

# **ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

## **ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ:**

**«Ισοζύγια μάζας που περιλαμβάνουν πολλαπλές  
μονάδες εξοπλισμού.**

**Ανακύκλωση χωρίς αντίδραση, παράκαμψη,  
καθαρισμός και βιομηχανικές εφαρμογές των  
ισοζυγίων μάζας (συνδετικό συστατικό, αραίωση)»**

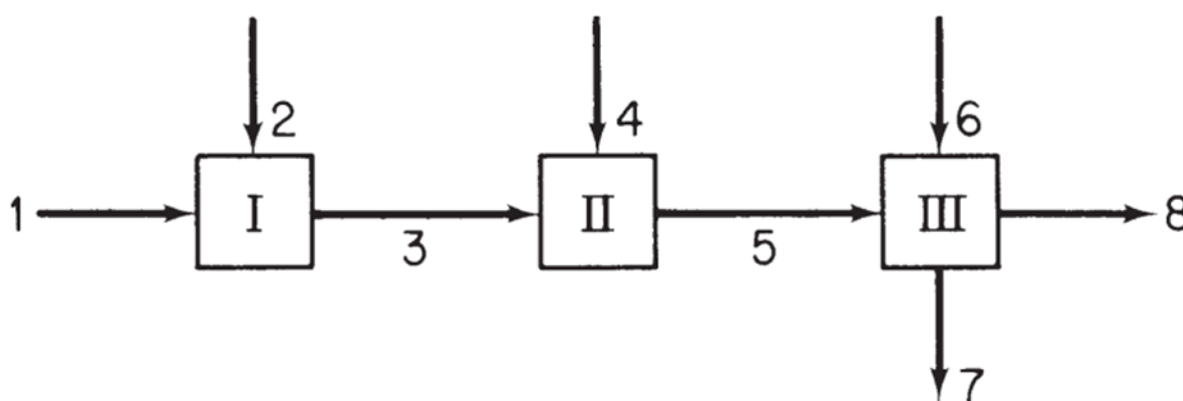
**Διδάσκοντες:  
Γκαϊντατζής Γεώργιος  
Δούναβης Αθανάσιος**

**Ξάνθη, Εαρινό Εξάμηνο 2025**

### Παράδειγμα 6.1 Προσδιορισμός του Αριθμού των Ανεξάρτητων Ισοζυγίων Μάζας σε μία Διεργασία με Πολλαπλές Μονάδες.

Το γαλακτικό οξύ ( $C_3H_6O_3$ ) που παράγεται από τη ζύμωση χρησιμοποιείται στα τρόφιμα, τα χημικά, και τις φαρμακευτικές βιομηχανίες. Το Σχήμα Ε6.1 απεικονίζει την ανάμειξη των συστατικών για το σχηματισμό ενός κατάλληλου ζωμού ζύμωσης. Το όλο σύστημα είναι ανοιχτό και σε συνθήκες σταθερής κατάστασης. Τα βέλη ορίζουν την κατεύθυνση των ροών. Καμία αντίδραση δεν λαμβάνει χώρα σε οποιοδήποτε από τα υποσυστήματα.

Σχήμα Ε6.1



Οι συστάσεις της μάζας του κάθε ρεύματος έχουν ως εξής:

1. Νερό (W): 100%
2. Γλυκόζη (G): 100%
3. W και B, γνωστές συγκεντρώσεις:  $\omega_W = 0.800$ ,  $\omega_B = 0.200$
4. Γαλακτοβάκιλος (L): 100%
5. W, G και L, γνωστές συγκεντρώσεις:  $\omega_W = 0.769$ ,  $\omega_G = 0.192$ ,  $\omega_L = 0.0385$
6. Βιταμίνη G με αμινοξέα και φωσφορικό άλας (V): 100%
7.  $\omega_W = 0.962$ ,  $\omega_V = 0.0385$
8.  $\omega_G = 0.833$ ,  $\omega_L = 0.167$

Ποιος είναι ο μέγιστος αριθμός ισοζυγίων μάζας που μπορούν να σχηματιστούν για αυτό το πρόβλημα;

#### Λύση

Επιλέγοντας κάθε μία από τις τρεις μονάδες ως υποσυστήματα, μπορείτε να γράψετε 9 εξισώσεις ειδών όπως φαίνεται παρακάτω. Αγνοείτε κάθε ολικό ισοζύγιο για τις τρεις μονάδες, καθώς επίσης και τα ολικά ισοζύγια για κάθε συστατικό ή το ολικό ισοζύγιο, ή οποιαδήποτε πιθανά ισοζύγια για συνδυασμούς μονάδων):

### Συνολικός αριθμός ισοζυγίων γημικών ειδών

Στην μονάδα I, περιλαμβάνονται δύο είδη	2
Στην μονάδα II, περιλαμβάνονται τρία είδη	3
Στην μονάδα III περιλαμβάνονται τέσσερα είδη	4
Σύνολο	9

Όμως δεν είναι όλα τα ισοζύγια ανεξάρτητα μεταξύ τους. Στην παρακάτω λίστα των ισοζυγίων συστατικών, έχουν εισαχθεί όλες οι γνωστές συγκεντρώσεις. Το  $F_i$  αντιπροσωπεύει το ρεύμα που αντιστοιχίζεται από τον δείκτη.

#### *Υποσύστημα I*

$$\text{Ισοζύγια συστατικών} \begin{cases} \text{A : } F_1 (1.00) + F_2 (0) = F_3 (0.800) & (\alpha) \\ \text{B : } F_1 (0) + F_2 (1.00) = F_3 (0.20) & (\beta) \end{cases}$$

#### *Υποσύστημα II*

$$\text{Ισοζύγια συστατικών} \begin{cases} \text{A : } F_3 (0.800) + F_4 (0) = F_5 (0.769) & (\gamma) \\ \text{B : } F_3 (0.200) + F_4 (0) = F_5 (0.192) & (\delta) \\ \text{Γ : } F_3 (0) + F_4 (1.00) = F_5 (0.0385) & (\epsilon) \end{cases}$$

#### *Υποσύστημα III*

$$\text{Ισοζύγια συστατικών} \begin{cases} \text{A : } F_5 (0.769) + F_6 (0) = F_7 (0.962) + F_8 (0) & (\sigma\tau) \\ \text{B : } F_5 (0.192) + F_6 (0) = F_7 (0) + F_8 (0.833) & (\zeta) \\ \text{Γ : } F_5 (0.0385) + F_6 (0) = F_7 (0) + F_8 (0.167) & (\eta) \\ \text{Δ : } F_5 (0) + F_6 (1.00) = F_7 (0.086) + F_8 (0) & (\theta) \end{cases}$$

Αν επιλέξετε ως αυθαίρετη βάση το  $F_1 = 100$ , είναι άγνωστες επτά τιμές  $F_i$ , και έτσι θα πρέπει να γραφούν μόνο επτά ανεξάρτητες εξισώσεις. Μπορείτε να δείτε ότι από τις 9 εξισώσεις, οι δύο είναι περιττές, και έτσι μπορεί να υπάρξει μία μοναδική λύση από τις επτά ανεξάρτητες εξισώσεις;

Αν επιλύσετε τις 9 εξισώσεις *διαδοχικά* με το χέρι ξεκινώντας από την Εξίσωση (α) και τελειώνοντας με την εξίσωση (θ), θα παρατηρήσετε, κατά την διάρκεια των υπολογισμών, ότι η Εξίσωση (δ) είναι πλεονάζουσα της (γ) και η Εξίσωση (η) είναι πλεονάζουσα της (ζ). Η πλεονασματικότητα των Εξισώσεων (γ) και (δ) θα γίνει κατανοητή, αν θυμηθείτε ότι το άθροισμα των κλασμάτων μάζας σε ένα ρεύμα είναι ίσο με τη μονάδα, και επομένως υπάρχει μία πεπλεγμένη εξίσωση μεταξύ των Εξισώσεων (γ) και (δ), με αποτέλεσμα να μην είναι ανεξάρτητες. Γιατί οι Εξισώσεις (ζ) και (η) δεν είναι ανεξάρτητες;

Καθώς εξετάζετε τις Εξισώσεις (α) έως (θ) από την περίπτωση της διαδοχικής επίλυσής τους, θα δείτε ότι η κάθε μία μπορεί να λυθεί ως προς μία μεταβλητή. Κοιτάξτε την παρακάτω λίστα:

**Εξίσωση Προσδιορισμός Εξίσωση Προσδιορισμός**

(α)	F <sub>3</sub>	(ε)	F <sub>4</sub>
(β)	F <sub>2</sub>	(στ)	F <sub>7</sub>
(γ)	F <sub>5</sub>	(ζ)	F <sub>8</sub>
(δ)	F <sub>5</sub>	(η)	F <sub>8</sub>
		(θ)	F <sub>6</sub>

Αν εισάγετε τις Εξισώσεις (α) έως (θ) σε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα επίλυσης εξισώσεων, θα λάβετε προειδοποίηση λάθους κάποιου τύπου αφού δεν αποτελούν ανεξάρτητη ομάδα εξισώσεων.

Αν κάνετε ένα ή περισσότερα ισοζύγια μάζας συστατικών για τον συνδυασμό των υποσυστημάτων I συν II, ή II συν I ή I συν III στο Παράδειγμα 6.1, ή για την συνολική ομάδα των τριών μονάδων, δεν θα δημιουργηθούν επιπλέον ανεξάρτητα ισοζύγια μάζας. Μπορείτε να αντικαταστήσετε ένα από τα ενδεικνυόμενα εναλλακτικά ισοζύγια μάζας με ένα ανεξάρτητο ισοζύγιο μάζας είδους; Σε γενικές γραμμές ναι.

Κατά τον υπολογισμό των βαθμών ελευθερίας σε προβλήματα που περιλαμβάνουν πολλαπλές μονάδες, πρέπει να είστε ιδιαίτερα προσεχτικοί, ώστε να συμπεριλαμβάνετε μόνο τα ανεξάρτητα ισοζύγια μάζας και να μην χάνετε σημαντικούς αγνώστους. Οι ίδιες αρχές ισχύουν και σε διεργασίες με πολλαπλές μονάδες, οι οποίες μελετήθηκαν στα Κεφάλαια 3 έως 5. Τα παρακάτω αποτελούν μία απλοποιημένη λίστα για την υπενθύμιση πιθανών αγνώστων που πρέπει να περιληφθούν στην ανάλυση, και πιθανών προδιαγραφών και εξισώσεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

**Βεβαιωθείτε ότι έχετε συμπεριλάβει όλες τις μεταβλητές που εμπλέκονται στο πρόβλημα και όχι αυτές που είναι άσχετες με αυτό. Ελέγξτε για**

- Μεταβλητές ροής που εισέρχονται και εξέρχονται από κάθε υποσύστημα
- Είδη ή συστατικά που εισέρχονται και εξέρχονται από κάθε υποσύστημα
- Μεταβλητές αντίδρασης και την έκταση των αντιδράσεων

**Βεβαιωθείτε ότι δεν έχετε παραλείψει οποιαδήποτε από τις πληροφορίες του προβλήματος που πρέπει να συμπεριληφθούν ως εξίσωση. Ελέγξτε για**

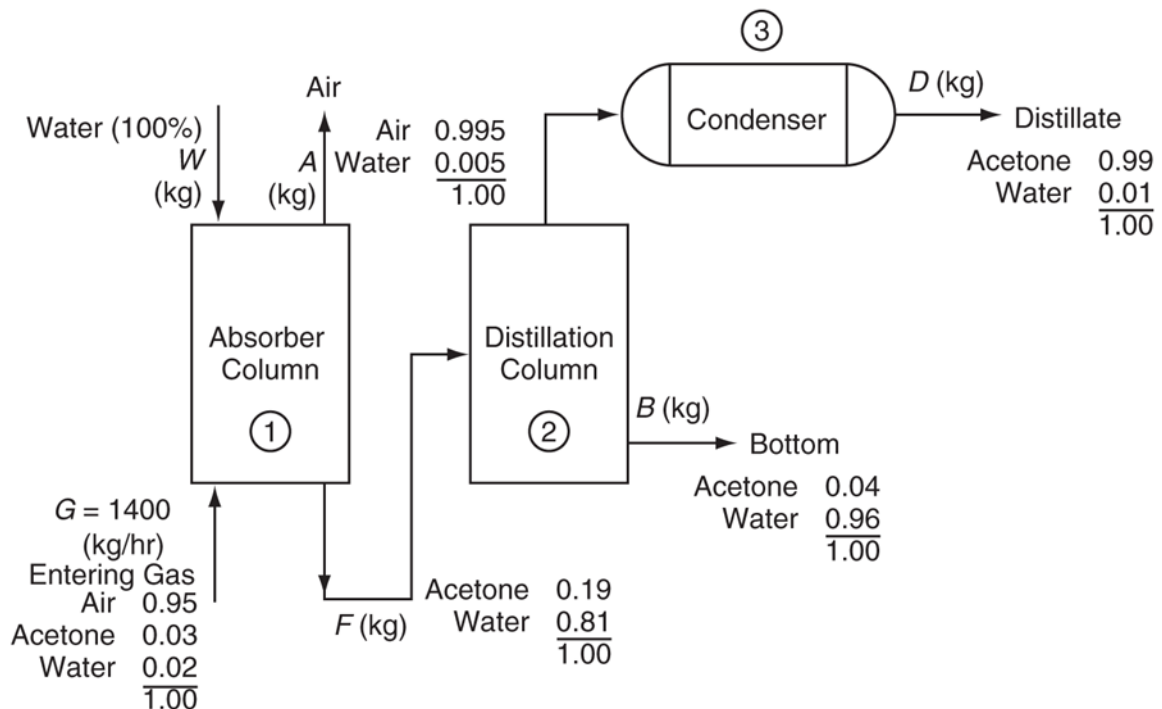
- Επιλογή βάση για κάθε υποσύστημα ή για το συνολικό σύστημα

- Ισοζύγια μαζών για κάθε είδος, στοιχείο ή συστατικό σε κάθε υποσύστημα και στο συνολικό σύστημα
- Προδιαγραφές για κάθε υποσύστημα και συνολικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό τιμών σε μεταβλητές ή για την προσθήκη εξισώσεων στο σετ επίλυσης (θυμηθείτε τις αναθέσεις που αντιστοιχούσαν σε πιθανές εξισώσεις)
- Συνεπαγόμενες εξισώσεις (άθροισμα κλασμάτων μάζας ή γραμμομορίων)

### Παράδειγμα 6.2 Ισοζύγια Μάζας για Πολλαπλές Μονάδες στις Οποίες δεν Πραγματοποιείται Αντίδραση

Η ακετόνη χρησιμοποιείται στην παρασκευή πολλών χημικών ενώσεων αλλά και σαν διαλύτης. Κατά την χρήση της σαν διαλύτη, υπάρχουν πολλοί περιορισμοί κατά την απελευθέρωση ατμών της στο περιβάλλον. Σας ζητείται να σχεδιάσετε ένα σύστημα ανάκτησης της ακετόνης σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του Σχήματος E6.2. Οι συγκεντρώσεις τόσο των αερίων όσο και των υγρών του Σχήματος E6.2 καθορίζονται σε ποσοστό κατά βάρος, ώστε οι υπολογισμοί να γίνουν ευκολότερα. Υπολογίστε τα A, F, W, B και D ανά ώρα. Θεωρήστε ότι  $G = 1400 \text{ kg/hr}$ .

Σχήμα E6.2



Water: Νερό

Air: Αέρας

Condenser: Συμπυκνωτής

Distillate: Απόσταγμα

Acetone: Ακετόνη  
Absorber column: Στήλη απορρόφησης  
Distillation column: Αποστακτική στήλη  
Bottom: Υπόλλειμμα  
Entering gas: Εισερχόμενο αέριο

## Λύση

Πρόκειται για ανοιχτό σύστημα μόνιμης κατάστασης χωρίς αντίδραση. Υπάρχουν τρία υποσυστήματα όπως φαίνονται στο Σχήμα Ε6.2.

### Βήματα 1 – 4

Δίνονται οι συστάσεις όλων των ρευμάτων. Όλες οι άγνωστες ροές ρευμάτων δηλώνονται με σύμβολα στο σχήμα.

### Βήμα 5

Επιλέξτε 1 hr σαν βάση έτσι ώστε  $G = 1400 \text{ kg}$ .

### Βήματα 6 και 7

Θα μπορούσαμε να ξεκινήσουμε την ανάλυση των βαθμών ελευθερίας με τα συνολικά ισοζύγια, αλλά αφού τα υποσυστήματα συνδέονται σε σειρά, θα ξεκινήσουμε την ανάλυση με τη Μονάδα 1 (στήλη απορρόφησης), και στη συνέχεια θα προχωρήσουμε στην Μονάδα 2 (αποστακτική στήλη) και στην Μονάδα 3 (Συμπυκνωτής).

Σε κάθε βήμα της λύσης του προβλήματος, όπως συνηθίζεται, οι μεταβλητές των οποίων οι τιμές δεν αναφέρονται ρητά στο Σχήμα Ε6.2 θα θεωρηθούν ίσες με μηδέν και δεν θα περιληφθούν στην καταμέτρηση των μεταβλητών.

#### *Μονάδα 1 (Απορρόφηση)*

Μεταβλητές: Οκτώ συστατικά των οποίων οι τιμές είναι γνωστές και έχουν εκχωρηθεί (βλέπε Σχήμα Ε6.2) συν τρεις μεταβλητές των οποίων οι τιμές δεν είναι γνωστές (οι άγνωστοι):  $W$ ,  $F$  και  $A$  (τα τρία άγνωστα ρεύματα).

Εξισώσεις: Για τον υπολογισμό των τριών αγνώστων απαιτούνται τρεις εξισώσεις. Η βάση,  $G = 1400 \text{ kg}$ , της έχει ήδη ανατεθεί μια τιμή. Ποιες σχέσεις μπορείτε να χρησιμοποιήσετε; Τα ισοζύγια μάζας των συστατικών: τρεις (μία για κάθε συστατικό: αέρα, νερό, ακετόνη).

Βαθμοί ελευθερίας: Μηδέν. Επομένως, μπορείτε να λύσετε για τις τιμές των  $W$ ,  $F$  και  $A$ .

Πριν προχωρήσετε στον υπολογισμό των βαθμών ελευθερίας για την Μονάδα 2 (την αποστακτική στήλη), θα πρέπει να προσέξετε την πλήρη έλλειψη στοιχείων σχετικά

με τις ιδιότητες του ρεύματος που κατευθύνεται προς την Μονάδα 3 (από τον συμπυκνωτή), από την αποστακτική στήλη. Γενικά, είναι προτιμότερο να αποφεύγετε να κάνετε ισοζύγια μάζας για συστήματα που περιλαμβάνουν τέτοια ρεύματα, αφού δεν περιέχουν καμιά χρήσιμη πληροφορία. Έτσι, το επόμενο σύστημα που επιλέγουμε για ανάλυση των βαθμών ελευθερίας, θα είναι το σύστημα που προκύπτει από τον συνδυασμό των Μονάδων 2 και 3.

*Μονάδες 2 και 3 (Αποστακτική στήλη συν Συμπυκνωτής)*

Μεταβλητές: Οι μόνοι άγνωστοι είναι τα A και B (δύο ρεύματα) επειδή F είναι γνωστό από την στήλη απορρόφησης. Τα κλάσματα μάζας των συστατικών σε κάθε ρεύμα,  $2 \times 3 = 6$ , είναι γνωστές οι τιμές τους έχουν ήδη εκχωρηθεί.

Εξισώσεις: Απαιτούνται δύο για την επίτευξη μηδέν βαθμών ελευθερίας. Μπορείτε να κάνετε δύο ισοζύγια συστατικών, το ένα για την ακετόνη και το άλλο για το νερό.

Βαθμοί ελευθερίας: Μηδέν.

Τι θα συνέβαινε αν μία σωστή ανάλυση των βαθμών ελευθερίας για ένα υποσύστημα έδινε +1; Τότε, θα ελπίζατε ότι η τιμή ενός από τους αγνώστους θα μπορούσε να προσδιοριστεί από κάποιο άλλο υποσύστημα του ολικού συστήματος. Στην πραγματικότητα, για το Παράδειγμα αυτό, αν ξεκινούσατε την ανάλυση των βαθμών ελευθερίας με τον συνδυασμό των Μονάδων 2 και 3, θα παίρνατε την τιμή +1 επειδή η τιμή του F δεν θα ήταν γνωστή πριν την επίλυση των εξισώσεων για την Μονάδα 1.

## Βήμα 8

Τα ισοζύγια μάζας για την Μονάδα 1 είναι τα εξής:

	Είσοδος	=	Έξοδος	
Αέρας:	1400 (0.95)	=	A(0.995)	(α)
Ακετόνη:	1400(0.03)	=	F(0.19)	(β)
Νερό:	1400(0.02) + W(1.00)	=	F(0.81) + A(0.005)	(γ)

Κάντε τον απαραίτητο έλεγχο, ώστε να βεβαιωθείτε ότι οι εξισώσεις είναι ανεξάρτητες.

## Βήμα 9

Επιλύστε τις εξισώσεις (α) ως προς το A, (β) ως προς το F και στη συνέχεια με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν επιλύστε τη (γ) για να πάρετε το W

$$A = 1336.7 \text{ kg/hr}$$

$$F = 221.05 \text{ kg/hr}$$

$$W = 157.7 \text{ kg/hr}$$

## Βήμα 10

(Ελέγξτε) Χρησιμοποιήστε το συνολικό ισοζύγιο.

$$\begin{aligned}G + W &= A + F \\1400 &= 1336 \\ \frac{157.7}{1557.7} &= \frac{221.05}{1557}\end{aligned}$$

## Βήμα 8

Τα ισοζύγια μάζας για τον συνδυασμό των Μονάδων 2 και 3 είναι:

$$\text{Ακετόνη: } 221.05(0.19) = D(0.99) + B(0.04) \quad (\delta)$$

$$\text{Νερό: } 221.05(0.81) = D(0.01) + B(0.96) \quad (\epsilon)$$

## Βήμα 9

Λύστε τις εξισώσεις (δ) και (ε) ταυτόχρονα για να πάρετε

$$D = 34.91 \text{ kg/hr}$$

$$B = 186.1 \text{ kg/hr}$$

## Βήμα 10

(Ελέγξτε) Χρησιμοποιήστε το συνολικό ισοζύγιο.

$$F = D + B \text{ ή } 221.05 \quad 34.91 + 186.1 = 221.01$$

Ποια άλλα ισοζύγια μάζας θα μπορούσαν να γραφούν για το σύστημα για αντικατάσταση με οποιαδήποτε από τις εξισώσεις (α) έως (ε); Τυπικά ισοζύγια θα ήταν τα ολικά ισοζύγια.

	<u>Είσοδος</u>	=	<u>Έξοδος</u>	
Αέρας:	G(0.95)	=	A(0.995)	(στ)
Ακετόνη:	G(0.03)	=	D(0.99) + B(0.004)	(ζ)
Νερό:	G(0.02) + W	=	A(0.005) + D(0.01) + B(0.96)	(η)
Σύνολο:	G + W	=	A + D + B	(θ)

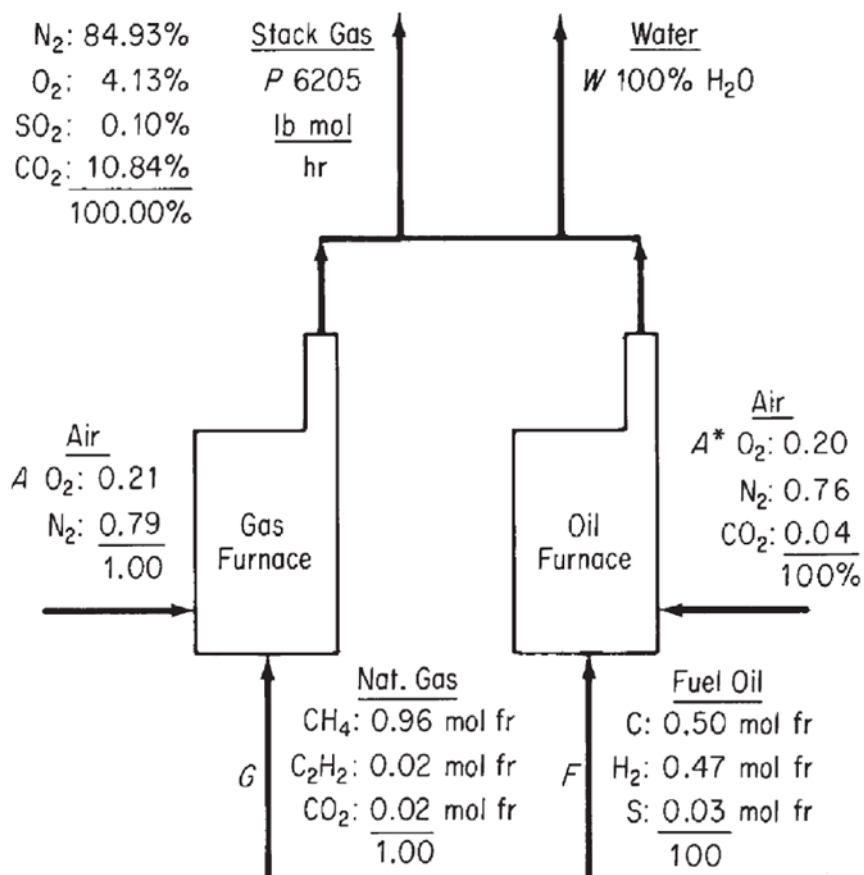
Οι Εξισώσεις (α) έως (θ) δεν προσθέτουν επιπλέον πρόσθετες πληροφορίες στο πρόβλημα. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι και πάλι μηδέν. Οποιαδήποτε από τις εξισώσεις μπορεί να αντικατασταθεί με κάποια από τις εξισώσεις (α) έως (ε) αρκεί να βεβαιωθείτε ότι η ομάδα των εξισώσεων που προκύπτει είναι ανεξάρτητη.



### Παράδειγμα 6.3 Ισοζύγια Μάζας σε Πολλαπλές Μονάδες στις οποίες Πραγματοποιείται και Αντίδραση

Έχοντας υπόψη το αυξανόμενο κόστος καυσίμων και την αβεβαιότητα προμήθειας συγκεκριμένων καυσίμων, πολλές εταιρίες λειτουργούν με δύο κλίβανους, έναν φυσικού αερίου και έναν καυσίμου πετρελαίου. Στην εταιρεία RAMAD, κάθε κλίβανος έχει τη δική του παροχή σε οξυγόνο. Ο κλίβανος καυσίμου πετρελαίου χρησιμοποιεί ως οξειδωτικό ένα ρεύμα με την ακόλουθη σύσταση: O<sub>2</sub> 20%, N<sub>2</sub> 76% και CO<sub>2</sub> 4%. Τα καυσαέρια και των δύο κλιβάνων απομακρύνονται από μία κοινή καπνοδόχο. Κοιτάξτε το Σχήμα Ε6.3.

Σχήμα Ε6.3



Water: Νερό

Stack gas: Καυσαέρια

Air: Αέρας

Gas furnace: Κλίβανος Αερίου

Nat. gas: Φυσικό Αέριο

Fuel Oil: Καύσιμο Πετρέλαιο

Oil furnace: Κλίβανος καυσίμου πετρελαίου

Σημειώστε ότι υπάρχουν δύο έξοδοι από την καπνοδόχο, για να αποδειχθεί ότι ενώ η ανάλυση των καυσαερίων είναι σε ξηρή βάση, υπάρχουν ακόμη υδρατμοί. Η σύσταση του καυσίμου πετρελαίου δίνεται σε γραμμομοριακά κλάσματα έτσι ώστε να μην απαιτείται να μετατρέπετε τα κλάσματα μάζας σε γραμμομοριακά κλάσματα.

Κατά τη διάρκεια χιονοθύελλας, όλες οι μεταφορές προς την RAMAD σταμάτησαν, και οι υπεύθυνοι άρχισαν να ανησυχούν για τη συνεχή ελάττωση των διαθέσιμων ποσών πετρελαίου αφού οι προμήθειες του φυσικού αερίου χρησιμοποιούνταν με μέγιστο ρυθμό. Τα αποθέματα του πετρελαίου ήταν μόνο 560 bbl. Πόσες ώρες ακόμη θα μπορούσε να λειτουργήσει η εταιρία, αν δεν έφτανε άλλο πετρέλαιο; Το ελάχιστο φορτίο θέρμανσης για την εταιρία, μεταφρασμένο σε παραγωγή καυσαερίων ήταν 6205 lb mol/hr ξηρών καυσαερίων. Η ανάλυση των καυσίμων και καυσαερίων παρουσιάζεται στο Σχήμα Ε6.3. Το μοριακό βάρος του πετρελαίου ήταν 7.91 lb/lb mol, και η πυκνότητά του 7.578 lb/gal.

### Λύση

Πρόκειται για ανοιχτή διεργασία μόνιμης κατάστασης, με αντίδραση. Υπάρχουν δύο υποσυστήματα. Θέλουμε να υπολογίσουμε το F και το G σε lb mol/hr και στη συνέχεια το F σε βαρέλια ανά ώρα.

### Βήματα 1 – 4

Παρόλο που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τα ισοζύγια μάζας των ειδών για την επίλυση αυτού του προβλήματος, θα χρησιμοποιήσουμε στοιχειακά ισοζύγια, επειδή εφαρμόζονται ευκολότερα για αυτό το πρόβλημα. Οι μονάδες όλων των μεταβλητών, των οποίων οι τιμές είναι άγνωστες, θα είναι lb moles. Αντί να δημιουργήσουμε ισοζύγια μάζας για κάθε κλιβάνο, και επειδή δεν διαθέτουμε πληροφορίες για κάθε ρεύμα εξόδου του κάθε κλιβάνου, θα δημιουργήσουμε ολικά ισοζύγια, και έτσι τα όρια του συστήματος θα περικλείουν και τους δύο κλιβάνους.

### Βήμα 5

Βάση: 1 hr, επομένως  $P = 6205 \text{ lb mol}$

### Βήματα 6 και 7

Η απλοποιημένη ανάλυση των βαθμών ελευθερίας γίνεται ως εξής: Έχετε πέντε στοιχεία στο πρόβλημα και πέντε ρεύματα των οποίων οι τιμές είναι άγνωστες: A, G, F, A\* και W. Έτσι, αν τα ισοζύγια των στοιχείων σε moles είναι ανεξάρτητα, μπορείτε να λάβετε μία μοναδική λύση του προβλήματος.

## Βήμα 8

Τα ολικά ισοζύγια των στοιχείων είναι (σε pound moles)

	<u>Είσοδος</u>	=	<u>Έξοδος</u>
H:	$G(0.96)(4) + F(0.47)(2)$	=	$W(2)$
N:	$A(0.79)(2) + (0.76)(2)$	=	$6205(0.8493)(2)$
O:	$A(0.21)(2) + A^*(0.20 + 0.04)(2)$ $+ G(0.02)(2)$	=	$6205(0.0413 + 0.001 + 0.1084)(2)$ $+ W$
S:	$F(0.03)$	=	$6205(0.0010)$
C:	$G(0.96) + (2)(0.02) + 0.02$ $+ F(0.05) + 0.04 A^*$	=	$6205(0.1084)$

Τα ισοζύγια φαίνεται πως είναι ανεξάρτητα.

## Βήμα 9

Λύστε το ισοζύγιο S ως προς F (ο λανθασμένος υπολογισμός των συγκεντρώσεων του SO<sub>2</sub> θα προκαλέσει σφάλμα στον υπολογισμό του F). Το θείο είναι το συνδετικό συστατικό. Στη συνέχεια λύστε ταυτόχρονα τα άλλα τέσσερα ισοζύγια ως προς G. Τα αποτελέσματα είναι:

$$F = 207 \text{ lb mol/hr}$$

$$G = 498 \text{ lb mol/hr}$$

Τελικά, η κατανάλωση του καυσίμου πετρελαίου είναι

$$\frac{207 \text{ lb mol}}{\text{hr}} \left| \frac{7.91 \text{ lb}}{\text{lb mol}} \right| \left| \frac{\text{gal}}{7.578 \text{ lb}} \right| \left| \frac{\text{bbl}}{42 \text{ gal}} \right| = 5.14 \text{ bbl/hr}$$

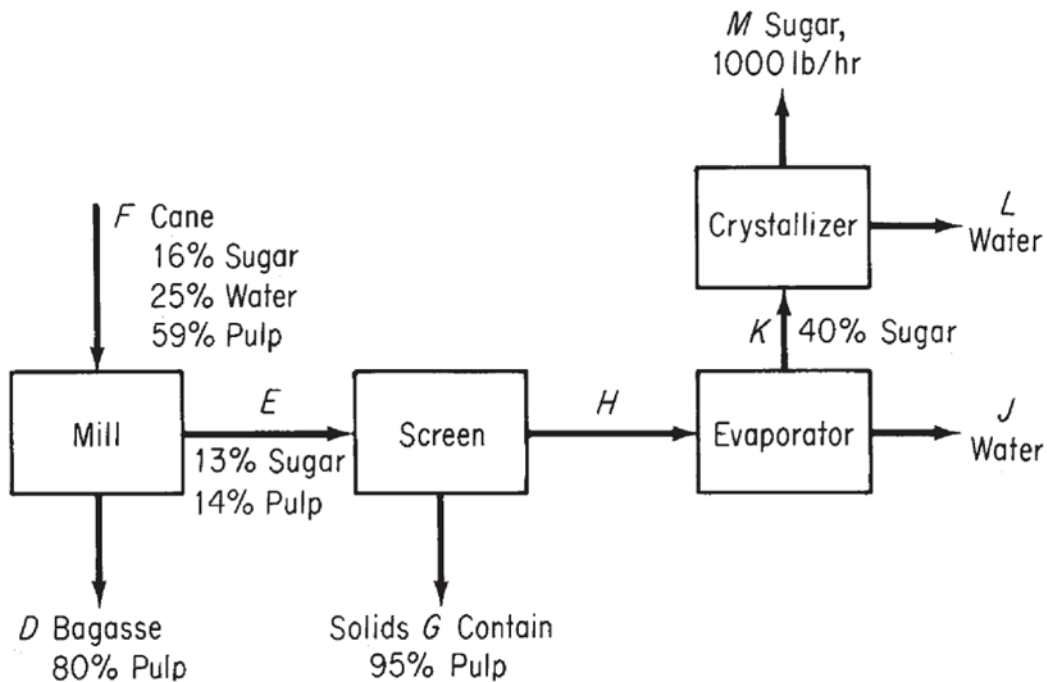
Αν τα αποθέματα του πετρελαίου ήταν μόνο 560 bbl, θα μπορούσαν να διαρκέσουν το πολύ

$$\frac{560 \text{ bbl}}{5.14 \frac{\text{bbl}}{\text{hr}}} = 109 \text{ hr}$$

**Παράδειγμα 6.4 Ανάλυση Διεργασίας Ανάκτησης Ζάχαρης, όταν στην Διεργασία Περιλαμβάνονται Πολλαπλές Μονάδες σε Σειρά**

Το Σχήμα E6.4 απεικονίζει την διεργασία και τα γνωστά δεδομένα. Σας ζητείται να υπολογίσετε την σύσταση για κάθε ρεύμα ροής, και το κλάσμα της ζάχαρης στο ζαχαροκάλαμο (F) που ανακτάται στο M.

**Σχήμα E6.4**



Cane: ζαχαροκάλαμο

Sugar: ζάχαρη

Water: νερό

Pulp: πολτός

Mill: μύλος

Bagasse: κατάλοιπο

Screen: Κόσκινο

Evaporator: Εξατμιστής

Solids G contain 95% pulp: Τα στερεά G περιέχουν 95% πολτό

Crystallizer: κρυσταλλωτής

## Λύση

### Βήματα 1 – 4

Όλα τα γνωστά δεδομένα τοποθετήθηκαν στο Σχήμα E6.4. Πρόκειται για ανοιχτή διεργασία μόνιμης κατάστασης, χωρίς αντίδραση. Με εξέταση του Σχήματος προκύπτουν δύο ερωτήματα. Ποια βάση πρέπει να επιλέξετε και με ποιο σύστημα θα πρέπει να ξεκινήσετε την ανάλυση; Η επιλογή συγκεκριμένων βάσεων και συστημάτων μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερες εξισώσεις που πρέπει να λυθούν ταυτόχρονα. Θα μπορούσατε να επιλέξετε σαν βάση  $F = 100 \text{ lb}$ ,  $M = 1000 \text{ lb}$  (όπως η 1 ώρα), ή την τιμή οποιουδήποτε ενδιάμεσου ρεύματος ροής. Θα μπορούσατε επίσης να επιλέξετε την ολική διεργασία σαν σύστημα για να ξεκινήσετε, ή κάποια ανεξάρτητη μονάδα ή κάποιον συνεχή συνδυασμό μονάδων. Θα επιλέξουμε το  $M$ , επειδή ορίζεται η τιμή του.

### Βήμα 5

Βάση: 1 ώρα ( $M = 1000 \text{ lb}$ )

### Βήματα 6 και 7

Ένα άλλο σημαντικό ερώτημα στο οποίο θα πρέπει να απαντήσετε είναι ποια είναι η σύσταση των ρευμάτων D, E, G και H; Το ρεύμα αποτελείται από τρία συστατικά, ενώ το ρεύμα K περιέχει, πιθανόν, μόνο ζάχαρη και νερό. Το ρεύμα H περιέχει πολτό; Πιθανόν όχι, γιατί αν εξετάσετε το διάγραμμα ροής της διεργασίας δεν θα δείτε πουθενά πολτό να εξέρχεται από τον εξατμιστή. Τα ρεύματα D και G πιθανόν να περιέχουν νερό και ζάχαρη αφού από το πρόβλημα συνεπάγεται ότι δεν ανακτάται όλη η ζάχαρη στο ρεύμα F. Τι θα συμβεί αν υποθέσετε ότι τα ρεύματα D και G δεν περιέχουν καθόλου νερό ή ζάχαρη; Στην περίπτωση αυτή θα γράφατε μία ομάδα ισοζυγίων μάζας που δεν είναι ανεξάρτητα και/ή ασύμβατα (δεν έχουν λύση). Δοκιμάστε το. Ας αντιστοιχίσουμε το S στην ζάχαρη, το P στον πολτό και το W στο νερό. Οι μονάδες τους είναι σε λίβρες. Επιλέξτε σαν αρχικό σύστημα τον κρυσταλλωτή. Γιατί; Επειδή (α) αν ελέγξετε τους βαθμούς ελευθερίας για τον κρυσταλλωτή, μόνο μία μικρή ομάδα αγνώστων σχετίζονται με μηδέν βαθμούς ελευθερίας (β) ο κρυσταλλωτής περιλαμβάνει την τροφοδοσία M που η τιμή της είναι γνωστή και (γ) ο κρυσταλλωτής βρίσκεται στο τέλος της διεργασίας. Εκχωρήστε τις τιμές των μεταβλητών που είναι γνωστές (τα συστατικά στα ρεύματα είναι σε κλάσματα μάζας):

$$M = 100$$

$$L = ;$$

$$K = ;$$

$$\omega_{ζάχαρη}^M = 1.00$$

$$\omega_{νερό}^L = 1.00$$

$$\omega_{ζάχαρη}^K = 0.40 \text{ και } \omega_{νερό}^K = 0.60$$

Οι άγνωστοι είναι οι K και L. Μπορείτε να κάνετε δύο ισοζύγια ειδών, για τη ζάχαρη και το νερό. Τι γίνεται με τις πεπλεγμένες εξισώσεις; Έχουμε χρησιμοποιήσει τις τρεις για να ορίσουμε τις συστάσεις των M, K, και L. Συνεπώς, οι βαθμοί ελευθερίας είναι μηδέν, και ο κρυσταλλωτής φαίνεται να αποτελεί ένα καλό υποσύστημα για να ξεκινήσετε.

Αν επιλέξετε μία άλλη βάση, έστω  $F = 100 \text{ lb}$ , και ένα άλλο υποσύστημα, έστω τον μύλο, θα έχετε τέσσερις αγνώστους: D, E,  $\omega_{\text{ζάχαρη}}^D$  και  $\omega_{\text{νερό}}^D$  (υποθέτοντας ότι είχατε ορίσει αρχικά  $\omega_{\text{νερό}}^E = 0.73$ ). Θα κάνετε 3 ισοζύγια ειδών και θα είχατε μία πεπλεγμένη εξίσωση,  $\sum \omega_i^D = 1$ , επομένως οι βαθμοί ελευθερίας θα είναι μηδέν.

Ως εκ τούτου, **κατά γενικό κανόνα, η βάση που θα επιλέξετε και η μονάδα με την οποία θα ξεκινήσετε την ανάλυση σε μια διεργασία με πολλαπλές μονάδες εξοπλισμού επηρεάζει το βαθμό πολυπλοκότητας των υπολογισμών σας.**

### Βήματα 8 και 9

Για τον κρυσταλλωτή οι εξισώσεις είναι

$$\begin{array}{ll} \text{Ζάχαρη:} & K (0.40) = L (0) + 1000 \\ \text{Νερό:} & K (0.60) = L + 0 \end{array}$$

Από τις οποίες παίρνουμε  $K = 2500 \text{ lb}$  και  $L = 1500 \text{ lb}$ .

### Βήμα 10

Ελέγξτε, με την βοήθεια των ολικών ροών:

$$2500 = 1500 + 1000 = 2500$$

Το επόμενο βήμα της λύσης, είναι η περίπτωση του εξατμιστή σαν σύστημα, και η επανάληψη της ανάλυσης των βαθμών ελευθερίας. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σκεφτείτε για τη σύνθεση του ρεύματος H. Υπάρχει καθόλου πολτός στο H; Αν κοιτάξετε τις συστάσεις μετά το H, δεν υπάρχει πολτός. Ως εκ τούτου, το H δεν περιέχει πολτό, αν αθροίσετε τα κλάσματα μάζας. Τότε, ο άγνωστος είναι το H, και θα χρειαστείτε δύο ανεξάρτητα ισοζύγια ειδών για το σύστημα ζάχαρης και νερού.

Οι βαθμοί ελευθερίας είναι μηδέν. Μπορείτε να λύσετε τις δύο εξισώσεις για το H και J, στη συνέχεια να προχωρήσετε σε μία μονάδα τη φορά, να λύσετε τις εξισώσεις για το κόσκινο και τέλος να λύσετε τις εξισώσεις για τον μύλο. Τα αποτελέσματα για όλες τις μεταβλητές είναι:

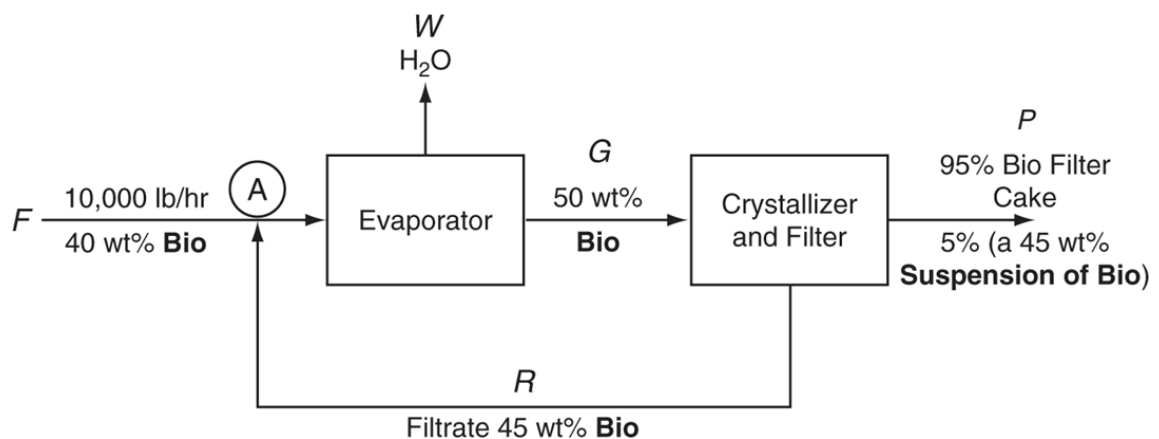
<u>lb</u>	<u>Κλάσμα μάζας</u>
D = 16,755	$\omega_S^D = 0.174$
E = 7819	$\omega_W^D = 0.026$
F = 24,574	$\omega_W^E = 0.73$
G = 1152	$\omega_S^G = 0.014$
H = 6667	$\omega_W^G = 0.036$
J = 4167	$\omega_W^H = 0.85$
K = 2500	$\omega_W^K = 0.60$
L = 1500	
M = 1000	

Το ποσοστό της ανακτώμενης ζάχαρης είναι  $1000/[(24,574)(0.16)] = 0.25$

### Παράδειγμα 6.5 Διήθηση με Συνεχή Ροή που Περιλαμβάνει Σύστημα Ανακύκλωσης

Σχήμα E6.5 αποτελεί μία σχηματική απεικόνιση μιας μεθόδου παραγωγής βιομάζας (συμβολίζεται ως Bio) που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή φαρμάκων.

**Σχήμα E6.5** Σχηματική απεικόνιση μιας μεθόδου παραγωγής βιομάζας  
Bio: Βιομάζα



Evaporator: Εξατμιστής

Crystallizer and Filter: Κρυσταλλωτής και Φίλτρο

Filtrate 45 wt % Bio: Διήθημα 45% κ.β. Βιομάζα

95% Bio Filter Cake: Στερεό κατάλοιπο φιλτραρίσματος 95% Βιομάζα.

5% (a 45 wt% Suspension of Bio): 5% (45% κ.β. Ελαιώρημα Βιομάζας)

Η καθαρή τροφοδοσία της διεργασίας είναι 10,00 lb/hr της 40% υδατικής βιομάζας στο εναιώρημα. Η καθαρή τροφοδοσία συνδυάζεται με το ανακυκλούμενο διήθημα από το φίλτρο, και εισάγεται στον εξατμιστή όπου το νερό απομακρύνεται σχηματίζοντας διάλυμα Βιομάζας 50% κ.β., το οποίο με τη σειρά του εισάγεται στο φίλτρο. Το φίλτρο παράγει ένα στερεό κατάλοιπο που αποτελείται από 95% κ.β. ξηρή βιομάζα σε ένα υγρό διάλυμα 5% κ.β., που στο εργαστήριο αποδεικνύεται πως αποτελείται από 55% κβ νερό, και το υπόλοιπο ξηρή βιομάζα. Το διήθημα περιέχει 45% κ.β. βιομάζα.

**α.** Υπολογίσετε τον ρυθμό ροής του νερού που απομακρύνεται από τον εξατμιστή, και τον ρυθμό ανακύκλωσης της διεργασίας.

**β.** Με δεδομένο τον ίδιο ρυθμό παραγωγής στερεού κατάλοιπου, θεωρήστε ότι το διήθημα δεν ανακυκλώνεται. Ποιος θα είναι ο ρυθμός τροφοδοσίας της βιομάζας 40% κ.β.; Θεωρήστε ότι το παραγόμενο διάλυμα από τον εξατμιστή και πάλι περιέχει 50% κ.β. βιομάζα σε νερό.

## **Λύση α**

### **Βήματα 1 – 4**

Το Σχήμα E6.5 περιέχει τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την επίλυση του προβλήματος.

### **Βήμα 5**

Βάση: 10,000 lb καθαρής τροφοδοσίας (ισοδυναμούν με 1 ώρα)

### **Βήματα 6 και 7**

Οι άγνωστοι είναι W, G, P και R δεδομένου ότι μπορείτε να ορίσετε τις τιμές στο F και όλα τα κλάσματα μάζας των αντίστοιχων ρευμάτων με τη χρήση κατάλληλων πεπλεγμένων εξισώσεων. Μπορείτε να κάνετε δύο ισοζύγια συστατικών για τρία υποσυστήματα: Το σημείο ανάμιξης A, τον εξατμιστή και το φίλτρο (καθώς επίσης και ένα ολικό ισοζύγιο για το καθένα). Μπορείτε επίσης να κάνετε παρόμοια ισοζύγια για διάφορους συνδυασμούς των υποσυστημάτων και για όλο το σύστημα. Ποια ισοζύγια θα επιλέγατε για την επίλυση του προβλήματος; Αν έχετε σκοπό να βάλετε τις εξισώσεις σε πρόγραμμα επίλυσης εξισώσεων, θα πρέπει αυτές να είναι ανεξάρτητες. Αλλά αν λύσετε μόνοι σας το πρόβλημα, και πρόκειται να κάνετε δύο ισοζύγια συστατικών για κάθε ένα από τα τρία υποσυστήματα που μόλις αναφέρθηκαν και το συνολικό σύστημα, θα πρέπει να μετρήσετε τον αριθμό των άγνωστων μεταβλητών που περιλαμβάνονται σε κάθε ένα από τρία υποσυστήματα και στο συνολικό σύστημα:



Σημείο ανάμιξης: P συν τροφοδοσία (και συστάσεις) προς τον εξατμιστή (δεν επισημαίνονται στο Σχήμα Ε6.5)

Εξατμιστής: W, G και τροφοδοσία προς τον εξατμιστή

Φίλτρο: G, P και R

Συνολικά: W και P

Μπορείτε να συμπεράνετε ότι με χρήση δύο μόνο συνολικών ισοζυγίων συστατικών μπορείτε να προσδιορίσετε τουλάχιστον τις τιμές των W και P. Συνεπώς θα πρέπει να ξεκινήσετε με τα συνολικά ισοζύγια.

### Βήματα 8 και 9

Συνολικό ισοζύγιο για τη βιομάζα:

$$(0.4)(10,000) = [0.95 + (0.45)(0.05)]P$$
$$P = 4113 \text{ lb}$$

Συνολικό ισοζύγιο H<sub>2</sub>O:

$$(0.6)(10,000) = W + [(0.55)(0.05)](4113)$$
$$W = 5887 \text{ lb}$$

Το συνολικό ποσό βιομάζας που εξέρχεται με το P είναι

$$[(0.95) + (0.45)(0.05)](4113) = 4000 \text{ lb}$$

Σας εκπλήσσει το παραπάνω αποτέλεσμα. Το ποσό του νερού στο P είναι 113 lb. Ελέγχουμε,  $113 + 5887 = 6000 \text{ lb}$ , και προκύπτει ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα.

### Βήματα 6 και 7 (επαναλαμβάνονται)

Τώρα που υπολογίσαμε τα W και P, το επόμενο βήμα είναι να κάνουμε ισοζύγια για το υποσύστημα που περιλαμβάνει το ρεύμα R. Επιλέξτε το σημείο ανάμιξης ή το φίλτρο. Ποιο από τα δύο πρέπει να διαλέξετε; Το φίλτρο περιλαμβάνει τρεις μεταβλητές, και πλέον γνωρίζουμε τον P, επομένως θα συμμετέχουν μόνο δύο άγνωστοι σε αντίθεση με την ύπαρξη περισσότερων αγνώστων αν είχατε επιλέξει ως σύστημα το σημείο ανάμιξης A.

Ισοζύγιο βιομάζας στο φίλτρο

$$0.5G = 4000 + 0.45R$$

Ισοζύγιο H<sub>2</sub>O στο φίλτρο

$$0.5G = 113 + 0.55R$$
$$R = 870 \text{ lb σε 1 hr}$$

Ελέγχουμε:

$$10,000 + 870 - 5887 = G = 4983 = 4113 + 870$$

### Λύση β

Τώρα, υποθέστε ότι δεν γίνεται ανακύκλωση από το φίλτρο, αλλά η παραγωγή και σύσταση του P παραμένει η ίδια. Σημειώστε ότι σ' αυτή την περίπτωση, το R θα απορρίπτεται αντί να ανακυκλώνεται και να αναμιγνύεται με τη νέα τροφοδοσία. Πως θα πρέπει να προχωρήσετε; Αναγνωρίζετε ότι το πρόβλημα είναι ανάλογο με αυτά που μελετήσατε στην Ενότητα 6.2;

### Βήμα 5

Η βάση είναι τώρα  $P = 4113 \text{ lb}$  (ίδια με την 1 ώρα)

### Βήματα 6 και 7

Οι άγνωστοι είναι τώρα F, W, G και R. Μπορείτε να κάνετε δύο ισοζύγια συστατικών για τον εξατμιστή και δύο για το φίλτρο, συν τα δύο συνολικά ισοζύγια συστατικών. Μόνο τα τέσσερα είναι ανεξάρτητα. Τα ισοζύγια του εξατμιστή θα περιελάμβαναν τα F, W και G. Τα ισοζύγια της συσκευής κρυστάλλωσης, τα G και R ενώ τα συνολικά ισοζύγια τα F, W και R. Με ποια ισοζύγια είναι προτιμότερο να ξεκινήσετε; Αν βάλετε τις εξισώσεις σε υπολογιστικό πρόγραμμα, δεν έχει σημασία ποιες θα επιλέξετε, αρκεί να είναι ανεξάρτητες. Είναι προτιμότερο να ξεκινήσετε τα ισοζύγια του φίλτρου γιατί τότε θα έχετε να επιλύσετε μόνο δύο συναφείς εξισώσεις για τα G και R.

### Βήματα 8 και 9

Ισοζύγιο βιομάζας στο φίλτρο:

$$0.5 G = [(0.95) + (0.05) (0.45)](4113) + 0.45 R$$

Ισοζύγιο  $\text{H}_2\text{O}$  στο φίλτρο

$$0.5 G = [(0.05) (0.55)](4113) + 0.55 R$$

Λύνοντας ταυτόχρονα τις εξισώσεις:

$$R = 38,870 \text{ lb σε } 1 \text{ hr}$$

Σημειώστε ότι χωρίς ανακύκλωση, ο ρυθμός της τροφοδοσίας πρέπει να είναι 5.37 φορές μεγαλύτερη για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας προϊόντος, χωρίς να

ξεχνάμε τον μεγάλο όγκο του διηθήματος που θα έπρεπε να αποτεθεί, ο οποίος είναι 45% κ.β. βιομάζα.

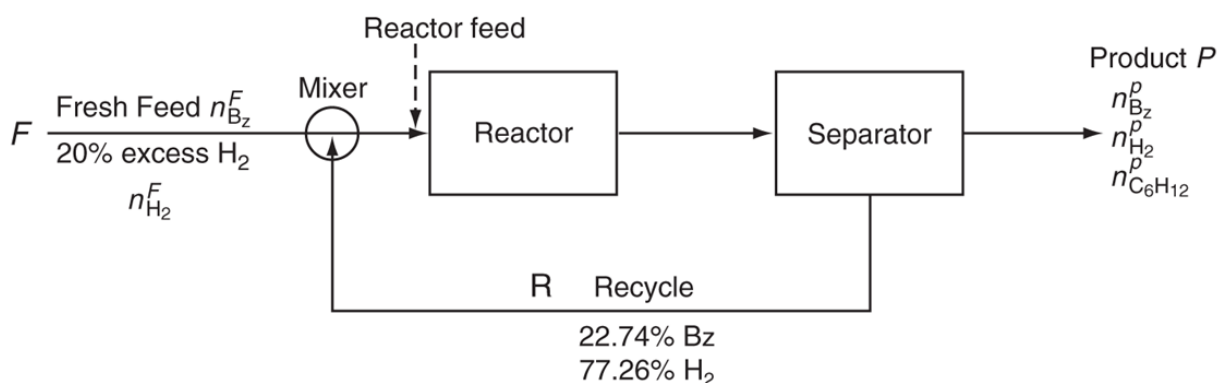
### Παράδειγμα 6.6 Ανακύκλωση σε Διεργασία στην Οποία Πραγματοποιείται Αντίδραση

Το κυκλοεξάνιο ( $C_6H_{12}$ ) παράγεται με την αντίδραση του βενζολίου (Bz, συντομογραφία για το  $C_6H_6$ ) με το υδρογόνο σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Για την διεργασία του Σχήματος E6.6, προσδιορίστε την αναλογία του ρεύματος ανακύκλωσης προς την καινούργια τροφοδοσία αν η συνολική μετατροπή του βενζολίου είναι 95%, και η μετατροπή σε ένα μόνο πέρασμα μέσα από τον αντιδραστήρα είναι ίση με 20%. Υποθέστε ότι χρησιμοποιείται περίσσεια υδρογόνου 20% στην καινούργια τροφοδοσία και ότι η σύσταση του ρεύματος ανακύκλωσης είναι 22.74 mol % βενζολίου και 78.26 mol % υδρογόνου.

**Σχήμα E6.6** Διάγραμμα ενός αντιδραστήρα ανακύκλωσης



Fresh feed: Καινούργια τροφοδοσία

20% excess  $H_2$ : 20% περίσσεια  $H_2$

Mixer: Αναμίκτης

Reactor feed: Τροφοδοσία αντιδραστήρα

Reactor: Αντιδραστήρας

Separator: Διαχωριστής

Recycle: Ανακύκλωση

Product P: Προϊόν P

Σημειώστε ότι σε αυτό το παράδειγμα, υπάρχει μια σχετικά χαμηλή μετατροπή σε ένα μόνο πέρασμα (20%) και η συνολική μετατροπή που είναι σχετικά υψηλή (95%). Μια χαμηλή μετατροπή σε ένα μόνο πέρασμα μπορεί να είναι επιθυμητή σε ορισμένες περιπτώσεις, για παράδειγμα, μια περίπτωση στην οποία η απόδοση μειώνεται καθώς αυξάνεται η μετατροπή. Με τη χρήση ανακύκλωσης, μπορείτε να αποκτήσετε μια υψηλή απόδοση και συγχρόνως μία υψηλή συνολική μετατροπή (δηλαδή, υψηλή χρησιμοποίηση του περιοριστικού αντιδρώντος).

### Λύση

Η διεργασία είναι ανοιχτή και μόνιμης κατάστασης

### Βήματα 1 – 4

Στο Σχήμα E6.6 περιέχονται όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τα ρεύματα ροής εκτός από το ποσό του  $H_2$ , το οποίο βρίσκεται σε περίσσεια 20% (για πλήρη αντίδραση, θυμηθείτε)

$$n_{H_2}^F = 100(3)(1 + 0.20) = 360 \text{ mol}$$

Και η ολική τροφοδοσία είναι ίση με 460 mol.

### Βήμα 5

Από την Εξίσωση (6.3) για το βενζόλιο ( $\nu_{Bz} = -1$ )

$$0.95 = \frac{-(-1)\xi}{100}$$

μπορείτε να υπολογίσετε ότι  $\xi = 95$  αντιδρώντα moles.

### Βήματα 6 και 7

Οι άγνωστοι είναι  $R$ ,  $n_{Bz}^P$ ,  $n_{H_2}^P$  και  $n_{C_6H_{12}}^P$ . Μπορείτε να γράψετε τρία ισοζύγια ειδών για κάθε ένα από τα τρία συστήματα, για το σημείο ανάμιξης, για τον αντιδραστήρα, και για τον διαχωριστή συν τα συνολικά ισοζύγια (από τα οποία φυσικά δεν είναι όλα ανεξάρτητα). Ποια συστήματα πρέπει να επιλέξετε, ώστε να ξεκινήσετε με αυτά; Από την συνολική διεργασία, γιατί στη συνέχεια θα μπορέσετε να χρησιμοποιήσετε την τιμή που υπολογίσατε για την έκταση της αντίδρασης.

## Βήματα 8 και 9

Τα ολικά ισοζύγια των ειδών είναι

$$n_i^{\text{έξοδος}} = n_i^{\text{είσοδος}} + \nu_i \xi$$

$$\text{Bz: } n_{\text{Bz}}^{\text{P}} = 100 + (-1)(95) = 5 \text{ mol}$$

$$\text{H}_2: n_{\text{H}_2}^{\text{P}} = 360 + (-3)(95) = 75 \text{ mol}$$

$$\text{C}_6\text{H}_{12}: n_{\text{C}_6\text{H}_{12}}^{\text{P}} = 0 + (1)(95) = 95 \text{ mol}$$

$$\text{Συνολικά: } P = 175 \text{ mol}$$

Το επόμενο βήμα είναι η χρήση της τελευταίας πληροφορίας, της πληροφορίας σχετικά με την μετατροπή σε ένα μόνο πέρασμα και την Εξίσωση (6.4), για να υπολογίσετε το R. Το σύστημα είναι τώρα ο αντιδραστήρας. Η ποσότητα του Bz που εισήχθη στον αντιδραστήρα είναι ίση με  $100 + 0.2274 R$ , και  $\xi = 95$  (η ίδια τιμή με αυτή που υπολογίστηκε από την ολική μετατροπή). Επομένως

$$0.20 = \frac{95}{100 + 0.2274R}$$

και λύνοντας ως προς R προκύπτει

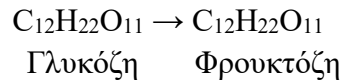
$$R = 1649 \text{ mol}$$

Τελικά, η αναλογία της ανακύκλωσης προς την καινούργια τροφοδοσία είναι

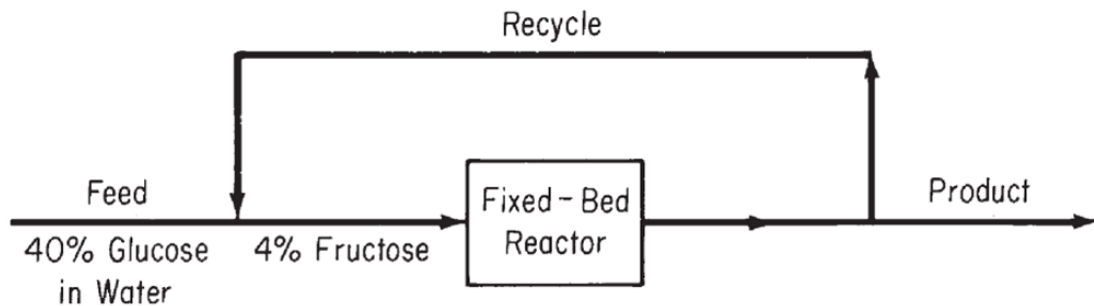
$$\frac{R}{F} = \frac{1659 \text{ mol}}{360 \text{ mol}} = 3.59$$

### Παράδειγμα 6.7 Ανακύκλωση σε Διεργασία που Περιλαμβάνει Αντίδραση

Η ακινητοποιημένη ισομεράση της γλυκόζης χρησιμοποιείται σαν καταλύτης για την παραγωγή φρουκτόζης από την γλυκόζη σε αντιδραστήρα σταθερής κλίνης (ο διαλύτης είναι το νερό). Στο σύστημα που απεικονίζεται στο Σχήμα Ε6.7α, ποιο ποσοστό μετατροπής της γλυκόζης έχει σαν αποτέλεσμα ένα πέρασμα από τον αντιδραστήρα όταν η αναλογία του ρεύματος εξόδου προς το ρεύμα ανακύκλωσης σε μονάδες μάζας ισούται με 8.33; Η αντίδραση είναι



Σχήμα Ε6.7<sup>α</sup>



Feed: Τροφοδοσία

40% Glucose in Water: 40% Γλυκόζη σε Νερό

4% Fructose: 4% Φρουκτόζη

Fixed-bed reactor: Αντιδραστήρας σταθερής κλίνης

Product: Προϊόν

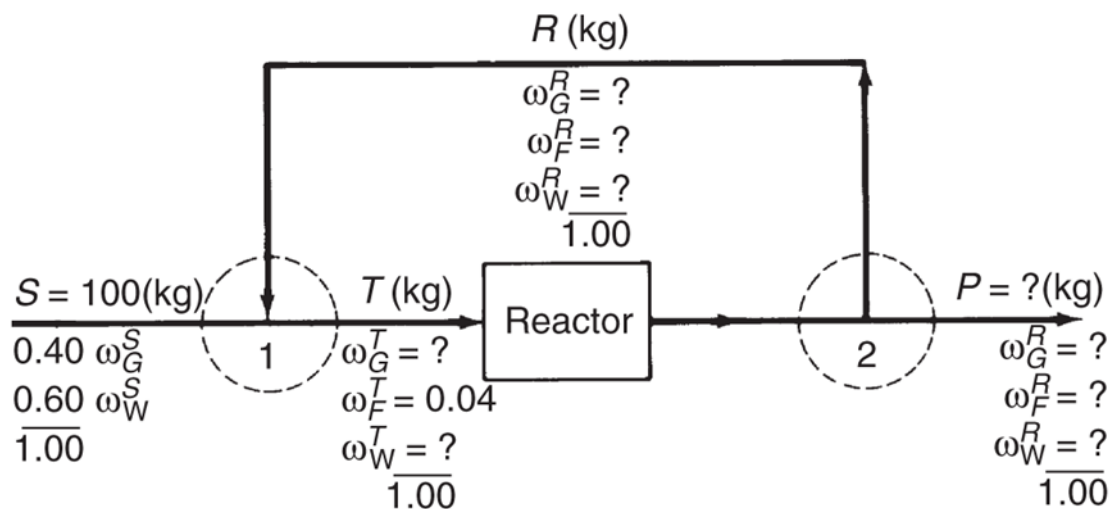
Recycle: Ανακύκλωση

### Λύση

#### Βήματα 1 – 4

Η διεργασία είναι μόνιμης κατάστασης και περιλαμβάνει αντίδραση και ανακύκλωση. Το Σχήμα Ε12.3β περιλαμβάνει όλες τις γνωστές και άγνωστες τιμές των μεταβλητών ενώ χρησιμοποιούνται και τα κατάλληλα σύμβολα ( $W$  για το νερό,  $G$  για την γλυκόζη, και  $F$  για την φρουκτόζη). Σημειώστε ότι το ρεύμα ανακύκλωσης και το ρεύμα του προϊόντος, έχουν την ίδια σύσταση, και συνεπώς στο διάγραμμα χρησιμοποιούνται τα ίδια σύμβολα μάζας για το κάθε ρεύμα.

Σχήμα Ε6.7β



Reactor: Αντιδραστήρας

### Βήμα 5

Επιλέξτε σαν βάση  $S = 100 \text{ kg}$ , με βάση τα δεδομένα του Σχήματος Ε6.7β

### Βήμα 6

Δεν χρησιμοποιήσαμε σύμβολα για το ρεύμα εξόδου του αντιδραστήρα και την σύστασή του αφού οι τιμές αυτές δεν είναι απαραίτητες για τα ισοζύγια μας. Έστω  $f$  κλασματική μετατροπή για ένα πέρασμα από τον αντιδραστήρα. Οι άγνωστοι είναι συνολικά  $\theta, R, F, P, T, \omega_G^R, \omega_F^R, \omega_W^R, \omega_G^T, \omega_W^T$  και  $f$ .

### Βήμα 7

Τα ισοζύγια είναι  $\sum \omega_i^R = 1, \sum \omega_i^T = 1, R = P/8.33$ , συν τρία ισοζύγια ειδών, ένα για το σημείο ανάμιξης 1, ένα για τον διαχωριστή 2 καθώς και για τον αντιδραστήρα και τα συνολικά ισοζύγια. Υποθέτουμε ότι βρίσκουμε 9 ανεξάρτητες εξισώσεις μεταξύ των πολλών και προχωρούμε. Δεν χρειάζεται να λύσουμε όλες τις εξισώσεις ταυτόχρονα. Οι μονάδες είναι μονάδες μάζας (kg).

### Βήματα 8 και 9

Συνολικά ισοζύγια

Συνολικά:  $P = 100 \text{ kg}$  (Πόσο εύκολο!)

Συνεπώς:

$$R = \frac{100}{8.33} = 12.0 \text{ kg}$$

Συνολικά, δεν καταναλώνεται ούτε σχηματίζεται νερό (δλδ. Το νερό δε συμμετέχει στην αντίδραση), επομένως

$$100(0.60) = P \omega_W^R = 100 \omega_W^R$$

Νερό:

$$\omega_W^R = 0.60$$

Έχουμε τώρα 6 άγνωστους που απομένουν για επίλυση. Ξεκινάμε κάπως αυθαίρετα με το σημείο ανάμιξης 1 για τον υπολογισμό μερικών από τους αγνώστους

Σημείο ανάμιξης 1

Δεν λαμβάνει χώρα αντίδραση στο σημείο ανάμιξης και επομένως τα μερικά ισοζύγια των χημικών ειδών μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς να χρησιμοποιήσουμε την έκταση της αντίδρασης:

$$\text{Συνολικά: } 100 + 12 + T = 112$$

$$\text{Γλυκόζη: } 100(0.40) + 12 \omega_G^P = 112 \omega_G^T$$

$$\text{Φρουκτόζη: } 0 + 12 \omega_F^R = 112(0.04)$$

Επιλύοντας ως προς  $\omega_F^R$  την τελευταία εξίσωση, προκύπτει  $\omega_F^R = 0.373$

Επίσης, επειδή,  $\omega_F^R + \omega_G^R + \omega_W^R = 1$ ,

$$\omega_G^R = 1 - 0.373 - 0.600 = 0.027$$

Στη συνέχεια, από το ισοζύγιο της γλυκόζης,  $\omega_G^T = 0.360$ .

Στη συνέχεια, αντί να κάνουμε ξεχωριστά ισοζύγια για τον αντιδραστήρα και τον διαχωριστή, θα συνδυάσουμε τα δύο συστήματα σε ένα (και έτσι θα αποφύγουμε να υπολογίσουμε τιμές που συνδέονται με το ρεύμα εξόδου του αντιδραστήρα).

Αντιδραστήρας συν διαχωριστής 2

$$\text{Είσοδος} \quad - \quad \text{Έξοδος} \quad = \quad \text{Κατανάλωση}$$

$$\text{Γλυκόζη: } (0.360)(112) \quad - \quad (112)(0.027) \quad = \quad f(0.360)(112)$$

$$f = 0.93$$



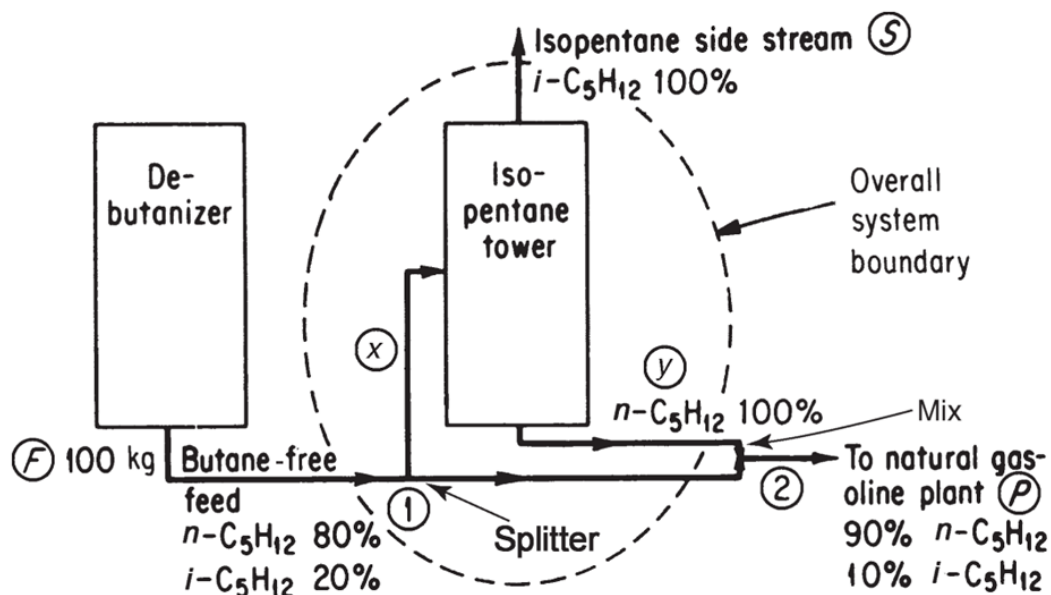
## Βήμα 10

Ελέγξτε με την Εξίσωση (6.5) συμπεριλαμβάνοντας την έκταση της αντίδρασης.

### Παράδειγμα 6.8 Υπολογισμοί για Ρεύματα Παράκαμψης

Στο τμήμα προετοιμασίας της τροφοδοσίας μιας βιομηχανικής μονάδας παραγωγής φυσικής βενζίνης, το ισοπεντάνιο απομακρύνεται από βενζίνη που είναι καθαρή από βουτάνιο. Θεωρείστε για λόγους ευκολίας την απλοποιημένη διεργασία και τα συστατικά που απεικονίζονται στο Σχήμα E6.8. Ποιο κλάσμα της ελεύθερης βουτανίου βενζίνης διέρχεται μέσα από τον πύργο του ισοπεντανίου; Κατά την ανάλυση και την επίλυση του προβλήματος δεν θα αναφερθούν λεπτομερή βήματα. Η διεργασία είναι σε μόνιμη κατάσταση ενώ δεν λαμβάνει χώρα αντίδραση.

Σχήμα E6.8



Debutanizer: Απομάκρυνση βουτανίου

Butane free feed: Τροφοδοσία απαλλαγμένη βουτανίου

Isopentane side stream: Παράπλευρο ρεύμα ισοπεντανίου

Overall system boundary: Συνολικά όρια συστήματος

To natural gasoline plant: Προς μονάδα φυσικής βενζίνης

Isopentane tower: Πύργος ισοπεντανίου

## Λύση

Στο διάγραμμα ροής βλέπουμε ότι ένα μέρος της απαλλαγμένης βουτανίου βενζίνης παρακάμπει τον πύργο του ισοπεντανίου και προχωρά στο επόμενο στάδιο, στην βιομηχανική μονάδα της φυσικής βενζίνης. Όλες οι συστάσεις (τα ρεύματα είναι υγρά) είναι γνωστές. Οι μονάδες είναι όλες σε κιλά. Επιλέξτε μία βάση:

Βάση: 100 kg τροφοδοσίας

- α. Με ποιο σύστημα ή υποσύστημα θα ξεκινούσατε την επίλυση; Ας ξεκινήσουμε με το συνολικό σύστημα, συνήθως το πιο εύκολο, ιδιαίτερα βάσει των πληροφοριών που παρέχονται. Ποιοι είναι οι άγνωστοι; Εάν ορίσετε  $F = 100$  kg, οι άγνωστοι είναι το  $S$  και το  $P$ . Τι ισοζύγια μπορείτε να γράψετε για το συνολικό σύστημα; Μπορείτε να γράψετε ένα ολικό ισοζύγιο και των δύο ισοζύγια συστατικών, αλλά μόνο δύο από τα τρία είναι ανεξάρτητα.

Συνολικό ισοζύγιο μάζας:

$$\frac{\text{Είσοδος}}{100} = \frac{\text{Έξοδος}}{S + P} \quad (\alpha)$$

Ισοζύγιο για το n-C<sub>5</sub> (συνδετικό συστατικό)

$$\frac{\text{Είσοδος}}{100(0.80)} = \frac{\text{Έξοδος}}{S(0) + P(0.90)} \quad (\beta)$$

Συνεπώς,

$$P = 100 \left( \frac{0.80}{0.90} \right) = 88.9 \text{ kg} \quad \text{και}$$

$$S = 100 - 88.9 = 11.1 \text{ kg}$$

- β. Τα ολικά ισοζύγια δεν αρκούν για τον προσδιορισμό του ποσοστού της τροφοδοσίας του πύργου του ισοπεντανίου. Για τον υπολογισμό αυτό χρειάζεστε ένα άλλο σύστημα. Επιλέξτε ως σύστημα τον πύργο του ισοπεντανίου.

Ολικό ισοζύγιο για τον πύργο του ισοπεντανίου:

Από το Σχήμα E6.8,  $X$  είναι τα kg της απαλλαγμένης βουτανίου βενζίνης που κατευθύνονται στον πύργο του ισοπεντανίου, και  $Y$  τα kg του n-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> που εξέρχονται από τον πύργο του ισοπεντανίου.

$$\begin{aligned} \text{Είσοδος} &= \text{Έξοδος} \\ X &= 11.1 + Y \end{aligned} \quad (\gamma)$$

Ισοζύγιο συστατικού για το n-C<sub>5</sub> (συνδετικό συστατικό):

$$X(0.80) = Y \quad (\delta)$$

Ο συνδυασμός της (γ) και της (δ) δίνει  $X = 55.5$  kg, επομένως το ζητούμενο κλάσμα είναι 0.55.

γ. Ένας άλλος τρόπος επίλυσης του προβλήματος αυτού θα ήταν να φτιάξουμε ισοζύγια μάζας στα σημεία ανάμιξης 1 και 2.

Ολικό ισοζύγιο στον κόμβο ανάμιξης 2:

$$(100 - X) + Y = 88.9 \quad (\epsilon)$$

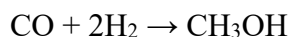
Ισοζύγιο για το συστατικό (iso-C<sub>5</sub>):

$$(100 - X)(0.20) + 0 = 88.9(0.10) \quad (\sigma\tau)$$

Επειδή η Εξίσωση (στ) δεν περιλαμβάνει το Y, μπορεί να λυθεί απευθείας ως προς X:  $X = 55.5$  kg όπως πριν. Περιμένετε να προκύψει διαφορετική τιμή;

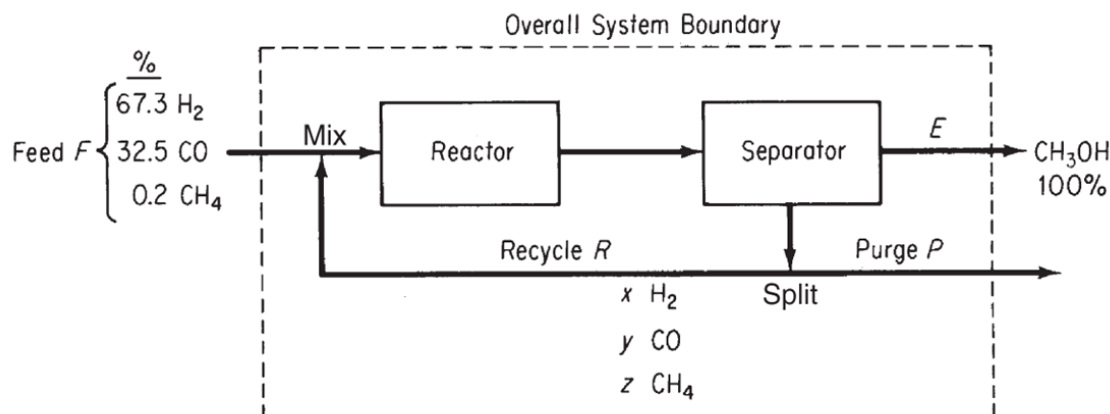
## Παράδειγμα 6.9 Καθαρισμός

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μετατροπή λιγνίτη σε πιο εύχρηστα υγρά προϊόντα που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή χημικών. Δύο κύρια αέρια που μπορούν να παραχθούν σε κατάλληλες συνθήκες από την επιτόπου καύση του λιγνίτη παρουσία ατμού (όπως συμβαίνει συνήθως παρουσία υπόγειων υδάτων), είναι το  $H_2$  και το  $CO$ . Μετά από τον καθαρισμό, αυτά τα δύο αέρια μπορούν να συνδυαστούν για την παραγωγή μεθανόλης σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση



Το Σχήμα Ε6.9α απεικονίζει μία ανοιχτή διεργασία μόνιμης κατάστασης για την παραγωγή μεθανόλης. Όλες οι συστάσεις εκφράζονται σε γραμμομοριακά κλάσματα ή επί τοις εκατό. Τα ρεύματα ροής είναι σε moles.

Σχήμα Ε6.9α



Feed: Τροφοδοσία

Mix: Ανάμιξη

Reactor: Αντιδραστήρας

Separator: Διαχωριστής

Split: Διαχωρισμός

Overall system boundary: Συνολικά όρια του συστήματος

Purge: Απομάκρυνση

Recycle: Ανακύκλωση

Θα παρατηρήσετε στο Σχήμα Ε6.9 ότι κάποια ποσότητα  $CH_4$  εισέρχεται στην διεργασία. Ωστόσο το  $CH_4$  δεν συμμετέχει στην αντίδραση. Ένα ρεύμα καθαρισμού χρησιμοποιείται για να διατηρεί την συγκέντρωση του  $CH_4$  στο ρεύμα εξόδου από τον διαχωριστή προς το R και το P σε συγκέντρωση όχι μεγαλύτερη από 3.2 mol %, και να παρεμποδίζει επίσης την συσσώρευση υδρογόνου στο σύστημα. Η απευθείας μετατροπή του  $CO$  στον αντιδραστήρα είναι 18%.

Υπολογίστε τα moles που ανακυκλώνονται, R, τα moles της CH<sub>3</sub>OH, E, και τα moles της του καθαρισμού, P, ανά 100 moles τροφοδοσίας, καθώς επίσης και την σύσταση του αερίου που απομακρύνεται.

## Λύση

### Βήματα 1 – 4

Οι περισσότερες γνωστές πληροφορίες φαίνονται στο Σχήμα E6.9a. Η διεργασία είναι μόνιμης κατάστασης και περιλαμβάνει αντίδραση. Τα ρεύματα καθαρισμού και ανακύκλωσης έχουν την ίδια σύσταση όπως συνεπάγεται στο σχήμα από το διαχωρισμό τους στην έξοδο του διαχωριστή σε P + R. Τα γραμμομοριακά κλάσματα των συστατικών στο ρεύμα καθαρισμού συμβολίζονται με x, y και z για το H<sub>2</sub>, το CO και το CH<sub>4</sub> αντίστοιχα.

### Βήμα 5

Επιλέξτε μία βολική βάση:

$$\text{Έστω } F = 100 \text{ mol}$$

### Βήμα 6

Μετά τον ορισμό των τιμών στις γνωστές μεταβλητές, οι μεταβλητές των οποίων οι τιμές είναι άγνωστες είναι x, y, z, E, P, R και η έκταση της αντίδρασης, ξ, η τελευταία να απαιτείται, αν σκοπεύετε να χρησιμοποιήσετε ισοζύγια μάζας ειδών και όχι ισοζύγια στοιχείων. Μπορείτε να αγνοήσετε το ρεύμα μεταξύ του αντιδραστήρα και του διαχωριστή καθώς δεν υπάρχουν ερωτήματα που να αναφέρονται σε αυτό.

### Βήματα 7 – 9

Μία πληροφορία που δίνεται από την εκφώνηση του προβλήματος και δεν έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι στιγμής, είναι η πληροφορία σχετικά με το ανώτερο όριο της συγκέντρωσης του CH<sub>4</sub> στο ρεύμα απομάκρυνσης. Το όριο μπορεί να εκφραστεί σαν  $z \leq 0.032$ . Μια ανισότητα δεν θα σας επιτρέψει να πάρετε μια μοναδική λύση στο πρόβλημα. Ως εκ τούτου, ας υποθέσουμε ότι το ρεύμα καθαρισμού περιέχει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα CH<sub>4</sub> και, συνεπώς, να ορίσουμε τιμή στο z:  $z = 0.032$ . Ως εκ τούτου, εξακολουθούν να υπάρχουν έξι άγνωστοι, x, y, E, P, R, και ξ, και θα πρέπει να διαμορφώσετε έξι ανεξάρτητες εξισώσεις.

### Πιθανά Ισοζύγια Υλικών

Ισοζύγιο για το H<sub>2</sub>  
Ισοζύγιο για το CO  
Ισοζύγιο για το CH<sub>4</sub>  
Ισοζύγιο για το CH<sub>3</sub>OH  
Άθροισμα γραμμομοριακών κλασμάτων  
για τα ρεύματα P και F  
Μετατροπή σε μία διέλευση στον αντιδραστήρα

### Πιθανά Συστήματα

Συνολικό  
Ένωση ρευμάτων F και P  
Διαχωρισμός ρευμάτων P και R  
Αντιδραστήρας συν διαχωριστής  
Αντιδραστήρας  
Διαχωριστής

Με μια γρήγορη ματιά στις αντίστοιχες μεταβλητές θα πρέπει να οδηγηθείτε στο συμπέρασμα ότι το συνολικό ισοζύγιο για το CH<sub>4</sub> είναι το απλούστερο να λύθει, επειδή το CH<sub>4</sub> είναι ένα συνδεδετικό συστατικό, όσο εισέρχεται, εξέρχεται σε ένα ρεύμα, χωρίς να πραγματοποιείται οποιαδήποτε αντίδραση, και το ισοζύγιο του CH<sub>4</sub> περιλαμβάνει μόνο έναν άγνωστο, το P:

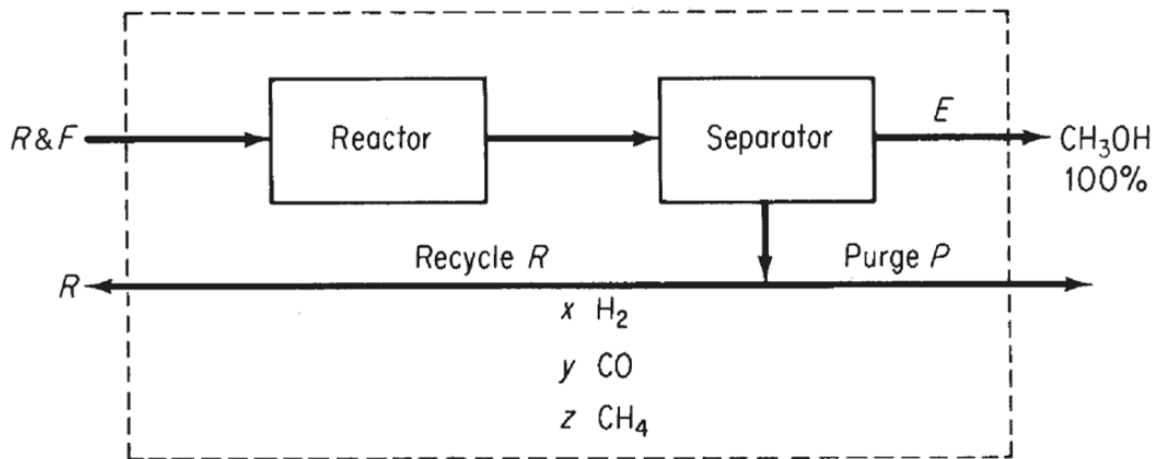
Είσοδος	Επομένως	Έξοδος
$0.002(100) = 0.032P$		$P = 6.25 \text{ mol}$

Τώρα που η τιμή του P έχει καθοριστεί (μειώνοντας τον αριθμό των αγνώστων σε πέντε), τι πρέπει να κάνετε στη συνέχεια; Υπάρχουν άλλες εξισώσεις που μπορεί να λυθούν για μία μόνο μεταβλητή; Όλα τα υπόλοιπα ισοζύγια συστατικών για ένα ανοικτό, σταθερής κατάστασης σύστημα είναι της μορφής που δίνεται από την εξίσωση (5.8) που προέρχεται από την εξίσωση (3.2) -  $n_i^{\text{έξοδος}} = n_i^{\text{είσοδος}} + v_i \xi$  - που θα περιλαμβάνουν τουλάχιστον δύο αγνώστους που θα πρέπει να επιλυθούν ταυτόχρονα. Επίσης, το ρεύμα R δεν θα συμμετέχει σε οποιαδήποτε από τις συνολικές εξισώσεις. Κατά συνέπεια, το επόμενο βήμα θα είναι να εξετάσετε τα ισοζύγια των χημικών ενώσεων για ένα σύστημα που περιλαμβάνει τα ρεύματα F και/ή R. Ένα σύστημα που αποτελείται από τον αντιδραστήρα συν τον διαχωριστή είναι συνήθως μια καλή επιλογή (Σχήμα E6.9β), η οποία σχηματίζεται με τη μετακίνηση του αριστερού τμήματος των ορίων του συστήματος προς τα δεξιά, κόβοντας το ρεύμα της ανακύκλωσης και της τροφοδοσίας του αντιδραστήρα. Συνδυάζοντας τις δύο μονάδες, μπορείτε να αποφύγετε να εμπλέξετε την άμεση έξοδο του αντιδραστήρα. Τα ισοζύγια των χημικών ενώσεων είναι

$$n_i^{\text{έξοδος}} = n_i^{\text{είσοδος}} + v_i \xi$$

CO:  $(R + 6.25)y = (32.5 + Ry) + (-1)(\xi)$   
H<sub>2</sub>:  $(R + 6.25)x = (657.3 + Rx) + (-2)(\xi)$   
CH<sub>3</sub>OH:  $E(1.0)0 + (1)(\xi)$   
CH<sub>4</sub>:  $(R + 6.25)(0.032) = 0.2 + (R)(0.032) + 0$  (περιττή εξίσωση, χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως)

**Σχήμα E6.9β**



Reactor: Αντιδραστήρας  
Separator: Διαχωριστής  
Purge: Απομάκρυνση  
Recycle: Ανακύκλωση

Επιπλέον, η κλασματική μετατροπή  $f$  συνδέεται με το  $\xi$  με την εξίσωση (6.4)

$$f_{SP} = \frac{-v_{LR} \xi}{n_{LR}^{RF}} \quad \text{ή} \quad 0.18 = \frac{-(-1)(\xi)}{32.5 + (Ry)}$$

και η πεπλεγμένη εξίσωση είναι

$$x + y + 0.032 = 1$$

Μπορείτε να επιλύσετε τις πέντε αυτές εξισώσεις με τη βοήθεια ενός προγράμματος επίλυσης εξισώσεων όπως το Polymath ή με διαδοχικές αντικαταστάσεις να προκύψει

E	CH <sub>3</sub> OH	31.25
P	απομάκρυνση	6.25
R	ανακύκλωση	705
x	H <sub>2</sub>	0.768
y	CO	0.200
z	CH <sub>4</sub>	0.032

### **Βήμα 10**

Ελέγξτε αν ικανοποιούνται όλα τα ισοζύγια.



## Λεξιλόγιο νέων όρων

**Ανακύκλωση** Ύλη (ή ενέργεια) που εξέρχεται από την μονάδα κάποιας διεργασίας και επιστρέφει στην ίδια μονάδα ή σε άλλη μονάδα, όπου επεξεργάζεται ξανά.

**Αναμίκτης** Συσκευή που ενώνει δύο ή περισσότερα ρεύματα ροής.

**Διάγραμμα ροής διεργασίας** Η γραφική αναπαράσταση μιας διεργασίας. Βλέπε το σχεδιάγραμμα ροής.

**Διαδοχικός συνδυασμός μονάδων** Ένα σύνολο μονάδων τοποθετημένες σε μια σειρά

**Διακλαδωτής** Συσκευή που χωρίζει τη ροή σε δύο ή περισσότερα ρεύματα.

**Διαχωριστής** Συσκευή που παράγει δύο ή περισσότερα ρεύματα διαφορετικής σύστασης από το υγρό (ή τα υγρά) που εισέρχεται στην συσκευή.

**Καθαρισμός** Το ρεύμα που διαρρέει μία διεργασία και απομακρύνει τα συσσωρευμένα αδρανή ή ανεπιθύμητα συστατικά που διαφορετικά θα επιβάρυναν τα ρεύματα ανακύκλωσης.

**Καλά αναμεμιγμένο σύστημα** Το υλικό μέσα σε ένα σύστημα (μηχάνημα) έχει ομοιόμορφη σύσταση, και το ρεύμα (ή τα ρεύματα) εξόδου έχουν την ίδια σύσταση με το υλικό που υπάρχει μέσα στο σύστημα.

**Κλάσμα μετατροπής σε ένα μόνο πέρασμα** Η μετατροπή που βασίζεται στο τι εισέρχεται και τι εξέρχεται από έναν αντιδραστήρα. Βλέπε το κλασματική μετατροπή σε ένα πέρασμα

**Κλασματική μετατροπή σε ένα πέρασμα** Η μετατροπή ενός αντιδρώντος με βάση το υλικό που εισέρχεται και εξέρχεται από τον αντιδραστήρα.

**Νέα τροφοδοσία** Η συνολική τροφοδοσία ενός συστήματος.

**Ολικά προϊόντα** Τα ρεύματα που εξέρχονται από την διεργασία.

**Ολική διεργασία** Το συνολικό σύστημα που αποτελείται από υποσυστήματα (μονάδες).

**Ολικό προϊόν** Το ρεύμα προϊόντος που απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα.

**Ρεύμα ανακύκλωσης** Το ρεύμα που ανακυκλώνει υλικά (ή ενέργεια).

**Ρεύμα Παράκαμψης** Το ρεύμα που παραλείπει μία ή περισσότερες μονάδες της διεργασίας, και πηγαίνει κατευθείαν σε μία επόμενη μονάδα.

**Συνδέσεις** Τα ρεύματα που ρέουν μεταξύ υποσυστημάτων (μονάδες).

**Συνολική κλασματική μετατροπή** Η μετατροπή ενός αντιδρώντος σε μία διεργασία με ανακύκλωση, με βάση την καινούργια τροφοδοσία του αντιδρώντος και τα συνολικά προϊόντα.

**Σύστημα ανακύκλωσης** Ένα σύστημα που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα ρεύματα ανακύκλωσης.

**Σχεδιάγραμμα ροής** Η γραφική αναπαράσταση μιας διεργασίας.

**Σχηματικό διάγραμμα** Μία ακολουθία ορθογωνίων, κύκλων, κ.τ.λ. που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση λειτουργικών χαρακτηριστικών στο διάγραμμα ροής.

**Τροφοδοσία διεργασίας** Το ρεύμα της τροφοδοσίας που εισέρχεται σε έναν αντιδραστήρα, που συνήθως χρησιμοποιείται σε διεργασία με αντιδραστήρα και ανακύκλωση.

**Υποσύστημα** Ένα καθορισμένο μέρος ενός πλήρους συστήματος.