



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

Μάθημα:

**“ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ -
ΡΕΟΛΟΓΙΑ”**

2_ΕΚΒΟΛΗ

Ακαδημαϊκό έτος 2023-2024

Μορφοποίηση θερμοπλαστικών πολυμερών



- Εκβολή



- Έγχυση



- Μόρφωση με φύσημα



- Θερμομόρφωση



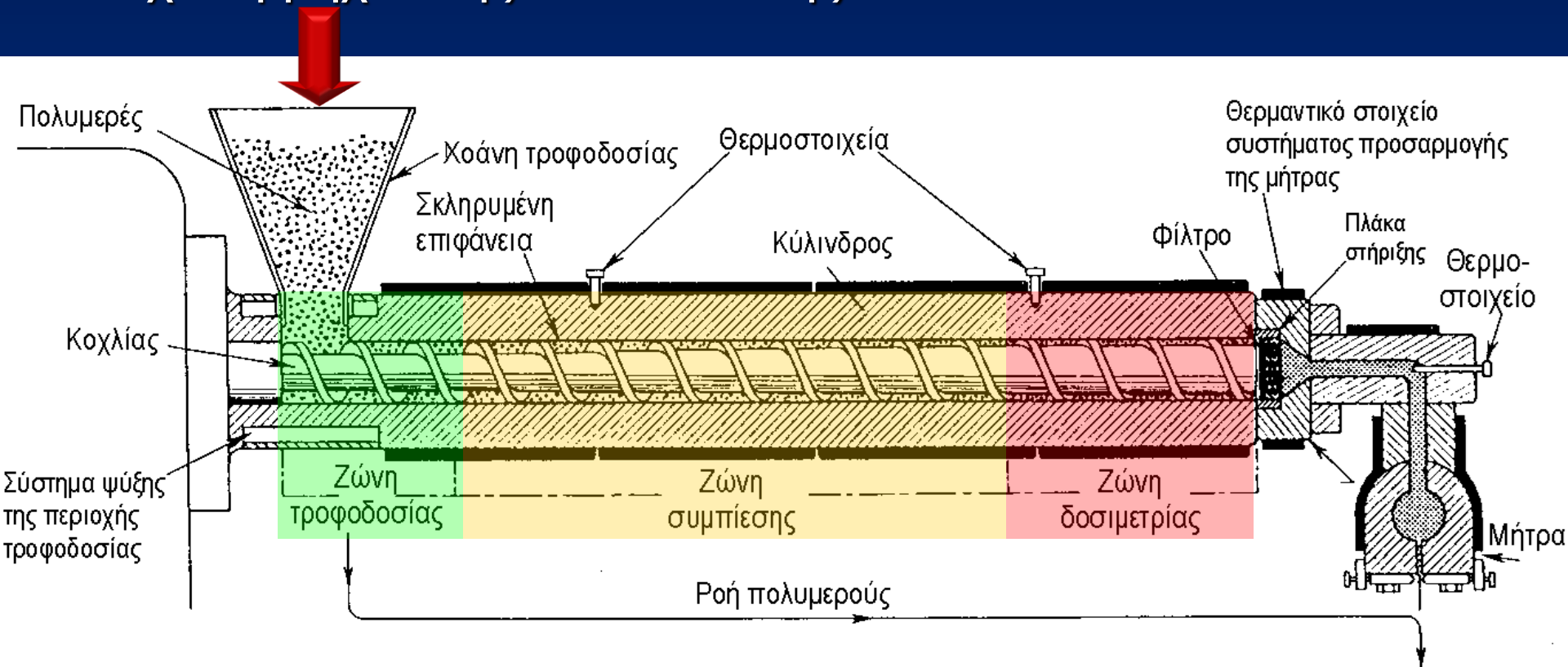
- Περιστροφική μόρφωση

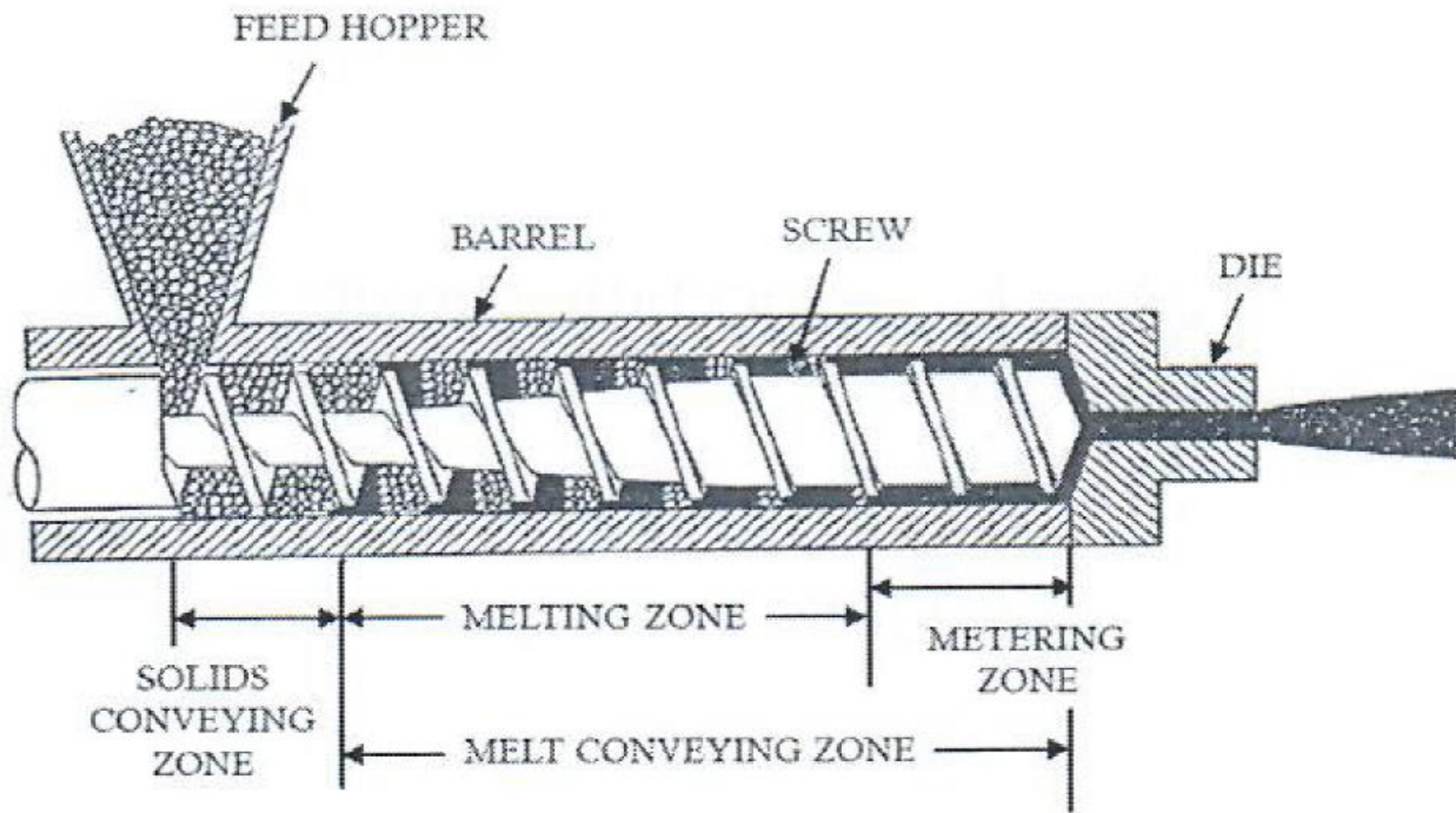


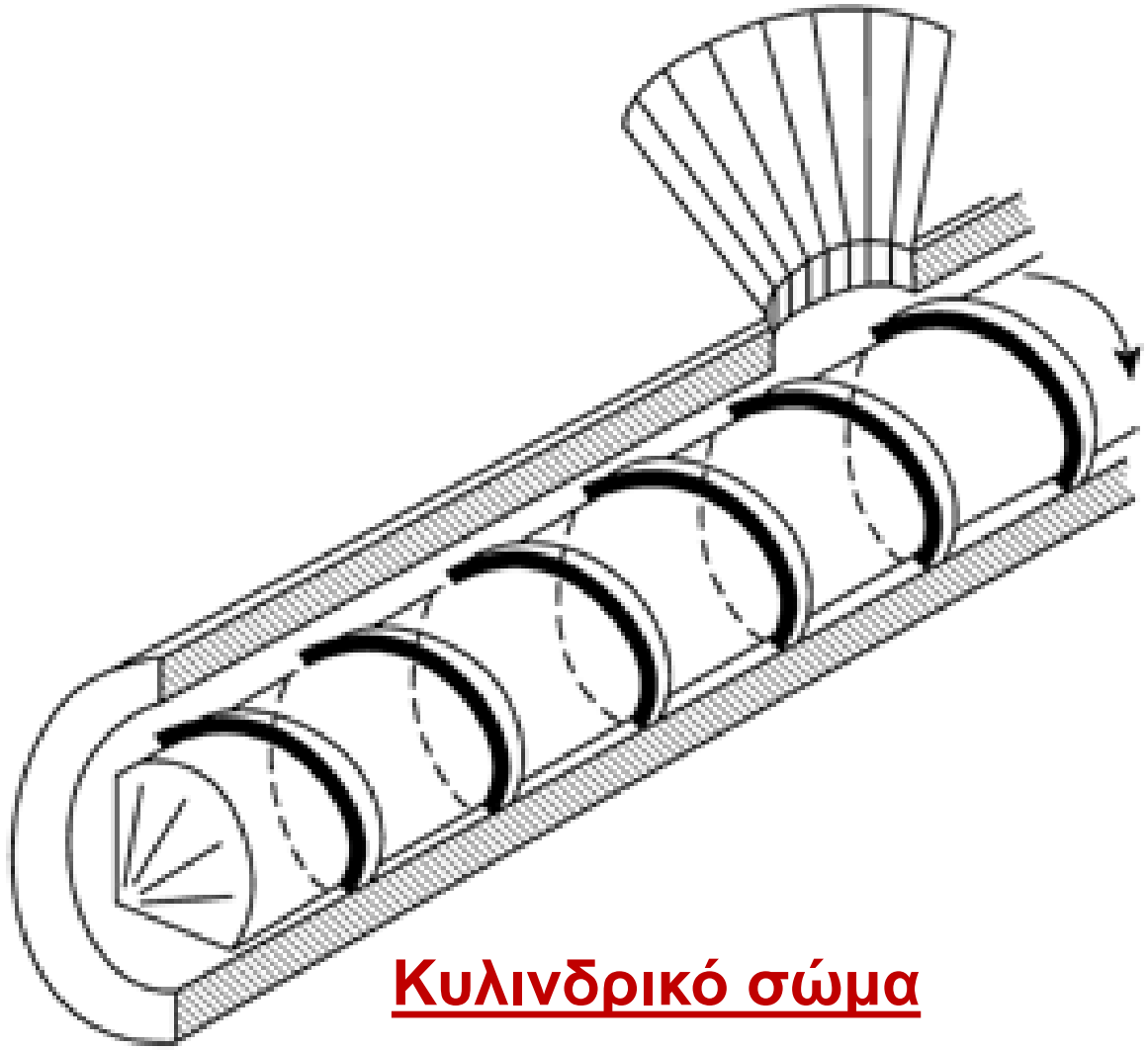
- Χύτευση-Συμπίεση

ΕΚΒΟΛΗ (EXTRUSION)

- Τεχνική ανάμειξης πολυμερών ή πολυμερούς προσθέτων
- Τεχνική μορφοποίησης (φιάλες, φιλμ, ίνες, προφίλ, επικάλυψη καλωδίων....)
- Τεχνική μηχανικής ανακύκλωσης πλαστικών



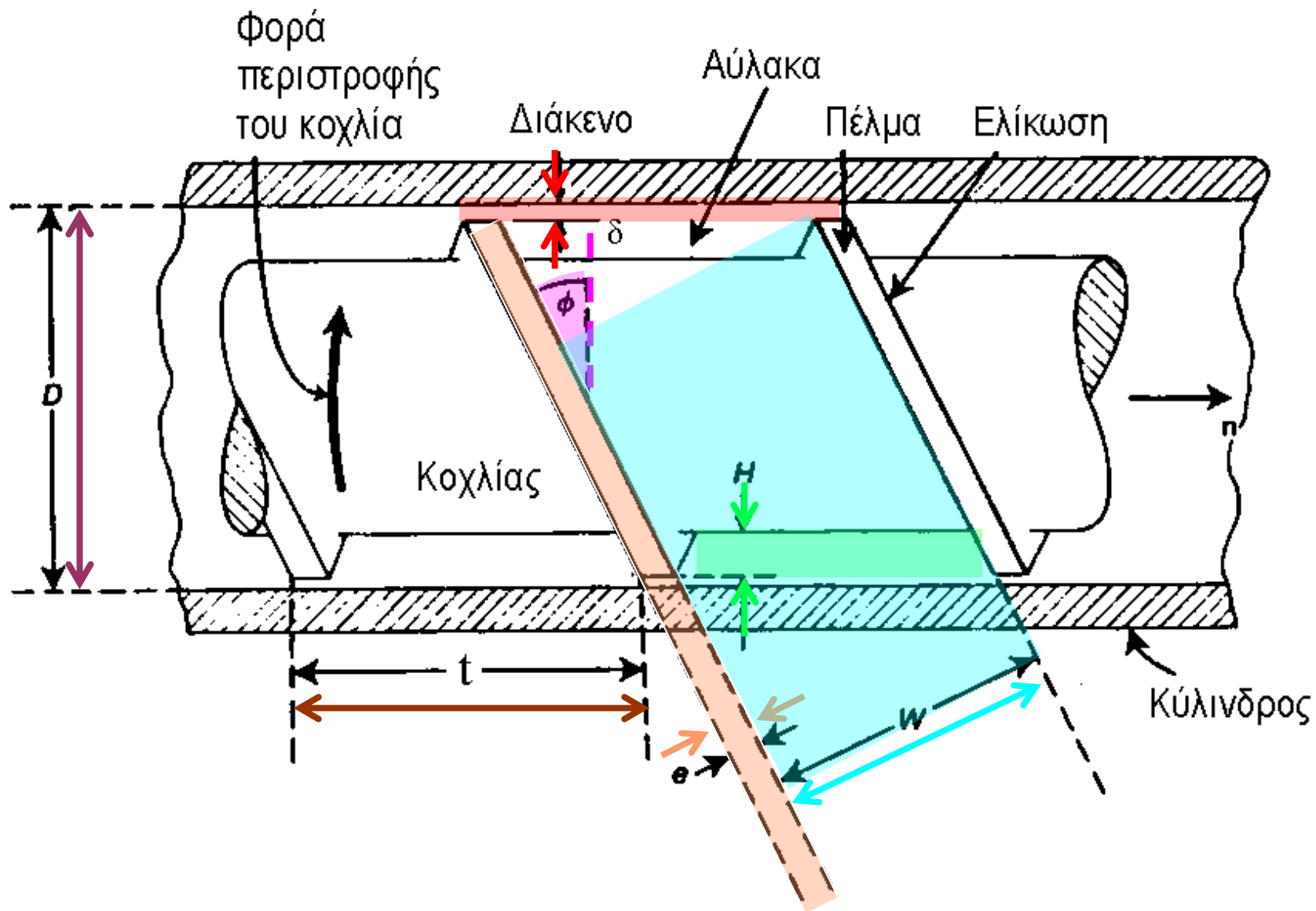




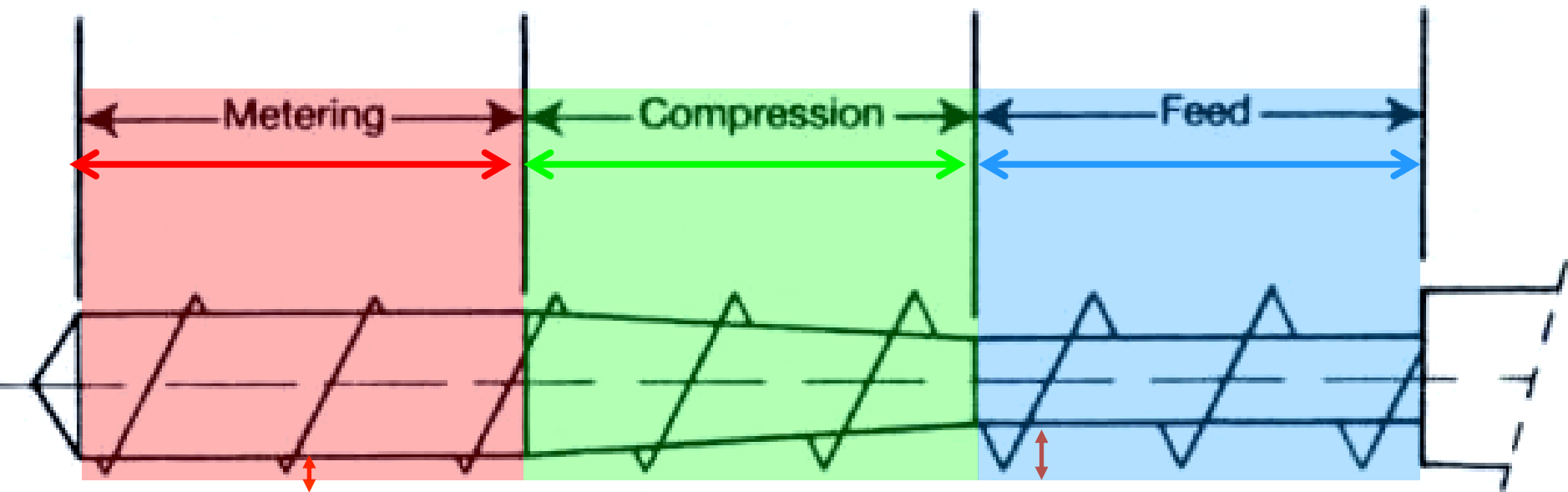
Κυλινδρικό σώμα

Η εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου αποτελεί το χώρο για:

- Μετάδοση θερμότητας
- Ανάπτυξη διατμητικών τάσεων



$t = D_s$: κοχλίας τετράγωνου βήματος $\Rightarrow \phi = 17.66^\circ$
 δ αμελητέο $\Rightarrow D_s = D_b = D$



Χαρακτηριστικά μέγεθ:

➤ **L/D**

16/1 μέχρι 32/1 για θερμοπλαστικά

4/1 μέχρι 7/1 για ελαστομερή

Λόγος συμπίεσης = $\frac{\text{Βάθος αύλακας στη ζώνη τροφοδοσίας}}{\text{Βάθος αύλακος στη ζώνη δοσιμετρίας}}$

1.1:1 μέχρι 5:1, τυπική τιμή 2.25:1

Rheomex Application

Extruders are generally used to:

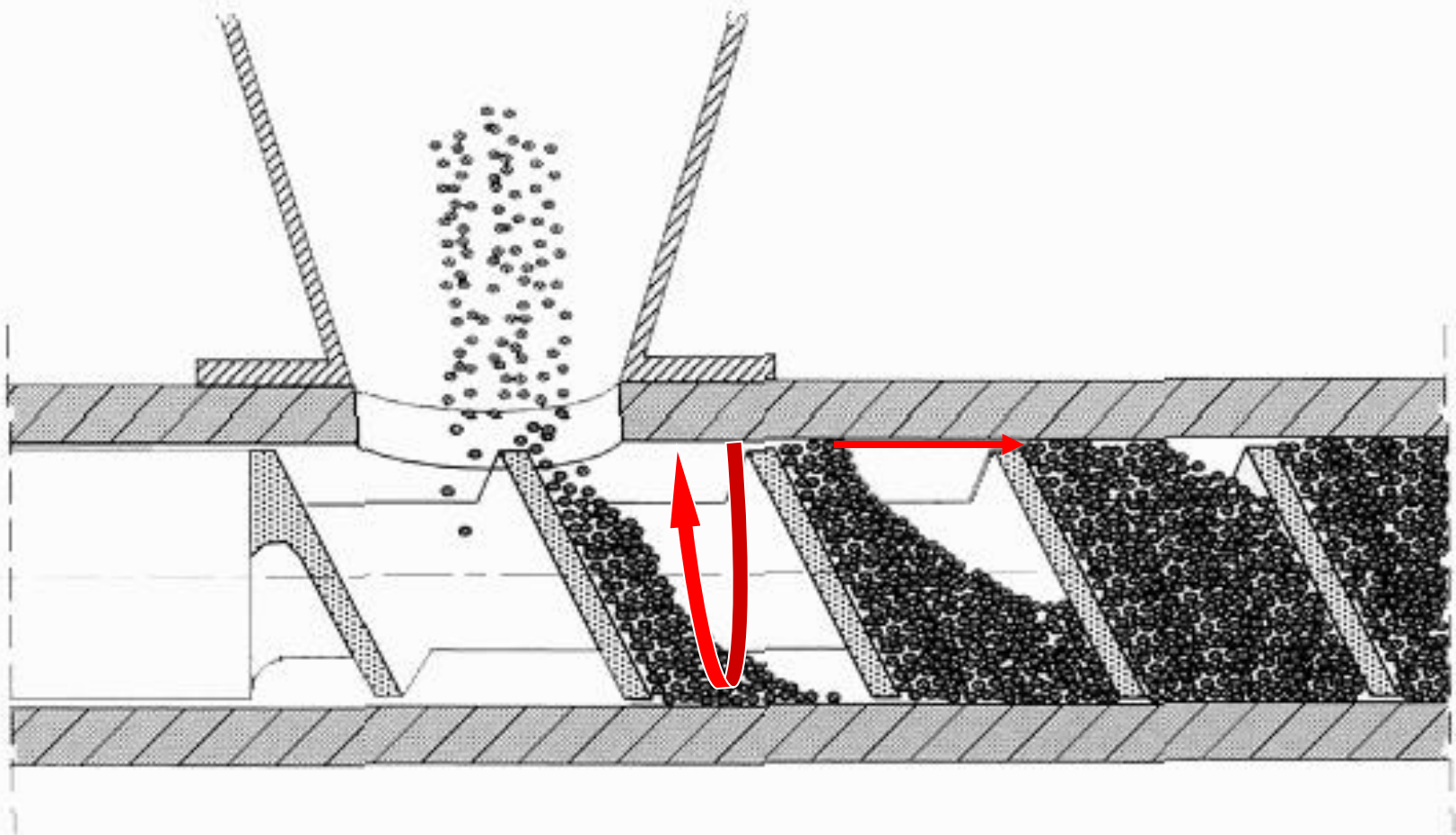
- transport material
- plasticize
- compress
- homogenize
- compound
- vent
- chemical reaction
- building up pressure



Ζώνη τροφοδοσίας (feed section)

Ταχύτερη μεταφορά κόκκων προς την έξοδο:

- Μικρότερη τριβή μεταξύ κοχλία και κόκκων
- Μεγαλύτερη τριβή μεταξύ κόκκων και κυλίνδρου

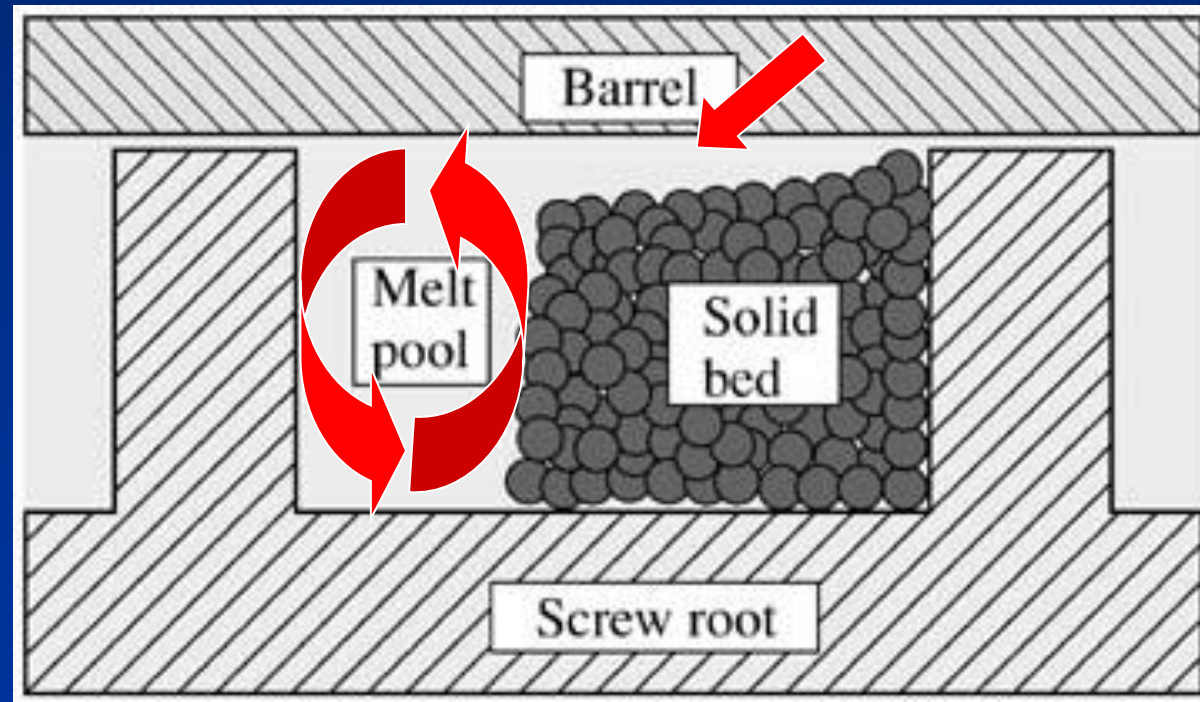


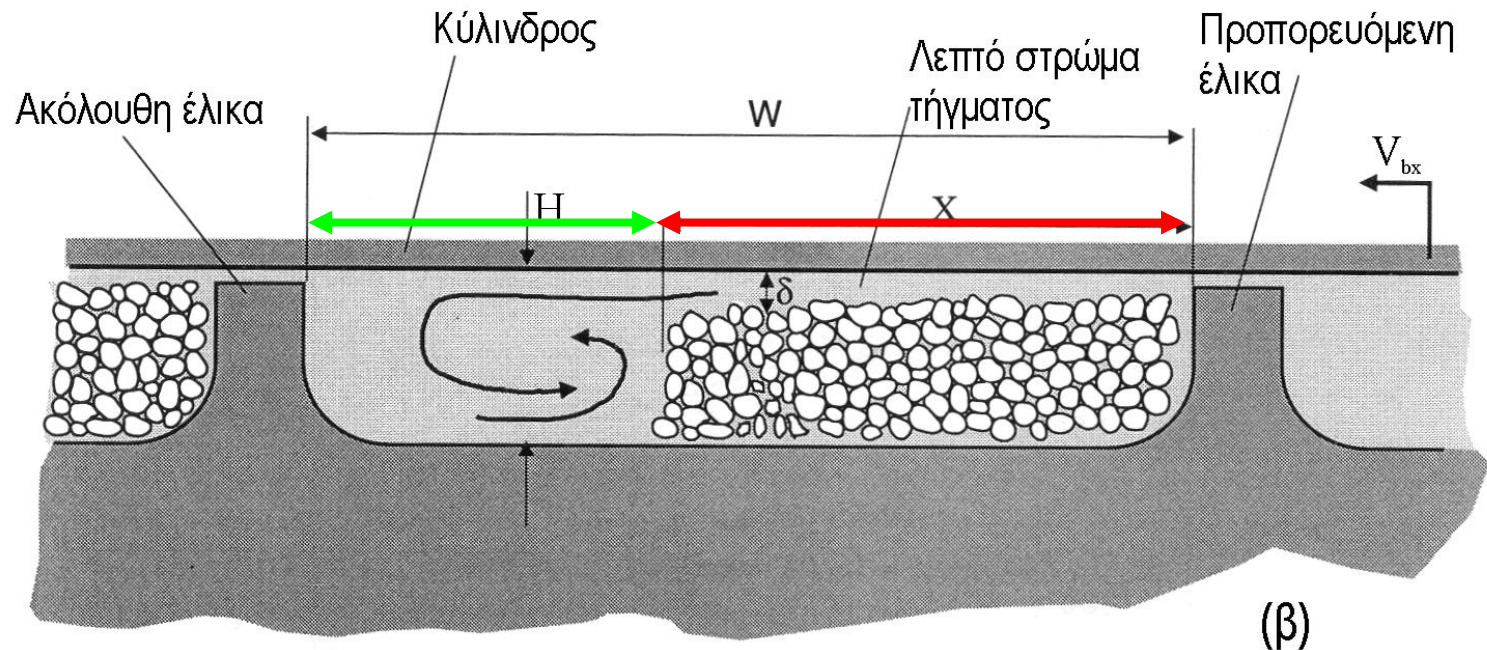
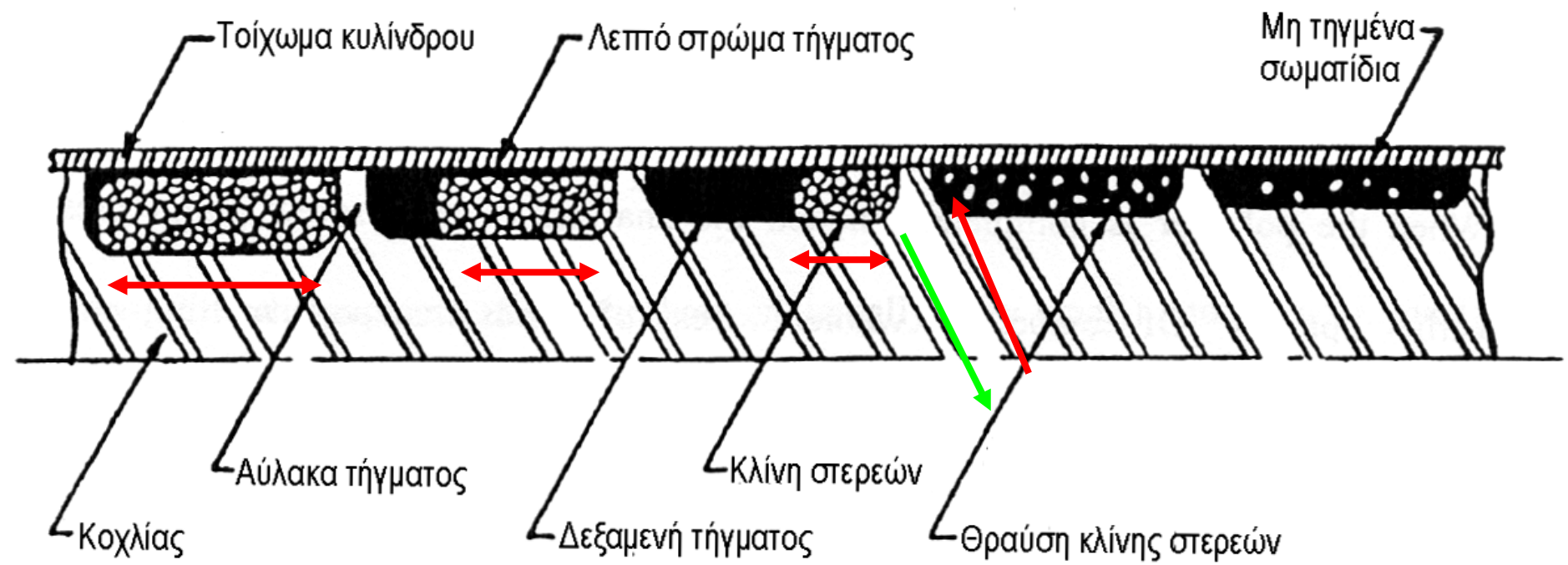
Μηχανισμός τήξης κατά την εκβολή

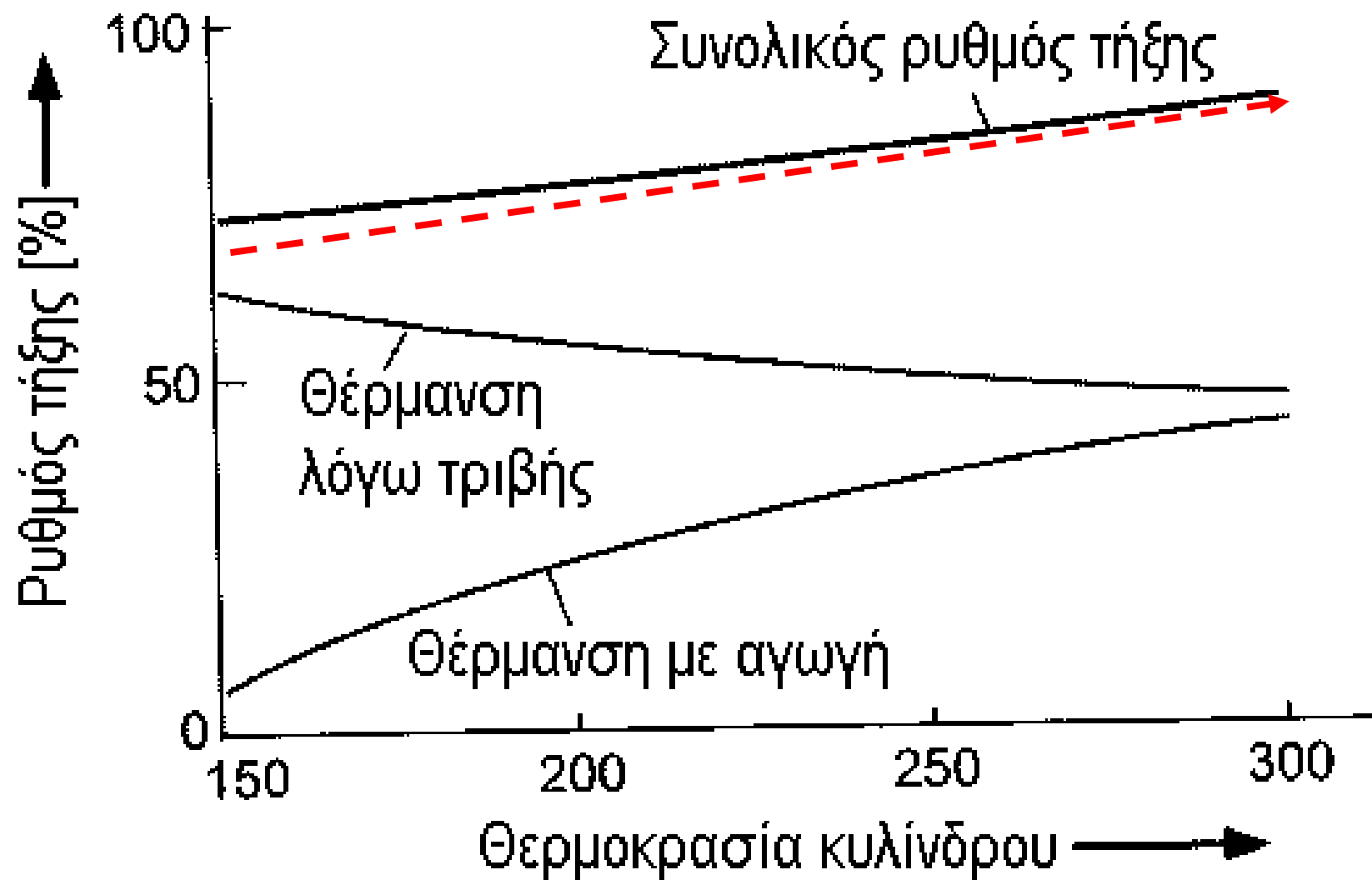
I. Θεωρητικό μοντέλο τήξης κλίνης στερεών σωματιδίων

- ❖ Σχηματισμός λεπτού υμένα από τήγμα στην επιφάνεια του κυλίνδρου.
- ❖ Ο κοχλίας «σκουπίζει» το υμένιο προς τον άξονα του κοχλία και ξανά προς τον κύλινδρο.
- ❖ Με την περιστροφή του κοχλία συμπαρασύρεται και νέο τήγμα

Δημιουργείται δεξαμενή τήγματος μέσα στην οποία συμπαρασύρονται και στερεοί κόκκοι.





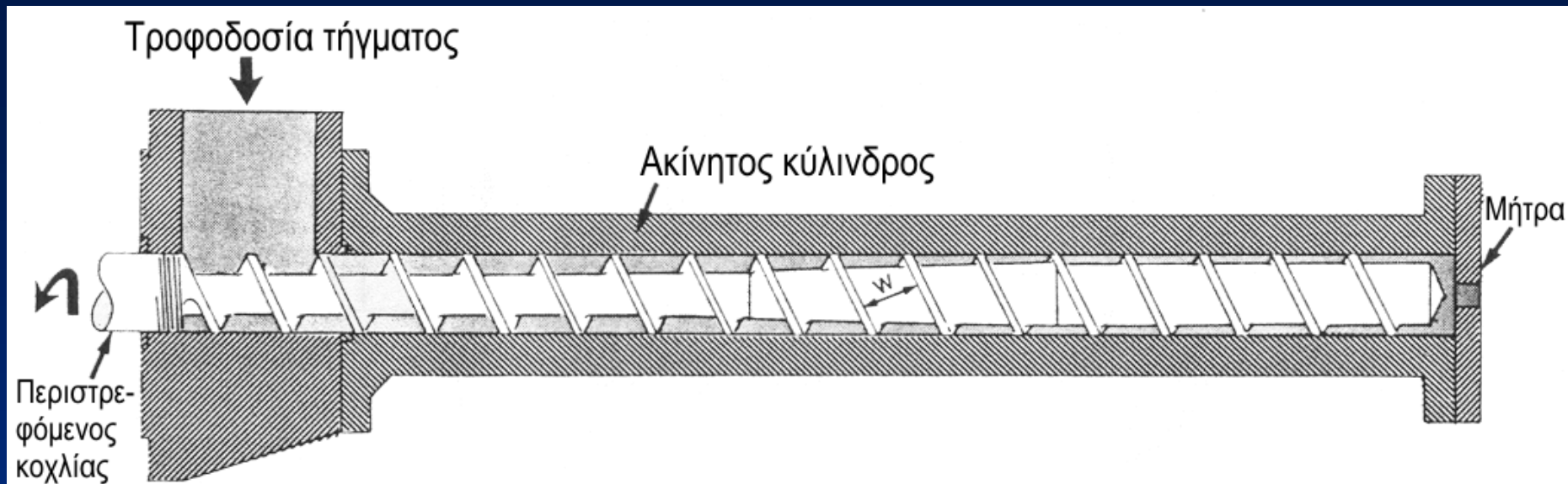


Όταν το ιξώδες του τήγματος δεν είναι πολύ ευαίσθητο στις μεταβολές της θερμοκρασίας, αύξηση της θερμοκρασίας του κυλίνδρου θα επιφέρει μικρή μείωση στη θερμότητα λόγω τριβής.

Ποσοτική ανάλυση της ροής σε μονοκόχλιο εκβολέα

- 👉 Ανάλυση στη ζώνη δοσιμετρίας όπου βρίσκεται σε ισοθερμοκρασιακή κατάσταση.
- 👉 Σταθερό ιξώδες μ .
- 👉 Η ροή λαμβάνει χώρα σε μία αβαθή αύλακα.

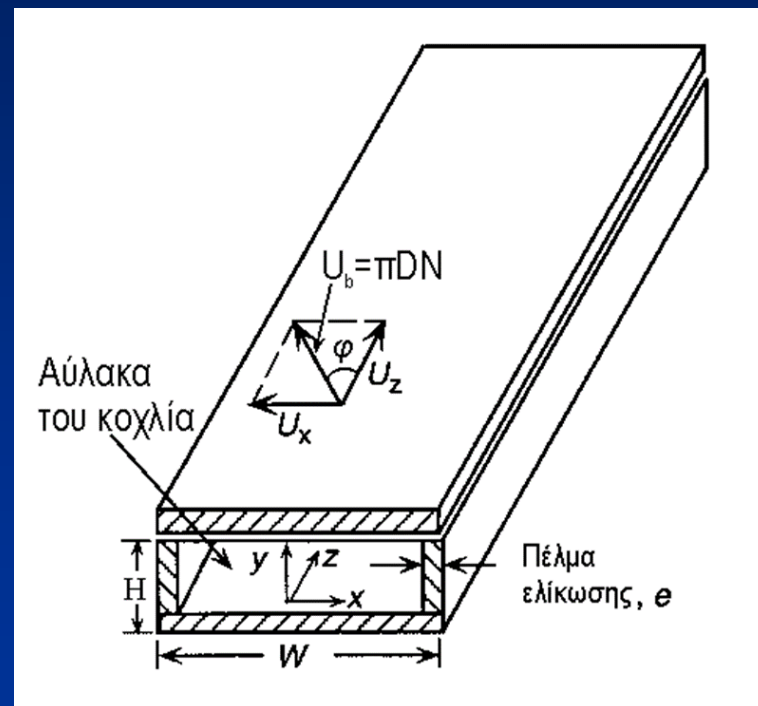
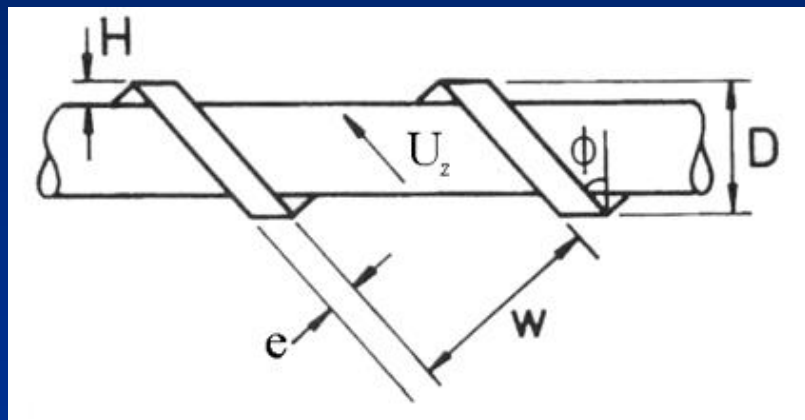
Ρεολογική συμπεριφορά στη ζώνη δοσιμετρίας του εκβολέα



- ✓ η ροή είναι στρωτή
- ✓ η ροή είναι ισοθερμοκρασιακή
- ✓ δεν παρατηρείται ολίσθηση στα τοιχώματα
- ✓ το ρευστό είναι νευτωνικό και ασυμπίεστο
- ✓ οι δυνάμεις βαρύτητας αγνοούνται
- ✓ δεν υπάρχει ροή στις κατευθύνσεις x και y ($v_x = v_y = 0$)
- ✓ η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη

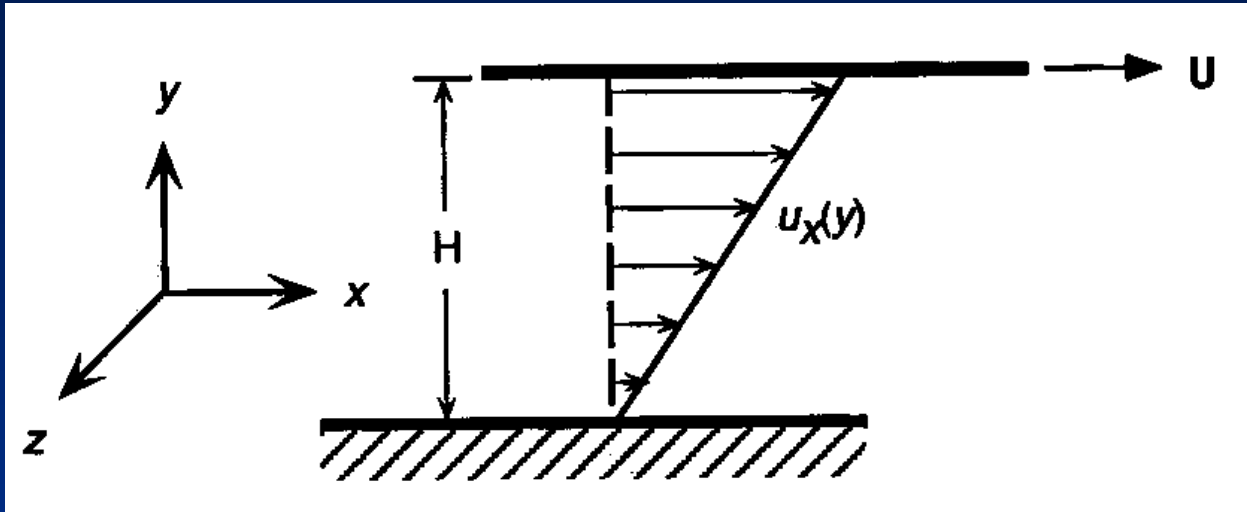
Ποσοτική ανάλυση της ροής σε μονοκόχλιο εκβολέα

Ας υποθέσουμε ότι ξεδιπλώνουμε τον κοχλία μέσα στον κύλινδρο:
Δημιουργείται κανάλι πλάτους W , βάθους H και μήκους L
Θεωρούμε ότι ο κοχλίας παραμένει ακίνητος και το τοίχωμα του κυλίνδρου περιστρέφεται με ταχύτητα $U_b = \pi D N$

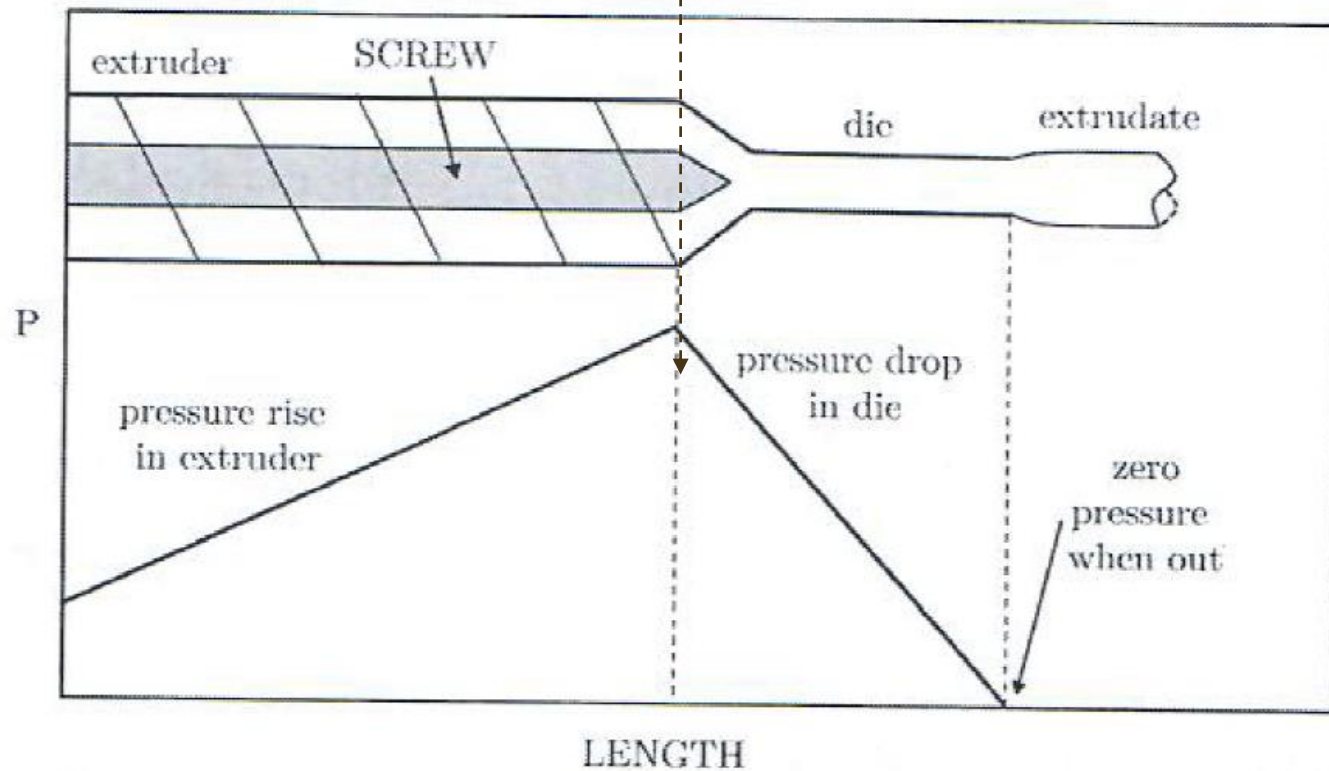
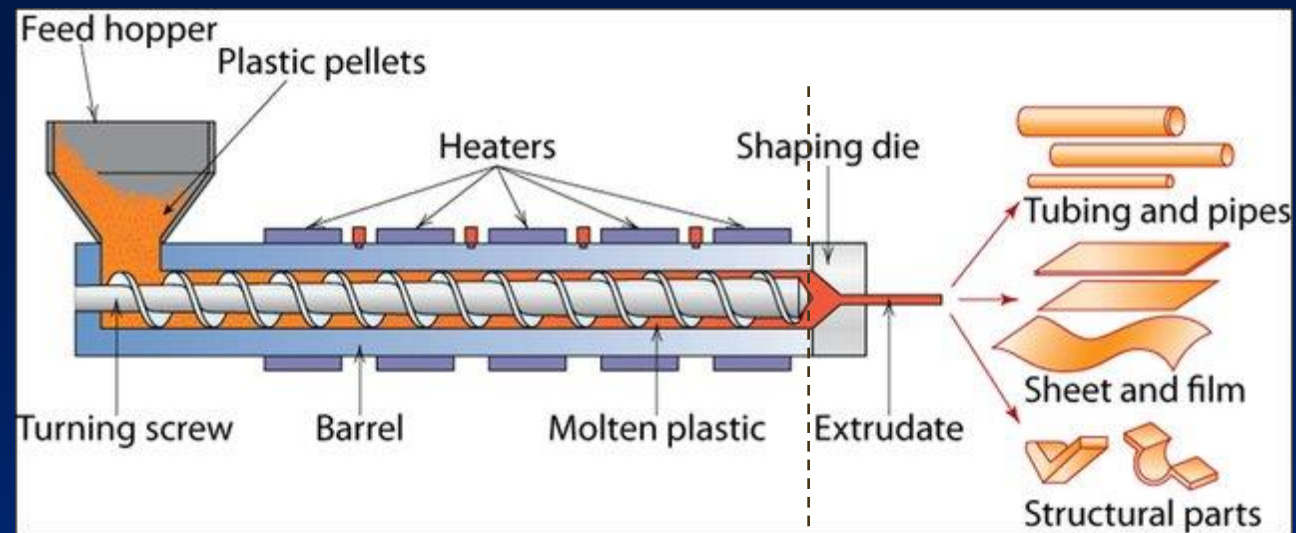


Ροή λόγω οπισθέλκουσας Q_d :

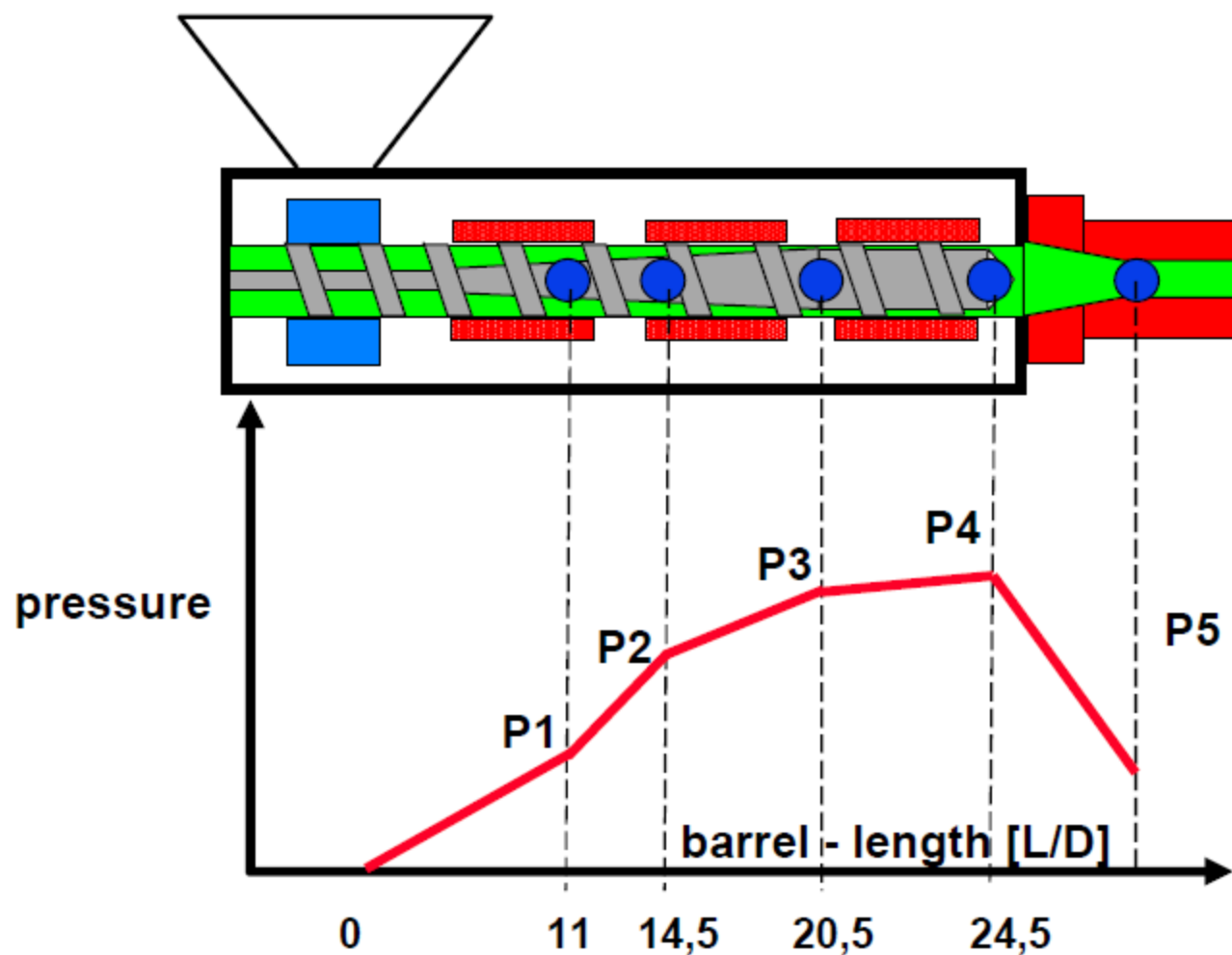
Η ροή οφείλεται στην κίνηση της μιας πλάκας



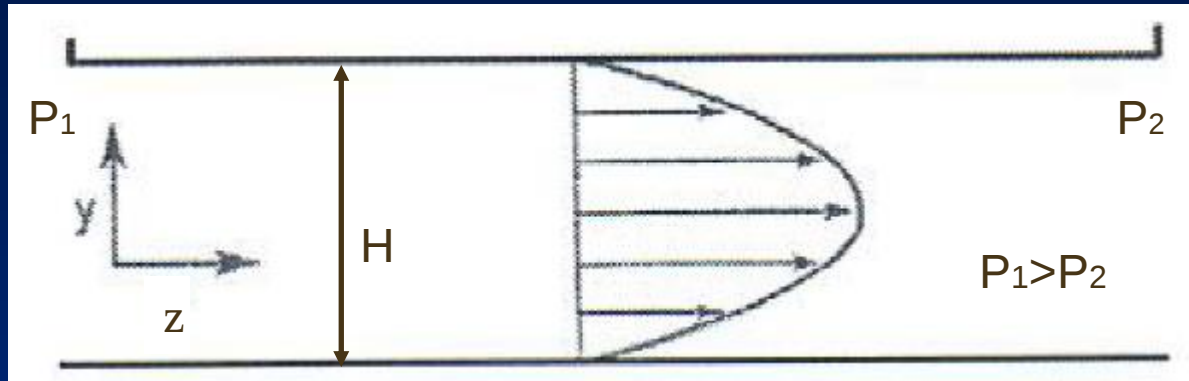
$$Q = \bar{v} \cdot A = \frac{1}{2} U H W$$



Pressure built-up in a single screw extruder



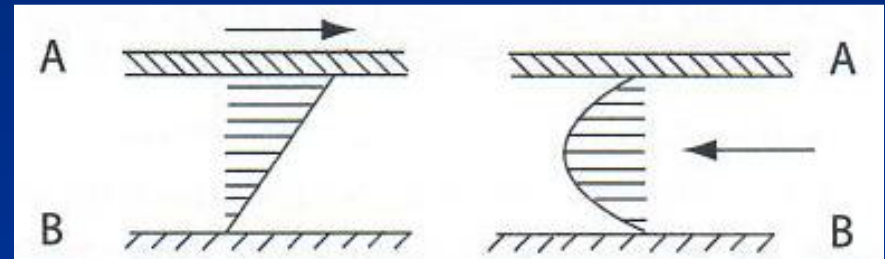
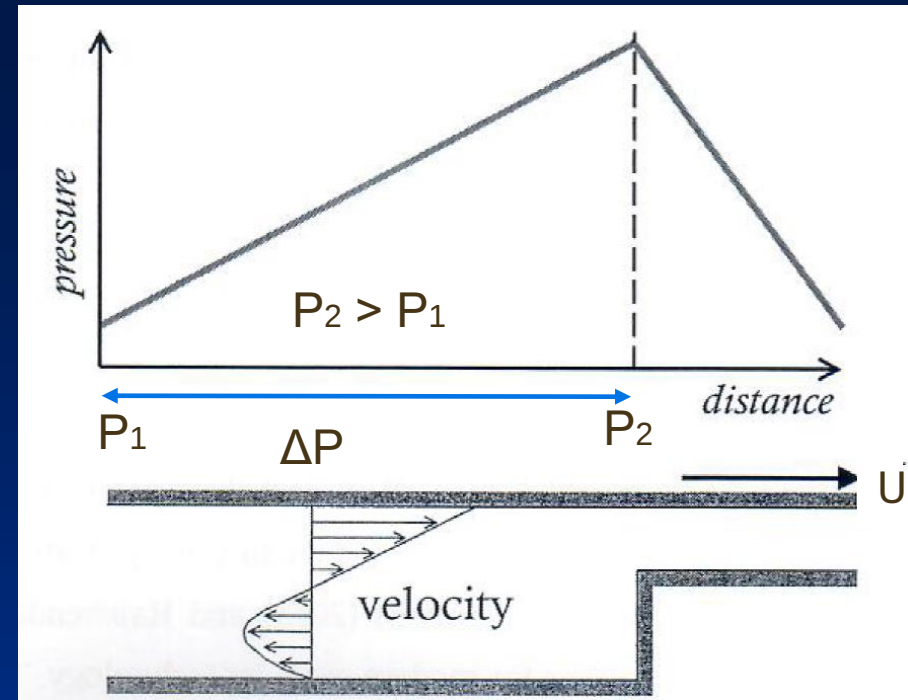
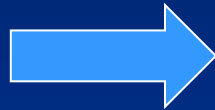
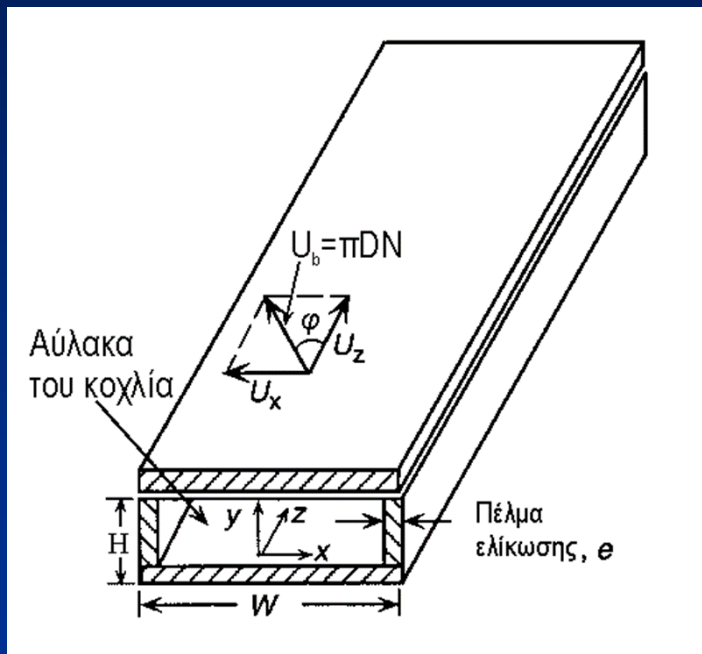
Ροή λόγω πίεσης Q_p



$$Q_P = \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{dP}{dz}$$

Συνδυασμός ροής λόγω οπισθέλκουσας και πίεσης:

Η ροή που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο πλακών όταν το ένα άκρο είναι κατά ένα μέρος κλειστό και αναπτύσσεται πίεση



$$Q = Q_d + Q_p = \frac{1}{2}UHW - \frac{H^3W}{12\mu} \frac{dP}{dz} = \frac{1}{2}UHW - \frac{H^3W}{12\mu} \frac{\Delta P}{z}$$

$$U_b = \pi D N$$

$$U_z = U_b \cos \phi = \pi D N \cos \phi$$

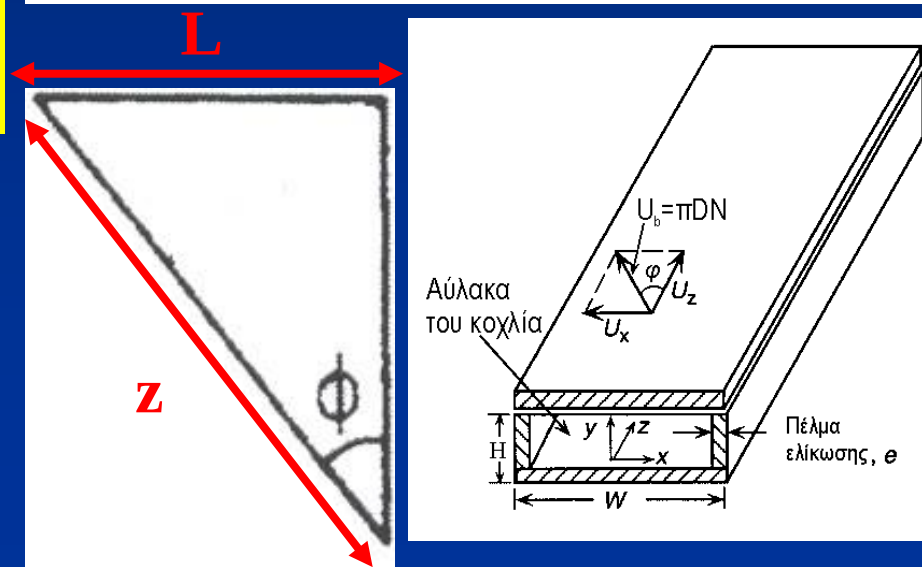
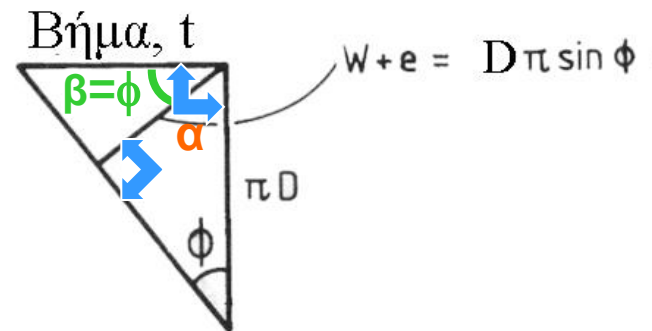
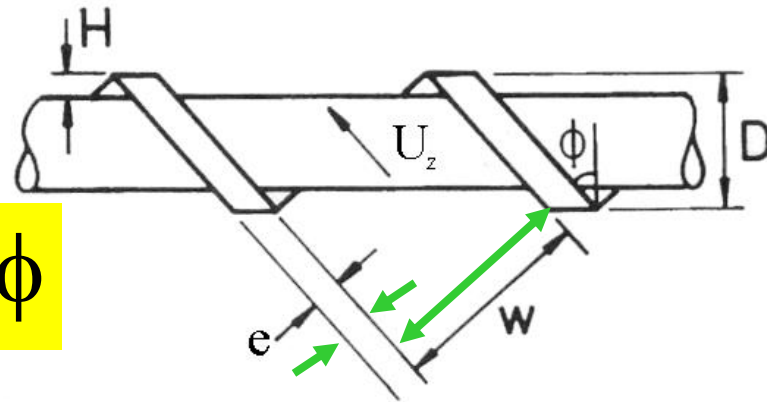
$$t = \pi D \tan \phi$$

$$\cos \phi = \frac{W + e}{t} \Rightarrow$$

$$W = t \cos \phi - e \Rightarrow W \approx t \cos \phi$$

$$W = \pi D \tan \phi \cos \phi - e = \pi D \sin \phi - e \approx \pi D \sin \phi$$

$$z = L / \sin \phi$$



Εξίσωση ροής σε σύστημα εκβολής

$$Q = \frac{1}{2} U_z H W - \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \sin \phi = \frac{1}{2} U_z H W - \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \sin \phi$$

$$U_z = \pi D N \cos \phi$$

$$W = \pi D \sin \phi - e$$

$$Q \stackrel{e=0}{\approx} \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12\mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L}$$

$$Q = Q_d - Q_p$$



$$Q = AN - C \frac{\Delta P}{\mu}$$

$$Q_L = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3}{12\mu e} \tan \phi \frac{\Delta P}{L}$$

Για δεδομένο εκβολέα τα μεγέθη **D**, **L**, **H** και **φ** είναι δεδομένα:

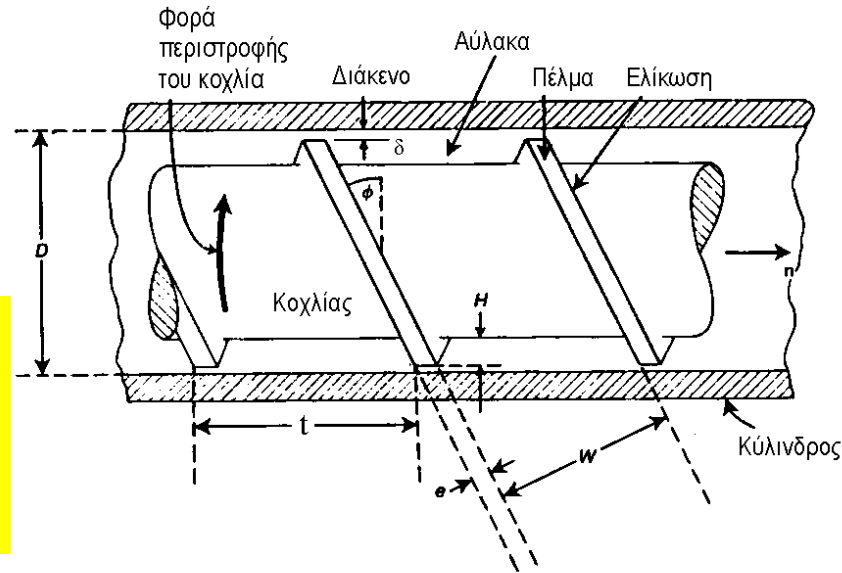
$$Q = Q_d - Q_p$$

$$Q = \frac{1}{2} U_z H W - \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \sin \phi$$

$$U_z = \pi D N \cos \phi$$

$$W = t \cos \phi - e = \pi D \sin \phi - e$$

$$Q \approx \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12\mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L}$$



$$Q = AN - C \frac{\Delta P}{\mu}$$

$$Q \approx \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12 \mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L}$$

I. Δεν αναπτύσσεται πίεση στο άκρο του εκβολέα ($\Delta P = 0$)

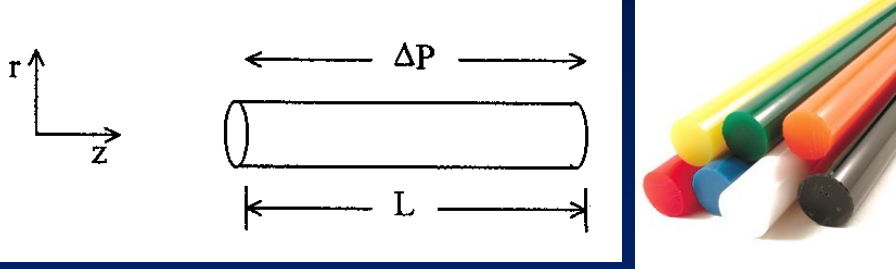
$$Q_{\max} = Q_d = \frac{\pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi}{2}$$

II. Η πίεση είναι αρκετά μεγάλη ώστε να εμποδίζει την εξώθηση του ρευστού ($Q = 0$), και μπορούμε να ισορροπήσουμε την Q_d και Q_p .

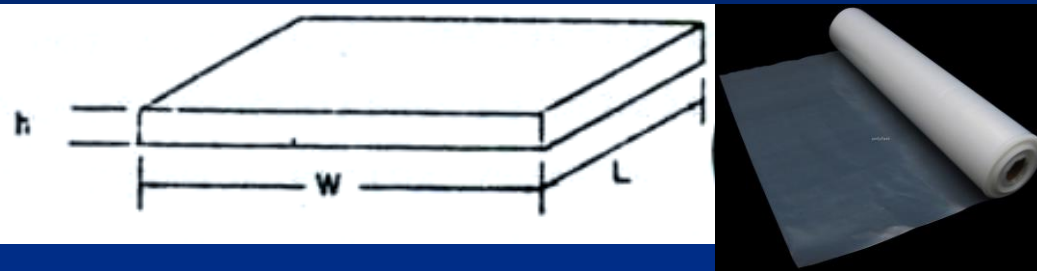
$$\Delta P_{\max} = \frac{6 \pi D L N \mu}{H^2 \tan \phi}$$

Μήτρα μορφοποίησης

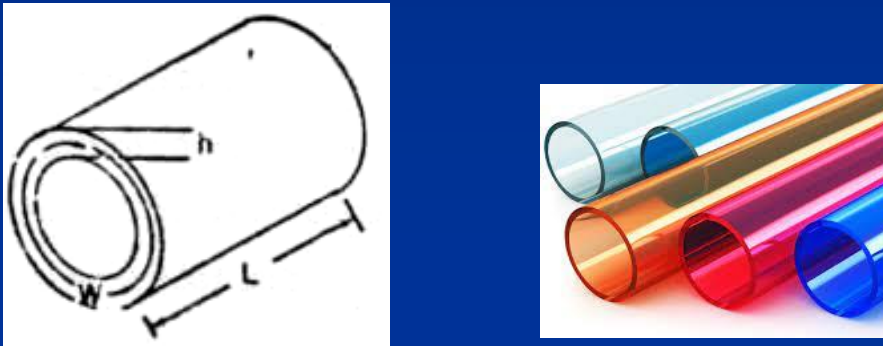
Μήτρα κυκλικής διατομής



Μήτρα επίπεδης σχισμής



Μήτρα με διάκενο δακτυλίου



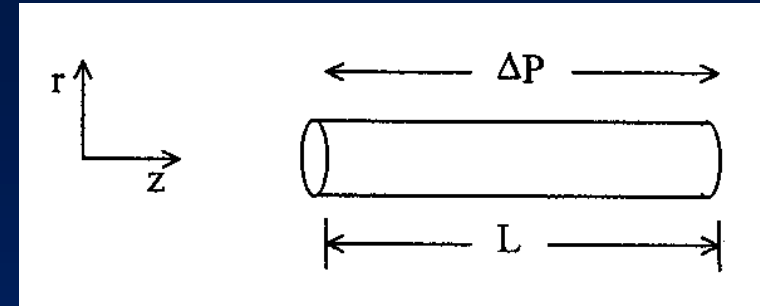
Εξίσωση ροής στη μήτρα

Μήτρα με κυκλικό άνοιγμα

Εξίσωση Hagen-Poiseuille

Παραδοχές:

- Ισοθερμοκρασιακές συνθήκες
- Νευτωνική συμπεριφορά



$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

Q: ογκομετρικός ρυθμός εξώθησης

ΔP: πτώση πίεσης της μήτρας

R: ακτίνα της μήτρας

L_d: μήκος της μήτρας

μ : ιξώδες τήγματος

Εξίσωση ροής στη μήτρα

Μήτρα με μορφή σχισμής

- Ευθεία σχισμή
- Κυκλική σχισμή (δακτυλιοειδής)

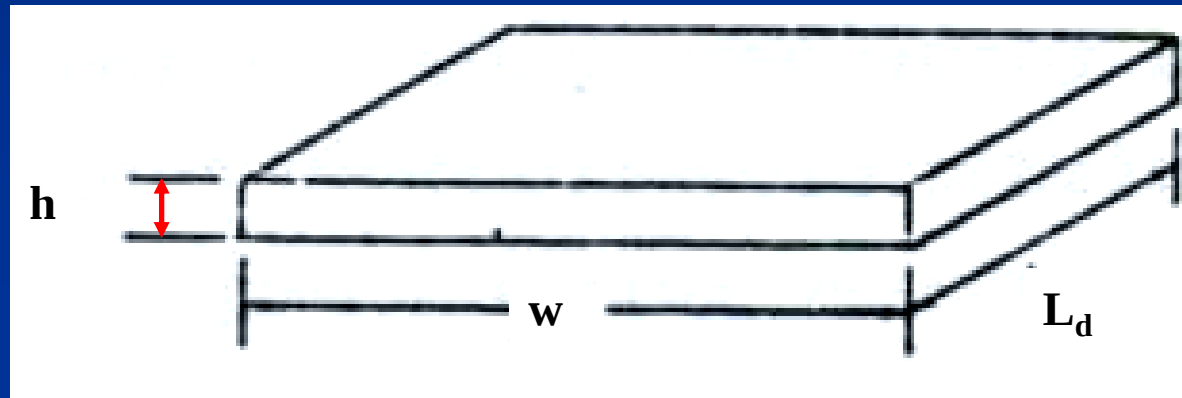
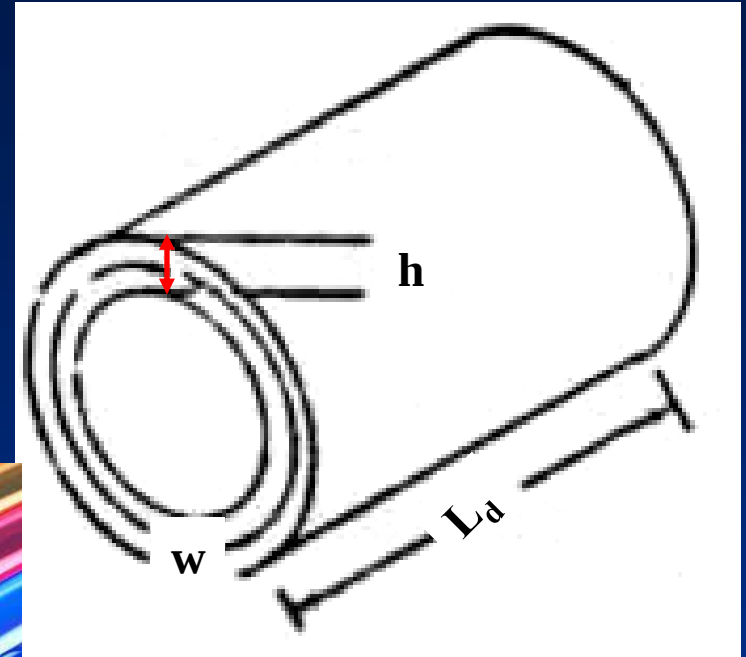
h: άνοιγμα μήτρας

w: πλάτος της μήτρας

L_d: μήκος της μήτρας

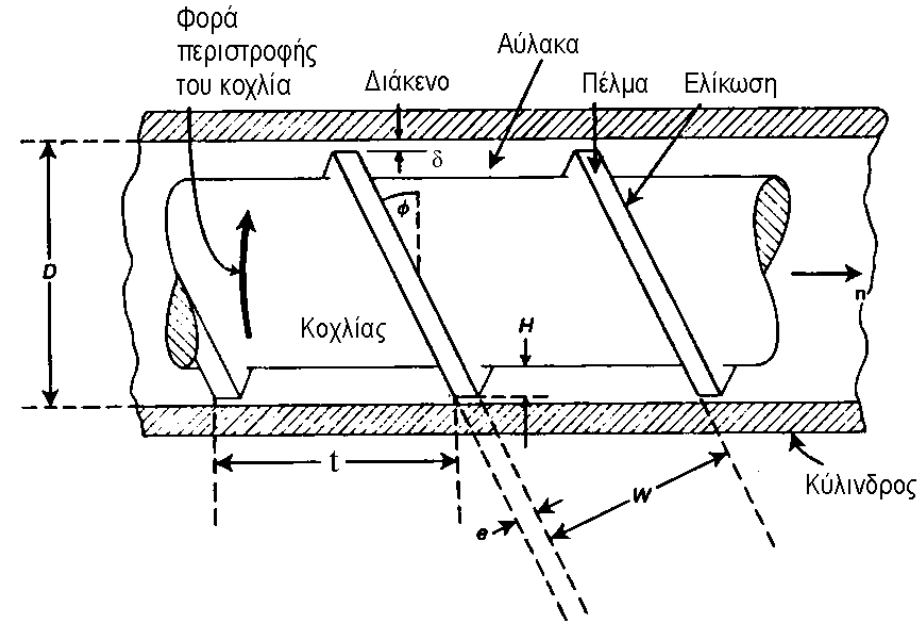
$$Q = \frac{wh^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{6Q}{wh^2}$$



$$Q = Q_d - Q_p$$

$$Q = \frac{1}{2} U_z HW - \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \sin \phi$$



$$Q \approx \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12\mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L}$$

Μήτρα με κυκλικό άνοιγμα

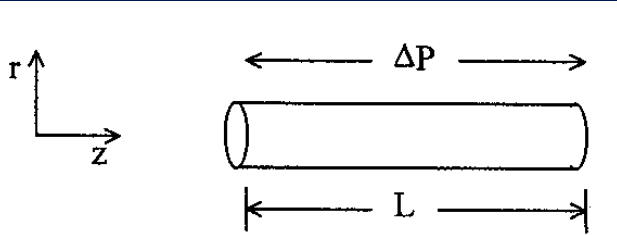
$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

Μήτρα με μορφή σχισμής

$$Q = \frac{wh^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

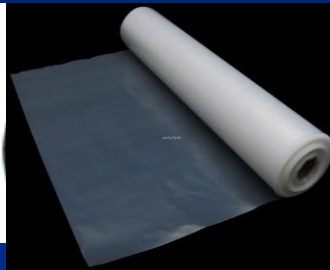
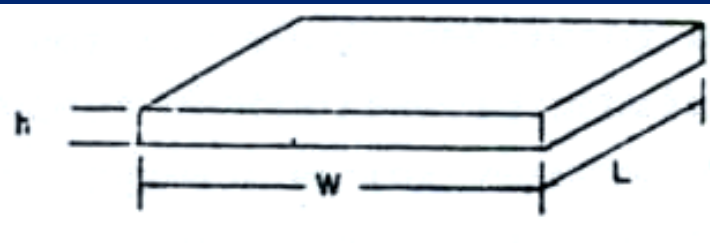
Μήτρα μορφοποίησης

Μήτρα κυκλικής διατομής



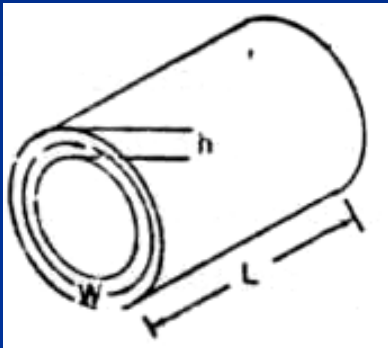
$$Q_{\text{μήτρας}} = \frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

Μήτρα επίπεδης σχισμής



$$Q_{\text{μήτρας}} = \frac{wh^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

Μήτρα με διάκενο δακτυλίου



Σχέση κοχλία-μήτρας

➡ Μεγάλη παροχή για τον εκβολέα:

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 N h \eta \mu \phi \sigma \nu \phi}{2} - \frac{\pi D h^3 \eta \mu^2 \phi \Delta P}{12 \mu L}$$

Απαιτεί χαμηλή πίεση στην έξοδο.

➡ Μεγάλη παροχή για τη μήτρα:

$$Q = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 \mu L_d}$$

Απαιτεί μεγάλη πίεση στην είσοδό της δηλαδή στην έξοδο του εκβολέα.

Σχέση εκβολέα-μήτρας μορφοποίησης

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 N H \eta \mu \phi \sigma \nu \phi}{2} - \frac{\pi D H^3 \eta \mu^2 \phi}{12 \mu} \frac{\Delta P}{L}$$

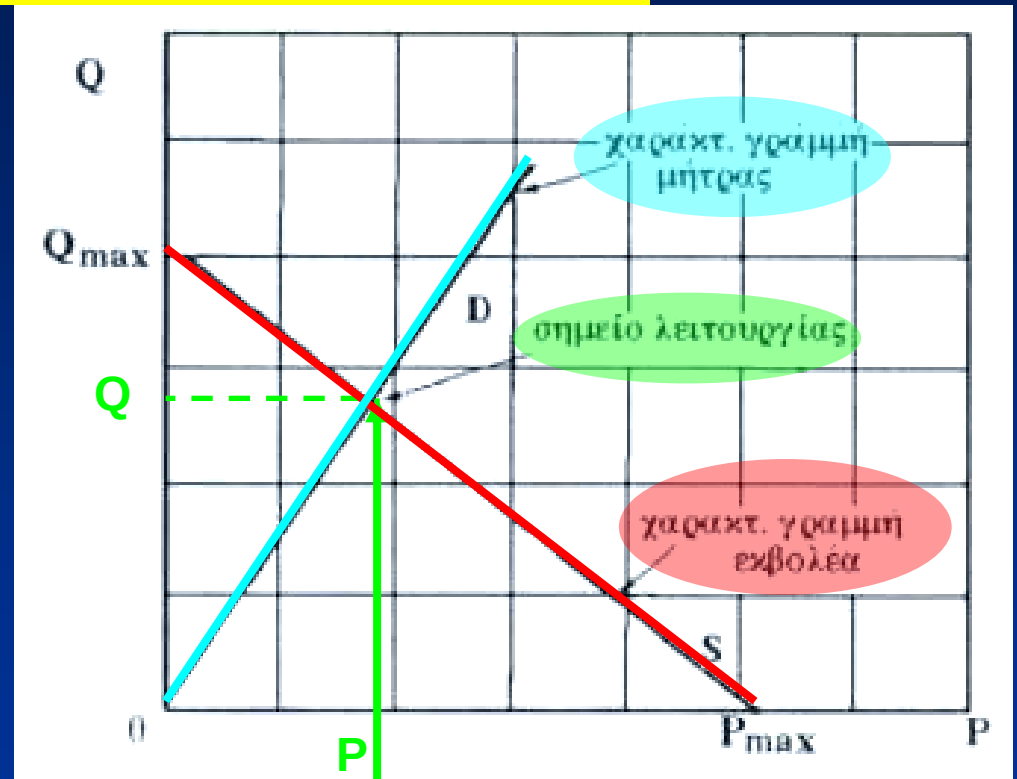
Μήτρα με κυκλικό άνοιγμα

$$Q_{\text{μήτρας}} = \frac{\pi R^4}{8 \mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

Μήτρα με μορφή σχισμής

$$Q_{\text{μήτρας}} = \frac{w h^3}{12 \mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

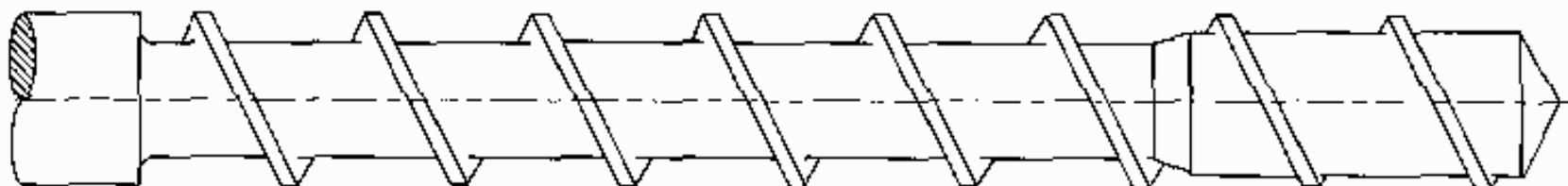
$$Q_{\text{εκβολέα}} = Q_{\text{μήτρας}}$$



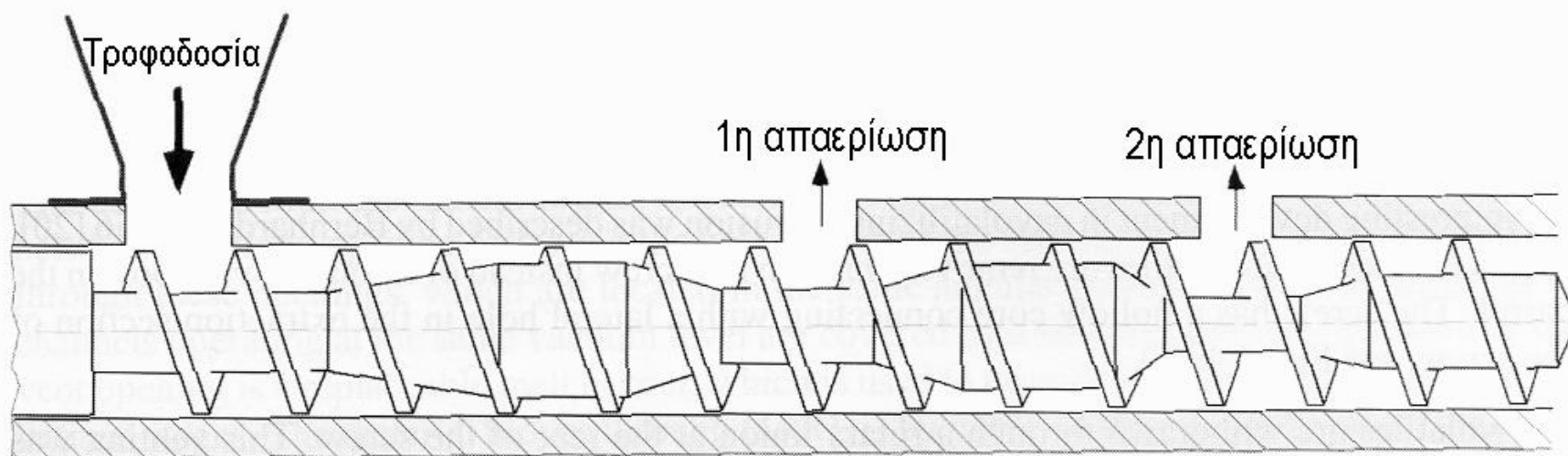
P_{λ}



Κοχλίας εκβολέα με μεταβλητό αυξανόμενο βήμα



Κοχλίας ταχείας συμπίεσης



1. Φύλλο από συμπολυμερές πολυστυρενίου (PS) πρόκειται να μορφοποιηθεί σε μονοκόχλιο εκβολέα, διαμέτρου 75 mm. Ο εκβολέας περιλαμβάνει ζώνη απαερίωσης μεταξύ πρώτης και δεύτερης ζώνης δοσιμετρίας, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά για τον κοχλία:

Πρώτη ζώνη δοσιμετρίας: μήκος 250 mm, βάθος αύλακας 4 mm

Δεύτερη ζώνη δοσιμετρίας: μήκος 500 mm, βάθος αύλακας 6 mm

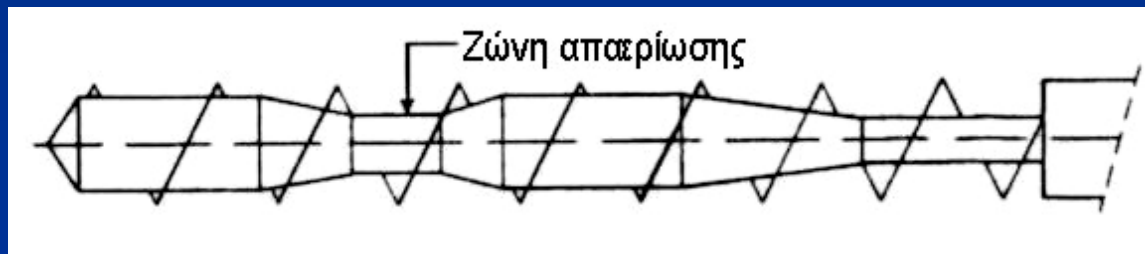
Η γωνία ελίκωσης του κοχλία και στις δύο ζώνες δοσιμετρίας είναι 17.7° , η ταχύτητα περιστροφής του κοχλία 40 στρ./min και η θερμοκρασία είναι ρυθμισμένη στους 230°C .

Η παραπάνω διάταξη εκβολής χρησιμοποιείται για την παραγωγή φιλμ με τη χρήση μήτρας επίπεδης σχισμής, η οποία έχει πλάτος 1 m και μήκος 10 mm.

Να υπολογισθεί το άνοιγμα της μήτρας εκβολής του φιλμ, το οποίο απαιτείται για την ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος εκβολής.

Το ιξώδες του πολυμερικού τήγματος να θεωρηθεί $250 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

** Να αναφερθούν οι παραδοχές που θα γίνουν για την επίλυση της άσκησης.*



(1) Δεδομένα:

I. Μονοκόχλιος εκβολέας

D: 75mm N: 40σπρ/min ϕ : 17.7° e: 7.5mm μ : 250N·s/m²

1^η Ζώνη δοσιμετρίας L₁: 250mm H₁: 4mm

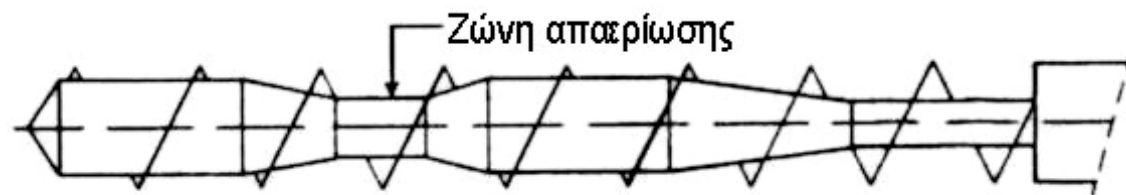
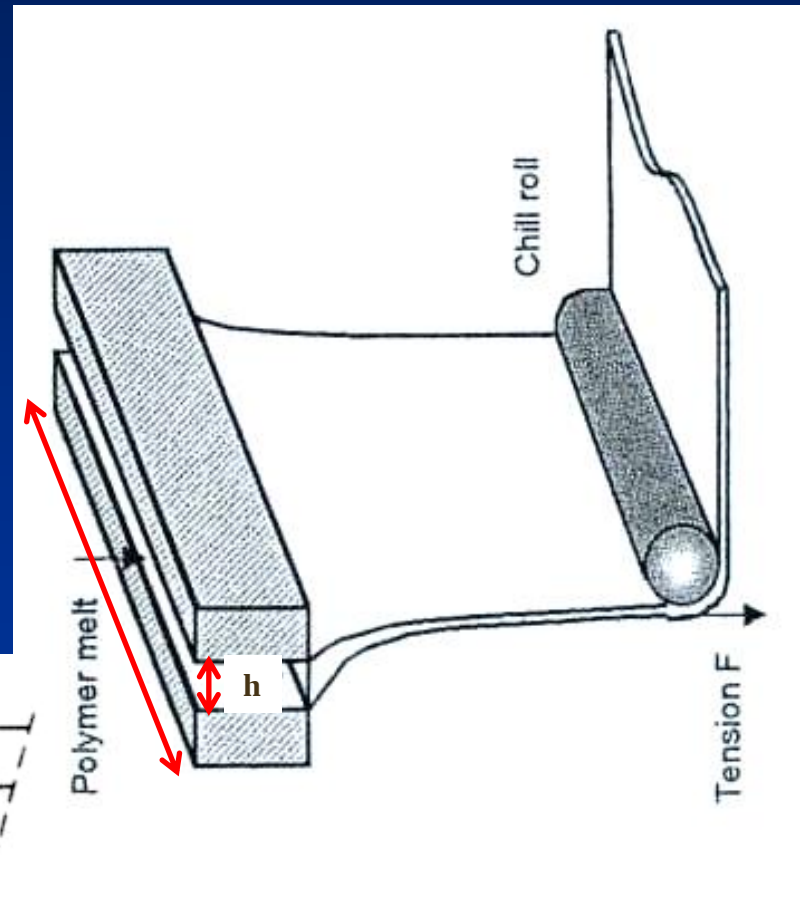
2^η Ζώνη δοσιμετρίας L₂: 500mm H₂: 6mm

II. Μήτρα μορφοποίησης φιλμ

w: 1m L_d: 10mm

Ζητούμενα:

Το άνοιγμα της μήτρας **h**
που ικανοποιεί την ομαλή
λειτουργία της διάταξης?



1^η ζώνη
δοσιμετρίας

$$Q_1 = Q_{d,1} - Q_{p,1}$$

$$Q_d = \frac{U_z HW}{2}$$

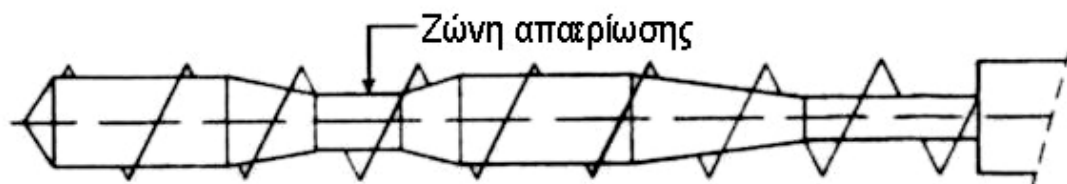
$$U_z = \pi DN \cos \phi$$

$$U_z = \frac{\pi \cdot 0.075 \cdot 40}{60} \cos 17.7^\circ = 0.1497 \text{ m/s}$$

$$W = \pi D \sin \phi - e = \pi \cdot 0.075 \sin 17.7^\circ - 0.0075 \Rightarrow$$

$$W = 0.0641 \text{ m}$$

$$Q_1 = Q_{d,1} = \frac{0.1497 \cdot 0.004 \cdot 0.0641}{2} = 1.92 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$



2η ζώνη
δοσιμετρίας

$$Q_2 = Q_{d,2} - Q_{p,2} = Q_1 = 1.92 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$U_z = 0.1497 \text{ m} / \text{s}$$

$$W = 0.0641 \text{ m}$$

$$Q_{d,2} = \frac{1}{2} U_z H_2 W = \frac{0.1497 \cdot 0.006 \cdot 0.0641}{2} = 2.88 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

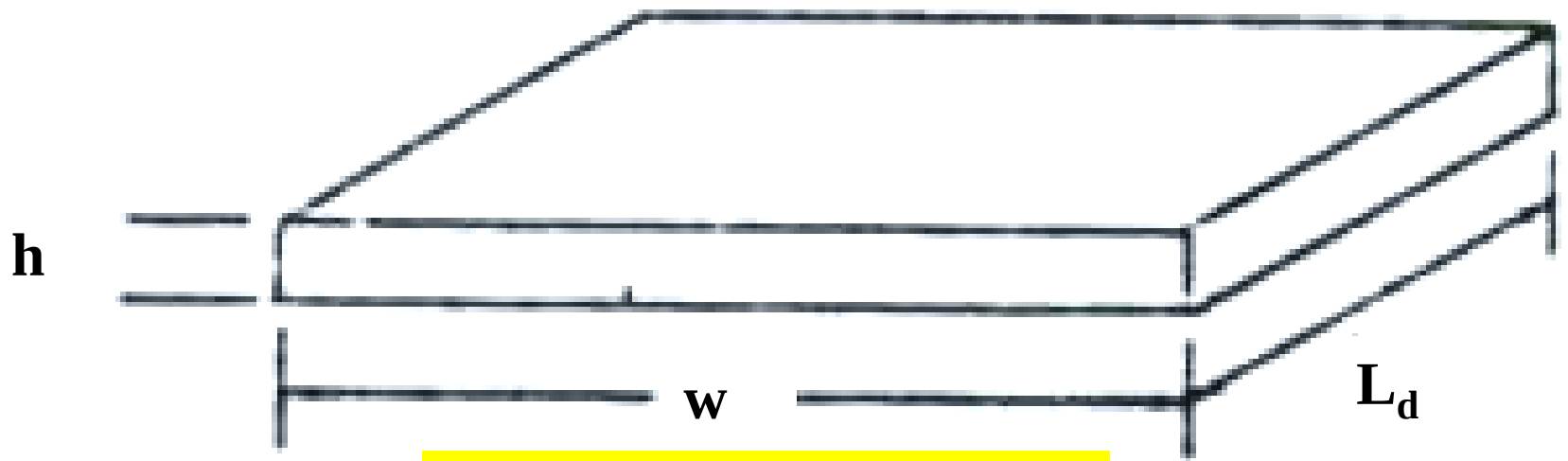
$$Q_{p,2} = \frac{H^3 W}{12 \mu} \frac{\Delta P}{L_2} \sin \phi = \frac{(0.006)^3 0.0641 \cdot \Delta P}{12 \cdot 250} \frac{1}{0.5} \sin 17.7^\circ =$$

$$2.806 \times 10^{-12} \Delta P \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$1.92 \times 10^{-5} = 2.88 \times 10^{-5} - 2.806 \times 10^{-12} \Delta P \Rightarrow$$

$$\Delta P = 3.42 \times 10^6 \text{ Pa}$$

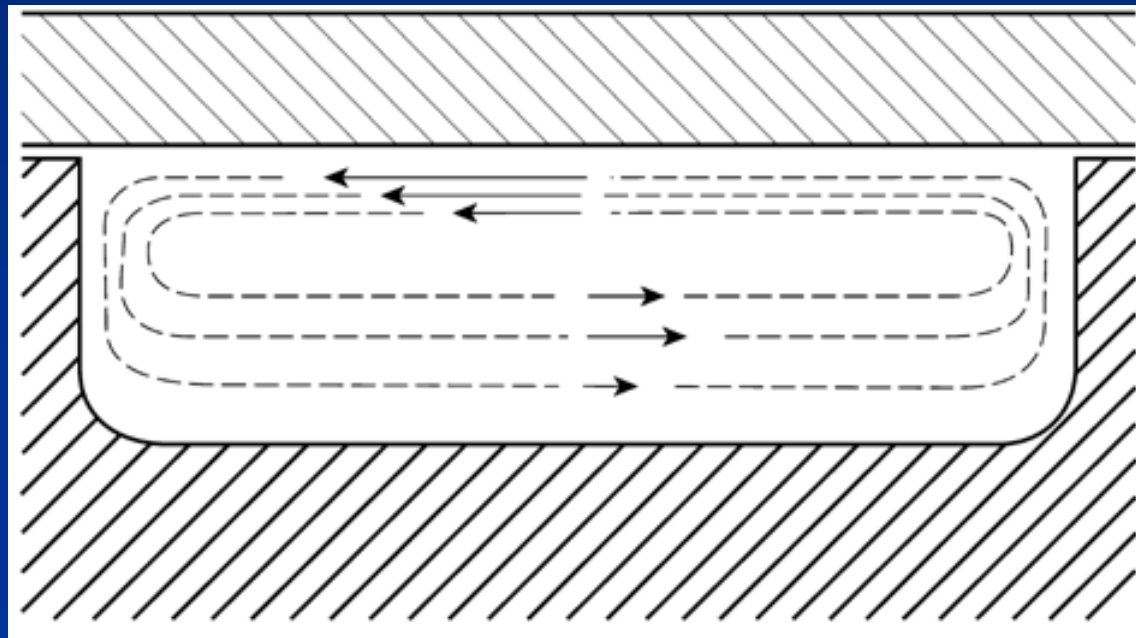
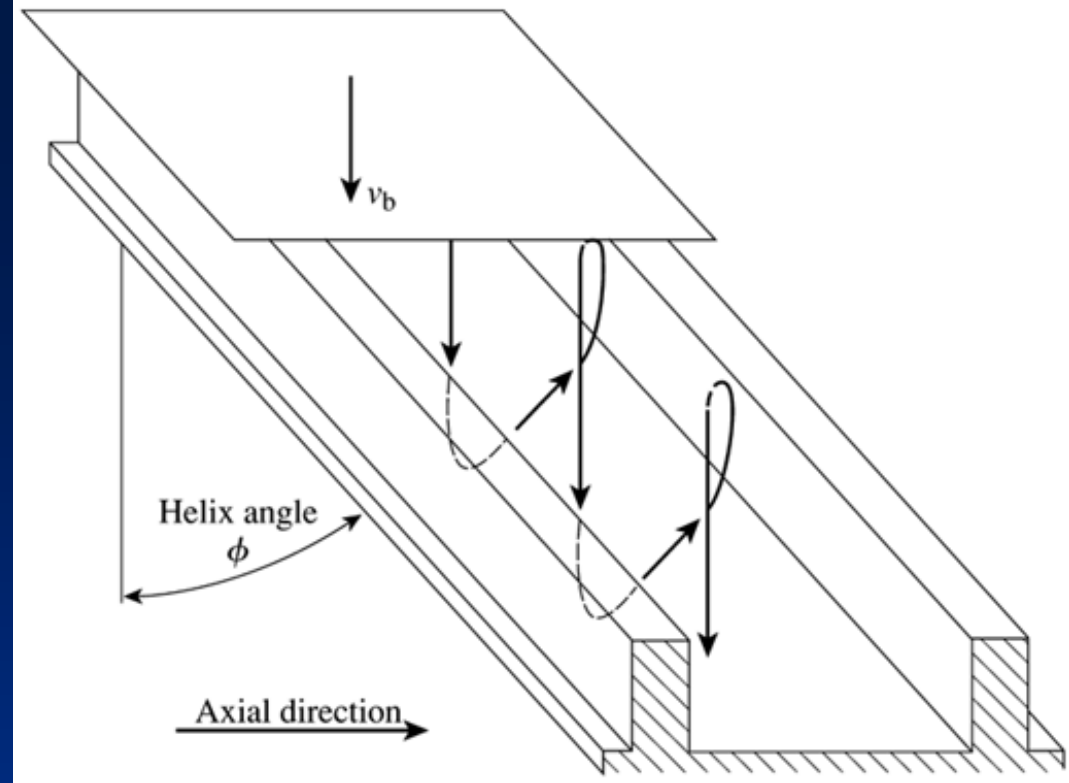
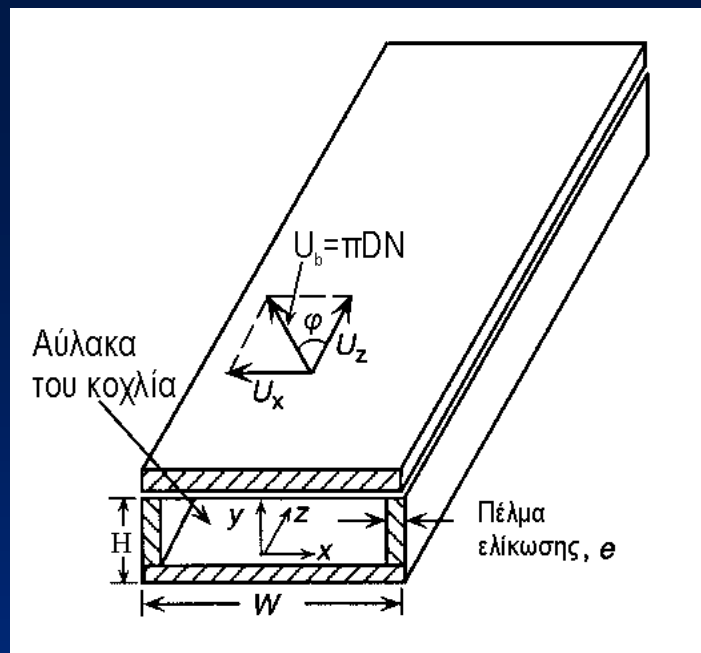
(1)

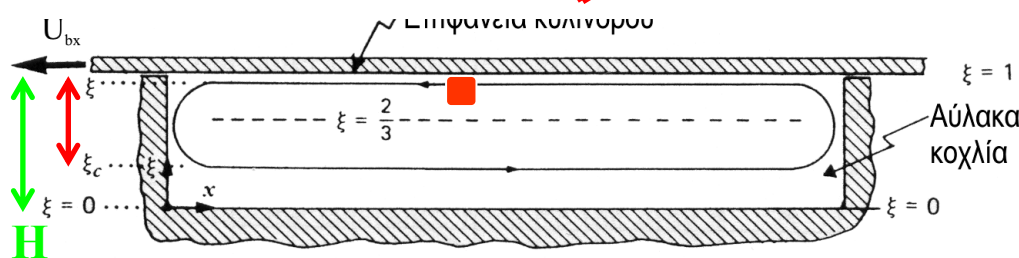
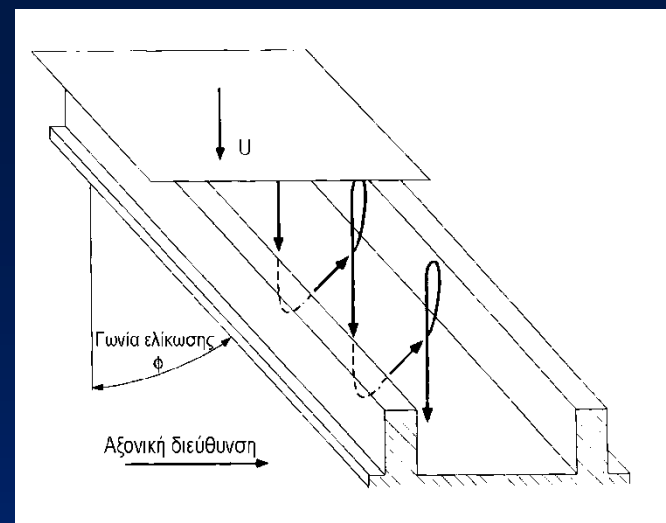
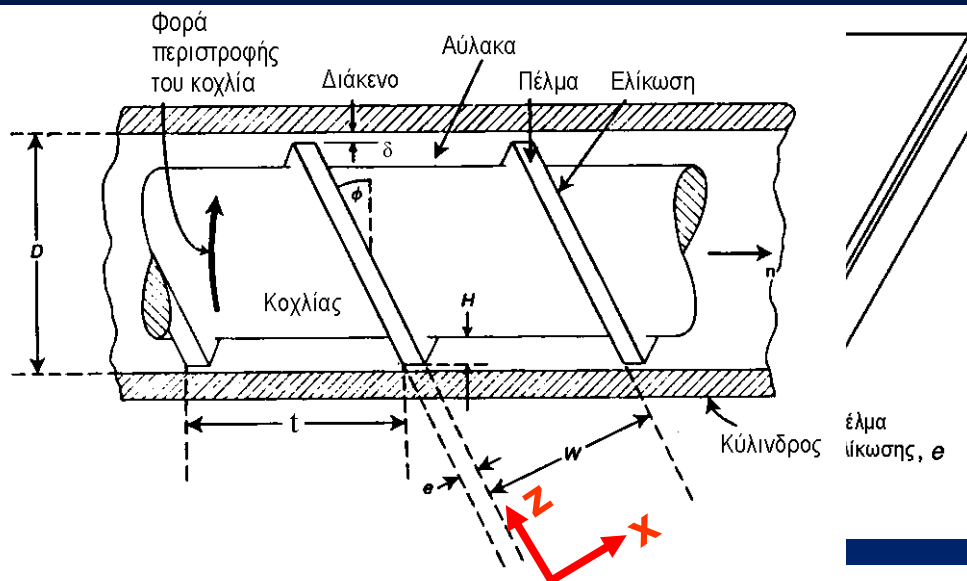


$$Q_{\text{εκβολέα}} = Q_{\text{μήτρα}}$$

$$Q_{\mu} = \frac{wh^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_d} \Rightarrow 1.92 \times 10^{-5} = \frac{1 \cdot h^3 \cdot 3.42 \times 10^6}{12 \cdot 250 \cdot 0.01} \Rightarrow$$

$$h = \left(\frac{1.92 \times 10^{-5} \cdot 30}{3.42 \times 10^6} \right)^{1/3} \Rightarrow h = 5.52 \times 10^{-4} \text{ m}$$





$$\xi = y / H$$

$$U_b = \pi N D$$

$$U_z = U_b \cos \phi$$

$$U_x = U_b \sin \phi$$

$$u_x = v_x / U_x$$

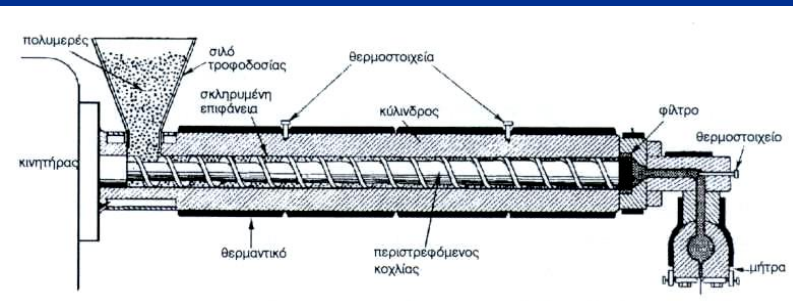
$$u_x = \xi(2 - 3\xi)$$

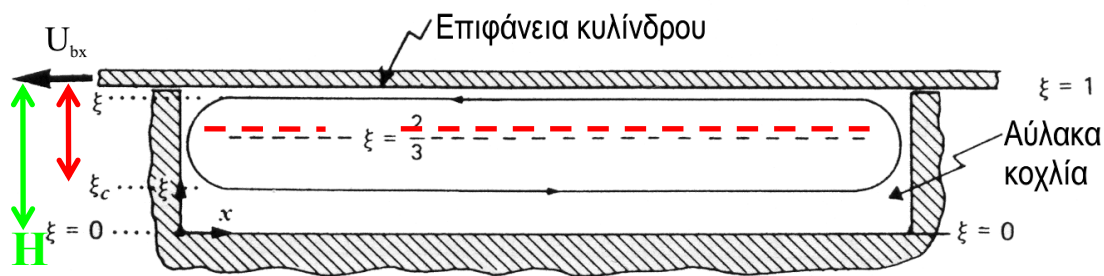
$$u_z = v_z / U_z$$

$$u_z = \xi + 3\xi(1 - \xi) \frac{Q_p}{Q_d}$$

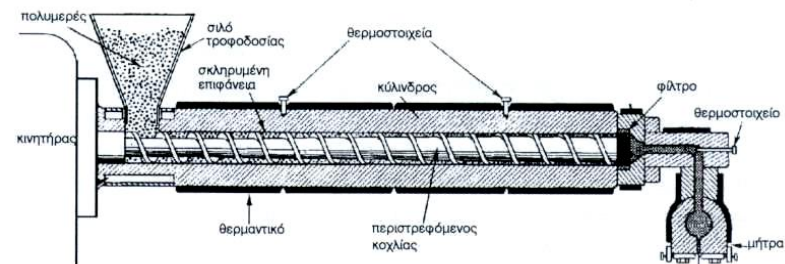
$$u_\ell = v_\ell / U_b$$

$$u_\ell = 3\xi(1 - \xi) \left(1 + \frac{Q_p}{Q_d} \right) \sin \phi \cos \phi$$





$$\xi = y / H$$

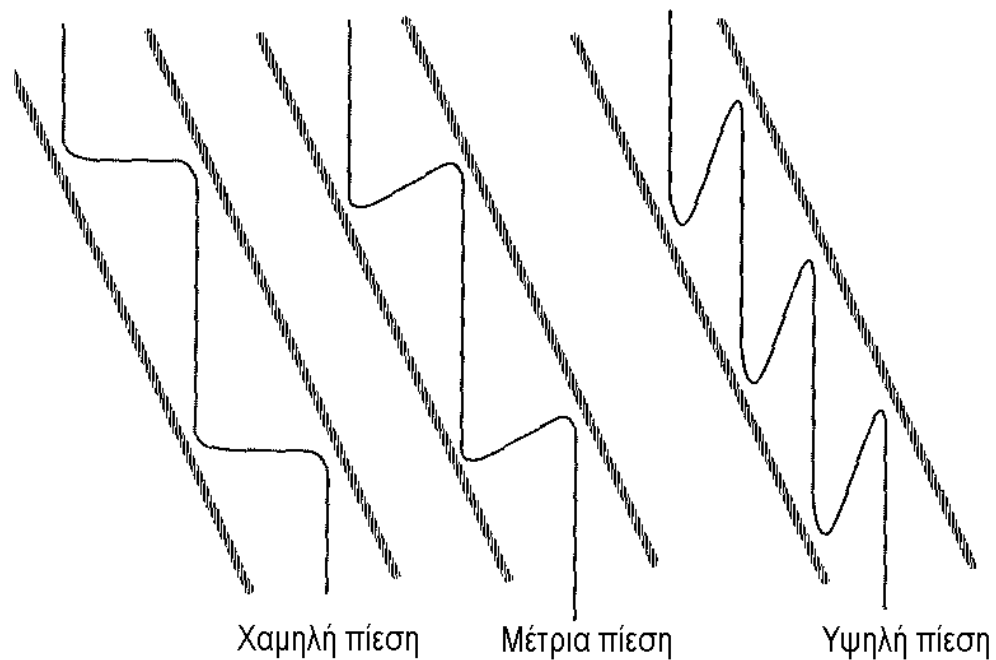
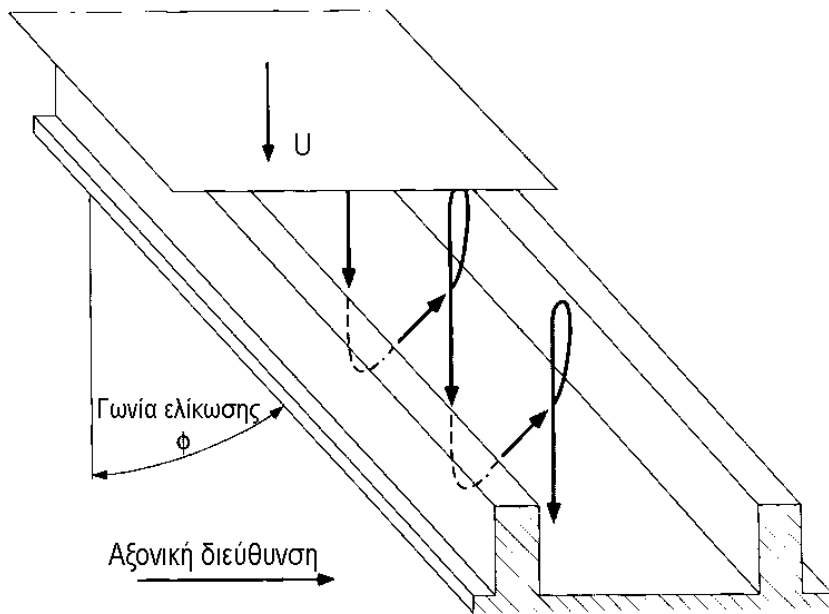


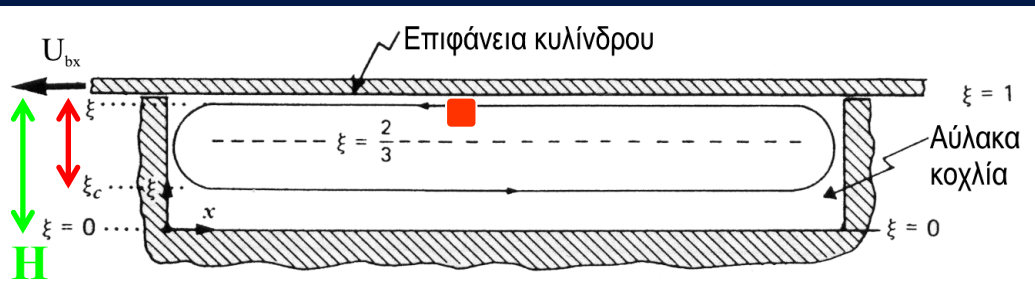
l : αξονικό μήκος εκβολέα

Συνάρτηση κατανομής του χρόνος παραμονής στον εκβολέα

Συνάρτηση κατανομής της παραμόρφωσης

Κίνηση ρευστού στη ζώνη μεταφοράς τήγματος





$$u_z = \xi + 3\xi(1-\xi) \frac{Q_p}{Q_d}$$

$$u_x = \xi(2-3\xi)$$

$$\xi = y / H$$

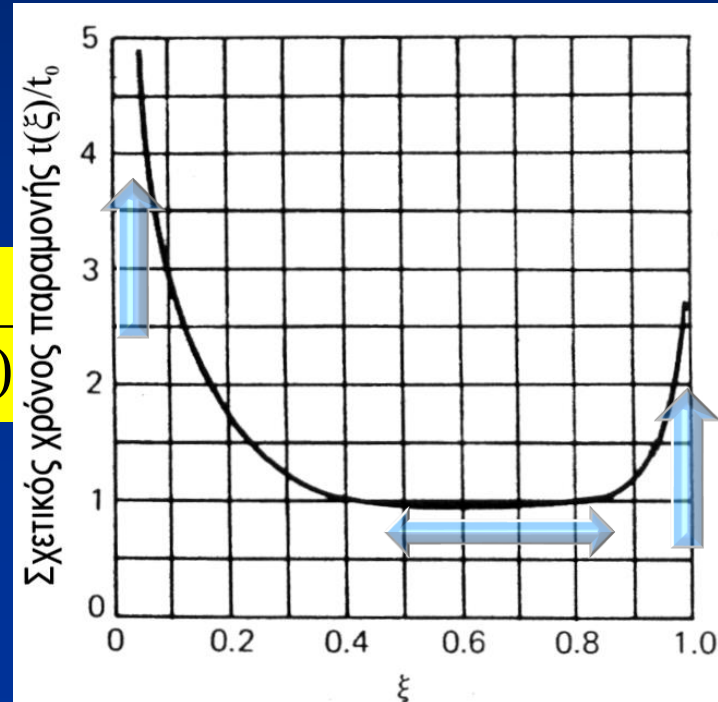
Συνάρτηση κατανομής του χρόνος παραμονής στον εκβολέα

$$t(\xi) = \left[\frac{\ell}{3U_b(1+Q_p/Q_d)\sin\phi\cos\phi} \right] \frac{3\xi-1+3\sqrt{1+2\xi-3\xi^2}}{\xi[1-\xi+\sqrt{1+2\xi-3\xi^2}]}, \frac{2}{3} \leq \xi \leq 1$$

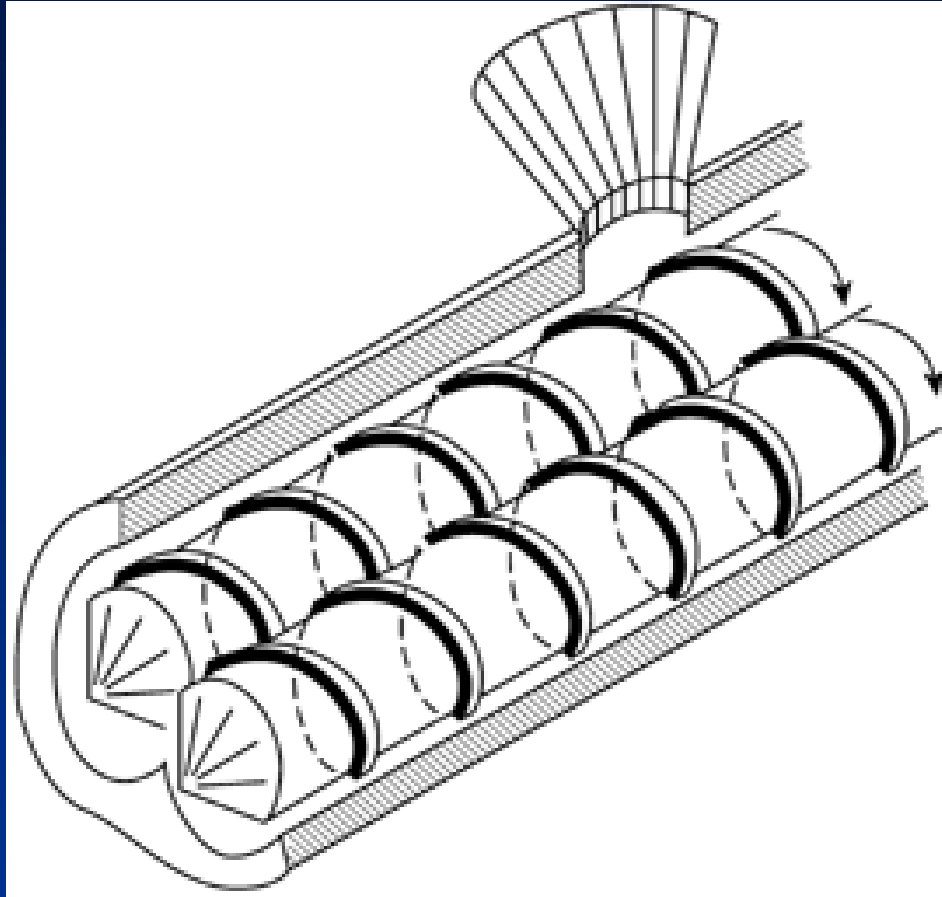
Ελάχιστος χρόνος παραμονής στον εκβολέα:

$$\xi = 2/3$$

$$t_0 = \frac{3\ell}{2U_b(1+Q_p/Q_d)\sin\phi\cos\phi} = \frac{3Z}{2U_z(1+Q_p/Q_d)}$$

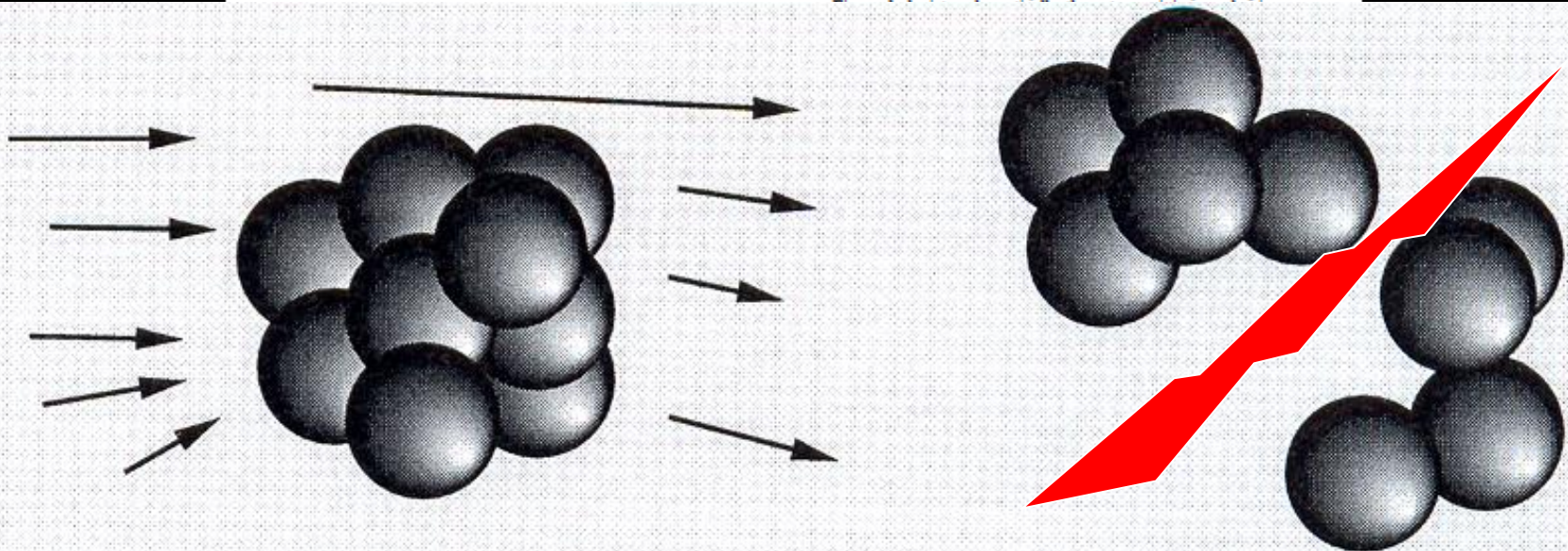


Διπλοκόχλιος εκβολέας (twin screw extruder)

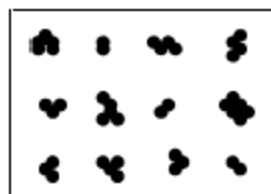


ANALYSIS OF MIXING IN POLYMER PROCESSING EQUIPMENT

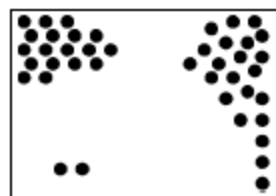
cohesive minor component such as clusters of solid particles or droplets of a liquid. Distributive mixing is the process of spreading the minor component throughout the matrix in order to obtain a good spatial distribution. In any mixing device, these two mechanisms may occur simultaneously or stepwise.



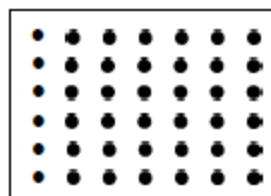
BAD DISPERSION : BAD DISTRIBUTION



BAD DISPERSION : GOOD DISTRIBUTION



GOOD DISPERSION : BAD DISTRIBUTION

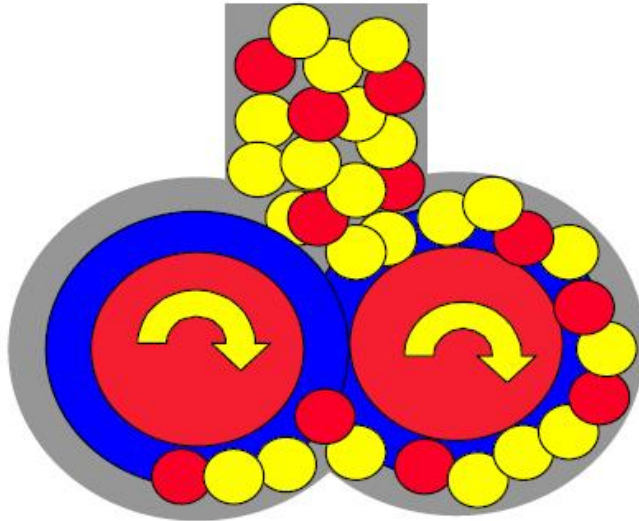


GOOD DISPERSION : GOOD DISTRIBUTION

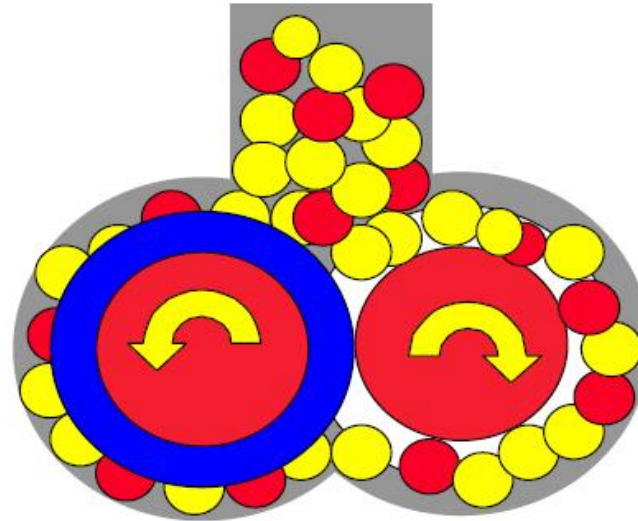
Figure 1 Schematic illustration of dispersive and distributive mixing mechanisms.

Ομόστροφοι και ετερόστροφοι

Twin-screw extruder versions:

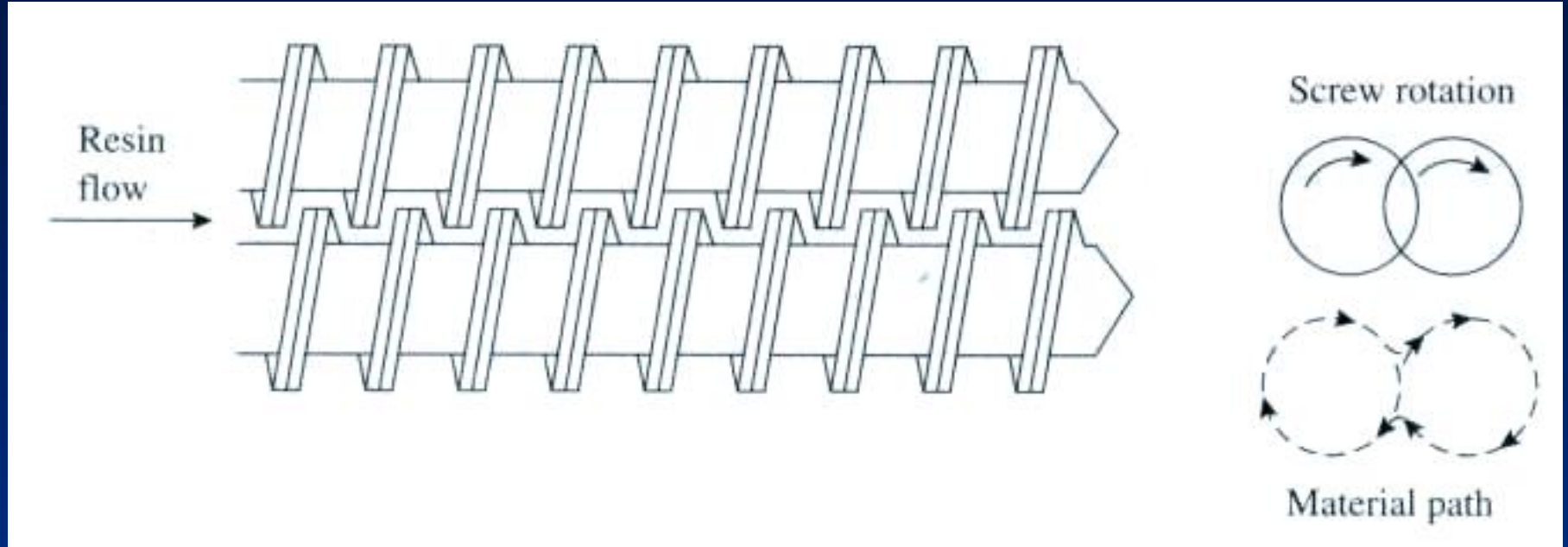


Co-rotating



Counter-rotating

Διπλοκόχλιος εκβολέας (twin screw extruder)



Ομόστροφους

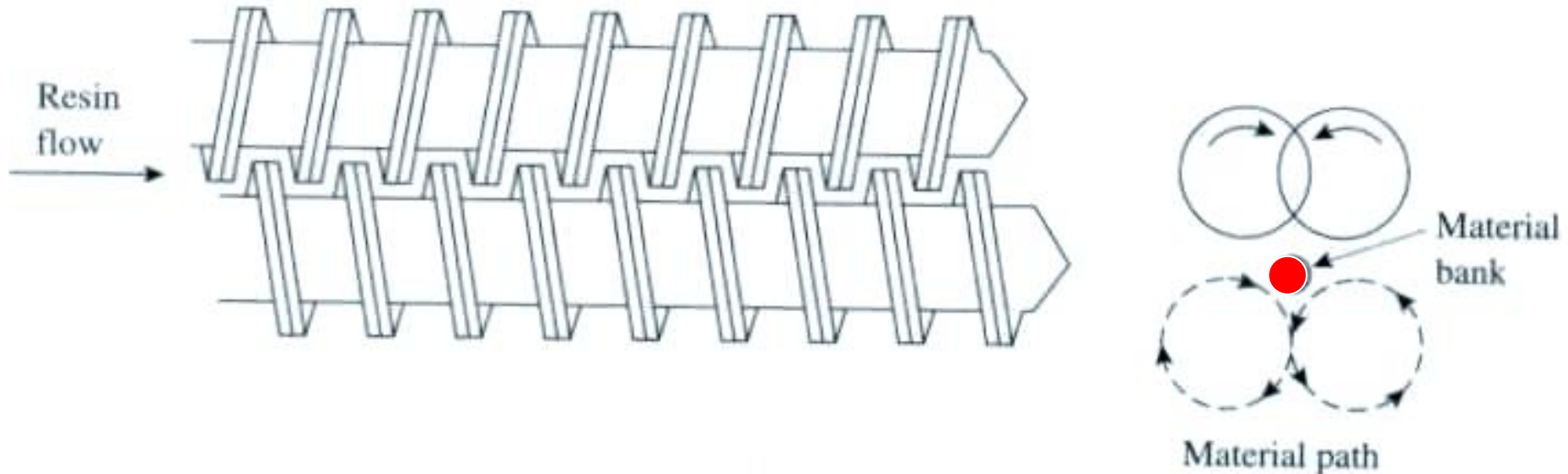
- Το υλικό μεταφέρεται από τον ένα κοχλία στον άλλο κάνοντας το σχήμα 8.
- Μεγαλύτερη επαφή με τον θερμαινόμενο κύλινδρο.
- Καλύτερη ανάμειξη.
- Κατάλληλη διάταξη για θερμοευαίσθητα υλικά, διότι το υλικό εξωθείται μέσω του εκβολέα πολύ γρήγορα.

Ετερόστροφους

Το υλικό διατέμνεται και συμπιέζεται.

Μικρή ποσότητα του υλικού περνά μεταξύ των δύο κοχλίων.

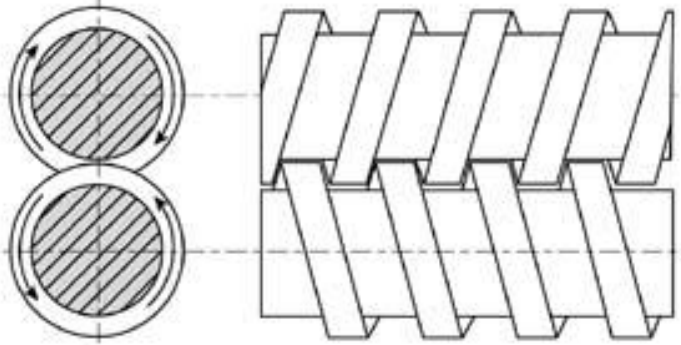
Το συσσωρευμένο υλικό μεταφέρεται κατά μήκος του εκβολέα.



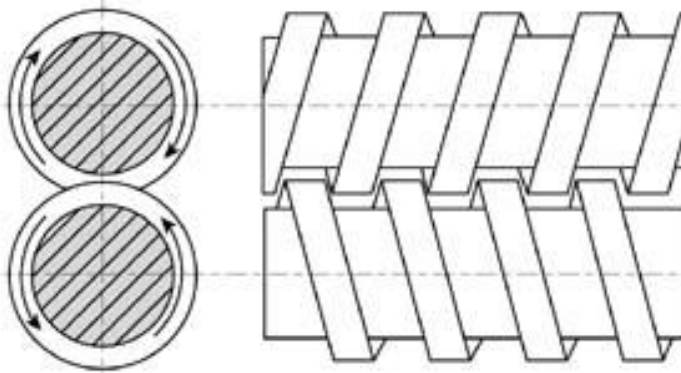
Ομόστροφοι & Ετερόστροφοι

- Έχουν ίδιες γωνίες ελίκωσης
- Ο κοχλίας περιστρέφεται μέχρι 1400 rpm
- Μεγάλη χρήση σε προετοιμασία μιγμάτων (compounding), πολύ μικρή σε εκβολή προφίλ

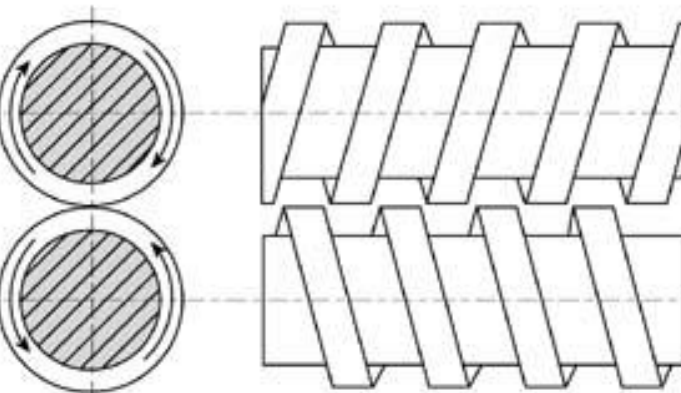
- Έχουν αντίθετες γωνίες ελίκωσης
- Ο κοχλίας περιστρέφεται μέχρι 500 rpm
- Μικρή χρήση σε προετοιμασία μιγμάτων (compounding), πολύ μεγάλη σε εκβολή προφίλ



(a)



(b)



(c)

Συμπλεκόμενους (intermeshing)

Οι σπείρες του ενός κοχλία εισχωρούν στην εκγλυφή του άλλου κοχλία.

(a) Συζευκτούς (conjugated):

το μεγαλύτερο μέρος της εκγλυφής καταλαμβάνεται από την εισχωρούσα σπείρα

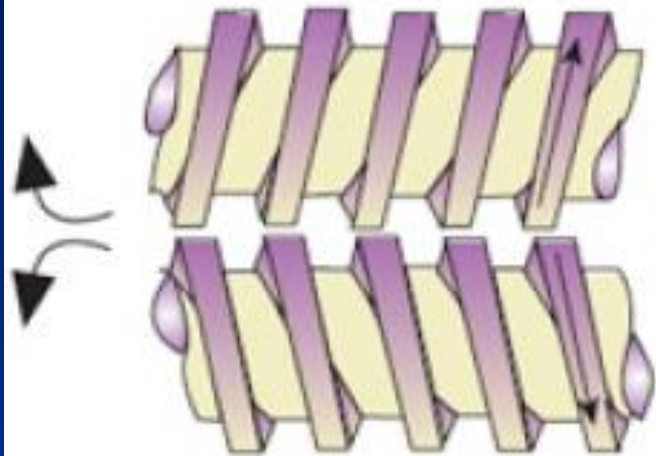
(b) Ασύζευκτους (non-conjugated)

Εφαπτόμενους (non-intermeshing)

Οι σπείρες του ενός κοχλία εφάπτονται με τις σπείρες του άλλου κοχλία.

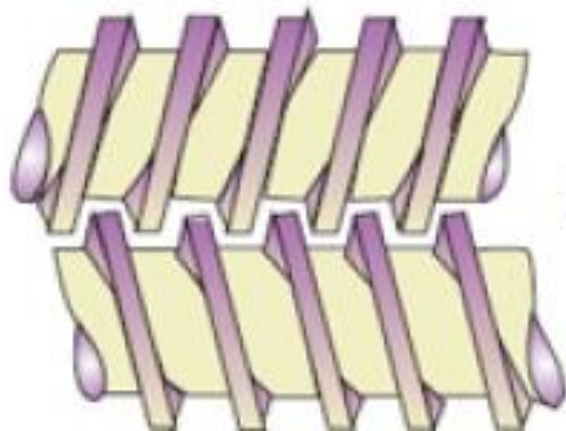
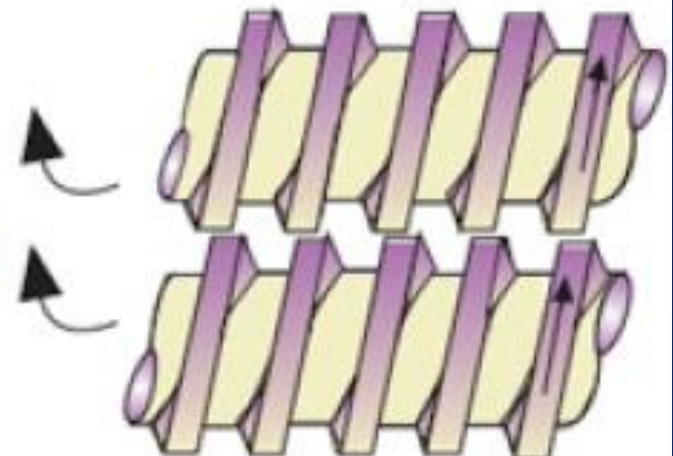
Εφαπτόμενοι (non-intermeshing) και συμπλεκόμενοι (intermeshing)

Counter-rotating

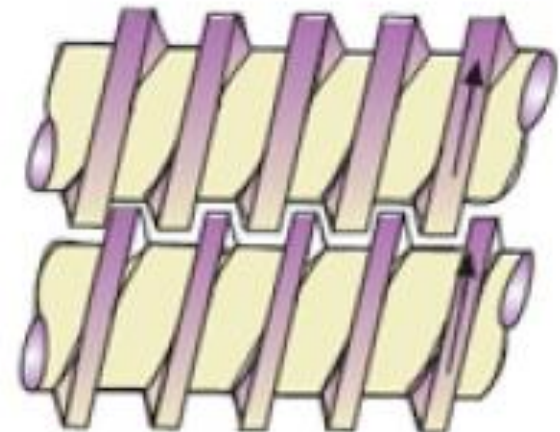


non-
intermeshing

Co-rotating



intermeshing



Δικόχλιος εκβολέας σε σειρά με λουτρό ψύξης και κοκοτοποιητή



Haake PTW 16

- Παράλληλοι ομόστροφοι, συμπλεκόμενοι κοχλίες (parallel co-rotating intermeshing screws)
- Συναρμολογούμενοι κοχλίες (segmented screws):
 - τμήματα μεταφοράς (transporting elements) και
 - τμήματα ανάμειξης (kneading elements)



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- $L/D=25:1$ ($L=400$ mm, $D=16$ mm)
- Μήτρα κυκλικής διατομής:
διάμετρος 2 mm
- Δυνατότητα = 200 g – 5 kg/h

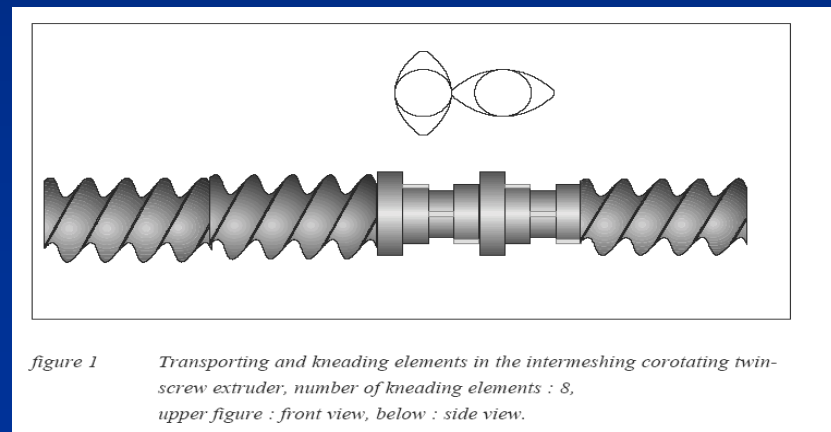
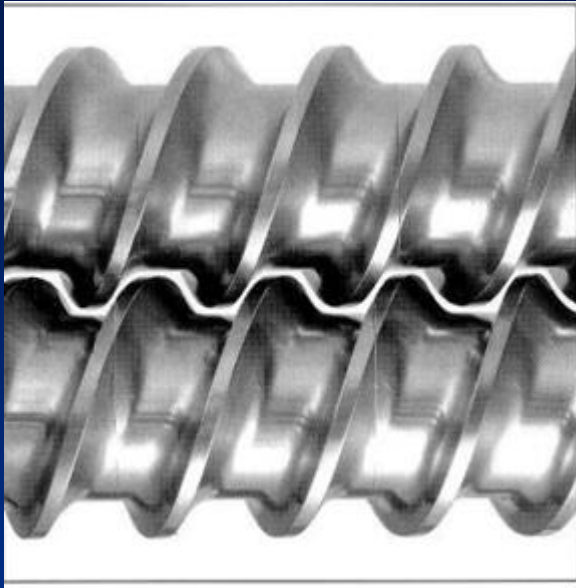
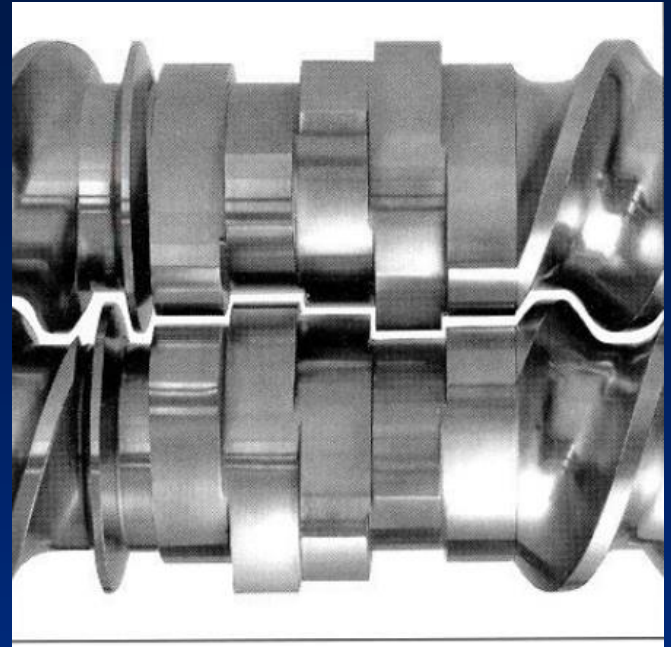


figure 1 Transporting and kneading elements in the intermeshing corotating twin-screw extruder, number of kneading elements : 8, upper figure : front view, below : side view.

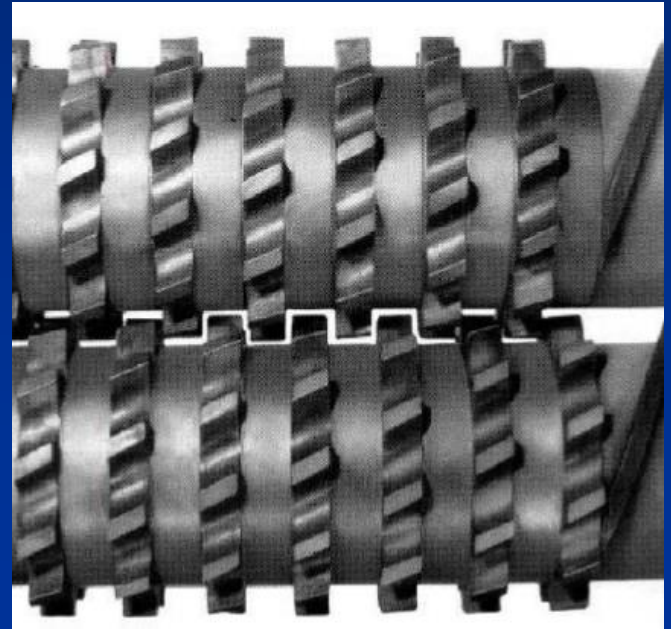
Τμήματα μεταφοράς (convey elements):



Τμήματα ανάμειξης
(kneading/mixing elements):
προκαλούν ισχυρές
διατμητικές τάσεις (→ ανάμειξη)

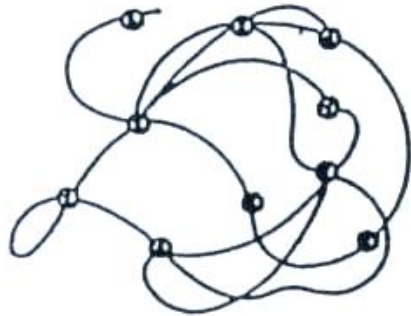


Ειδικά τμήματα για ηπιότερες
διατμητικές τάσεις
(πολυμερή ευαίσθητα σε
διατμητικές τάσεις)

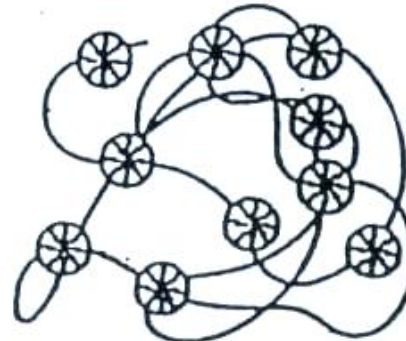
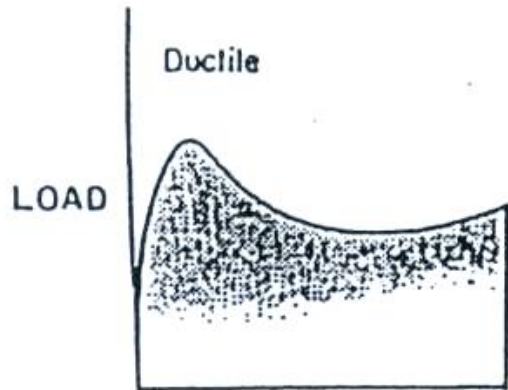


Ψύξη πολυμερικών τηγμάτων

1. Ψύξη με ρεύμα αέρα, Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας $h: 5-30 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
2. Υδατόλουτρο, $h: 1000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
3. Ψεκασμός νερού, $h: 1500 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
4. Κύλινδρος ψύξης



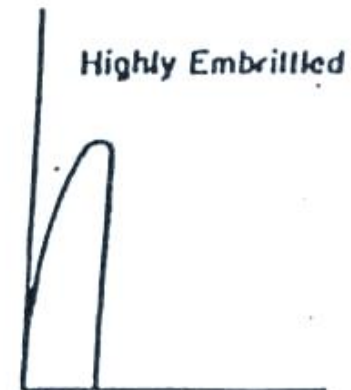
Rapid Cooling



Moderate Cooling



Slow Cooling



Επίδραση κρυσταλλικότητας στις ιδιότητες του πολυμερούς

Πυκνότητα 

Αντοχή σε εφελκυσμό 

Η ακαμψία 

Η διαπερατότητα 

Η αντοχή σε κρούση 

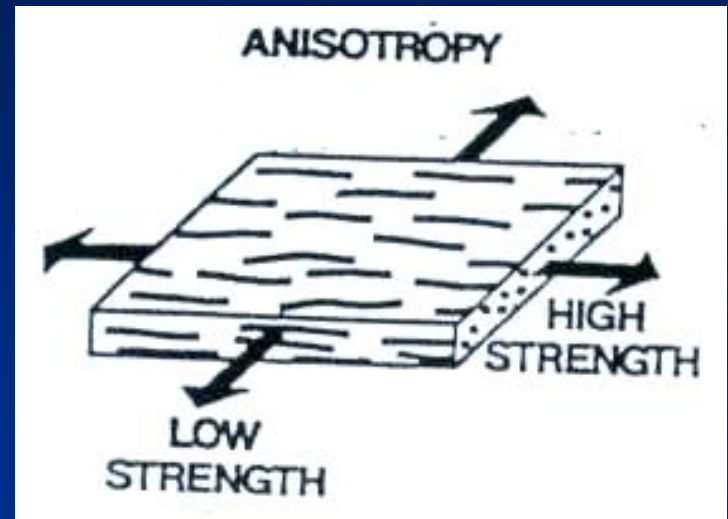
Οπτικές ιδιότητες

Τεχνικές προσανατολισμού

1. Προερχόμενος από διάτμηση
(shear induced orientation)



2. Προερχόμενος από
εφελκυστική παραμόρφωση
(Stress induced orientation)



- ❖ Στιγμαία ελαστική παραμόρφωση στις γωνίες ή δεσμούς
- ❖ Μοριακός προσανατολισμός και “ξεδίπλωμα” των αναδιπλωμένων αλυσίδων
- ❖ Μη-ανακτήσιμη ιξώδης ροή προερχόμενη από την ολίσθηση μεταξύ των αλυσίδων

Επίδραση προσανατολισμού στις ιδιότητες του πολυμερούς

Αντοχή σε εφελκυσμό 

Η ακαμψία 

Αντίσταση στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος 

Διαμήκης αντοχή σε σχισμό 

Η διαπερατότητα στα αέρια 

Εκβολή (extrusion)

Εφαρμογές:

1. Παραγωγή ινών
2. Επικάλυψη καλωδίων
3. Παραγωγή σωλήνων
4. Παραγωγή προφίλ
5. Παραγωγή φιλμ με εκβολή από μήτρα επίπεδη σχισμή
6. Παραγωγή φιλμ με εκβολή και φύσημα

Παραγωγή ινών

Εκβολέας



Μήτρα εκβολής



Λουτρό στερεοποίησης
(ψύξη, εξάτμιση, πήξη)



Κύλινδροι τανυσμού
(προσανατολισμός)



Θερμική σταθεροποίηση
(θέρμανση υπό τάση)



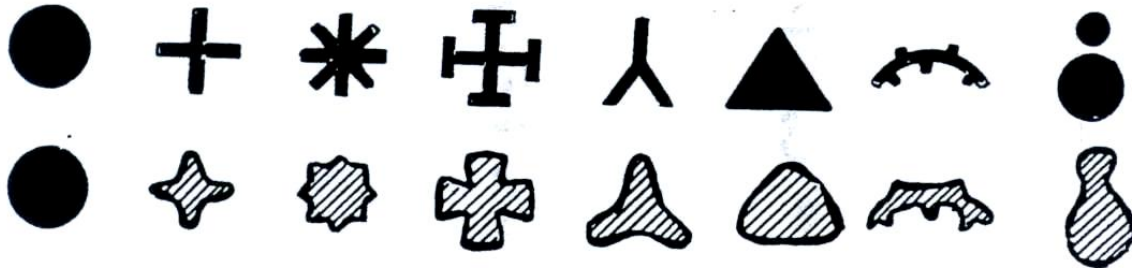
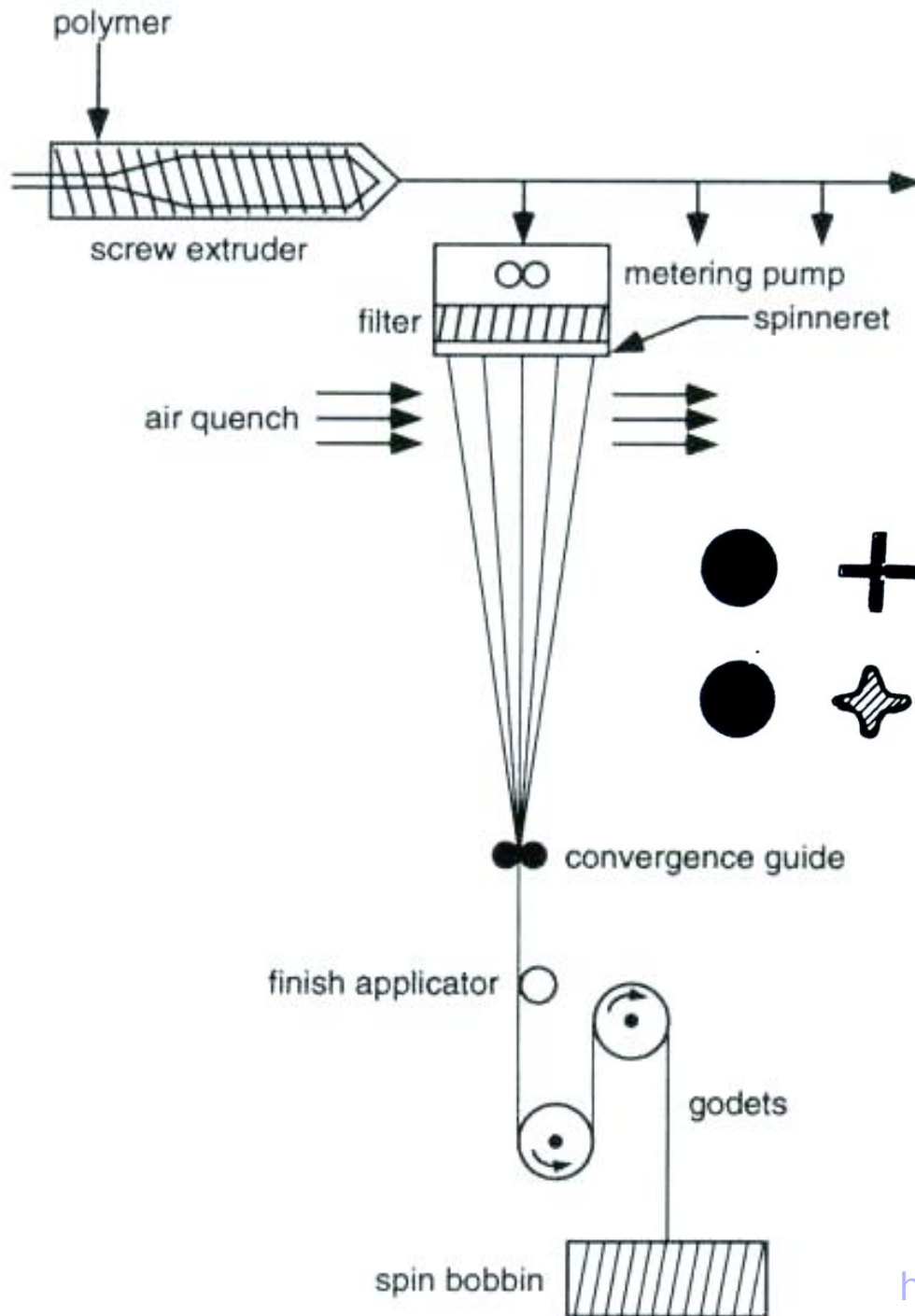
Περιτύλιξη

Ταχύτητα παραγωγής:

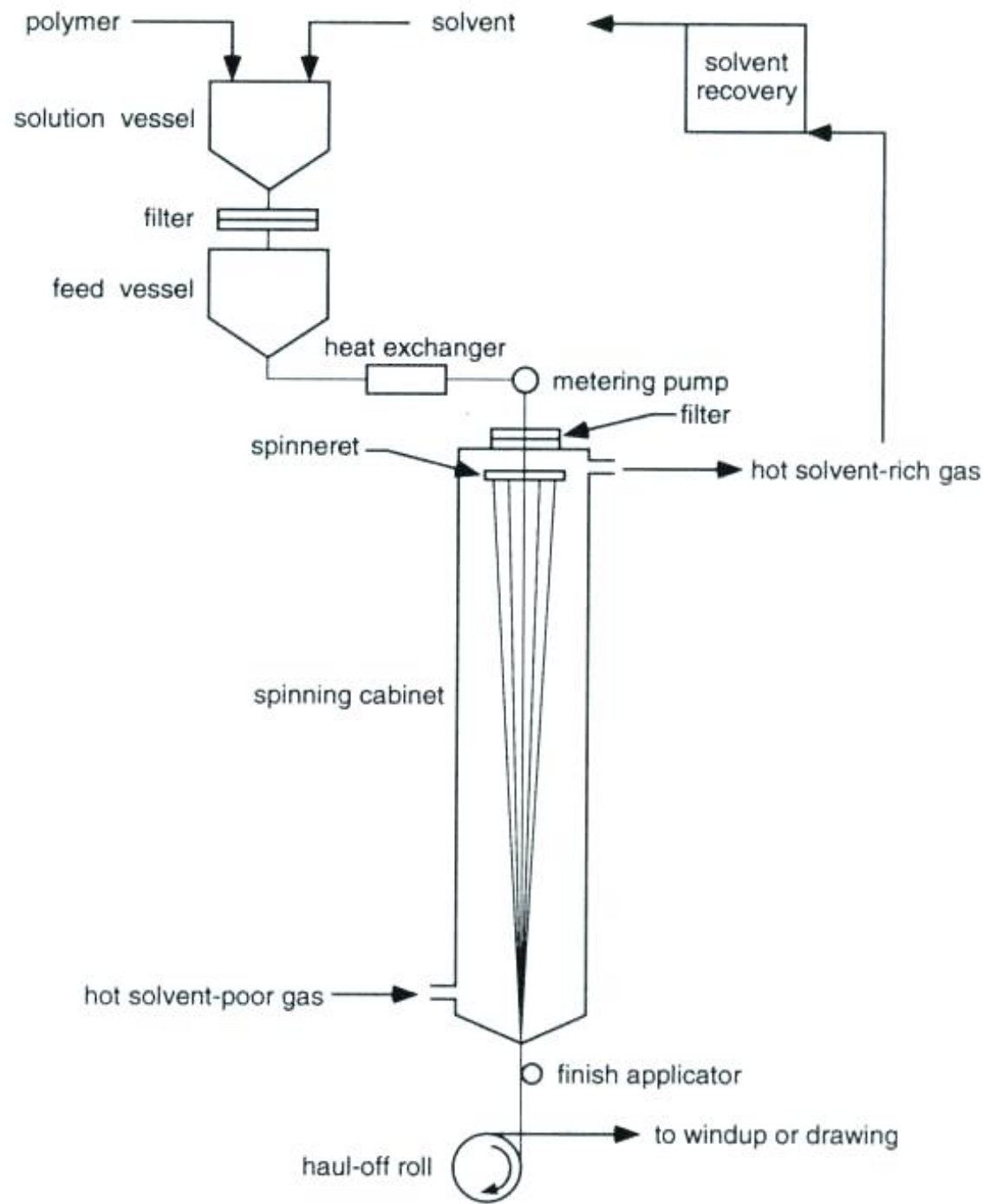
1. Πολύ χαμηλής ταχύτητας ($30 \sim 100\text{m/min}$), παραγωγή νημάτων μεγάλης σχετικά διαμέτρου
2. Χαμηλής ταχύτητας ($100 \sim 750\text{m/min}$)
3. Ενδιάμεσης ταχύτητας ($750 \sim 3500\text{m/min}$)
4. Υψηλής ταχύτητας ($3500 \sim 7000\text{m/min}$), κυριαρχεί η κρυστάλλωση προερχόμενη από υψηλές τάσεις

Ινοποίηση τήγματος (melt spinning)

PE, PP, PET, Nylon



https://www.youtube.com/watch?v=22VC_8xcyrs

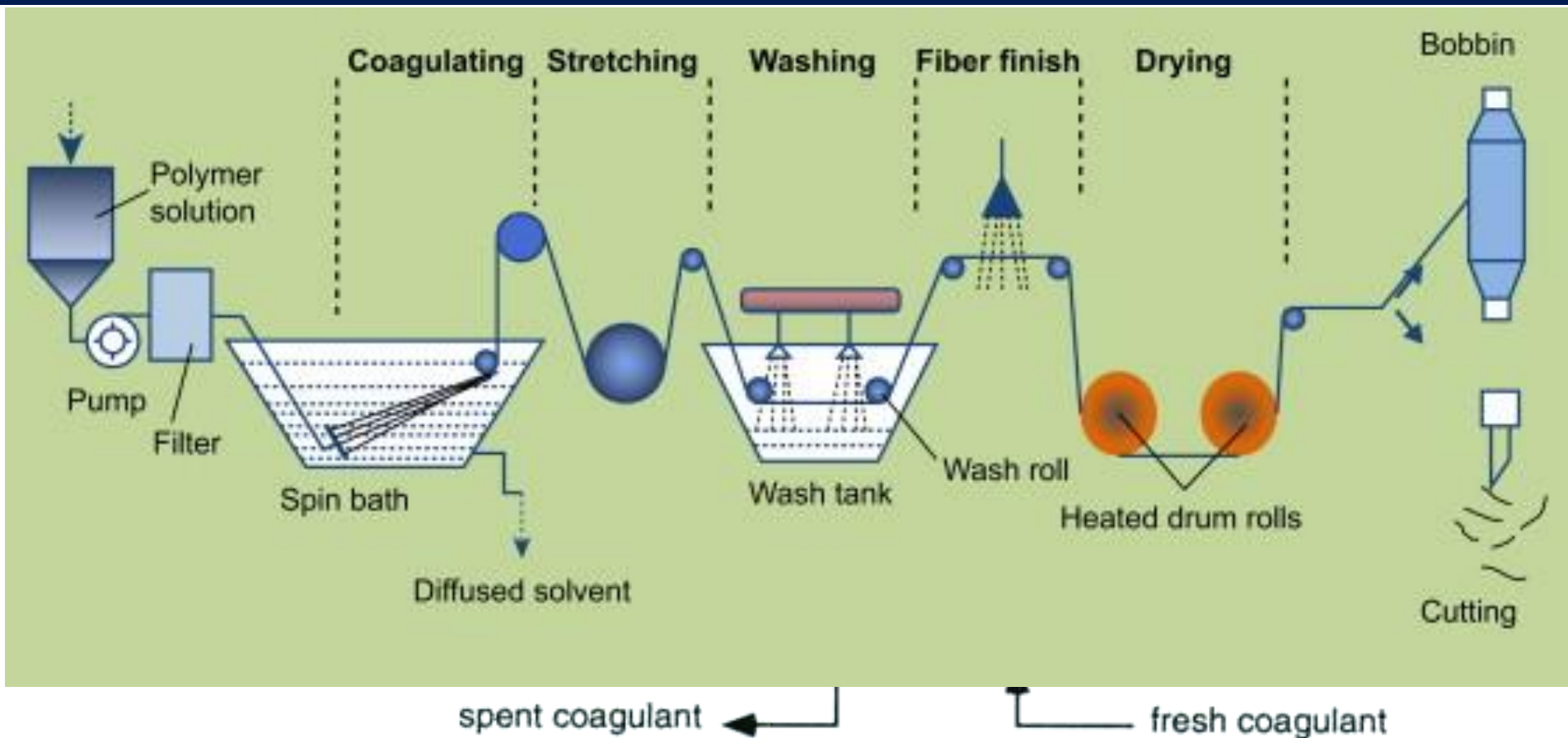


Ξηρή ινοποίηση (solution dry spinning)

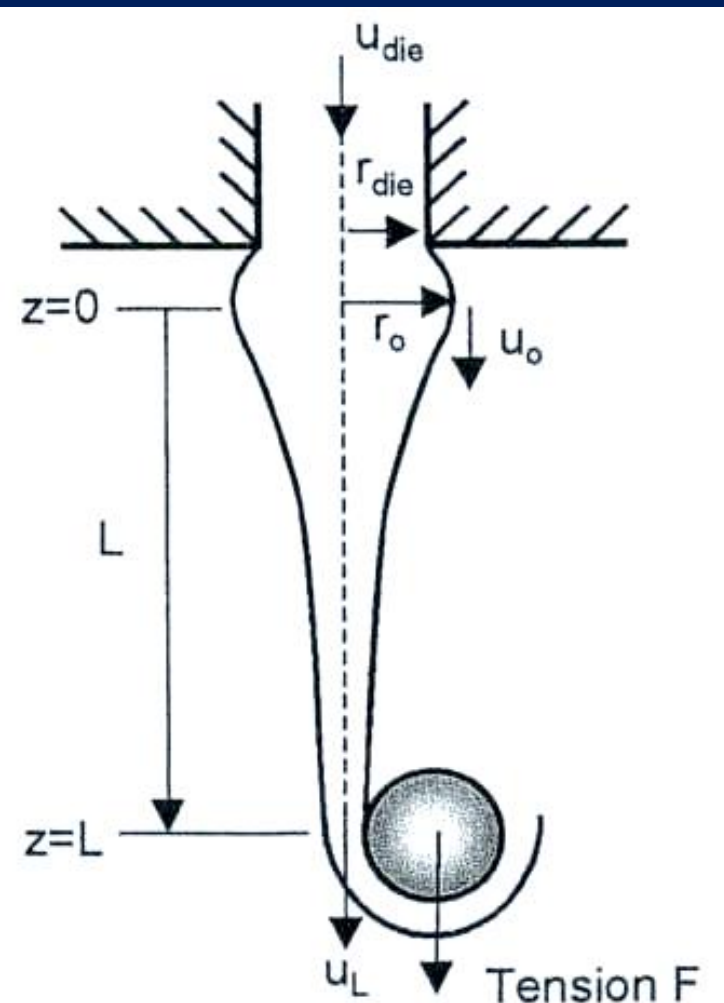
Ινοποίηση οξικής
κυτταρίνης και
ακρυλικών

Υγρή ινοποίηση (wet spinning)

PVA, PVC, PAN



Μετά την έξοδο από τη μήτρα παρατηρείται το φαινόμενο της διόγκωσης του πολυμερικού ρευστού λόγω χαλάρωσης των κάθετων τάσεων.



Λόγος τανυσμού:

$$D_R = \frac{u_L}{u_o}$$

u_o : η μέση ταχύτητα εκβολής στη μήτρα

u_L : η ταχύτητα στον κύλινδρο τανυσμού

Λόγος μείωσης ακτίνας:

$$R = \frac{r_o}{r_L}$$

r_o : η ακτίνα της κυλινδρικής μήτρας

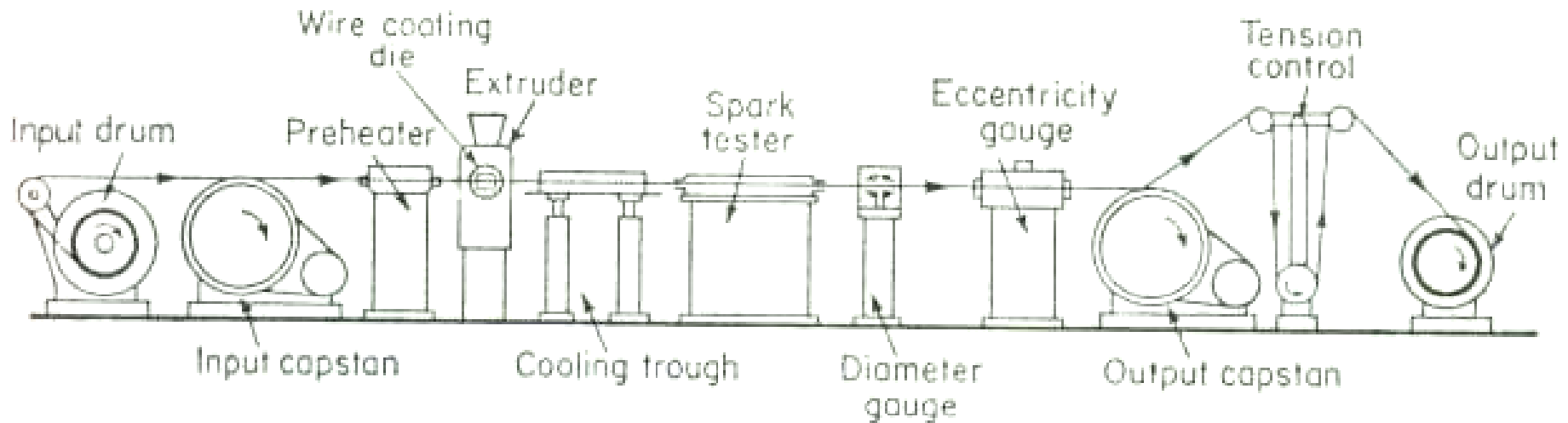
r_L : η ακτίνα της ίνας στον κύλινδρο τανυσμού

Denier: το βάρος σε γραμμάρια μήκους 9000m

dTex: το βάρος σε γραμμάρια 10000m

Tenacity: η αντοχή στη θραύση διαιρεμένη με dTex

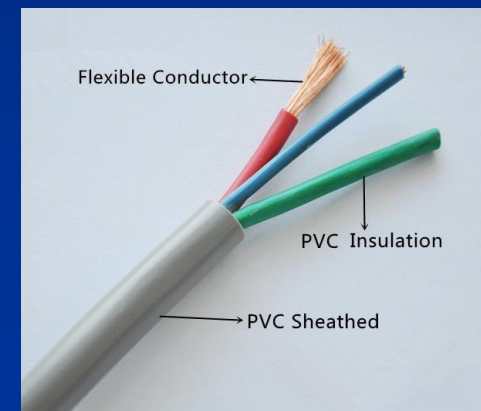
Επένδυση συρμάτων / καλωδίων



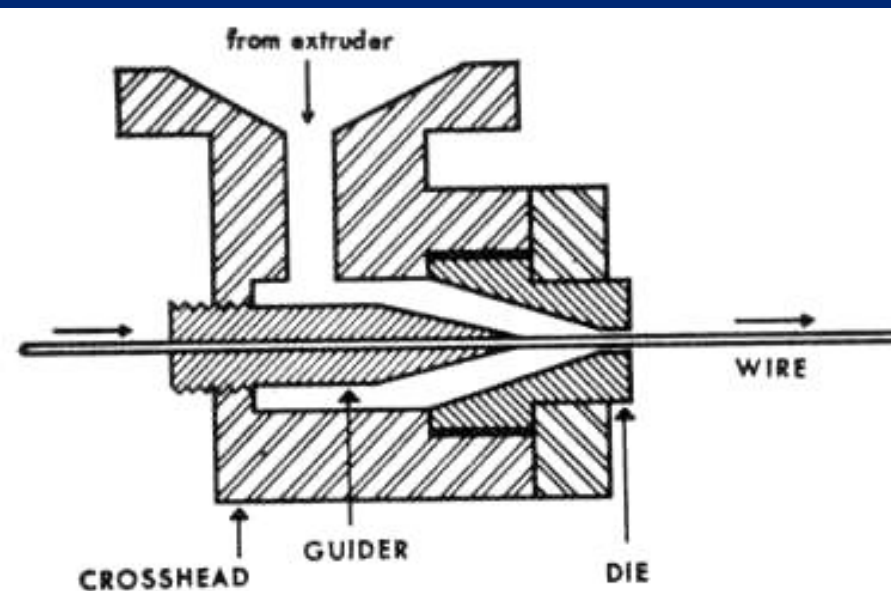
Επίστρωση: από τηλεφωνικά σύρματα 0.2mm μέχρι καλώδια διαμέτρου 13cm.

Το σύρμα προθερμαίνεται στους 120-180°C.

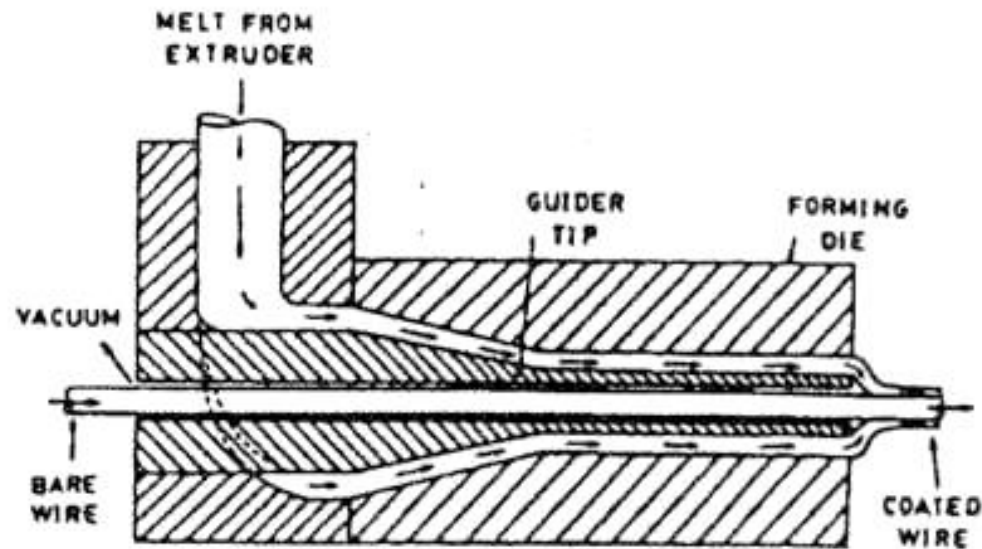
<https://www.youtube.com/watch?v=6ab66F3yimq>
<https://www.youtube.com/watch?v=SRKSKRbhLzw>



- 👉 Το προς επίστρωση σύρμα έρχεται σε επαφή με το πολυμερικό τήγμα.
- 👉 Οι μήτρες τοποθετούνται εγκάρσια με τη ροή του εκβολέα και το πολυμερές ρέει περιφερειακά σε δακτύλιο προτού έρθει σε επαφή με το σύρμα.
- 👉 Το σύρμα περνά μέσα από μικροσυσκευή που οδηγεί και επικεντρώνει το σύρμα (τορπίλη).

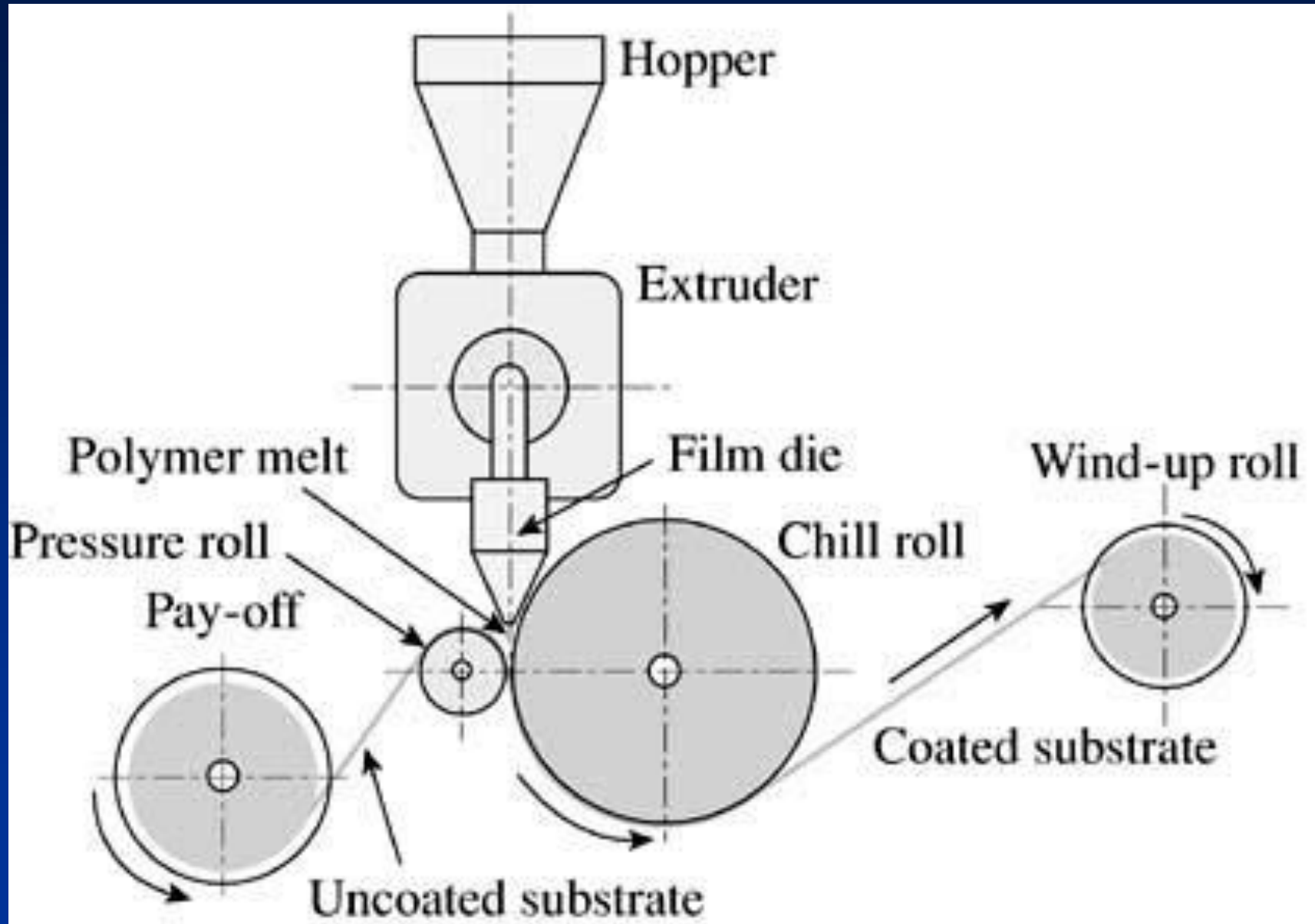


Μήτρα εκβολής με πίεση



Μήτρα εκβολής τύπου σωλήνα

Επικάλυψη φύλλων με εκβολή

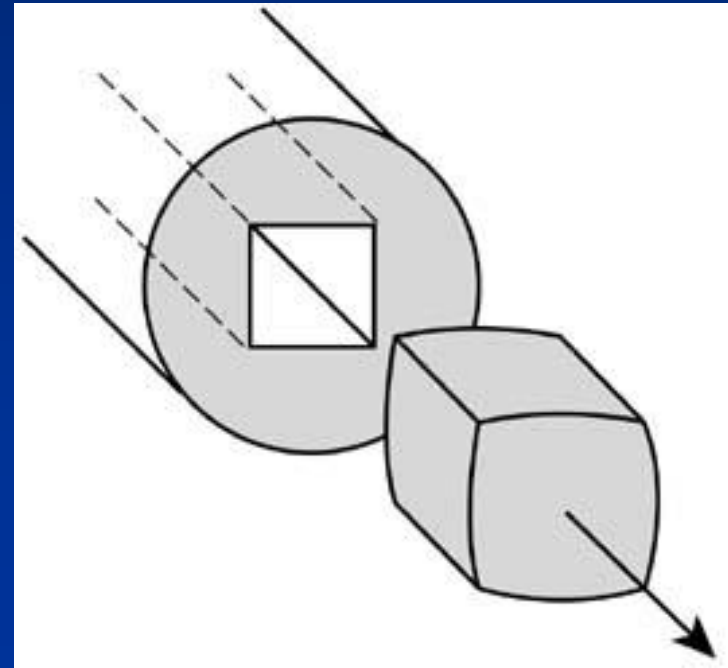


Παραγωγή προφίλ

Συνεχή παραγωγή πλαστικών προϊόντων με ομοιόμορφη, συμπαγή διατομή.

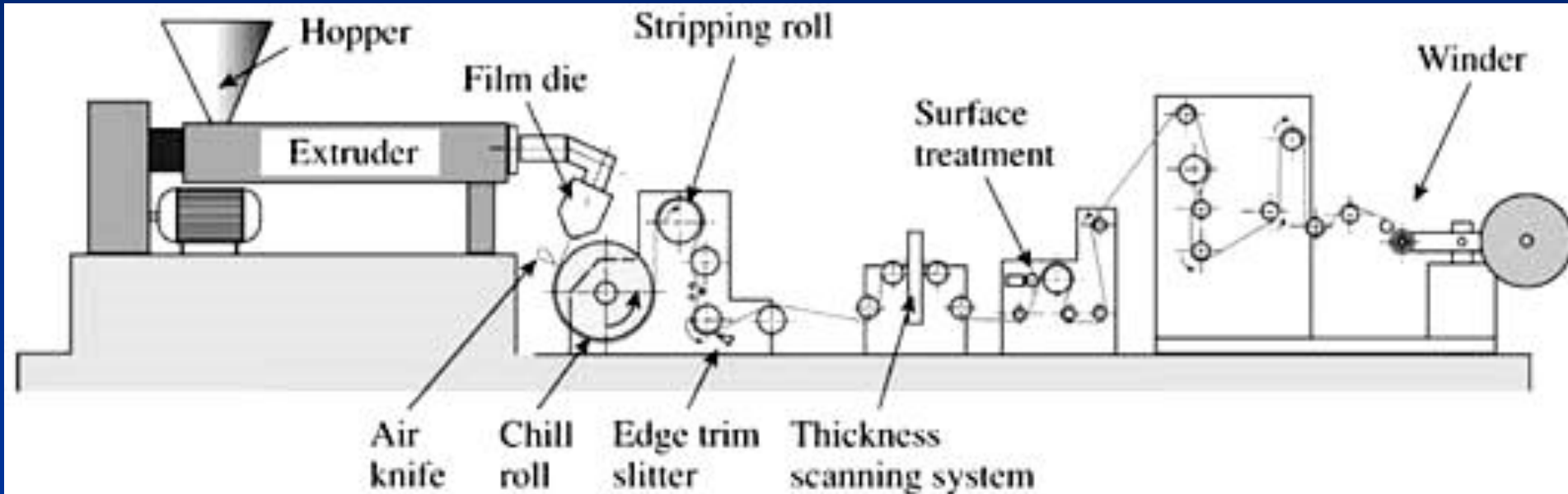
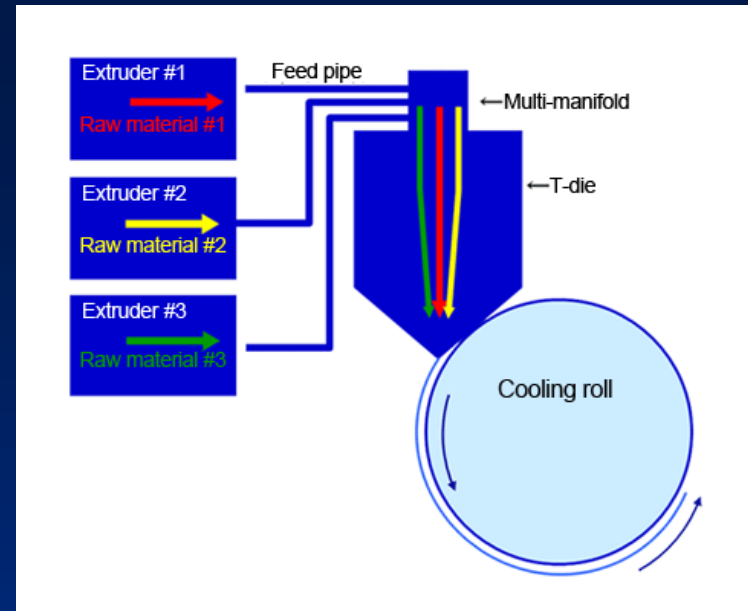
Ο σχεδιασμός της μήτρας επηρεάζεται :

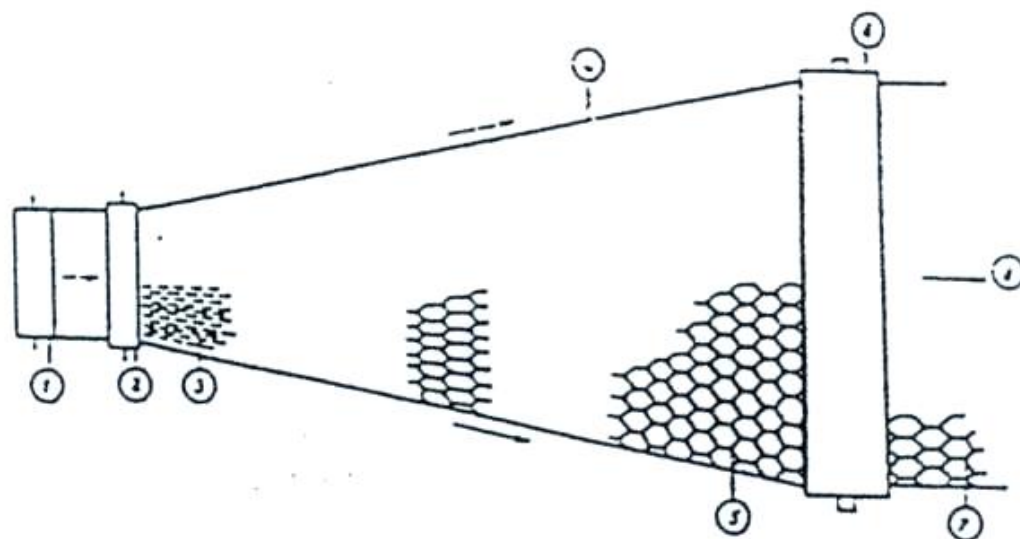
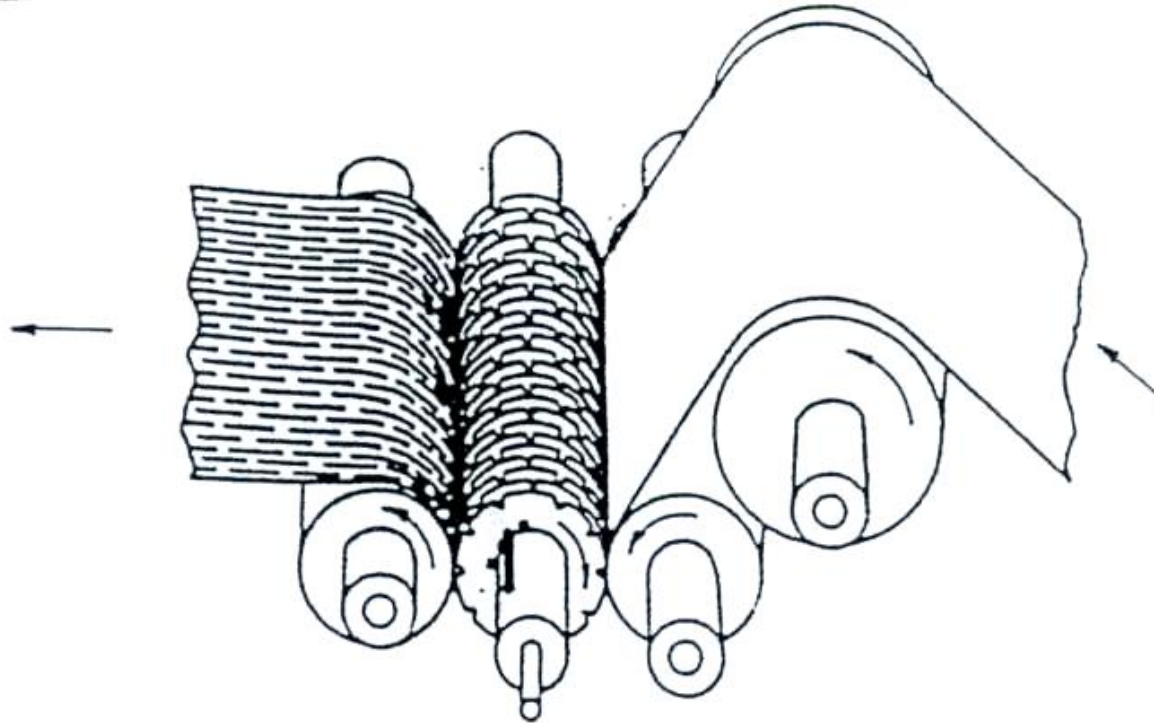
- ➔ Φαινόμενα διόγκωσης κατά την έξοδο από τη μήτρα (die swell)
- ➔ Χαρακτηριστικά ροής ιξωδοελαστικών τηγμάτων πολυμερών
- ➔ Από τη συρρίκνωση κατά την ψύξη του αντικειμένου



Εκβολή επίπεδου φιλμ

- ❖ *Λεπτό φιλμ* : πάχος 10-50μm
- ❖ *Φύλλο* : πάχος 100-400μm
- ❖ *Φύλλο για*
- ❖ *θερμομόρφωση* : πάχος 200-2500μm

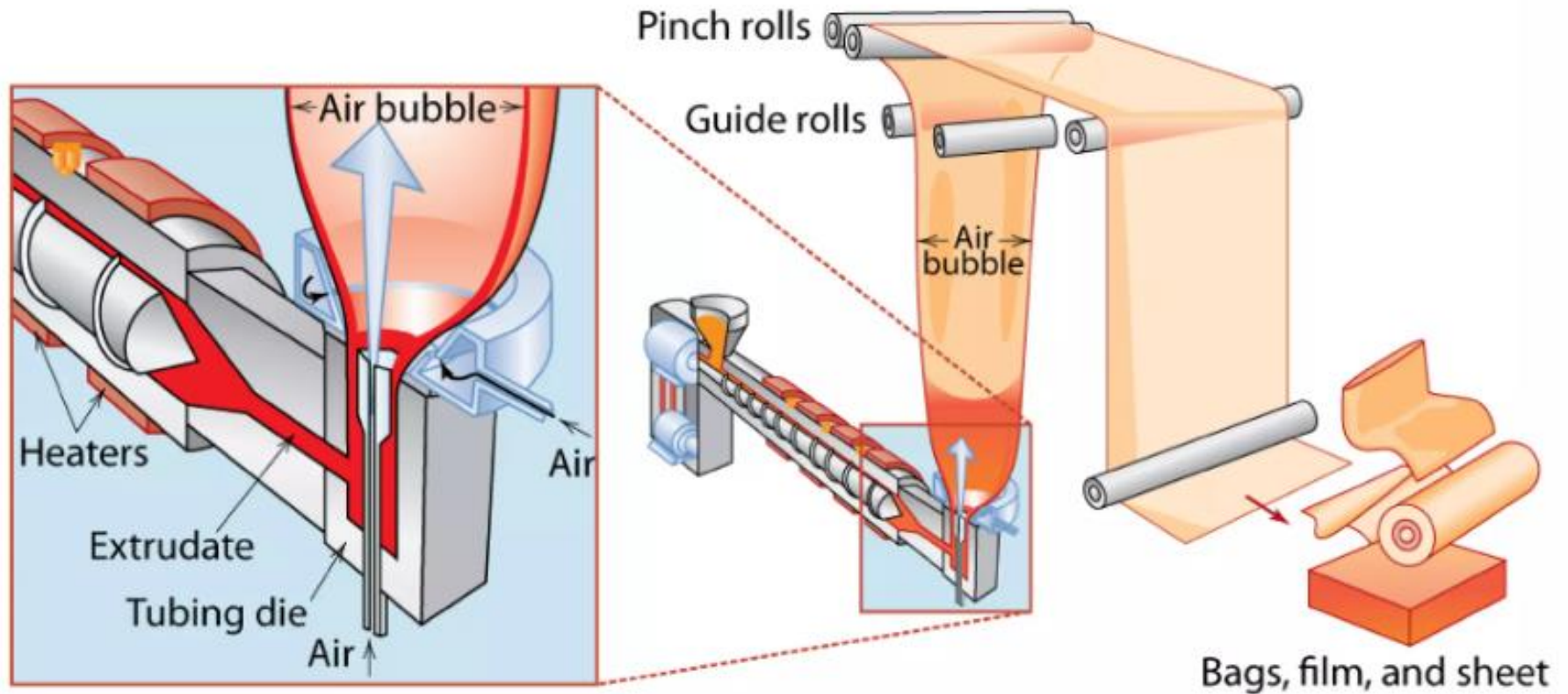




- 1—thermoplastic film
- 2—cutter disks with broken blades
- 3—cut film
- 4—stretcher

- 5—screen after stretching
- 6—heated roller
- 7—heat set screen
- 8—take-up motion

Παραγωγή φουσητού φιλμ



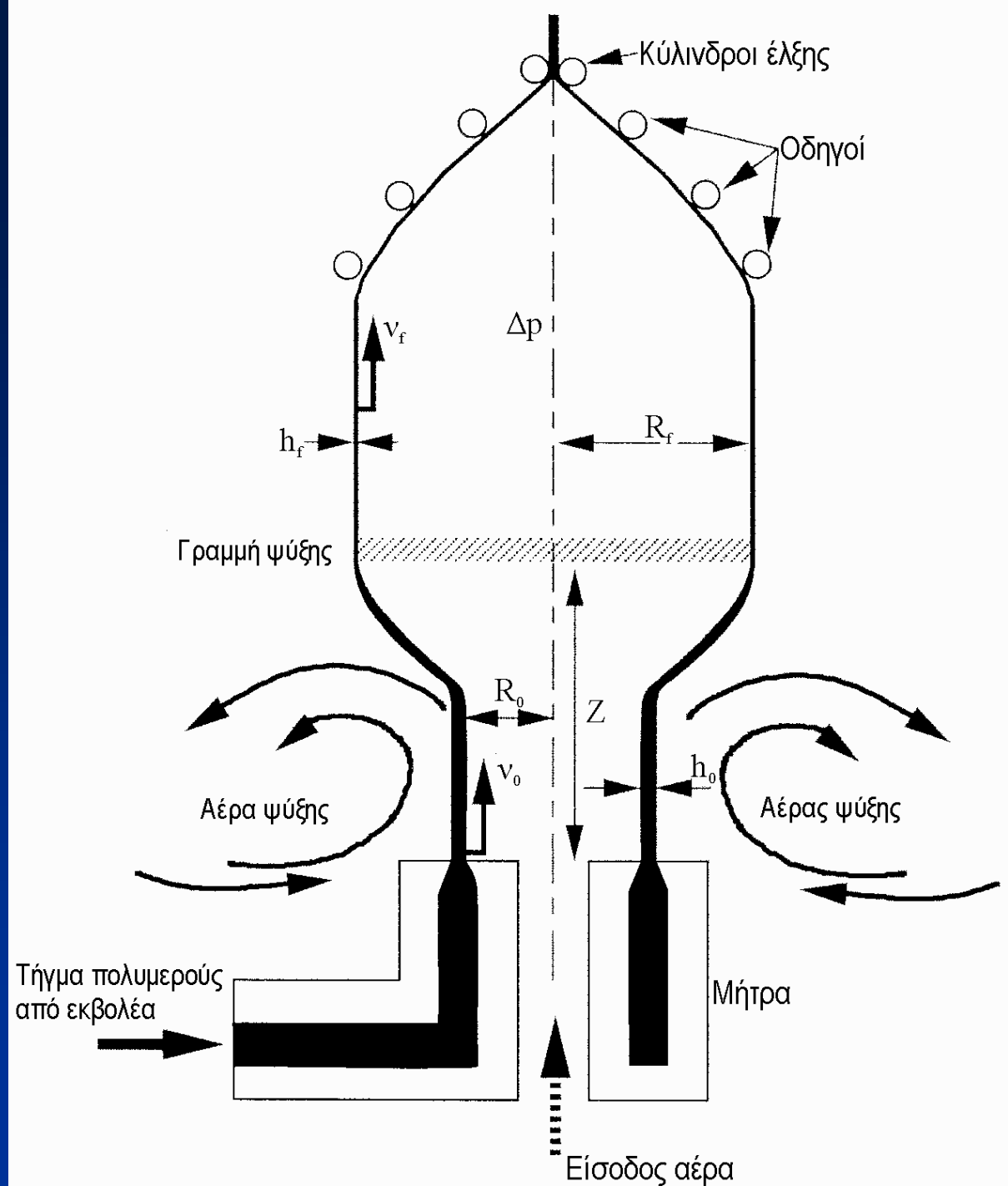
Brabender Plasti-Corder PLE 330



$L/D = 25:1$ (L=500 mm, D=20 mm)

Παραγωγή φυσικού φιλμ

Ι. Ψύξη με αέρα



Παράμετροι της παραγωγής φουσητού φιλμ

Ύψος γραμμής ψύξης (Frost Line Height, FLH)

Αύξηση της FLH

Μείωση του ρυθμού ψύξης του φιλμ

Λόγος εμφύσησης (Blow-up Ratio, BUR)

$$BUR = D_{\text{bubble}} / D_{\text{die}}$$

Τυπικές τιμές: 1 μέχρι 4

Ταχύτητα γραμμής

Καθορίζει το λόγο τανυσμού
(Draw-down ratio, DDR), $DDR = U_1 / U_0$

Τυπικές τιμές: 10 μέχρι 40

