



ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΟΡΜΗΣ - ΡΕΟΛΟΓΙΑ



Ερωτήματα

- Όλα τα ρευστά (π.χ. νερό, μέλι) ρέουν με τον ίδιο τρόπο ή την ίδια ταχύτητα κάτω από τις ίδιες συνθήκες?
- Όλα τα ρευστά απαιτούν την ίδια δύναμη για να κινηθούν ?
- Πόσο εύκολα γλιστρούν μεταξύ τους τα μόρια ενός ρευστού ?
- Ποιος είναι ο χρόνος πλήρωσης μιας δεξαμενής από ένα ρευστό?
- Πόση ενέργεια απαιτείται για να αντλήσουμε ένα ρευστό ?
- Ποια είναι η περιεκτικότητα και η διαμόρφωση πρωτεϊνών μέσα σε ένα διάλυμα ?
- Χρησιμοποιούμε τον ίδιο μηχανολογικό εξοπλισμό (σωλήνες, αντλίες κλπ) για να εμφιαλώσουμε νερό και κέτσαπ ?
- Χρησιμοποιούμε τον ίδιο μηχανολογικό εξοπλισμό για να φτιάξουμε μαρέγκα ή κρέμα σαντιγί ή ζυμάρι για το ψωμί ?
- Αν κάτι φαίνεται στερεό, είναι σίγουρα στερεό?
- Μπορούμε να περπατήσουμε στην επιφάνεια ενός ρευστού ?



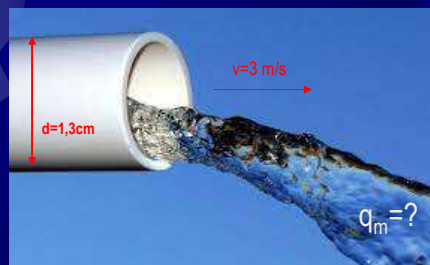
Βασικές έννοιες - Παροχή

- Ο ρυθμός με τον οποίο ένα ρευστό «ρέει» μέσα σε κάποιο αγωγό ή η ποσότητα του ρευστού που διαπερνά τον αγωγό στην μονάδα του χρόνου.
- Μαζική παροχή (η ποσότητα του ρευστού εκφρασμένη σε μονάδες μάζας) $q_m = \rho \cdot v \cdot A$ (kg/s)
- Ογκομετρική παροχή (σε μονάδες όγκου) $q_v = v \cdot A$ (m³/s), όπου:
 - v = μέση ταχύτητα ρευστού (m/s)
 - A = η επιφάνεια διατομής του αγωγού (m²)
 - ρ = η πυκνότητα του ρευστού (kg/m³)
- Εναλλακτικά: $q = V/t = m^3/s$



Άσκηση

- Ποια είναι η μαζική παροχή σε Kg/min ενός αγωγού με διάμετρο 1,3 cm στον οποίο το ρευστό (νερό) κινείται με ταχύτητα 3 m/s?





Ρεολογία

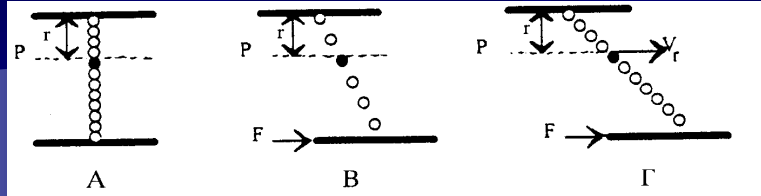
- Επιστήμη που εξετάζει την ροή και την παραμόρφωση των υλικών κάτω από την άσκηση πίεσης.
- Η μεταφορά, η ανάμιξη και η ανάδευση των υγρών στην βιομηχανία τροφίμων συνδέεται άμεσα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους και κύρια με την πυκνότητα και το ιξώδες.
- Τα χαρακτηριστικά αυτά καθορίζουν τόσο την ολική ενέργεια που απαιτείται για την μεταφορά τους όσο και την συμπεριφορά της ροής στην διάρκεια της επεξεργασίας.



Βασικές έννοιες - Ιξώδες

- Το ιξώδες (viscosity), περιγράφει το μέγεθος της αντίστασης που αναπτύσσεται μέσα στην μάζα του ρευστού κατά την εφαρμογή δυνάμεων διάτμησης, δυνάμεων δηλαδή που ενεργούν παράλληλα προς την κατεύθυνση ροής του ρευστού.
- Με άλλα λόγια εκφράζει την εσωτερική τριβή του ρευστού και κατά συνέπεια την αντίσταση του σε διαδικασίες ροής, ανάμιξης, ψεκασμού κλπ. Εκφράζει επίσης την ενέργεια που απορροφά το ρευστό στις διαδικασίες αυτές.

Ρυθμός διολίσθησης ή παραμόρφωση



- Η έννοια του ιξώδους προκύπτει από την ρεολογική συμπεριφορά των ρευστών όταν σε αυτά ενεργούν δυνάμεις μεταφοράς ή κίνησης της μάζας του. Η ευκολία διολίσθησης των μορίων του ρευστού αναμεταξύ των είναι γνωστή σαν ρυθμός διολίσθησης ή παραμόρφωσης dv/dr (sec^{-1}).
- Η ρεολογική συμπεριφορά ενός ρευστού προσδιορίζεται από την σχέση ανάμεσα στην τάση (τ) και στον ρυθμό διολίσθησης που η τάση αυτή προκαλεί (dv/dr) επί έναν σταθερό παράγοντα, ειδικό για κάθε ρευστό, που καλείται ιξώδες (μ): $\tau = \mu \cdot dv/dr = \mu \cdot \gamma$
- Πολλές φορές το ιξώδες αναφέρεται σαν δυναμικό ή κινηματικό ($\nu = \mu/\rho$), όπου ρ η πυκνότητα.

Δυναμικό και Κινηματικό ιξώδες

- Δυναμικό ιξώδες → πόσο «παχύ» είναι ένα ρευστό.
- Κινηματικό ιξώδες → πόσο εύκολα ρέει σε σχέση με την πυκνότητά του.

| Ιδιότητα | Δυναμικό ιξώδες | Κινηματικό ιξώδες |
|------------------------|-------------------------|---|
| Τι εκφράζει | Αντίσταση στη διάτμηση | Αντίσταση στη ροή λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα |
| Σχέση | βασική ιδιότητα ρευστού | ($\nu = \mu/\rho$) |
| Μονάδες (SI, CGS) | Pa·s , Poise (P) | m^2/s , Stokes (St) |
| Εξάρτηση από πυκνότητα | όχι | ναι |



Μονάδες μέτρησης ιξώδους

Στο S.I.

$\tau = Pa = N/m^2 = kg \cdot m/s^2 / m^2 = kg/m \cdot s^2$
 $dv/dr = \gamma = (m/s) / m = 1/s$
 $\mu = \tau / \gamma = (kg/m \cdot s^2) / (1/s) = kg/m \cdot s = Pa \cdot s$
 Συνηθέστερα: mPa·s

Στο F.P.S

$\tau = lb_f / ft^2$
 $\gamma = 1/s$
 $\mu = (lb_f / ft^2) / (1/s) = lb_m / ft \cdot s$

Στο C.G.S

$\tau = dyn/cm^2 = (g \cdot cm/s^2) / cm^2 = g/cm \cdot s^2$
 $\gamma = 1/s$
 $\mu = (g/cm \cdot s^2) / (1/s) = g/cm \cdot s = Poise (P)$

1 Poise = 0,1 Pa·s
 1 cP (centiPoise) = 0,01 P = 0,001 Pa·s
 = 1 mPa·s

Για το κινηματικό ιξώδες ($\nu = \mu/\rho$):
 Στο S.I = m^2/s

Στο C.G.S = cm^2/s (Stokes ή St
 και συνηθέστερα τα cSt)

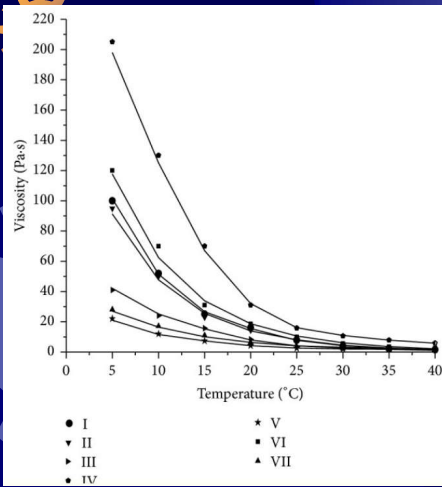
Στο F.P.S = ft^2/s



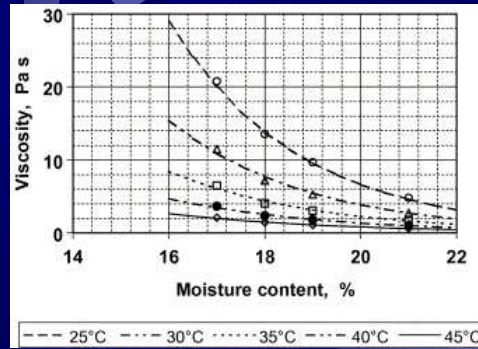
Τιμές ιξώδους κρίσιμων ρευστών

| Ρευστό | Ιξώδες (mPa.s ή cP) |
|---------------------|---------------------|
| Νερό (0°C) | 1,8 |
| Νερό (20°C) | 1,0 |
| Νερό (100°C) | 0,3 |
| Ελαιόλαδο (20°C) | 80-100 |
| Μέλι (20°C) | 2000-10000 |
| Αίμα (ορός 37°C) | ~4 |
| Αίμα (πλάσμα 37°C) | ~1,5 |
| Λάδι μηχανής (AE10) | ~200 |
| Αέρας | 0,018 |

Με βάση τα παραπάνω από τι σας φαίνεται να εξαρτάται η τιμή του ιξώδους σε ένα ρευστό?



Μεταβολή του ιξώδους με την θερμοκρασία σε δείγματα μελιού (Saxena et al., 2014)



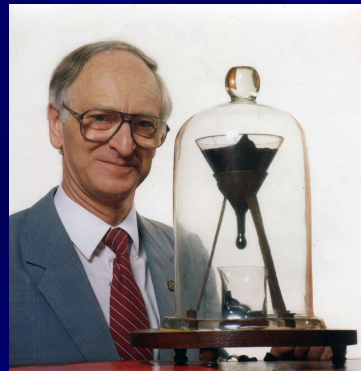
Μεταβολή του ιξώδους με την θερμοκρασία και την υγρασία σε δείγματα μελιού (Yanniotis et al., 2006)



Pitch drop experiment (99 χρόνια)

☀ Κάποια σώματα μοιάζουν στερεά αλλά στην πραγματικότητα είναι ρευστά με πολύ μεγάλο ιξώδες

(7 σταγόνες από το 1927)

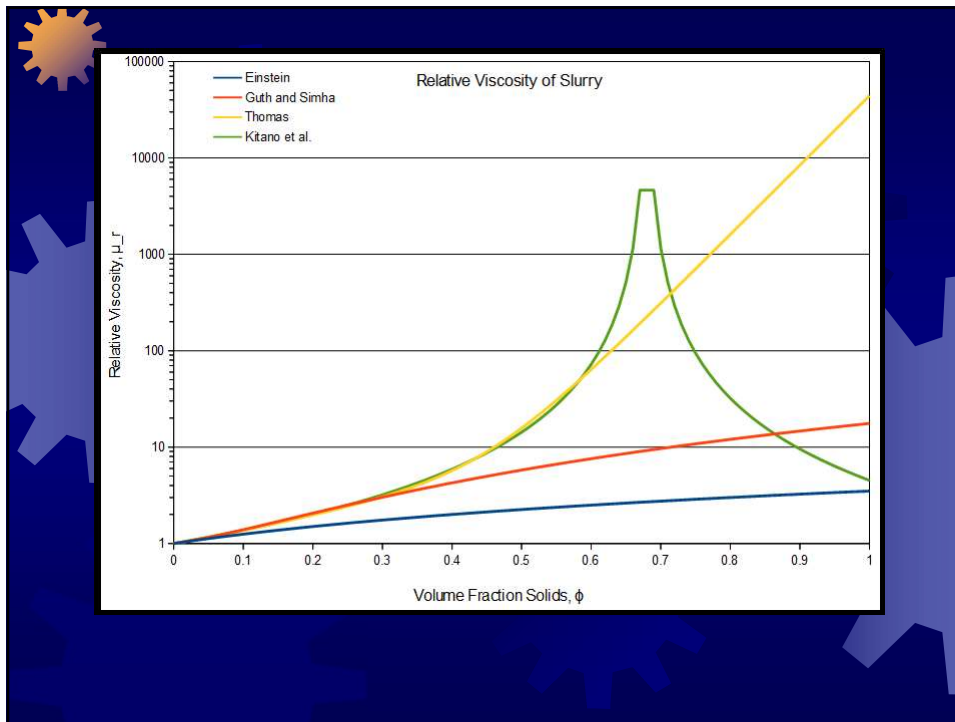


Παράγοντες που επηρεάζουν το ιξώδες

- (α) Συγκέντρωση στερεών στο ρευστό
- (β) Θερμοκρασία
- (γ) Τύπος του ρευστού

Πρόβλεψη ιξώδους με βάση την περιεκτικότητα σε στερεά

- Το ιξώδες ενός αιωρήματος με βάση το ιξώδες του υγρού (μ_0) και την συγκέντρωση σε στερεά (x) μπορεί να προβλεφθεί:
- Για αραιά αιωρήματα (μέχρι 10% κ.ο. σε στερεά) από την εξίσωση Einstein: $\mu = \mu_0(1+2.5x)$
 - Όπου x η συγκέντρωση των στερεών
- Για λιγότερο αραιά αιωρήματα (μέχρι 20% κ.ο. σε στερεά) από την εξίσωση Guth & Simha:
$$\mu = \mu_0(1+2.5x+14.1x^2)$$



Θερμοεξάρτηση του ιξώδους

- Πάντα η πρόβλεψη λαμβάνει χώρα σε σταθερή θερμοκρασία μιας και η παράμετρος αυτή επηρεάζει ιδιαίτερα την τιμή του ιξώδους.

- Η εξάρτηση του ιξώδους από την θερμοκρασία περιγράφεται από τον τύπο του Arrhenius:

$$\ln \mu = \ln A - \frac{Ea}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

A, η σταθερά του Arrhenius

Ea, η ενέργεια ενεργοποίησης

R, η σταθερά των αερίων

- Με κατάλληλο μετασχηματισμό μπορούμε να εκτιμήσουμε την σταθερά Ea/R αφού κάνουμε μερικές μετρήσεις του ιξώδους σε διαφορετικές θερμοκρασίες.
- Γενικά το ιξώδες ενός υγρού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ το ιξώδες των αερίων αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

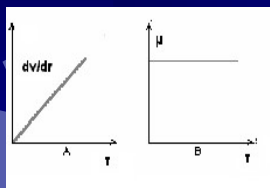


Τύποι ρευστών

- ☀ Ρευστά των οποίων η τάση διολίσθησης είναι ανάλογη (ή σταθερή) προς τον ρυθμό διολίσθησης καλούνται Νευτώνεια (νερό, γάλα, χυμοί, φυσικά έλαια, μέλι κ.α.).
- ☀ Ρευστά των οποίων η τάση διολίσθησης μεταβάλλεται δυσανάλογα με τον ρυθμό διολίσθησης καλούνται μη Νευτώνεια. Το ιξώδες των ρευστών αυτών καλείται «φαινομενικό ιξώδες» μιας και εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό «παραμόρφωσης» ή και τον χρόνο, όπως σε χρονικά εξαρτώμενα ρευστά (θιξότροπα και ρεοπηκτικά).
- ☀ Στην βιομηχανία τροφίμων χρησιμοποιείται γενικότερα ο όρος «ιξώδες».

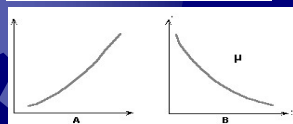


Νευτώνεια και μη Νευτώνεια

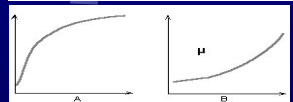


Στα Νευτώνεια ρευστά η σχέση της τάσης προς τον ρυθμό διολίσθησης είναι σταθερή (σχ Α), άρα το ιξώδες είναι σταθερό (σχ Β)

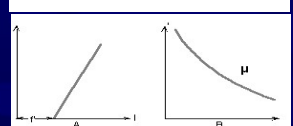
Μη Νευτώνεια ρευστά:



Ψευδοπλαστικά (χρώματα, βερνίκια νυχιών, εναιωρήματα)



Διασταλτικά (πηλός, κρέμες ζαχαρ/κής, ζυμάρι, Oobleck)

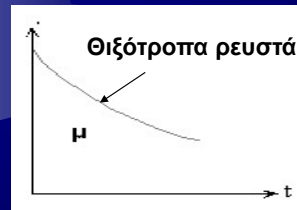


Πλαστικά Bingham, τα οποία συμπεριφέρονται σαν στερεά κάτω από συνθήκες ακινησίας.

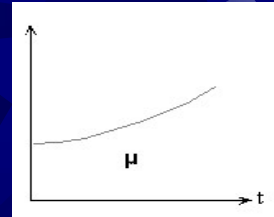
(κέτσαπ, πουρές, μαρέγκα, μαγιονέζα, οδοντόκρεμα, στόκος)

Χρονικά εξαρτώμενα ρευστά

- Είναι τα ρευστά στα οποία η τάση παραμόρφωσης, για σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης, μεταβάλλεται με τον χρόνο.



ρεοπηκτικά



*Υπάρχουν επίσης τα ιξωδοελαστικά ρευστά τα οποία έχουν την τάση να ανακάμπτουν από παραμορφώσεις που υφίστανται κατά την ροή τους.

Ρεολογικά μοντέλα ρευστών

- Bingham:** $\tau = b\dot{\gamma} + \tau_0$
 - Μέλι σε χαμηλή θερμοκρασία
- Ψευδοπλαστικά:** $\tau = b\dot{\gamma}^n$, $0 < n < 1$
 - Διαλύματα κόλλων, γάλα συμπυκνωμένο
- Διασταλτικά:** $\tau = b\dot{\gamma}^n$, $1 < n < \infty$
 - Φυστικοβούτυρο, πυκνά αιωρήματα αμύλου
- Πλαστικά Bingham:** $\tau = b\dot{\gamma}^n + \tau_0$, $1 < n < \infty$
 - Κέτσαπ, πουρές, μουστάρδα

b = ο δείκτης συνεκτικότητας του ρευστού
 n = ο δείκτης συμπεριφοράς στην ροή, ενώ
 τ_0 = είναι η τάση έναρξης της ροής.

Ρεολογικές
σταθερές



Μέθοδοι μέτρησης ιξώδους

- Γυάλινο τριχοειδές ιξωδόμετρο
- Γυάλινο τριχοειδές Ιξωδόμετρο με εξαναγκασμένη ροή
- Σωληνωτά ιξωδόμετρα για μη Νευτώνεια ρευστά
- Περιστροφικά ιξωδόμετρα
- Περιστροφικά ιξωδόμετρα μεγάλου διακένου



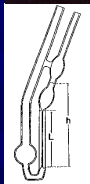
Μέτρηση με γυάλινα ιξωδόμετρα



Η μέτρηση του ιξώδους γίνεται με την πλήρωση του σωλήνα με το υγρό και την μέτρηση του χρόνου κένωσης σε συγκεκριμένο μέρος του σωλήνα.

$$\mu = k \cdot \rho \cdot \Theta$$

Όπου ρ = η πυκνότητα, Θ ο χρόνος κένωσης και k σταθερά του ιξωδομέτρου που εξαρτάται από την διατομή του σωλήνα, το ύψος της στήλης του ρευστού και το μήκος του σωλήνα



Μέτρηση με γυάλινα ιξωδόμετρα εξαναγκασμένης ροής

• Η μέτρηση του ιξώδους γίνεται με την μέτρηση της πτώσης πίεσης που παρατηρείται όταν το ρευστό εξαναγκασθεί να τρέξει με μια σταθερή ταχύτητα (μέσα σε σωλήνα). Από τον τύπο (νόμο) του Poiseuille:

$$q_v = \Delta v / \Delta t = \pi \cdot R^4 \cdot (P_1 - P_2) / 8 \cdot \mu \cdot L$$

$$\text{Προκύπτει ότι: } \mu = (\Delta P \cdot \pi \cdot R^4 \cdot g_c) / (8 \cdot L \cdot q)$$

Όπου ΔP = η πτώση πίεσης, g_c η σταθερά του Newton, q η παροχή (m^3/s), L το μήκος του σωλήνα και R η ακτίνα.

• Για την μέτρηση με την χρήση σφαίρας που πέφτει σε γυάλινο κύλινδρο παρουσία υγρού : $\mu = (2 \Delta P \cdot g \cdot R^2) / 9 \cdot v$

Όπου, ΔP η διαφορά πυκνότητας της σφαίρας και του ρευστού, R η ακτίνα της σφαίρας και v η ταχύτητα της σφαίρας κατά την μέτρηση.

Ιξωδόμετρο Hoerpler



Μέτρηση με περιστροφικό ιξωδόμετρο (1)

- Τα περιστροφικά ιξωδόμετρα και μάλιστα αυτά με μεγάλο διάκενο (π.χ. Brookfield) είναι τα πλέον χρησιμοποιούμενα στην βιομηχανία τροφίμων. Σε αυτά, ηλεκτρονικά μετράται η ροπή στρέψης ενός άξονα που καταλήγει σε κύλινδρο ο οποίος με την σειρά του περιστρέφεται στην μάζα του ρευστού. Η τάση παραμόρφωσης μπορεί να εκτιμηθεί από τον τύπο:

$$\tau_w = A / (2 \cdot \pi \cdot L \cdot R^2), \text{ όπου:}$$

A η ροπή στρέψης, R η ακτίνα του κυλίνδρου (ή δίσκου) και L το μήκος του άξονα. Οι τιμές του τ_w εφαρμόζονται στις εξισώσεις που περιγράφουν τα ρεολογικά μοντέλα των ρευστών και από εκεί εκτιμούνται ανάλογα οι ρεολογικές σταθερές (b και n).

Μέτρηση με περιστροφικό ιξωδόμετρο (2)

- Τα πλέον σύγχρονα περιστροφικά ιξωδόμετρα δίνουν απ' ευθείας τις ενδείξεις των ρεολογικών σταθερών που μας ενδιαφέρουν. Αυτό γίνεται βάσει του τύπου:

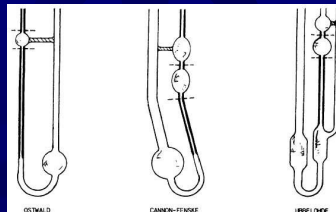
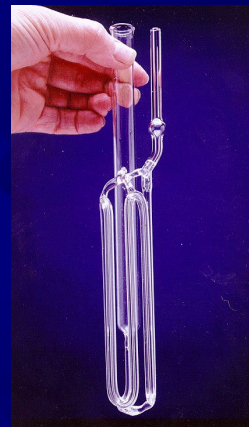
$$\mu_{\Phi} = (1/n)^n (4\pi N')^{n-1} b, \text{ όπου:}$$

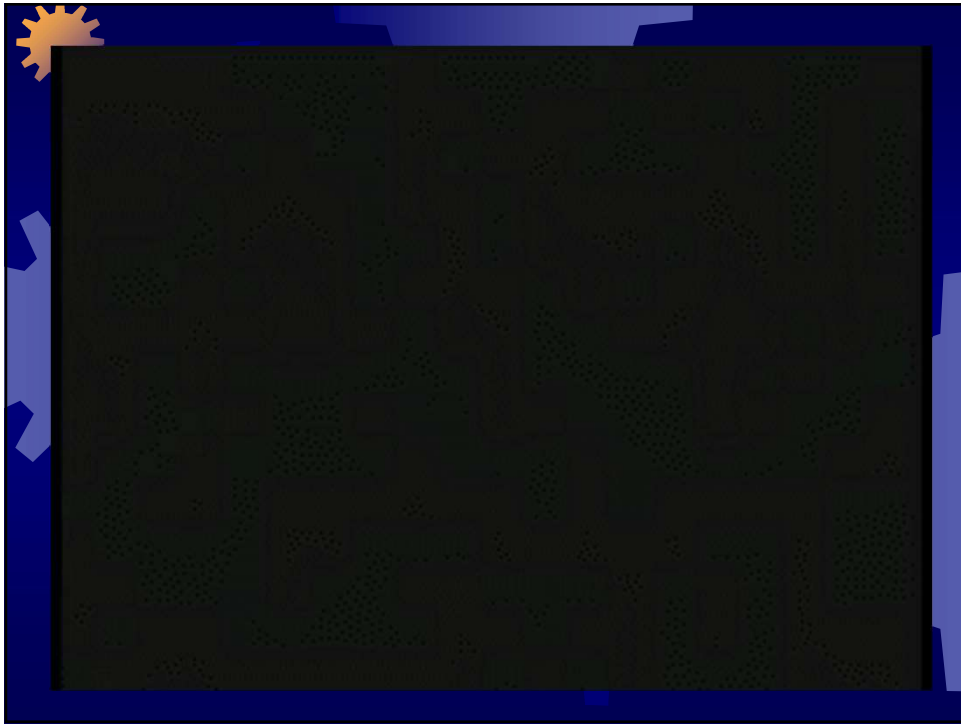
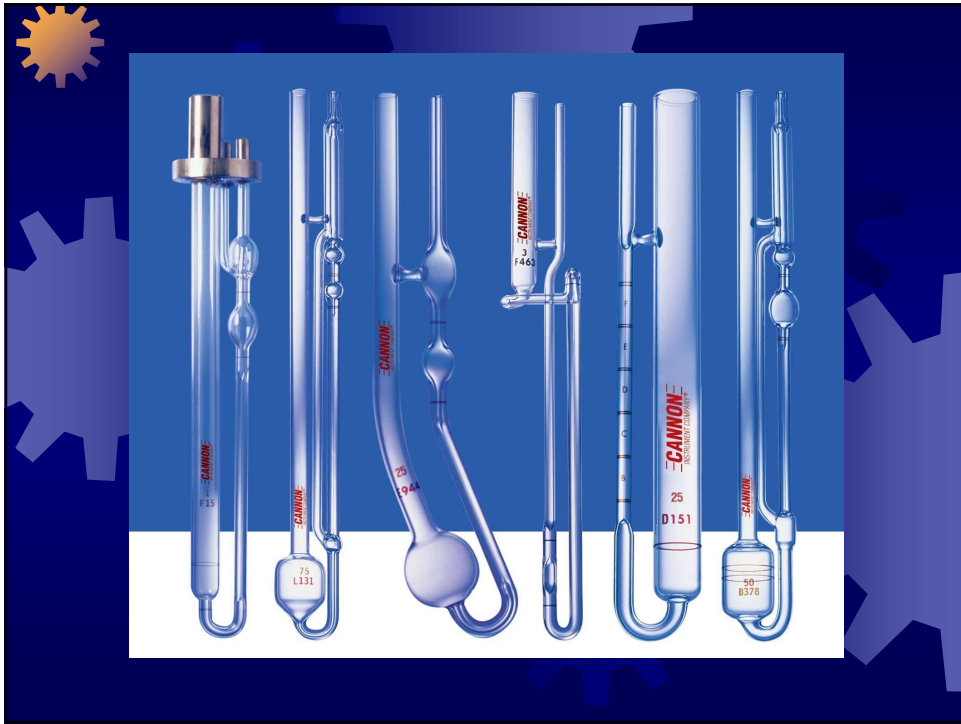
μ_{Φ} το φαινομενικό ιξώδες και N' οι στροφές ανά λεπτό.

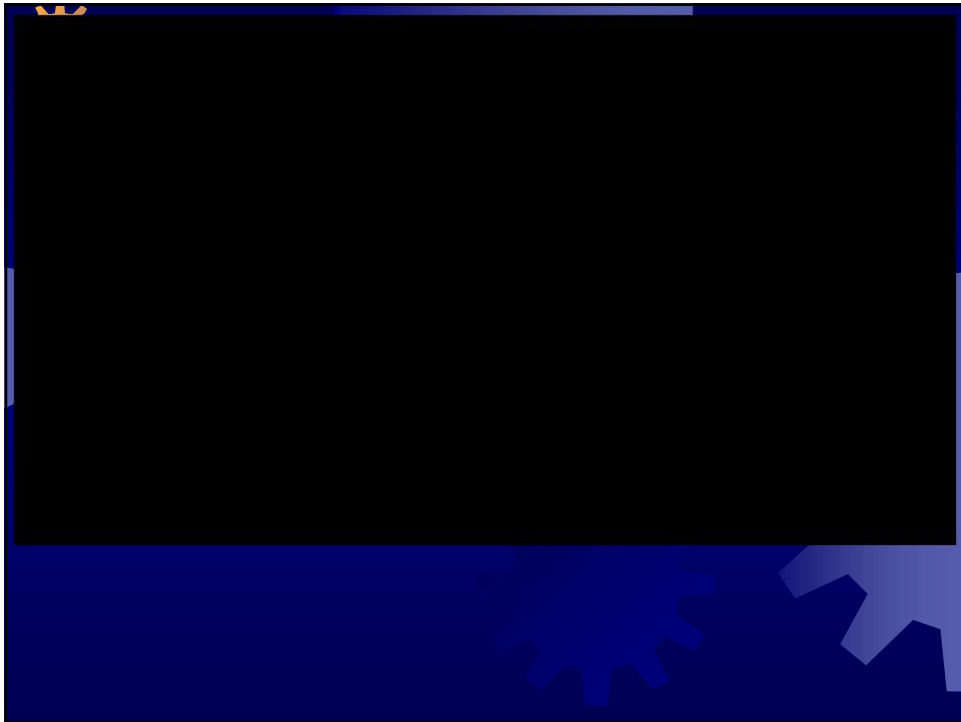
Πίνακας ρεολογικών σταθερών (b, n) ρευστών τροφίμων

| Προϊόν | T (°F) | Σύσταση | b (dyn s ⁿ /cm ²) | n |
|----------------------|--------|---------------|--|-------|
| Λάδι ελιάς | 68 | κανονική | 0,84 | 1,0 |
| Μέλι | 75 | κανονική | - | - |
| Λάδι σόγιας | 86 | κανονική | 0,4 | 1,0 |
| Γάλα ολόπαχο | 68 | κανονική | 0,0212 | 1,0 |
| Γάλα αποβουτυρωμένο | 77 | κανονική | 0,014 | 1,0 |
| Κρέμα γάλακτος | 37 | 20% λίπους | 0,062 | 1,0 |
| Κρέμα γάλακτος | 37 | 30% λίπους | 0,138 | 1,0 |
| Μηλοχυμός | 80 | 20 Brix | 0,021 | 1,0 |
| Μηλοχυμός | 80 | 60 Brix | 0,3 | 1,0 |
| Χυμός γκρέιπ | 80 | 20 Brix | 0,025 | 1,0 |
| Χυμός γκρέιπ | 80 | 60 Brix | 1,1 | 1,0 |
| Τοματοχυμός | 90 | 5,8% στερεά | 2,23 | 0,59 |
| Τοματοχυμός συμπ/νος | 90 | 30% στερεά | 187,0 | 0,4 |
| Πουρέ τομάτας | - | - | 9,2 | 0,554 |
| Σιρόπι καλαμποκισού | 80 | 48,4% στερεά | 0,053 | 1,0 |
| Πουρέ βερούκοκκο | 80 | 17,7% στερεά | 54,0 | 0,29 |
| Πουρέ βερούκοκκο | 77 | 19% στερεά | 200,0 | 0,3 |
| Πουρέ βερούκοκκο | 80 | 13,8% στερεά | 72,0 | 0,41 |
| Πουρέ μήλου | 80 | 11,6% στερεά | 127,0 | 0,28 |
| Πουρέ μήλου | 77 | 31,7% στερεά | 220,0 | 0,4 |
| Πουρέ αχλάδι | 80 | 14,6% στερεά | 53,0 | 0,38 |
| Πουρέ αχλάδι | 90 | 45,75% στερεά | 355,0 | 0,479 |
| Πουρέ ροδάκινο | 80 | 10,0% στερεά | 9,4 | 0,44 |
| Πουρέ μπανάνα | 75 | - | 107,0 | 0,333 |
| Πουρέ μπανάνα | 120 | - | 41,5 | 0,478 |

Τύποι ιξωδομέτρων







Ασκήσεις

- Εκτιμήστε το ιξώδες ρευστού που προκύπτει από ανάμιξη νερού με άμυλο με τελική συγκέντρωση 4,8% (κ.ο.).
- Ένα ρευστό με ιξώδες 50 cP απαιτεί χρόνο κένωσης 2 min σε γυάλινο ιξωδόμετρο. Ένα άλλο ρευστό στο ίδιο ιξωδόμετρο παρουσιάζει χρόνο κένωσης 2,5 min. Τα ρευστά έχουν την ίδια πυκνότητα. Ποιο το ιξώδες του άγνωστου ρευστού?
- Γιατί «μέση ταχύτητα» όταν εκτιμάμε την μαζική παροχή ενός ρευστού μέσω ενός αγωγού ?