



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”**

**6_ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΦΥΣΗΜΑ
7_ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΜΟΡΦΩΣΗ**

Ακαδημαϊκό έτος 2025-2026

Μορφοποίηση θερμοπλαστικών πολυμερών



- Εκβολή



- Έγχυση



- Μόρφωση με φύσημα



- Θερμομόρφωση



- Περιστροφική μόρφωση

Σχεδιασμός πλαστικής συσκευασίας

“Σκληρή” συσκευασία



Εύκαμπτη συσκευασία



Μόρφωση με φύσημα



Μόρφωση με την
εφαρμογή εκβολής
(Extrusion blow
molding)

Μόρφωση με την
εφαρμογή έγχυσης
(Injection blow
molding)

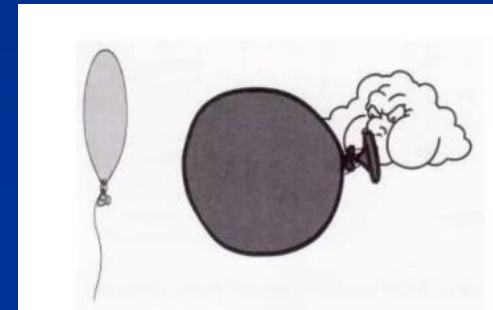
Μόρφωση με φύσημα
και προσανατολισμό
(Injection stretch blow
molding)

PET (33%), PC

Ασυνεχής εκβολή

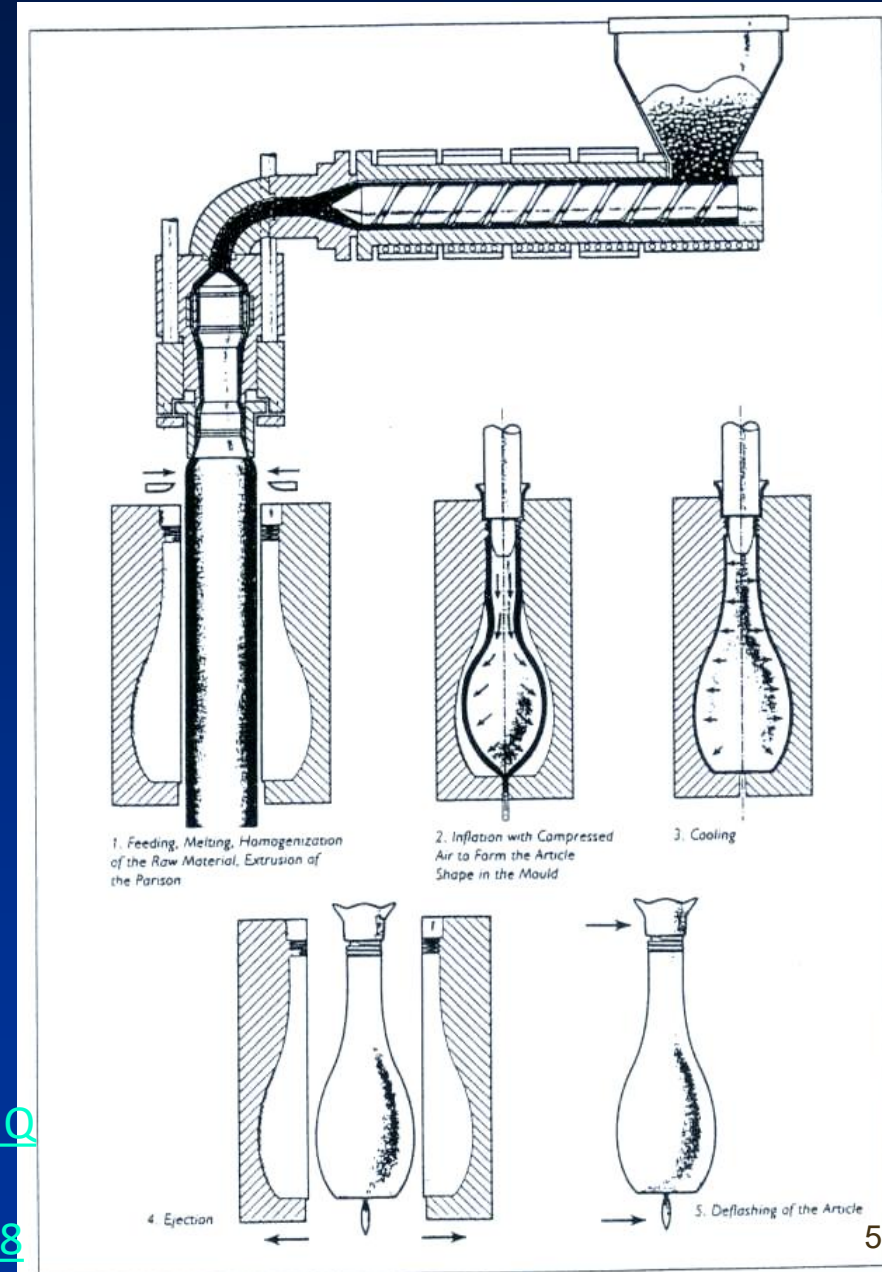
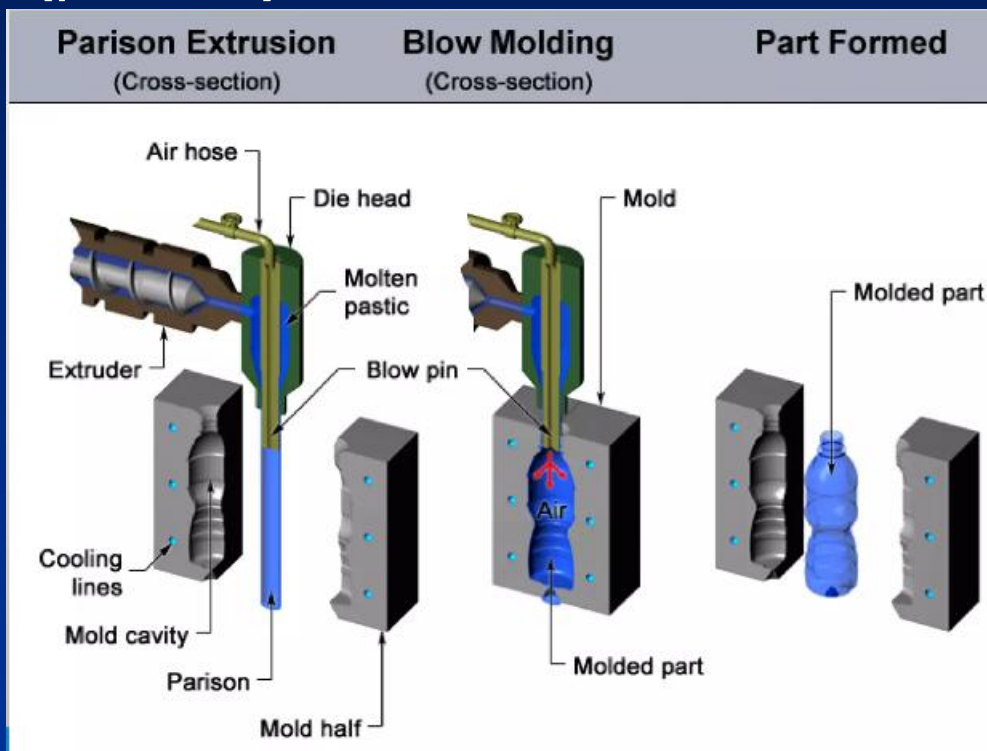
Συνεχής εκβολή

PVC, PS, PP, LDPE, HDPE (57%)



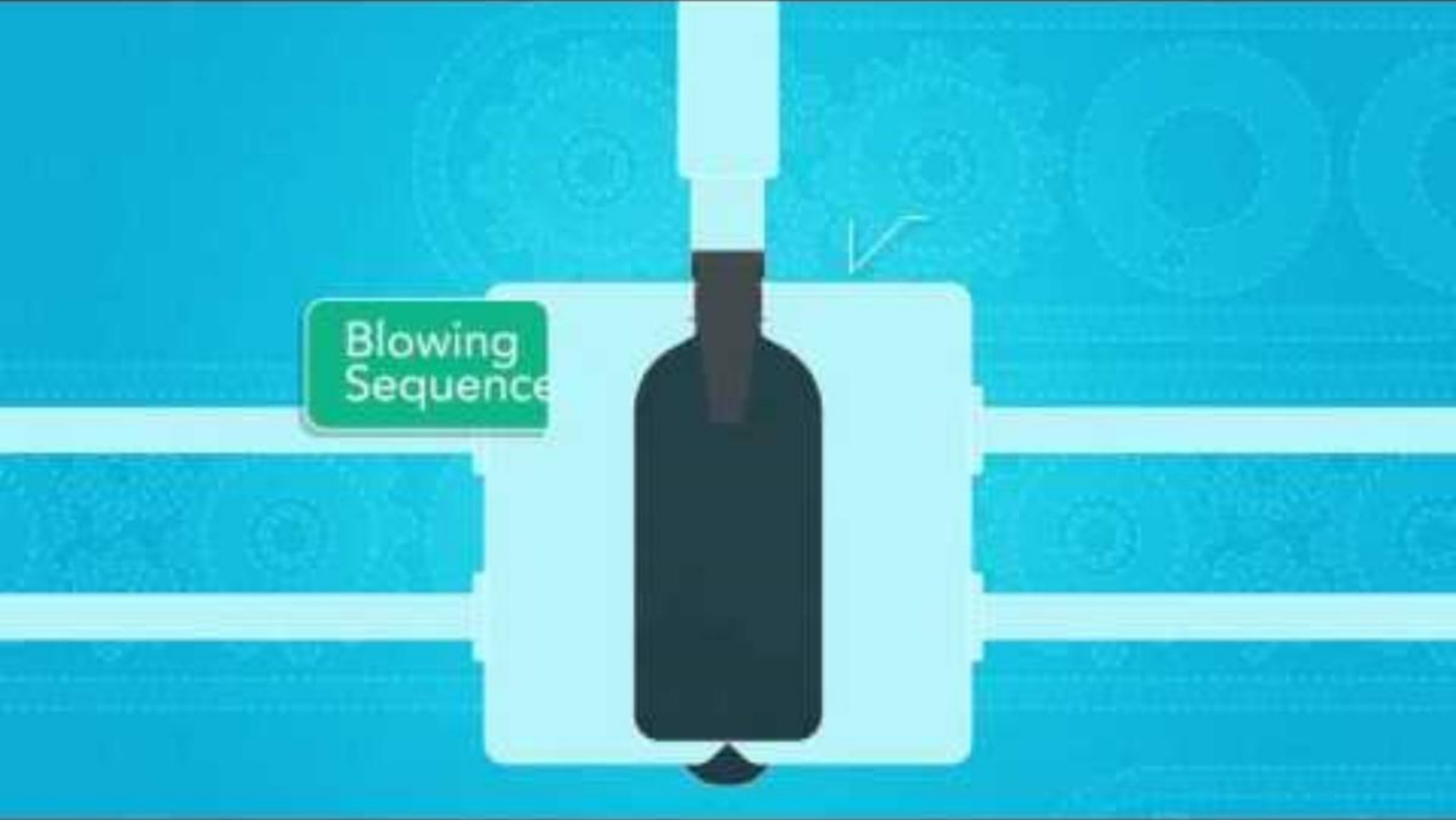
1. Μόρφωση με φύσημα με την εφαρμογή εκβολής (extrusion blow molding)

Χρόνος μορφοποίησης ↔
Χρόνος δημιουργίας σωλήνα
(parison)



<https://www.youtube.com/watch?v=8W6P5KU5ONQ>
<https://www.youtube.com/watch?v=236PIbUf2HQ>
<https://www.youtube.com/watch?v=oY7hyuMHm68>

1. Μόρφωση με φύσημα με την εφαρμογή εκβολής (extrusion blow molding)



<https://www.youtube.com/watch?v=236PlbUf2HQ>

1. Μόρφωση με φύσημα με την εφαρμογή εκβολής (extrusion blow molding)



1. Μόρφωση με φύσημα με την εφαρμογή εκβολής



1. Μόρφωση με φύσημα με την εφαρμογή εκβολής (extrusion blow molding)

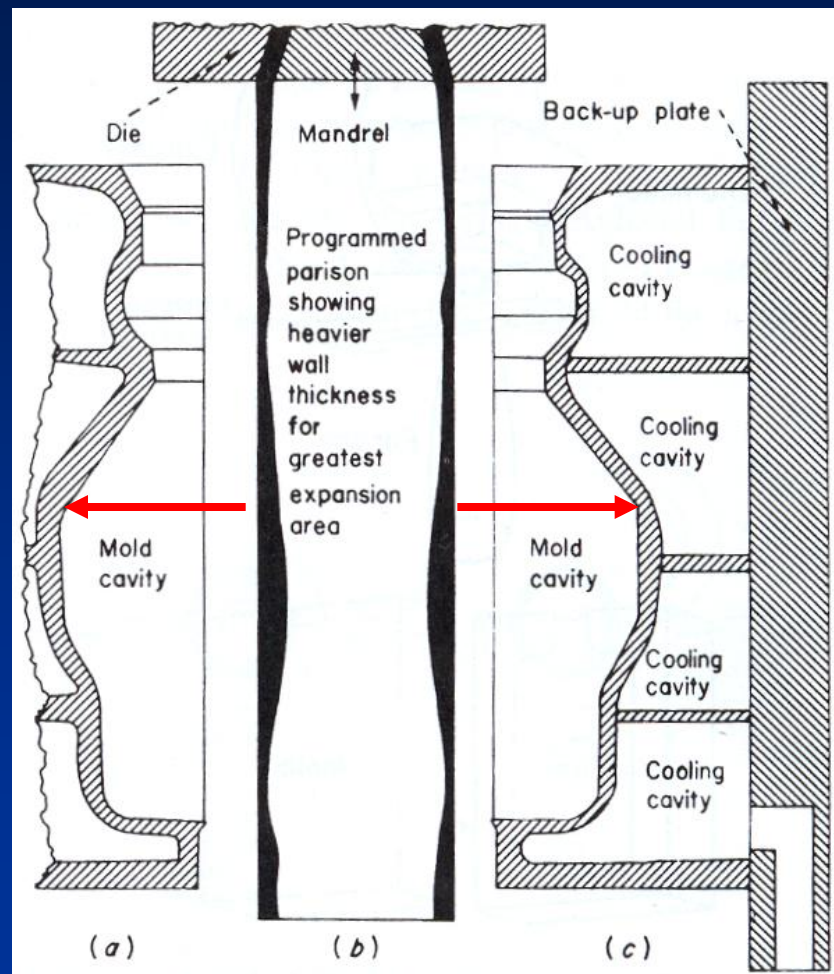
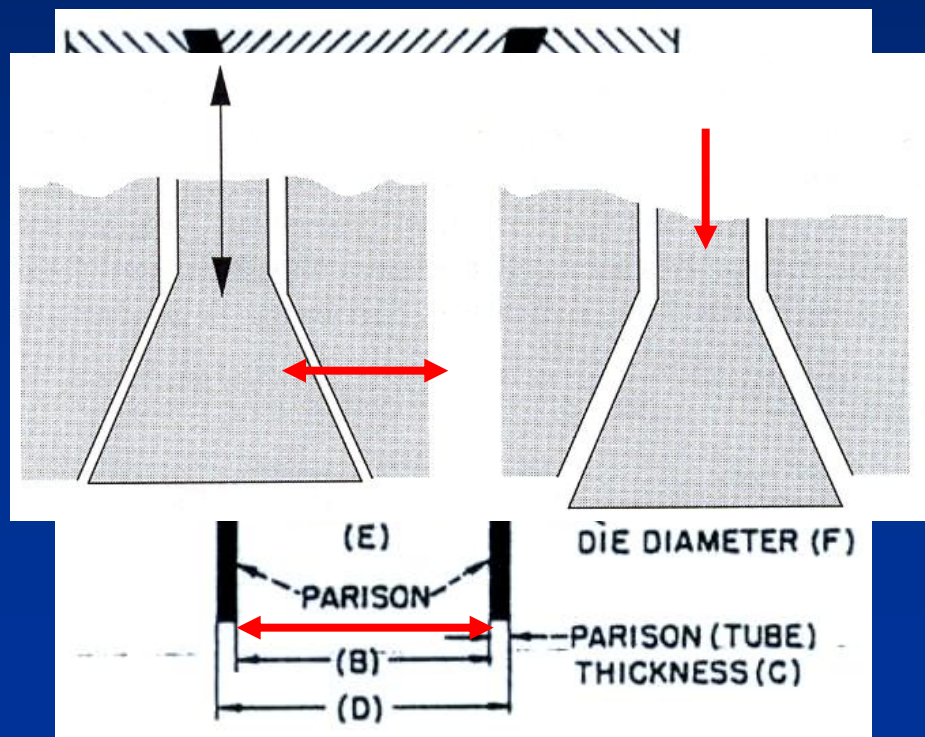


Καλούπι μορφοποίησης

Κρίσιμα στάδια κατά τη μόρφωση με φύσημα με την εφαρμογή εκβολής

1. Παραγωγή σωλήνα & Διόγκωση της μήτρας (die swelling)

- ➔ Η ογκομετρική παροχή εξόδου
- ➔ Η θερμοκρασία του τήγματος
- ➔ Η γεωμετρία της μήτρας (L/D)



https://www.youtube.com/watch?v=RDV6NXQ_7Rk

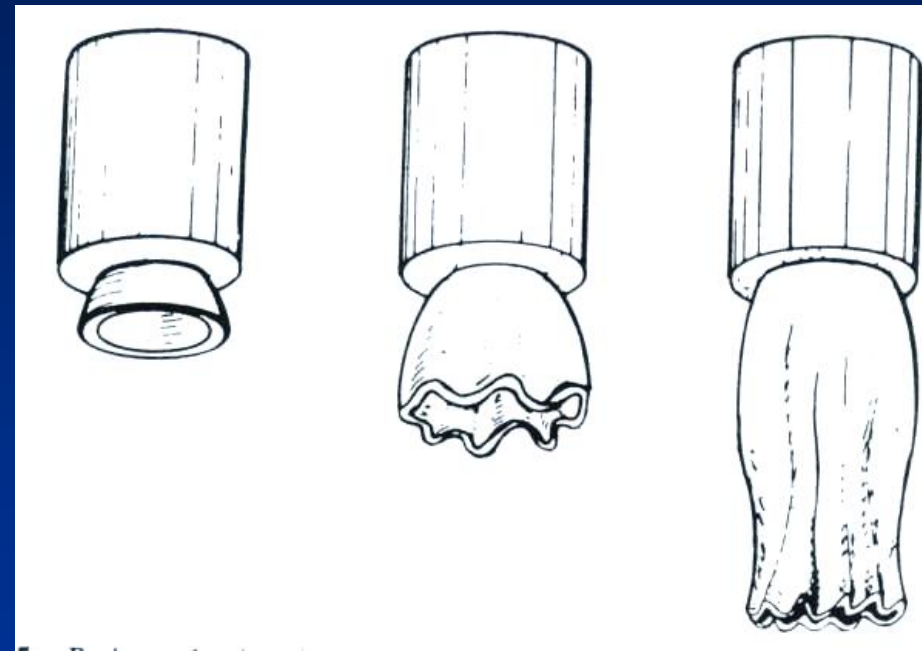
Κρίσιμα στάδια κατά τη μόρφωση με φύσημα με την εφαρμογή εκβολής

2. Λέπτυνση ή τράβηγμα του σωλήνα (parison sagging) λόγω του βάρους του

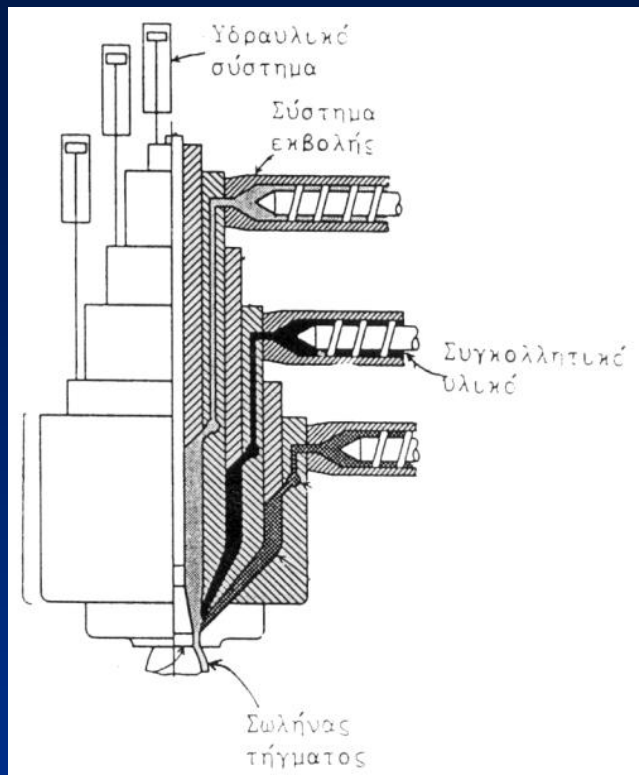
- ➔ Θερμοκρασία του τήγματος
- ➔ Ογκομετρικός ρυθμός ροής

3. Ψύξη αντικειμένου

- ➔ Θερμοκρασία του τήγματος
- ➔ Θερμοκρασία του καλουπιού
- ➔ Η πίεση του αέρα

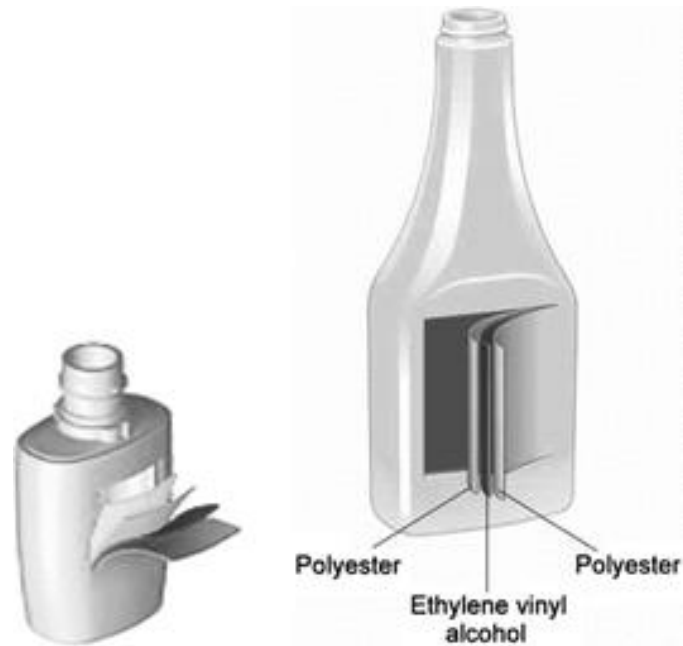


Συνεκβολή



- Ρεολογική συμβατότητα
- Βαθμός συγκόλλησης μεταξύ των διαφορετικών τηγμάτων

Σχεδιασμός πολυστρωματικών φιαλών με υλικά υψηλού φραγμού σε αέρια: συμπολυμερές αιθυλενίου-βινυλικής αλκοόλης (EVOH ή EVAL):



Typical applications	Typical structure (in / out)
Ketchup bottles, sauce bottles	PP/regrind/tie/ EVAL™ /tie/PP PP/tie/ EVAL™
Juice and milk bottles	PE/regrind/tie/ EVAL™ /tie/PE
Beer, carbonated beverages	PET/ EVAL™ /PET/ EVAL™ /PET PET/ EVAL™ /PET

Χαρακτηριστικά μόρφωσης με φύσημα με την εφαρμογή εκβολής

1. Η κατασκευή των καλουπιών είναι φθηνότερη από τη μόρφωση με έγχυση και φύσημα.
2. Συντομότεροι κύκλοι μορφοποίησης.
3. Ευελιξία στο σχεδιασμό προϊόντων
 - Παραγωγή κοίλων (εσωτερικά κενών) αντικειμένων μεσαίου μεγέθους
 - Αντικείμενα με στενό στόμιο και ευρύ κύριο σώμα
4. Ευρεία κλίμακα επιλογής ρητινών.
5. Οι ρεολογικές απαιτήσεις του τήγματος της πολυμερικής ρητίνης δεν είναι τόσο αυστηρές με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σε σημαντικό %, τεμαχισμένα scrap υλικά.
6. Σημαντικό ποσοστό scrap 20-30%.
7. Απαιτεί εξοπλισμό για τεμαχισμό και επαναχρησιμοποίηση του scrap.

2. Χαρακτηριστικά μόρφωσης με έγχυση και φύσημα (injection blow molding)

1. Μεγάλους όγκους παραγωγής για μικρότερου μεγέθους φιαλίδια.
2. Ελάχιστο ποσοστό scrap.
3. Ακρίβεια στις διαστάσεις των μορφοποιημένων αντικειμένων.
4. Δεν υπάρχουν διαχωριστικές γραμμές στο μορφοποιημένο αντικείμενο, από το κλείσιμο του καλουπιού.

https://www.youtube.com/watch?v=pN-MWbcE_vM

<https://www.youtube.com/watch?v=3IESHy6KTb4>

2. Μόρφωση με έγχυση και φύσημα (injection blow molding)



https://www.youtube.com/watch?v=pN-MWbcE_vM

<https://www.youtube.com/watch?v=3IESHy6KTb4>

2. Μόρφωση με έγχυση και φύσημα (injection blow molding)



Injection Blow Machine

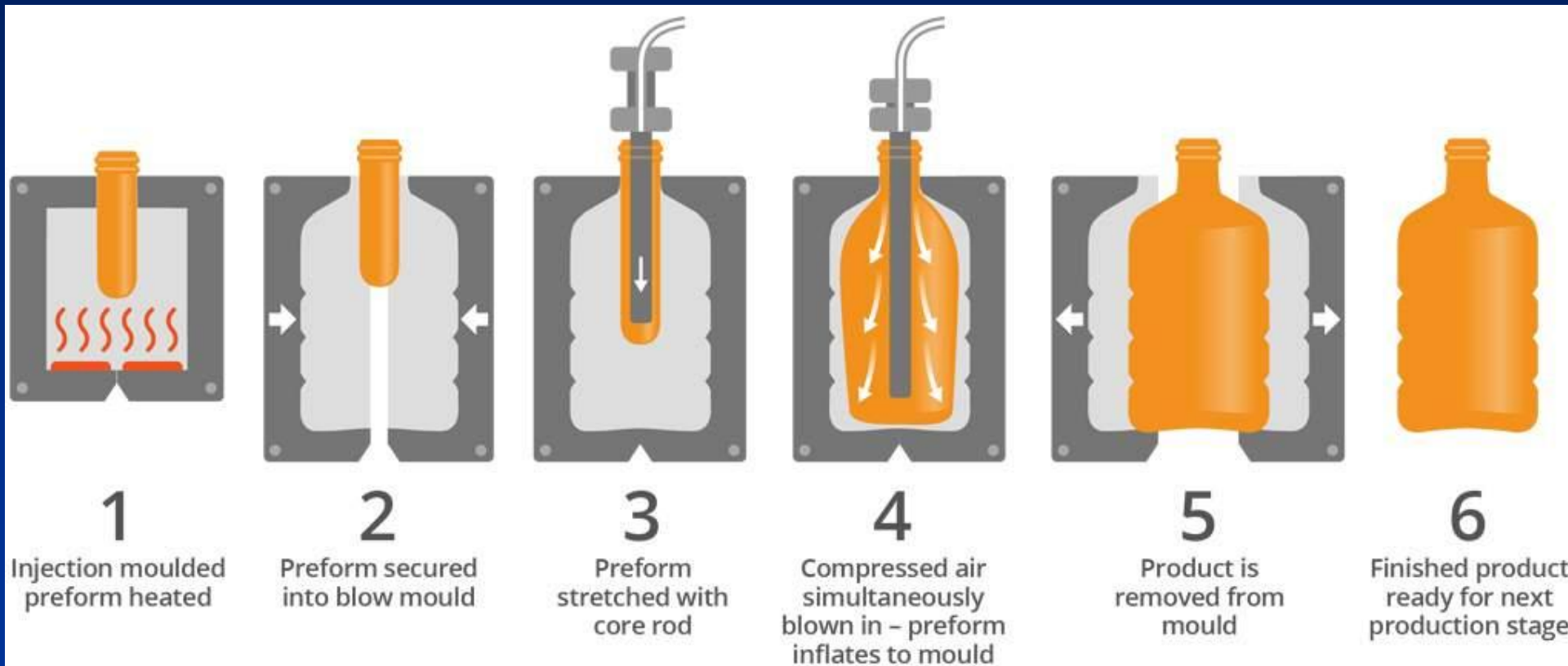
For 1-Ltr Bottle



https://www.youtube.com/watch?v=pN-MWbcE_vM

<https://www.youtube.com/watch?v=3IESHy6KTb4>

3. Μόρφωση με έγχυση, έκταση και φύσημα (injection stretch blow molding)

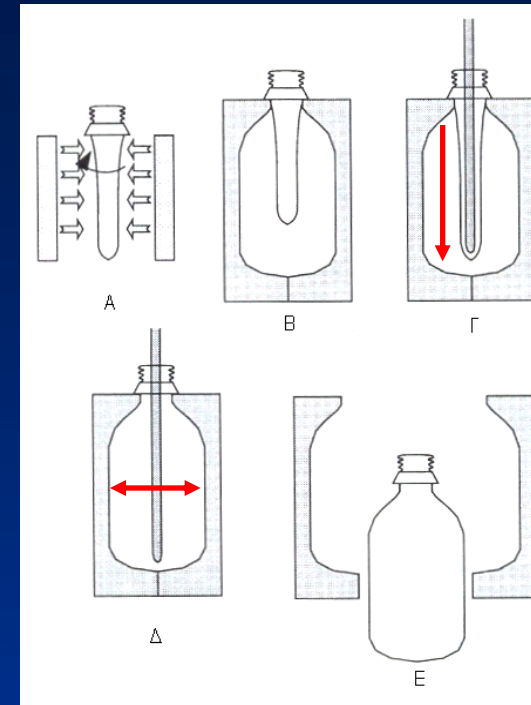


3. Μόρφωση με έγχυση, έκταση και φύσημα (injection stretch blow molding)

Στάδια μορφοποίησης (PET)

1. Μορφοποίηση του προμορφώματος (preform) στους 250-280°C και απότομη ψύξη ($\rightarrow 20^{\circ}\text{C}$).
2. Ομοιόμορφη θέρμανση στους 90-115°C.
3. Διαξονικός προσανατολισμός με
 - **έκταση** (αξονική επιμήκυνση: 2.4-2.6) και
 - **φύσημα** (περιφερειακή επιμήκυνση: 4-4.5)

➔ Σχηματισμός μικρών κρυσταλλιτών (stress-induced crystallization)
20-30 % κρυσταλλικότητα.
4. Ψύξη – Παραλαβή αντικειμένου

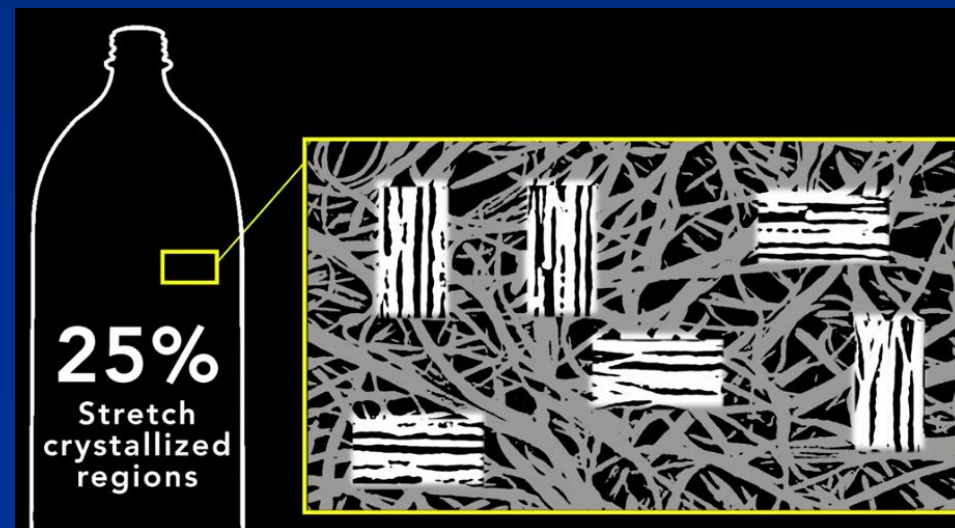
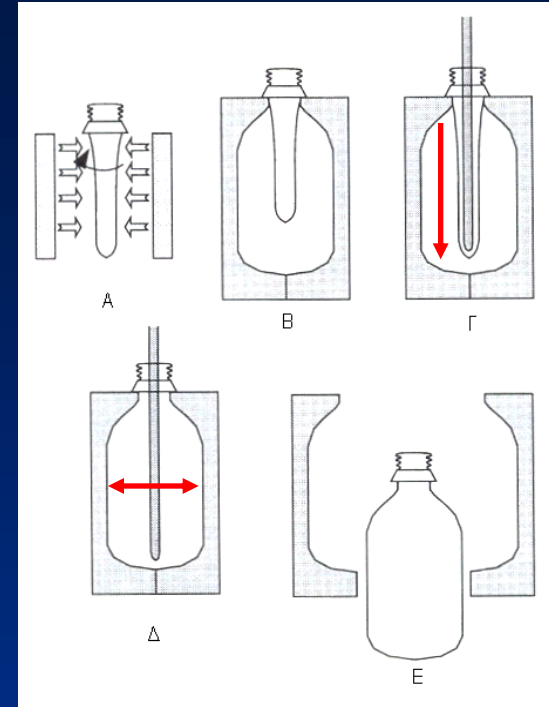


https://www.youtube.com/watch?v=kU_gH36GG58

<https://www.youtube.com/watch?v=arMY8Mly0v0>
<https://www.youtube.com/watch?v=AAvOYz7qOsw>
<https://www.youtube.com/watch?v=fBa9BWIT6gg>
<https://www.youtube.com/watch?v=hWUIR7DlrOo>

3. Μόρφωση με έγχυση, έκταση και φύσημα (injection stretch blow molding)

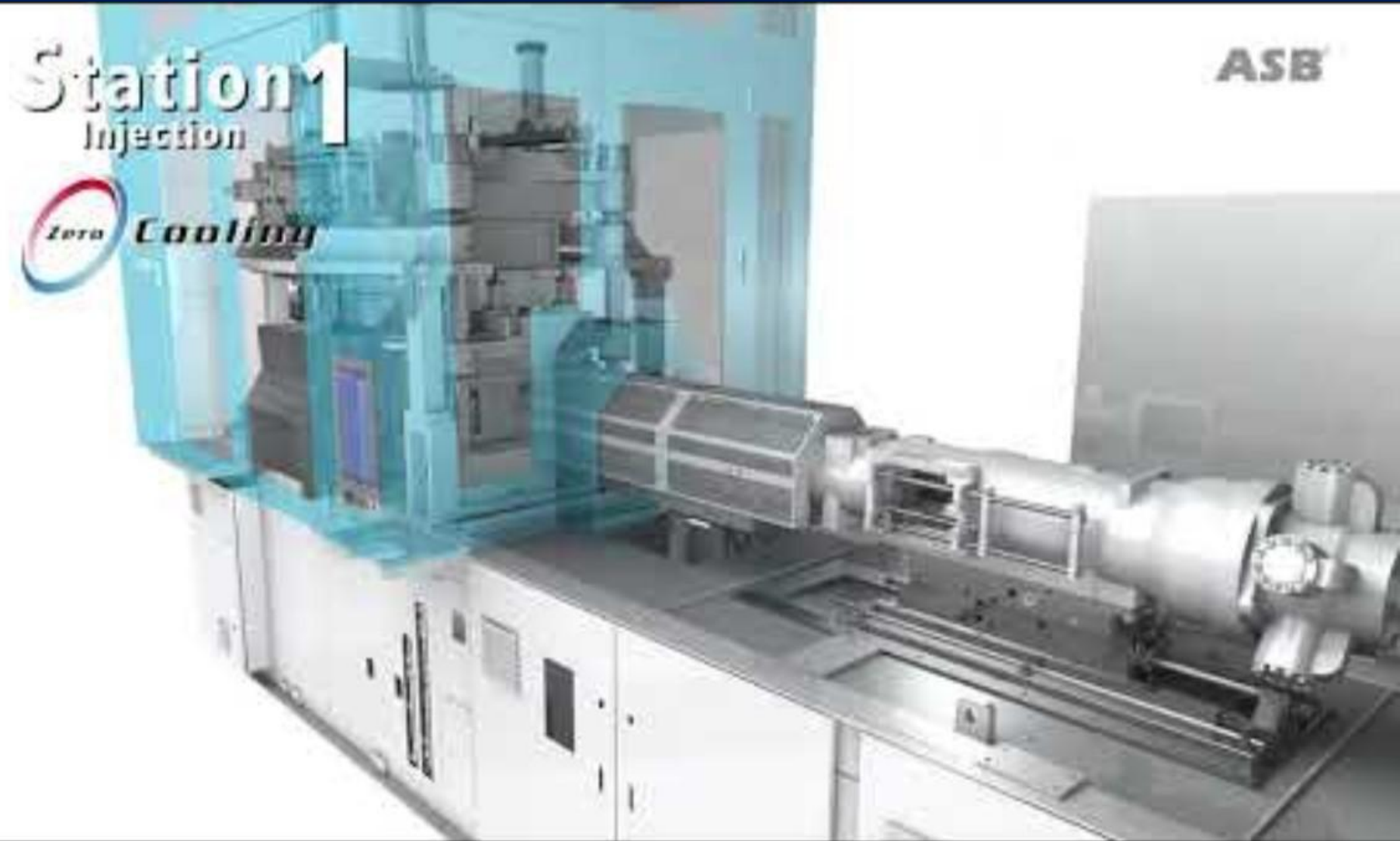
3. Διαξονικός προσανατολισμός με
- έκταση (αξονική επιμήκυνση: 2.4-2.6) και φύσημα (περιφερειακή επιμήκυνση: 4-4.5)
- ➔ Σχηματισμός μικρών κρυσταλλιτών
(stress-induced crystallization)
20-30 % κρυσταλλικότητα.



Μόρφωση με έγχυση, έκταση και φύσημα (injection stretch blow molding)



Μόρφωση με έγχυση, έκταση και φύσημα (injection stretch blow molding)



Μόρφωση με έγχυση, έκταση και φύσημα (injection stretch blow molding)



Μόρφωση με έγχυση, έκταση και φύσημα (injection stretch blow molding)



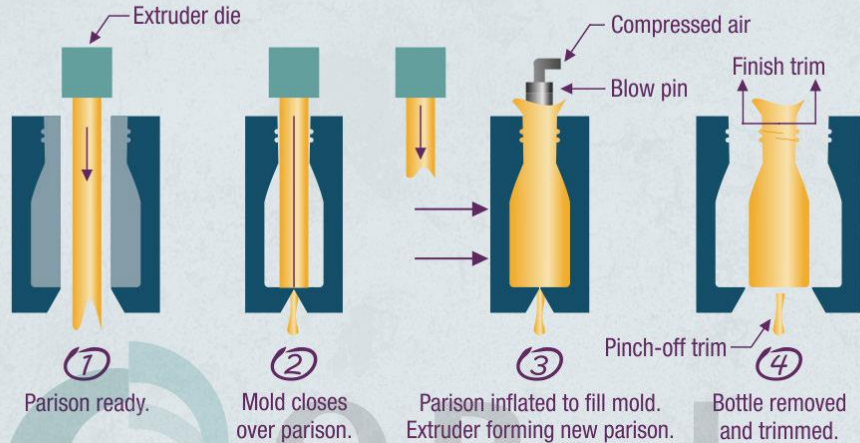
Μορφοποίηση φιαλών PET

Πλεονεκτήματα της μορφοποίησης με έγχυση, έκταση και φύσημα:

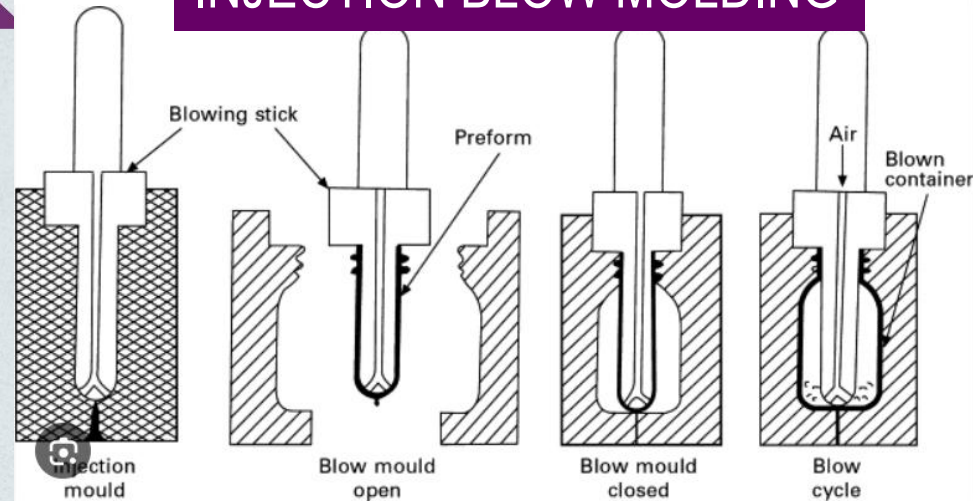


- 👍 Αυξημένη ακαμψία, που οδηγεί σε καλή συμπεριφορά κατά τη διαδικασία της συσκευασίας.
- 👍 Αύξηση της αδιαπερατότητας στα αέρια (προσανατολισμός μοριακών αλυσίδων).
- 👍 Αυξημένη ακρίβεια στον έλεγχο των διαστάσεων του μορφοποιημένου αντικειμένου.
- 👍 Δυνατότητα να γίνει συνδυασμός του πάχους του προμορφώματος (preform) με τη διόγκωση της φιάλης και επομένως να ελεγχθεί το πάχος των τοιχωμάτων.

EXTRUDED BLOW MOLDING

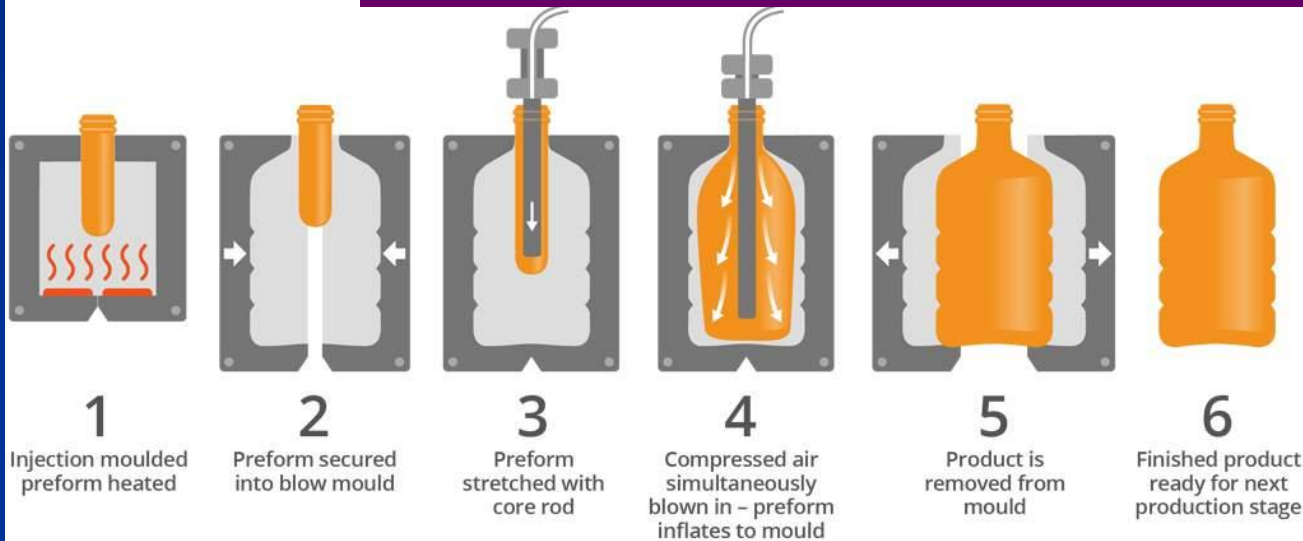


INJECTION BLOW MOLDING



https://www.youtube.com/watch?v=kU_gH36GG58

INJECTION STRETCH BLOW MOLDING



Τεχνολογίες Παραγωγής εύκαμπτων πολυμερικών μεμβρανών (φιλμ)

Τεχνολογίες τήγματος

Παραγωγή φιλμ με εκβολή και φύσημα (Παραγωγή φυσητού φιλμ)

Παραγωγή φιλμ με εκβολή σε μήτρα επίπεδης σχισμής (χυτό φιλμ)

Παραγωγή φιλμ με κυλίνδρωση

Τεχνολογία διαλύματος

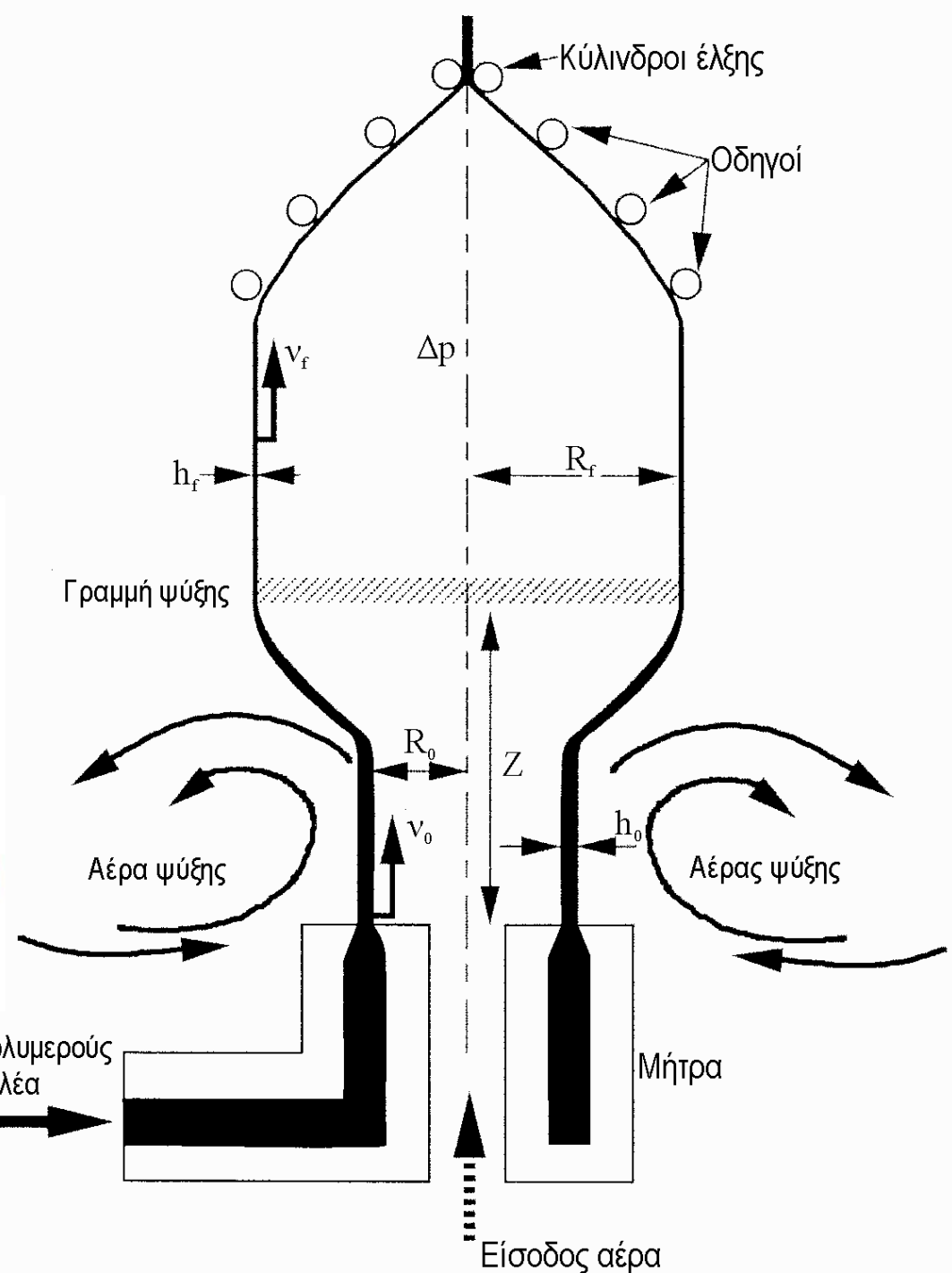
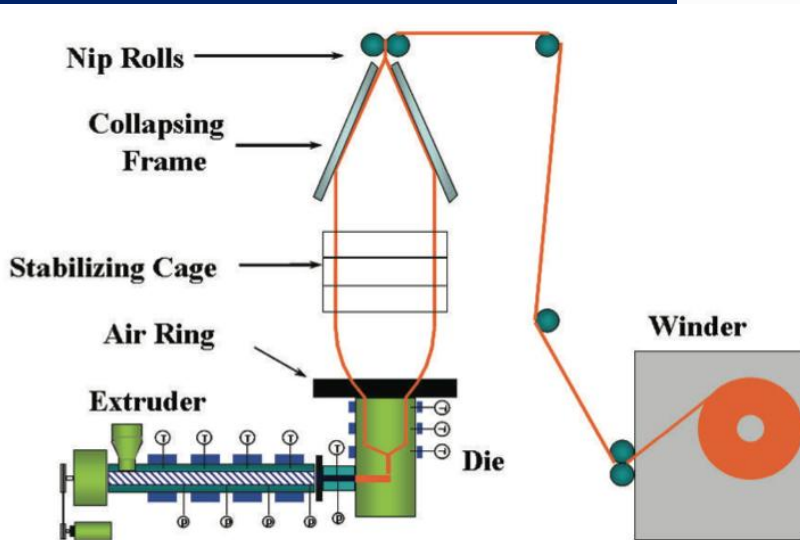
Παραγωγή φιλμ με χύτευση διαλύματος πολυμερούς



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

Παραγωγή φουσητού φιλμ

I. Ψύξη με αέρα



<https://www.youtube.com/watch?v=JMFsX8GPjt0>
<https://www.youtube.com/watch?v=oit6nSwqUNY>

Παραγωγή φιλμ με εκβολή και φύσημα (παραγωγή φυσητού φιλμ, blown film)

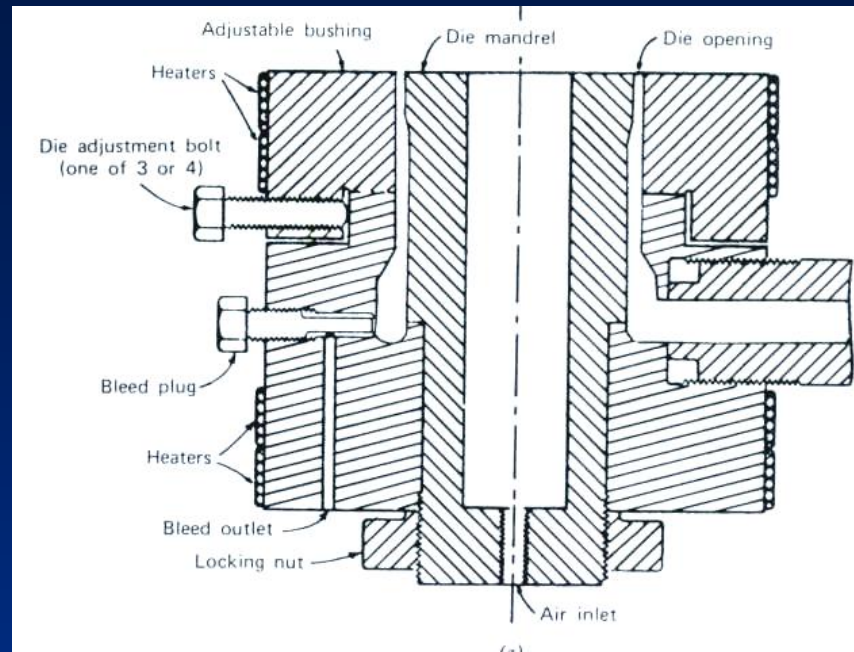
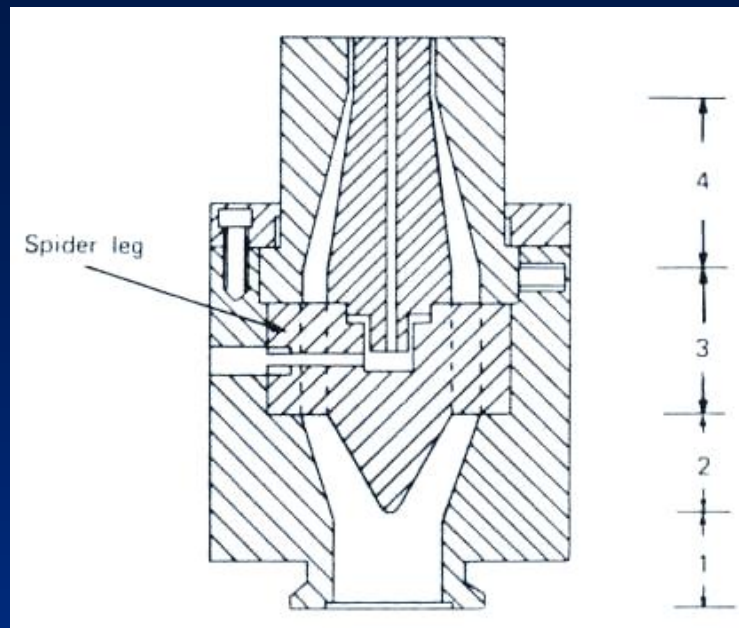


Εργαστηριακός μονοκόχλιος εκβολέας Brabender Plasti-corder PLE 330 με διάταξη παραγωγής φιλμ με φύσημα



L/D: 25/1, L: 500 mm, D: 20 mm

Μήτρες εκβολής



1. Μήτρα τύπου «αράχνης»:
δακτύλιο υποστήριξης με
ακτινικά στοιχεία που συνδέουν
σταθερά τον άξονα με το σώμα
της μήτρας

2. Μήτρα με πλευρική
τροφοδοσία

Παράμετροι της παραγωγής φυσητού φιλμ

1. Θερμοκρασία του τήγματος

Λόγω του σημαντικού ανοίγματος της δακτυλιοειδούς μήτρας, δεν επηρεάζεται ο προσανατολισμός των μορίων ακόμη και σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες τήγματος.

2. Η θερμοκρασία νερού/αέρα ψύξης

Η ψύξη με νερό είναι πιο ισχυρή από την ψύξη με αέρα.

Αύξηση της θερμοκρασίας του μέσου ψύξης 

Αύξηση στο % κρυσταλλικότητας του φιλμ
(χαμηλός ρυθμός ψύξης)

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, B_R)

$$B_R = R_f / R_0$$

Τυπικές τιμές: 1 μέχρι 4

Ταχύτητα γραμμής

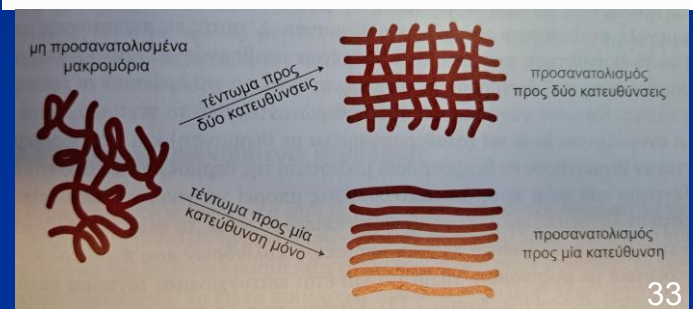
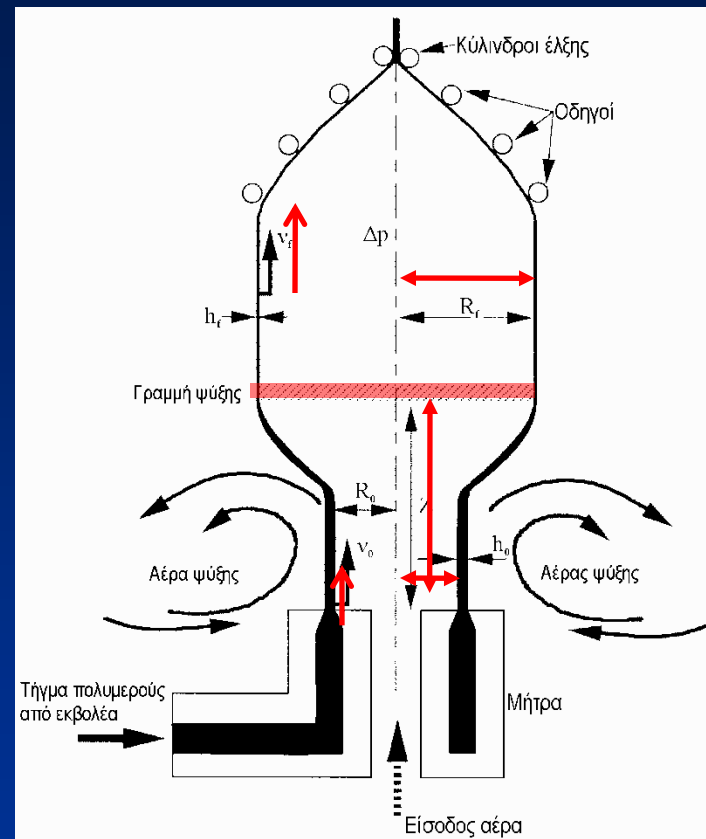
Καθορίζει το λόγο τανυσμού (Draw-down ratio, D_R), $D_R = v_f / v_0$

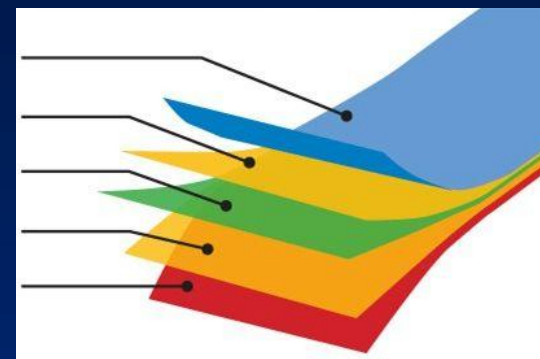
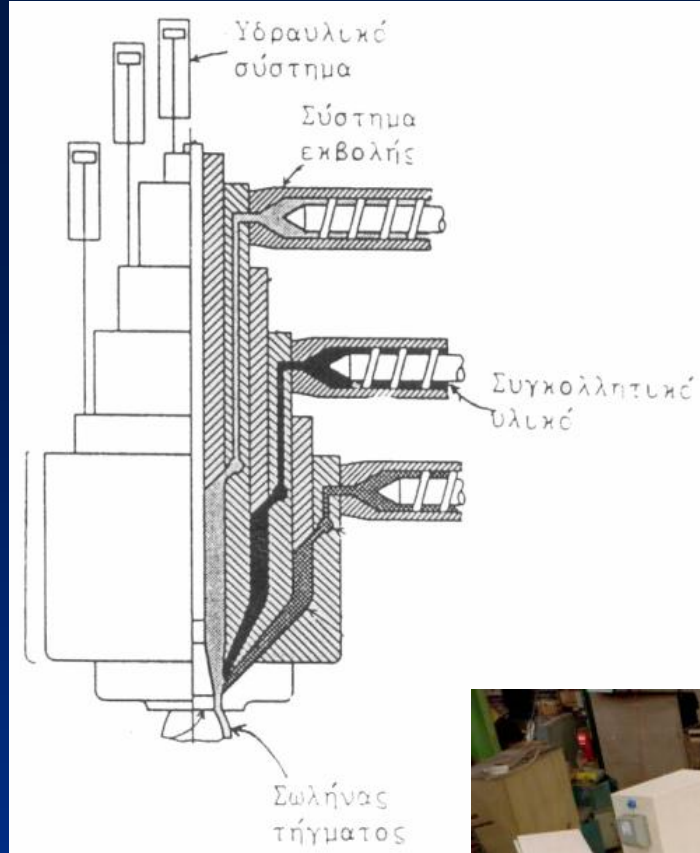
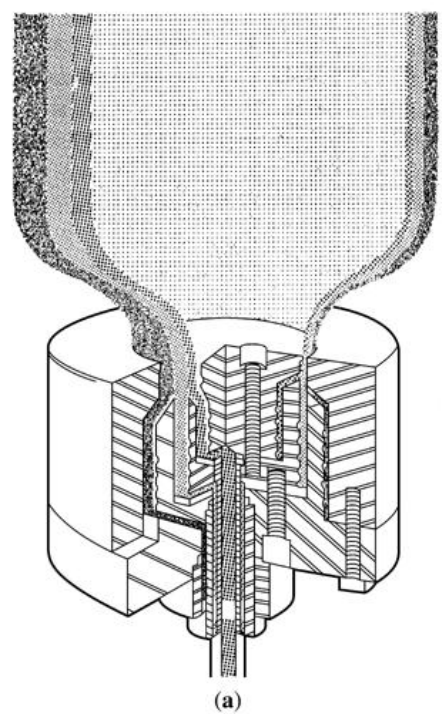
Τυπικές τιμές: 10 μέχρι 40

Μείωση πάχους

$$T_r = h_0 / h_f$$

Τυπικές τιμές: μεταξύ 20 και 200





Υλικά φραγμού:

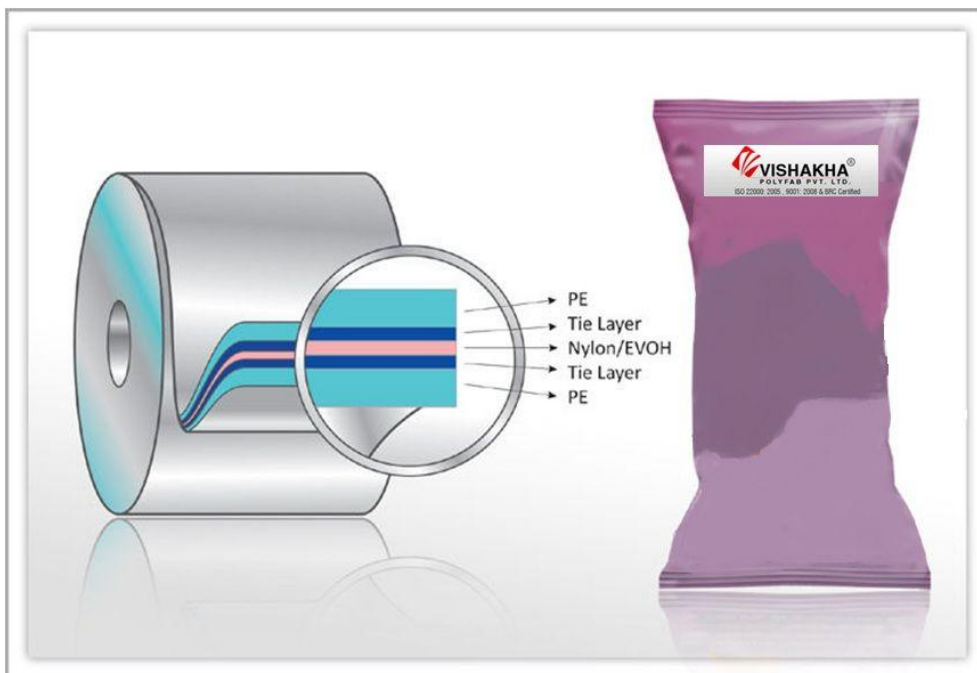
- συμπολυμερές αιθυλενίου και βινυλικής αλκοόλης (EVOH)
- συμπολυμερές βινυλιδενοχλωριδίου-βινυλοχλωριδίου, (PVDC)

<https://www.youtube.com/watch?v=JiFNGAfmyeY>
<https://www.youtube.com/watch?v=uEGs91p9Suo>

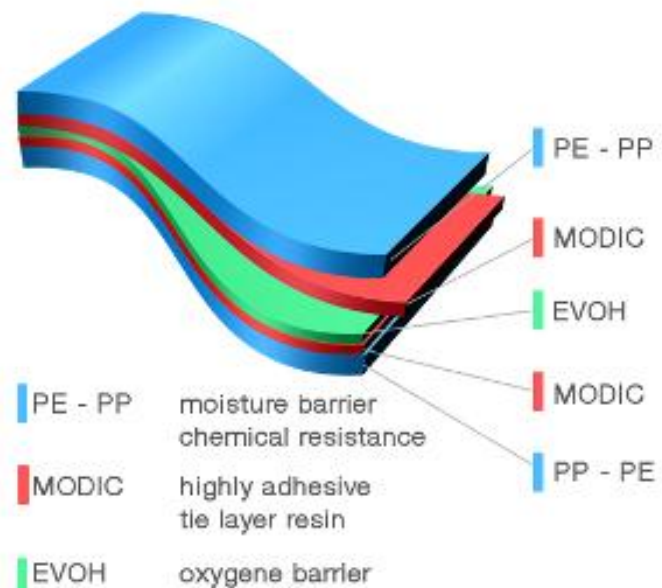


➤ Παραγωγή φουσητού φίλμ με Συνεκβολή (Co-extrusion)
διαφορετικών πλαστικών



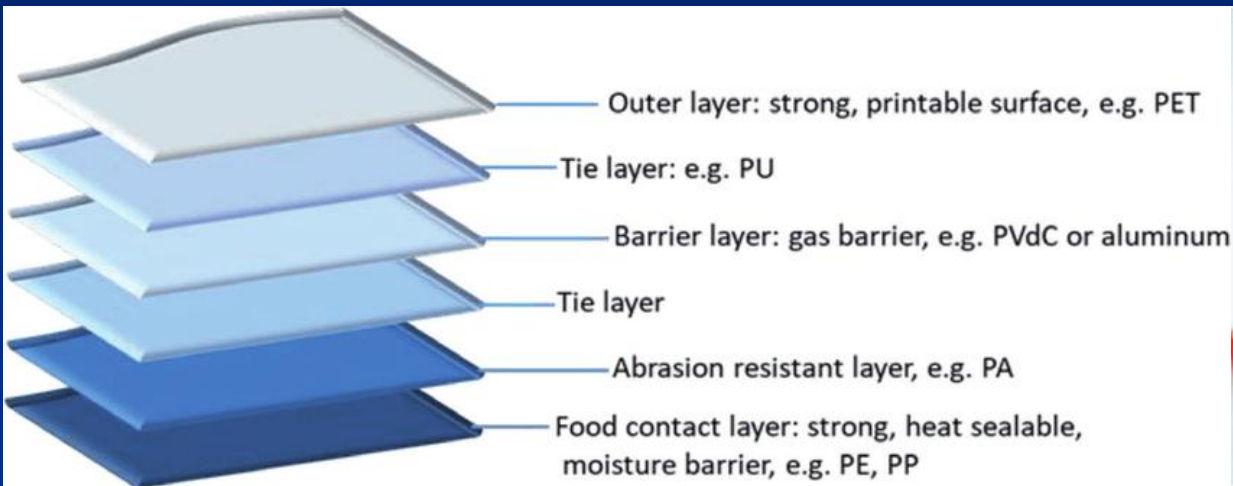


TYPICAL BUILD-UP MULTILAYER BARRIER FILM



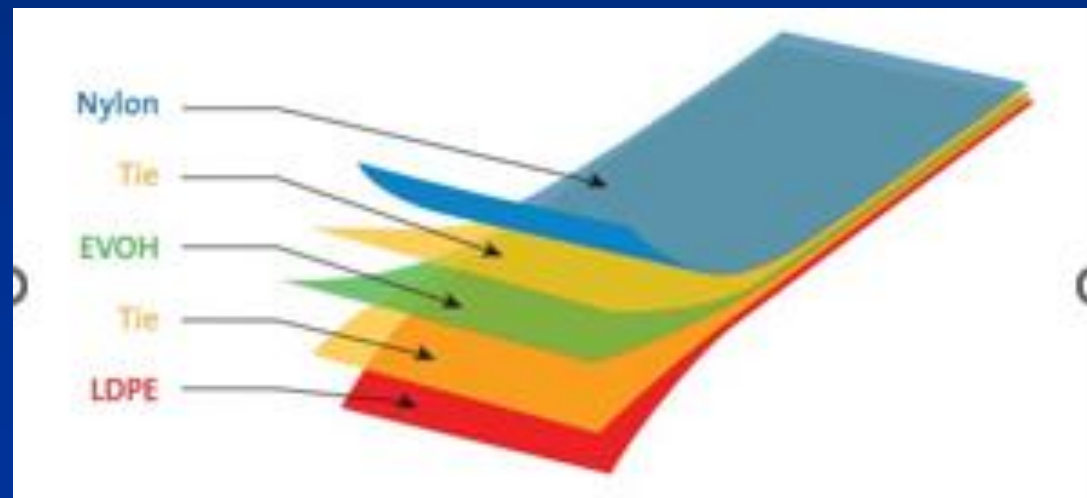
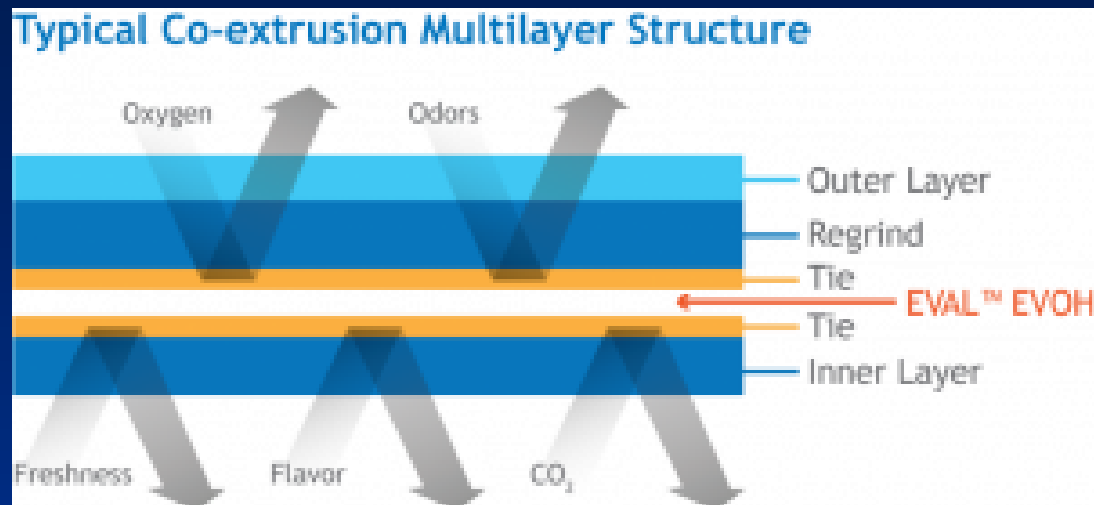
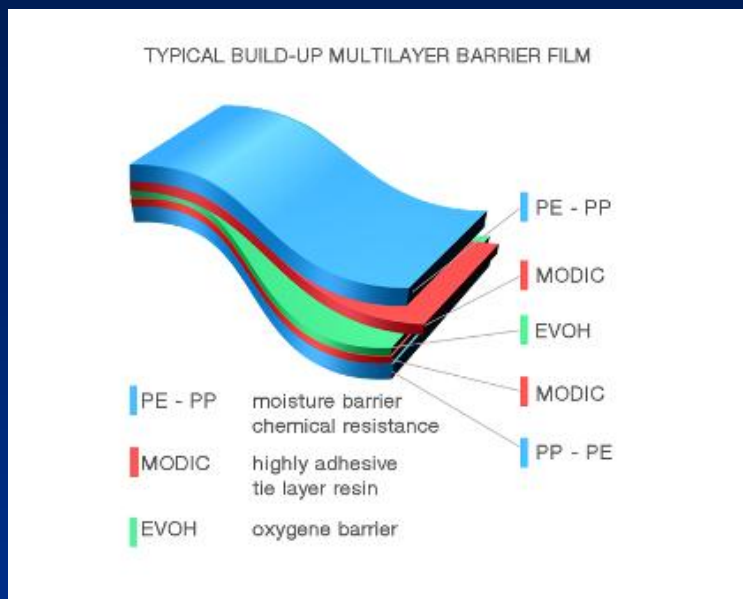
Πολυστρωματικές δομές εύκαμπτων μεμβρανών (Laminates)

- Laminate: πολυστρωματικός συνδυασμός εύκαμπτων υλικών συσκευασίας π.χ. χαρτί, πλαστικών μεμβρανών, αλουμίνιο με κάθε στρώμα να έχει πάχος μεγαλύτερο από 6 μm .



Διεργασίες παρασκευής πολυστρωματικών δομών από εύκαμπτες πολυμερικές μεμβράνες (Laminates):

➤ Συνεκβολή (Co-extrusion) διαφορετικών πλαστικών

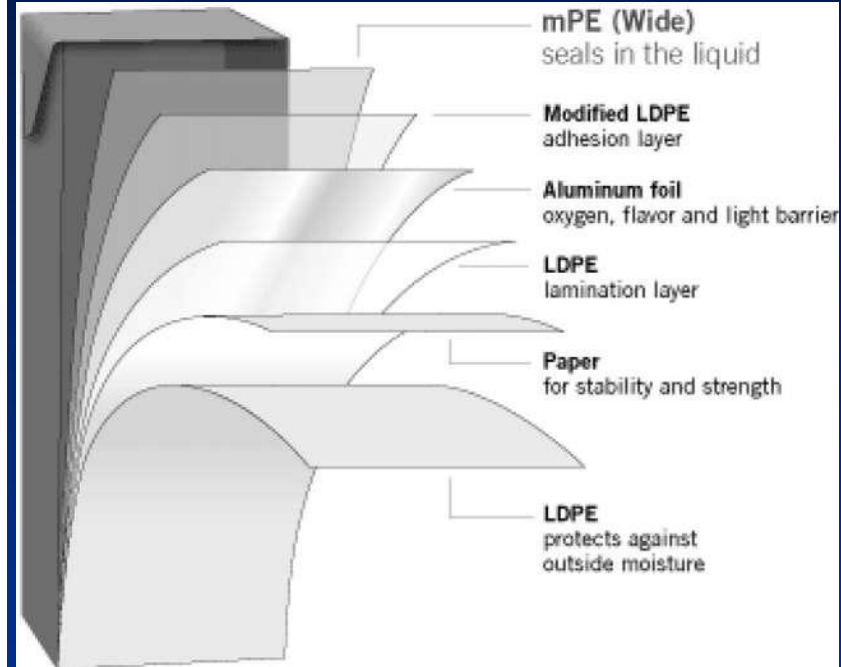
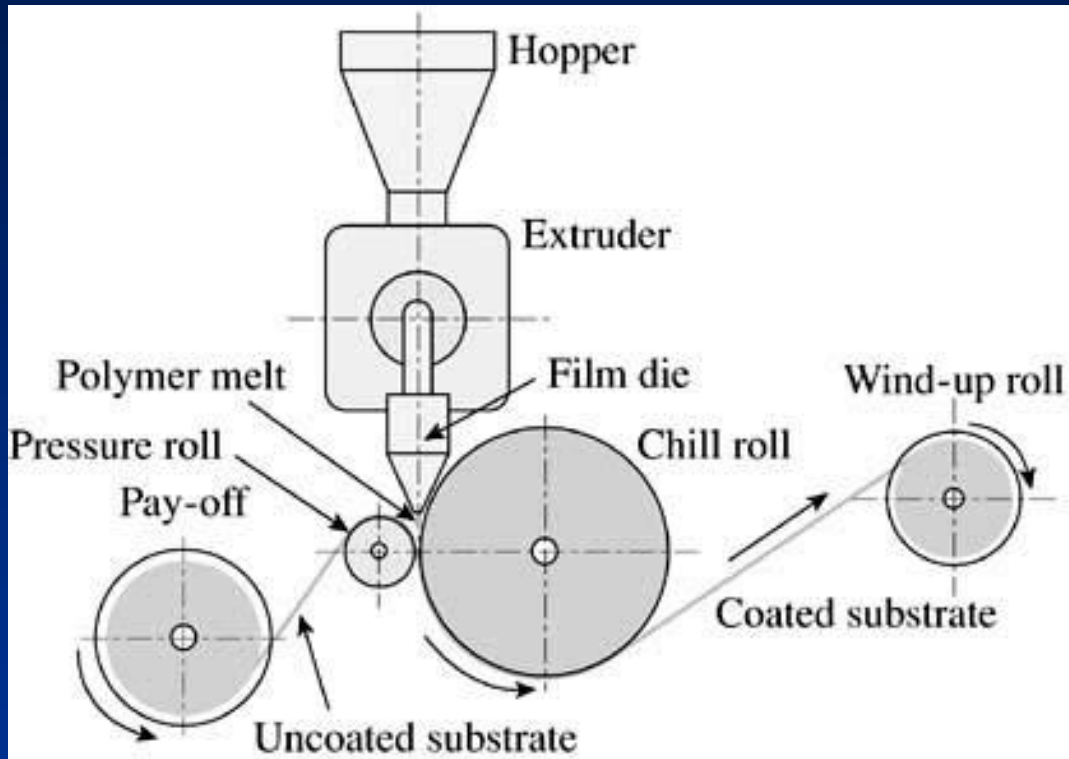


Υλικά φραγμού:

- συμπολυμερές αιθυλενίου και βινυλικής αλκοόλης (EVOH ή EVAL)
- συμπολυμερές βινυλιδενοχλωριδίου-βινυλοχλωριδίου, (PVdC)

Διεργασίες παρασκευής πολυστρωματικών δομών από εύκαμπτες πολυμερικές μεμβράνες (Laminates):

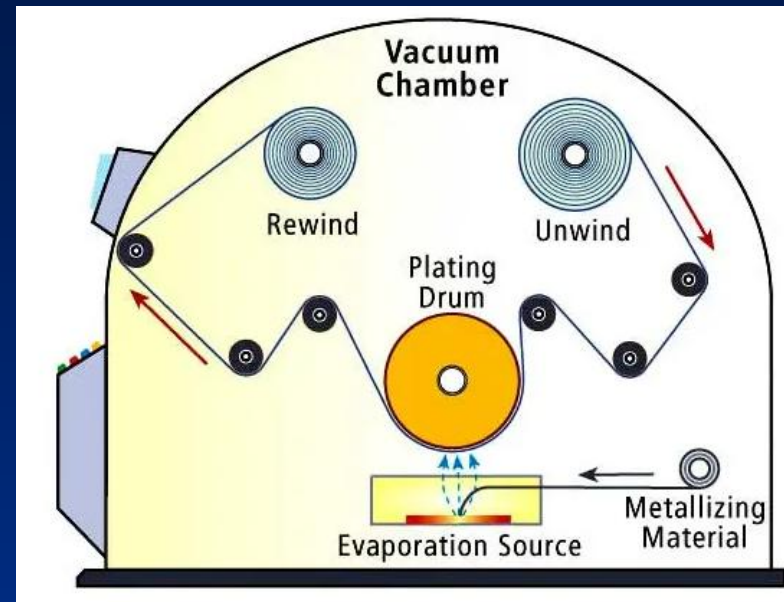
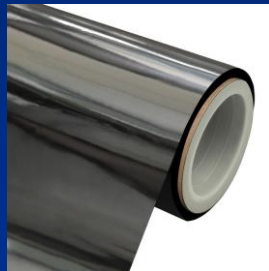
➤ Επικάλυψη με εκβολή (PP, PA, LDPE) (extrusion coating)



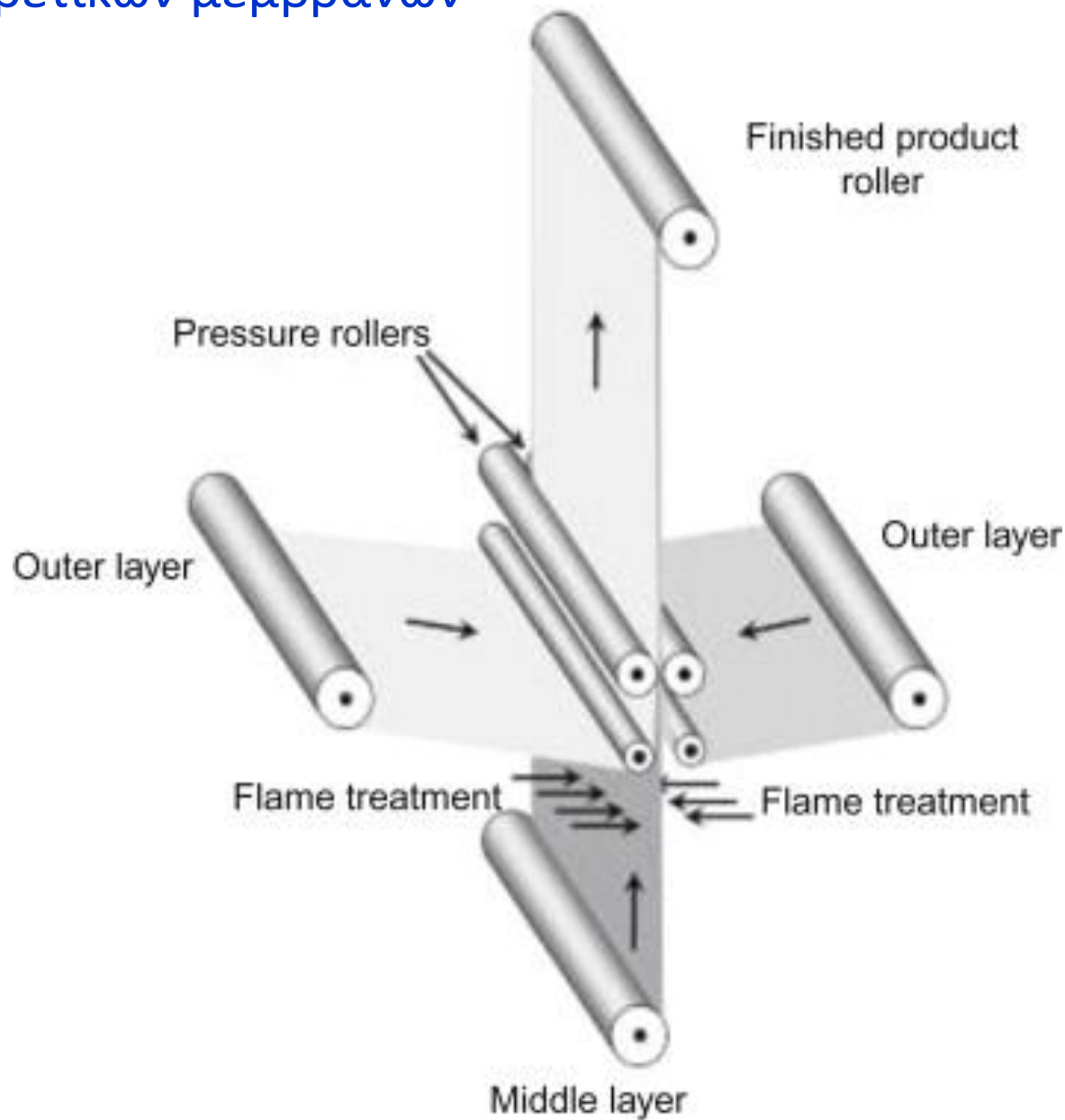
Διεργασίες παρασκευής πολυστρωματικών δομών από εύκαμπτες πολυμερικές μεμβράνες (Laminates):

➤ Επιμετάλλωση υπό κενό (8-50 nm) (vacuum metallizing):

- παράδειγμα: 50 nm στρώμα αλουμινίου σε πλαστική μεμβράνη → 95-99% μείωση της διαπερατότητας σε O_2 και υδρατμούς
- met-PP + PP: σακίδια για συσκευασία snacks (πατατάκια τσιπς, κρουασάν ...)



➤ **Λαμινάρισμα: συγκόλληση με κόλλα (adhesive lamination)**
διαφορετικών μεμβρανών



Βιβλιογραφία

“Σημειώσεις του μαθήματος Δυναμικές Μηχανικές Ιδιότητες Υλικών-Ρεολογία” στο HELIOS, Κεφ. 4

Further reading

1. Κ.Γ. Παναγιώτου. “Πολυμερή: Επιστήμη και Τεχνολογία”, Εκδ. Σιμώνη 2023, Κεφ. 21: §21.1.2, 21.1.3, 21.2.5

Θερμομόρφωση



<https://www.youtube.com/watch?v=alq3RDZN4jo>

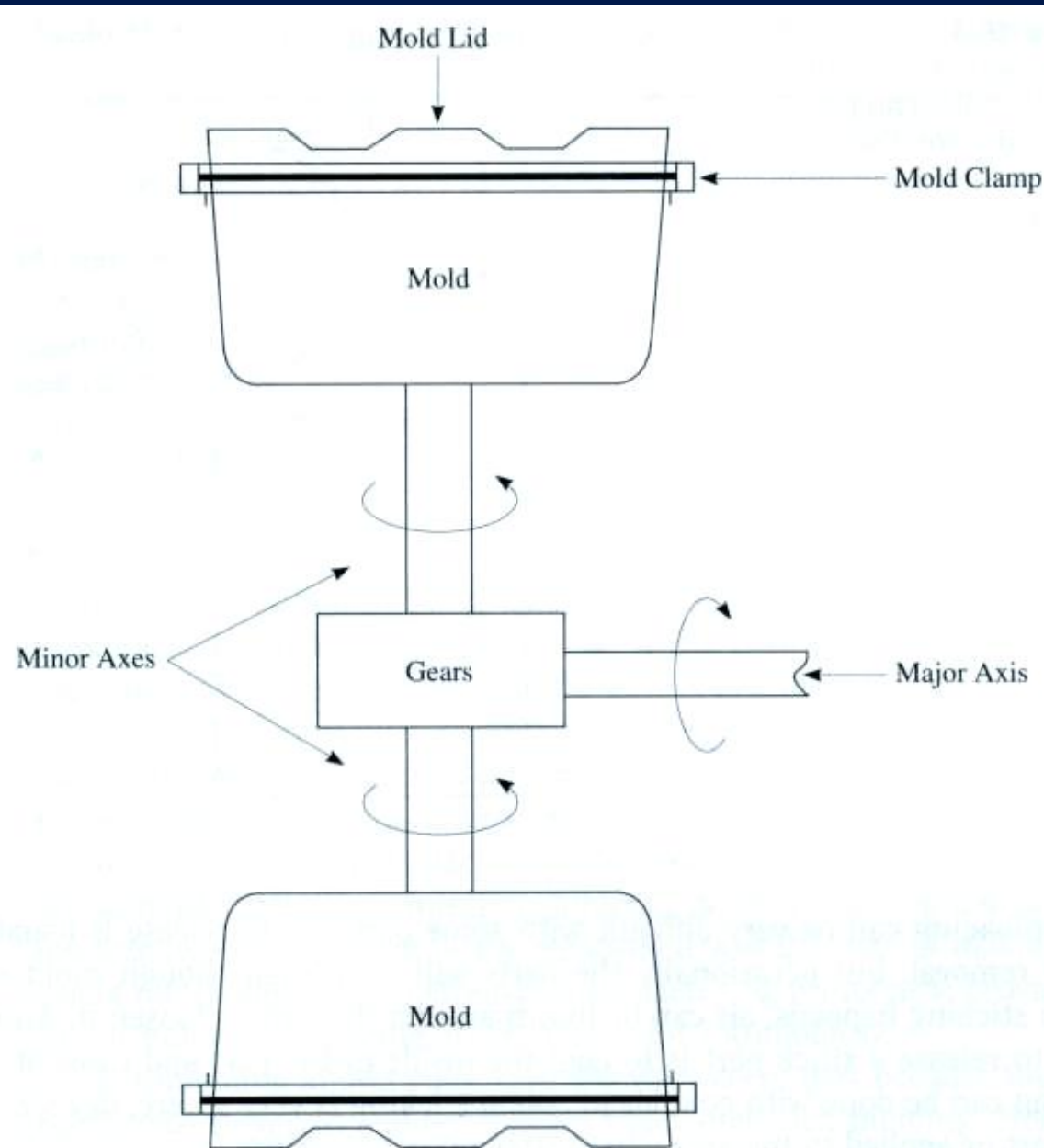
Περιστροφική μόρφωση

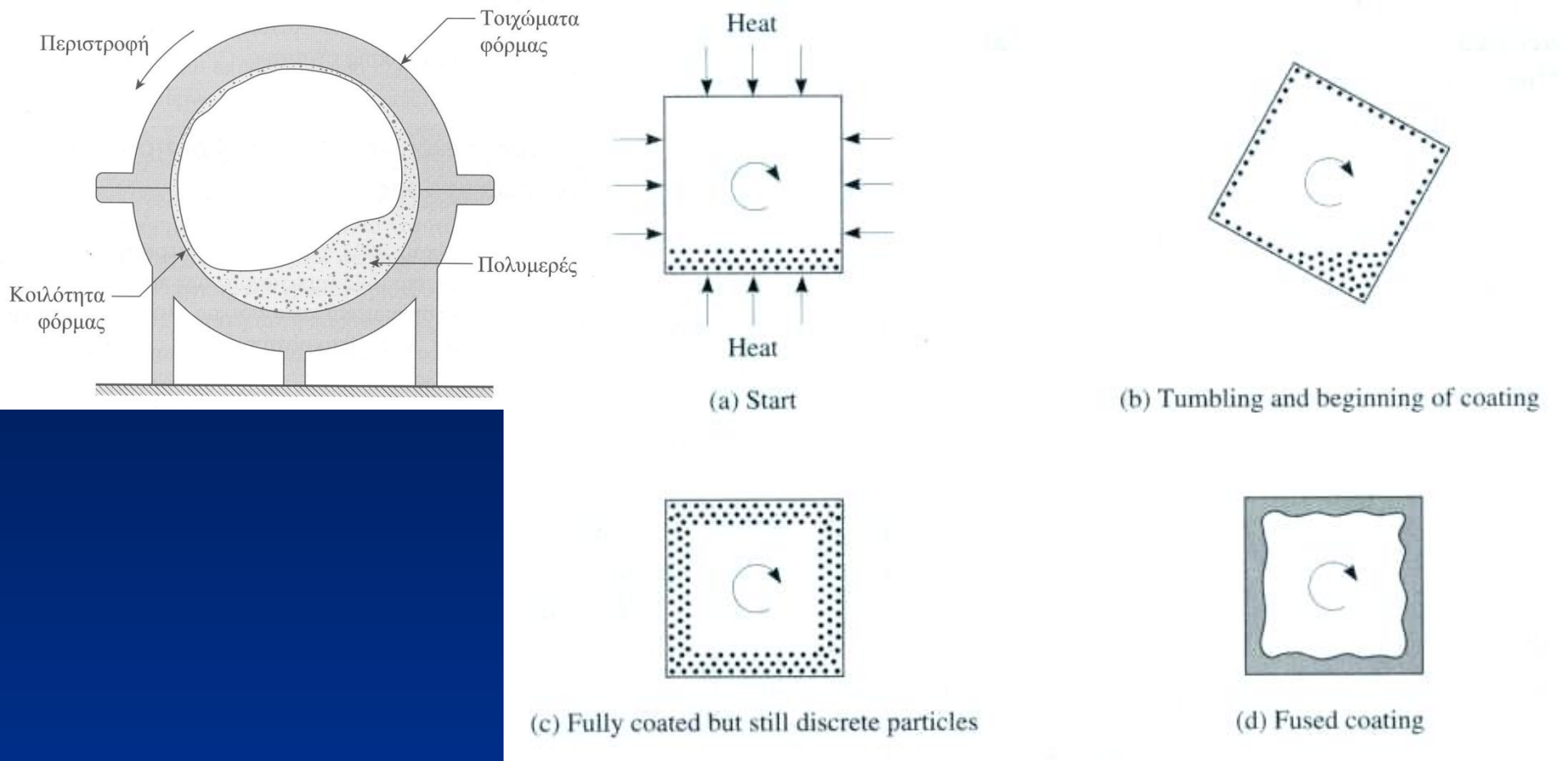


Κριτήρια αποτελεσματικής επίστρωσης κατά την περιστροφή

Πλαστιζόλες, PE, PA, PC
(κόκκοι 100-800 μm)

1. Ταυτόχρονη διαξονική περιστροφή.
2. Η ταχύτητα περιστροφής κατά τον μεγάλο άξονα $>$ από το μικρό άξονα.
3. Ένας συνήθης λόγος των ταχυτήτων είναι 4:1.





- Το στάδιο θέρμανσης έχει τη μεγαλύτερη διάρκεια από όλα τα υπόλοιπα στάδια του κύκλου μορφοποίησης.
- Αύξηση του χρόνου θέρμανσης με το πάχος του αντικειμένου.

<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8522>
https://www.youtube.com/watch?v=-d_cyeFXJWk
<https://www.rotomade.com/en/rotomolding-process/>

Περιστροφική μόρφωση



Κριτήρια επιλογής πρώτων υλών

1. Θερμική σταθερότητα
2. Δυνατότητα κονιοποίησης
3. Λεπτή και στενή κατανομή της κοκκομετρίας της ρητίνης
4. Ευκολία ροής της ρητίνης
5. Πυκνότητα: όσο υψηλότερη τόσο καλύτερη η στοίβαξη: - τόσο ευκολότερη τήξη - περιορίζεται ο αέρας μεταξύ των σωματιδίων.
6. Ικανότητα πλαστικοποίησης  (εξαρτάται και από το MB του πολυμερούς   μηχανικές ιδιότητες )

Πλεονεκτήματα

- 👍 Διεργασία χαμηλής πίεσης
- 👍 Καλούπια χαμηλού κόστους
($<$ από έγχυση, εκβολή με φύσημα, $\approx$ θερμομόρφωση)
- 👍 Μορφοποίηση μεγάλων αντικειμένων (χωρίς συγκολλήσεις)
- 👍 Αντικείμενα ελεύθερα από εσωτερικές τάσεις
(καλύτερη συμπεριφορά σε κρούση)
- 👍 Ευκολία στην αλλαγή πρώτων υλών (χρώματος, ρητίνης) →
Δεν υπάρχει απώλεια υλικού

Μορφοποίηση μεγάλων αντικειμένων με μικρό
κόστος εξοπλισμού

Μειονεκτήματα

- 👎 Μορφοποίηση αντικειμένων απλού σχήματος
- 👎 Μικρή ακρίβεια στις ανοχές των διαστάσεων
- 👎 Αργοί κύκλοι μορφοποίησης
- 👎 Περιορισμένη κλίμακα ρητινών προς χρήση

Βιβλιογραφία

“Σημειώσεις του μαθήματος Δυναμικές Μηχανικές Ιδιότητες Υλικών-Ρεολογία” στο HELIOS, Κεφ. 5

Further reading

1. Κ.Γ. Παναγιώτου. “Πολυμερή: Επιστήμη και Τεχνολογία”, Εκδ. Σιμώνη 2023, Κεφ. 21: §21.4