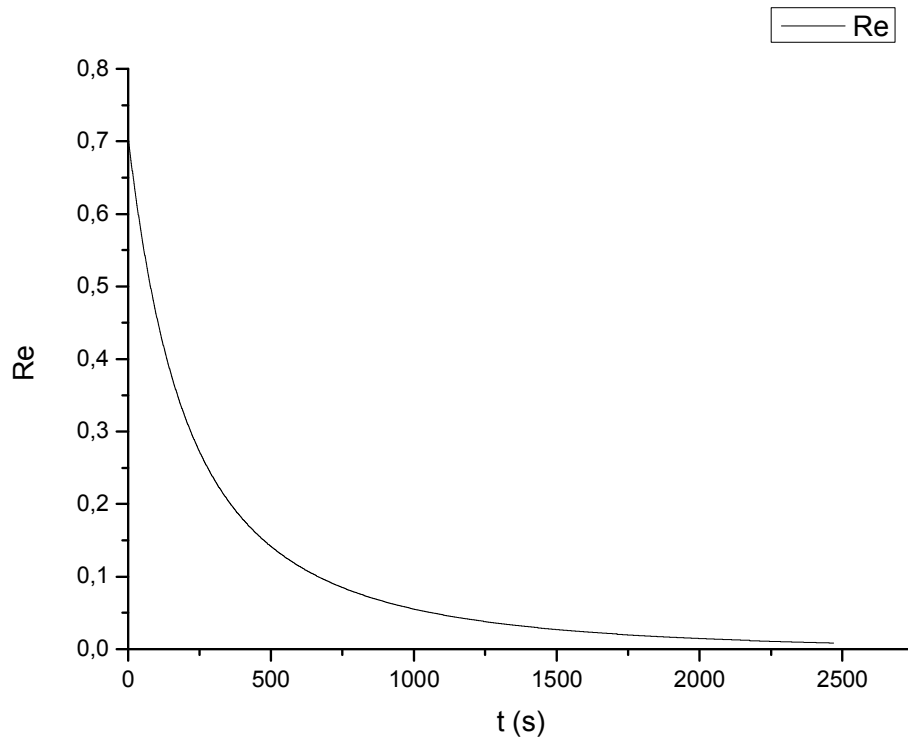
Σχήμα 4.3.b. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



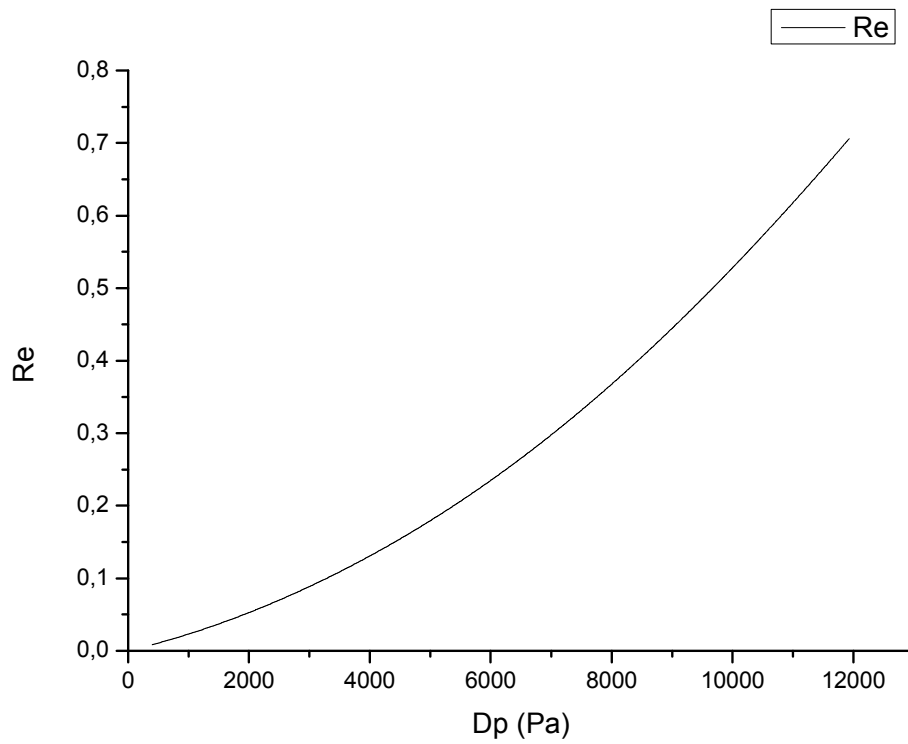
Σχήμα 4.3.b. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



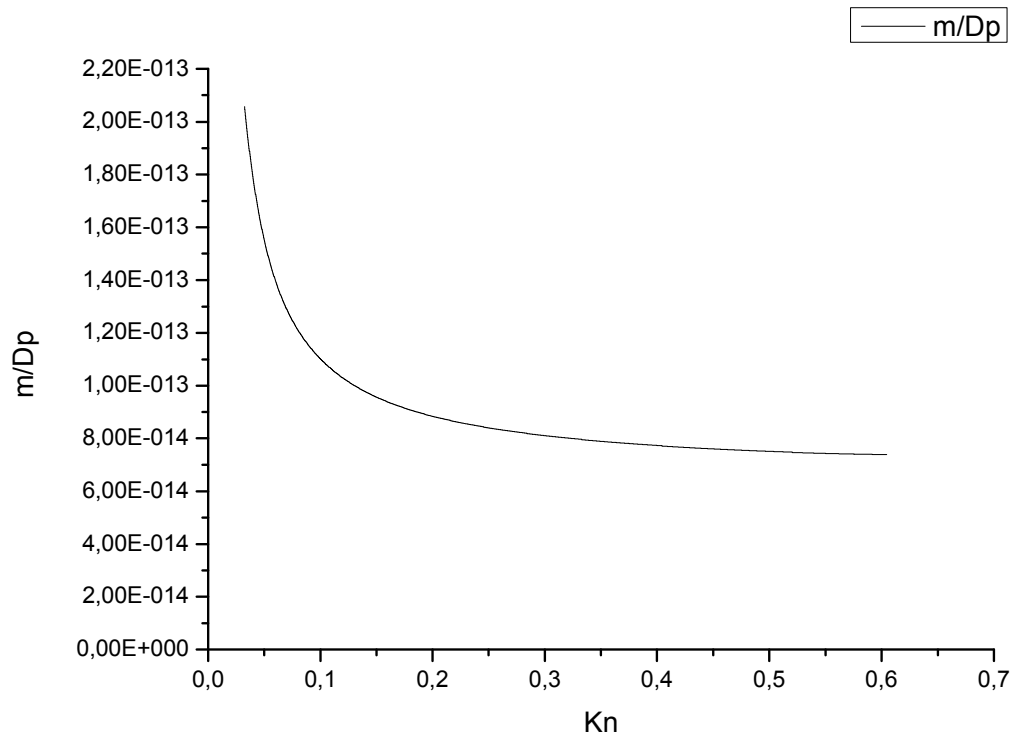
Σχήμα 4.3.b. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.3.b. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



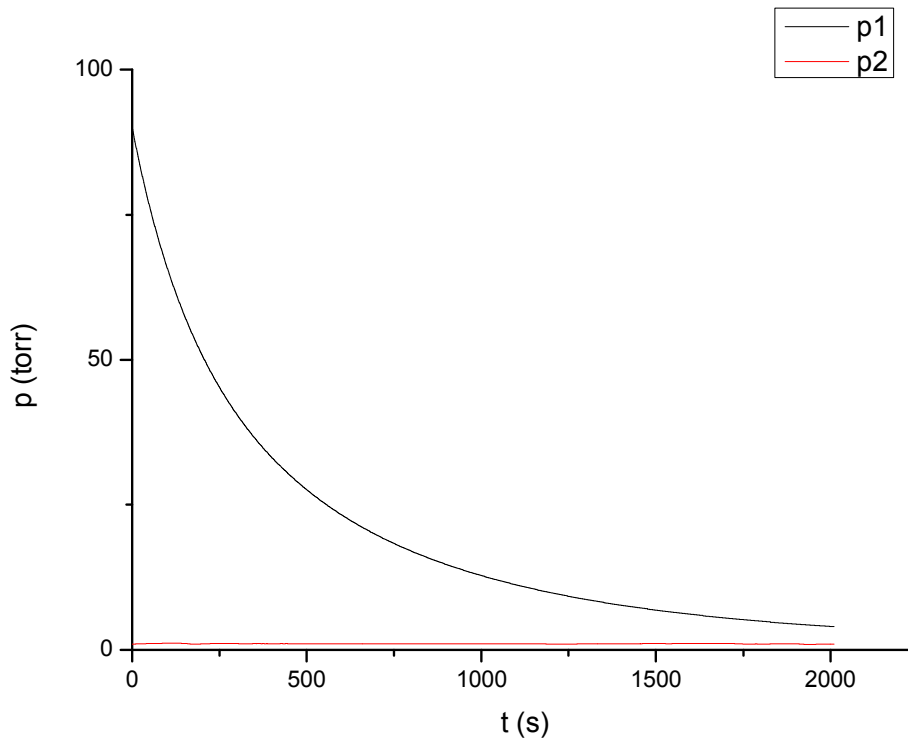
Σχήμα 4.3.b. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



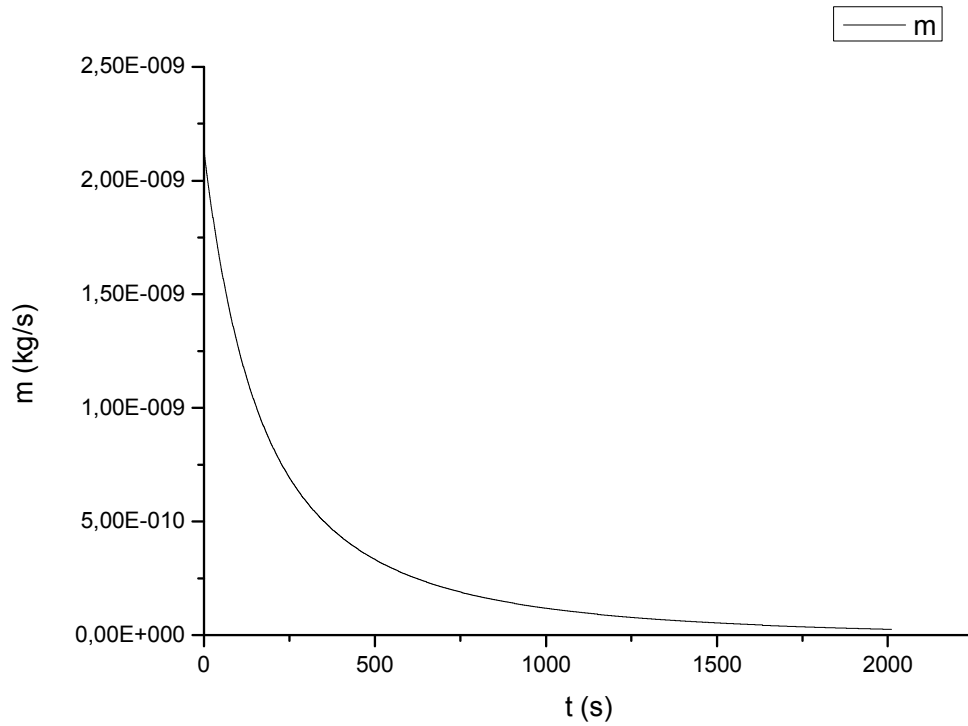
Σχήμα 4.3.b. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.3.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr 2 πλάτους 285,85 μm , ύψους 19,03 μm , εργαζόμενο μέσο Αέρας

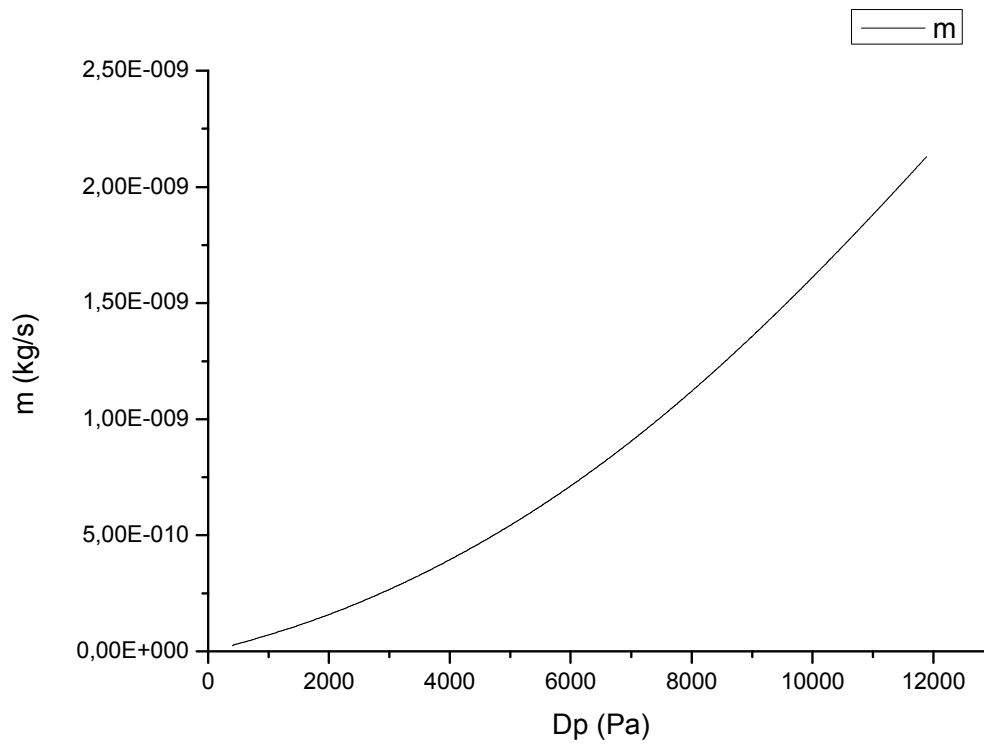
Μικροκανάλι: 55-0045-01 Nr2, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 285,85 \mu\text{m} \times 19,03 \mu\text{m}$
Αέριο: Αέρας $R=287$, $\mu=1,82 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



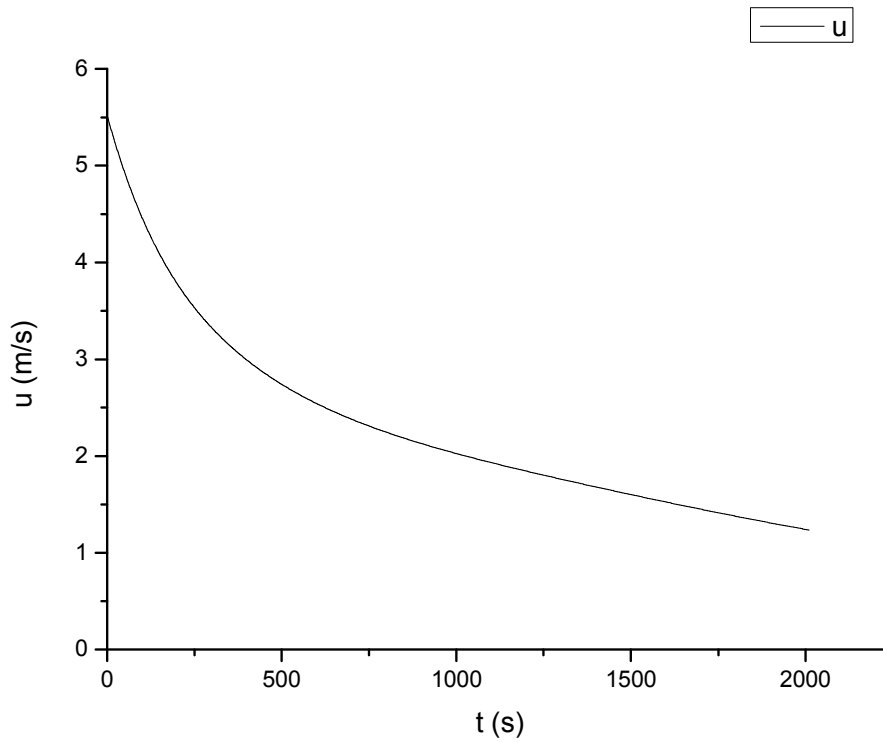
Σχήμα 4.3.c. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



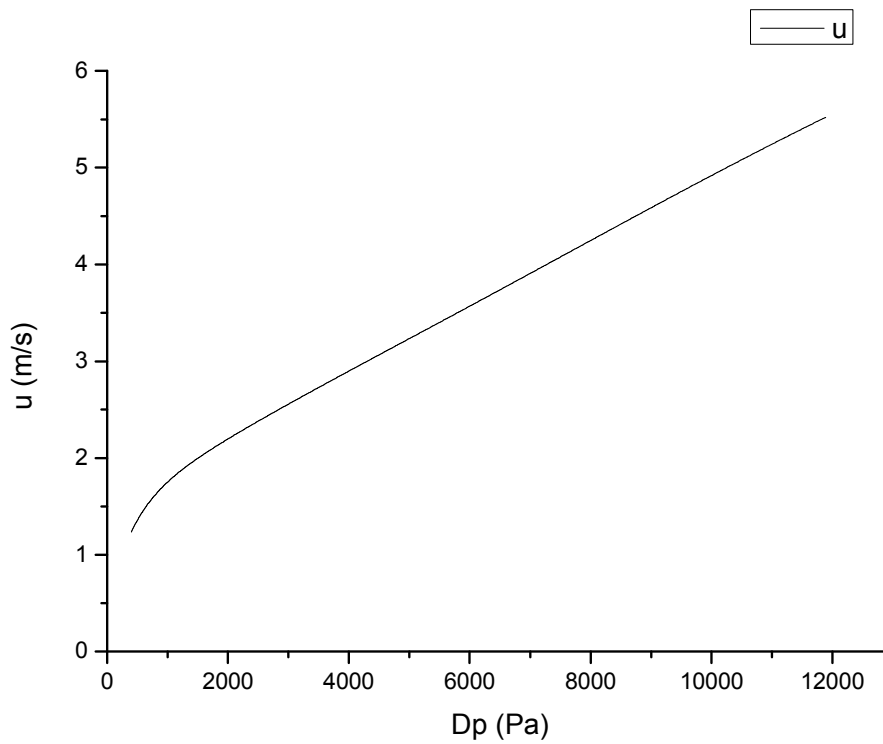
Σχήμα 4.3.ε. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



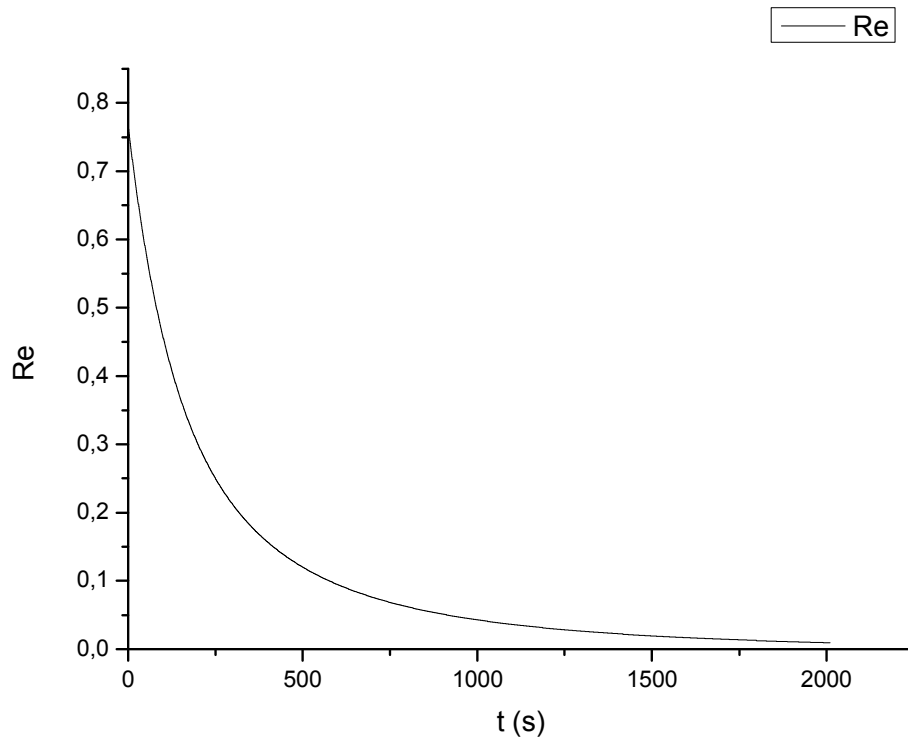
Σχήμα 4.3.ε. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



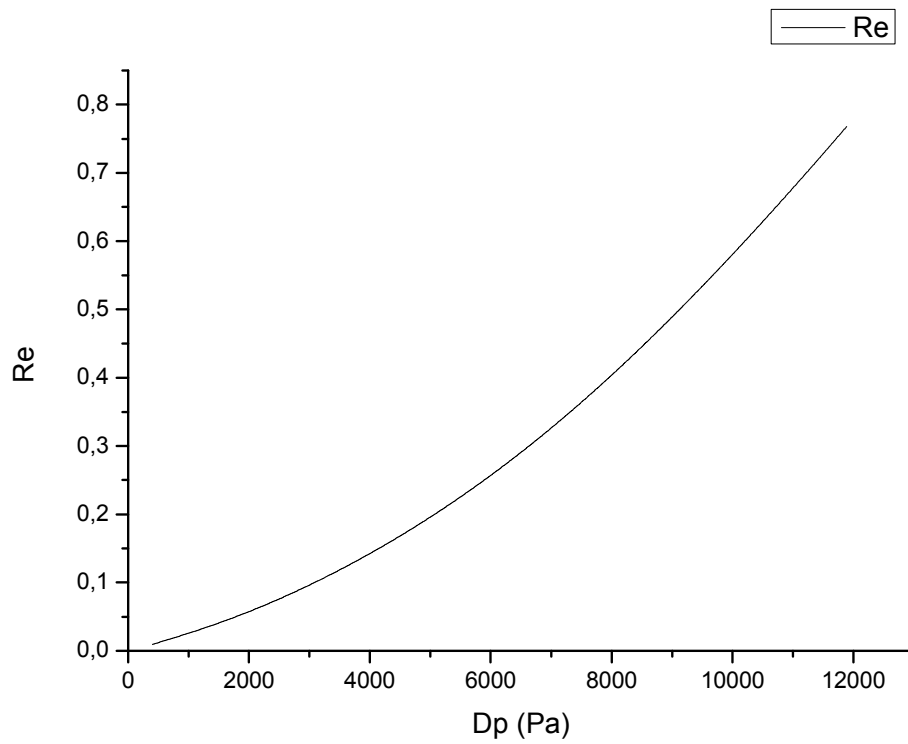
Σχήμα 4.3.c. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



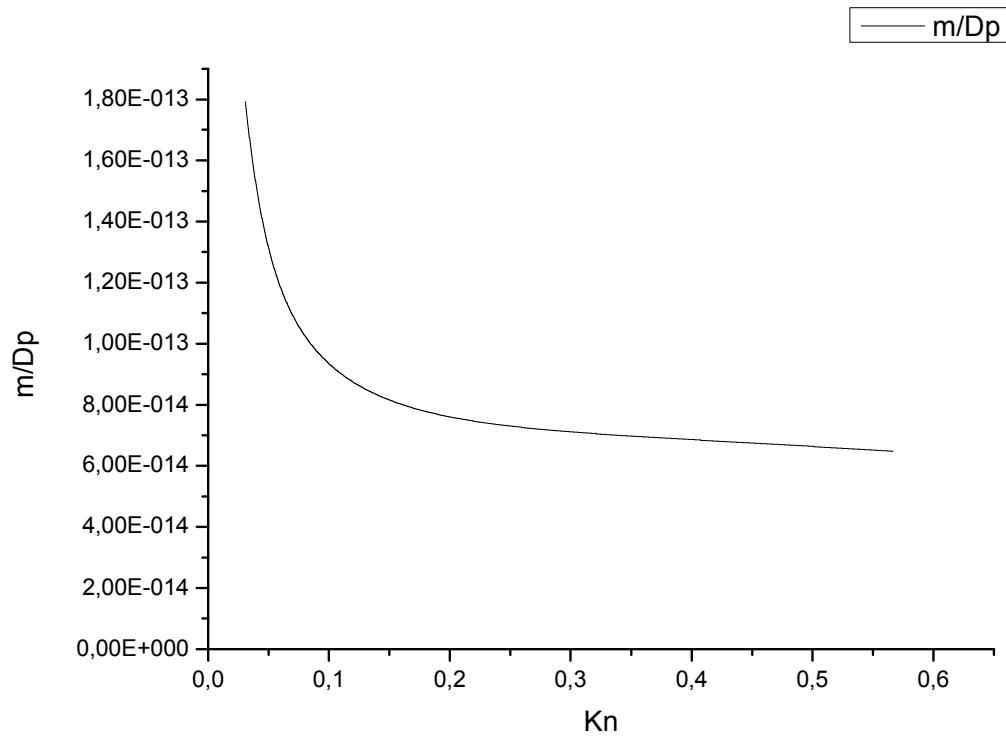
Σχήμα 4.3.c. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.3.ε. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



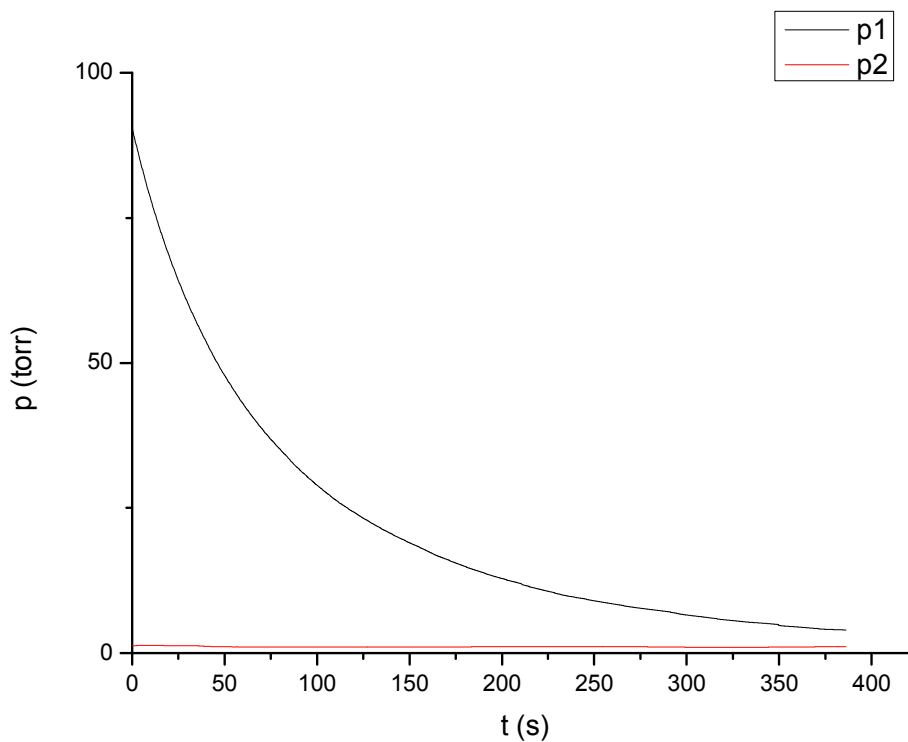
Σχήμα 4.3.ε. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



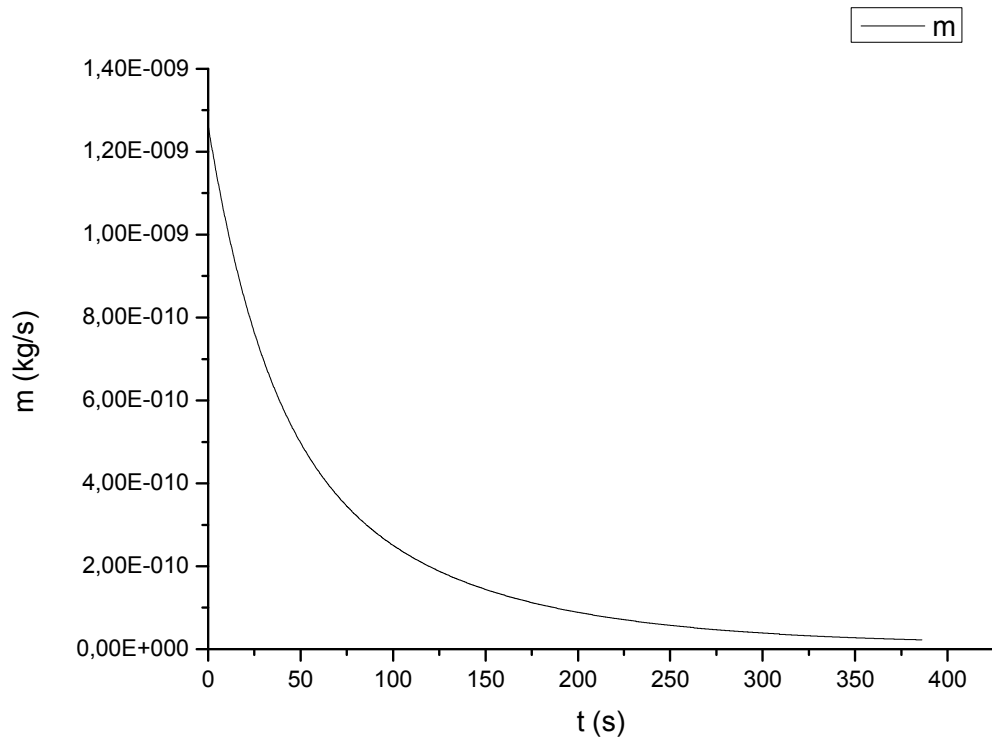
Σχήμα 4.3.c. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.4.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 2 πλάτους 283,88 μm , ύψους 31,72 μm , εργαζόμενο μέσο He

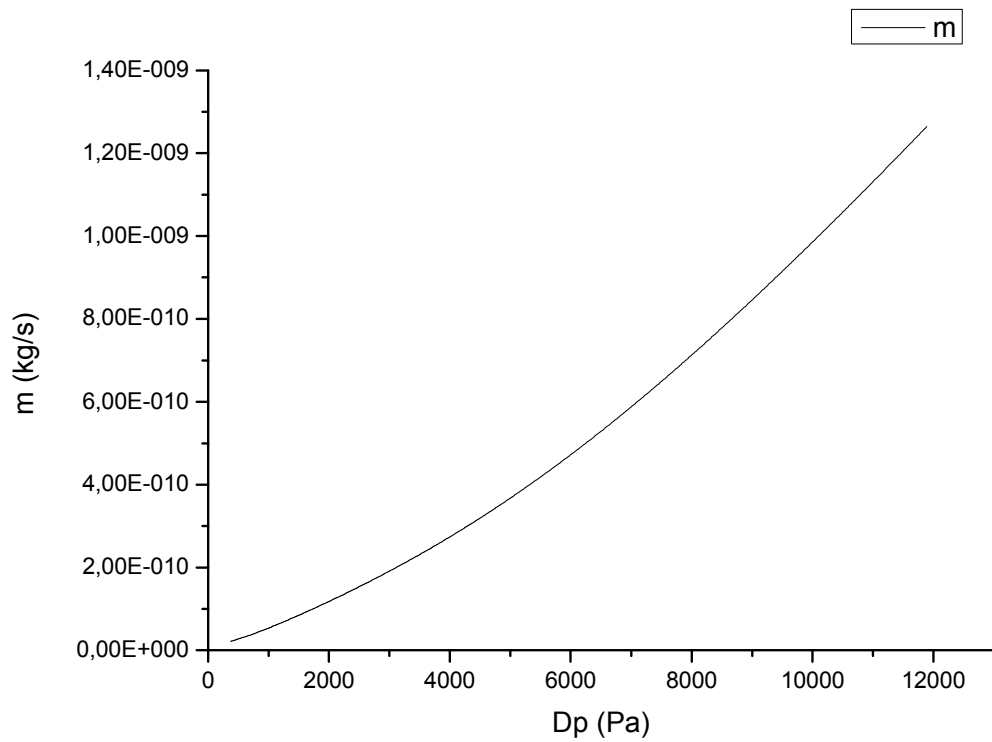
Μικροκανάλι: 55-0045-02 Nr2, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 283,88 \mu\text{m} \times 31,72 \mu\text{m}$
Αέριο: He $R=2076,9$, $\mu=1,9955 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



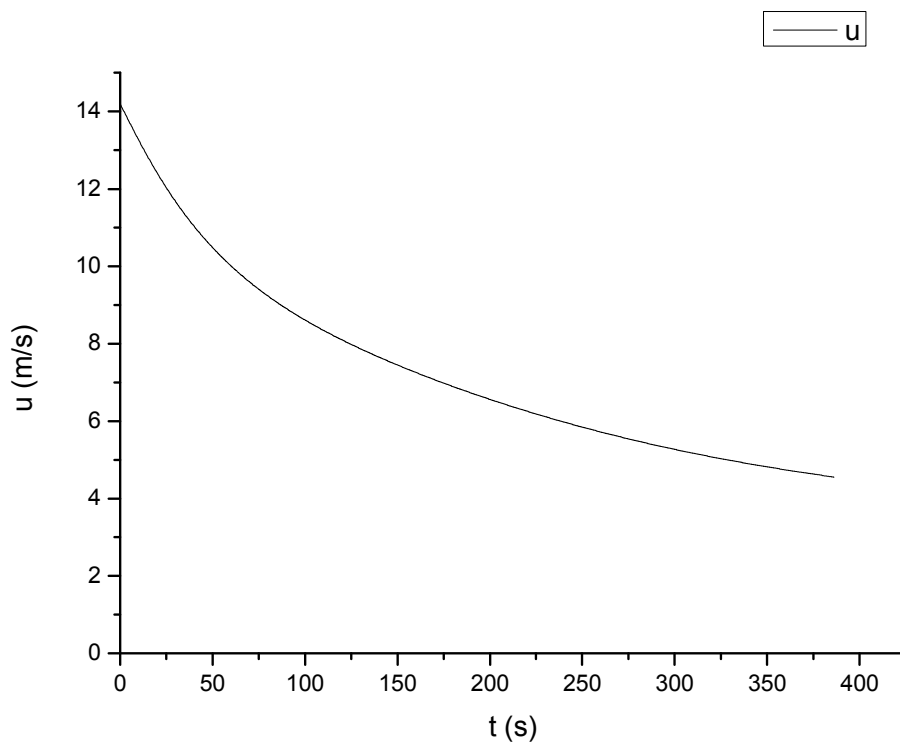
Σχήμα 4.4.a. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



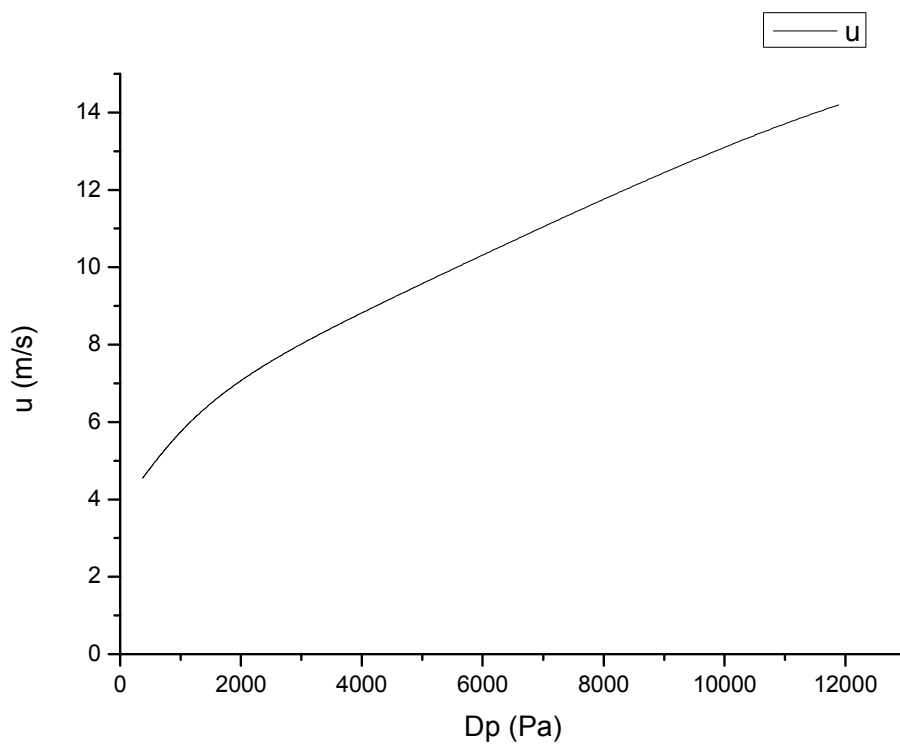
Σχήμα 4.4.a. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



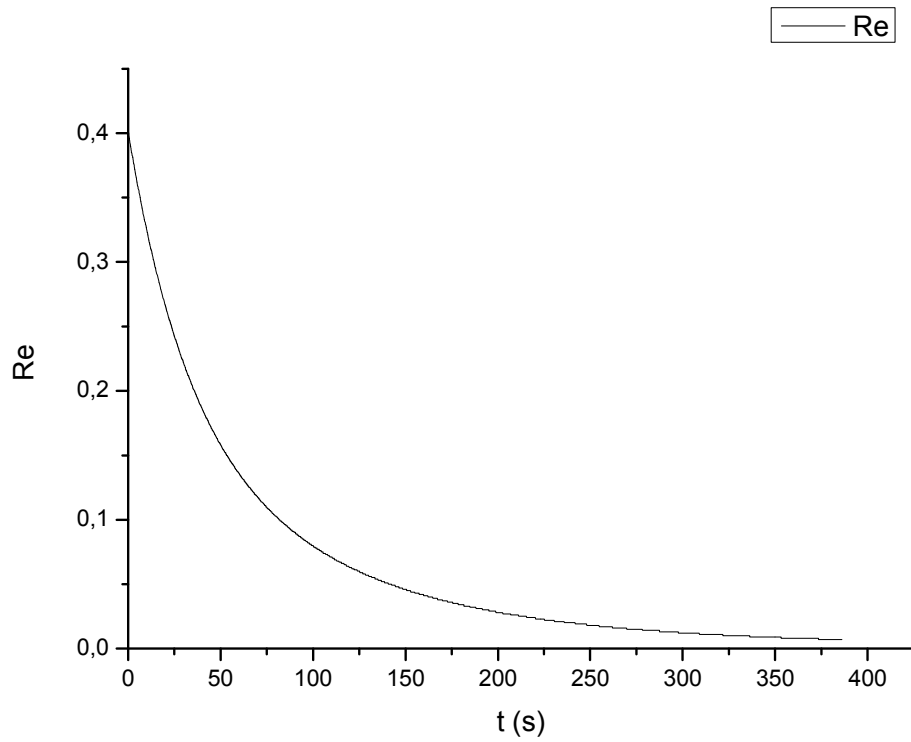
Σχήμα 4.4.a. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



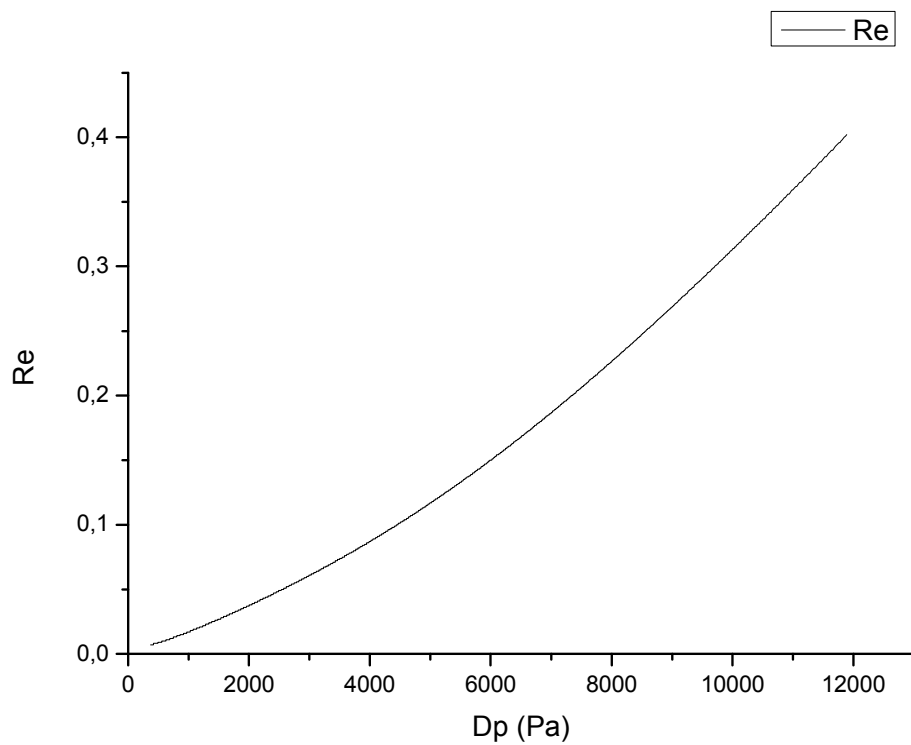
Σχήμα 4.4.a. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



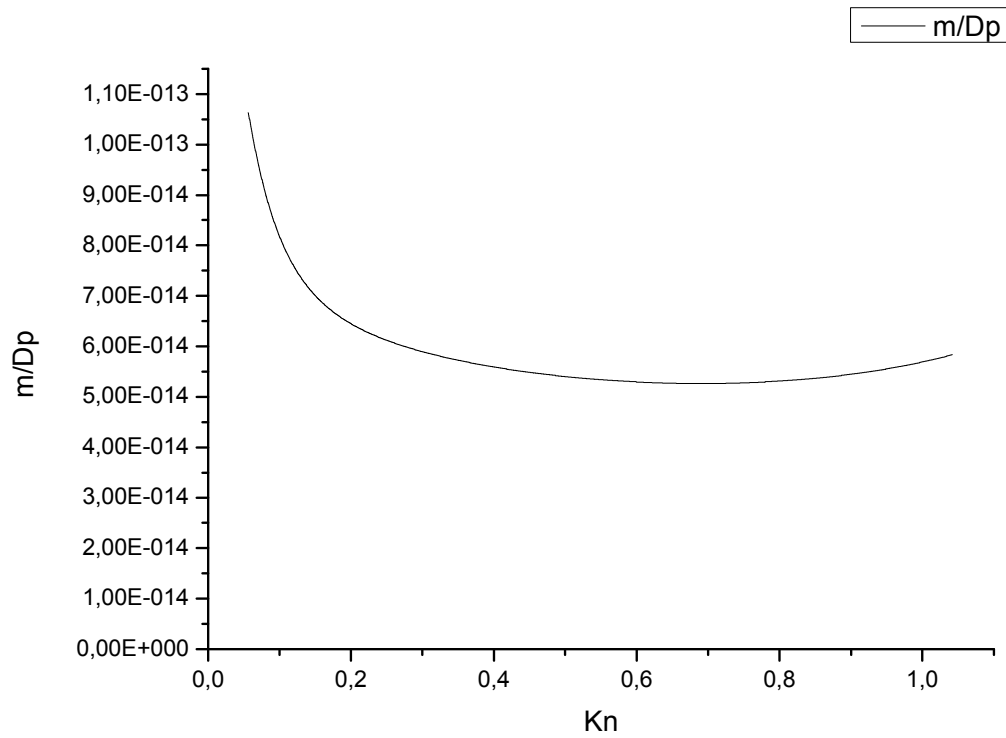
Σχήμα 4.4.a. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



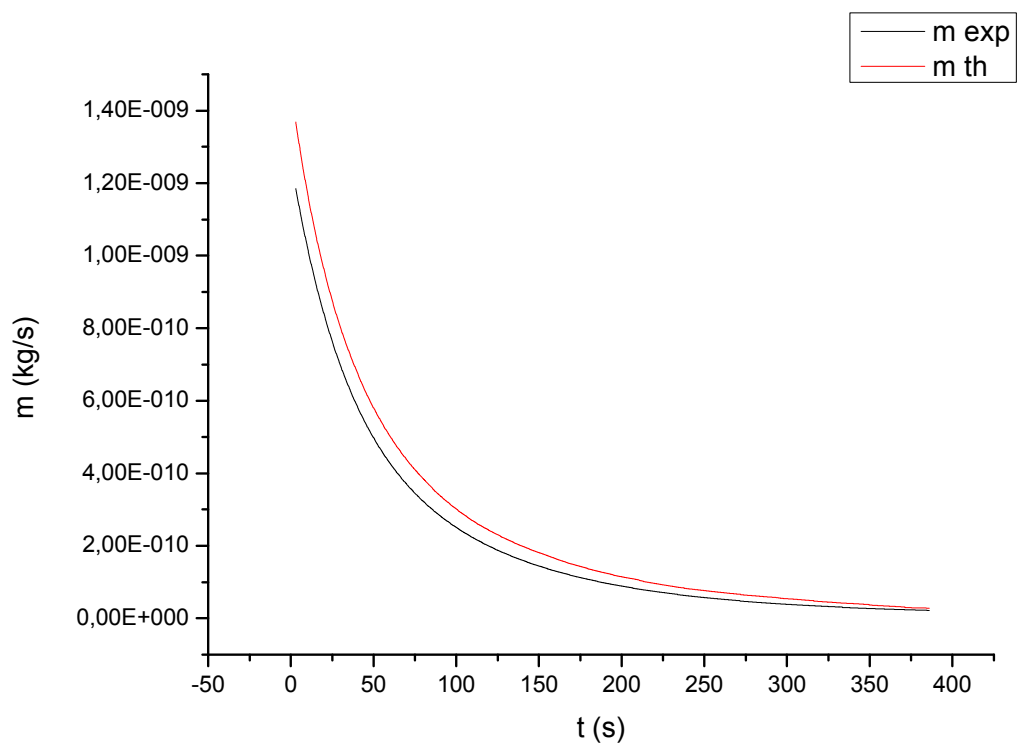
Σχήμα 4.4.a. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



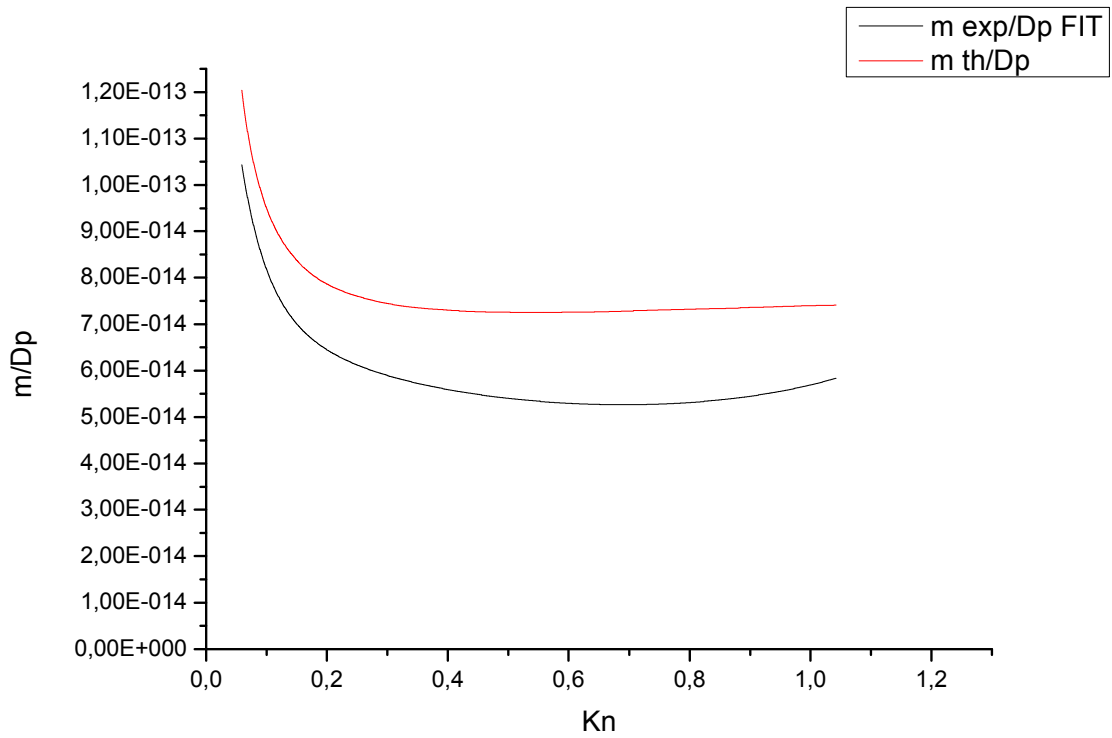
Σχήμα 4.4.a. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



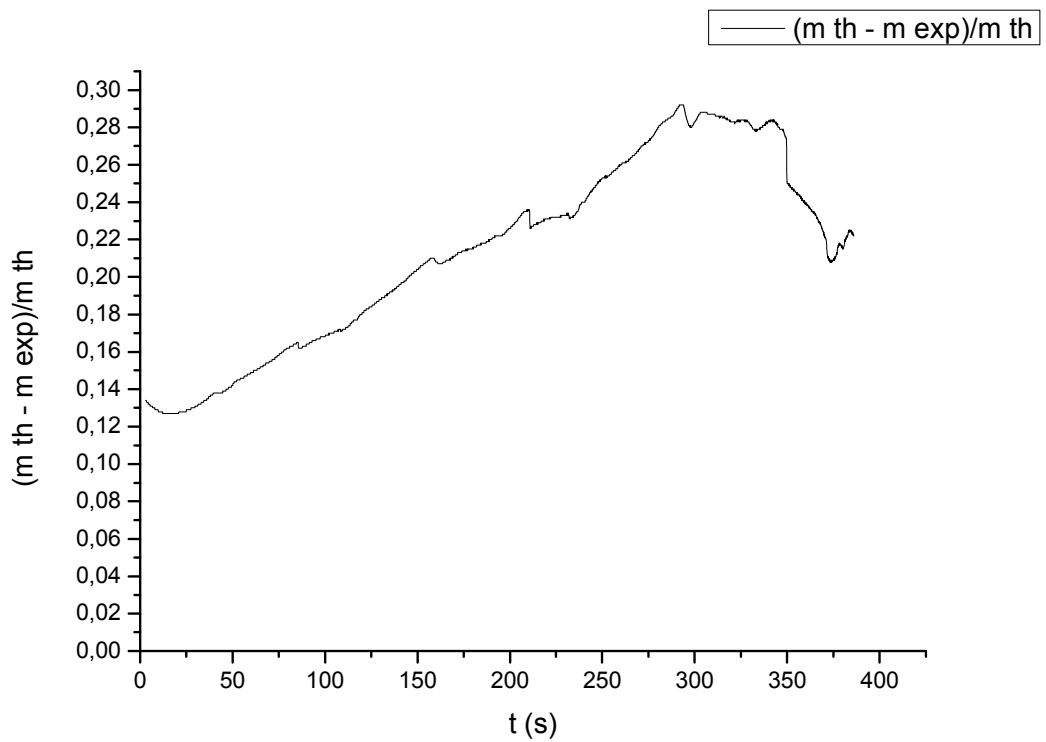
Σχήμα 4.4.a. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen



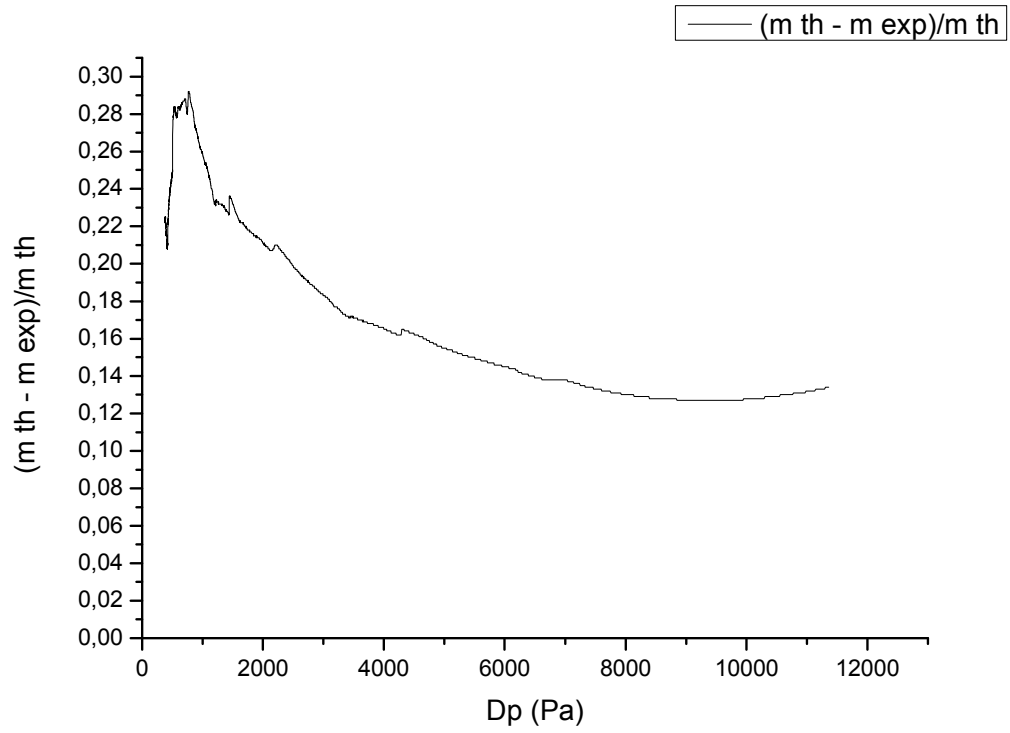
Σχήμα 4.4.a. 9: Πειραματική (m_{exp}) και θεωρητική (m_{th}) παροχή μάζας



Σχήμα 4.4.a. 10: Πειραματική ($m \text{ exp}$) και θεωρητική ($m \text{ th}$) παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



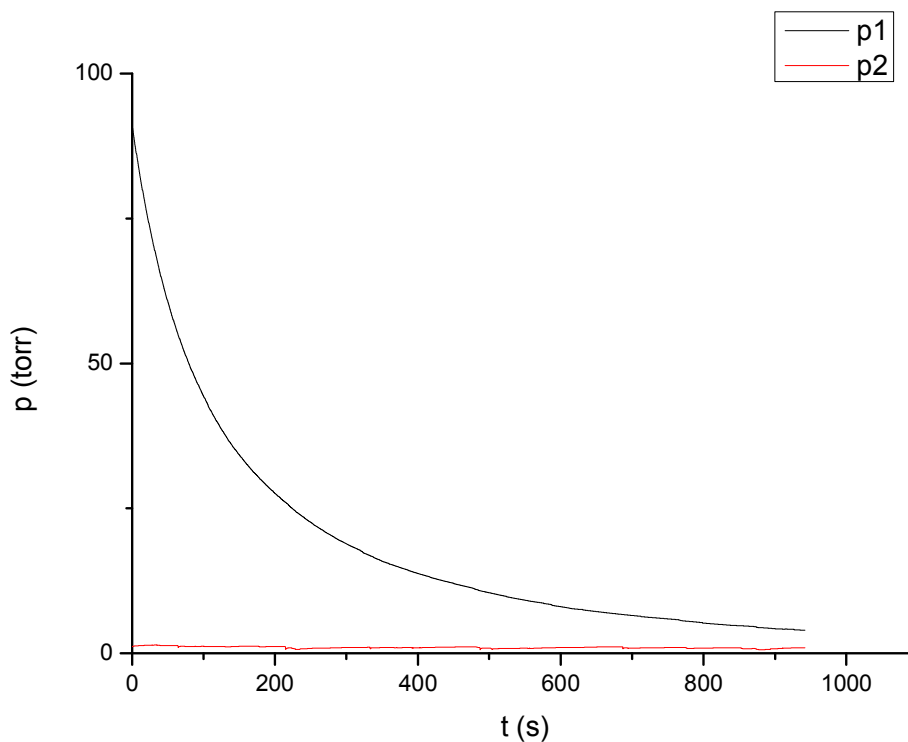
Σχήμα 4.4.a. 11: Αδιαστατοποιημένη διαφορά θεωρητικής και πειραματικής παροχής μάζας συναρτήσει χρόνου



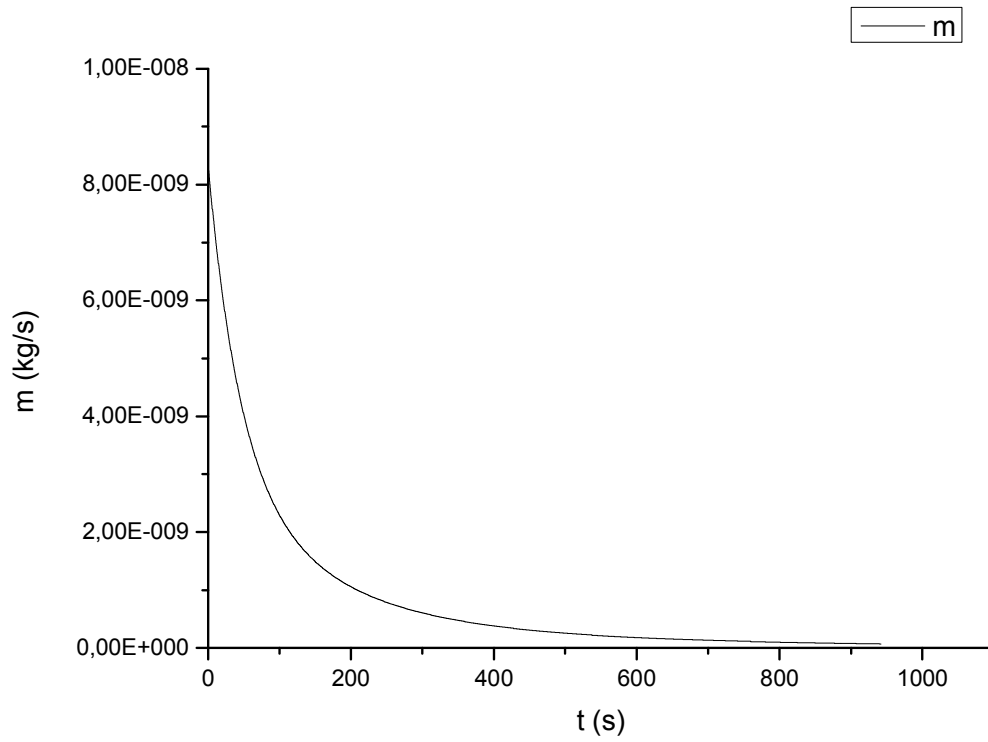
Σχήμα 4.4.α. 12: Αδιαστατοποιημένη διαφορά θεωρητικής και πειραματικής παροχής μάζας συναρτήσει διαφοράς πιέσεων των δεξαμενών

4.4.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 2 πλάτους 283,88 μm , ύψους 31,72 μm , εργαζόμενο μέσο Ar

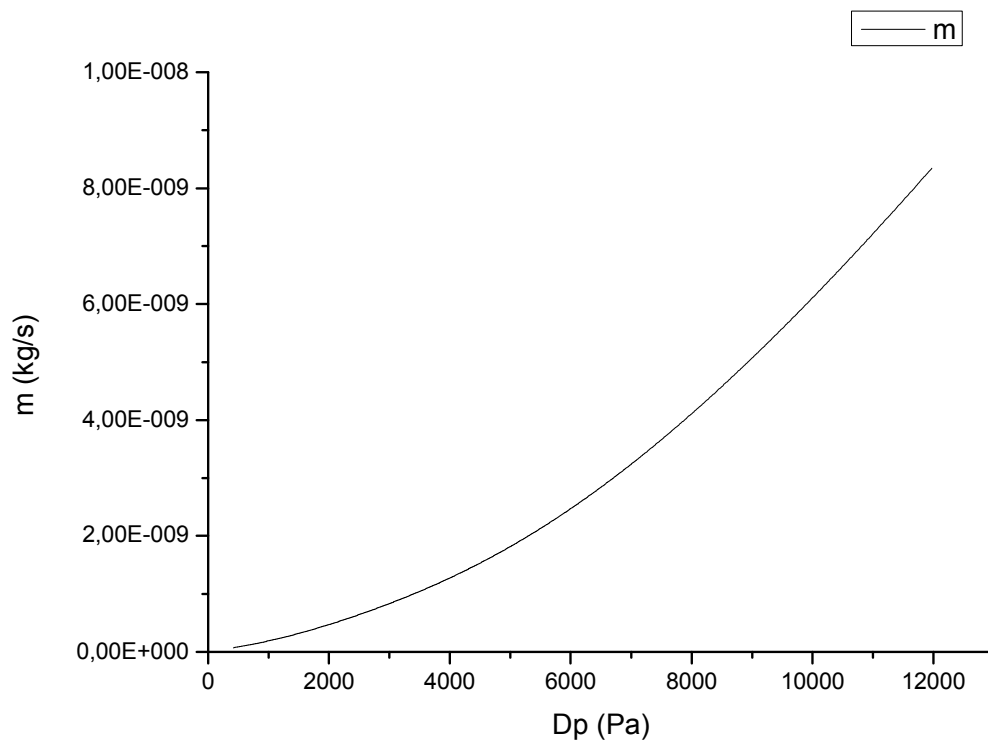
Μικροκανάλι: 55-0045-02 Nr2, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 283,88 \mu\text{m} \times 31,72 \mu\text{m}$
Αέριο: Ar $R=208$, $\mu=2,26 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



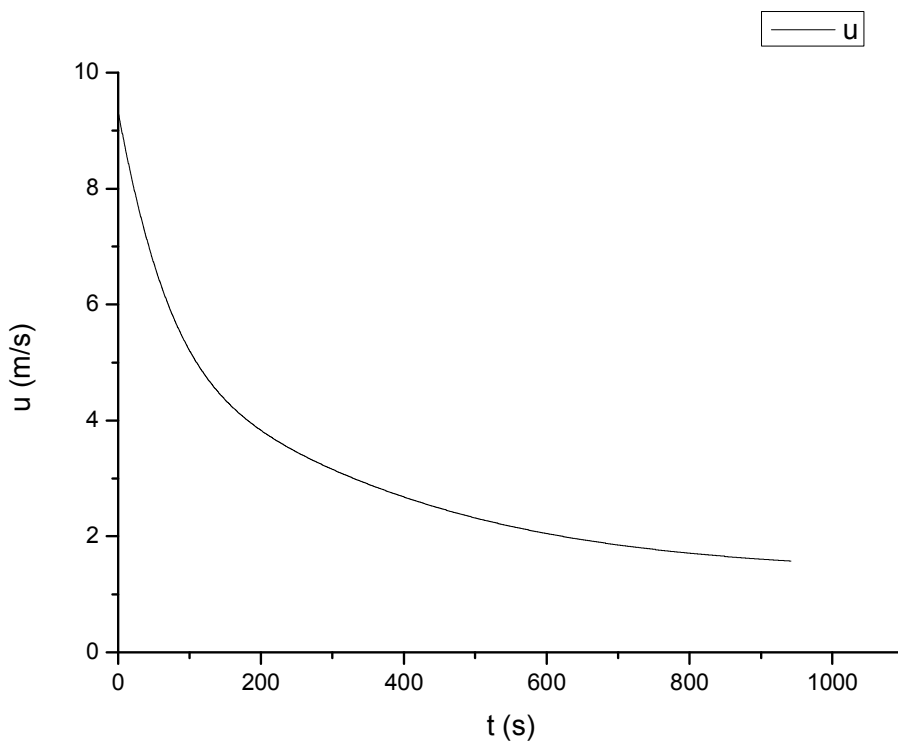
Σχήμα 4.4.b. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



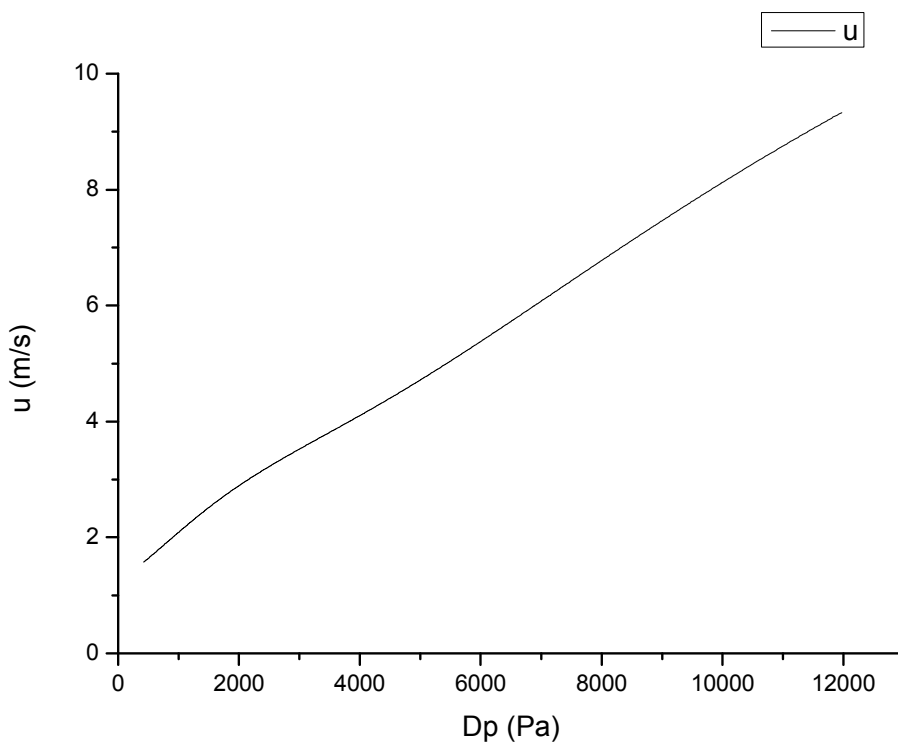
Σχήμα 4.4.b. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



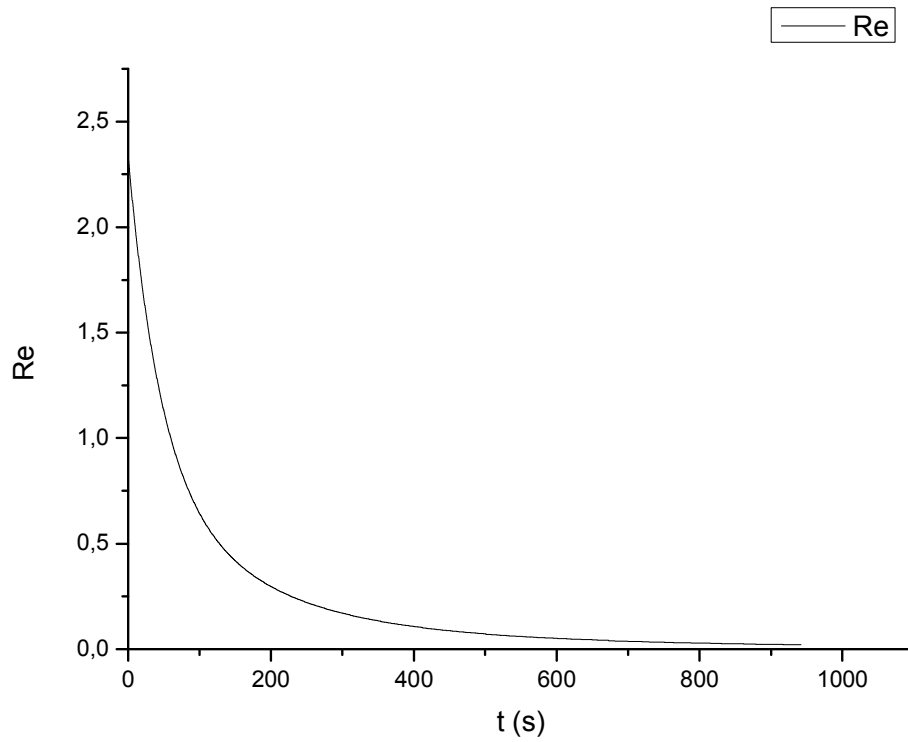
Σχήμα 4.4.b. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



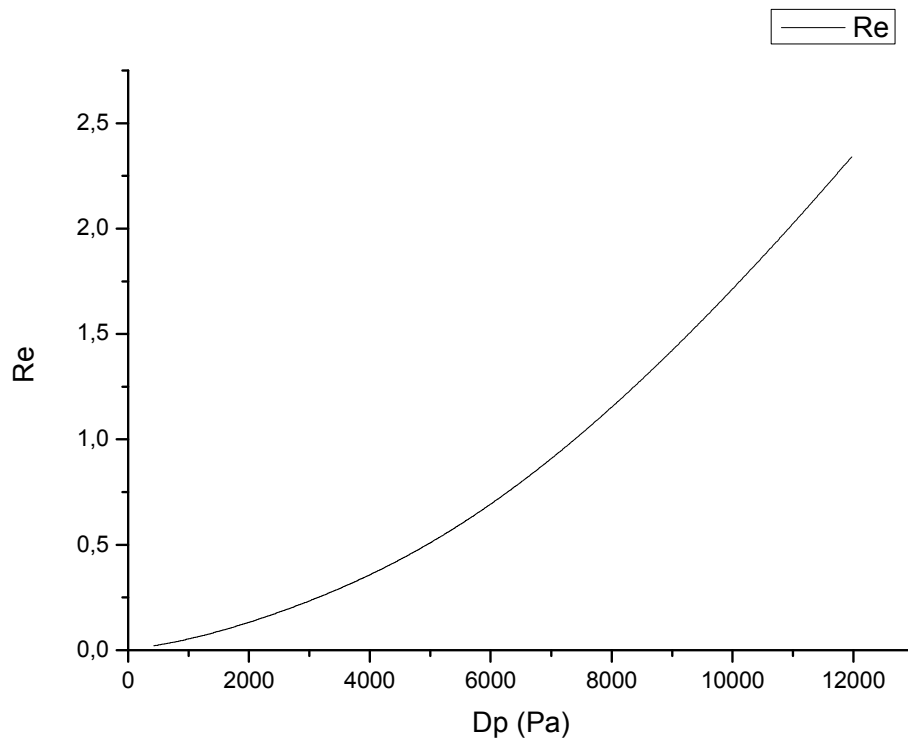
Σχήμα 4.4.b. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



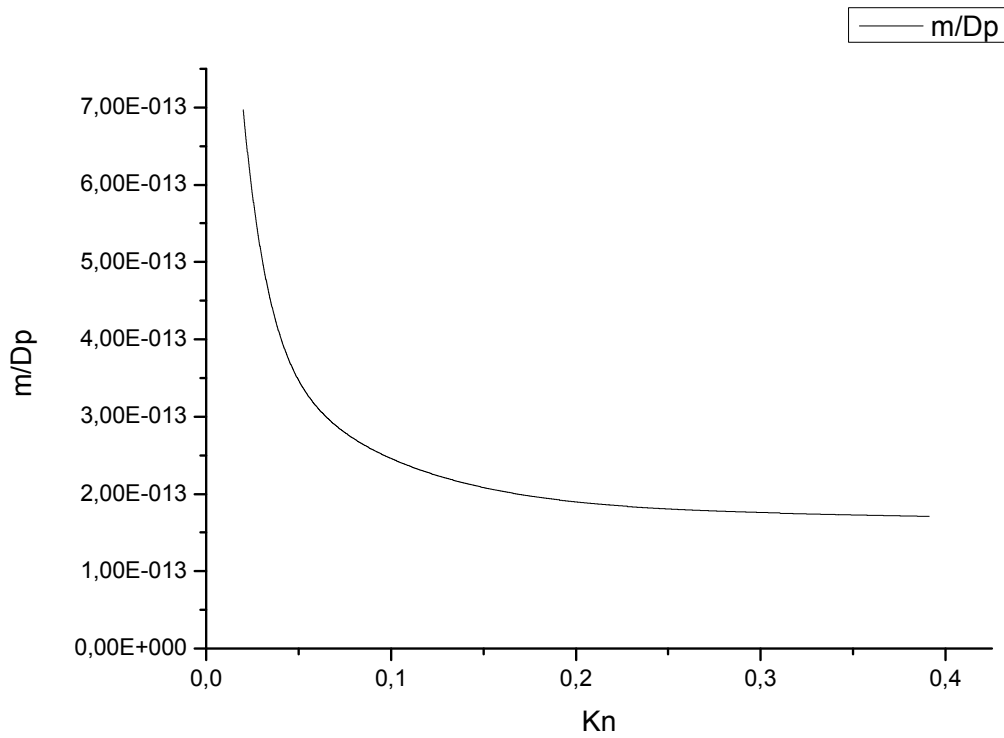
Σχήμα 4.4.b. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



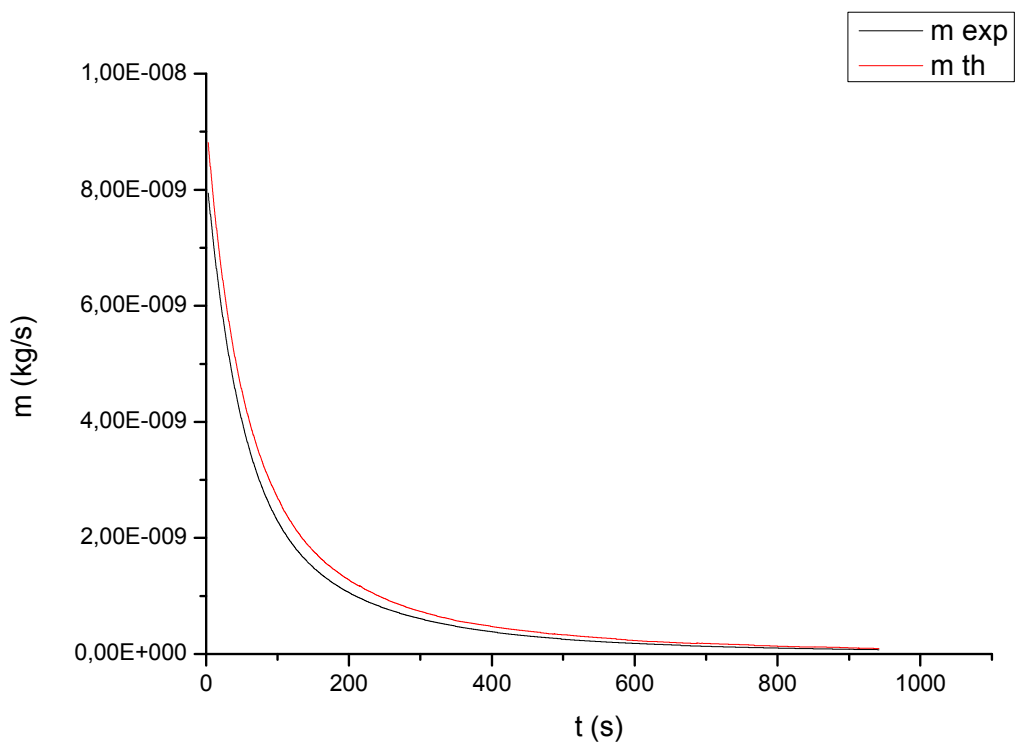
Σχήμα 4.4.b. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



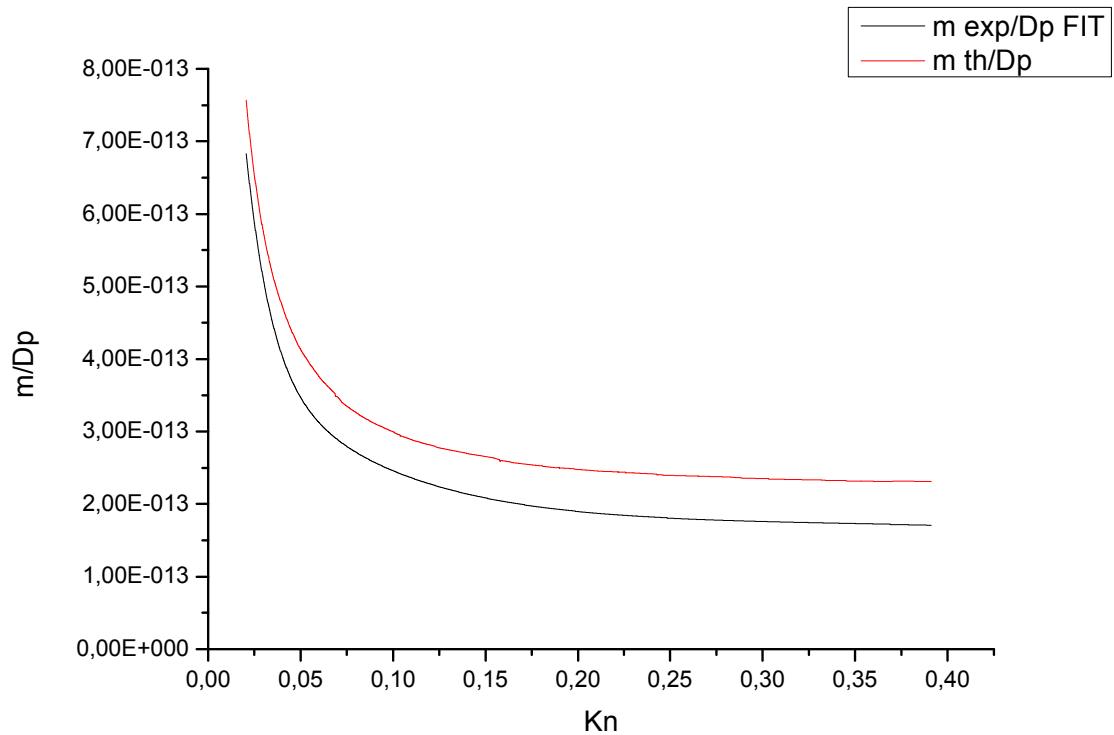
Σχήμα 4.4.b. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



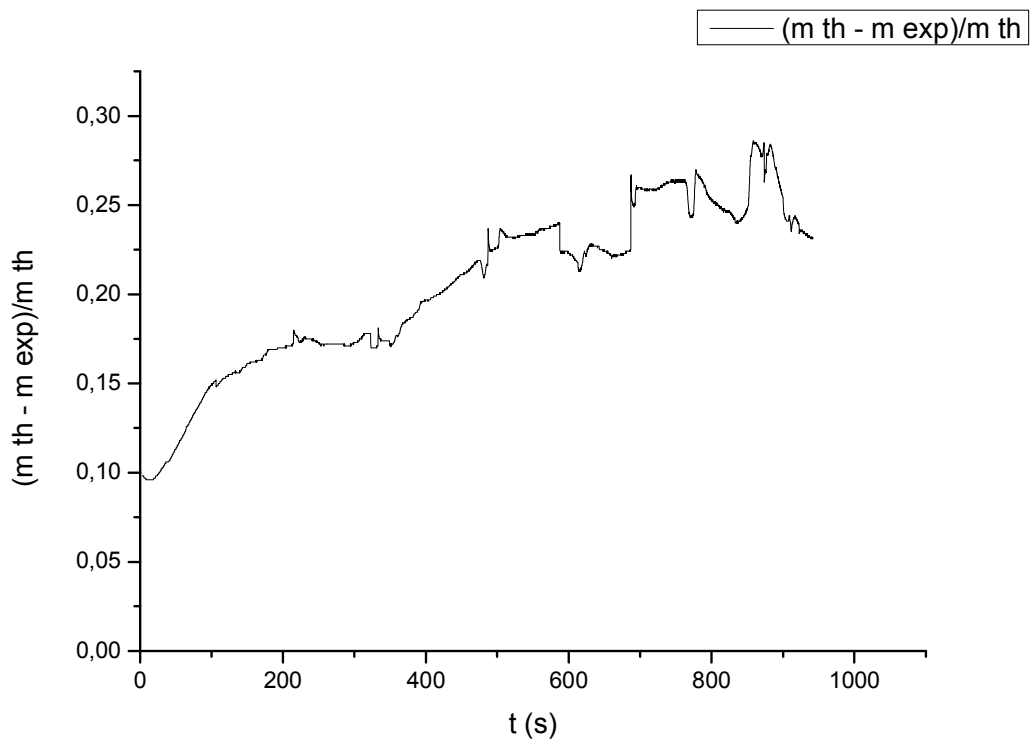
Σχήμα 4.4.b. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen



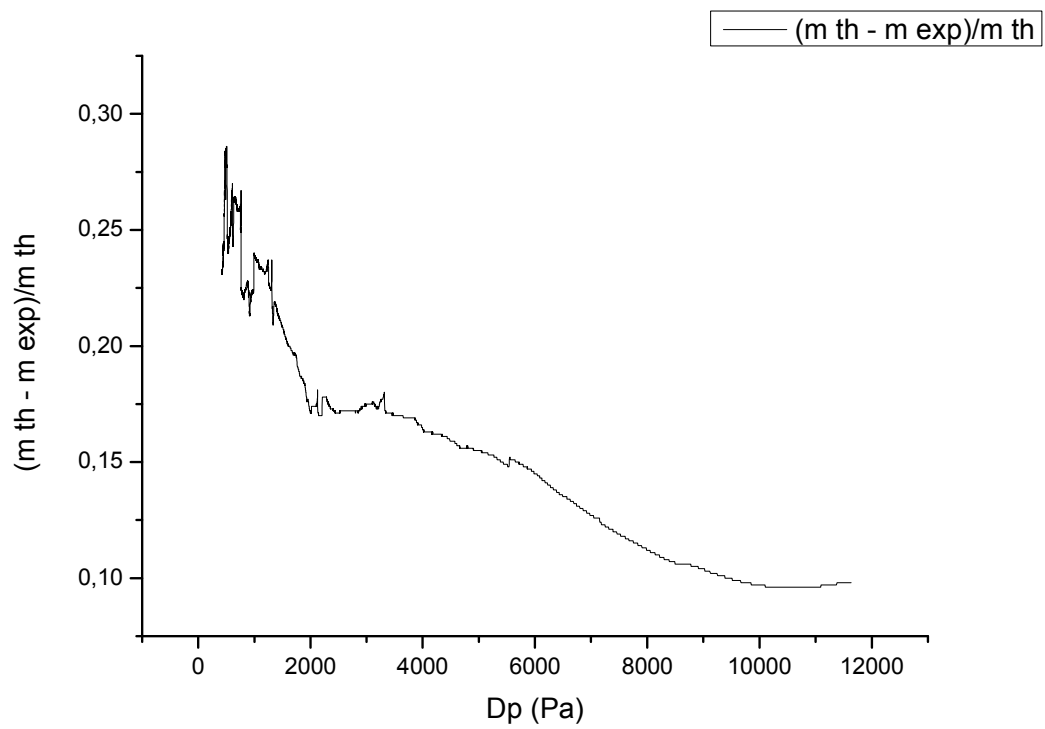
Σχήμα 4.4.b. 9: Πειραματική ($m \text{ exp}$) και θεωρητική ($m \text{ th}$) παροχή μάζας



Σχήμα 4.4.b. 10: Πειραματική ($m \text{ exp}$) και θεωρητική ($m \text{ th}$) παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



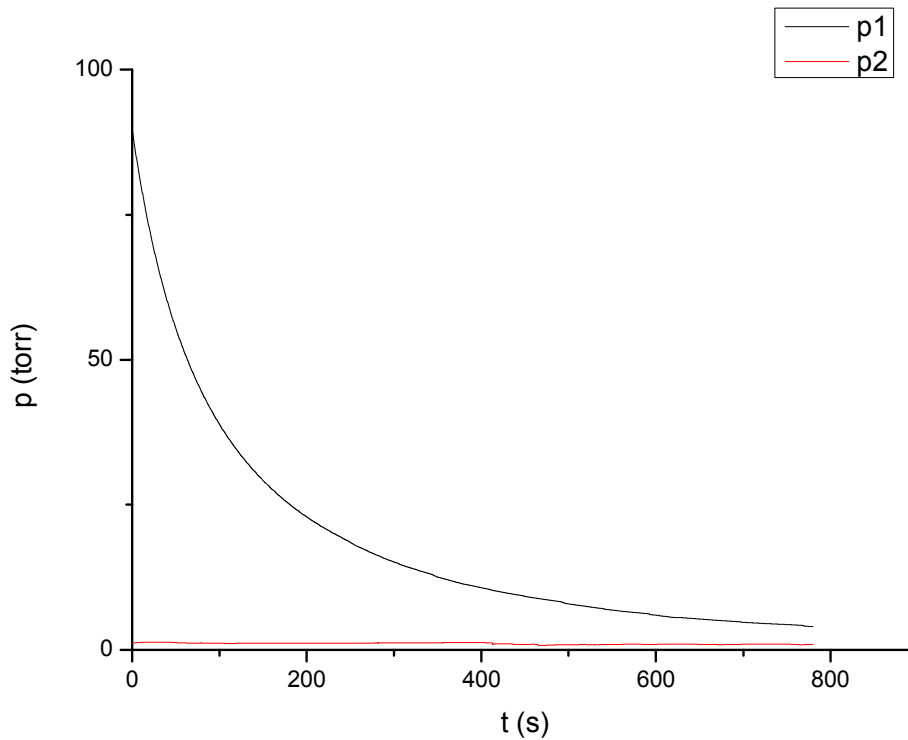
Σχήμα 4.4.b. 11: Αδιαστατοποιημένη διαφορά θεωρητικής και πειραματικής παροχής μάζας συναρτήσει χρόνου



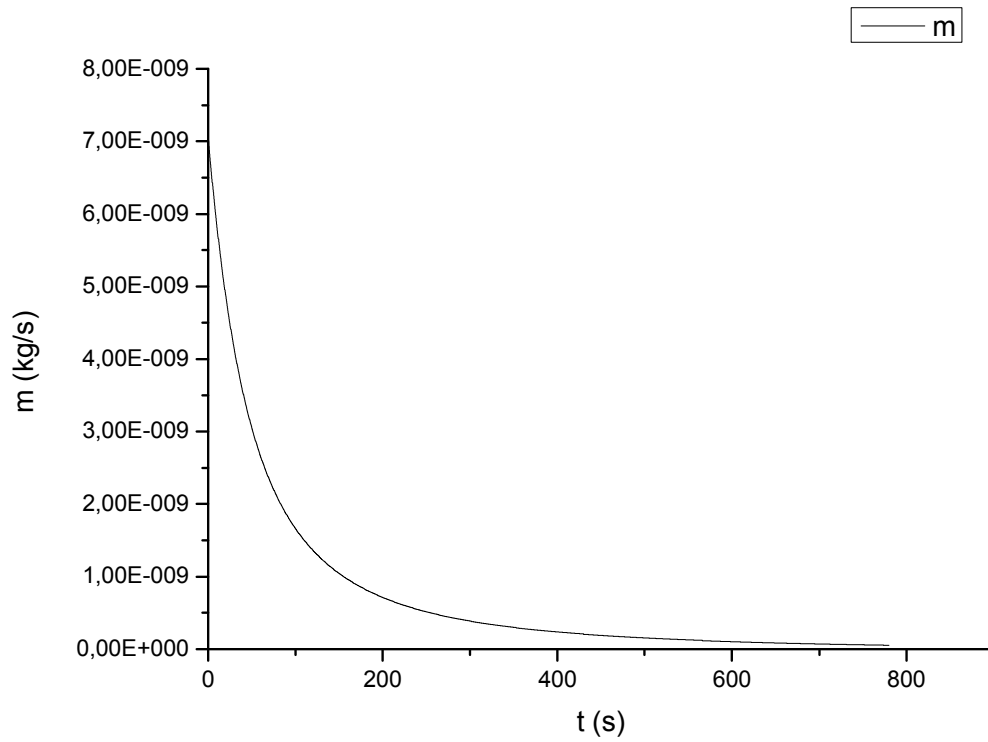
Σχήμα 4.4.b. 12: Αδιαστατοποιημένη διαφορά θεωρητικής και πειραματικής παροχής μάζας συναρτήσει διαφοράς πιέσεων των δεξαμενών

4.4.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 2 πλάτους 283,88 μm, ύψους 31,72 μm, εργαζόμενο μέσο Αέρας

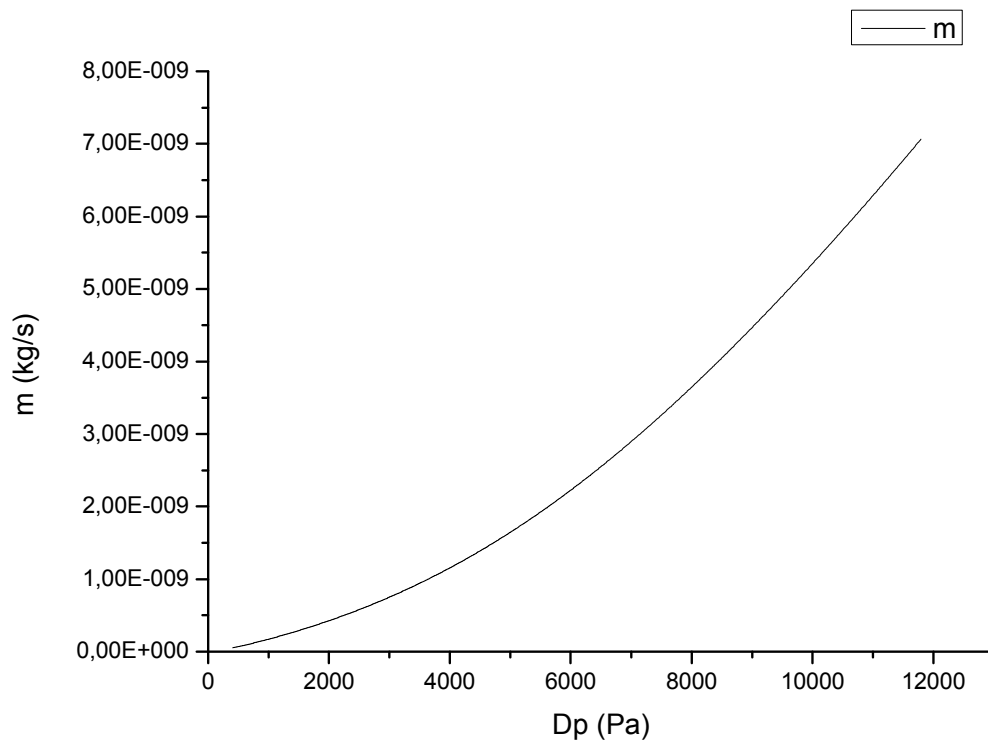
Μικροκανάλι: 55-0045-02 Nr2, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 283,88 \mu\text{m} \times 31,72 \mu\text{m}$
Αέριο: Αέρας $R=287$, $\mu=1,82 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



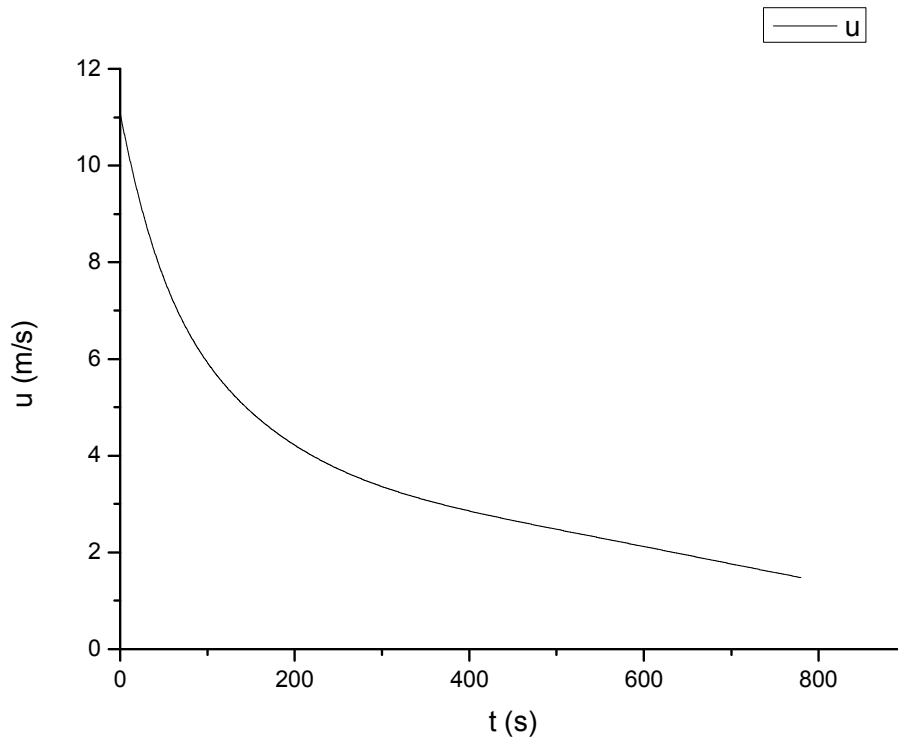
Σχήμα 4.4.c. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



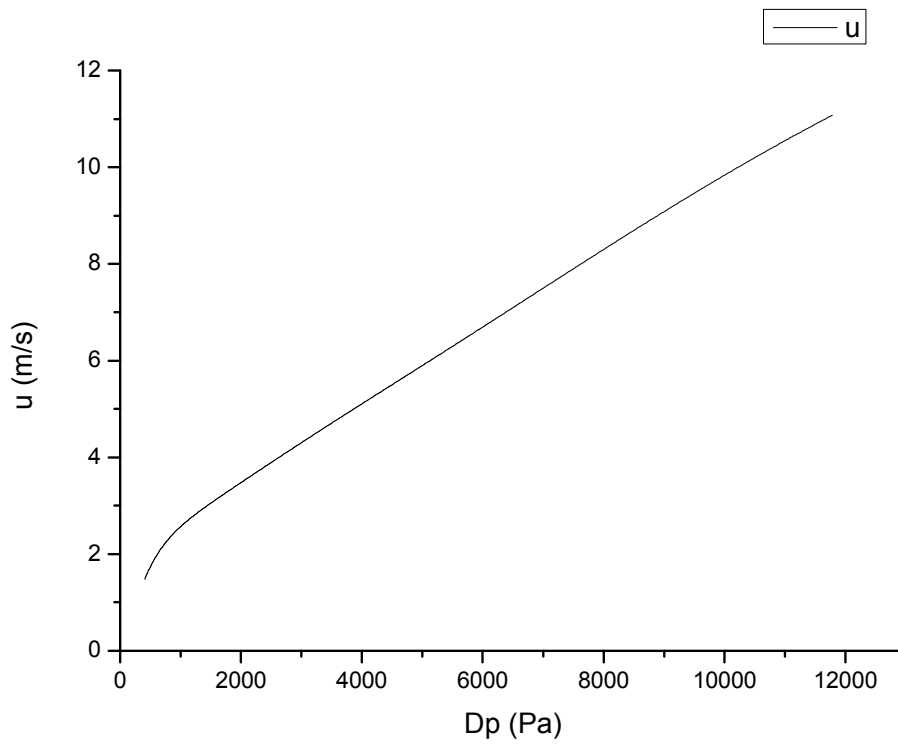
Σχήμα 4.4.ε. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



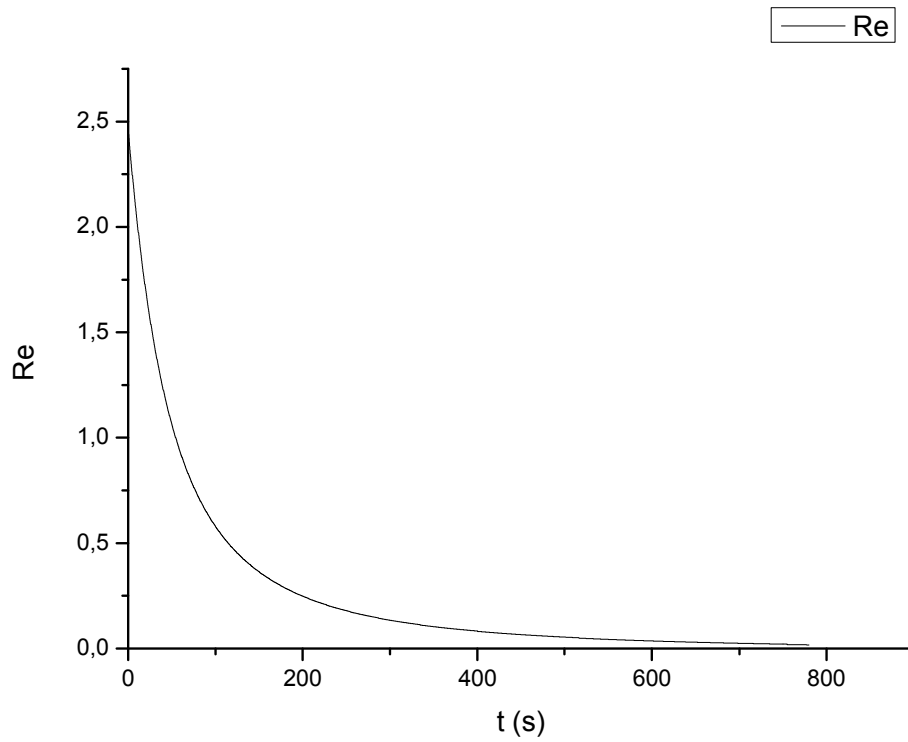
Σχήμα 4.4.ε. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



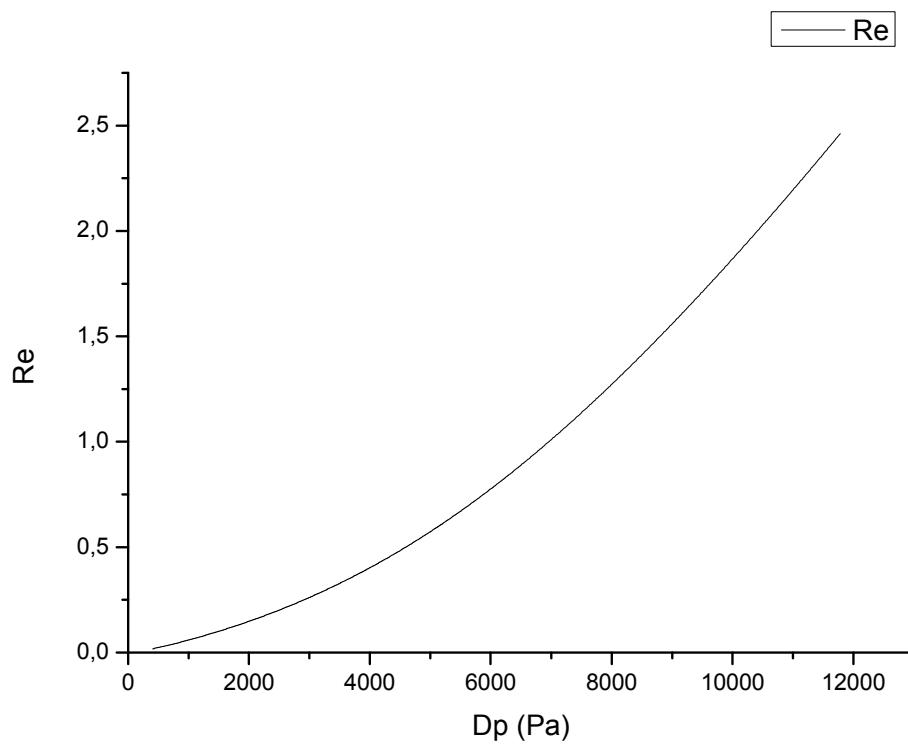
Σχήμα 4.4.ε. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



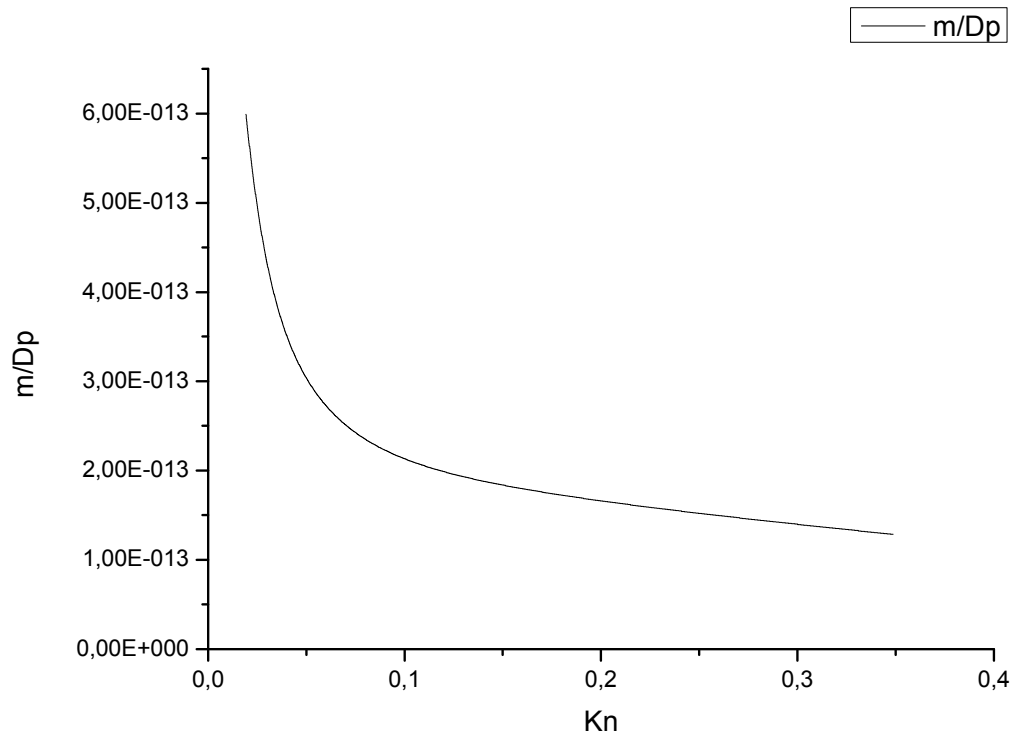
Σχήμα 4.4.ε. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.4.ε. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



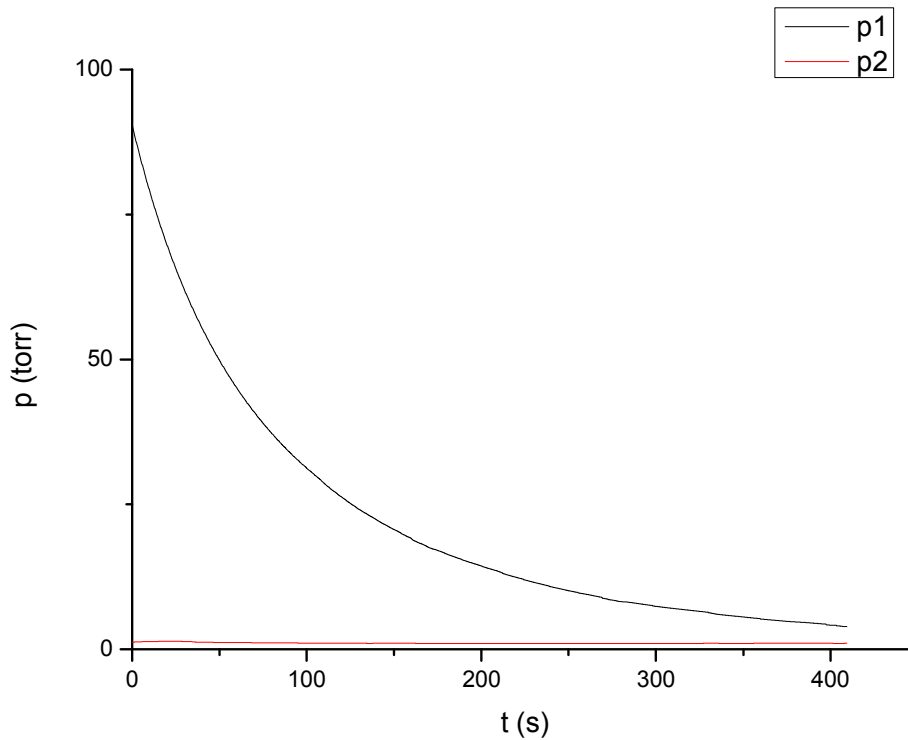
Σχήμα 4.4.ε. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



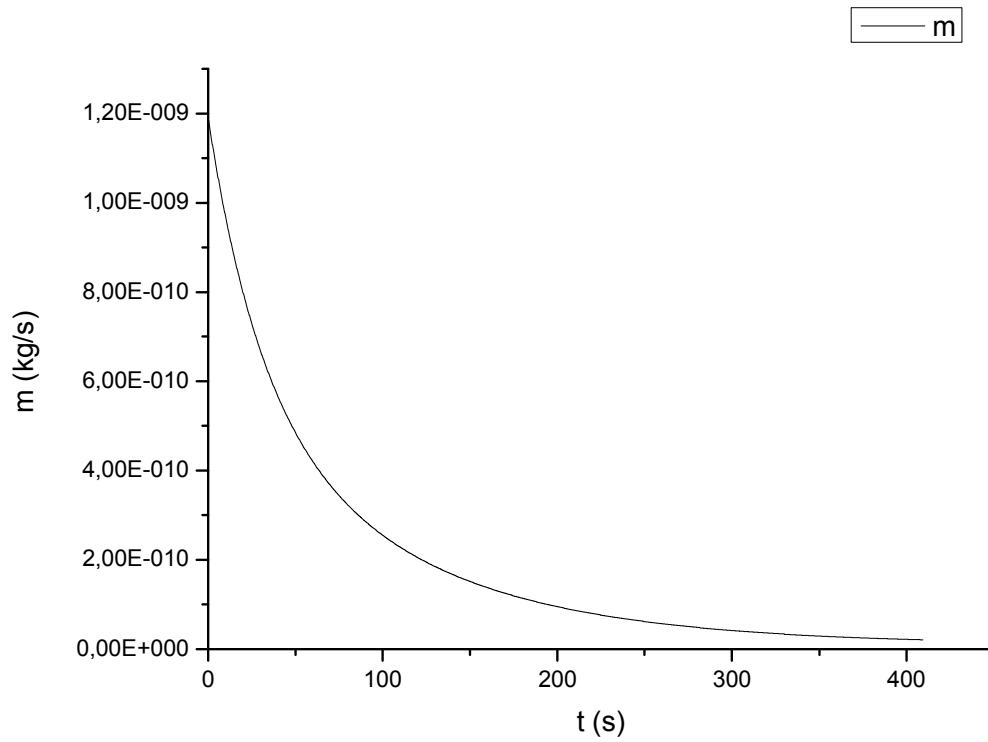
Σχήμα 4.4.c. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.5.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 3 πλάτους 282,55 μm , ύψους 29,63 μm , εργαζόμενο μέσο He

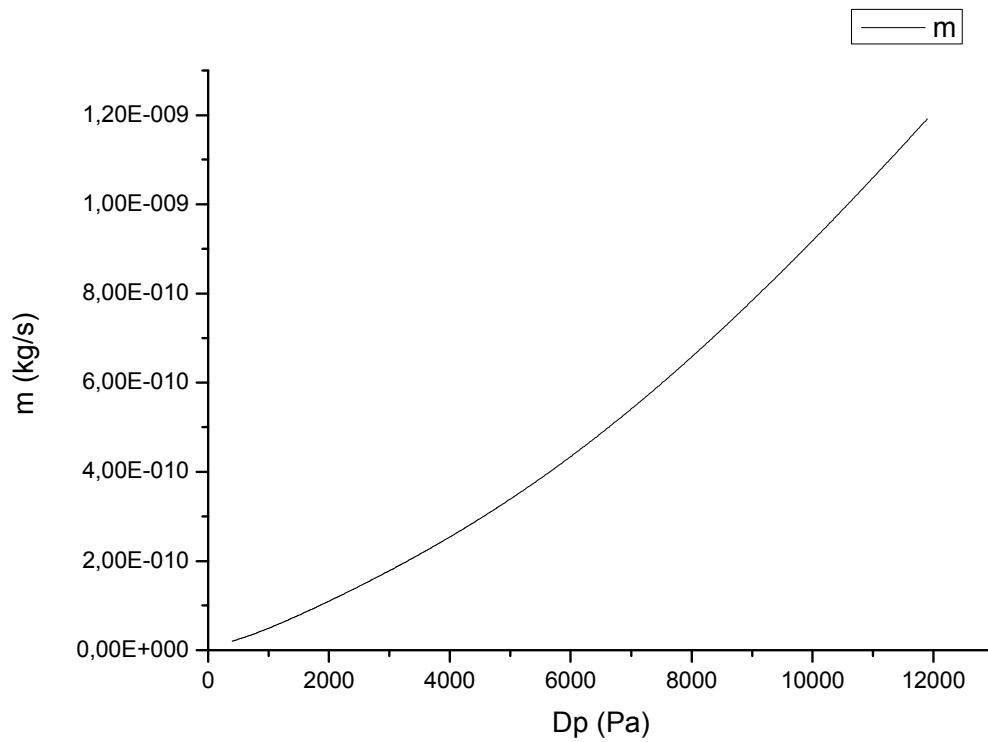
Μικροκανάλι: 55-0045-02 Nr3, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 282,55 \mu\text{m} \times 29,63 \mu\text{m}$
Αέριο: He $R=2076,9$, $\mu=1,9955 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



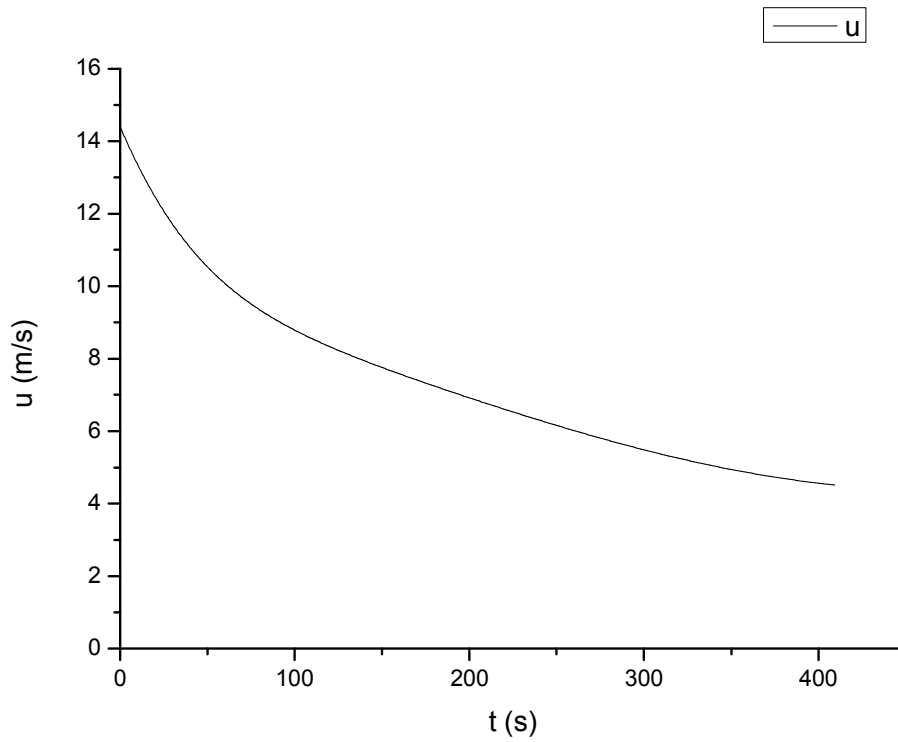
Σχήμα 4.5.a. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



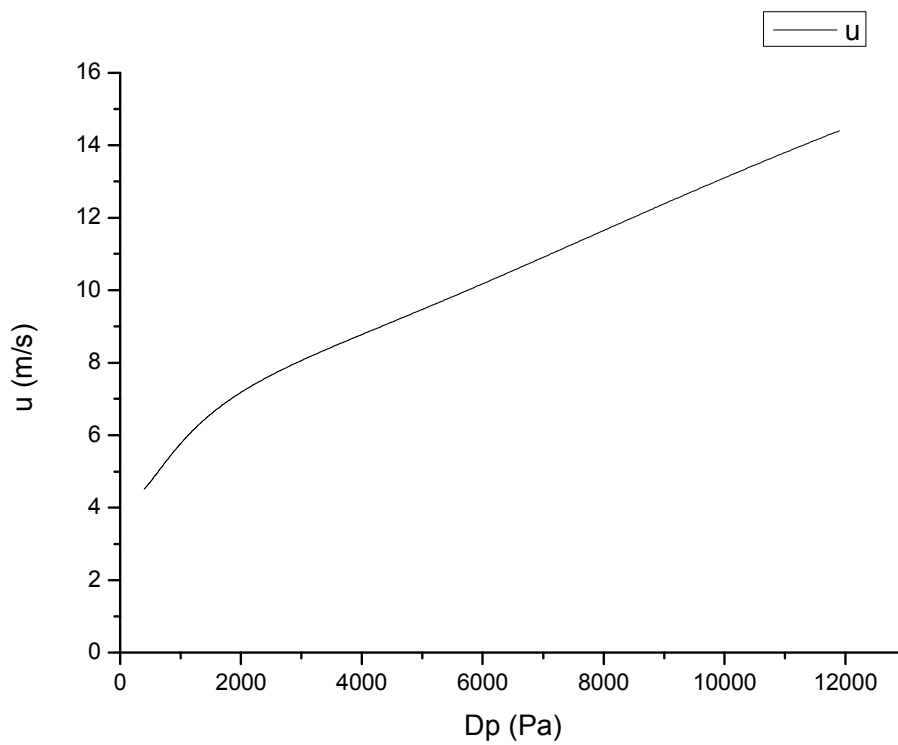
Σχήμα 4.5.a. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



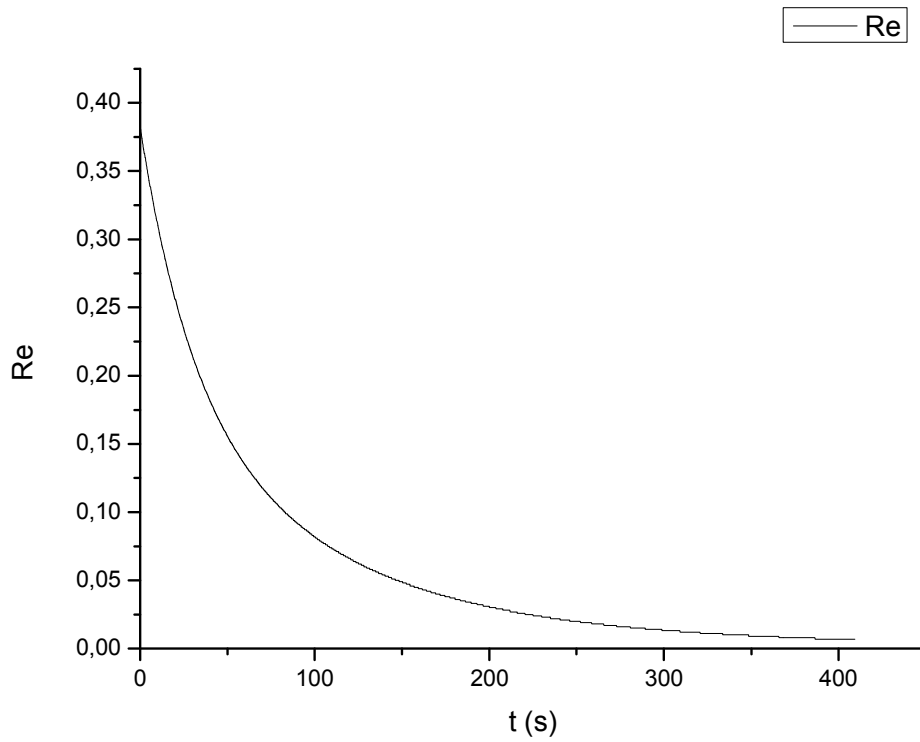
Σχήμα 4.5.a. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



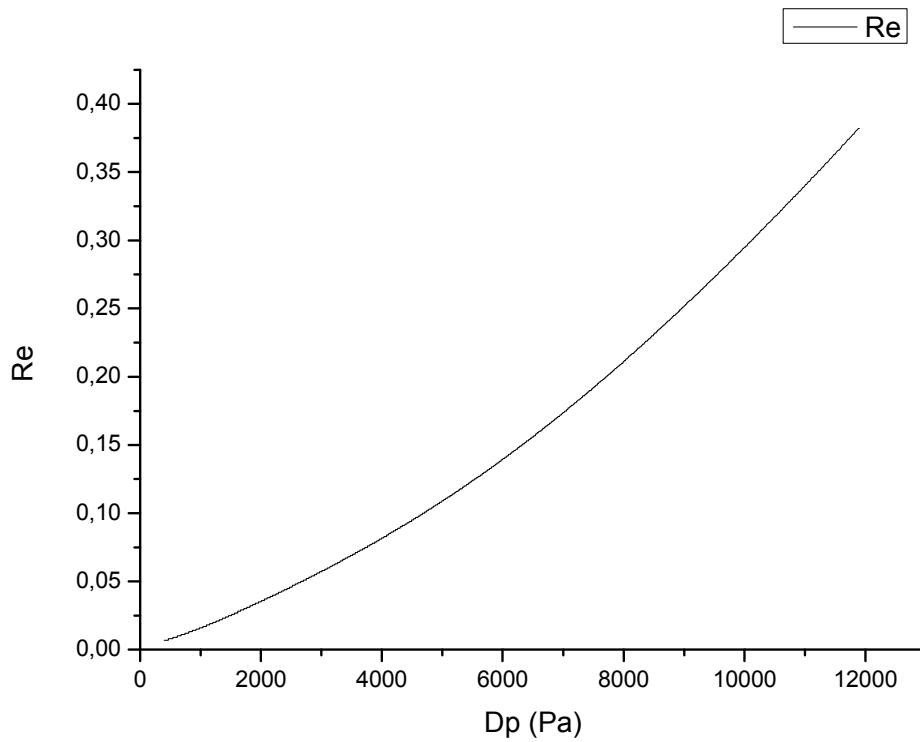
Σχήμα 4.5.a. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



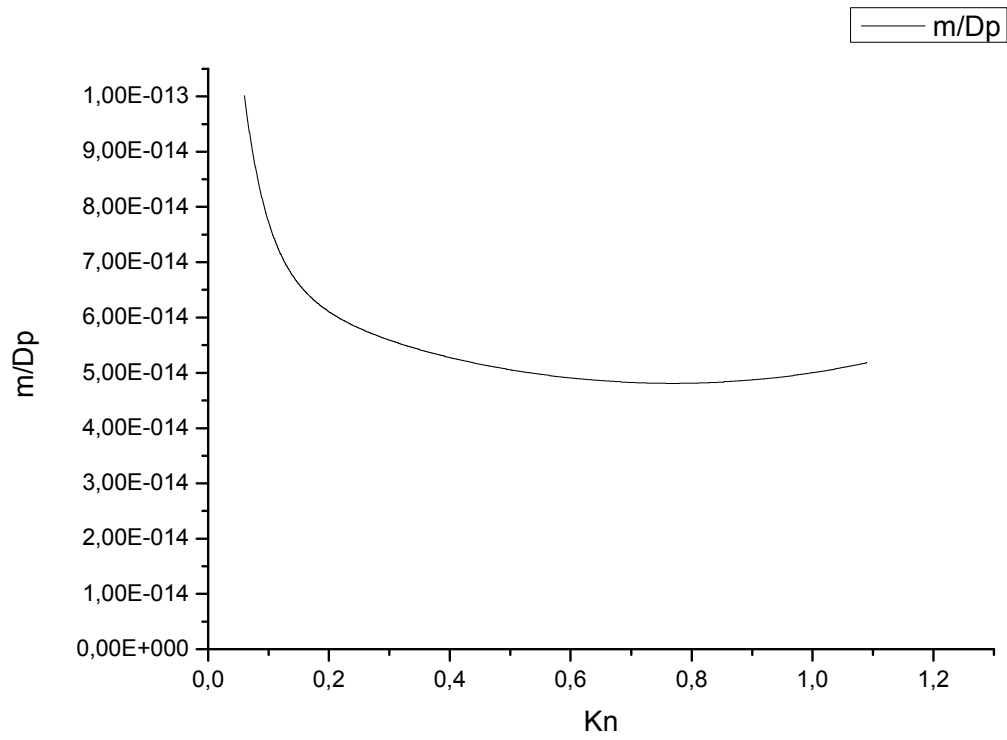
Σχήμα 4.5.a. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.5.a. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



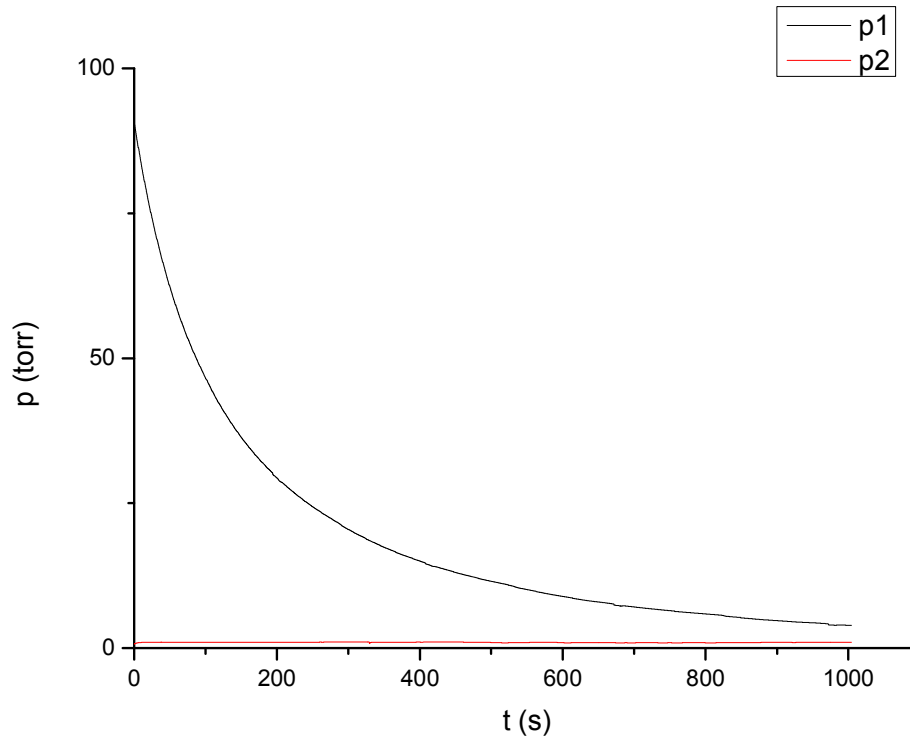
Σχήμα 4.5.a. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



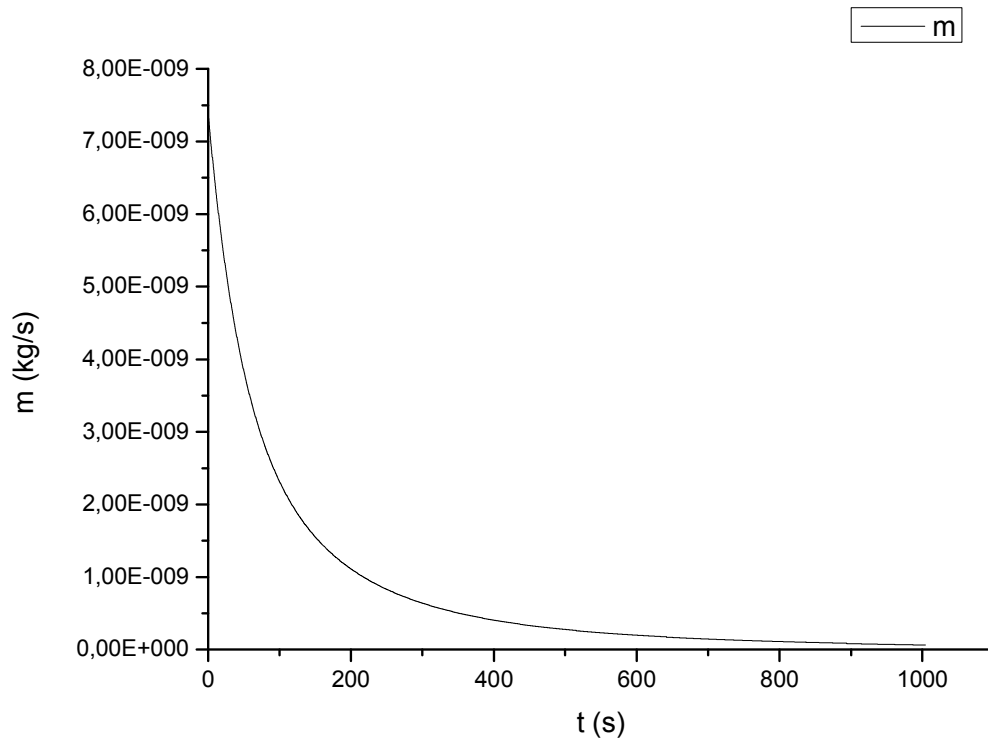
Σχήμα 4.5.a. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.5.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 3 πλάτους 282,55 μm , ύψους 29,63 μm , εργαζόμενο μέσο Ar

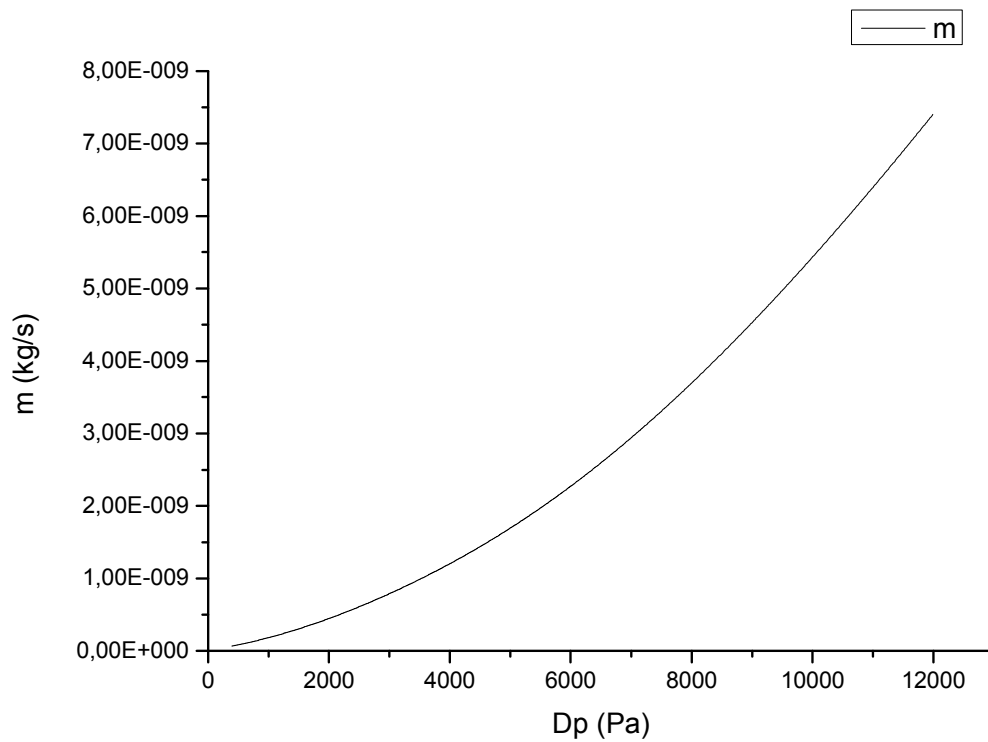
Μικροκανάλι: 55-0045-02 Nr3, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 282,55 \mu\text{m} \times 29,63 \mu\text{m}$
Αέριο: Ar $R=208$, $\mu=2,26 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



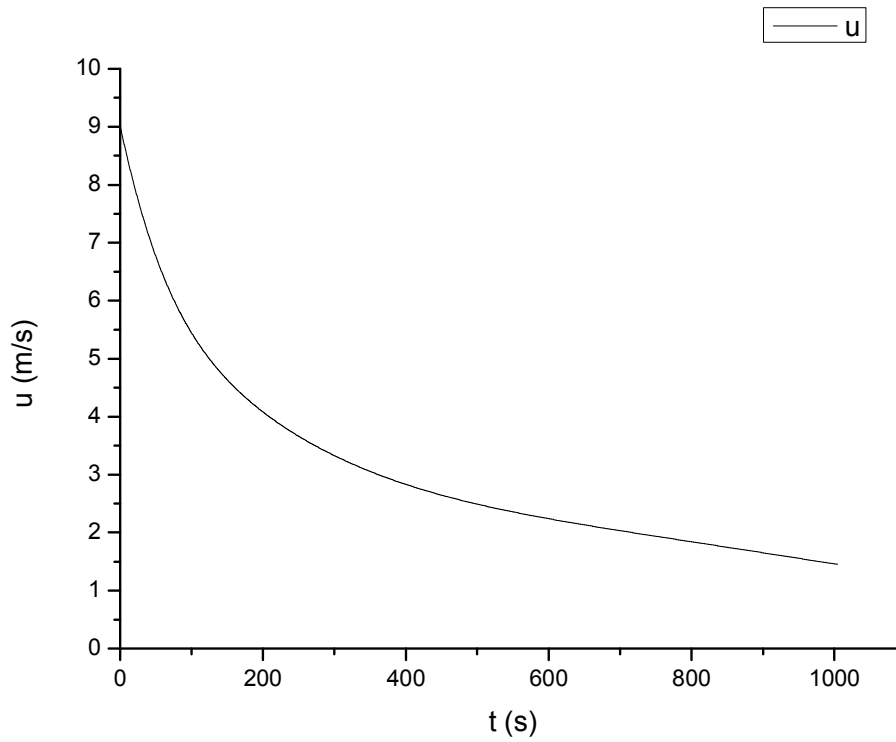
Σχήμα 4.5.b. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



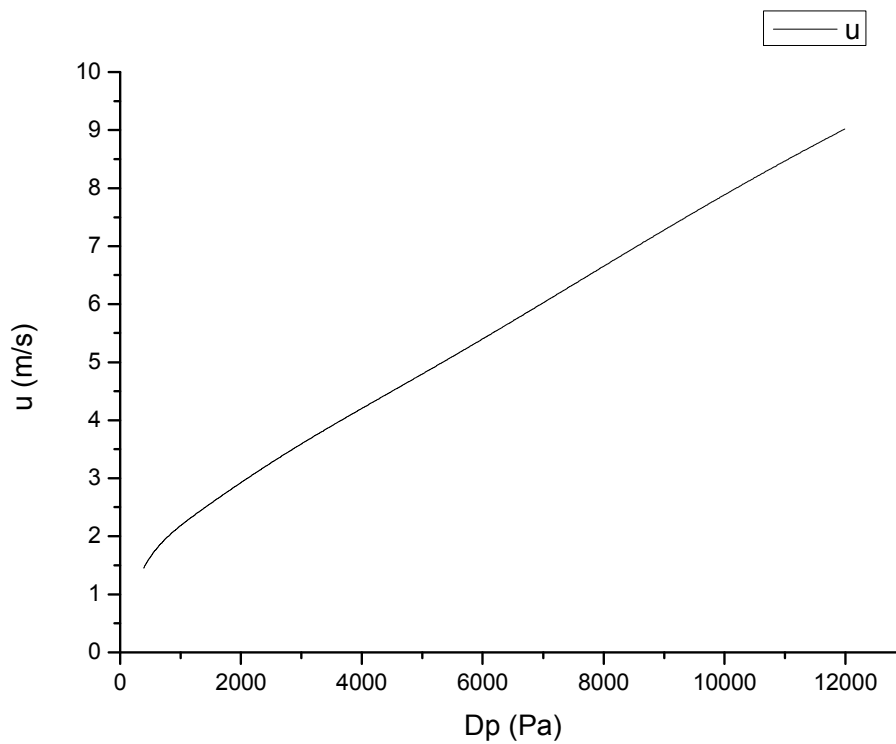
Σχήμα 4.5.b. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



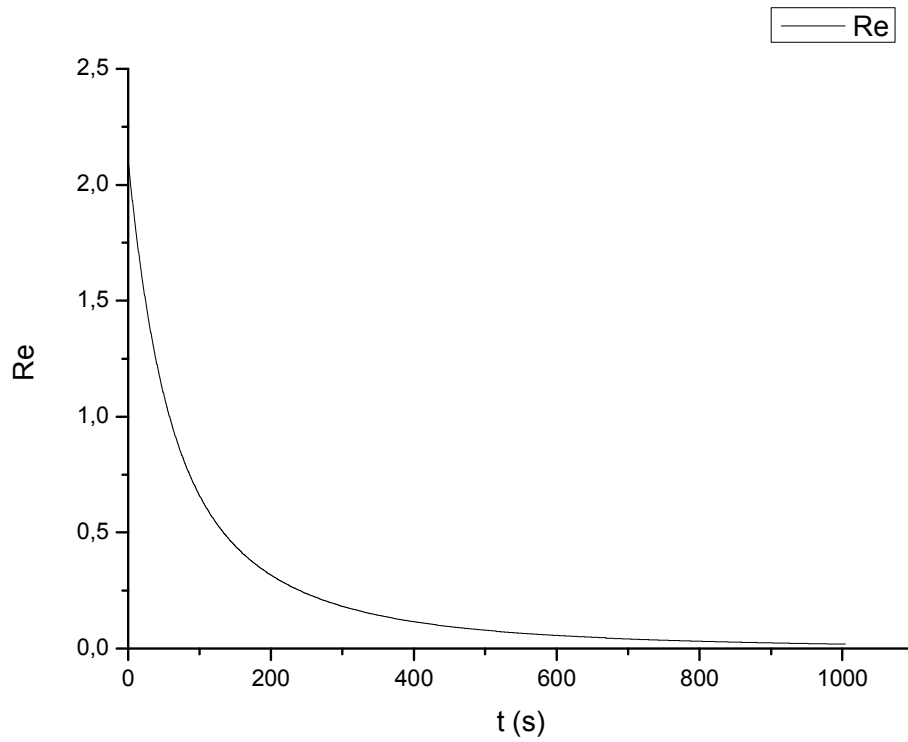
Σχήμα 4.5.b. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



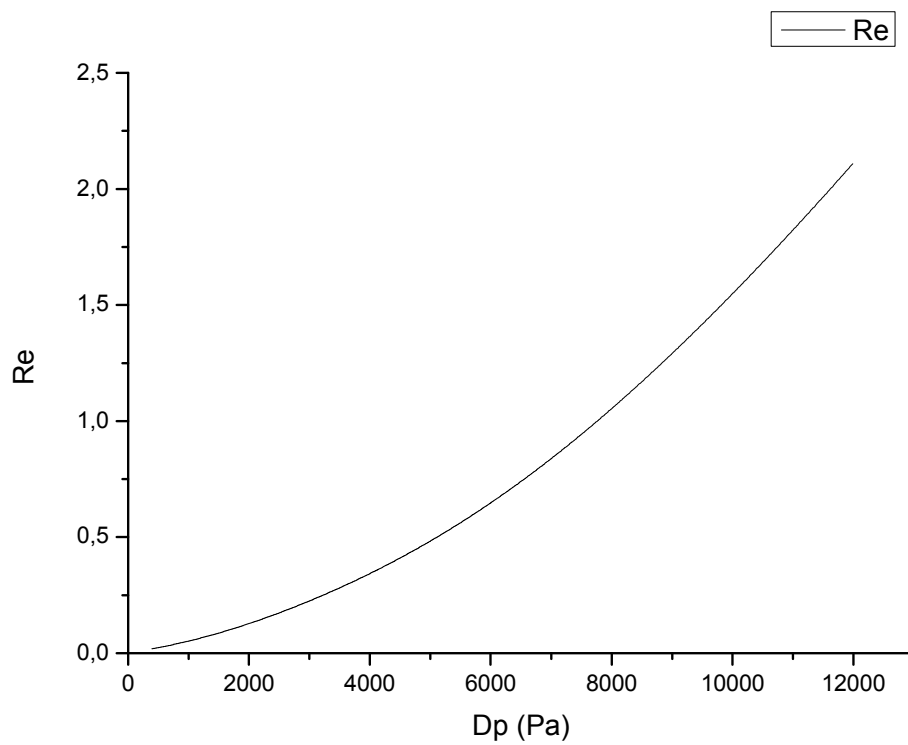
Σχήμα 4.5.b. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



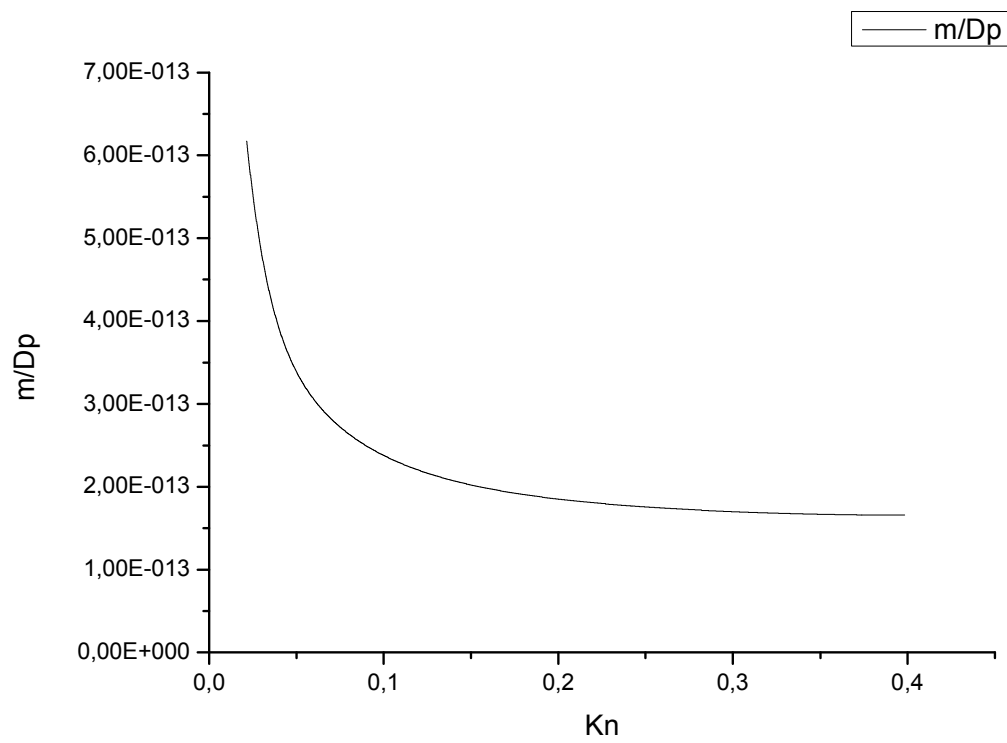
Σχήμα 4.5.b. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.5.b. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



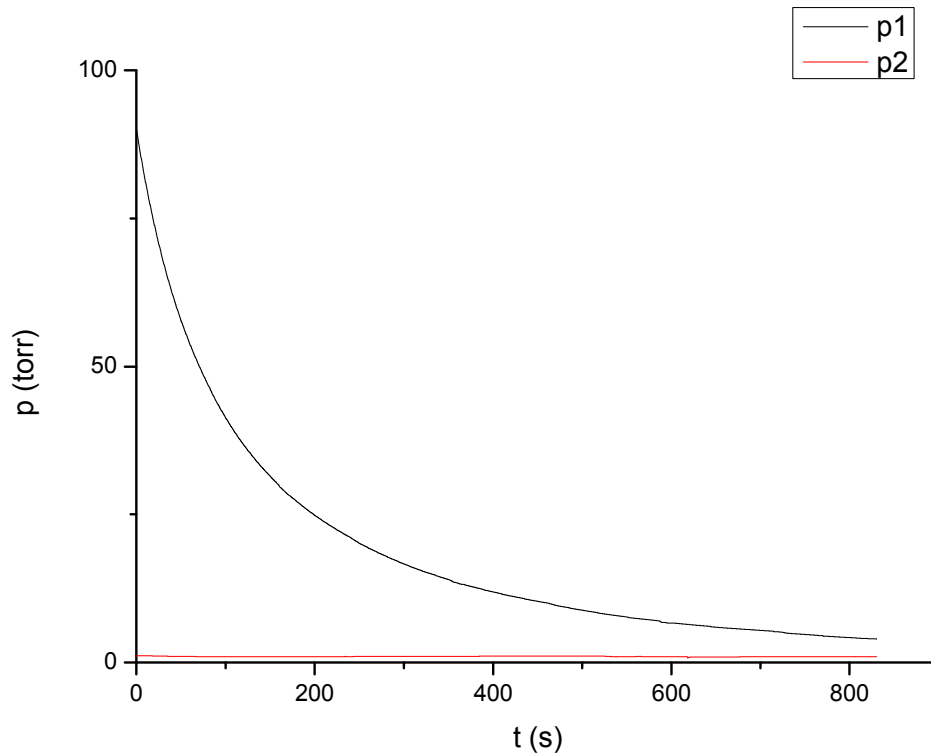
Σχήμα 4.5.b. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



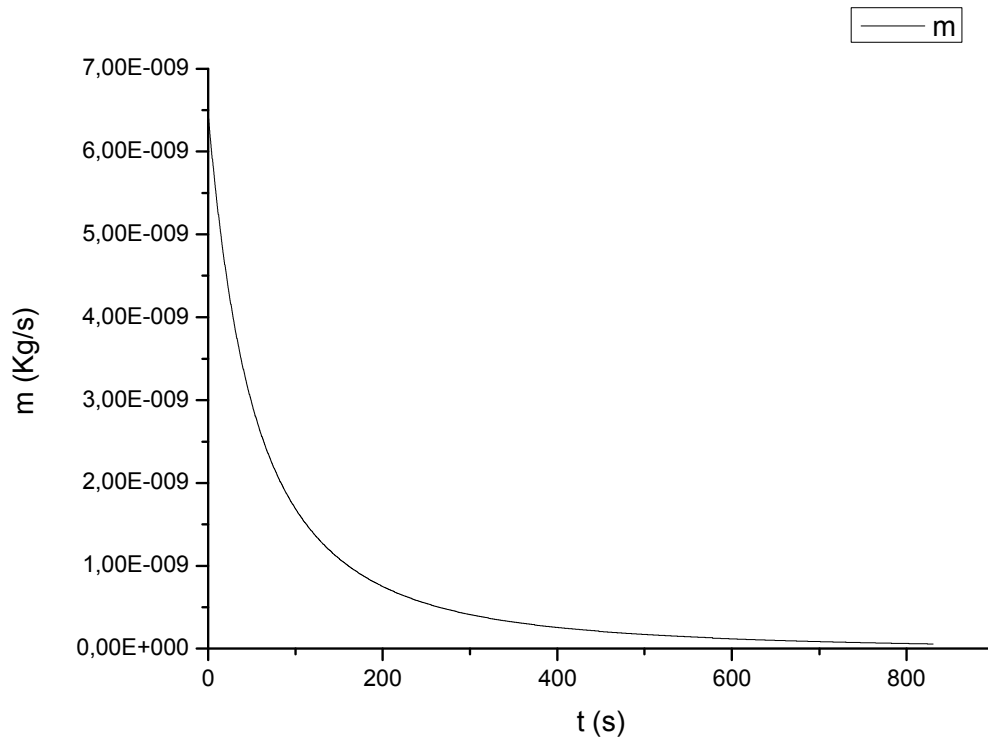
Σχήμα 4.5.b. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.5.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 3 πλάτους 282,55 μm , ύψους 29,63 μm , εργαζόμενο μέσο Αέρας

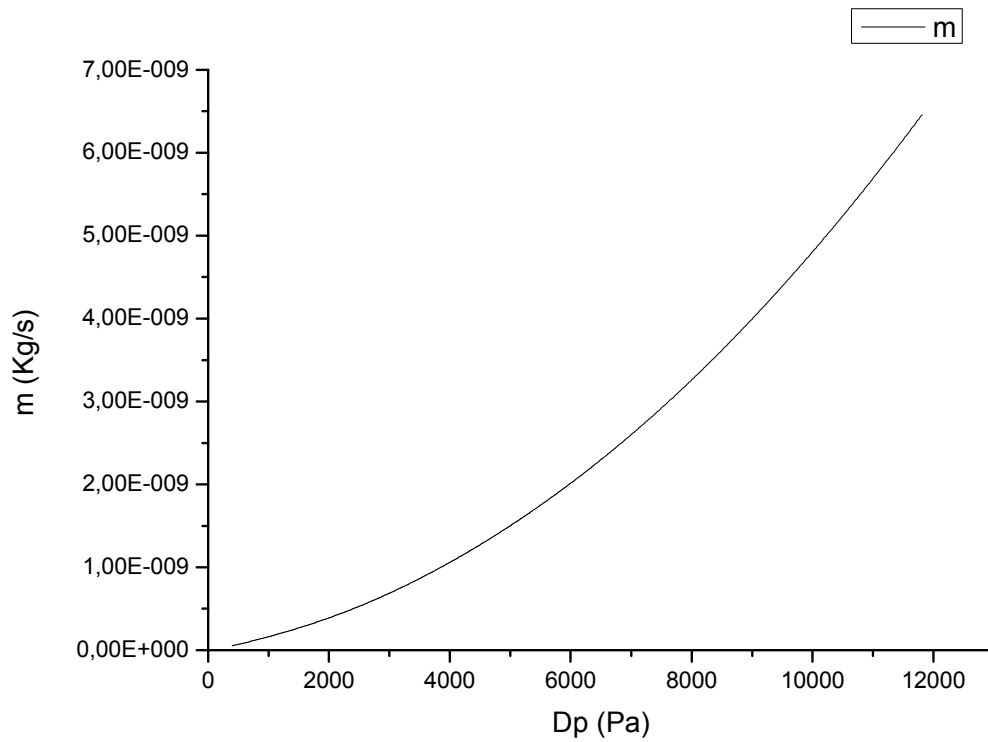
Μικροκανάλι: 55-0045-02 Nr3, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 282,55 \mu\text{m} \times 29,63 \mu\text{m}$
Αέριο: Αέρας $R=287$, $\mu=1,82 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



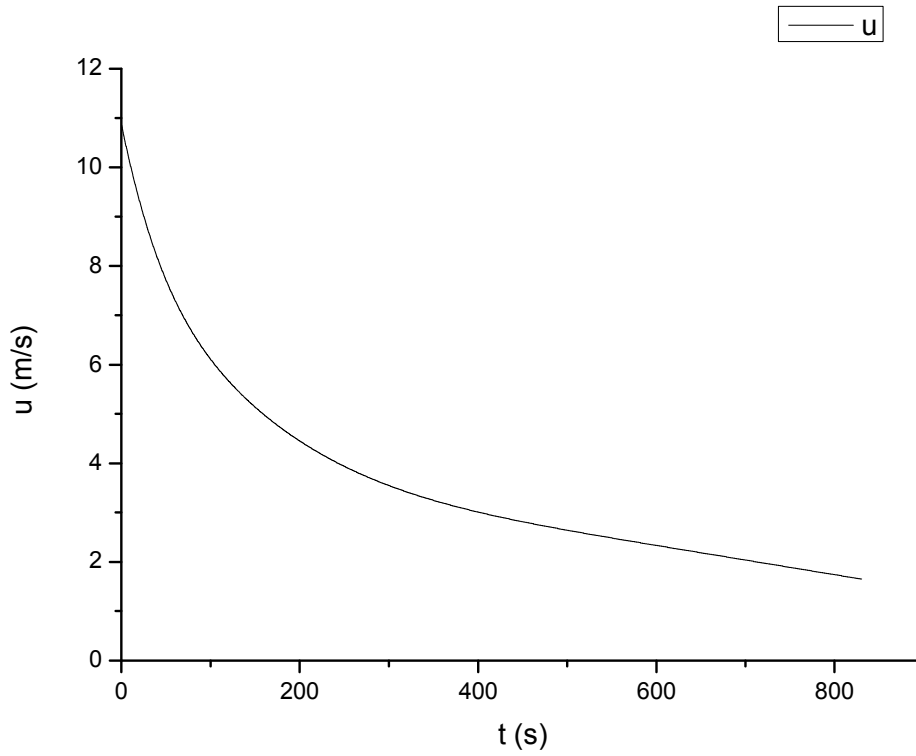
Σχήμα 4.5.c. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



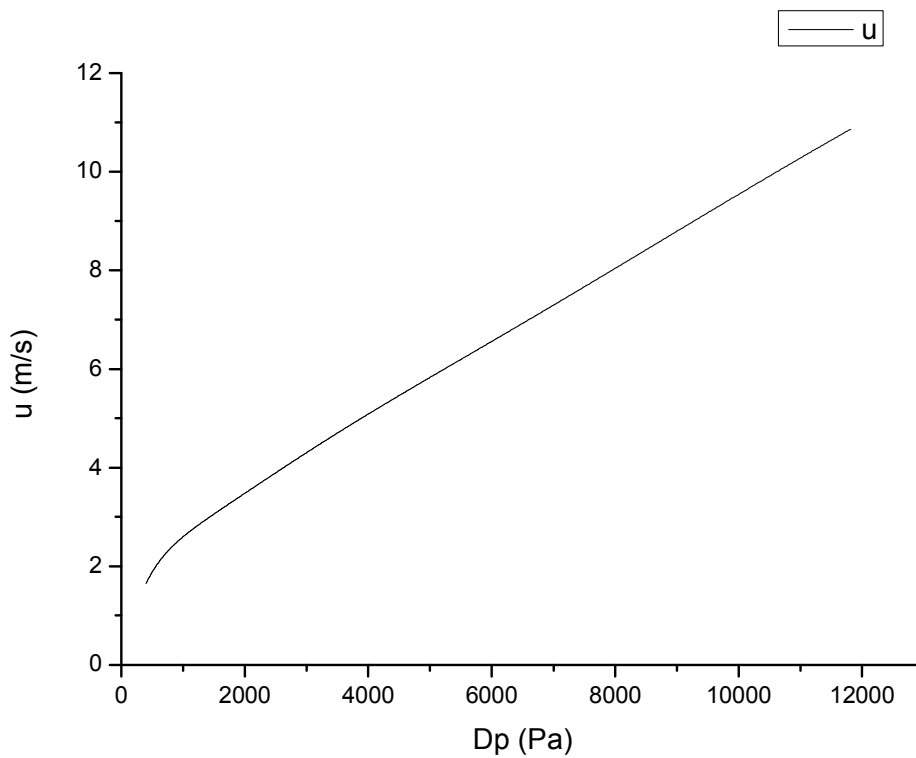
Σχήμα 4.5.ε. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



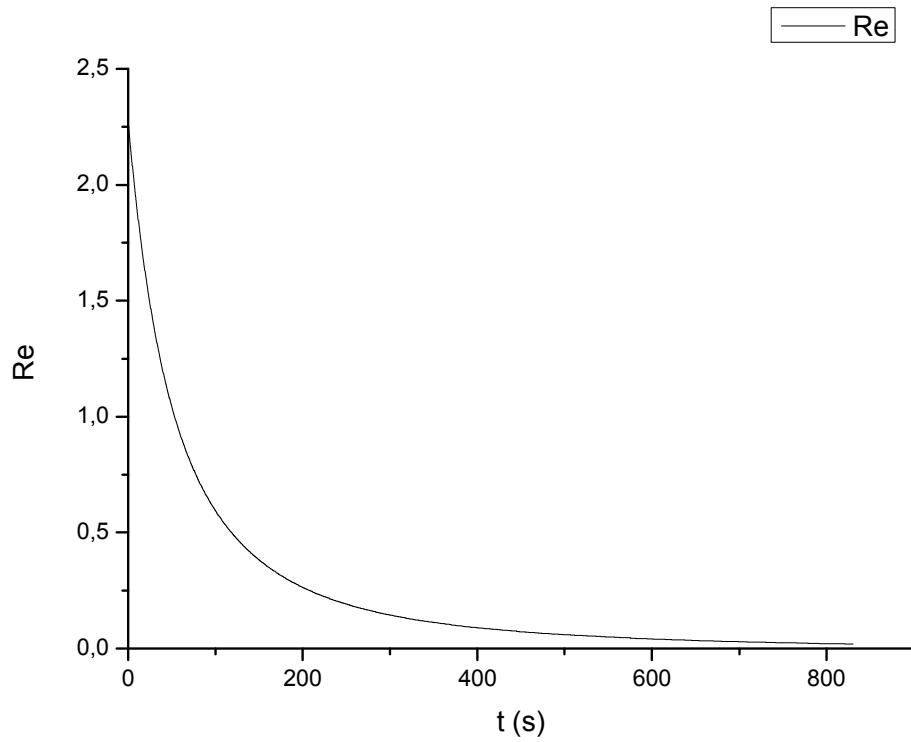
Σχήμα 4.5.ε. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



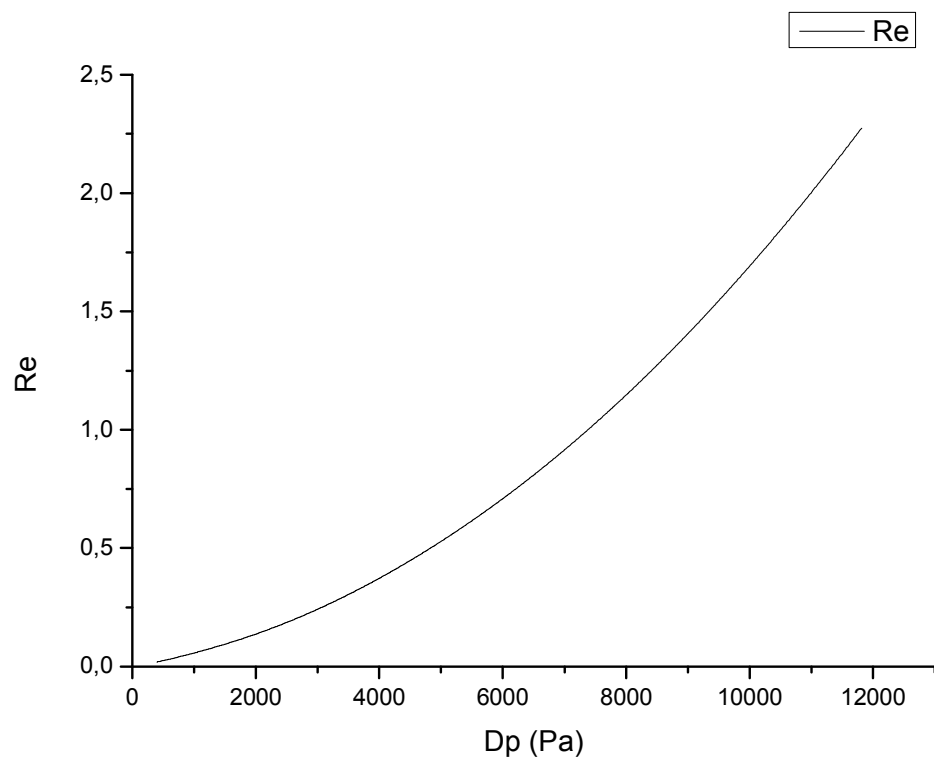
Σχήμα 4.5.ε. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



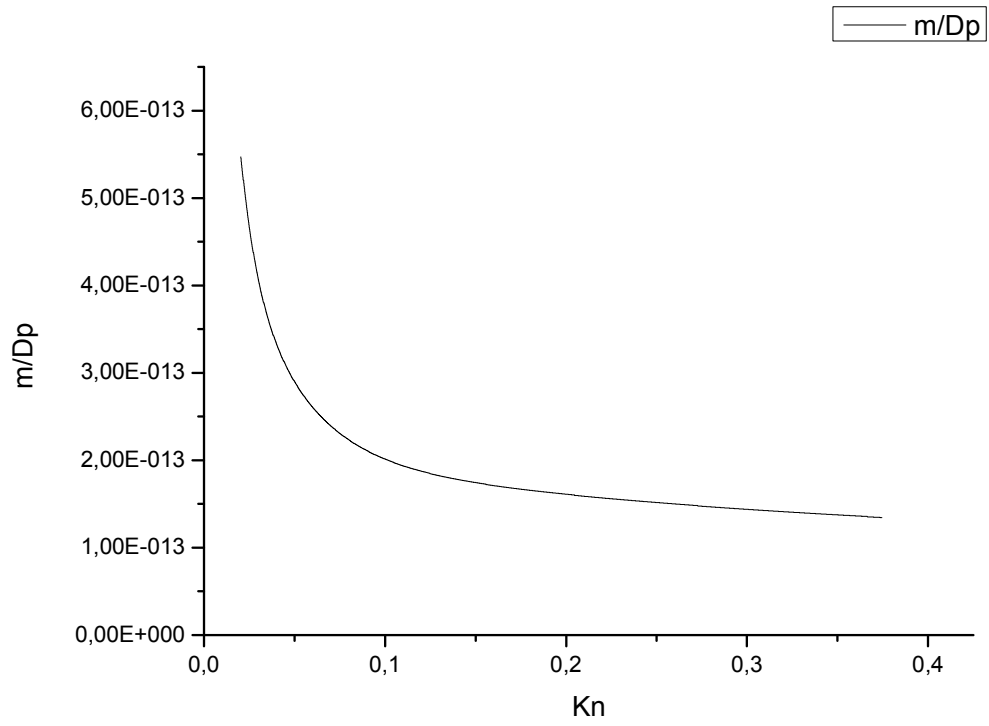
Σχήμα 4.5.ε. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.5.ε. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



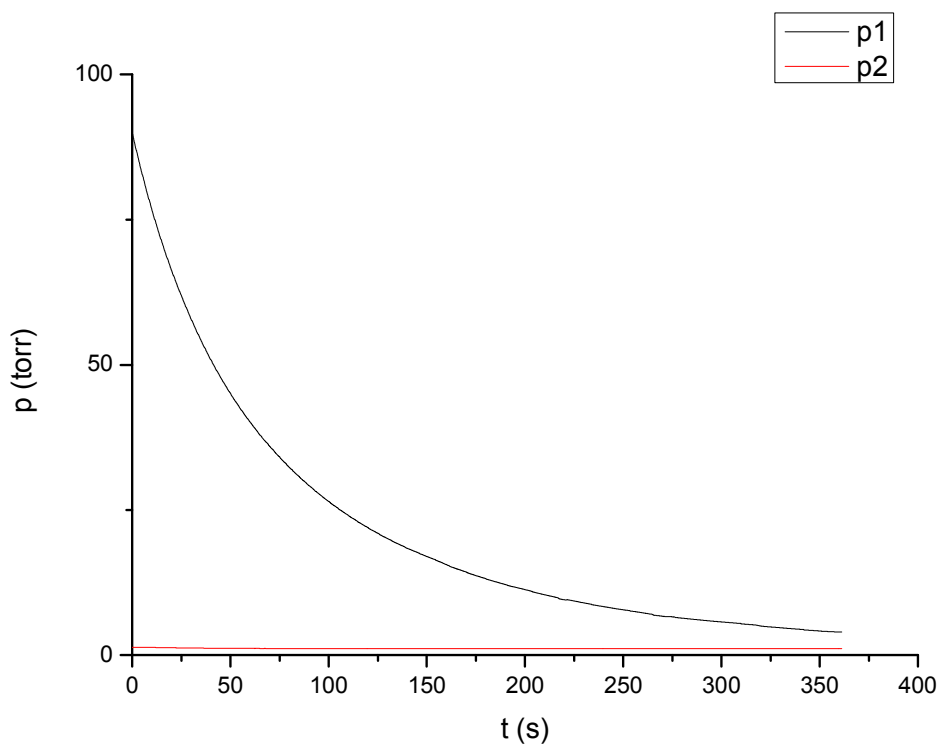
Σχήμα 4.5.ε. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



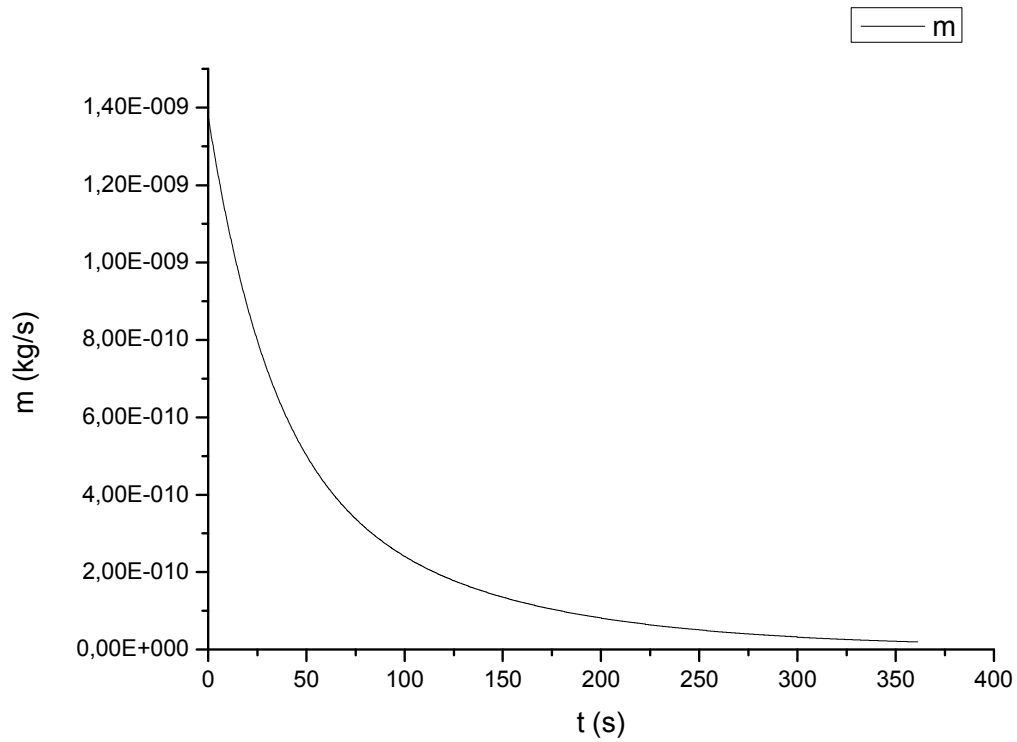
Σχήμα 4.5.c. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.6.a: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 4 πλάτους 282,35 μm , ύψους 29,91 μm , εργαζόμενο μέσο He

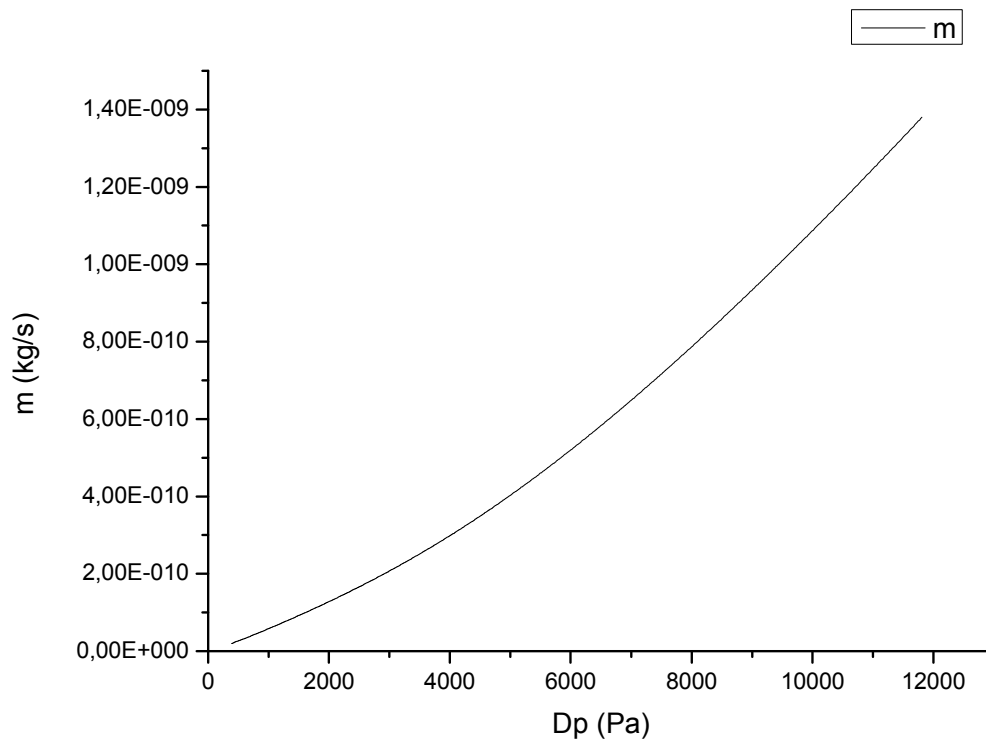
Μικροκανάλι: 55-0045-02 Nr4, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 282,35 \mu\text{m} \times 29,91 \mu\text{m}$
Αέριο: He $R=2076,9$, $\mu=1,9955 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



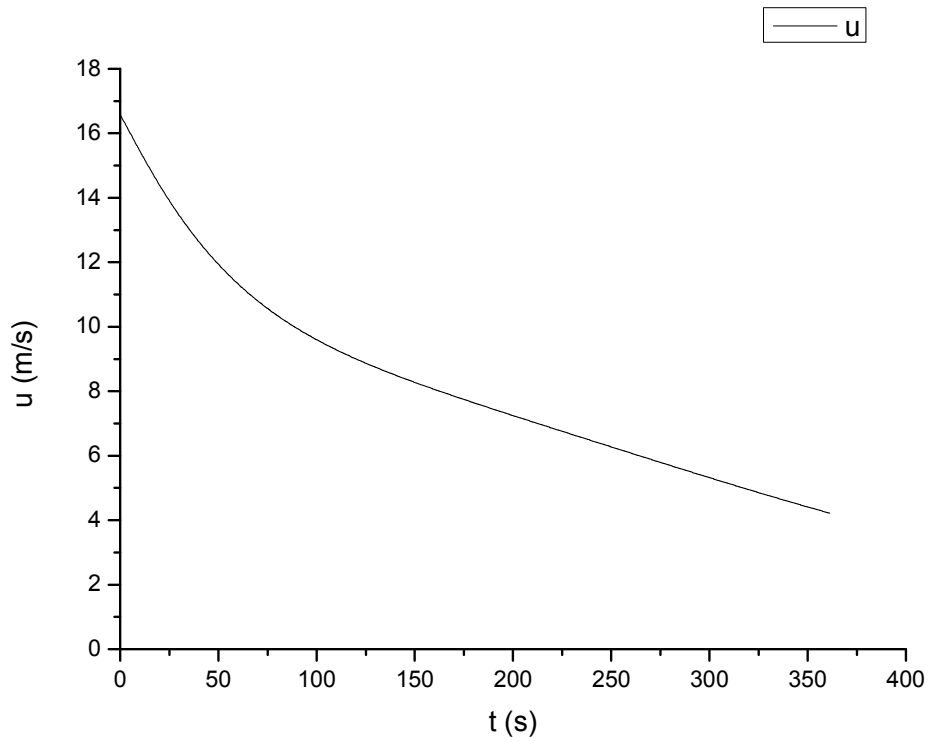
Σχήμα 4.6.a. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



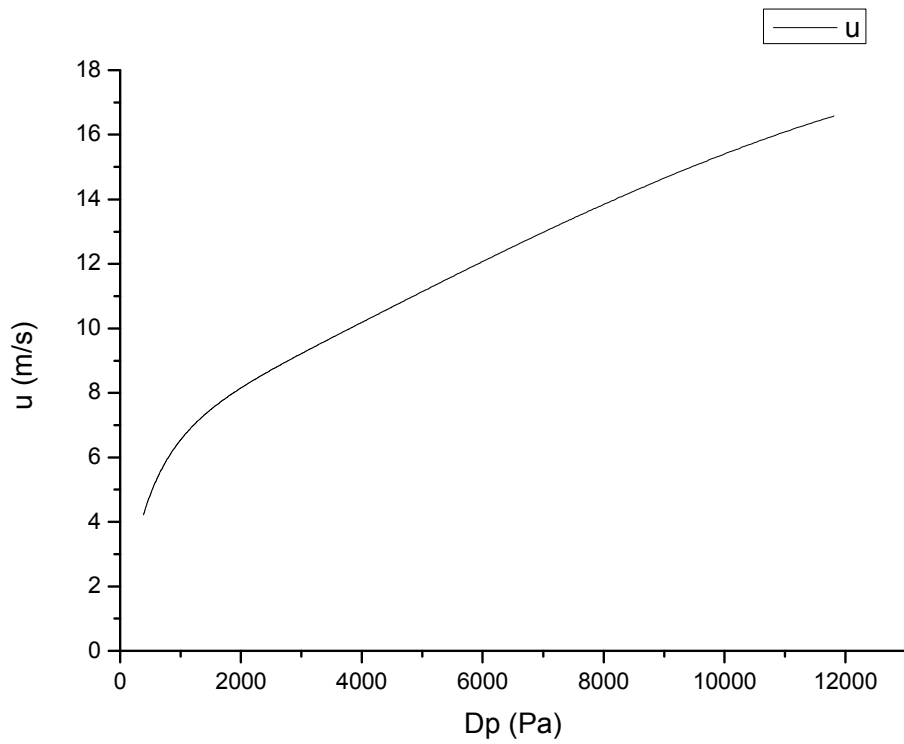
Σχήμα 4.6.a. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



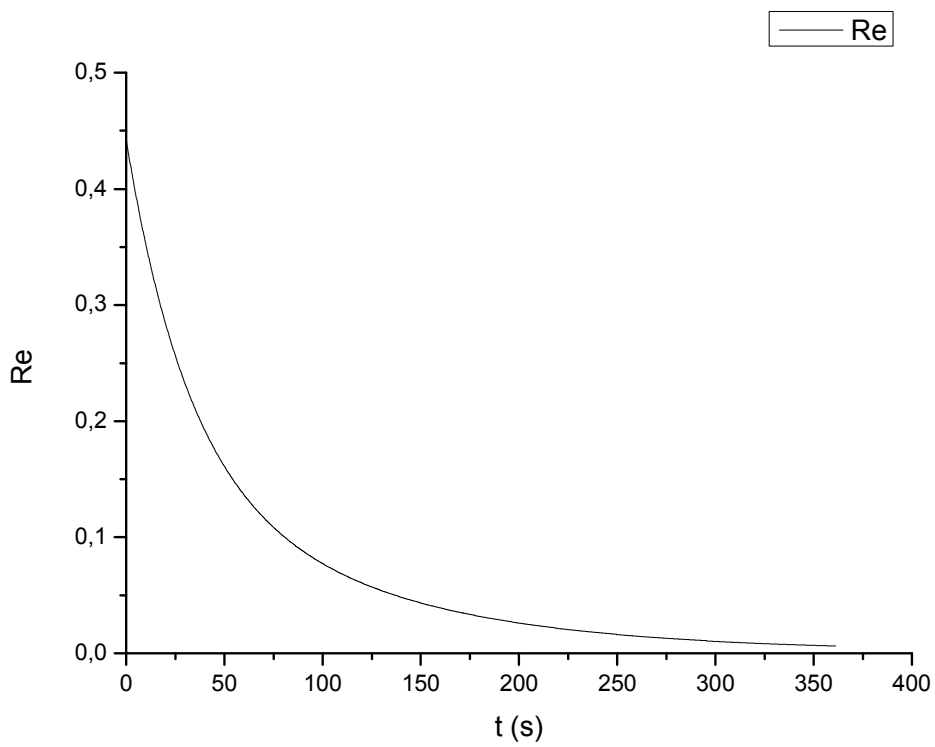
Σχήμα 4.6.a. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



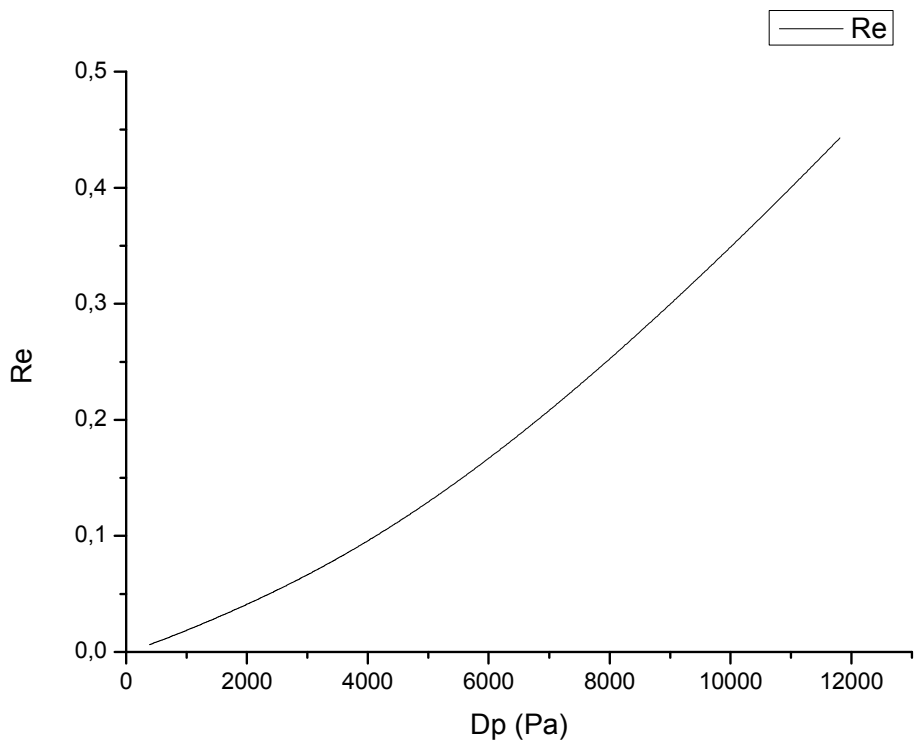
Σχήμα 4.6.a. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



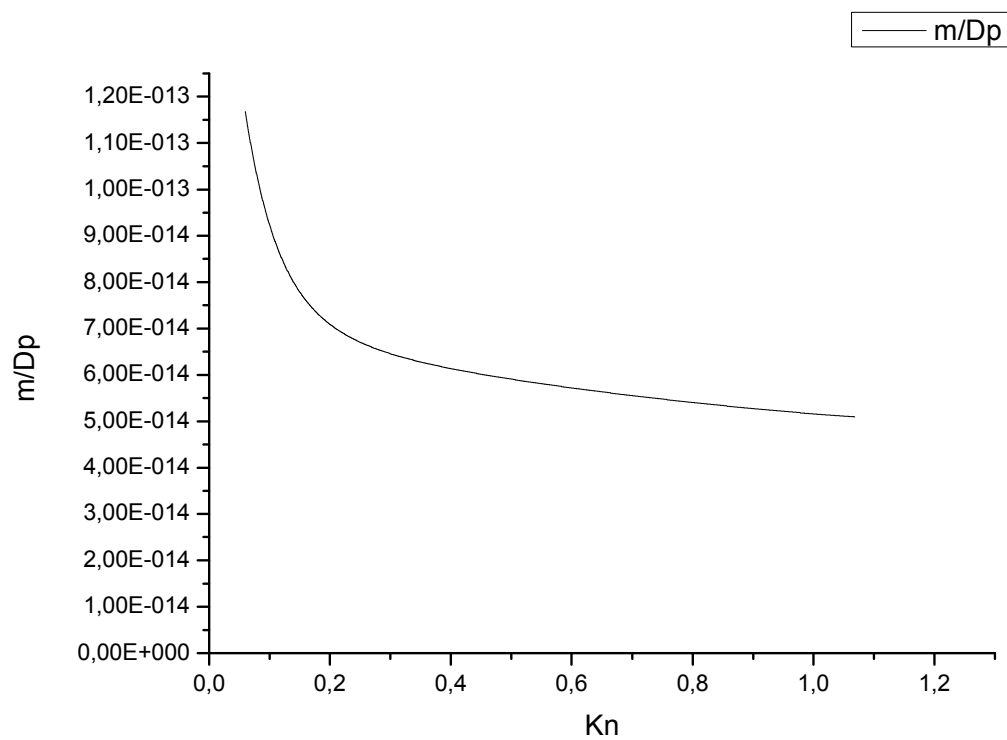
Σχήμα 4.6.a. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.6.α. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



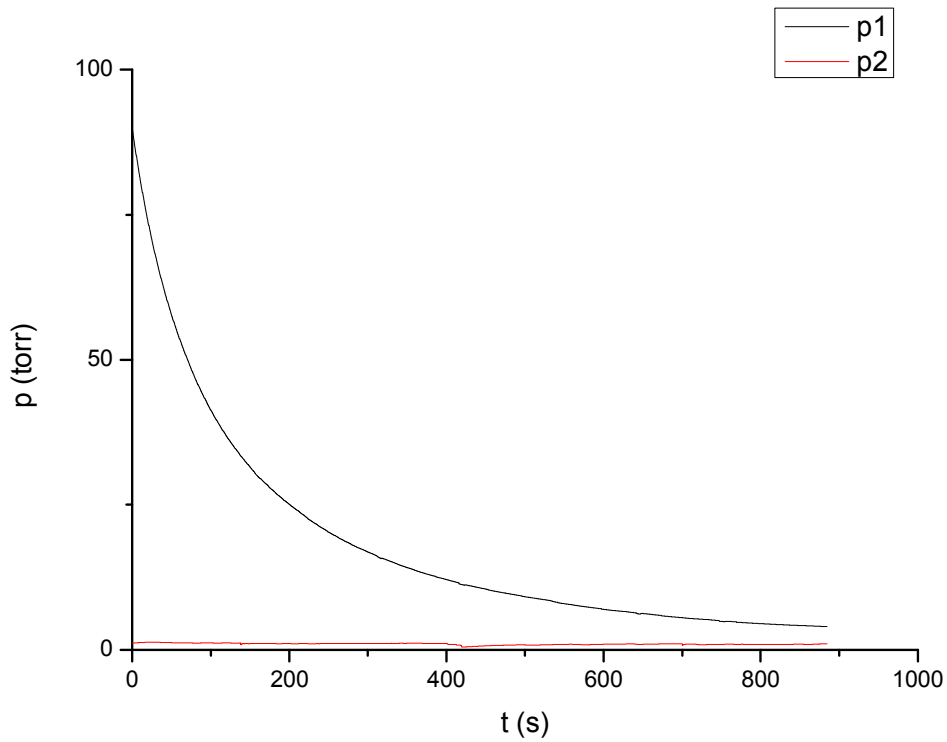
Σχήμα 4.6.α. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



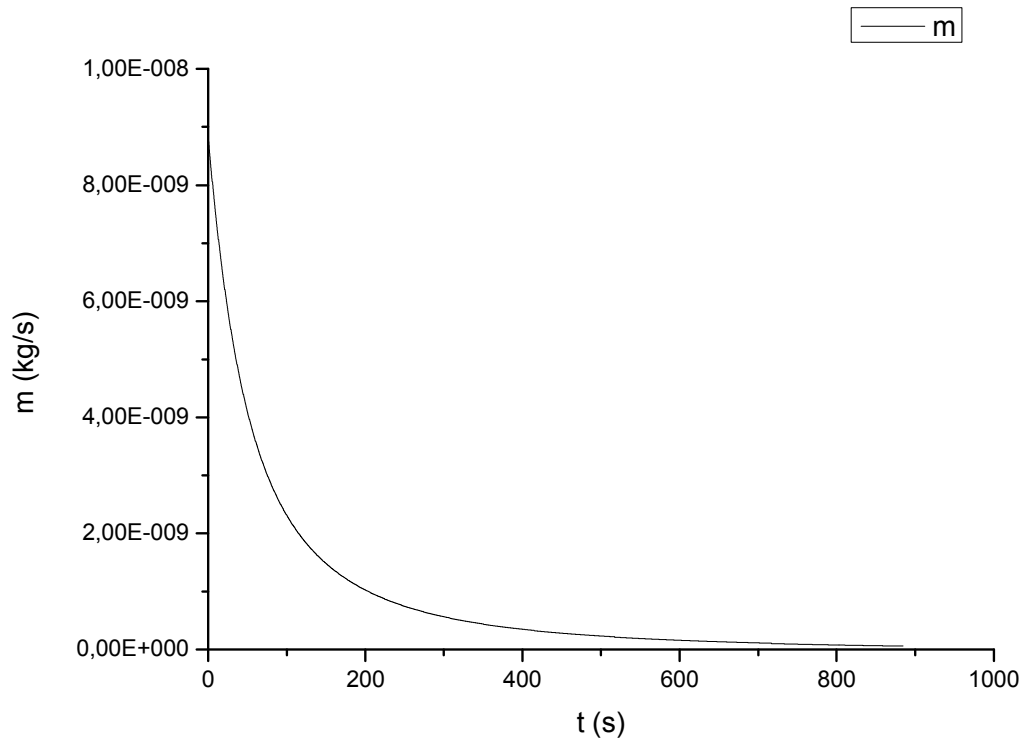
Σχήμα 4.6.α. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.6.b: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 4 πλάτους 282,35 μm , ύψους 29,91 μm , εργαζόμενο μέσο Ar

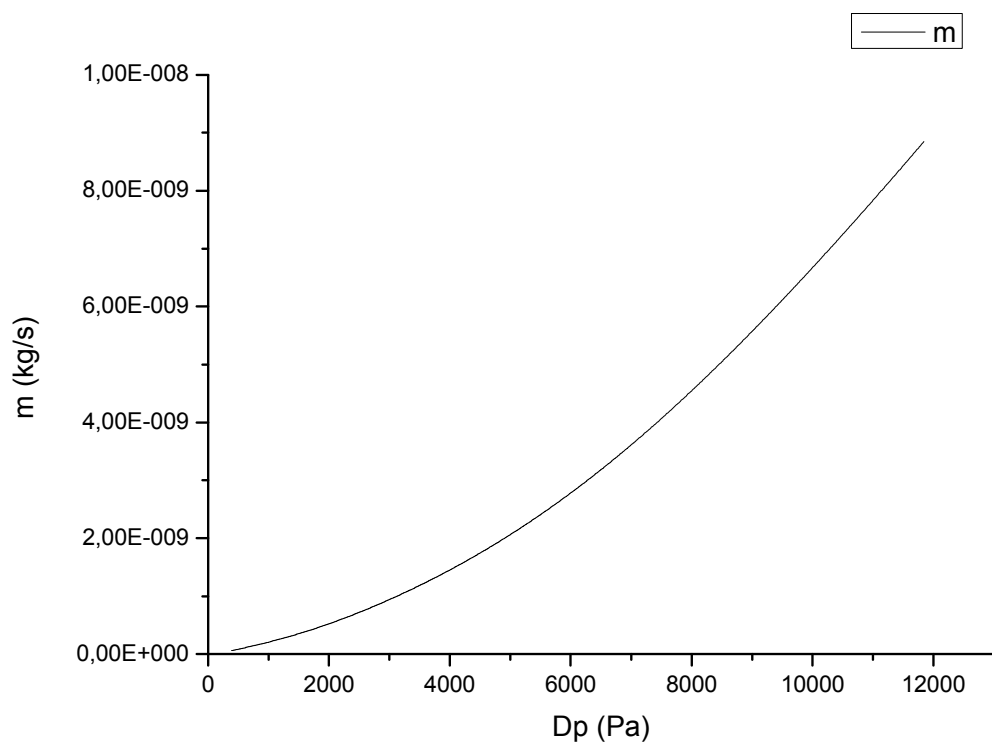
Μικροκανάλι: 55-0045-02 Nr4, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 282,35 \mu\text{m} \times 29,91 \mu\text{m}$
Αέριο: Ar $R=208$, $\mu=2,26 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



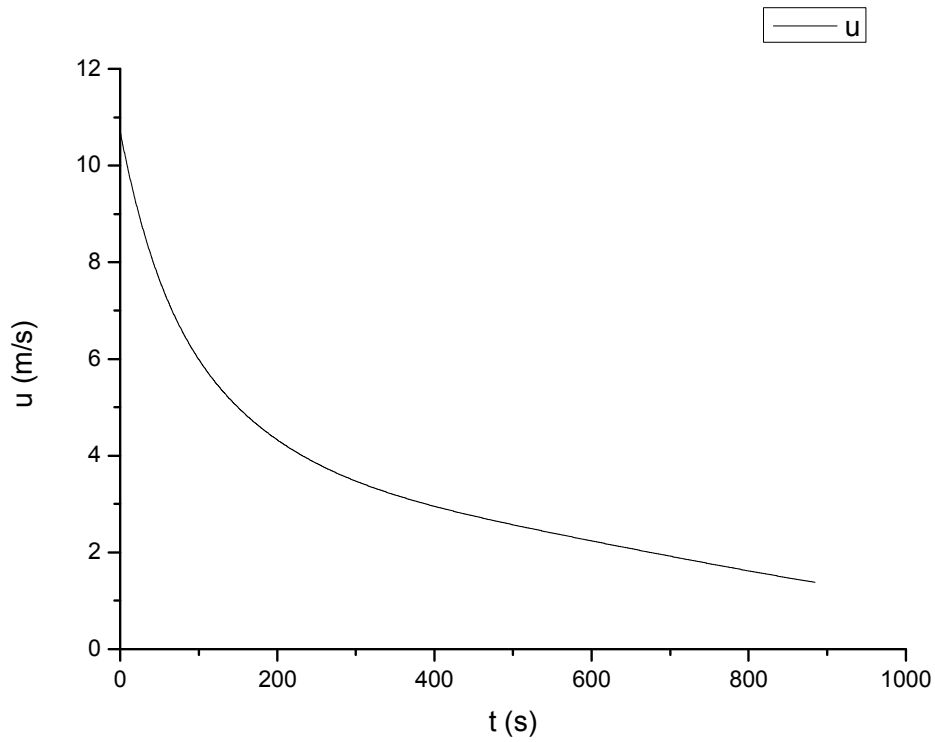
Σχήμα 4.6.b. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



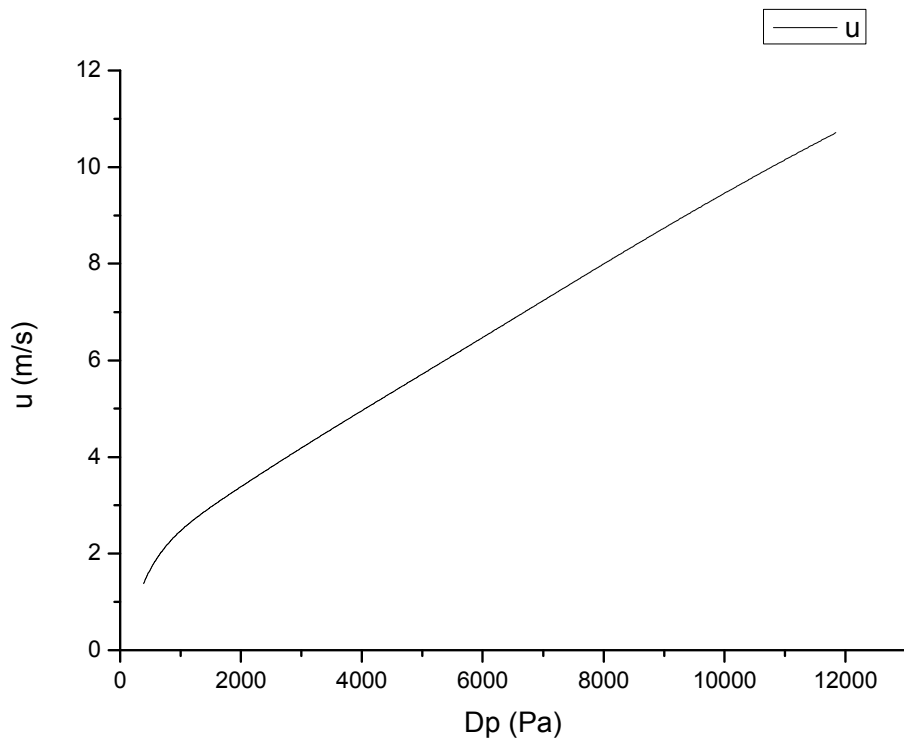
Σχήμα 4.6.b. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



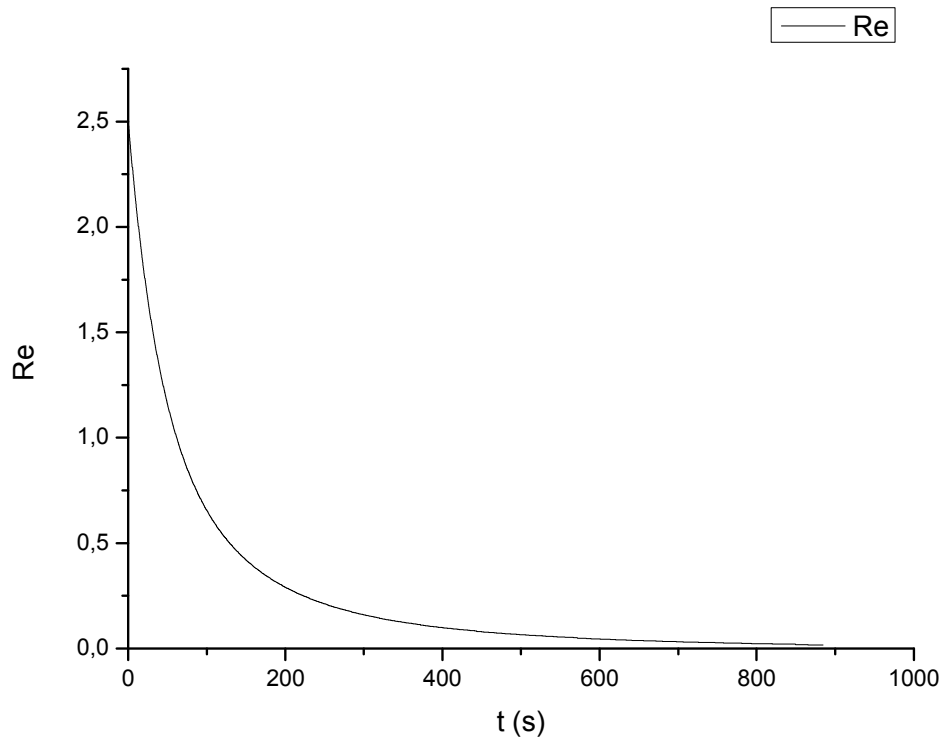
Σχήμα 4.6.b. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



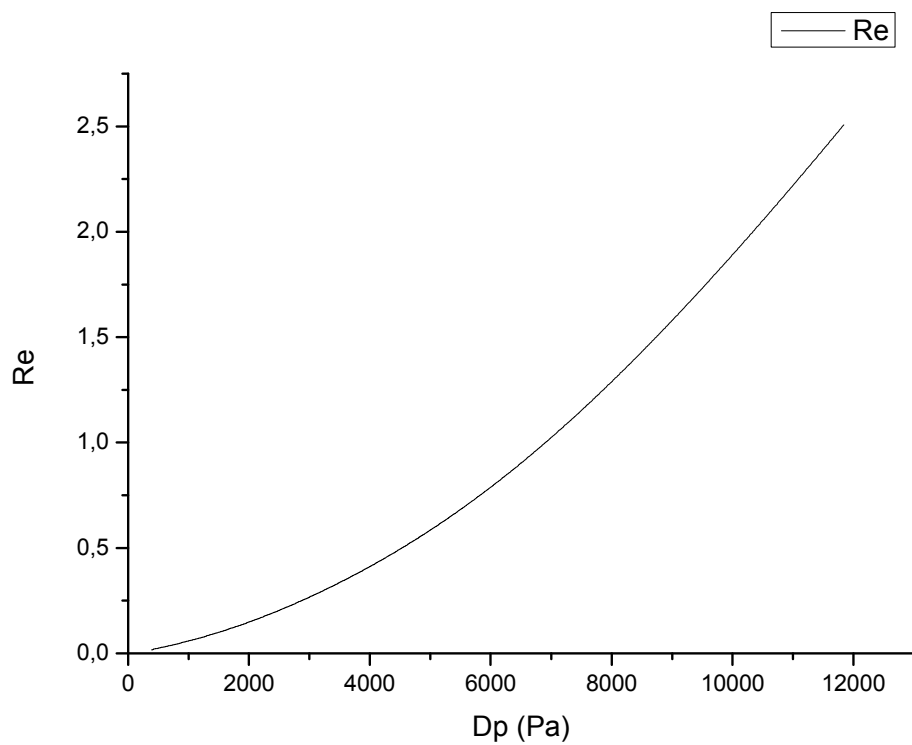
Σχήμα 4.6.b. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



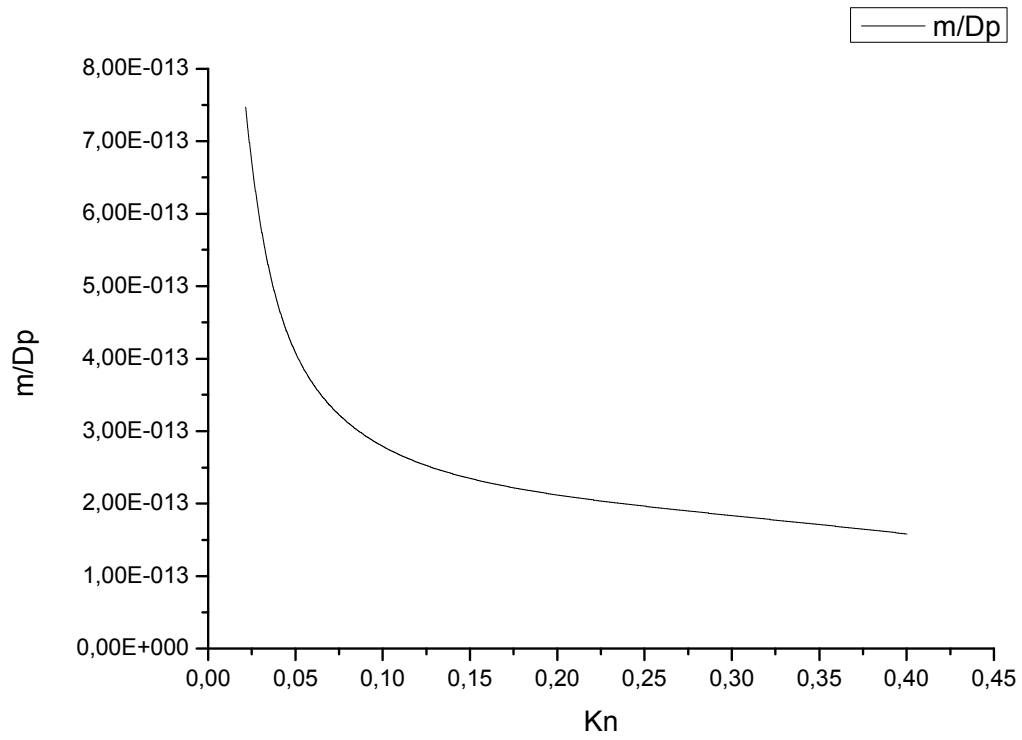
Σχήμα 4.6.b. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.6.b. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



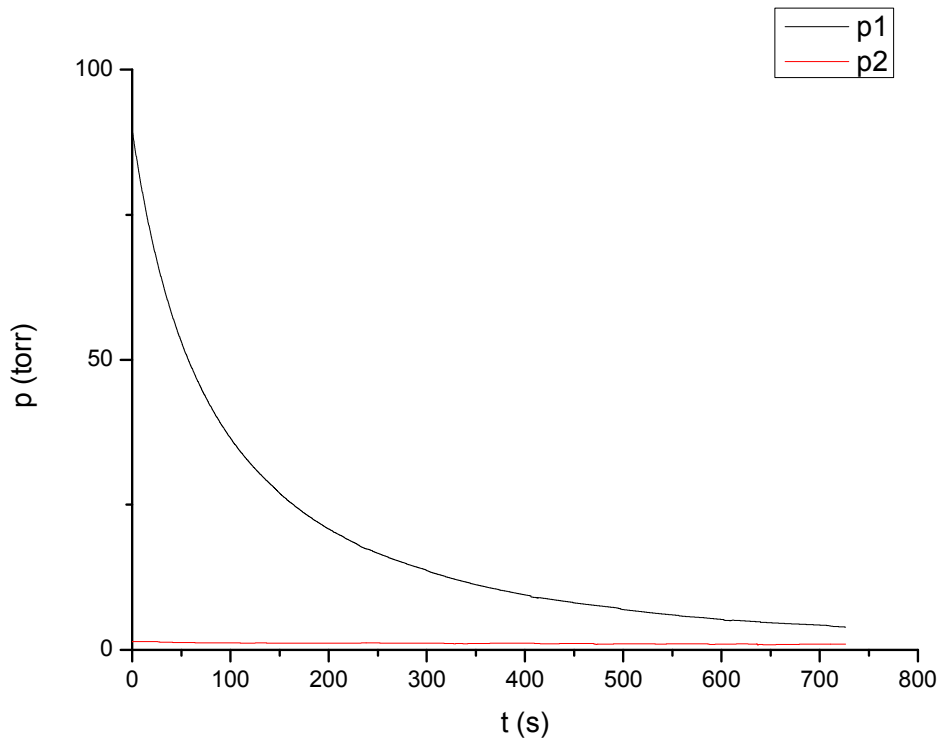
Σχήμα 4.6.b. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



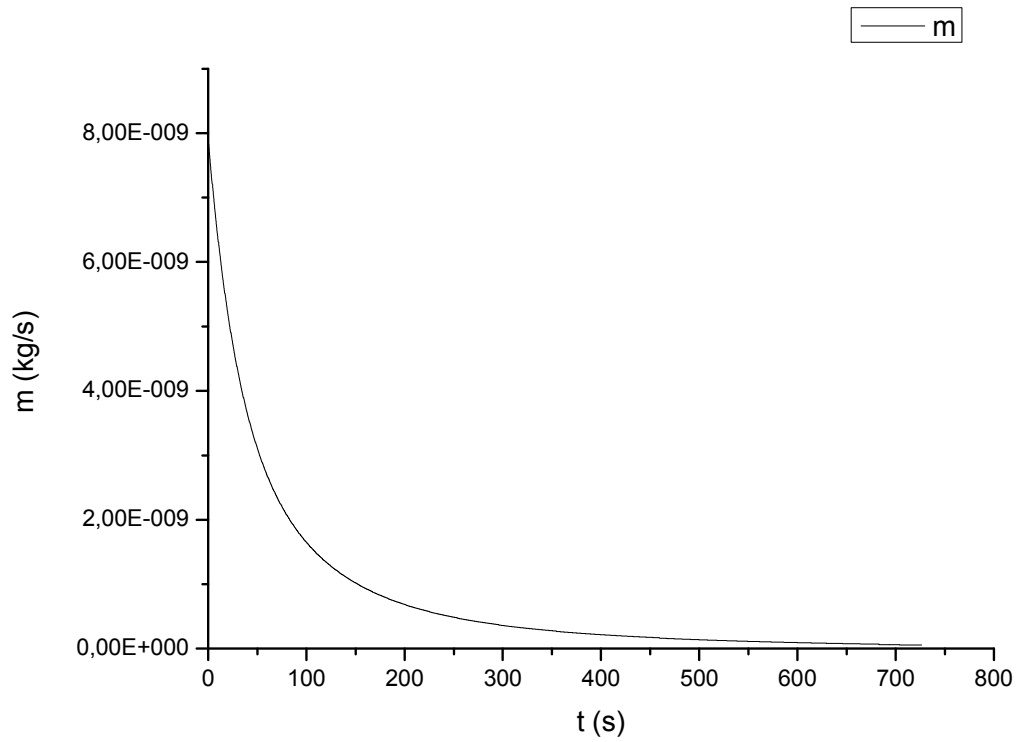
Σχήμα 4.6.b. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

4.6.c: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr 4 πλάτους 282,35 μm , ύψους 29,91 μm , εργαζόμενο μέσο Αέρας

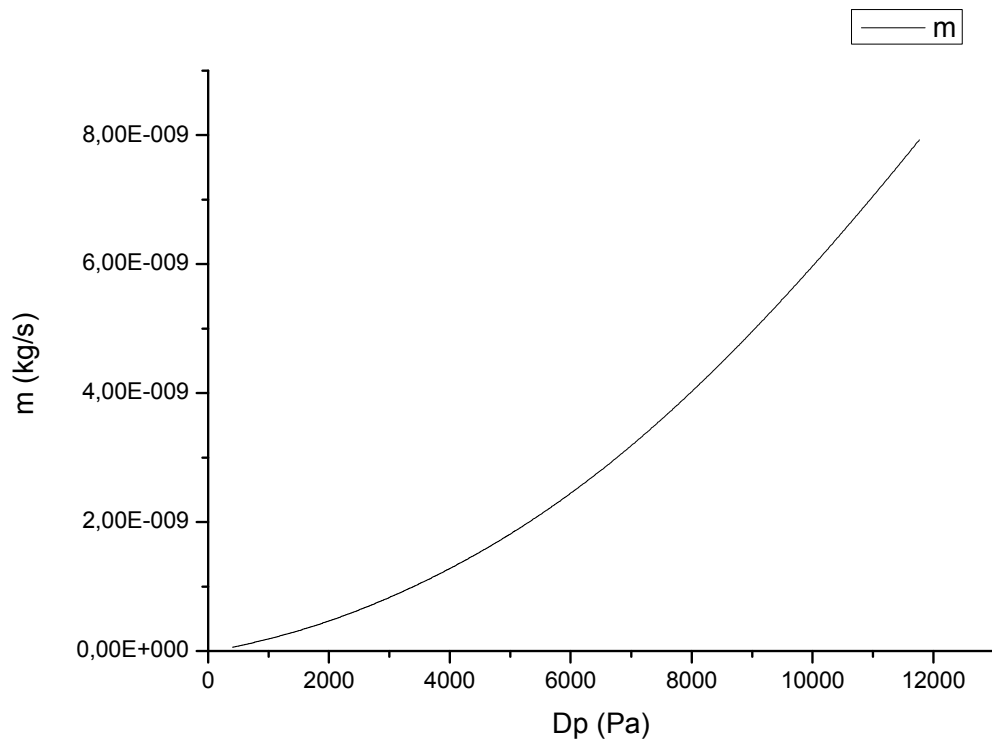
Μικροκανάλι: 55-0045-02 Nr4, εμβαδόν διατομής $A=bxh= 282,35 \mu\text{m} \times 29,91 \mu\text{m}$
Αέριο: Αέρας $R=287$, $\mu=1,82 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ για $T=298\text{K}$



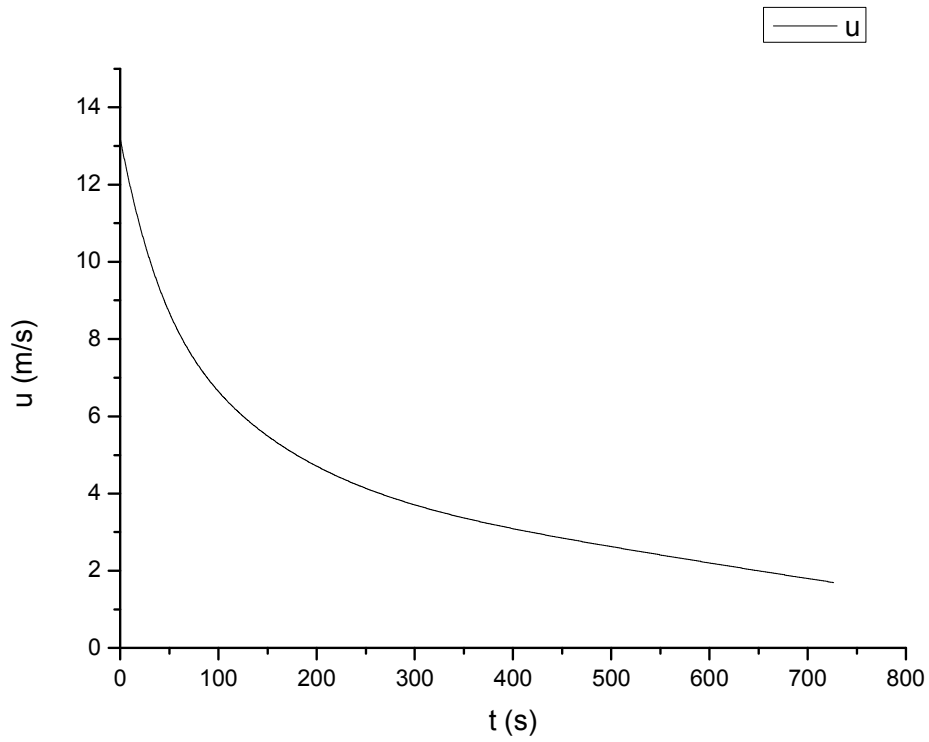
Σχήμα 4.6.c. 1: Πίεση των δεξαμενών συναρτήσει χρόνου



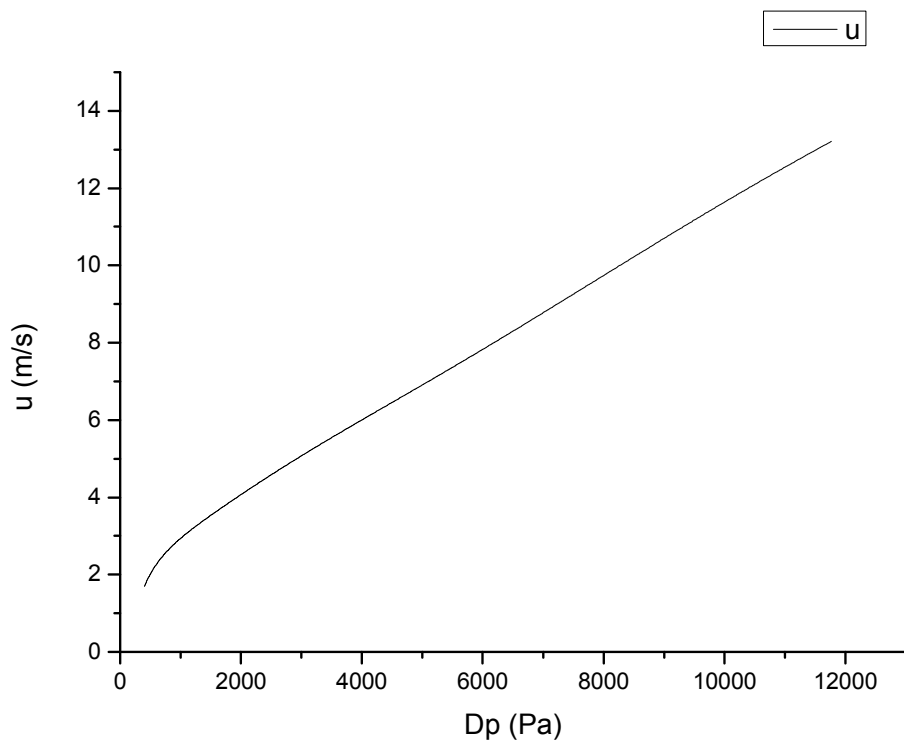
Σχήμα 4.6.ε. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου



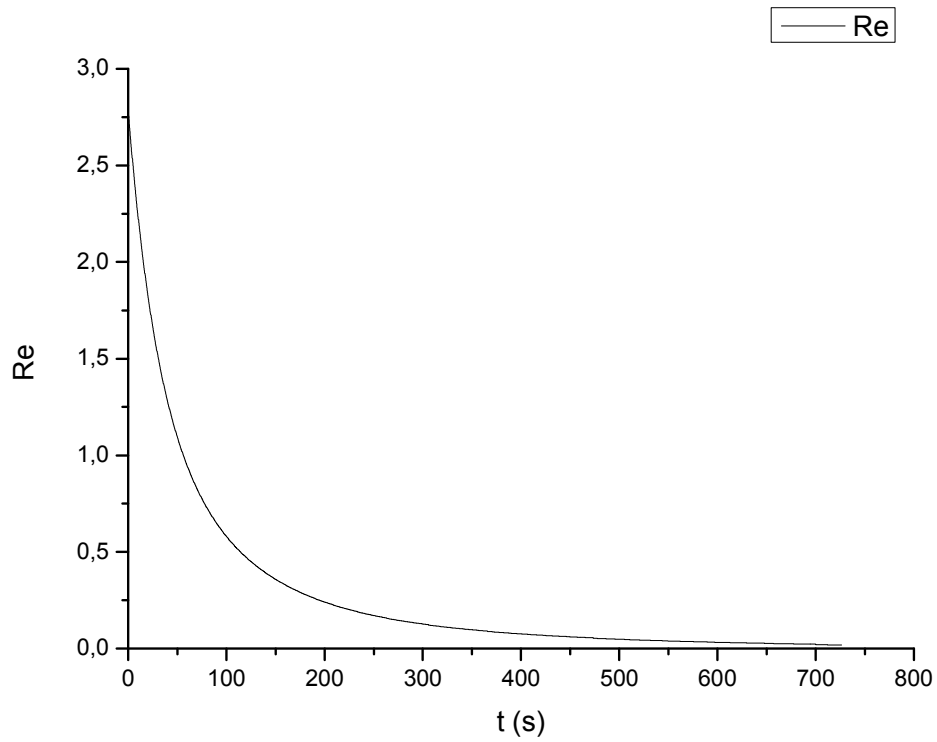
Σχήμα 4.6.ε. 3: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



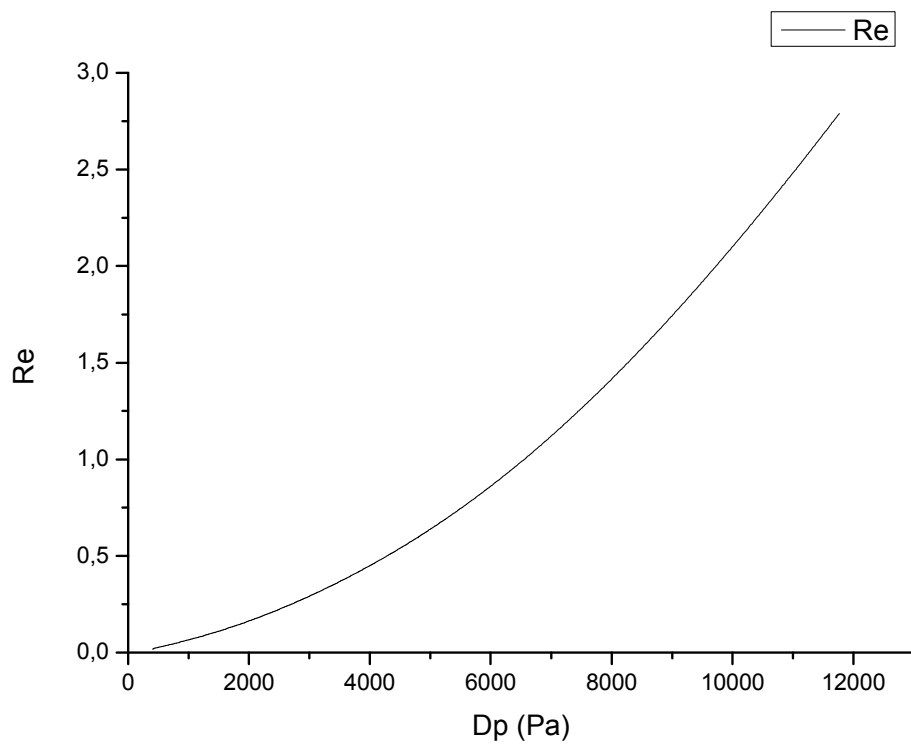
Σχήμα 4.6.c. 4: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



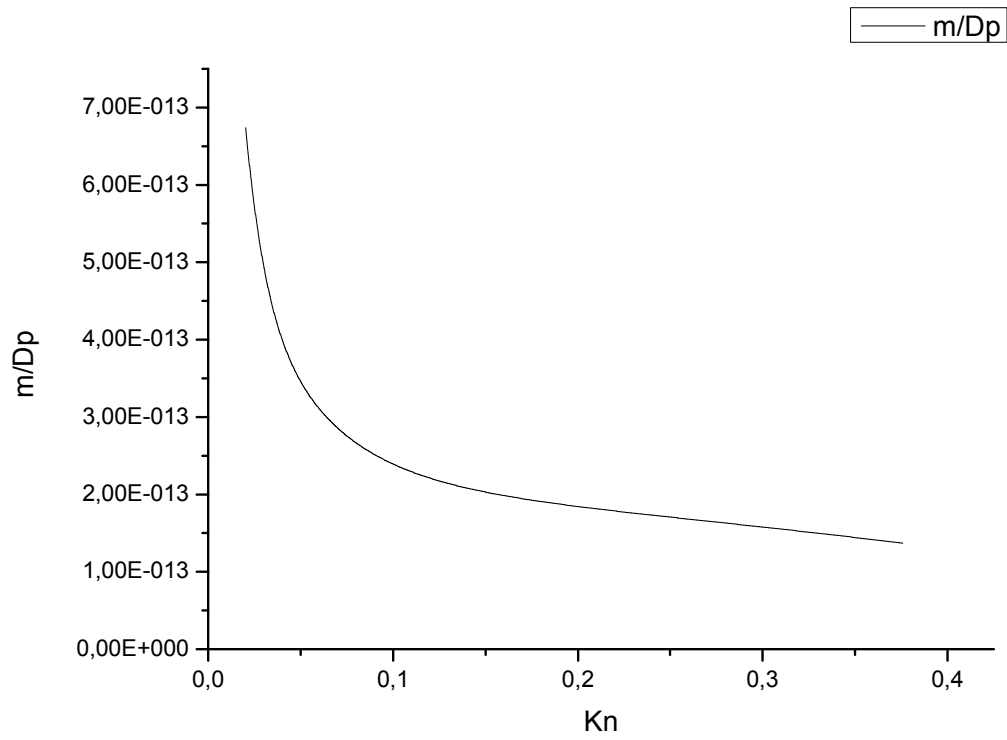
Σχήμα 4.6.c. 5: Μέση ταχύτητα του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



Σχήμα 4.6.ε. 6: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει χρόνου



Σχήμα 4.6.ε. 7: Αριθμός Reynolds του αερίου στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



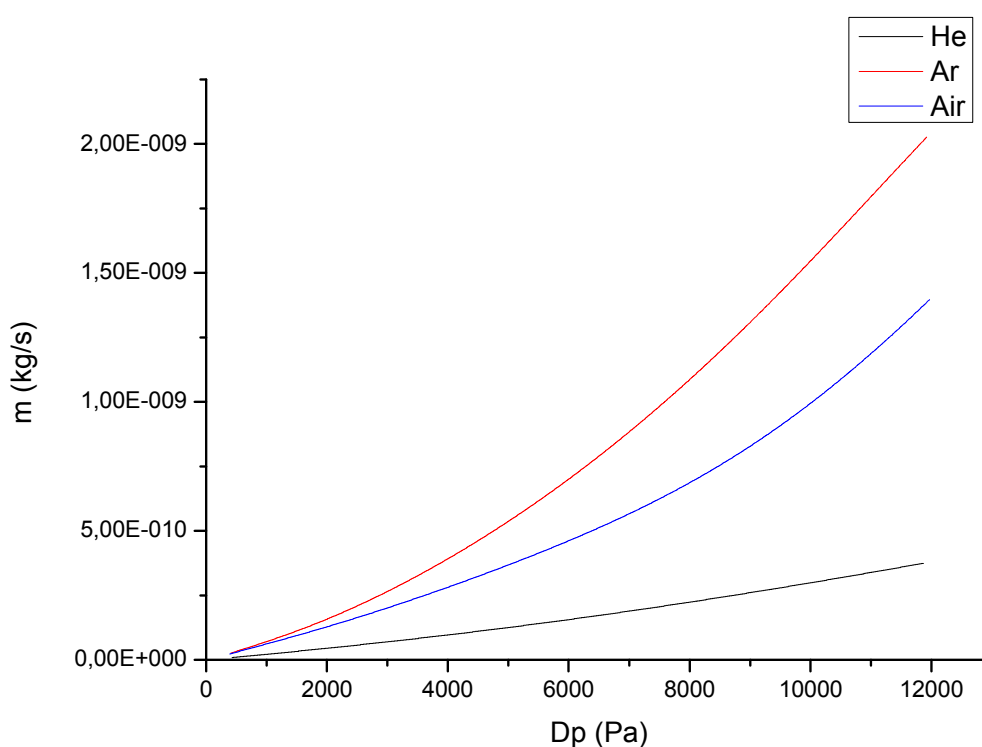
Σχήμα 4.6.c. 8: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ

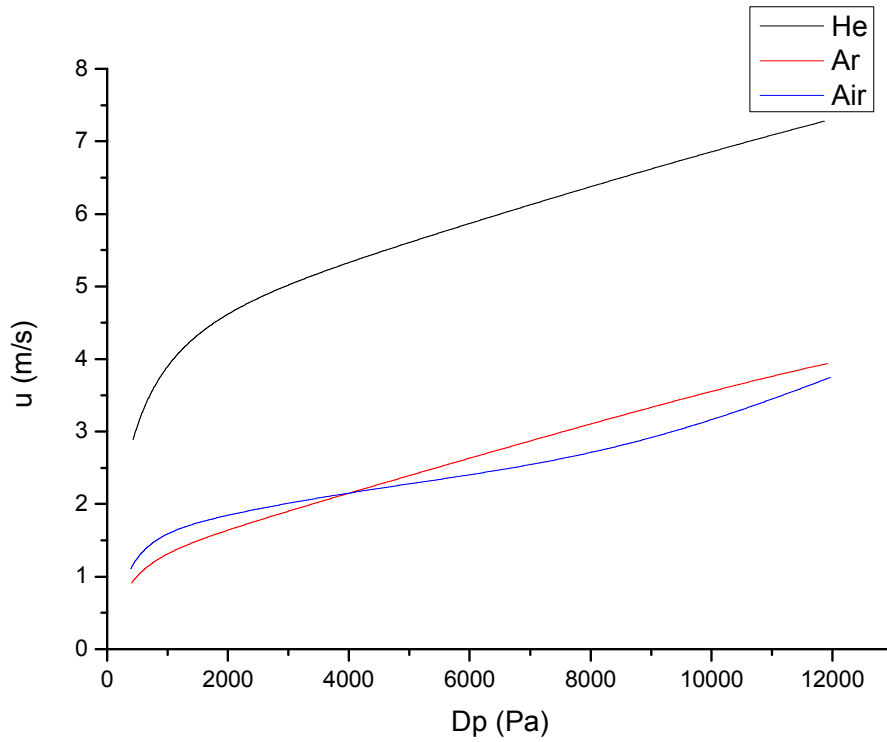
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα πειραματικά αποτελέσματα συγκεντρωμένα με σκοπό να γίνουν συγκρίσεις. Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει διαγράμματα και για τα 3 αέρια στο ίδιο σχήμα για κάθε μικροκανάλι και το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει διαγράμματα με τις τριάδες των καναλιών που έχουν παρόμοιες διαστάσεις για κάθε αέριο.

5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το κάθε μικροκανάλι

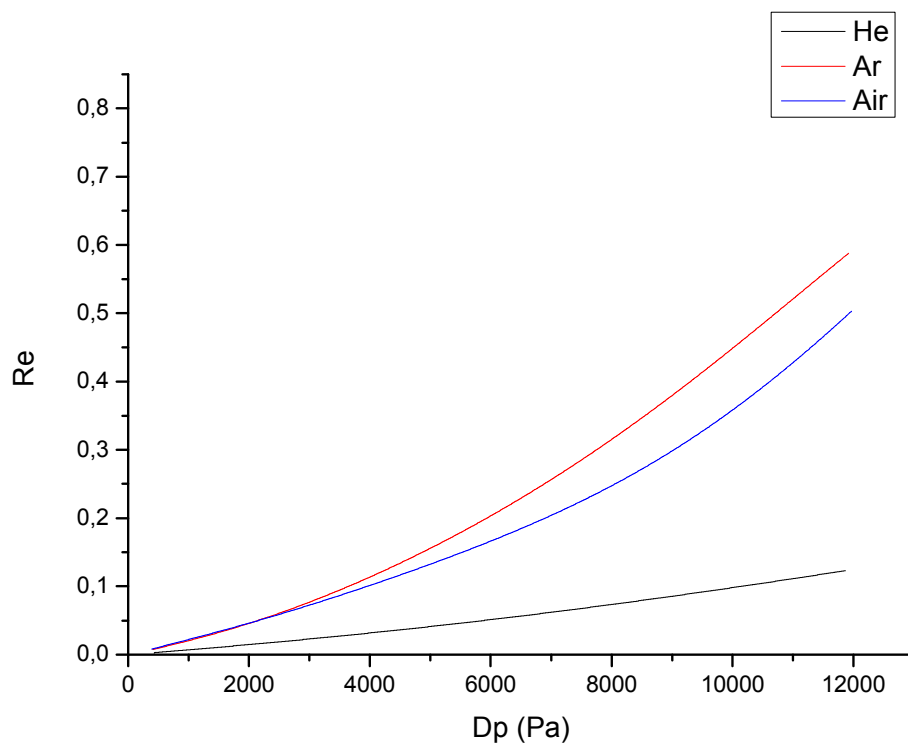
5.1.1: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr4 πλάτους 286,78μm, ύψους 18,27 μm



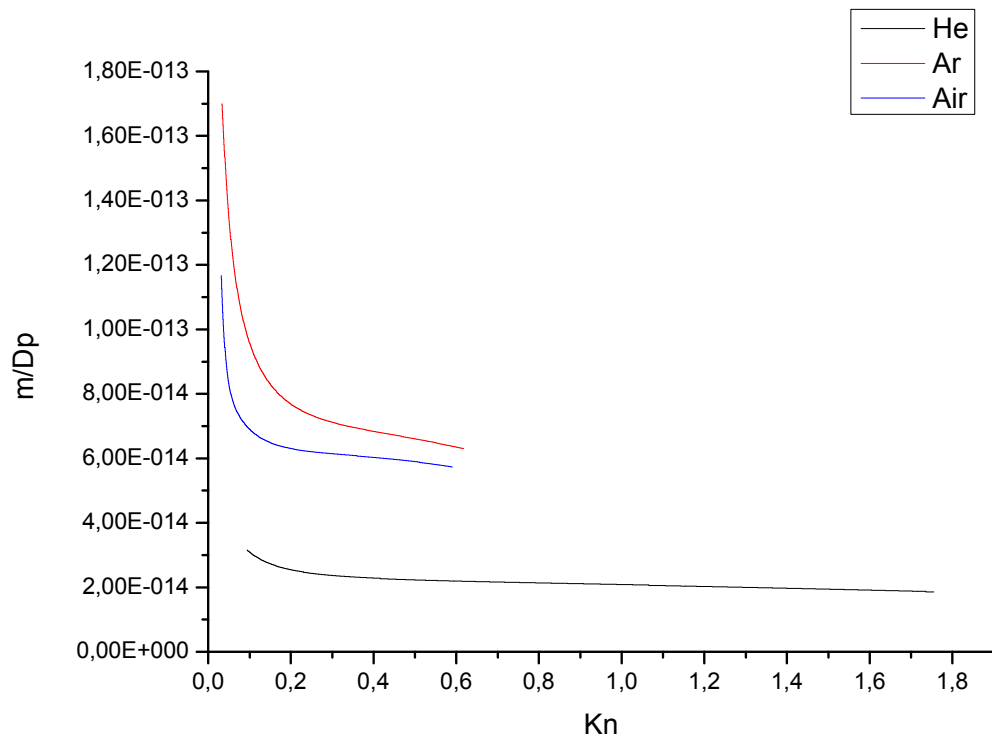
Σχήμα 5.1.1. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσεως της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για ήλιο, αργόν και αέρα



Σχήμα 5.1.1. 2: Μέση ταχύτητα των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

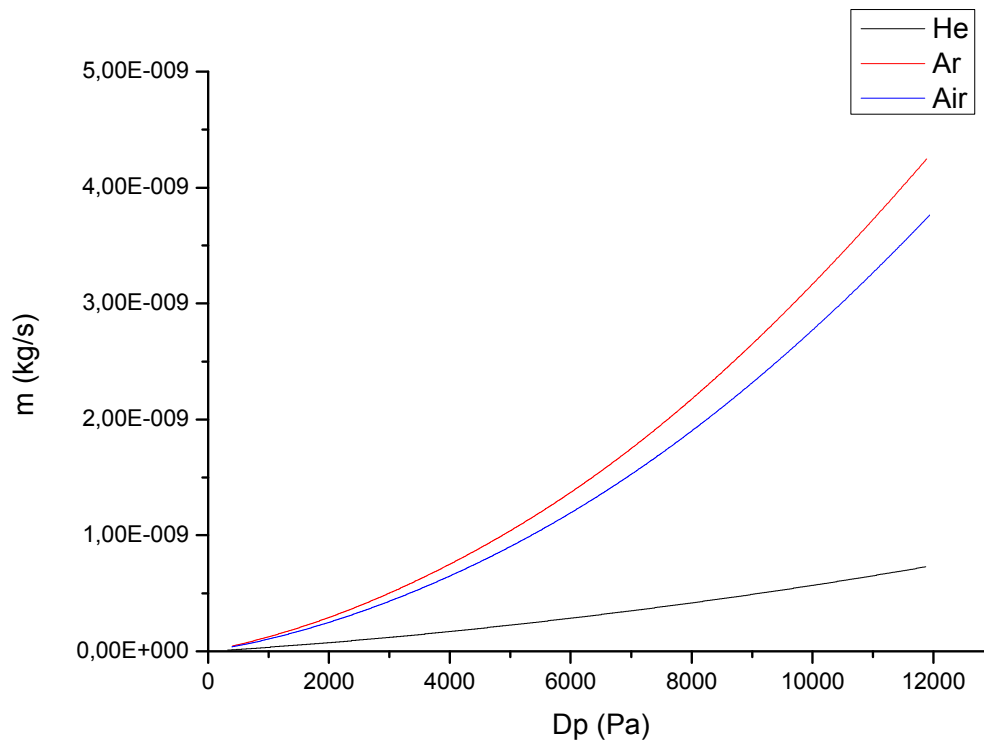


Σχήμα 5.1.1. 3: Αριθμός Reynolds των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

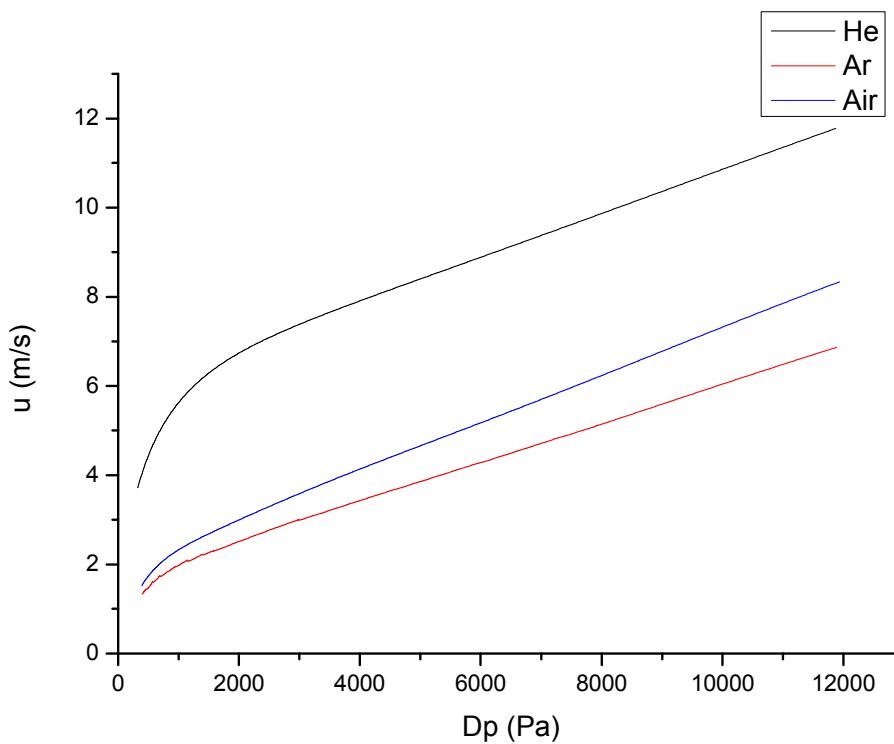


Σχήμα 5.1.1. 4: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για ήλιο, αργόν και αέρα

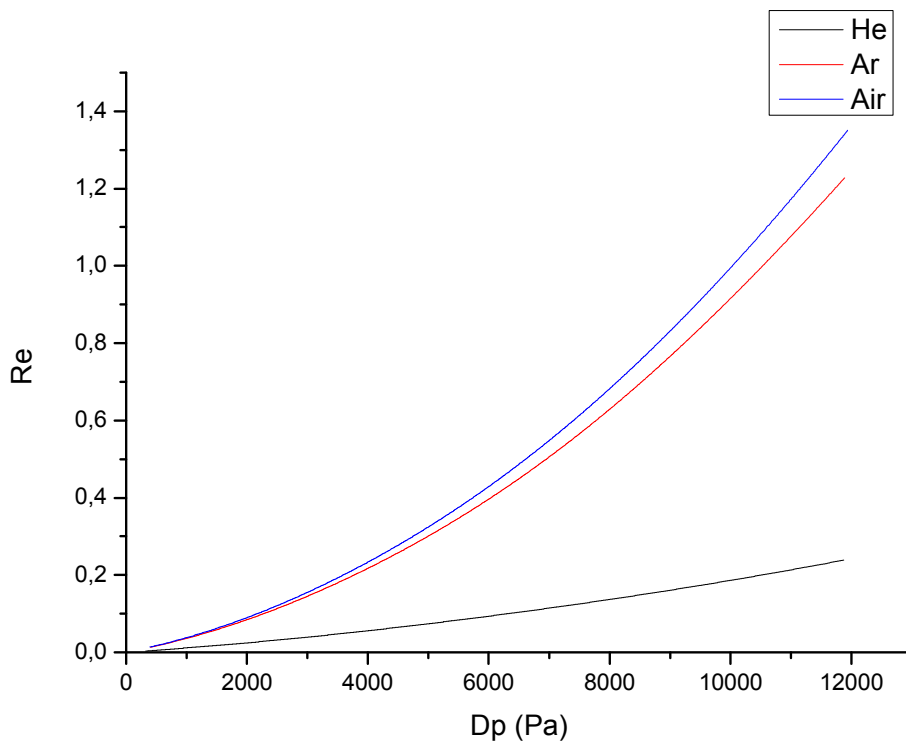
5.1.2: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr1 πλάτους 283,91 μm , ύψους 22,17 μm



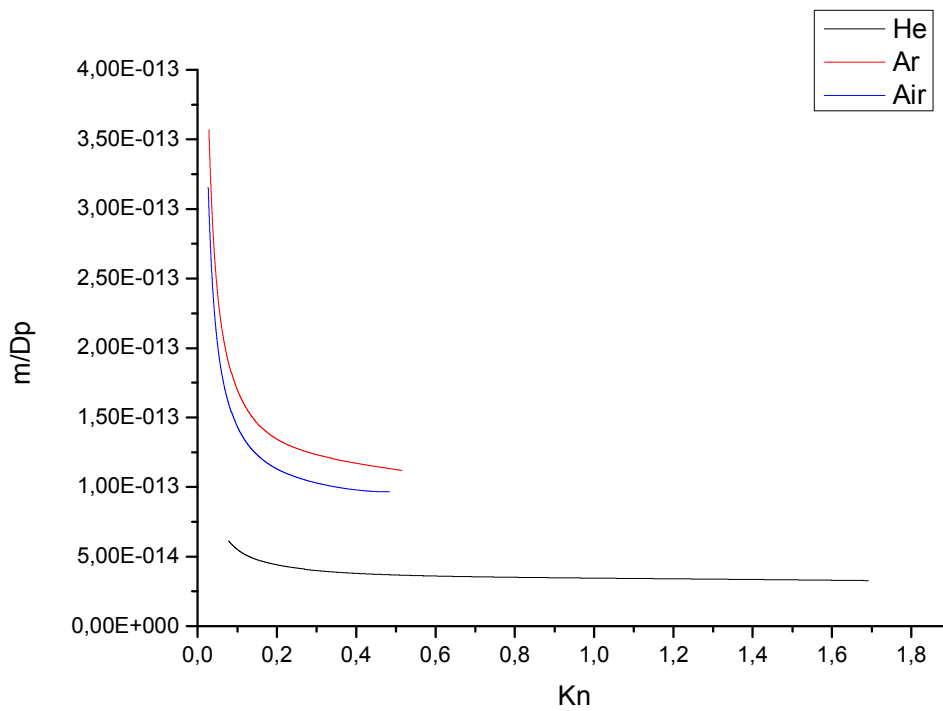
Σχήμα 5.1.2. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσεως της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για ήλιο, αργόν και αέρα



Σχήμα 5.1.2. 2: Μέση ταχύτητα των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσεως της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

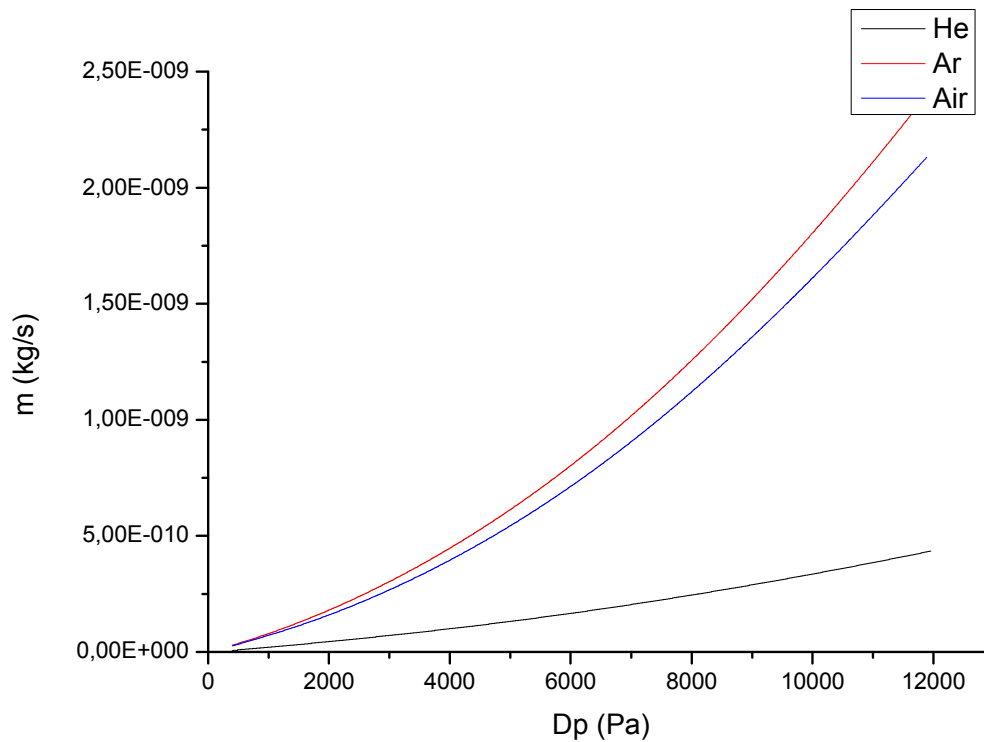


Σχήμα 5.1.2. 3: Αριθμός Reynolds των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

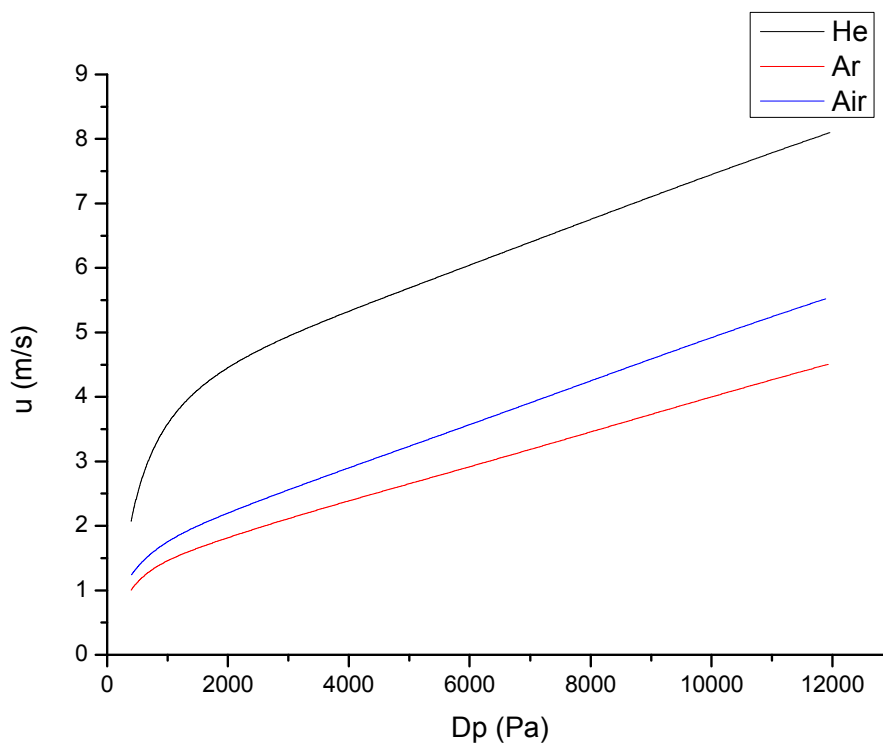


Σχήμα 5.1.2. 4: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για ήλιο, αργόν και αέρα

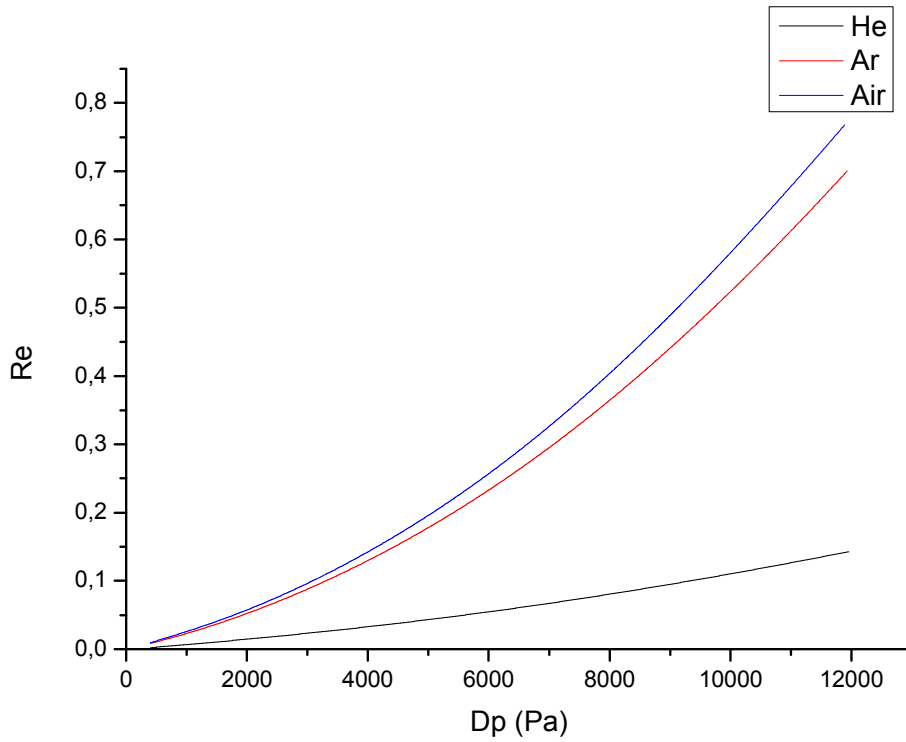
5.1.3: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-01 Nr2 πλάτους 285,85 μm , ύψους 19,03 μm



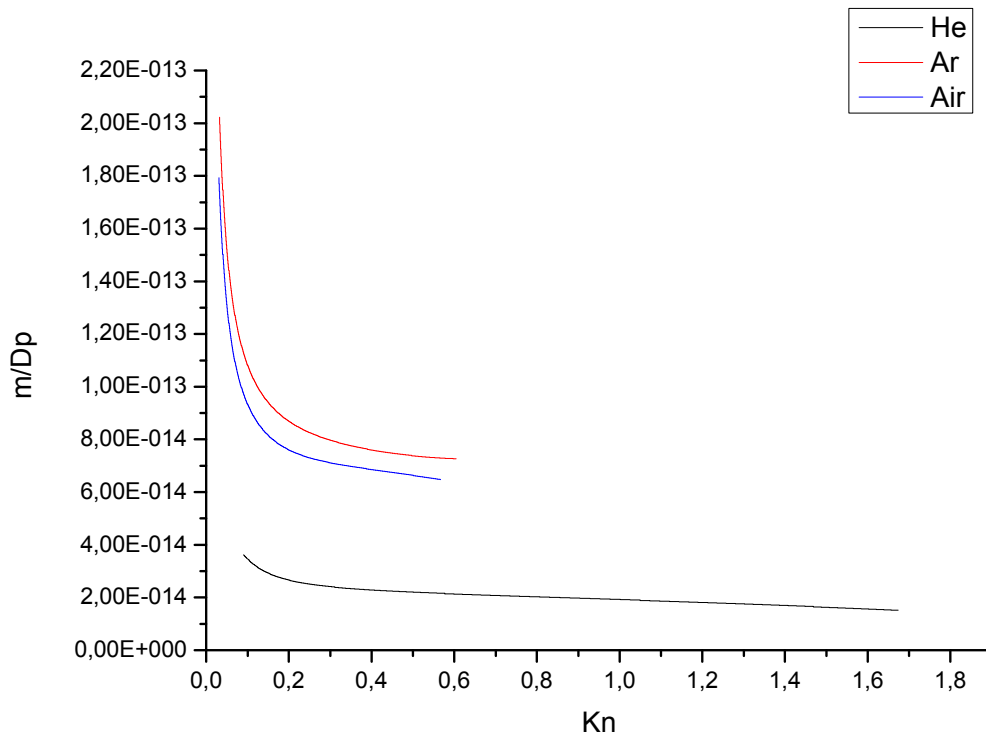
Σχήμα 5.1.3. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για ήλιο, αργόν και αέρα



Σχήμα 5.1.3. 2: Μέση ταχύτητα των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

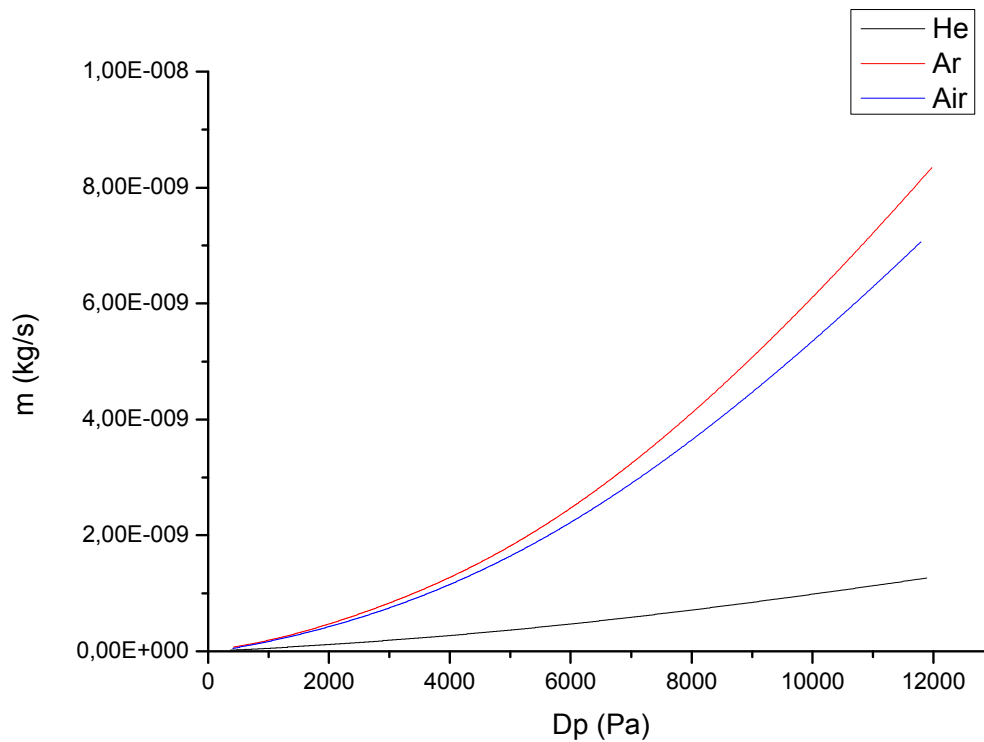


Σχήμα 5.1.3. 3: Αριθμός Reynolds των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

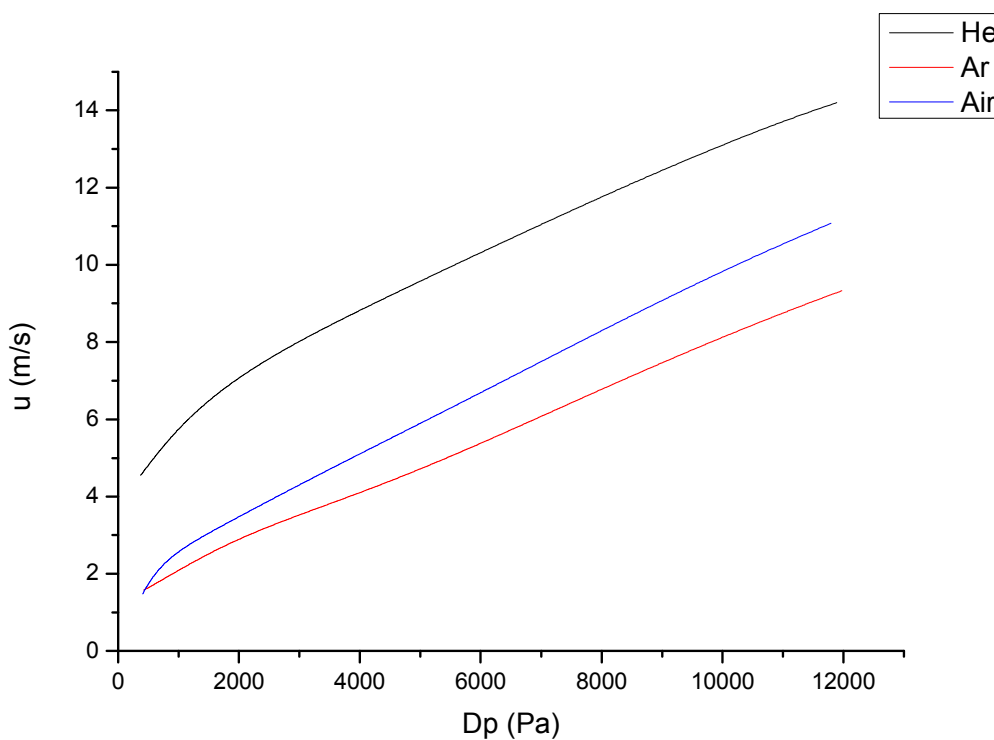


Σχήμα 5.1.3. 4: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για ήλιο, αργόν και αέρα

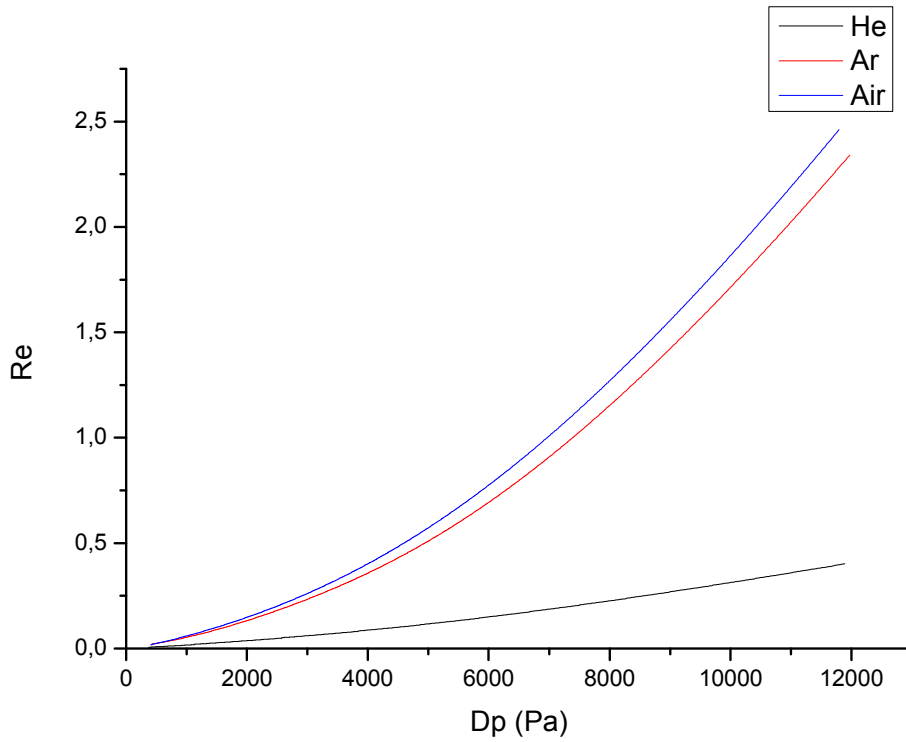
5.1.4: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr2 πλάτους 283,88 μm , ύψους 31,72 μm



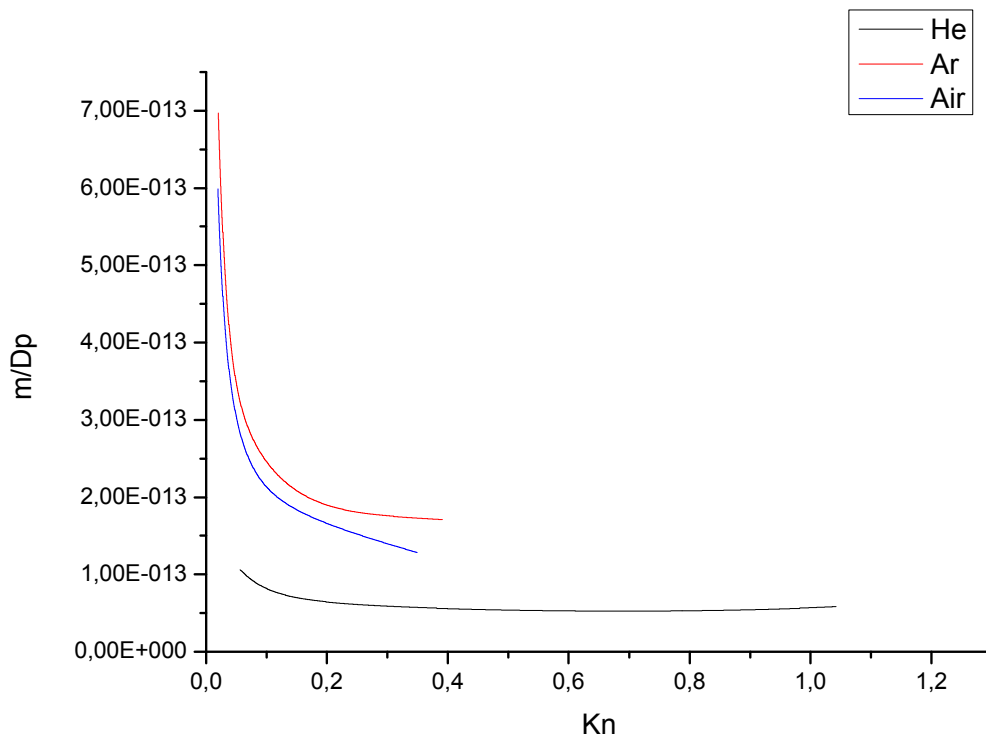
Σχήμα 5.1.4. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για ήλιο, αργόν και αέρα



Σχήμα 5.1.4. 2: Μέση ταχύτητα των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

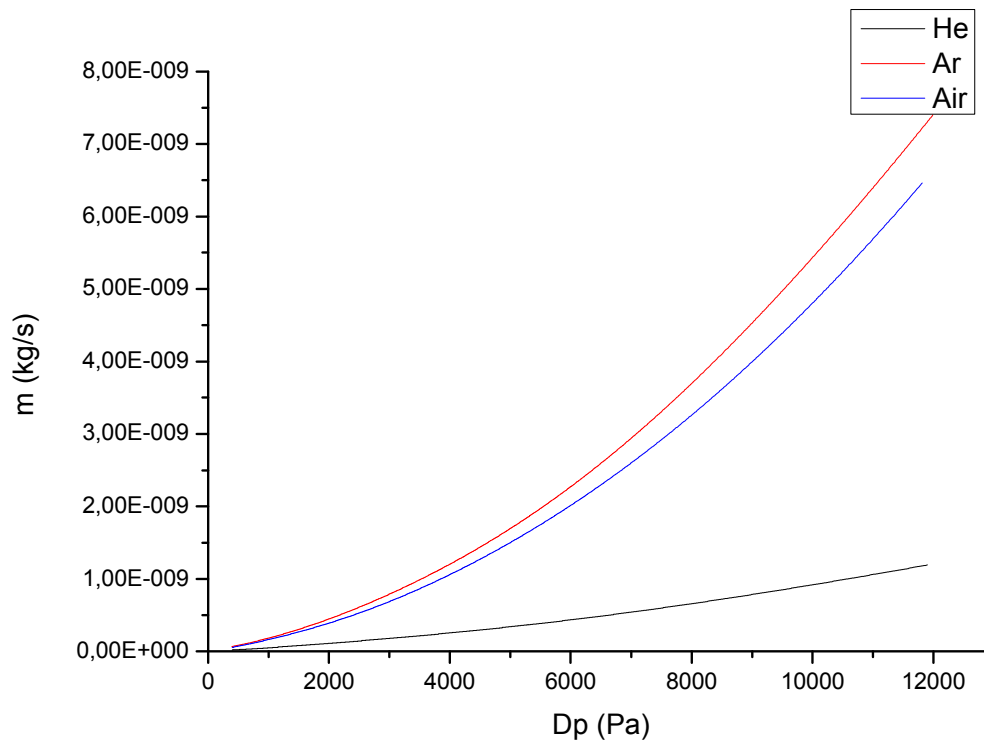


Σχήμα 5.1.4. 3: Αριθμός Reynolds των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

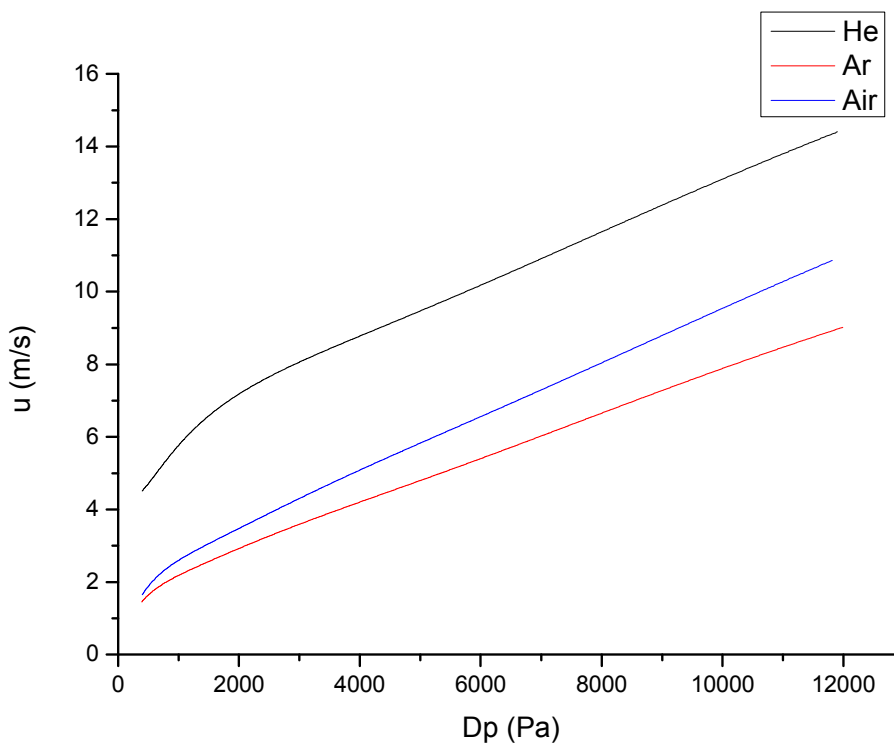


Σχήμα 5.1.4. 4: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για ήλιο, αργόν και αέρα

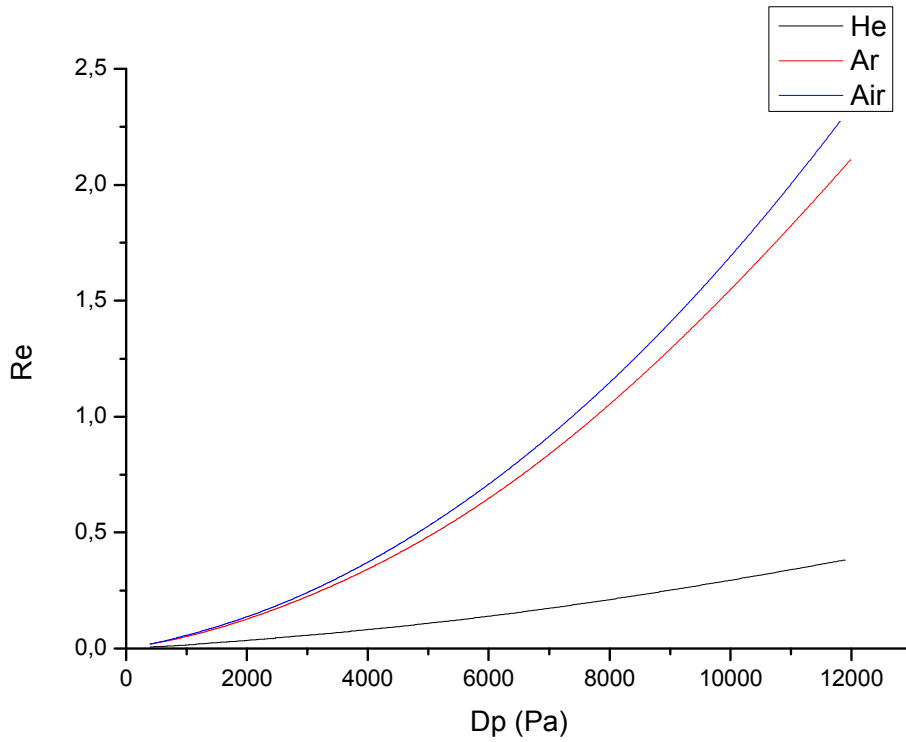
5.1.5: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr3 πλάτους 282,55 μm , ύψους 29,63 μm



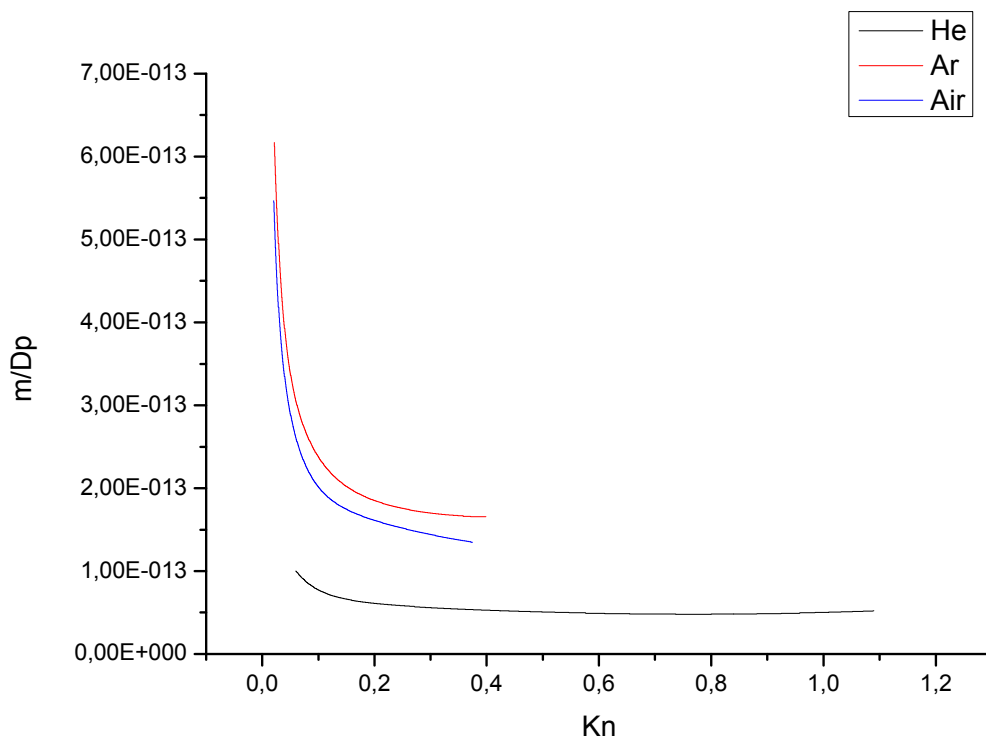
Σχήμα 5.1.5. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για ήλιο, αργόν και αέρα



Σχήμα 5.1.5. 2: Μέση ταχύτητα των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

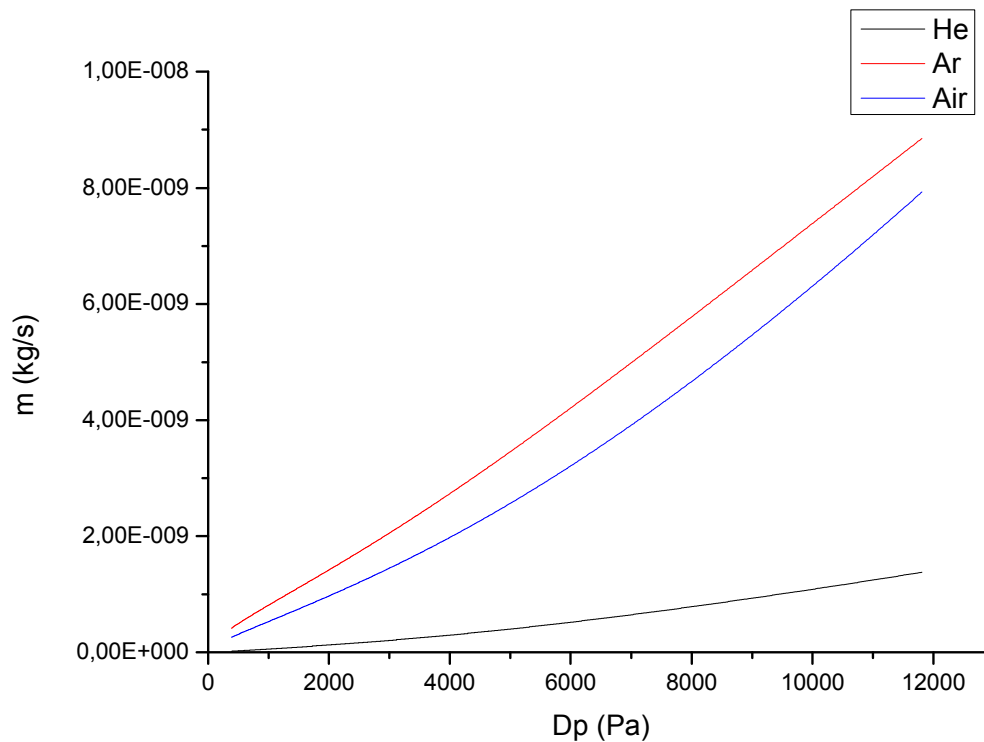


Σχήμα 5.1.5. 3: Αριθμός Reynolds των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών

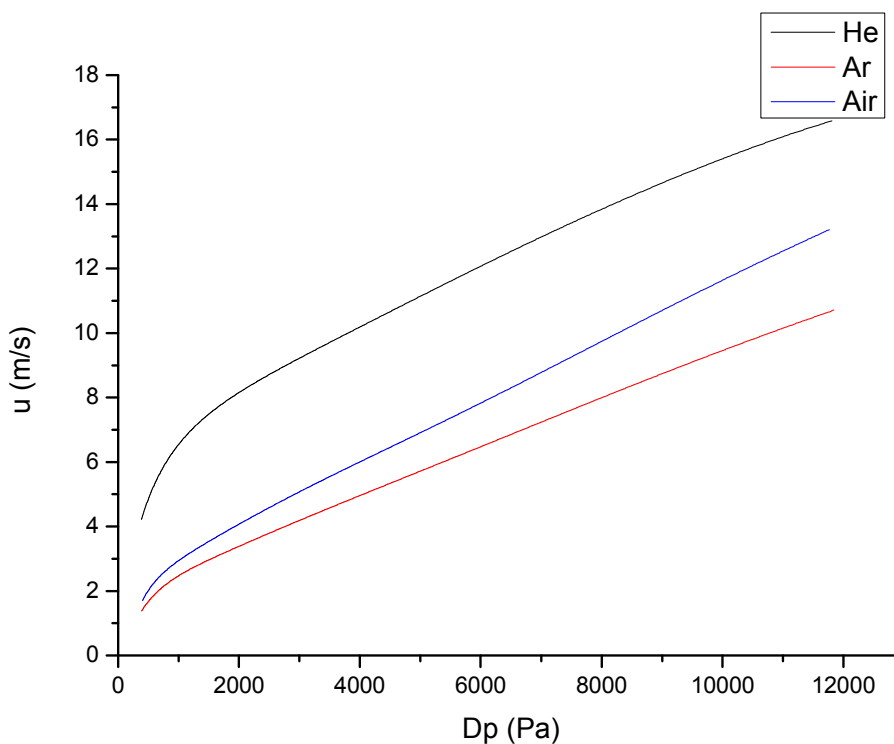


Σχήμα 5.1.5. 4: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για ήλιο, αργόν και αέρα

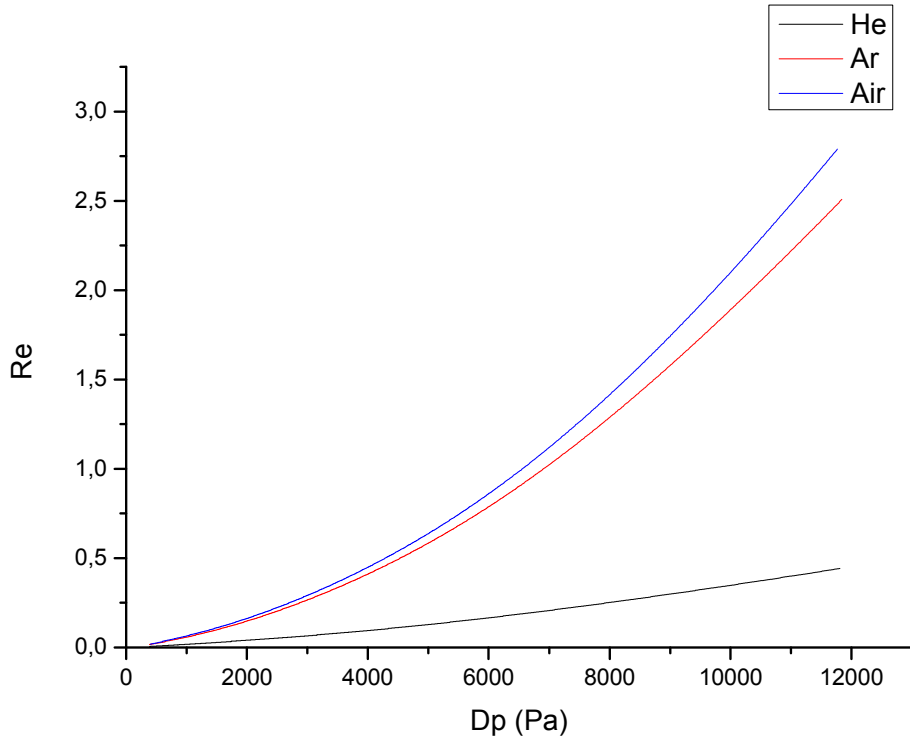
5.1.6: Διάταξη μικροκαναλιών 55-0045-02 Nr4 πλάτους 282,35 μm , ύψους 29,91 μm



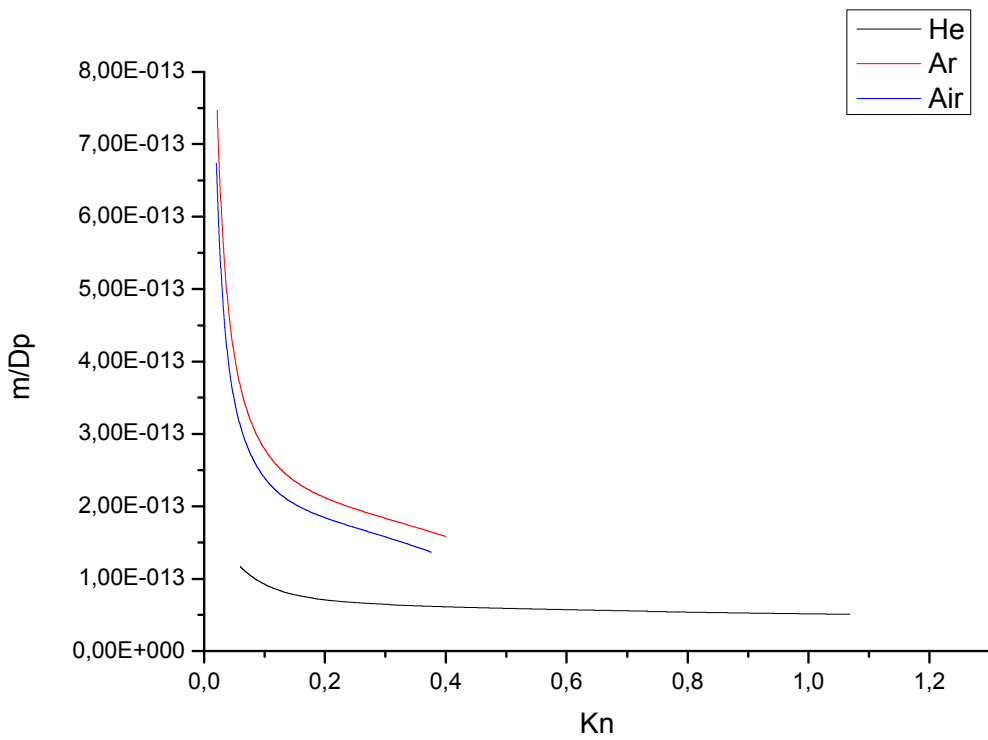
Σχήμα 5.1.6. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για ήλιο, αργόν και αέρα



Σχήμα 5.1.6. 2: Μέση ταχύτητα των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



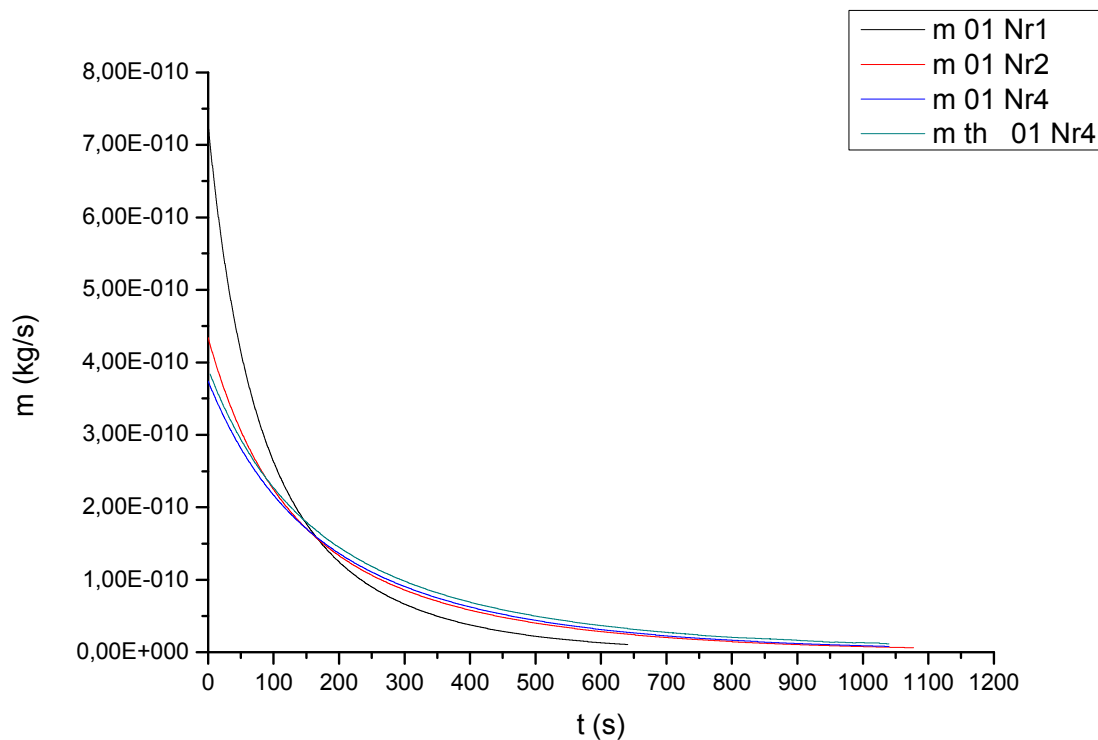
Σχήμα 5.1.6. 3: Αριθμός Reynolds των αερίων στο μικροκανάλι συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών



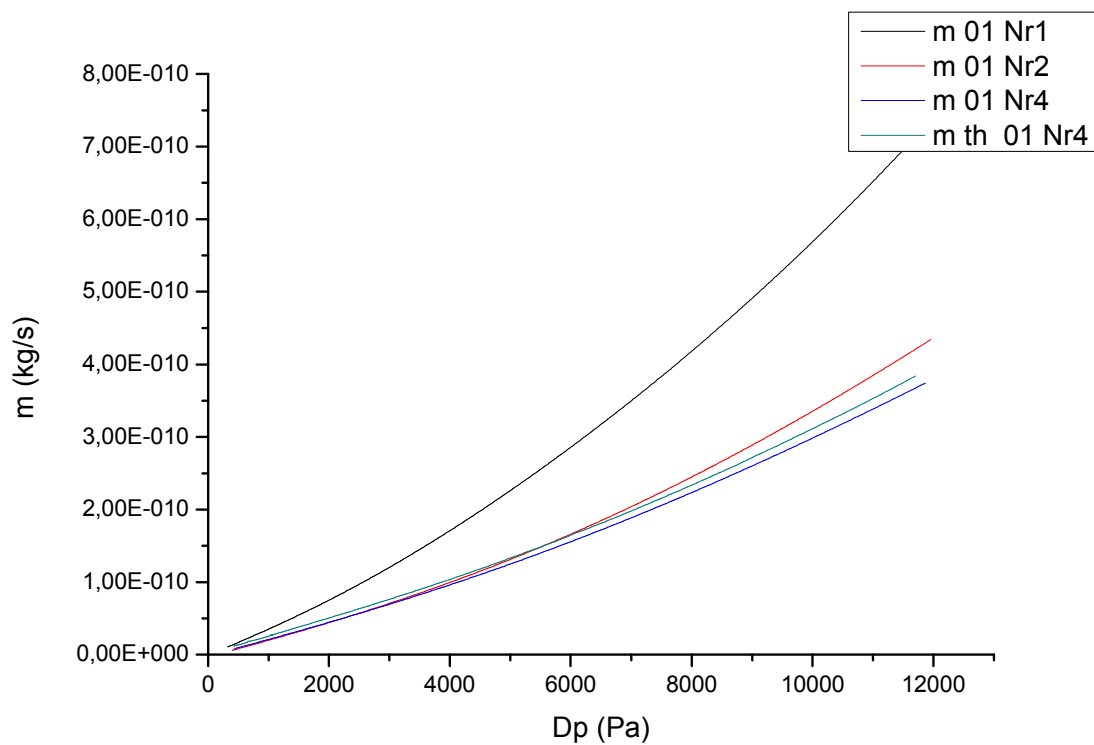
Σχήμα 5.1.6. 4: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για ήλιο, αργόν και αέρα

5.2: Σύγκριση των μικροκαναλιών

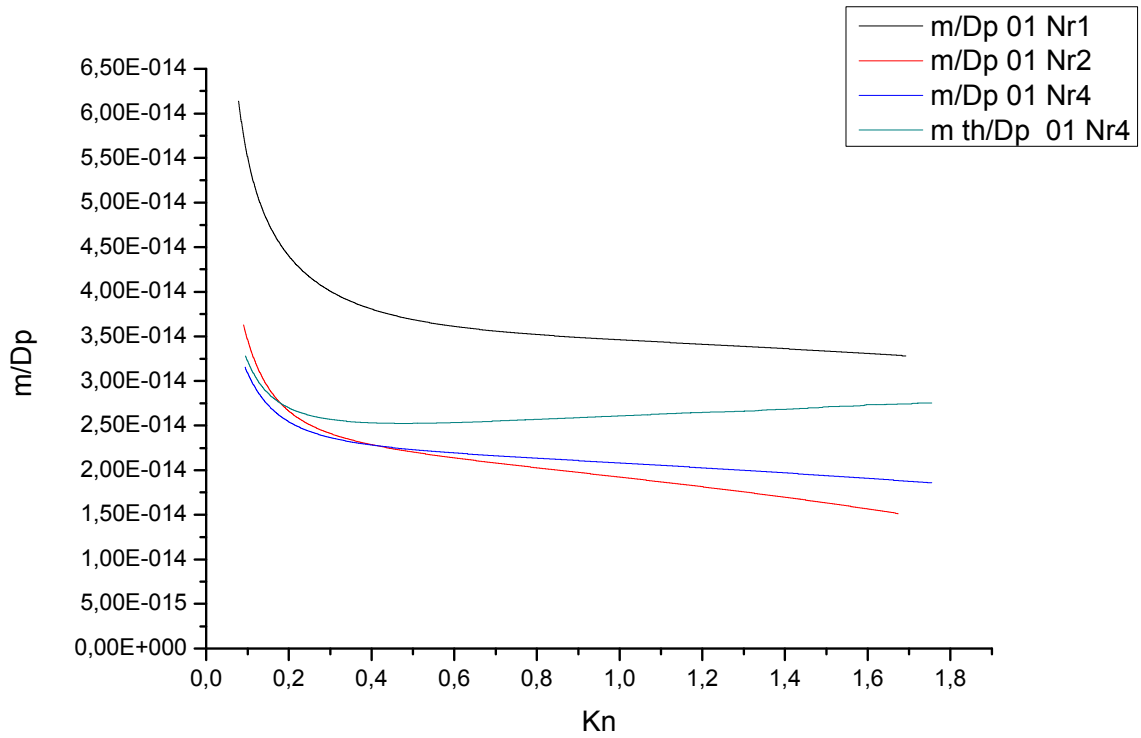
5.2.1.a: 55-0045-01 Nr1, 55-0045-01 Nr2, 55-0045-01 Nr4 για He



Σχήμα 5.2.1.a. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου για ήλιο

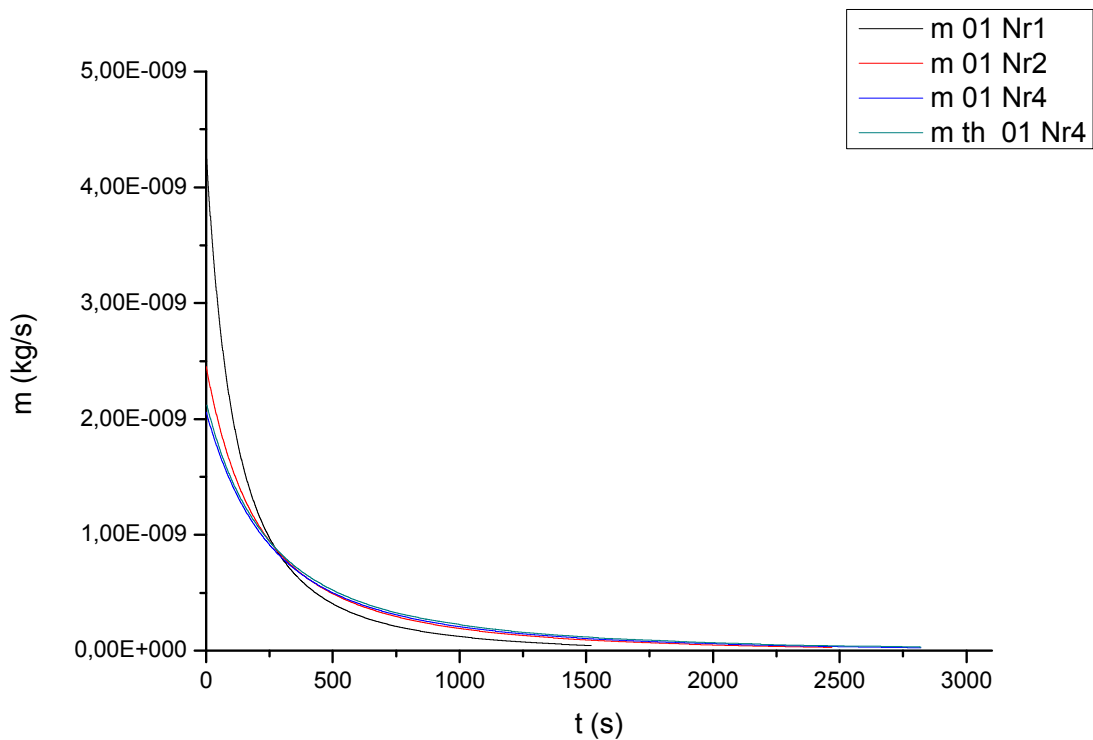


Σχήμα 5.2.1.a. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για ήλιο

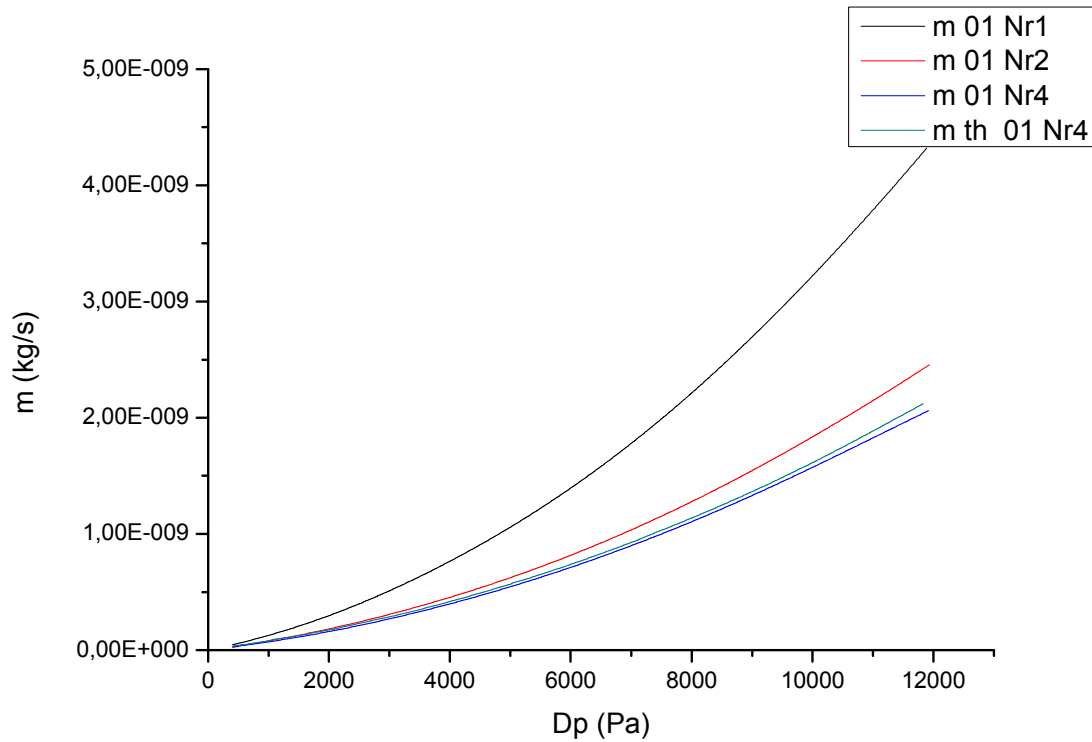


Σχήμα 5.2.1.a. 3: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για ήλιο

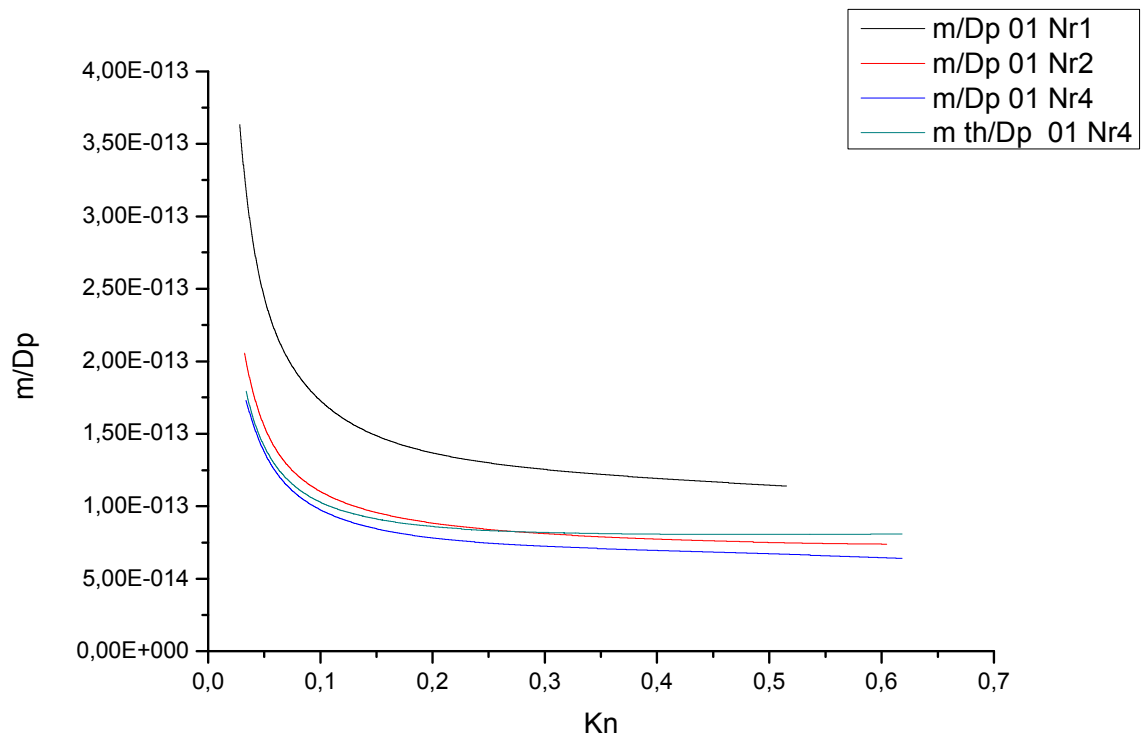
5.2.1.b: 55-0045-01 Nr1, 55-0045-01 Nr2, 55-0045-01 Nr4 για Ar



Σχήμα 5.2.1.b. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου για αργόν

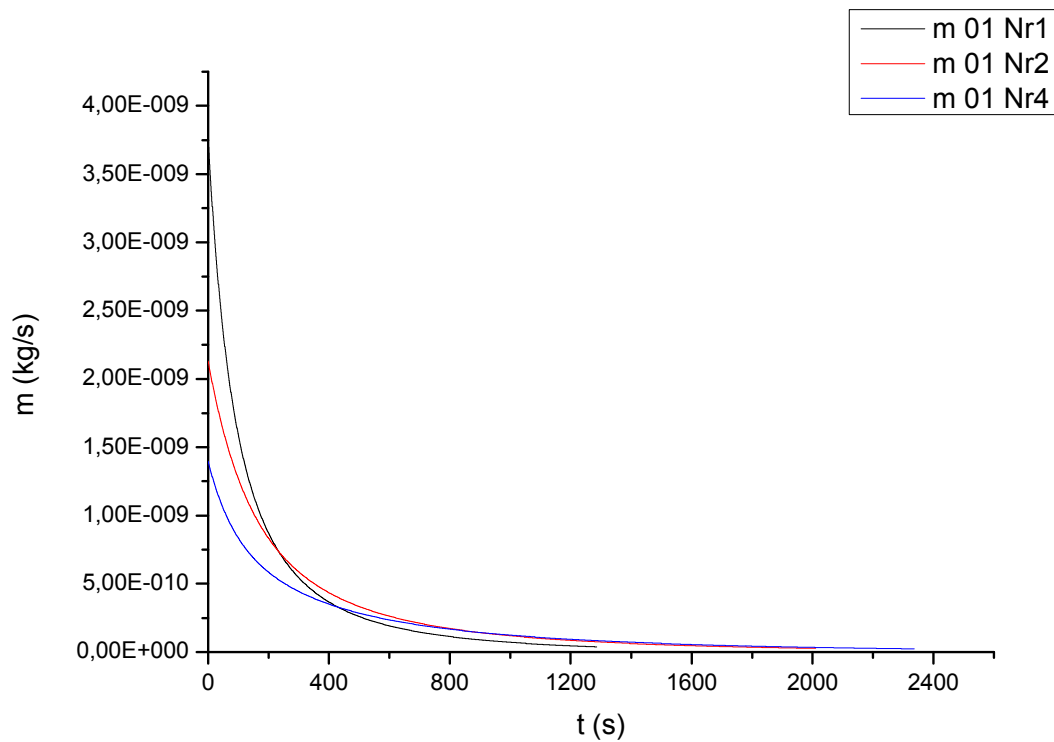


Σχήμα 5.2.1.b. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για αργόν

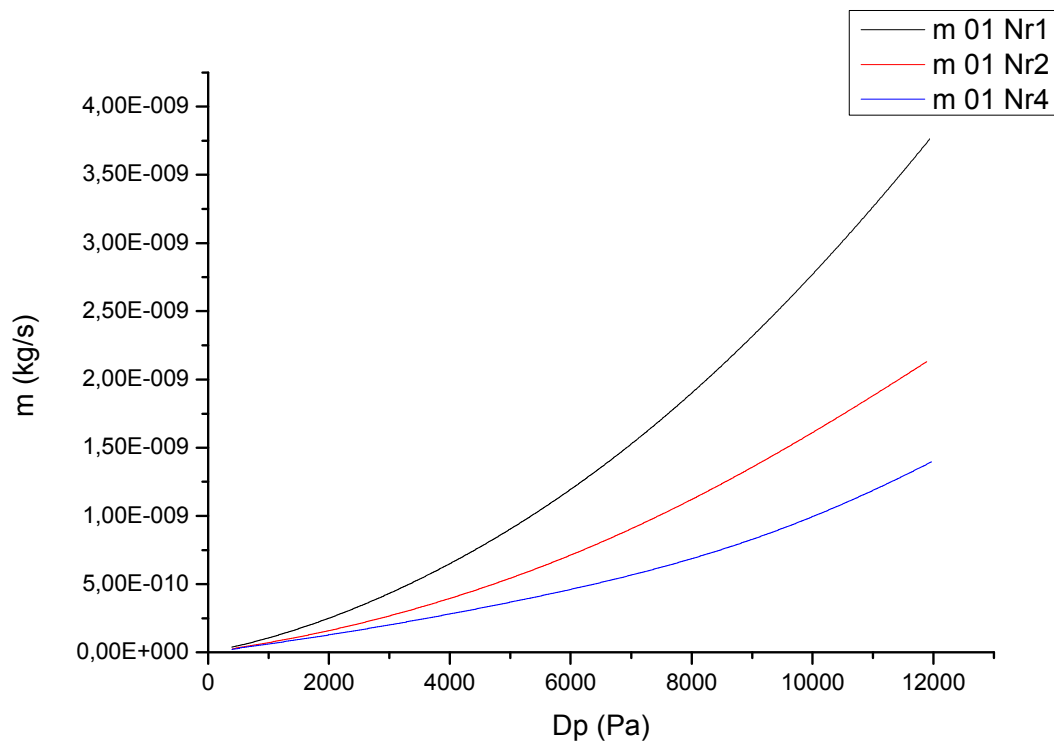


Σχήμα 5.2.1.b. 3: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για αργόν

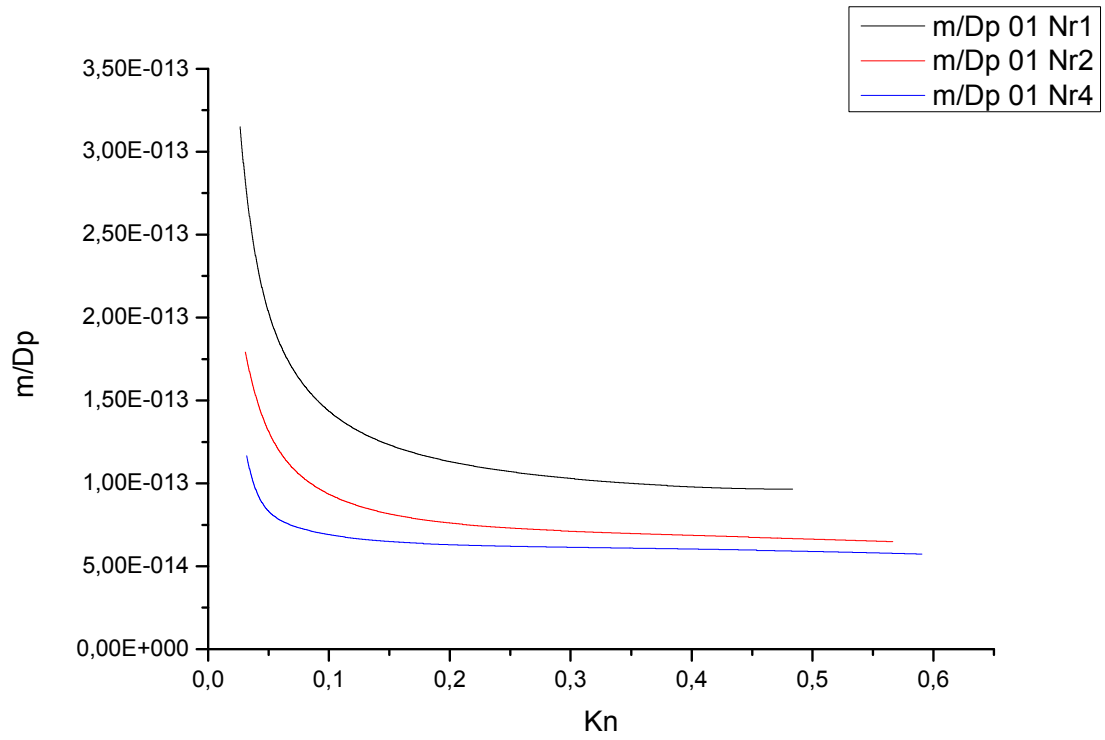
5.2.1.c: 55-0045-01 Nr1, 55-0045-01 Nr2, 55-0045-01 Nr4 για Αέρα



Σχήμα 5.2.1.c. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου για αέρα

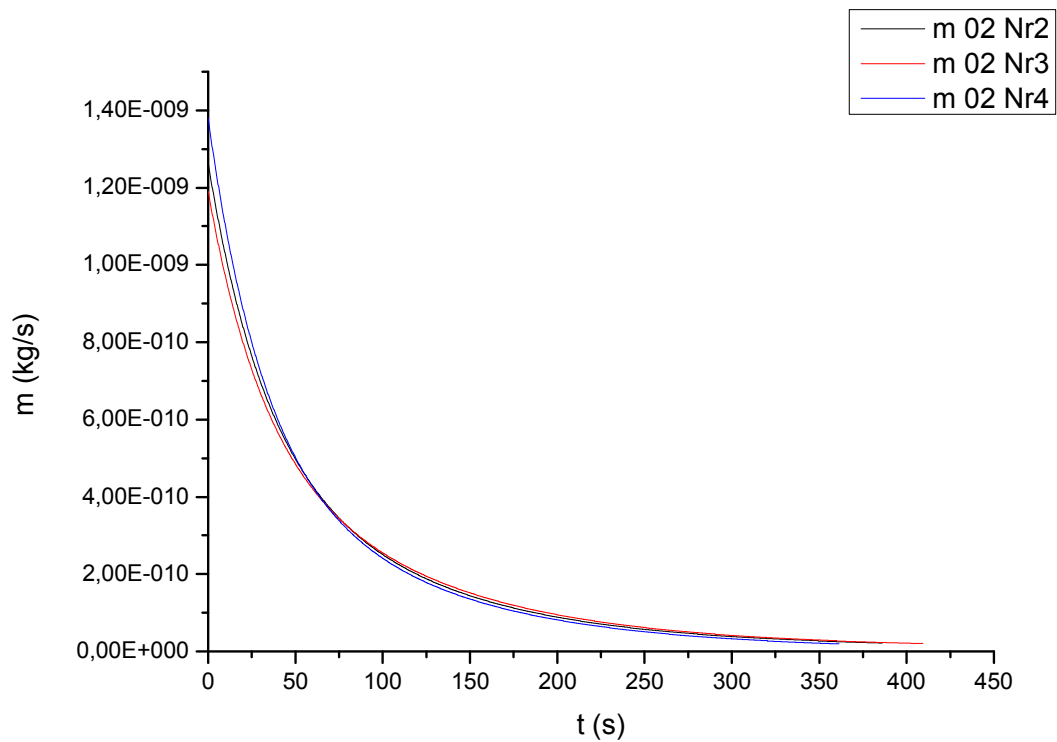


Σχήμα 5.2.1.c. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για αέρα

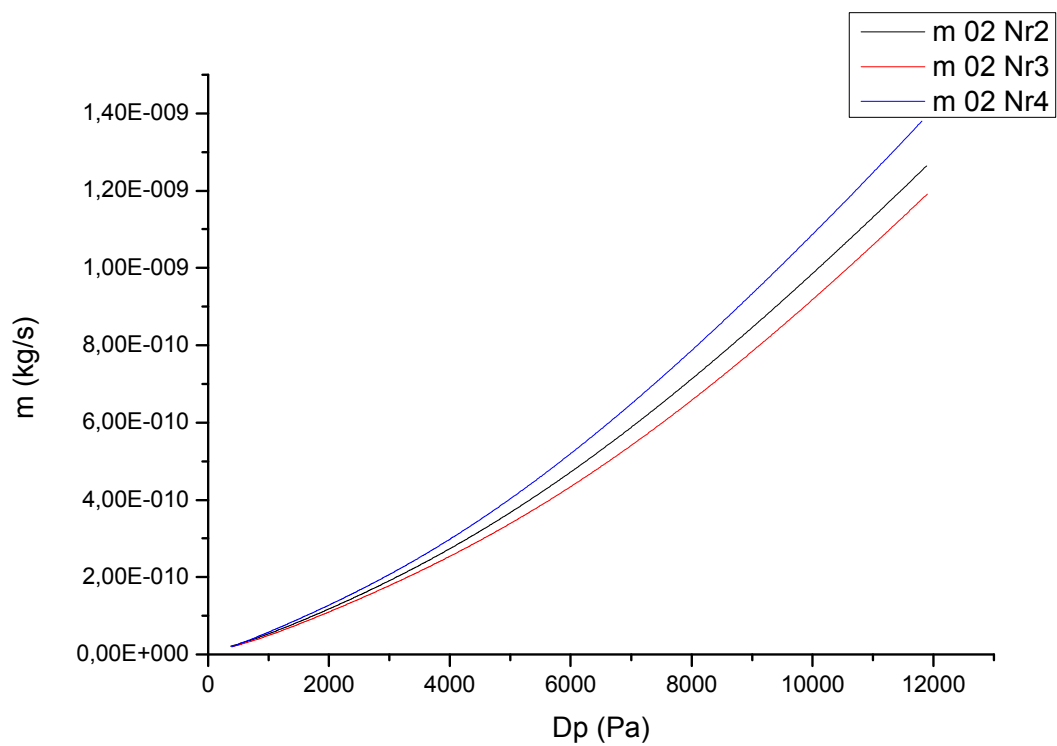


Σχήμα 5.2.1.ε. 3: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για αέρα

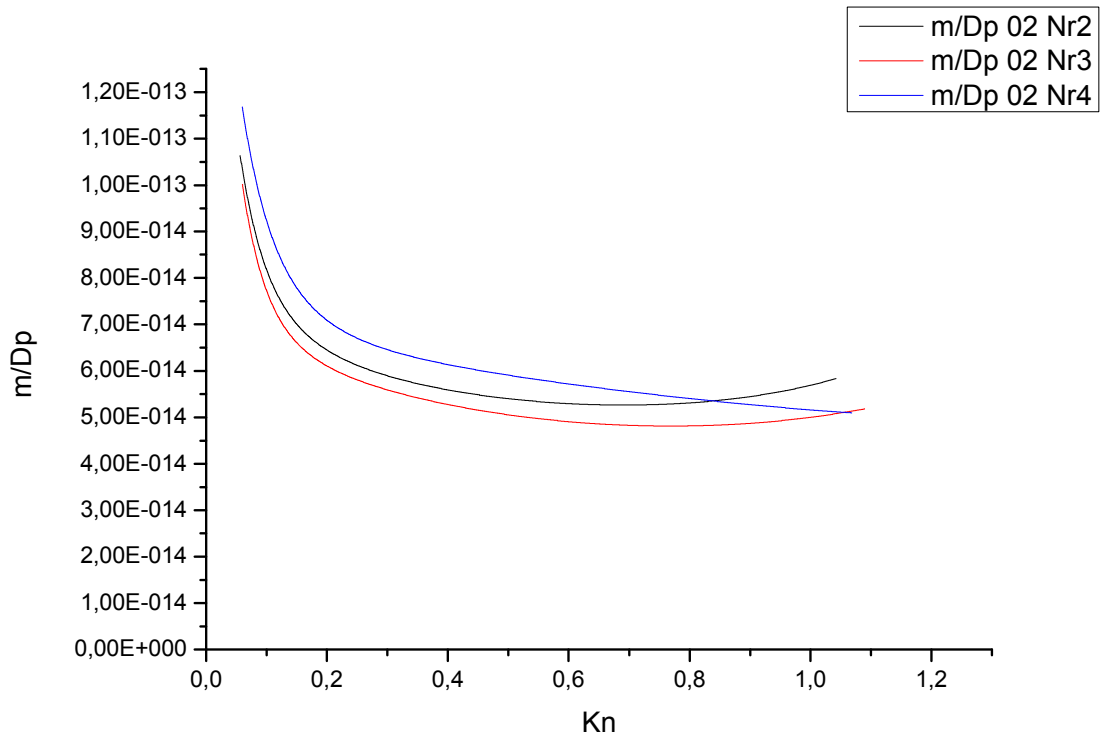
5.2.2.a: 55-0045-02 Nr2, 55-0045-02 Nr3, 55-0045-02 Nr4 για He



Σχήμα 5.2.2.a. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου για ήλιο

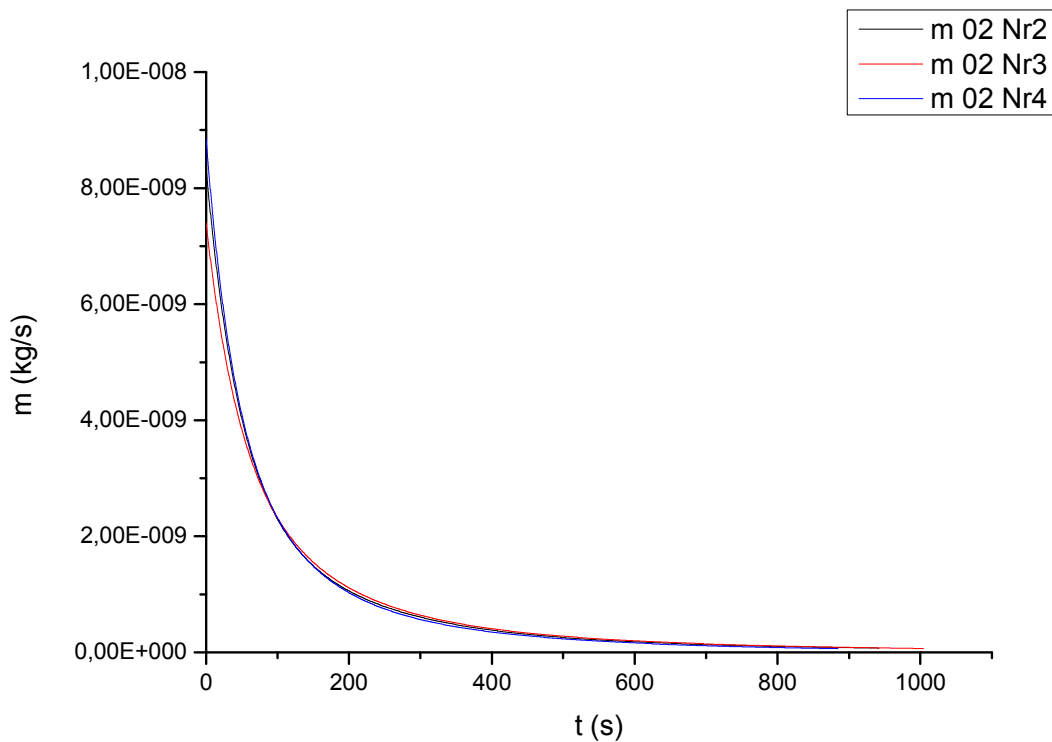


Σχήμα 5.2.2.a. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για ήλιο

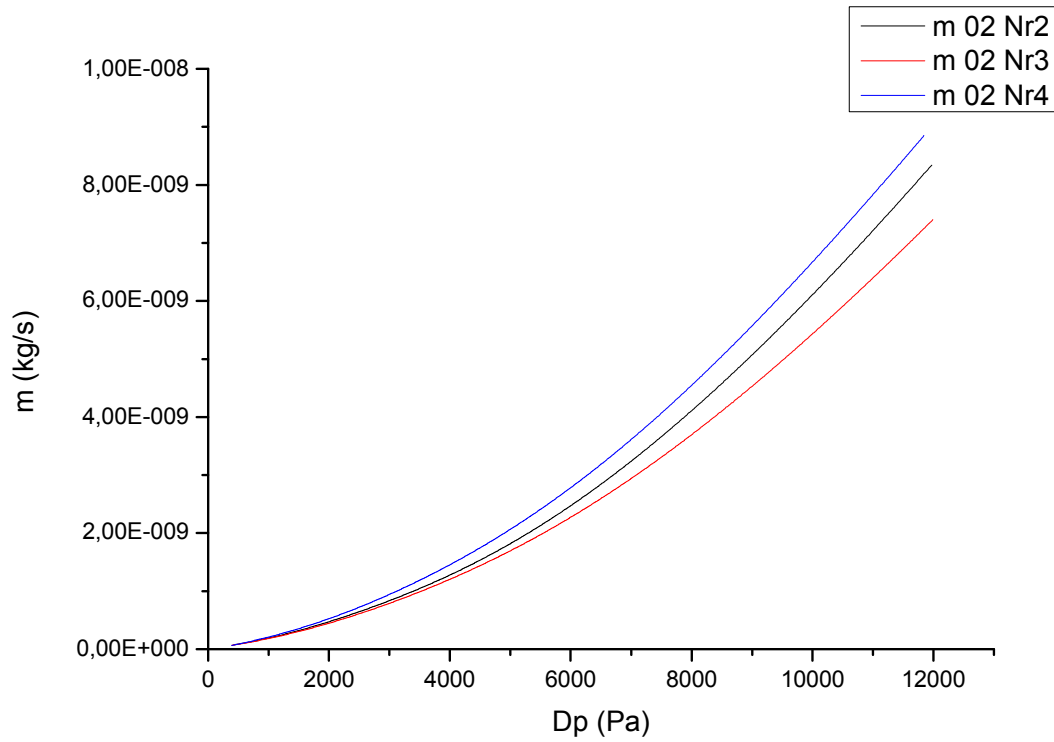


Σχήμα 5.2.2.a. 3: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για ήλιο

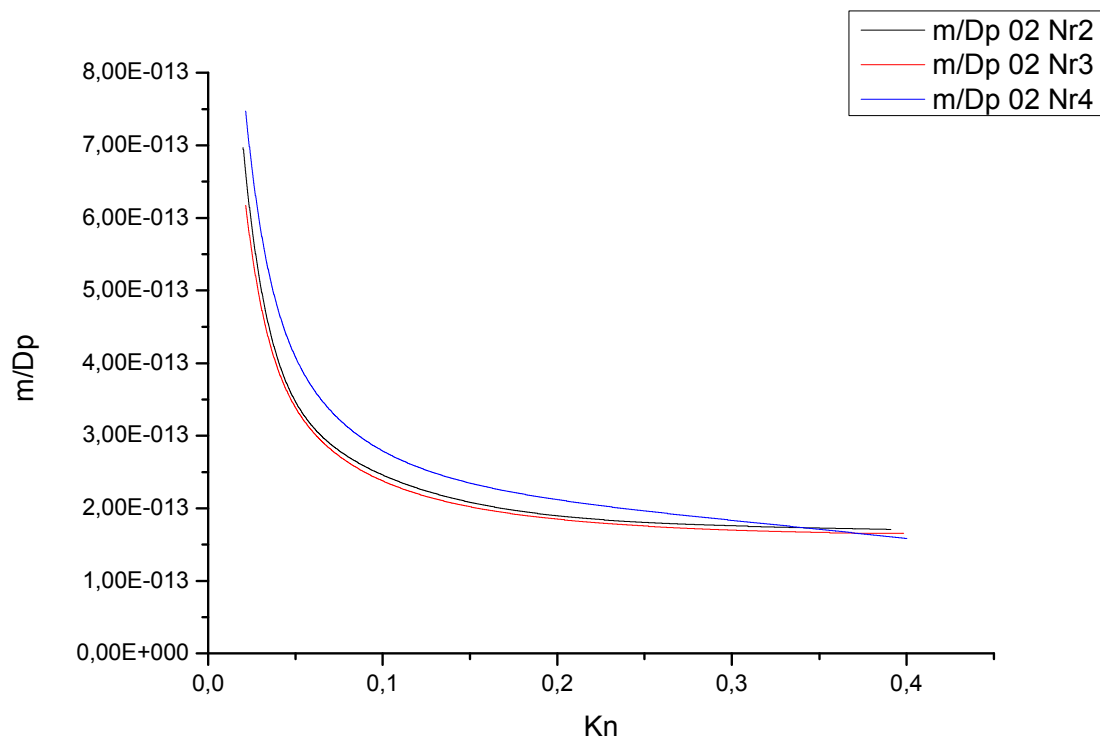
5.2.2.b: 55-0045-02 Nr2, 55-0045-02 Nr3, 55-0045-02 Nr4 για Ar



Σχήμα 5.2.2.b. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου για αργόν

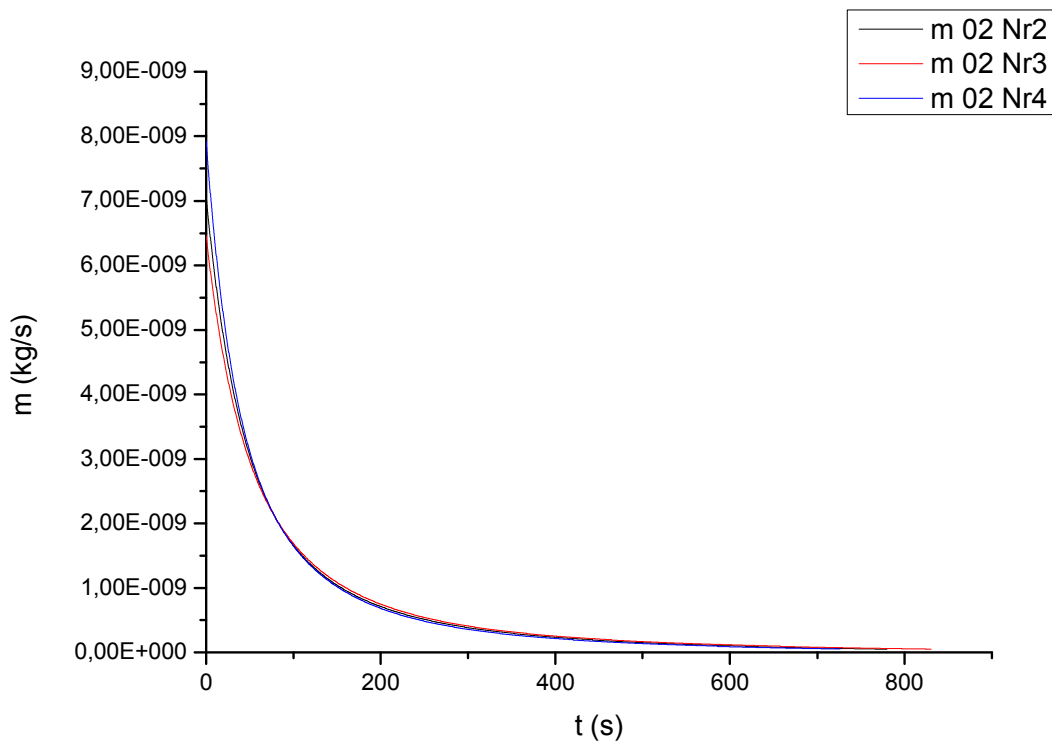


Σχήμα 5.2.2.b. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για αργόν

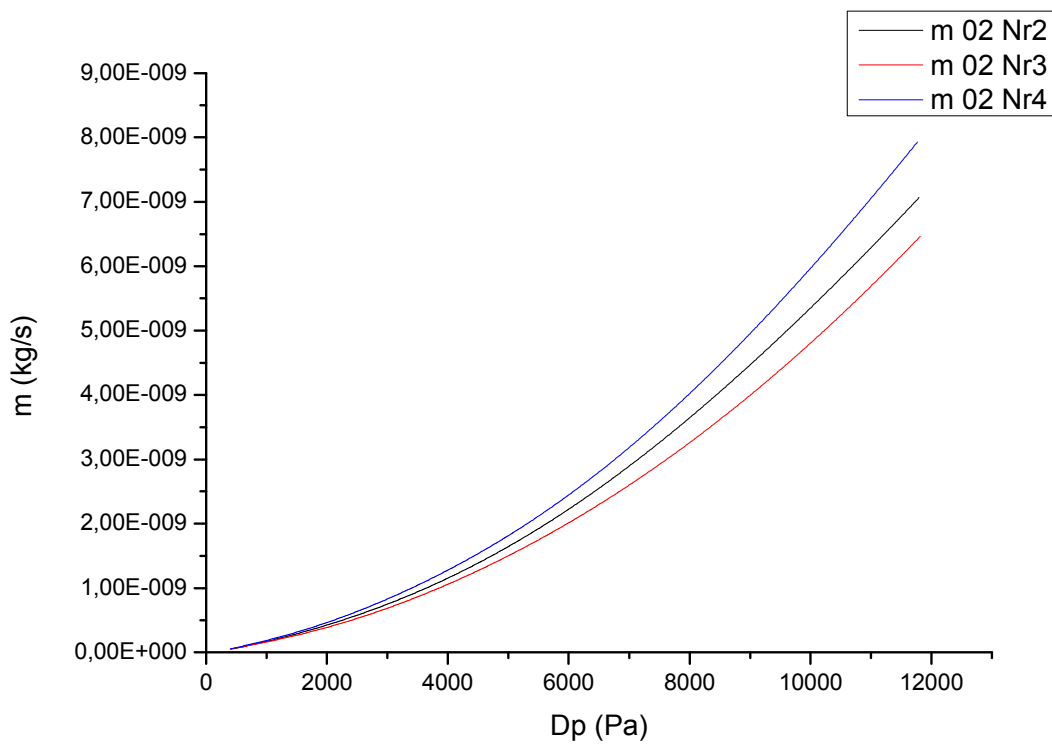


Σχήμα 5.2.2.b. 3: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για αργόν

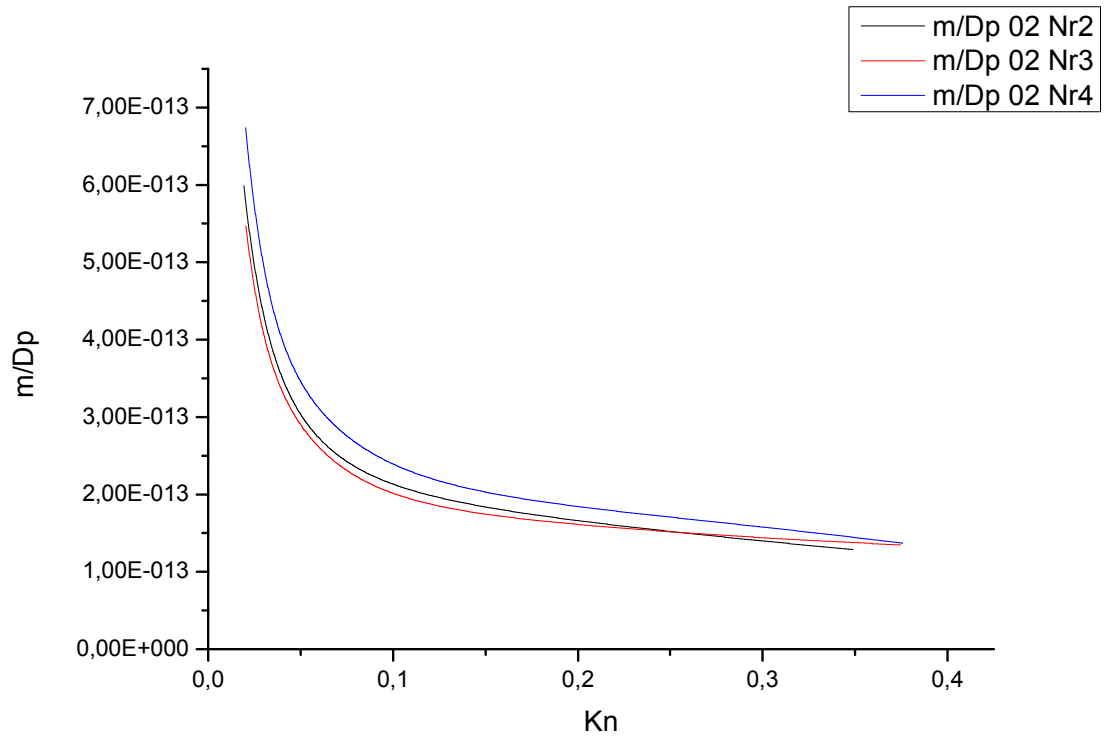
5.2.2.c: 55-0045-02 Nr2, 55-0045-02 Nr3, 55-0045-02 Nr4 για Αέρα



Σχήμα 5.2.2.c. 1: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει χρόνου για αέρα



Σχήμα 5.2.2.c. 2: Παροχή μάζας μέσω ενός μικροκαναλιού συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών για αέρα



Σχήμα 5.2.2.ε. 3: Παροχή μάζας διαιρεμένη με τη διαφορά πίεσης των δεξαμενών συναρτήσει αριθμού Knudsen για αέρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα πειράματα που έγιναν στις έξι διατάξεις μικροκαναλιών για ήλιο, αργόν και αέρα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Η παροχή μάζας του αργού είναι μεγαλύτερη από αυτή του αέρα που με τη σειρά της είναι μεγαλύτερη από αυτή του ηλίου. Σύμφωνα με τη μηχανική ρευστών η παροχή μάζας για μια δεδομένη πτώση πίεσης σε ένα σωλήνα εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα του αερίου αν η συνεκτικότητα (μ) είναι σταθερή και τα φαινόμενα συμπιεστότητας δεν είναι σημαντικά. Στην παρούσα εργασία η συνεκτικότητα μεταξύ των τριών αέριων δεν διαφέρει αισθητά οπότε η διαφορά στην παροχή μάζας μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η πυκνότητα του ηλίου είναι μικρότερη από αυτή του αέρα και αυτή μικρότερη από του αργού. Επίσης από τα διαγράμματα βλέπουμε πως η καμπύλη της παροχής μάζας συναρτήσει του Dp είναι παραβολικού τύπου, κάτι που συμφωνεί με τα αποτελέσματα που δίνει η εξίσωση Navier-Stokes με συνθήκη ολίσθησης για την περιοχή ολίσθησης.
Για τα κανάλια βάθους 30 μm τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν πως αυτό με τη μεγαλύτερη παροχή μάζας είναι το 55-0045-02 Nr 4 (βάθους 29,91 μm) το οποίο όμως έχει μικρότερη υδραυλική διάμετρο (54,09 μm) από το 55-0045-02 Nr 2 (βάθους 31,72 μm) το οποίο έχει υδραυλική διάμετρο 57,06. Αυτή η παρατήρηση μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει σημαντική πιθανότητα οι μετρήσεις των διαστάσεων των καναλιών να είναι εσφαλμένες.
- Από τα διαγράμματα της ταχύτητας συναρτήσει του Dp βλέπουμε πως υπάρχει γραμμική σχέση για πίεση μεγαλύτερη από 1000 Pa όπως προβλέπεται και από τη θεωρία συνεχούς μέσου για στρωτή ροή (η ροή μπορεί να θεωρηθεί στρωτή σε όλες τις πειραματικές περιπτώσεις της παρούσας εργασίας αφού ο αριθμοί Reynolds είναι πολύ μικροί). Από τα 1000 Pa και κάτω παρουσιάζεται μια απότομη μείωση στην ταχύτητα που είναι ενδεικτική της αραιοποίησης του αερίου. Αυτό συμβαίνει για $Kn > 0,2$ για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Για την περίπτωση της διάταξης 55-0045-01 Nr 4 βάθους 18,27 μm (σχήμα 5.1.1. 2) η ταχύτητα του αέρα φαίνεται να είναι μικρότερη από αυτήν του αργού για το μεγαλύτερο εύρος του Dp , κάτι που συμβαίνει μόνο για τη συγκεκριμένη διάταξη. Συνεπώς είναι πιθανό αυτή η διάταξη να είναι προβληματική.
- Η τιμή του αριθμού Reynolds σε όλες τις περιπτώσεις ήταν μικρή κάτι που είναι χαρακτηριστικό των μικροροών. Πιο συγκεκριμένα για τα κανάλια βάθους 30 μm ο μέγιστος αριθμός Reynolds ήταν 2,5 ενώ για τα κανάλια βάθους 20 μm ήταν 0,8. Η μικρή τιμή του Re έχει δυο συνέπειες: επιτρέπει τη διαγραφή των αδρανειακών όρων στις εξισώσεις ορμής και καθιστά πολύ μικρό το μήκος του αγωγού που είναι απαραίτητο για να διαμορφωθεί πλήρως η ροή.
- Στα διαγράμματα της παροχής μάζας διαιρεμένης με τη διαφορά πίεσης μεταξύ των δεξαμενών συναρτήσει του αριθμού Knudsen το ελάχιστο παρατηρήθηκε ξεκάθαρα μόνο για δυο περιπτώσεις: στη διάταξη 55-0045-02

Nr 2 (βάθους 31,72 μm) και ήλιο για $\text{Kn}=0,70$ περίπου και στη διάταξη 55-0045-02 Nr 3 (βάθους 29,63 μm) και ήλιο για $\text{Kn}=0,77$ περίπου.

Σύγκριση με θεωρητικά αποτελέσματα

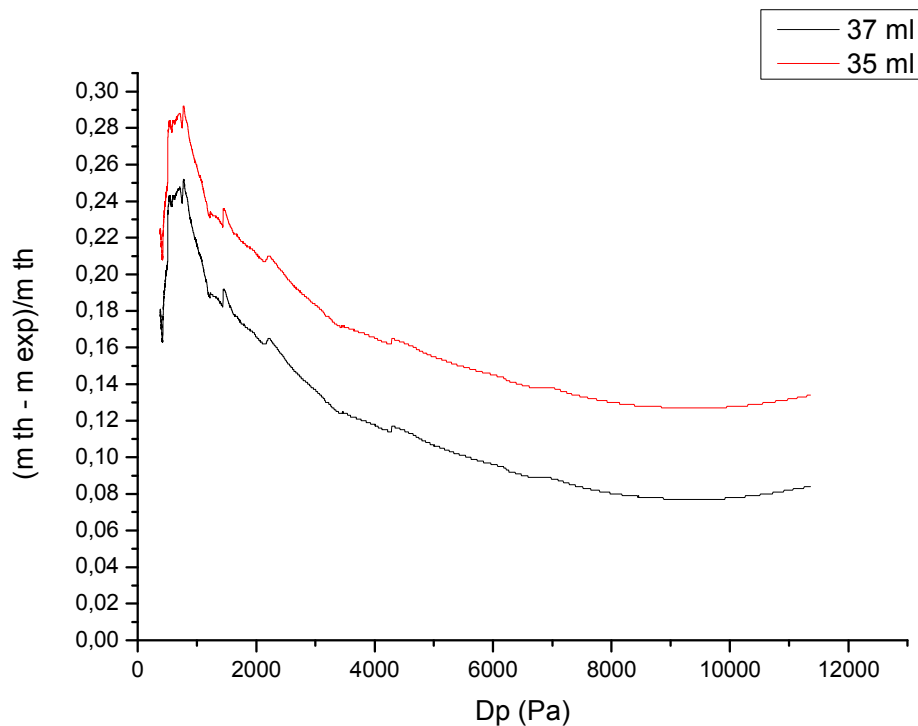
Τα θεωρητικά αποτελέσματα προέκυψαν με λύση της γραμμικοποιημένης εξίσωσης BGK με οριακές συνθήκες πλήρους διάχυσης Maxwell (S.Misdanitis and D.Valougeorgis [8]).

- Για τη διάταξη 55-0045-01 Nr 4 (βάθους 18,27) και εργαζόμενο μέσο **ήλιο** παρατηρήθηκαν τα εξής (σχήμα 4.1.a. 12): Η πειραματική τιμή της παροχής μάζας είναι κατά 5 % μικρότερη από την αντίστοιχη θεωρητική για D_p από 12000 έως 4000 Pa που αντιστοιχεί σε αριθμό Knudsen από 0,096 έως 0,278. Όσο μειώνεται το D_p διαφορά της πειραματικής από τη θεωρητική παροχή μάζας αυξάνεται, η διαφορά τους φτάνει το 15 % για $D_p=1000$ και $\text{Kn} = 0,90$ και για ακόμα χαμηλότερα D_p (μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Knudsen) αγγίζει το 35 %.
- Για τη διάταξη 55-0045-01 Nr 4 (βάθους 18,27) και εργαζόμενο μέσο **αργόν** παρατηρήθηκαν τα εξής (σχήμα 4.1.b. 12): Η πειραματική τιμή της παροχής μάζας είναι κατά λιγότερο από 5 % μικρότερη από την αντίστοιχη θεωρητική για D_p από 12000 έως 3500 Pa που αντιστοιχεί σε αριθμό Knudsen από 0,034 έως 0,108 , 10 % για $D_p=1400$ και $\text{Kn} = 0,246$ και για ακόμα χαμηλότερα D_p (μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Knudsen) φτάνει έως 23 %.
- Για τη διάταξη 55-0045-02 Nr 2 (βάθους 31,72) και εργαζόμενο μέσο **ήλιο** παρατηρήθηκαν τα εξής (σχήμα 4.4.a. 12): Η πειραματική τιμή της παροχής μάζας είναι κατά 12 % έως 16 % μικρότερη από την αντίστοιχη θεωρητική για D_p από 12000 έως 4000 Pa που αντιστοιχεί σε αριθμό Knudsen από 0,056 έως 0,16. Για μικρότερα D_p (μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Knudsen) η διαφορά αυξάνεται έως και 29 %.
- Για τη διάταξη 55-0045-02 Nr 2 (βάθους 31,72) και εργαζόμενο μέσο **αργόν** παρατηρήθηκαν τα εξής (σχήμα 4.4.b. 12): Η πειραματική τιμή της παροχής μάζας είναι κατά 10 % έως 17 % μικρότερη από την αντίστοιχη θεωρητική για D_p από 12000 έως 4000 Pa που αντιστοιχεί σε αριθμό Knudsen από 0,02 έως 0,058. Για μικρότερα D_p (μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Knudsen) η διαφορά αυξάνεται έως και 28 %.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι όταν η διαφορά των πιέσεων μεταξύ των δυο δεξαμενών μειωθεί κάτω από τα 4000 Pa (30 Torr) η απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τις τιμές που προβλέπει η θεωρία για την παροχή μάζας αυξάνεται αισθητά ενώ από 4000 Pa και πάνω η απόκλιση είναι μικρή. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι διαρροές που πιθανότατα υπάρχουν γίνονται σημαντικές στις χαμηλές πιέσεις όπου και φαίνεται το αποτέλεσμα τους. Το συμπέρασμα αυτό, ότι υπάρχουν διαρροές, ενισχύεται από το γεγονός ότι η πειραματικά μετρούμενη παροχή μάζας είναι για όλες τις περιπτώσεις μικρότερη από την αντίστοιχη θεωρητική τιμή. Επίσης στην απόκλιση των πειραματικών από τα θεωρητικά αποτελέσματα ενδέχεται να συμβάλλουν η ανακρίβεια των αισθητήρων

πίεσης και ανακριβής μέτρηση των διαστάσεων των μικροκαναλιών και του όγκου των δεξαμενών.

Για παράδειγμα έστω ότι ο όγκος των δεξαμενών είναι 37 ml αντί για 35 ml. Τότε η αδιαστατοποιημένη διαφορά της θεωρητικής από την πειραματική τιμή της παροχής μάζας για την περίπτωση της διάταξης 55-0045-02 Nr 2 (βάθους 31,72 μm) για εργαζόμενο μέσο ήλιο μειώνεται κατά 4% όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 6. 1: Αδιαστατοποιημένη διαφορά θεωρητικής και πειραματικής παροχής μάζας συναρτήσει διαφοράς πιέσεων των δεξαμενών για όγκο 37 ml και 35 ml

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Flow of Rarefied Gases, Princeton: University Press. Schaaf, S.A. & P.L. Chambre, 1961
- [2] Review of Single-Phase Forced Micro-Convection for Consolidation of Rarefaction and Non-Rarefaction Scaling Effects - Professor, Laboratory of Applied Thermodynamics, Helsinki University of Technology, Finland
- [3] Μηχανική των Ρευστών – Σωκράτης Τσαγγάρης
- [4] Gad-el-Hak, M. 1999 “The fluid mechanics of microdevices – The Freeman scholar lecture,” ASME Journal of Fluids Engineering, vol. 121, no. 1, pp. 6-33.
- [5] An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements
M.J. Kohl, S.I. Abdel-Khalik *, S.M. Jeter, D.L. Sadowski
- [6] Karniadakis, G.E. & A. Beskok, 2002 Microflows: Fundamentals and Simulation. New York: Springer-Verlag Inc.
- [7] Karniadakis, G.E. & A. Beskok, A (2001) Micro Flows, Fundamentals and Simulation, Springer Verlag, Berlin
- [8] Gas flow in micro channels in the slip and early transition regimes: measurements and comparisons with kinetic theory of gases – G. Kaparianos, S. Misdanitis, D. Mathioulakis and D. Valougeorgis
- [9] Experimental investigation of gas flow in micro channels – Stephen E. Turner, Lok C. Lam, Mohammad Faghri, Otto J. Gregory
- [10] Gas flow in micro channels - John C. Harley, Yufend Huang, Haim H. Bau, Jay N. Zemel
- [11] Gaseous slip flow in long microchannels - Errol B. Arkilic, Martin A. Schmidt, Member, IEEE, and Kenneth S. Breuer
- [12] Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule-Thomson refrigerators - Wu Peiyi and W.A. Little
- [13] Fluid flow in micro-channels - G. Hetsroni, A. Mosyak, E. Pogrebnyak, L.P. Yarin
- [14] Lecture 3: Review of Single-Phase Forced Micro-Convection for Consolidation of Rarefaction and Non-Rarefaction Scaling Effects - S.P. Mahulikar