

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Χημικών Μηχανικών

Εισαγωγή στη Χημική Μηχανική

Ισοζύγια μάζας με αντίδραση

Επ. Καθ. Κυριάκος Λαμπρόπουλος

1

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Βασικές έννοιες

- ❖ Στοιχειομετρία
 - Στοιχειομετρικοί συντελεστές
 - Στοιχειομετρική αναλογία
- ❖ Μη στοιχειομετρική αναλογία
 - Περιοριστικό αντιδρών
 - Αντιδρών σε περίσσεια
- ❖ Μετατροπή (κλάσμα ή βαθμός μετατροπής)
- ❖ Απόδοση αντίδρασης
- ❖ Εκλεκτικότητα
- ❖ Έκταση αντίδρασης ξ

2

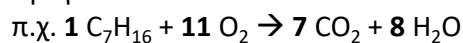
2

ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

- Η στοιχειομετρία ασχολείται με τις ποσότητες των στοιχείων ή των ενώσεων που αντιδρούν και αυτών που παράγονται σε χημική αντίδραση
- Οι ποσοτικές πληροφορίες αναφέρονται σε **mol** και **όχι σε g**.
- **Μετατρέπουμε τη μάζα σε mol και εφαρμόζουμε τη στοιχειομετρία**



δηλ. a moles του A και b moles του B αντιδρούν μεταξύ τους
και παράγουν c moles του C και d moles του D



Στοιχειομετρικές ποσότητες: a, b, c, d

Στοιχειομετρικές αναλογίες: a/b, a/c, a/d, b/c, b/d, c/d

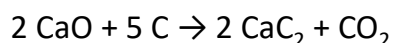
**Οι στοιχειομετρικοί συντελεστές συστατικών είναι αρνητικοί για αντιδρώντα
και θετικοί για προϊόντα**

3

3

ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ – ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΕ MOLES**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**

Το καρβίδιο του ασβεστίου (CaC_2) παρασκευάζεται κατά τη θέρμανση οξειδίου του ασβεστίου (CaO) και άνθρακα (C) σε υψηλή θερμοκρασία.



Διατίθενται 1150 kg CaO . Πόσα kg C απαιτούνται για την πλήρη αντίδραση του CaO και πόσα kg CaC_2 θα παραχθούν;

MB: CaO 56, CaC_2 64

Hint:

- *Don't panic*, υπάρχουν και πιο δύσκολα πράγματα στη ζωή
- Ξαναδείτε την αντίδραση, 2 αντιδρώντα, 2 προϊόντα
- Αναγνωρίστε τους στοιχειομετρικούς συντελεστές
- Σκεφτείτε τις στοιχειομετρικές αναλογίες
- Αφού δίνονται MB μάλλον θα χρειαστεί να μετατρέψουμε βάρη σε mole και το αντίστροφο

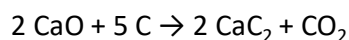


4

4

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**ΛΥΣΗ**

Το καρβίδιο του ασβεστίου (CaC_2) παρασκευάζεται κατά τη θέρμανση οξειδίου του ασβεστίου (CaO) και άνθρακα (C) σε υψηλή θερμοκρασία.



Διατίθενται 1150 kg CaO . Πόσα kg C απαιτούνται για την πλήρη αντίδραση του CaO και πόσα kg CaC_2 θα παραχθούν; MB: CaO 56, CaC_2 64

	2 CaO	+	5 C	→	2 CaC ₂	+	CO ₂
mol	2		5		2		1
g	2 · 56 = 112		5 · 12 = 60		2 · 64 = 128		1 · 44 = 44

“Μπακάλικος” τρόπος με χρήση αναλογιών ποσοτήτων

Διατίθενται 1150kg CaO , άρα

$$\text{kg} \quad 1150 \text{ kg} \quad \frac{60}{112} \cdot 1150 = 616.1 \text{ kg} \quad \frac{128}{112} \cdot 1150 = 1314 \text{ kg} \quad \frac{44}{112} \cdot 1150 = 452 \text{ kg}$$

5

5

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

“Ορθότερος” τρόπος με χρήση στοιχειομετρικών συντελεστών

ΛΥΣΗ

μάζα 1150 kg

$$\text{mol} \quad 1150 \text{ kg} \left| \frac{1 \text{ mol}}{56 \text{ g}} \right| \frac{1000 \text{ g}}{\text{kg}} =$$

$$= 20536 \text{ mol}$$

$$\frac{5}{2} 20536 =$$

$$= 51340 \text{ mol}$$

$$\frac{2}{2} 20536$$

$$= 20536 \text{ mol}$$

$$\frac{1}{2} 20536$$

$$= 10268 \text{ mol}$$

$$51340 \text{ mol} \left| \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{1 \text{ mol}} \right|$$

$$616.1 \text{ kg}$$

$$20536 \text{ mol} \left| \frac{64 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{1 \text{ mol}} \right|$$

$$1314 \text{ kg}$$

$$10268 \text{ mol} \left| \frac{44 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{1 \text{ mol}} \right|$$

$$452 \text{ kg}$$

6

6

ΜΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ

Στην πράξη σπάνια χρησιμοποιούνται τα αντιδρώντα στις στοιχειομετρικές τους αναλογίες.

Περιοριστικό αντιδρών: Το αντιδρών που είναι στοιχειομετρικά στη μικρότερη ποσότητα

Αντιδρών σε περίσσεια: Το αντιδρών που είναι στοιχειομετρικά σε μεγαλύτερη ποσότητα από το περιοριστικό αντιδρών.

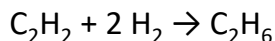
$$\text{Περίσσεια} = \frac{n_{\text{ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ}} - n_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ}}}{n_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ}}}$$

7

7

ΜΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2**

20.0 kmol/h ακετυλενίου (C_2H_2) και 50.0 kmol/h H_2 τροφοδοτούνται σε ένα αντιδραστήρα:



- Ποιο είναι το περιοριστικό αντιδρών;
- Ποιο είναι το αντιδρών σε περίσσεια;
- Περίσσεια %;

(Άσχετη ερώτηση): Σχετικά με την απόδοση «**το αντιδρών**» (ουσιαστικό) του αγγλικού όρου reactant, μήπως μπορεί να **γράφεται με όμικρον (το αντιδρόν)**, κατ'αναλογίαν με το ποιόν; Απάντηση: «Όχι» με το ακόλουθο σκεπτικό:

Αφού είναι: ο αντιδρών, η αντιδρώσα, το αντιδρών. Ο αντιδρών ηλεκτρολύτης, η αντιδρώσα ουσία, το αντιδρών σώμα. Και ουσιαστικό να γίνει δεν θα αλλάξει την κλίση. Είναι το αντιδρών – του αντιδρώντος. Αν ακολουθήσει το ποιόν (γεν. του ποιού) θα πρέπει να γίνει: το αντιδρόν – του αντιδρού (αποκλείεται τέτοια επέμβαση...).

Μια απλοποίηση θα ήταν να γράφεται με ο και να κλίνεται: το αντιδρόν – του αντιδρόντος (κατά τα: ιόν – ιόντος, ανιόν – ανιόντος, προϊόν – προϊόντος); Αλλά, όμως, δεν μπορούμε να το δούμε αποσπασματικά και μεμονωμένα. Τι θα γίνει με την αντιδρώσα; Εφόσον χρησιμοποιούνται ακόμα οι μετοχές αυτές, δεν υπάρχει δυνατότητα αλλαγής. Χρησιμοποιούμε ακόμα την μετοχή: ζων, ζώσα, ζων και τη μετοχή: κυβερνών, κυβερνώσα, κυβερνών (το κυβερνών κόμμα). Και στη φυσική, ανακλών, ανακλώσα, ανακλών (ανακλώσα επιφάνεια) και διαθλών, διαθλώσα, διαθλών κ.ά

8

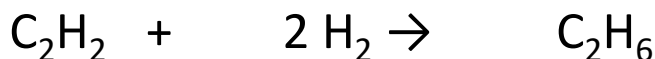
8

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

20.0 kmol/h ακετυλενίου (C_2H_2) και 50.0 kmol/h H_2 τροφοδοτούνται σε ένα αντιδραστήρα: $C_2H_2 + 2 H_2 \rightarrow C_2H_6$ Ποιο είναι το περιοριστικό αντιδρών; Ποιο είναι το αντιδρών σε περίσσεια; Περίσσεια %;

ΛΥΣΗ

Βάση υπολογισμών 1h



1 mol 2 mol

20 kmol $\frac{2}{1} \cdot 20 \text{ kmol} = 40 \text{ kmol}$

Στοιχειομετρικά απαιτούμενα ($n_{stoichiometric}$)

20 kmol 50 kmol

Διατίθενται (τροφοδοσία) (n_{feed})



C_2H_2

Περιοριστικό
αντιδρών
(limiting
reactant)



H_2

Αντιδρών σε
περίσσεια
(excess
reactant)

Περίσσεια (H_2)

$$\frac{n_{\text{ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ}} - n_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ}}}{n_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ}}} = \frac{50 - 40}{40} = 0.25 = 25\%$$

9

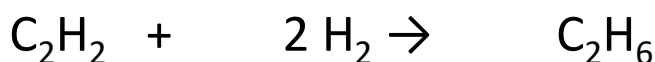
9

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

20.0 kmol/h ακετυλενίου (C_2H_2) και 50.0 kmol/h H_2 τροφοδοτούνται σε ένα αντιδραστήρα: $C_2H_2 + 2 H_2 \rightarrow C_2H_6$ Ποιο είναι το περιοριστικό αντιδρών; Ποιο είναι το αντιδρών σε περίσσεια; Περίσσεια %;

ΛΥΣΗ

Βάση υπολογισμών 1h



1 mol 2 mol

$\frac{1}{2} \cdot 50 = 25 \text{ kmol}$ 50 kmol

Στοιχειομετρικά απαιτούμενα ($n_{stoichiometric}$)

20 kmol 50 kmol

Διατίθενται (τροφοδοσία) (n_{feed})



C_2H_2

Περιοριστικό
αντιδρών
(limiting
reactant)



H_2

Αντιδρών σε
περίσσεια
(excess
reactant)

Και αν αντί να τσεκάρω με βάση το C_2H_2 δοκίμαζα με το H_2 ;

10

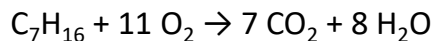
10

ΜΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3



80 g C_7H_{16} αντιδρούν με 480 g O_2 σύμφωνα με την αντίδραση:



Ποιο είναι το περιοριστικό αντιδρών;

Ποιο είναι το αντιδρών σε περίσσεια;

Πόση είναι η % περίσσεια;

Για πλήρη αντίδραση, πόσα g CO_2 και H_2O θα παραχθούν και τι υπάρχει (mol %) στο προϊόν;



Hint:

- *Don't panic, too many questions, too little time*
- *Οι πρώτες τρεις ερωτήσεις είναι παρόμοιες με το προηγούμενο παράδειγμα, απλά μάλλον πρέπει να μετατρέψουμε τα g σε moles*
- *Για την τελευταία ερώτηση ας βγάλουμε πρώτα άκρη με στοιχειομετρικές και moles και βλέπουμε...*

11

11

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3

80 g C_7H_{16} αντιδρούν με 480 g O_2 σύμφωνα με την αντίδραση: $C_7H_{16} + 11 O_2 \rightarrow 7 CO_2 + 8 H_2O$
 Ποιο είναι το περιοριστικό αντιδρών; Ποιο είναι το αντιδρών σε περίσσεια; Πόση είναι η % περίσσεια;

ΛΥΣΗ

Βήμα 1: Μετατροπή g σε moles

$$C_7H_{16} \quad 80g = 80g \frac{1 \text{ mol}}{100 \text{ g}} = 0.80 \text{ mol}$$

$$O_2 \quad 480g = 480g \frac{1 \text{ mol}}{32 \text{ g}} = 15.0 \text{ mol}$$

Βήμα 2: Check περιοριστικό αντιδρών / αντιδρών σε περίσσεια

$$\text{Στοιχειομετρική αναλογία} \frac{O_2}{C_7H_{16}} = \frac{11}{1} = \mathbf{11} < \frac{15}{0.8} = \mathbf{18.8} \quad \text{Διατιθέμενη αναλογία}$$

O_2 είναι αντιδρών σε **περίσσεια**
 C_7H_{16} **περιοριστικό αντιδρών**

Περίσσεια (O_2)

$$\frac{n_{\text{ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ } O_2} - n_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ } O_2}}{n_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ } O_2}} = \frac{15.0 - (11 \cdot 0.8)}{11 \cdot 0.8} = 0.705 = \mathbf{70.5\%}$$

12

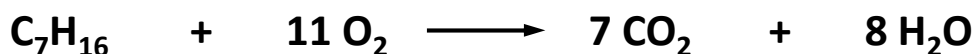
12

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3

Για πλήρη αντίδραση, πόσα g CO₂ και H₂O θα παραχθούν και τι υπάρχει (mol %) στο προϊόν;

Βήμα 3: Μετατροπή moles σε g

Προφανώς του περιοριστικού αντιδρώντος (ήτοι C₇H₁₆)



Αντιδρούν & παράγονται	0.8 mol 80g	$\frac{11}{1} \cdot 0.8 = 8.8 \text{ mol}$ $8.8 \cdot 32 = 281.6 \text{ g}$	$\frac{7}{1} \cdot 0.8 = 5.6 \text{ mol}$ $5.6 \cdot 44 = 246.4 \text{ g}$	$\frac{8}{1} \cdot 0.8 = 6.4 \text{ mol}$ $6.4 \cdot 18 = 115.2 \text{ g}$
Θα υπάρχουν στο «προϊόν»	0 mol 0 g	15.0 – 8.8 = 6.2 mol 480 – 281.6 = 198.4 g	5.6 mol 246.4 g	6.4 mol 115.2 g
Προϊόν (mol %)	Σύνολο moles = 6.2 + 5.6 + 6.4 = 18.2 mol $\frac{6.2}{18.2} = 0.341 = 34.1 \%$ $\frac{5.6}{18.2} = 0.308 = 30.8 \%$ $\frac{6.4}{18.2} = 0.351 = 35.1 \%$			

13

13

ΒΑΘΜΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ**Βαθμός μετατροπής:**

Είναι το κλάσμα της τροφοδοσίας (ή ενός υλικού της τροφοδοσίας) που μετατρέπεται σε προϊόντα:

$$f = \frac{\text{mol}_{\text{reacted}}}{\text{mol}_{\text{fed}}}$$

Όταν ο βαθμός μετατροπής αναφέρεται σε περιοριστικό αντιδρών, τότε ορίζεται ως **βαθμός μετατροπής της αντίδρασης**

14

14

ΑΠΟΔΟΣΗ

Απόδοση: Υπάρχουν πολλοί ορισμοί.

- Ο λόγος των mol (ή της μάζας) του επιθυμητού τελικού προϊόντος προς τα mol (ή τη μάζα) του βασικού αντιδρώντος (συνήθως του περιοριστικού) στην τροφοδοσία (Σημ.: έχει τη μεγαλύτερη εφαρμογή)
- Ο λόγος των mol (ή της μάζας) του επιθυμητού τελικού προϊόντος προς τα mol (ή τη μάζα) του βασικού αντιδρώντος (συνήθως του περιοριστικού) που καταναλώνεται (Σημ. είναι ο λόγος των στοιχειομετρικών συντελεστών).
- Ο λόγος των mol (ή της μάζας) του επιθυμητού τελικού προϊόντος που λαμβάνεται προς τη θεωρητική ποσότητα που θα λαμβανόταν για 100% μετατροπή (Σημ.: ουσιαστικά είναι ο βαθμός μετατροπής της αντίδρασης – μικρότερη εφαρμογή)

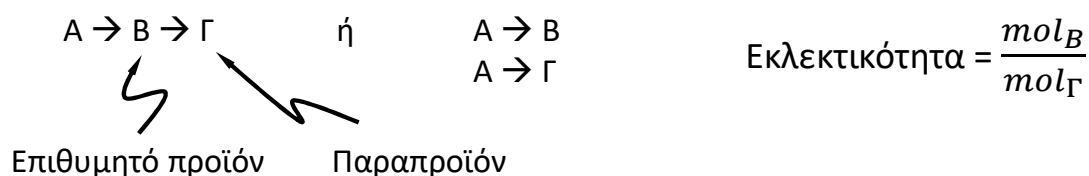
15

15

ΕΚΛΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Εκλεκτικότητα:

Ορίζεται ως το κλάσμα των moles ενός συγκεκριμένου προϊόντος προς τα moles ενός άλλου προϊόντος (συνήθως μη επιθυμητού – παραπροϊόν).



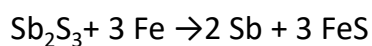
16

16

ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ – ΑΠΟΔΟΣΗ – ΕΚΛΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

HIM.5.2.12


Το αντιμόνιο (Sb) παράγεται με θέρμανση αντιμονίτη (Sb_2S_3) με σκραπ σιδήρου και απομάκρυνση του λιωμένου Sb από τον πυθμένα του αντιδραστήρα:



Θερμαίνονται μαζί 600 kg Sb_2S_3 και 250 kg Fe και παράγονται 200 kg Sb.

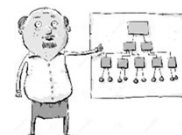
- (α) Ποιο είναι το περιοριστικό αντιδρών;
- (β) % περίσσεια του αντιδρώντος σε περίσσεια;
- (γ) Βαθμός μετατροπής (κλάσμα) αντίδρασης;
- (δ) Βαθμός μετατροπής (%) με βάση το Sb_2S_3 ;
- (ε) Απόδοση σε kg Sb/kg Sb_2S_3 (τροφοδοσίας);

Hint:

- Μήπως είναι καλό να φτιάξουμε ένα διάγραμμα ροής της διαδικασίας;
- Καλό είναι να δουλέψουμε με mol, δηλ. ας μετατρέψουμε kg σε mol

17

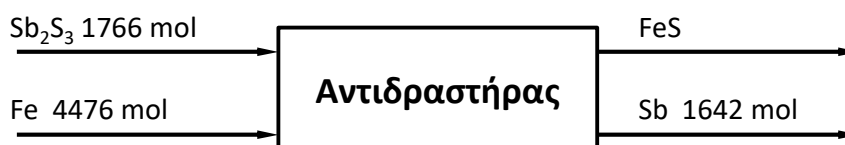
17

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

Βήμα 1:

Μετατροπή kg σε mol και διάγραμμα ροής



Χημική ένωση	m (kg)	M_i (g/mol)	mol
Sb_2S_3	600	339.7	1766
Fe	250	55.85	4476
Sb	200	121.8	1642
FeS	-	87.91	

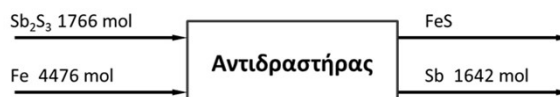


18

18

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4**Βήμα 2:**

Περιοριστικό αντιδρών;

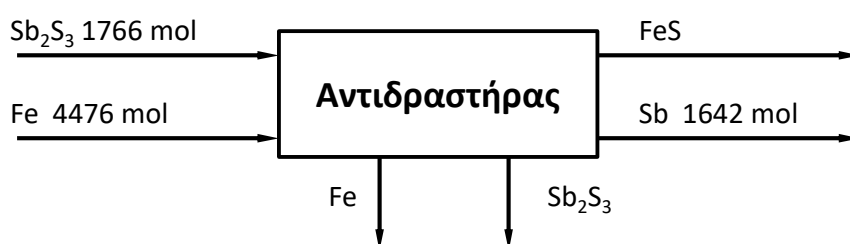


Στοιχειομετρική αναλογία: $\left(\frac{\text{Fe}}{\text{Sb}_2\text{S}_3}\right)_{\text{στοιχ.}} = \frac{3}{1} = 3$

Παρεχόμενη (feed) αναλογία: $\left(\frac{\text{Fe}}{\text{Sb}_2\text{S}_3}\right)_{\text{feed.}} = \frac{4476}{1766} = 2.53$

⇒ Fe = Περιοριστικό αντιδρών
⇒ Sb₂S₃ σε περίσσεια

- Καθώς έχουμε περίσσεια Sb₂S₃ κάποια moles σίγουρα θα περισσέψουν
- **Επίσης, επειδή δεν είμαστε σίγουροι ότι αντιδρούν όλα τα αντιδρώντα, πιθανά να περισσέψει ΚΑΙ Fe**



19

19

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4**Βήμα 3:**

% περίσσεια του αντιδρώντος σε περίσσεια;



$$\% \text{ Περίσσεια του Sb}_2\text{S}_3 = \frac{n_{\text{τροφ.}} - n_{\text{στοιχ.αντιμονιτη}}}{n_{\text{στοιχ.αντιμονιτη}}} \quad (1)$$

Ερώτηση: Ναι, αλλά πόσο θα είναι το $n_{\text{στοιχ.}}$;Απάντηση: **Θα είναι τα mol εκείνα που χρειάζονται για να αντιδράσουν πλήρως ΜΕ ΟΛΗ ΤΗΝ ΠΟΣΟΤΗΤΑ (4476 mol) του Fe (το περιοριστικό αντιδρών)**

Σύμφωνα με την στοιχειομετρία: $\frac{\text{mol}_{\text{Sb}_2\text{S}_3}}{\text{mol}_{\text{Fe}}} = \frac{1}{3} = \frac{n_{\text{στοιχ.αντ}}}{4476} \Rightarrow n_{\text{στοιχ.αντ}} = 1492 \text{ mol}$

$$(1) \Rightarrow \% \text{ περίσσεια Sb}_2\text{S}_3 = \frac{n_{\text{τροφ.}} - n_{\text{στοιχ.αντιμονιτη}}}{n_{\text{στοιχ.αντιμονιτη}}} = \frac{1766 - 1492}{1492} = 0.184 = 18.4\%$$

20

20

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4**Βήμα 4:**

Κλάσμα (βαθμός) μετατροπής
[με βάση το περ. αντιδρών ήτοι το Fe]



$$f_{\text{Fe}} = \frac{\text{mol}_{\text{reacted}}}{\text{mol}_{\text{fed}}} = \frac{\text{mol Fe που αντιδρούν}}{\text{mol Fe τροφοδοσίας}} \quad (2)$$

Ερώτηση: Ναι, αλλά πόσο θα είναι το $n_{\text{Fe, reacted}}$, δηλαδή αυτά που τελικά αντέδρασαν;

Απάντηση: Θα είναι τα mol εκείνα που αντιδρούν, βάσει στοιχειομετρίας, έτσι ώστε να δώσουν την ποσότητα Sb που αναφέρεται ως παραγόμενη (1642 mol)

$$\text{Σύμφωνα με την στοιχειομετρία: } \frac{\text{mol}_{\text{Sb}}}{\text{mol}_{\text{Fe}}} = \frac{2}{3} = \frac{n_{\text{Sb, παραγ.}}}{n_{\text{Fe, reacted}}} = \frac{1642}{n_{\text{Fe, reacted}}} \Rightarrow n_{\text{Fe, reacted}} = 2463 \text{ mol}$$

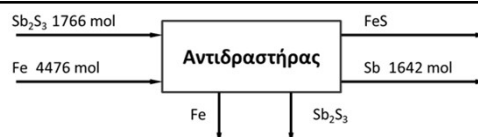
$$(2) \Rightarrow f_{\text{Fe}} = \frac{\text{mol Fe που αντιδρούν}}{\text{mol Fe τροφοδοσίας}} = \frac{2463}{4476} = 0.55 = 55\%$$

21

21

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4**Βήμα 5:**

Βαθμός μετατροπής (%) με βάση το Sb_2S_3



$$f_{\text{αντιμονιτη}} = \frac{\text{mol}_{\text{reacted}}}{\text{mol}_{\text{fed}}} = \frac{\text{mol αντιμονιτη που αντιδρούν}}{\text{mol αντιμονιτη τροφοδοσίας}} \quad (3)$$

Ερώτηση: Άντε πάλι!!! πόσο θα είναι το $n_{\text{αντιμονιτη, reacted}}$, που τελικά αντέδρασε;

Απάντηση: Θα είναι τα mol εκείνα που αντιδρούν, βάσει στοιχειομετρίας, έτσι ώστε να δώσουν την ποσότητα Sb που αναφέρεται ως παραγόμενη (1642 mol)

$$\text{Σύμφωνα με την στοιχειομετρία: } \frac{\text{mol}_{\text{Sb}}}{\text{mol}_{\text{Sb}_2\text{S}_3}} = \frac{2}{1} = \frac{n_{\text{Sb, παραγ.}}}{n_{\text{Sb}_2\text{S}_3, \text{reacted}}} = \frac{1642}{n_{\text{Sb}_2\text{S}_3, \text{reacted}}} \Rightarrow n_{\text{Sb}_2\text{S}_3, \text{reacted}} = 821 \text{ mol}$$

$$(3) \Rightarrow f_{\text{αντιμονιτη}} = \frac{\text{mol αντιμονιτη που αντιδρούν}}{\text{mol αντιμονιτη τροφοδοσίας}} = \frac{821}{1766} = 0.465 = 46.5\%$$

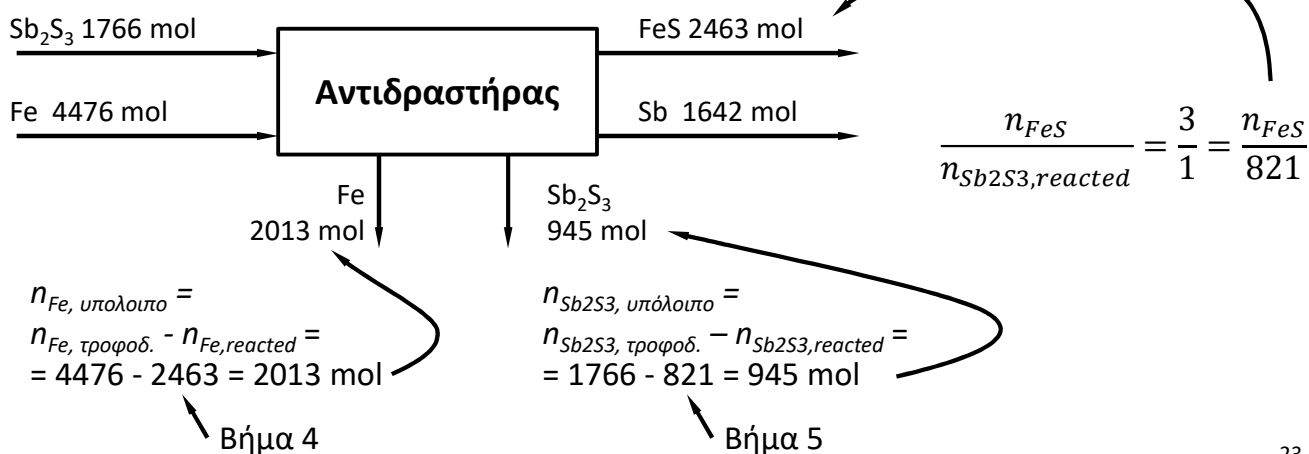
22

22

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

Βήμα 6:

Ας κάνουμε μια σούμα (σε mol)
να δούμε που είμαστε (προαιρετικό)



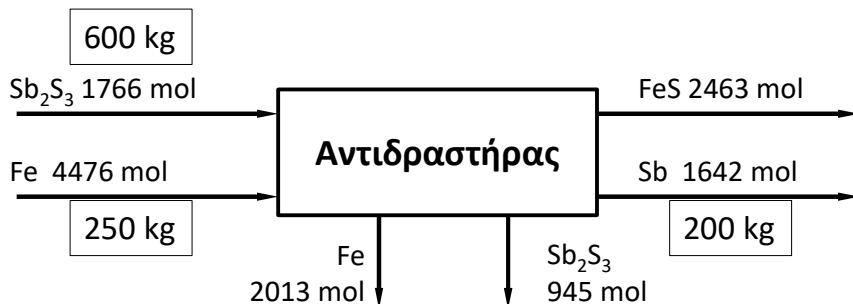
23

23

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

Βήμα 7:

Απόδοση σε kg Sb/kg Sb_2S_3 (τροφοδοσίας)



$$\text{Απόδοση} = \frac{200 \text{ kg Sb}}{600 \text{ kg Sb}_2\text{S}_3} = \frac{1}{3} = 0.33 \text{ kg Sb / kg Sb}_2\text{S}_3$$

24

24

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

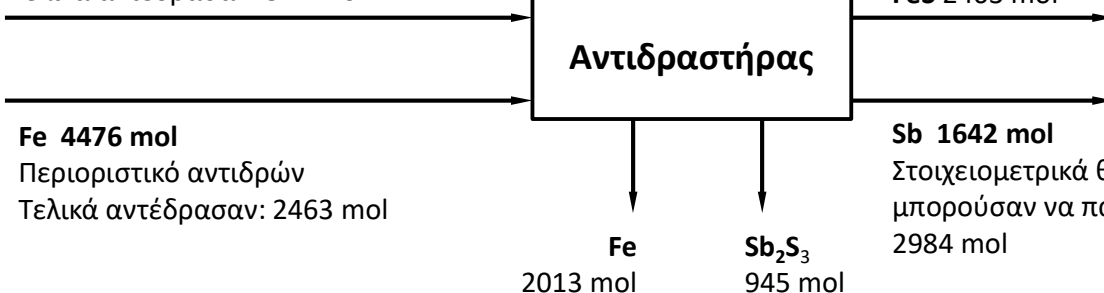


Sb₂S₃ 1766 mol

Σε περίσσεια

Στοιχειομετρικά απαιτούνταν: 1492 mol

Τελικά αντέδρασαν: 821 mol



Μαύρα στοιχεία: Ότι πραγματικά τροφοδοτήθηκε – εξήλθε από τον αντιδραστήρα
Κόκκινα στοιχεία: Πληροφοριακά στοιχεία

25

25

ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – ΑΤΕΛΕΙΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

Έκταση αντίδρασης:

- Η έκταση της αντίδρασης είναι μια βοηθητική παράμετρος η οποία σε συνδυασμό με τους στοιχειομετρικούς συντελεστές μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τις ποσότητες των προϊόντων – αντιδρώντων σε μια χημική αντίδραση (όπου συνήθως δεν καταναλώνεται όλη η ποσότητα των αντιδρώντων, δηλαδή μετατροπή ΟΧΙ 100%)
- Συμβολίζεται με το γράμμα ξ
- Μετριέται σε mol ή mol/h ή
- **Δηλώνει πόσα mol (ή mol/h) ενός αντιδρώντος έχουν αντιδράσει.** Με βάση τη στοιχειομετρία υπολογίζονται σε συνάρτηση του ξ:
 - ❖ οι ποσότητες των υπολοίπων αντιδρώντων που αντέδρασαν και
 - ❖ οι ποσότητες των προϊόντων που έχουν παραχθεί

26

26

ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – ΑΤΕΛΕΙΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

Για μια ένωση ή στοιχείο (i) που συμμετέχει σε μια χημική αντίδραση ισχύει το ισοζύγιο μάζας χημικής ένωσης σε **μόνιμη κατάσταση**, ήτοι:



με άλλα λόγια δηλαδή:

$$n_i = n_{i,0} (\pm) \nu_i \cdot \xi$$

όπου n_i mol της χημικής ένωσης (i) στο ΤΕΛΟΣ της αντίδρασης
 $n_{i,0}$ mol της χημικής ένωσης (i) ΠΡΙΝ την αντίδραση (δηλ. τροφοδοσία)
 ν_i στοιχειομετρικός συντελεστής της χημ. ένωσης (i) στην αντίδραση
 ξ έκταση της αντίδρασης (mol)

27

27

ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – ΑΤΕΛΕΙΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι έχουμε την γενική αντίδραση (βλ. Παράδειγμα 7):



Για την οποία μας δίνονται αρχικές και τελικές τιμές για τα n_i (ή $\dot{n}_i$ αν πρόκειται για ρυθμούς). Τότε, σύμφωνα με τον ορισμό της έκτασης της αντίδρασης $n_i = n_{i,0} \pm \nu_i \cdot \xi$ θα έχουμε τα ακόλουθα:

$$n_A = n_{A,0} - a \cdot \xi_A \quad (1^*)$$

$$n_B = n_{B,0} - b \cdot \xi_B \quad (2^*)$$

$$n_\Gamma = n_{\Gamma,0} - c \cdot \xi_\Gamma \quad (3^*)$$

$$n_D = n_{D,0} + d \cdot \xi_D \quad (4^*)$$

$$n_E = n_{E,0} + e \cdot \xi_E \quad (5^*)$$

Όπου όμως, $\xi_A = \xi_B = \xi_\Gamma = \xi_D = \xi_E = \xi$ καθώς η έκταση της αντίδρασης είναι κοινή για όλα τις συμμετέχουσες ενώσεις.

Δηλαδή τα moles των συμμετεχόντων ενώσεων αυξάνονται ή μειώνονται βάσει μιας κοινής τιμής moles, πολλαπλασιασμένη με τον εκάστοτε στοιχειομετρικό συντελεστή με το σωστό πρόσημο (+ αν είναι προϊόν, ή – αν είναι αντιδρών)

28

28

ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – ΑΤΕΛΕΙΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

Άρα, η ορθή αναγραφή (και επίλυση μέσω έκτασης αντίδρασης) είναι η ακόλουθη:

$$n_i = n_{i,0} \pm \nu_i \cdot \xi$$

$$n_A = n_{A,0} - a \cdot \xi \quad (1)$$

$$n_B = n_{B,0} - b \cdot \xi \quad (2)$$

$$n_{\Gamma} = n_{\Gamma,0} - c \cdot \xi \quad (3)$$

$$n_{\Delta} = n_{\Delta,0} + d \cdot \xi \quad (4)$$

$$n_E = n_{E,0} + e \cdot \xi \quad (5)$$

29

29

ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – $\xi_{\max}$

Υπάρχει, όμως, και η έννοια της **μέγιστης έκτασης της αντίδρασης, για κάθε συμμετέχουσα ουσία**.

$\xi_{i, \max}$ είναι η έκταση της αντίδρασης αναφορικά με το συστατικό i, αν όλη η διαθέσιμη ποσότητα αυτού αντιδρούσε πλήρως, δηλαδή (για το προηγούμενο παράδειγμά μας):

$$0 = n_{A,0} - a \cdot \xi_{A, \max} \quad (6^*) \quad \Leftrightarrow \quad \xi_{A, \max} = \frac{0 - n_{A,0}}{-a}$$

$$0 = n_{B,0} - b \cdot \xi_{B, \max} \quad (7^*) \quad \Leftrightarrow \quad \xi_{B, \max} = \frac{0 - n_{B,0}}{-b}$$

$$0 = n_{\Gamma,0} - c \cdot \xi_{\Gamma, \max} \quad (8^*) \quad \Leftrightarrow \quad \xi_{\Gamma, \max} = \frac{0 - n_{\Gamma,0}}{-c}$$

Περιοριστικό αντιδρών είναι αυτό με το μικρότερο $\xi_{\max}$
Ναι αλλά γιατί;

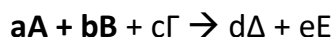
30

30

ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – $\xi_{\max}$

Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να ελέγξουμε μεταξύ του Α και του Β ποιο είναι το περιοριστικό αντιδρών, και ας υποθέσουμε ότι $\xi_{A,\max} > \xi_{B,\max}$

$$\xi_{A,\max} = \frac{0-n_{A,0}}{-a} > \xi_{B,\max} = \frac{0-n_{B,0}}{-b} \Rightarrow \frac{b}{a} \cdot n_{A,0} > n_{B,0} \quad (1)$$



Όμως, η ποσότητα $\frac{b}{a} \cdot n_{A,0}$ είναι τα **mole B** που **απαιτούνται για να αντιδράσουν πλήρως τα $n_{A,0}$** αλλά σύμφωνα με την (1) τα διαθέσιμα mol B ($n_{B,0}$) δεν επαρκούν!

Επομένως, συγκριτικά, το συστατικό B είναι σε «έλλειψη» και άρα (μεταξύ τους) το B είναι το περιοριστικό αντιδρών.

31

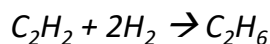
31

ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – ΑΤΕΛΕΙΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5



Έχουμε 20.0 kmol/h ακετυλενίου (C_2H_2), 50.0 kmol/h H_2 και 50.0 kmol αιθανίου C_2H_6 και ύστερα από κάποιο χρόνο αντιδρούν 30.0 kmol H_2 . Χρησιμοποιώντας την έννοια της έκτασης της αντίδρασης, υπολογίστε την ποσότητα των αντιδρώντων και προϊόντων σε αυτόν τον χρόνο.

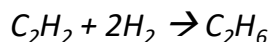


Hint:

- Τροποποίηση του παραδείγματος 2.
- Εκεί είχαμε λύσει το «υπαρξιακό» πρόβλημα ποιο ήταν το περιοριστικό αντιδρών (C_2H_2) και ποιο το αντιδρών σε περίσσεια (H_2)
- Το εύλογο ερώτημα, βέβαια, αφορά στο αν η αντίδραση είναι ατελής. Στο παράδειγμα 2 είχαμε βρει ότι η στοιχειομετρική αναλογία του H_2 για πλήρη κατανάλωση του ακετυλενίου ήταν 40kmol.
→ η αντίδραση είναι ατελής

32

32

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

Υπολογισμός της έκτασης της αντίδρασης (ξ) με βάση το H_2

$$n_{\text{H}_2} = n_{\text{H}_2,0} \pm \nu_{\text{H}_2} \cdot \xi \Rightarrow \xi = \frac{n_{\text{H}_2} - n_{\text{H}_2,0}}{\nu_{\text{H}_2}} \quad (1)$$

από τα οποία ξέρουμε το $n_{\text{H}_2,0} = 50 \text{ kmol}$, το $\nu_{\text{H}_2} = -2$ (αντιδρών), άρα πρέπει να βρούμε το n_{H_2} δηλ. την ποσότητα μετά από χρόνο t .

$$n_{\text{H}_2} = n_{\text{αρχικό}} - n_{\text{αντέδρασε}} = 50 - 30 = 20 \text{ kmol},$$

$$\text{οπότε } \xi = \frac{n_{\text{H}_2} - n_{\text{H}_2,0}}{\nu_{\text{H}_2}} = \frac{20 - 50}{-2} = \frac{-30}{-2} = 15 \text{ kmol}$$

Επομένως:

$$\begin{aligned} n_{\text{H}_2} &= n_{\text{H}_2,0} - 2 \cdot \xi = 50 - 2 \cdot 15 = 20 \text{ kmol} \quad (\text{σημ. αν και το είχαμε ήδη υπολογίσει}) \\ n_{\text{C}_2\text{H}_2} &= n_{\text{C}_2\text{H}_2,0} - 1 \cdot \xi = 20 - 1 \cdot 15 = 5 \text{ kmol} \\ n_{\text{C}_2\text{H}_6} &= n_{\text{C}_2\text{H}_6,0} + 1 \cdot \xi = 50 + 1 \cdot 15 = 65 \text{ kmol} \end{aligned}$$

Ερώτηση: Γιατί με βάση το H_2 και όχι με βάση το C_2H_2 ;

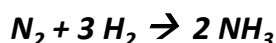
Απάντηση: Γιατί για το H_2 μας δίνονται δεδομένα για χρόνο t

33

33

ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – ΑΤΕΛΕΙΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6**

Έστω ότι έχουμε την παραγωγή αμμωνίας



με αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας με τροφοδοσία 100 mol/s N_2 , 300 mol/s H_2 και 1 mol/s Ar (αδρανές αέριο). Να υπολογίσετε τις ροές των προϊόντων αν ο βαθμός μετατροπής του H_2 είναι 0.60 (δηλ. 60%):

- με χρήση της έκτασης της αντίδρασης ξ
- μέσω ατομικών ισοζυγίων
- μέσω της στοιχειομετρίας της αντίδρασης (δηλ. όπως Παράδειγμα 1)



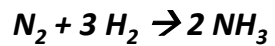
Hint:

- *Don't panic.* Δεν βοηθάει ποτέ
- Αντίθετα, ο βαθμός μετατροπής του H_2 υποδεικνύει ατελή αντίδραση
- Προφανώς, στα «προϊόντα» θα έχουμε υπολειπόμενο H_2
- Πιθανά να βοηθήσει να σχεδιάσουμε το διάγραμμα ροής

34

34

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6



Έστω ότι έχουμε την παραγωγή αμμωνίας με αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας με τροφοδοσία 100 mol/s N_2 , 300 mol/s H_2 και 1 mol/s Ar (αδρανές αέριο). Να υπολογίσετε τις ροές των προϊόντων αν ο βαθμός μετατροπής του H_2 είναι 0.60 (δηλ. 60%):

Βήμα 1:

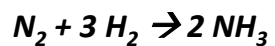
Διάγραμμα ροής



35

35

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6

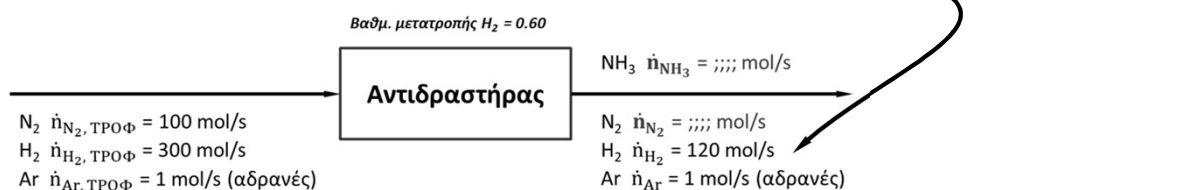
**Βήμα 2:**

Τι μπορούμε, άραγε, να υπολογίσουμε από τον βαθμό μετατροπής $f = \frac{\text{mol}_{\text{reacted}}}{\text{mol}_{\text{fed}}}$ του H_2 ;

$$f_{H_2} = 0.60 = \frac{\text{mol}_{H_2} \text{αντεδρασσαν}}{\text{mol}_{H_2} \text{τροφοδοσιας}} = \frac{\text{mol}_{H_2} \text{τροφοδοσιας} - \text{mol}_{H_2} \text{που ΔΕΝ αντεδρασσαν}}{\text{mol}_{H_2} \text{τροφοδοσιας}} = \frac{\dot{n}_{H_2, \text{τροφ}} - \dot{n}_{H_2}}{\dot{n}_{H_2, \text{τροφ}}} =$$

$$= \frac{300 - \dot{n}_{H_2}}{300} \Rightarrow \dot{n}_{H_2} = 120 \text{ mol/s}$$

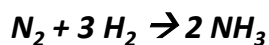
Άρα το διάγραμμα ροής επικαιροποιείται ως εξής:



36

36

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6

**Βήμα 3:**

(α) Υπολογισμοί μέσω έκτασης αντίδρασης

$$n_i = n_{i,0} \pm \nu_i \cdot \xi \quad \Leftrightarrow$$

$$\dot{n}_{N_2} = \dot{n}_{N_2, \text{τροφ}} - 1 \cdot \dot{\xi} \quad \Leftrightarrow \dot{n}_{N_2} = 100 - \dot{\xi} \quad [\text{mol/s}] \quad (1)$$

$$\dot{n}_{H_2} = \dot{n}_{H_2, \text{τροφ}} - 3 \cdot \dot{\xi} = \quad \Leftrightarrow 120 = 300 - 3 \cdot \dot{\xi} \quad [\text{mol/s}] \quad (2)$$

$$\dot{n}_{NH_3} = \dot{n}_{NH_3, \text{τροφ}} + 2 \cdot \dot{\xi} \quad \Leftrightarrow \dot{n}_{NH_3} = 0 + 2 \cdot \dot{\xi} \quad [\text{mol/s}] \quad (3)$$

$$\dot{n}_{Ar} = 1 \text{ mol/s}$$

$$(2) \Leftrightarrow \dot{\xi} = 60 \text{ mol/s}$$

$$(1) \Leftrightarrow \dot{n}_{N_2} = 100 - 60 = 40 \text{ mol/s}$$

$$(3) \Leftrightarrow \dot{n}_{NH_3} = 2 \cdot 60 = 120 \text{ mol/s}$$

Βαθμ. μετατροπής $H_2 = 0.60$

Αντιδραστήρας

N_2 $\dot{n}_{N_2, \text{τροφ}} = 100 \text{ mol/s}$
 H_2 $\dot{n}_{H_2, \text{τροφ}} = 300 \text{ mol/s}$
 Ar $\dot{n}_{Ar, \text{τροφ}} = 1 \text{ mol/s}$ (αδρανές)

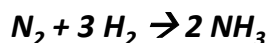
 NH_3 $\dot{n}_{NH_3} = ;;; \text{ mol/s}$

N_2 $\dot{n}_{N_2} = ;;; \text{ mol/s}$
 H_2 $\dot{n}_{H_2} = 120 \text{ mol/s}$
 Ar $\dot{n}_{Ar} = 1 \text{ mol/s}$ (αδρανές)

37

37

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6

**Βήμα 4:**(β) Υπολογισμοί μέσω ατομικών ισοζυγίων**Ισοζύγιο N**

$$N_{IN} = N_{OUT} \text{ δηλαδή } N_{\text{στο } N_2 \text{ ΤΡΟΦ}} = N_{\text{στο } N_2 \text{ ΕΞΟΔ}} + N_{\text{στην } NH_3 \text{ ΕΞΟΔ}}$$

$$\begin{aligned} \text{Άρα υπό μορφή ροών:} \quad 2 \cdot \dot{n}_{N_2, \text{τροφ}} &= 2 \cdot \dot{n}_{N_2} + 1 \cdot \dot{n}_{NH_3} \Leftrightarrow \\ 2 \cdot 100 &= 2 \cdot \dot{n}_{N_2} + 1 \cdot \dot{n}_{NH_3} \end{aligned} \quad (4)$$

Ισοζύγιο H

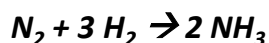
$$H_{IN} = H_{OUT} \text{ δηλαδή } H_{\text{στο } H_2 \text{ ΤΡΟΦ}} = H_{\text{στο } H_2 \text{ ΕΞΟΔ}} + H_{\text{στην } NH_3 \text{ ΕΞΟΔ}}$$

$$\begin{aligned} \text{Άρα υπό μορφή ροών:} \quad 2 \cdot \dot{n}_{H_2, \text{τροφ}} &= 2 \cdot \dot{n}_{H_2} + 3 \cdot \dot{n}_{NH_3} \Leftrightarrow \\ 2 \cdot 300 &= 2 \cdot 120 + 3 \cdot \dot{n}_{NH_3} \Leftrightarrow \dot{n}_{NH_3} = 120 \text{ mol/s} \\ (4) \Leftrightarrow \dot{n}_{N_2} &= 40 \text{ mol/s} \end{aligned}$$

38

38

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6



Βήμα 4:

(γ) μέσω της στοιχειομετρίας της αντίδρασης



[mol/s]	N_2	+	3H_2	→	2NH_3
Στοιχειομετρική αναλογία	1		3		2
Είσοδος	100		300		-
Έξοδος	$\dot{n}_{\text{N}_2}$		$\dot{n}_{\text{H}_2} = 120$		$\dot{n}_{\text{NH}_3}$
Αντιδρούν ή παράγονται	$100 - \dot{n}_{\text{N}_2}$		$300 - 120 = 180$ ($= f_{\text{H}_2} \cdot 300$)		$\dot{n}_{\text{NH}_3}$
Στοιχειομετρική αναλογία βάσει του H_2	$\frac{\text{N}_2}{\text{H}_2} = \frac{1}{3} = \frac{100 - \dot{n}_{\text{N}_2}}{180}$ $\Rightarrow \dot{n}_{\text{N}_2} = 40 \text{ mol/s}$				$\frac{\text{NH}_3}{\text{H}_2} = \frac{2}{3} = \frac{\dot{n}_{\text{NH}_3}}{180}$ $\Rightarrow \dot{n}_{\text{NH}_3} = 120 \text{ mol/s}$

39

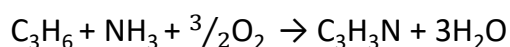
39

ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – ΒΑΘΜΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ – ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



Το ακρυλονιτρίλιο ($\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$) παράγεται σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση και επιτυγχάνεται μια μετατροπή 30.0% του περιοριστικού αντιδρώντος.



Η τροφοδοσία έχει σύσταση: 10.0% mol προπυλένιο, 12.0% mol αμμωνία και 78% mol αέρα. Θεωρείστε σύσταση αέρα 21% O_2 και 79% N_2 . Με βάση 100 mol τροφοδοσίας, βρείτε τα ακόλουθα:

- Περιοριστικό αντιδρών
- Περίσσεια υπολοίπων αντιδρώντων
- Σύσταση του προϊόντος.

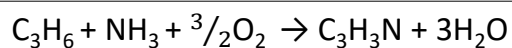
Hint:

- *Don't panic.* Αν χρειαστεί, κάντε..... αέρα ☺
- Αφού δίνεται βαθμός μετατροπής μιλάμε για ατελή αντίδραση
- Στο «προϊόν» θα έχουμε σχεδόν τα πάντα, *think about it*

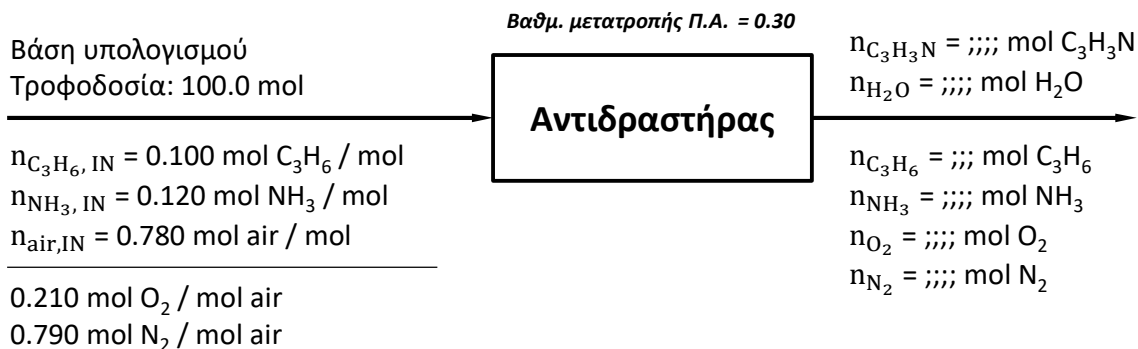


40

40

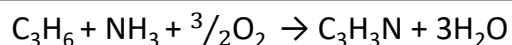
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**Βήμα 1:**

Διάγραμμα ροής

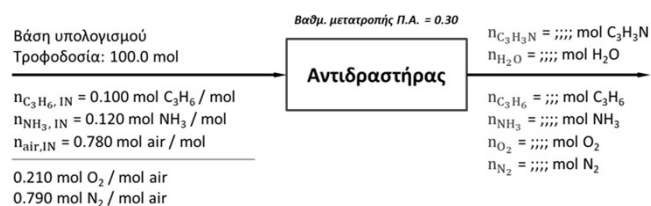


41

41

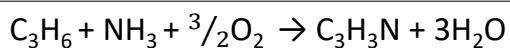
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**Βήμα 2:**

Σύσταση εισόδου

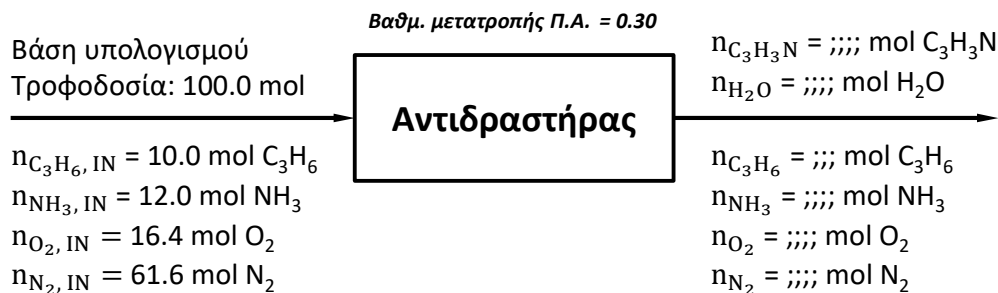


42

42

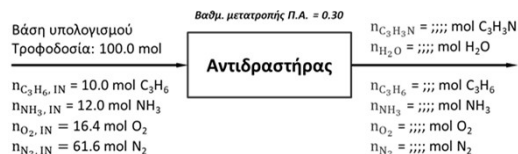
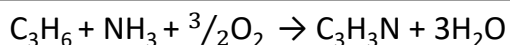
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**Βήμα 2:**

Διάγραμμα ροής
(επικαιροποιημένο)



43

43

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**Βήμα 3:**

(α) Περιοριστικό αντιδρών (1ος τρόπος)

$$\left(\frac{n_{\text{NH}_3}}{n_{\text{C}_3\text{H}_6}} \right)_{\text{ΣΤΟΙΧ}} = \frac{1}{1} = 1.0$$

$$\left(\frac{n_{\text{NH}_3}}{n_{\text{C}_3\text{H}_6}} \right)_{\text{IN}} = \frac{12}{10} = 1.2$$

$$\left(\frac{n_{\text{O}_2}}{n_{\text{C}_3\text{H}_6}} \right)_{\text{ΣΤΟΙΧ}} = \frac{3/2}{1} = 1.5$$

$$\left(\frac{n_{\text{O}_2}}{n_{\text{C}_3\text{H}_6}} \right)_{\text{IN}} = \frac{16.4}{10} = 1.64$$

1.2 (IN) > 1.0 (ΣΤΟΙΧ) $\Rightarrow$ NH_3 σε περίσσεια



Περιοριστικό αντιδρών είναι το **προπυλένιο C_3H_6**

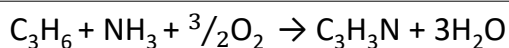


1.64 (IN) > 1.5 (ΣΤΟΙΧ) $\Rightarrow$ O_2 σε περίσσεια

44

44

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



Βήμα 3:

(α) Περιοριστικό αντιδρών (2ος τρόπος)

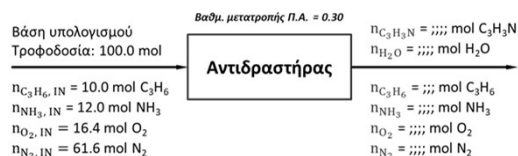
$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} = \text{ΕΚΡΟΗ} + \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} \quad n_i = n_{i,0} \pm \nu_i \cdot \xi$$

$$\xi_{\max, \text{NH}_3} = \frac{0 - 12.0}{-1} = 12.0$$

$$\xi_{\max, \text{O}_2} = \frac{0 - 16.4}{-1.5} = 10.9$$

$$\xi_{\max, \text{C}_3\text{H}_6} = \frac{0 - 10.0}{-1} = 10.0$$

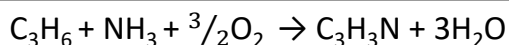
Περιοριστικό αντιδρών αυτό με το μικρότερο $\xi_{\max}$ δηλαδή το προπυλένιο C_3H_6



45

45

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



Βήμα 4:

(β) Περίσσεια των υπολοίπων αντιδρώντων

Αφού το Π.Α. είναι το προπυλένιο C_3H_6 , τότε, όπως είδαμε (1ος τρόπος) το O_2 και NH_3 είναι σε περίσσεια:

$$\% \text{περίσσεια αντιδρ.} = \frac{n_{\text{A,τροφ.}} - n_{\text{A,στοιχ.}}}{n_{\text{A,στοιχ.}}} \quad (1)$$

$$n_{\text{NH}_3, \text{στοιχ.}} = 10.0 \text{ mol C}_3\text{H}_6 \cdot \left| \frac{1 \text{ mol NH}_3}{1 \text{ mol C}_3\text{H}_6} \right| = 10.0 \text{ mol NH}_3$$

$$n_{\text{O}_2, \text{στοιχ.}} = 10.0 \text{ mol C}_3\text{H}_6 \cdot \left| \frac{3/2 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol C}_3\text{H}_6} \right| = 15.0 \text{ mol O}_2$$

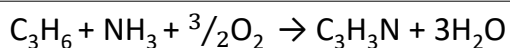
$$\% \text{περίσσεια NH}_3 = \frac{12.0 - 10.0}{10.0} = 20\% \quad \text{NH}_3$$

$$\% \text{περίσσεια O}_2 = \frac{16.4 - 15.0}{15.0} = 9.3\% \quad \text{O}_2$$

46

46

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



Βήμα 5:

(γ) Σύσταση του προϊόντος (1^{ος} τρόπος με χρήση ξ)

Έχει δοθεί ότι βαθμός μετατροπής Π.Α. (ήτοι του C_3H_6) είναι 30%, επομένως:

$$f = 0.3 = \frac{n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{αντιδρ.}}}{n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{τροφοδ.}}} = \frac{n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{τροφοδ.}} - n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}}}{n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{τροφοδ.}}} = \frac{10.0 - n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}}}{10.0} \Rightarrow n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}} = 7.0 \text{ mol}$$

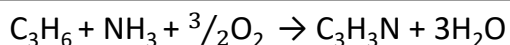
Υπολογισμός ξ

$$n_i = n_{i,0} \pm \nu_i \cdot \xi \Rightarrow n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}} = n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{τροφοδ.}} - 1 \cdot \xi \Rightarrow \Rightarrow 7.0 = 10.0 - \xi \Rightarrow \xi = 3.0 \text{ mol}$$

47

47

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



Βήμα 5:

(γ) Σύσταση του προϊόντος (1^{ος} τρόπος με χρήση ξ)

Χρήση ξ (=3.0 mol) για τις υπόλοιπες ενώσεις και στοιχεία του προϊόντος

$$n_i = n_{i,0} \pm \nu_i \cdot \xi$$

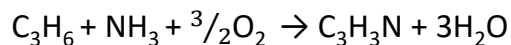
$$\begin{aligned} n_{\text{NH}_3, \text{out}} &= n_{\text{NH}_3, \text{τροφοδ.}} - 1 \cdot \xi = 12 - 1 \cdot 3 \Rightarrow n_{\text{NH}_3, \text{out}} = 9.0 \text{ mol} \Rightarrow y_{\text{NH}_3} = \frac{9}{101.5} = 8.9 \% \\ n_{\text{O}_2, \text{out}} &= n_{\text{O}_2, \text{τροφοδ.}} - 1.5 \cdot \xi = 16.4 - 1.5 \cdot 3 \Rightarrow n_{\text{O}_2, \text{out}} = 11.9 \text{ mol} \Rightarrow y_{\text{O}_2} = \frac{11.9}{101.5} = 11.7 \% \\ n_{\text{N}_2, \text{out}} &= n_{\text{N}_2, \text{τροφοδ.}} - 0 \cdot \xi \Rightarrow n_{\text{N}_2, \text{out}} = 61.6 \text{ mol} \Rightarrow y_{\text{N}_2} = \frac{61.6}{101.5} = 60.7 \% \\ n_{\text{C}_3\text{H}_3\text{N}, \text{out}} &= n_{\text{C}_3\text{H}_3\text{N}, \text{τροφοδ.}} + 1 \cdot \xi = 0 + 1 \cdot 3 \Rightarrow n_{\text{C}_3\text{H}_3\text{N}, \text{out}} = 3.0 \text{ mol} \Rightarrow y_{\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} = \frac{3}{101.5} = 2.9 \% \\ n_{\text{H}_2\text{O}, \text{out}} &= n_{\text{H}_2\text{O}, \text{τροφοδ.}} + 3 \cdot \xi = 0 + 3 \cdot 3 \Rightarrow n_{\text{H}_2\text{O}, \text{out}} = 9.0 \text{ mol} \Rightarrow y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{9}{101.5} = 8.9 \% \\ n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}} &= 7.0 \text{ mol} \Rightarrow y_{\text{C}_3\text{H}_6} = \frac{7}{101.5} = 6.9 \% \end{aligned}$$

$$\Sigma n_i = 101.5 \text{ mol}$$

$$100.0 \%$$

48

48

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**Βήμα 5:**(γ) Σύσταση του προϊόντος (2^{ος} τρόπος με ισοζύγια μάζας)

ΕΙΣΡΟΗ + ΠΑΡΑΓΩΓΗ = ΕΚΡΟΗ + ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

$$\begin{array}{llll}
 \text{C}_3\text{H}_6 & 10.0 + 0 = n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}} + f \cdot 10 & \xRightarrow{f=0.3} & n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}} = 7 \text{ mol} \\
 \text{NH}_3 & 12.0 + 0 = n_{\text{NH}_3, \text{out}} + 0.3 \cdot 10 \cdot \left| \frac{1 \text{ mol NH}_3}{1 \text{ mol C}_3\text{H}_6} \right| & \Rightarrow & n_{\text{NH}_3, \text{out}} = 9 \text{ mol} \\
 \text{O}_2 & 16.4 + 0 = n_{\text{O}_2, \text{out}} + 0.3 \cdot 10 \cdot \left| \frac{\frac{3}{2} \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol C}_3\text{H}_6} \right| & \Rightarrow & n_{\text{O}_2, \text{out}} = 11.9 \text{ mol} \\
 \text{N}_2 & 61.6 + 0 = n_{\text{N}_2, \text{out}} + 0 & \Rightarrow & n_{\text{N}_2, \text{out}} = 61.6 \text{ mol} \\
 \text{C}_3\text{H}_3\text{N} & 0 + 0.3 \cdot 10 \cdot \left| \frac{1 \text{ mol C}_3\text{H}_3\text{N}}{1 \text{ mol C}_3\text{H}_6} \right| = n_{\text{C}_3\text{H}_3\text{N}, \text{out}} + 0 & \Rightarrow & n_{\text{C}_3\text{H}_3\text{N}, \text{out}} = 3.0 \text{ mol} \\
 \text{H}_2\text{O} & 0 + 0.3 \cdot 10 \cdot \left| \frac{3 \text{ mol H}_2\text{O}}{1 \text{ mol C}_3\text{H}_6} \right| = n_{\text{H}_2\text{O}, \text{out}} + 0 & \Rightarrow & n_{\text{H}_2\text{O}, \text{out}} = 9.0 \text{ mol}
 \end{array}$$

Ομοίως, όπως προηγουμένως, υπολογίζονται τα y_i

Βαθμ. μετατροπής Π.Α. = 0.30

Βάση υπολογισμού
Τροφοδοσία: 100.0 mol

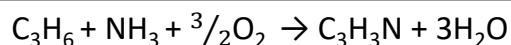
$n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{IN}} = 10.0 \text{ mol C}_3\text{H}_6$
 $n_{\text{NH}_3, \text{IN}} = 12.0 \text{ mol NH}_3$
 $n_{\text{O}_2, \text{IN}} = 16.4 \text{ mol O}_2$
 $n_{\text{N}_2, \text{IN}} = 61.6 \text{ mol N}_2$

Αντιδραστήρας

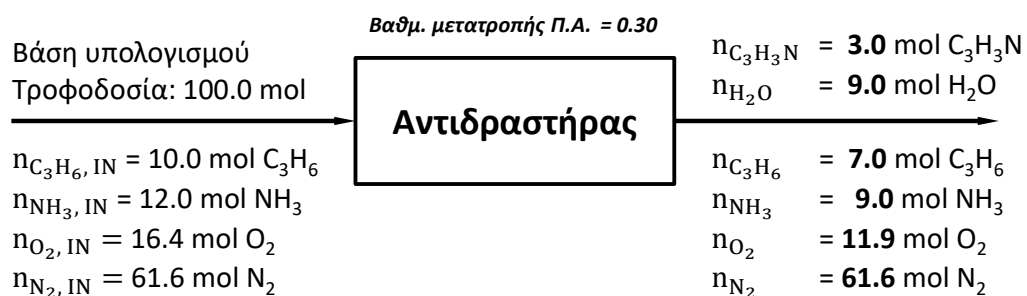
$n_{\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} = \text{mol C}_3\text{H}_3\text{N}$
 $n_{\text{H}_2\text{O}} = \text{mol H}_2\text{O}$
 $n_{\text{C}_3\text{H}_6} = \text{mol C}_3\text{H}_6$
 $n_{\text{NH}_3} = \text{mol NH}_3$
 $n_{\text{O}_2} = \text{mol O}_2$
 $n_{\text{N}_2} = \text{mol N}_2$

49

49

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**Βήμα 6:**

Διάγραμμα ροής (με υπολογισμένες τιμές)



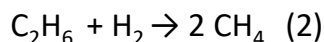
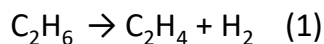
Περιοριστικό αντιδρών: C_3H_6
 Περίσσεια NH_3 : 20 %
 Περίσσεια O_2 (αέρα): 9.3%
 Σύσταση προϊόντος (mol %): C_3H_6 : 6.9, NH_3 : 8.9, O_2 : 11.7, N_2 : 60.7, $\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$: 2.9, H_2O : 8.9

50

50

ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ - ΑΠΟΔΟΣΗ - ΕΚΛΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8


Οι παρακάτω αντιδράσεις γίνονται σε αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας, μόνιμης κατάστασης.



Η τροφοδοσία περιλαμβάνει 85.0 mol % αιθάνιο (C_2H_6) και 15 mol % αδρανή (I). Ο βαθμός μετατροπής του αιθανίου είναι 0.501 και η απόδοση σε αιθυλένιο (mol C_2H_4 / mol C_2H_6) 0.471.

Υπολογίστε τη μολαρική σύσταση του προϊόντος και την εκλεκτικότητα του αιθυλενίου ως προς το μεθάνιο (CH_4).

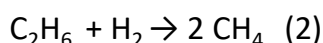
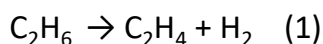


Hint:

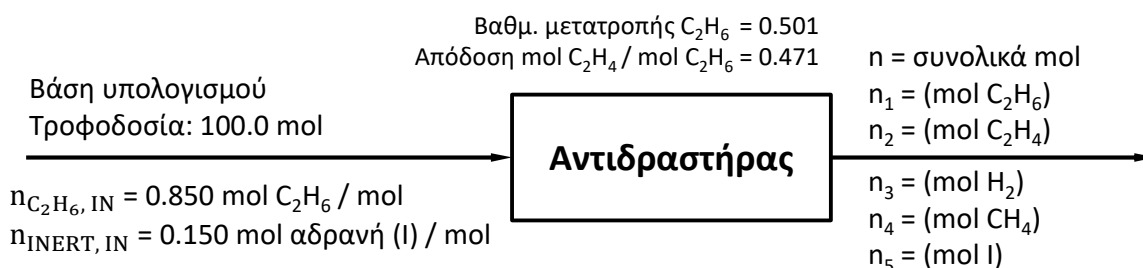
- Πλέον έχει καταστεί σαφές ότι δεν χρειάζεται πανικός, *life is short*
- Προσοχή, το H_2 δεν είναι διαθέσιμο από την αρχή, αλλά παράγεται μέσω της αντίδρασης (1)
- Στο «προϊόν» θα έχουμε σχεδόν τα πάντα, *think about it, ... πάλι*

51

51

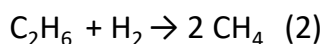
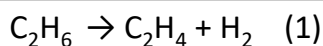
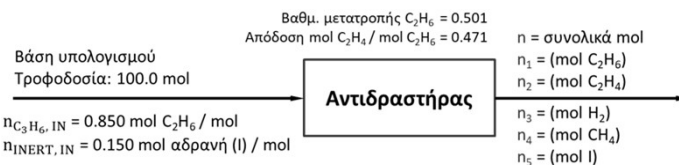
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8

Βήμα 1:

Διάγραμμα ροής



52

52

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8**Βήμα 2:****Σύσταση προϊόντος με χρήση ξ**

Προσοχή, όταν υπάρχουν περισσότερες της μιας αντιδράσεις, έχουμε πολλαπλή παραγωγή/κατανάλωση κάποιων συμμετεχόντων ενώσεων

$$n_i = n_{i,0} \pm \sum_{j=1}^2 v_{ij} \cdot \xi_j$$

Αν ξ_1 είναι η έκταση της πρώτης αντίδρασης και ξ_2 της δεύτερης, τότε:

$$n_1 (\text{mol C}_2\text{H}_6) = 85 - 1 \cdot \xi_1 - 1 \cdot \xi_2 \quad (3)$$

$$n_2 (\text{mol C}_2\text{H}_4) = 0 + 1 \cdot \xi_1 \quad (4)$$

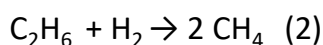
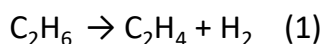
$$n_3 (\text{mol H}_2) = 0 + 1 \cdot \xi_1 - 1 \cdot \xi_2 \quad (5)$$

$$n_4 (\text{mol CH}_4) = 0 + 2 \cdot \xi_2 \quad (6)$$

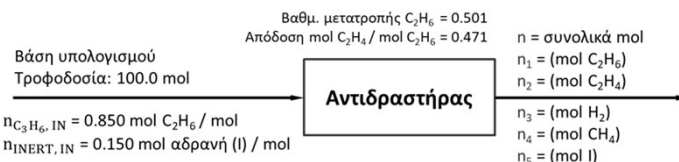
$$n_5 (\text{mol I}) = 15.0$$

53

53

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8**Βήμα 3:**

Αξιοποίηση βαθμού μετατροπής



Βαθμός μετατροπής C_2H_6 : $f = 0.501 \Rightarrow$ το υπόλοιπο κλάσμα $(1 - 0.501)$ δεν αντέδρασε και βρίσκεται στην έξοδο!

$$n_1 = \frac{(1-0.501) \text{ mol C}_2\text{H}_6 \text{ που δεν αντεδρασαν}}{\text{mol C}_2\text{H}_6 \text{ τροφοδοσίας}} \cdot 85.0 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \text{ τροφοδοσίας} \Rightarrow$$

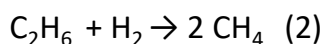
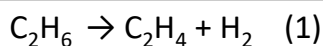
$$\Rightarrow n_1 = 42.4 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \quad (7)$$

$$(3) \Rightarrow 42.4 = 85 - \xi_1 - \xi_2 \Rightarrow$$

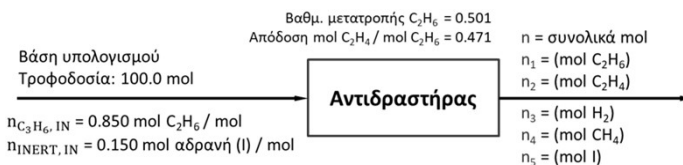
$$\xi_1 + \xi_2 = 42.6 \text{ mol} \quad (8)$$

54

54

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8**Βήμα 4:**

Αξιοποίηση βαθμού απόδοσης



$$\text{Απόδοση} = \frac{\text{mol προϊόντος C}_2\text{H}_4}{\text{mol προϊόντος C}_2\text{H}_4 \text{ με 100\% μετατροπή του C}_2\text{H}_6} = 0.471 \quad (9)$$

$$n_2^* = 85.0 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \text{ τροφοδοσίας} \cdot \frac{1 \text{ mol C}_2\text{H}_4}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6} \Rightarrow n_2^* = 85.0 \text{ mol}$$

$$(9) \Rightarrow n_2 = 0.471 \cdot 85.0 = \mathbf{40.0 \text{ mol C}_2\text{H}_4}$$

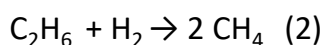
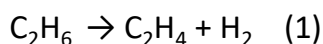
$$(4) \Rightarrow n_2 = 40.0 = \xi_1 \quad \Rightarrow \xi_1 = \mathbf{40.0 \text{ mol}}$$

$$\text{Ενώ από την (8)} \Rightarrow 40 + \xi_2 = 42.6 \text{ mol} \quad \Rightarrow \xi_2 = \mathbf{2.6 \text{ mol}}$$

Μπορώ πλέον να λύσω τις (3) έως (6)

55

55

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8**Βήμα 5:**Υπολογισμός n_i εξόδουΈχοντας πλέον υπολογίσει $\xi_1 = 40.0 \text{ mol}$ και $\xi_2 = 2.6 \text{ mol}$ τότε:

$$(3) n_1 (\text{mol C}_2\text{H}_6) = 85 - \xi_1 - \xi_2 \Rightarrow n_1 = 42.4 \quad y_1 = 42.4 / 140 = 30.3 \%$$

$$(4) n_2 (\text{mol C}_2\text{H}_4) = \xi_1 \Rightarrow n_2 = 40.0 \quad y_2 = 28.6 \%$$

$$(5) n_3 (\text{mol H}_2) = \xi_1 - \xi_2 \Rightarrow n_3 = 37.4 \quad y_3 = 26.7 \%$$

$$(6) n_4 (\text{mol CH}_4) = 2 \cdot \xi_2 \Rightarrow n_4 = 5.2 \quad y_4 = 3.7 \%$$

$$n_5 (\text{mol Inert}) \Rightarrow n_5 = 15.0 \quad y_5 = 10.7 \%$$

$$\Sigma n_i = \mathbf{140.0 \text{ mol} \quad 100.0 \%}$$

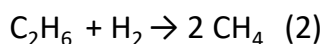
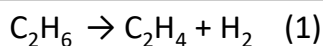
$$\text{Εκλεκτικότητα} = \frac{\text{mol προϊόντος C}_2\text{H}_4}{\text{mol μη επιθυμητού προϊόντος CH}_4} = \frac{40}{5.2} = 7.7 \frac{\text{mol C}_2\text{H}_4}{\text{mol CH}_4}$$

56

56

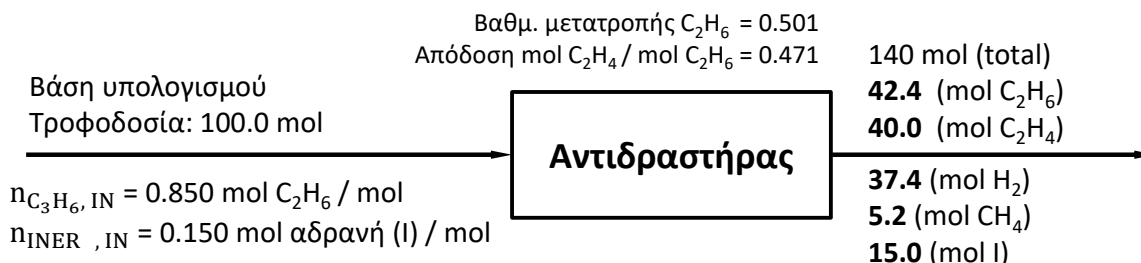
THE
END

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



Βήμα 6:

Ανακεφαλαίωση

Σύσταση προϊόντος (mol %): C_2H_6 : 30.3, C_2H_4 : 28.6, H_2 : 26.7, CH_4 : 3.7, Inert: 10.7Εκλεκτικότητα C_2H_4 ως προς $\text{CH}_4 = 7.7 \frac{\text{mol C}_2\text{H}_4}{\text{mol CH}_4}$

57

57

ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ

Ισοζύγιο μάζας χημικής ένωσης σε ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ (μη μόνιμη) κατάσταση

ΕΙΣΡΟΗ	+	ΠΑΡΑΓΩΓΗ	-	ΕΚΡΟΗ	-	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ	=	ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ
Ρυθμός εισόδου συστατικού στο σύστημα		Ρυθμός παραγωγής συστατικού εντός του συστήματος		Ρυθμός εξόδου συστατικού από το σύστημα		Ρυθμός κατανάλωσης συστατικού εντός του συστήματος		Ρυθμός συσσώρευσης συστατικού εντός του συστήματος

Ισοζύγιο μάζας χημικής ένωσης σε ΜΟΝΙΜΗ κατάσταση

ΕΙΣΡΟΗ	+	ΠΑΡΑΓΩΓΗ	-	ΕΚΡΟΗ	-	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ	=	0
--------	---	----------	---	-------	---	------------	---	---

58

58

ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ ΧΗΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Ισοζύγιο μάζας χημικού στοιχείου σε ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ (μη μόνιμη) κατάσταση

ΕΙΣΡΟΗ

-

ΕΚΡΟΗ

=

ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ

Ρυθμός
εισόδου
συστατικού
στο
σύστημα

Ρυθμός
εξόδου
συστατικού
από το
σύστημα

Ρυθμός
συσσώρευσης
συστατικού
εντός του
συστήματος

Προσοχή

Ισοζύγιο μάζας χημικού στοιχείου
μπορεί να γίνει σε **ΌΛΑ τα
συστήματα** σε moles ή kg
ανεξάρτητα αν στο σύστημα
πραγματοποιείται **χημική
αντίδραση**

ΕΙΣΡΟΗ

=

ΕΚΡΟΗ

Ισοζύγιο μάζας χημικού στοιχείου
σε ΜΟΝΙΜΗ κατάσταση

59

59

ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΗΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ & ΧΗΜΙΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ

	ΙΣΧΥΕΙ ΕΙΣΡΟΗ = ΕΚΡΟΗ ;;;	
	Χωρίς χημική αντίδραση	Με χημική αντίδραση
	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ	
Μάζα	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Mol	ΝΑΙ	ΌΧΙ !!!!
	ΜΕΡΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ	
Μάζα χημικού στοιχείου	ΝΑΙ	ΝΑΙ
mol χημικού στοιχείου	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Μάζα χημικής ένωσης	ΝΑΙ	ΌΧΙ !!!!
mol χημικής ένωσης	ΝΑΙ	ΌΧΙ !!!!

60

60

ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ ΑΝΑ ΕΙΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

$$BE \text{ ή } df = \text{Αρ. Αγνώστων} - \text{Αρ. Ανεξ. Εξισώσεων} - (\text{περιορισμοί \& σχέσεις})$$

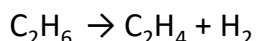
	ΜΟΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	ΑΤΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ
+	Αρ. αγνώστων μεταβλητών	Αρ. αγνώστων μεταβλητών	Αρ. αγνώστων μεταβλητών
	Αρ. ανεξάρτητων χημικών αντιδράσεων		Αρ. ανεξάρτητων χημικών αντιδράσεων (αρ. ξ)
-	Αρ. ισοζυγίων μάζας μοριακών ειδών	Αρ. ισοζυγίων μάζας ατομικών ειδών	Αρ. εξισώσεων με αντιδρώντα
		Αρ. ισοζυγίων μάζας μη αντιδρώντων	Αρ. ισοζυγίων μάζας μη αντιδρώντων
	Αρ. περιορισμών	Αρ. περιορισμών	Αρ. περιορισμών

61

61

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ – 1 ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9


100 kmol/min **αιθάνιο** εισάγεται σε αντιδραστήρα αφυδρογόνωσης με στόχο την **παραγωγή αιθυλενίου**.



Η **ροή** H_2 στην έξοδο είναι 40 kmol/min.

Καθορίστε τους βαθμούς ελευθερίας και επιλύστε το ακόλουθο διάγραμμα ροής: α) με μοριακά ισοζύγια, β) με ατομικά ισοζύγια, γ) με χρήση της έκτασης της αντίδρασης



100 kmol/min C_2H_6

ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ
(Αντιδραστήρας)

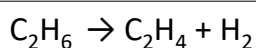
40 kmol/min H_2

$\dot{n}_1$ kmol/min C_2H_6

$\dot{n}_2$ kmol/min C_2H_4

62

62

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9100 kmol/min C_2H_6 **ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ**
(Αντιδραστήρας)40 kmol/min H_2 $\dot{n}_1$ kmol/min C_2H_6
 $\dot{n}_2$ kmol/min C_2H_4 **Βήμα 1 ΜΟΡΙΑΚΗ ΒΑΣΗ:**

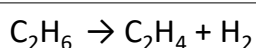
Υπολογισμός βαθμών ελευθερίας

ΜΟΡΙΑΚΗ ΒΑΣΗ

+	Άγνωστες μεταβλητές	+	2 ($\dot{n}_1, \dot{n}_2$)
+	Ανεξάρτητες χημικές αντιδράσεις	+	1
-	Μοριακά ισοζύγια μάζας (αρ. διαφορετικών μορίων)	-	3 ($\text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_2\text{H}_4, \text{H}_2$)
-	Άλλες εξισώσεις και περιορισμοί	-	0
Βαθμοί ελευθερίας			+2 +1 -3 -0 = 0

63

63

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9100 kmol/min C_2H_6 **ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ**
(Αντιδραστήρας)40 kmol/min H_2 $\dot{n}_1$ kmol/min C_2H_6
 $\dot{n}_2$ kmol/min C_2H_4 **Βήμα 1 ΜΟΡΙΑΚΗ ΒΑΣΗ:**

Επίλυση μέσω μοριακών ισοζυγίων

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = 0$$

$$\text{H}_2 \quad \cancel{\text{Εισ}} + \text{Παρ} - \cancel{\text{Εξ}} - \cancel{\text{Κατ}} = 0 \quad \Rightarrow \text{Παρ} = \text{Εξ} \quad \Rightarrow \dot{n}_{\text{H}_2, \text{παρ}} = 40 \text{ kmol/min} \quad (1)$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 \quad \cancel{\text{Εισ}} + \cancel{\text{Παρ}} - \text{Εξ} - \text{Κατ} = 0 \quad \Rightarrow \text{Εισ} = \text{Εξ} + \text{Κατ} \Rightarrow$$

$$100 \frac{\text{kmol C}_2\text{H}_6}{\text{min}} = \dot{n}_1 + 40 \frac{\text{kmol H}_2}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6 \text{ κατ.}}{1 \text{ kmol H}_2 \text{ παρ.}} \Rightarrow 100 = \dot{n}_1 + 40$$

$$\Rightarrow \dot{n}_1 = 60 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \text{C}_2\text{H}_6$$

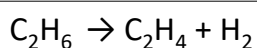
$$\text{C}_2\text{H}_4 \quad \cancel{\text{Εισ}} + \text{Παρ} - \cancel{\text{Εξ}} - \cancel{\text{Κατ}} = 0 \quad \Rightarrow \text{Παρ} = \text{Εξ} \Rightarrow 40 \frac{\text{kmol H}_2}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_4 \text{ παρ.}}{1 \text{ kmol H}_2 \text{ παρ.}} = \dot{n}_2$$

$$\Rightarrow \dot{n}_2 = 40 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \text{C}_2\text{H}_4$$

64

64

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9

100 kmol/min C_2H_6 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ
(Αντιδραστήρας)40 kmol/min H_2
 $\dot{n}_1$ kmol/min C_2H_6
 $\dot{n}_2$ kmol/min C_2H_4
Βήμα 2 ΑΤΟΜΙΚΗ (ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ) ΒΑΣΗ:

Υπολογισμός βαθμών ελευθερίας

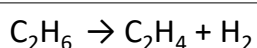
ΑΤΟΜΙΚΗ (ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ) ΒΑΣΗ

+	Άγνωστες μεταβλητές	+	$2 (\dot{n}_1, \dot{n}_2)$
-	Ατομικά ισοζύγια μάζας (αντιδρώντων συστατικών)	-	$2 (\text{C}, \text{H})$
-	Ισοζύγια μη αντιδρώντων (αδρανών) συστατικών	-	0
-	Άλλες εξισώσεις και περιορισμοί	-	0
Βαθμοί ελευθερίας			$+2 +2 -0 -0 = 0$

65

65

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9

100 kmol/min C_2H_6 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ
(Αντιδραστήρας)40 kmol/min H_2
 $\dot{n}_1$ kmol/min C_2H_6
 $\dot{n}_2$ kmol/min C_2H_4
Βήμα 2 ΑΤΟΜΙΚΗ (ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ) ΑΝΑΛΥΣΗ:

Επίλυση μέσω ατομικών (στοιχειακών) ισοζυγίων

ΕΙΣΡΟΗ = ΕΚΡΟΗ

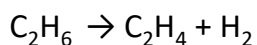
$$\text{C} \quad \overbrace{100 \frac{\text{kmol C}_2\text{H}_6}{\text{min}} \cdot \frac{2 \text{ kmol C.}}{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6}}^{\text{στην εισροή C}_2\text{H}_6} = \overbrace{\dot{n}_1 \cdot \frac{2}{1} + \dot{n}_2 \cdot \frac{2}{1}}^{\text{στην εκροή C}_2\text{H}_6} \Rightarrow 100 = \dot{n}_1 + \dot{n}_2 \quad (1)$$

$$\text{H} \quad \overbrace{100 \frac{\text{kmol C}_2\text{H}_6}{\text{min}} \cdot \frac{6 \text{ kmol H.}}{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6}}^{\text{στην εισροή C}_2\text{H}_6} = \underbrace{40 \cdot \frac{2}{1}}_{\text{στην εκροή H}_2} + \underbrace{\dot{n}_1 \cdot \frac{6}{1}}_{\text{στην εκροή C}_2\text{H}_6} + \underbrace{\dot{n}_2 \cdot \frac{4}{1}}_{\text{στην εκροή C}_2\text{H}_4} \Rightarrow 600 = 80 + 6 \cdot \dot{n}_1 + 4 \cdot \dot{n}_2 \quad (2)$$

$$(1), (2) \quad \dot{n}_1 = 60 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \text{C}_2\text{H}_6 \quad \dot{n}_2 = 40 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \text{C}_2\text{H}_4$$

66

66

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9100 kmol/min C_2H_6 **ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ**
(Αντιδραστήρας)40 kmol/min H_2 $\dot{n}_1$ kmol/min C_2H_6
 $\dot{n}_2$ kmol/min C_2H_4 **Βήμα 3 ΑΝΑΛΥΣΗ με βάση την ΕΚΤΑΣΗ της ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ:**

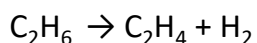
Υπολογισμός βαθμών ελευθερίας

ΑΤΟΜΙΚΗ (ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ) ΒΑΣΗ

+	Άγνωστες μεταβλητές	+	2 ($\dot{n}_1, \dot{n}_2$)
+	Αριθμός ανεξάρτητων χημικών αντιδράσεων (αριθμός ξ)	+	1
	Αριθμός αντιδρώντων (συμμετέχουν στην αντίδραση)	-	3 ($\text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_2\text{H}_4, \text{H}_2$)
-	Αριθμός μη αντιδρώντων (αδρανών) συστατικών	-	0
-	Άλλες εξισώσεις και περιορισμοί	-	0
Βαθμοί ελευθερίας			$+2 +1 -3 -0 -0 = 0$

67

67

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9100 kmol/min C_2H_6 **ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ**
(Αντιδραστήρας)40 kmol/min H_2 $\dot{n}_1$ kmol/min C_2H_6
 $\dot{n}_2$ kmol/min C_2H_4 **Βήμα 3 ΑΝΑΛΥΣΗ με βάση την ΕΚΤΑΣΗ της ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ:**

Υπολογισμός βαθμών ελευθερίας

Εξισώσεις με ξ ,
$$n_i = n_{i,0} \pm \nu_i \cdot \xi$$

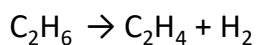
H_2 : $40 = 0 + 1 \cdot \xi \quad \Rightarrow \quad \xi = 40 \text{ kmol/min}$

$\text{C}_2\text{H}_6 \quad \dot{n}_1 = 100 - 1 \cdot \xi \quad \xrightarrow{\xi=40} \quad \dot{n}_1 = 60 \text{ kmol/min } \text{C}_2\text{H}_6$

$\text{C}_2\text{H}_4 \quad \dot{n}_2 = 0 + 1 \cdot \xi \quad \xrightarrow{\xi=40} \quad \dot{n}_2 = 40 \text{ kmol/min } \text{C}_2\text{H}_4$

68

68

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9**Βήμα 4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ:**

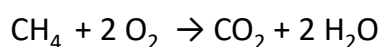
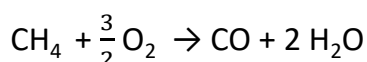
ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ
Ατομική βάση	Συνήθως η 1 ^η μας επιλογή
Έκταση αντίδρασης (ξ)	Πολύ καλό εργαλείο επίλυσης
Μοριακή βάση	Πιο σύνθετοι υπολογισμοί. Μόνο για απλά συστήματα μιας αντίδρασης

69

69

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ – ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**

Μεθάνιο καίγεται με αέρα σε αντιδραστήρα **συνεχούς λειτουργίας και μόνιμης κατάστασης**.



- Σύσταση τροφοδοσίας: 7.80% mol CH_4 , 19.4% O_2 και 72.8% N_2 .
- Βαθμός μετατροπής μεθανίου: 90.0%.
- Στο προϊόν ισχύει: (mol CO_2)/(mol CO) = 8.0

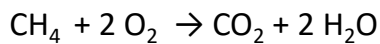
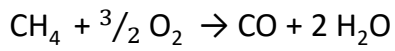
Έχοντας ως **βάση υπολογισμού 100 mol τροφοδοσία**:

Καθορίστε τους βαθμούς ελευθερίας και επιλύστε το σχετικό διάγραμμα ροής: α) με μοριακά ισοζύγια, β) με ατομικά ισοζύγια και γ) με χρήση της έκτασης της αντίδρασης

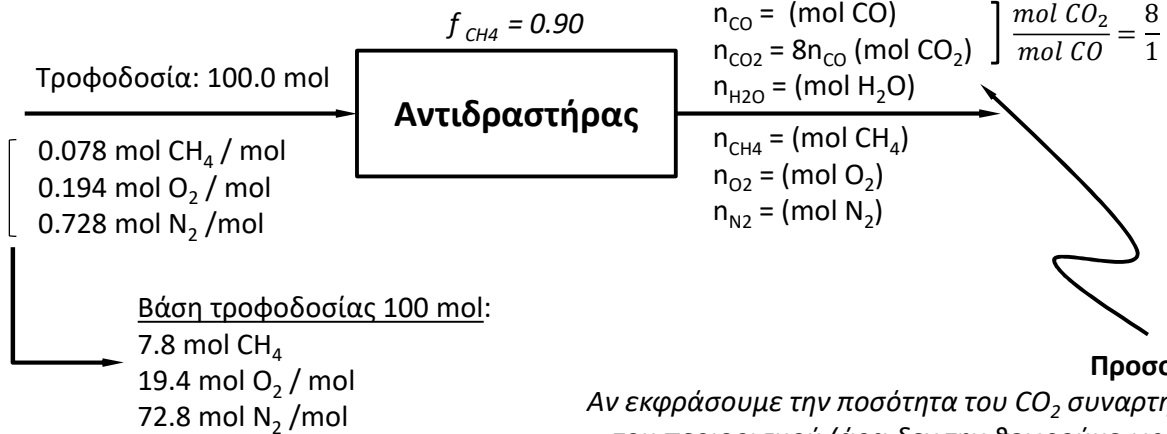
Ποια είναι η **μολαρική σύσταση του προϊόντος/εξόδου/καυσαερίων**.

70

70

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**Βήμα 1:**

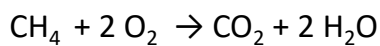
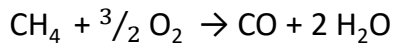
Διάγραμμα ροής

**Προσοχή:**

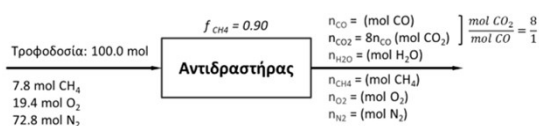
Αν εκφράσουμε την ποσότητα του CO₂ συναρτήσει του περιορισμού (άρα δεν την θεωρούμε ως νέα άγνωστη μεταβλητή), τότε έχουμε «χρησιμοποιήσει τον περιορισμό, άρα δεν θα τον προσμετρήσουμε

71

71

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**Βήμα 2:**

Βαθμοί ελευθερίας



BE ή df = Αρ. Αγνώστων – Αρ. Ανεξ. Εξισώσεων – (περιορισμοί & σχέσεις)

ΜΟΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	ΑΤΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ
Αρ. αγνώστων μεταβλητών	Αρ. αγνώστων μεταβλητών	Αρ. αγνώστων μεταβλητών
Αρ. ανεξάρτητων χημικών αντιδράσεων		Αρ. ανεξάρτητων χημικών αντιδράσεων (αρ. ξ)
Αρ. ισοζυγίων μάζας μοριακών ειδών	Αρ. ισοζυγίων μάζας ατομικών ειδών	Αρ. εξισώσεων με αντιδρώντα
	Αρ. ισοζυγίων μάζας μη αντιδρώντων	Αρ. ισοζυγίων μάζας μη αντιδρώντων
Αρ. περιορισμών	Αρ. περιορισμών	Αρ. περιορισμών

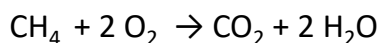
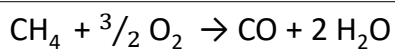
Μοριακή βάση: $(n_{\text{CO}}, n_{\text{CO}_2}, n_{\text{H}_2\text{O}}, n_{\text{CH}_4}, n_{\text{O}_2}, n_{\text{N}_2})$ 6 χημ. είδη
6 άγνωστοι + 2 αντιδράσεις – 6 ισοζύγια μάζας – 2 περιορισμοί = 0

Ατομική ανάλυση: (C, H, O) (N)
6 άγνωστοι – 3 ισοζύγια μάζας – 1 μη αντιδρών – 2 περιορισμοί = 0

Έκταση: (ξ_1, ξ_2) $(\text{CH}_4, \text{O}_2, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O})$ (N)
6 άγνωστοι + 2 αντιδράσεις – 5 ισοζύγια μάζας – 1 μη αντιδρών – 2 περιορισμοί = 0

72

72

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**Βήμα 3:**

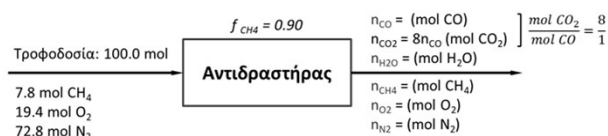
Αξιοποίηση περιορισμών και άλλων πληροφοριών

1. Βαθμός μετατροπής μεθανίου $f_{\text{CH}_4} = 0.90 \Rightarrow$

$$\frac{n_{\text{CH}_4, \text{τροφοδ.}} - n_{\text{CH}_4}}{n_{\text{CH}_4, \text{τροφοδ.}}} = \frac{7.80 - n_{\text{CH}_4}}{7.80} = 0.90 \Rightarrow n_{\text{CH}_4} = \mathbf{0.78 \text{ mol}}$$

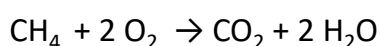
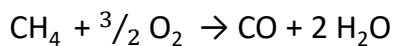
2. Αναλογία CO_2 / CO

$$\frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol CO}} = \frac{8}{1} \Rightarrow n_{\text{CO}_2} = \mathbf{8 n_{\text{CO}}}$$

3. Μη αντιδρών: $\Rightarrow n_{\text{N}_2} = \mathbf{72.8 \text{ mol N}_2}$ 

73

73

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**Βήμα 4:**

Επίλυση μέσω μοριακών ισοζυγίων

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = 0$$

ΠΡΟΣΟΧΗ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ & ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ αναφέρονται σε όλες τις αντιδράσεις

$$\text{CH}_4: 7.80 + 0 = 0.78 + n_{\text{CH}_4, \text{R1}} + n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \quad (1) \Rightarrow n_{\text{CH}_4, \text{R1}} + n_{\text{CH}_4, \text{R2}} = 7.02 \quad (1^*)$$

όπου $n_{\text{CH}_4, \text{R1}}$ και $n_{\text{CH}_4, \text{R2}}$ είναι τα mol CH₄ που καταναλώθηκαν μέσω κάθε αντίδρασης

$$\text{O}_2: 19.4 + 0 = n_{\text{O}_2} + n_{\text{O}_2, \text{R1}} + n_{\text{O}_2, \text{R2}} \quad (2)$$

όπου $n_{\text{O}_2, \text{R1}}$ και $n_{\text{O}_2, \text{R2}}$ είναι τα mol του O₂ που αντέδρασαν μέσω κάθε αντίδρασης

Για να μη «γεμίζουμε» όμως αγνώστους, μπορούμε να εκφράσουμε τα mol του O₂ που αντέδρασαν βάσει των αντίστοιχων mol CH₄, ήτοι:

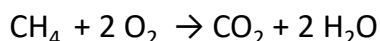
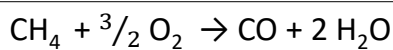
$$19.4 = n_{\text{O}_2} + n_{\text{CH}_4, \text{R1}} \cdot \frac{\frac{3}{2} \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol CH}_4} + n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \cdot \frac{2 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol CH}_4} \Rightarrow$$

$$19.4 = n_{\text{O}_2} + 1.5 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R1}} + 2 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \quad (2^*)$$

74

74

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10

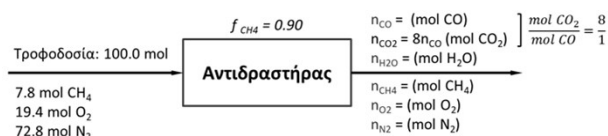


Βήμα 4:

Επίλυση μέσω μοριακών ισοζυγίων

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = 0$$

ΠΡΟΣΟΧΗ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ & ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ αναφέρονται σε όλες τις αντιδράσεις



$$\text{CO: } 0 + n_{\text{CO}, \text{P1}} = n_{\text{CO}} + 0 \quad (3)$$

όπου $n_{\text{CO}, \text{P1}}$ είναι τα mol CO που παρήχθηκαν μέσω κάθε αντίδρασης

Όπως και προηγουμένως, όμως, **μπορούμε να εκφράσουμε τα mol του CO που παρήχθησαν βάσει των αντίστοιχων mol CH₄, ήτοι:**

$$n_{\text{CH}_4, \text{R1}} \cdot \frac{1 \text{ mol CO}}{1 \text{ mol CH}_4} = n_{\text{CO}} \Rightarrow n_{\text{CO}} = n_{\text{CH}_4, \text{R1}} \quad (3^*)$$

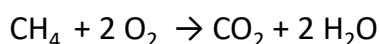
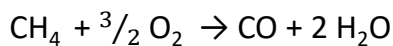
$$\text{CO}_2: 0 + n_{\text{CO}_2, \text{P2}} = n_{\text{CO}_2} + 0 \quad (4) \Rightarrow$$

$$n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \cdot \frac{1 \text{ mol CO}_2}{1 \text{ mol CH}_4} = n_{\text{CO}_2} \Rightarrow n_{\text{CO}_2} = n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \Rightarrow 8 n_{\text{CO}} = n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \quad (4^*)$$

75

75

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10

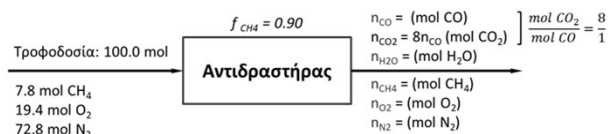


Βήμα 4:

Επίλυση μέσω μοριακών ισοζυγίων

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = 0$$

ΠΡΟΣΟΧΗ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ & ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ αναφέρονται σε όλες τις αντιδράσεις



$$\text{H}_2\text{O: } 0 + n_{\text{H}_2\text{O}, \text{P1}} + n_{\text{H}_2\text{O}, \text{P2}} = n_{\text{H}_2\text{O}} + 0 \quad (5)$$

όπου $n_{\text{H}_2\text{O}, \text{P1}}$ και $n_{\text{H}_2\text{O}, \text{P2}}$ είναι τα mol H₂O που παρήχθηκαν μέσω κάθε αντίδρασης

$$n_{\text{CH}_4, \text{R1}} \cdot \frac{2 \text{ mol H}_2\text{O}}{1 \text{ mol CH}_4} + n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \cdot \frac{2 \text{ mol H}_2\text{O}}{1 \text{ mol CH}_4} = n_{\text{H}_2\text{O}} \Rightarrow n_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R1}} + 2 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \quad (5^*)$$

ΣΧΟΛΙΟ:

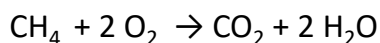
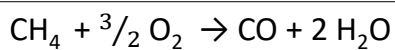
Δηλαδή, εκεί που είχαμε τρεις εναπομείναντες αγνώστους (n_{CO} , $n_{\text{H}_2\text{O}}$ και n_{O_2}) κάναμε τη ζωή μας πιο δύσκολη βάζοντας άλλους δύο ($n_{\text{CH}_4, \text{R1}}$ και $n_{\text{CH}_4, \text{R2}}$);

Απάντηση:

Περίπου, αλλά πλέον έχουμε 5 εξισώσεις, 5 αγνώστους, που λύνονται εύκολα

76

76

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**Βήμα 4:**

Επίλυση μέσω μοριακών ισοζυγίων

$$n_{\text{CH}_4, \text{R1}} + n_{\text{CH}_4, \text{R2}} = 7.02 \quad (1^*)$$

$$19.4 = n_{\text{O}_2} + 1.5 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R1}} + 2 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \quad (2^*)$$

$$n_{\text{CO}} = n_{\text{CH}_4, \text{R1}} \quad (3^*)$$

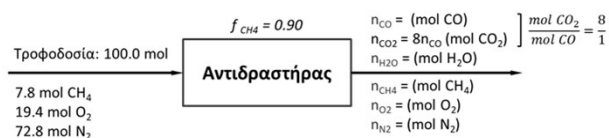
$$8 n_{\text{CO}} = n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \quad (4^*)$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R1}} + 2 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \quad (5^*)$$

■ Με αντικατάσταση (3*), (4*) στην (1*) $\Rightarrow n_{\text{CO}} + 8 n_{\text{CO}} = 7.02 \quad \Rightarrow n_{\text{CO}} = 0.78 \text{ mol}$
 $\Rightarrow n_{\text{CO}_2} = 6.24 \text{ mol}$

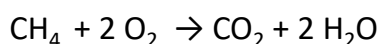
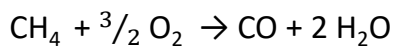
■ (3*) $\Rightarrow n_{\text{CH}_4, \text{R1}} = 0.78 \text{ mol}$ και (4*) $n_{\text{CH}_4, \text{R2}} = 6.24 \text{ mol}$, άρα από (2*) $\Rightarrow n_{\text{O}_2} = 5.75 \text{ mol}$

■ (5*) $\Rightarrow n_{\text{H}_2\text{O}} = 14.04 \text{ mol}$



77

77

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**Βήμα 5:**

Επίλυση μέσω ατομικών ισοζυγίων

ΕΙΣΡΟΗ = ΕΚΡΟΗ

$$\text{C: } \underbrace{7.80 \text{ mol CH}_4 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CH}_4}}_{\text{C στο CH}_4 \text{ ΕΙΣ}} = \underbrace{0.78 \text{ mol CH}_4 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CH}_4}}_{\text{C στο CH}_4 \text{ ΕΞΟΔ}} + \underbrace{n_{\text{CO}} \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CO}}}_{\text{C στο CO ΕΞΟΔ}} + \underbrace{n_{\text{CO}_2} \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CO}_2}}_{\text{C στο CO}_2 \text{ ΕΞΟΔ}} \Rightarrow$$

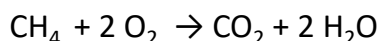
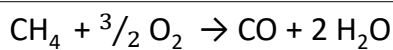
$$7.02 = n_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2} \quad (6)$$

$$\text{O: } \underbrace{19.4 \text{ mol} \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol O}_2}}_{\text{O}_2 \text{ ΕΙΣ}} = \underbrace{n_{\text{O}_2} \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol O}_2}}_{\text{O}_2 \text{ ΕΞ}} + \underbrace{n_{\text{CO}} \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CO}}}_{\text{O στο CO ΕΞΟΔ}} + \underbrace{n_{\text{CO}_2} \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CO}_2}}_{\text{O στο CO}_2 \text{ ΕΞΟΔ}} + \underbrace{n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}}}_{\text{O στο H}_2\text{O ΕΞΟΔ}} \Rightarrow$$

$$38.8 = 2 \cdot n_{\text{O}_2} + n_{\text{CO}} + 2 \cdot n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} \quad (7)$$

78

78

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**Βήμα 5:**

Επίλυση μέσω ατομικών ισοζυγίων

ΕΙΣΡΟΗ

=

ΕΚΡΟΗ

$$\text{H: } \underbrace{7.80 \text{ mol CH}_4 \cdot \frac{4 \text{ mol H}}{1 \text{ mol CH}_4}}_{\text{H στο CH}_4 \text{ ΕΙΣ}} = \underbrace{0.78 \text{ mol CH}_4 \cdot \frac{4 \text{ mol H}}{1 \text{ mol CH}_4}}_{\text{H στο CH}_4 \text{ ΕΞΟΔ}} + \underbrace{n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{2 \text{ mol H}_2\text{O}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}}}_{\text{H στο H}_2\text{O} \text{ ΕΞΟΔ}} \Rightarrow$$

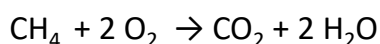
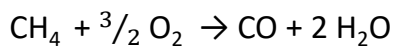
$$\Rightarrow n_{\text{H}_2\text{O}} = 14.04 \text{ mol}$$

Άρα, συνεχίζοντας την επίλυση:

- Από αναλογία $\text{CO}_2 / \text{CO} \Rightarrow n_{\text{CO}_2} = 8 \cdot n_{\text{CO}}$ επομένως, (6) $\Rightarrow n_{\text{CO}} = 0.78 \text{ mol}$ & $n_{\text{CO}_2} = 6.24 \text{ mol}$
- (7) $\Rightarrow n_{\text{O}_2} = 5.75 \text{ mol}$

79

79

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**Βήμα 6:**

με βάση την ΕΚΤΑΣΗ της ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ:

$$n_i = n_{i,0} \pm \sum_{j=1}^2 \nu_{ij} \cdot \xi_j$$

$$\text{CH}_4: \quad 0.78 = 7.80 - 1 \cdot \xi_1 - 1 \cdot \xi_2 \quad \Rightarrow \xi_1 + \xi_2 = 7.02 \text{ mol} \quad (8)$$

$$\text{O}_2: \quad n_{\text{O}_2} = 19.4 - \frac{3}{2} \cdot \xi_1 - 2 \cdot \xi_2 \quad (9)$$

$$\text{CO:} \quad n_{\text{CO}} = 0 + 1 \cdot \xi_1 \quad \Rightarrow n_{\text{CO}} = \xi_1 \quad (10)$$

$$\text{CO}_2: \quad n_{\text{CO}_2} = 0 + 1 \cdot \xi_2 \quad \Rightarrow n_{\text{CO}_2} = \xi_2 \quad (11)$$

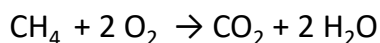
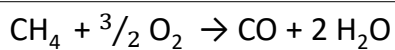
$$\text{H}_2\text{O:} \quad n_{\text{H}_2\text{O}} = 0 + 2 \cdot \xi_1 + 2 \cdot \xi_2 \quad (12)$$

$$\text{Περιορισμός: } n_{\text{CO}_2} = 8 n_{\text{CO}} \quad (13)$$

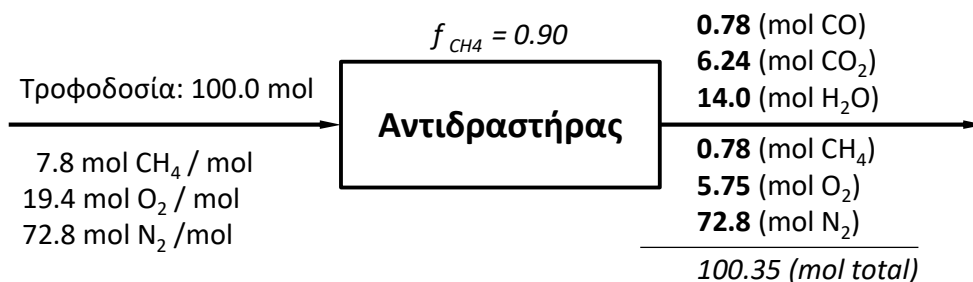
- Αντικατάσταση (13), (11) και (10) στην (8) $\Rightarrow n_{\text{CO}} = 0.78 \text{ mol}$ και $n_{\text{CO}_2} = 6.24 \text{ mol}$
- Αντικατάσταση (10), (11) στην (9) $\Rightarrow n_{\text{O}_2} = 5.75 \text{ mol}$
- Αντικατάσταση (10), (11) στην (12) $\Rightarrow n_{\text{H}_2\text{O}} = 14.04 \text{ mol}$

80

80

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**Βήμα 7:**

Σύνοψη και σύσταση προϊόντος



Σύσταση προϊόντος (mol %):

CH₄: 0.78H₂O: 14

CO: 0.78

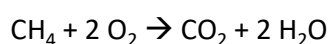
O₂: 5.7CO₂: 6.2N₂: 72.5

81

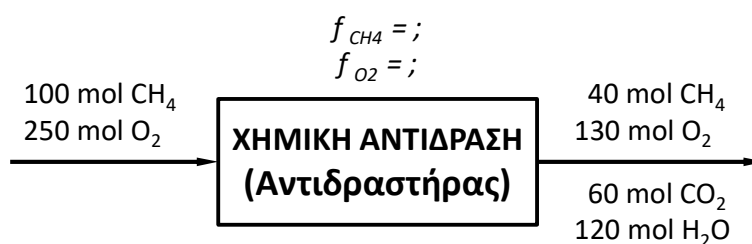
81

ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11**

Δίνεται η ακόλουθη αντίδραση και διάγραμμα ροής:



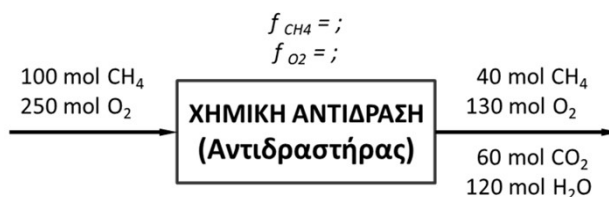
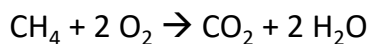
1. Βαθμός μετατροπής μεθανίου = ;
2. Βαθμός μετατροπής οξυγόνου = ;
3. Καταστρώστε τις σχετικές εξισώσεις με βάση την έκταση της αντίδρασης ξ για τα CH₄, O₂, CO₂ και H₂O. Υπολογίστε το ξ.
4. Πόσα ανεξάρτητα ισοζύγια σε μοριακή βάση μπορούν να καταγραφούν;
5. Πόσα ανεξάρτητα ισοζύγια σε ατομική βάση μπορούν να καταγραφούν;
6. Να ελεγχθεί αν τα ισοζύγια C, H, O, O₂ είναι σωστά.
7. Περιεκτικότητα καυσαερίων σε CH₄ σε υγρή και σε ξηρή βάση:



82

82

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11



$$1. \quad f_{\text{CH}_4} = \frac{\text{mol}_{\text{reacted}}}{\text{mol}_{\text{fed}}} = \frac{100 - 40}{100} = 0.60$$

$$2. \quad f_{\text{O}_2} = \frac{\text{mol}_{\text{reacted}}}{\text{mol}_{\text{fed}}} = \frac{250 - 130}{250} = 0.48$$

$$3. \quad \text{Έκταση αντίδρασης: } n_i = n_{i,0} \pm \nu_i \cdot \xi$$

$$\text{CH}_4: \quad 40 = 100 - 1 \cdot \xi \quad \Rightarrow \xi = 60 \text{ mol}$$

$$\text{O}_2: \quad 130 = 250 - 2 \cdot \xi$$

$$\text{H}_2\text{O}: \quad 120 = 0 + 2 \cdot \xi$$

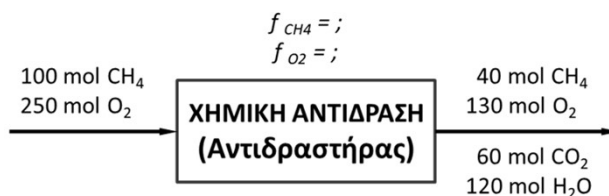
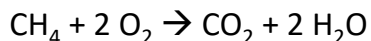
$$4. \quad \text{Ανεξάρτητα ισοζύγια σε } \underline{\text{μοριακή βάση}} = 4 \quad (\text{CH}_4, \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O})$$

$$5. \quad \text{Ανεξάρτητα ισοζύγια σε } \underline{\text{ατομική βάση}} = 3 \quad (\text{C, H, O})$$

83

83

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11



$$6. \quad \text{Έλεγχος ισοζυγίων (C, H, O, O}_2\text{):}$$

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

$$\text{C: } 100 + 0 = 40 + 60 \quad \checkmark \text{ OK}$$

$$\text{H: } 4 \cdot 100 + 0 = 4 \cdot 40 + 2 \cdot 120 \quad \checkmark \text{ OK}$$

$$\text{O: } 2 \cdot 250 + 0 = 2 \cdot 130 + 2 \cdot 60 + 1 \cdot 120 \quad \checkmark \text{ OK}$$

$$\text{O}_2: 250 - 2 \cdot \xi = 130 \quad \checkmark \text{ OK}$$

$$7. \quad \text{Περιεκτικότητα καυσαερίων σε CH}_4 \text{ σε υγρή και ξηρή βάση:}$$

$$\text{Υγρή βάση} = \frac{\text{mol CH}_4}{\text{mol total συμπεριλ. H}_2\text{O}} = \frac{40}{40+130+60+120} = 11.4\%$$

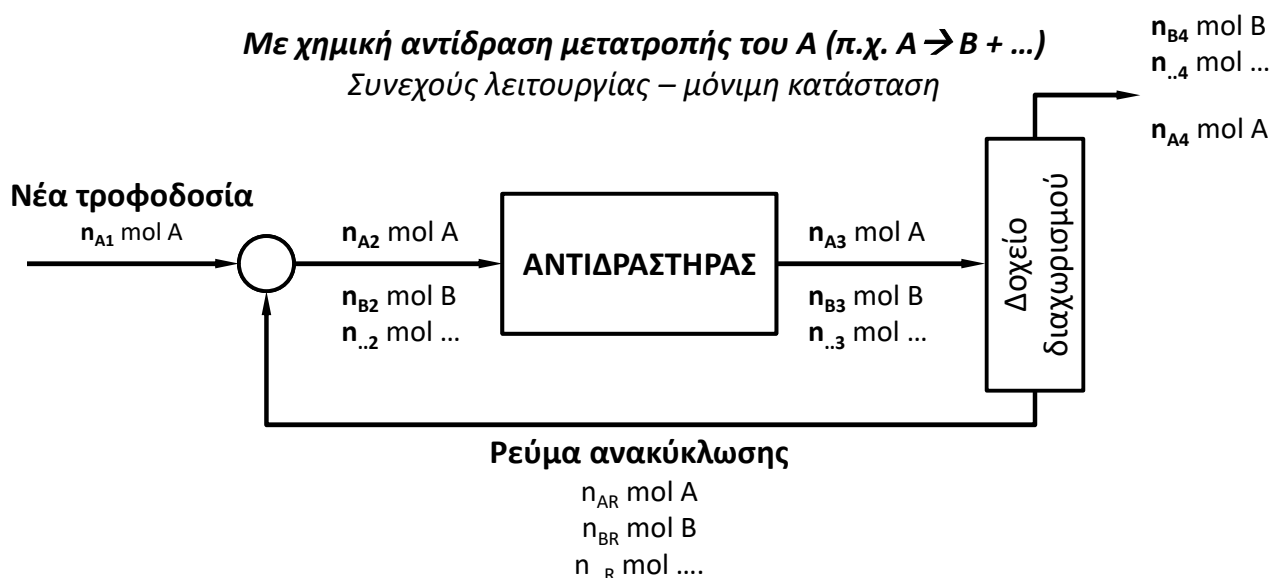
$$\text{Ξηρή βάση} = \frac{\text{mol CH}_4}{\text{mol total ΧΩΡΙΣ H}_2\text{O}} = \frac{40}{40+130+60} = 17.4\%$$

84

84

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

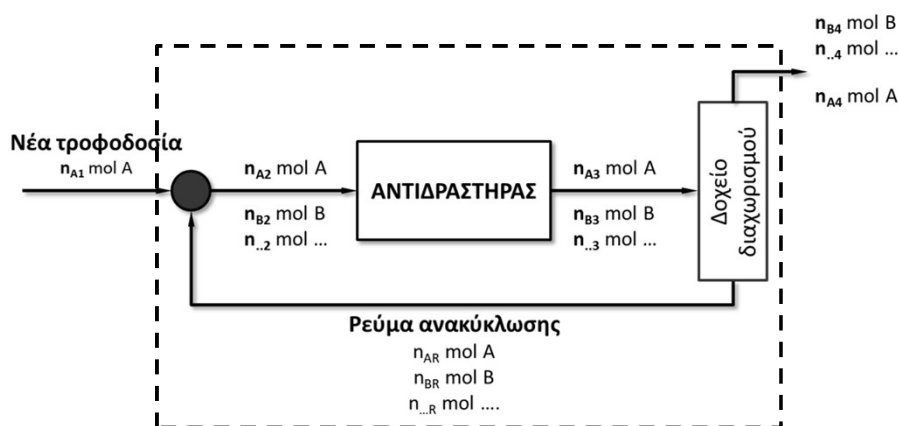
Με χημική αντίδραση μετατροπής του A (π.χ. $A \rightarrow B + \dots$)
 Συνεχούς λειτουργίας – μόνιμη κατάσταση



$$\text{Λόγος Ανακύκλωσης } R = \frac{\text{Ρεύμα Ανακύκλωσης}}{\text{Νέα Τροφοδοσία}} = \frac{n_{AR} + n_{BR} + \dots}{n_{A1}}$$

85

85

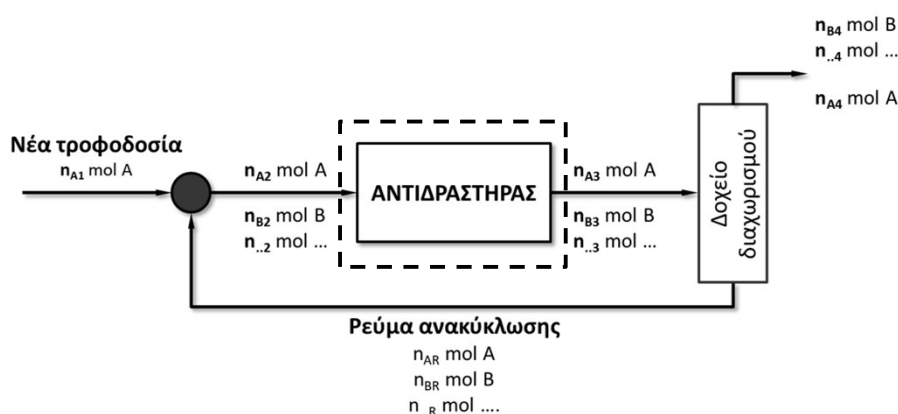


$$\text{ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΛΑΣΜΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ } f_{OA} = \frac{\text{mol περιοριστικού αντιδρώντος που (συνολικά) αντέδρασαν}}{\text{mol περιοριστικού αντιδρώντος στη νέα τροφοδοσία}} =$$

$$\frac{\text{mol περιοριστικού αντιδρώντος στη νέα τροφοδοσία} - \text{mol περ.αντιδρ. στο προϊόν της διεργασίας}}{\text{mol περιοριστικού αντιδρώντος στη νέα τροφοδοσία}} = \frac{n_{A1} - n_{A4}}{n_{A1}}$$

86

86



ΚΛΑΣΜΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΣΕ ΕΝΑ ΠΕΡΑΣΜΑ (Single pass) [Βαθμός μετατροπής στον αντιδραστήρα]

$$f_{SP} = \frac{\text{mol περιοριστικού αντιδρώντος που αντιδρούν σε κάθε περασμά}}{\text{mol περιοριστικού αντιδρώντος στη τροφοδοσία του αντιδραστήρα}}$$

$$\frac{\text{mol περ. αντιδρ. που εισάγεται στον αντιδραστήρα} - \text{mol περ. αντιδρ. στην έξοδο του αντιδραστήρα}}{\text{mol περ. αντιδρ. που εισάγεται στον αντιδραστήρα}} = \frac{n_{A2} - n_{A3}}{n_{A2}}$$

87

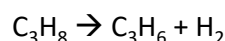
87

ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



Δίνεται η ακόλουθη αντίδραση αφυδρογόνωσης του προπανίου:



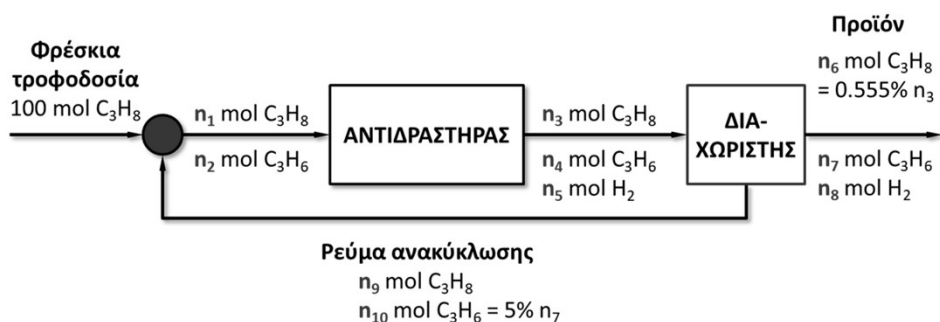
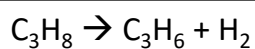
Το **συνολικό κλάσμα μετατροπής** του προπανίου είναι 95%. Τα προϊόντα της αντίδρασης διαχωρίζονται σε δύο ρεύματα. Το **1^ο ρεύμα** περιέχει **H₂, προπυλένιο** και το 0.555% του **προπανίου** που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα και λαμβάνεται ως προϊόν. Το **2^ο ρεύμα** που περιέχει το υπόλοιπο **προπάνιο** που δεν αντέδρασε και ποσότητα **προπυλενίου** ίση με 5% του προπυλενίου του πρώτου ρεύματος ανακυκλώνεται στον αντιδραστήρα

- να σχεδιαστεί το διάγραμμα ροής και να γίνει ανάλυση βαθμών ελευθερίας
- να επιλυθεί το σχετικό διάγραμμα ροής και να υπολογιστεί η μοριακή σύσταση του προϊόντος
- υπολογίστε τον λόγο (βαθμό) ανακύκλωσης
- υπολογίστε το ποσοστό μετατροπής σε ένα πέρασμα (βαθμό μετατροπής του προπανίου στον αντιδραστήρα).

Θεωρείστε βάση υπολογισμού 100 mol C₃H₈ φρέσκιας τροφοδοσίας

88

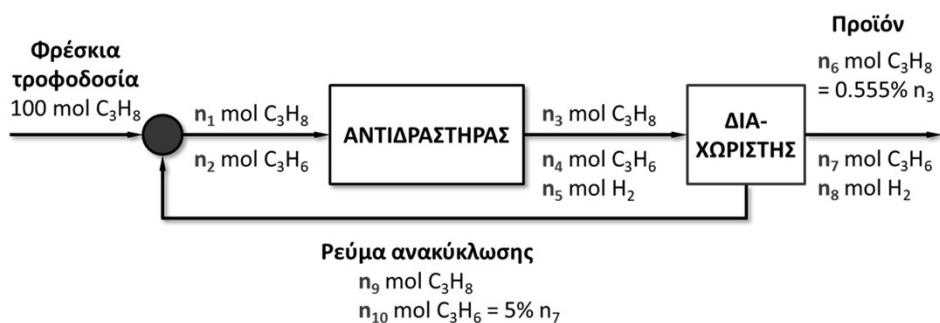
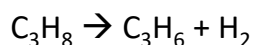
88

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (Ατομική βάση)**

+	Άγνωστες μεταβλητές	+	3 (n_6, n_7, n_8)
-	Ατομικά ισοζύγια μάζας (αντιδρώντων συστατικών)	-	2 (C, H)
-	Ισοζύγια μη αντιδρώντων (αδρανών) συστατικών	-	0
-	Άλλες εξισώσεις και περιορισμοί	-	1 $f_{\text{OA}} = 0.95$
Βαθμοί ελευθερίας			$3 - 2 - 1 = 0$

89

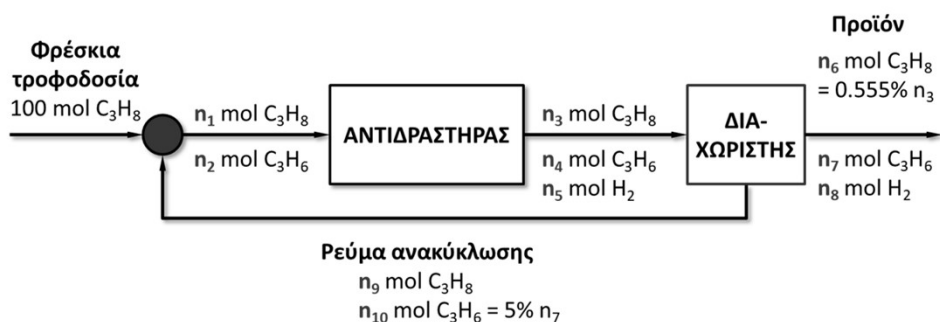
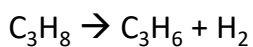
89

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΜΙΞΗΣ (Μοριακή Βάση)**

+	Άγνωστες μεταβλητές	+	4 (n_1, n_2, n_9, n_{10})
+	Ανεξάρτητες χημικές αντιδράσεις	+	0 (Δεν γίνεται αντίδραση)
-	Μοριακά ισοζύγια μάζας (αρ. διαφορετικών μορίων)	-	2 ($\text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_3\text{H}_6$)
-	Άλλες εξισώσεις και περιορισμοί	-	0
Βαθμοί ελευθερίας			$4 - 2 = 2$

90

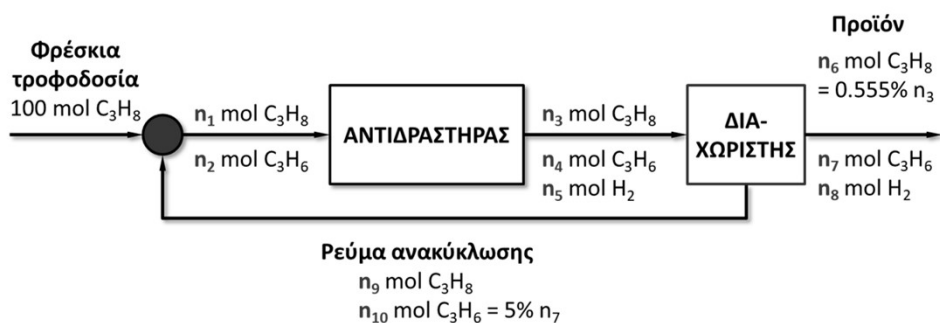
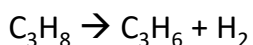
90

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ (Ατομική βάση)**

+	Άγνωστες μεταβλητές	+	5 (n_1, n_2, n_3, n_4, n_5)
-	Ατομικά ισοζύγια μάζας (αντιδρώντων συστατικών)	-	2 (C, H)
-	Ισοζύγια μη αντιδρώντων (αδρανών) συστατικών	-	0
-	Άλλες εξισώσεις και περιορισμοί	-	0
Βαθμοί ελευθερίας			5 - 2 = 3

91

91

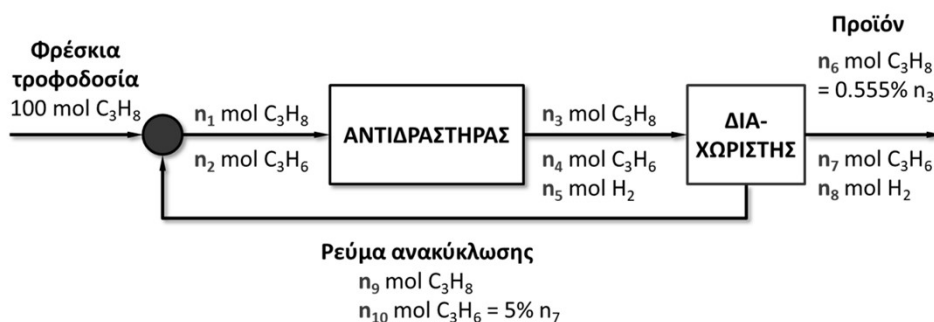
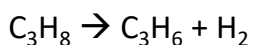
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗΣ (Μοριακή Βάση)**

+	Άγνωστες μεταβλητές	+	8 ($n_3, n_4, n_5 \mid n_6, n_7, n_8 \mid n_9, n_{10}$)
+	Ανεξάρτητες χημικές αντιδράσεις	+	0 (Δεν γίνεται αντίδραση)
-	Μοριακά ισοζύγια μάζας (αρ. διαφορετικών μορίων)	-	3 ($\text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_3\text{H}_6, \text{H}_2$)
-	Άλλες εξισώσεις και περιορισμοί	-	2 ($n_6/n_3, n_{10}/n_7$)
Βαθμοί ελευθερίας			8 - 3 - 2 = 3

92

92

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



Συνολικό σύστημα:

$$\text{Ισοζύγιο C: } 3 \cdot 100 = 3 \cdot n_6 + 3 \cdot n_7 \quad (1)$$

$$\text{Ισοζύγιο H: } 8 \cdot 100 = 8 \cdot n_6 + 6 \cdot n_7 + 2 \cdot n_8 \quad (2)$$

$$\text{Περιορισμός: } f_{\text{OA}} = \frac{\text{C}_3\text{H}_8 \text{ που αντεδρασε}}{\text{C}_3\text{H}_8 \text{ νεας τροφοδοσίας}} = \frac{100 - n_6}{100} = 0.95 \quad (3)$$

$$(3) \Rightarrow n_6 = 5 \text{ mol C}_3\text{H}_8$$

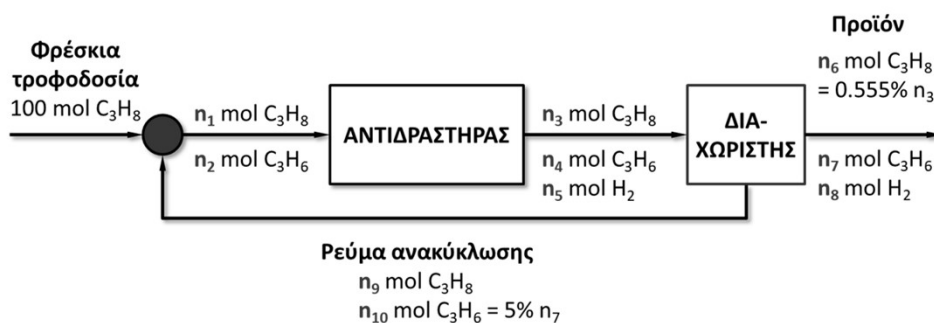
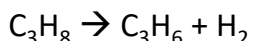
$$(1) \Rightarrow n_7 = 95 \text{ mol C}_3\text{H}_6$$

$$(2) \Rightarrow n_8 = 95 \text{ mol H}_2$$

93

93

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



Στη συνέχεια, πως θα αποφασίσουμε την σειρά επίλυσης

(Ανάμειξη, Αντιδραστήρας, Διαχωριστής);

Hint 1: Ο αντιδραστήρας, όντας «εσωτερικός», και εφόσον δεν υπολογίσαμε κάποια από τις μεταβλητές του, μάλλον θα είναι τελευταίος

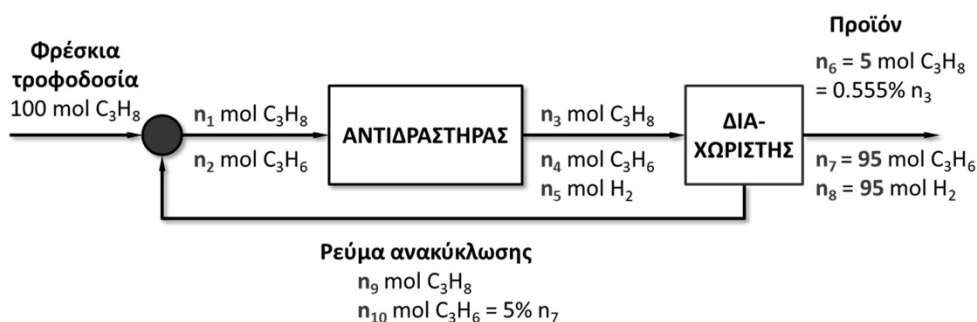
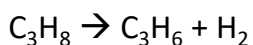
Hint 2: Μετά την επίλυση σε συνολικό σύστημα, πλέον ο διαχωριστής έχει:

5 άγνωστες μεταβλητές ($n_3, n_4, n_5 \mid n_9, n_{10}$), 3 ισοζύγια μάζας ($\text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_3\text{H}_6, \text{H}_2$), και 2 περιορισμούς (n_6/n_3 και n_{10}/n_7) ήτοι B.E. $5-3-2=0$

Σε αντίθεση, οι B.E. του αναμεικτήρα παραμένουν B.E.=2

94

94

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**Διαχωριστής**

$$\text{Ισοζύγιο } \text{C}_3\text{H}_8: n_3 = n_6 + n_9 \Leftrightarrow$$

$$n_3 = 5 + n_9 \quad (4)$$

$$\text{Ισοζύγιο } \text{C}_3\text{H}_6: n_4 = n_7 + n_{10} \Leftrightarrow$$

$$n_4 = 95 + n_{10} \quad (5)$$

$$\text{Ισοζύγιο } \text{H}_2: n_5 = n_8 = 95 \text{ mol } \text{H}_2 \quad (6)$$

$$\text{Περιορισμός 1: } n_6 = 5.55 \times 10^{-3} n_3 \quad (7)$$

$$\text{Περιορισμός 2: } n_{10} = 0.05 n_7 \quad (8)$$

$$(7) \Leftrightarrow n_3 = 900 \text{ mol } \text{C}_3\text{H}_8$$

$$(4) \Leftrightarrow n_9 = 895 \text{ mol } \text{C}_3\text{H}_8$$

$$(8) \Leftrightarrow n_{10} = 4.75 \text{ mol } \text{C}_3\text{H}_6$$

$$(5) \Leftrightarrow n_4 = 99.75 \text{ mol } \text{C}_3\text{H}_6$$

Σημείο ανάμιξης

$$\text{Ισοζύγιο } \text{C}_3\text{H}_8: 100 + n_9 = n_1 \Leftrightarrow$$

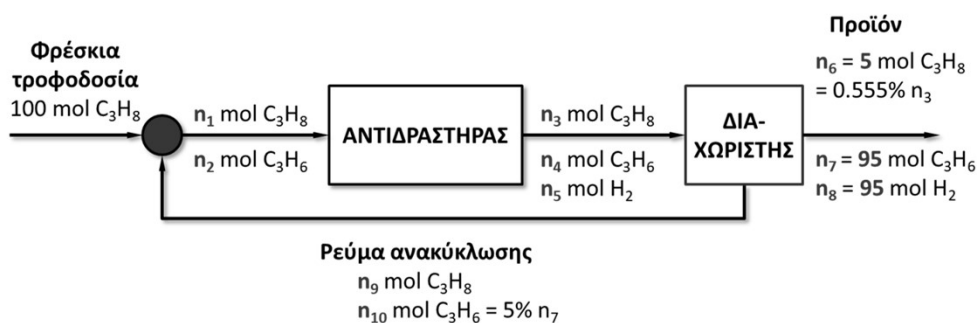
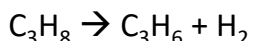
$$n_1 = 995 \text{ mol} \quad (9)$$

$$\text{Ισοζύγιο } \text{C}_3\text{H}_6: 0 + n_{10} = n_2 \Leftrightarrow$$

$$n_2 = 4.75 \text{ mol} \quad (10)$$

95

95

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**«Χαζή» ερώτηση**

Γιατί μετά την επίλυση ισοζυγίων δεν πήγα να επιλύσω τον Αντιδραστήρα; Αφού πλέον θα ήξερα τα n_3 , n_4 , n_5 άρα οι Β.Ε. Θα γίνονταν 0.

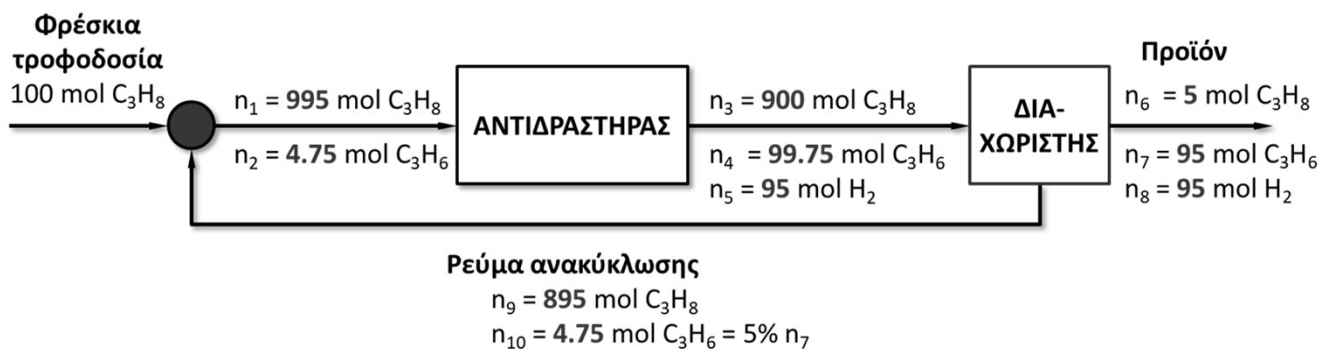
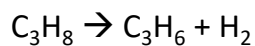
«Χαζή» απάντηση

- Μπορώ! Και μάλιστα θα μπορούσα να το λύσω με τρεις τρόπους: σε ατομική βάση (σχετικά εύκολο), με έκταση της αντίδρασης (αν την προτιμάτε), και σε μοριακή βάση (θέλει περισσότερη προσοχή)

96

96

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



**Μολαρική
σύσταση
προϊόντος**

5 mol C_3H_8

95 mol C_3H_6

95 mol H_2

195 mol μίγμα

$5/195 = 2.6 \%$

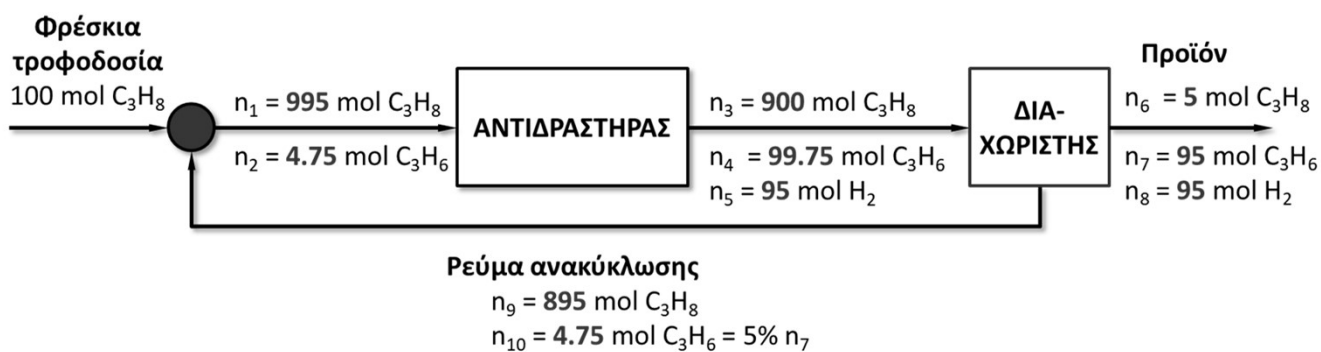
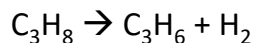
$95/195 = 48.7 \%$

$95/195 = 48.7 \%$

97

97

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



$$\text{Λόγος ανακύκλωσης} = \frac{n_9 + n_{10}}{n_o} = \frac{895 + 4.75}{100} \approx 9.0$$

$$f_{\text{SP}} = \frac{n_1 - n_3}{n_1} = \frac{995 - 900}{995} \approx 0.095 \text{ ή } 9.5\%$$

Τροφή για σκέψη



Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, βλέπετε κάποια σχέση μεταξύ f_{OA} , f_{SP} και λόγου ανακύκλωσης;

98

98

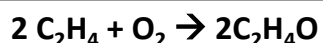
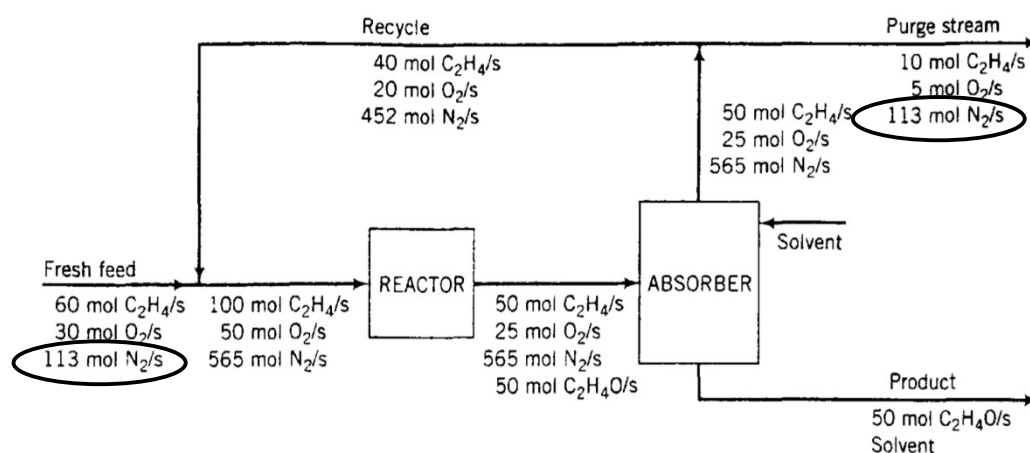
Απόρριψη (καθαρισμός: Purging)

Υπάρχουν προβληματικές καταστάσεις σε διαδικασίες ανακύκλωσης. Ας υποθέσουμε ότι ένα υλικό (ουσία) **εισέρχεται στο σύστημα** με την φρέσκια τροφοδοσία ή παράγεται από μια αντίδραση **αλλά παραμένει εντελώς στο ρεύματα ανακύκλωσης**, αντί να εξέρχεται με το προϊόν της διαδικασίας. **Αν δεν γίνει τίποτα για αυτή την κατάσταση, η ουσία αυτή θα εισέρχεται συνεχώς στην διαδικασία και δεν θα έχει τρόπο να φεύγει, άρα θα συσσωρεύεται**, και επομένως δεν θα είναι εφικτή η επίτευξη μόνιμης κατάστασης.

Για να αποφευχθεί μια τέτοια κατάσταση συσσώρευσης, μέρος του ρεύματος ανακύκλωσης **πρέπει να αποσύρεται ως ρεύμα απόρριψης** (καθαρισμού – purge stream) για να απαλλαγεί η διαδικασία από την εν λόγω ουσία

99

99



Παράδειγμα:

Παραγωγή αιθυλενοξειδίου με ανακύκλωση και καθαρισμό (απόρριψη)

100

100

ΑΠΟΡΡΙΨΗ (ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ: PURGING)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



Η μεθανόλη παράγεται σύμφωνα με την αντίδραση



Η φρέσκια (νέα) τροφοδοσία περιέχει H_2 , CO_2 και 0.400 mol% αδρανή Ι. Τα προϊόντα του αντιδραστήρα περνούν από συμπυκνωτή που απομακρύνει CH_3OH , H_2O , αλλά όχι αντιδρώντα και αδρανή (Ι), τα οποία ανακυκλώνονται στον αντιδραστήρα. Για να αποφευχθεί η συσσώρευση του (Ι), ένα ρεύμα καθαρισμού απομακρύνεται. Δίνεται ότι η σύσταση της τροφοδοσίας του αντιδραστήρα είναι 28.0% mol CO_2 , 70.0 % H_2 και 2.0 % mol (Ι). Η μετατροπή απλής διαδρομής H_2 είναι **60.0%**. Θεωρείστε βάση υπολογισμού **100 mol τροφοδοσία αντιδραστήρα**.

1. Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής.
2. Υπολογίστε τους βαθμούς ελευθερίας.
3. Υπολογίστε τις μοριακές ροές και συστάσεις της νέας τροφοδοσίας, τροφοδοσίας στον αντιδραστήρα, ρεύματος ανακύκλωσης, ρεύματος καθαρισμού για παραγωγή προϊόντος 155 kmol/h CH_3OH .

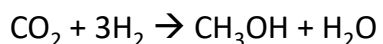
Hint:

- Ένα διάγραμμα ροής διώχνει το άγχος

101

101

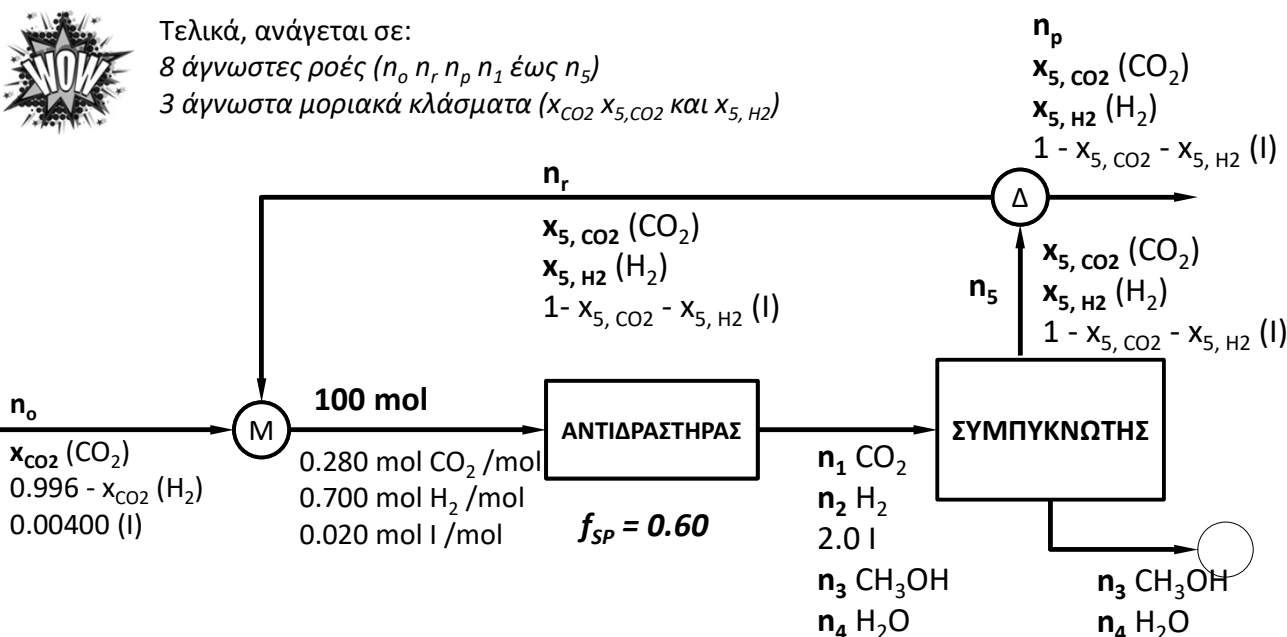
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



Τελικά, ανάγεται σε:

8 άγνωστες ροές (n_o, n_r, n_p, n_1 έως n_5)

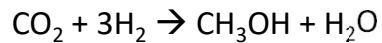
3 άγνωστα μοριακά κλάσματα ($x_{\text{CO}_2}, x_{5,\text{CO}_2}$ και x_{5,H_2})



102

102

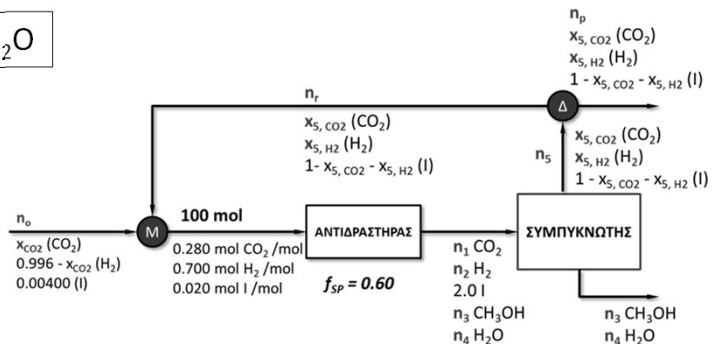
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



Τροφή για σκέψη:



Γιατί σε ορισμένα ρεύματα επιλέγω να διαλέξω ως αγνώστους συστάσεις (γραμμομοριακά κλάσματα, x_i) ενώ σε άλλα ρεύματα ποσότητες (moles, n_i);



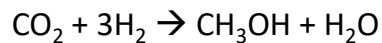
Επί της αρχής δεν υπάρχει πρόβλημα, και λύνεται το διάγραμμα ροής όπως και αν θέλουμε να προχωρήσουμε (ποσότητες ή συστάσεις). **Αλλά (σίγουρα) μας βολεύει σε ρεύματα που υπάρχουν απλοί διαχωριστήρες** (σημ. όχι διεργασίες διαχωρισμού, π.χ. συμπυκνωτές), καθώς στις ροές γύρω από τον διαχωριστήρα αλλάζουν μεν οι συνολικές ποσότητες ανά ρεύμα αλλά η σύσταση παραμένει ίδια.

Για παράδειγμα, πως θα τροποποιούνταν το διάγραμμα ροής αν χρησιμοποιούσαμε ως αγνώστες μεταβλητές μόνο ποσότητες (moles) ή μόνο ροές ρευμάτων και συστάσεις αυτών;

103

103

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13

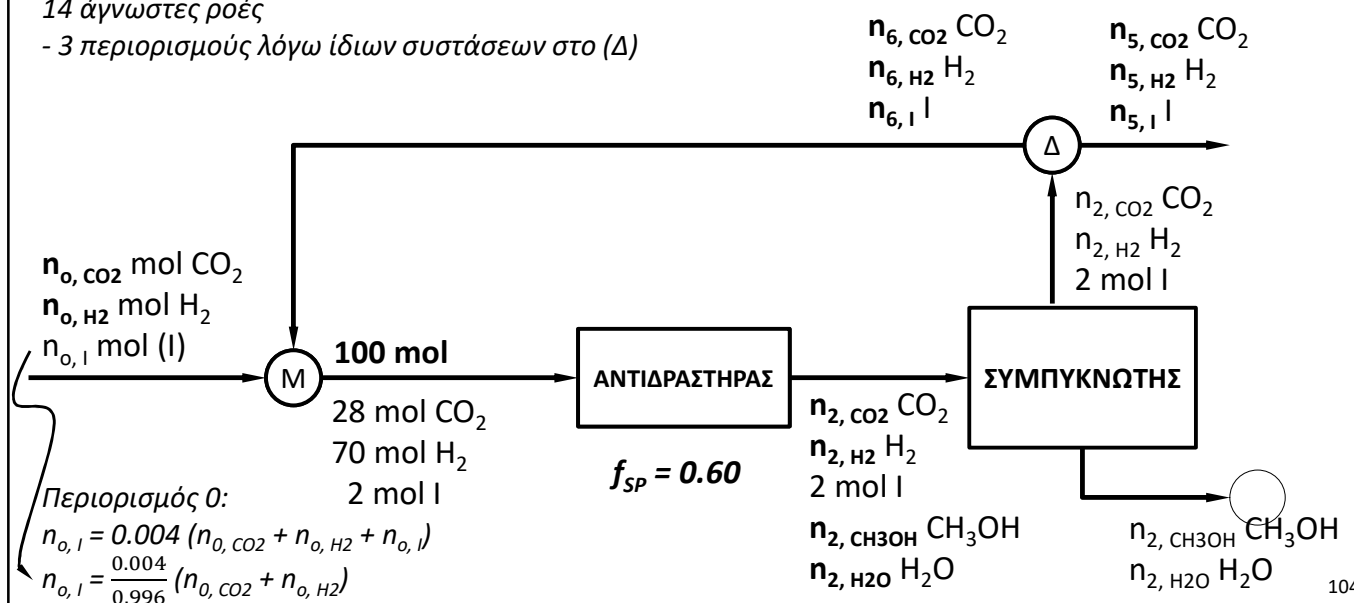


Διάγραμμα ροής μόνο με αγνώστες ποσότητες moles

Τελικά, ανάγεται σε:

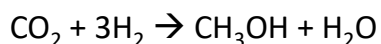
14 αγνώστες ροές

- 3 περιορισμούς λόγω ίδιων συστάσεων στο (Δ)



104

104

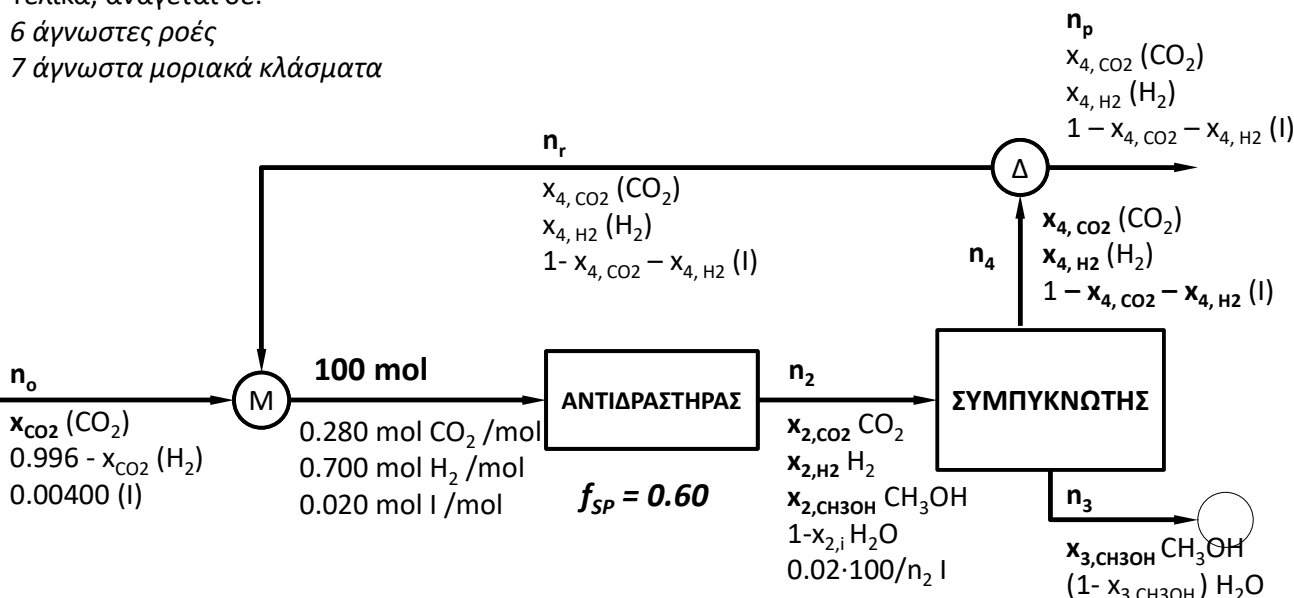
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13

**Διάγραμμα ροής μόνο με
άγνωστες ροές και συστάσεις**

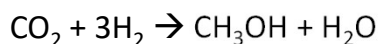
Τελικά, ανάγεται σε:

6 άγνωστες ροές

7 άγνωστα μοριακά κλάσματα

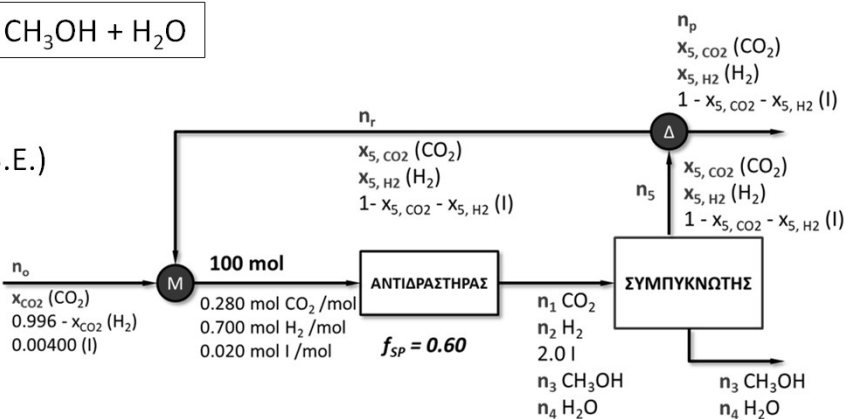


105

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**Βήμα 2:**

Ανάλυση βαθμών ελευθερίας (Β.Ε.)

ΜΟΡΙΑΚΗ ΒΑΣΗ

**1. Συνολικό σύστημα:**

Β.Ε. = Άγνωστοι 7 ($n_o, x_{\text{CO}_2}, n_3, n_4, n_p, x_{5,\text{CO}_2}, x_{5,\text{H}_2}$) + 1 αντίδραση
 – 5 Ισοζύγια μάζας ($\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{CH}_3\text{OH}, \text{H}_2\text{O}, \text{I}$) $\Rightarrow$ **Β.Ε. = 3**

2. Σημείο ανάμιξης:

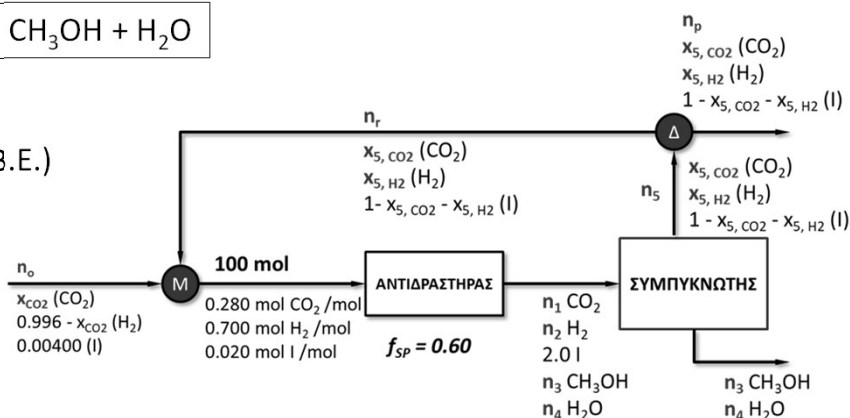
Β.Ε. = Άγνωστοι 5 ($n_o, x_{\text{CO}_2}, n_r, x_{5,\text{CO}_2}, x_{5,\text{H}_2}$)
 – 3 Ισοζύγια μάζας ($\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{I}$) $\Rightarrow$ **Β.Ε. = 2**

106

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**Βήμα 2:**

Ανάλυση βαθμών ελευθερίας (B.E.)

ΜΟΡΙΑΚΗ ΒΑΣΗ

**3. Αντιδραστήρας:**B.E. = Άγνωστοι 4 (n_1, n_2, n_3, n_4) + 1 αντίδραση– 4 (μοριακά) Ισοζύγια μάζας ($\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{CH}_3\text{OH}, \text{H}_2\text{O}$) – 1 περιορισμός (f_{SP}) $\Rightarrow \text{B.E.} = 0$ **4. Συμπυκνωτής:**B.E. = Άγνωστοι 7 ($n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, x_{5, \text{CO}_2}, x_{5, \text{H}_2}$)– 5 (μοριακά) Ισοζύγια μάζας ($\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{I}, \text{CH}_3\text{OH}, \text{H}_2\text{O}$) $\Rightarrow \text{B.E.} = 2$

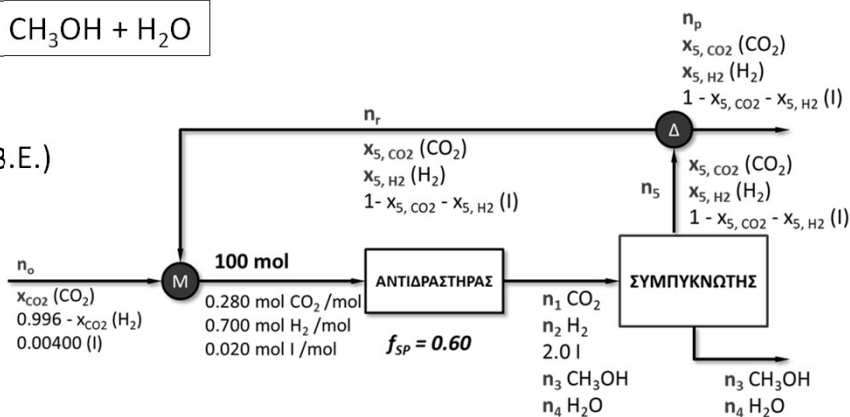
107

107

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**Βήμα 2:**

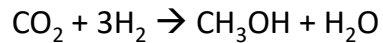
Ανάλυση βαθμών ελευθερίας (B.E.)

ΜΟΡΙΑΚΗ ΒΑΣΗ

**5. Σημείο διαχωρισμού:**B.E. = Άγνωστοι 5 ($n_r, n_p, n_5, x_{5, \text{CO}_2}, x_{5, \text{H}_2}$)– 1 ανεξάρτητο Ισοζύγιο μάζας (είτε συνολικό, είτε CO_2 ή H_2 ανάγονται στο ίδιο) $\Rightarrow \text{B.E.} = 4$

108

108

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13

	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	ΑΝΑΜΕΙΞΗ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ	ΣΥΜΠΥΚΝ.	ΣΗΜΕΙΟ ΔΙΑΧΩΡ.
ΑΓΝΩΣΤΟΙ	7 $n_o, x_{\text{CO}_2}, n_3, n_4,$ $n_p, x_{5, \text{CO}_2}, x_{5, \text{H}_2}$	5 → (3) $n_o, x_{\text{CO}_2}, n_r,$ $x_{5, \text{CO}_2}, x_{5, \text{H}_2}$	4 n_1, n_2, n_3, n_4	7 → (3) $n_1, n_2, n_3, n_4,$ $n_5, x_{5, \text{CO}_2}, x_{5, \text{H}_2}$	5 → (1) $n_5, n_r, n_p,$ $x_{5, \text{CO}_2}, x_{5, \text{H}_2}$
ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ	1		1		
ΙΣ. ΜΑΖΑΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ	5	3 (3)	4	5 (3)	1 (1)
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ			1		
ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	3	2 (0) ✓	0 ✓	2 (0) ✓	4 (0)
ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ		3	1	2	4

109

109

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**Βήμα 3:**

ΕΠΙΛΥΣΗ (με ισοζύγιο)

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = 0$$

Τροφή για σκέψη

Ποιο είναι το περιοριστικό
αντιδρών;

ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ:

$$f_{\text{SP}, \text{H}_2} = 0.60$$

⇒ Αντέδρασε το $f_{\text{SP}} \cdot n_{\text{H}_2 \text{ INPUT ANTIΔΡ.}}$ ήτοι το f_{SP} των 70 mol H_2
δηλ. καταναλώνονται $0.60 \cdot 70 = 42 \text{ mol H}_2$

$$\Rightarrow n_2 = 70 - 42 = 28.0 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Μ.Ισ.Μ. CO}_2 \quad 0.280 \cdot 100 + 0 = n_1 + 42.0 \text{ mol H}_2 \cdot \left| \frac{1 \text{ mol CO}_2}{3 \text{ mol H}_2} \right. \Rightarrow n_1 = 14.0 \text{ mol CO}_2$$

110

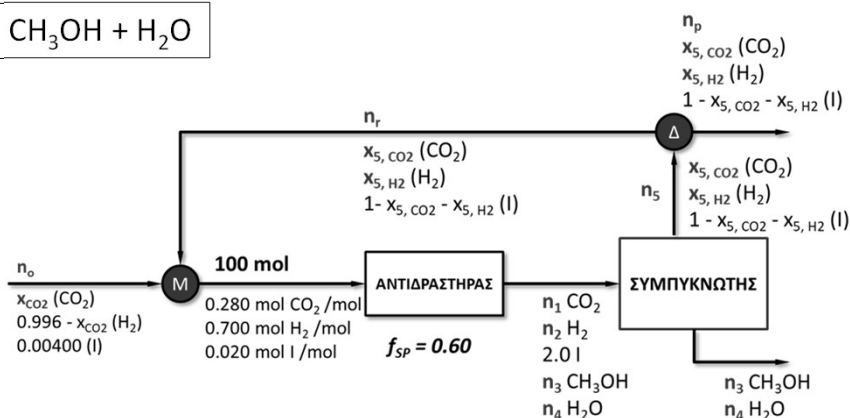
110

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13

**Βήμα 3:**

ΕΠΙΛΥΣΗ (με ισοζύγιο)

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = 0$$

**ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ (συνέχεια):**

$$\text{Μ.Ι.σ.Μ. CH}_3\text{OH} \quad 0 + 42.0 \text{ mol H}_2 \cdot \left| \frac{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}}{3 \text{ mol H}_2} \right| = n_3 + 0 \quad \Rightarrow n_3 = 14.0 \text{ mol CH}_3\text{OH}$$

$$\text{Μ.Ι.σ.Μ. H}_2\text{O} \quad 0 + 42.0 \text{ mol H}_2 \cdot \left| \frac{1 \text{ mol H}_2\text{O}}{3 \text{ mol H}_2} \right| = n_4 + 0 \quad \Rightarrow n_4 = 14.0 \text{ mol H}_2\text{O}$$

111

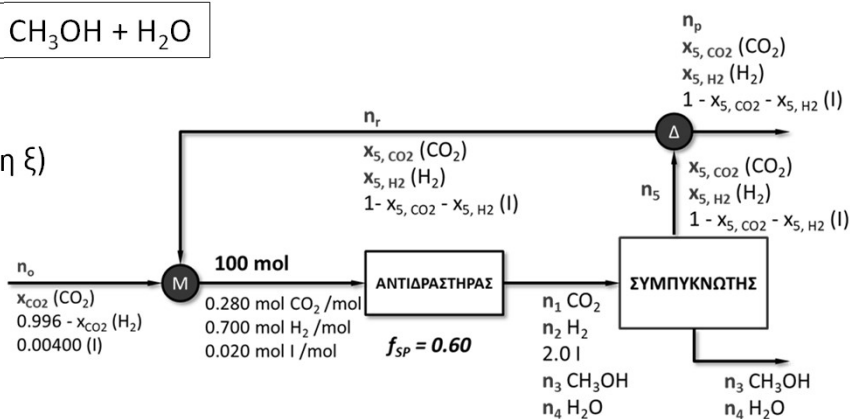
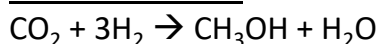
111

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13

**Βήμα 3:**

Εναλλακτική ΕΠΙΛΥΣΗ (με έκταση ξ)

$$n_i = n_{i,0} \pm \nu_i \cdot \xi$$

**ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ:**

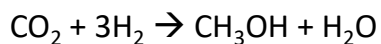
$$\begin{array}{ll} \text{H}_2 & n_2 = 0.700 \cdot 100 - 3 \cdot \xi \\ \text{CO}_2 & n_1 = 0.280 \cdot 100 - 1 \cdot \xi \\ \text{CH}_3\text{OH} & n_3 = 0 + 1 \cdot \xi \\ \text{H}_2\text{O} & n_4 = 0 + 1 \cdot \xi \end{array} \quad \begin{array}{l} f_{SP}=0.60 \rightarrow n_2=28.0 \text{ mol} \\ \Rightarrow \xi = 14 \text{ mol} \\ \Rightarrow n_1 = 14 \text{ mol} \\ \Rightarrow n_3 = 14 \text{ mol} \\ \Rightarrow n_4 = 14 \text{ mol} \end{array}$$

$$\xi = \frac{f_{SP} \cdot n_{i,0}}{\nu_i}$$

112

112

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



Βήμα 3:

ΕΠΙΛΥΣΗ (με ισοζύγια)

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = 0$$

ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ:

Συνολικό ισοζύγιο:

$$n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + 2.0 = n_3 + n_4 + n_5 \Rightarrow n_5 = n_1 + n_2 + 2 = 14 + 28 + 2 \Rightarrow n_5 = 44 \text{ mol}$$

$$\text{Μ.Ισ.Μ. CO}_2 \quad n_1 + 0 = x_{5, \text{CO}_2} \cdot n_5 + 0 \Rightarrow 14 = x_{5, \text{CO}_2} \cdot 44 \Rightarrow x_{5, \text{CO}_2} = 0.3182 \text{ mol CO}_2 / \text{mol}$$

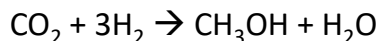
$$\text{Μ.Ισ.Μ. H}_2 \quad n_2 + 0 = x_{5, \text{H}_2} \cdot n_5 + 0 \Rightarrow 28 = x_{5, \text{H}_2} \cdot 44 \Rightarrow x_{5, \text{H}_2} = 0.6364 \text{ mol H}_2 / \text{mol}$$

$$\text{I (αδρανής)} \quad x_I + x_{5, \text{CO}_2} + x_{5, \text{H}_2} = 1 \Rightarrow x_I = 0.0454 \text{ mol I} / \text{mol}$$

113

113

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



Βήμα 3:

ΕΠΙΛΥΣΗ (με ισοζύγια)

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = 0$$

ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ:

Συνολικό ισοζύγιο:

$$n_o + n_r = 100 \quad (1)$$

Ισοζύγιο I (αδρανής):

$$0.00400 \cdot n_o + 0.0454 \cdot n_r = 0.020 \cdot 100 \quad (2)$$

Μ.Ισ.Μ. CO₂

$$x_{\text{CO}_2} \cdot n_o + x_{5, \text{CO}_2} \cdot n_r = 0.280 \cdot 100 \Rightarrow x_{\text{CO}_2} = 0.256 \text{ mol CO}_2 / \text{mol}$$

$$\left. \begin{array}{l} n_o = 61.4 \text{ mol (νέα τροφοδοσία)} \\ n_r = 38.6 \text{ mol (ανακύκλωση)} \end{array} \right\}$$

114

114

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**ΕΥΛΟΓΗ ΑΠΟΡΙΑ**

Θα μπορούσαμε μετά τον συμπυκνωτή να επιλύσουμε το σημείο διαχωρισμού (που είναι και γειτονικό) αντί το σημείο διαχωρισμού;

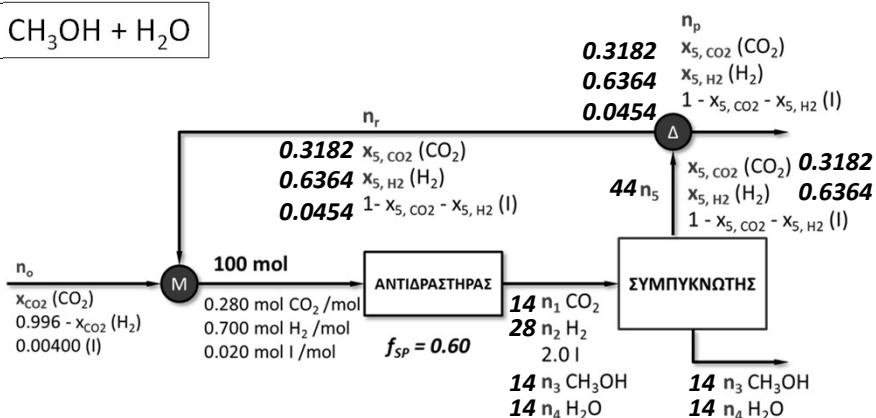
ΣΗΜΕΙΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ:

Συνολικό ισοζύγιο:

$$n_5 = 44 = n_p + n_r$$

2 άγνωστοι (n_p , n_r)

Μοριακά ισοζύγια μάζας δεν έχει νόημα να εφαρμοστούν καθώς μας ξαναδίνουν πάλι την παραπάνω εξίσωση



115

115

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**Βήμα 3:**

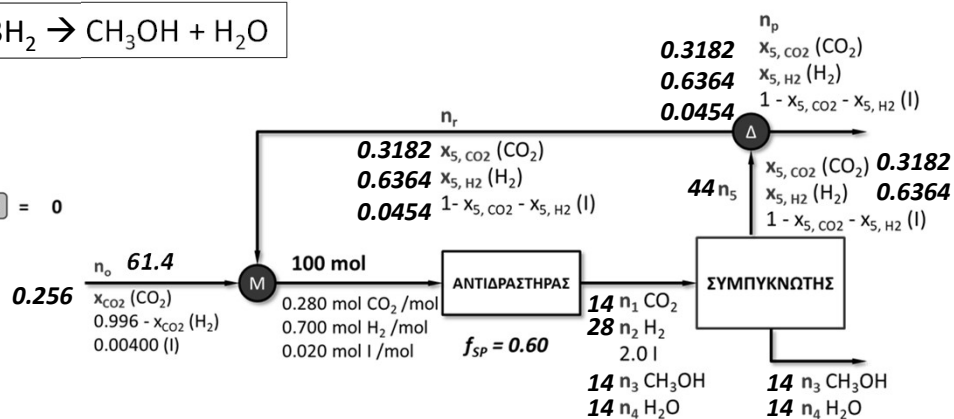
ΕΠΙΛΥΣΗ (με ισοζύγια)

$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ} - \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} = 0$$

ΣΗΜΕΙΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ:

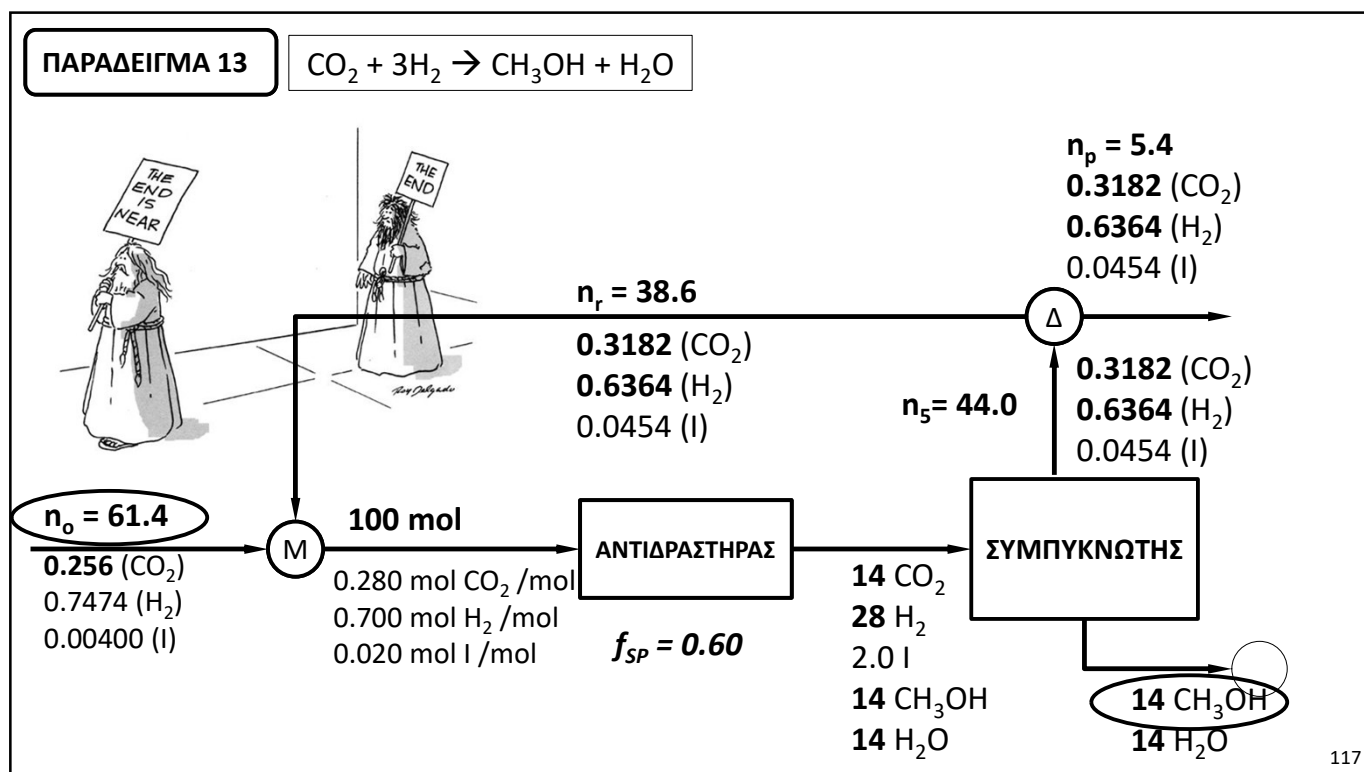
Συνολικό ισοζύγιο:

$$n_5 = n_r + n_p \Rightarrow n_p = 5.4 \text{ mol}$$

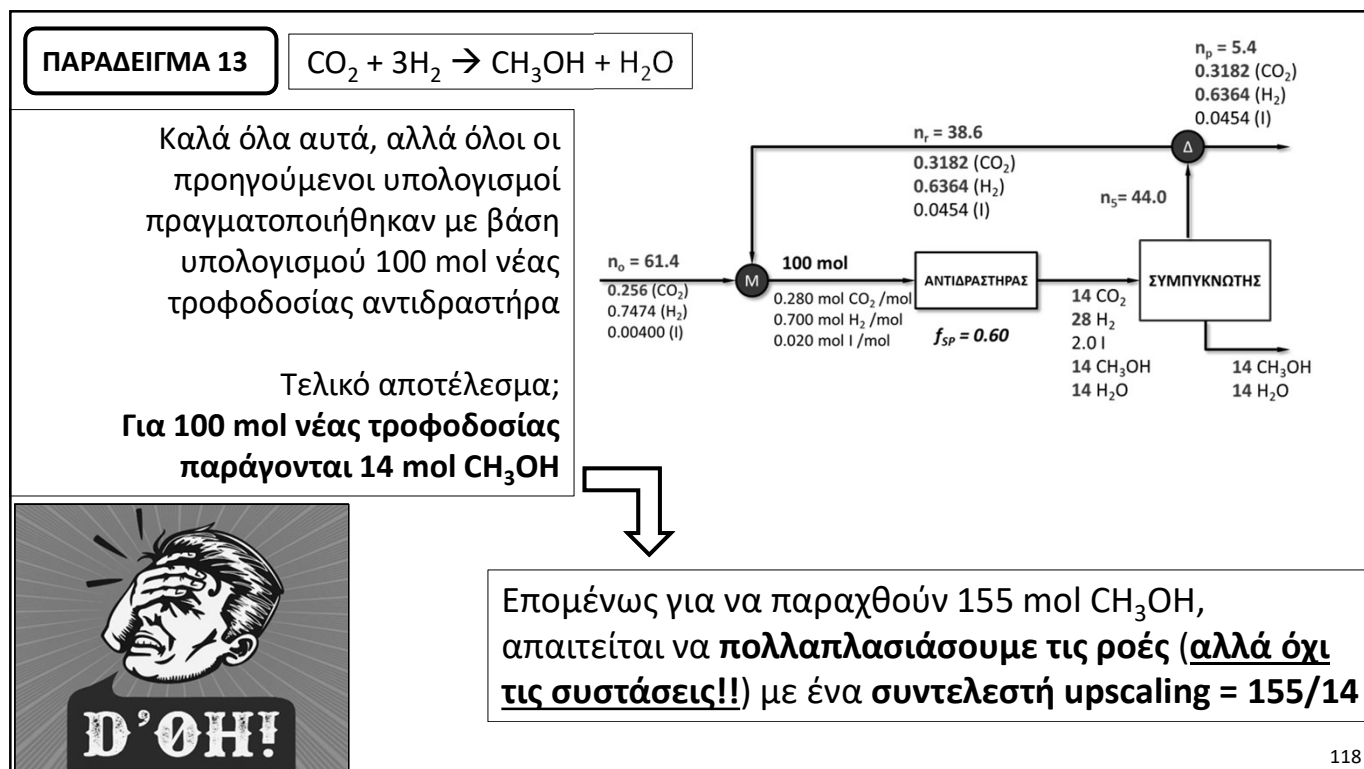


116

116

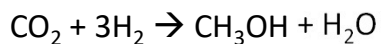


117



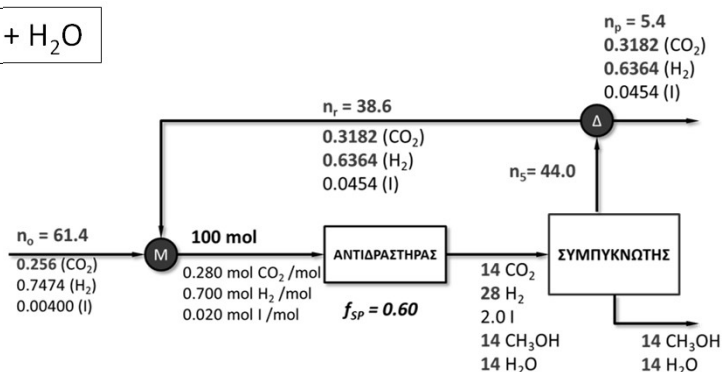
118

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



ΝΕΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ

Βάση 100	Upscale (155/14)
$n_o = 61.4 \text{ mol}$	$n_o = 680 \text{ mol}$
25.6 % CO_2	25.6 % CO_2
74.0 % H_2	74.0 % H_2
0.4 % I	0.4 % I



ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΑΝΤΙΔΡ.

Βάση 100	Upscale (155/14)
100 mol	1107 mol
28.0 % CO_2	28.0 % CO_2
70.0 % H_2	70.0 % H_2
2 % I	2 % I

ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Βάση 100	Upscale (155/14)
$n_r = 38.6 \text{ mol}$	427 mol
31.8 % CO_2	31.8 % CO_2
63.6 % H_2	63.6 % H_2
4.6 % I	4.6 % I

ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ

Βάση 100	Upscale (155/14)
$n_p = 5.4 \text{ mol}$	59.8 mol
31.8 % CO_2	31.8 % CO_2
63.6 % H_2	63.6 % H_2
4.6 % I	4.6 % I

119

119

ΑΠΟΡΡΙΨΗ (ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ: PURGING)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14



Μεθανόλη παράγεται από CO και H_2 σε καταλυτικό αντιδραστήρα σύμφωνα με την αντίδραση: $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$

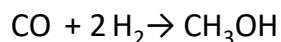
- Η φρέσκια τροφοδοσία περιλαμβάνει 32% CO , 64% H_2 και 4.0% N_2 .
- Το ρεύμα αναμιγνύεται με ένα ρεύμα ανακύκλωσης 5/1 (5 μέρη ανακύκλωσης προς 1 μέρος φρέσκιας τροφοδοσίας) και μπαίνει στον αντιδραστήρα με 13.0% σε N_2 . Το ποσοστό μετατροπής απλού περάσματος είναι μικρό.
- Τα προϊόντα του αντιδραστήρα πηγαίνουν στον συμπυκνωτή όπου εξάγονται δύο ρεύματα. Το ένα υγρό ρεύμα περιλαμβάνει όλη την υγρή μεθανόλη και το άλλο τα CO , H_2 και N_2 .
- Το αέριο προϊόν του συμπυκνωτή χωρίζεται σε 2 ρεύματα, το ένα απομακρύνεται (απορρίπτεται) και το άλλο ανακυκλώνεται.

Με βάση 100 mol φρέσκιας τροφοδοσίας:

- Σχεδιάστε και επιλύστε το διάγραμμα ροής
- Συνολικός βαθμός μετατροπής CO και βαθμός μετατροπής CO στον αντιδραστήρα
- Οφέλη ανακύκλωσης και καθαρισμού

120

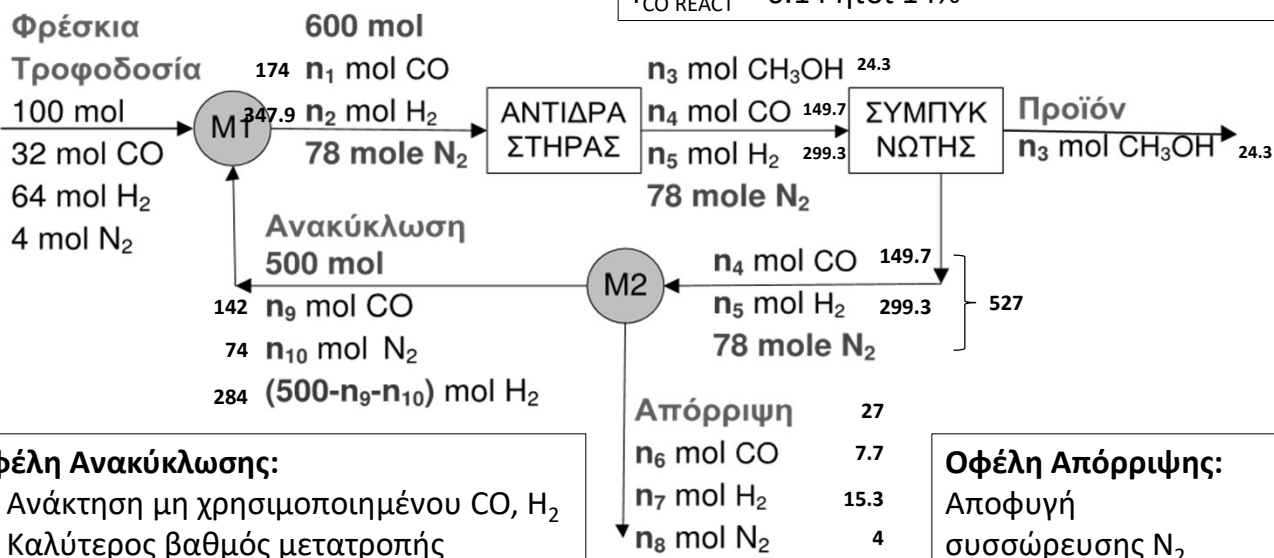
120

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14**Συνολικός βαθμός μετατροπής CO**

$$f_{\text{CO TOT}} = 0.76 \text{ ήτοι } 76\%$$

Βαθμός μετατροπής CO στον αντιδραστήρα

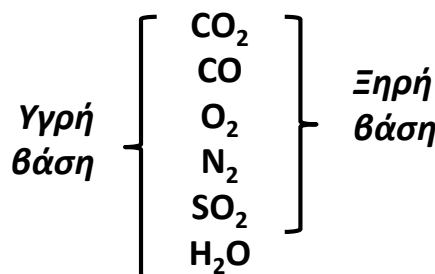
$$f_{\text{CO REACT}} = 0.14 \text{ ήτοι } 14\%$$



121

ΚΑΥΣΗ

- Η ταχεία αντίδραση καυσίμου με οξυγόνο
- Η σημασία της δεν οφείλεται στην αξία των προϊόντων (CO₂, H₂O και πιθανά CO, SO₂), αλλά στην απελευθέρωση σημαντικών ποσών ενέργειας.
- Ανάλυση καυσαερίων:
 - ✓ Υγρή βάση
 - ✓ Ξηρή βάση



122

122

ΚΑΥΣΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Υγρή βάση	5.1% CO ₂	Ξηρή βάση	5.7% CO ₂
	1.8% CO		2.0% CO
	8.4% O ₂		9.4% O ₂
	72.6% N ₂		80.5% N ₂
	2.2% SO ₂		2.4% SO ₂
	9.9% H ₂ O		

$\cdot \frac{1}{1 - 0.099}$

Αν δίνεται η σύσταση των καυσαερίων σε **ξηρή βάση** (οπότε δεν υπάρχουν πληροφορίες για το νερό), πρέπει να προστεθεί η εκροή του νερού (W) και να γίνει ο υπολογισμός της από τα ισοζύγια μάζας

123

123

ΚΑΥΣΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ

Ένα αέριο μείγμα περιέχει 60.0 mole% N₂, 15.0% CO₂ και από 10.0% O₂ και H₂O. Υπολογίστε τη **μολαρική σύσταση σε ξηρή βάση**

Βάση υπολογισμών: 100 mol
καυσαερίων σε υγρή βάση

60.0 mol N ₂	Ξηρή βάση 85 mol	⇒	$\frac{60.0}{85.0} = 0.706 \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol EB}}$ ήτοι 70.6 %
15.0 mol CO ₂			$\frac{15}{85.0} = 0.176 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol EB}}$ ήτοι 17.6 %
10.0 mol O ₂			$\frac{10}{85.0} = 0.118 \frac{\text{mol O}_2}{\text{mol EB}}$ ήτοι 11.8 %
10.0 mol H ₂ O			
95.0 mol υγρή βάση			

124

124

ΚΑΥΣΗ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΙ ΟΡΟΙ**Θεωρητικός αέρας**

Ο αέρας που αντιστοιχεί στο O_2 που απαιτείται στοιχειομετρικά για την πλήρη καύση (αέρας = 21% O_2 , 79% N_2)

Περίσσεια αέρα

Το επιπλέον ποσοστό σε σχέση με τον θεωρητικό αέρα. Μετριέται πάντα σε σχέση με την ποσότητα του καυσίμου που μπορεί να καεί και όχι με αυτήν που πράγματι καίγεται.

$$\text{Περίσσεια αέρα} = \frac{\text{mol αερα τροφοδοσίας} - \text{mol αερα θεωρητικά απαιτούμενου}}{\text{mol αερα θεωρητικά απαιτούμενου}}$$

Μερική καύση (ατελής καύση)

Όταν δεν καίγεται πλήρως το καύσιμο σε CO_2 , αλλά παράγεται και CO . Σε περίπτωση μερικής καύσης (CO), η περίσσεια υπολογίζεται σαν να ήταν πλήρης η καύση (μόνο CO_2).

125

125

ΚΑΥΣΗ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑΣ ΑΕΡΑ**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15**

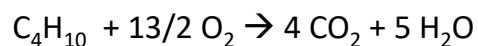
100 mol / h βουτάνιο εισέρχεται σε αντιδραστήρα και καίγεται με αέρα παροχής 5000 mol / h. Υπολογίστε % Περίσσεια αέρα

Hint:

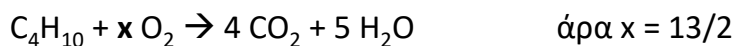
- Χρειαζόμαστε να σκεφτούμε ποια η αντίδραση πλήρους καύσης, ώστε να συγκρίνουμε την θεωρητικά απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου (αέρα)
- Αν μας βοηθάει ένα διάγραμμα ροής (λέμε τώρα), ας το κάνουμε, αλλά μια απλή καύση είναι, ας μην αγχωνόμαστε, έχουμε τόσα άλλα να αγχωθούμε στη ζωή μας.

126

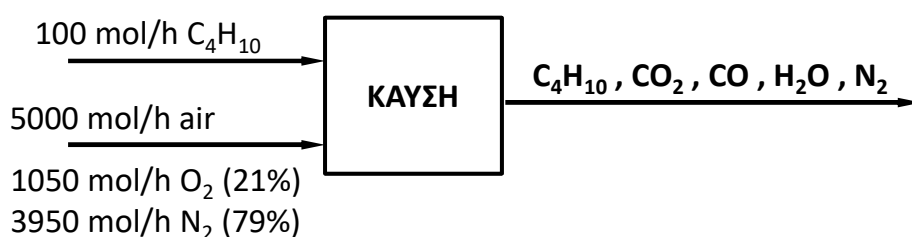
126

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15**Βήμα 1:**

ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΑΥΣΗΣ

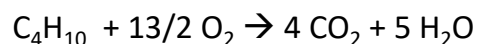
Όταν το βουτάνιο C_4H_{10} καίγεται πλήρως, παράγει CO_2 και υδρατμούς

(Σημ. δεν χρειάζεται να πανικοβαλλόμαστε ή να αποστηθίζουμε εξισώσεις)

Βήμα 2:

127

127

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15**Βήμα 3:**

$$\text{Περίσσεια } \text{O}_2 = \frac{\dot{n}_{feed} - \dot{n}_{\Theta.A.}}{\dot{n}_{\Theta.A.}}$$

$$\dot{n}_{feed} = 0.21 \cdot 5000 = 1050 \text{ mol/h } \text{O}_2$$

$$\dot{n}_{\Theta.A.} = \dot{n}_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot \frac{13/2 \text{ mol } \text{O}_2 \text{ αντιδρ.}}{1 \text{ mol } \text{C}_4\text{H}_{10}} = 100 \cdot 13/2 = 650 \text{ mol/h } \text{O}_2$$

$$\text{Άρα Περίσσεια } \text{O}_2 = \frac{1050 - 650}{650} = 0.616 \text{ ήτοι } \mathbf{61.6\%} \Rightarrow \text{Περίσσεια αέρα } 61.6\%$$

128

128

ΚΑΥΣΗ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑΣ ΑΕΡΑ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 16



Εισάγονται **100 mol/h μεθανίου** που καίγονται με αέρα με σύσταση 21% O₂ και 79% N₂.

1. Να υπολογίσετε τη ροή του **θεωρητικά απαιτούμενου O₂**.
2. Να υπολογίσετε τη ροή θεωρητικά απαιτούμενου O₂, αν η μετατροπή του μεθανίου είναι **75%**.
3. Να υπολογίσετε την ποσότητα του **θεωρητικά απαιτούμενου αέρα**.
4. Αν η περίσσεια αέρα είναι **100%** τότε υπολογίστε την ροή αέρα στην είσοδο του καυστήρα.
5. Αν η τροφοδοσία περιέχει **300 mol/h O₂** τότε να υπολογίσετε την περίσσεια αέρα.

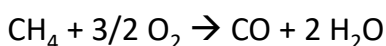
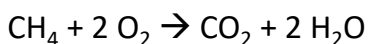
Hint:

- Πρακτικά, είναι παρόμοιο με το προηγούμενο παράδειγμα, απλά ζητάει περισσότερα πράγματα.
- Δεν απαιτείται διάγραμμα ροής, μια απλή καύση είναι.

129

129

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 16



$$\text{Περίσσεια} = \frac{\dot{n}_{\text{feed}} - \dot{n}_{\Theta.A.}}{\dot{n}_{\Theta.A.}}$$

$$1. \dot{n}_{\text{O}_2 \Theta.A.} = \dot{n}_{\text{CH}_4} \cdot \frac{2 \text{ mol O}_2 \text{ αντιδρ.}}{1 \text{ mol CH}_4} = 100 \cdot 2 = 200 \text{ mol/h O}_2$$

$$2. \text{Θεωρητικά απαιτούμενο O}_2 \text{ για μερική μετατροπή CH}_4: \dot{n}_{\text{O}_2 \Theta.A.} = 200 \text{ mol/h O}_2$$

$$3. \text{Θεωρητικά απαιτούμενος αέρας } \dot{n}_{\text{air } \Theta.A.} = \dot{n}_{\text{O}_2 \Theta.A.} \cdot \frac{1 \text{ mol αερας.}}{0.21 \text{ mol O}_2} = 952 \text{ mol/h αέρα}$$

$$4. \text{Περίσσεια} = \frac{\dot{n}_{\text{feed}} - \dot{n}_{\Theta.A.}}{\dot{n}_{\Theta.A.}} = 100\% = 1$$

$$\Rightarrow \dot{n}_{\text{air feed}} = 1 \cdot \dot{n}_{\text{air } \Theta.A.} + \dot{n}_{\Theta.A.} = 2 \cdot \dot{n}_{\Theta.A.} = 1904 \text{ mol/h αέρα}$$

$$5. \text{Αν } \dot{n}_{\text{O}_2 \text{ feed}} = 300 \text{ mol/h τότε:}$$

$$\text{περίσσεια αέρα} = \text{περίσσεια O}_2 = \frac{\dot{n}_{\text{O}_2 \text{ feed}} - \dot{n}_{\text{O}_2 \Theta.A.}}{\dot{n}_{\text{O}_2 \Theta.A.}} = \frac{300 - 200}{200} = 0.50 \text{ ήτοι } 50\%$$

130

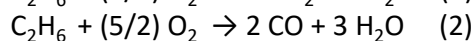
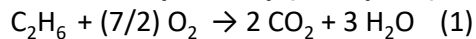
130

ΚΑΥΣΗ ΜΕ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17



Αιθάνιο καίγεται σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



ΔΕΔΟΜΕΝΑ

50% περίσσεια αέρα

Βαθμός μετατροπής αιθανίου: 90%

Το 25% του αιθανίου μετατρέπεται σε CO και το υπόλοιπο σε CO₂.

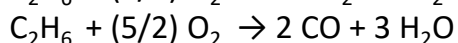
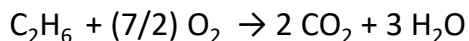
ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ

- Να σχεδιαστεί το διάγραμμα ροής
- Καθορίστε τους βαθμούς ελευθερίας και επιλύστε το σχετικό διάγραμμα ροής
- Μολαρική σύσταση εξόδου (καυσαερίων) σε υγρή βάση
- Μολαρική σύσταση εξόδου (καυσαερίων) σε ξηρή βάση
- Λόγος mol νερού προς mol ξηρών καυσαερίων

131

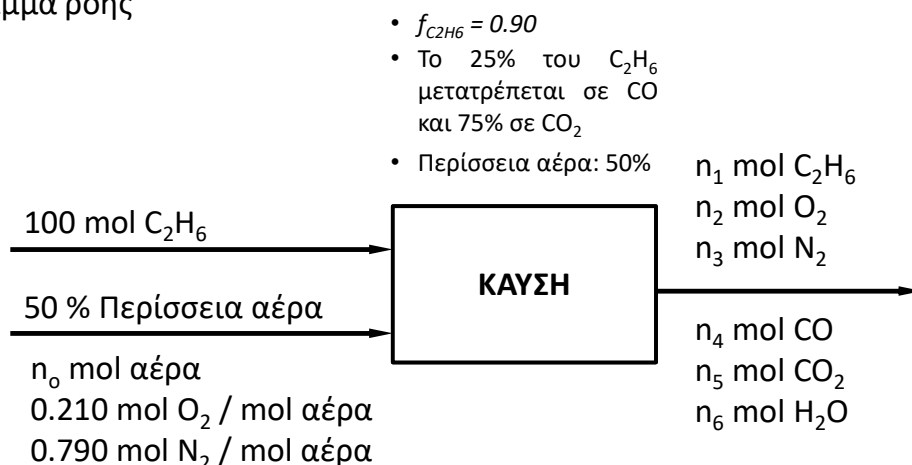
131

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17



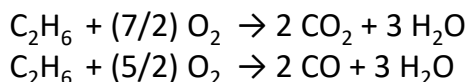
Βήμα 1:

Διάγραμμα ροής



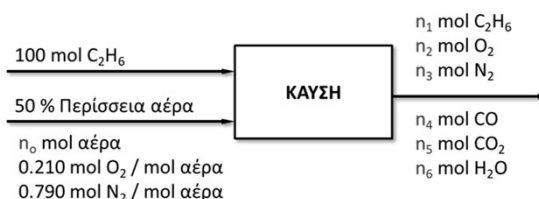
132

132

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17**Βήμα 2:**

Βαθμοί ελευθερίας

- +7 Άγνωστοι ($n_o, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$)
- 3 Ατομικά ισοζύγια μάζας (C, H, O)
- 1 Ατομικό ισοζύγιο μάζας (N δεν αντιδρά)
- 3 περιορισμοί ($f_{\text{C}_2\text{H}_6}$, περίσσεια αέρα, αναλογία CO/CO₂)



Βαθμοί ελευθερίας Β.Ε.

$$= 7 - 3 - 1 - 3 = 0 \text{ άρα επιλύεται}$$

Βήμα 3:

Αξιοποίηση περιορισμού 1:

$$\text{Περίσσεια} = \frac{\dot{n}_{\text{feed}} - \dot{n}_{\text{O}_2, \text{A.}}}{\dot{n}_{\text{O}_2, \text{A.}}}$$

$$50\% \text{ περίσσεια αέρα} = \frac{n_o - n_{\text{air}, \text{O.A.}}}{n_{\text{air}, \text{O.A.}}} = \frac{n_{\text{O}_2 \text{ feed}} - n_{\text{O}_2, \text{O.A.}}}{n_{\text{O}_2, \text{O.A.}}} = 0.50 \quad (3)$$

$$\text{όπου } n_o = n_{\text{O}_2 \text{ feed}} \cdot \frac{1 \text{ mol αέρα}}{0.21 \text{ mol O}_2} \quad (4)$$

$$\text{Όμως } n_{\text{O}_2, \text{O.A.}} = 100 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \cdot \frac{7/2 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6} = 350 \text{ mol}$$

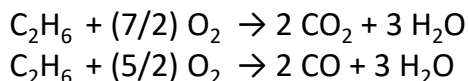
$$(3) \Rightarrow n_{\text{O}_2 \text{ feed}} = 525 \text{ mol}$$

$$(4) \Rightarrow n_o = 2500 \text{ mol}$$

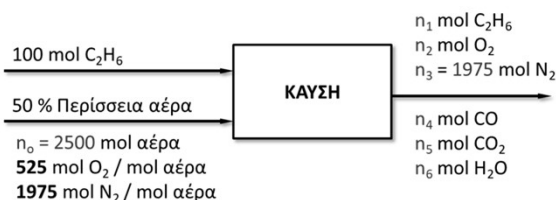
$$n_{\text{N}_2 \text{ feed}} = n_3 = 2500 - 525 = 1975 \text{ mol}$$

133

133

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17**Βήμα 4:**

Αξιοποίηση περιορισμών:



$$\text{Περιορισμός 2: } f_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0.90 = \frac{n_{\text{C}_2\text{H}_6 \text{ feed}} - n_1}{n_{\text{C}_2\text{H}_6 \text{ feed}}} = \frac{100 - n_1}{100} \Rightarrow n_1 = 10 \text{ mol C}_2\text{H}_6$$

Περιορισμός 3: Το 25% του C₂H₆ μετατρέπεται σε CO και 75% σε CO₂

$$\frac{2 \text{ mol CO}}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6}$$

Το C₂H₆ που αντέδρασε ήταν $f_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot 100 = 90 \text{ mol}$ από τα οποία:

$$0.25 \cdot 90 = 22.5 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \text{ αντέδρασαν και παρήγαγαν } 2 \cdot 22.5 \text{ mol CO, ήτοι } n_4 = 45 \text{ mol CO}$$

$$0.75 \cdot 90 = 67.5 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \text{ αντέδρασαν και παρήγαγαν } 2 \cdot 67.5 \text{ mol CO}_2, \text{ ήτοι } n_5 = 135 \text{ mol CO}_2$$

Αντίστοιχα:

$$22.5 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \text{ αντέδρασαν προς CO και παρήγαγαν } 3 \cdot 22.5 \text{ mol H}_2\text{O}$$

$$67.5 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \text{ αντέδρασαν προς CO}_2 \text{ και παρήγαγαν } 3 \cdot 67.5 \text{ mol H}_2\text{O}$$

$$22.5 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \text{ αντέδρασαν προς CO και απαιτούν } 5/2 \cdot 22.5 \text{ mol O}_2$$

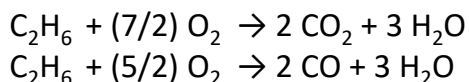
$$67.5 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \text{ αντέδρασαν προς CO}_2 \text{ και απαιτούν } 7/2 \cdot 67.5 \text{ mol O}_2$$

$$n_6 = 270 \text{ mol}$$

$$n_2 = 525 - 292.5 = 232.5 \text{ mol}$$

134

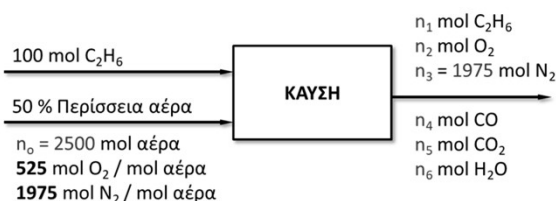
134

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17**ΣΧΟΛΙΟ:**

Μήπως η επίλυση στο προηγούμενο βήμα (περιορισμός 3) ήταν λίγο «μπακάλικη»;

(σημ. αν και γρήγορη και ευκολονόητη)

Ας το δούμε λίγο πιο «συστηματικά»:

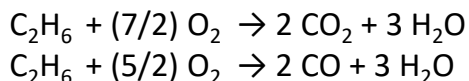


Αυτό το 25% του C_2H_6 που αντέδρασε οδηγεί σε CO μήπως μπορεί να μας δώσει κάποια σχέση μεταξύ των n_4 και n_5 ;

$$\frac{n_4}{n_5} = \frac{\frac{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{CO}}{2 \text{ mol CO}} | \text{mol CO}}{\frac{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{CO}_2}{2 \text{ mol CO}_2} | \text{mol CO}_2} = \frac{1/2 \cdot 0.25 \cdot f_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot 100 \text{ mol C}_2\text{H}_6}{1/2 \cdot 0.75 \cdot f_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot 100 \text{ mol C}_2\text{H}_6} = \frac{1}{3} \quad (5)$$

135

135

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17**ΣΧΟΛΙΟ:**

Μήπως τελικά η επίλυση στο προηγούμενο βήμα (περιορισμός 3) ήταν λίγο «μπακάλικη»;

(σημ. αν και γρήγορη και ευκολονόητη)

Ατομικό ισοζύγιο C

$$100 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \cdot \frac{2 \text{ mol C}}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6} = n_1 \cdot \frac{2 \text{ mol C}}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6} + n_4 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CO}} + n_5 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CO}_2} \quad (6)$$

Ατομικό ισοζύγιο H

$$100 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \cdot \frac{6 \text{ mol H}}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6} = n_1 \cdot \frac{6 \text{ mol H}}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6} + n_6 \cdot \frac{2 \text{ mol H}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} \Rightarrow n_6 = 270 \text{ mol H}_2\text{O}$$

Ατομικό ισοζύγιο O

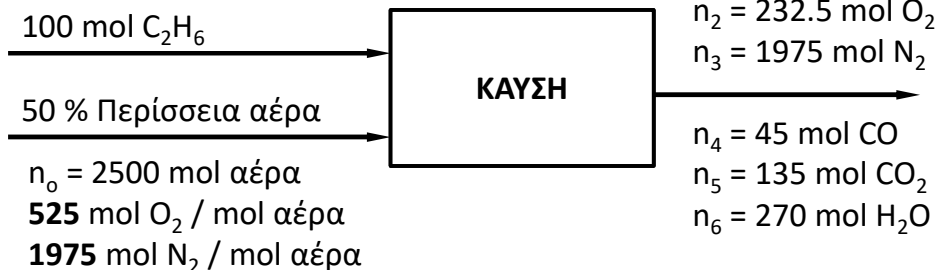
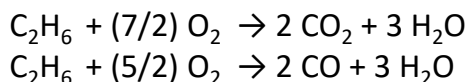
$$525 \text{ mol O}_2 \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol O}_2} = n_2 \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol O}_2} + n_4 \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CO}} + n_5 \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CO}_2} + n_6 \cdot \frac{2 \text{ mol H}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} \quad (7)$$

Επίλυση:

(5), (6) $\Rightarrow n_4 = 45 \text{ mol CO}$ και $n_5 = 135 \text{ mol CO}_2$ και από (7) $n_2 = 232.5 \text{ mol O}_2$

136

136

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17

Σύσταση καυσαερίων	Υγρή βάση		Ξηρή βάση	
	mol	%	mol	%
$n_1 = 10 \text{ mol C}_2\text{H}_6$	10	0.37 %	10	0.42 %
$n_2 = 232.5 \text{ mol O}_2$	232.5	8.72 %		9.70 %
$n_3 = 1975 \text{ mol N}_2$	1975	74.04 %		82.37 %
$n_4 = 45 \text{ mol CO}$	45	1.69 %		1.88 %
$n_5 = 135 \text{ mol CO}_2$	135	5.06 %		5.63 %
$n_6 = 270 \text{ mol H}_2\text{O}$	270	10.12 %		
Υγρή βάση = 2667.5 mol		100.00 %		100.00 %
Ξηρή βάση = 2397.5 mol				

Λόγος mol νερού προς mol ξηρών καυσαερίων = $270 / 2397.5 = 0.113$

137

ΚΑΥΣΗ ΜΕ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑ**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 18**

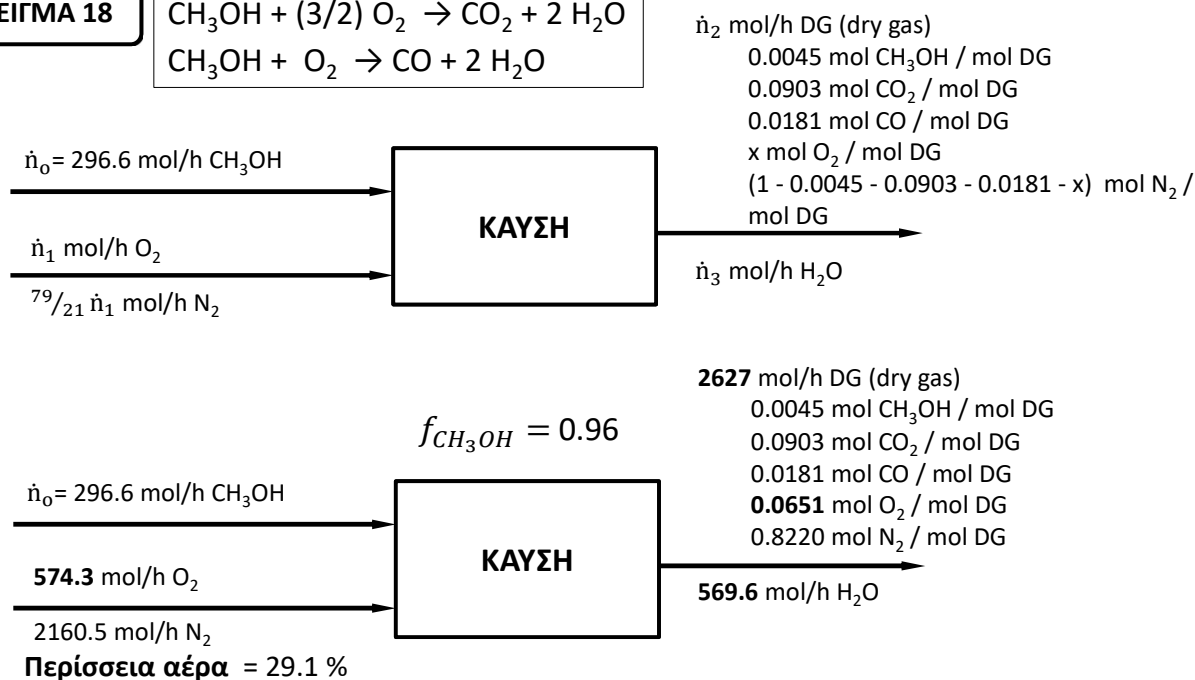
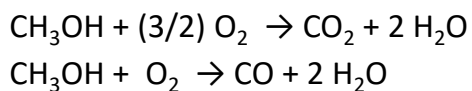
Υγρή μεθανόλη (CH₃OH) πυκνότητας 0.792 kg/L τροφοδοτείται με παροχή 12.0 L/h σε αντιδραστήρα και **καίγεται** με περίσσεια αέρα (σύσταση αέρα: 0.210 mol O₂/mol air, 0.790 mol N₂/mol air). Τα προϊόντα καύσης περιέχουν (μολαρική σύσταση) σε ξηρή βάση CH₃OH 0.45%, CO₂ 9.03% και CO 1.81 %.

ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ

- Καταγράψτε τις αντιδράσεις καύσης της μεθανόλης
- Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής της διεργασίας
- Καθορίστε τους βαθμούς ελευθερίας και επιλύστε το διάγραμμα ροής.
- Υπολογίστε τον βαθμό μετατροπής της μεθανόλης
- Υπολογίστε την περίσσεια του αέρα
- Υπολογίστε το λόγο mol νερού προς mol καυσαερίων

138

138

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 18

139

139

ΓΕΝΙΚΕΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΣ

1. DON'T PANIC! Υπάρχουν και χειρότερα, π.χ. να έχουμε και ισοζύγια ενέργειας!
2. (Ξανα)διαβάστε την εκφώνηση ή (ξανα)δείτε προσεκτικά το διάγραμμα ροής
3. Αναγνωρίστε και καταγράψτε όλους τους περιορισμούς
4. Βάλτε τόσες άγνωστες μεταβλητές όσες απολύτως χρειάζονται. Σαν το αλάτι ένα πράγμα.... Τόσο όσο!
5. Αν μπορείτε να ξεμπερδέψετε με μερικές από αυτές, είτε με άμεση χρήση περιορισμών (π.χ. να εκφράσετε κάποια συναρτήσεί κάποιας άλλης), κάντε το!!!
6. Επιλέξτε μοριακή βάση / ατομική βάση / έκταση αντίδρασης, ό,τι κάνει την ζωή σας πιο εύκολη.
7. Δείτε λίγο τους βαθμούς ελευθερίας. Σας βοηθούν να βρείτε από που ξεκινάτε. Ειδάλλως θα είναι μακρύς ο δρόμος!
8. Και να θυμάστε, το διάγραμμα ροής και ο καθορισμός των κατάλληλων άγνωστων μεταβλητών είναι η μισή δουλειά. Η άλλη μισή είναι η επίλυση!

140

140