

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Χημικών Μηχανικών

Εισαγωγή στη Χημική Μηχανική

Ισοζύγια μάζας χωρίς αντίδραση

Επ. Καθ. Κυριάκος Λαμπρόπουλος

1

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η **διεργασία** περιγράφει τη μετατροπή της ύλης
(φυσική, χημική ή βιολογική)

Στις διεργασίες περιγράφονται:

- τα εισερχόμενα ρεύματα (**τροφοδοσία**)
- τα εξερχόμενα ρεύματα (**προϊόντα**).

Διάγραμμα ροής διεργασίας (flowsheet).

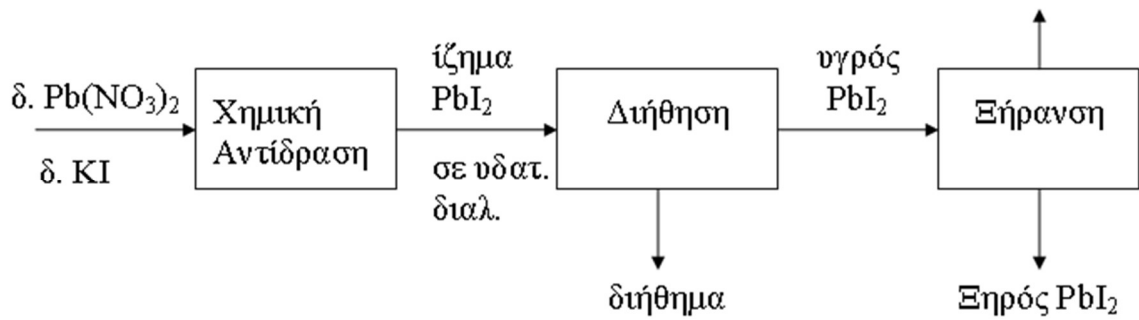
Βασικές διεργασίες:

- Προετοιμασία: Συμπίεση, θέρμανση, ψύξη, εξάτμιση, διάλυση
- Αντιδράσεις: Καταλυτικές (ομογενείς-ετερογενείς), βιοαντιδραστήρες
- Διαχωρισμός: Απόσταξη, εξάτμιση, διάλυση, κρυστάλλωση-διήθηση

2

2

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ – Διάγραμμα βαθμίδων

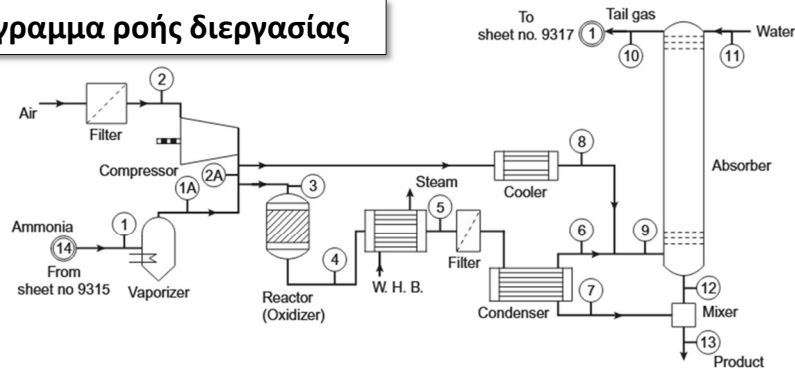


Διάγραμμα βαθμίδων-Block Diagram

3

3

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ – Διάγραμμα ροής διεργασίας



Flows kg/h Pressures nominal

Line no. Stream Component	1 Ammonia Feed	1A Ammonia Vapour	2 Filtered Air	2A Oxidizer Air	3 Oxidizer Feed	4 Oxidizer Outlet	5 W.H.B. Outlet	6 Condenser Gas	7 Condenser Acid	8 Secondary Air	9 Absorber Feed	10 Tail(2) Gas	11 Water Feed	12 Absorber Acid	13 Product Acid	C & R Construction Inc
NH ₃	731.0	731.0	—	—	731.0	Nil	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Nitric acid 60%
O ₂	—	—	3036.9	2628.2	2628.2	935.7 (935.7) ⁽¹⁾	275.2	Trace	Trace	408.7	683.9	371.5	Trace	Trace	Trace	%100,000 ly
N ₂	—	—	9990.8	8644.7	8644.7	8668.8	8668.8	8668.8	Trace	1346.1	10,014.7	10,014.7	Trace	Trace	Trace	Client BOP Chemicals
NO	—	—	—	—	—	1238.4 (1238.4) ⁽¹⁾	202.5	Trace	Trace	—	202.5	21.9	Trace	Trace	Trace	SLIGO
NO ₂	—	—	—	—	—	Trace	(?) ⁽¹⁾	967.2	Trace	—	—	967.2	(Trace) ⁽¹⁾	Trace	Trace	Sheet no. 9316
HNO ₃	—	—	—	—	—	Nil	Nil	—	—	850.6	—	—	—	Trace	Trace	—
H ₂ O	—	Trace	—	Trace	—	1161.0	1161.0	29.4	1010.1	1010.1	—	29.4	26.3	1376.9	2554.6	2146.0
Total	731.0	731.0	13,027.7	11,272.9	12,003.9	12,003.9	10,143.1	1860.7	1754.8	11,897.7	10,434.4	1376.9	2840.0	4700.6	—	—
Press bar	8	8	1	8	8	8	8	1	8	8	8	1	8	1	1	Dwg by Date
Temp. °C	15	20	15	230	204	907	234	40	40	40	40	25	25	40	43	Checked 25/7/1980

FIGURE 4.2

Flow-sheet: simplified nitric acid process

4

4

ΣΥΣΤΗΜΑ**ΣΥΣΤΗΜΑ:**

Οποιαδήποτε αυθαίρετα θεωρούμενη διεργασία ή τμήμα της διεργασίας που θα αναλύσουμε

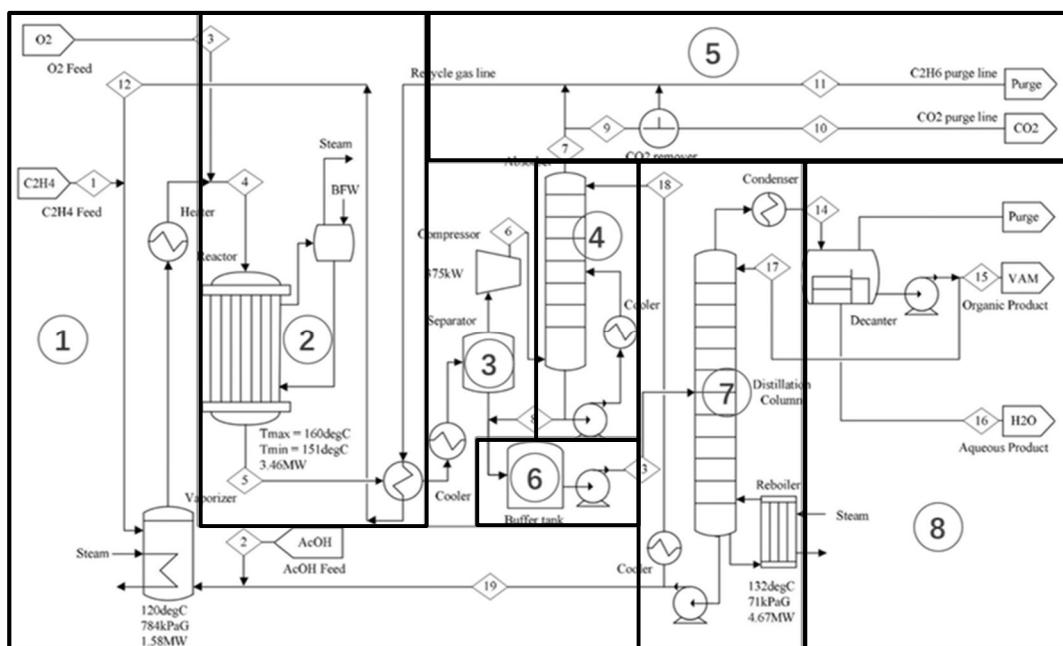
Παράδειγμα: Ένας αντιδραστήρας, ένας ξηραντήρας, ένα σημείο ανάμιξης, ή ακόμα και ολόκληρη η βιομηχανική εγκατάσταση

ΟΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ:

Νοητά όρια που περικλείουν το υπό εξέταση σύστημα

5

5

ΣΥΣΤΗΜΑ

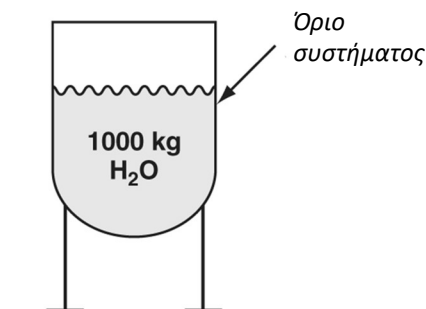
6

6

ΤΑΞΙΝΟΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

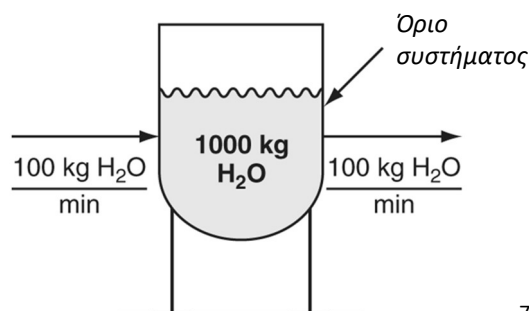
Κλειστό σύστημα:

Δεν υπάρχει ροή μάζας δια μέσου των ορίων του συστήματος στο χρονικό διάστημα μελέτης του συστήματος.



Ανοικτό σύστημα:

Υπάρχει ροή μάζας δια μέσου των ορίων του συστήματος (εισροή, εκροή)



7

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ:

Χαρακτηρίζουν τις εισροές και εκροές καθώς και την ίδια τη διεργασία

Εντατικές μεταβλητές (ή εντατικές ιδιότητες) είναι ανεξάρτητες από το μέγεθος και την ποσότητα

- Θερμοκρασία
- Πίεση
- Πυκνότητα
- Συγκέντρωση
- Σύσταση (κλάσμα βάρους, μοριακό κλάσμα)

Οι **εκτατικές μεταβλητές** εξαρτώνται από την ποσότητα

- Μάζα
- Όγκος
- Ρυθμός ροής

8

8

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

❖ Ασυνεχούς ή διαλειπόντος έργου (Batch)

- Η τροφοδοσία μπαίνει στην αρχή και τα προϊόντα απομακρύνονται στο τέλος της διεργασίας

❖ Συνεχούς έργου (Continuous)

- Η τροφοδοσία και τα προϊόντα είναι σε συνεχή ροή στη διάρκεια της διεργασίας

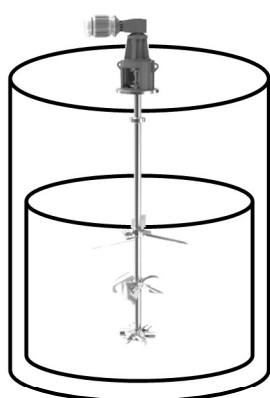
❖ Ημι-συνεχούς έργου (Semi batch)

- Ό,τι δεν μπορεί να ταξινομηθεί στις δύο προηγούμενες κατηγορίες

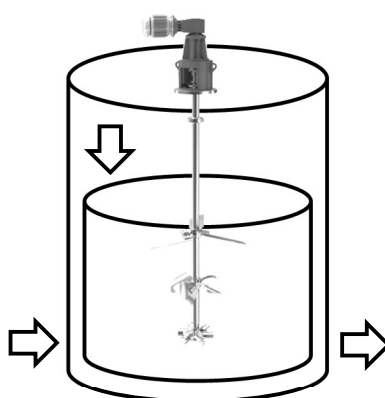
9

9

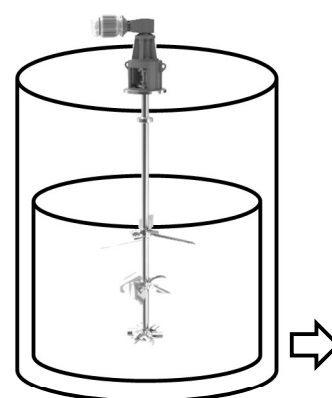
ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ



m, v, n
Ασυνεχούς έργου
(παρτίδες)



m', v', n'
Συνεχούς έργου



m', v', n'
Ημισυνεχούς έργου

10

10

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ βάσει συνθηκών λειτουργίας

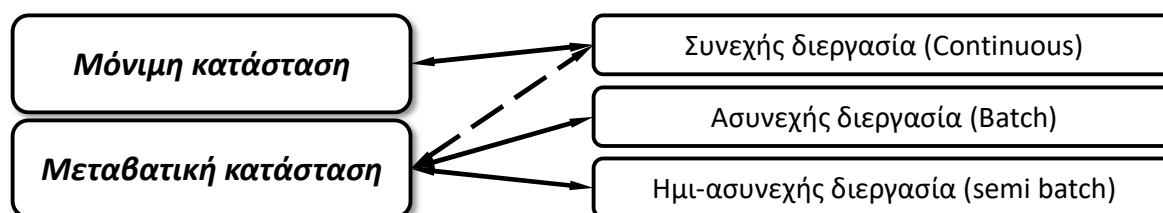
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ vs. ΧΡΟΝΟΣ (t)

Μόνιμη κατάσταση (Steady state)

- Οι μεταβλητές της διεργασίας ($T, P, \dot{m}, \rho, x_A, \dots$) ΔΕΝ μεταβάλλονται με το χρόνο (t)
- Το σύστημα είναι σε σταθερή κατάσταση (ισορροπία)

Μη μόνιμη ή μεταβατική κατάσταση (unsteady state)

- Κάποιες από τις μεταβλητές της διεργασίας μεταβάλλονται με το χρόνο (t)



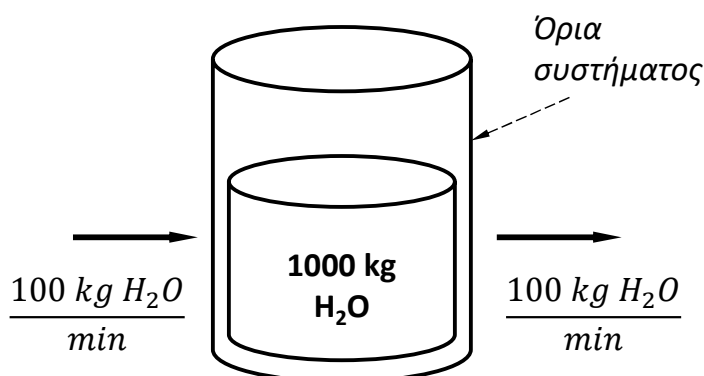
11

11

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ βάσει συνθηκών λειτουργίας

Συνεχούς έργου – Μόνιμη κατάσταση

(χωρίς αντίδραση)



Είσοδος = Έξοδος

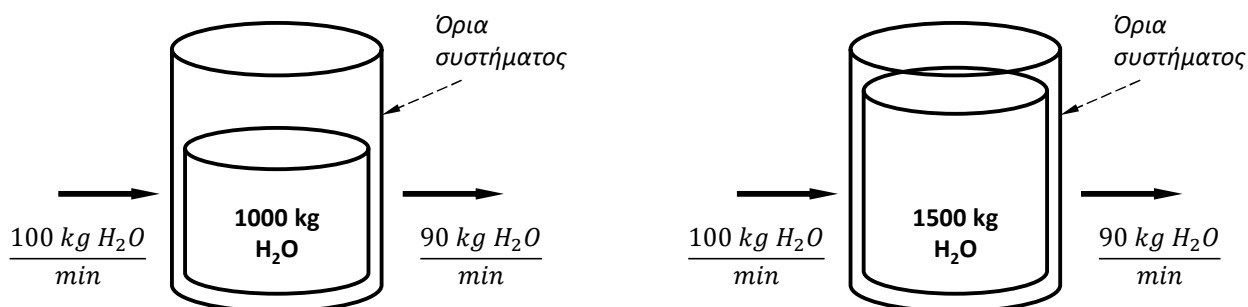
12

12

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ βάσει συνθηκών λειτουργίας

Μη μόνιμη κατάσταση

(χωρίς αντίδραση)



$$\text{Είσοδος} - \text{Έξοδος} = \text{Συσσώρευση}$$

$$\text{Είσοδος} > \text{Έξοδος}$$

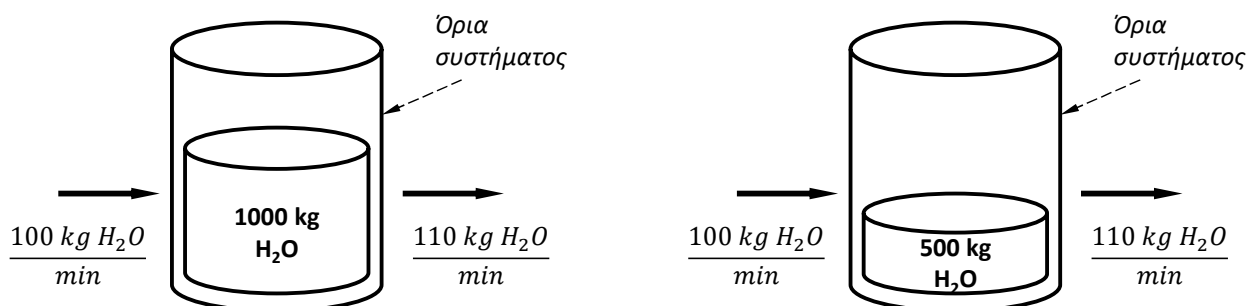
13

13

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ βάσει συνθηκών λειτουργίας

Μη μόνιμη κατάσταση

(χωρίς αντίδραση)



$$\text{Είσοδος} - \text{Έξοδος} = \text{Συσσώρευση}$$

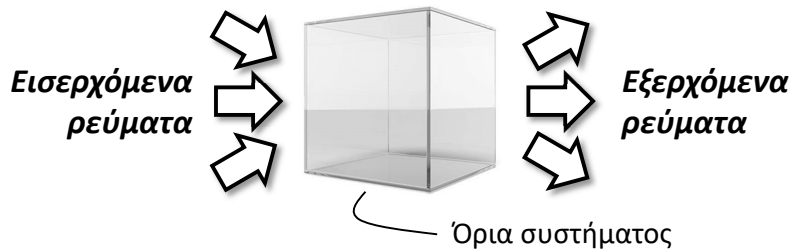
$$\text{Είσοδος} < \text{Έξοδος}$$

14

14

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ

Ισοζύγια μάζας μπορούμε να γράψουμε για κάθε συστατικό που συμμετέχει στη διεργασία καθώς και για το σύνολο



- Ολική μάζα
- Ολικά moles
- Μάζα στοιχείων
- moles στοιχείων
- Μάζα χημικών ενώσεων
- moles χημ. ενώσεων

Εφαρμογή ισοζυγίου μάζας για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων μεταβλητών των διεργασιών

- Ροές
- Συστάσεις

ΕΙΣΡΟΗ

+

ΠΑΡΑΓΩΓΗ

-

ΕΚΡΟΗ

-

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

=

ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ

15

15

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ

Εύκολος τρόπος να θυμάστε την βασική εξίσωση ισοζυγίου μάζας

ΕΙΣΡΟΗ

+

ΠΑΡΑΓΩΓΗ

-

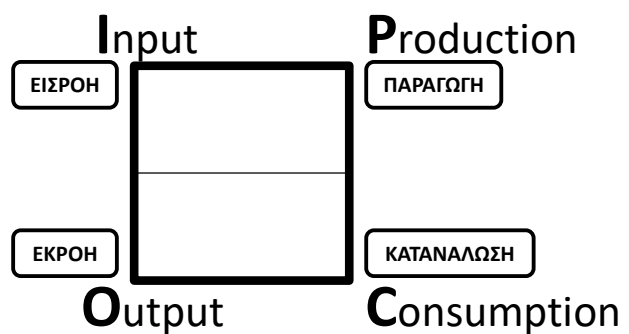
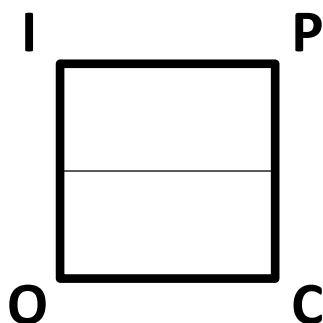
ΕΚΡΟΗ

-

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

=

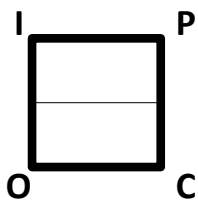
ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ



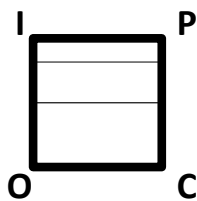
16

16

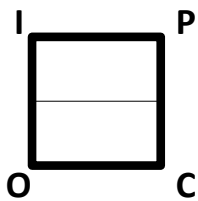
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ



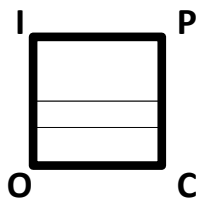
$$\frac{I + P}{O + C} > 1$$



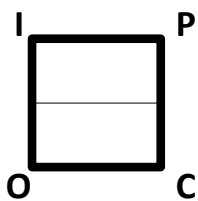
Όταν το άθροισμα των όρων εισροής και παραγωγής είναι **ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ** του αθροίσματος των όρων εκροής και κατανάλωσης, η συσσώρευση είναι θετική



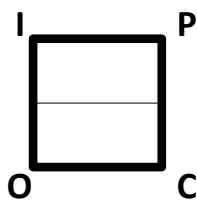
$$\frac{I + P}{O + C} < 1$$



Όταν το άθροισμα των όρων εισροής και παραγωγής είναι **ΜΙΚΡΟΤΕΡΟ** του αθροίσματος των όρων εκροής και κατανάλωσης, η συσσώρευση είναι αρνητική



$$\frac{I + P}{O + C} = 1$$



Όταν το άθροισμα των όρων εισροής και παραγωγής είναι **ΙΣΟ** με το άθροισμα των όρων εκροής και κατανάλωσης, η συσσώρευση είναι μηδενική

17

17

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ

Ολικό Ισοζύγιο Μάζας

ΕΙΣΡΟΗ

+

ΠΑΡΑΓΩΓΗ

-

ΕΚΡΟΗ

-

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

=

ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ

Χωρίς χημική αντίδραση οι όροι παραγωγής και κατανάλωσης είναι μηδενικοί

ΕΙΣΡΟΗ

+

~~ΠΑΡΑΓΩΓΗ~~

-

ΕΚΡΟΗ

-

~~ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ~~

=

ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ

ΕΙΣΡΟΗ

-

ΕΚΡΟΗ

=

ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ

18

18

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ

Ολικό Ισοζύγιο Μάζας

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = \text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}$$

Σε μόνιμη κατάσταση (με αντίδραση) ο όρος συσσώρευσης είναι μηδενικός

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = \text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}$$

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} = \text{ΕΚΡΟΗ} + \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ}$$

19

19

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ

Ολικό Ισοζύγιο Μάζας

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = \text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}$$

Σε μόνιμη κατάσταση, χωρίς χημική αντίδραση:

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = \text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}$$

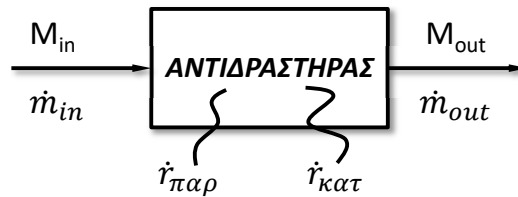
$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} = \text{ΕΚΡΟΗ}$$

20

20

Ο ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΧΡΟΝΟΣ

$M_{in/out}$ = μάζα συστατικού Α
στην είσοδο/έξοδο
[=] kg



$$\begin{aligned} M_{in} &= \dot{m}_{in} \cdot \Delta t \\ M_{out} &= \dot{m}_{out} \cdot \Delta t \\ M_{\pi\alpha\rho} &= \dot{r}_{\pi\alpha\rho} \cdot \Delta t \\ M_{\kappa\alpha\tau} &= \dot{r}_{\kappa\alpha\tau} \cdot \Delta t \end{aligned}$$

Γενικό Ισοζύγιο:

Εισ + Παρ – Εκρ – Καταν = Συσσώρευση

$$(\dot{m}_{in} + \dot{r}_{\pi\alpha\rho} - \dot{m}_{out} - \dot{r}_{\kappa\alpha\tau}) \cdot \Delta t = \Delta M$$

Αν $\Delta t \rightarrow 0$

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{in} + \dot{r}_{\pi\alpha\rho} - \dot{m}_{out} - \dot{r}_{\kappa\alpha\tau}$$

**Διαφορικό
Ισοζύγιο (1)**

21

21

Ο ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΧΡΟΝΟΣ

Αν έχω ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ $\frac{dM}{dt} \rightarrow 0$

Αν έχω ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ $\frac{dM}{dt} \neq 0$,
απαιτείται συνοριακή συνθήκη, $t = 0, M = \dots$

$$(1) \Rightarrow \int_{t_0}^{t_f} dM = M(t_f) - M(t_0) = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{in} dt + \int_{t_0}^{t_f} \dot{r}_{\pi\alpha\rho} dt - \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{out} dt - \int_{t_0}^{t_f} \dot{r}_{\kappa\alpha\tau} dt$$

$$\Rightarrow M(t_f) = M(t_0) + \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{in} dt + \int_{t_0}^{t_f} \dot{r}_{\pi\alpha\rho} dt - \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{out} dt - \int_{t_0}^{t_f} \dot{r}_{\kappa\alpha\tau} dt$$

22

22

Ο ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΧΡΟΝΟΣ**ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (Γενικά)**

$$\Rightarrow M(t_f) = M(t_o) + \int_{t_o}^{t_f} \dot{m}_{in} dt + \int_{t_o}^{t_f} \dot{r}_{\pi\alpha\rho} dt - \int_{t_o}^{t_f} \dot{m}_{out} dt - \int_{t_o}^{t_f} \dot{r}_{\kappa\alpha\tau} dt$$

Ολοκληρωτικό Batch (κλειστό), δηλαδή: $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = 0$

δηλ. $M(t_f) = M(t_o) + \int_{t_o}^{t_f} \cancel{\dot{m}_{in}} dt + \int_{t_o}^{t_f} \dot{r}_{\pi\alpha\rho} dt - \int_{t_o}^{t_f} \cancel{\dot{m}_{out}} dt - \int_{t_o}^{t_f} \dot{r}_{\kappa\alpha\tau} dt$ απλοποιείται

$$\Rightarrow M(t_o) + \int_{t_o}^{t_f} \dot{r}_{\pi\alpha\rho} dt = M(t_f) + \int_{t_o}^{t_f} \dot{r}_{\kappa\alpha\tau} dt$$

23

23

Ο ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΧΡΟΝΟΣ**ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (Γενικά)**

$$\Rightarrow M(t_f) = M(t_o) + \int_{t_o}^{t_f} \dot{m}_{in} dt + \int_{t_o}^{t_f} \dot{r}_{\pi\alpha\rho} dt - \int_{t_o}^{t_f} \dot{m}_{out} dt - \int_{t_o}^{t_f} \dot{r}_{\kappa\alpha\tau} dt$$

Ολοκληρωτικό Batch χωρίς αντίδραση: $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = 0$

δηλ. $M(t_f) = M(t_o) + \int_{t_o}^{t_f} \cancel{\dot{m}_{in}} dt + \int_{t_o}^{t_f} \cancel{\dot{r}_{\pi\alpha\rho}} dt - \int_{t_o}^{t_f} \cancel{\dot{m}_{out}} dt - \int_{t_o}^{t_f} \cancel{\dot{r}_{\kappa\alpha\tau}} dt$ απλοποιείται

$$\Rightarrow M(t_f) = M(t_o)$$

24

24

Ο ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΧΡΟΝΟΣ – ΓΕΝΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΑΖΑΣ

Διαφορικά ισοζύγια (differential balances)

- Σε διεργασίες μόνιμης κατάστασης
- Τι γίνεται για συγκεκριμένη στιγμή στο σύστημα
- Οι όροι των ισοζυγίων είναι **ροές**

Ολοκληρωτικά ισοζύγια (integral balances)

- Σε διεργασίες μη μόνιμης κατάστασης
- Τι γίνεται μεταξύ δύο χρονικών στιγμών στο σύστημα
- Οι όροι των ισοζυγίων είναι **ποσότητες**.

*Ισοζύγια μάζας καταστρώνονται
για κάθε συστατικό που συμμετέχει στη διεργασία
καθώς και για το σύνολο αυτών*

25

25



*Ισοζύγια μάζας καταστρώνονται
για κάθε συστατικό που συμμετέχει στη
διεργασία
καθώς **και για το σύνολο αυτών***

26

26

ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ – Ανάλυση αν ένα πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί
**Βαθμοί
ελευθερίας**
=
**Άγνωστες
μεταβλητές**
-
**Ανεξάρτητες
εξισώσεις**

$$df = n_x - n_{eq}$$

- Το ισοζύγιο έχει μοναδική (μονοσήμαντη) λύση όταν $df=0$
- Αν $n_x - n_{eq} > 0$ τότε το σύστημα είναι υπο-καθορισμένο (άπειρες λύσεις). Για να λυθεί μονοσήμαντα πρέπει να βρεθούν κι άλλες ανεξάρτητες εξισώσεις ή να δώσουμε τιμή σε κάποιες άγνωστες μεταβλητές.
- Αν $n_x - n_{eq} < 0$ τότε το σύστημα είναι υπερκαθορισμένο (συνήθως καμία λύση).

27

27

ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ – Ανάλυση αν ένα πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί
 BE ή $df = \text{Αρ. Αγνώστων} - \text{Αρ. Ανεξ. Ισοζυγία} - (\text{περιορισμοί \& σχέσεις})$
«Πηγές» εξισώσεων

- **Ισοζύγια μάζας**
- **Φυσικοί περιορισμοί**
Κλάσματα μάζας ή μοριακά κλάσματα (αθροίζουν στο 100%)
- **Χαρακτηριστικά διεργασίας**
Πιθανές σχέσεις, αναλογίες μεταξύ ροών,...
- **Στοιχειομετρικές σχέσεις**
- **Φυσικές ιδιότητες και νόμοι**
Πυκνότητες, καταστατικές εξισώσεις αερίων,...
- **Ισοζύγια ενέργειας**

28

28

ΒΗΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ



1. Προσεκτική ανάγνωση του προβλήματος
2. Κατασκευή **διαγράμματος ροής**
3. Τοποθέτηση των **τιμών των γνωστών μεταβλητών** στο διάγραμμα ροής (ροές, συστάσεις) και **των περιορισμών**
4. Τοποθέτηση των άγνωστων μεταβλητών με σύμβολα
5. Επιλογή βάσης υπολογισμών (**Δεδομένο άσκησης ή την επιλέγετε εσείς**)
6. Απαρίθμηση εξισώσεων που περιγράφουν το σύστημα
7. Προσδιορισμός βαθμών ελευθερίας (df)
8. Αν $df=0$ τότε επίλυση συστήματος για τον προσδιορισμό των άγνωστων μεταβλητών.
Αν έχουμε πολλαπλό σύστημα:
 - Ξεκινάμε την επίλυση ισοζυγίων από εκείνο το σύστημα που 0 βαθμούς ελευθερίας
 - Αντικαθιστούμε τις υπολογιζόμενες μεταβλητές (ροές, συστάσεις) στα άλλα (άλυτα) συστήματα, συνεχίζουμε μέχρι να υπολογιστούν όλες οι μεταβλητές των ρευμάτων
9. Επαλήθευση αποτελεσμάτων

29

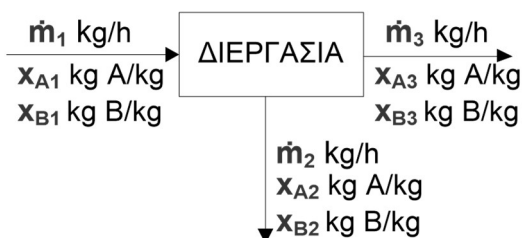
29

ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ

- ➔ Σε μια διεργασία χωρίς χημική αντίδραση, μπορούν να γραφούν **τόσα ανεξάρτητα ισοζύγια μάζας** (εξισώσεις δηλαδή) **όσα είναι και τα συστατικά** που συμμετέχουν στη διαδικασία



Παράδειγμα
2 συστατικά A και B



$$\text{Ισοζύγιο A: } \dot{m}_1 \cdot x_{A1} = \dot{m}_2 \cdot x_{A2} + \dot{m}_3 \cdot x_{A3} \quad (1)$$

$$\text{Ισοζύγιο B: } \dot{m}_1 \cdot x_{B1} = \dot{m}_2 \cdot x_{B2} + \dot{m}_3 \cdot x_{B3} \quad (2)$$

$$\text{Συνολικό ισοζύγιο: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (3)$$

Η (3) δεν είναι ανεξάρτητη εξίσωση, αφού προκύπτει από την άθροιση των (1) και (2) μιας και $x_{Ai} + x_{Bi} = 1$

30

30

ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ

- ➔ Σε ένα ρεύμα με n συστατικά, οι συστάσεις των $n-1$ συστατικών είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους:
 - ⇒ Ισχύει η εξίσωση $x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1$ για τις συστάσεις. Αν είναι γνωστές $n-1$ συστάσεις, τότε η n -οστή προκύπτει από τις υπόλοιπες
- ➔ Εκμετάλλευση άμεσου υπολογισμού μεταβλητών (βάζουμε τις υπολογιζόμενες τιμές απ' ευθείας στο διάγραμμα ροής.
- ➔ Τα ισοζύγια μάζας αφορούν ροές μάζας ή mol. Αν δίνονται ή ζητούνται ογκομετρικές μεταβλητές χρησιμοποιούμε την πυκνότητα ή και το M.B.
 - ⇒ Μετατροπές: Όγκος $\xleftrightarrow{\rho}$ Μάζα $\xleftrightarrow{M.B.}$ mol
- ➔ Αν έχουμε κλάσματα μάζας και μοριακά κλάσματα τότε καλό θα ήταν να τα μετατρέπουμε όλα σε κοινή βάση

31

31

ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ

- ➔ Αν $df > 0$ σε όλα τα συστήματα, τότε μάλλον κάποια εξίσωση έχουμε ξεχάσει!!!!
- ➔ Για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων ξεκινάμε από τα προφανή (εξισώσεις με έναν άγνωστο) και αντικαθιστούμε στις επόμενες.

32

32

TOO MANY (DEGREES OF) FREEDOM, TOO LITTLE TIME
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1


Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

1. Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας.
2. Αναγράψτε τις άγνωστες μεταβλητές (ροές ή/και συστάσεις) που περιγράφουν πλήρως το σύστημα.
3. Καταστρώστε όλα τα ισοζύγια και υποδείξτε ποια από αυτά είναι ανεξάρτητα.
4. Έχετε περιορισμούς;
5. Υπολογίστε τους βαθμούς ελευθερίας. Λύνεται το παραπάνω σύστημα;
6. Για πόσες μεταβλητές απαιτούνται τιμές; Ή τι ενδεικτικούς περιορισμούς θα προτείνετε;

33

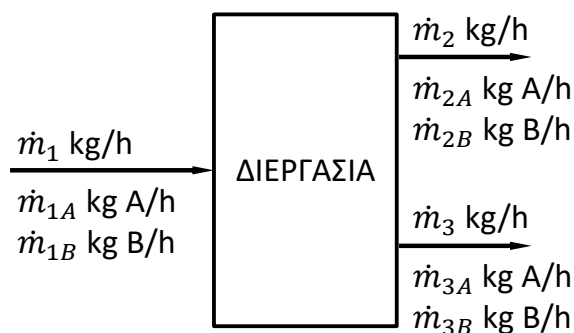
33

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1
ΒΗΜΑ 1

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

1. Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας.
2. Αναγράψτε τις άγνωστες μεταβλητές (ροές ή/και συστάσεις) που περιγράφουν πλήρως το σύστημα.

Περίπτωση 1: Ας υποθέσουμε ότι θέλω να εκφράσω τα πάντα ως μαζικούς ρυθμούς



Σε αυτό το (προκαταρκτικό) στάδιο περιγραφής, πόσες άγνωστες μεταβλητές νομίζω ότι έχω; (Απάντηση: 9)

34

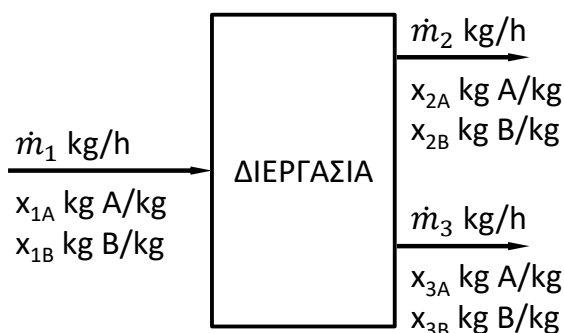
34

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**ΒΗΜΑ 1**

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

1. Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας.
2. Αναγράψτε τις άγνωστες μεταβλητές (ροές ή/και συστάσεις) που περιγράφουν πλήρως το σύστημα.

Περίπτωση 2: Ας υποθέσουμε ότι θέλω να εκφράσω τις ροές ως μαζικούς ρυθμούς και τις επιμέρους συστάσεις με μαζικά κλάσματα



Σε αυτό το (προκαταρκτικό) στάδιο περιγραφής, πόσες άγνωστες μεταβλητές νομίζω ότι έχω; (Απάντηση: 9)

35

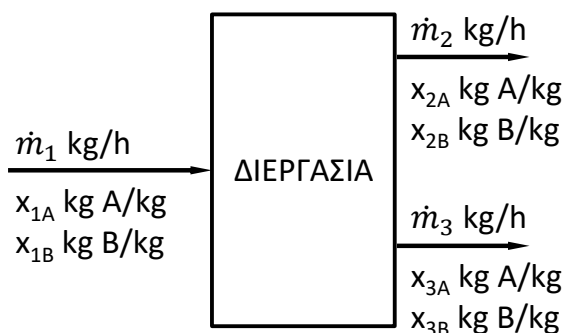
35

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**ΒΗΜΑ 1**

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

1. Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας.
2. Αναγράψτε τις άγνωστες μεταβλητές (ροές ή/και συστάσεις) που περιγράφουν πλήρως το σύστημα.

ΌΛΑ ΚΑΛΑ; Ή μήπως κάποιοι άγνωστοι δεν είναι και τόσο άγνωστοι;



Απάντηση: ΌΧΙ, επιμένουμε ότι όλα αυτά είναι άγνωστες μεταβλητές!
Άλλωστε ο επιμένων νικά,..... όπως λένε

36

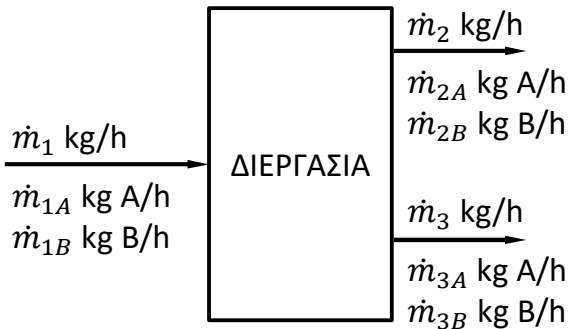
36

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**ΒΗΜΑ 1**

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

3. Καταστρώστε όλα τα ισοζύγια και υποδείξτε ποια από αυτά είναι ανεξάρτητα.

Περίπτωση 1: Με καθολική χρήση **μαζικών ρυθμών**



$$\text{Μίγμα A\&B: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\text{Συστατικό A: } \dot{m}_{1A} = \dot{m}_{2A} + \dot{m}_{3A} \quad (2)$$

$$\text{Συστατικό B: } \dot{m}_{1B} = \dot{m}_{2B} + \dot{m}_{3B} \quad (3)$$

ΠΡΟΣΟΧΗ: Μόνο δύο ισοζύγια είναι ανεξάρτητα (όσα δηλ. και ο αριθμός των συστατικών), καθώς, $\dot{m}_{1A} + \dot{m}_{1B} = \dot{m}_1$ και αντίστοιχα για τα ρεύματα ② και ③

όπου π.χ. (1) προκύπτει από (2) + (3), π.χ. (2) προκύπτει από (1) – (3) και αντίστοιχα π.χ. (3) προκύπτει από (1) – (2)

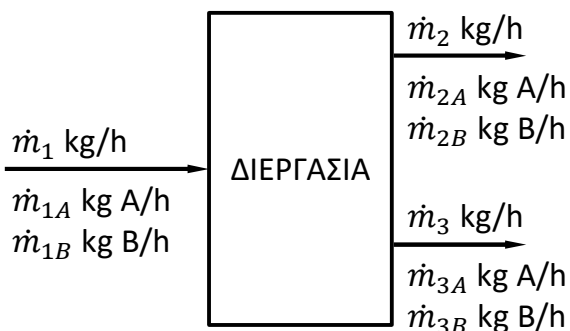
37

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**ΒΗΜΑ 1**

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

4. Έχετε περιορισμούς;

Περίπτωση 1: Με καθολική χρήση **μαζικών ρυθμών**



$$\text{Συνολικό: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\text{A: } \dot{m}_{1A} = \dot{m}_{2A} + \dot{m}_{3A} \quad (2)$$

$$\text{B: } \dot{m}_{1B} = \dot{m}_{2B} + \dot{m}_{3B} \quad (3)$$

9 άγνωστες μεταβλητές! $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \dot{m}_{1A}, \dot{m}_{2A}, \dot{m}_{3A}, \dot{m}_{1B}, \dot{m}_{2B}, \dot{m}_{3B}$
αλλά πρέπει να λάβω υπόψη μου και τις τρεις εξισώσεις
(ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ) $\dot{m}_i = \dot{m}_{iA} + \dot{m}_{iB}$

38

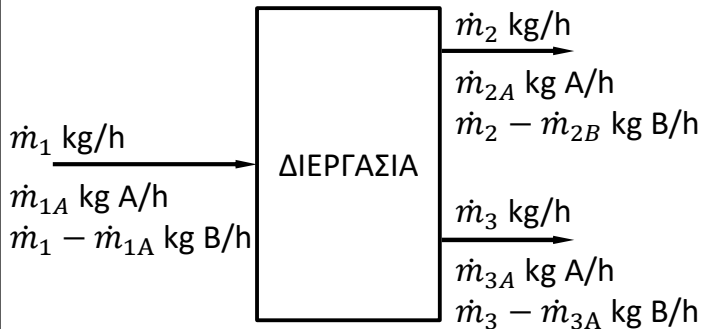
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

4. Έχετε περιορισμούς;

ΒΗΜΑ 1

Περίπτωση 1: Με καθολική χρήση **μαζικών ρυθμών**



Άρα αν επέλεγα π.χ. ως δύο ανεξάρτητα ισοζύγια το συνολικό και αυτό για το A, τότε θα είχαμε

$$\text{Συνολικό: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\text{A: } \dot{m}_{1A} = \dot{m}_{2A} + \dot{m}_{3A} \quad (2)$$

$$\text{B: } (\dot{m}_1 - \dot{m}_{1A}) = (\dot{m}_2 - \dot{m}_{2A}) + (\dot{m}_3 - \dot{m}_{3A})$$

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ: Έχω μεν 6 άγνωστες μεταβλητές! $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \dot{m}_{1A}, \dot{m}_{2A}, \dot{m}_{3A}$ αλλά έχω ήδη λάβει υπόψη μου τις τρεις εξισώσεις $\dot{m}_i = \dot{m}_{iA} + \dot{m}_{iB}$ **ΑΡΑ ΔΕΝ ΕΧΩ ΠΛΕΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ!**

39

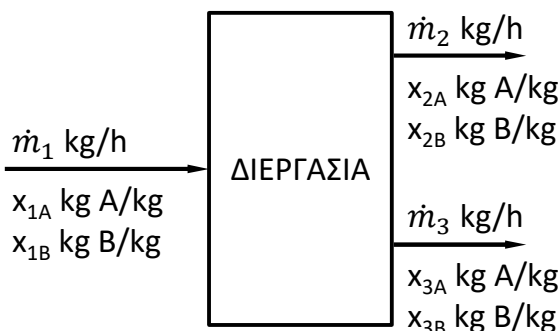
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

3. Καταστρώστε όλα τα ισοζύγια και υποδείξτε ποια από αυτά είναι ανεξάρτητα.

ΒΗΜΑ 1

Περίπτωση 2: Ας υποθέσουμε ότι θέλω να εκφράσω τις ροές ως μαζικούς ρυθμούς και τις επιμέρους συστάσεις με μαζικά κλάσματα



$$\text{Συνολικό: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\text{A: } x_{1A} \cdot \dot{m}_1 = x_{2A} \cdot \dot{m}_2 + x_{3A} \cdot \dot{m}_3 \quad (2)$$

$$\text{B: } x_{1B} \cdot \dot{m}_1 = x_{2B} \cdot \dot{m}_2 + x_{3B} \cdot \dot{m}_3 \quad (3)$$

ΠΡΟΣΟΧΗ: Μόνο δύο ισοζύγια είναι ανεξάρτητα (όσα δηλ. και ο αριθμός των συστατικών), καθώς, $x_{1A} + x_{1B} = 1$ και αντίστοιχα για τα ρεύματα ② και ③ όπου π.χ. (1) προκύπτει από (2) + (3), π.χ. (2) προκύπτει από (1) – (3) και αντίστοιχα π.χ. (3) προκύπτει από (1) – (2)

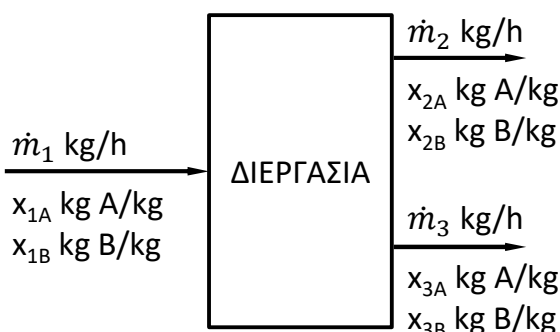
40

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**ΒΗΜΑ 1**

Περίπτωση 2: Ας υποθέσουμε ότι θέλω να εκφράσω τις ροές ως μαζικούς ρυθμούς και τις επιμέρους συστάσεις με μαζικά κλάσματα

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

4. Έχετε περιορισμούς;



Άρα αν επέλεγα π.χ. ως δύο ανεξάρτητα ισοζύγια το συνολικό και αυτό για το A, τότε θα είχαμε

$$\text{Συνολικό: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\text{A: } x_{1A} \cdot \dot{m}_1 = x_{2A} \cdot \dot{m}_2 + x_{3A} \cdot \dot{m}_3 \quad (2)$$

$$\text{B: } x_{1B} \cdot \dot{m}_1 = x_{2B} \cdot \dot{m}_2 + x_{3B} \cdot \dot{m}_3 \quad (3)$$

9 άγνωστες μεταβλητές! $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, x_{1A}, x_{2A}, x_{3A}, x_{1B}, x_{2B}, x_{3B}$
αλλά πρέπει να λάβω υπόψη μου και τις τρεις εξισώσεις
(ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ) $x_{iA} + x_{iB} = 1$ (περιορισμοί)

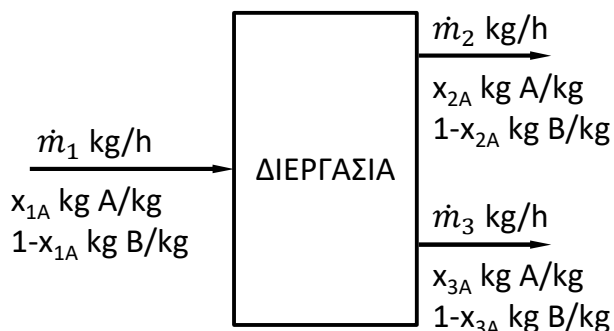
41

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**ΒΗΜΑ 1**

Περίπτωση 2: Ας υποθέσουμε ότι θέλω να εκφράσω τις ροές ως μαζικούς ρυθμούς και τις επιμέρους συστάσεις με μαζικά κλάσματα

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

4. Έχετε περιορισμούς;



Άρα αν επέλεγα π.χ. ως δύο ανεξάρτητα ισοζύγια το συνολικό και αυτό για το A, τότε θα είχαμε

$$\text{Συνολικό: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\text{A: } x_{1A} \cdot \dot{m}_1 = x_{2A} \cdot \dot{m}_2 + x_{3A} \cdot \dot{m}_3 \quad (2)$$

$$\text{B: } (1 - x_{1A}) \cdot \dot{m}_1 = (1 - x_{2A}) \cdot \dot{m}_2 + (1 - x_{3A}) \cdot \dot{m}_3$$

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ: Κατ' ουσία, πάλι έχω **6 άγνωστες μεταβλητές!** $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, x_{1A}, x_{2A}, x_{3A}$ αλλά έχω ήδη λάβει υπόψη μου τις τρεις εξισώσεις $x_{iA} + x_{iB} = 1$
ΑΡΑ ΔΕΝ ΕΧΩ ΠΛΕΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ!

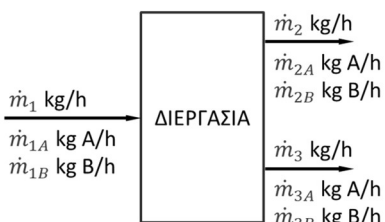
42

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**ΒΗΜΑ 1**

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

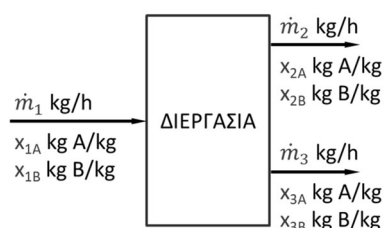
4. Υπολογίστε τους βαθμούς ελευθερίας. Λύνεται το παραπάνω σύστημα;

Βαθμοί Ελευθερίας $df = \text{Αρ. Αγνώστων} - \text{Αρ. Ανεξ. Εξισώσεων} - (\text{περιορισμοί})$



- **9 άγνωστες μεταβλητές:**
 $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \dot{m}_{1A}, \dot{m}_{2A}, \dot{m}_{3A}, \dot{m}_{1B}, \dot{m}_{2B}, \dot{m}_{3B}$
- **2 ανεξάρτητα ισοζύγια:**
 $\Sigma \& A \text{ ή } \Sigma \& B \text{ ή } A \& B$
- **3 περιορισμοί:**
 $\dot{m}_i = \dot{m}_{iA} + \dot{m}_{iB}$

$$dF = 4$$



- **9 άγνωστες μεταβλητές**
 $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, x_{1A}, x_{2A}, x_{3A}, x_{1B}, x_{2B}, x_{3B}$
- **2 ανεξάρτητα ισοζύγια:**
 $\Sigma \& A \text{ ή } \Sigma \& B \text{ ή } A \& B$
- **3 περιορισμοί:**
 $x_{iA} + x_{iB} = 1$

$$dF = 4$$

43

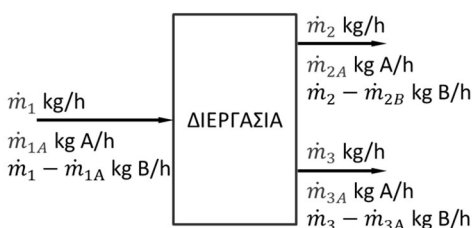
43

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**ΒΗΜΑ 1**

Έχετε μια διεργασία μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση, όπου το ρεύμα τροφοδοσίας (kg/h) περιέχει δύο συστατικά A και B. Από την διεργασία εξέρχονται δύο ρεύματα, διαφορετικής σύστασης, όπου, όμως, και στα δύο ρεύματα υπάρχουν συστατικά A και B.

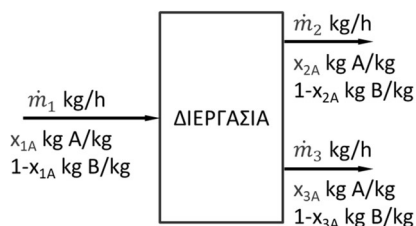
4. Υπολογίστε τους βαθμούς ελευθερίας. Λύνεται το παραπάνω σύστημα;

Βαθμοί Ελευθερίας $df = \text{Αρ. Αγνώστων} - \text{Αρ. Ανεξ. Εξισώσεων} - (\text{περιορισμοί})$



- **6 άγνωστες μεταβλητές:**
 $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \dot{m}_{1A}, \dot{m}_{2A}, \dot{m}_{3A}$
- **2 ανεξάρτητα ισοζύγια:**
 $\Sigma \& A \text{ ή } \Sigma \& B \text{ ή } A \& B$
- **0 περιορισμοί:**

$$dF = 4$$



- **6 άγνωστες μεταβλητές**
 $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, x_{1A}, x_{2A}, x_{3A}$
- **2 ανεξάρτητα ισοζύγια:**
 $\Sigma \& A \text{ ή } \Sigma \& B \text{ ή } A \& B$
- **0 περιορισμοί:**

$$dF = 4$$

44

44

ΑΠΟΣΤΑΚΤΙΚΗ ΣΤΗΛΗ – Συνεχής διεργασία

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2



1000 kg/h μίγματος βενζολίου (B) και τολουολίου (T) το οποίο περιέχει **50% B w/w** εισέρχεται σε αποστακτική στήλη για να διαχωριστεί σε **2 κλάσματα**. Το άνω ρεύμα (κορυφής) έχει παροχή **450 B kg/h** ενώ το κάτω (πυθμένα) **475 T kg/h**.

1. Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας (μόνιμη κατάσταση)
2. Καταστρώστε τα ισοζύγια και υπολογίστε τις άγνωστες ροές.

Hint:

1. Ξαναδιαβάστε την εκφώνηση του προβλήματος
2. Σχεδιάστε ένα διάγραμμα ροής της διεργασίας, βοηθάει αφάνταστα στο να δείτε τι δεδομένα έχετε και τι σας λείπουν
3. Αναγνωρίστε τις άγνωστες ροές
4. Πόσες και ποιες είναι εντέλει οι ανεξάρτητες εξισώσεις;
5. Υπάρχουν περιορισμοί ή / και δεδομένες σχέσεις;



45

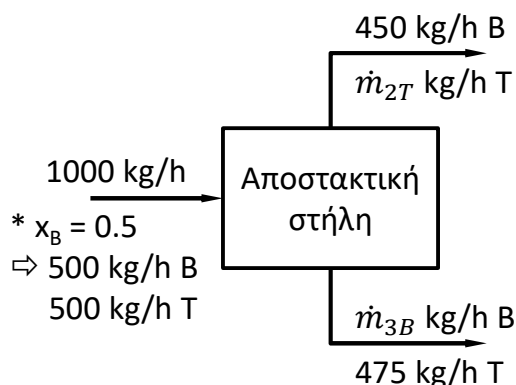
45

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

ΛΥΣΗ

1000 kg/h μίγματος βενζολίου (B) και τολουολίου (T) το οποίο περιέχει **50% B w/w** εισέρχεται σε αποστακτική στήλη για να διαχωριστεί σε **2 κλάσματα**. Το άνω ρεύμα (κορυφής) έχει παροχή **450 B kg/h** ενώ το κάτω (πυθμένα) **475 T kg/h**.

1. Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας.
2. Καταστρώστε τα ισοζύγια και υπολογίστε τις άγνωστες ροές.



ΛΥΣΗ

$$\dot{m}_{2T} = 25 \text{ kg/h T}$$

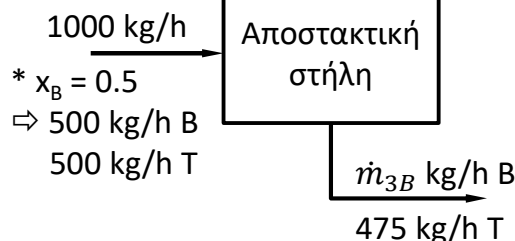
$$\dot{m}_{3B} = 50 \text{ kg/h B}$$

46

46

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

ΛΥΣΗ

Ισοζύγια μάζας (συνολικό / μερικά)

Είσοδος + Παραγωγή – Έξοδος – Κατανάλωση
 = Συσσώρευση

$\Rightarrow$ Είσοδος = Έξοδος

Check 1: Βαθμοί ελευθερίας df;

Συνολικό ισοζύγιο:

$$1000 \text{ [kg/h]} = 450 + \dot{m}_{2T} + \dot{m}_{3B} + 475 \text{ [kg/h]} \quad (1)$$

Μερικά ισοζύγια:

Βενζόλιο $500 = 450 + \dot{m}_{3B}$

$\Rightarrow \dot{m}_{3B} = 50 \text{ kg / h B}$

Τολουόλιο $500 = \dot{m}_{2T} + 475 \Rightarrow$

$\dot{m}_{2T} = 25 \text{ kg / h T}$

Επαλήθευση με συνολικό ισοζύγιο: ☒

47

47

ΑΠΟΣΤΑΚΤΙΚΗ ΣΤΗΛΗ – Revisited...

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3



Μίγμα βενζολίου (B) και τολουολίου (T) εισέρχεται σε αποστακτική στήλη με σύσταση **45% w/w B** και **55% w/w T**. Το ρεύμα κορυφής έχει **μολαρική σύσταση 95.0% B**. Το ρεύμα του πυθμένα περιέχει το **8.0% κ.β. του B που περιέχεται στην τροφοδοσία** (επομένως το 92% του B στην τροφοδοσία πάει στο ρεύμα κορυφής). Η **ογκομετρική παροχή της τροφοδοσίας είναι 2000 L/h** και το ειδικό βάρος της είναι **0.872**.

Υπολογίστε τις μαζικές ροές των 2 ρευμάτων εξόδου.

Υπολογίστε τη μαζική σύσταση του κάτω ρεύματος (ρεύματος πυθμένα).

($\epsilon_{\text{τροφ}} = 0.872$, $\rho_{\text{τροφ}} = 0.872 \text{ kg/L}$, $M_{r,B} = 78.11$, $M_{r,T} = 92.13$)



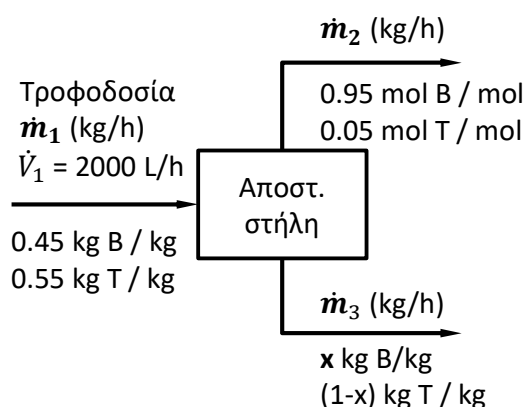
- Ξαναδιαβάστε την εκφώνηση του προβλήματος, χωρίς κραυγές...
- Είναι συνεχής (χωρίς συσσώρευση), άρα μιλάμε με όρους ρυθμών
- Δίνεται η βάση υπολογισμού, 2000 L/h αν και μάλλον είναι το μόνο νόμιμο όγκου. Δεν πειράζει, γνωρίζουμε πυκνότητα άρα μετατρέπεται αμέσως σε ρυθμό μάζας.

48

48

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3**ΛΥΣΗ**

Μίγμα βενζολίου (B) και τολουολίου (T) εισέρχεται σε αποστακτική στήλη με σύσταση **45% w/w B** και **55% w/w T**. Το ρεύμα κορυφής έχει **μολαρική σύσταση 95.0% B**. Το ρεύμα του πυθμένα περιέχει το **8.0% κ.β. του B που περιέχεται στην τροφοδοσία** (επομένως το 92% του B στην τροφοδοσία πάει στο ρεύμα κορυφής). $\dot{V}_1 = 2000 \text{ L/h}$ και $\epsilon_{\text{τροφ}} = 0.872$.

**Ζητούμενα:**

$\dot{m}_2, \dot{m}_3, x$

Σημ. το $\dot{m}_1$, μοιάζει με άγνωστο, αλλά πρακτικά δεν είναι καθώς ξέρουμε το $\dot{V}_1 = 2000 \text{ L/h}$.

Αν παρόλα αυτά το θάλουμε, θα συνυπολογίσουμε την σχέση (περιορισμός)

$$\dot{m}_1 = \rho_{\text{τροφ}} \dot{V}_1$$

Check βαθμοί ελευθερίας:

Άγνωστοι: 3

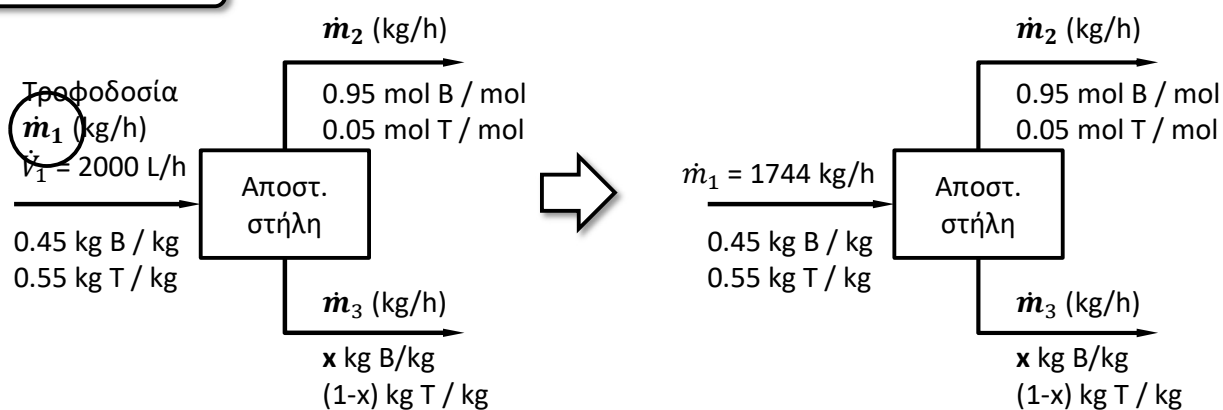
Εξισώσεις: 2 ισοζύγια μάζας

Δεδομένα / περιορισμοί: (8% τροφοδ. B) = 1

Άρα B.E = 0 άρα ΛΥΝΕΤΑΙ

49

49

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3

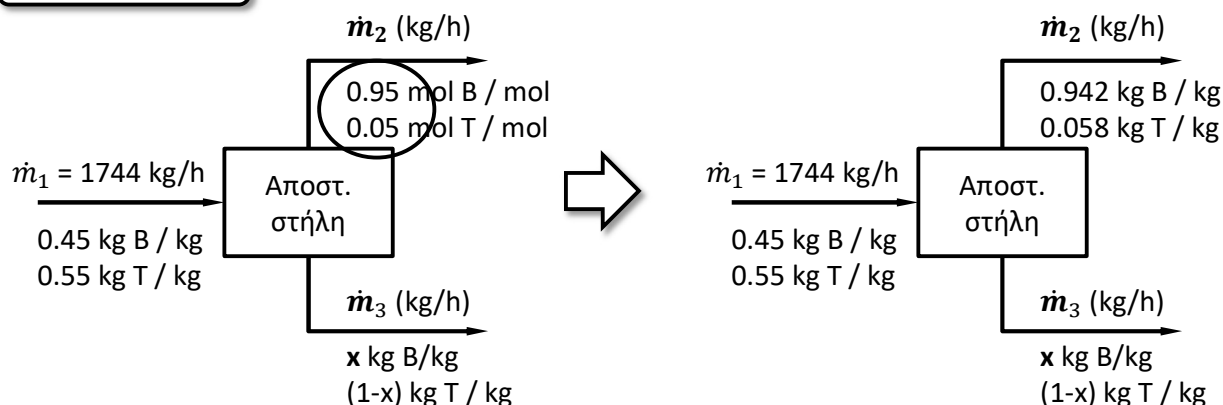
1ο βήμα: Ομοιομορφία δεδομένων για να εφαρμοστούν τα ισοζύγια: L/h $\rightarrow$ kg/h

Υπολογίζουμε την $\dot{m}_1$ (εξ ου και δεν είναι «άγνωστη μεταβλητή») μέσω του $\dot{V}_1$

$$\dot{m}_1 = \rho \cdot \dot{V}_1 = 0.872 \text{ kg/L} \cdot 2000 \text{ L/h} = 1744 \text{ kg/h}$$

50

50

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3

2^ο βήμα: Ομοιομορφία δεδομένων για να εφαρμοστούν τα ισοζύγια: γραμμομοριακά κλάσματα $\rightarrow$ κλάσματα μάζας

$$0.95 \text{ mol B} \cdot 78.11 \text{ g B/mol B} = 74.2 \text{ g B}$$

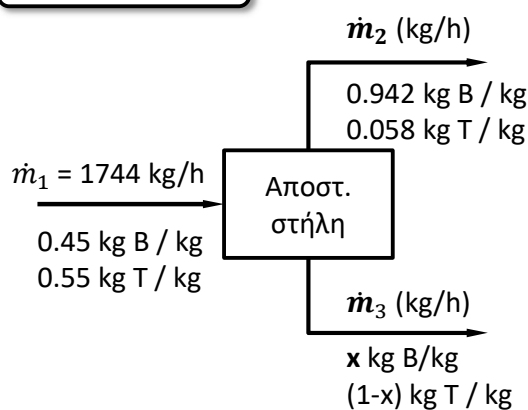
$$0.05 \text{ mol T} \cdot 92.13 \text{ g T/mol T} = 4.6 \text{ g T}$$

Σύνολο μάζας ανά mol μίγματος $74.2 + 4.6 = 78.8 \text{ g μίγματος 2}$

Άρα: $X_{B2} = 74.2/78.8 = 0.942 \text{ kg B / kg}$ και $x_{T2} = 4.6 / 78.8 = 0.058 \text{ kg T/kg}$

51

51

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3**2 ΙΣΟΖΥΓΙΑ:**

Συνολικό:

$$1744 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

Ισοζύγιο B:

$$0.45 \cdot 1744 = 0.942 \cdot \dot{m}_2 + x \cdot \dot{m}_3 \quad (2)$$

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ

"Το ρεύμα του πυθμένα περιέχει το 8.0% κ.β. του B που περιέχεται στην τροφοδοσία (επομένως το 92% του B στην τροφοδοσία πάει στο ρεύμα κορυφής)"

$$\Rightarrow 0.942 \cdot \dot{m}_2 = 0.92 \cdot (0.45 \cdot 1744) \quad (3)$$

$$\text{ή } x \cdot \dot{m}_3 = 0.08 \cdot (0.45 \cdot 1744) \quad (3')$$

Επίλυση

Από την (3) $\dot{m}_2 = 766 \text{ kg/h}$

Από την (1) $\dot{m}_3 = 978 \text{ kg/h}$

Από την (2) $x = 0.065 \text{ kg B/kg}$



52

52

ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΑΕΡΙΩΝ ΜΕ ΜΕΜΒΡΑΝΗ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4



Με την τεχνολογία των μεμβρανών μπορούμε να εμπλουτίσουμε σε O_2 τον αέρα. Ο ατμοσφαιρικός αέρας **εισέρχεται** στη μεμβράνη με μοριακή σύνθεση 21% O_2 και 79% N_2 ενώ **εξέρχεται** με 25% O_2 και 75% N_2 . Υπάρχει κι ένα ρεύμα **απόρριψης** (πλούσιο σε N_2) το οποίο αποτελεί το 80% της τροφοδοσίας. Ποια είναι η σύσταση του;

Hint:

- Ξαναδιαβάστε την εκφώνηση του προβλήματος (προσοχή στους όρους, π.χ. εισέρχεται, εξέρχεται, απόρριψη κλπ)
- Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας, για να δείτε τι δεδομένα έχετε και τι σας λείπουν
- Αναγνωρίστε τις άγνωστες ροές. Σε ποιο ρεύμα αναφέρεται το ερώτημα περί σύστασης;
- Ποια βάση υπολογισμού θα ήταν χρήσιμη;



ΛΥΣΗ

$$P = 20 \text{ kmol}$$

$$R = 80 \text{ kmol}$$

$$y_1 = 0.20 \text{ mol } O_2/\text{mol}$$

53

53

ΑΝΑΜΕΙΞΗ – Batch Διεργασία

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5



Διατίθενται 2 μίγματα μεθανόλης - νερού σε **ξεχωριστές δεξαμενές**. Η πρώτη περιέχει **40.0 w/w %** σε μεθανόλη και η δεύτερη **70.0% w/w**. **2000 kg** από την πρώτη δεξαμενή αναμιγνύονται με **1500 kg** από τη δεύτερη δεξαμενή.

1. Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας.
2. Υπολογίστε τη μάζα και τη σύσταση εξόδου – προϊόντος

Hint:

- Ξαναδιαβάστε την εκφώνηση του προβλήματος (Batch, άρα μιλάμε με **όρους ποσοτήτων!**)
- Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας: Δεν χρειάζεται να σχεδιάσετε τις δυο δεξαμενές τροφοδοσίας!! Ασχολούμαστε μόνο με την δεξαμενή ανάμιξης



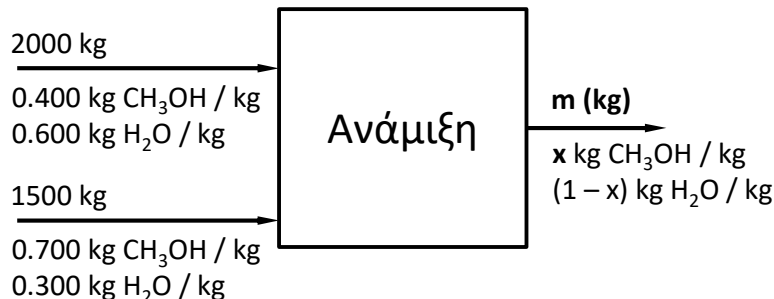
54

54

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5**ΛΥΣΗ**

Διατίθενται 2 μίγματα μεθανόλης - νερού σε **ξεχωριστές δεξαμενές**. Η πρώτη περιέχει **40.0 w/w %** σε μεθανόλη και η δεύτερη **70.0% w/w**. **2000 kg** από την πρώτη δεξαμενή αναμειγνύονται με **1500 kg** από τη δεύτερη δεξαμενή.

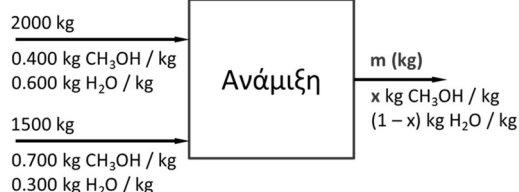
1. Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας.
2. Υπολογίστε τη μάζα και τη σύσταση εξόδου – προϊόντος

**ΛΥΣΗ**

$$m = 3500 \text{ kg}$$

$$x = 0.529 \text{ kg CH}_3\text{OH} / \text{kg}$$

55

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5**ΛΥΣΗ****Ισοζύγια (συνολικό / μερικά)**

$$\text{Είσοδος} + \text{Παραγωγή} - \text{Έξοδος} - \text{Κατανάλωση} = \text{Συσσώρευση} \Rightarrow \text{Είσοδος} = \text{Έξοδος} \quad (1)$$

Συνολικό ισοζύγιο:

$$\text{Είσοδος} = \text{Έξοδος} \Rightarrow 2000 + 1500 = m \Rightarrow m = 3500 \text{ kg διαλύματος}$$

Μερικό ισοζύγιο CH₃OH:

$$\frac{0.400 \text{ kg CH}_3\text{OH}}{1 \text{ kg δ/τος}} \cdot 2000 \text{ kg δ/τος} + \frac{0.700 \text{ kg CH}_3\text{OH}}{1 \text{ kg δ/τος}} \cdot 1500 \text{ kg δ/τος} = x \frac{\text{kg CH}_3\text{OH}}{\text{kg δ/τος}} \cdot m \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x = 0.529 \text{ kg CH}_3\text{OH} / \text{kg}$$

Επαλήθευση (μερικό ισοζύγιο H₂O):

$$0.600 \cdot 2000 + 0.300 \cdot 1500 = (1 - 0.529) \cdot 3500$$

$$\underbrace{1200} + \underbrace{450} = \underbrace{\sim 1650}$$

56

ΑΝΑΜΕΙΞΗ – Batch Διεργασία

Υπολογισμοί λόγων ανάμειξης και προϊόντων

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6



Υδατικό διάλυμα NaOH 20.0% κ.β. χρησιμοποιείται για την παρασκευή διαλύματος NaOH 8.0% κ.β. με αραίωση του πυκνού διαλύματος με καθαρό νερό. Υπολογίστε τον λόγο (λίτρα νερού / kg τροφοδοσίας) και τον λόγο (μάζα (kg) προϊόντος / kg τροφοδοσίας).

Βάση υπολογισμού 100 kg τροφοδοσία διαλύματος, $\rho_{H_2O} = 1 \text{ kg/L}$

Hint:

- Ξαναδιαβάστε την εκφώνηση του προβλήματος. Τα περισσότερα δεδομένα είναι κ.β. άρα μάλλον θα υπολογίζουμε kg. Ακόμα και ο όγκος του νερού που ζητείται, εύκολα μετατρέπεται σε kg
- Είναι **batch**, άρα μιλάμε με όρους ποσοτήτων
- Δίνεται η βάση υπολογισμού. Έτσι και αλλιώς μάλλον την ίδια θα επιλέγαμε



$$\text{Λύση: } \frac{L_{\text{νερο}}}{kg_{\text{τροφ}}} = 1.5 \text{ L / kg}_{\text{τροφ}}$$

$$\frac{kg_{\text{προιοντος}}}{kg_{\text{τροφοδοσιας}}} = 2.5 \text{ kg}_{\text{προιο}} / \text{kg}_{\text{τροφ}}$$

57

57

Semi-Batch Διεργασία

ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ $\neq 0$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



Αέρας εισέρχεται με παροχή **0.100 kmol/min** σε δοχείο που περιέχει εξάνιο (C_6H_{14}). Το αέριο ρεύμα εξόδου περιέχει **10.0% mole ατμών εξανίου** και θεωρείται ότι ο αέρας είναι αδιάλυτος στο εξάνιο ($\epsilon C_6H_{14} = 0.659 \text{ kg/L}$, $M_r C_6H_{14} = 86.2$).

Χρησιμοποιώντας το ολοκληρωτικό ισοζύγιο, υπολογίστε το χρόνο (t) που απαιτείται για την εξάτμιση **10.0 m³ υγρού εξανίου**.

Hint:

- Ξαναδιαβάστε την εκφώνηση του προβλήματος (Αναφερόμαστε σε ροές kmol / min)
- Πουθενά δεν δίνονται όγκοι, παρόλα αυτά μας ζητείται χρόνος για εξάτμιση όγκου υγρού (εξάνιο)
- Αφού δίνονται πυκνότητες και μοριακά βάρη, μάλλον θα χρειαστούν σε μετατροπές σε kmol.
- Προσοχή στη μετατροπή μονάδων (L, m³ κλπ)

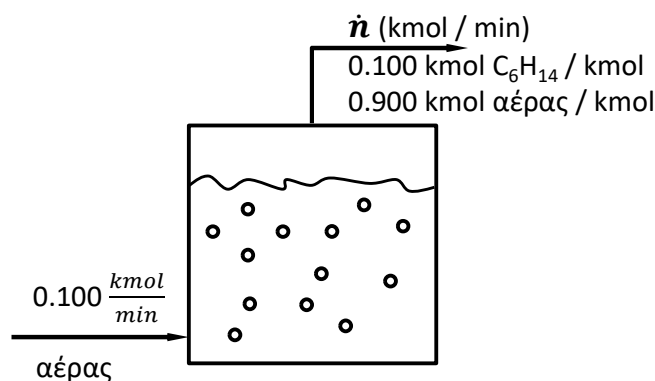


58

58

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**ΛΥΣΗ**

Αέρας εισέρχεται με παροχή **0.100 kmol/min** σε δοχείο που περιέχει εξάνιο (C_6H_{14}). Το αέριο ρεύμα εξόδου περιέχει **10.0% mole ατμών εξανίου** και θεωρείται ότι ο **αέρας είναι αδιάλυτος στο εξάνιο**. ($\epsilon C_6H_{14} = 0.659 \text{ kg/L}$, $M_r C_6H_{14} = 86.2$). Χρησιμοποιώντας το ολοκληρωτικό ισοζύγιο, υπολογίστε το χρόνο (t) που απαιτείται για την εξάτμιση **10.0 m³ υγρού εξανίου**.

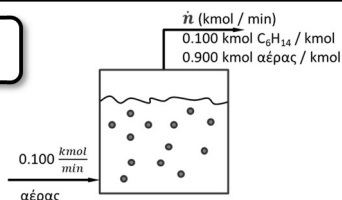
**ΛΥΣΗ**

$$\dot{n} = 0.111 \text{ kmol / min}$$

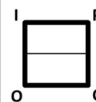
$$t = 6880 \text{ min}$$

59

59

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**ΛΥΣΗ****Hint:**

Αφού **ΔΕΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΕΤΑΙ Ο ΑΕΡΑΣ** (αδιάλυτος στο εξάνιο) αλλά ούτε έχουμε αντίδραση (όροι παραγωγής και κατανάλωσης μηδενικοί) ας ξεκινήσουμε με το μερικό διαφορικό ισοζύγιο του αέρα για να βρούμε την ροή εξόδου

**Μερικό διαφορικό Ισοζύγιο για τον αέρα**

Είσοδος + Παραγωγή – Έξοδος – Κατανάλωση = Συσσώρευση $\Rightarrow$

$$\frac{dN}{dt} (\text{kmol/min}) = 0 = \cancel{\dot{n}_{in}} + \cancel{\dot{r}_{\pi\alpha\rho}} - \cancel{\dot{n}_{out}} - \cancel{\dot{r}_{\kappa\alpha\tau}} \Rightarrow \dot{n}_{in} = \dot{n}_{out}$$

$$0.100 \frac{\text{kmol αερας}}{\text{min}} = \dot{n} \frac{\text{kmol μιγμα}}{\text{min}} \left| \frac{0.900 \text{ kmol αερας}}{\text{kmol μιγμα}} \right| \Rightarrow \dot{n} = 0.111 \text{ kmol/min μίγματος}$$

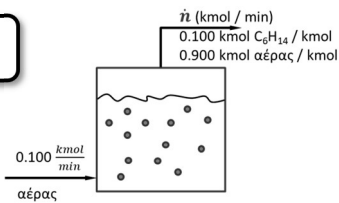
$$\Rightarrow \dot{n}_{\alpha\epsilon\rho\alpha} = 0.100 \frac{\text{kmol αερας}}{\text{min}} \quad \text{και} \quad \dot{n}_{\epsilon\xi\alpha\nu} = \dot{n} - \dot{n}_{\alpha\epsilon\rho\alpha} = 0.011 \frac{\text{kmol εξαν}}{\text{min}}$$

60

60

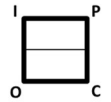
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

ΛΥΣΗ



Hint:

Στην περίπτωση του **εξανίου** η συσσώρευση dM/dt **ΔΕΝ** είναι μηδενική (μεταβατική κατάσταση $\rightarrow$ ολοκληρωτικό ισοζύγιο $t_o \rightarrow t_f$).

Μερικό διαφορικό ισοζύγιο για εξάνιο

$$\frac{dN}{dt} = \dot{n}_{in} + \dot{r}_{παρ} - \dot{n}_{out} - \dot{r}_{κατ} = -\dot{n}_{out}$$

$$\Rightarrow \int_{N_{in}}^{N_{out}} dN = - \int_{t=0}^{t=t_{τελ}} \dot{n}_{out} dt$$

$$\Delta n = n_{τελ} - n_{αρχ} = - \frac{V \cdot \rho}{M_r} = -10 m^3 \cdot 0.659 \frac{kg}{L} \left| \frac{1000 L}{m^3} \cdot \frac{1 kmol}{86.2 kg} \right| = -76.45 \text{ kmol εξανίου}$$

$$\Rightarrow -76.45 \text{ kmol } C_6H_{14} = -\dot{n}_{εξαν} \cdot (t_f - 0)$$

$$\Rightarrow -76.45 \text{ kmol } C_6H_{14} = -0.100 \text{ kmol } C_6H_{14} / \text{kmol} \cdot 0.111 \text{ kmol/min} \cdot (t_f - 0)$$

$$\Rightarrow \mathbf{t_f = 6888 \text{ min}}$$

Σημ. αν χρησιμοποιήσετε $\dot{n}_{εξαν} = 0.011$ από πριν, τότε βγαίνει $t_f = 6950 \text{ min}$

61

61

ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ – Ανάλυση βαθμών ελευθερίας

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



Ένα ρεύμα υγρού αέρα εισέρχεται σε συμπυκνωτή από τον οποίο συμπυκνώνεται το **95% των υδρατμών**. Η έξοδος του συμπυκνωτή της υγρής φάσης έχει ροή **225 L/h**. Θεωρείστε ότι ο ξηρός αέρας έχει σύσταση **21% mol O_2 και 79% N_2** . Να υπολογίσετε τον ρυθμό εκροής του **εξερχόμενου αέριου ρεύματος** και τα **μολαρικά κλάσματα O_2 , N_2 , H_2O** σε αυτό το ρεύμα.

(α) Να διερευνήσετε αν μπορεί να επιλυθεί η άσκηση.

(β) Αν ο εισερχόμενος αέρας έχει **10.0 mol% H_2O** να προσδιορίσετε τις παραπάνω μεταβλητές.

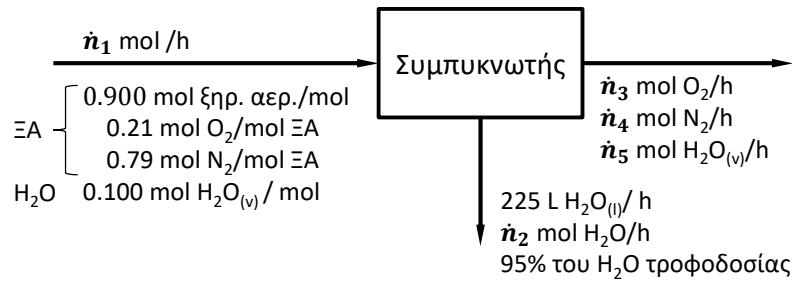
Δίνονται για το νερό $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, $M_{r_{H_2O}} = 18 \text{ g/gmol}$



- Ξαναδιαβάστε την εκφώνηση του προβλήματος.
- Είναι συνεχής (χωρίς συσσώρευση), άρα μιλάμε με όρους ρυθμών
- Επειδή μάλιστα ζητάει ρυθμό εκροής και μολαρικά κλάσματα, προφανώς και οι ρυθμοί θα αναφέρονται σε **mol/h**
- Δύο έξοδοι (νερό και αφυγρασμένος αέρας)

62

62

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8**ΛΥΣΗ (β)**

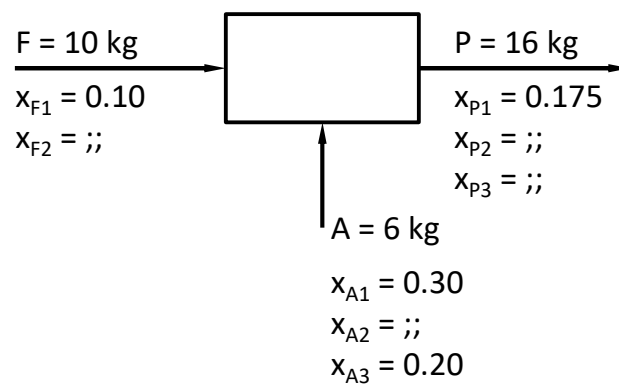
$$\begin{aligned} \dot{n}_1 &= 132 \times 10^3 \text{ mol/h} \\ \dot{n}_2 &= 12.5 \times 10^3 \text{ mol/h H}_2\text{O (liquid)} \\ \dot{n}_3 &= 24.9 \times 10^3 \text{ mol/h} \\ \dot{n}_4 &= 93.9 \times 10^3 \text{ mol/h} \\ \dot{n}_5 &= 700 \text{ mol/h} \\ y_{\text{O}_2} &= 0.208 \\ y_{\text{N}_2} &= 0.786 \\ y_{\text{H}_2\text{O}} &= 0.006 \end{aligned}$$

63

63

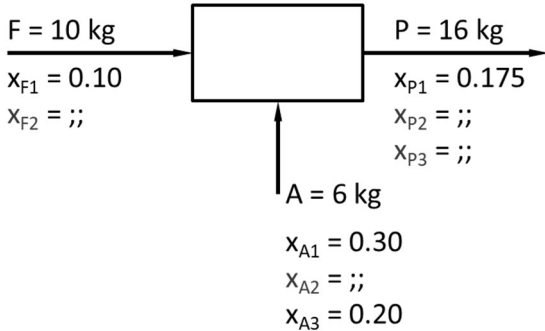
ΜΙΞΗ ΡΟΩΝ**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9**

Για τη διεργασία μόνιμης κατάστασης του ακόλουθου σχήματος, προσδιορίστε αν υπάρχει μοναδική λύση για την τιμή των μεταβλητών. Να δείξετε τους υπολογισμούς. x_{ij} είναι το κλάσμα μάζας του συστατικού i στο ρεύμα “ j ”.



64

64

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9**ΛΥΣΗ**

4 άγνωστες μεταβλητές

2 ανεξάρτητα ισοζύγια

3 σχέσεις κλασμάτων

$$\left. \begin{array}{l} 4 \text{ άγνωστες μεταβλητές} \\ 2 \text{ ανεξάρτητα ισοζύγια} \\ 3 \text{ σχέσεις κλασμάτων} \end{array} \right\} df = 4 - 2 - 3 = -1 \text{ ΥΠΕΡΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΟ}$$

Προσοχή: Μόνο 2 ανεξάρτητα ισοζύγια μάζας, καθώς για το συστατικό 1, πρακτικά δεν έχω κάπου άγνωστη μεταβλητή (σύσταση) – βλ. εξίσωση (1). Άρα δεν με «βοηθάει»

Άγνωστες μεταβλητές: 4 (x_{F2} , x_{A2} , x_{P2} , x_{P3})

Ισοζύγια μάζας για 3 συστατικά

$$(1) \quad x_{F1} \cdot F + x_{A1} \cdot A = x_{P1} \cdot P \Rightarrow 0.10 \cdot 10 + 0.30 \cdot 6 = 0.175 \cdot 16$$

$$(2) \quad x_{F2} \cdot F + x_{A2} \cdot A = x_{P2} \cdot P \Rightarrow x_{F2} \cdot 10 + x_{A2} \cdot 6 = x_{P2} \cdot 16$$

$$(3) \quad 0 \cdot F + x_{3A} \cdot A = x_{3P} \cdot P \Rightarrow 0 \cdot 10 + 0.20 \cdot 6 = x_{P3} \cdot 16$$

Κλάσματα ανά ρεύμα

$$x_{F1} + x_{F2} + x_{F3} = 1$$

$$x_{A1} + x_{A2} + x_{A3} = 1$$

$$x_{P1} + x_{P2} + x_{P3} = 1$$

65

65

ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΣΗ**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**

Κύτταρα ζύμης παραλαμβάνονται από υγρό μίγμα που περιέχει κύτταρα με τη βοήθεια φυγοκέντρου. Προσδιορίστε την **ποσότητα του υπολείμματος σε g** η οποία δεν περιέχει κύτταρα και απομακρύνεται κάθε 1 h, αν η τροφοδοσία είναι 1000L / h και περιέχει 500 mg κύτταρα/L, ενώ το ρεύμα παραγωγής (συμπυκνωμένα κύτταρα) περιέχει 50 % w/w κύτταρα. Θεωρείστε ότι η τροφοδοσία έχει $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$

$$Y = 999000 \text{ g}$$

66

66

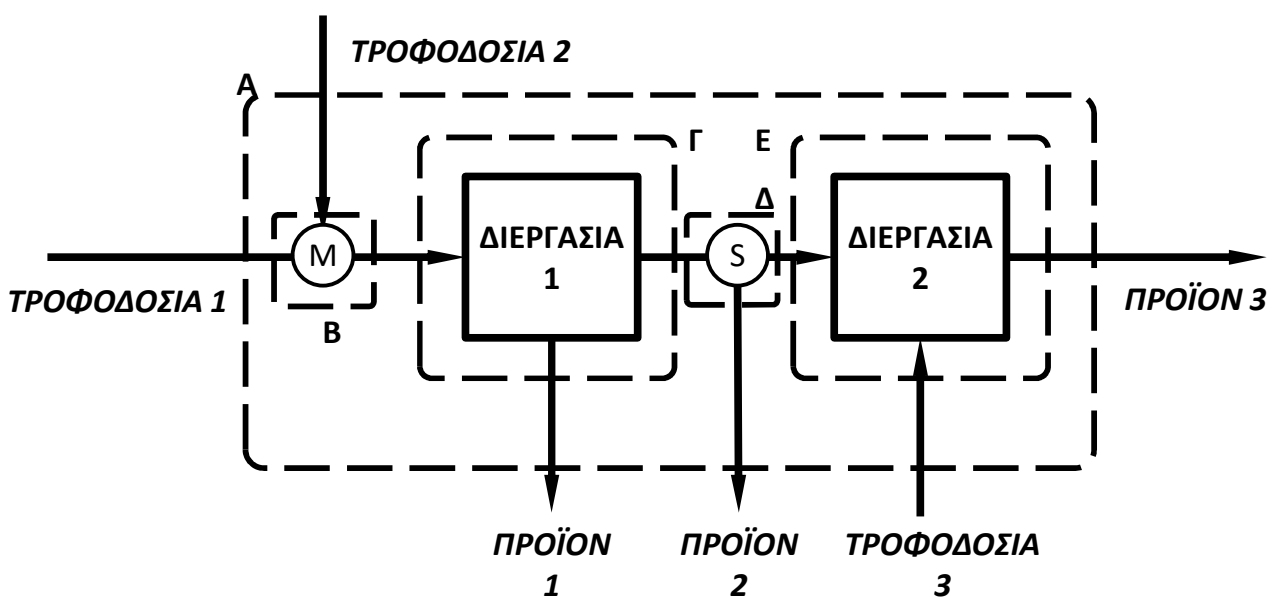
ΕΚΧΥΛΙΣΗ**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11**

Η στρεπτομυκίνη (strep) ανακτάται με διεργασίας εκχύλισης με χρήση οργανικού διαλύτη. Υποθέστε ότι εκχυλίζεται υδατικό διάλυμα με συγκέντρωση 10 g strep /L, πυκνότητας $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ και εισερχόμενου ρεύματος υδατικού διαλύματος 200 L/h. Για την εκχύλιση χρησιμοποιείται οργανικός διαλύτης πυκνότητας 0.6 g/cm^3 και ροή 10 L/h. Το εκχυλισμένο υδατικό διάλυμα έχει συγκέντρωση στρεπτομυκίνης 0.2 g strep/L και δεν περιέχει διαλύτη. Να προσδιορίσετε το κλάσμα της στρεπτομυκίνης στο εξερχόμενο ρεύμα οργανικού διαλύτη. Υποθέστε ότι οι ρυθμοί ροής των εισερχόμενων είναι ίσες με τις εξερχόμενες.

$$w_{\text{strep}} = 0.246$$

67

67

ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

68

68

ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

1. Σχεδιάζουμε το διάγραμμα ροής και απεικονίζουμε όλες τις μεταβλητές (γνωστές και άγνωστες) πάνω σε αυτό.
2. **Εξετάζουμε τα σχετικά συστήματα** (συνολική διεργασία, επιμέρους διεργασίες, σημεία ανάμιξης, σημεία διαχωρισμού κλπ) και **βρίσκουμε τους βαθμούς ελευθερίας κάθε συστήματος ξεχωριστά.**
 - Σε κάθε σύστημα συμπεριλαμβάνουμε μόνο τα ρεύματα που τέμνουν τα όρια του συστήματος
 - Μπορεί να χρειαστεί να θεωρήσουμε ως σύστημα ένα υποσύνολο της συνολικής διεργασίας που αποτελείται από δύο ή περισσότερες επιμέρους διεργασίες
3. **Ξεκινάμε την επίλυση των ισοζυγίων από το σύστημα που έχει 0 βαθμούς ελευθερίας.**
4. Αντικαθιστούμε τις υπολογιζόμενες μεταβλητές (ροές, συστάσεις) στα άλλα (άλλα) συστήματα και συνεχίζουμε μέχρι να υπολογιστούν όλες οι μεταβλητές των ρευμάτων.

69

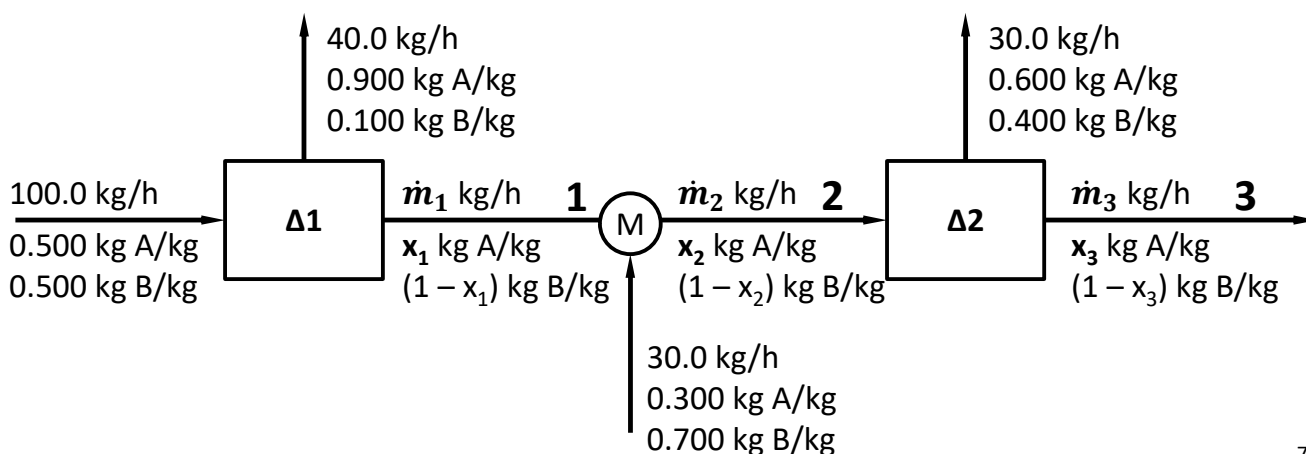
69

ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



Δίνεται η ακόλουθη συνολική συνεχής διεργασία που αποτελείται από 2 μονάδες. Κάθε ροή περιέχει δύο συστατικά A, B σε διαφορετικές αναλογίες. Να υπολογισθούν οι μαζικές ροές στα ρεύματα 1, 2 και 3 καθώς και οι συστάσεις τους.



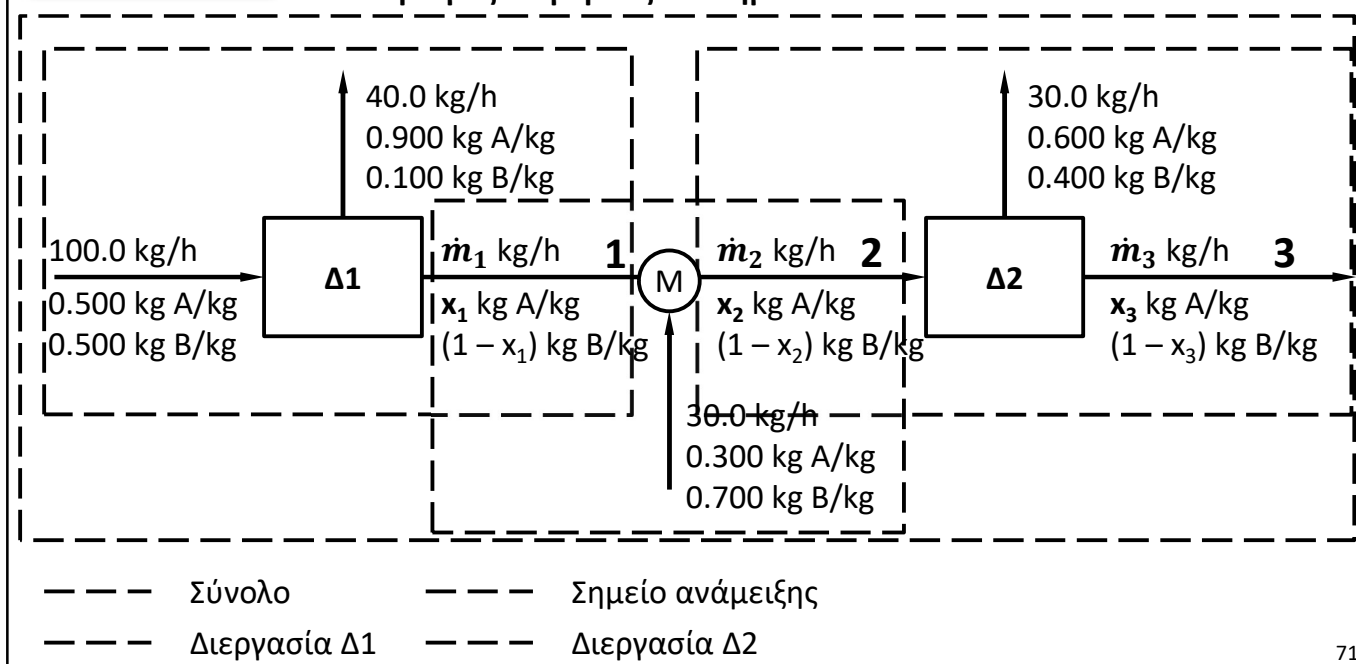
70

70

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12

ΒΗΜΑ 1:

Καθορισμός επιμέρους συστημάτων



71

71

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12

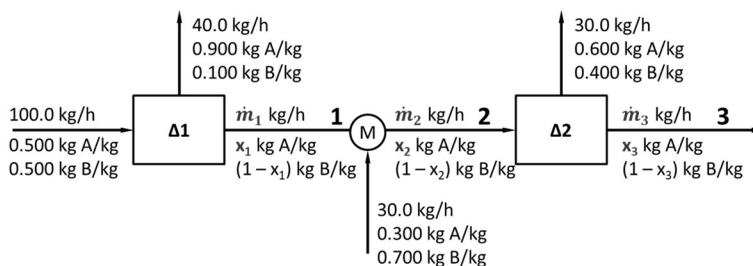
ΒΗΜΑ 2:

Καθορισμός βαθμών ελευθερίας επιμέρους συστημάτων

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΑΓΝΩΣΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ
Σύνολο	2 ($\dot{m}_3, x_3$)	2	0
Διεργασία Δ1	2 ($\dot{m}_1, x_1$)	2	0
Σημείο ανάμειξης	4 ($\dot{m}_1, x_1, \dot{m}_2, x_2$)	2	2
Διεργασία Δ2	4 ($\dot{m}_2, x_2, \dot{m}_3, x_3$)	2	2

Σειρά επίλυσης ισοζυγίων μάζας

- Διεργασία Δ1 → $\dot{m}_1, x_1$
 - Σημείο ανάμειξης → $\dot{m}_2, x_2$
 - Δ2 (ή Σύνολο) → $\dot{m}_3, x_3$
- (Εναλλακτικά)
- Σύνολο: → $\dot{m}_3, x_3$
 - Διεργασία Δ1 → $\dot{m}_1, x_1$
 - Σημείο ανάμειξης → $\dot{m}_2, x_2$



72

72

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12

ΒΗΜΑ 2:

Καθορισμός βαθμών ελευθερίας επιμέρους συστημάτων

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΑΓΝΩΣΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ
Δ1 & Ανάμιξη	2 ($\dot{m}_2, x_2$)	2	0
Ανάμιξη & Δ2	4 ($\dot{m}_1, x_1, \dot{m}_3, x_3$)	2	2

(Εναλλακτικές) σειρές επίλυσης ισοζ. μάζας με αξιοποίηση των παραπάνω «διπλών» συστημάτων

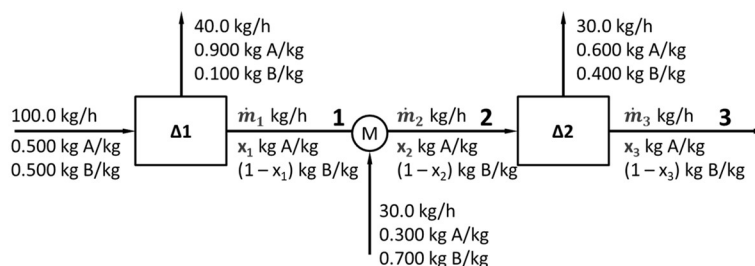
1. Δ1 & Ανάμιξη $\rightarrow \dot{m}_2, x_2$
2. Σύνολο: $\rightarrow \dot{m}_3, x_3$
3. Διεργασία Δ1 $\rightarrow \dot{m}_1, x_1$

ή

1. Δ1 & Ανάμιξη $\rightarrow \dot{m}_2, x_2$
2. Σύνολο: $\rightarrow \dot{m}_3, x_3$
3. Σημείο ανάμιξης $\rightarrow \dot{m}_1, x_1$

ή

1. Δ1 & Ανάμιξη $\rightarrow \dot{m}_2, x_2$
2. Σύνολο: $\rightarrow \dot{m}_3, x_3$
3. Ανάμιξη & Δ2 $\rightarrow \dot{m}_1, x_1$



73

73

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12

ΒΗΜΑ 2:

Καθορισμός βαθμών ελευθερίας επιμέρους συστημάτων

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΑΓΝΩΣΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ
Δ1 & Ανάμιξη	2 ($\dot{m}_2, x_2$)	2	0
Ανάμιξη & Δ2	4 ($\dot{m}_1, x_1, \dot{m}_3, x_3$)	2	2

(Εναλλακτικές) σειρές επίλυσης ισοζ. μάζας με αξιοποίηση των παραπάνω «διπλών» συστημάτων

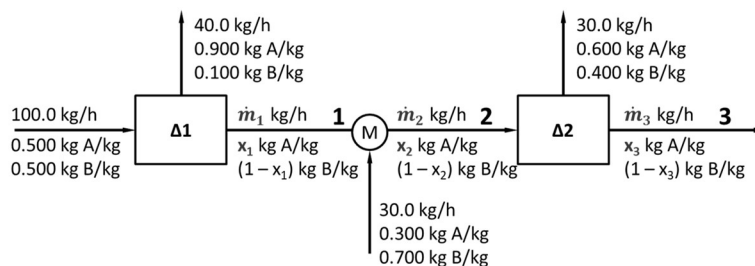
1. Σύνολο: $\rightarrow \dot{m}_3, x_3$
2. Ανάμιξη & Δ2 $\rightarrow \dot{m}_1, x_1$
3. Σημείο ανάμιξης $\rightarrow \dot{m}_2, x_2$

ή

1. Σύνολο: $\rightarrow \dot{m}_3, x_3$
2. Ανάμιξη & Δ2 $\rightarrow \dot{m}_1, x_1$
3. Δ1 & Ανάμιξη $\rightarrow \dot{m}_2, x_2$

ή

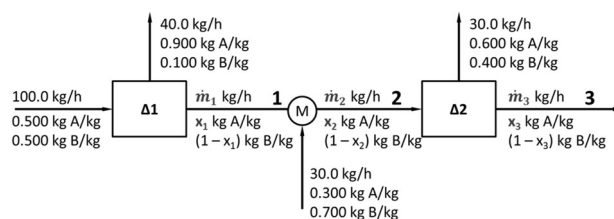
1. Δ1 & Ανάμιξη $\rightarrow \dot{m}_2, x_2$
2. Σημείο ανάμιξης $\rightarrow \dot{m}_1, x_1$
3. Ανάμιξη & Δ2 $\rightarrow \dot{m}_3, x_3$



74

74

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12

ΒΗΜΑ 3:
Επίλυση ισοζυγίων
**Διεργασία Δ1**

Συνολικό ισοζύγιο: $100 \text{ (kg/h)} = 40 + \dot{m}_1 \text{ (kg/h)} \Rightarrow \dot{m}_1 = 60 \text{ kg/h}$ (1)

Ισοζύγιο A: $0.500 \text{ (kg A/kg)} \cdot 100 \text{ (kg/h)} = 0.900 \text{ (kg A/kg)} \cdot 40 \text{ (kg/h)} + x_1 \text{ (kg A/kg)} \cdot \dot{m}_1 \text{ (kg/h)}$ (2)
 όμως $\dot{m}_1 = 60 \text{ kg/h} \Rightarrow x_1 = 0.233 \text{ kg A/kg}$

Σημείο Ανάμιξης

Συνολικό ισοζύγιο: $\dot{m}_1 + 30 \text{ (kg/h)} = \dot{m}_2 \text{ (kg/h)} \Rightarrow \dot{m}_2 = 90 \text{ kg/h}$ (3)

Ισοζύγιο A: $x_1 \text{ (kg A/kg)} \cdot \dot{m}_1 \text{ (kg/h)} + 0.300 \text{ (kg A/kg)} \cdot 30 \text{ (kg/h)} = x_2 \text{ (kg A/kg)} \cdot \dot{m}_2 \text{ (kg/h)}$ (4)
 όμως $\dot{m}_1$, x_1 και $\dot{m}_2$ = γνωστά $\Rightarrow x_2 = 0.255 \text{ kg A/kg}$

Διεργασία Δ2

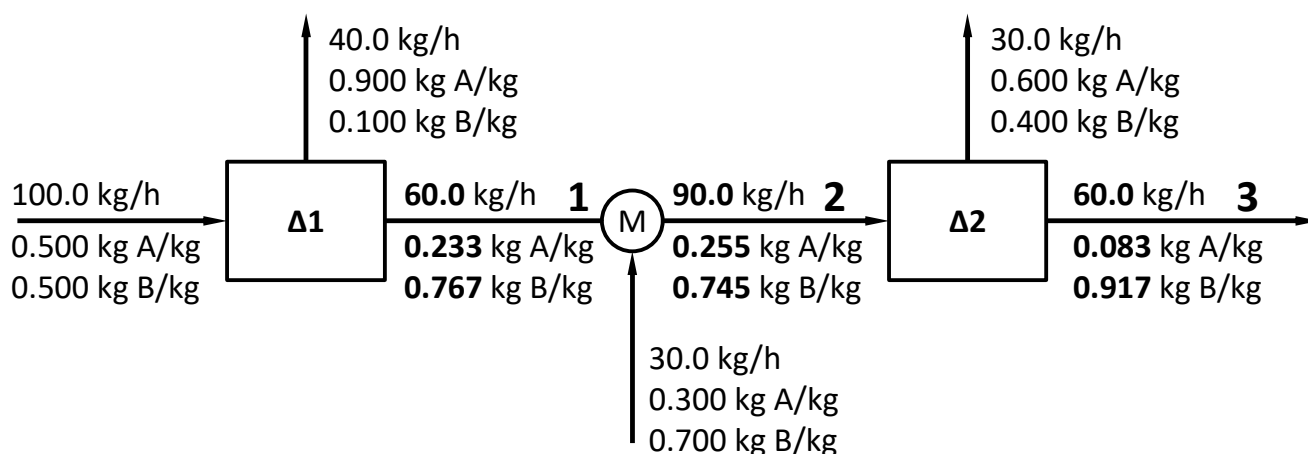
Συνολικό ισοζύγιο: $\dot{m}_2 \text{ (kg/h)} = 30 + \dot{m}_3 \text{ (kg/h)} \Rightarrow \dot{m}_3 = 60 \text{ kg/h}$ (5)

Ισοζύγιο A: $x_2 \text{ (kg A/kg)} \cdot \dot{m}_2 \text{ (kg/h)} = 0.600 \text{ (kg A/kg)} \cdot 30 \text{ (kg/h)} + x_3 \text{ (kg A/kg)} \cdot \dot{m}_3 \text{ (kg/h)}$ (6)
 όμως $\dot{m}_2$, x_2 και $\dot{m}_3$ = γνωστά $\Rightarrow x_3 = 0.083 \text{ kg A/kg}$

75

75

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12

ΒΗΜΑ 4:
Λυμένο διάγραμμα ροής


76

76

ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



Ένα μίγμα υγρού που περιέχει 30.0 mole % βενζόλιο (B), 25.0% Τολουόλιο (T) και το υπόλοιπο Ξυλένιο (X) εισάγεται σε μία αποστακτική στήλη. Τα προϊόντα πυθμένα περιλαμβάνουν 98.0 % mol X, καθόλου B και το 96% του X που υπάρχει στην τροφοδοσία ανακτάται στο ρεύμα αυτό.

- Το ρεύμα κορυφής εισέρχεται σε δεύτερη αποστακτική στήλη.
- Το ρεύμα κορυφής της 2ης στήλης περιέχει 97.0 % του B της τροφοδοσίας της (στήλης 2). Η σύσταση του ρεύματος αυτού είναι 94.0 mole% B και το υπόλοιπο T.
- (i) Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής και υπολογίστε τους βαθμούς ελευθερίας έτσι ώστε να διαπιστώσετε ότι οι μεταβλητές μπορούν να προσδιοριστούν. Δώστε τη σειρά υπολογισμών χωρίς να τους εκτελέσετε.
- (ii) Υπολογίστε το ποσοστό του Βενζολίου που εξέρχεται από το ρεύμα κορυφής της 2ης στήλης σε σχέση με την τροφοδοσία της 1ης στήλης.
- (iii) Υπολογίστε το ποσοστό τολουολίου εξέρχεται από το ρεύμα πυθμένα της 2ης στήλης σε σχέση με την τροφοδοσία της 1ης στήλης.



- Ξαναδιαβάστε την εκφώνηση του προβλήματος.
- Πολλαπλό σύστημα με δύο αποστακτικές στήλες

77

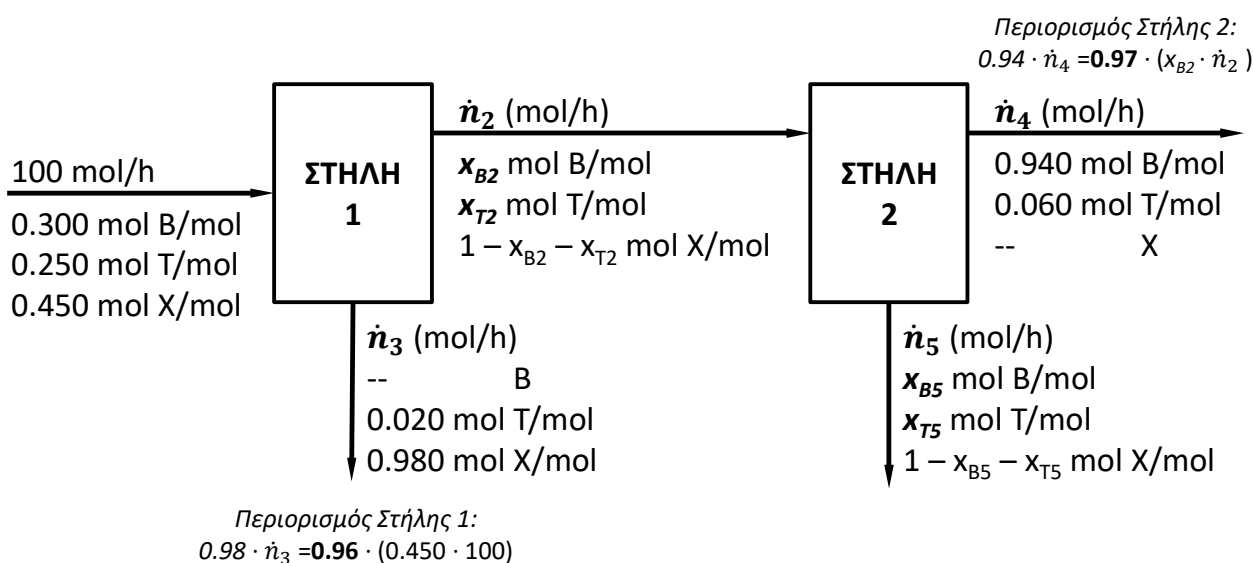
77

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13

ΒΗΜΑ 1:

Σχεδιασμός διαγράμματος ροής

Βάση υπολογισμού: Τροφοδοσία 100 mol/h

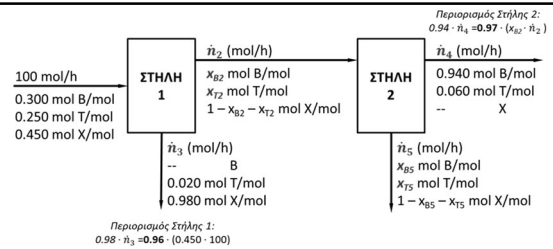


78

78

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13

ΒΗΜΑ 2: Ανάλυση βαθμών ελευθερίας για επιλογή σειρά επίλυσης



«ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ»

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΑΓΝΩΣΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ
Σύνολο	5 ($\dot{n}_3, \dot{n}_4, \dot{n}_5, x_{B5}, x_{T5}$)	3 (B, T, X)	1* (Περιορισμός Στήλης 1 96% τροφοδ.)	1
Στήλη 1	4 ($\dot{n}_2, \dot{n}_3, x_{B2}, x_{T2}$)	3	1 (Περ. Στήλης 1 96% τροφοδ.)	0
Στήλη 2	7 ($\dot{n}_2, x_{B2}, x_{T2}, \dot{n}_4, \dot{n}_5, x_{B5}, x_{T5}$)	3	1 (Περ. Στήλης 2 97% τροφοδ.)	3

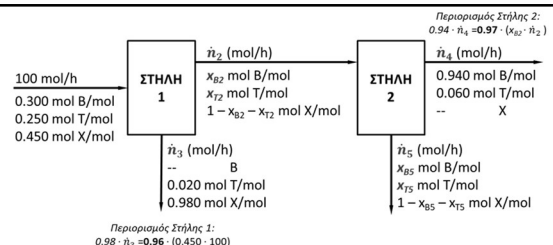
* Στο Σύνολο δεν προσμετράται ο περιορισμός της Στήλης 2, καθώς αυτός αφορά εσωτερικό ρεύμα που δεν διαπερνά τα όρια του συστήματος

79

79

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13

ΒΗΜΑ 2: Ανάλυση βαθμών ελευθερίας για επιλογή σειρά επίλυσης



«ΤΕΛΙΚΗ» ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΑΓΝΩΣΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ
Σύνολο	5 ($\dot{n}_3, \dot{n}_4, \dot{n}_5, x_{B5}, x_{T5}$)	3 (B, T, X)	0**	2
Στήλη 1	4 ($\dot{n}_2, \dot{n}_3, x_{B2}, x_{T2}$)	3	1 (Περ. Στήλης 1 96% τροφοδ.)	0
Στήλη 2	7 ($\dot{n}_2, x_{B2}, x_{T2}, \dot{n}_4, \dot{n}_5, x_{B5}, x_{T5}$)	3	1 (Περ. Στήλης 2 97% τροφοδ.)	3

** Οι περιορισμοί προσμετρώνται ΜΟΝΟ μια φορά

Άρα τους «χρεώνουμε» μόνο σε ένα από τα συστήματα στα οποία εμφανίζονται και δεν τα προσμετράμε επομένως «διπλά»

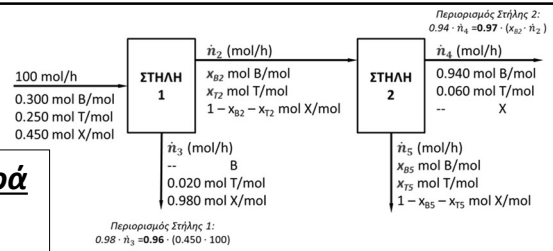
80

80

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13

**** Οι περιορισμοί προσμετρώνται ΜΟΝΟ μια φορά**

Άρα τους «χρεώνουμε» μόνο σε ένα από τα συστήματα στα οποία εμφανίζονται και δεν τα προσμετράμε επομένως «διπλά»



Γιατί όμως;

- Ας υποθέταμε ότι «χρεώναμε» τον περιορισμό 1 και στην στήλη 1 και στο συνολικό.
- Τότε $df_{\text{ΣΤΗΛΗ 1}} = 0$ ΚΑΙ $df_{\text{ΣΥΝΟΛΙΚΟ}} = 1$ (δηλ. πάλι θα ξεκινούσαμε από την στήλη 1)
- Όταν όμως φτάναμε στα ισοζύγια και τις εξισώσεις του συνολικού, ΗΔΗ θα είχαμε υπολογίσει το $\dot{n}_3$!!!! Άρα ο περιορισμός δεν θα είχε καμία χρησιμότητα, απλά ισχύει μια ισότητα $0.98 \cdot 44.1 = 0.96 \cdot (0.450 \cdot 100)$, δηλαδή δεν μας δίνει τιμή για κάποια άγνωστη μεταβλητή.

81

81

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13

ΒΗΜΑ 2: Ανάλυση βαθμών ελευθερίας για επιλογή σειρά επίλυσης

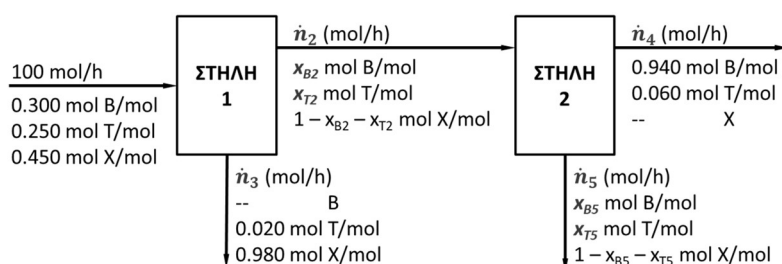
ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΕΙΡΑΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΑΓΝΩΣΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ
Σύνολο	5 ($\dot{n}_3, \dot{n}_4, \dot{n}_5, x_{B5}, x_{T5}$)	3 (B, T, X)	0**	2
Στήλη 1	4 ($\dot{n}_2, \dot{n}_3, x_{B2}, x_{T2}$)	3	1	0
Στήλη 2	7 ($\dot{n}_2, x_{B2}, x_{T2}, \dot{n}_4, \dot{n}_5, x_{B5}, x_{T5}$)	3	1	3(0)

- Ξεκινάμε από εκείνο το σύστημα όπου $df = 0 \rightarrow$ (Στήλη 1 και βρίσκουμε τις $\dot{n}_2, \dot{n}_3, x_{B2}, x_{T2}$)
- Συνεχίζουμε σε εκείνο το σύστημα που όταν βρεθούν οι τιμές των μεταβλητών του προηγούμενου, πλέον οι df του εξεταζόμενου συστήματος γίνονται 0
 - Στο παράδειγμα αυτό, μετά την επίλυση στη Στήλη 1 θα έχουμε γνωστές τις $\dot{n}_2, x_{B2}, x_{T2}$ στην Στήλη 2 άρα οι $df_{\text{ΣΤΗΛΗ 2}} = 0$ (σημ. $4-3-1=0$). Άρα **συνεχίζουμε με την Στήλη 2**
 - Συγκριτικά, αν δοκίμαζα το Σύνολο, θα είχα γνωστή μόνο την $\dot{n}_3$ άρα $df_{\text{ΣΥΝΟΛΟ}} = 1$ ($4-3-0=1$)

82

82

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**ΒΗΜΑ 2:****Ανάλυση βαθμών ελευθερίας****Στήλη 1**Άγνωστοι: 4 ($\dot{n}_2$, $\dot{n}_3$, x_{B2} , x_{T2})

Ισοζύγια: 3 (B, T, X)

Περ. & σχέσεις: 1 (96% τροφοδοσίας)

$$Df = 4 - 3 - 1 = 0$$

Στήλη 2: (αρχικά)Άγνωστοι: 7 ($\dot{n}_2$, x_{B2} , x_{T2} , $\dot{n}_4$, $\dot{n}_5$, x_{B5} , x_{T5})

Ισοζύγια: 3 (B, T, X)

Περ. & σχέσεις: 1 (97% τροφοδοσίας)

$$Df = 7 - 3 - 1 = 3$$

**Στήλη 2: (μετά από επίλυση της στήλης 1)**Άγνωστοι: 4 ($\dot{n}_4$, $\dot{n}_5$, x_{B5} , x_{T5})

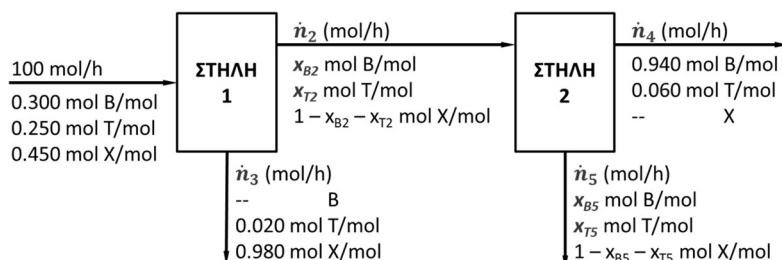
Ισοζύγια: 3 (B, T, X)

Περ. & σχέσεις: 1 (97% τροφοδοσίας)

$$Df = 4 - 3 - 1 = 0$$

83

83

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**ΒΗΜΑ 3:****Επίλυση****Στήλη 1**

$$\text{Περιορισμός: } 0.980 \cdot \dot{n}_3 = 0.96 \cdot (0.450 \cdot 100) \Rightarrow \dot{n}_3 = \mathbf{44.1 \text{ mol/h}} \quad (1)$$

Γεν. ισοζύγιο (συνεχής χωρίς συσσώρευση & παραγωγή / κατανάλωση): Είσοδος = Εξοδος

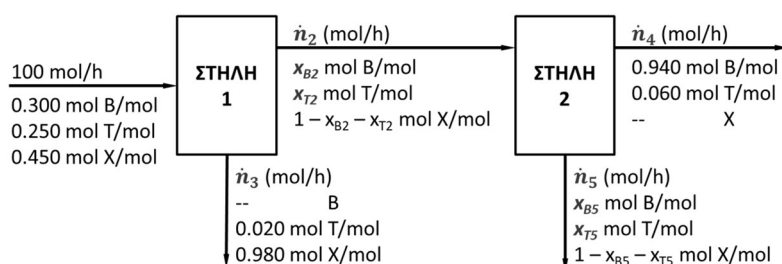
$$\text{ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ: } 100 \text{ (mol/h)} = \dot{n}_2 + \dot{n}_3 \text{ (mol/h)} \Rightarrow \dot{n}_2 = \mathbf{55.9 \text{ mol/h}} \quad (2)$$

$$\text{ΜΕΡΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ B: } 0.3 \cdot 100 \text{ (mol B/h)} = 0 + x_{B2} \cdot \dot{n}_2 \text{ (mol B/h)} \Rightarrow x_{B2} = \mathbf{0.536} \quad (3)$$

$$\text{ΜΕΡΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ T: } 0.25 \cdot 100 \text{ (mol T/h)} = x_{T2} \cdot \dot{n}_2 + 0.02 \cdot \dot{n}_3 \text{ (mol T/h)} \Rightarrow x_{T2} = \mathbf{0.431} \quad (4)$$

84

84

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**ΒΗΜΑ 3:**
Επίλυση**Στήλη 2**

Περιορισμός: $0.940 \cdot \dot{n}_4 = 0.97 \cdot (x_{B2} \cdot \dot{n}_2) \Rightarrow \dot{n}_4 = \mathbf{30.95 \text{ mol/h}}$ (5)

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ: $\dot{n}_2 \text{ (mol/h)} = \dot{n}_4 + \dot{n}_5 \text{ (mol/h)} \Rightarrow \dot{n}_5 = \mathbf{24.96 \text{ mol/h}}$ (6)

ΜΕΡΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ Β: $x_{B2} \cdot \dot{n}_2 \text{ (mol B/h)} = 0.940 \cdot \dot{n}_4 + x_{B5} \cdot \dot{n}_5 \text{ (mol B/h)} \Rightarrow \mathbf{x_{B5} = 0.036}$ (7)

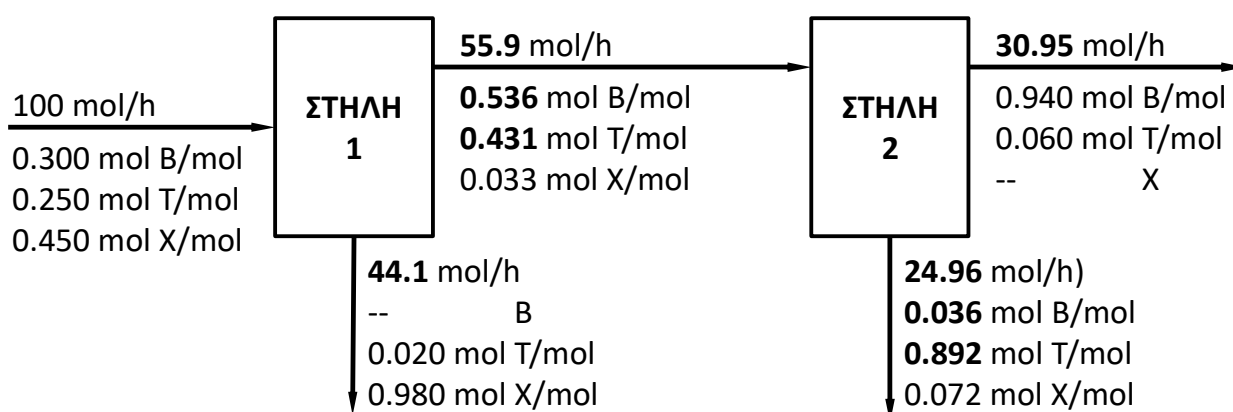
ΜΕΡΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ Τ: $x_{T2} \cdot \dot{n}_2 \text{ (mol T/h)} = 0.060 \cdot \dot{n}_4 + x_{T5} \cdot \dot{n}_5 \text{ (mol T/h)} \Rightarrow \mathbf{x_{T5} = 0.892}$ (8)

ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ: % Β (ως προς τροφοδοσία Β) = $\frac{\text{Κορυφή Β στηλη 2}}{\text{Εισοδος Β στηλη 1}} = \frac{0.940 \cdot 30.95}{0.300 \cdot 100} = 97\%$

% Τ (ως προς τροφοδοσία Τ) = $\frac{\text{Πυθμένας Τ στηλη 2}}{\text{Εισοδος Τ στηλη 1}} = \frac{0.892 \cdot 24.96}{0.250 \cdot 100} = 89\%$

85

85

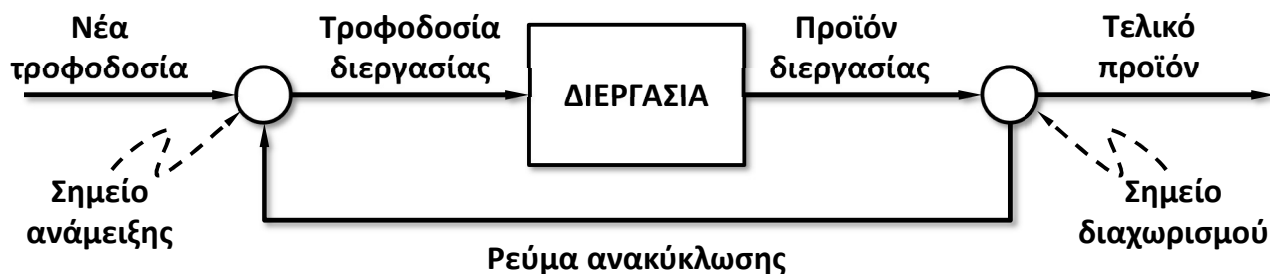
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**ΒΗΜΑ 4:**
Λυμένο διάγραμμα ροής

86

86

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Χωρίς χημική αντίδραση



- Οι ιδιότητες των ρευμάτων ανακύκλωσης δεν προκύπτουν από το συνολικό ισοζύγιο μάζας (γιατί είναι εσωτερικές ροές του συστήματος).
- Χρειάζεται και ισοζύγιο μάζας στο **σημείο διαχωρισμού προϊόντος** ή/και στο **σημείο ανάμειξης με τη νέα τροφοδοσία**.
- Συχνά ζητείται ο **λόγος του ρεύματος ανακύκλωσης** ως προς το ρεύμα του τελικού προϊόντος ή της νέας τροφοδοσίας

87

87

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Με χημική αντίδραση (π.χ. $A \rightarrow B$)

Συνεχούς λειτουργίας – μόνιμη κατάσταση



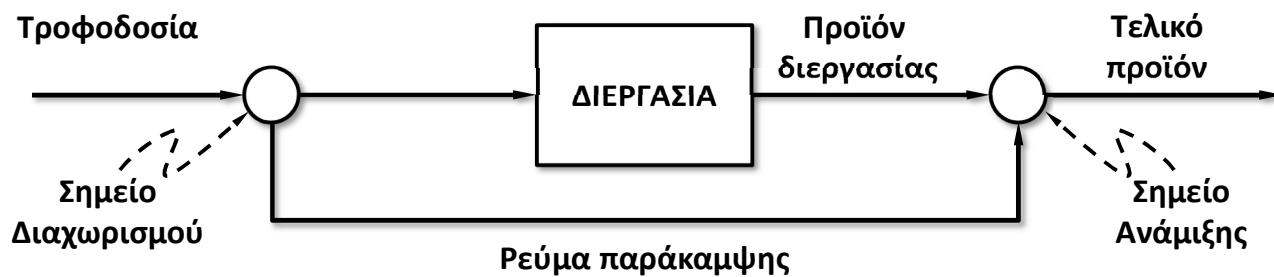
$$\text{Λόγος Ανακύκλωσης } \Sigma R = \frac{\text{Ρεύμα Ανακύκλωσης}}{\text{Νέα Τροφοδοσία}}$$

88

88

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Ρεύμα Παράκαμψης



Ρεύμα παράκαμψης:

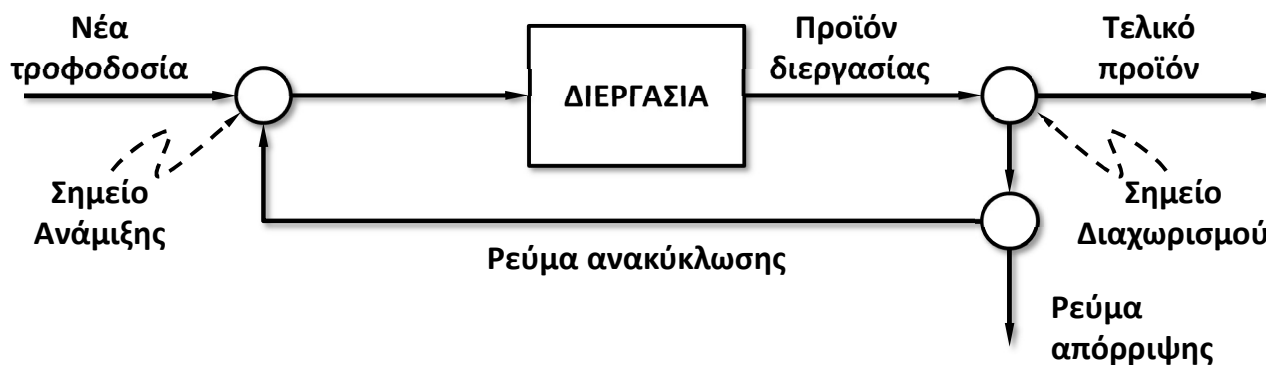
Χρησιμοποιείται κυρίως για να ρυθμίζεται η σύσταση προϊόντος.

89

89

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Ανακύκλωση - Απόρριψη



Ρεύμα απόρριψης (απομάκρυνσης)

Βοηθάει στην αποτροπή της συσσώρευσης αδρανών ή ανεπιθύμητων ουσιών στο σύστημα

90

90

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

- ❖ Βελτίωση αποδοτικότητας διατάξεων
- ❖ Εξοικονόμηση πόρων (ενέργεια, υλικά)
- ❖ Προστασία περιβάλλοντος

Φυσικές διεργασίες

- Ανάκτηση διαλύτη
- Ανακύκλωση κυκλοφορούντος ρευστού (π.χ. ψυκτικός κύκλος)
- Κλασσικό παράδειγμα: απόσταξη

Χημικές διεργασίες

- Ανάκτηση αντιδρώντων που δεν αντέδρασαν
- Ανάκτηση καταλύτη

91

91

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ ΜΑΖΑΣ

- Σχεδιάζουμε το **διάγραμμα ροής** και απεικονίζουμε όλες τις μεταβλητές (γνωστές και άγνωστες) πάνω σε αυτό.
- Εξετάζουμε τα **σχετικά συστήματα** (συνολική διεργασία, επιμέρους διεργασίες, σημεία ανάμιξης, σημεία διαχωρισμού κλπ) και βρίσκουμε τους βαθμούς ελευθερίας κάθε συστήματος ξεχωριστά.
- **Ξεκινάμε την επίλυση των ισοζυγίων από το σύστημα(τα) που έχει(ουν) 0 βαθμούς ελευθερίας.**
- Αντικαθιστούμε τις υπολογιζόμενες μεταβλητές (ροές, συστάσεις) στα άλλα (άλυτα) συστήματα, καθώς αυτά με γνωστές πλέον μερικές από τις μεταβλητές τους δίνουν $dF=0$, και συνεχίζουμε μέχρι να υπολογιστούν όλες οι μεταβλητές των ρευμάτων.

Με άλλα λόγια, δεν αλλάζει ο τρόπος υπολογισμού των ισοζυγίων μάζας!

92

92

ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ – AIR CONDITION - ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14



Φρέσκος αέρας που περιέχει **4% υγρασία** $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$, ψύχεται και αφυγραίνεται ώστε να περιέχει **1.7% υγρασία** (mol %). Ο φρέσκος αέρας πριν την κλιματιστική μονάδα αναμιγνύεται με ένα **ρεύμα ανακύκλωσης** που περιλαμβάνει αφυγραθέντα αέρα (1.7% υγρασία). Ο αέρας που τροφοδοτείται στο κλιματιστικό έχει υγρασία **2.3%**. Στο κλιματιστικό μέρος της υγρασίας συμπυκνώνεται και απομακρύνεται ως υγρό.

- Να γίνει το διάγραμμα ροής.
- Να υπολογιστούν οι ροές όλων των ρευμάτων παίρνοντας ως **βάση 100 mol αφυγραθέντος αέρα που απομακρύνεται από τη διεργασία** (όλες οι συστάσεις είναι κατά mole), δηλ. υπολογίστε τα mol φρέσκου αέρα, mol συμπυκνωμένου νερού, mol ανακυκλούμενου αέρα



- Ξαναδιαβάστε την εκφώνηση του προβλήματος. Stay "cool"....
- Σύστημα με ανακύκλωση, χωρίς αντίδραση. Άρα θα περιέχει ρεύμα ανακύκλωσης και κάπου μπαίνει αναμικτήρας και διαχωριστήρας
- Η βάση υπολογισμού είναι η έξοδος!
- Οι ροές είναι σε mol όχι σε mol/χρόνος

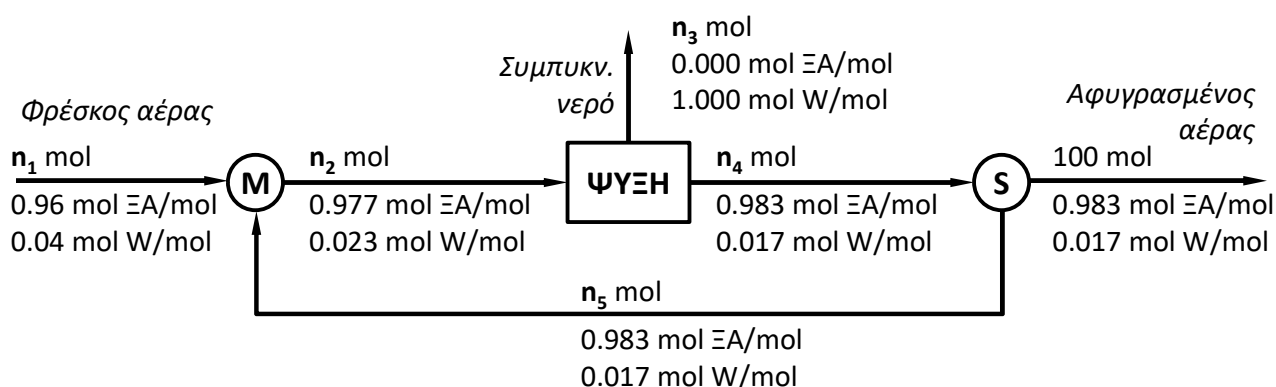
93

93

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14

ΒΗΜΑ 1:

Σχεδιασμός διαγράμματος ροής - Βάση υπολογισμού: Έξοδος 100 mol



Σημ.

ΞA : Ξηρός αέρας

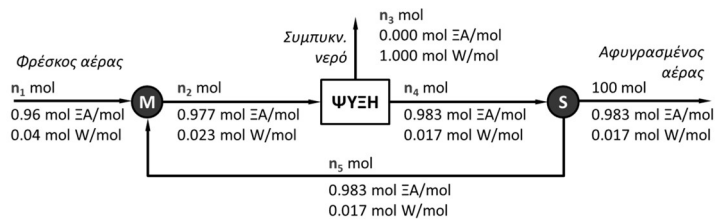
W : Νερό (είτε με την μορφή υγρασίας είτε ως συμπύκνωμα/υγρό)

Ζητούνται τα n_1 , n_3 και n_5 αλλά προφανώς κατά την διάρκεια υπολογισμών θα βρούμε και τα n_2 και n_4

94

94

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14

ΒΗΜΑ 2:
Βαθμοί ελευθερίας


ΣΥΣΤΗΜΑ	ΑΓΝΩΣΤΟΙ	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ
Σύνολο	2 (n_1, n_3)	2	0
Σημείο ανάμιξης (M)	3 (n_1, n_2, n_5)	2	1
Ψύξη	3 (n_2, n_3, n_4)	2	1
Σημείο διαμοιρασμού (S)	2 (n_4, n_5)	1	1

Σειρά επίλυσης:ΣΥΝ $\rightarrow$ Μ $\rightarrow$ Ψύξηή ΣΥΝ $\rightarrow$ Ψύξη $\rightarrow$ Μ

Ερωτ.: Γιατί μόνο ένα ανεξάρτητο ισοζύγιο;
 Απ.: Γιατί δεν υπάρχει αλλαγή σύστασης (βλ. επόμενη διαφάνεια)

95

95

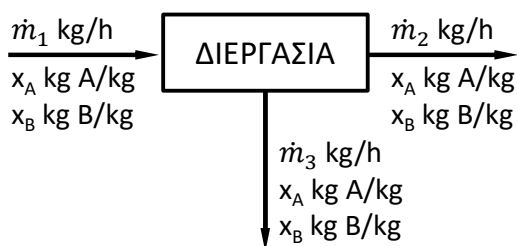
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14

ΓΕΝΙΚΗ
ΔΙΕΥΚΡΙΝΗΣΗ

Σε μια διεργασία όπου όλα τα ρεύματα έχουν την ίδια σύσταση (πχ. όταν 1 ρεύμα διαμοιράζεται σε 2 ή και περισσότερα ρεύματα), **μπορεί να γραφτεί ένα (1) μόνο ανεξάρτητο ισοζύγιο μάζας, ανεξάρτητα από τον αριθμό των συστατικών που συμμετέχουν στη διεργασία.**

Παράδειγμα:

Διαμοιρασμός ρεύματος δύο συστατικών
 Α και Β σε δυο ρεύματα ίδιας σύστασης



$$\text{Συν. ισοζύγιο: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\text{Ισοζύγιο Α: } x_A \cdot \dot{m}_1 = x_A \cdot \dot{m}_2 + x_A \cdot \dot{m}_3 \quad (2)$$

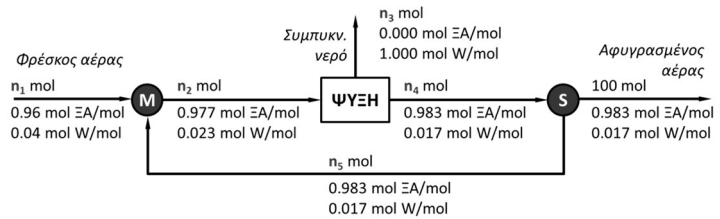
$$\text{Ισοζύγιο Β: } x_B \cdot \dot{m}_1 = x_B \cdot \dot{m}_2 + x_B \cdot \dot{m}_3 \quad (3)$$

- Μόνο η (1) είναι ανεξάρτητη!
- Οι (2) και (3) προκύπτουν από την (1) με πολλαπλασιασμό με x_A και x_B αντίστοιχα

96

96

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14

ΒΗΜΑ 3:
Επίλυση

Συνολικό σύστημα

$$\text{Συνολ. Ισοζύγιο: } n_1 = n_3 + 100 \quad (1)$$

$$\text{Ισοζύγιο } \Xi A: 0.96 \cdot n_1 = 0 \cdot n_3 + 0.983 \cdot 100 \quad (2) \Rightarrow n_1 = 102.4 \text{ mol}$$

$$\stackrel{(1)}{\Rightarrow} n_3 = 2.4 \text{ mol}$$

Σημείο Μίξης (M)

$$\text{Συνολ. Ισοζύγιο: } n_1 + n_5 = n_2 \quad (3)$$

$$\text{Ισοζύγιο } \Xi A: 0.96 \cdot n_1 + 0.983 \cdot n_5 = 0.977 \cdot n_2 \quad (4)$$

$$(3) \text{ \& } (4) \Rightarrow n_2 = 392.5 \text{ mol και } n_5 = 290.1 \text{ mol}$$

$$\text{Λόγος } \frac{\text{Αφυγρασμένος αερας}}{\text{Ανακύκλωση}} = \frac{100}{290.1} \approx \frac{1}{3}$$

97

97

ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ – ΕΞΑΤΜΙΣΗ και ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15



Θέλουμε να ανακτήσουμε στερεό K_2CrO_4 από υδατικό του διάλυμα περιεκτικότητας **33.3% w/w σε K_2CrO_4** . Το διάλυμα αυτό ρέει με **ρυθμό 4500 kg/h (φρέσκια τροφοδοσία)** και ενώνεται με **ρεύμα ανακύκλωσης** που είναι διάλυμα **36.4% σε K_2CrO_4** . Το προκύπτον ρεύμα εισέρχεται σε εξατμιστήρα. Το πυκνό διάλυμα που εξέρχεται από τον εξατμιστήρα περιέχει **49.4% K_2CrO_4** . Το διάλυμα αυτό ψύχεται στη συνέχεια σε ένα κρυσταλλωτήρα (οπότε και κρύσταλλοι K_2CrO_4 εξέρχονται του διαλύματος) και φιλτράρεται. Το ίζημα (νωπό φίλτρο – filter cake) που παρακρατείται στο φίλτρο αποτελείται κατά 95% από κρυστάλλους (στερεό) K_2CrO_4 και το υπόλοιπο (5%) από διάλυμα 36.4% σε K_2CrO_4 . Το διάλυμα που περνάει από το φίλτρο περιέχει επίσης διάλυμα 36.4% σε K_2CrO_4 και ανακυκλώνεται.

- Να γίνει το διάγραμμα ροής και βαθμούς ελευθερίας
- Υπολογίστε τον ρυθμό εξάτμισης, τον ρυθμό παραγωγής του κρυσταλλικού K_2CrO_4 , την τροφοδοσία του εξατμιστήρα και κρυσταλλωτήρα καθώς και τον ρυθμό ανακύκλωσης (μάζα ανακύκλωσης/μάζα νέας τροφοδοσίας)
- Αν δεν υπάρχει ρεύμα ανακύκλωσης υπολογίστε το ποσό του στερεού K_2CrO_4 που απορρίπτεται σε σχέση με το τελικό προϊόν κρυσταλλικού K_2CrO_4 .

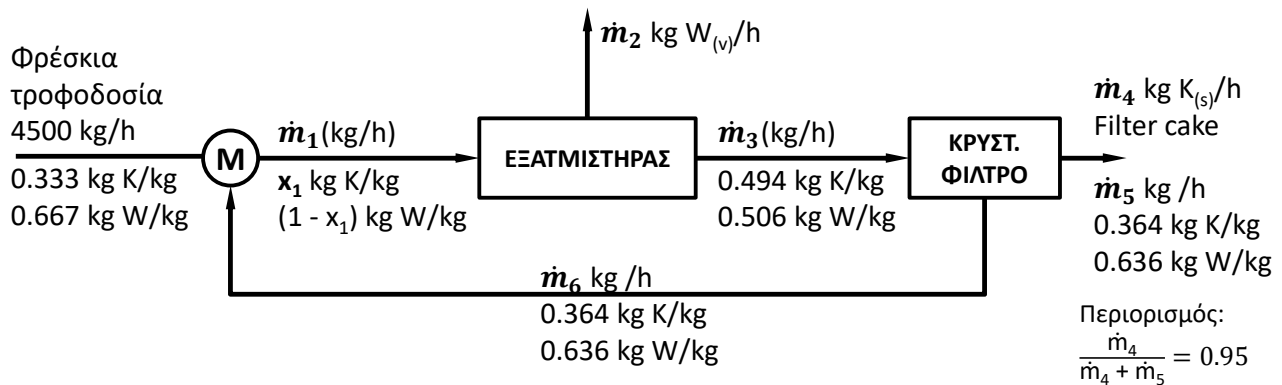
98

98

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15

ΒΗΜΑ 1:

Σχεδιασμός διαγράμματος ροής - Βάση υπολ. 4500 kg/h φρ. τροφοδ.



Σημ.

K: K₂CrO₄ K_(s): κρύσταλλοι (στερεό) K₂CrO₄

W: Νερό σε διάλυμα ή ως ατμός (v)

Ζητούμενα:

- ρυθμός εξάτμισης $\dot{m}_2$
- ρυθμός παραγωγής κρυστ. K₂CrO₄ $\dot{m}_4$
- τροφοδοσία εξατμιστήρα $\dot{m}_1$
- τροφοδοσία κρυσταλλωτήρα $\dot{m}_3$
- ρυθμός ανακύκλωσης $\dot{m}_6/4500$

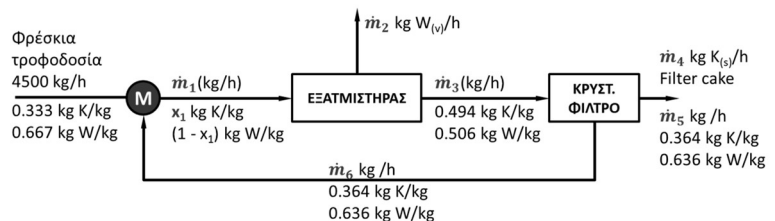
99

99

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15

ΒΗΜΑ 2:

Ανάλυση Β.Ε.



ΣΥΣΤΗΜΑ	ΑΓΝΩΣΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ
Σύνολο	3 ($\dot{m}_2, \dot{m}_4, \dot{m}_5$)	2	1	0
Σημείο ανάμιξης Μ	3 ($\dot{m}_1, x_1, \dot{m}_6$)	2	-	1
Εξατμιστήρας	4 ($\dot{m}_1, x_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3$)	2	-	2
Κρυστ. Φίλτρο	4 ($\dot{m}_3, \dot{m}_4, \dot{m}_5, \dot{m}_6$)	2	- **	2

Σειρά επίλυσης ισοζυγίων μάζας

1. Σύνολο $\rightarrow \dot{m}_2, \dot{m}_4, \dot{m}_5$
2. Κρυστ. Φίλτρο $\rightarrow \dot{m}_3, \dot{m}_6$
3. Σημείο ανάμιξης: $\rightarrow \dot{m}_1, x_1$

Περιορισμός:

Το ίζημα (νωπό φίλτρο – filter cake) που παρακρατείται στο φίλτρο αποτελείται κατά 95% από κρυστάλλους (στερεό) K₂CrO₄ και το υπόλοιπο (5%) από διάλυμα 36.4% σε K₂CrO₄

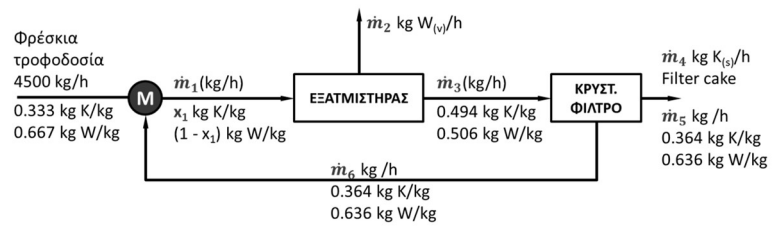
$$\frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_4 + \dot{m}_5} = 0.95$$

** «Χρεώσαμε» τον περιορισμό στο Συνολικό Σύστημα

100

100

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15

ΒΗΜΑ 3:
Επίλυση

Συνολικό σύστημα

$$\text{Συνολ. Ισοζύγιο: } 4500 = \dot{m}_2 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \quad (1)$$

$$\text{Ισοζύγιο K: } 0.333 \cdot 4500 = 0 + \dot{m}_4 + 0.364 \cdot \dot{m}_5 \quad (2)$$

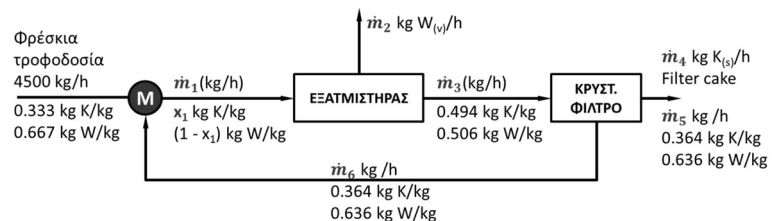
$$\text{Περιορισμός } \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_4 + \dot{m}_5} = 0.95 \Rightarrow \dot{m}_4 = \frac{0.95}{0.05} \dot{m}_5 \Rightarrow \dot{m}_4 = 19 \cdot \dot{m}_5 \quad (3)$$

$$\Rightarrow \dot{m}_5 = 77.5 \text{ kg/h}, \dot{m}_4 = 1472.5 \text{ kg/h}, \dot{m}_2 = 2950 \text{ kg/h}$$

101

101

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15

ΒΗΜΑ 3:
Επίλυση

Κρυστ. Φίλτρο

Σημ. πήγαμε στο Κρυστ. Φίλτρο, καθώς με γνωστά πλέον τα $\dot{m}_4$ και $\dot{m}_5$ οι βαθμοί ελευθερίας πλέον γίνονται $dF=0$. Αντίθετα, σε αυτό το στάδιο επίλυσης, το σημείο ανάμιξης παραμένει με $dF=1$

$$\text{Συνολ. Ισοζύγιο: } \dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_6 \Rightarrow \dot{m}_3 = 1472.5 + 77.5 + \dot{m}_6 \quad (4)$$

$$\text{Ισοζύγιο K: } 0.494 \cdot \dot{m}_3 = 1 \cdot \dot{m}_4 + 0.364 \cdot \dot{m}_5 + 0.364 \cdot \dot{m}_6 \Rightarrow 0.494 \cdot \dot{m}_3 = 1472.5 + 0.364 \cdot 77.5 + 0.364 \cdot \dot{m}_6 \quad (5)$$

Περιορισμός (σημ. το «χρεώσαμε» στο συνολικό, αλλά έτσι και αλλιώς δεν θα είχε χρησιμότητα καθώς πλέον τα $\dot{m}_4 + \dot{m}_5$ είναι γνωστά)

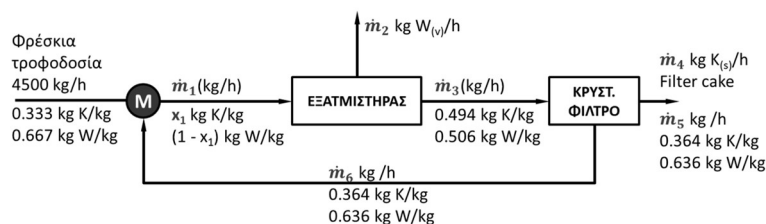
$$\Rightarrow \dot{m}_6 = 5654 \text{ kg/h}, \dot{m}_3 = 7204 \text{ kg/h}$$

$$\text{ρυθμός ανακύκλωσης } \dot{m}_6/4500 \text{ (νέα τροφοδοσία)} = 5654 / 4500 = 1.26$$

102

102

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15

ΒΗΜΑ 3:
Επίλυση

Σημείο ανάμιξης

Συνολ. Ισοζύγιο: $4500 + \dot{m}_6 = \dot{m}_1 \Rightarrow$

$$4500 + 5654 = \dot{m}_1 \Rightarrow$$

$$\dot{m}_1 = 10.154 \text{ kg/h}$$

(6)

Ισοζύγιο K:

$$0.333 \cdot 4500 + 0.364 \cdot \dot{m}_6 = x_1 \cdot \dot{m}_1 \Rightarrow$$

(7)

$$0.333 \cdot 4500 + 0.364 \cdot 5654 = x_1 \cdot 10.154 \Rightarrow$$

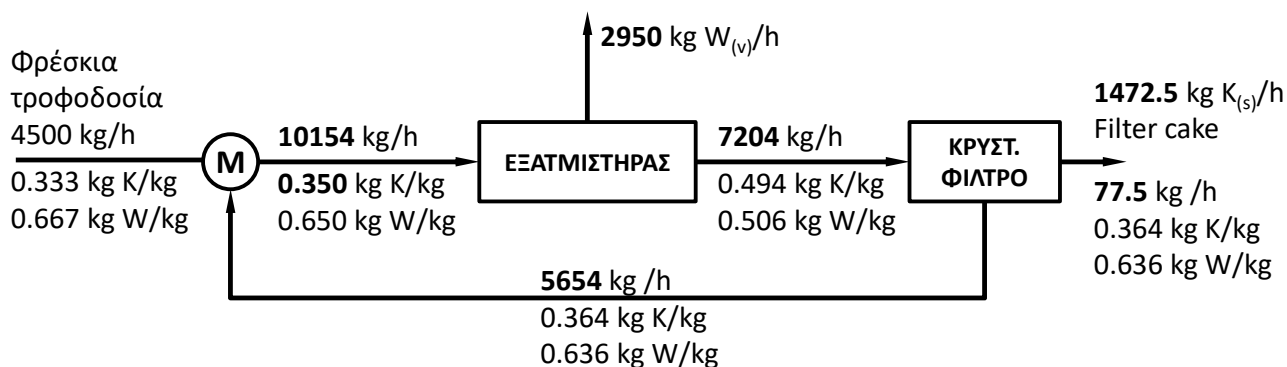
$$x_1 = 0.35$$

(Σημ. Το x_1 δεν ζητείται, οπότε τυπικά δεν χρειάζεται να το υπολογίσουμε!)

103

103

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15

ΒΗΜΑ 4:
Λυμένο διάγραμμα ροής

Σημ.

K: K_2CrO_4 $K_{(s)}$: κρύσταλλοι (στερεό) K_2CrO_4

W: Νερό σε διάλυμα ή ως ατμός (v)

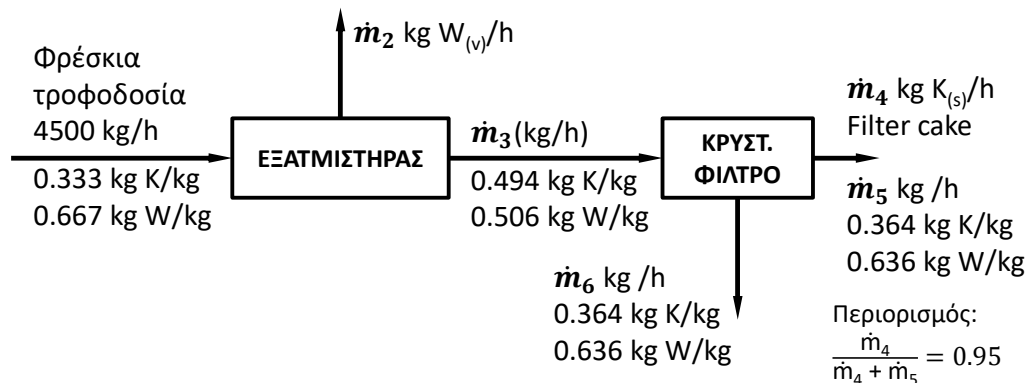
104

104

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15

ΒΗΜΑ 5:

Σχεδιασμός διαγράμματος ροής – Χωρίς ανακύκλωση



Σημ.

K: K_2CrO_4 $K_{(s)}$: κρύσταλλοι (στερεό) K_2CrO_4

W: Νερό σε διάλυμα ή ως ατμός (v)

Παρατήρηση:

Μιας και είναι συνέχεια του προηγούμενου ερωτήματος, δεν υπάρχει κάποιος ιδιαίτερος λόγος να επανεκκινήσουμε την αρίθμηση, απλά «αφαιρούμε» τους δείκτες του ρεύματος 1.

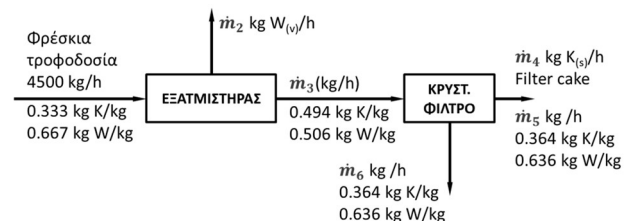
105

105

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15

ΒΗΜΑ 2:

Ανάλυση Β.Ε.



ΣΥΣΤΗΜΑ	ΑΓΝΩΣΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ
Σύνολο	4 ($\dot{m}_2, \dot{m}_4, \dot{m}_5, \dot{m}_6$)	2	1	1
Εξατμιστήρας	2 ($\dot{m}_2, \dot{m}_3$)	2	-	0
Κρυστ. Φίλτρο	4 ($\dot{m}_3, \dot{m}_4, \dot{m}_5, \dot{m}_6$)	2	- **	1

Σειρά επίλυσης ισοζυγίων μάζας

- Εξατμιστήρας $\rightarrow \dot{m}_2, \dot{m}_3$
- Σύνολο $\rightarrow \dot{m}_4, \dot{m}_5, \dot{m}_6$

Περιορισμός:

Το ίζημα (νωπό φίλτρο – filter cake) που παρακρατείται στο φίλτρο αποτελείται κατά 95% από κρυστάλλους (στερεό) K_2CrO_4 και το υπόλοιπο (5%) από διάλυμα 36.4% σε K_2CrO_4

$$\frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_4 + \dot{m}_5} = 0.95$$

** «Χρεώσαμε» τον περιορισμό στο Συνολικό Σύστημα

106

106

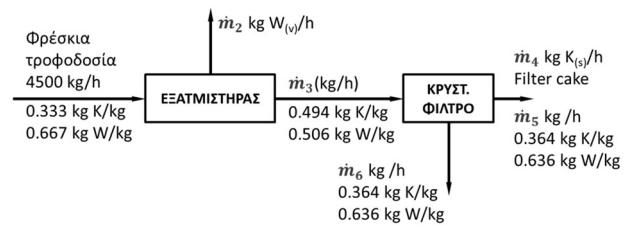
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15

ΒΗΜΑ 3:
Επίλυση

Εξατμιστήρας

Συνολ. Ισοζύγιο: $4500 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$ Ισοζύγιο K: $0.333 \cdot 4500 = 0 + 0.494 \cdot \dot{m}_3$

$$\Rightarrow \dot{m}_3 = 3036 \text{ kg/h}, \dot{m}_2 = 1464 \text{ kg/h}$$



(1)

(2)

107

107

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15

ΒΗΜΑ 3:
Επίλυση

Κρυστ. Φίλτρο

Συνολ. Ισοζύγιο: $\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_6 \Rightarrow$

$$3036 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_6 \quad (3)$$

Ισοζύγιο K: $0.494 \cdot \dot{m}_3 = \dot{m}_4 + 0.364 \cdot \dot{m}_5 + 0.364 \cdot \dot{m}_6 \Rightarrow$

$$0.494 \cdot 3036 = \dot{m}_4 + 0.364 \cdot \dot{m}_5 + 0.364 \cdot \dot{m}_6 \quad (4)$$

$$\text{Περιορισμός} \quad \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_4 + \dot{m}_5} = 0.95 \Rightarrow \dot{m}_4 = \frac{0.95}{0.05} \dot{m}_5 \Rightarrow \dot{m}_4 = 19 \cdot \dot{m}_5 \quad (5)$$

$$\Rightarrow \dot{m}_5 = 33 \text{ kg/h}, \dot{m}_4 = 627 \text{ kg/h}, \dot{m}_6 = 2376 \text{ kg/h}$$

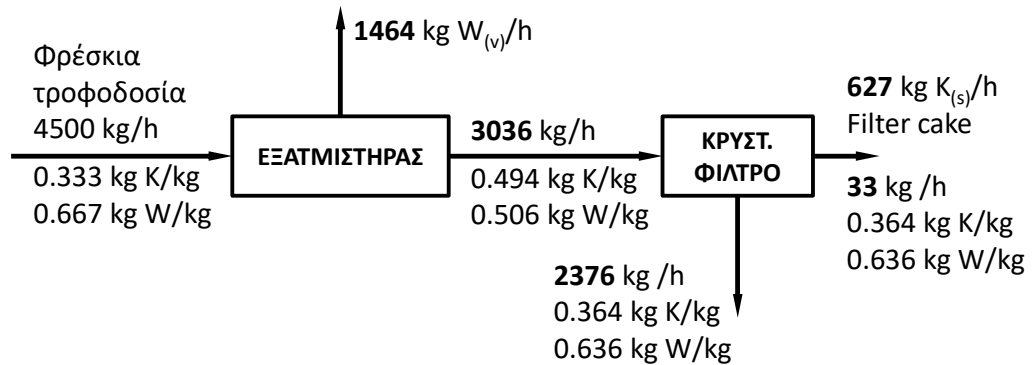
Ζητούμενο:

Απορρίπτεται $0.364 \cdot 2376 = 865 \text{ kg/h K}$

Δηλαδή απορρίπτεται περισσότερο K από το κρυσταλλικό K που είναι το προϊόν της διεργασίας = ΑΣΥΜΦΟΡΟ

108

108

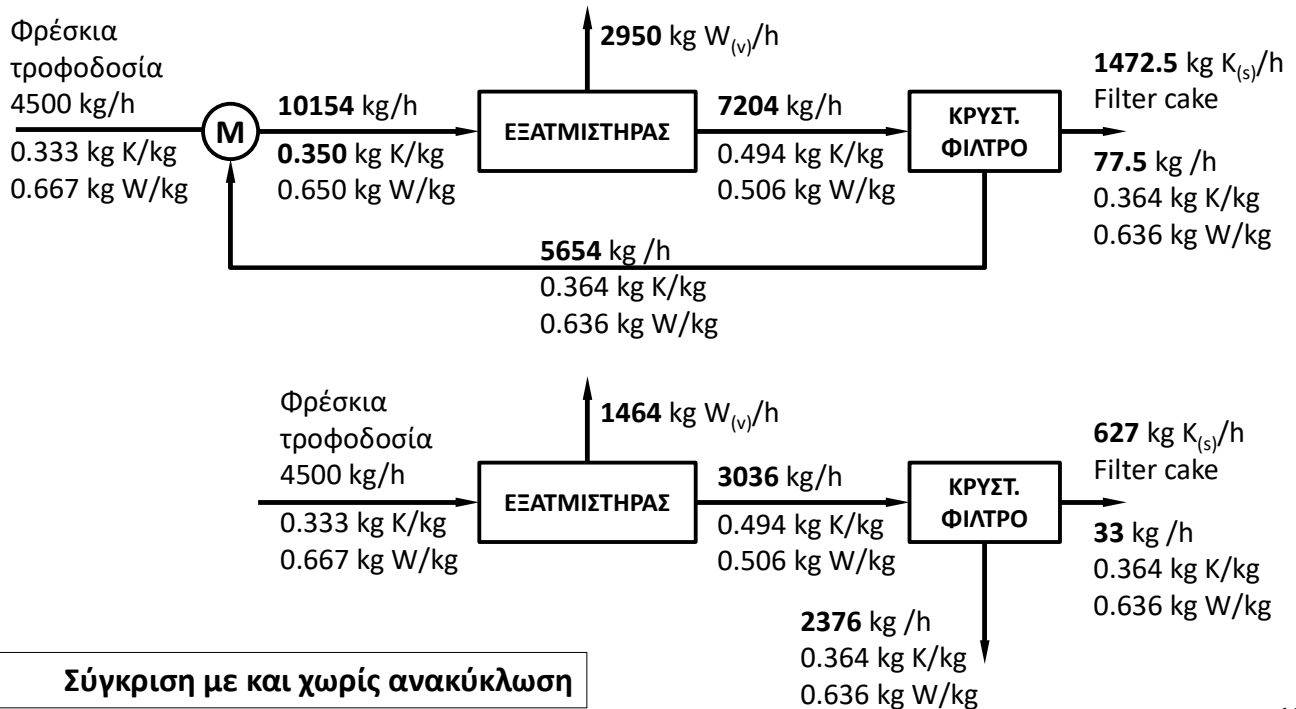
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15**ΒΗΜΑ 5:****Λυμένο διάγραμμα ροής – Χωρίς ανακύκλωση**

Σημ.

 K : K_2CrO_4 $K_{(s)}$: κρύσταλλοι (στερεό) K_2CrO_4 W : Νερό σε διάλυμα ή ως ατμός (v)

109

109

**Σύγκριση με και χωρίς ανακύκλωση**

110

110