



# Βασικές Διεργασίες Μηχανικής Τροφίμων

## Ενότητα 8:

### Εκχύλιση, 1ΔΩ

Τμήμα: Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής Του Ανθρώπου

Σταύρος Π. Γιαννιώτης, Καθηγητής Μηχανικής Τροφίμων



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ





# Μαθησιακοί Στόχοι

- Τύποι εκχύλισης
- Βασικές αρχές
- Παραδείγματα εφαρμογής
- Βασικοί υπολογισμοί



# Λέξεις Κλειδιά

- Εκχύλιση υγρού-υγρού
- Εκχύλιση στερεού υγρού
- Συντελεστής κατανομής
- Επιλεκτικότητα
- Συντελεστής διαχωρισμού
- Διαφορική εκχύλιση
- Υπερκρίσιμο ρευστό



# Εκχύλιση <sup>1/4</sup>

- Η εκχύλιση ορίζεται ως η διεργασία κατά την οποία διαχωρίζεται μια ουσία από μία άλλη με τη βοήθεια ενός διαλύτη. Βασίζεται στη διαφορά διαλυτότητας των ουσιών στο διαλύτη
- Χρησιμοποιείται για διαχωρισμό ουσιών που:
  - Διαφέρουν στη χημική τους σύσταση
  - Έχουν περίπου την ίδια τάση ατμών και δεν μπορούν να διαχωριστούν με απόσταξη ή είναι πολύ ευαίσθητες στη θερμοκρασία
- Διακρίνεται σε:
  - Εκχύλιση υγρού-υγρού
  - Εκχύλιση στερεού-υγρού



# Εκχύλιση 2/4

## 1. Εκχύλιση υγρού-υγρού

Αναφέρεται στο διαχωρισμό ουσιών που βασίζεται στη διαφορετική διαλυτότητα τους σε δύο μη-αναμειγνυόμενα υγρά (διαλύτη και αρχικό υγρό)

### Παραδείγματα

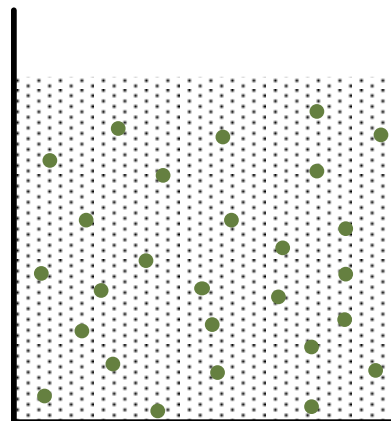
- εκχύλιση ελεύθερων λιπαρών οξέων από λάδια (προσθήκη NaOH και στη συνέχεια εκχύλιση με νερό)
- εκχύλιση προϊόντων ζύμωσης (αντιβιοτικά, βιταμίνες κ.ά)



# Εκχύλιση 3/4

## 1. Εκχύλιση υγρού-υγρού

Όταν ένα διάλυμα μιας διαλυμένης ουσίας  $i$  σε ένα διαλύτη A (π.χ. νερό) αναμιγνύεται με ένα δεύτερο διαλύτη B (συνήθως οργανικό διαλύτη), ο οποίος δεν αναμειγνύεται με τον πρώτο, η διαλυμένη ουσία κατανέμεται μεταξύ των δύο διαλυτών ανάλογα με τη διαλυτότητά της στους δύο καθαρούς διαλύτες A και B



●●●● Διαλύτης A

● Διαλύτης B



# Εκχύλιση 4/4

## 2. Εκχύλιση στερεού-υγρού

Αναφέρεται στο διαχωρισμό μιας διαλυτής ουσίας από ένα αδρανές υλικό με τη βοήθεια ενός διαλύτη

### Παραδείγματα

- Εκχύλιση με ζεστό νερό ζάχαρης από ζαχαρότευτλα
- Εκχύλιση με εξάνιο λαδιού από σπόρους
- Εκχύλιση διαλυτών στερεών από τον καφέ και το τσάι
- Εκχύλιση καφεΐνης από τον καφέ
- Εκχύλιση με διάλυμα  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  κολλαγόνου από δέρμα ζώων
- Εκχύλιση με ζεστό νερό ή αραιό οξύ ζελατίνης από κολλαγόνο
- Εκχύλιση με ζεστό νερό χυμού μήλου και δαμάσκηνου
- Εκχύλιση με ζεστό νερό καραγενάνης από φύκια
- Εκχύλιση με αραιό οξύ πηκτίνης από πολτό μήλου



# Χαρακτηριστικά Διαλύτη <sup>1/3</sup>

**Συντελεστής κατανομής** ( $m_i$ ) της ουσίας  $i$  μεταξύ του διαλύτη και του προς εκχύλιση σώματος ή υγρού στην ισορροπία

$$m_i = \left( \frac{y_i}{x_i} \right)_{eq}$$

$y$  συγκέντρωση της ουσίας  $i$  στο διαλύτη

$x$  συγκέντρωση της ουσίας  $i$  στο προς εκχύλιση σώμα ή στο υγρό

***Όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής κατανομής  $m_i$  τόσο λιγότερη ποσότητα διαλύτη  $A$  χρειάζεται***





# Χαρακτηριστικά Διαλύτη <sup>2/3</sup>

## Επιλεκτικότητα

Δείχνει τη δυνατότητα του διαλύτη να διαχωρίζει την ουσία  $i$  από μια άλλη ουσία  $j$

$$\beta = \frac{y_i / x_i}{y_j / x_j}$$

όπου  $x$  και  $y$  η συγκέντρωση στο αρχικό υγρό ή σώμα και στο διαλύτη

**Εάν  $\beta=1$  ο διαχωρισμός με εκχύλιση των  $i$  και  $j$  είναι αδύνατος**



# Χαρακτηριστικά Διαλύτη <sup>3/3</sup>

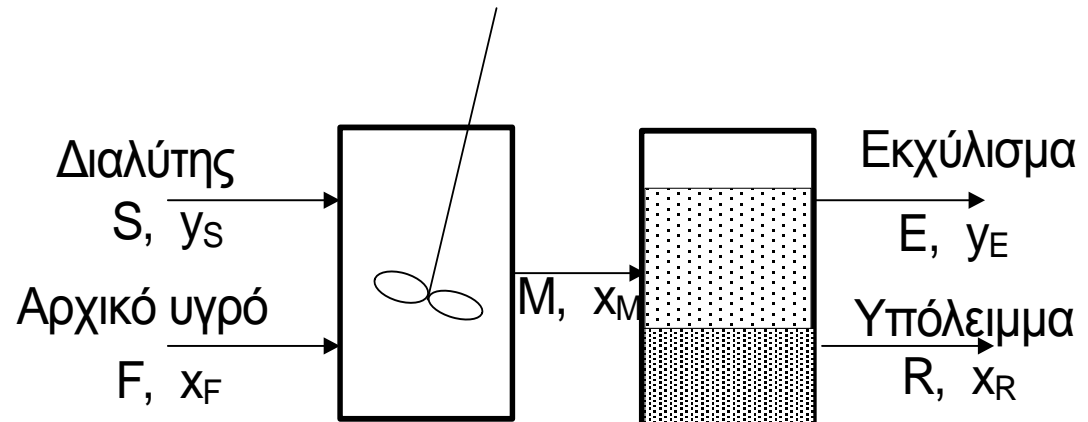
- 1. Δυνατότητα ανάκτησης** του διαλύτη. Η ανάκτηση συνήθως γίνεται με απόσταξη
- 2. Πυκνότητα.** Είναι επιθυμητό να υπάρχει μεγάλη διαφορά στην πυκνότητα των κορεσμένων υγρών φάσεων προκειμένου να διαχωρίζονται εύκολα
- 3. Τοξικότητα:** Ο διαλύτης πρέπει να μην είναι τοξικός, να είναι χαμηλού κόστους και κατά προτίμηση μη-αναφλέξιμος



# Εκχύλιση Υγρού-Υγρού 1/3

- Ολικό ισοζύγιο μάζας

$$F + S = M = E + R$$



- Μερικό ισοζύγιο μάζας

$$Fx_F + Sy_S = Mx_M = Ey_E + Rx_R$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει

$$\frac{F}{S} = \frac{y_S - x_M}{x_M - x_F}$$

και

$$\frac{E}{R} = \frac{x_R - x_M}{x_M - y_E}$$



# Συντελεστής Διαχωρισμού

Ο συντελεστής διαχωρισμού ορίζεται ως:

$$\alpha = \frac{E y_E}{R x_R} = \frac{E m}{R}$$

Εάν  $y_S=0$

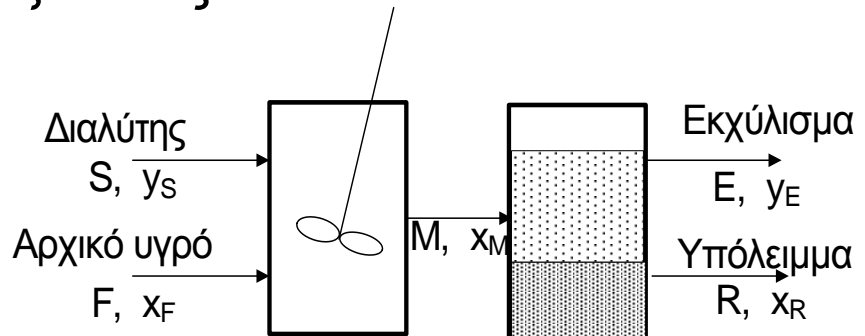
$$F x_F = E m x_R + R x_R$$

Εάν  $F=R$

$$\frac{x_R}{x_F} = \frac{1}{\alpha + 1}$$

και

$$\frac{y_E}{x_F} = \frac{m}{\alpha + 1}$$

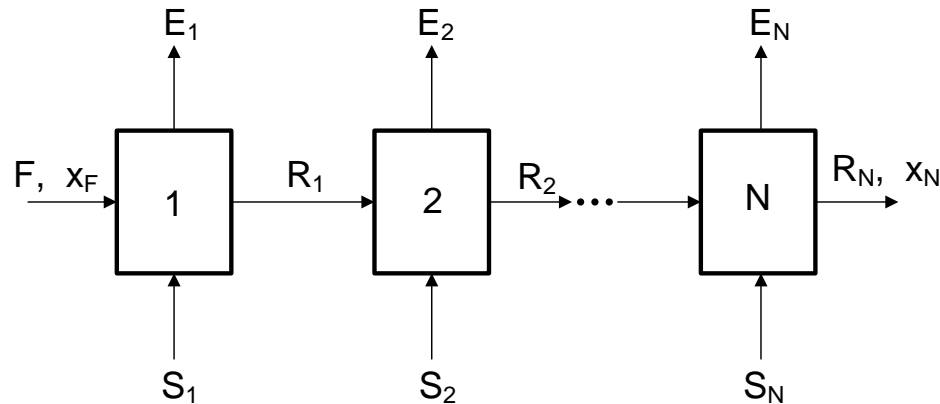




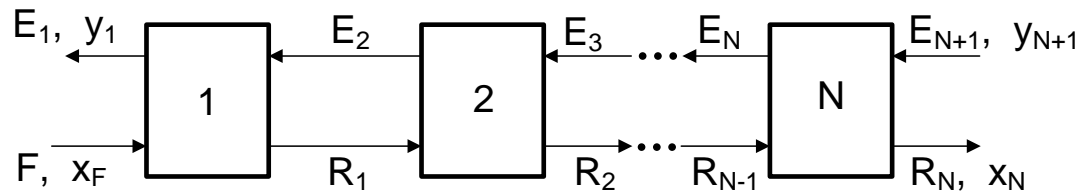
# Εκχύλιση Υγρού-Υγρού 2/3

## Συστήματα Πολλαπλών Βαθμίδων

### 1) Εγκάρσια ροής



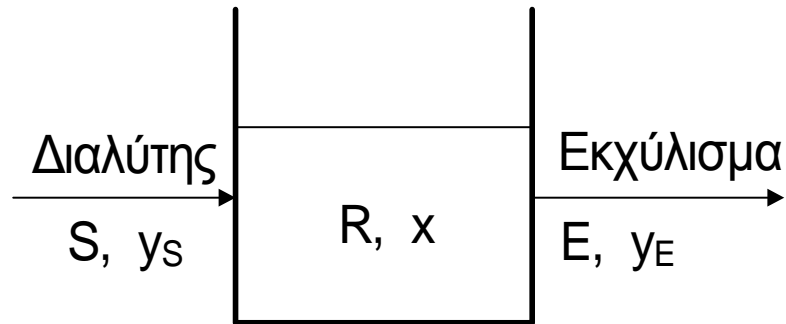
### 2) Αντιρροής





# Εκχύλιση Υγρού-Υγρού 3/3

## Διαφορική Εκχύλιση



Εάν αποκαθίσταται ισορροπία μεταξύ R και E τότε:

$$\ln \frac{x}{x_0} = \alpha$$

όπου

$x_0$  αρχική συγκέντρωση

$x$  συγκέντρωση σε χρόνο  $t$

$\alpha$  συντελεστής διαχωρισμού,

$$\alpha = \frac{E y_E}{R x_R} = \frac{E m}{R}$$



# Εκχύλιση Στερεού – Υγρού <sup>1/7</sup>

## 1. Εσωτερική αντίσταση αμελητέα (Biot < 0.1)

$$\frac{C_e - C}{C_e - C_0} = \exp\left(-\frac{k_L A}{V} t\right)$$

όπου:

$C_e$  συγκέντρωση ισορροπίας (κορεσμού) στο διάλυμα,  $\text{kg/m}^3$

$C_0$  αρχική συγκέντρωση στο διάλυμα,  $\text{kg/m}^3$

$C$  συγκέντρωση στο διάλυμα στο χρόνο  $t$ ,  $\text{kg/m}^3$

$k_L$  συντελεστής μεταφοράς μάζας,  $\text{m/s}$

$A$  επιφάνεια εκχύλισης,  $\text{m}^2$

$V$  όγκος διαλύματος,  $\text{m}^3$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι το  $k_L$  και το  $A$  παραμένουν σταθερά (δεν μεταβάλλονται με το χρόνο).

Μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση διάλυσης μιας ουσίας σε ένα διάλυμα καθώς δεν υπάρχει ουσιαστικά εσωτερική αντίσταση εάν το στερεό είναι καθαρή ουσία όμως σε αυτή την περίπτωση το  $A$  μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά.



# Εκχύλιση Στερεού – Υγρού <sup>2/7</sup>

## Παράδειγμα

Πόσος χρόνος θα απαιτηθεί προκειμένου να διαλυθούν 20 g ζάχαρη σε 100 g νερό εάν ο συντελεστής μεταφοράς μάζας είναι  $1.5 \times 10^{-5}$  m/s, η ειδική επιφάνεια της ζάχαρης είναι  $3000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , η πυκνότητα της ζάχαρης είναι  $1100 \text{ kg}/\text{m}^3$ , η πυκνότητα του διαλύματος που θα προκύψει  $1068 \text{ kg}/\text{m}^3$ , η πυκνότητα του νερού  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$  και η συγκέντρωση ισορροπίας είναι  $900 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

## Λύση

Υπόθεση: Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας και η επιφάνεια παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια της διάλυσης  
Από την προηγούμενη εξίσωση προκύπτει:

$$t = \frac{V}{k_L A} \ln \frac{C_e - C_0}{C_e - C}$$







# Εκχύλιση Στερεού – Υγρού <sup>3/7</sup>

όπου:

$$A = \alpha V_z = \alpha \frac{m_z}{\rho_z} = 3000 \times \frac{0.020}{1100} = 0.0545 \text{ m}^2$$

$$C = \frac{20 \text{ kg ζάχαρης}}{100 + 20 \text{ kg διαλύματος}} \times 1068 \frac{\text{kg διαλύματος}}{\text{m}^3 \text{ διαλύματος}} = 178 \frac{\text{kg ζάχαρης}}{\text{m}^3 \text{ διαλύματος}}$$

$$t = \frac{V}{k_L A} \ln \frac{C_e - C_0}{C_e - C} = \frac{0.0001}{1.5 \times 10^{-5} \times 0.0545} \ln \frac{900 - 0}{900 - 178} = 27 \text{ s}$$



# Εκχύλιση Στερεού – Υγρού <sup>4/7</sup>

## 2. Εξωτερική αντίσταση αμελητέα ( $Bi > 40$ )

Εφαρμόζονται οι λύσεις του 2ου νόμου του Fick, π.χ. η μέση συγκέντρωση στο στερεό για  $Biot > 40$  και  $Fo > 0.20$  θα είναι:

- Πλάκα

$$\frac{C_e - C_m}{C_e - C_o} = 0.811 \exp(-2.47 Fo)$$

όπου:

$Fo$  αριθμός Fourier  $\left( Fo = \frac{Dt}{x_1^2} \right)$

$C_m$  μέση συγκέντρωση,  $kg/m^3$

$C_e$  συγκεντρωση ισορροπίας,  $kg/m^3$

$C_o$  αρχική συγκέντρωση,  $kg/m^3$

$D$  συντελεστής διάχυσης,  $m^2/s$

$x_1$  χαρακτηριστική διάσταση,  $m$

$t$  χρόνος,  $s$



# Εκχύλιση Στερεού – Υγρού <sup>5/7</sup>

Ομοίως για:

- Κύλινδρο απείρου μήκους

$$\frac{C_e - C_m}{C_e - C_o} = 0.692 \exp(-5.783 Fo)$$

- Σφαίρα

$$\frac{C_e - C_m}{C_e - C_o} = 0.608 \exp(-9.870 Fo)$$



# Εκχύλιση Στερεού – Υγρού <sup>6/7</sup>

## Παράδειγμα

Προκειμένου να εκχειλιστεί το 90% της περιεχόμενης διαλυτής ουσίας από στερεά σωματίδια διαμέτρου 5 mm χρειάζονται 2 ώρες. 1) Να υπολογιστεί ο συντελεστής διάχυσης και 2) εάν η διάμετρος των σωματιδίων μειωθεί και γίνει ίση με 2 mm πόσος χρόνος θα απαιτείται προκειμένου να εκχυλιστεί το ίδιο ποσοστό;

## Λύση

1) Το ποσοστό που δεν έχει ακόμη εκχυλιστεί είναι 10%, άρα:

$$\frac{C_e - C_m}{C_e - C_o} = 0.10$$

Υποθέτοντας ότι  $Bi > 40$  και  $Fo > 0.2$  εφαρμόζουμε την εξίσωση για κύλινδρο απείρου μήκους:

$$\frac{C_e - C_m}{C_e - C_o} = 0.692 \exp(-5.783 Fo) \quad \rightarrow$$



# Εκχύλιση Στερεού – Υγρού <sup>7/7</sup>

δηλαδή:

$$0.10 = 0.692 \exp(-5.783Fo)$$

Απ' όπου προκύπτει  $Fo=0.33$

Άρα:

$$D = Fo \frac{R_1^2}{t_1} = 0.33 \frac{0.0025^2}{2 \times 3600} = 2.86 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$$

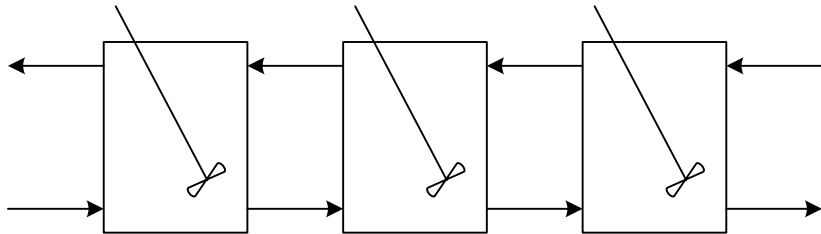
2) Για το ίδιο ποσοστό μη-εκχυλισμένης ουσίας (στην προκειμένη περίπτωση 0.10) ο Fourier θα είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος της διαμέτρου. Επομένως:

$$\frac{t_1 D}{R_1^2} = \frac{t_2 D}{R_2^2} \quad \text{και} \quad t_2 = \frac{R_2^2}{R_1^2} t_1 = \frac{2^2}{5^2} 120 = 19.2 \text{ min}$$



# Συστήματα Εκχύλισης 1/4

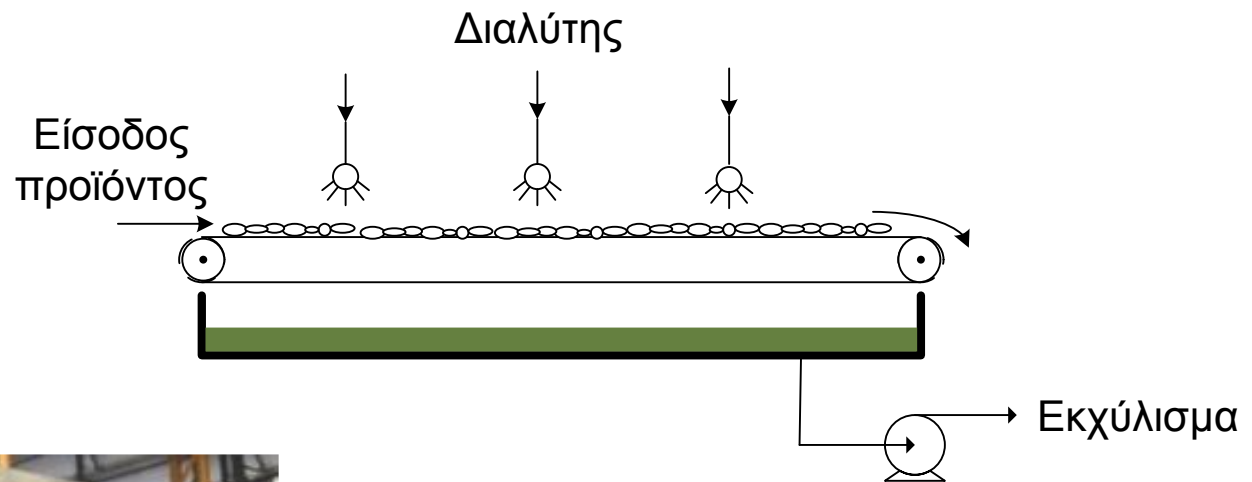
## Αναδευόμενου δοχείου





# Συστήματα Εκχύλισης 2/4

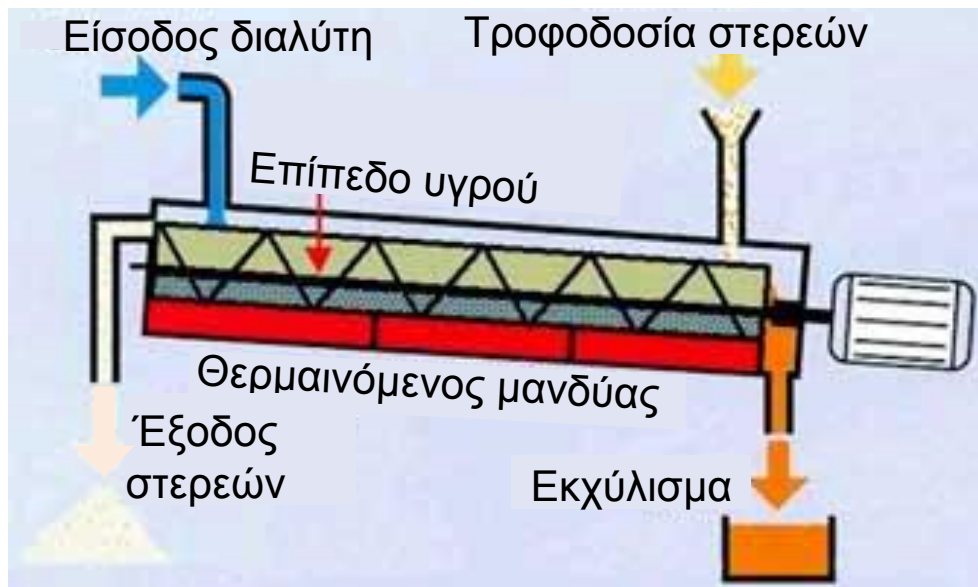
## Με ιμάντα





# Συστήματα Εκχύλισης 3/4

## Με κοχλία

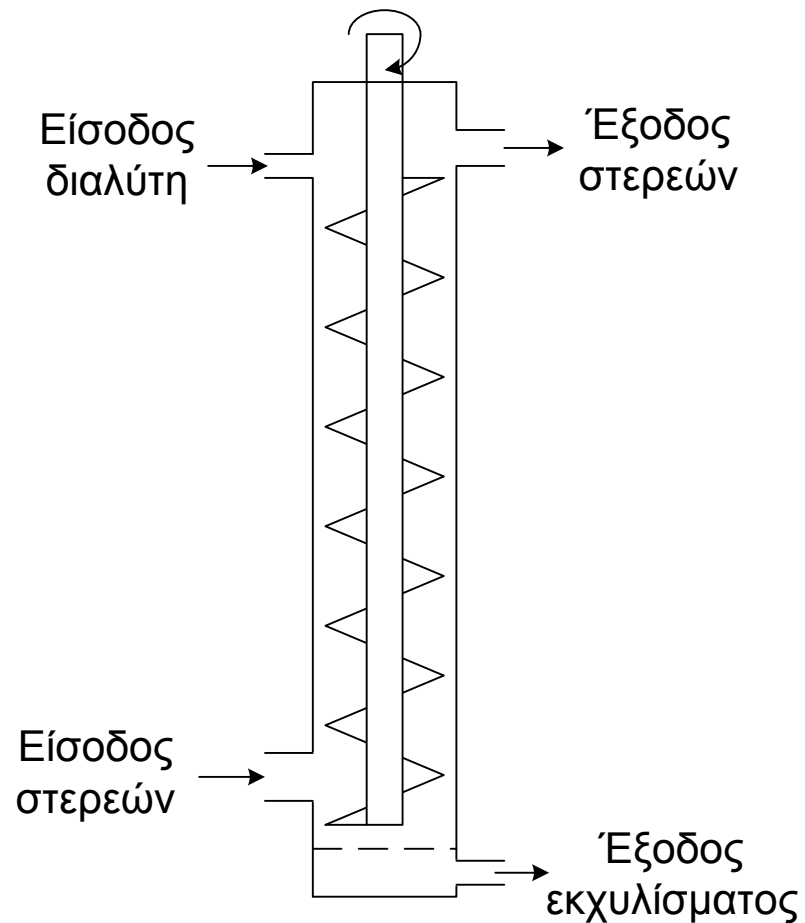






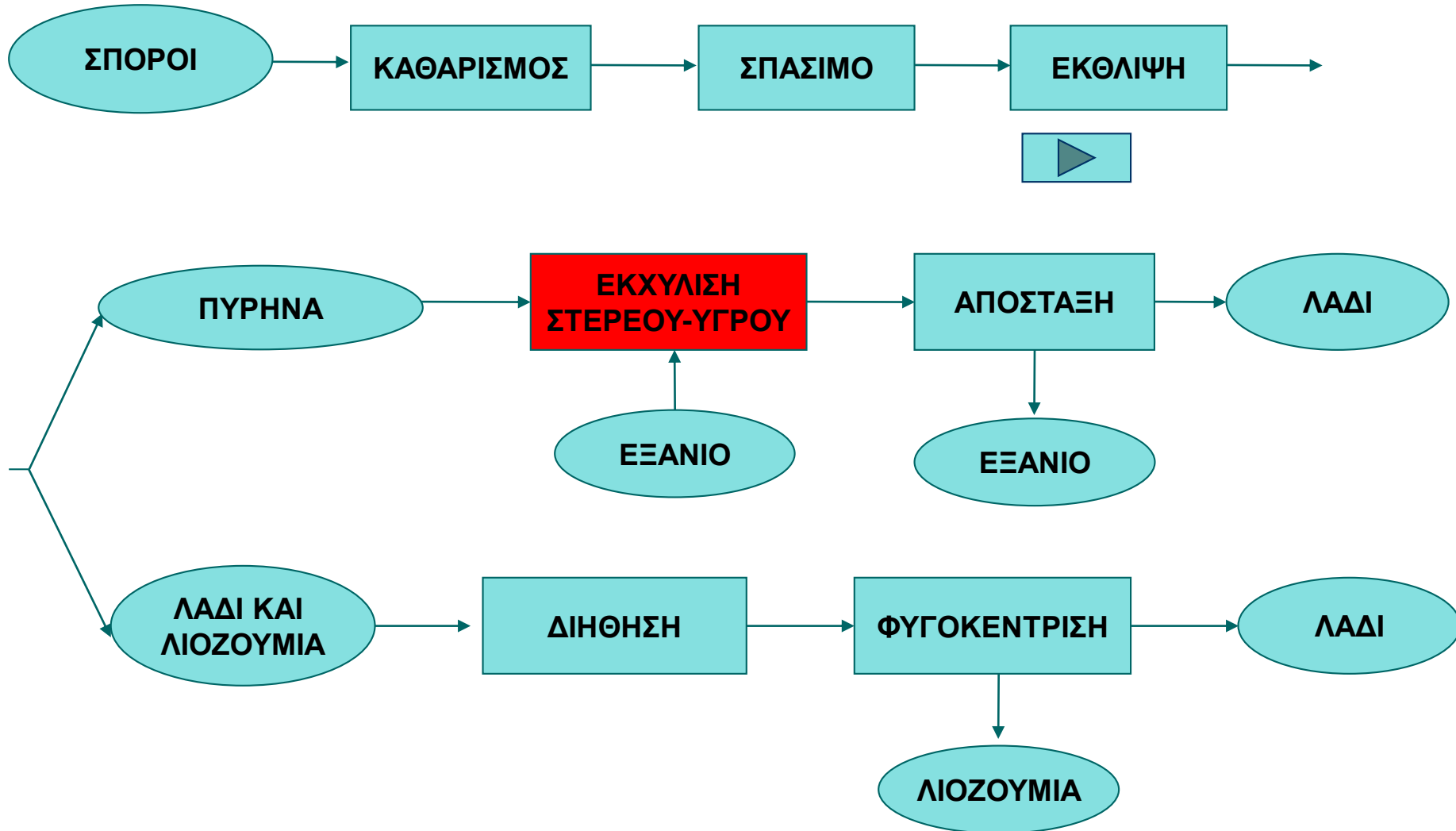
# Συστήματα Εκχύλισης 4/4

## Με κοχλία



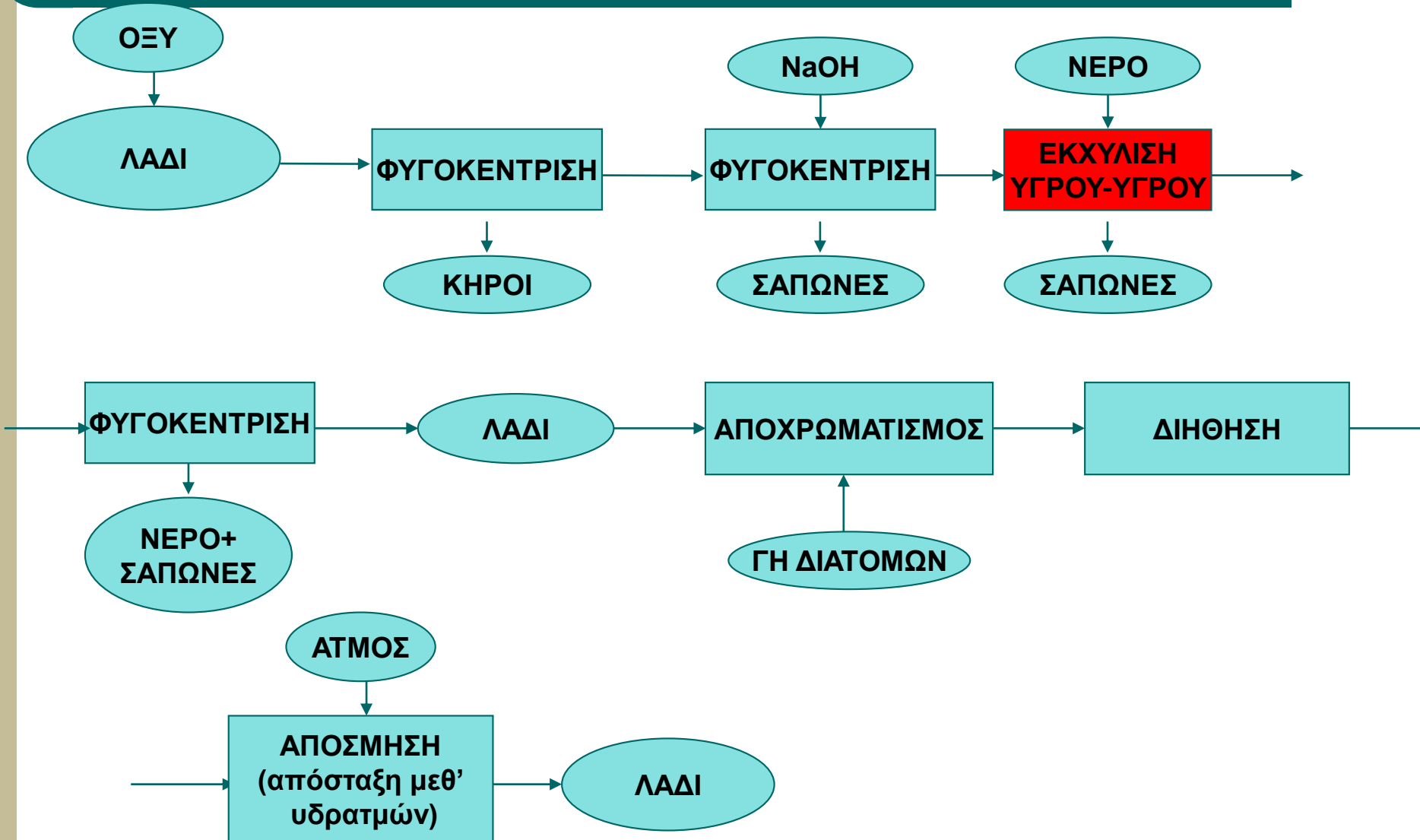


# Εφαρμογή: Παραγωγή Σπορελαίου 1/2





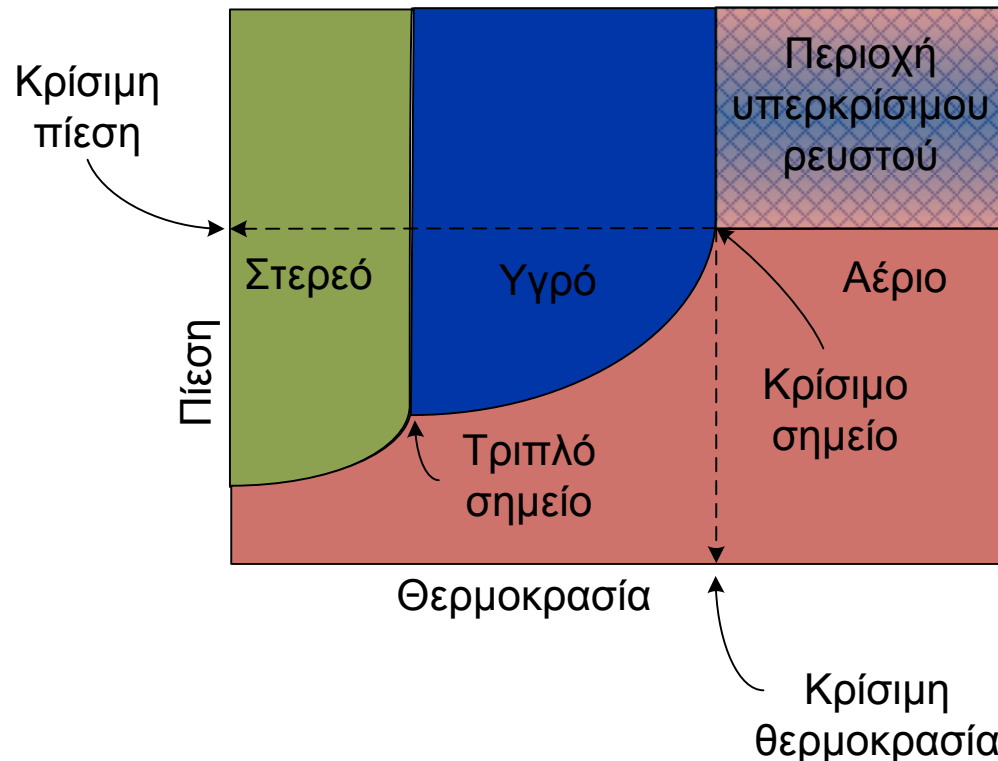
# Εφαρμογή: Παραγωγή Σπορελαίου 2/2





# Εκχύλιση με Υπερκρίσιμα Ρευστά 1/5

Ως διαλύτης χρησιμοποιείται ένα ρευστό σε υπερκρίσιμη κατάσταση δηλαδή σε πίεση και θερμοκρασία πάνω από τις κρίσιμες τιμές π.χ.  $\text{CO}_2$  ( $T_c = 31^\circ\text{C}$ ,  $P_c = 74 \text{ bar}$ )





# Εκχύλιση με Υπερκρίσιμα Ρευστά 2/5

## Χαρακτηριστικά

- Οι ιδιότητες του ρευστού (πυκνότητα, ιξώδες, συντελεστής διάχυσης) στην υπερκρίσιμη κατάσταση έχουν τιμές μεταξύ αυτών στην υγρή και την αέρια κατάσταση
- Η επιφανειακή τάση είναι ίση με μηδέν καθώς δεν υπάρχει όριο μεταξύ υγρής και αέριας φάσης
- Η διαλυτότητα μιας ουσίας σε ένα υπερκρίσιμο ρευστό αυξάνει με την πυκνότητα και τη θερμοκρασία του υπερκρίσιμου ρευστού
- Η πυκνότητα αυξάνει με την πίεση επομένως και η διαλυτότητα
- Μερικές φορές απαιτείται η χρήση και δεύτερου διαλύτη (π.χ. μεθανόλη ή αιθανόλη) προκειμένου να αυξηθεί η διαλυτότητα της ουσίας στο  $\text{CO}_2$
- Η επιλεκτικότητα ρυθμίζεται μεταβάλλοντας την πίεση και τη θερμοκρασία



# Εκχύλιση με Υπερκρίσιμα Ρευστά <sup>3/5</sup>

## Παραδείγματα

- Εκχύλιση αιθερίων ελαίων
- Εκχύλιση καφεΐνης από φασόλια καφέ
- Εκχύλιση λυκίσκου
- Εκχύλιση χοληστερόλης από βούτυρο

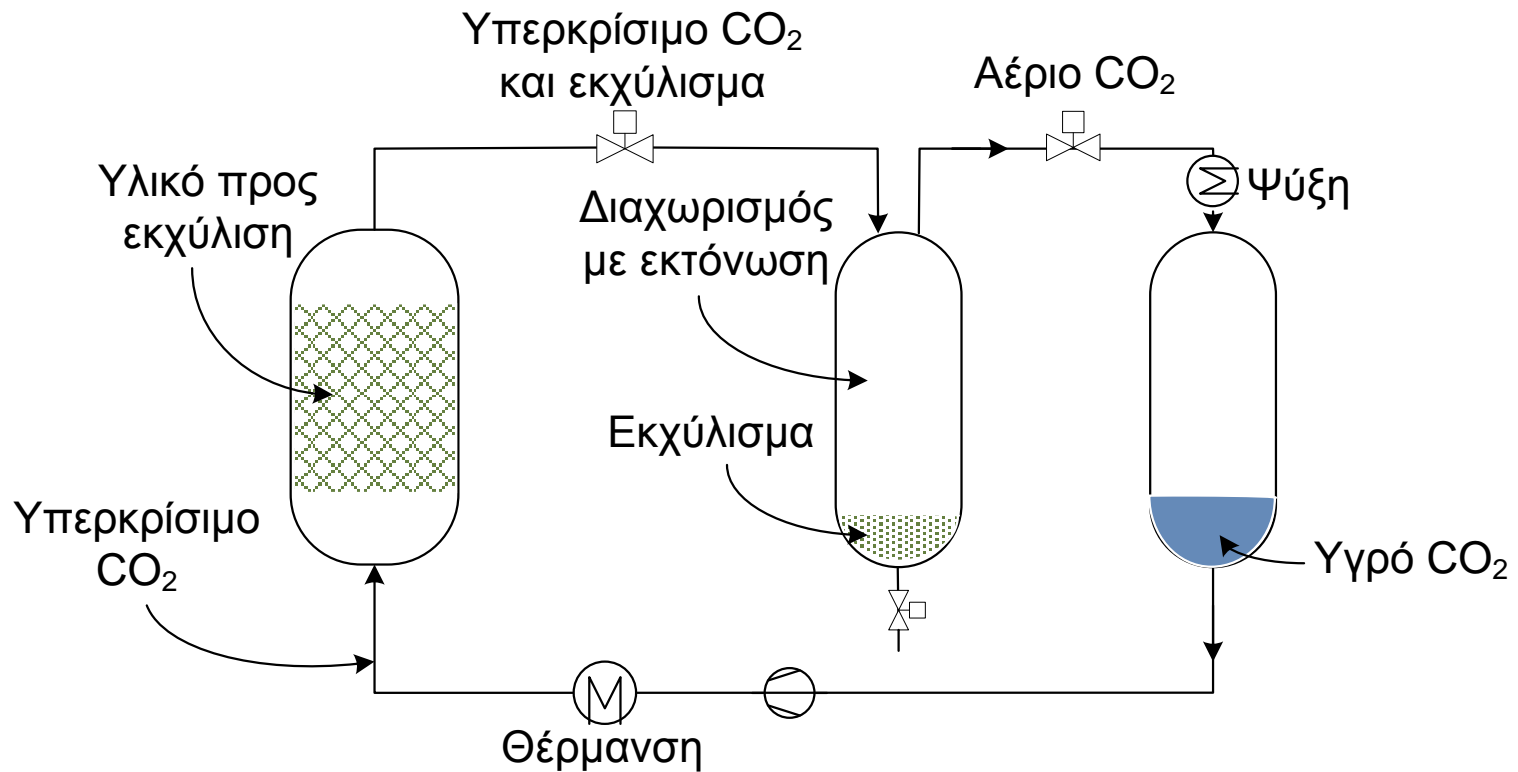


# Εκχύλιση με Υπερκρίσιμα Ρευστά 4/5

- Πλεονεκτήματα
  - Δεν μένουν υπολείμματα οργανικών διαλυτών στο τρόφιμο
  - Δεν επιβαρύνεται το περιβάλλον
  - Ταχεία εκχύλιση λόγω του μικρού ιξώδους και του μεγάλου συντελεστή διάχυσης του υπερκρίσιμου ρευστού
- Μειονεκτήματα
  - Υψηλό κόστος λόγω υψηλών πιέσεων



# Εκχύλιση με Υπερκρίσιμα Ρευστά 5/5







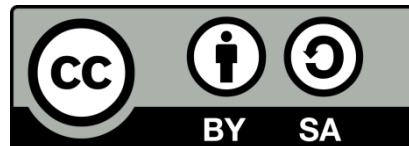
# Βιβλιογραφία

- Σ. Γιαννιώτη, Παραδόσεις Μηχανικής Τροφίμων
- Mac Cabe & Smith, Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής
- C. Geankoplis, Transport Processes and Unit Operations



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδεια χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.





# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





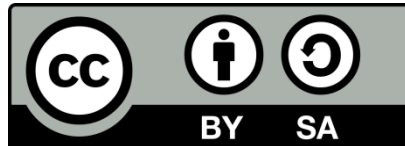
# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου, Στάυρος Π. Γιαννιώτης. «Βασικές Διεργασίες Μηχανικής Τροφίμων». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:  
<https://mediasrv.aua.gr/eclass/courses/OCDFSHN108/>



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων, π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Η άδεια αυτή ανήκει στις άδειες που ακολουθούν τις προδιαγραφές του Ορισμού Ανοικτής Γνώσης [2], είναι ανοικτό πολιτιστικό έργο [3] και για το λόγο αυτό αποτελεί ανοικτό περιεχόμενο [4].

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

[2] <http://opendefinition.org/okd/ellinika/>

[3] <http://freedomdefined.org/Definition/EI>

[4] <http://opendefinition.org/buttons/>



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
  - το Σημείωμα Αδειοδότησης
  - τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
  - το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)
- μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.