

Λίγη Φυσική... για τη σοκολάτα

Ζωή Ευθυμιάδου¹, Βικτωρία Κελαναστάση², Αγγελική Κοσμά³

1^ο Πρότυπο Πειραματικό Λύκειο Θεσ/νίκης «Μανόλης Ανδρόνικος»

¹ zoeefth@hotmail.com, ² viktoria444@hotmail.com, ³ angelica.k_321@hotmail.com

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ Κλαίρη Αχιλλέως

Φυσικός, 1^ο Πρότυπο Πειραματικό Λύκειο Θεσ/νίκης «Μανόλης Ανδρόνικος»

cachilleosa@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σοκολάτα είναι ίσως η μοναδική τροφή που είναι στερεό σε κανονικές θερμοκρασίες και που λιώνει εύκολα μέσα στο στόμα. Αυτό οφείλεται στο βούτυρο κακάο που περιέχει και το οποίο είναι στερεό σε θερμοκρασίες κάτω των 25°C ενώ είναι υγρό σε θερμοκρασία σώματος (37°C).

Όταν η σοκολάτα λιώσει στο στόμα υπάρχουν δύο σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα της. Ο ένας παράγοντας είναι το μέγεθος των σωματιδίων που περιέχει. Ο δεύτερος παράγοντας είναι το ιζώδες της με το οποίο και ασχολούμαστε σε αυτήν την εργασία. Το ιζώδες της σοκολάτας επηρεάζεται από το είδος των σωματιδίων που περιέχει, το μέγεθος τους, αλλά και από τη δομή της.

Όπως γνωρίζουμε ιζώδες είναι η αντίσταση που παρουσιάζει ένα υγρό στην κίνηση, όταν αυτό ανακατεύεται ή χύνεται.

Στην εργασία μας μετρήσαμε το ιζώδες της σοκολάτας. Παρουσιάζεται καταρχήν η συσκευή που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματα μας και η οποία κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας απλά υλικά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που κάναμε ώστε να προσδιοριστεί το ιζώδες της μαύρης σοκολάτας και κάποιων άλλων γλυκών ουσιών όπως είναι το μέλι και το σιρόπι.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: σοκολάτα, ιζώδες, Νόμος Poiseuille.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιστορία της σοκολάτας

Η σοκολάτα είναι ένα από τα μακροβιότερα καταναλωτικά προϊόντα. Ξεκινώντας ως δέντρα κακάο από τους Μάγια και τους Αζτέκους το 600 μ.Χ., περνώντας στην Ευρώπη με το Χριστόφορο Κολόμβο μέσω σπόρων κακάο και αργότερα με τη δημιουργία του

πρώτου ροφήματος σοκολάτας στο Λονδίνο το 1657 και της άσπρης σοκολάτας το 1930. Η ιστορία της αποτελεί μεγάλο κεφάλαιο της βιομηχανίας τροφίμων. Είναι σχεδόν το μοναδικό φαγώσιμο προϊόν το οποίο είναι στερεό σε θερμοκρασία δωματίου και λιώνει εύκολα στο στόμα. Αυτό συμβαίνει καθώς το λίπος που περιέχει, το οποίο ονομάζεται βούτυρο κακάο, είναι κυρίως στερεό σε θερμοκρασίες κάτω των 25°C. Το λίπος είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου υγρό σε θερμοκρασία σώματος, δίνοντας την ικανότητα στα σωματίδια να ρέουν περνώντας το ένα το άλλο, όποτε η σοκολάτα γίνεται ένα λείο υγρό όταν ζεσταίνεται μέσα στη στοματική κοιλότητα. (S.T. Beckett, 2000).

Η σοκολάτα έχει γλυκιά γεύση γεγονός το οποίο την κάνει ελκυστικότερη στους περισσότερους ανθρώπους.

Το ιξώδες

Η λέξη ιξώδες προέρχεται από τη λέξη ιξός (τη γνωστή κολλώδη ουσία που περιβάλλει κάποιους καρπούς) και σημαίνει το κολλώδες. Γενικά όμως με τον όρο ιξώδες στη Χημεία και στη Φυσική χαρακτηρίζεται μία από τις ιδιότητες της ύλης, ιδίως των υγρών αλλά και των αερίων και συγκεκριμένα η αντίσταση που παρουσιάζουν κατά τη ροή τους. Η αντίσταση αυτή που παρουσιάζουν τα ρευστά οφείλεται στις εσωτερικές τριβές των μορίων τους. Το ιξώδες είναι μέτρο της αντίστασης του υγρού στη ροή και εξετάζεται ιδιαίτερα από την Υδροδυναμική. Το μέτρο του ιξώδους είναι ο συντελεστής συνεκτικότητας ή συντελεστής εσωτερικής τριβής ή συντελεστής ιξώδους του υγρού. Όσο πιο παχύρρευστο είναι ένα υγρό, τόσο μεγαλύτερο ιξώδες λέμε ότι έχει (el. Wikipedia). Το ιξώδες μετριέται με ειδικό όργανο που λέγεται ιξωδόμετρο ωστόσο εμείς κατασκευάσαμε τη δική μας απλή συσκευή που περιγράφεται στις πειραματικές μεθόδους. Μονάδα μέτρησης του ιξώδους είναι το $1\text{Pa}\cdot\text{s} = 1\text{N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$ αλλά χρησιμοποιείται και η μονάδα poise, $1\text{poise} = 0,1\text{Pa}\cdot\text{s}$ (Jupiter.chem.).

Το ιξώδες της σοκολάτας

Το ιξώδες της σοκολάτας έχει μια πολύπλοκη συμπεριφορά καθώς απαιτείται μια συγκεκριμένη δύναμη για να ξεκινήσει να ρέει, αλλά μόλις αρχίσει να ρέει, όσο αυξάνεται η δύναμη που εφαρμόζεται, τόσο πιο λεπτόρευστο γίνεται το υγρό. Αυτό είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για τους κατασκευαστές σοκολάτας επειδή το ιξώδες δεν έχει σταθερή τιμή. Στην πραγματικότητα υπάρχουν δύο φυσικές παράμετροι που περιγράφουν την ρευστότητα της σοκολάτας. Η πρώτη παράμετρος είναι το όριο ελαστικότητας. Αυτή συνδέεται με τη δύναμη που χρειάζεται η σοκολάτα για να αρχίσει να κινείται. Η δεύτερη παράμετρος είναι το πλαστικό ιξώδες. Αυτή συνδέεται με την ενέργεια που χρειάζεται η σοκολάτα για να κρατηθεί σε κίνηση μόλις αρχίσει να ρέει (S.T. Beckett, 2004).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Πειραματική Διάταξη

Για να προσδιοριστεί το ιξώδες της σοκολάτας, του μελιού και της καραμέλας-σιρόπι κατασκευάσαμε με απλά υλικά (εικ.1) ένα ιξωδόμετρο.

Χρησιμοποιήθηκε μια σύριγγα των 60ml, η οποία έχει ακροφύσιο μήκους 2,5cm. Η σύριγγα τοποθετήθηκε με το ακροφύσιο προς τα κάτω, μέσα σε ένα κυλινδρικό

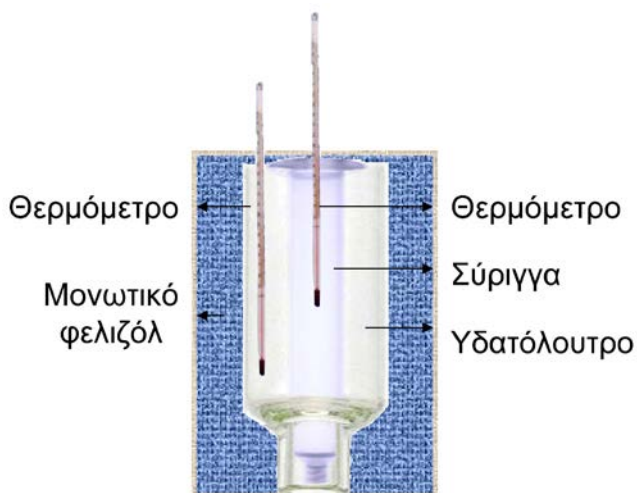
μπουκάλι σαμπουάν. Το μπουκάλι έχει διάμετρο 7cm, ύψος λίγο μεγαλύτερο από την σύριγγα και του αφαιρέθηκε ο πυθμένας.

Εικόνα 1: Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική διάταξη.



Το σύστημα σύριγγα-μπουκάλι τοποθετήθηκε στο κέντρο μιας στήλης από τρεις φέτες γαλάζιου μονωτικού φελιζόλ πάχους 3cm. Οι διαστάσεις κάθε φέτας φελιζόλ είναι 30cm x30cm. Εξωτερικά το σύστημα σταθεροποιήθηκε με αυτοκόλλητο αλουμινόχαρτο. Στο μπουκάλι τοποθετήθηκε ένα πόμα από φελιζόλ από το οποίο περνούν δύο θερμομέτρα. Το ένα μετρά τη θερμοκρασία του νερού που βρίσκεται στο μπουκάλι - λουτρό νερού. Το άλλο μετρά τη θερμοκρασία της σοκολάτας ή όποιου άλλου υγρού βρίσκεται στην σύριγγα. Έτσι αφενός ελέγχεται η θερμική ισορροπία, αφετέρου είναι γνωστή η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το υγρό όταν εκτελούνται τα πειράματα. Η πειραματική διάταξη τοποθετήθηκε σε μεταλλική βάση, ενώ κάτω από την έξοδο του ρευστού τοποθετήθηκε ογκομετρικό δοχείο συλλογής του υγρού.

Σχήμα 1: Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης



Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ακόμη, μια ηλεκτρονική ζυγαριά ακρίβειας 0,1g, προκειμένου να προσδιορίζεται η μάζα του υγρού και κατ' επέκταση να υπολογίζεται η πυκνότητά του, άλλη μια σύριγγα όμοια με αυτή της διάταξης και το χρονόμετρο ενός κινητού τηλεφώνου. Το νερό για το λουτρό θερμαινόταν σε ηλεκτρικό βραστήρα. Στο σχήμα 1 φαίνεται το σχέδιο της πειραματικής διάταξης.

Πειραματική Διαδικασία

Θερμαίνεται στο βραστήρα νερό και τοποθετείται στο λουτρό. Ζυγίζουμε καταρχήν τη σύριγγα άδεια. Ζεσταίνουμε το υγρό που θέλουμε να μελετήσουμε. Τοποθετούμε 60ml υγρού στη σύριγγα και τη ζυγίζουμε ξανά. Έτσι με αφαίρεση της μάζας της άδειας σύριγγας προσδιορίζουμε τη μάζα του υγρού. Γνωρίζοντας τον όγκο του, μπορούμε να προσδιορίσουμε την πυκνότητα του υλικού από τη γνωστή σχέση

$$d=m/V$$

όπου d η πυκνότητα του υγρού, m η μετρούμενη μάζα και V ο μετρούμενος όγκος.

Στη συνέχεια χύνουμε το υγρό από τη σύριγγα στη σύριγγα-δοχείο εκροής του ιξωδομέτρου. Το ακροφύσιο το κλείνουμε με πλαστελίνη ώστε να μην ρέει το υγρό μέχρι να αποκατασταθεί η θερμική ισορροπία. Όταν αποκατασταθεί η θερμική ισορροπία αφαιρούμε την πλαστελίνη από το ακροφύσιο και χρονομετρούμε τον χρόνο εκροής του υγρού. Τα υγρά που μελετήσαμε, εκτός της μαύρης σοκολάτας, είναι τα ακόλουθα: Νερό και μέλι σε διάφορες θερμοκρασίες, σιρόπι καραμέλας και απλό σιρόπι στους 20°C και σοκολάτα γάλακτος στους 80°C. Πρέπει να αναφερθεί ότι η προσπάθειά μας να πειραματιστούμε με λευκή σοκολάτα απέτυχε, διότι οι γαλακτοποιητές σε αυτή τη σοκολάτα δημιουργούσαν σβόλους, με αποτέλεσμα η υγρή σοκολάτα να μην ρέει.

Πειραματικές Μετρήσεις και Υπολογισμοί

Σύμφωνα με τον νόμο του Poiseuille ο συντελεστής ιξώδους ενός ρευστού που ρέει στρωτά και κατακόρυφα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \rho T}{8V}$$

όπου η ο συντελεστής ιξώδους

R η ακτίνα του ακροφυσίου της σύριγγας

ρ το ειδικό βάρος του υγρού

T ο χρόνος εκροής του ρευστού και

V ο όγκος του ρευστού (χρησιμοποιήσαμε 60ml για όλα τα ρευστά).

Το ειδικό βάρος ρ το υπολογίζουμε σε κάθε ρευστό με τη βοήθεια της σχέσης:

$$\rho = d \cdot g$$

όπου d η πυκνότητα του υγρού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας που είναι 9,8m/s² στη Θεσσαλονίκη.

Στους πίνακες 1 και 2 φαίνονται οι χρόνοι εκροής, για όγκο 60 ml, των ρευστών που μελετήθηκαν στους 20°C και στους 80°C αντίστοιχα. Στην τελευταία στήλη των πινάκων φαίνονται οι τιμές ιξώδους όπως αυτές υπολογίστηκαν από τον τύπο Poiseuille.

Πίνακας 1: Πειραματικές τιμές του χρόνου εκροής και του ιξώδους διαφόρων ουσιών στους 20°C.

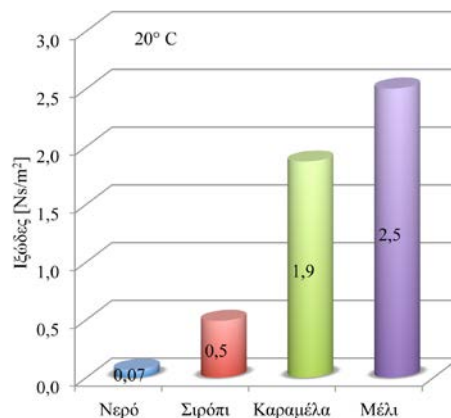
Ουσία	Χρόνος εκροής T [s]	Ιξώδες η [Pa.s]
Νερό	4,2	0,07
Σιρόπι	6,3	0,5
Καραμέλα	23,5	1,9
Μέλι	32,5	2,5

Πίνακας 2: Πειραματικές τιμές του χρόνου εκροής και του ιξώδους διαφόρων ουσιών στους 80°C.

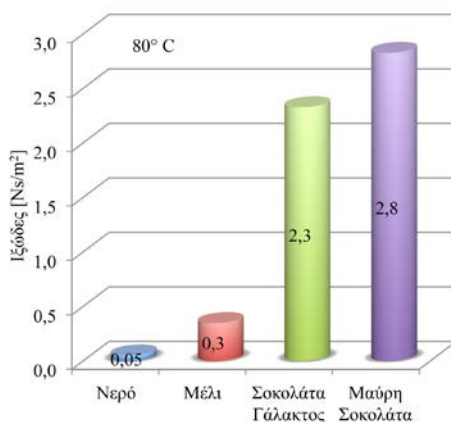
Ουσία	Χρόνος εκροής T[s]	Ιξώδες η [Pa.s]
Νερό	2,3	0,05
Μέλι	4,5	0,3
Σοκολάτα Γάλακτος	38	2,3
Μαύρη Σοκολάτα	43	2,8

Στα διαγράμματα 1 και 2 φαίνεται ο συντελεστής ιξώδους της σοκολάτας και των υπολοίπων υλικών στους 20°C και στους 80°C.

Διάγραμμα 1: Το ιξώδες διαφόρων υλικών στους 20°C.



Διάγραμμα 2: Το ιξώδες διαφόρων υλικών στους 80°C.



Στους πίνακες 3,4,5 φαίνονται οι τιμές χρόνου εκροής όπως μετρήθηκε για τα διάφορα υλικά και σε διαφορετικές θερμοκρασίες καθώς επίσης και οι τιμές ιξώδους όπως αυτές υπολογίστηκαν. Στο διάγραμμα 3 φαίνεται η μεταβολή του ιξώδους της σοκολάτας, του μελιού και του νερού σε σχέση με την θερμοκρασία.

Πίνακας 3: Πειραματικές τιμές του χρόνου εκροής και του ιξώδους του νερού.

Θερμοκρασία Θ [°C]	Χρόνος Εκροής T [s]	Ιξώδες η [Pa.s]
30	4,207	0,07
40	3,92	0,06
50	3,5	0,06
60	3,05	0,05
70	2,73	0,04
80	2,3	0,04

Πίνακας 4: Πειραματικές τιμές του χρόνου εκροής και του ιξώδους για το μέλι.

Θερμοκρασία Θ [°C]	Χρόνος Εκροής T [s]	Ιξώδες n [Pa.s]
35	30	2,3
45	24,38	1,9
50	17,5	1,3
55	15,5	1,2
60	7,1	0,5

Πίνακας 5: Πειραματικές τιμές του χρόνου εκροής και του ιξώδους για τη σοκολάτα.

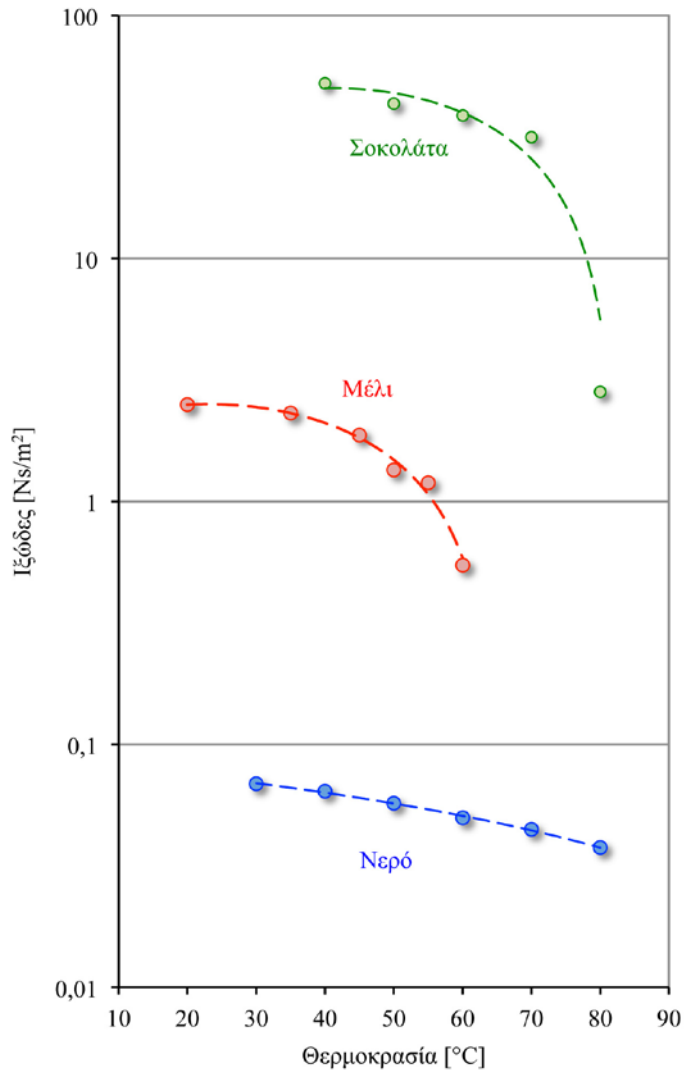
Θερμοκρασία Θ [°C]	Χρόνος Εκροής T [s]	Ιξώδες n [Pa.s]
40	800	52,6
50	660	43,4
60	590	38,8
70	480	31,6
80	43	2,8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο διάγραμμα 1 φαίνονται οι τιμές του ιξώδους για τα διάφορα υλικά που μελετήθηκαν στους 20°C. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 0,07 Pa.s (νερό) μέχρι 2,5 Pa.s (μέλι). Ενδιάμεσα βρίσκονται οι τιμές του σιροπιού και της καραμέλας. Στο διάγραμμα 2 φαίνονται οι τιμές ιξώδους για τα διάφορα υλικά στους 80°C. Απ'ότι φαίνεται η μαύρη σοκολάτα έχει την μεγαλύτερη τιμή ιξώδους (2.8 Pa.s) ενώ το νερό την μικρότερη (0,05 Pa.s). Γενικότερα η μαύρη σοκολάτα έχει μεγαλύτερη τιμή ιξώδους από τα υπόλοιπα υλικά καθώς είναι το πιο παχύρρευστο υλικό, όπως διαπιστώθηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων μας.

Από τις μετρήσεις μας σε διάφορες θερμοκρασίες συμπεραίνεται ότι η τιμή του ιξώδους για κάθε υλικό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία του. Κάθε υλικό όταν θερμαίνεται γίνεται πιο λεπτόρρευστο. Άρα έχει μεγαλύτερη ευκολία κίνησης και συνεπώς μικρότερο ιξώδες. Αυτό μπορεί να φανεί στο διάγραμμα 3 στο οποίο παρουσιάζεται το πώς μεταβάλλεται η τιμή του ιξώδους κάθε υλικού καθώς ανεβαίνει η θερμοκρασία του.

Διάγραμμα 3: Μεταβολή του ιξώδους σε σχέση με την θερμοκρασία για την μαύρη σοκολάτα, το μέλι και το νερό.



Τέλος είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι ο νόμος του Poiseuille, που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το ιξώδες κάθε υλικού ισχύει μόνο για τα υγρά που ρέουν στρωτά και κατακόρυφα. Το μέλι και η σοκολάτα ικανοποιούν τις παραπάνω προδιαγραφές, αλλά το νερό όχι. Γι' αυτό το λόγο, ενώ οι τιμές ιξώδους που υπολογίζονται για τη σοκολάτα (52 Pa.s) και το μέλι (2,5 Pa.s) είναι φυσιολογικές σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (S.T. Beckett, 2000), για το νερό η τιμή που

υπολογίζεται προκύπτει εκατό φορές μεγαλύτερη από την κανονική που είναι περίπου 0.001 Pa.s (N.I. Koshkin et al, 1982). Αυτό συμβαίνει γιατί στο ακροφύσιο της σύριγγας, που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική μας διάταξη, η ροή του νερού δεν είναι στρωτή αλλά στροβιλώδης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώθηκε υπολογίζοντας τον αριθμό Reynolds χρησιμοποιώντας τον τύπο

$$Re = \frac{2d\bar{v}R}{n}$$

όπου d η πυκνότητα σε kg/m

\bar{v} η μέση ταχύτητα σε m/s

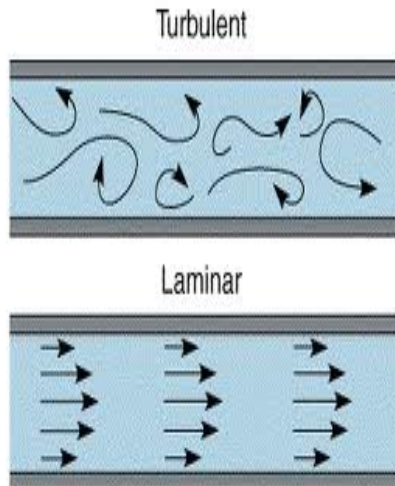
R η ακτίνα ακροφυσίου σε m και

n ο συντελεστής ιξώδους σε Pa.s

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αν ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος του 1000 η ροή του υγρού είναι στροβιλώδης ενώ, αν είναι μικρότερος του 1000 η ροή του υγρού είναι στρωτή. Στην εικόνα 2 φαίνεται πώς είναι η στροβιλώδης και η στρωτή ροη. Όπως φαίνεται στην εικόνα στη στροβιλώδη ροή σχηματίζονται δίνες ενώ η στρωτή ροή είναι ομαλή, ήρεμη.

Για το νερό, υπολογίσαμε ότι ο αριθμός Reynolds είναι 2.482 τιμή αρκετά μεγαλύτερη από το 1000. Άρα ο νόμος του Poiseuille δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ροή νερού στη διάταξή μας και γι' αυτό υπολογίστηκε κατά πολύ μεγαλύτερη η τιμή του ιξώδους του.

Εικόνα 2: Η στροβιλώδης και η στρωτή ροή



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε θερμά τους κ. Κ. Γ. Ευθυμιάδη, Χ. Πολάτογλου και Κ. Μελίδη, καθηγητές του Τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ. για την πολύπλευρη βοήθειά τους ώστε να δοθούν λύσεις σε όποια προβλήματα είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας μας αυτής. Επίσης ευχαριστούμε θερμά τον κ. Νίκο Κυριακίδη, γονέα, γιατί κατασκεύασε και μας χάρισε τη βάση για να στηρίξουμε την πειραματική μας διάταξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

S. T. Beckett, The Science of chocolate, United Kingdom, 2000.

N.I. Koshkin, M.G. Shirkevich, Handbook of elementary Physics, MIR Publishers, Moskow, 1982.

<http://el.wikipedia.org>

<http://jupiter.chem.uoa.gr>

http://en.wikipedia.org/wiki/Hagen–Poiseuille_equation

<http://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>

http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number

<http://www.ceb.cam.ac.uk/pages/mass-transport.html>